
第 11 回
学術・技術報告会
論文集

Collection of Papers of the 11th Conference

2022 年 3 月 17 日(木)

ZOOM ミーティング

公益社団法人 空気調和・衛生工学会 東北支部

Tohoku Branch of The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE)

空気調和・衛生工学会東北支部 第 11 回学術・技術報告会

口頭発表講演者および技術 P R 募集

空気調和・衛生工学会東北支部では第 11 回学術・技術報告会を下記の要領にてオンラインで実施致します。

つきましては、空気調和・給排水衛生・電気・防災等の建築設備、建築環境工学一般に関する研究や調査、物件の企画や設計・施工・試験結果等の技術報告、新製品・新素材や試製品の紹介等の口頭発表および技術 P R を募集致します。若手研究者・技術者を対象とした優秀発表奨励賞の表彰も行います。産官学各界よりたくさんのご応募を賜りますよう、お願い申し上げます。また、どなたでも聴講できますので、ぜひお誘いあわせのうえご参加下さい。

- 主 催 空気調和・衛生工学会東北支部
- 共 催 電気設備学会東北支部、建築設備技術者協会東北支部、日本技術士会東北本部
- 後 援 日本建築学会東北支部、住まいと環境 東北フォーラム、日本空調衛生工事業協会東北支部、東北空調衛生工事業協会、日本設備設計事務所協会連合会北海道・東北ブロック、宮城県空調衛生工事業協会、日本電設工業協会東北支部、日本冷凍空調学会東北地区事業推進委員会、山形県設備技術協議会
- 日 時 2022 年 3 月 17 日（木）8：50～17:30（予定）
- 開催方式 zoom ミーティング※参加のための URL は、口頭発表・技術 PR・聴講の申し込みをされた方に、別途お知らせします。

【口頭発表・技術 P R のエントリー】

- エントリー締切 2022 年 1 月 7 日（金）
※エントリー用紙は必ず今年度（第 11 回）版をご使用下さい。
※エントリーが受理された方には整理番号をお送りします。参加費お振り込みの際に使う番号となります。
※締め切り日までに論文集掲載用原稿（論文・P R 資料）を提出して下さい。
- 応募資格 発表者（連名者）/説明者（紹介者）のうち少なくとも 1 名が本学会または共催・後援学協会の会員（会員種別不問）であること。
- 申込方法 専用ホームページ（以下専用 HP）からエントリー用紙をダウンロードし、メールにて件名に「第 11 回東北支部学術・技術報告会申込み」と明記してお申込み下さい。
専用 HP：<https://sites.google.com/view/tohoku-gakujutsu>
- 参加費用 ・**口頭発表登録料**：一題につき 3,000 円(税込)。論文集掲載用原稿の提出日（2 月 10 日（木））までに、エントリー時に与えられた整理番号と発表者のお名前前で、指定の口座へお振込み下さい（振込み方法は、エントリー用紙および専用 HP に掲載）。入金を確認できない場合、原稿は論文集へ掲載しません。連名者は無料です。なお、複数題をまとめて振り込みする場合はその旨委員会へお知らせ下さい。
・**技術 P R 登録料**：1 件当たり 10,000 円(予定料金・税込)。2 月 4 日(金)頃までに出展者（責任者）宛に請求書を送付致しますので、期日までに指定の口座へお振込み下さい。

【論文集掲載用原稿（論文および技術 P R 資料）の提出】

- 提出方法 論文集掲載用原稿は所定のテンプレートを用いて作成し、偶数頁(最大 6 ページ)、ファイルサイズは 2 ページあたり上限約 1MB とします。期日までに所定のファイル名をつけた PDF ファイルを、組織委員会 tohoku.shase@gmail.com までメールに添付して提出して下さい。ファイル名のつけかたは後日専用 HP にて伝達事項でお知らせします。
- 提出締切 2022 年 2 月 10 日（水）17：00

- 講演方法
 - ・**口頭発表**：一題につき発表 9 分、討論 3 分程度を予定。
 - ・**技術 P R**：説明時間は未定。技術 PR の説明は、コアタイムにおいて参加者全員に向けて行って頂きます。
 - ・**口頭発表・技術 PR 共通**：各自、あらかじめ zoom による音声確認はじめ論文の画面共有等発表できるようにご準備下さい。開催日が近づきましたら、接続確認の機会や、発表方法についてご相談頂く機会を設ける予定です。その他の詳細は、「伝達事項」として専用 HP に掲載致します。
- 採 否 東北支部学術・技術報告会組織委員会に一任願います。
- 掲 載 プログラムが決まりましたら専用 HP および 3 月会告へ掲載します。技術 PR の原稿は、論文集の掲載とは別に一定期間専用 HP に掲載します。

【論文集予約購入】

無償の PDF 版が専用 HP よりダウンロード可能です(掲載開始時期 3 月 3 日頃予定)。また、紙媒体(白黒印刷 1 冊 4,000 円 税込)は予約販売します。後日請求書を同封の上お送りいたします。購入希望者は、論文集予約フォーム <https://forms.gle/qrXAEeKeMNY4crfc6> からお申込み下さい。フォームがご利用になれない場合は、組織委員会 tohoku.shase@gmail.com までメールでお申込み下さい。申込締切 2 月 10 日(木)。

【聴講の申込み】

- 申込締切 2022 年 3 月 11 日(金)
- 申込方法 件名「第 11 回学術・技術報告会聴講希望」とし、①参加者名、②会社名(学校名)、③連絡メールアドレス、④電話番号を明記の上、組織委員会 tohoku.shase@gmail.com までメールにてお申込み下さい。
- 資 格 どなたでも聴講できます。
- 参加費用 無料
- 参加方式 zoom ミーティング ※開催日 2 日くらい前までに URL をお送りします。

【連絡・お問い合わせ先】

空気調和・衛生工学会 東北支部第 11 回学術・技術報告会組織委員会

E-mail tohoku.shase@gmail.com 担当：柴田・岡田

TEL：022-224-7091 FAX：022-797-2486

※@gmail.com からのメールが受け取れるように設定をお願いします。

※伝達事項は、随時東北支部 HP に掲載しますが、ご不明な点は上記までご連絡下さい。

第 11 回学術・技術報告会専用 HP

<https://sites.google.com/view/tohoku-gakujutsu>

伝達事項、各種用紙のダウンロードは専用ページをご利用下さい。

第11回
学術・技術報告会
論文集

Collection of Papers of the 11th Conference

目 次

学術・技術報告〔口頭発表〕	1
学術・技術報告〔技術PR〕	101
空気調和・衛生工学会の概要	109
空気調和・衛生工学会 東北支部 メンバー	110
第1～10回 優秀発表奨励賞受賞者	112

第11回 学術・技術報告会 組織委員会

委員長	許 雷	東北工業大学
委員	須知 秀行	(株)朝日工業社東北支店
	鈴木 道哉	東北学院大学
	小林 仁	仙台高等専門学校
	松隈 達也	(株)大気社東北支店
	牧野 泰弘	ダイダン(株)東北支店
	菅原 正則	宮城教育大学
	後藤 正徳	第一工業(株)東北支店
	小山 琢	三建設備工業(株)東北支店
事務局	岡田 ゆきえ	空気調和・衛生工学会東北支部事務局
事務代行	柴田 まりこ	住まいと環境 東北フォーラム

空気調和・衛生工学会 東北支部 第11回学術・技術報告会 スケジュール

	口頭発表A会場	口頭発表B会場	メモ欄
開会式	9:30～9:35 小林支部長挨拶 司会:許 雷		
学術・技術報告 (口頭発表)	9:45～10:30 【建築環境①】 A1～A5 (A1・A5:欠番) 司会:須知 秀行	9:45～10:45 【環境・シミュレーション】 B1～B4 司会:牧野 泰弘	
	10:45～11:30 【建築環境②】 A6～A8 司会:須知 秀行	11:00～12:15 【BIM・システム設計】 B5～B9 司会:牧野 泰弘	
技術PR (口頭発表)	12:30～13:15 G1～G3 司会:後藤 正徳		
学術・技術報告 (口頭発表)	14:00～15:00 【性能検証・実態調査①】 A9～A12 司会:小林 仁	14:00～14:45 【再生可能エネルギー】 B10～B12 司会:菅原 正則	
	15:15～16:00 【性能検証・実態調査②】 A13～A15 司会:小林 仁	15:00～16:00 【給湯システム】 B13～B16 司会:菅原 正則	
閉会式	16:15～16:30 閉会の辞:田原副支部長 司会:許 雷		

公益社団法人 空気調和・衛生工学会 東北支部

第11回 学術・技術報告会

プログラム

令和4年3月17日(木)

オンライン(Zoomミーティング)

1. 開会式

【開会式】 9:30~9:35	司会: 許 雷	東北工業大学
支部長挨拶	空気調和・衛生工学会 東北支部長 小林 光	口頭発表A会場・B会場 東北大学

2. 学術・技術報告〔口頭発表〕

【建築環境①】 9:45~10:30	司会: 須知 秀行	(株)朝日工業社	掲載 ページ
A-1 (欠番)			-
A-2 複合現実技術を用いたバーチャル教室の可能性	○ 佐藤 大地 宮城教育大学 菅原 正則 宮城教育大学 野澤 令照 宮城教育大学上廣倫理教育アカデミー		1
A-3 新型コロナウイルス感染症拡大による大学生の生活スタイルの変化と健康影響の実態調査	○ 小山 桃花 宮城教育大学 菅原 正則 宮城教育大学 北條 祥子 尚綱学院大学/東北大学 水越 厚史 近畿大学		5
A-4 スマートハウスモデルを用いた家庭科の住居領域における授業の提案	○ 武山 侑加 宮城教育大学 菅原 正則 宮城教育大学		9
A-5 (欠番)			-

【建築環境②】 10:45~11:30	司会: 須知 秀行	(株)朝日工業社	掲載 ページ
A-6 新型コロナウイルス感染症対策下の冬季における仙台市内中学校教室の環境マイクロバイーム	○ 福島 朋実 宮城教育大学 菅原 正則 宮城教育大学 小林 光 東北大学 江刺 美和 宮城教育大学附属中学校		13
A-7 局所日射量の簡易測定法の開発 その1 測定原理	○ 小林 仁 仙台高等専門学校		17
A-8 屋外輝度の簡易測定法の開発 その1 測定原理	○ 小林 仁 仙台高等専門学校		19

【性能検証・実態調査①】 14:00~15:00	司会: 小林 仁	仙台高等専門学校	掲載 ページ
A-9 HEMSが省エネ型ライフスタイルに及ぼす効果に関する事例調査	○ 二瓶 満里愛 秋田県立大学 長谷川 兼一 秋田県立大学 竹内 仁哉 秋田県立大学 松本 真一 秋田県立大学		21
A-10 住宅のダンプネスとシックハウス症状との因果モデルの構築に関する基礎的研究	○ 斎藤 涼平 秋田県立大学 長谷川 兼一 秋田県立大学 松本 真一 秋田県立大学 竹内 仁哉 秋田県立大学		25

A-11	住宅における低湿度環境が健康に及ぼす影響に関する調査研究	○ 田村 成 秋田県立大学 長谷川 兼一 秋田県立大学 松本 真一 秋田県立大学 竹内 仁哉 秋田県立大学	29
A-12	高齢者施設の室内環境改善のための設計・運用に関する調査研究 (その5)入所者や職員の温冷感や住まい方・介護方法の冬期実測調査	○ 野高 文太郎 秋田県立大学 竹内 仁哉 秋田県立大学 長谷川 兼一 秋田県立大学 松本 真一 秋田県立大学	33

【性能検証・実態調査②】 15:15~16:00		司会: 小林 仁 仙台高等専門学校	口頭発表A会場	掲載 ページ
A-13	原子力発電所事故被災地における人工被覆面の ¹³⁷ Cs深度分布調査及び地表面付近での ¹³⁷ Cs沈着状況の検討	○ 大槻 謙太郎 東北大学 小林 光 東北大学 須藤 慎仁 東北大学		37
A-14	東北地方の市町村におけるヒートショック関連死亡率と住宅環境に関する統計分析	○ 西川 竜二 秋田大学		41
A-15	スギ材の異方性を考慮した湿気伝導率の把握とその調湿効果	○ 本間 義規 国立保健医療科学院		45

【環境・シミュレーション】 9:45~10:45		司会: 牧野 泰弘 ダイダグン(株)	口頭発表B会場	掲載 ページ
B-1	空気齢による住宅用換気システムの新鮮空気分配性状の評価実験	○ 金 さやか 秋田県立大学 竹内 仁哉 秋田県立大学 長谷川 兼一 秋田県立大学 松本 真一 秋田県立大学		51
B-2	F病院の病床周りにおけるCFD解析及び実験結果を踏まえた改善	○ 中島 由佳 千葉工業大学 若山 尚之 千葉工業大学 松岡 彩香 千葉工業大学 相原 辰哉 千葉工業大学		55
B-3	室内湿度分布形成に対する湿源の寄与を評価する指標CRI(S) _H の開発とCRI(S) _{DB} を併用した比エンタルピー空間分布評価法の提案	○ 須田 華 東北大学 小林 光 東北大学 森 凱人 東北大学		59
B-4	空気の流れの可視化による健康・快適な教室環境づくりに向けた資料の提案	○ 能登谷 鞠菜 宮城教育大学 菅原 正則 宮城教育大学 石田 泰之 東北大学 小林 光 東北大学 江刺 美和 宮城教育大学附属中学校		63

【BIM・システム設計】 11:00~12:15		司会: 牧野 泰弘 ダイダグン(株)	口頭発表B会場	掲載 ページ
B-5	BIM技術を用いた空調配管システムの設計に関する研究 その1 配管システムの構築及びIFCデータの確認	○ 高橋 翔吾 東北工業大学 高橋 朱利 東北工業大学 許 雷 東北工業大学		67
B-6	BIM技術を用いた空調配管システムの設計に関する研究 その2 配管圧力損失及び管径の計算	○ 高橋 朱利 東北工業大学 高橋 翔吾 東北工業大学 許 雷 東北工業大学		69
B-7	BIM技術を活用した給水システムの設計に関する研究	○ 劉 雨萌 東北工業大学 許 雷 東北工業大学		71
B-8	空調におけるAI活用制御技術の開発	○ 綾目久雄 新日本空調(株) 永坂 茂之 新日本空調(株) 廣島 雅則 新日本空調(株) 福田 伊吹希 公立諏訪東京理科大学 山田 哲靖 公立諏訪東京理科大学		73
B-9	細胞培養加工室の気流最適化手法の考案	○ 遠藤 翔太 三機工業(株) 永田 淳一郎 三機工業(株) 新村 浩一 三機工業(株) 植村 聡 三機工業(株) 中澤 賢 三機工業(株)		77

【再生可能エネルギー】 14:00～14:45		司会: 菅原 正則	宮城教育大学	掲載 ページ
		口頭発表B会場		
B-10	地中熱ヒートポンプ空調システムを備えた住宅の省エネルギー性能に関する研究 (その7) 実験に基づく水平型埋設管まわりの地中温度の分析	○ 加藤 太一	秋田県立大学	81
		竹内 仁哉	秋田県立大学	
		長谷川 兼一	秋田県立大学	
		松本 真一	秋田県立大学	
B-11	特殊地中熱交換器の性能検証と評価(第1報)	○ 進堂 晃央	ミサワ環境技術(株)	85
		田中 雅人	ミサワ環境技術(株)	
		中元 秀則	ミサワ環境技術(株)	
		小野 勇人	ミサワ環境技術(株)	
		赤井 仁志	福島大学	
		新田 信二	(株)タツミ電工	
		勝又 雅浩	(株)ユアテック	
		佐久山 邦宏	(株)ユアテック	
		佐々木 隆二	(株)ユアテック	
		高橋 善浩	(株)ユアテック	
B-12	特殊地中熱交換器の性能検証と評価(第2報)	○ 佐久山 邦宏	(株)ユアテック	87
		勝又 雅浩	(株)ユアテック	
		佐々木 隆二	(株)ユアテック	
		新倉 万結	(株)ユアテック	
		赤井 仁志	福島大学	
		新田 信二	(株)タツミ電工	
		田中 雅人	ミサワ環境技術(株)	
		中元 秀則	ミサワ環境技術(株)	
		進堂 晃央	ミサワ環境技術(株)	
		小野 勇人	ミサワ環境技術(株)	

【給湯システム】 15:00～16:00		司会: 菅原 正則	宮城教育大学	掲載 ページ
		口頭発表B会場		
B-13	VPPリソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用 (その5) 給湯設備改修による効率変化(給湯機COP)	○ 宮川 卓	北海道大学	89
		赤井 仁志	福島大学/北海道大学	
		濱田 靖弘	北海道大学	
		猪俣 海斗	北海道大学	
		天野 雄一郎	四国電力(株)	
		藤井 良平	(株)四国総合研究所	
B-14	VPPリソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用 (その6) 給湯設備改修による効率変化(給湯機デフロスト運転)	○ 猪俣 海斗	北海道大学	91
		赤井 仁志	福島大学 / 北海道大学	
		濱田 靖弘	北海道大学	
		宮川 卓	北海道大学	
		天野 雄一郎	四国電力(株)	
		藤井 良平	(株)四国総合研究所	
B-15	VPPリソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用 (その7) 実測データに基づくシミュレーションモデルの構築とケーススタディ	○ 藤井 良平	(株)四国総合研究所	95
		天野 雄一郎	四国電力(株)	
		赤井 仁志	福島大学 / 北海道大学	
		濱田 靖弘	北海道大学	
		猪俣 海斗	北海道大学	
		宮川 卓	北海道大学	
B-16	VPPリソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用 (その8) VPPを考慮したヒートポンプ給湯システム計画・設計の方向性	○ 赤井 仁志	福島大学 / 北海道大学	99
		濱田 靖弘	北海道大学	
		猪俣 海斗	北海道大学	
		宮川 卓	北海道大学	
		天野 雄一郎	四国電力(株)	
		藤井 良平	(株)四国総合研究所	

3. 技術PR

【技術PR】		司会：後藤 正徳 第一工業(株)		掲載 ページ
12:30~13:15		口頭発表A会場		
G-1	建築現場における排水配管のご提案	浅野 啓志	積水化学工業(株)	101
G-2	高効率な外気処理及び居室内の調湿が可能な、小型デシカント空調機のご紹介	菅野 博徳	クボタ空調(株)	103
G-3	再生可能エネルギー活用やBCP対応力を向上したスマートビルエネルギーマネジメントシステム「I.SEM®」 小型直流総合電源「MSEG®」	茂手木 直也	(株)竹中工務店	107

4. 閉会式

【閉会式】		司会：許 雷 東北工業大学	
16:15~16:30		口頭発表A会場・B会場	
閉会の辞	空気調和・衛生工学会 東北支部 副支部長	田原 誠	(株)竹中工務店

A-2

複合現実技術を用いたバーチャル教室の可能性

○佐藤 大地 (宮城教育大学), 菅原 正則 (宮城教育大学),

野澤 令照 (宮城教育大学上廣倫理教育アカデミー)

Expectations of Virtual Classrooms Built on Mixed Reality Technologies

Sato Taichi (Miyagi University of Education),

Sugawara Masanori (Miyagi University of Education),

Nozawa Yoshiteru (Uehiro Academy for Philosophy and Ethics in Education,

Miyagi University of Education)

キーワード：仮想空間、Mixed Reality、遠隔学習

はじめに

現在、XRと言われる技術は大きく3種類に分けることができる。それぞれVR (Virtual Reality: 仮想現実)、AR (Augmented Reality: 拡張現実)、MR (Mixed Reality: 複合現実) と呼ばれ、現実世界の本質を時空の制約を超えて人間に伝える技術として活用が期待されている。コロナ禍において、人々は不要な外出を避けるようになり、リモートワークという形で仕事でも外に出ないという人も増えてきている。その中で課題と考えられるのが、リモートでのコミュニケーションの難しさである。このような状況で活用できるのがXR技術であると考えられる。人々は仮想世界の中に現実に近いものを見ることができ、あたかも同一の空間を共有しているかのように認識することもできると思われる。

この技術を教育に取り入れる際には、MRが有効と考えられる。仮想空間に教室を再現し、現実世界の教室と重ね合わせれば、そこへ遠隔から参加したメンバーでも仮想空間とはいえ一緒に授業を受け、コミュニケーションをとることが可能と考えられる。本研究では、その可能性を検討し、学習活動の実施を試みたので報告する。

1. バーチャル教室の作成における検討

本研究において「バーチャル教室」は、現実世界の教室を仮想空間上に3DCGモデルとして再現したものの総称と定義する。バーチャル教室を作成する方法には、2通りある。1つはLiDARを用いて現実世界の教室の内側形状をスキャンし、仮想空間アプリ(本研究ではSpatial¹⁾)に取り

込む方法である。LiDARスキャン機能を持つデバイス(タブレットPCなど。本研究ではiPad pro)を使用することで、細部まで本物に近い3DCGモデルを作成できた(図1)。もう1つの方法は、LiDARスキャン機能を持つデバイスが用意できない場合、CADソフト(本研究ではSketchUp)を用いて教室と同じ間取りの直方体を作成し、事前に撮影した教室内部の写真を、その直方体に貼り付けて作成する(図2)。



図1 仮想空間にインポートした3DCGモデルの教室

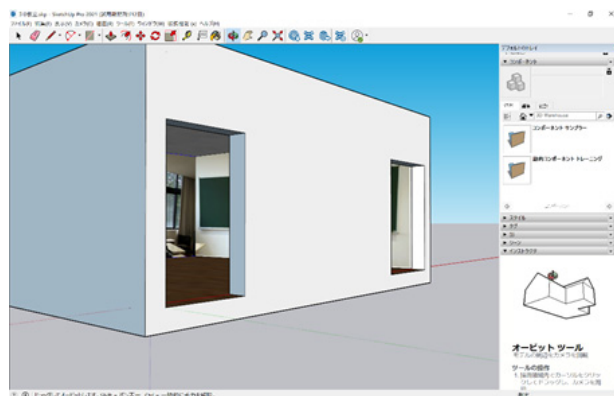


図2 CADで作成した教室

2. バーチャル教室での学習活動の可能性

コロナ禍では、「3密」を回避しながら社会活動を止めないことに意義があるため、教育においても Web 会議ツールなどを用いた遠隔での学習活動が試みられている。しかし本来は、コミュニケーションを密にとることや、実物の教材に触れたり実際に体験したりすることが、学習効果に大きく貢献すると言える。図3は、宮城教育大学において2021年1月21日(木)に行われた授業(受講者10名)の中で、MR技術を用いてバーチャル空間内に複数人が滞在し、対話を試行している様子である。図中の赤円で囲まれている男性アバターは、現実世界では別室にいる(下図の写真には存在していない)。しかし仮想空間内では、あたかも同じ空間内に存在しているように見える。このようにバーチャル教室は、遠隔学習においてもリアリティを持たせるという課題を、部分的には克服できると考えられる。

そこで本研究では、MR技術を用いたバーチャル教室において、「コミュニケーションを密にとる活動」および「教材を自分で動かす・手に取って観察する活動」を提案・実施する。



図3 MR技術(MagicLeap+Spatial)を用いた探究の対話(p4c)の予備的实施風景
(上:仮想空間の様子。下:現実空間の様子。青丸の女性は、仮想空間でのアバター位置が合っていない。)

3. コミュニケーションを密にとる活動

3.1 設定理由と効果

コミュニケーションを密にとる活動として、「探究の対話(p4c)²⁾」を行う。この活動は、設定されたテーマについて参加者全員で問いを立て、出揃った問いから1つを選び、それに対する答えを各自で考えて、適宜示しながら対話をする事によって、物事への思索を深めるものである。対話の際には、糸で手作りされた「コミュニティボール」を使用するのが特徴で、それを持っている人の見に発言権がある。その他にも、セーフティを確保しながら発言する機会が、参加者へ均等に与えられるためのルールが明確である。

このことは、通信音声混線しやすい遠隔学習において、スムーズに対話を進められる点で相性が良い。仮想空間内での「コミュニティボール」制作は、3Dペイント機能を用いれば参加者全員で行えるので、アイスブレイキングも可能である。

3.2 活動手順

- ①PC または MR 機材(本研究では Microsoft HoloLens)を用いて、事前に作成したアカウントで、バーチャル教室のある仮想空間アプリにログインする。
- ②PC と MR 機材を連携し、バーチャル教室を一人称視点および三人称視点で状況確認できるようにしておく。
- ③MR 機材の 3D ペイント機能を用いて、参加者でコミュニティボールを制作する。
- ④バーチャル教室の中で探究の対話(p4c)を行う。この対話は必ずしも結論を出す必要がないので、全員が話し終えた、または、話し合いが一区切りついた場合に、ファシリテータが総括して終了する。

3.3 実施結果

宮城教育大学において2022年1月21日(金)に行われた授業(受講者5名)の中で、各自が所持するPCでバーチャル教室へ入室し、仮想空間を体験してもらった。その後、ファシリテータを中心に、対話のルール確認や活動の流れの確認をし、コミュニティボールの作成を行った。想定したとおり、現実世界では糸を使って作成するものに近いものが作成できた(図4~5)。



図4 現実のコミュニティボール

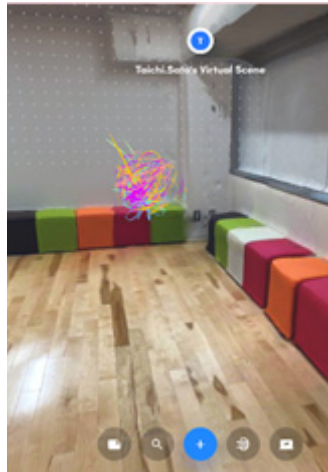


図5 バーチャル教室内で制作したコミュニティボール(図中央の線のかたまり)



図6 「居心地の良い室内環境」の一例(三人称視点)



図7 「居心地の良い室内環境」の一例(一人称視点)

4. 教材を自分で動かす・手に取って観察する活動

4.1 設定理由と効果

教材を自分で動かす・手に取って観察する活動として、「イマジナリー・アーキテクチャー」を行う。これは、堀ら³⁾の学習プログラムに着想を得たもので、そのメリットは、堀らが1辺10数cmの箱模型で実施したのに対して、仮想空間内とはいえ実寸大で再現できることである。遠隔学習として実施を想定した時に、住居学の考え方に基づいた活動として、教材となる家具などの3DCGモデルを自分で動かし、観察できることは、空間づくりの新たな体験になると期待される。

4.2 活動手順

- ①PCまたはMR機材を用いて、事前に作成したアカウントで仮想空間アプリにログインし、参加者はあらかじめ3DCGモデルが用意されたルームに入室する。
- ②主催者はPCとMR機材を連携し、バーチャル教室を一人称視点および三人称視点で状況確認できるようにしておく。
- ③Web会議ツールで指示や観察をできるようにしておく。
- ④主催者のルームの映像をWeb会議ツールへ転送し、PCでの操作方法や3DCGモデルのインポートの仕方などを練習する。
- ⑤参加者は、各ルームで自分自身が「居心地の良い室内環境」と感じる部屋を作成する。
- ⑥部屋が作成されたら、主催者がMR機材で各ルームを観察し、参加者も転送された映像で一人

称視点を体験する。

- ⑦参加者それぞれが作成した部屋に関して、テーマや意識したことを説明し、全員で共有する。

4.3 実施結果

図6～7は、2022年1月23日(日)に、日本建築学会東北支部主催「親子の都市と建築講座自分だけのへやづくりを仮想空間でかなえますか?—イマジナリー・アーキテクチャーII—」において作成された、「居心地の良い室内環境」の一例である。参加者は小学5～6年生3名の男女であった。

各家具の色を変えながら自分なりにそれらを配置し、自分が寛げる空間づくりをしていることが観察された。また、使用した仮想空間アプリ内に入っていた3DCGモデル(ラジカセ、ケーキ、猫など)をうまく取り入れながら、個性ある部屋づくりをすることができていた。他の参加者の部屋を観察した際に、自分とは異なる点に「居心地の良さ」を見出し、異なるテーマをもって作成したことに気づく、良い機会になっていた。

参加者アンケート(表1)にも「いろいろなア

アイテムがあって楽しく活動に取り組めた」「新しい発見があった」との記載があったことから、目的に沿った活動ができていたと言える。

PC 画面では三人称視点で、空間をやや俯瞰的に見渡すので、家具などを配置する活動には、この視点が適していると言える。しかし、MR 機材を用いると一人称視点になり、空間に没入し、実寸大でそれを体験することができるので、作成された空間を、現実味をもって感じられる迫力がある。今回はオンライン開催ということもあり、参加者には PC 画面越しに一人称視点を体験してもらうことになったが、そもそも VR や MR の機材は、その没入感が成長過程にある脳に与える悪影響が予想されるため、18 歳未満の使用は推奨され

ていない。したがって、体験内容としては妥当であったと考える。

まとめ

本研究では、MR 技術とバーチャル空間を用いることで、使用者同士の場所によらず同じ空間を共有しながら活動してもらえるようなバーチャル教室の提案およびMR 機材によって取り入れられる、教材・学習プログラムの提案を行った。バーチャル空間に教室を再現することにより、遠隔から参加している人に対しても学校で活動をしていると感じてもらえるような、効果として同等の価値のあるものを作成できたのではないかと考える。

その中で行う「コミュニケーションを密にとる活動」と「教材を自分で動かす・手に取って観察する活動」の両方を学習プログラムの一案として提案・実施できた。活動の自由度という点に関しては、どちらもある程度ルールやあらかじめ作られた 3DCG モデルを使用する必要があるので、準備段階でより自由度を高められるような教材づくりを行うことが重要である。今後、プライバシーなどの問題を考慮しながらも、Web 会議ツールよりもリアリティのある活動を提案できると期待される。

参考文献

- 1) <https://spatial.io/>(参照日 2022 年1月 23 日)
- 2) p4c みやぎ・出版企画委員会:子どもたちの未来を拓く 探究の対話「p4c」:東京書籍(2017-12)
- 3) 堀早紀子・菅原正則:室内模型を用いた「居心地の良い室内環境」を学習プログラムの提案:空気調和・衛生工学会東北支部第 10 回学術・技術報告会論文集(2021-3)、pp. 21-24

表 1 参加者アンケート

アンケート項目	回答 (回答数)
① 講座の内容について感じたことを選択してください。	大変満足 (3)
② よかった点、わるかった点を教えてください。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 分かりやすくてよかった ・ やりやすくてよかった ・ いろいろなアイテムを準備してくれていたのととても楽しく取り組めた。 ・ たくさんフォローや声掛けをしてもらえたので思うような部屋を作ることができた。 ・ 使い方に慣れるのに時間がかかった。 ・ 事前に (バーチャル空間提供アプリ内での操作の) 予習ができるような資料があれば、もう少しスムーズに進められた。
③ 今後、今回のテーマのような活動があれば参加してみたいと思いますか?	参加する (3)
④ そのほかに、ご意見・ご感想をおしえて下さい。	<ul style="list-style-type: none"> ・ すごく大変だったが楽しかった。 ・ ずっと当日を楽しみにしていたので、とても楽しかった。 ・ あまりパソコンに慣れていないので思うようにアイテムを動かさずたくさん手伝ってもらったが、もっとバーチャル空間提供アプリを使ってみたいと思った。 ・ 自分の作ったものだけでなく、他の人の作品を見るのも新しい発見があった。

A-3

新型コロナウイルス感染症拡大による大学生の生活スタイルの変化と健康影響の実態調査

○小山桃花 (宮城教育大学), 菅原正則 (宮城教育大学),
北條祥子 (尚絅学院大学, 東北大学), 水越厚史 (近畿大学)

Survey on University Students' Lifestyle Changes and Health Conditions due to the spread of COVID-19

Koyama Momoka (Miyagi University of Education),
Sugawara Masanori (Miyagi University of Education),
Hojo Sachiko (Shokei Gakuin University, Tohoku University),
Mizukoshi Atsushi (Kindai University)

キーワード：環境過敏症, 化学物質過敏症, 電磁過敏症, COVID-19

はじめに

近年, 先進国を中心に環境過敏症 (化学物質過敏症, 電磁過敏症など) の問題が取り上げられるようになった。殊に, With コロナ時代は, 化学物質 (消毒剤等) や電磁曝露 (オンライン作業など) の機会が増えるために, 患者が急増する可能性が指摘されている¹⁾。

環境過敏症とは, 大多数の人が自覚しないような身の周りの多種多様な微量化学物質 (喫煙, 受動喫煙, 殺虫剤・防虫剤, 芳香剤, 柔軟剤など) 曝露や微弱な電磁場 (パソコン, 携帯電話など) により, 頭痛, 睡眠障害, 倦怠感, 疲労感など, 多臓器にまたがり多彩な症状が現れる健康障害の総称で, アレルギー疾患と密接な関係があることが知られている。本報では, 大学生を対象として, “生活環境と健康調査票 (QEESI と EHS 問診票の合体版)²⁾” を用いて, コロナ禍前後における環境過敏度に関する実態調査を行ったので報告する。

(2) 調査対象：宮城教育大学の学生 248 名 (男 96 名, 女 152 名, 平均年齢 19±1 歳)

(3) 調査に用いた調査票：北條ら²⁾の「生活環境と健康に関する調査票(表-1 参照)」及び小山³⁾の「コロナ前後の生活スタイルの変化調査票(表-2 参照)」

(4) 回答方法：Google Form

(5) 質問形式：各質問項目において, コロナ前(2020年2月以前)とコロナ後(2021年11月;調査時点)の二種類を回答。

表-1 本調査質問項目一覧表

No.	題目	セクション	項目別タイトル
0	基本情報	0-1	解析に必要な情報
		0-1	慢性疾患 (現在治療中/過去に治療)
1	生活スタイルの変化	1	生活スタイルに関する質問
2	QEESI簡略版	2	代表的な化学物質過敏反応 (QEESI簡略版)
3	EHS簡略版	3	代表的な電磁過敏反応 (EHS簡略版)
4	QEESI	4.1	Q1 呼吸器から取り込む化学物質過敏反応
		4.2	Q2 呼吸器以外から取り込む化学物質過敏反応 (その他の不耐性)
		4.3	Q3 症状
		4.4	Q4 日常的に曝露する化学物質の有無
		4.5	Q5 日常障害 (日常生活の支障)
5	EHS問診票	5.1	電磁過敏反応に関する質問 (EHS問診票)
		5.2	一般的健康状態に関する質問

表-2 コロナ前後の生活スタイルの変化調査票

生活スタイルに関する質問		
1. 外出頻度	6. パソコン使用時間	11. 平均睡眠時間
2. 家族との対面頻度	7. スマホ使用時間	12. 睡眠障害の頻度
3. 家族と連絡する頻度	8. 睡眠直前一時間のスマホ使用時間	13. 消毒剤の使用頻度
4. 家族以外の人と連絡する頻度	9. 睡眠時のスマホの置き場所	14. 手指消毒剤のタイプ
5. オンライン講義時間	10. 睡眠時のスマホと体との距離	15. 衣類一着 (シャツ・ブラウス類など) の購入金額
		16. よく購入する衣類の素材
		17. 購入時に特に避ける衣類の素材
		18. 衣類の洗濯時に柔軟剤を使用頻度
		19. 香料入りの化粧品の使用頻度
		20. 運動の頻度
		21. アルコール飲料の摂取の頻度
		22. カフェイン入り飲料の摂取頻度
		23. 喫煙の頻度
		24. 受動喫煙する頻度
		25. 精神的なストレスによる身体症状の悪化

1. 調査方法

1.1 予備調査

(1) 調査期間：2020年6月-2020年11月

(2) 調査対象：宮城教育大学の学生 252名 (男 91名, 女 161名, 平均年齢 19±1歳)

(3) 調査に用いた調査票：北條ら²⁾の「生活環境と健康に関する調査票」

(4) 回答方法：Google Form

1.2 本調査

(1) 調査期間：2021年11月

2. QEESI Q3 (症状) 合計と EHS 問診票症状 57 項目合計の相関関係

予備調査の主な結果については既報⁴⁾に譲るが, ここでは調査データを用いて, 項目数の多い EHS 問診票の簡略化を検討する。図-1 に示すように, QEESI

Q3(症状)合計と EHS 問診票の症状 57 項目合計との間には、相関関係($R=0.716$)が見られ、水準 0.1%で有意であった。また、回帰式 $y=1.21x+5.68$ (x :QEESI Q3 合計得点, y : EHS 問診票症状 57 項目合計)が得られた。そこで、本調査における EHS 基準値は、Q3 合計得点から回帰式を用いて推定することとした。

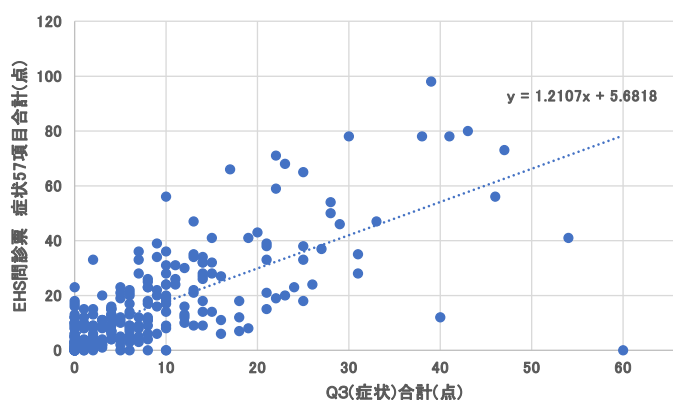


図-1 Q3 合計と症状 57 項目の相関関係

3. 結果と考察

本章におけるコロナ禍前後の有意差検定には、Man-Whitney の U 検定を用いた (p は有意水準)。

3.1 生活スタイルの変化

1) 外出頻度

宮城教育大学学生(以下、宮教生)の外出頻度(コロナ前/コロナ後)は、週 1 日以下(12.9%/14.9%)、週 2~3 日(36.3%/50.8%)、週に 4 日以上(50.8%/34.3%)であった。すなわち、コロナ後は、週 1 日、週 2~3 日外出している人の割合が増加し、逆に、週 4 日以上外出している人の割合が減少しており、コロナ前後で、外出頻度は有意 ($p<0.01$) に減っていた。外出頻度が減ると運動不足になりやすいので、できるだけ定期的に運動する必要がある。

2) 家族と会う頻度

家族と会う頻度は、週 1 日以下(10.1%/35.1%)、週 2~3 日(5.6%/4.8%)、週 4 日以上(84.3%/60.1%)であった。すなわち、コロナ後には、家族と会う頻度が有意 ($p<0.001$) に減っていた。家族と会うことは精神衛生上大事なことだと考えるので、電話などで頻繁に連絡を取る必要がある。

3) 一日のオンライン活動時間

コロナ前後のオンライン活動時間は、約 1 時間またはそれ以下(87.9%/1.2%)が大幅に減少しているのに対して、約 2 時間(5.6%/10.9%)、約 3 時間

(2.8%/34.3%)であり、約 4 時間(1.6%/27.4%)、約 5 時間(1.2%/15.3%) などでは有意 ($p<0.001$) に増えていた。本調査の対象者は、大学 1~2 年生が多く、コロナ前は高校生である。したがってオンライン講義に関しては、コロナの影響よりも、高校生(コロナ前)と大学生(コロナ後)の差が影響を及ぼしていると推察できる。

4) 一日のパソコン使用時間

コロナ前後の一日のパソコンの使用時間は、約 1 時間またはそれ以下(75.8%/1.2%)、約 2 時間(12.9%/7.7%)、約 3 時間(7.3%/25.8%)、約 4 時間(2.4%/24.6%)、約 5 時間(0.8%/19.8%)などであり、コロナ後は有意 ($p<0.001$) に増えていた。しかし、「3) 一日のオンライン活動時間」と同様に、コロナの影響よりも、高校生(コロナ前)と大学生(コロナ後)の差が影響している可能性が高い。

5) 一日のスマホ使用時間

コロナ前後の一日のスマホの使用時間は、約 1 時間またはそれ以下が(5.6%/0.0%)、約 2 時間(16.1%/8.1%)、約 3 時間(23.4%/14.1%)、約 4 時間(19.8%/25.0%)、約 5 時間(15.3%/14.5%)などであった。すなわち、コロナ前後で有意差 ($p<0.001$) が認められた。

6) 睡眠 1 時間前のスマホ使用時間

コロナ前後の睡眠 1 時間前のスマホ使用時間は、15 分以内(19.8%/14.1%)、1 時間以内(50.8%/49.6%)、1 時間以上(29.4%/36.3%)、であった。すなわち、コロナ前後で有意差 ($p<0.05$) が認められた。加藤⁵⁾によれば、睡眠直前のスマホの使用が睡眠障害などの健康影響を及ぼすことが報告されているので、睡眠直前にはスマホの使用を控えるように、注意する必要がある。

7) 睡眠時のスマホと体との距離

コロナ前後の睡眠時のスマホと体との距離は、10cm 以内(24.0%/25.3%)、30cm 以内(40.4%/44.0%)、約 50cm 以内(23.1%/22.7%)、約 1m(7.6%/7.1%)、2m 以上(4.9%/3.1%)であり、コロナ前後で有意差はなかった。しかし、睡眠時に 30 cm 以内に置いている学生が 70%以上存在することが明らかになった。電磁曝露は距離の二乗に反比例するため、スマホはできるだけ体から話して使う方が健康影響は少ない。したがって、睡眠時にはスマホの電源を切る、スマホを使用する場合は体からの距離を離す、ということに注意を払う必要がある。

8) 睡眠障害の頻度

一週間当たりの睡眠障害は、週 1 日以下 (78.6%/68.1%) が最も多く、次いで、週 2~3 日 (16.5%/23.4%)、週に 4 日以上 (4.8%/8.5%) であり、コロナ前後で有意差 ($p < 0.01$) が見られた。睡眠障害は健康影響が大きいので、睡眠障害の頻度と QEESI 得点 (化学物質不耐性、その他の物質の不耐性、症状、日常生活障害) および EHS 問診票 (電磁過敏反応) との関連が予想される。

9) 一日の手指消毒剤の使用回数

一週間当たりの手指消毒剤の使用頻度は、0 回 (68.1%/1.2%)、1~2 回 (20.6%/19.4%)、3~5 回 (5.6%/49.2%)、6 回以上 (5.6%/30.2%) で、コロナ前後で有意差 ($p < 0.001$) があった。コロナ禍で手指消毒は必要だが、使い過ぎや、消毒剤が揮発した蒸気を吸入することには、注意が必要である。

10) 一週間当たり衣類洗濯時の柔軟剤の使用頻度

一週間当たりの衣類洗濯時の柔軟剤の使用頻度もコロナ前後で有意差がなく、7 日 (33.1%/28.2%)、5~6 日 (13.3%/12.9%)、3~4 日 (23.4%/26.2%)、1~2 日 (20.6%/23.8%)、0 日 (9.7%/8.9%) であり、90%の学生が柔軟剤を使用していることがわかった。現在、他人の使う柔軟剤の香りに過敏反応を示す香害が問題になっており、柔軟剤の使い過ぎに、十分に注意する必要がある。

11) 一週間当たり香料入り化粧品の使用頻度

コロナ前の一週間当たりの香料入り化粧品の使用頻度では、0 日 (73.0%/61.3%)、1~2 日 (10.1%/10.5%)、3~4 日 (7.7%/10.5%)、5~6 日 (2.8%/7.7%)、7 日 (6.5%/10.1%) であった。すなわち、コロナ後に使用頻度が有意 ($p < 0.01$) に増加していた。

12) 精神的なストレスによる身体症状の悪化

精神的なストレス状況は、まったくない (37.5%/37.1%)、まれにある (33.9%/31.9%)、時々ある (18.5%/19.8%)、頻繁にある (8.1%/9.3%)、いつもある (2.0%/2.0%) で、予測に反して有意差がなかった。

3.2 QEESI 問診票の結果

1) 化学物質曝露による反応 (呼吸器経由)

“症状なし (0 点)” は (33.1%/33.1%) で、30 点 (MCS のスクリーンカットオフ値) 以上の高得点を示した人は (5.6%/5.6%) 存在した。1 点以上の項目では、多い順に、タバコの煙 (48.4%/49.6%)、ペンキシシナー (49.2%/49.2%)、香料 (38.3%/38.3%)、車の排気ガ

ス (36.7%/37.9%)、化粧品類 (37.5%/37.1%)、ガソリン臭 (35.9%/36.3%)、殺虫剤・防虫剤 (29.8%/29.8%)、消毒剤・クリーナー (26.6%/26.6%)、新車・室内装飾品臭 (25.8%/25.8%)、コールタール・アスファルト (23.0%/23.0%) であった。

2) Q2 その他の物質による反応 (呼吸器以外)

“反応なし” が (38.3%/35.5%) 存在し、1 点以上の項目では、生物学的アレルゲン (42.7%/44.4%)、次いで、水道カルキ臭 (27.4%/27.8%)、皮膚接触品 (21.8%/23.8%)、食後の不快感 (15.3%/18.1%)、カフェイン摂取反応 (9.7%/11.7%)、特定食物 (10.9%/10.5%)、医薬品 (4.8%/6.5%)、アルコール (2.4%/3.2%)、習慣性食物 (2.8%/2.4%)、カフェイン中毒反応 (2.0%/2.4%) と、有意差がないものの、コロナ後に増加した項目が多かった。

3) Q3 化学物質過敏症の症状

“症状なし” は (31.5%/28.2%) で、13 点 (MCS のスクリーンカットオフ値) 以上の高得点を示した人は (19.4%/23.0%) 存在した。1 点以上の症状は、情緒 (41.5%/45.6%)、次いで、思考能力 (33.9%/42.7%)、頭痛 (33.9%/35.5%)、腹部・消化器 (30.2%/33.5%)、神経・感覚 (30.2%/33.9%)、皮膚 (26.2%/27.8%)、泌尿器 (26.2%/29.8%)、粘膜・呼吸器 (23.0%/25.8%)、筋肉・関節 (19.0%/20.2%)、心臓・胸部 (14.1%/14.9%) であり、いずれの症状ともコロナ前と比べて、全症状がコロナ後に悪化している傾向があり、思考能力では、有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

4) Q4 日常的に曝露する化学物質

日常的に曝露する化学物質は、多い順に、柔軟剤使用 (85.1%/84.7%)、香料入り化粧品使用 (48.0%/61.7%)、カフェイン摂取 (40.3%/43.5%)、開放型燃焼器使用 (31.5%/24.2%)、受動喫煙 (29.4%/23.4%)、殺虫防カビ剤使用 (25.4%/28.6%)、服薬 (10.5%/12.5%)、飲酒 (7.3%/9.3%)、仕事・趣味の化学物質使用 (6.5%/8.5%)、喫煙 (1.2%/1.2%) であった。“香料入り化粧品使用” はコロナ後に、有意差 ($p < 0.01$) が見られ、3.2 節 11) を裏付ける結果であった。柔軟剤や化粧品が多いのは、大学生の特性と予想される。

5) Q5 日常生活障害

“障害なし” が (62.1%/44.0%) であり、17 点 (MCS のスクリーンカットオフ値) 以上の高得点を示した人は (2.8%/7.7%) 存在した。1 点以上の障害としては、社会活動 (10.9%/29.4%) で有意差 ($p < 0.001$)、

仕事・学校(10.5%/17.3%)で有意差 ($p<0.05$), 旅行ドライブ (8.5%/17.7%) で有意差 ($p<0.01$), 趣味 (4.8%/18.1%) で有意差 ($p<0.001$), 家族関係 (3.6%/8.9%) で有意差 ($p<0.05$) が見られた。また, 有意差はなかったが, 衣類障害(25.0%/25.4%) や, 化粧品・防臭剤障害(11.3%/13.3%)に高い割合を示したことは, 大学生の特徴と予想される。

6) MCS 基準値超過

MCS 基準値 (Q1 \geq 30 点, Q3 \geq 13 点, Q5 \geq 17 点をすべて満たす) 超過者はコロナ前 3 名 (1.2%), コロナ後 4 名 (1.6%) 存在した (表 3)。

3.3 EHS 問診票の結果

1) 症状発現と関係する電磁波発生源

“なし”は(70.2%/66.5%)存在した。1点以上の発生源は多い順に, 携帯電話(27.4%/31.0%), テレビ (11.7%/11.7%), パソコン(11.3%/22.6%), 蛍光灯やLEDなどの照明器具 (10.1%/11.7%), 家電製品 (6.5%/6.9%), 電子レンジ(5.2%/5.2%), 携帯基地局(3.2%/3.2%), スマートメーター(3.2%/3.2%), 送電線(2.8%/2.8%), ラジオ・テレビ塔(2.8%/2.8%), IH 調理器(2.4%/2.8%)の順であり, パソコンでは有意差 ($p<0.01$) が認められた。

2) 睡眠

睡眠時間の平均値(6.3 時間/6.5 時間)は有意 ($p<0.05$) に増加していた。睡眠障害では, “全然なかった (49.2%/46.0%)” と “少しあった (34.3%/26.2%)” が減少し, 逆に, “まあまああった (11.3%/16.5%)”, “かなりあった (2.4%/6.0%)”, “非常にあった (2.8%/5.2%)” で増加した。一晩寝ても疲れが全然取れない「眠脱疲れ」の質問では, “全然とれない (7.7%/9.7%)”, “少しとれる (19.4%/22.2%)” のように, 睡眠障害を抱えている大学生が一定程度いることが注目される。

4) THI 抑うつ尺度

抑うつ尺度基準値 (22 点) 超過者が (16.1%/19.4%) 存在した。抑うつ項目では, ゆうつ (36.3%/38.3%), 会いたくない(30.6%/35.9%), 引け目 (25.4%/27.8%) などが多かった。

5) EHS 基準値超過

EHS 基準値 (症状 57 項目(Q3 合計から推定) \geq 47 点, q67 電磁過敏反応 \geq 1 点, q68 自由記述に 2 つ以上記載有の 3 条件をすべて満たす) 超過者が コロナ前 2 名 (0.8%), コロナ後 3 名 (1.2%) 存在した (表

-3)。これは, 北條ら⁶⁾の一般回答者よりも少ない割合であるが, 年齢層の違いがあるためと考えられる。

表-3 MCS/EHS の基準値超過者の割合の比較⁵⁾

スクリーニング 基準	超過割合 (%)					宮教生	
	MCS	EHS	喘息	一般	コロナ前	コロナ後	
MCS Q1 \geq 30 Q3 \geq 13 Q5 \geq 17 の 3 条件をすべて満たす	82.0	63.9	15.3	5.9	1.2	1.6	
EHS 症状 57 項目 合計推定値 (Q3 合計) \geq 47 電磁過敏症 \geq 1 詳細記述 \geq 1 の 3 条件をすべて満たす	34.6	66.9	13.2	3~6	0.8 (推定値)	1.2 (推定値)	

4. 今後の展望

本研究の調査対象者は, 大学 1~2 年生が多く, 彼らはコロナ前に高校生だったことから, 調査結果には「コロナ前後の変化」だけではなく, 「高校生と大学生の生活の変化」の影響も含まれていることを考慮しなければならない。化学物質や電磁場の曝露と健康状況との関係について, 今後も調査を継続することが必要である。

参考文献

- 1) 宮田幹夫監修・水城まさみ他共著:化学物質過敏症対策—専門医・スタッフからのアドバイス, 緑風出版, (2020)
- 2) 北條祥子・水越厚史:疫学調査からみた日本の環境過敏症患者実態と今後の展望, 臨床環境医学, 27(2), (2018), pp.83-98
- 3) 小山桃花:新型コロナウイルス感染症拡大による大学生の生活スタイルの変化と健康影響の実態調査, 宮城教育大学卒業論文, (2022-2)
- 4) 小山桃花, 北條祥子, 水越厚史, 菅原正則: QEESSI と EHS 問診票を用いた大学生の環境過敏度に関する実態調査, 室内環境学会学術大会講演要旨集, (2021-12), pp.152-153
- 5) 加藤やすこ:シックスクール問題と対策, 緑風出版, (2018)
- 6) 北條祥子, 水越厚史, 黒岩義之:疫学的視点からみた環境過敏症の最新知見と今後の展望: 国際共通問診票を用いた環境過敏症の国内調査研究を中心に, 自律神経, In press

A-4

スマートハウス模型を用いた家庭科の住居領域における授業の提案

○武山 侑加 (宮城教育大学), 菅原 正則 (宮城教育大学)

Proposal of Lessons in the Field of Housing of Home Economics
using a Smart House Experimental Model

Takeyama Yuka (Miyagi University of Education),
Sugawara Masanori (Miyagi University of Education)

キーワード：中学校家庭科，授業提案，エネルギー教育，模型実験

はじめに

家庭科の住居領域の指導は、他領域と比較して低調であることが指摘され、生徒の関心が低いこと、教員の苦手意識が要因として挙げられている¹⁾。また、生徒は住居領域の中で「環境に配慮した住まい」などの今日的な課題に対しては学習の必要感が高いが、学習後はそれを実感するまでに至っていないことが明らかになっている²⁾。学習を通して、これからの社会への必要感を引き出すことで、住居領域の学習の意欲を伸ばしていけるような教材や学習方法の開発が課題である²⁾。

そこで本研究では、中学校家庭科の住居領域の興味関心を高めるために、スマートハウス模型を活用した授業を提案し、また学校教員向けの授業手引き書を作成する。

1. スマートハウス模型を用いた

家庭科の住居領域における授業の検討

1.1 中学校家庭科でのスマートハウスの取り扱い

CO₂ 排出の削減を実現する省エネ住宅であるスマートハウスは、現行の「中学校学習指導要領(平成 29 年告示)技術・家庭 (家庭分野)」への記載はないが、「C 消費生活・環境」の分野との関連を図って指導をすることも考えられる。そして同解説には、指導に当たっては、「B 衣食住の生活」の学習と相互に関連を図り、総合的に展開できるよう配慮することも示されている。また、学習指導要領の解説には、「環境の負荷を軽減させることについては、電気、ガス、水をはじめ、衣食住に関わる多くのものが限りある資源であり、それらを有効に活用するためには、自分や家族の消費行動が環境に与える影響を自覚し、自分だけでなく多くの人が行ったり、長期にわたって続けたりすることが大切であることに気づくようにする」、「環境負荷の小さいものを

消費することの効果など、消費者としての責任ある消費行動について実践できることを話あったり、家族生活で使用されている電気、ガス、水、など限りある資源を有効に活用するための生活の仕方について実践できることを話し合ったりする活動などが考えられる」という記述がある。

このことから、「C 消費生活・環境」の分野において、住生活に必要な電気も限りある資源であり、環境負荷を軽減させるよう指導していくことが求められていると分かる。スマートハウス模型を用いた家庭科の授業では、住生活だけではなく、消費生活とも関連させながら指導していくことを考えていく必要がある。

1.2 菅原らのスマートハウス模型を活用した教育実践

本研究は、菅原ら³⁾の「スマハキット」を活用した教育イベントを参考にしている。「スマハキット」とは、スマートハウスの仕組みを簡易で安価な電子回路類で構成した、建物模型教材のことである。この教材は、WindowsPC 上の Scratch(プログラミング言語)により制御可能である。イベントでは、主催者からのスマートハウスに関する簡単な講義と実験の説明の後に、スマートハウスの効果を体感する 5 つの実験を行っている。「スマハキット」には、明るさの平均値を安定的に目標の値にできているかを評価するための、明るさの計測を 1 分間行う「1 分チャレンジ」機能があり、この値を実験結果の数値として、記録用紙に記入している。

1.3 指導過程の検討

提案する授業は 2 時限分(1 時限 50 分)とする。

1 時限目には、《指導過程 1》学習課題『スマートハウスを理解し、環境に配慮した住生活を考えよう』の提示、《指導過程 2》資源や再生可能エネルギーを活用した様々な住まい方の理解、《指導過程

3) スマートハウスの理解,《指導過程 4》スマートハウス模型を用いての実験(教師による実演/実験 1~2),《指導過程 5》次回の実験の説明,からなる。

2 時限目は,《指導過程 6》スマートハウス模型の実験(教師による実演/実験 3~5)と並行してタブレットによる実験(班ごと),《指導過程 7》「SDGs 建築ガイド(開発目標 7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに)」の感想記入,《指導過程 8》授業の振り返り,からなる。授業のために,ワークシート,パワーポイント,実験補助資料の作成と,模型,タブレット版ソフトウェアの改良を行った。タブレット版ソフトウェアは,リモート「スマハキット」のソフトウェア³⁾を改良して,スマートハウス模型につながずにタブレット内だけでも同様の実験をできるようにした。

1.4 スマートハウス模型の改良

菅原らの模型(図-1)はスチレンボードと塩ビ板で作られた立方体の建物模型であるが,「家型」の模型を簡易に製作するために,ここでは(有)風大地プロダクツの「家模型ワークショップ〈工作キット〉」に,LED と Cds 照度センサーを取り付けて改良したもの(図-2)を用いることとする。



図-1 菅原らの模型



図-2 改良後の模型

2. 模擬授業の実施と分析

2.1 模擬授業の実施概要

模擬授業は,2022年1月20日木曜日に宮城教育大学の授業(90分,受講者5名)内で《指導過程 3》から《指導過程 6》を実施した。この指導過程では,スマートハウスの説明を受け,模型を使用した実験を行うことでスマートハウスの理解をさらに深めることをねらいとしている。

《指導過程 3》では,パワーポイントを使用し,口頭で「スマートハウスの始まり」など基礎的な内容の説明を行った。《指導過程 4》から《指導過

程 6》では,教師がスマートハウス模型を扱いながら実験方法を1回ごとに説明し,実験1から実験5まで同時に進めていった。また,提案では班ごととしていたタブレット内での実験であるが,受講生各自がパソコンを所持していたことから,今回はそれぞれ個人で実験を行ってもらった。実験結果は,配布したワークシートに記入してもらった。最後に受講生に授業評価アンケートを行い,配布したプリントを全て回収し模擬授業を終えた。

2.2 模擬授業の分析

(1) 模擬授業の評価方法・評価項目

模擬授業の評価アンケートは,全部で16問(授業の受講前に回答する3問および授業を受講後に回答する13問)で構成した。回答方式は,選択式と自由記述式がある。授業前の3問は,受講生のスマートハウスの基礎知識や住生活分野の興味関心を確認するための質問,授業後の13問は,興味関心への変化を問うもの,授業方法について問うもの,実験について問うもの,模擬授業全体に対する意見などである。

(2) 模擬授業評価アンケートの分析結果

【授業前】「住生活分野の学習は好きである」と答えた回答者が多かった。一方で,スマートハウスに関しては,「聞いたことはある」と回答したのが3名,聞いたこともなく「知らない」と回答したのが2名であり,スマートハウスの具体的な知識を聞いた質問では,「快適な家」「省エネ」「賢い暮らし」などの単語や「スマートハウス」という名称から連想できるような回答が多く,スマートハウスの知識がほとんどないことが窺える。

【授業後】住生活やスマートハウスへの興味関心が高まり,スマートハウスの具体的な知識を聞いた質問に関しても,文章で記述され,授業を通して理解が深まっていることが分かった。また,今回配布した「実験補助資料が分かりやすかった」という意見が多くみられた。紙資料として配ることでソフトウェア画面と照らし合わせられるため,受講者自身がソフトウェアを操作するための手立てとなったことが窺える。実験結果を記入するワークシートはほとんどの回答者にとって使いやすかったことが分かった。スマートハウス模型を使った説明も「分かりやすい」という回答が多く,スマートハウス模型を使った説明は理解を促す上で有効だと分かった。各自での実験に使ったタブレッ

ト版ソフトウェアは操作が簡単で使いやすく、実験を楽しんでもらえたことが分かった。タブレット版ソフトウェアは、教師側から送られてきた URL (<https://scratch.mit.edu/projects/630090656/>) をクリックするだけで簡単に使用を始めることができる。実験の分かりにくかった点として、1分チャレンジ中に、「明るさの平均値を目標値に近づけることを重視するのか」、「明るさの安定を示す顔マークを重視すべきなのか」という指示内容の不明確さについて意見が多く挙げられた。

【模擬授業全体を通しての感想】「タブレットを使った実験を初めてやった」「明るさの調節の実験が新鮮で楽しかった」などの実験内容や方法に対して「新しい」という感想がみられた。今後改善すべき点としては、コンデンサについての中学生の理解度を考慮していなかったことが挙げられた。

2.3 模型とソフトウェア画面デザインの改良

(1) スマート模型の再改良

模擬授業の実施結果からスマートハウス模型の課題が2点挙げられた。1点目は、模型内部の明るさの変化が見えにくかったことである。これは、模型の外壁面の色とLED照明の色が似ていたためである(図-3)。2点目が、模型内部の明るさを確認するための窓の設置面数である。模擬授業で使用した模型は、正面だけに窓を設置したが、その正面を生徒側に向けると、授業での説明時に教師がパソコンを操作しながら模型内部の明るさの変化を確認することが難しかった。この2点をふまえて、①模型の外壁面に黒画用紙を貼り付ける、②窓は3面に増やす、という改良を加え、新たにスマートハウス模型を製作し直した(図-4)。改良後の模型の製作方法は、3.2節の授業の手引き書内に明記した。



図-3 改良前点灯時



図-4 改良後点灯時

(2) ソフトウェア画面デザインの改良

ソフトウェアの改良ポイントは、教師用(図-5)と

生徒用(図-6)のソフトウェア画面のデザインを統一することである。模擬授業では、教師が使用しているソフトウェアの画面構成と、生徒が使用しているタブレット版ソフトウェアの画面構成が一部異なるデザインとなっていたため、説明漏れが起こってしまった。ソフトウェア画面のデザインを統一することで、説明不足を防ぎ、分かりやすい授業につながると考えられる。

また、模擬授業評価アンケートで多く指摘された「1分チャレンジ」中の指示内容の対応として、明るさの安定を示す顔マークの大きさと表示場所を変更し、明るさを赤い枠線で囲むことにより、明るさの数値に注目させるようにした。授業の応用編として顔マークを意識させるような指導を行うことが容易になる。改良後は、教師用、生徒用ともにタブレット版ソフトウェア画面のデザイン(図-6)に統一した。



図-5 教師用ソフトウェア画面

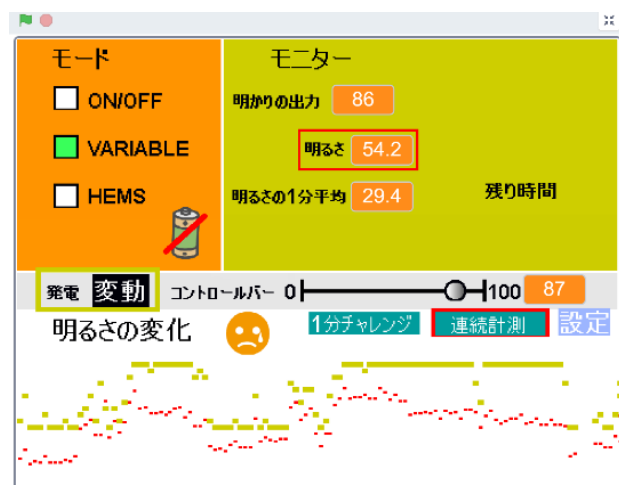


図-6 生徒用タブレット版ソフトウェア画面

3. スマートハウス模型を用いた

家庭科の住居領域における授業の提案

3.1 授業の提案

基本的には、1.3 節の指導過程にしたがって授業提案を行うが、模擬授業の分析結果より、次の 5 点を修正した。

- (1) 《指導過程 3》で「スマートハウスの始まり」の説明を生徒への学習の必要感をより引き出すため、「エネルギー消費量の推移」や「日本のエネルギー事情」などの今日的な話題に変更。
- (2) 《指導過程 4》から《指導過程 6》の実験形態を、班ごとではなく個人での実験に変更。
- (3) 実験補助資料を分かりやすくするために、パワーポイントの説明内容を新たに追加。
- (4) ワークシートに「顔マーク」と「目標の明るさとの差」を追加。
- (5) パワーポイントに中学生の理解度を考慮して「蓄電池」の説明を追加。

3.2 授業の手引き書の作成

提案した授業を、すべての家庭科教員が実践可能にすることを目指し、「スマートハウス模型を用いた家庭科の住居領域における授業の手引き」を作成した(図-7)。内容は 17 ページで、本研究で提案する授業を行うため「1. スマートハウス模型の製作手順」「2. 教師用スマートハウス模型ソフトウェアの準備」「3. スマートハウス模型とパソコンのつなぎ方」の 3 章で構成されている。また、手引き書は授業準備に焦点をあて、写真や図を多く用いて作成することで、住居領域に苦手意識を抱いている教員にとっても、分かりやすくなることを心掛けた。

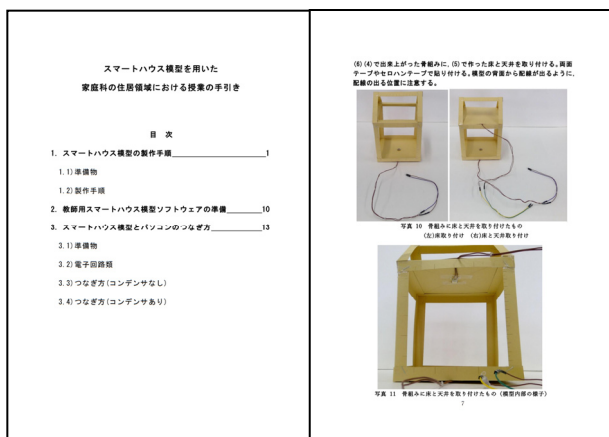


図-7 作成した手引き書の例(一部)

まとめ

本研究では、住生活やスマートハウスへの興味関心を高め、スマートハウスの理解を深めるための授業提案とその有効性の検討、そして授業の手引き書の作成を行った。1人1台端末を使用することが当たり前となりつつある教育現場で、新たな住居領域の授業として期待がもてる。

今後の課題としては、この指導過程や手引き書をもとに、家庭科教員志望の学生や中学校の家庭科教員が授業可能なのか検討していくこと、小学校家庭科や高校家庭科の授業としても検討していくことが挙げられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、模擬授業に参加してくださった宮城教育大学の学生の皆様にご協力頂きましたので、深く感謝申し上げます。なお、本研究は JSPS 科研費 18K02185 (研究代表者 菅原正則) の助成を受けました。

参考文献

- 1) 速水多佳子：小学校・中学校・タカ等学校の家庭科住居領域における学習内容に関する分析—平成 29 年度使用教科書から：日本家政学会誌, Vol. 70, No. 6, pp. 371-387(2019)
- 2) 小川裕子・中島喜代子・石井仁・田中勝・杉浦淳吉・小川正光：中学生の学習要求からみた家庭科住居領域授業実践に関する考察：教科開発学論集, 第 2 号, pp. 107-115(2014)
- 3) 菅原正則・野角光治：スマートハウスの効果を体験する建物模型教材の開発とオンラインワークショップの実践：空気調和・衛生工学会東北支部第 10 回学術・技術報告会論文集(2021-3), pp. 25-28

A-6

新型コロナウイルス感染症対策下の冬季における仙台市内中学校の環境マイクロバイオーム

○福島 朋実 (宮城教育大学), 菅原 正則 (宮城教育大学),
小林 光 (東北大学), 江刺 美和 (宮城教育大学附属中学校)

Environmental Microbiome Junior High School in Winter under the Management of COVID-19

Fukushima Tomomi (Miyagi University of Education),
Sugawara Masanori (Miyagi university of education), Kobayashi Hikaru (Tohoku University),
Esashi Miwa (Affiliated Junior High School, Miyagi University of Education)

キーワード：マイクロバイオーム, 室内環境, DNA 解析, 教室

1. はじめに

筆者ら^{1),2)}はこれまで、仙台市の中学校建物内における冬季および夏季の環境マイクロバイオーム(微生物叢)を調査し、生徒が日ごろ接触する機会のある部位間、あるいは季節間の様相を比較した。本報では、同一の中学校教室において、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が蔓延し始めて1年後の2021年1月に、サンプリングを2度実施したので、その調査結果を報告する。

2. 調査概要

調査対象は、仙台市市街域にある中学校(1学年あたり4クラス、1学年157~158名在籍)の3学年教室(図1、RC造3階建の1階)である。窓はすべて南面しているが、教室c1およびc4はセットバックし、窓の方向とホールに面する出入口の方向との関係が異なるため、教室c2およびc3に比べて日照・通風条件が不利である。

調査項目(表1)は、1教室(38~40名在籍)あたり3台を調査のたびに無作為に選んだ机の天板とその付近の床、入口引戸の引手、教卓天板の各表面である。冬期休業日の2021年1月5日および平常授業日の1月29日(完全下校後)に、スワブによる拭き取りサンプリングを実施した。サンプリング作業および解析の手順についての詳細は、文献1)を参照のこと。また、環境条件把握のため、3学年教室すべてと3学年用ホールにおいて温湿度とCO2濃度、そして百葉箱において温湿度を、調査日を含む1年間以上に渡り5分または10分間隔で連続計測した。

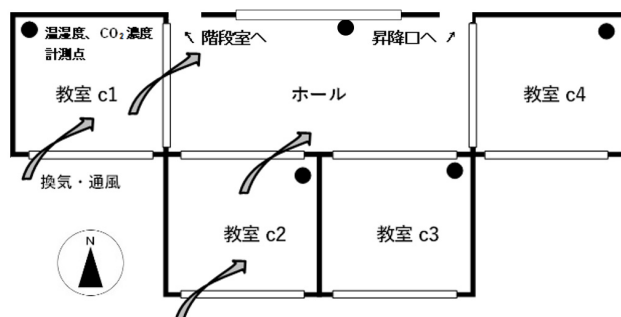


図1 調査対象教室の平面構成

表1 調査項目

サンプル記号	サンプリング位置	面積
3-1-1	c1教室机1	100cm ²
3-1-2	c1教室机2	100cm ²
3-1-3	c1教室机3	100cm ²
3-1-4	c1教室床1	100cm ²
3-1-5	c1教室床2	100cm ²
3-1-6	c1教室床3	100cm ²
3-1-7	c1教室入口引戸の引手(前後)	185cm ² × 2
3-1-8	c1教室教卓天板	100cm ²
3-2-1	c2教室机1	100cm ²
3-2-2	c2教室机2	100cm ²
3-2-3	c2教室机3	100cm ²
3-2-4	c2教室床1	100cm ²
3-2-5	c2教室床2	100cm ²
3-2-6	c2教室床3	100cm ²
3-2-7	c2教室入口引戸の引手(前後)	185cm ² × 2
3-2-8	c2教室教卓天板	100cm ²

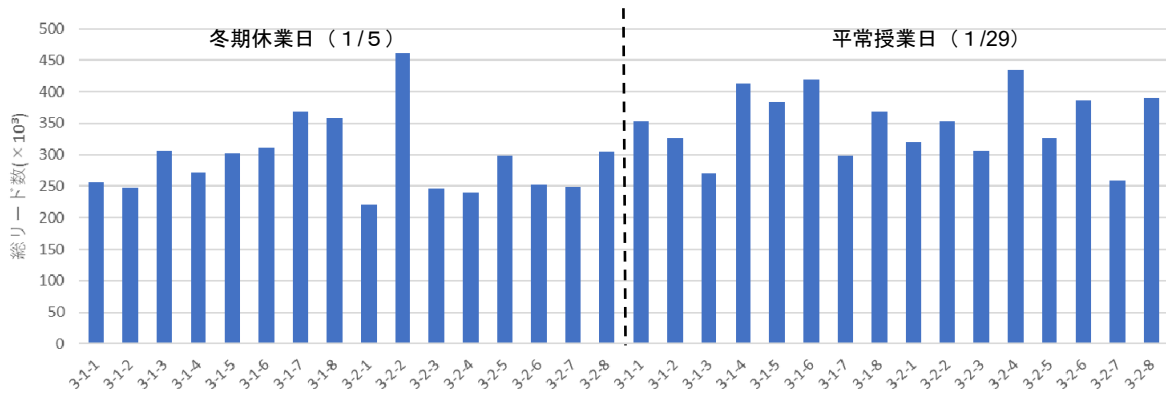


図2 サンプル中の総リード数

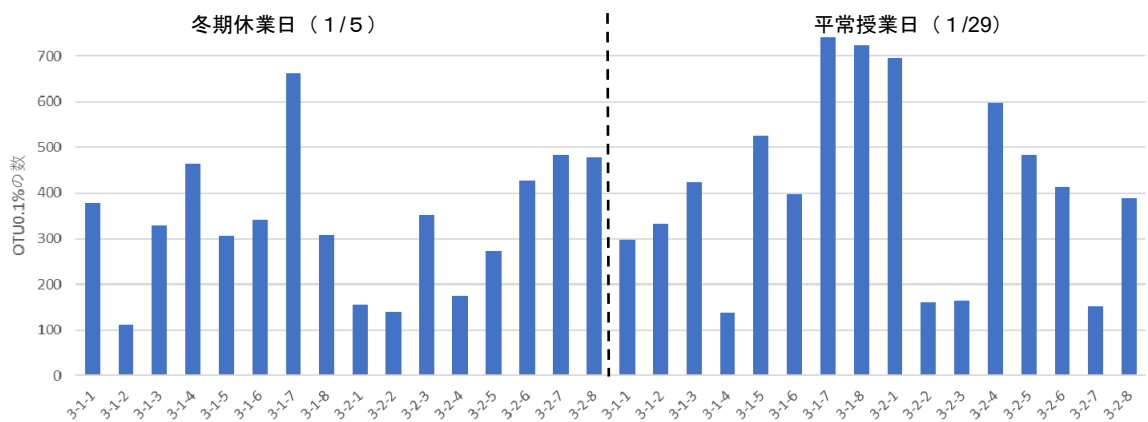


図3 サンプル中のOTU0.1%の数

3. 調査結果

3.1 総リード数

今回の2度の調査において、全 32 サンプルから検出された OTU (Operational Taxonomic Unit) は 272,039、リード数は $7,117 \times 10^3$ であった。1 サンプル中に含まれる総リード数を図2に示す。1 サンプル当たりのリード数は $16 \sim 30 \times 10^4$ の範囲にあり、教室、部位、測定日による違いに特定の傾向は見られない。

3.2 1 サンプルあたりの OTU0.1% の数

1 サンプル中に検出された OTU のうち、リード数の比率が 0.1% 以上のもの(本報では、OTU_{0.1%}と呼ぶ)の数を図3に示す。OTU_{0.1%}の数が多いほど、マイクロバイオームは多様といえるが、例えばこれが 400 以上であるのは、1/5 の測定で 5 つ、1/29 の測定で 8 つであり、主に平常授業日の床面(無作為に選定)と、入口引戸の引手で見られた。

一方、OTU_{0.1%}の数が少ないサンプルを見ると、

例えば 200 未満であるのは、1/5 の測定で 4 つ、1/29 の測定で 4 つであり、半数は c2 教室机上面(無作為に選定)であった。

3.3 主な OTU の組成比

全サンプルの OTU について、菌の種類が特定できたもののうち、属の分類レベルでリード数が 45×10^3 以上のものは、24 種類であった。それら主な OTU について、1 サンプルごとの組成比を図4に示す。また、リード数が 100×10^3 以上であった菌の生息場所、主な特徴等について表 2 に示す。これらには体内や体表面のほか、土壌や海水中に主に分布しているもの、そして日和見感染の原因となるものも多く見られた。OTU について全リード数が最も多かったのは Staphylococcus であった。

前節で OTU_{0.1%}の数が 400 以上であるとされたサンプルは、その他(凡例にある 24 種類以外の OTU)比率が 17.6%~76.6%(平均 48.3%)であり全サンプルの「その他」の OTU 比率平均

(35.4%)より高かった。このことは、マイクロバイオーームが多様なことを裏付けていると考える。一方、OTU_{0.1%}が 200 未満であるとされたサンプルは、組成比が最大の OTU である *Staphylococcus* が 1.5%~45.3%(平均 16.5%)を占め、全サンプルの平均(13.2%)より高かった。

計測時期の特徴として、*Staphylococcus* は冬期休業日 1.3%~38.5%(平均 11.5%)に対して、平常授業日 1.2%~45.3%(平均 14.8%)であり比率が高い傾向があった。*Staphylococcus* は人の体表面などの常在菌であることから、生徒が教室を使用した影響であると考えられる。さらに、床表面サンプル内の「その他」の比率は、冬期休業日 24.2%~55.2% (平均 41.9%)、平常授業日 59.3%~68.8%(平均 63.1%)であり、平常授業日の比率が高く、マイクロバイオーームがより多様になったと考えられる。

3.4 主座標分析

図 5、6 に全サンプルを主座標分析した結果を示す。固有値の高い PC1-PC2 軸の分布図である図 5 では、平常授業日の c2 教室の教卓天板、床、机の各1箇所の除き、何れも座標軸の原点付近に集まっていることが分かる。これら 3 か所の外れ値が生じたのは、いずれも c2 教室の平常授業日であることから、特定の使用者による影響があったものと予想される。しかし、1/29 に c2 教室の出席者からの風邪の申告はなかったため、この原因は不明である。

図 5 において原点付近に集まっていたサンプルは、PC2、PC3 軸で表された図 6 では、図全体に散在した。この結果から机上面と床面、c1 教室と c2 教室、冬期休業日と平常授業日の分布を比較したが、その範囲に特徴的な違いは見られなかった。今後、図 5 に見られた外れ値のサンプルを除いて、再度主座標分析するなど、詳細な検討が必要である。

表 2 検出された主な菌の生息場所・特徴 (主に日本細菌学会ウェブサイト、Wikipedia、文献 3)を参照)

名前	主な生息場所	特徴
<i>Staphylococcus</i> (ブドウ球菌)	体表・消化管・腔	通性嫌気性細菌。腸内細菌の形成。
<i>Acinetobacter</i> (アシネトバクター)	口腔・咽頭	好気性細菌。病院環境下で血流・呼吸器感染を引き起こすことがある。
<i>Corynebacterium</i> (コリネバクテリウム属)	気道等	咽頭や鼻腔の粘膜に感染して増殖する。
<i>Pseudomonas</i> (シュードモナス属)	土壌・海水・組織	日和見感染症・呼吸器・尿路感染症、菌血症・敗血症を引き起こす。
<i>Methylobacterium</i> (メチロバクテリウム属)	土壌・水中	病院環境下で日和見感染の原因となる。
<i>Bacillus</i> (バシラス属)	糞	偏性好気性(一部通性嫌気性)の細菌。枯草菌等が含まれる。
<i>Streptococcus</i> (ストレプトコッカス属)	菌	真正細菌の総称。毒性のある肺炎球菌・溶連菌等が含まれる。
<i>Paracoccus</i> (パラコッカス属)	土壌・海水	好気性非芽胞形成の球菌/桿菌。工業的に利用されることもある。
<i>Diploricettsia</i> (ディプロリケットシア)	マダニ・ハエの体内	偏性細胞内寄生性の真正細菌。

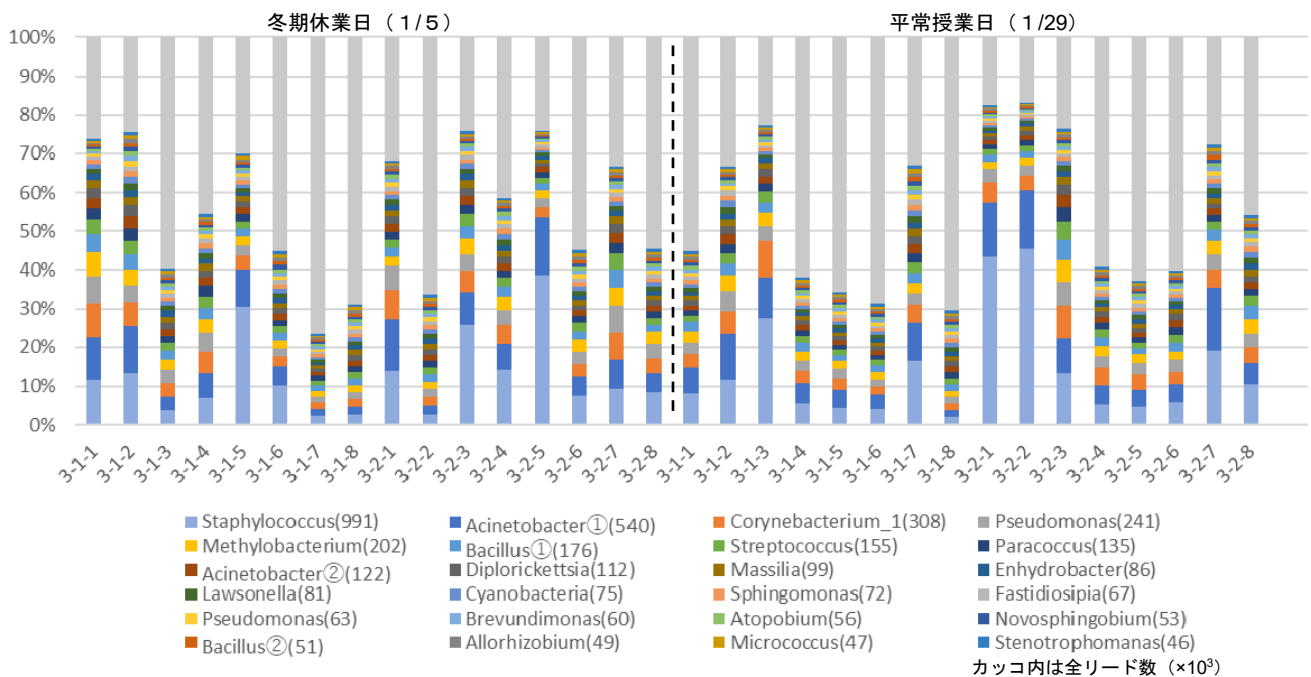


図 4 全サンプルにおける主な OTU の組成比

4.まとめ

本研究では、新型コロナウイルス感染症蔓延後の冬季において中学校教室内の環境マイクロバイオームを調査・分析した。その結果、冬期休業日に対して通常授業日では、次の特徴が見られた。

- ①Staphylococcus の OTU 比率が高く、生徒が教室を使用した影響が見られる。
- ②床面では「その他」の OTU 比率が高く、マイクロバイオームが多様と言える。
- ③c2 教室の教卓天板・床面・机上面に特定の使用者の影響と予想される、主座標分析の外れ値が見られる。

環境マイクロバイオームは、居住者の直接的・間接的な接触による影響を受ける⁴⁾⁵⁾が、それ以外の影響要因が不明な部分も多く、環境の実態を読み取るためには裏付けデータの取得が欠かせない。

謝辞

本研究の遂行にあたり、中学校の先生方には多大なご協力を頂きました。ここに記し感謝の意を表します。なお本研究は、科研費 17H06216 および 18K02185 の助成を受けました。

参考文献

- 1) 小林光、菅原正則：建築環境における呼吸器系病原体モニタリング法の確立に関する研究 その3：日本建築学会大会（東北）学術講演梗概集、D-2（2018-9）、pp. 867-870
- 2) 菅原正則他：仙台市の中学校教室における冬季および夏季のマイクロバイオーム実態調査 2020 年日本建築学会大会学術講演梗概集 pp. 1569-1570
- 3) ロブ・デサール・スーザン・L.パーキンズ著 斎藤隆央訳：マイクロバイオームの世界 あなたの中和表面と周りにいる何兆もの微生物たち：紀伊國書店（2016）
- 4) Meadow JM, Altrichter AE, et al. : Bacterial communities on classroom surfaces vary with human contact : Microbiome 2: 7 (2014-3)
- 5) D. P. Kelly, I. R. McDonald, A. P. Wood : The Family Methylobacteriaceae : The Prokaryotes (2014-11) , pp. 313-340

— 各測定時期の机上面のサンプル
 - - 各測定時期の床面のサンプル
 — 各測定時期のc1教室のサンプル
 - - 各測定時期のc2教室のサンプル
 — 冬期休業日のサンプル
 - - 平常授業日のサンプル

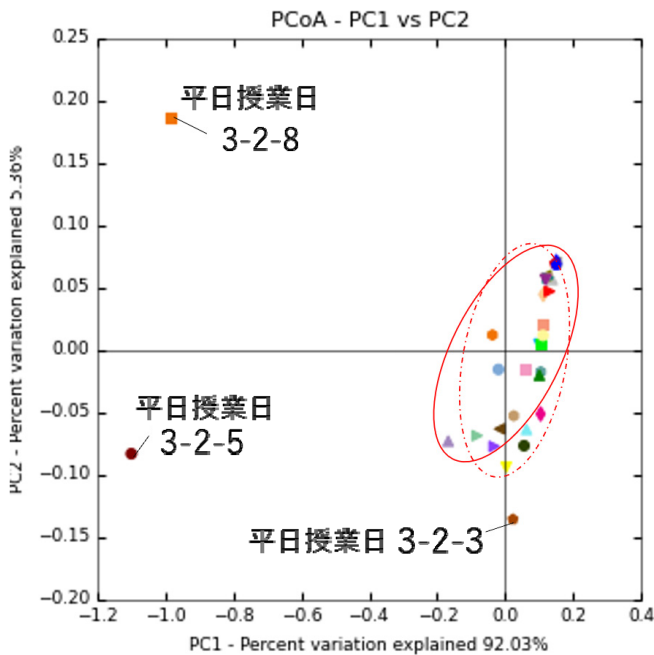


図5 主座標分析(PC1-PC2軸)

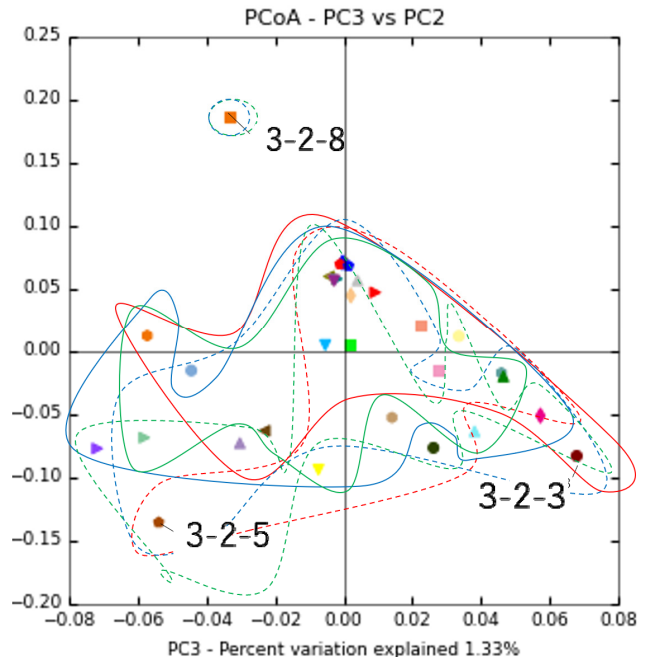


図6 主座標分析(PC3-PC2軸)

A-7

局所日射量の簡易測定法の開発 その1 測定原理

○小林 仁 (仙台高等専門学校)

Development of Simple Measurement Method on Local Solar Radiation

Part 1 Measurement Theory

Hiroshi Kobayashi (National Institute of Technology Sendai College)

キーワード：日射量，直達・分散・反射分離

1. はじめに

近年では、気象関連衛星やアメダス等気象観測点の増加に伴い、拡張アメダス気象データなどマクロな気象データが整備されている。これらを基に、日本建築学会標準住宅モデル等の代表的建築物を対象としてシミュレーションなど設計支援データも拡充されており、各種の省エネ等設計指針も提案されている。

これらのデータや指針は代表的な地点や建物についての離散的なものであるため、設計において目安にはなるものの、実際設計に直接活用する「建築デジタルツインズ」等の建築DXには至っていない。確かに、ZEB・ZEH等高性能建物では、断熱・気密化により外部環境の不要な影響を軽減し、室内環境を最小のエネルギー量で快適に制御するため、予測精度向上は重要であるが、費用対効果を考慮する必要がある。

簡易な局所データ補間に、HEAT20¹⁾等でも用いられる、代表点のデータを基に、日射データ等を用いて、各種指標をより詳細な地域別に補正する方法がある。これを基に、局所地形・構造物なども含め、より詳細な地区・敷地別の、直達・拡散・反射の日射が把握できれば、現在整備されているデータを補償することで、簡易で精度の高い設計資料の整備・提供が可能となる。

以上より、本研究では、環境負荷が大きい局所日射に着目し、直達・拡散・反射放射輝度分布の簡易測定法の提案を目的とする。局所日射データの取得に関しては、CIE 天空放射輝度分布関連研究^{2)~6)}を参考に、カメラやデジカメを用いた相対的天空輝度分布簡易測定法を応用する。ここでは、360度天空カメラ画像データと、局所日射データを活用して、天空放射輝度分布へ変換する。本報では、その測定原理を整理したので報告する。

2. 簡易測定原理

2.1 ダイナミックレンジ

一般に、天空のダイナミックレンジ(DR)は、23EV(Exposure Value)程(太陽光 100000~夜空 0.01[lx])とされ、デジタルカメラの測定範囲(13EV: 1000~0.1[lx])を超えている。それに付随して、フレアやゴースト等も発生する。最近ではナノコーティング等コーティング技術が向上しているが、白飛・黒潰は物理的に防げない。そこで、直達日射遮蔽の有/無、ND1000程度のフィルターの有/無を組合せて撮影して、有効範囲のデータ(白飛・黒潰を除く)を用いることを考える。

2.2 周波数域

最近のデジタルカメラは、研究用のものを除きIRフィルター(赤外光遮蔽)が内蔵されており、測定域は概ね可視光となる。このため、可視光域を測定対象とし、IRフィルターを付けた局所日射(放射照度)データを基に、画像の放射輝度への変換を行う。併せて、IRフィルター有/無の局所日射データを用い、6000K黒体放射量分布等鑑みて、可視光+赤外光域の放射輝度の推定も試みる。なお、内蔵IRフィルター脱着可能なものは、IRフィルター有/無での測定を行い、比較検証を行う。

2.3 デジタルデータ変換

データ変換は、①~④のプロセスによって行う。

- ①3DのRGBデジタルデータをグレースケールの明るさIのデジタルデータに変換する。
- ②線形等近似により明るさI(対数)を、輝度L(対数)へ変換する。
- ③水平面立体投射より輝度Lを照度Eに変換する。
- ④照度(または輝度)を発光効率で除して放射照度(または放射輝度)に変換する。

ここで、⑤平均放射照度は日射量と一致するとし、②の線形近似の係数を、④放射照度と日射量との差異が最小になるように定める。

①②④により、画像データを放射輝度分布に変換する。

具体的には、R・G・B デジタルデータ(8bit)は下記に示す式 1 で重付平均された相対的明るさ $I[\text{lm}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)]$ に変換する。

$$I = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B \quad \text{式 1}$$

相対的明るさ I のデジタルデータと輝度 L との関係は既往研究⁵⁾により $10 \sim 1000[\text{lx}]$ の範囲では両対数グラフ上で直線になるため、 $\log(L) = a \cdot \log(I) + b$ と近似する(a, b は任意の定数)。

輝度 L (放射輝度) から照度 E (放射照度) への変換は半径 1 の等輝度拡散面 S を仮定した、 S 面全体から受照点 P の受ける直接照度を示す、式 2 を用いて行う。

$$E = \pi \int L \cdot \cos \beta / (\pi r^2) dS \quad \text{式 2}$$

なお、式 2 の立体角投射は汎用の画像処理ソフトにより行う。近似係数の算定では、3D 画像の上側(天空)または下側(地面)の半分を用いる。

照度・放射照度変換に用いる発光効率に関しては、既往研究⁶⁾によれば、雲量等により 10% 程度変化するが、本研究では平均の $110[\text{lm}/\text{W}]$ とする。

3. 簡易測定方法

画像データと測定データから 2 章の式を用いて、各種放射輝度分布を算定する。

3.1 拡散日射の放射輝度分布

拡散光天空カメラ画像データ(直達光遮蔽)と拡散日射量(直達光遮蔽)のデータから可視光領域の拡散光放射輝度分布を算定する。

3.2 直達日射の放射輝度分布

ND1000 程度フィルターを付けた全天日射カメラ画像データ(拡散光は黒潰れ)と直達日射量(全天日射量 - 拡散日射量)のデータから可視光領域の直達光放射輝度分布を算定する。

3.3 反射日射の放射輝度分布

反射光の地面カメラ画像を基に、3.1 節の近似係数を用いて、可視光領域の反射光放射輝度分布

を算定する。

併せて検証のために地面カメラ画像データと反射日射量測定データを基にした、可視光領域平均放射輝度分布も算定して比較検証を行う。

3.4 全天地日射の放射輝度分布

ND1000 フィルターを付けた場合の、太陽周辺部分の画像データにフィルターの減衰係数を乗じ、フィルター無の太陽部分の白潰している画像データと置換することで、明るさの仮想 24bit データ ($200000 \sim 0.1[\text{lx}]$) を作成して、全天日射量のデータを用いて求めた係数で線形近似して、全天地放射輝度分布を試算する。

4. おわりに

本報では、360 度天空カメラの 3D デジタルデータを基に、可視光域の 3D 放射輝度分布を直達・拡散・反射に分けて簡易に測定する方法について、既往の研究成果を基に提案している。併せて、可視光域 + 赤外線域の 3D 放射輝度分布の推定法も提案している。

今後は、実際の測定結果を基に、精度を検証するとともに、既存の拡張アメダスデータと組合せ局所の環境条件を推定する方法も提案する。

参考文献

- 1) 坂本他: HEAT20 設計ガイドブック 2021 正しい住宅断熱化の作法, 2021.6
- 2) 中村洋他: 全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布, 日本建築学会計画系論文集, 第 573 号, pp.33~40, 2003.11
- 3) 永村一雄他: 天空輝度・放射輝度分布を推定する ALL Sky Model の改良, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 号, pp.121~127, 2021.3
- 4) 上谷芳昭: デジタルカメラによる輝度色度の測定, 平成 10 年度照明学会第 31 回全国大会, pp.128~129, 1998.10
- 5) 野口太郎他: ビデオカメラを用いた輝度分布測定システムについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.169~170, 1990.10
- 6) 松澤朋子他: 雲量による照度と日射量の考察, 平成 15 年度照明学会, 第 36 回全国大会, pp.65~66, 2003.10

屋外輝度の簡易測定法の開発 その1 測定原理

○小林 仁 (仙台高等専門学校)

Development of Simple Measurement Method on Outdoor Luminance

Part 1 Measurement Theory

Hiroshi Kobayashi (National Institute of Technology Sendai College)

キーワード：輝度分布、輝度経時変化

1. はじめに

近年、都市型住宅では、従来の狭小性に加えて、省エネルギーの観点からも、日当たりの確保の重要性が増している。一方で、ソーラパネルや熱線反射ガラスなど高機能化・高性能化にともない太陽光反射光害への対応も必要となるなど、従来よりも緻密な光環境計画が重要とされる。

日当たりや採光などを検討する上で、都市 3DCAD モデルデータの整備、CIE の ALL Sky Model 等の天空輝度分布関連資料²⁾など昼光をより高精度で推定できる光環境設計資料が整備されているが個々の建物に利用するには至っていない。

この課題に対処する方法として、直達・拡散光による天空輝度分布に加えて、周辺の地形や構造物からの反射光による輝度分布も含めた、主要な天候における 4D 輝度分布画像データを整備することを考える。これにより、都市 3DCAD データや CIE ALL Sky Model に加え、衛星やアメダス等気象観測データや拡張アメダス気象データなど広域の離散的な気象データとコネクして、緻密な採光計画が可能になるといえる。

以上より、本研究では、デジタルカメラやビデオカメラを用いた相対的な天空輝度分布の簡易測定法^{3)~6)}に着目し、昨今の世界的コロナ蔓延に伴って普及しているオンライン会議や動画撮影等で使用され、今後も高性能化することが期待できる、360 度天空カメラを用い、照度データを基に、簡易に局所 4D 屋外輝度分布画像データを作成する方法の確立を目的としている。本報ではその測定原理をまとめて延べている。

なお、本測定で用いる主要な式は、前報¹⁾で記したものと一部重複するため、具体的な式等に関しては前報を参照し、本報では簡易法の概要とデータ変換のプロセスを記述する。

2. 簡易測定のための測定原理

2.1 ダイナミックレンジ

前報と同様に、光環境のダイナミックレンジ (DR: 太陽光 100000~反射光 100[lx]) をデジタルカメラでカバーできるように、直達日射遮蔽の有/無、ND1000 程度のフィルターの有/無を組合わせた条件で撮影し、有効範囲のデータを合成した仮想 24 ビットデータを作成する。

2.2 周波数域

明るさは可視光による為、デジタルカメラの内蔵 IR フィルターの影響は小さいと考えるが、赤色領域での影響を鑑みて、前報と同様に、IR フィルターの有/無の日照データの測定も参考として行い、可視光域の輝度と可視光+赤外光域の輝度を測定し比較することで影響を検討する。

合わせて、脱着可能な内蔵 IR フィルターの場合は内蔵 IR フィルター有/無での測定を行い、比較検証も行う。

2.3 デジタルデータ変換

データ変換は、①~④のプロセスで行う。

① 3D の RGB デジタルデータをグレースケールの明るさ I のデジタルデータに変換する。

② 線形近似により明るさ I (対数) を、輝度 L (対数) へ変換する。

③ 水平面立体投射より輝度 L を照度 E に変換する。ここで、④ 平均照度の計算値は実測値と一致するとし、近似係数を算定する。具体的には、② の線形近似の係数を、計算値と実測値との差異が最小になるように定める。

①②により、3D デジタルデータを 3D 輝度分布に連続変換し、4D データとする。

①②③で用いる式等は、前報の 2.3 節に示した

通りである。

3. 簡易測定方法

条件後に画像データと測定データから 2 章の式を用いて、各種輝度分布を算定する。

3.1 拡散光の輝度分布

拡散光の天空カメラ画像データ(直達光を遮蔽)と拡散光照度(直達光を遮蔽した場合の照度)のデータから、拡散光の輝度分布を算定する。

3.2 直達光の輝度分布

ND1000 フィルターを付けた全天日射のカメラ画像データと直達照度(全日照度－天空照度)のデータから直達光輝度分布を算定する。

3.3 反射光の輝度分布

反射光の地上等のカメラ画像を基に、前報 2.3 節の式を用いて、3.1 節の定数 a、b を用いて、反射光輝度分布を算定する。

なお、検証のために地上方向の下向きカメラ画像データと反射光照度データから反射光輝度分布も算定し、比較検証を行う。

3.4 全天地光の輝度分布

前報と同様に ND1000 フィルターを付けた場合の太陽部分の画像データにフィルターの減衰係数を乗じ、フィルター無の太陽部分の画像データと置換し、明るさの仮想 24bit データ(200000～0.1[lx])を作成して、全日照度のデータから全天地輝度分布を算定する。

なお、使用する画像データは全て(360 度)として、各時刻の 3D 全天輝度分布のデータを作成し、それを基に 4D 全天輝度分布のデータの作成を試みる。

このデータを汎用の 3D 動画再生ソフト等により、任意の時刻・方向の立体角投射データを抽出し、任意の方向の面照度とその要因(画像データを基に、直達・拡散・反射光を判断)を分析できる。

4. おわりに

本報では、既往の研究成果を基づいて、360 度天空カメラの 3D デジタルデータを基に、4D 輝度分布デジタルデータを簡易に作成する方法について提案している。更に、それらの画像データを基に、直達・拡散・反射光とその要因に分けて、分析する方法も提案している。

これにより、任意の方位の天候別の採光計画を

簡易に行うことが可能となる。例えば、斜線規制の緩和措置として用いられる天空率は、人間の感覚と差異があることが課題となっている。しかし、天候別の 4D 天空地輝度分布データが整備されれば、天候・時刻別の南方向垂直面の平均輝度分布の差異の比較により、より人間の感覚に即した合理的な規制を制定することが出来る。また、光害についてもフィルム等により防除するのではなく、適度に拡散させるなど、光環境の改善に有効に活用することも可能になる。

今後は、実際の測定を行い、理論を検証するとともに、既存の拡張アメダスデータ等のマクロの気象と組合せ局所の光環境を推定する方法を提案する計画である。

参考文献

- 1) 小林仁:局所日射量の簡易測定法の開発 その1 測定原理, 空気調和衛生工学会東北支部・第 11 回学術・技術報告会論文集(掲載予定), 2022.3
- 2) 永村一雄他:天空輝度・放射輝度分布を推定する ALL Sky Model の改良, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 号, pp.121～127, 2021.3
- 3) 中村洋他:正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その 1. 写真測光法と正射影カメラ・感光材料), 日本建築学会論文報告集, 第 243 号, pp.73～79, 1976.5
- 4) 中村洋:正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その 2. 写真濃度の測定・校正・測定手順など), 日本建築学会論文報告集, 第 244 号, pp. 81～87, 1976. 6
- 5) 上谷芳昭:デジタルカメラによる輝度色度の測定, 平成 10 年度照明学会第 31 回全国大会, pp.128～129, 1998.10
- 6) 野口太郎他:ビデオカメラを用いた輝度分布測定システムについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp169～170, 1990.10
- 7) 松澤朋子他:雲量による照度と日射量の考察, 平成 15 年度照明学会, 第 36 回全国大会, pp.65～66, 2003.10
- 8) 中村洋他:全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布, 日本建築学会計画系論文集, 第 573 号, pp.33～40, 2003.11

A-9

HEMS が省エネ型ライフスタイルに及ぼす効果に関する事例調査

○二瓶満里愛（秋田県立大学），長谷川兼一（秋田県立大学），

竹内仁哉（秋田県立大学），松本真一（秋田県立大学）

Case study of the energy saving effect by HEMS in a detached house located in Akita.

Nihei Maria (Akita Prefectural University), Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University),
Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University), Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University)

キーワード：HEMS，省エネルギー，事例調査

1. はじめに

地球温暖化の進行により，家庭部門では温室効果ガス排出量を66%削減(2013年度比)する目標がある。家庭部門で温室効果ガスを削減するためには，家庭のエネルギー消費構造を把握する必要がある。加えて，居住者が無理せずともエネルギー消費を削減できるようにしなければならない。そこで家庭部門の省エネルギーを促進するシステムとしてHEMS(Home Energy Management System)の導入が進められている。

現状では設備で対策は講じられていることが多いが，特に家庭部門は省エネルギー行動を促すソフト面の対策も重要である。そこで，本研究では，実測を基にHEMSが省エネ型ライフスタイルに及ぼす効果について検討する。

2. 調査住宅概要

図-1に調査住宅の外観を示し，表-1に調査住宅の概要を示す。対象住宅は由利本荘市内に建設された木造2階建の戸建住宅で，暖房設備は，土間コンクリートの蓄熱暖房を主体としエアコンを予備に用いている。U_A値は0.41[W/(m²・K)]，C値は0.39[cm²/m²]である。家族構成は夫婦と子供2人の4人で妻は在宅である。



図-1 実測対象住宅外観

表-1 調査住宅の概要

住宅名称	N邸	
所在地	秋田県由利本荘市	
構造	木造	
住宅形式	戸建住宅	
家族構成	夫婦+子(2人)	
竣工年	2021年	
延床面積	128.85m ²	
断熱材	屋根	GW16K充填断熱120mm+付加断熱120mm
	壁	GW16K充填断熱120mm+付加断熱120mm
	基礎	ポリスチレンフォーム100+50mm
窓	サッシ	樹脂
	ガラス	Low-Eトリプル
暖冷房設備	エアコン，土間コンクリートの蓄熱暖房	
給湯設備	自然冷媒ヒートポンプ給湯器	
換気設備	第一種機械換気	
熱源	暖冷房	電気
	給湯	電気
	調理	電気

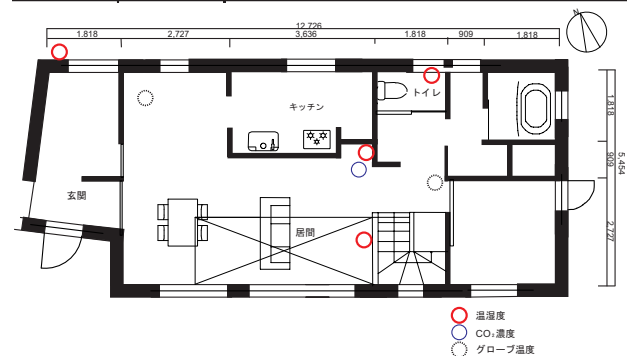


図-2(a) 1F平面図と測定器の設置概要

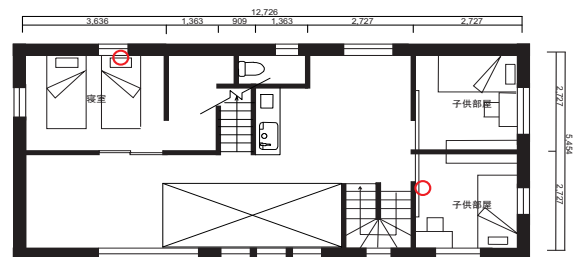


図-2(b) 2F平面図と測定器の設置概要

調査住宅には HEMS が導入されており、居住者は家庭内の電力収支を把握することができる。

3. 室内温熱環境実測

3.1 実測調査概要

図-2 に示す地点に測定器を設置し、温湿度と CO₂ 濃度、グローブ温度を 10 分間隔で測定している。測定は 2021/4/2 から開始し、現在も継続して測定している。

3.2 実測値による温熱環境グレード評価

調査住宅の温熱環境を総合的に評価するため、吉野のグレード評価法¹⁾に従って、各項目を 1(劣)～5(優)の 5 段階で評価した。表-2 に、グレード評価表と評価結果を示す。また、評価には 1 月の実測データを用いた。全グレードは 4.7 となり、対象住他の温熱環境レベルは高いものとする。

3.3 室内温度変動

図-3 に、8/2~8/8 の夏期における室内温度変動を示す。この期間の外気温は 23℃～35℃の範囲で推移していたが、N 邸の室内の温度は 25℃～27℃の範囲で推移していることがわかる。各室の温度を比較すると、土間の温度は低いが、その他の室の温度には差はなく、N 邸の室ごとの温度分布は小さいことが確認された。

図-4 に、10/25~10/31 の中間期における室内温度変動を示す。この期間の室内温度は 22℃～28℃の間で変動していることが確認できる。寝室の温度が最も低く、これは寝室は北側に位置し日射取得が他室より小さいためであるとする。

図-5 に、12/13~12/19 の冬期における室内温度変動を示す。温度変動において、この期間の N 邸の室内温度は 20℃～27℃の範囲で変動していることが確認できた。測定箇所内の温度変動は幅が大きいとはいえないが、室ごとに温度差が見られた。

表-2 温熱環境グレード評価

グレード		1	2	3	4	5	N邸	グレード評価
居間 温度	床上1.1mの温度	12	15	18	21	24	23.5	5
	上下温度差 ^{*1}	10	8	6	3	0	0.98	5
	グローブ温度差 ^{*2}	-3	-2	-1	0	1	-0.3	4
	明け方の最低温度 ^{*3}	2	6	10	14	18	21.2	5
寝室の温度(団らん時) ^{*4}		4	8	12	16	20	16.7	4
便所・廊下の温度(団らん時) ^{*4}		2	5	8	11	14	17.8	5
平均								4.7

*1 床上1mの温度が20℃、外気温が0℃の時の値。
 *2 グローブ温度と床上1m温度との差。
 *3 外気温が0℃の時の値。
 *4 団らん時に、居間の床上1mの温度が20℃、外気温が0℃の時の値。

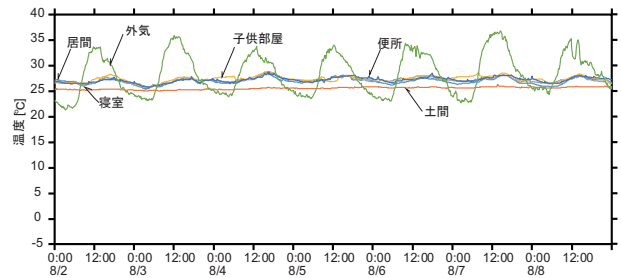


図-3 夏期における室内外温度変動

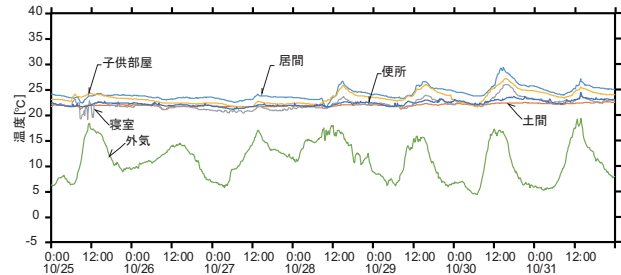


図-4 中間期における室内外温度変動

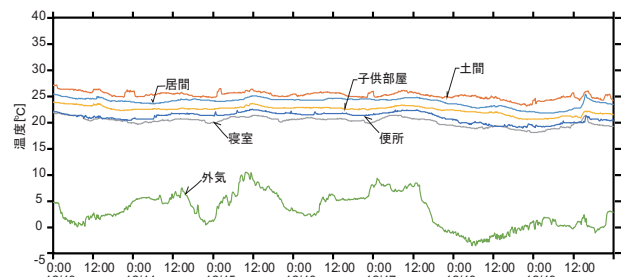


図-5 冬期における室内外温度変動

4. HEMS データに基づく消費電力量の実測

4.1 実測調査概要

HEMS データの測定間隔は 30 分である。測定は 2021/4/2 から開始し、現在も測定を継続している。

4.2 実測調査結果

図-6 に 8/2~8/8 の夏期における消費電力量の変動を示す。この期間の一日の消費電力量の平均値は約 23.9kWh であった。エアコンによる冷房は 8~22 時に運転され、一日当たり平均約 14.3kWh であった。

図-7 に 10/25~10/31 の中間期における消費電力量の変動を示す。この期間の一日の消費電力量の平均値は約 14.6kWh であった。空調が約 0.1kWh、給湯が約 3.9kWh であった。

図-8 に 12/6~12/13 の冬期における消費電力量の変動を示す。この期間の一日の消費電力量の平均値は約 30.0kWh であった。空調が約 13.3kWh で、22~8 時に土間コンクリートの蓄熱による暖房をしていた。

5. ヒアリング調査に基づくHEMSが省エネ型ライフスタイルに及ぼす効果の検討

5.1 実測調査概要

調査内容は、機器の制御などHEMS機能に関するものと、夏期、中間期、冬期の室内温熱環境に関してヒアリングして調査を実施した。

5.2 HEMS機能の使用実態

居住者は発電量や消費電力量など電力状況の表示機能は良く閲覧しエアコンの運転方法を判断していた。給湯器には、外出先から湯はりができる機能があるが、ライフスタイルと合っておらず使用していないことが確認された。また、家電においては、HEMS未対応のため、HEMSを使用していないことが多かった。

5.3 室内温熱環境と省エネ型ライフスタイル

夏期においてエアコンによる冷房が使用され、設定温度は25℃、運転時間は7~21時の間が多いが、8/2~8/8は外気温が高かったため、夜間も運転していたことが確認された。冬期において、暖房は土間コンクリートの蓄熱暖房を使用していたが、太陽光発電による発電量をHEMSで閲覧し蓄熱暖房に加えてエアコンを使用するか判断していた。蓄熱暖房の設定温度は30℃~50℃と決まった値ではなく、室内の温度計と天気予報から夜間にどのように蓄熱させるか判断していた。

HEMSは家電の操作においては、家電の使用方法与HEMS機能が合致しない限り活用度は低いが、暖冷房設備の操作の判断に用いられることが確認された。その際に閲覧される項目は発電や消費電力量の表示であり、エネルギー収支が見える化することは居住者の省エネルギー行動へつながっていると考えられる。

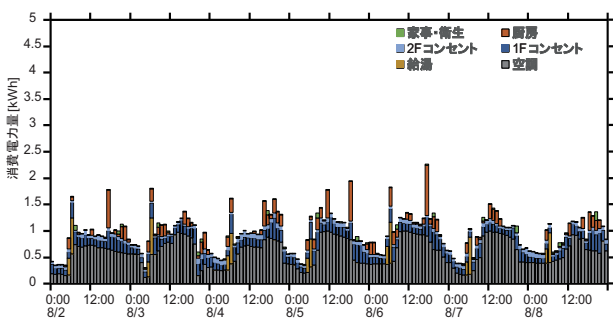


図-6 夏期における消費電力量変動

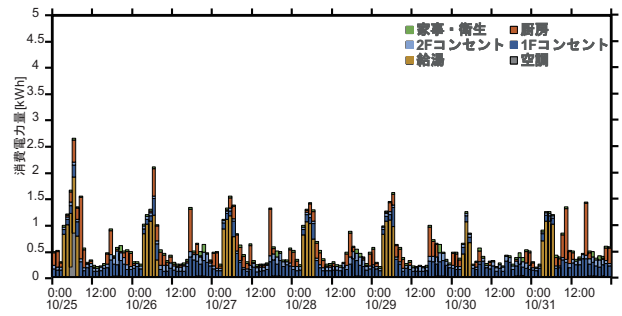


図-7 中間期における消費電力量変動

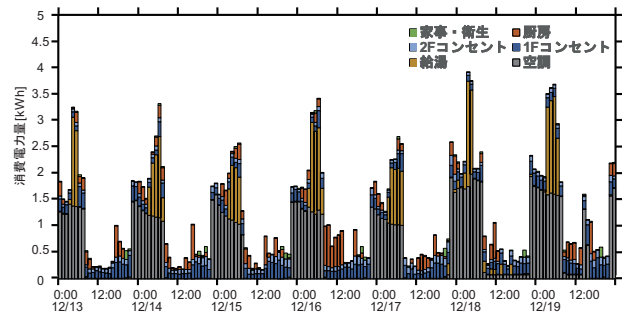


図-8 冬期における消費電力量変動

6. 冷暖房負荷と室内温熱環境に関する数値計算

6.1 数値計算概要

HEMSによるエネルギーの見える化は居住者の冷暖房設備の操作の判断材料となっていることが分かったが、冷暖房設備の設定温度など操作自体は居住者の体感によるものであった。そこで、冷暖房負荷を削減した場合の室内温熱環境を計算し、HEMSが省エネルギー行動に働きかけるための課題を検討する。

数値計算には動的熱負荷計算ツールTANSYS²⁾を用いて実測住宅における年間冷暖房負荷とPMVを算出する。表-3に計算条件を示す。家族構成は夫婦とその子供2人の4人家族とし、気象データは拡張アメダスデータ³⁾の由利本荘市(標準年)を用いた。冷暖房負荷の削減は省エネルギー行動によるものとするため、計算条件は冷暖房設備の設定温度を変更することによって行った。

表-3 数値計算モデルの概要

項目	計算条件
家族構成	4人(夫婦+子供 2人)
住宅属性	木造住宅
気象条件	秋田県由利本荘市 (標準年)
換気条件	0.3[回/h]
暖房設定温度	現状(25℃)→計算(22℃)

6.2 数値計算結果

図-9に年間冷暖房負荷の計算結果、図-10に測定期間中最も平均外気温が低かった12月における暖房負荷の計算結果を示す。年間冷暖房負荷において、現状モデルの年間冷暖房負荷は23.8[GJ]であったが、検討モデルでは15.9[GJ]と約33%削減できた。12月における暖房負荷においては、現状モデルの暖房負荷は3.5[GJ]であったが、検討モデルでは2.8[GJ]と20%削減できた。快適性評価のためにPMVを計算する。計算条件は、代謝量を1.2[met]、気流速度を0.1[m/s]、着衣量を0.7[clo]と1.0[clo]、室内温度、相対湿度、グローブ温度は計算より算出しPMVの条件とした。12月におけるPMVの平均値は現状モデルが-0.27であったのに対し、検討モデルは-0.91という結果になった。ヒアリング調査から冬期における着衣量が約0.7[clo]と薄着で生活していることが明らかになっており、冬期の標準的な着衣量とした場合のPMVの値は-0.40とPPDが10%以下になるような値になったことから、暖房の設定温度を省エネルギー側にするだけでなく、着衣量を増やすことで室内温熱環境を快適に維持したまま暖房負荷を削減できるという計算結果となった。

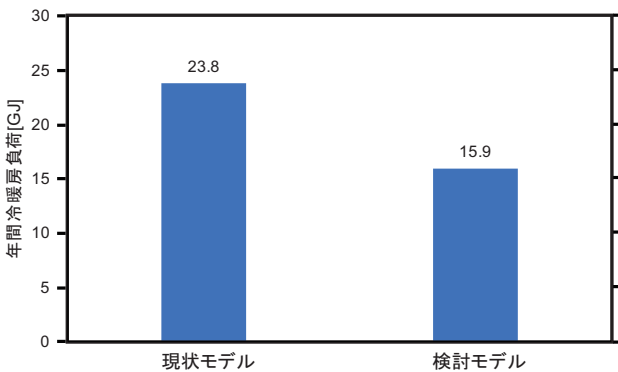


図-9 年間冷暖房負荷計算結果

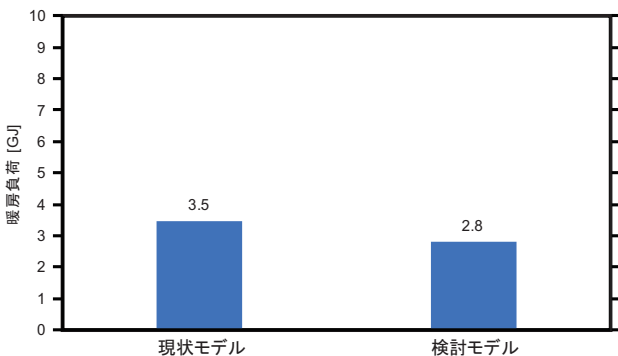


図-10 12月における暖房負荷計算結果

7. まとめと今後の課題

発電量や消費電力量の電力表示は居住者の暖冷房設備の運転の判断材料となっているが、家電に対応する機能は使用されないことが多い。室内温熱環境において、暖房期間中の室内温度を現状よりも低くしても快適な温度は維持できると考え、暖房用エネルギーの削減につながると期待できる。

謝辞

本研究における実測調査を行うにあたっては、志村建設株式会社、ならびに対象住宅のご家族の皆様にご理解とご協力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

なお、本研究に対しては、秋田県立大学・研究倫理審査委員会の承認（承認番号 県大研-246）を得ている。

参考文献

- 1) 長谷川房雄, 吉野博ほか: 東北地方の各種住宅における冬期の室温に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, 第371号, pp.18-26, 1987.1.
- 2) Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Medison
- 3) 日本建築学会: 拡張アメダスデータ 1981-2000, 2005.8

A-10

住宅のダンプネスとシックハウス症状との
因果モデルの構築に関する基礎的研究

○斎藤涼平（秋田県立大学），長谷川兼一（秋田県立大学）

松本真一（秋田県立大学），竹内仁哉（秋田県立大学）

Study on a causal structure model of Sick Building Syndrome
related to Home Dampness

Ryohei Saito(Akita Prefectural University), Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University),
Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University), Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University)

キーワード：ダンプネス，シックハウス症状，DAG

1. はじめに

近年，住宅の高気密化や不適切な換気によって室内の湿度が上昇し，微生物汚染等による健康影響が懸念されている。室内の高湿度環境（ダンプネス）はアレルギー性疾患の発症リスクを高めるとの報告もあり，居住環境が健康に及ぼす影響が注目されている。しかしながら，住宅のダンプネスが健康に影響しているといった因果関係を明らかにしている知見は少ない。

ダンプネスから健康に連鎖する因果構造は図1に示すように，室内環境の汚染が介在していると仮定できる。また，冬季の低湿度環境（ドライネス）による乾燥も健康に影響を及ぼすとされており，本研究グループでは冬季の乾燥感に関するアンケート調査を行っている。本研究ではダンプネスに焦点を当て，アンケート調査データを用いて因果モデルを構築し，健康影響との因果関係を明らかにすることを目的とする。

2. 調査概要

調査はインターネットを用いたアンケート調査であり，調査対象の条件を①築後1年以上15年未満の戸建住宅に居住する世帯，②居間と寝室の2室以上を有し，寝室で就寝する世帯としている。なお，可能な限り新しい住宅を選定している。

アンケート調査における調査対象地域は，東北地方6県に加えて北海道と関東地方とし，本研究に必要な標本数を各地域300世帯以上と設定した。表1にアンケート調査の質問項目を示す。調査は2020年1月16日～20日の5日間を実施した。

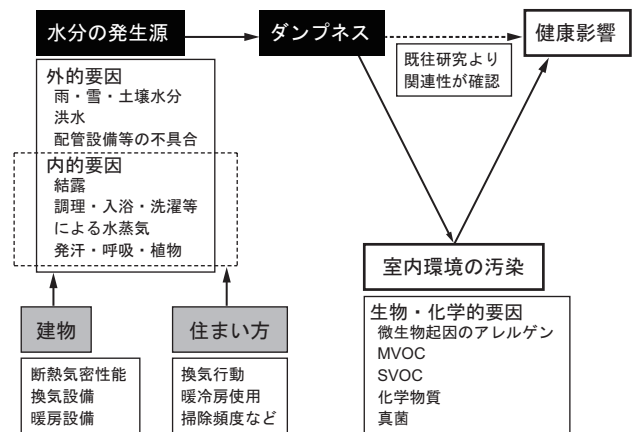


図-1 ダンプネスと健康影響の因果構造の例

表-1 アンケート調査の対象地域，配布数，回収数，回収率

調査地域	配布数	回収数	回収率 (%)
北海道	691	355	51.4
青森県	496	359	72.4
岩手県	426	313	73.5
宮城県	629	381	60.6
秋田県	408	309	75.7
山形県	429	314	73.2
福島県	576	309	53.6
関東	625	375	60.0
合計	4,280	2,715	63.4

表-2 アンケート調査内容

居住者特性	性別，年齢，職業，治療中の病気，喫煙状況
建物特性	築年数，周辺状況，仕上げ材（床/壁/天井），窓の構成
設備	暖房器具の種類，換気設備の種類
冬季の住まい方と室内環境	暖房時間，換気時間，加湿・除湿方法，加湿場所，主な洗濯物干し場所，窓を開ける頻度，団らん時の服装，結露状況，カビ・カビ臭発生場所，冬季の環境上の問題
冬季の室内環境の感じ方	起床時/団らん時の温冷感，適温感，乾湿感，乾湿度受容度，空気質の認識，静電気の発生状況
冬季の自覚症状	眼/鼻/気道・喉/皮膚症状の頻度，通院の有無，原因
知識・対策	カビ・湿気対策，ダニ対策，化学物質による空気汚染対策，シックハウス・アレルギーに関する知識

3. 調査結果

3.1 ダンプネスの評価方法

本研究の分析で用いるダンプネスの評価項目を表3に示す。回答者が容易に判断できる結露・カビの発生や、知覚が可能なカビ臭を評価項目とした。結露の発生箇所は窓以外での発生の方が問題が大きいとし、冬季にガラス面での結露の程度・頻度が高いほど点数が加算されていく。カビ・カビ臭の発生箇所では、水回り以外での発生を加点が大きいとした。以上8種類の各項目を3点満点で評価し、その合計より(24点満点)ダンプネスの程度を評価する。

3.2 信頼性分析

信頼性分析とは、その尺度にどの程度再現性が認められるかを評価し、クロンバックの α 係数が用いられる。ダンプネスの評価のように複数の質問項目を選定し、その合計値を尺度に用いる場合、各質問項目が全体として同じ概念や対象を測定しているか、内的整合性を評価する必要がある。このように、クロンバックの α 係数は内的整合性を示す指標であり、一般に0.8以上あれば内的整合性が十分高いと言える。ダンプネスの評価指標の質問群の再現性を検討するため、クロンバックの α による信頼性分析を実施した。

表4に分析結果を示す。全ての項目で安定的に α 係数で0.8前後の値を示しており、再現性の高い尺度を用いてダンプネスの評価ができていると考えられる。

3.3 ダンプネスの程度

図2にダンプネスの程度分布を示す。ダンプネスの程度は、上記に示した評価法で点数を付け、四分位に基づいて0~6.3をランク1、6.3~10.5をランク2、10.5~13.3をランク3、13.3~24.0をランク4とする。図を見ると、分布はランク1に集中する傾向がみられる。原因として、本調査が築年数の新しい住宅を優先的に選定しているため、ダンプネスの程度に偏りが生じてしまったと考える。

3.4 シックハウス症状の有症率と

ダンプネスの程度との関連

各自覚症状の有症率は、鼻症状9.3%、目症状6.6%、喉症状5.3%、皮膚症状3.6%である。

図3にダンプネスの程度のランクとシックハウス症状の有症率を示す。目の症状と喉の症状はランクが高くなると有症率が有意に高くなっている。また、ど

のランクにおいても有意ではないが鼻症状の有症率が高くなっている。

表-3 ダンプネスの評価項目

(1) 居間・寝室の結露箇所 (3点×2室)	「窓ガラス、窓枠、外気に面する扉等」とそれ以外での発生箇所の数により評価。
(2) 居間・寝室の窓ガラスの結露の程度 (3点×2室)	「なし」～「水滴が流れる程度」までの程度により評価。
(3) 居間・寝室の窓ガラスの結露の頻度 (3点×2室)	「なし」～「常に発生する」までの頻度により評価。
(4) 浴室以外のカビの発生箇所 (3点)	「なし」～「3箇所以上」までの発生居室の数により評価。
(5) カビ臭の発生箇所 (3点)	「台所・洗面所・浴室」とそれ以外での発生居室の数により評価。

表-4 信頼性分析結果

評価項目 (クロンバックの α 係数: 0.821)	修正済み項目 合計相関	項目が削除された場合		
		尺度の平均値	分散	クロンバックの α 係数
居間: 結露箇所	0.612	3.031	14.734	0.797
寝室: 結露箇所	0.626	2.982	14.733	0.796
居間: 結露程度	0.538	2.902	13.439	0.802
居間: 結露頻度	0.691	2.902	12.511	0.777
寝室: 結露程度	0.588	2.845	13.066	0.794
寝室: 結露頻度	0.683	2.801	12.074	0.779
カビ: 発生箇所	0.451	3.021	14.547	0.813
カビ臭: 発生箇所	0.199	3.177	16.547	0.836

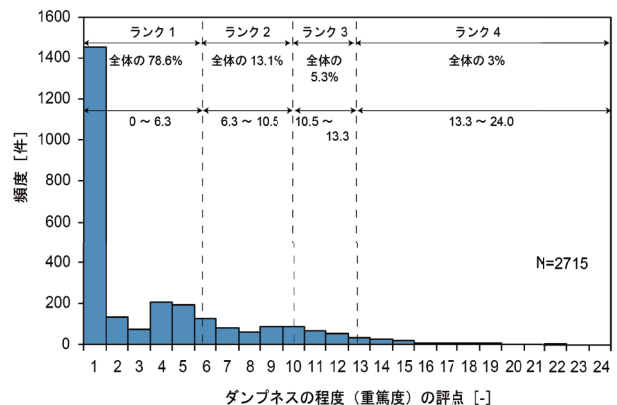


図-2 ダンプネスの程度分布

4. 統計的因果推論に基づく分析

4.1 DAG(directed acyclic graph)³⁾

DAG(directed acyclic graph)は、研究対象となっている因果メカニズムをグラフによって適切に表現できる。曝露、アウトカム、共変量を含めた因果関係に関する研究仮説を可視化し、交絡因子を同定する際に有効である。

4.2 DAG(directed acyclic graph) の構築

DAGを作成する際は、研究者自身の研究仮説を明確に定義する必要があり、本研究は「ダンプネスの程度が大きくなるほど、シックハウス症候群になりやすい」という研究仮説を定義している。また、共変量を含めた変数を調整することでDAGが完成し、調整した変数は交絡因子として多変量解析に投入される。

図4に構築したDAGを示す。本研究では、「対象地域」、「周辺状況」、「職種」を交絡因子として同定し、曝露とアウトカム間の因果の有無を推論する。

4.3 分析概要

アンケート調査結果を用いて、ロジスティック回帰分析^{注1)}を行った。DAGによって同定された交絡因子である「対象地域」、「周辺状況」、「職種」に加え「ダンプネスの程度」を独立変数、各部位の「シックハウス症状」を従属変数として分析を行い、調整オッズ比(AOR)^{注2)}を算出した。

4.4 多変量解析結果

表5～8に目、鼻、喉のシックハウス症状を従属変数とした多変量解析結果を示す。

目の症状では、「ランク3」以外では、ダンプネスの程度が大きくなるほどAORが有意に大きくなる傾向が確認できる。特に、ダンプネスの程度の「ランク4」では、AOR=2.53(p<0.05)となり、住宅のダンプネスとの関連性が明確に表れている。

鼻の症状ではどのランクも有意とはならなかったが、「ランク4」におけるオッズ比は1.74となっている。

喉の症状では、全てのランクで有意となり、ダンプネスの程度が大きくなるほど、AORが大きくなる事が確認できる。これらは、長谷川ら²⁾のダンプネスの程度とアレルギー疾患の有症率に明確な関連がみられるという知見と整合している。

5. まとめと今後の展望

住宅のダンプネスと健康影響との因果関係を明らかにするため、統計的因果推論に基づき分析をした。その結果、以下のことが分かった。

まず、DAGの構築を通じて曝露とアウトカム間に影響を与える変数を判断することができ、「対象地域」、「周辺状況」、「職種」が調整すべき交絡因子として同定された。

多変量解析の結果、ダンプネスの程度ランクが大

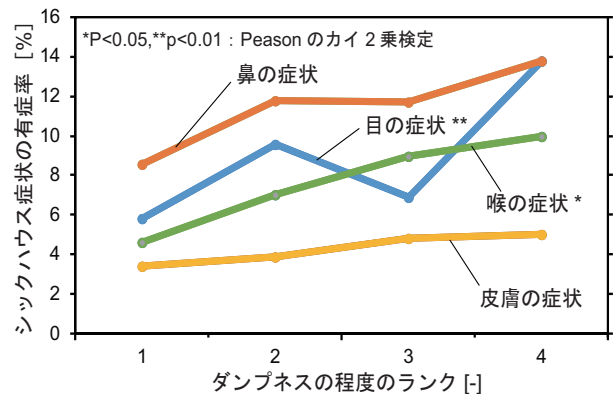


図-3 ダンプネスの程度とシックハウス症状の有症率との関係

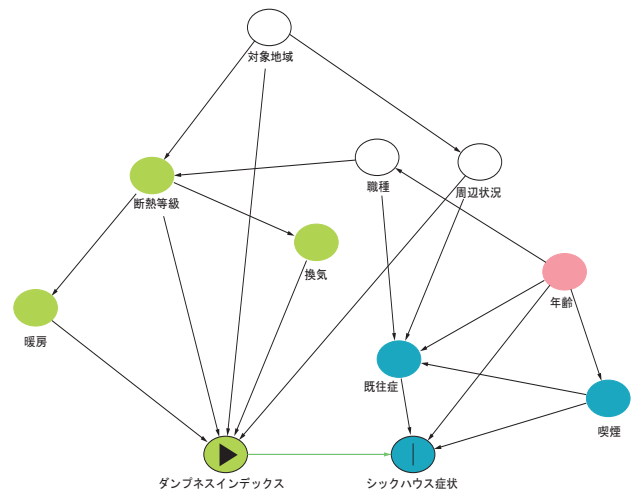


図-4 構築した DAG

表-5 目の症状に対する多変量解析結果

要因	オッズ比	95%信頼区間		有意確率
		下限	上限	
ダンプネスの程度ランク				
ランク1	1.00			
ランク2	1.73	1.16	2.59	0.010 *
ランク3	1.17	0.60	2.30	0.640
ランク4	2.53	1.30	4.94	0.010 *
p for trend				0.000 ***

交絡要因：対象地域、周辺状況、職種 HosmerとLemeshowの検定：0.846
***p<0.001,**p<0.01,*p<0.05

表-6 鼻の症状に対する多変量解析結果

要因	オッズ比	95%信頼区間		有意確率
		下限	上限	
ダンプネスの程度ランク				
ランク1	1.00			
ランク2	1.43	1.00	2.04	0.050
ランク3	1.40	0.82	2.38	0.220
ランク4	1.74	0.90	3.36	0.100
p for trend				0.080

交絡要因：対象地域、周辺状況、職種 HosmerとLemeshowの検定：0.884
***p<0.001,**p<0.01,*p<0.05

きくなるほど特に目症状や喉症状の健康リスクが高くなることを確認でき、用量-反応関係^{注3)}の存在を示唆する確認を得た。よって、ダンプネスとシックハウス症状間の因果関係が明示されているといえる。

日衛誌, 64, pp796-805, 2009.

今後は DAG を用いることの有用性の検討や、実測調査などのサンプル数を増やし、ダンプネスの程度が大きい住宅の居住環境要因を明らかにしていく予定である。

表-7 喉の症状に対する多変量解析結果

要因	オッズ比	95%信頼区間		有意確率
		下限	上限	
ダンプネスの程度ランク				
ランク1	1.00			
ランク2	1.61	1.02	2.55	0.040 *
ランク3	1.99	1.08	3.65	0.030 *
ランク4	2.25	1.05	4.85	0.040 *
p for trend				0.010 *

交絡要因：対象地域，周辺状況，職種

HosmerとLemeshowの検定：0.927

***p<0.001,**p<0.01,*p<0.05

謝辞

本研究を行うにあたっては、関係各位にご理解と多大なる協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。なお、本調査の実施に対して、秋田県立大学・研究倫理審査委員会の承認（承認番号 県大研一 435）を得ている。

注釈

- 1) ロジスティック回帰分析とはある事象に対していくつかの要因が影響を及ぼしている場合、その関連性の強さを予測する手法である。
- 2) オッズ比とは、ある要因を有する人がそれを有しない人に比べ、ある結果をもたらす可能性の高さを示す統計的な尺度である。単変量解析で得られるオッズ比を調整しないオッズ比、多変量ロジスティック回帰分析で得られたオッズ比は交絡要因を考慮して得られた調整オッズ比であり、オッズ比と区別するために「調整オッズ比」と呼ぶ。

参考文献

- 1) 増田早也花：冬期の居住空間における乾燥感のメカニズムに関する研究，令和2年，秋田県立大学 修士論文
- 2) 長谷川兼一 他：住宅のダンプネスのアンケートによる評価法の提案と子供のアレルギー疾患に及ぼす影響に関する全国調査，日本建築学会環境系論文集，第81巻，第723号，pp.477-485，2016年5月
- 3) 医学における因果推論 第二部 交絡要因の選択とバイアスの整理および仮説の具体化に役立つ Directed Acyclic Graph,

A-11

住宅における低湿度環境が健康に及ぼす影響に関する調査研究

○田村 成 (秋田県立大学), 長谷川兼一 (秋田県立大学)

松本真一 (秋田県立大学), 竹内仁哉 (秋田県立大学)

A study on the adverse health effect of home low-humidity environment

Jo Tamura (Akita Prefectural University), Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University),
Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University), Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University)

キーワード：低湿度環境, DAG, 健康影響

1. はじめに

近年、住宅の高断熱・高气密化に伴って、冬季の室内で低湿度な環境が発生しやすくなり、それは皮膚、喉、眼の乾燥と関連しているといわれている。乾燥には、皮膚水分量の減少や目や鼻、喉の粘膜の乾燥などの生理反応としての乾燥と、「乾燥を知覚する」という心理反応としての乾燥に分類することができる。後者を「乾燥感」といい、2020年冬季に実施された調査研究¹⁾では、乾燥感のメカニズムを明らかにすることを目的として乾燥感についての分析・考察がなされた。しかしながら、低湿度環境が人体に及ぼす影響についての分析には至っていない。

そこで、本研究では低湿度環境への曝露が健康に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、実施済み調査のデータを用いて低湿度環境と健康の因果モデルを作成し、分析を行った。

2. 実施済み調査概要

2.1 調査対象の選定

調査はインターネットを用いたアンケート調査である。調査対象として条件に合う世帯を選定するため、予め事前調査を実施し、調査対象の条件を、①築後1年以上15年未満の戸建住宅に居住する世帯、②居間と寝室の2室以上を有し、寝室で就寝する世帯としている。

調査対象地域は、東北地方6県に加えて北海道と関東地方である。調査は2020年1月16日～20日の5日間で実施され、有効回答数は2,715件であった。

表-1 アンケート調査の質問項目

居住者特性	性別, 年齢, 職業, 治療中の病気, 喫煙状況
建物特性	築年数, 周辺状況, 仕上げ材(床/壁/天井), 窓の構成
設備	暖房器具の種類, 換気設備の種類
冬季の住まい方と室内環境	暖房時間, 換気時間, 加湿・除湿方法, 加湿場所, 主な洗濯物干し場所, 窓を開ける頻度, 団らん時の服装, 結露状況, カビ・カビ臭発生場所, 冬季の環境上の問題
冬季の室内環境の感じ方	起床時/団らん時の温冷感, 適温感, 乾湿感, 乾湿度受容度, 空気質の認識, 静電気の発生状況
冬季の自覚症状	眼/鼻/気道・喉/皮膚症状の頻度, 通院の有無, 原因
知識・対策	カビ・湿気対策, ダニ対策, 化学物質による空気汚染対策 シックハウス・アレルギーに関する知識

2.2 調査項目

表-1にアンケート調査の質問項目を示す。調査では、年齢、職業などの居住者特性、築年数などの建物特性、暖房器具の種類などの設備、暖房や換気やカビの発生などの住まい方と室内環境、冬季における室内環境の感じ方、各部位の自覚症状の有無、カビや湿気に対する知識や対策について尋ねている。各部位の自覚症状については、症状の有無を尋ねた後、その症状での通院経験の有無やその症状の原因について尋ねている。

3. 低湿度環境と健康の因果モデル

3.1 DAGとは

DAG (directed acyclic graph) は非巡回有向グラフとも呼ばれ、暴露とアウトカム間の因果関係を推測する因果推論において、研究仮説を提示する際や交絡変数を探索する際に用いられる有用かつ簡便なツールとされている²⁾。

今回の分析を行うにあたり、アンケート調査の結

果より DAG を構築し、交絡変数を探索する。

3.2 研究仮説

DAG を構築するにあたり、研究仮説を立てる必要がある。研究仮説は暴露とアウトカムで構成される。本研究では、低湿度環境が健康に及ぼす影響について明らかにすることを目的としている。そのため、研究仮説における暴露は「居住空間が低湿度環境に暴露されていること」となり、アウトカムは「乾燥による健康影響」となる。

3.3 DAG の構築

図-1 に「居住空間が低湿度環境に曝露されていると、乾燥を原因とする居住者の健康に影響を及ぼす」という研究仮説のもと構築した最終的な DAG を示す。DAG 内にある変数は、アンケート調査の質問項目である居住環境要因を選定し取り入れ、DAG を構築している。

この DAG において、「性別」、「既往症」、「職業」、「団らん時乾湿感」、「起床時乾湿感」が交絡変数と認められ、これらを調整することで因果関係を分析できる。

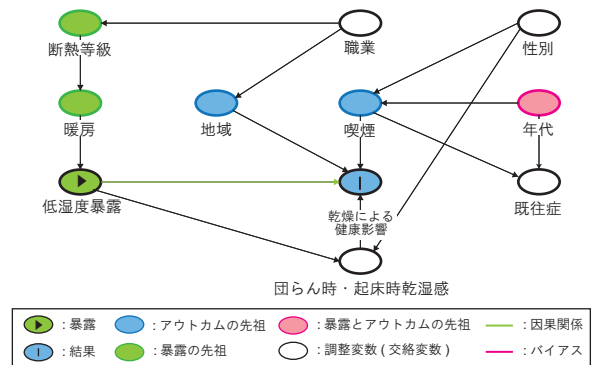


図-1 低湿度暴露と健康影響についての DAG

表-2 乾燥指標の評価方法

(1) 静電気の発生頻度 (3点)	
3.0点	: ほとんど毎日発生する
1.5点	: 時々発生する
0点	: 全く発生しない
(2) カビの発生している部屋 (3点)	
3.0点	: カビは発生していない
2.0点	: 寝室/居間/子供室 以外の箇所で発生
1.0点	: 上記の1部屋で発生
0点	: 上記の2部屋以上で発生

4. 低湿度環境を代表とする乾燥指標

4.1 乾燥指標の評価方法

アンケート調査の質問項目の中で、居住空間での低湿度環境への暴露の程度を評価することが可能な質問を点数化し、低湿度環境への暴露の程度を評価可能とする指標（乾燥指標）を作成した。

表-2 に示すように、アンケート調査の質問項目で低湿度環境への暴露を評価可能性のある「静電気の発生頻度」と「カビの発生している部屋」を評価項目とする。「静電気の発生頻度」では、静電気の発生頻度が高いほど、また「カビの発生している部屋」では、カビが発生していない部屋が多いほどそれぞれ点数が高くなる。これら2つの各評価項目を3点満点とし、合計(6点満点)により低湿度環境への暴露の程度を評価する。

4.2 乾燥指標の評価結果

図-1 に乾燥指標の分布を示す。乾燥指標の点数の分布は、評点0以上～3.0未満をランク1、評点3.0以上～4.0未満をランク2、評点4.0以上をランク3とする。ランク3を低湿度環境への暴露の程度が最も重篤であると判別している。図を見ると、特に点数の分布が狭いランク2に多く分布していることが確認できる。

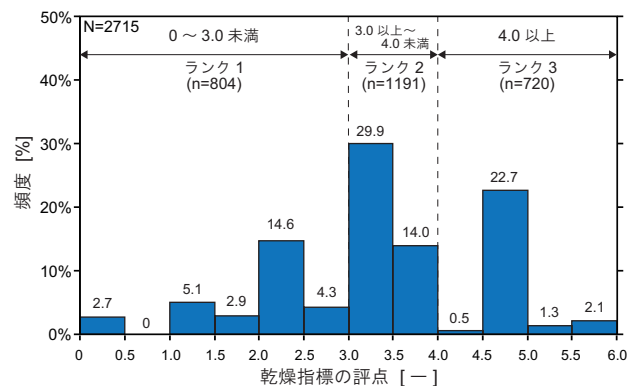


図-2 乾燥指標の分布

5. 低湿度曝露と自覚症状の因果関係

5.1 乾燥指標と自覚症状の関連性

低湿度環境への暴露の程度を評価する「乾燥指標」を作成した。暴露を「乾燥指標」、アウトカムを「乾燥による健康影響」として、因果関係を評価することを目的にロジスティック回帰分析を行った。アウトカムである各部位の「室内空気乾燥による自覚症状あり」^{注1)}を従属変数、暴露である「静電気の発生」、また構築した DAG において認められた交絡変数である「性別」、「既往症」、「職業」、「団らん時・起床時乾湿感」を独立変数に投入し、調整オッズ比を算出した。

表-3 に「乾燥指標」を原因とする気道・喉の

自覚症状の分析結果を示す。有意な結果は得られず、他の部位でも同様に、「乾燥指標」の程度が高いほど症状を自覚しやすいなどといった傾向は確認できなかった。

本論文では、乾燥指標の評価項目として「静電気の発生頻度」と「カビの発生する部屋」を用いて指標を作成した。しかし、「カビの発生する部屋」について、カビが発生していないと点数が高くなるが、カビが発生していないため低湿度環境へ曝露されているとは考えにくく、現状の「乾燥指標」では低湿度環境への曝露の程度を評価する指標としては適切ではないと考えられる。「乾燥指標」については評価項目や各ランクの点数分布なども含めて今後、再検討する必要がある。

5.2 評価項目と自覚症状の関連性

低湿度環境への曝露の程度を評価する「乾燥指標」を作成しロジスティック回帰分析を行ったが、有意な結果は得られなかった。そこで「乾燥指標」の評価項目である「静電気の発生頻度」と「カビの発生している部屋」を暴露要因とした場合の因果関係を評価することを目的にロジスティック回帰分析を行った。

曝露を「静電気の発生頻度」、アウトカムを「乾燥による健康影響」として、ロジスティック回帰分析を行った。なお、交絡変数は「性別」、「既往症」、「職業」、「団らん時・起床時乾湿感」を独立変数に投入している。

表-4に「静電気の発生頻度」を原因とする気道・喉の自覚症状の分析結果を示す。「静電気の発生頻度」では「ときどき発生する」で有意な結果となり、調整オッズ比が発生していないときと比べ大きくなっていることから、静電気が発生すると症状を自覚する傾向が見られた。

また、曝露を「カビの発生する部屋」とした場合の因果関係を確認するためにロジスティック回帰分析を行った。

表-5に「カビの発生する部屋」を原因とする気道・喉の自覚症状の分析結果を示す。「カビの発生する部屋」ではカビが発生しているほど（高湿度環境に曝露されているほど）症状を自覚している傾向がある。

これらの結果から、「静電気の発生」のような低湿度環境のみではなく、「カビの発生」のような高湿度環境に曝露されることによっても症状を自覚し

表-3 気道・喉の自覚症状と乾燥指標の関連性

変数	度数	調整オッズ比	95%信頼区間		有意確率
			下限	上限	
乾燥指標					
ランク1	804	1.00			
ランク2	1191	0.74	0.54	1.01	0.058
ランク3	720	0.78	0.56	1.11	0.165
p for trend					0.144

***p<0.001**p<0.01*p<0.05
交絡変数：性別、既往症、職業、起床時乾湿感、団らん時乾湿感
HosmerとLemeshowの検定：p=0.707

表-4 気道・喉の自覚症状と静電気の関連性

変数	度数	調整オッズ比	95%信頼区間		有意確率
			下限	上限	
静電気					
全く発生しない	1403	1.00			
ときどき発生する	1190	1.54	1.17	2.04	0.002**
ほとんど毎日発生する	122	1.37	0.77	2.44	0.281
p for trend					0.010**

***p<0.001**p<0.01*p<0.05
交絡変数：性別、既往症、職業、起床時乾湿感、団らん時乾湿感
HosmerとLemeshowの検定：p=0.915

表-5 気道・喉の自覚症状とカビの関連性

変数	度数	調整オッズ比	95%信頼区間		有意確率
			下限	上限	
カビの発生					
発生していない	170	1.00			
寝室/居間/子供室以外で発生	268	1.52	1.12	2.06	0.028**
上記の1部屋で発生	809	1.96	1.29	2.96	0.001***
上記の2部屋以上で発生	1468	1.98	1.20	3.26	0.007***
p for trend					0.001***

***p<0.001**p<0.01*p<0.05
交絡変数：性別、既往症、職業、起床時乾湿感、団らん時乾湿感
HosmerとLemeshowの検定：p=0.569

ており、既往研究での共分散構造分析の結果¹⁾と同様の傾向にあることが確認できた。

6. まとめと今後の課題

実施済みアンケート調査の再分析より、低湿度環境への曝露が健康に及ぼす影響について検討した。

- (1) 低湿度環境への曝露の程度を評価する「乾燥指標」を作成し、乾燥による健康影響との関連性について分析を行ったが、有意な結果は得られなかった。
- (2) 「静電気の発生頻度」では静電気の発生頻度が高いほど、「カビの発生している部屋」ではカビが発生している部屋が多いほど乾燥による症状を自覚しやすい傾向が見られた。
- (3) 建物特性や室内環境の知覚などが自覚症状に影響を及ぼすという既往の研究と同様な傾向があることが確認できた。

本論文では、DAGを用いて交絡変数を探索したが、DAGの構築には主観的な要素が強く、また専門的な知識も必要となる。よって、低湿度環境への曝露と健康影響の因果関係を明らかにするためには、より具体化したDAGを構築し適切な交絡要因を探索していくことが必要である。

また「乾燥指標」については、適切な評価項

目の選定，各ランクの点数分布などの課題があり，今後それらを踏まえて再検討していく予定である。

あとがき

本研究を行うにあたっては，関係各位にご理解と多大なる協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

なお，本調査の実施に対して，秋田県立大学・研究倫理審査委員会の承認（県大研-435）を得ている。

注釈

1) 目と鼻，気道・喉，皮膚の症状で通院し，空気の乾燥を原因とする居住者を「室内空気の乾燥による自覚症状あり」としている。

参考文献

- 1) 増田 早也花：冬季の居住空間における乾燥感のメカニズムに関する研究，令和2年度，秋田県立大学 修士論文，2021.3.
- 2) 鈴木 越治，小松 裕和，須藤 貴志，山本 英二，土居 弘幸，津田 敏秀：医学における因果推論 第二部・交絡要因の選択とバイアスの整理および仮説の具体化に役立つ Directed Acyclic Graph-，日本衛生学雑誌 第64巻 第4号，pp.796-805，2009.9.

A-12

高齢者施設の室内環境改善のための設計・運用に関する調査研究 (その5) 入所者や職員の温冷感や住まい方・介護方法の冬期実測調査

○野高文太郎 (秋田県立大学), 竹内仁哉 (秋田県立大学)

長谷川兼一 (秋田県立大学), 松本真一 (秋田県立大学)

Case study for Indoor Environment Improvement in Facilities for the Elderly
Part 5 Investigation of Thermal Sensation and Lifestyle
of the Elderly and Facility staff in three facilities of Akita during winter
Nodaka Buntaro (Akita Prefectural University), Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University),
Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University), Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University)

キーワード：高齢者施設, 実測調査, 温熱環境, 温冷感

1. はじめに

国内では介護認定された要介護・要支援高齢者が年々増加し、高齢者施設においては職員の人手不足などにより介護問題に直面している。厚生労働省による介護予防の定義¹⁾を鑑みると、高齢者施設における入所者の重度化を抑制するためには室内環境へのより一層の配慮が求められる。しかし、高齢者施設では適切な換気計画と冬期の加湿の必要性が依然として指摘されているものの、温湿度などの室内環境基準が明確に定められておらず、全国的に見ても客観的な判断に基づき運用されている事例は少ない。また、昨今の新型コロナウイルス感染症対策に伴う換気の促進や現行の温度制御主体の運用により、高齢者施設内の温湿度環境の悪化が懸念される。特に、体温調節機能や活動量、生理反応が異なる入所者と職員が同じ環境に暴露されるため、両者の健康にも影響が及ぶ可能性がある。

本研究では、秋田県内の3件の介護老人保健施設を対象とする室内温熱環境調査をはじめヒアリング

調査などにより、入所者の住まい方や職員の介護方法、施設の運用・管理方法などの実態を明らかにすることを目的とする。

2. 高齢者の室内暴露温度と健康影響に関する文献調査

2.1 調査概要 高齢者に対する室内の暴露温度と健康影響に関して文献調査^{2)~4)}を実施した。特に、寒冷環境や暑熱環境における健康影響や閾値について、建築物環境衛生管理基準や高齢者に配慮した住宅熱環境評価基準値⁵⁾、病院空調設備の設計・管理指針⁶⁾と比較しながら整理した。

2.2 寒冷・暑熱環境における健康影響と推奨値

寒冷環境では、より年配・女性の血圧が室温変動の影響を受けやすく²⁾、日中・夜間共に18℃を上回る温度が推奨される³⁾。一方、暑熱環境においてWHOのガイドライン⁴⁾では日本での推奨温度は言及されておらず、熱中症予防指標として、WBGT(Wet Bulb Globe Temperature：湿球黒球

表-1 施設概要

施設名称	施設A		施設Y	施設K
所在地	秋田県由利本荘市		秋田県由利本荘市	秋田県秋田市
施設形態	特別養護老人ホーム	ショートステイ	特別養護老人ホーム	特別養護老人ホーム
竣工年	2014/4/1		2014/6/1	2020/7/1
構造	鉄骨造		鉄骨造	鉄骨造
階数	平屋		平屋	2階建て
定員	50名	30名	50名	80名
居室構成	50室/個室	10室/個室, 5室/4人	50室/個室	80室/個室
共用空間	5エリア/階	1エリア/階	5エリア/階	4エリア/階
空調設備	冷房	エアコン(全館)		エアコン(全館)
	暖房	エアコン(全館)+床暖房(共用空間, 廊下)		エアコン(全館)+床暖房(共用空間, 廊下)
	加湿	空気清浄機一体型(共用空間)		空気清浄機一体型(共用空間)
換気設備	居室：天井埋め込み型換気扇(24時間換気) 共用空間：熱交換型換気扇(24時間換気)		居室：天井埋め込み型換気扇(24時間換気) 共用空間：熱交換型換気扇	天井換気扇(熱交換器付)

温度)が用いられる。しかし、WBGTは物理的環境指標であり、主に暑熱環境における労働環境や運動環境を対象に標準指標として規格化されているものの、体温調節機能や人体生理反応は考慮されていない。今後の課題として、暑熱環境や湿度についても十分な知見を得る必要がある。

3. 室内温熱環境の調査内容

3.1 施設概要 表-1に調査施設の概要を示す。対象施設は秋田県内の介護老人福祉施設3施設(施設Aのみショートステイも調査)で全て鉄骨造、築年数も比較的浅い。運用形態として、各施設とも個室が完備され、10人前後で食事や団欒が可能な共用空間を併設している。冷房設備として、各施設とも全館にエアコンが設置されているが、暖房設備は施設Kを除く施設A、施設Yにおいて床暖房が廊下や共用空間に導入されている。加湿設備は施設A、施設Yで空気清浄機一体型の業務用加湿器、施設Kでポータブル小型加湿器を共用空間もしくは、共用空間近くに設置している。換気設備は各施設とも熱交換型換気扇が導入されている。

3.2 調査概要

写真-1に測定風景を示す。各施設の居室2部屋と共用部1エリアを対象として、12/1～12/27の調査期間にて床上1.1mの温湿度やグローブ温度、CO₂濃度を20分間隔で連続測定した。

また、施設Aの特別養護老人ホーム(以降、特養)、ショートステイ(以降、ショート)を対象として、入居者や職員の着衣量に加え、1日の生活・行動範囲や介助状況、姿勢等に着目し、ヒアリング調査を行いながら行動観察を計2日間実施した。写真



写真-1 測定風景

写真-2 調査風景

-2に行動観察の調査風景を示す。

さらに、住まい方や着衣量の調査と同様に、施設Aの入所者や職員数名を対象に、温冷感や快適感についてアンケート調査を実施した。

4. 調査結果

4.1 室内温熱環境 図-1に3施設の実測結果に加え、3つの熱環境基準の範囲を示す。各施設の温度、湿度ともに、各管理基準から外れたデータが顕著に見られる。特に、3施設とも低湿度側で各基準から外れており、建築物環境衛生管理基準の下限相対湿度40%を下回る割合は、施設Aで52%、施設Yで60%、施設Kで91%である。以上より、加湿が行われているものの、湿度環境に課題がある点は既往研究⁷⁾と同様である。

4.2 住まい方や介護状況、着衣量 要介護度は特養で平均4.2、ショートで平均3.1と異なる。職員の介護状況として、ショートでは入居者が自ら食器を運び、トイレの介助が不要な入所者が多く、入所者

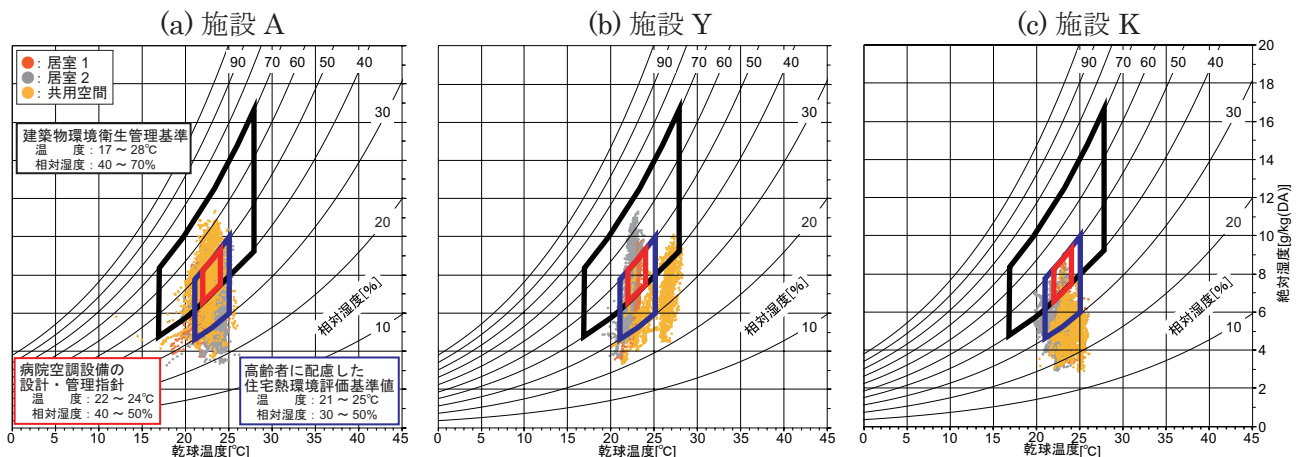


図-1 冬期の実測調査と各管理基準値の比較 (特別養護老人ホームを対象)

1人あたりの介護負担は特養の職員より小さいようである。また着衣量は職員より入所者の方が厚着傾向である。しかし、職員は一部の介助行為を除き常にマスクを着用しており、少し動いただけでも暑い、息苦しいと申告している。暖房設備の運用方法として、特養とショートのどちらも床暖房は25℃、エアコンは20℃で朝方～夜間運転されているが、エアコン（廊下）のみ各居室に暖房空気が届くように24時間運転されている。入所者から寒いとの申告があれば職員が0.5℃ずつ設定温度を変更している。

4.3 温冷感申告値と快適感申告値・SET*の関係

図-2に施設Aの特養とショートでの入所者・職員・調査員の温冷感申告値と快適感申告値、SET*（標準新有効温度）の関係を示す。なお、風速は静穏な環境とみなし0.1m/s、各代謝量は実際の生活・介助行為に近い代謝量を選定しSET*の算出に用いた。特養について、温冷感申告値と快適感申告値の関係は、温冷感申告に振れ幅はあるものの、入所者、職員共に「快適」と申告している。温冷感申告値とSET*の関係については、職員Aの温冷感申告に対してSET*が27.4℃をとっている箇所があり、これは気流等の影響であると考えられる。ショートについて、温冷感申告値と快適感申告値の関係は、入所者と職員の介助行為によらず室温に対する温冷感が「暑い」側であるほど快適感は「快適」との申告が多い。温冷感申告値とSET*との関係において、ASHRAEではオフィスの快適範囲をSET*=22.2～25.6℃としているが、調査エリアではエアコン以外に床暖房の運転に加え、施設Y、施設Kより湿度が比較的高い傾向にあり、SET*=27℃前後が多い。職員の介助行為に着目すると、例えば事務作業の場合SET*=30℃近くで、温冷感申告値は「暑い」側となる。また、入浴介助や入所者の排泄介助の場合、SET*=22～24℃程度で、温冷感申告値は「暑い」側となり、職員の介助行為により着衣量や代謝量の変動する事が要因と考えられる。

5. 低湿度環境改善のための加湿方法の検討

5.1 必要換気量の推定 図-3に各施設の換気量の推定結果を示す。1人当たりの換気量は、測定した室内の二酸化炭素濃度を用いてザイデル式より算出した。推定した換気量は、施設Aにおける各空間の平均換気量が約61m³/(h・人)、施設Yが約

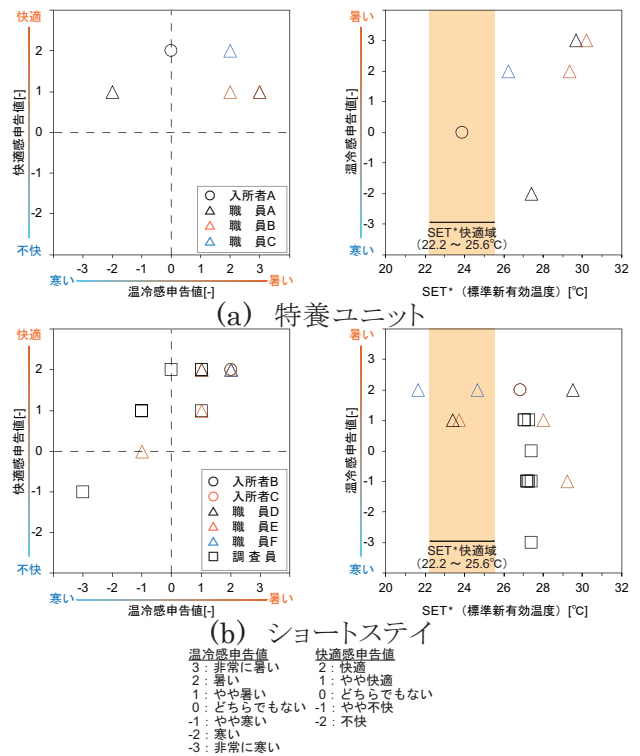


図-2 温冷感申告値と快適感申告値・SET*の関係

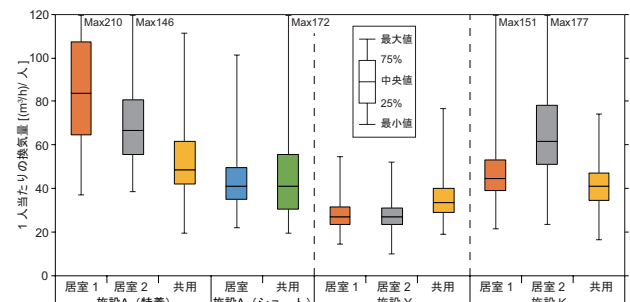


図-3 換気量の推定結果

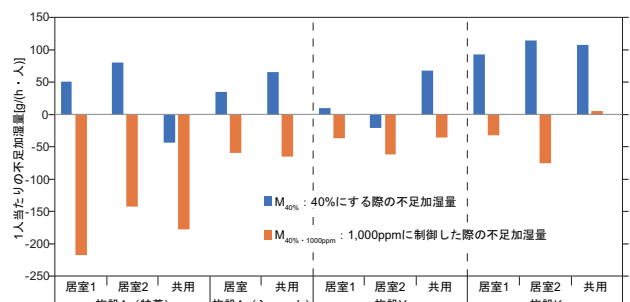


図-4 各施設における不足加湿量の推定結果

31m³/(h・人)、施設Kが約52m³/(h・人)である。
5.2 加湿量の推定 各施設の推定換気量を用いて、相対湿度を40%にするために必要な1人当たりの不足加湿量M_{40%}[g/(h・人)]と、室内のCO₂

濃度を 1,000ppm に維持し換気量を制御した上で、相対湿度を 40% にするために必要な不足加湿量 $M_{40\% \cdot 1000ppm}$ [g/(h・人)] を開原らと同様の方法で推定⁸⁾した。図-4 に各施設の不足加湿量の推定結果を示す。不足加湿量 $M_{40\%}$ は施設 A の特養・共用空間、施設 Y の居室 2 において、現状の加湿で相対湿度 40% に達することが確認できた。一方、不足加湿量 $M_{40\% \cdot 1000ppm}$ はポータブル小型加湿器を設置している施設 K の共用空間以外は、CO₂ 濃度を 1,000ppm に制御すると相対湿度を 40% 以上に維持できることが示唆された。

6. まとめ

本研究では、1) 文献調査により、寒冷環境での高齢者に対する健康影響と推奨値として、年配女性の血圧が室温変動の影響を受けやすく、日中・夜間共に 18℃を上回る温度が推奨され、2) 入所者と職員の着衣量や活動量、温冷感が異なるため、空調の設定温度や加湿方法など、適切な運用方法を検討する必要性を確認した。

謝辞

本調査を実施するにあたり、3 施設の施設長や職員、入所者の皆様をはじめ、関係各位には多大なるご理解とご協力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。なお、本調査は、秋田県立大学・研究倫理審査委員会の承認（承認番号 県大研-46）を得て実施している。

参考文献

- 1) 厚生労働省：介護予防マニュアル改訂版,2012.3
- 2) Umishio W et al: Cross-Sectional Analysis of the Relationship Between Home Blood Pressure and Indoor Temperature in Winter A Nationwide Smart Wellness Housing Survey in Japan, Hypertension, Vol.74, pp.756-766, 2019.10.
- 3) Public Health England : minimum home temperature thresholds for health in winter - A systematic literature review, 2014.10.
- 4) WHO: WHO Housing and health guidelines, 2018
- 5) 川島美勝編著：高齢者の住宅熱環境, p219(1994)

6) 日本医療福祉設備協会規格：病院空調設備の設計・管理指針 (HEAS-02-2013)

7) 小林集地：秋田県の老人福祉施設の温湿度制御と管理・運用に関する事例研究 秋田県立大学 令和 2 年度修士論文, 2020 年 3 月

8) 開原典子ら：特別養護老人ホームの温熱環境に関する実態調査, 寒冷地における冬期の室内温湿度と湿度管理に関する分析, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 765 号, pp.267-276(2018.3)

A-13

原子力発電所事故被災地における人工被覆面の ^{137}Cs 深度分布調査

及び地表面付近での ^{137}Cs 沈着状況の検討

○大槻謙太郎（東北大学），小林光（東北大学），須藤慎仁（東北大学）

Investigation and analysis of the deposition depth of ^{137}Cs on the artificial pavement surfaces in the area affected by the nuclear power plant accident

Kentaro Otsuki (Tohoku university), Hikaru Kobayashi (Tohoku university), Masahito Suto (Tohoku university)

キーワード：原発事故, ^{137}Cs , 深度分布, 人工被覆面, 空間線量率, 放射線解析

はじめに

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所(FDNPS)事故により避難指示区域が設定されたが、現在では避難指示解除が進み、住民帰還の検討が進められている。帰還に伴う住民の不安要因として、事故由来の放射性核種による屋内外の空間線量率がある。簡易で実用的な空間線量率予測を可能とする解析手法が確立できれば、様々な対策を検討する上で有益である。

筆者らはこれまで粒子・重イオン輸送計算コードPHITSを用いた実用的 γ 線境界モデル¹⁾²⁾³⁾⁴⁾(図-1)の開発を進めてきた。実用的 γ 線境界モデルは解析領域の境界面に設定する仮想線源モデル、地表面線源モデルから構成され、それぞれの境界面から入射する γ 線の放射特性と強度を再現し、解析領域内での空間線量率の予測を可能とする。地表面線源モデルは斎藤ら⁵⁾による露出土壤及び吉村ら⁶⁾による不透水性アスファルトの ^{137}Cs 深度分布を用いたモデルの開発を行っている。 γ 線放射特性は各被覆面における ^{137}Cs 深度分布に大きく依存しているが、FDNPS事故後の人工被覆における ^{137}Cs 深度分布データは、吉村ら⁶⁾による調査以外に無く極めて不足している。建築の周りは道路等の人工被覆面が占める割合が大きい。都市・建築空間の空間線量率の予測評価には人工被覆面における ^{137}Cs 深度分布及び人工被覆の地表面付近での ^{137}Cs の詳細な沈着状況の把握が不可欠である。

本報では①人工被覆面における ^{137}Cs 深度分布の調査、②人工被覆の地表面付近での詳細な ^{137}Cs 沈着状況の検討を行った。

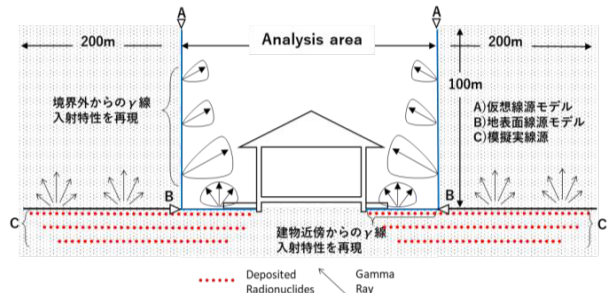


図-1 実用的 γ 線境界モデル体系

1. 人工被覆面における ^{137}Cs 深度分布の調査

1.1 調査地の概要

福島県大熊町の5施設、計9箇所にて透水性・不透水性アスファルト及びコンクリートの3種類の人工被覆について ^{137}Cs 深度分布の調査を実施した。調査地点はFDNPSより3km~5kmの範囲にあり、地上1mにおける空間線量率は $0.7\mu\text{Sv/h}$ ~ $3.6\mu\text{Sv/h}$ である。表-1に試料採取地及び試料の概要を示す。

表-1 試料採取概要

採取名	施設・採取地点	人工被覆種別	採取個数	
site1	施設K2	駐車場	不透水性アスファルト	2
site2		駐車場	コンクリート	2
site3	施設KS	建物スロープ	コンクリート	2
site4		建物犬走	コンクリート	2
site5		体育館前	不透水性アスファルト	2
site6		駐車場	不透水性アスファルト	2
site7	施設CD	駐車場	不透水性アスファルト	2
site8	施設HC	駐車場	透水性アスファルト	4
site9	施設FC	駐車場	不透水性アスファルト	4

1.2 調査方法

調査にあたっての作業手順を示す。調査地点でのコア抜き(図-2)により採取した直径約95mmの試料を旋盤で地表面から0.5mmずつ切削(図-3)して、深度毎の検体を作成する。その検体が

放射する γ 線を Ge 半導体検出器によって分析して、 ^{137}Cs 汚染量 (Bq) を決定する。本報では透水性・不透水性アスファルト、コンクリートの 20 個の試料を切削し、計 150 検体を作り、これを測定することで調査を行った。

旋盤での人工被覆の精密な切削はほとんど前例がなく、試料を切削するためのバイトの選定、試料の固定法などを検討することでこれを可能にした。切削時に発生する粉末を検体とするが、この粉末の漏洩は検体の損失であると共に作業環境の汚染につながる。そのため集塵カバー及び粉末の回収法の最適化を図りカバー内部の気流や気密性を検討することで、切削粉末の回収率は 98~99% 程度を達成している (図-3)。切削は傾向を掴むことを目的として、既往研究⁶⁾に倣い、表面汚染密度が地表面の 1/10 以下となる深度迄行った。



図-2 調査地点でのコア抜き

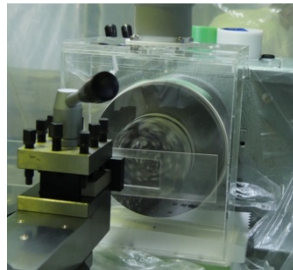


図-3 旋盤による切削

1.3 ^{137}Cs 深度分布の調査結果

測定結果の例を図-4に示す。実深度 (cm) による ^{137}Cs 深度分布は人工被覆の地表面の凹凸によって左右される。そこで用いられるのが重量深度 (g/cm^2) での評価で、各層の密度を考慮した値であり、各層での密度 (g/cm^3) \times 実深度 (cm) により算出する。凹凸により空隙の多い層は浅く評価される。

図-4は3種類の人工被覆での ^{137}Cs 深度分布の代表値による比較である。図-4に示す各人工被覆における重量緩衝深度 (地表面での ^{137}Cs 汚染濃度の $1/e$ となる深度) は、site1 (不透水性アスファルト) で $0.116\text{g}/\text{cm}^2$ 、site2 (コンクリート) が $0.149\text{g}/\text{cm}^2$ と地表面付近に沈着しているのに対して、site8 (透水性アスファルト) は $1.095\text{g}/\text{cm}^2$ と7倍以上深く浸透していることがわかる。透水性アスファルトでは雨水が浸透する過程で、水と共に ^{137}Cs も地中に浸透したと考えられる。

図-5はsite9における採取時期が異なる不透水性アスファルトの ^{137}Cs 深度分布である。図中の 2016年データは吉村ら⁶⁾による調査を示し、2021年は本調査によるものである。発災5年後の2016年と発災10年後の2021年での ^{137}Cs 深度分布を比較した。2つの ^{137}Cs 深度分布は浸透の傾向が似ており、緩衝深度では吉村ら⁶⁾の調査では 0.08cm 、本調査では 0.09cm とほとんど変化しないことから ^{137}Cs 深度分布は発災後、早期に形成された後、大きく変化しないことが伺われる。

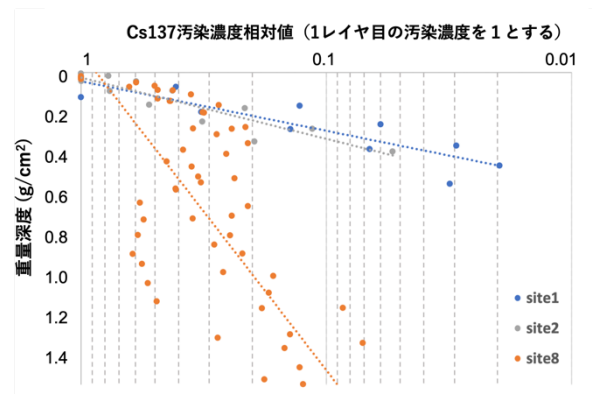


図-4 人工被覆の種類による ^{137}Cs 深度分布比較

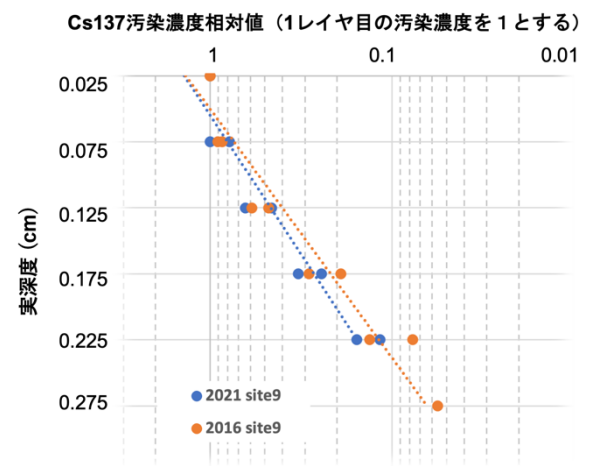


図-5 ^{137}Cs 深度分布の経時変化

2. 地表面付近での ^{137}Cs 沈着状況の検討

切削によって得た ^{137}Cs 深度分布は、切削における各レイヤ (0.5mm) 以上の解像度は期待できず、平均的な ^{137}Cs 汚染濃度の評価に留まる。一方で人工被覆の地表面には凹凸が存在している。地表面形状とその形状による地表面付近での ^{137}Cs の沈着状況は、 γ 線放射特性や地表面線源モデルに影響を与える可能性があるが、 ^{137}Cs 深度分布ではこ

れを確認することができない。

そこで、PHITSを用いた解析上での人工被覆の地表面形状の再現と地表面形状に応じた想定される ^{137}Cs の沈着状況を設定して、地表面からの射出量を検討する。また、この解析結果と実環境における対象地点の地表面での放射線測定データを比較して、地表面付近における ^{137}Cs の沈着状況を検討した。

2.1 解析における地表面形状の再現

人工被覆における地表面形状は場所によって異なる(図-6)。解析上でその形状に対応した凹凸をつけるため、以下の再現方法を採用した。

凹凸は直方体を積層させたピラミッド型で再現する。1層目の直方体の大きさは、対象地点の試料から適当な地表面の凸の大きさを測定し、決定する。直方体の高さを切削厚である0.5mmと対応させる事で、2層目以降は、切削重量より算出される増加率から、直方体の大きさを決定する。尚、切削重量が最も重い層となるまで直方体を積層させる(図-7)。

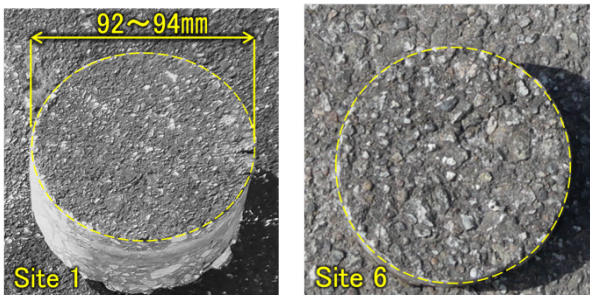
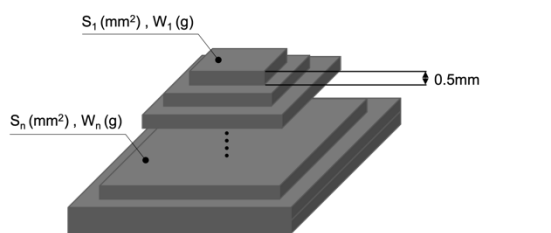


図-6 人工被覆における地表面形状



- 1層目 $S_1 \rightarrow$ 実測
 - 2～n層目 ($n \geq 2$) $W_n/W_{n-1} = R_n$
 - $S_{n-1} * R_n = S_n$
- $$\begin{cases} W_n = n\text{層目での切削重量(g)} \\ R_n = n-1\text{層目から}n\text{層目への増加率} \\ S_n = n\text{層目の大きさ(mm}^2\text{)} \end{cases}$$

図-7 地表面形状の再現方法

2.2 地表面付近での ^{137}Cs 沈着状況の検討方法

地表面での沈着状況は直接観察できないため、 ^{137}Cs が放射する β 線と γ 線の透過力の違いを利

用した地表面からの射出量で検討した。 ^{137}Cs が地中に浸透するほど、透過力が低い β 線は地表面への射出量が減少する。一方 γ 線は透過力が高く、数mm程度の深度では遮蔽されない(図-8)。この原理を利用し、地表面から射出される β 線の射出量で地表面付近での ^{137}Cs の沈着状況の推定が可能になると考えられた。

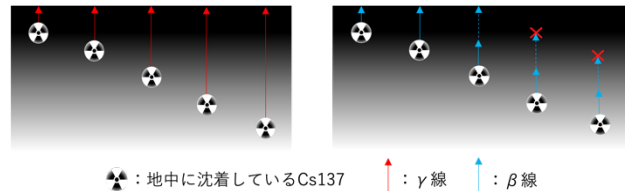


図-8 ^{137}Cs における β 線と γ 線の透過力

2.3 実測体系

実環境において地表面から射出する β 線のみを検出することは困難であるため、測定には β 線と γ 線を検出するGM管サーベイメータを用いる。site1の不水性アスファルトとsite2のコンクリートを対象として、GM管と地表面の間に何も挟まない場合(β 線と γ 線を検出)と β 線を遮蔽する5mmの亚克力板を挟む場合(大部分の β 線を遮蔽し γ 線を検出)の測定値(cpm)の比から遮蔽された β 線の射出量を明らかにする。

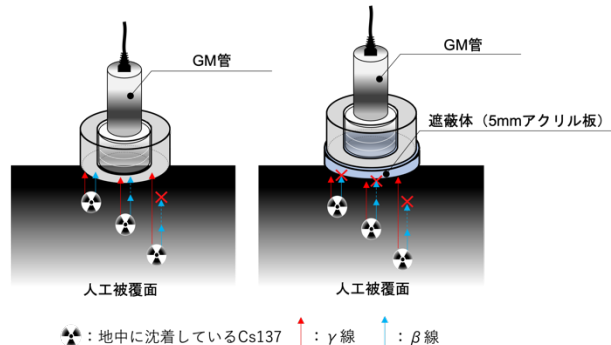


図-9 実環境での測定原理

2.4 解析体系

図-10に示す3つの解析体系で実測地点における ^{137}Cs 深度分布を用いて、解析上で亚克力板の有無による β 線と γ 線の射出量を検討した。亚克力板の有/無での比から実測との比較を行い、解析で設定した ^{137}Cs 沈着状況の妥当性を検討した。Case.1は地表面形状を水平とした場合、Case.2・Case.3は、地表面形状を再現し、異なる ^{137}Cs の沈着状況を想定した線源を設定する(図-10)。

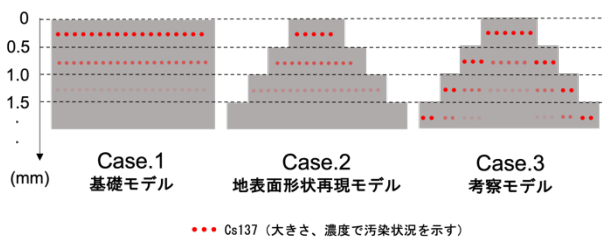


図-10 解析体系毎に再現した地表面形状及び¹³⁷Cs沈着状況模式図

2.5 結果・考察

遮蔽体の無/有での実測値と解析結果を表-2に示す。実測値は、いずれの解析結果と比べても、アクリル板の無/有の比では1/3~1/5程度小さく、今回の検討では実環境における地表面での¹³⁷Csの沈着状況の再現はできなかった。一方で実測・解析体系において、地表面形状によりβ線が地中で遮蔽され、アクリル板の無/有の比が最も小さくなると考えられたCase.1でも、実測値の方が1/3程度小さいことから、実環境においてアクリル板を透過するβ線やγ線を放射する¹³⁷Cs以外の放射性核種が存在し、実測値に影響を与えている可能性が明らかになった。

一例として⁹⁰Srが挙げられる。FDNPS事故において¹³⁷Cs同様に大気中への飛散が確認されているが、¹³⁷Csよりも飛散量が少ないこと、簡易な測定法が確立されていないことから、本報では⁹⁰Srの存在について確認できていない。その他にも自然放射性核種が存在している可能性も考えられ、正確な¹³⁷Cs沈着状況の再現のために今後検討していく必要がある。

表-2 アクリル板の無/有での実測値と解析値比較

	A 不透水性アスファルト		B コンクリート	
	アクリル板	無/有比	アクリル板	無/有比
実測値		10.213		9.820
Case.1		30.246		18.331
Case.2		50.913		35.184
Case.3		33.767		27.017

3. 結論

本研究では、人工被覆面における¹³⁷Cs深度分布の調査方法の確立とその調査を行うことで、被覆面毎での¹³⁷Csの浸透の傾向や経時変化について確認した。さらに詳細な地表面付近での沈着状

況を検討することで、¹³⁷Cs以外の放射性核種の存在及び把握の必要性など新たな課題を見出した。今後、詳細な地表面付近での沈着状況の解明を進めるとともに、地表面線源モデルや市街地における実用的γ線境界モデルの開発に発展させる。

謝辞

この研究は環境省委託事業「放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）」において実施したものです。

参考文献

- 1) 小林光, 山守諒他: 原発事故被災地の建築空間内γ線空間線量率に関する研究(その1) γ線空間線量率解析に用いる実用的な放射線境界条件モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp683-686 2019.9
- 2) 小林光, 中島主策他: 原発事故被災地の建築空間内γ線空間線量率に関する研究(その2) 木造建築を対象としたγ線空間線量率分布の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp687-690 2019.9
- 3) 中島主策, 小林光他: 原発事故被災地域の地表面γ線源モデルと詳細建築モデルを用いた建築空間線量率予測手法の構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp1551-1552 2020.9
- 4) 須藤慎仁, 小林光他: 原発事故被災地の建築空間内γ線空間線量率に関する研究(その5) 市街地の屋内線量率予測に資する周辺街区環境を再現したγ線境界モデルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp537-538 2021.9
- 5) 齊藤公明, 青木和弘, 谷畑勇夫: 土壌中における放射性物質の深度分布の確認, JAEA 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門, 福島環境安全センター, 研究開発成果の発信, 論文・報告書, 放射性物質の分布状況調査
- 6) K. Yoshimura et al.: Vertical and horizontal distributions of ¹³⁷Cs on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of environment Radioactivity, Vol.217, Article106213, 2020

A-14

東北地方の市町村におけるヒートショック関連死亡率と住宅環境に関する統計分析

○西川竜二 (秋田大学)

Statistical analysis of the relationship between the mortality rate of causes of death due to temperature shock and the thermal performance of houses in the Tohoku region
Nishikawa Ryoji (Akita University)

キーワード： 標準化死亡比 SMR, 住宅・土地統計調査, 外気温

1. はじめに

筆者は、データの入手・更新がしやすい公的な統計調査を活用して冬季のヒートショック関連死因の死亡率に住宅環境の要因が与える影響を市町村単位で明示し、住環境改善の基礎資料を得るための研究を行っており、これまで秋田県を対象に幾つかの報告をしてきた(例えば、1) 2)。本報告では、既報を踏まえて、①分析対象県を秋田県に隣接する北東北3県(秋田県+青森県・岩手県)として県毎と北東北3県として分析する、②心疾患と脳血管疾患の死因の種類別でも分析する、を進めている経過の知見を報告する。なお、北東北3県はいずれもヒートショック関連の死亡率が上位の県である(心疾患は岩手県5位、青森県7位、秋田県9位、脳血管疾患は岩手県1位、秋田県2位、青森県7位、2020年人口動態統計の粗死亡率より)。

2. 分析対象地域と統計データの概要

表-1の秋田16市町、青森17市町、岩手21市町を分析対象とし、表-2の統計データを用いた。対象期間は、死亡率(標準化死亡比SMR)³⁾の統計期間の2013~17年とし、気象⁴⁾・住宅統計⁵⁾を合わせた。ヒートショック関連死因に心疾患と脳血管疾患を用いた。既報^{1) 2)}では、心疾患と脳血管疾患の全体を目的変数としたが、今回、急性心筋梗塞と心不全、脳内出血と脳梗塞、という種類別の分析も試みた。心疾患と脳血管疾患の死亡割合は全死因の2位と3位である(図-1)。心疾患のうち急性心筋梗塞が1~2割、心不全が3~5割で、脳血管疾患のうち脳内出血が約3割、脳梗塞が約6割である(図-2)。

表-1 分析対象の県と市町

秋田県 (16市町)	3地域 横手市(横手)、大館市(大館)、湯沢市(湯沢)、鹿角市(鹿角)、大仙市(大仙)、北秋田市(横巻)、仙北市(角館)、美郷町(横手)、羽後町(湯沢)
	4地域 秋田市(秋田)、能代市(能代)、男鹿市(男鹿)、由利本荘市(本荘)、潟上市(男鹿)、にかほ市(にかほ)、三種町(能代)
	2-3地域 平川市(鷹巣)
青森県 (17市町)	3地域 青森市(青森)、弘前市(弘前)、八戸市(八戸)、黒石市(黒石)、五所川原市(五所川原)、十和田市(十和田)、三沢市(三沢)、むつ市(むつ)、つがる市(五所川原)、藤崎町(平川)、板柳町(弘前)、七戸市(十和田)、東北町(三沢)、おいらせ町(三沢)、五戸町(十和田)、南郷町(三戸)
	2-3地域 八幡平市(岩手松尾)
岩手県 (21市町)	3地域 盛岡市(盛岡)、花巻市(花巻)、久慈市(久慈)、遠野市(遠野)、二戸市(二戸)、紫波市(紫波)、滝沢市(盛岡)、紫波町(紫波)、矢作町(紫波)、宮野町(盛岡)
	3-4地域 一関市(一関)
	4地域 宮古市(宮古)、大船渡市(大船渡)、北上市(北上)、陸前高田市(大船渡)、釜石市(釜石)、奥州市(江刺)、金ヶ崎町(北上)、大槌町(山田)、山田町(山田)

※1 住宅・土地統計調査では、形質及び人口1万5千人以上の町村が調査単位となる。秋田県は25市町村(13市9町3村)16市町(13市3町)、住宅総数の約6.9%、青森県は10市町(10市0町0村)17市町(10市7町)、住宅総数の約1.7%、岩手県は23市町村(14市9町4村)21市町(14市7町)、住宅総数の約3.2%、年平均人口は2013年まで調査対象で、2014年1月1日から市制移行した。
※2 表中の2~4地域は、建築労働土木法における住宅の省エネルギー基準の地域区分。
※3 市町村の数の少い1)には、使用した気象観測所を、当該市町村に近しい観測所がない場合は隣接する観測所を使用、最寄りの観測所が複数の場合は市町の境域(中心市街地)から観測所までの距離、および沿岸部と内陸部や市街地が等の地理的な状況を考慮して選定した。

表-2 使用した統計データ 3) 4) 5)

	使用データ	調査名称	調査・公表機関	使用年
1	標準化死亡比 SMR(ベイズ推定値) (死因・性・市町村別)	人口動態統計特殊報告	厚生労働省	2013~17の期間値
2	外気温 (各最寄りの観測所)	アメダス気象観測データ	国交省気象庁	秋田県の市町:2013~17の毎日の集計 青森・岩手県の市町:1990~2020の毎日の平均値
3	住宅データ(市町村別)	住宅・土地統計調査	総務省	2013年

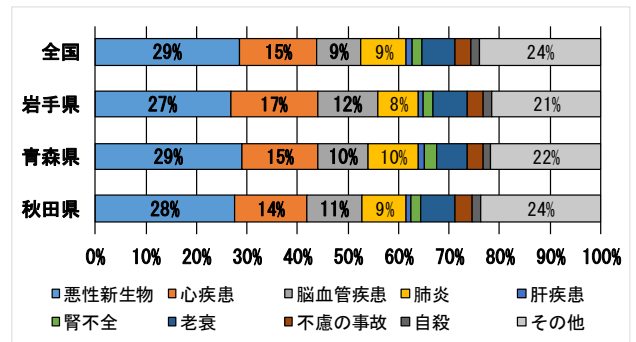


図-1 主な死因別死因割合 (男女総数、2013~17年の合計の割合)

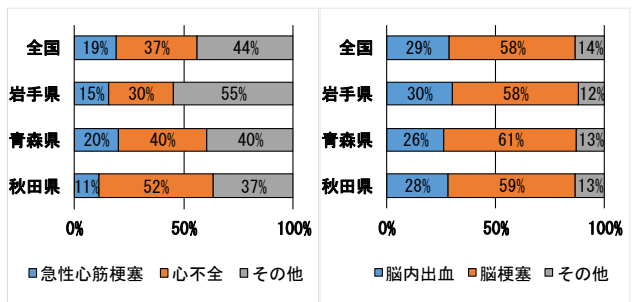


図-2 (左)「心疾患(高血圧性を除く)」と(右)「脳血管疾患」の種類別の死亡数の割合 (男女総数、2013~17年の合計の割合)

3. 結果と考察

表-3~5に、県ごとの、SMRと気象・住宅統計の各項目間の相関分析の結果を示す。表-6は、北東北3県の市町を一緒にした場合である。また、図-3に住宅の建築時期と複層窓の関係の一例を、図-4~5に表-3~6の相関係数行列の中から3通りを取り上げて、散布図を示す。

3. 1 県ごとのSMRと気象・住宅環境の関係に関する回帰分析

(1) 秋田県 (表-3)

秋田では、既報²⁾と重なるが、特に心疾患(全体)のSMRでは、気象・住宅の全項目で因果関係の理屈と整合した符号の相関関係が見られ、男性では有意な相関も多い。要約すると、外気温が低く、建築時期が古い住宅割合が多いほど(古い住宅ほど窓が複層化されておらず延床も広く断熱気密が低く暖房が行き届かず室温温度差がつきやすい)、心疾患(全体)のSMRが高い関係性となっている。そして、窓については、全ての窓が複層なら室温温度差を緩和するが、複層窓が一部だと居室と非居室の室温温度差の緩和できないのでヒートショックの抑制にならないという説明が当てはまる結果となっている。また、この秋田の結果では、心疾患(全体)の男性以外も、SMRと気象・住宅の要素の相関の正負の符号の関係は理屈と整合するものが多い(一部、理屈と反対の有意な相関は、急性心筋梗塞・女性の場合)。新規の心不全・男性の結果では、心疾患(全体)の傾向と同様で、心疾患全体の5割を占めることと整合した。また、既報^{1) 2)}では、脳血管疾患(全体)は、気象と有意な相関のみで、住宅要因と有意な相関が無かったが、新規の脳内出血・女性では、建築時期と有意な相関が検出された。脳内出血は、全体の3割弱で、脳梗塞6割の半分なので、全体での分析では隠れていたと考える。また、脳内出血・女性は、気象・住宅の全ての項目の相関の符号が心疾患・男性と同様に理屈と一致した。

(2) 青森県 (表-4)

全体に相関が弱く、符号が理屈と相反する項

目も多い。心疾患は、全項目で有意な相関が無く、理屈と符号が合わない項目もある(気象・窓・医療機関)。脳血管疾患は、有意な相関が出た項目も含め、ほとんどの項目で相関の符号が理屈と相反した。相関が弱いデータ群の中で幾つの特異な傾向のデータによる影響などを精査したい。また、今回の分析期間以前の傾向も確認を要する(秋田は同様の傾向¹⁾)。

(3) 岩手県 (表-5)

心疾患は、有意な相関も多く、相関の符号も理屈と合致する項目が多い。一部に心疾患全体と種類別とで符号が異なる項目の確認を要す。一方、脳血管疾患は、全体的に相関が弱く、相関の符号が理屈と相反する項目が多い。

3. 2 北東北3県を一緒にした場合 (表-6)

まず、3県の住宅の建築時期と複層窓の関係を見ると、回帰直線は類似するが、寒冷な市町が多い順に青森、秋田、岩手が分布し、岩手は建築時期に対して複層ガラスの割合が低い市町も複数あるといった類似性と差異もある。こうした北東北3県を一緒にして相関分析したところ、幾つかの問題が見つかった。表-6で有意な相関が出た中から問題のある例を2つ取り上げると、図-4では、秋田に有意な相関があったが3県では無相関になった。図-6では、岩手が心不全・男性が秋田・青森に比べてかなり低い傾向があり、県ごとでは3県とも無相関であったが、3県合わせると複層ガラスがない住宅割合が多いほどSMRが低いという誤った相関が現れた。

4. おわりに

①既報の秋田県に加え、北東北3県の市町における心疾患と脳血管疾患のSMRと気象・住宅環境の統計値の相関分析を行った。青森県は、SMRと気象・住宅統計の相関が弱く、データの精査や今回より以前の傾向の確認、および既報²⁾で行っているような気象・住宅以外の世帯・生活習慣等の要因の検討も必要と考える。また、北東北3県の間でもデータを合わせて相関を見ることの問題と難しさを確認し、県単位の地域で分析する方法の有用性も確認されたと考える。

表-3 秋田県内16市町のSMRと気象・住宅環境の関係 (相関係数、有意差判定)

気象・住宅統計	心疾患・脳血管疾患SMR				心疾患(全体) (高血圧性を除く)				急性心筋梗塞				心不全				脳血管疾患 (全体)				脳内出血				脳梗塞			
	男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
暖房デGREEデー D18-18 [°C・日]	0.47		0.29		0.06		-0.08		0.12		0.23		-0.06		0.50	*	0.09		0.44		0.06		0.48		0.06		0.48	
気象 年平均外気温 [°C]	-0.52	*	-0.34		-0.13		-0.02		-0.12		-0.22		0.07		-0.53	*	-0.02		-0.41		-0.08		-0.53	*	-0.08		-0.53	
1月の日最低外気温の平均 [°C]	-0.43		-0.25		-0.03		0.10		-0.07		-0.17		0.11		-0.53	*	-0.05		-0.44		-0.02		-0.50	*	-0.02		-0.50	
構造 木造(防火木造を含む)	0.59	*	0.33		-0.07		-0.01		0.63	**	0.38		0.13		-0.00		0.29		0.22		0.07		0.00		0.07		0.00	
種類 一戸建	0.65	**	0.41		0.10		0.09		0.59	*	0.40		0.22		0.07		0.26		0.27		0.15		0.05		0.15		0.05	
所有 持ち家	0.64	**	0.36		0.03		0.05		0.67	**	0.42		0.18		0.00		0.27		0.29		0.11		-0.02		0.11		-0.02	
広さ 1住宅当たり延べ床面積 [m ²]	0.68	**	0.35		-0.15		-0.28		0.64	**	0.42		0.36		0.10		0.48		0.47		0.24		0.00		0.24		0.00	
建築時期 1980年以前(およそ旧省エネ基準以前)	0.79	**	0.48		0.16		-0.01		0.44		0.40		0.16		0.20		0.26		0.50	*	0.11		0.14		0.11		0.14	
2000年以前	0.64	**	0.51	*	-0.08		-0.03		0.46		0.42		0.16		0.37		0.16		0.49		0.16		0.33		0.16		0.33	
2001年以降(次世代省エネ基準後)	-0.64	**	-0.22		-0.19		-0.15		-0.37		-0.11		-0.04		0.20		-0.57	*	-0.24		-0.24		-0.23		-0.24		-0.23	
住宅の「全ての窓にある」	-0.66	**	-0.41		0.19		0.28		-0.55	*	-0.37		-0.24		-0.04		-0.23		-0.43		-0.14		0.06		-0.14		0.06	
住宅の「一部の窓にある」	0.28		0.16		0.31		0.36		0.35		0.21		0.17		0.07		-0.05		0.01		0.24		0.09		0.24		0.09	
「なし」	0.48		0.31		-0.39		-0.52	*	0.30		0.24		0.16		0.02		0.30		0.45		0.01		-0.08		0.01		-0.08	
複層の窓 「全ての窓」と「一部の窓」にある	-0.44		-0.29		0.42		0.54	*	-0.28		-0.21		-0.11		0.01		-0.27		-0.42		0.04		0.12		0.04		0.12	
「一部の窓にある」+「なし」	0.67	**	0.42		-0.17		-0.26		0.55	*	0.38		0.28		0.07		0.26		0.45		0.18		-0.02		0.18		-0.02	
医療 最寄りの医療機関まで1km未満	-0.51	*	-0.06		0.18		0.04		-0.59	*	-0.11		0.18		0.26		-0.07		-0.17		0.10		0.27		0.10		0.27	

※住宅統計で単位の記載が無いものは該当する住宅の割合[%]、分母は「住宅総数(居住世帯あり)」

表-4 青森県内17市町のSMRと気象・住宅環境の関係 (相関係数、有意差判定)

気象・住宅統計	心疾患・脳血管疾患SMR				心疾患(全体) (高血圧性を除く)				急性心筋梗塞				心不全				脳血管疾患 (全体)				脳内出血				脳梗塞			
	男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
暖房デGREEデー D18-18 [°C・日]	0.26		0.05		0.13		-0.09		-0.17		-0.16		-0.31		-0.47		0.36		-0.00		-0.57	*	-0.45		-0.57	*	-0.45	
気象 年平均外気温 [°C]	-0.06		0.09		0.08		0.31		0.32		0.29		0.20		0.28		-0.46		-0.17		0.51	*	0.32		0.51	*	0.32	
1月の日最低外気温の平均 [°C]	-0.23		-0.06		-0.08		0.10		0.25		0.17		0.32		0.49	*	-0.33		0.09		0.53	*	0.44		0.53	*	0.44	
構造 木造(防火木造を含む)	0.23		0.22		0.12		-0.05		0.02		0.19		0.05		-0.23		0.11		-0.16		-0.03		-0.19		-0.03		-0.19	
種類 一戸建	0.16		0.29		0.07		0.04		0.12		0.32		0.09		-0.28		0.06		-0.28		0.02		-0.19		0.02		-0.19	
所有 持ち家	0.23		0.36		0.19		0.16		0.16		0.41		0.12		-0.26		0.04		-0.38		0.11		-0.15		0.11		-0.15	
広さ 1住宅当たり延べ床面積 [m ²]	0.20		0.37		-0.02		0.07		0.25		0.44		0.04		-0.28		-0.10		-0.33		0.07		-0.23		0.07		-0.23	
建築時期 1980年以前(およそ旧省エネ基準以前)	0.03		0.22		0.06		0.12		0.05		0.20		-0.03		-0.22		-0.15		-0.35		0.03		-0.18		0.03		-0.18	
2000年以前	0.20		0.26		0.10		0.04		0.17		0.22		0.17		-0.06		-0.07		-0.02		0.18		-0.10		0.18		-0.10	
2001年以降(次世代省エネ基準後)	-0.07		-0.15		-0.23		-0.25		-0.15		-0.20		0.02		0.01		0.45		0.20		-0.25		0.11		-0.25		0.11	
住宅の「全ての窓にある」	-0.10		-0.33		-0.24		-0.36		-0.02		-0.25		-0.03		0.15		0.24		0.38		-0.15		0.16		-0.15		0.16	
住宅の「一部の窓にある」	0.25		0.29		0.17		0.14		0.21		0.31		0.18		0.04		-0.27		-0.02		0.36		-0.13		0.36		-0.13	
「なし」	-0.08		0.18		0.10		0.29		-0.17		0.03		-0.12		-0.25		0.04		-0.47		-0.17		-0.09		-0.17		-0.09	
複層の窓 「全ての窓」と「一部の窓」にある	0.14		-0.14		-0.15		-0.36		0.20		-0.00		0.17		0.25		0.04		0.52	*	0.19		0.08		0.19		0.08	
「一部の窓にある」+「なし」	0.13		0.34		0.20		0.31		0.03		0.26		0.05		-0.15		-0.17		-0.35		0.14		-0.16		0.14		-0.16	
医療 最寄りの医療機関まで1km未満	0.18		0.38		0.35		0.38		0.03		0.24		0.03		0.12		-0.20		0.01		0.10		0.11		0.10		0.11	

※住宅統計で単位の記載が無いものは該当する住宅の割合[%]、分母は「住宅総数(居住世帯あり)」

表-5 岩手県内21市町のSMRと気象・住宅環境の関係 (相関係数、有意差判定)

気象・住宅統計	心疾患・脳血管疾患SMR				心疾患(全体) (高血圧性を除く)				急性心筋梗塞				心不全				脳血管疾患 (全体)				脳内出血				脳梗塞			
	男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
暖房デGREEデー D18-18 [°C・日]	0.10		0.01		0.24		-0.03		0.44	*	0.44	*	0.22		0.01		0.27		-0.09		0.02		-0.00		0.02		-0.00	
気象 年平均外気温 [°C]	-0.25		-0.16		-0.24		0.12		-0.45	*	-0.48	*	-0.24		-0.07		-0.29		0.07		-0.01		-0.02		-0.01		-0.02	
1月の日最低外気温の平均 [°C]	-0.04		0.06		-0.14		-0.03		-0.42	*	-0.38	*	-0.20		0.05		-0.23		0.02		-0.10		0.07		-0.10		0.07	
構造 木造(防火木造を含む)	0.17		0.11		0.44	*	0.37		0.33		0.32		-0.16		-0.16		-0.31		-0.37		-0.01		0.03		-0.01		0.03	
種類 一戸建	0.33		0.24		0.55	*	0.43	*	0.44	*	0.45	*	-0.06		-0.05		-0.23		-0.30		0.02		0.05		0.02		0.05	
所有 持ち家	0.24		0.20		0.58	**	0.44	*	0.44	*	0.50	*	-0.10		-0.15		-0.21		-0.33		-0.05		0.02		-0.05		0.02	
広さ 1住宅当たり延べ床面積 [m ²]	0.22		0.15		0.59	**	0.44	*	0.36		0.41		-0.12		-0.12		-0.26		-0.40		-0.06		0.07		-0.06		0.07	
建築時期 1980年以前(およそ旧省エネ基準以前)	0.80	**	0.61	**	0.36		0.23		0.42		0.46	*	-0.15		0.04		-0.22		-0.07		-0.02		0.10		-0.02		0.10	
2000年以前	0.36		0.23		0.45	*	0.31		0.46	*	0.40		0.05		-0.14		0.00		-0.15		0.02		-0.05		0.02		-0.05	
2001年以降(次世代省エネ基準後)	-0.32		-0.20		-0.42	*	-0.30		-0.45	*	-0.38	*	-0.05		0.15		-0.01		0.13		-0.02		0.06		-0.02		0.06	
住宅の「全ての窓にある」	-0.52	*	-0.49	*	-0.05		-0.09		-0.11		-0.16		0.24		0.02		0.29		0.06		-0.01		-0.09		-0.01		-0.09	
住宅の「一部の窓にある」	-0.10		-0.11		0.31		0.37		0.34		0.39		-0.19		-0.15		-0.33		-0.46	*	-0.02		-0.01		-0.02		-0.01	
「なし」	0.47	*	0.45	*	-0.13		-0.15		-0.11		-0.11		-0.07		0.07		-0.03		0.21		0.02		0.07		0.02		0.07	
複層の窓 「全ての窓」と「一部の窓」にある	-0.46	*	-0.45	*	0.15		0.16		0.12		0.11		0.06		-0.07		0.02		-0.23		-0.02		-0.07		-0.02		-0.07	
「一部の窓にある」+「なし」	0.52	*	0.49	*	0.07		0.09		0.12		0.17		-0.24		-0.03		-0.29		-0.08		0.00		0.08		0.00		0.08	
医療 最寄りの医療機関まで1km未満	-0.53	*	-0.37		-0.34		-0.20		-0.31		-0.26		0.14		-0.17		0.16		0.10		0.17		-0.13		0.17		-0.13	

※住宅統計で単位の記載が無いものは該当する住宅の割合[%]、分母は「住宅総数(居住世帯あり)」

表-6 北東北3県の54市町のSMRと気象・住宅環境の関係 (相関係数、有意差判定)

気象・住宅統計	心疾患・脳血管疾患SMR				心疾患(全体) (高血圧性を除く)				急性心筋梗塞				心不全				脳血管疾患 (全体)				脳内出血				脳梗塞			
	男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女		男		女	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	
暖房デGREEデー D18-18 [°C・日]	0.26		0.13		0.26		0.07		0.08		0.19		0.02		0.05		0.11		-0.06									

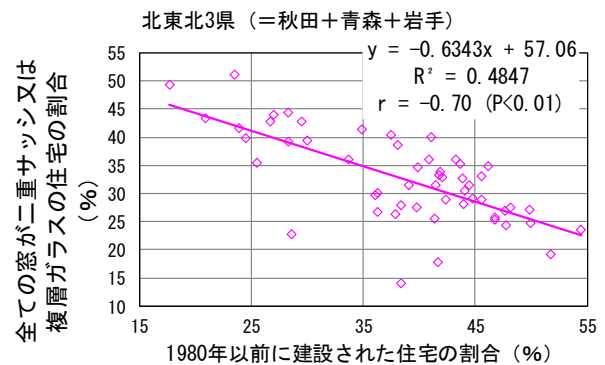
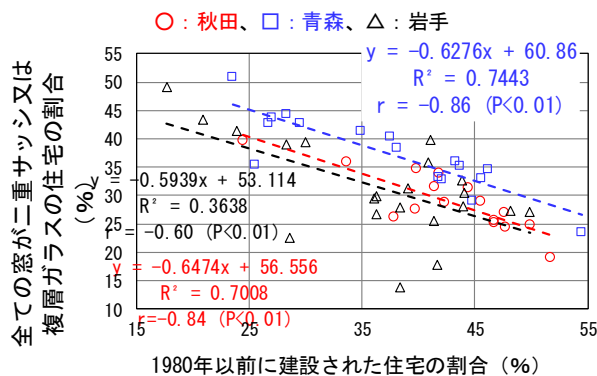


図-3 「1980年以前に建設の住宅の割合」と「全ての窓ガラスが複層化された住宅の割合」の関係

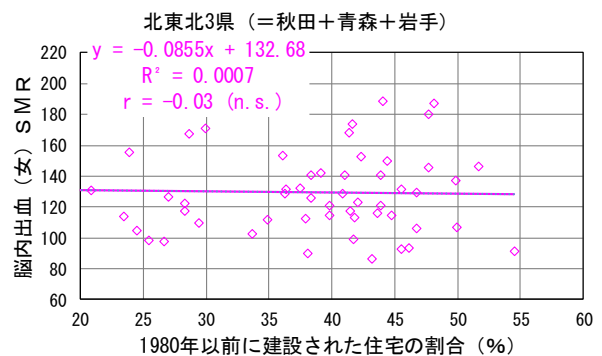
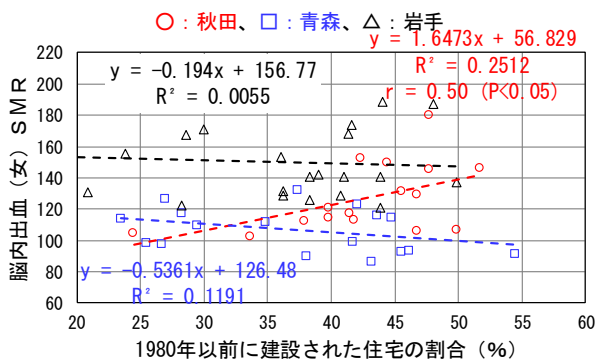


図-4 「1980年以前に建設の住宅の割合」と「脳内出血・女性のSMR」の関係

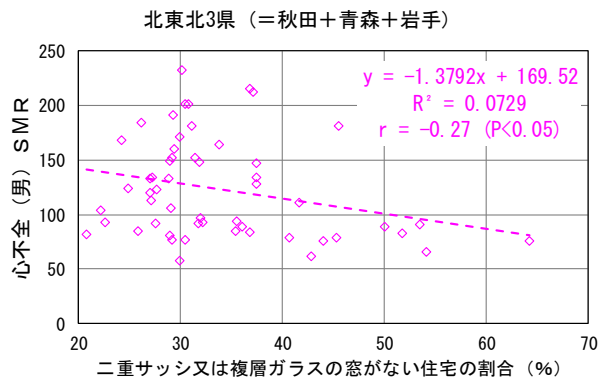
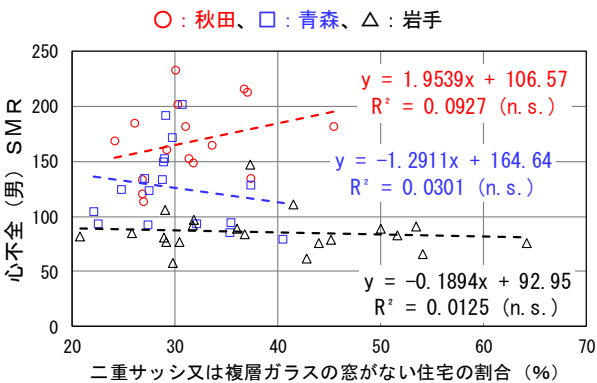


図-5 「二重サッシ又は複層ガラスの窓がない住宅の割合」と「心不全・男性のSMR」の関係

※ 図中の心疾患(男)SMRのAV±SDは、秋田168.3±34.0、青森126.0±36.1、岩手85.6±18.5で岩手が低い

参考文献

②心疾患と脳血管疾患の種類別の分析も行い、割合が少ない脳内出血にも有意な相関が現れた。

謝辞

本研究は、科研費・基盤研究(C) (研究代表者：西川竜二、課題番号：20K02382) の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

- 1) 西川：秋田県内の市町村単位でみたヒートショック関連死因の死亡率と住宅熱環境に関する統計分析、日本建築学会大会梗概集、pp.981-982、2015
- 2) 西川：同 その3、建築学会大会梗概、pp.1081-1082、2021
- 3) 厚労省：人口動態統計特殊報告、H25～29年人口動態保健所・市区町村別統計、2020.7
- 4) 気象庁HP：過去の気象データ検索、www.data.jma.go.jp
- 5) 総務省統計局：平成25年住宅・土地統計調査 調査の結果、https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/tyosake.html
- 6) 厚労省：令和2年人口動態統計(確定数)の概況、2021.9

A-15

スギ材の異方性を考慮した湿気伝導率の把握とその調湿効果

○本間義規 (国立保健医療科学院)

Determination of Moisture Conductivity considering Anisotropy of Cedar and Evaluation of its Adsorption/ Desorption Response

Honma Yoshinori (National Institute of Public Health)

キーワード：木材異方性，湿気物性，調湿

1. はじめに

木材は、異方性により熱伝導率や収縮率が異なることはよく知られている。湿気物性に関しても同様であるが、木材工学分野以外では測定例にほぼ行き当たらない。調湿材全般にみられる傾向であるが、室内空間での調湿効果に関する定量的評価は十分とは言えない。室内空間には、カーペットやカーテン、居住者の衣服や空気など、一般建材よりも吸放湿性の高い湿気容量源が多く存在する。従って、吸放湿性能の高い建築材料を使ったとしても、他のファクタが大きく影響し、調湿建材自体の効果が見えにくくなることも当然ありうる。

室内空間は0.5achの換気設備設置が求められ、実際、0.5achの換気が行われていれば、室内水分発生量はそのほとんどが調湿材に吸湿されずに外気に排出されてしまう。一方で、換気量の少ない居住空間か断熱性能が低く結露の危険性の高い外壁面、熱源がなく換気量が不足しがちな非居住空間(クローゼット、床下空間、小屋裏空間等)では、一定の調湿効果を見込むことができる。

本研究では、動的測定法により、杉材の異方性を考慮した湿気伝導率および平衡含水率の測定を行う。そしてJIS A1470-1の吸法湿性試験方法¹⁾に準じた数値実験を行い、吸放湿性に対して異方性がどの程度の違いを生じさせるのかについて検討したので、その結果を報告する。

2. スギ材の湿気物性同定プロセス

2.1 試験方法

平衡含水率は、無機塩飽和水溶液を用いたデシケーター法により求める。柾目(半径方向, Radial), 板目(接線方向, Tangential), 木口(軸方向, Longitudinal)の3種の異方性試料(30mm×30mm×D10mm)を、金属線とクリップを用

いて広口ガラス瓶の中に吊るす(写真1, 2)。

無機塩は表1に示す4種類、および純水(100% RH)の5種類を用いる。試料は、開始前に乾燥器を用いて105℃絶乾とし、塩化カルシウム(相対湿度0%)容器で室温に戻した。その後、23℃のインキュベーター内に設置し、定期的に取り出して質量測定を行う。通常は1日間隔で質量測定を行うが、本研究では、質量増加過程のデータを用いて平衡含水率と湿気伝導率の両方を動的測定法²⁾で求めるため、カラの広口ガラス瓶を電子天秤(AandD GX-4000, 秤量4200g)に載せ、蓋を素早く付け替え、1~3時間間隔で質量測定を行った。

表1 含水率測定に使用した無機塩

飽和塩記号	文献値	実測相対湿度
MgCl ₂ ・6H ₂ O	33%	35.8%
Mg(NO ₃) ₂ ・6H ₂ O	54%	54.6%
NaCl	76%	77.9%
KCl	85%	86.7%



写真1 広口ガラス瓶を用いた平衡含水率測定

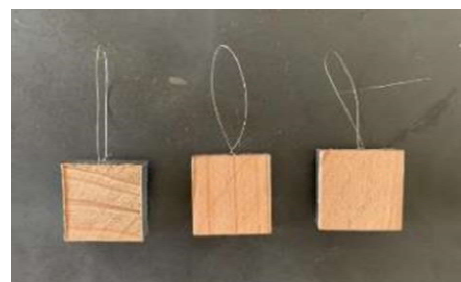


写真2 スギ材試料(左から木口, 柾目, 板目)

2.2 試料質量変化測定結果とその関数近似

同一のスギ材から切り出した柾目、板目、木口の各試料(n=5)を各無機塩飽和水溶液内に吊るし、一定時間ごとに質量測定した結果を図1～3に示す。基本的に3日間で測定を終了している。また同図中には、質量変化を1次指数関数減衰式(1式)で近似した曲線も記載している。時間無限大にすると、この近似式の定数項が各々の無機塩飽和水溶液湿度における平衡質量となる。その値を用いて、平衡含水率曲線を作成する。

$$W = a + b \cdot e^{-c \cdot t} \quad (1式)$$

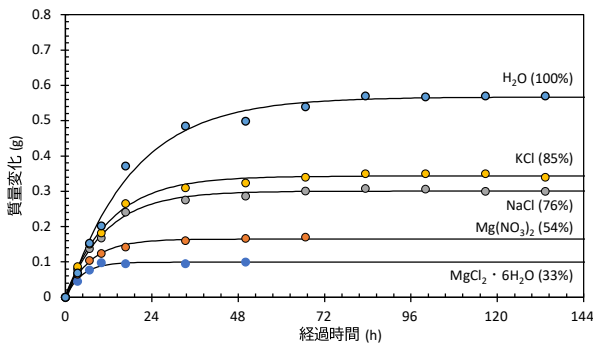


図1 試料(柾目)の質量変化と近似曲線

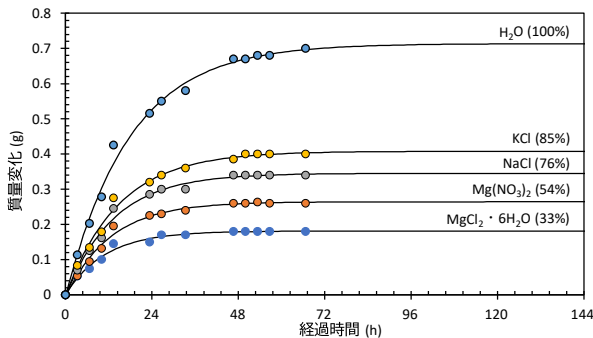


図2 試料(板目)の質量変化と近似曲線

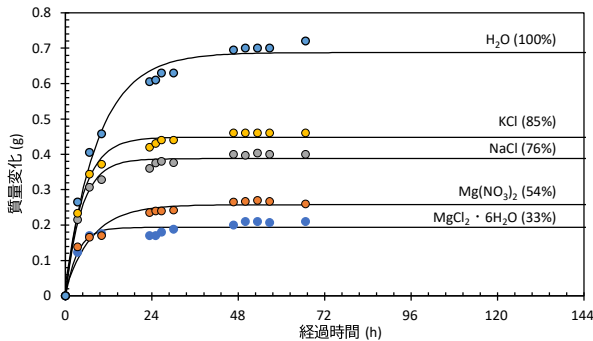


図3 試料(木口)の質量変化と近似曲線

2.3 平衡含水率曲線

2.2 で得られた柾目、板目、木口の平衡質量から平衡含水率を算出した。なお、0%(絶乾)のときは0g、また、H₂Oの平衡含水率は蒸気拡散領域の最大値(98%)として平衡含水率曲線上ではプロットする。また、スギ材の最大含水率は全乾比重と真比重とから算出され³⁾、異方性の差はないものとして同一数値とした。平衡含水率曲線を図4に、平衡含水率の近似式(大澤の式⁴⁾、2式)の係数を表2に示す。なお、2式中のHは相対湿度(0-1)である。

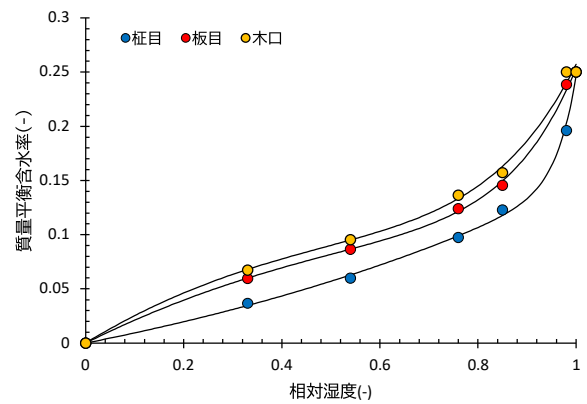


図4 柾目、板目、木口の平衡含水率曲線

$$\psi = AHe^{BH} + CH + D(e^{EH} - 1) \quad (2式)$$

表2 平衡含水率曲線(2式)の係数

	柾目	板目	木口
A	2.120E-12	17.2	17.2
B	24.57547	-0.00831	-0.00831
C	-0.019897	-16.9908	-16.9908
D	0.13715	1.9971E-4	1.9971E-4
E	0.79542	6.76329	6.76329

2.4 パラメータ推定に基づく湿気伝導率の同定

2.2 で得られた質量変化データを用いて、パラメータ推定法により各湿度における湿気伝導率を同定する。推定区間内の残差2乗和を最小にする非線形最小2乗法(DSO法)を用いた。求めた湿気伝導率を図5にプロットする。結果をみると、他の建築材料同様、相対湿度が高くなるにつれて湿気伝導率が大きくなる傾向にあることがわかる。次章の調湿にかかわる数値実験でも利用するため、(3式)で近似した。係数を表3に示す。

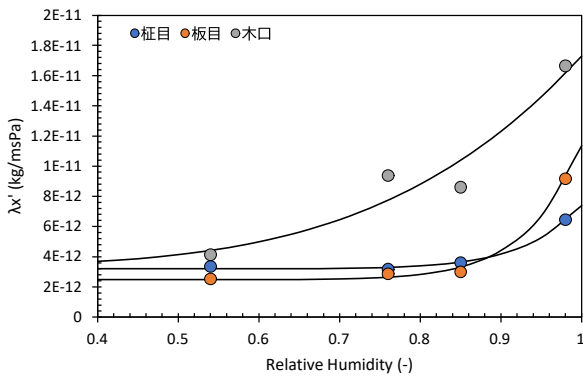


図5 柾目，板目，木口の湿気伝導率

$$y = a + \frac{b - a}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^d} \quad (3式)$$

表3 湿気伝導率(3式)の係数

	柾目	板目	木口
a	0.131363	0.2580669	7.79946E-5
b	5.21E-7	4.02E-7	5.57E-7
c	2.413212	2.307377	2.250466
d	13.81073	14.46324	4.32152

3. 異方性が調湿性能に及ぼす影響

3.1 シミュレーションの詳細

建築材料の調湿性能評価は JIS でその測定法が定められている^{1,5)}。今回は、JIS1470-1 湿度応答法に準じ、数値シミュレーションにより行う。JIS によると、低湿域は 30~55%、高湿域は 70~95% を試験の湿度範囲としているが、一般的な住宅・非住宅の居住環境で出現する相対湿度範囲や、また建築物衛生法・空気管理基準における湿度範囲(40~70%)を前提とすると、冬期条件として 23℃ 20~40% を低湿域に、および夏期条件として 26℃ 70~90% を高湿域に設定するほうがより現実的である。そこで本検討では、JIS の試験範囲とは異なる設定とした。また、調湿材の壁面施工を想定し、低湿条件は外気に面するコンクリート壁(100mm)に貼付する状態(低湿 1:外気側 0℃70%、温度勾配の影響あり) および間仕切壁(低湿 2:外気側 23℃20%、温度勾配の影響なし) の 2 種類とした。間仕切壁は隣室を等温と仮定する。高湿条件は夏期を想定した間仕切壁相当(高湿:外気側 26℃70%)のみとした(図 6)。

なお、JIS 実験上での養生については、設定範

囲の低湿側で平衡になるまで養生することが条件となっている。数値実験では、240 時間(10 日間)の助走を行い、そのあと 12 時間周期で吸湿過程と放湿過程を繰り返す設定とする。シミュレーションに使用する物性値のうち、既出の湿気物性のほか、文献より引用した熱伝導率、比熱、密度を用いる(表 5)。熱伝導率に関しては繊維方向および繊維直方向の 2 種類のデータを示している文献 6 の値を採用した。

数値シミュレーションは、1 次元のハイグロスコピック領域熱水分同時移動モデル⁷⁾をコントロールボリューム法により解く。分割幅はスギ材内部 1~4mm(10~12 分割)、コンクリート内部 10 分割(100mm, 非等分割)、計算タイムステップは 1 秒とした。湿気伝導率および絶対湿度勾配に対する含水率変化率 κ 、温度勾配に対する含水率変化率 ν は、実験で得た近似式を用いてその相対湿度に応じて毎計算ステップに更新している。

表4 シミュレーション条件

条件	温度		室内側相対湿度		外気側相対湿度
	室内側	外気側	吸湿	放湿	
低湿 1	23	10	40	20	70
低湿 2	23	23	40	20	20
高湿	26	26	90	70	70

表5 試料熱物性および空隙率

	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kgK)	λ (W/mK)	φ (m ³ /m ³)
柾目	395	1880	0.1	0.8
板目	395	1880	0.1	0.8
木口	395	1880	0.25	0.8
コンクリート	2200	940	1.6	0.15

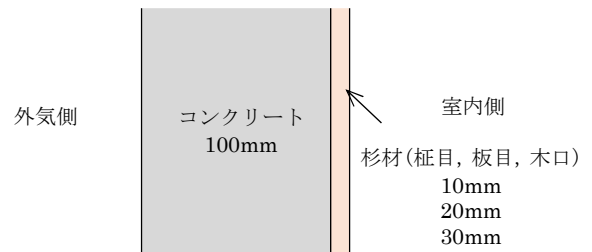


図6 シミュレーションモデル

3.2 表面湿流積分値の比較

図 7 に低湿条件(低湿 1 および低湿 2)における柾目、板目、木口の 1, 2 サイクル目の表面湿

流積分値を示す。いずれも木口が柎目、板目より吸放湿量が大きく（約 1.2~1.3 倍）、また低湿 2 よりも低湿 1 のほうで吸放湿量が大きい。図 8 は高湿条件であるが、異方性の差は顕著で木口は柎目、板目の表面湿流積分値の 1.7~1.9 倍になっている。平衡含水率が大きい木口の調湿性能が高いといえる。ただ、1, 2 サイクル目の表面湿流積分値は放湿量よりも吸湿量のほうが大きく、杉材内部への水分蓄積が伺える（図 9）。

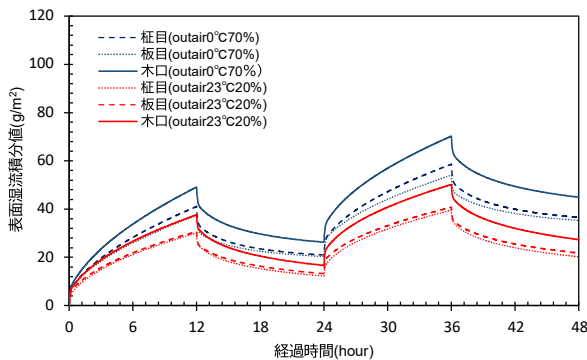


図 7 低湿条件における表面湿流積分値

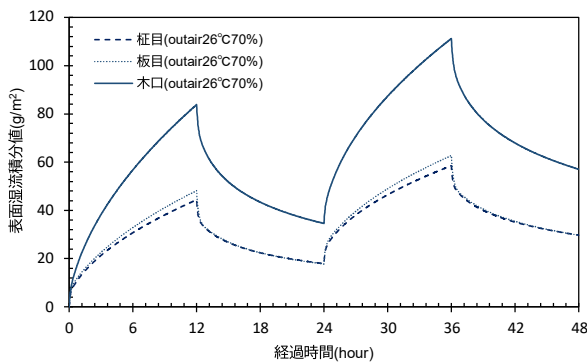


図 8 高湿条件における表面湿流積分値

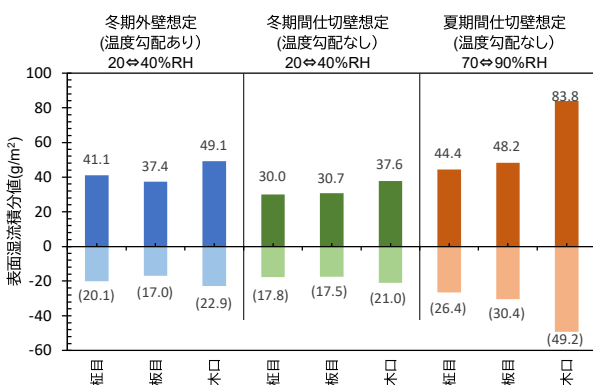


図 9 湿度条件の違いによる表面湿流積分値比較

3.3 スギ材内部の吸放湿過程の相対湿度分布

図 10-1~5 に杉材内部の吸放湿過程（1 サイクル目吸湿および放湿）の 1 時間ごとの相対湿度分布を示す。コンクリート側の相対湿度の変化幅は板目<柎目<木口の順に大きく、80%まで変化する位置までで比較すると、板目で 2mm, 柎目で 2.5mm, 木口で 4mm 程度であることがわかる。図 10-3~5 は木口材厚を 10, 20, 30mm と変化した場合の相対湿度分布を示した図である。材料厚を増しても 12 時間周期の相対湿度ステップ応答に対しては 10mm 厚と同等の効果しかない。厚みを増すことで熱抵抗が増すため、逆に吸放湿量は小さくなることがわかった。

3.4 吸放湿サイクル数の影響

2 サイクル目までの表面湿流積分値をみると、吸湿量に対し放湿量が少ない（放湿量/吸湿量 = 0.45~0.58 程度）。2 回目は 1 回目よりも吸放湿量が減少する。JIS では平衡状態になるまで養生し、その後、最大でも 4 サイクルまでの結果を示すことしかルール化していない。そこで、高湿条件・木口で 10 サイクル目（連続 10 日間）までシミュレーションを実施し、それ以降は 1 次指数関数で近似した。結果を図 11 に示す。時間∞にすると、吸湿量と放湿量の平衡値が定まる。木口 10mm, 高湿条件の周期的定常状態では、吸湿量 39.1g, 放湿量 31.5g に平衡することになる。差分の約 7.6g は透湿することを意味する。いずれにしても、JIS に基づく第 1 サイクル目の吸湿量は 83.8g であるから、周期的定常状態では、評価値の約 47%しか調湿に寄与しないことになる。調湿建材判定基準によると、中湿域（50-75%）12 時間以上の条件において 29g/m² 以上吸湿することが調湿建材として認められる基準である。周期的定常状態を踏まえているかどうかは不明で、調湿性能を過大評価する可能性も懸念される。

4. 結論

無機塩飽和水溶液を用いた平衡含水率実験よりスギ材の異方性を考慮した湿気物性の導出を行った。5 つの湿度域の実験を並行して実施し、その時系列データを用いて一次指数関数減衰式で近似しているため、3 日間程度で実験を終えたとしてもその後の平衡質量の予測には支障がないことを

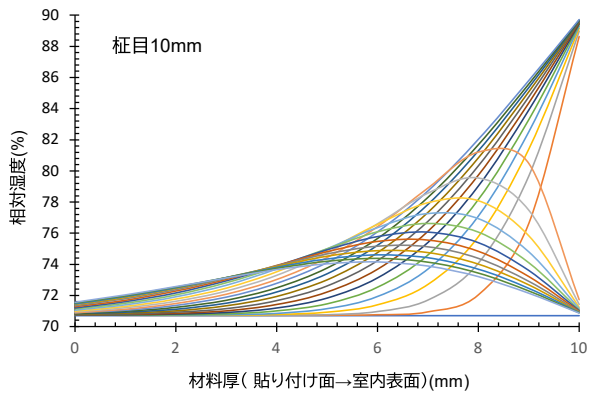


図 10-1 柱目 10mm の相対湿度分布 (高湿時吸放湿サイクル 1 回目, 1 時間ごとのプロット)

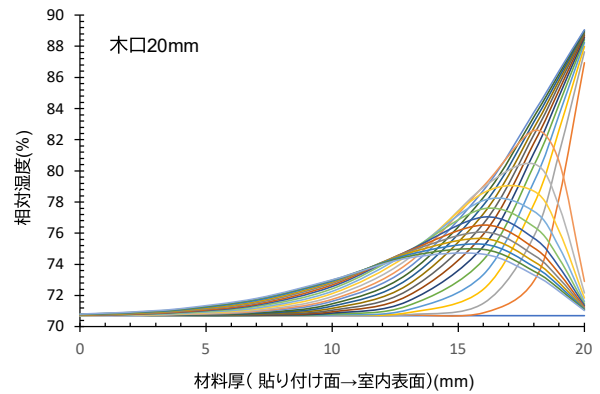


図 10-4 木口 20mm の相対湿度分布 (高湿時吸放湿サイクル 1 回目, 1 時間ごとのプロット)

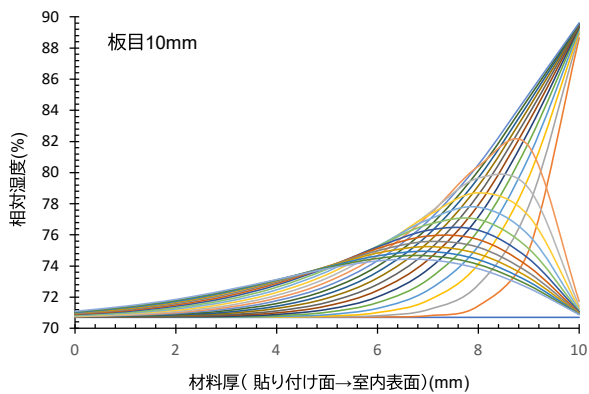


図 10-2 板目 10mm の相対湿度分布 (高湿時吸放湿サイクル 1 回目, 1 時間ごとのプロット)

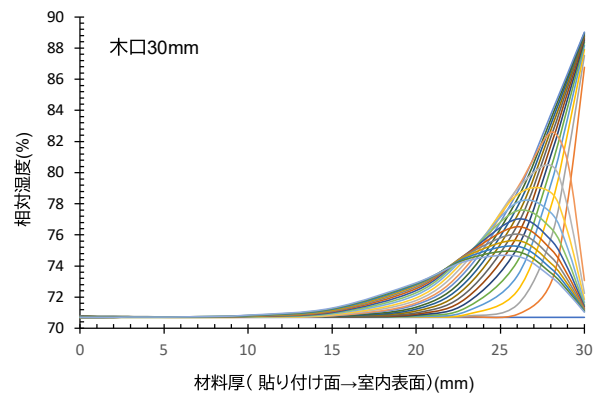


図 10-5 木口 30mm の相対湿度分布 (高湿時吸放湿サイクル 1 回目, 1 時間ごとのプロット)

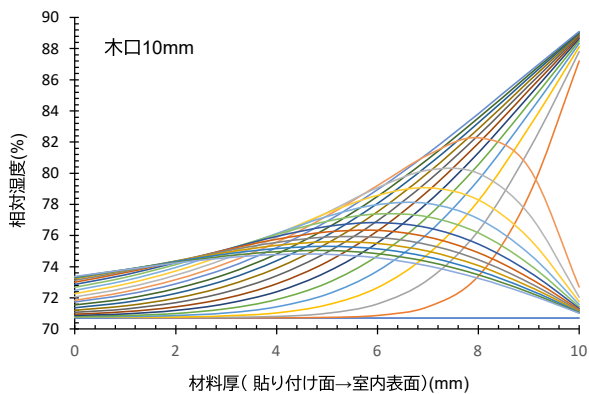


図 10-3 木口 10mm の相対湿度分布 (高湿時吸放湿サイクル 1 回目, 1 時間ごとのプロット)

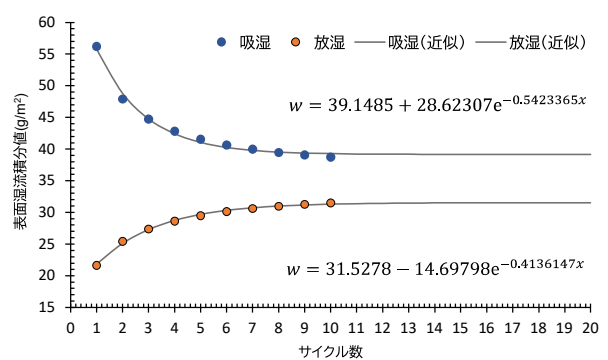


図 11 吸放湿サイクル回数と表面湿流積分値

確認した。また、その時系列データを用いてパラメータ推定 (DSO 法) により湿気伝導率を同定した。湿気伝導率は湿度依存性があることが古くから指摘されているが、その性状を関数近似するこ

とで、熱水分同時移動方程式を用いたシミュレーション等の精度向上に寄与できるものと思われる。そして、得られた湿気物性値を用いて、スギ材の異方性に関する調湿性能の数値実験比較を行った。

その結果として、柱目と板目はその吸放湿性能に大きな違いはなく、一方で、木口の吸放湿性能が比較的高いことが明らかとなった。また、低湿 1,2 の条件（冬期条件）よりも、含水率変化の大きな高湿条件の領域で調湿性能を発揮することなどが把握することができた。

5. 今後の課題

一定量の換気量を確保することにより、特に寒冷地では室内の過乾燥が問題となる。また、医療施設では、感染症対策として一定程度の湿度環境を維持する努力がはらわれている。こうした湿度環境の改善に、調湿材の活用を期待する声がある。

ただ、実際の調湿建材が使用される室内条件は、様々な外乱（ランダムな湿度発生、外気の影響、換気量、日射を含む放射場の影響など）が生じる非定常場である。建築材料の吸放湿性評価は、湿度応答と温度応答の評価法が定められ、材料同士の相対比較を可能としているが、そうした観点のみではなく、実空間での使用を前提とした評価法が必要である。

今回はスギ材を対象に木材の湿気物性の異方性評価を行った。木材の内部構造を考えると、少なくとも針葉樹の他樹種も同様の構造を有すると予想されるが、この結果を普遍的に利用するのはやや難がある。広葉樹を含め、木質内装に利用される他の樹種についてもデータを蓄積していきたい。

最後に、調湿材として木口面を内装に利用するデザインは、見栄えの観点において多少の工夫が求められるだろう。場合によっては、クローゼット等の見えない空間に利用するなどが考えられる。

多数室を対象としたシミュレーションを実施し調湿材の効果を確認するとともに、実空間での検証を行いたいと考えている。

注) タイトル、本文中には“調湿”と“吸放湿”の2種類の用語を混在使用している。本来は用語の統一をすべきであるが、もともと“調湿”という用語が広く使用され、JIS1470-1でも使用されていたこと(2008年のJIS改定でISO/DIS24353に合わせ“調湿”から“吸放湿”へと用語変更している)、現在でも調湿建材登録・表示制度⁸⁾で“調湿”を仕様していることなどから、あえて混在使用した。

謝辞

スギ材の平衡含水率実験に際し、その多くの手間を宮城学院女子大学4年杉本愛香さんに担っていただきました。その多大なるご協力に感謝し、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS A1470-1, 2014 建築材料の吸放湿性試験方法 - 第1部:湿度応答法
- 2) 本間義規・銚井修一・福島明:吸放湿性建築材料の実用的湿気物性同定に関する基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集第513号, 31-37, 1998
- 3) 木材の物理, 木材科学講座3, 海青社, 2017
- 4) 大澤徹夫・土川忠浩・水谷章夫:多孔質建築材料内の局所非平衡性に関する研究, 第7報 平衡容積含水率曲線と湿気容量の実験式, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 299-300, 1996年10月
- 5) JIS A1470-2, 2014 建築材料の吸放湿性試験方法 - 第2部:温度応答法
- 6) Lars Wadso, Studies of Water Vapor Transport and Sorption in Wood, Lund University Report TVBM-1013, 1993
- 7) 松本衛:湿気, 環境物理, 新建築学体系10, 彰国社, 1984
- 8) 「調湿建材登録・表示制度」に関する調湿建材判定基準, 一般社団法人日本建材・住宅設備産業協会, 平成19年10月1日制定, 平成28年1月1日改定

B-1

空気齢による住宅用換気システムの新鮮空気分配性状の評価実験

○金さやか (秋田県立大学), 竹内仁哉 (秋田県立大学),

長谷川兼一 (秋田県立大学), 松本真一 (秋田県立大学)

Experiment of Fresh Air Distribution using Mechanical Ventilation System by Age of Air in Full-scale Test House

Kon Sayaka (Akita Prefectural University), Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University),

Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University), Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University)

キーワード：実験，換気システム，空気齢

1. はじめに

2003年に住宅への換気システムの設置が義務付けられ，居室の換気回数を0.5[回/h]以上確保するための換気計画が行われるようになった。しかし，住宅の換気システムの運用は居住者に委ねられており，換気量不足の住宅が確認されている。その原因として，給排気口を閉めた状態による運用や十分なメンテナンスを実施していない事等，住まい方による所が大きい。換気システムの不具合がなく正常に運用される場合，住宅内の換気性状はその稼働状況によって大きく異なる事が推察される。このような背景から，運用時における住宅の換気量を測定することは室内空気環境を清浄に維持するためにも重要であるが，未だ換気量測定を行う上で多くの課題がある。

本研究では，文献調査により住宅の換気量測定法に関して，主にPFT法の現状や課題を把握するとともに，応急仮設住宅を対象として，トレーサガス法により，住宅用換気システムの使用パターンによって変化する新鮮空気の分配性状に対して，

空気齢を用いて明らかにする事を目的とする。

2. 換気量測定法に関する文献調査

住宅の換気量は，室内にトレーサガスの発生点と捕集点を設け，捕集したガス濃度を分析する事により求められる。換気量測定法には，機械的にガスの発生や捕集を制御するアクティブ法と，ガスの発生と捕集ともに機械的な制御を介さないパッシブ法がある。アクティブ法による換気量測定法には定常濃度法(以降，ステップアップ法)や濃度減衰法(以降，ステップダウン法)，パッシブ法による換気量測定法にはPFT法等が存在する。本研究ではPFT法について文献調査を行った。

表-1にPFT法の課題を示す。PFT法は，従来の換気量測定法と比較し，器具の操作が簡便で，騒音がなく居住者に負担がないという特徴を持つ。⁴⁾一方で，器具の配置に関する規定がなく，ガスの捕集の妨げとなる影響を小さくする事が重要であり，測定精度を確保する難しさがある。⁶⁾

表-1 PFT法の課題¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

影響要因	室内空気の流れ	外部風	外気温	生活行為
文献調査からわかる課題	自然換気	・ 定常濃度到達時間よりも長周期で気流が反転する場所への適用不可	・ 1(°C)上昇で発生量4(%)増加	・ 局所ファンの運転による濃度分布の偏り
	機械換気			
文献調査に基づいて考えられる課題	自然換気	・ 海風，陸風の変化を伴う場所への適用不可	・ 変動が室内の設定温度に影響し，温度差換気の観点から算出される換気量は異なる可能性	・ ショートサーキット
	機械換気			
改善点	自然換気	・ 気象条件が安定している日 ・ 窓は開けない	・ ドーザーを温度変化が激しい場所(窓際や攪拌用ファン付近)に置かない	・ 測定精度を確保する場合： 局所ファンを運転しない ・ 居住状態を想定する場合： 影響を考慮して実験
	機械換気			

影響要因	気体の密度	ドーザー・サンブラーの設置位置	ドーザー・サンブラーの数	ドーザーの個体差	
文献調査からわかる課題	自然換気				
	機械換気	・大きいPFCsほど温度依存性が高い	・家具、什器、間仕切り壁、廊下、階段室で濃度不均一性増大 ・ショートサーキットや濃度分布が生じる可能性	・経済性、時間、人的制限から現場ではむやみに多点配置できない	・拡散膜の種類や放散源の作製方法による不均一性
文献調査に基づいて考えられる課題	自然換気				
	機械換気	・大きいほど室内気流に乗らずガスの滞留箇所ができる可能性	・空間が理想的な混合状態であるかは不確か	・個数が多い場合：人件費、分析費用、設置・処理時間 ・居住者ありの場合：大人数での作業や頻繁に出入りができない	・放散量の不確かさは捕集量の違いになり、測定点の換気量算出結果が異なる
改善点	自然換気	・温度の可能な限りの制御	・多点配置 ・空間の状況を把握	・可能な限りの個数を使用 ・事前の空間状況把握	・性能を把握する ・測定開始と終了時点の重さを測る
	機械換気	・測定器を滞留箇所に設置しない	・ドーザーは排気ファン付近に置かない ・サンブラーはガスの滞留域に置かない		

3. 応急仮設住宅を対象とした実験概要

3.1 建物概要

写真-1に対象建物の外観、図-1に実験機器の設置位置を示す。対象建物は秋田県立大学本荘キャンパス構内の第3種機械換気システムが導入された応急仮設住宅である。主な換気設備として建物南側に給気口、トイレや浴室、レンジフードに排気ファンが設置されている。



写真-1 対象建物外観 (応急仮設住宅)

3.2 実験概要

図-1に示すように、室内の床上1.1mや給気口、各排気ファン近傍にCO₂濃度センサーを多数設置した。トレーサガスにはCO₂を使用した。実験方法について第一に、ステップアップ法では室内でガスを十分に混合させるために、攪拌用ファンを5台稼働させ、トイレと浴室のドアを開けた状態で室内濃度が十分安定するまで室内の2箇所からガスを一定量発生させた。第二に、ステップダウン法では室内濃度が十分に混合し定常状態を確認後、ガスの発生を停止し、トイレ使用時、浴室使用時等を想定して各実験条件に基づきドアを閉めた状態で室内濃度が十分減衰するまで実験を継続した。トイレや浴室については風量測定器を用いて排気風量を測定した。

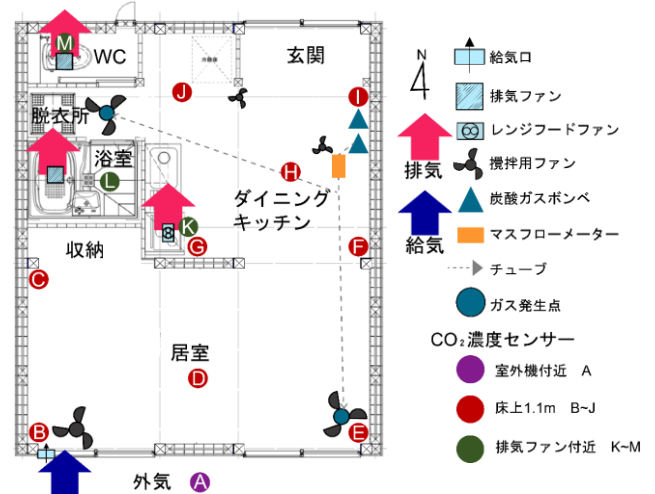


図-1 対象室平面図・実験機器設置位置

4. 空気齢による新鮮空気分配性状の評価

4.1 実験ケース

表-2に実験ケースを示す。実際の排気設備の運用方法を想定し、計3ケース実施した。Case1とCase2は常時換気として考えられるケースである。

4.2 ステップダウン法による室内濃度推移

図-2にCase2のステップダウン法による濃度推移、図-3にステップダウン法による片対数グ

表-2 実験ケース

Case	トイレの排気ファン	浴室の排気ファン	レンジフードファン
Case1	○	×	×
Case2	○	○	×
Case3	○	○	○

ラフ、表-3に換気量と換気回数の算出結果及び風量測定値を示す。図-2より、十分に混合し定常濃度に達した室内濃度が外気濃度まで減衰している事が確認できる。図-3から濃度減衰データを用いて、濃度減衰多時点法により各ケースの換気量を算出した。この換気量は、排気設備の機械換気量に加え、建物の隙間から流入出する自然換気量を含んだ「みかけの換気量」となる。表-3より、外部風による隙間での自然換気量の影響により、みかけの換気量は風量測定値と異なっている。換気回数においては、Case1, 2ともに0.5[回/h]を満たす。

4.3 空気齢による新鮮空気分配性状

SVE3(Scale for Ventilation Efficiency)を図-4に示す。SVE3とは給気口からの新鮮空気の到達時間を表す局所平均空気齢[h]を名目換気時間[h]で基準化した値である。7) 常時換気を想定したCase1やCase2であっても空気の新鮮度合いに分布が生じ、給気口からの距離が遠い場所ほど新鮮空気が到達しにくい状況が確認できる。8) 中でも、室内の隅角部である点C, E, Iは他の測定点より室内濃度が比較的高い傾向を示す。Case3のレンジフードファンは調理の際に運転する事が想定されるが、稼働状況によって室内全体の気流分布に影響する事がわかる。トイレと浴室の濃度を比較すると、トイレの方が低い。原因として、北側壁面の排気口位置からトイレが最も近いために風の逆流が生じた事や、ユニットバスのように囲まれていないため隙間流量が多い事、浴室のドアより建具の方がアンダー

カット排気に対する通気抵抗が小さい事が考えられる。

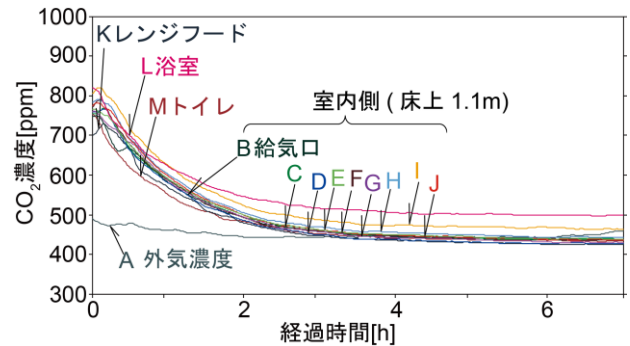


図-2 ステップダウンの濃度推移(Case2)

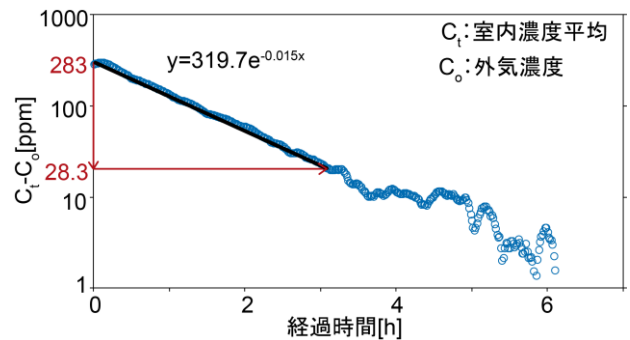


図-3 ステップダウンの濃度推移(Case2：片対数)

表-3 換気量と換気回数及び風量測定結果

Case	Case1	Case2	Case3
みかけの換気量(m ³ /h)	71.8	74.0	152.0
換気回数(回/h)	0.83	0.85	1.76
風量測定(m ³ /h)	47.9	116.0	—

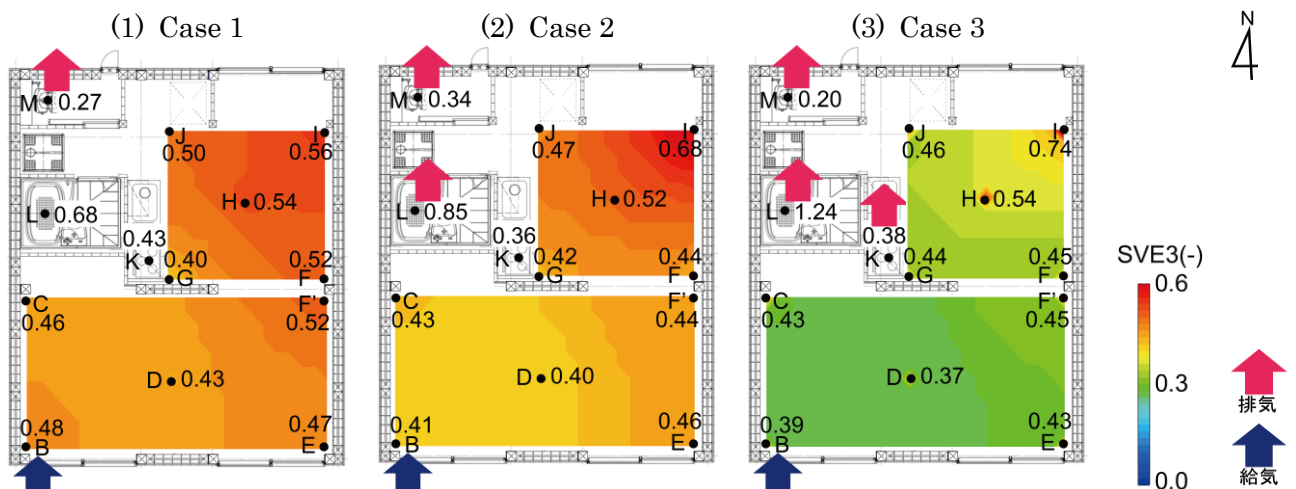


図-4 SVE3の実験結果⁸⁾

5. まとめ

本研究では、文献調査によりPFT法の課題を整理した。定常濃度法、濃度減衰法の実験では、排気設備の稼働状況により新鮮空気の分配性状が異なる事が確認され、常時換気を想定したケースにおいても空気の分布ができる事がわかった。一方で、評価には気密性能や外部風が影響するため、隙間の量や位置を把握した上で実験する事が望ましい。

工学会論文集 No32(1986-10), pp.91~102

参考文献

- 1) 金勲:PFT法を用いた換気量測定法とSF6法連続供給法, CO₂一定濃度法, 差圧測定法との比較実験, 日本建築学会環境系論文集 74 巻 635号(2009-1), pp47~54
- 2) Mellisa Lunden et al.: Experiments to Evaluate and Implement Passive Tracer Gas Methods to Measure Ventilation Rates in Home, ローレンス・バークレー国立研究所環境エネルギー技術部門(2012-10),
- 3) 坂口淳:住宅を対象とした多数室換気測定法に関する研究, LIXIL住生活財団平成24年度調査研究助成報告書(2014-1)
- 4) 内海禎一・長谷川兼一・細淵勇人・高木理恵・松本真一:PFT法を用いた換気量測定の適用条件に関する検討その1文献調査ならびに換気方式とドーザー配置をパラメータとした実験の概要, 日本建築学会東北支部研究報告集計画系第79号(2018-6), pp27~30
- 5) 内海禎一・長谷川兼一・細淵勇人・高木理恵・松本真一:PFT法を用いた換気量測定の適用条件に関する検討その2換気方式とドーザー配置をパラメータとした実験の結果, 日本建築学会東北支部研究報告集計画系第79号(2018-6), pp31~32
- 6) 空気調和・衛生工学会換気設備委員会, 換気性能小委員会:SHASE換気関連規格改定・提案のための換気効率, 換気量及び換気性能評価に関する検討, SHASE委員会成果報告書(2017-10), pp71~82
- 7) REHVA・SHASE:換気効率ガイドブック-理論と応用-, 空気調和・衛生工学会(2009-10), p18
- 8) 村上周三・加藤信介:新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法-換気効率の評価モデルに関する研究-, 空気調和・衛生

B-2

F 病院の病床周りにおける CFD 解析及び実験結果を踏まえた改善

○中島由佳（千葉工業大学），若山尚之（千葉工業大学），松岡彩香（千葉工業大学），

相原辰哉（千葉工業大学）

Proposal of improvement plans based on CFD analysis and the actual experimental results around bed of “F Hospital”

Nakajima Yuka (Chiba Institute of Technology), Wakayama Hisashi (Chiba Institute of Technology), Matsuoka Ayaka (Chiba Institute of Technology), Aihara Tatsuya (Chiba Institute of Technology)

キーワード：CFD 解析，モックアップ実験，風速

1. 序論

福祉・医療施設では室内の温熱・空気環境が如実に利用者に影響を及ぼす。このことから昨年度の研究では CFD 解析を用いて既存病室を再現した空間モデルを作成し、空調機器についての検討を行った。

本研究では昨年度行った CFD 解析に加えモックアップ施設を学内に作成し、夏期と冬期の各 2 週間風速実測実験を行う。また、双方の結果を比較し、昨年度の提案の再検討を行う。

2. F 病院の概要

F 病院は 2008 年に開設された回復期リハビリテーションを実践する中規模の病院である。1 階には外来診察室やリハビリスペース、事務室等があり、2～4 階には病床が合計で 200 床ある。

3. CFD 解析の概要

3.1 解析病室モデルの詳細

本研究では解析対象として 2 階北東向きの 1 病室を想定している。床面積は 21[m²]、空調機は 1 方向吹き出しの天井カセット型ファンコイルユニット(以下 FCU)を使用しており、給気は外調機からシングルのブリーズライン(以下 BL)、排気には吸込口が 1 つ設置されている。また、それらの設備詳細設定は表-1 の通りで、平面図は図-1 に示す。

昨年度の研究で提案した改善案では、FCU は同条件とし給気の BL を角アネモに変更した。更に排気のための吸込口を 2 つに増設した。また、それらの設備詳細設定は表-2 の通りで、平面図は図-2 に示す。

表-1 1 床室の設備詳細

	面積 [m ²]	面風速 [m/s]	風量 [m ³ /hr]	吹き出し温度 [°C]	
				夏期	冬期
FCU	0.80	0.08	243	22.0	26.0
BL(S)	0.06	0.50	100	22.0	26.0
吸込口(HS)	0.04	0.69	100	-	-

表-2 1 床室角アネモ案の設備詳細

	面積 [m ²]	面風速 [m/s]	風量 [m ³ /hr]	吹き出し温度 [°C]	
				夏期	冬期
FCU	0.80	0.08	243	22.0	26.0
角アネモ	0.08	0.33	100	22.0	26.0
吸込口(HS)	0.04	0.35	50	-	-

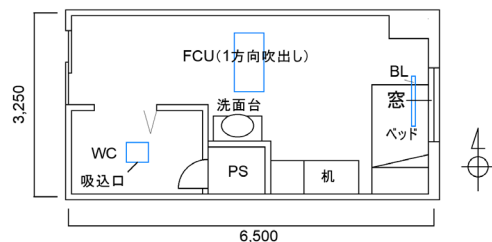


図-1 1 床室 平面図

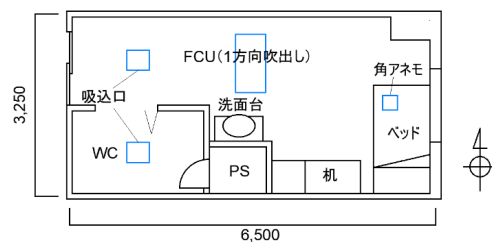


図-2 1 床室角アネモ案 平面図

3.2 解析条件

今回の解析では昨年度研究した夏期に加え冬期の病室を想定し、それぞれ外気温度を 35.8℃、2℃とした。また、外気に面している東側壁面のみ熱貫流率を $0.82[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ として解析した。なお、東面以外の壁面、床、天井からの伝熱負荷は、隣室との温度差がほぼ無いことから考慮していない。更に、照明負荷は LED 化により昨年度から変更し、 $3[\text{W}/\text{m}^2]$ とした。

4. CFD 解析結果

解析結果は図-3 に示す x 軸方向 1.6m 地点での断面図を提示する。

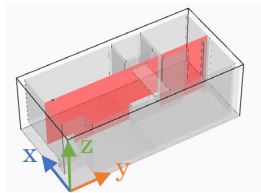


図-3 x 軸断面位置

4.1 1 床室 解析結果

現在の 1 床室の夏期を再現した条件下での解析では、図-4 より BL からの給気が直接ベッドに当たることによってベッド周辺の温度が下がっていることが分かる。一方冬期では、ベッド周辺の風速が周囲とほぼ変わらないことから、BL からの給気が直接ベッドへもたらす影響は少ないと図-5 から判断することができる。これは給気にはたらく浮力が風速に影響を及ぼしていると考えられる。

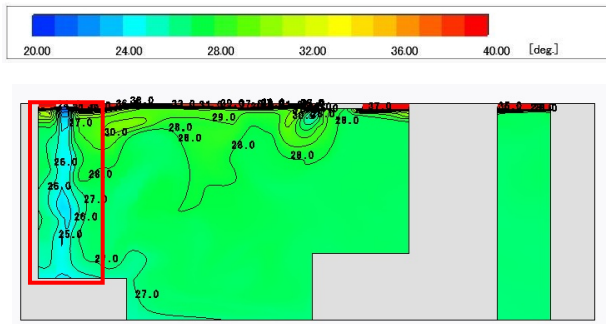


図-4 1 床室夏期 温度分布断面図

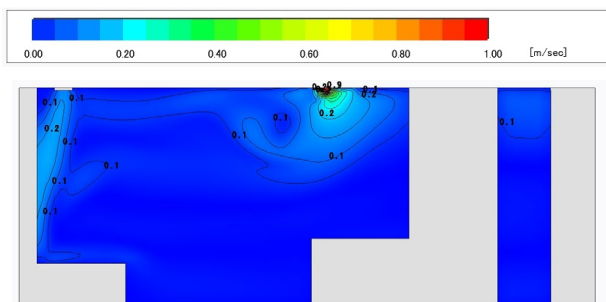


図-5 1 床室冬期 風速分布断面図

4.2 1 床室角アネモ案 解析結果

現状を再現した条件下での解析をふまえ、ベッド面への影響が少なくなるよう、吹出口を拡散性の高い角アネモに変更して再度解析を行った。

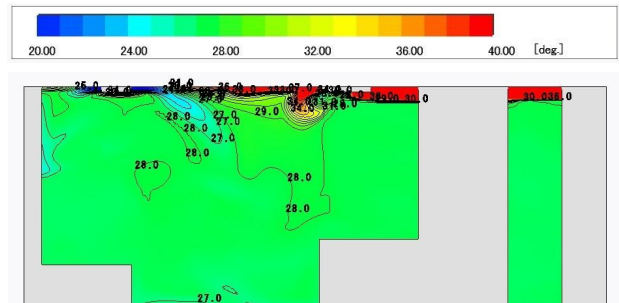


図-6 角アネモ案夏期 温度分布断面図

夏期の解析結果(図-6)では、図-4 と比べるとベッド周辺の温度低下が解消され、部屋全体が均一な温度に保たれていることが確認できる。しかし冬期(図-7)では、ベッドを利用する患者に悪影響を及ぼすほどの速さではないものの、ベッド面に降りている気流が気になる結果となった。

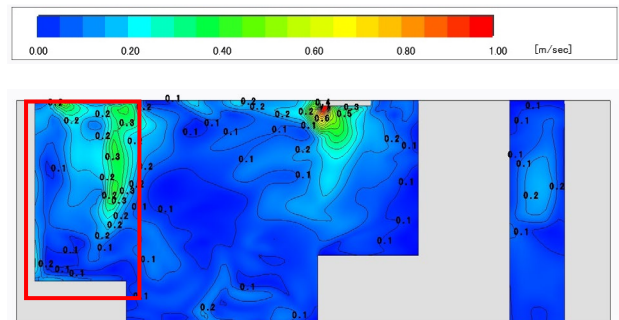


図-7 角アネモ案冬期 風速分布断面図

以上の結果をふまえ角アネモ案が CFD 解析では有用であると判断したが、更なる信頼性向上のためモックアップを用いた実測実験を行う。

5. 角アネモ案のモックアップ実験

新型コロナウイルスの影響で、実存の病室での実測検証を行うことが不可能であったため、学内にモックアップ施設を作成し、夏期、冬期を想定した条件下で各 2 週間実測実験を行った。なお、使用した部屋の広さの都合により病室全体ではなく、図-8 の枠で囲まれた病室の一部と給気口のみを再現し、実験を行った。

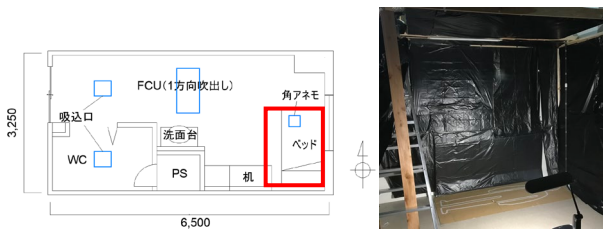


図-8 モックアップ再現位置・写真

実験では、風速の実測と気流の可視化を行う。なお、風速の実測結果は図-9に示すy軸方向1.0m地点のものを提示する。

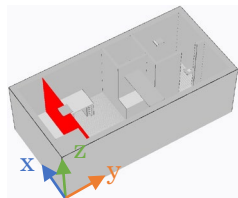


図-9 y軸断面位置

5.1 夏期 実測結果・CFD解析との比較

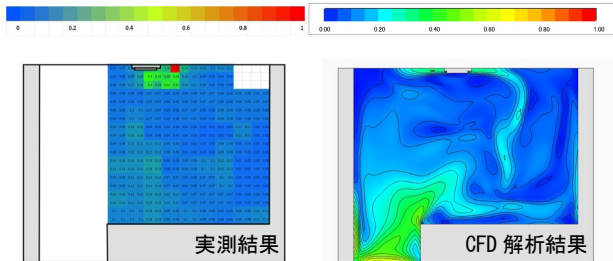


図-10 角アネモ案夏期 風速分布断面図比較

夏期条件での実測結果では、機器周辺とベッド付近において広い範囲に同じ風速が見られることから、角アネモの拡散性の高さが確認できた。しかし図-10のようにCFD解析結果と比べると、実測ではCFD解析ほどのコアンダ効果が発揮されず、図-11の気流可視化からも角アネモから吹き出された空気は横方向だけでなく、ベッドの方向にも吹き出していることが分かる。



図-11 気流可視化

5.2 冬期 実測結果・CFD解析との比較

冬期条件での実測結果では、夏期よりも広く横方向に広がっていることが、図-12、図-13双方から確認できる。これは、角アネモの拡散力に浮力が加わったことが影響していると推測できる。

角アネモ案を、モックアップ施設を用いて実測し図-11のようにCFD解析と比較したところ、実測と解析で違う挙動をする部分があると判明した。

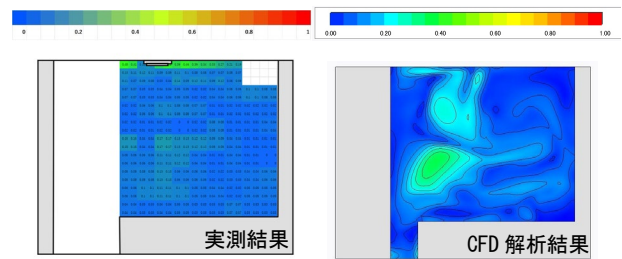


図-12 角アネモ案冬期 風速分布断面図比較



図-13 気流可視化

これらの結果から、特に夏期では吹出口の変更によってベッド周辺の風速が改善されるとは言い切れないと考えたため、新たにBL角度変更案を提案する。

6. BL角度変更案の提案

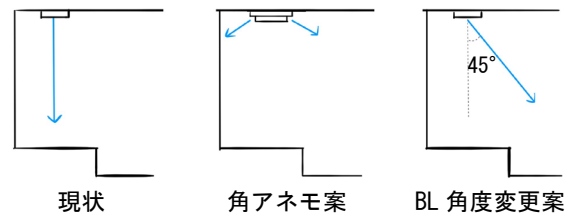


図-14 吹き出し角度

ベッドに給気口からの風が直接当たることによってベッド周辺の温熱環境に悪影響を及ぼす可能性があることと、実存の病室ではBLを使用していることから、BLをそのまま使用し、内部の羽根を調整して吹き出し角度を変更したBL角度変更案を提案する(図-14)。角アネモ案と同じく、モックアップ施設を用いた実験とCFD解析で評価を行う。

6.1 モックアップ実験 結果

図-15の気流の可視化実験から冷房、暖房共にBLから斜めに吹き出していることが確認でき、BLからの風が直接ベッド面に与える影響は少な

いように見える。



図-15 気流可視化(左冷房・右暖房)

6.2 CFD 解析結果

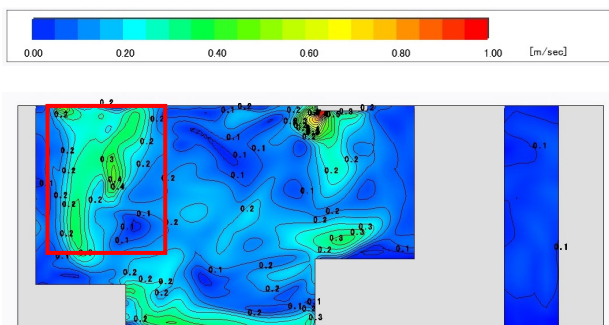


図-16 BL 角度変更案夏期 風速分布断面図

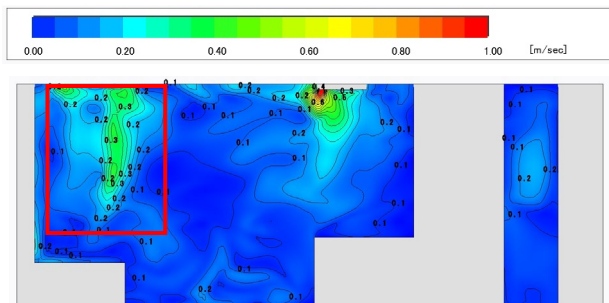


図-17 BL 角度変更案冬期 風速分布断面図

夏期(図-16)、冬期(図-17)共に実測実験ほど顕著な結果は得られなかったが、BL から斜めに風速が減少する傾向にあることから、BL からの気流がベッド面に直接及ぼす影響の少なさを確認することができた。しかし、病室全体の風速は角アネモ案と比べると若干高い数値を示している。

6.3 CFD 解析と実測結果の比較

図-18、図-19 のように実測結果と CFD 解析結果を比較すると、角アネモ案ほどの相違はないように見える。生じている違いの原因については、FCU からの送風の有無などが挙げられる。

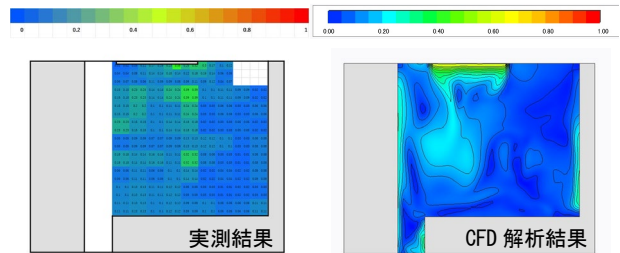


図-18 BL 角度変更案夏期 風速分布断面図比較

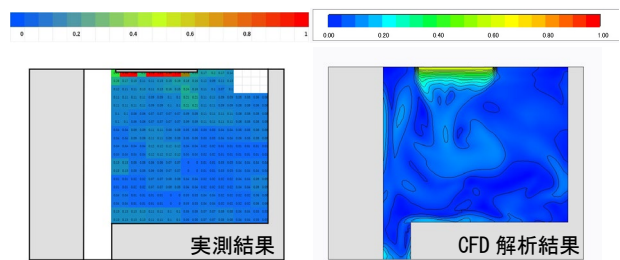


図-19 BL 角度変更案冬期 風速分布断面図比較

7. 結論

本研究では CFD 解析とモックアップによる実験を用いて、昨年度提案した角アネモ案について再度検討を行った。

CFD 解析では昨年度と同じく角アネモ案は有用であると思われたが、実測実験で CFD 解析とは異なる挙動を見せたことから角アネモ案が有用であるとは言い切れないと考え、新たに既存の BL の吹き出し角度を変更した案を提案した。

BL 角度変更案も同様に CFD 解析とモックアップによる実験を行ったところ、BL からの気流がベッドを避けるよう斜めに吹き出していることが確認された。CFD 解析では、病室全体の風速は角アネモ案と比較すると若干高い数値を示しているが、患者の健康に悪影響を及ぼすほどのものではないと考える。

以上のことから、昨年度提案した角アネモ案よりも BL 角度変更案の方が、既存の設備を改修することなく室内環境を改善することができる有用な案であると言える。

参考文献

中島由佳「CFD 解析を用いた F 病院の病室における温熱・空気環境の検討」『第 10 回学術・技術報告会論文集』 pp. 37-40. 空気調和衛生工学会

B-3

室内湿度分布形成に対する湿源の寄与を評価する指標 $CRI(S)_H$ の開発と

$CRI(S)_{DB}$ を併用した比エンタルピー空間分布評価法の提案

○須田華 (東北大学), 小林光 (東北大学), 森凱人 (東北大学)

Development of $CRI(S)_H$ to assess the contribution of moisture sources to indoor humidity distribution and proposal of assessment method of indoor specific enthalpy distribution with $CRI(S)_{DB}$ and $CRI(H)$

Suda Hana (Tohoku University), Kobayashi Hikaru (Tohoku University),
Mori Gaito (Tohoku University)

キーワード：温熱環境解析, 湿度, CRI , 空間評価, グリーンハウス, IoT

はじめに

筆者らは室内の温熱環境形成に作用する熱源、湿源、気流等の寄与を分解・評価する指標である CRI (Contribution Ratio for Indoor climate)の開発を行っている。一連の研究では、空間と躯体や土壌を一体に評価する $CRI(S)$ シリーズの開発を進め、これまで $CRI(S)_{DB}$ や $CRI(S)_{MRT}$ 等を提案するとともに、半透明空間やグリーンハウス内の環境評価に適用してきた。

本報では空間内の湿度形成を評価する $CRI(S)_H$ を提案し、グリーンハウスを対象としてその有用性を示す。また $CRI(S)_{DB}$ と $CRI(H)$ を用いた比エンタルピーによる空間評価法の提案を行う。

1. $CRI(S)_H$ の提案

1.1 $CRI(S)_H$ の理論

Hong らは湿度分布形成を分析することを目的として室内湿気環境形成寄与率 $CRI(H)$ ¹⁾ を提案している。空間内の CFD 解析を行った後流れ場を固定し、室内の湿源から個別に水蒸気を発生させることで各湿源の空間への影響度を評価する手法で、加藤・小林らによる初期の CRI ²⁾ と同様換気のない空間を対象とできない他、固体内の水分移動を考慮すべき場合に実現象との間で乖離が生じる。そこで本研究では固体も流体も同一系内で解析した上で、室内湿度分布に対する各湿源の寄与率を評価可能な指標 $CRI(S)_H$ の理論構築を行う。

1.2 $CRI(S)_H$ の定義

$CRI(S)_H(x)$ は解析領域内の位置 x における全湿源による湿度上昇 (または下降) に対する各湿源

の寄与割合を示す指標である。

$$CRI(S)_H(x) = \frac{\delta q_m}{q(x)} \quad \dots \text{式(1)}$$

$\delta q_m(x)$: 着目する湿源 m による位置 x における湿度上昇 (または下降) [kg/kg']

$q(x)$: 位置 x における全湿源による湿度上昇 (または下降)

$CRI(S)_H$ は $CRI(H)$ と同様の定義であるが以下の3点において異なっている。

(1) 固体内を流体と一体に解析する

流体と固体の水分移動は式(2), (3)で記述される。

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x_i} D - u_i \right) \frac{\partial q_w}{\partial x_i} + D \frac{\partial^2 q_w}{\partial x_i^2} \quad \dots \text{式(2)} \text{注2}$$

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q_w}{\partial x_i^2} \quad \dots \text{式(3)}$$

式(3)では D に空間分布がないが、固体中でも D に空間分布が生じる場合はある。これを考慮し固体を「風速が0の流体」として式(2)を適用することは妥当であり CRI を固体・流体問わず同一系内で定義することが可能である。このとき固体と流体中の絶対湿度を等価に扱うための読み替えが必要だが、これに関しては今後検討を行う。

(2) 境界条件を断湿条件としない

空間と一体に分析を行う固体との間及び解析領域の境界を断湿条件としない。

(3) 湿源の分類と基準湿度場の設定

湿源の正負の決定のため、湿源を対象湿源と非対象湿源に分ける。非対象湿源による湿度場を基準湿度場とし、これを上昇させるものを正、低下させるものを負とする。

2. 小型グリーンハウスにおける湿度分布測定

2.1 実験目的

ハウス内に複数湿源が存在する場合に形成される空間温湿度分布及び換気、日射等を実測し、これを解析対象データとする。

2.2 実験概要

東北大学青葉山キャンパス内の小型グリーンハウスに湿源となるプランターを設置して測定を行った。測定点を図-1に示す。空間温湿度 18 点に関しては、デジタル温湿度センサ(Sensirion SHT85)をWi-FiモジュールESP32に接続しデータをクラウドサーバーAmbientに送信しデータ収集した。表面温度 14 点に関しては、各物質表面にT型熱電対を透明テープで固定し測定した。屋外日射量は、日射計(EKO MS-402)をハウスに設置し測定した。屋内日射量は、日射計(EKO ML-01)をプランターに設置し測定した。プランターからの蒸散量は、電子天秤(AND GP-30K)にプランターを載せ、その重量変化を蒸散量として測定した。地中温度・熱流に関しては、熱流板を地中40cmに熱流板を設置して測定した。なお表面温度、日射量、地中温度・熱流に関してはデータロガー(GRAPHTEC GL840M)によった。蒸散量に関しては電子天秤よりデータを出力してPCで収録した。測定間隔は全て30秒である。

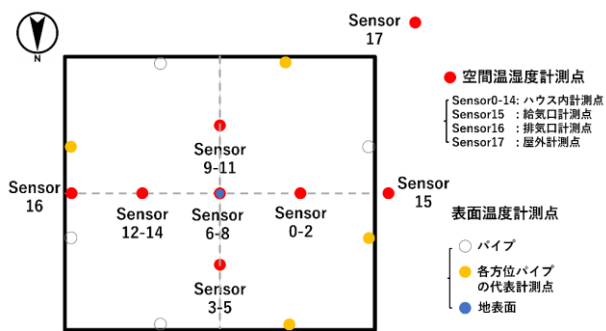


図-1 測定点(平面図)

2.3 実験結果

(1) 測定期間

測定は2021年12月16日～30日に実施しそのうち実測が安定した2021年12月23日を代表日とする。

(2) 空間温度および空間絶対湿度

図-2、図-3に代表日の空間温度、空間絶対湿度を示す。夜間は0℃以下、3g/kg程度だが、7時～

10時にかけて温度・湿度共に上昇し、10時～14時にかけては25℃、6g/kg前後で安定している。

(3) 蒸散量

図-4にプランターの重量変化を示す。8:00～16:00にかけ153.1g減少しており、特に10:00～14:00は33g/h程度の蒸散が継続する状況が確認される。

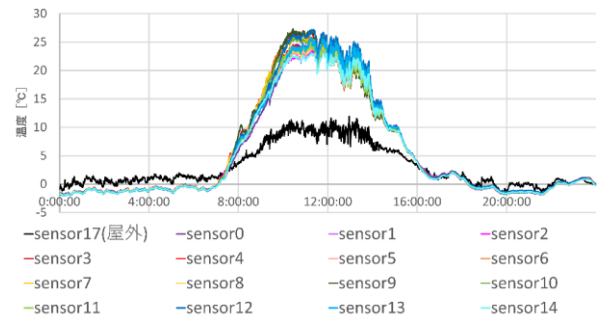


図-2 空間温度

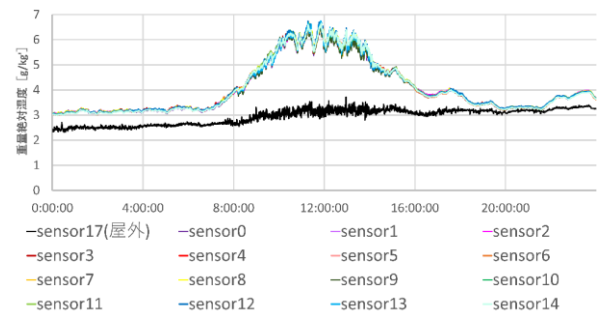


図-3 空間絶対湿度

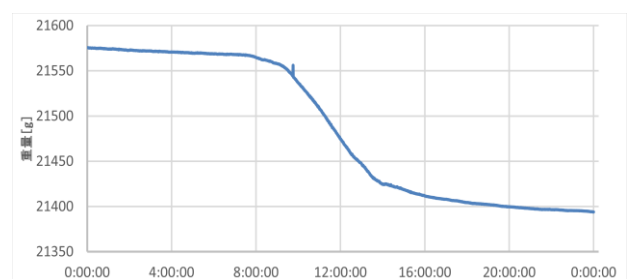


図-4 プランター重量変化

3. CFD解析

3.1 解析概要

実測値が安定した2021年12月23日12時を対象に定常解析を行った。解析条件は表-1～表-4で、実験で使用したグリーンハウスをモデル化したものを対象に解析を行った。解析は汎用CFDコードscFlowによった。

表-1 解析基本条件

モデル	標準 k-ε モデル
メッシュ分割	814715 (非構造格子)
換気量	94[m ³ /h]
屋外側総合熱伝達率	17.9[W/m ² ・K]
屋内側総合熱伝達率	9[W/m ² ・K]

表-2 解析条件

大項目	小項目	数値[単位]
水分発生	プランター	32.9 [g/h]
	水分流入(換気)	370.6 [g/h]
	地面からの蒸散	258.9 [g/h]
	水分流出(換気)	662.3 [g/h]
壁面境界条件	地面蒸散熱量	-162.31[W]
	地底面温度 (-40cm 地点)	22.6[°C]
気象条件	外気温	9.7[°C]
	給気温度	13.3[°C]
	流入空気 絶対湿度	3.2[g/kg]
	全天日射量	491.9[W/m ²]

表-3 物性値

物質名	熱伝導率 [W/m・K]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg・K]
ビニル	0.16	1400	950
鉄パイプ	80.3	2000	442
土壌	1.004	2365	2800
発泡スチロール	0.037	17.5	2000
アルミパイプ	2688	905	237

表-4 日射特性

物質名	反射率	吸収率	透過率
ビニル	0.05	0.3	0.65
鉄パイプ	0.35	0.65	0
地表面	0.7	0.3	0
発泡スチロール	0.9	0.1	0
アルミパイプ	0.3	0.7	0

3.2 解析結果

温度及び湿度の解析結果を図-5, 図-6 に示す。実測より空間温度平均は約 3°C、湿度平均は 0.8 g/kg'高い結果となった。日射量が最大の 12 時で定常解析したため熱の入射が多く再現性は若干低

いが、以降この結果を用いる。なお今回は気中と土中の等価絶対湿度を求めることができないなどの制約があり CRI(S)_H評価は発生水分量のみの解析となった。解析結果は CRI(H)と同じ計算としたが対象空間には吸湿要素がないこと及び換気があることから評価には問題を生じない。

4. CRI(S)_{DB} および CRI(H) の算出

CRI(S)_{DB}, CRI(H)の計算結果を図-7, 図-8 に示す。なおプランターと土壌のみを示す。CRI(S)_{DB}に関して、プランターはその近傍への寄与は 0.35 程度であるが影響範囲は狭い。土壌は地表面付近では 0.3 ほどであったが、ハウス上部に行くにしたがって寄与率が下がり屋根部では 0.05 であった。CRI(H)に関して、プランターはその近傍への寄与率は 0.7 と高いが影響範囲は限定的であった。土壌は全体的に寄与率 0.9 程で、空間湿度場形成に大きく寄与している。

5. CRI(S)_{DB}, CRI(H) による空間評価の提案

5.1 比エンタルピーを評価する CRI_h の提案

位置*x*における全温湿源による比エンタルピー *h(x)*に関して、温度・絶対湿度は各温湿源の温度場・湿度場の線形和であるから*h(x)*は式(4)で与えられる。

$$h(x) = cp\{\theta_1(x) + \theta_2(x) + \dots + \theta_n(x)\} + (q_1(x) + q_2(x) + \dots + q_n(x))\{r + cv(\theta_1(x) + \theta_2(x) + \dots + \theta_n(x))\} \quad \dots \text{式(4)}_{\text{注3}}$$

水蒸気の顕熱は潜熱に比べて十分に小さいことから式(4)を式(5)として扱うと、位置*x*におけるある着目温湿源*m*由来のエンタルピー場*hm(x)*は式(6)で与えられる。

$$h(x) \cong cp \sum_{i=1}^n \theta_i(x) + r \sum_{i=1}^n q_i(x) \quad \dots \text{式(5)}$$

$$hm(x) = 1.005\theta_m(x) + 2501.1q_m(x) \quad \dots \text{式(6)}_{\text{注4}}$$

以上より位置*x*におけるある着目温湿源*m*のエンタルピー場に対する寄与率CRI_h(*x*)は式(7)のように定義できる。

$$CRI_h(x) = \frac{\delta hm(x)}{\delta h(x)} \quad \dots \text{式(7)}_{\text{注5}}$$

5.2 CRI_h の算出

プランターと土壌の CRI_h 計算結果を図-9 に示す。プランターの比エンタルピーに対する寄与範

囲はその近傍のみで限定的であった。一方、土壌は地表面近くへの寄与が 0.75~0.9、ハウス上部でも 0.5 と比較的ハウス全体への寄与率が高い。

6. まとめ

本研究では固体を含めた室内湿気形成寄与率指標 CRI(S)_Hの開発、実験・解析によるハウス内温湿度分布の把握、CRI(S)_{DB}, CRI(H)を応用した比エンタルピーによる空間評価の提案を行った。今後 CRI(S)_{注6}の整備とその複合による総合的な評価により、実環境評価への適用を検討する。

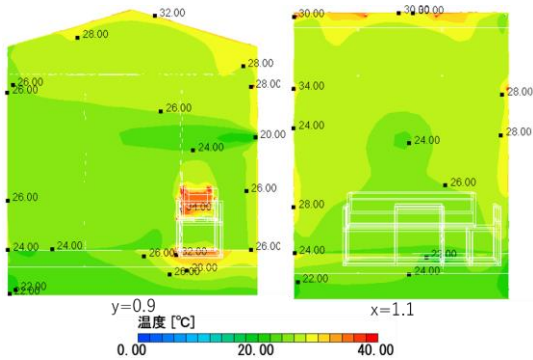


図-5 解析結果(温度)

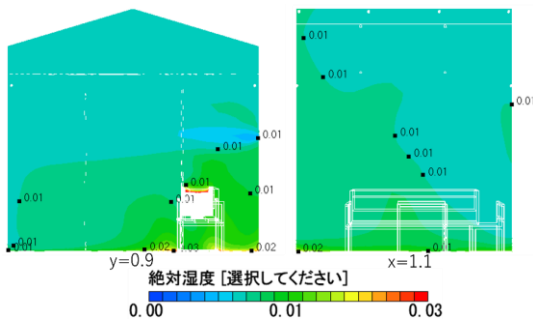


図-6 解析結果(絶対湿度)

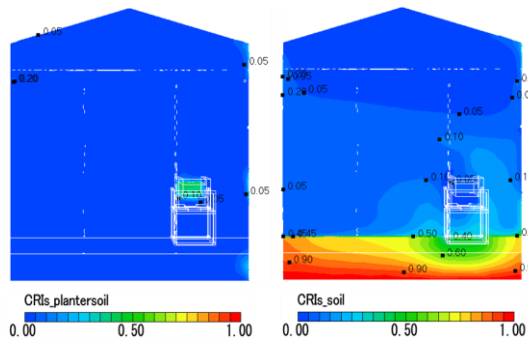


図-7 CRI(S)_{DB}算出結果

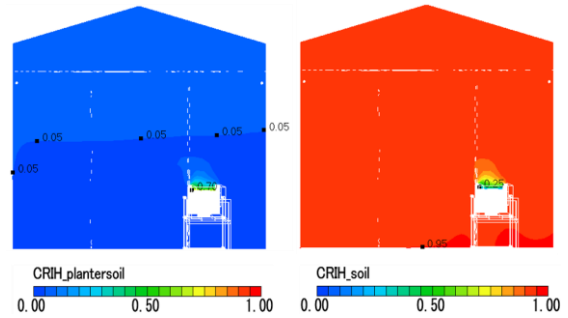


図-8 CRI(H)算出結果

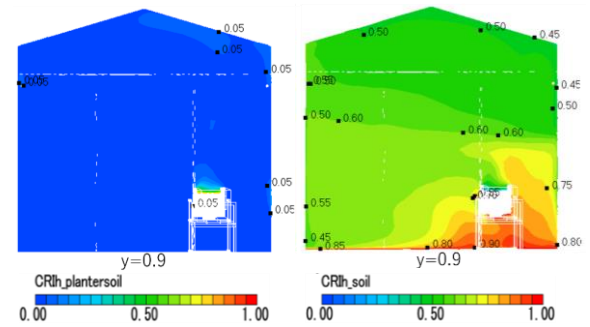


図-9 CRI_h算出結果

- 注 1 : 室内乾球温度場形成における各熱源の寄与を評価する指標
- 注 2 : q_w : 絶対湿度の瞬間値[kg/kg], u_i : 風速の瞬間値の 3 成分 [m/s], x_i : 空間座標の 3 成分 [m], D : 水蒸気に関する分子拡散係数 [m²/s]
- 注 3 : c_p : 乾き空気の定圧比熱 1.005[kJ/kg · K], c_v : 水蒸気の定圧比熱 1.846[kJ/kg · K], $\theta_n(X)$: 位置 X における温湿源 n 由来の温度場 [°C], $q_n(X)$: 位置 X における温湿源 n 由来の湿度場 [kg/kg]
- 注 4 : $\theta_m(X)$: 位置 X におけるある着目温湿源 m 由来の温度場, $q_m(X)$: 位置 X におけるある着目温湿源 m 由来の湿度場
- 注 5 : $\delta h_m(X)$: 着目温湿源 m による位置 X における比エンタルピーの上昇(または下降) [kJ/kg], $\delta h(X)$: 全温湿源による位置 X における比エンタルピーの上昇(または下降) [kJ/kg]
- 注 6 : CRI(s)は CRI シリーズ全体をまとめて指す

参考文献

- 1) HongHuang ShinsukeKato RuiHu YoshihiroIshida: Development of new indices to assess the contribution of moisture sources to indoor humidity and application to optimization design: Proposal of CRI(H) and a transient simulation for the prediction of indoor humidity, Building and Environment, Volume 46, Issue 9, September 2011, Pages 1817-1826
- 2) 加藤信介, 小林光, 村上周三: 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究(その 2), CFD に基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No.69, pp39-47, 1998.4

B-4

空気の流れの可視化による健康・快適な教室環境づくりに向けた資料の提案

○能登谷鞠菜（宮城教育大学），菅原正則（宮城教育大学），石田泰之（東北大学），
小林光（東北大学），江刺美和（宮城教育大学附属中学校）

Suggestion for the Healthy and Comfortable Classroom in Terms of CFD

Notoya Marina (Miyagi University of Education),
Sugawara Masanori (Miyagi University of Education), Ishida Yasuyuki (Tohoku University),
Kobayashi Hikaru (Tohoku University),
Esashi Miwa (Affiliated Junior High School, Miyagi University of Education)

キーワード：換気，CFD 解析，環境調整行動

はじめに

教室は学校生活の多くを過ごす場所であり、生徒の健康状態を保つために適切な温度管理や空気の衛生管理が必要である。文部科学省が提示する学校環境衛生基準¹⁾では、教室等の温度は「17℃以上 28℃以下であることが望ましい」とされており、また、教室の二酸化炭素量の増加が他の汚染物質の増加を伴うと考えられることから、「換気の基準として、二酸化炭素濃度は、1500ppm 以下であることが望ましい」とされている。また、柳井ら²⁾によれば、教室環境を整えることで健康や学習意欲に好影響を与える可能性も示されている。

しかし、例えば冬期の暖房使用時に、室内の空気環境が悪くなった場合であっても、寒さの点から授業中に窓を開けて換気することは難しい。そこで、気温低下を避けながら効率よく換気することが望まれるが、空気の流れは複雑であり視認することはできないため、室内全体の空気の流れの入れ替わりができていないのかを確認することは難しい。

そこで本研究では、流体解析ソフトを用いて空気の流れや気温分布を可視化することにより、効果的な換気方法を検討する。そして、解析結果から換気方法について生徒が理解しやすいような資料にまとめることで、健康・快適な教室環境づくりに役立てることを目的とする。

1. 学校教室における空気流れの可視化

1.1 調査対象教室の概要

調査対象は、仙台市市街域にある中学校の1階4教室とホールである(図-1)。教室は校舎南側に位置し、外窓は全て南面しているが、ホールへの出入り口は内側教室(教室2と3)と外側教室(教室1

と4)では位置が異なっている。この中学校の教職員によれば、外側教室は風通しが悪いように感じられ、夏は暑く、冬(コロナ禍以前)は風邪の罹患率が高い傾向が見られたとのことである。

教室とホールはいずれも天井高 3.08m で床上 1.05m 以上が窓で仕切られ、教室後方に外への出入り口があり、外窓は床上 90cm 以上から設置されている。内側教室は開閉できる外窓が4箇所あるが、外側教室は3箇所である。机は40台あり天板の高さは床上 76cm である。内側教室の教室後方、外側教室の北側には高さ 88cm のロッカー及び掃除用具入れ、いずれの教室の前方にも教卓と電子黒板が配置されている。

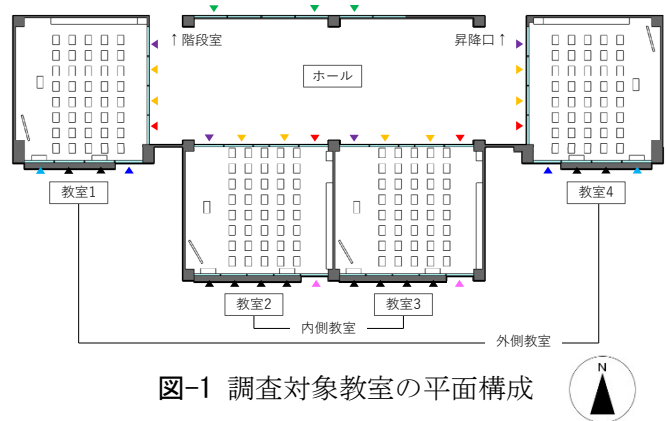


図-1 調査対象教室の平面構成

1.2 気流解析の概要

本研究では、FlowDesigner を用いて SIMPLEC 法により気流解析を行い、空気の流れを可視化した。図-2 に示す教室モデルでは、教室全体の気流性状に影響の少ない机脚部は省略し、天板のみとした。そして、個体部のエッジと、その間をできる限り均等に分割したメッシュを図-3 のように生成した。

2. 気流解析による教室の気温・換気性状の比較

2.1 内側教室と外側教室における教室単体の比較

調査対象教室は他の教室やホールが隣接している。開口位置の異なる外側教室(教室 1)と内側教室(教室 2)を単体で比較するため、隣接する外壁を模した仮想壁面を設置して解析を行った。表-1 に解析条件、表-2 および図-4 に解析結果を示す。外側教室よりも内側教室の換気量が 34%多いことが分かる。

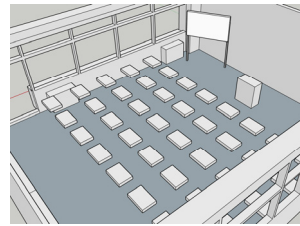


図-2 教室モデル

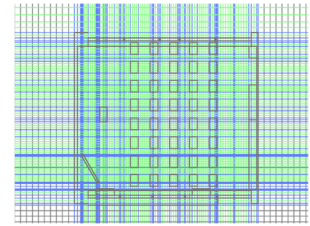
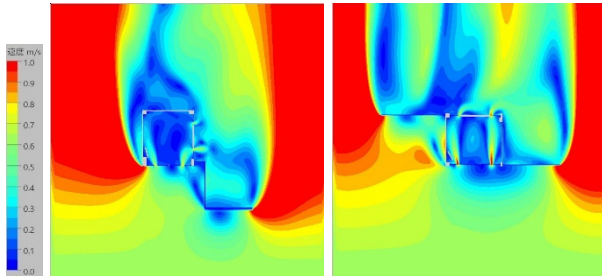


図-3 メッシュ線



外側教室 内側教室

図-4 解析結果

表-1 解析条件

解析領域	45.0m(X)×45.0m(Y)×10.0m (Z)
教室の大きさ	外：8.125m(X)×8.845m(Y)×3.080m(Z) 内：9.125m(X)×7.850m(Y)×3.080m(Z)
メッシュ数	外：218(X)×203(Y)×48(Z)=2,124,192 内：192(X)×219(Y)×51(Z)=2,144,448
乱流モデル	高レイノルズ数型 修正 L-K モデル
終了条件	残差 -3.5
流入条件	外気風(風向パターン使用時：09 方向 / 風向角度：90.000°) 流速：1.0m/s 温度：25.0℃
開口部	①②③：0.5m×2.0m ④：0.5m×1.2m

2.2 教室棟基準階の解析による各教室の気温・換気性状

4 教室とホールからなる教室棟基準階(図-1)に対して、季節、開口パターン、空調の有無、換気扇稼働の有無の条件を変えた場合の気温・換気性状を検討した。解析条件および解析 case を表-3 および表-4 に示す。なお季節「基準」は風向南、風速 1.0m/s、気温 25.0℃、「夏期」「冬期」は 1991 年～2020 年の 1 月、8 月における月平均気温 ϑ を用いた。開口パターンは、小さい開口部をいくつも設けた場合(I)、教室対角線上に大きな開口部を設けた場合(II)、換気扇の効果を検証するために教室ホール側とホールの窓を開口した場合(III)としている。表-5 に解析結果から得られた換気回数を示す。なお、図-5～11 の気温・CO₂ 濃度分布は床上 1.0m で表示している。

(1) 空調が稼働していない場合

①基準

2.1 節において教室単体で解析した結果ほどの差はないが、case0 の換気回数は内側教室が外側教室より多い。CO₂ 濃度分布を見ると、いずれの教室も風の通りが良い教室後方は濃度が低い。外側教室の外窓から教室前方にかけては濃度が高い。内側教室は局所的に高濃度の箇所がある。

②冬期

換気回数は、case1 では外側教室が内側教室よりも多く、case2 では内側教室が外側教室よりも

表-2 解析結果

	外側教室	内側教室
換気容積(m ³)	216.713	218.052
換気量(m ³ /h)	4.912×10 ³	6.565×10 ³
換気回数(回/h)	22.7	30.1

表-3 解析条件

解析領域	90.0m(X)×70.0m(Y)×10.0m (Z)
教室の大きさ	外：8.125m(X)×8.845m(Y)×3.080m(Z) 内：9.125m(X)×7.850m(Y)×3.080m(Z)
ホールの大きさ	23.350m(X)×7.850m(Y)×3.080m(Z)
乱流モデル	高レイノルズ数型 修正 L-K モデル
終了条件	残差 -3.50
開口パターン	I ▲ 0.1m×1.2m, ▲ 0.1m×2.0m, ▲ (0.1m×0.95m)×2
	II ▲ 0.5m×1.2m, ▲ 0.5m×2.0m
	III ▲ 0.5m×2.0m, ▲ (0.1m×0.95m)×2
ホール開口部はいずれも ▲ 0.9m×1.2m	
暖房	吹出面積 0.186m ² 流速 0.8m/s 吹出温度 40℃
冷房	吹出面積 0.033m ² ×4 流量 5.0m ³ /min 吹出温度 25℃ 吸込面積 0.26m ² 流量 20.0m ³ /min
換気扇	ファンパネル面積 0.164m ² 流速 2.24m/s
CO ₂	発生エリア 0.024m ³ 発生量 39.3g/h

多い。このときの CO₂ 濃度分布(図-5)を見ると、case1 は教室 3 と教室 4 で CO₂ 濃度が高いのに対して、case2 では教室 1 の中央付近の濃度が高く、case1 に比べて空気の淀みは少ない。

③夏期

case3 よりも case4 の換気回数が全体的に多く、外側教室より内側教室の換気回数が多い。特に case4 の CO₂ 濃度分布(図-6)では、教室 1 の奥まで空気が流れていないことが分かるが、換気回数で見ても他の教室と比べて 1/2~1/5 と圧倒的に少ない。

(2) 冬期暖房時

換気回数は case5 の方が少ないため、気温(図-7)も全体的に高い。ホール側に生じる高温の範囲は、天井付近の暖気が下降しているためである。

(3) 夏期冷房時

いずれの case においても内側教室の換気回数が多い。ただし、開口パターン I (case7)から II (case8)に変えると、外側教室は換気回数が減少するが内側教室では増加する。CO₂ 濃度分布は case8 が全体的に低い、気温分布(図-8)は教室 1 以外において外気の流入が多いため高温になっている。

(4) 換気扇稼働時

①冬期暖房時

換気回数は case9 の方が case10 より少なく、CO₂ 濃度も内側教室の中央が外側教室に比べてやや高くなっている。しかし、その差は小さい。一方、温度分布(図-9)は全体的に低いとはいえ、case9 では教室間の差は小さい。これに対して開口パター

ンIII(case13)とすると、換気回数は少なくなるものの、外側教室と内側教室の差はほぼない。また、いずれの教室の CO₂ 濃度分布(図-10)もほぼ均一である。温度分布(図-11)は冷たい外気が入らないため全体的に高くなっているが、高温になりすぎている部分は見られない。

②夏期冷房時

換気回数は開口パターン I (case11)と II (case12)において内側教室が多く、III(case14)では教室間の差はなかった。ただし、開口パターン I から II へ変えると外側教室は減少するが、内側教室の換気回数は増加する。CO₂ 濃度分布を見ると局所的に高濃度になる箇所は見られるが、空気が淀んでいる様子は見られない。温度分布は、外気の流入により開口パターン I、II では教室 4 の窓際、開口パターン II では内側教室で高くなっているが、開口パターン III では、教室内の温度が高すぎる等の偏りがなくほぼ均一に分布している。

3. 健康・快適な教室環境づくりに向けた資料の作成

前章で得られた結果をもとに、健康・快適な教室環境づくりに向けた資料(図-12)を作成した。学校環境衛生基準をもとに健康・快適な教室環境をつくるためには、窓開けによって得られる換気回数が多いことはもちろん、教室内の CO₂ 濃度分布に偏りがなければ考慮する必要がある。換気回数と CO₂ 濃度分布に着目すると、今回行った検討 case

表-4 解析 case

case	季節	開口パターン	暖冷房	換気扇
0	基準	I	なし	なし
1	冬期	I		
2		II		
3	夏期	I		
4		II		
5	冬期	I	暖房	換気扇
6		II		
7	夏期	I	冷房	
8		II		
9	冬期	I	暖房	
10		II		
11	夏期	I	冷房	
12		II		
13	冬期	III	暖房	
14	夏期	III	冷房	

表-5 換気回数(回/h)

case	教室 1	教室 2	教室 3	教室 4	ホール
0	5.2	6.1	6.3	5.4	8.6
1	13	12.1	13.2	19.6	16.1
2	12	13.5	14.5	14.1	18.5
3	4.8	10.9	13.1	12.3	14.9
4	3.5	16.6	17	13.1	19.4
5	19.8	21	20.5	23.2	14.3
6	22.3	22	24.2	23.8	19.6
7	21.7	28.5	29.5	25.8	15.1
8	20.4	37.5	36.9	17.7	16
9	26.1	24	26.6	27.6	17.3
10	28.4	24	29.5	29.1	21.9
11	27.7	31.8	31.3	25.4	7.8
12	20.2	32.9	32.4	20.1	11.5
13	16.1	15.8	16.1	16.3	14.4
14	25	25.1	25.2	24.7	12.9

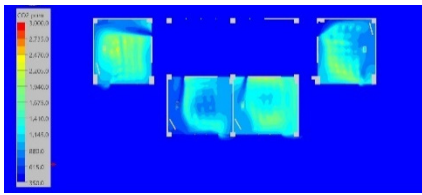


図-5 case2 CO₂濃度分布

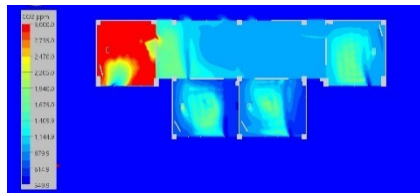


図-6 case4 CO₂濃度分布

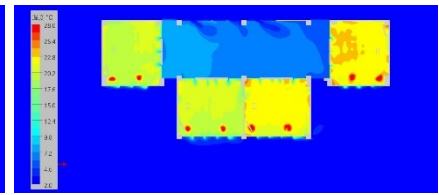


図-7 case5 気温分布

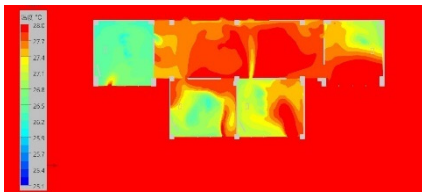


図-8 case8 気温分布

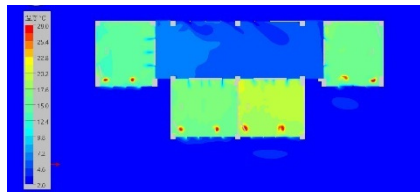


図-9 case9 気温分布

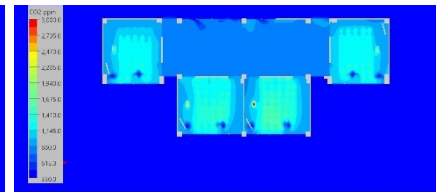


図-10 case13 CO₂濃度分布

の中で最も効果的だと考えられるのは、冬期は case9、夏期は case11 の開口パターンIである。このことから開口部を細かくいくつも設ける方がより効果的に室内の換気ができるといえる。しかしこの方法による長時間の換気は外気の流入が多くなり、室内温度が基準の範囲を超える可能性がある。温度を保ちつつ換気をするには、冬期は case13、夏期は case14 の開口パターンⅢが効果的である。この2つの開口パターンを状況によって使い分けることで、空気環境を衛生的に維持することができると思われる。

この資料により、調査対象中学校の生徒が窓開けや換気扇の効果を理解し、健康・快適な教室環境づくりに役立てられることを期待している。

まとめ

本研究では、仙台市内中学校において生徒が健康・快適な教室環境づくりに役立てることのできる資料の提案を目指し、流体解析ソフトを用いて教室内の空気の流れや気温分布を可視化することで、効果的な換気方法の検討を行った。

参考文献

- 1) 文部科学省:学校環境衛生管理マニュアル「学校環境衛生基準」の理論と実践[平成 30 年度改訂版]: p.21, p.26, pp.28~30
- 2) 柳井悠希, 伊香賀俊治, 川久保俊:教室環境の質が児童の体調と集中力に与える影響に関する実態調査:日本建築学会環境系論文集 第77巻 第676号, pp.533~539, 2012年6月
- 3) 国土交通省:気象庁 | 過去の気象データ検索:平年値(年・月ごとの値):

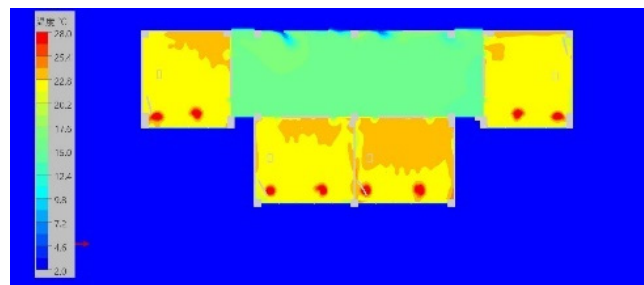


図-11 case13 気温分布

~健康・快適な教室環境づくり~
効果的に換気をしよう!

健康・快適な教室環境の目安は...
 温度 17°C以上 28°C以下, CO₂濃度 1500ppm以下

① 全ての窓やドアを10cmくらいずつ開け換気扇を稼働する

→短時間で多く室内を換気できるが、室温が外気に影響されやすい

② ホールに面した窓を10cmくらい、ドアを50cmくらいずつ開け換気扇を稼働する

→少し時間がかかるが、室温を保ちながら換気することができる

図-12 健康・快適な教室環境づくりに向けた資料

https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=34&block_no=47590&year=&month=&day=&view=p1:(2021.10.5 参照)

BIM 技術を用いた空調配管システムの設計に関する研究

その1 配管システムの構築及び IFC データの確認

○高橋翔吾（東北工業大学）,高橋朱利（東北工業大学）,許雷（東北工業大学）

Shogo Takahashi (Tohoku Institute of Technology), Syuri Takahashi, Lei Xu

キーワード：冷水, 機器性能値, IFC

はじめに

昨年 3 月に、国土交通省が発注者における BIM/CIM 実施要領（案）¹⁾を更新し、LandXML1.2 に準じた 3 次元設計データ交換標準と IFC ファイルの利用を提案した。本研究では、空調設備分野における IFC データの活用に着目し、BIM ソフト Revit で出力された空調冷水システムの IFC データを対象として、システムの構成、設備要素の定義を確認する。

1. 冷水システムモデルの作成

Revit2022 を用いて、図-1 に示すリバーサイト方式の空調冷水システムの例を作成した。地下 1 階に冷凍機を 2 基、1 階～3 階に空調機を 2 台ずつ設置した。各空調機の冷水流量を 10L/s、各冷凍機流量を 30L/s に設定した。配管付属品として温度計や圧力計も配置した。

IFC4 の仕様書に基づいて、Revit のプラグインソフト BIM Interoperability Tools²⁾を利用して、作成した設備システムの IFC データを出力した。IFC 書き出し設定オプションとしては、Revit プ

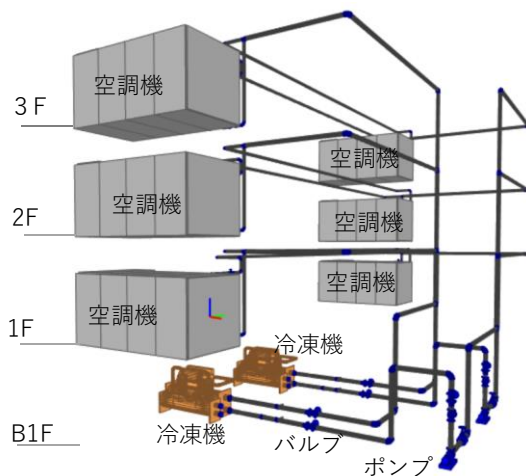


図-1 空調冷水システムの 3 次元図面

ロパティセットと IFC 共通プロパティセットを利用した。

2. 冷水システム及び設備要素の IFC データ

2.1 システムデータと IfcSystem

構築された冷水システムでは、冷水行きと還りの 2 つ系統がある。冷水還り系統の IFC データ構成は図-2 に示すグループ要素 IfcRelAssignsToGroup(#118862)で定義されており、このグループの *RelatingGroup* 属性は IfcSystem(#118855)である。IfcSystem の *Name* (ネーム) 属性は“CHR1”、*ObjectType* (オブジェクトタイプ) 属性は“M032_CH 冷温水(還)”である。また、システムの *RelatedObjects* 属性から冷凍機 IfcChiller、空調機 IfcEnergyConversionDevice、バルブ IfcValve、ポンプ IfcPump、配管 IfcPipeSegment、配管付属品(圧力計・温度計) IfcFlowInstrument など構成要素を 623 個確認した。

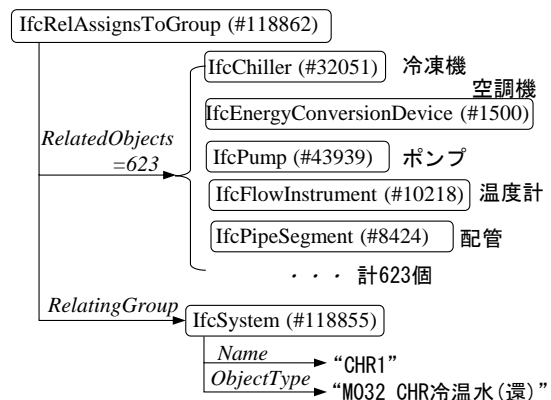


図-2 冷水還り系統の IFC データ構成

2.2 設備要素の IFC データ

給排水設備システムと同様に、配管は IfcPipeSegment、継手類は IfcFlowFitting、バルブは IfcValve で定義されているため、本研究では、

冷凍機、空調機、ポンプ、圧力計など配管付属品の IFC データを説明する。

(1) 冷凍機 IfcChiller

図-3 に示すように、冷凍機は IfcChiller クラスで定義されており、Name や Object Type などの属性を確認した。また、PropertySet 属性から冷凍機の冷水流量(0.03 m³/s)、圧力損失 (371kPa) など機器性能値を確認できる。

IfcChiller(#32051)	
Name	“M_らせん回転式液体凍結機-水冷式-4パス-1143~1582kW:1143-1582kW:98670”
ObjectType	“M_らせん回転式液体凍結機-水冷式-4パス-1143~1582kW:1143-1582kW”
ObjectPlacement	<IfcLocalPlacement(#32050)>
Representation	<IfcProductDefinitionShape(#32044)>
Tag	“986870”
PredefinedType	NOTDEFINED

図-3 冷凍機の IFC データ構成

(2) 空調機 IfcEnergyConversionDevice

図-4 に示すように、空調機は IfcEnergyConversionDevice クラスで定義されている。Name や ObjectType 属性にコイルの面積情報も含まれている。また、PropertySet 属性から冷凍機の冷水流量(0.01 m³/s)、圧力損失 (19.9kPa)、外部(機外)全圧 (719Pa) など機器性能値を確認できる。

IfcEnergyConversionDevice(#1500)	
Name	“M_屋外AHU-水平:5.7平方メートルのコイル:968356”
ObjectType	“M_屋外AHU-水平:5.7平方メートルのコイル”
ObjectPlacement	<IfcLocalPlacement(#1499)>
Representation	<IfcProductDefinitionShape(#1493)>
Tag	“968356”

図-4 空調機の IFC データ構成

(3) ポンプ IfcPump

ポンプは IfcPump クラスで定義されており、図-5 に Name や ObjectType 属性を示している。また、PropertySet 属性からポンプの流量(0.01 m³/s)、圧力損失(19.9kPa)、外部(機外)全圧(719Pa) など機器性能値を確認できる。

(4) 配管付属品 IfcFlowInstrument

BIM Interoperability Tools を用いて、配管付属品は IfcFlowInstrument として出力される。特に、PredefinedType 属性が指定できるため、圧力

計や温度計などが定義できる。図-6 に冷水供給側の圧力計の一例を示している。PredefinedType 属性は“PRESSUREGAUGE”となっているため、圧力計であることを確認できる。その他に、PredefinedType 属性は“THERMOMETER”になる場合、配管付属品は温度計と判断できる。

IfcPump(#43939)	
Name	“M_遠心ポンプ-水平:5.4LPS-7.3 Meter Head:990627”
ObjectType	“M_遠心ポンプ-水平:5.4LPS-7.3 Meter Head”
ObjectPlacement	<IfcLocalPlacement(#43938)>
Representation	<IfcProductDefinitionShape(#43932)>
Tag	“990627”
PredefinedType	NOTDEFINED

図-5 ポンプの IFC データ構成

IfcFlowInstrument (#59861)	
Name	“M_圧力ゲージ:100mmダイヤル-8mm:998771”
ObjectType	“M_圧力ゲージ:100mmダイヤル-8mm”
ObjectPlacement	<IfcLocalPlacement:#59860>
Representation	<IfcProductDefinitionShape:#59854>
Tag	“998771”
PredefinedType	“PRESSUREGAUGE”

図-6 圧力計の IFC データ構成 (一例)

3. 結論

本報では、IFC4 の仕様書に基づいて、Revit のプラグイン BIM Interoperability Tools を利用して、空調冷水システムの IFC データを出力し、冷凍機、空調機、ポンプ、圧力計など配管付属品の IFC データを説明した。また、出力された PropertySet 属性から冷凍機や空調機の冷水流量、圧力損失など属性を確認した。今後は、これらの設備性能データを空調設備の設計に活用したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：発注者における BIM/CIM 実施要領(案)，<<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001395761.pdf>>(2022年2月8日参照)
- 2) Autodesk: Autodesk BIM Interoperability Tools, <<https://interoperability.autodesk.com/>>(2022年2月8日参照)

BIM 技術を用いた空調配管システムの設計に関する研究

その2 配管圧力損失及び管径の計算

○高橋朱利(東北工業大学), 高橋翔吾(東北工業大学), 許雷(東北工業大学)

Pipe Design for HVAC System with BIM Technology

Part 2 Calculations of Pressure loss and size

Syuri Takahashi (Tohoku Institute of Technology), Shogo Takahashi, Lei Xu

キーワード : BIM, 管径設計, 配管設備, 圧力損失

はじめに

前報に続き、本研究では、作成されたリバースリターン方式の冷水システムを対象として、配管の圧力損失及び管径を計算する。特に、手動計算と Revit による自動計算の整合性を確かめることを目的とする。

1. 冷水管の管径設計及び圧力損失の計算

1.1 冷水管の管径設計

Revit の「ダクト/配管のサイズ設定」ツールを用いて、冷水管の管径を設計する。図-1 に示すように、全圧法を利用して、摩擦損失を 245Pa/m に設定する。また、分岐サイズ設定として、「計算されたサイズのみ」を選択した。Revit2022 の MEP ファミリより、空調機など設備を選定し、冷水流量を設定した上、冷水管の管径が自動的に計算される。

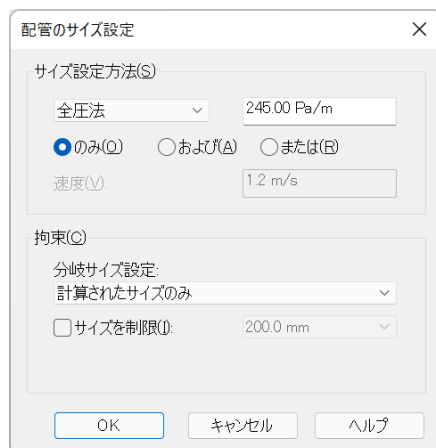


図-1 冷水管サイズの設定

手動計算では、空気調和衛生工学便覧に記載される配管用炭素鋼管の流量線図や継手の局部抵抗

係数 λ を使用する。また、ASHRAE の計算資料^{2),3)}などを参照しながら、抵抗計算を行った。

1.2 圧力損失の計算

配管の摩擦損失係数、分岐やエルボの局部抵抗係数を用いて、配管圧力損失を計算する。

1.3 圧力損失レポートの作成

Revit の解析ツール「管内圧力損失レポート」を選択し、計算システムを選定すれば、配管の圧力損失の計算結果が出力できる。また、レポート設定画面で、使用可能なレポートフィールドを選択し、html 形式のレポートが作成される。

本研究では、CH1(冷温水往き)と CHR1(冷温水還り)を選定し、冷水システムの圧力損失を計算する。図-2 にクリティカルパスの配管ルートが表示されている。点線は冷水往き系統、直線は冷水還り系統となる。

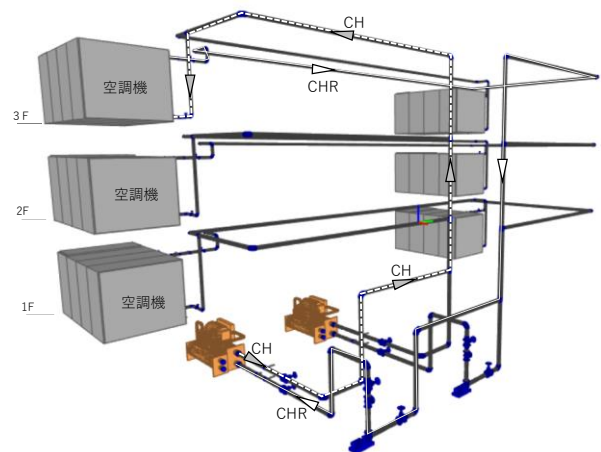


図-2 冷水管のクリティカルパス

2. 計算結果の比較

手動計算の方法を参照しながら、BIM ツールに

より自動的に計算した配管の圧力損失、管径を比較する。表-1に冷水行き系統のクリティカルパスの計算結果を示している。

表-1 クリティカルパス（冷水行き）の計算比較

No	要素	流量 (l/s)	管径 (m)	管径*1 (m)	速度 (m/s)	速度*1 (m/s)	長さ (m)	摩擦係 数	圧力損 失(Pa)	圧力損 失*1(Pa)
0	空調機	10	-	-	-	-	-	-	19905	19905
1	継手	10	-	-	2.8	3.0	-	-	926	273
2	配管	10	0.09	0.1	1.5	1.3	0.11	0.017	26	16
	継手*2	10	-	-	1.5	1.3	-	-	10	10
3	配管	10	0.09	0.1	1.5	1.3	0.14	0.017	32	19
	継手*2	10	-	-	1.5	1.3	-	-	19	19
4	配管	10	0.09	0.1	1.5	1.3	0.35	0.020	81	57
	継手	10	-	-	1.5	1.3	-	-	1067	1184
5	継手	10	-	-	4.5	1.3	-	-	0	0
6	配管	10	0.09	0.1	1.5	1.3	3.20	0.017	728	448
	継手	10	-	-	1.5	1.3	-	-	4079	6097
7	配管	20	0.125	0.13	1.5	1.6	18.43	0.016	2853	3151
	継手	20	-	-	1.5	1.6	-	-	1096	1038
8	配管	40	0.15	0.2	2.1	1.3	3.76	0.015	919	222
	継手*2	40	-	-	2.1	1.3	-	-	50	50
9	配管	60	0.2	0.2	1.8	1.9	2.43	0.014	320	314
	継手*2	60	-	-	1.8	1.9	-	-	31	31
10	配管	30	0.15	0.15	1.6	1.7	13.45	0.018	1898	2265
	継手	30	-	-	1.6	1.7	-	-	1715	1531
11	継手	30	-	-	0.9	1.0	-	-	436	151
12	配管	30	0.15	0.15	1.6	1.7	1.33	0.015	188	197
	継手*2	30	-	-	1.6	1.7	-	-	7	7
13	配管	30	0.15	0.15	1.6	1.7	2.01	0.015	284	298
	継手*2	30	-	-	1.6	1.7	-	-	7	7
14	継手	30	-	-	0.6	0.6	-	-	392	15
15	冷凍機	30	-	-	-	-	-	-	371000	371000
クリティカルパス 総圧力損失									408068	408304

注：*1)は手動計算で算出した数量である。
*2)手動計算の際、Revitの局部抵抗係数を利用した。

冷水管の管径について、自動計算と手動計算の結果がほぼ一致している。流量が小さい場合、例えば、10L/sの時に、自動計算した管径は90mmに対して、手動計算の結果は100mmである。また、手動計算の管径が、Revitの自動計算の管径を下回ることはなかったと確認した。

配管や継手類の圧力損失について、個々の圧力損失は完全に一致していないが、クリティカルパスの総圧力損失の値は非常に近い数値が得られた。自動計算の結果408.1kPaに対して、手動計算の結果は408.3kPaである。

その他に、配管圧力損失の違いは大きくないが、

継手圧力損失の違いがやや大きいと確認した。空調便覧では、一部、分岐直流方向の局部抵抗係数が不足しているため、Revitの計算結果を利用した。

3.結論

本報では、Revitの「ダクト/配管のサイズ設定」ツールを用いて、全圧法より、冷水管の管径を設計し、配管システムの圧力損失を計算した。また、空調便覧に記載される配管用炭素鋼管の流量線図や継手の局部抵抗係数を用いて、手動計算を行った。

本研究では、配管摩擦損失を245Pa/mと設定し、冷水管の管径や配管圧力損失について、自動計算と手動計算の結果がほぼ一致していることを確認した。また、クリティカルパスの総圧力損失の値は非常に近い数値が得られた。自動計算の結果408.1kPaに対して、手動計算の結果は408.3kPaである。一方、配管圧力損失の違いは大きくないが、継手圧力損失の違いがやや大きいと確認した。特に、空調便覧の一部、分岐の局部抵抗係数が不足していることも確認した。

空調配管の選定に当たって、等摩擦法がよく使われている。ASHRAEでは、100~400Pa/mを一般設計値として推奨されており、Revitでは245Pa/mを採用している。日本では、呼び径50A以下では1.2m/s以下、それ以上の場合、単位長さあたりの圧力損失を400Pa/m以下と推奨している。

今後は、設備配管システムの実例を対象として、特に設備の性能値やBIMライブラリやファミリーデータを活用しながら、配管設計を行い、BIMソフトの設計結果を確認したいと考えている。

参考文献

- 1) 空気調和衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧（14版）の3空気調和設備編，p235~239
- 2) ASHRAE: Fundamentals of Water System Design (SI Edition), 1999
- 3) ASHRAE : ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI Edition), 2017

B-7

BIM 技術を活用した給水システムの設計に関する研究

○劉 雨萌（東北工業大学），許雷（東北工業大学）

Domestic Water System Design with BIM Technology

Yumeng Liu (Tohoku Institute of Technology), Lei Xu (Tohoku Institute of Technology)

キーワード：IFC データ，配管ルートの取得，クリティカルパス

はじめに

IFC は、BIM の国際規格であり、建築業界におけるデータ交換のための標準的なデータフォーマットである。国内では、BIM 推進会議の発足、発注者における BIM/CIM 実施要領¹⁾の更新など政府主導する BIM の取り組みがあり、IFC データの応用が期待されている。

そこで、本研究では、IFC データを用いて、給水システムの設計に着目する。IFC4 の仕様に基づいて、給水システムの IFC データを対象として、プログラミングより、水利的に最も不利な配管ルートを検索する。また、配管要素の接続順番、配水管の給水負荷単位数、長さなど情報の取得手順を説明する。

1. BIM モデルの概要

図-1 に示すように、BIM ツール Revit2021 を用いて、給排水設備システムの設計図を作成する。地下 1 階、地上 2 階である。給水システムでは大便器（洗浄弁）、小便器（洗浄弁）、洗面台、上水受水槽、揚水ポンプ（立形）などが配置されている。ポンプ直送方式を採用し、受水槽、ポンプを通して各給水器具に水を供給する。

2. 水利的に最も不利な配管ルートの検索

2.1 クリティカルパスの定義

下記の 3 つの条件に従い、水利的に最も不利なルートを検索する。

- ①最上階にあること。
- ②器具の給水必要圧力が最も高いこと。
- ③給水ポンプからの配管長さが最も長いこと。

図-1²⁾ に示す給排水システムでは、水利的に最も不利である器具は 2 階の大便器 1 で、必要圧力 70kPa で、ポンプからの配管合計長さが最も長いであるから、このルートは水利的に最も不利なルートとなる。本研究では、この配管ルートをクリティカルパスという。

2.2 クリティカルパスの検索手順

IFC4 仕様書では、IfcRelNests クラスで設備要素とポートの接続関係が定義されている。給水設備の INV:Nests 属性から関連する IfcRelNests と IfcDistributionPort を検索すれば、クリティカルパスにある設備や配管要素及び接続順番を確認できる。図-2 に示すように、IFC データの解析手順を説明する。

Step1: 給水システムグループの検索

給水システムの IFC ファイルから、IfcRelAssignsToGroup を検索し、給水システムを取得する。IfcRelAssignsToGroup の RelatedObjects 属性より給水システムの構成要素を取得する。

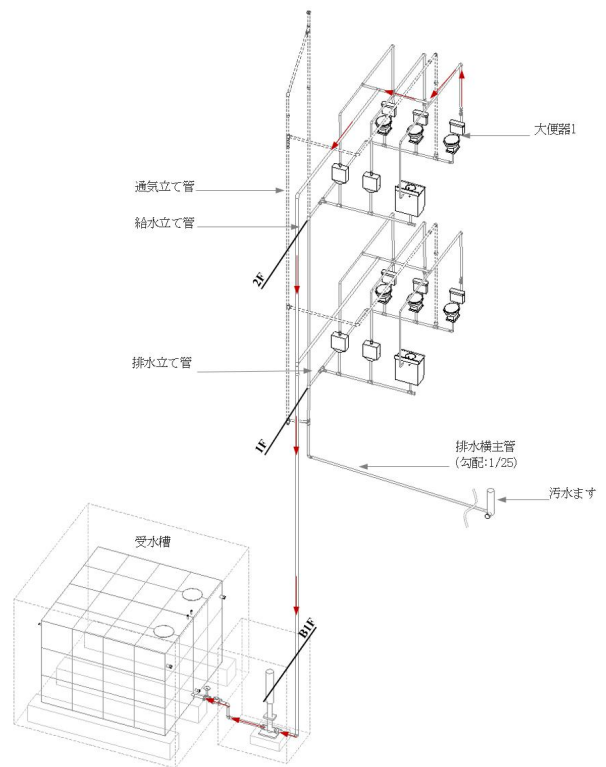


図-1 給排水設備システムの 3D 図面

Step2: 配管ルートごとの設備要素の検索

IfcDistributionFlowElements のリストにより、各給水器具 (IfcFlowTerminal) を検索する。各配管ルートにおける各設備要素の繋がり順番を確認できる。給水器具を起点、受水槽を終点と設定する。各給水器具、上流側ポート、上流側の設備・継手、上流設備のポートを検索する。

Step3: すべての配管ルートの取得

配管や器具の給水負荷単位数、配管の長さ、圧力損失など Psets 属性も取得する。

Step4: クリティカルパスの決定

前述したクリティカルパスの決定的な条件に基づいて、クリティカルパスを決定する。

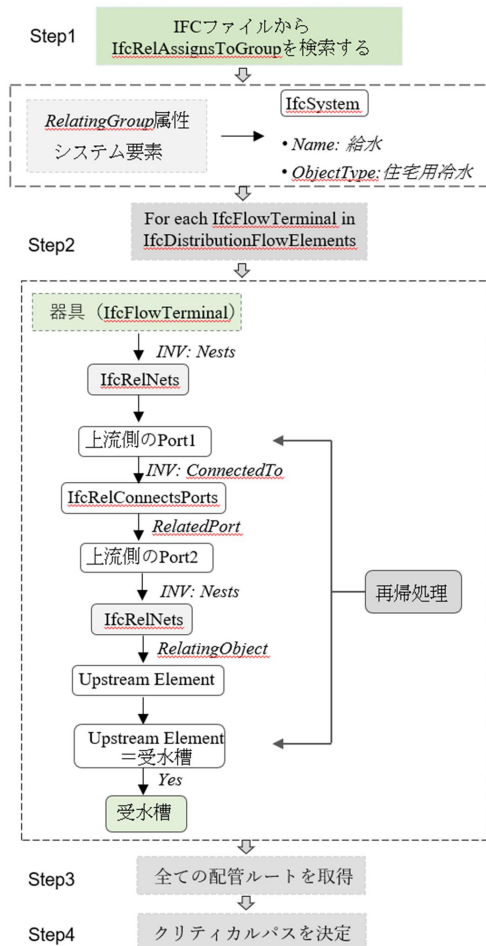


図-2 クリティカルパスの取得手順

2.3 情報の取得

配管ルートごとの設備要素を検索する時に、IfcFlowTerminal または IfcPipeSegment の Pset 属性から、給水負荷単位数、長さなどを取得する。

3. 解析結果

IfcOpenShell や Python を用いて、プログラミングによりクリティカルパスの配管や設備情報及び接続順番を抽出する。表-1 に示すように、各配管、給水負荷単位数や配管の長さや圧力損失をまとめる。なお、ここでは、直管のみのデータを表示した。

表-1 クリティカルパスにおける各配管の情報

要素の Name と ID	給水負荷単位数	長さ (mm)	圧力損失 (Pa)
IfcPipeSegment27943	5	122.77	40.82
IfcPipeSegment27317	5	350.29	116.46
IfcPipeSegment28353	5	1605.32	533.70
IfcPipeSegment27545	5	2069.75	688.10
IfcPipeSegment35469	7	1067.10	277.77
IfcPipeSegment53514	15	357.52	64.88
IfcPipeSegment53025	23	5629.41	1403.09
IfcPipeSegment52806	23	6080.27	1515.47
IfcPipeSegment64461	46	274.00	32.99
IfcPipeSegment63620	46	13230.49	1593.02
IfcPipeSegment61066	46	515.66	62.09
IfcPipeSegment61308	46	1000.01	120.41
IfcPipeSegment61742	46	332.84	40.08
IfcPipeSegment61525	46	175.68	21.15
IfcPipeSegment69035	46	113.72	13.69
IfcPipeSegment70242	46	300.55	36.19
IfcPipeSegment27943	5	122.77	40.82

まとめ

建築設備分野における BIM の国際仕様である IFC データの応用拡大が予想されている。IFC データを活用するために、各設備の情報の把握は重要である。本研究では、クリティカルパスの検索、検索手順、情報の取得を分析した。

今後は、提案したクリティカルパスの検索方法を活用し、給水管の管径計算に応用したいと考えている。

参考文献

- 国土交通省: 発注者における BIM/CIM 実施要領 (案), <<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001395761.pdf>>(2022年2月9日参照)
- 劉 雨萌、許 雷: IFC データによる給排水システムの情報解析、空気調和衛生工学会論文集、No. 298 (2022)、p. 17~23

B-8

空調における AI 活用制御技術の開発

○綾目久雄（新日本空調㈱），永坂茂之（新日本空調㈱），廣島雅則（新日本空調㈱），

福田伊吹希（公立諏訪東京理科大学），山田哲靖（公立諏訪東京理科大学）

Development of Control Technology Using Artificial Intelligence for Air Conditioning

Hisao AYAME*1, Shigeyuki NAGASAKA*1, Masanori HIROSHIMA*1,
Ibuki FUKUDA*2, Tetsuyasu YAMADA*2

*1 SHIN NIPPON AIR TECHNOLOGIES CO., LTD. *2 Suwa University of Science

キーワード：PID 制御， 試運転調整， 省力化， AI， 自動設定

はじめに

セントラル式空調システムにおいて、PID 制御の各ゲイン(PID 制御の特性を決める設定係数のこと)で比例ゲイン K_p 、積分時間 T_i 、微分時間 T_d などの形で設定される)は、竣工前の試運転調整時に専門業者によって、一定値に設定され運用される¹⁾。対象システムに適した PID ゲインは、建物の立地条件や用途、対象となる室内のサイズや空調方式によって異なるため、試運転調整に労力を費やす。そこで筆者らは、空調制御盤内の PID 制御に学習機能を外付けで組み込み、運用しながら最適 PID ゲインを自動設定することで、制御不具合の解消と設定業務の省力化を図ることを目指し、研究開発に取り組んでいる。

本報では、まず制御方法の概要を説明する。次いで制御ロジックを小型コンピュータに実装し、一定の空調負荷を与えた実験室において行った冷房実験結果を示す。さらに、空調負荷が成行きで変化する実空調システムに導入して得た結果も併せて示す。

1. 制御システム

1.1 システムの概要

開発した制御システムのブロック線図を図-1 に示す。コンピュータ上で、対象制御システムを一次遅れ+むだ時間モデル²⁾で表現し、その時間遅れ特性を、過去の運転データを基にシステムを同定する。同定した一次遅れ+むだ時間モデルに基づき、シミュレーションにより PID ゲインの最適解を導出し、実システムの PID ゲインを自動で更新する。

なお、同じ制御システムでも、空調負荷や流量

など、システムの時間遅れ特性に影響を与える運転パラメータが変化した場合、それに適した PID ゲインも変わってくる。これに対応するため本システムでは、時間遅れ特性に影響を与えるパラメータ(以降、これを環境パラメータ X と呼ぶ)を計測し、その大小に段階を定めて、前述の最適化計算を各段階に分けて実施する。それぞれの運転状態における最適化計算結果を、コンピュータのデータベース上へデータテーブル形式で保存・読出しし、実システムに反映させる。

次節より、最適化計算の核となるシステム同定及び PID シミュレーションによる最適化の内容を説明する。

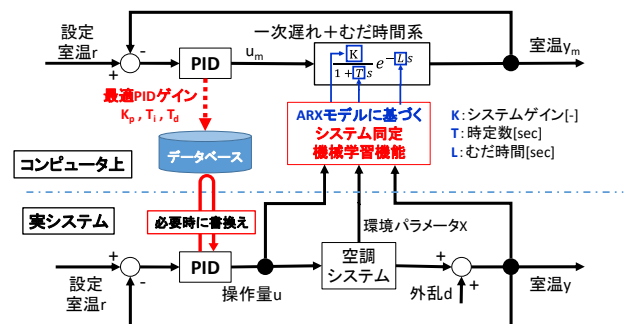


図-1 制御システムのブロック線図

1.2 システム同定

一次遅れ+むだ時間モデルのパラメータは、システムゲイン $K[-]$ ・時定数 $T[\text{sec}]$ ・むだ時間 $L[\text{sec}]$ の3つで、伝達関数 $G(s)$ を式(1)で表現する²⁾。

$$G(s) = \frac{K}{1+T \cdot s} e^{-L \cdot s} \quad (1)$$

通常の PID 制御運転を行う中で、前述3つのパラメータ ($K \cdot T \cdot L$ 、以降これらを一次遅れパラメータと呼ぶ)を機械学習する方法が提案されてお

り、その1つがARXモデルである²⁾。1入力1出力システムのARXモデル式を式(2)に示す。

$$y_m(k+1) = y_m(k) + \alpha\{y_m(k) - y_m(k-1)\} + \sum_{i=1}^2 b_i\{u(k-D-i+1) - u(k-D-i)\} \quad (2)$$

ここでkは現在の計算ステップ数、 y_m はモデル出力、 α は自己回帰係数、 b_i は外生入力係数である。ARXモデルは離散モデルであるが、近似式を使用せずに一次遅れ+むだ時間系の伝達関数系(連続モデル)へ、容易に変換できる。その際のARXモデルのパラメータと、一次遅れパラメータの変換式を式(3)~(5)に示す。ここで Δt はサンプリング時間[sec]、Dは $L/\Delta t$ の整数部分、Rは $L/\Delta t$ の余り部分である。

$$\alpha = e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (3)$$

$$b_1 = K(1 - e^{-\frac{R-\Delta t}{T}}) \quad (4)$$

$$b_2 = Ke^{-\frac{\Delta t}{T}}(e^{\frac{R}{T}} - 1) \quad (5)$$

式(6)に示す、実測した室温 y とモデル出力 y_m の誤差が最小となるベクトル $\theta=[K,T,D]^T$ を求めることで、一次遅れパラメータの同定を行う。 n_d は時系列データのサンプリング数である。

$$\text{minimize } J = \sum_{i=1}^{n_d} \{y_m(i) - y(i)\}^2 \quad (6)$$

なお、学習用時系列データは操作量 u 及び室温 y に適度な振幅の時間変動が含み、両者の時間遅れ関係が学習データ内に納まっている必要がある。一方、実フィールドにおいて同じ運転状態(空調負荷)が続く時間には限りがあるので、必要かつ十分な時間長さを、学習データを分割・抽出する技術が求められる。筆者らは直近のシステム同定計算にて得た一次遅れパラメータを基にした演算式より、次回システム同定を行う際の適切なサンプリング時間の長さ(n_d)を導出可能であることを見出し、本システムに導入している³⁾。

1.3 PID シミュレーションと最適化計算

同定したシステム伝達関数 $G(s)$ と PID 制御伝達関数を合成した総合伝達関数を離散化して、PID 制御シミュレーションを行った⁴⁾。

なお、一次遅れパラメータの同定及びPIDゲイン最適値を探索する際の組合せ探索方法として、TPE(Tree-structured Parzen Estimator)を採用した。本システムのように計算資源が限られたエッジコンピューティングを行う場合、効率が重要となる。TPEはベイズ推定の一つで、効率の良い

パラメータ探索アルゴリズムとして注目されている。実装にあたり、Preferred Networks社が提供するフレームワーク「Optuna」⁵⁾を利用した。

2. 実験室での検証

2.1 実験装置及び方法

実験装置の概略図を図-2に示す。対象室は容積約40m³で、高断熱のパネルで周囲を囲っている。室内に模擬負荷を設置し、一定の冷房負荷を与えた。AHUの冷水弁開度をPID制御することで、室温制御する空調システムとした。

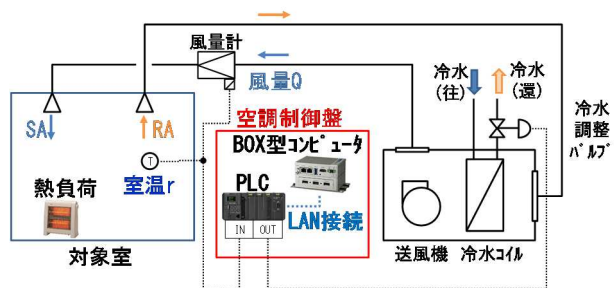


図-2 実験装置概略図

PID計算はPLC内で行っている。前章に示した一連の制御ロジックを、BOX型の小型コンピュータに実装し、PLCと通信することでPIDゲインの最適化を行った。また、システムの運転条件に変化を与えるため、循環風量を手動で変更した。この循環風量を環境パラメータ X とした。

提案手法のほか、PIDゲインを一定値に固定する場合(以降、これを固定ゲインと呼ぶ)の、両方式で実験した。循環風量を100%・50%・25%の値で3時間ごとに手動で変更し、計9時間連続で運転した。固定ゲインは循環風量100%にて、ジューグラー・ニコルスのステップ応答法(PID制御)⁶⁾を行い決定した。空調開始前から室内で模擬負荷による熱負荷を与え、室内温度が40℃に達した時点から空調を開始した。表-1に実験条件をまとめた。

表-1 実験条件

項目	単位	設定値
循環風量 Q	m ³ /h	4800・2400・1200 (100%・50%・25%)
模擬熱負荷	kW	4
設定温度 r	℃	26

2.2 実験結果及び考察

固定ゲイン及び3周実施した提案手法にて運転した際の、室温変動とその設定ゲインに関する結果を、図-3に示す。

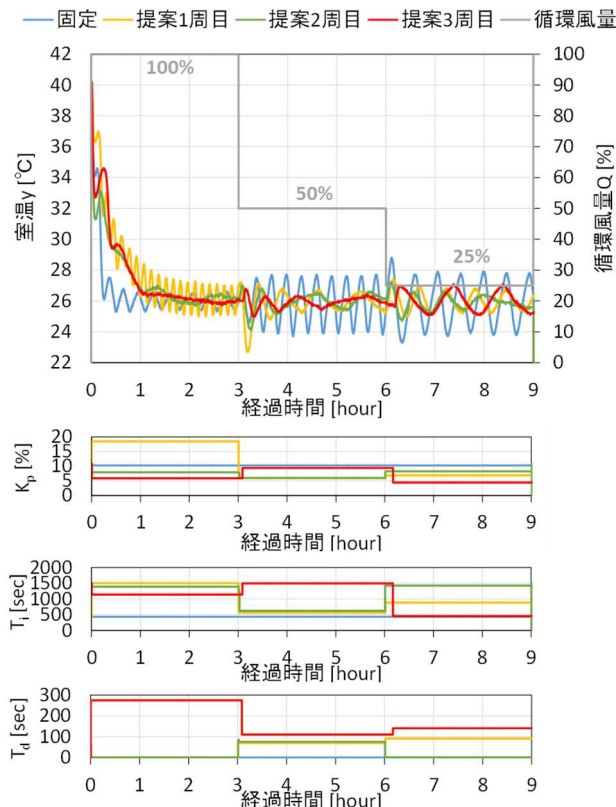


図-3 提案手法における室温及びPIDゲインの設定変動

一番上のグラフの縦軸が室温と循環風量、横軸がAHU運転開始からの経過時間である。合わせてPIDゲインの経時変化についても、下の3つのグラフに示した。循環風量が100%である経過時間が0~3時間での室温を見ると、青線で示す固定ゲインの場合、立ち上がり運転の後も一定量の偏差($\Delta 1^{\circ}\text{C}$ 程度)が残っている。これに対し、黄色線で示す提案手法1周目の場合、約8分程度の周期で細かく室温が振動するものの、2周目・3周目の結果では、立ち上がり運転後に生じる偏差はほとんどなく、固定ゲインと比較して、安定性に優れた運転がなされている。

循環風量を50%、25%とした経過時間3~6時間、6~9時間の結果においては、固定ゲインの場合、室温変動の振幅は $\Delta 4^{\circ}\text{C}$ 程度となり、ハンチングを起こしている。一方、提案手法の場合、いず

れのケースでも固定ゲインの結果より室温変動が小さくなっている。

以上の結果から、一定の熱負荷を与えた実験室において、冷水弁開度により室温をPID制御する空調機を運転した時、意図的に循環風量減らした場合、PIDゲインを固定値とすると、室温が大きくハンチングしたのに対し、提案手法ではそれぞれの運転条件に合わせて最適化計算されたPIDゲインに変更され、いずれの条件でも固定ゲインより室温の変動を抑える効果が確認された。

3. 実空調システムでの検証

3.1 実験装置及び方法

実験装置の概略図を図-4に示す。対象室は容積約 $200\text{m}^3(9\text{m}\times 9\text{m}\times 2.5\text{mH})$ の部屋で、外皮からの成行き冷房負荷が生じている。AHUの送風機INV周波数を操作量とし、室内温度をPID制御した。前章同様、PID計算はPLCで、PIDゲインの最適化はBOX型コンピュータにて行った。

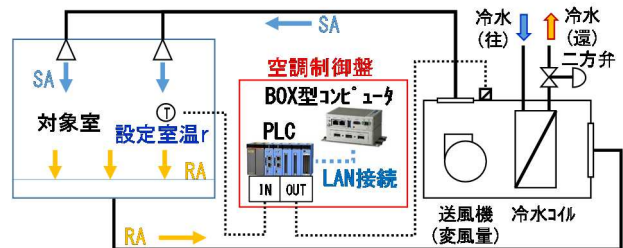


図-4 実験装置概略図

実験条件を表-2に示す。環境パラメータXは空調機INV周波数と、立ち上がり運転とその後運転とを判別する室温偏差 $|r-y|$ の、2つとした。空調機INV周波数は25Hz、45Hzを境界値とし、3段階に分けて運転状態を識別した。 $|r-y|$ の境界値は、 $\Delta 2^{\circ}\text{C}$ とした。前章同様、固定ゲインの場合と、提案手法の両方式でデータ取得を行った。固定ゲインは専門業者が調整した値とした。

表-2 実験条件

項目	仕様 / 設定
空調機風量	定格 $2,000\text{ m}^3/\text{h}$ (60Hz)
空調機循環回数	定格 10 回/h
冷水設定温度	7°C (往温度)
吹出空気温度	18°C

3.2 実験結果及び考察

室温変動とその PID ゲインに関する実験結果を、図-5 に示す。上側のグラフの縦軸が室温及び操作量、横軸が実験開始からの経過時間である。下側のグラフは PID ゲインの経時変化を示す。左側(a)の固定ゲインの運転では、操作量が室温の変動に合わせて、素早くかつ大きな振れ幅で上下し、室温は一日を通して、ほぼ目標値に近い値で推移している。PID ゲインを最適化計算した右側(b)の提案手法では、操作量が固定ゲインの結果に比べ緩やかな速度で変動している。室温は一日を通して、ほぼ目標値に近い値で推移しており、良好な室温制御が行われている。

空調負荷が成行きで変動する実際の空調システムに対し提案手法を導入した結果、提案手法と専門業者が調整した固定ゲインとは、ほぼ同等程度の室温調整の結果が得られた。提案手法により、専門業者が行う試運転調整作業の省力化が図れる見込みを得た。

4. まとめ

現場に設置した小型コンピュータにて、機械学習により PID ゲインの最適化を行い、実機の制御に逐次反映させる自動設定手法を提案して実験し、以下の知見を得た。

- 1) 一定の熱負荷を与えた実験室空調システムにおいて、PID ゲインを固定値とすると、室温が大きくハンチングするケースがあったのに対し、提案手法ではそれぞれの運転条件に合

わせて最適化計算された PID ゲインに変更され、いずれの条件でも固定ゲインより室温の変動を抑える効果が確認された。

- 2) 空調負荷が成行きで変動する実際の空調システムに対し、提案手法を導入した結果、提案手法と専門業者が調整した固定ゲインとは、ほぼ同等程度の室温調整の結果が得られた。提案手法により専門業者が行う試運転調整作業の省力化が図れる見込みを得た。

参考文献

- 1) 笠原雅人・松葉匡彦・葛生克明ほか: 特性変動をともなう空調システムへの PID 制御の適用, 計測自動制御学会論文集 36 巻 (2000) 5 号, p. 431~437
- 2) 昆潤一郎・山下善之・田中太郎ほか: 伝達関数を用いた ARX モデルによるモデル同定法の実プロセスへの適用, 第 54 回自動制御連合講演会, (2011), pp.1620~1624
- 3) 福田伊吹希・永坂茂之・廣島雅則ほか: 空調における AI を活用した制御技術の開発 (第 3 報) 適応制御のためのデータ自動抽出方法並びにパラメータ高精度推定方法の検討, 空気調和衛生工学会講演論文集 (2021)
- 4) 山本重彦・加藤尚武: PID 制御の基礎と応用, 朝倉出版 (2005)
- 5) Optuna - 株式会社 Preferred Networks : <https://www.preferred.jp/ja/projects/optuna> (参照日: 2022/02)

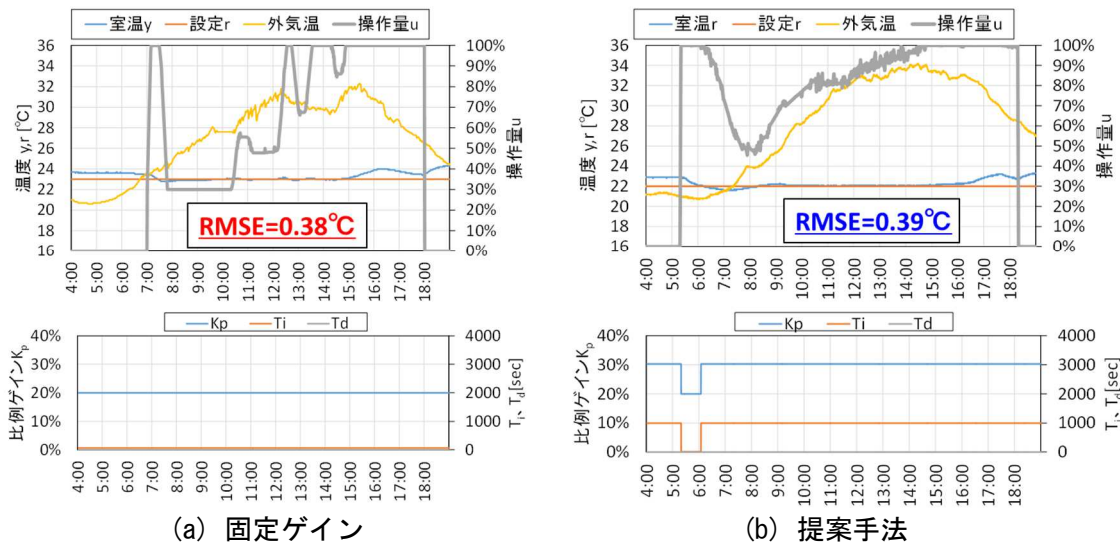


図-5 提案手法における室温及び PID ゲインの経時変化

B-9

細胞培養加工室の気流最適化手法の考案

○遠藤 翔太, 永田 淳一郎, 新村 浩一, 植村 聡, 中澤 賢 (三機工業(株))

Consideration of Airflow Optimization Method in Cell Processing Center

Shota Endo, Junichiro Nagata, Kouichi Shinmura, Satoshi Uemura,
Ken Nakazawa (Sanki Engineering Co.,Ltd.)

キーワード：気流解析, バイオロジカルクリーンルーム, 細胞培養加工室

はじめに

再生医療では細胞を操作・培養のために、清浄環境が保たれたCPC (Cell Processing Center: 細胞培養加工室)が必要である。細胞培養加工室は、バイオロジカルクリーンルームの場合が多く、安全キャビネット(以下、BSC)やインキュベータ等の付帯設備を備えている。室内での作業内容や製造工程および生産量の変更に伴い、BSCの移設や台数変更など、これら機器配置のレイアウトに変更が生じる場合がある。このときのレイアウト変更によってはBSC周囲などの清浄度が変化すると考えられる。特にBSCを複数有する大部屋方式では、その変化に対応できることは有益である。

一般的に細胞培養加工室は、動線や作業に起因するじんあいや微生物粒子を適切な気流方向で制御するために壁面の1ヶ所ないしは数ヶ所から排気をとるが、先に述べたようにBSCの移設があった際に後付けで対応することは難しい。今回、この対策として図-1のような細胞培養加工室周囲の壁面に排気口を複数設置し、清浄度要求箇所に応じて各排気口の風量を変更する“気流最適化システム”を考案した。これは機器配置のレイアウト変更に応じて各排気口の風量バランスを変更することにより、機器のレイアウトに依らずBSC周囲の清浄度を確保することを狙っている。本報では、“気流最適化システム”の効果検証のためにモックアップを構築し、in operationを想定した発じん負荷を与えた試験を行った。また、CFDによるシミュレーションでの検証も併せて行った。

1. CPC モックアップ概要

構築したモックアップについて図-2に平面図を示す。700mm×700mmの排気口を6箇所、室中央の天井に給気口を設け、クラスIIA2型BSCを設置した。表-1に換気回数および排気風量を示す。室内の循環風量は2,500 m³/h(換気回数30回/h)、BSCの循環風量は543 m³/hである。

また、BSC前面の清浄度維持および室内気流の整

流化を目的としてBSC上部には、図-3に示すような自己循環型のクリーンユニット(以下、CU)¹⁾を据え付けた。CUにより、BSC上部から排気される清浄空気はBSC前面に下降気流として供給される。

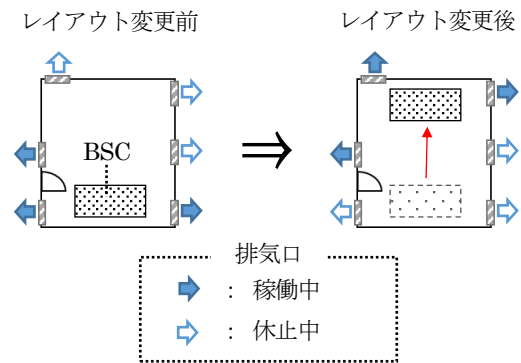


図-1 気流最適化システム

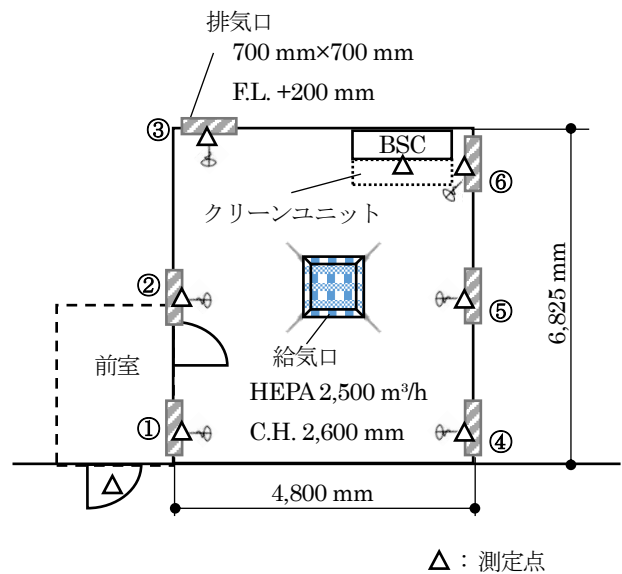


図-2 CPC モックアップ平面図

表-1 システム毎の排気風量

システム	換気回数	排気風量
従来システム	30 回/h	2,500 m ³ /h 排気口：①と⑥ or ③と④
		2,500 m ³ /h 排気口：①～⑥
気流最適化システム		

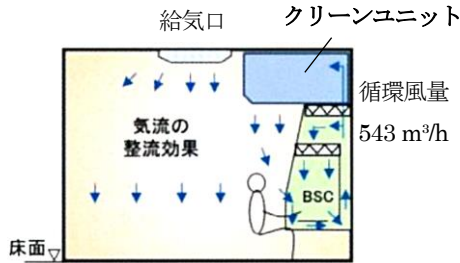


図-3 クリーンユニットの効果

2. 試験・シミュレーション概要

気流最適化システムの効果検証のためじんあい濃度を測定した。また、実験と同条件とした CFD シミュレーションを実施し比較検証を行った。

2.1 試験方法

室内で外気じん試験を行った。各排気口の風量バランスを変化させ各風量バランスにおける室内のじんあい濃度を測定した。測定点は図-2 に示す。BSC 吸込面および外気じんは吸引量 28 L/min、排気口①～⑥は 2.8 L/min のパーティクルカウンタを用いた。対象粒径は 0.5 μm である。表-2 に風量バランスのパターンを示す。従来システムは Case 1 または Case 6 となる。なお、Case 7 は複数発じん源とした際に用いた条件である。

図-4 に示すように、A 点：入室部、B 点：室中央、C 点：BSC 前の三点を外気じん発生位置とした。A 点、B 点、C 点のうち一ヶ所から発生する条件と、A 点と C 点から同時に発生する条件を与えた。外気じんは CPC 外一般居室部から発生位置までホースを延ばし、送風機によって導入した。一定時間発生させ、50 分間の平均値をとった。また、発生位置の高さは床面からのじんあいの巻き上げを想定し、床面からとしている。

2.2 シミュレーション

拡散物質は粒径 0.5 μm、発じん量は 82,992 個/min^{2.3)}とした。CFD ソフトは STREAM V2020 SP1 (Software Cradle Co., Ltd.) を使用した。

表-2 排気風量バランス

		排気風量分配率 [%]						
Case		1	2	3	4	5	6	7
排気口番号	①	0	12	17	26	40	50	8
	②	0	12	17	12	5	0	28
	③	50	26	17	12	5	0	8
	④	50	26	17	12	5	0	8
	⑤	0	12	17	12	5	0	8
	⑥	0	12	17	26	40	50	40

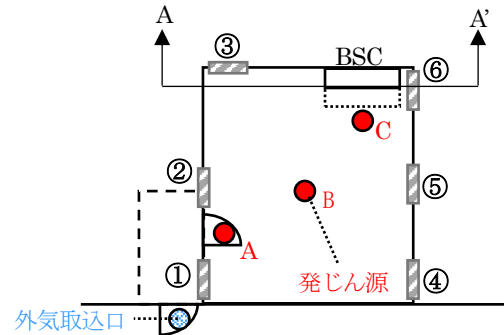


図-4 発じん源

3. 評価方法

BSC 吸込面の清浄度について評価する。ここでは評価指標として、以下に定義する“基準化濃度 C_p^* ”⁴⁾を用いた。また、CU から給気される清浄気流の寄与率を評価するため SVE 4⁵⁾を用いた。

基準化濃度 C_p^* は評価点のじんあい濃度 C_p を室内のじんあい完全混合したと仮定した場合の濃度 C_e で除した無次元数とし、(1)式より求めた。完全混合した場合の濃度 C_e [個/m³]は外気じんあい濃度 [個/m³]に送風機風量 [m³/s] を乗じた後、循環風量 [m³/s] で除すことで求めた。

$$C_p^* = \frac{C_p}{C_e} \quad (1)$$

SVE 4 は、その吹出気流自身の室内濃度分布によって定義される。吹出口の気流濃度を C_0 、ある地点 x での気流濃度を $C(x)$ としたとき、(2)式より求められる。

$$SVE 4 (x) = \frac{C(x)}{C_0} \quad (2)$$

4. 結果

4.1 事前確認

はじめに各試験条件における発じん量の結果について図-5 に示す。発じん量の文献値²⁾についても併せ

て図示する。結果、外気じん試験の一ヶ所からの発じん量は78,000~272,000 個/minであり、オーダーとしては文献値と同程度であった。

4.2 清浄度結果・考察

図-6 は外気じん試験での BSC 吸込部における基準化濃度 C_p を排気口⑥の風量ごとに示したものである。測定結果とシミュレーション結果を併記する。発じん源と BSC が離れている場合(A 点、B 点)、排気口⑥の風量が小さいとき (Case 1)、および大きいとき (Case 6) に BSC 吸込部の基準化濃度は高くなり、⑥の風量が中程度に対して最小値を示している。

図-7 に BSC 吸込面(A-A断面)でのシミュレーション結果におけるSVE4分布を示す。Case 1やCase 6といった各排気口の風量バランスに大きな偏りがあると、CUから給気される清浄空気がBSC吸込部に到達せず、より風量の大きい排気口に引っ張られていた。これが、Case 1やCase 6において基準化濃度が高くなった要因と考えられる。

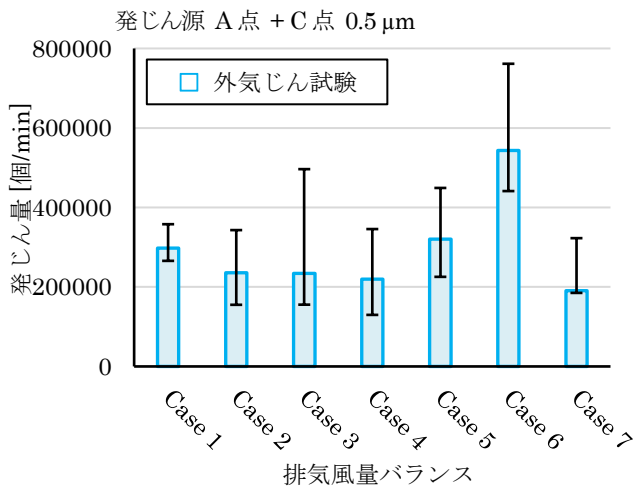
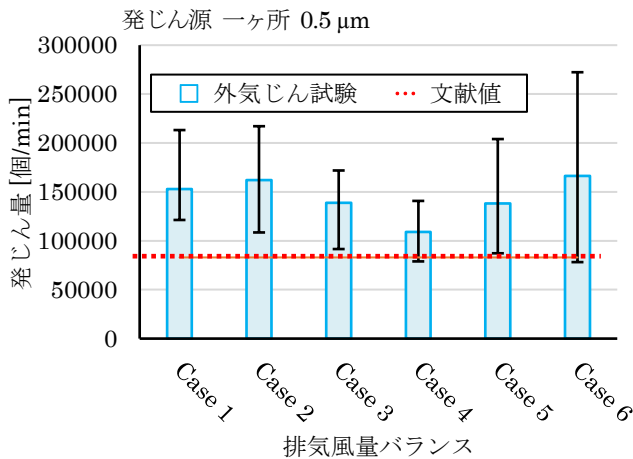


図-5 各試験での 0.5 μm 粒子の発じん量

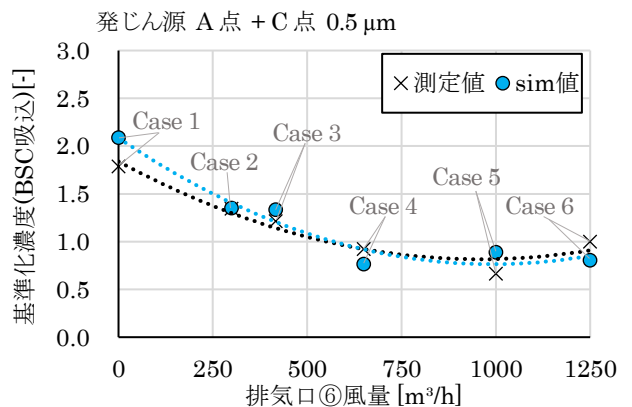
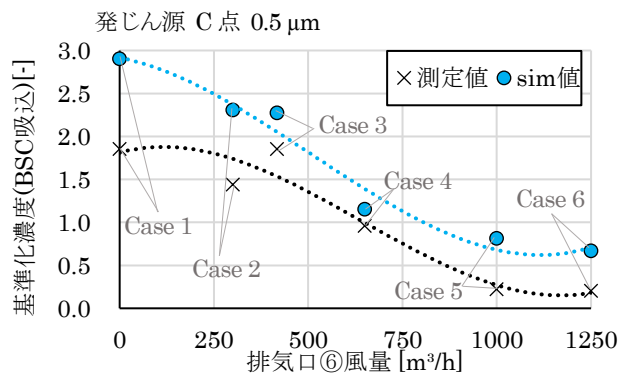
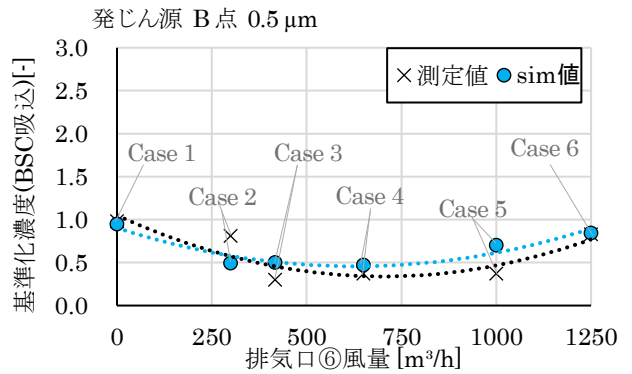
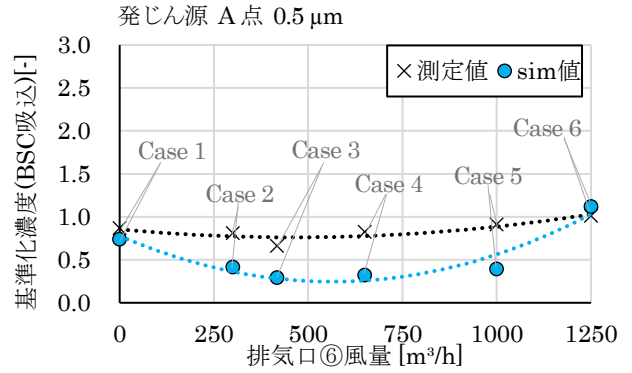


図-6 発じん源毎の基準化濃度 (BSC 吸込)

一方で発じん源がBSCと近い場合(図-6 発じん源C点)は排気口⑥の風量が大きいほど基準化濃度は低くなった。じんあいもBSCに吸込まれるよりも先に排気口⑥に多く吸込まれたためと考えられる。

発じん源がBSCから離れた場所と近い場所から同時に発生する場合(図-6 発じん源A点+C点)は、C点のみからの発じんと同様に排気口⑥の風量を大きくするほどBSC吸込の基準化濃度は低くなったが、A点からの発じんによる影響で1.0程度と高止まりしていた。

BSCと発じん源の位置関係による排気風量バランスの最適値は存在することが確認された。従来システム(Case 1、Case 6)では特定の発じん源に対する清浄効果は期待出来るものの、発じん源位置によっては極端にBSC周囲の環境が悪化する。対して“気流最適化システム”では発じん源位置に応じて最適値を選択可能なため、BSC周囲の環境は維持され安定を保つことが可能である。

“気流最適化システム”を用いる場合は排気風量のバランスを極端に偏らせないこと、発じん源が特定される場合は発じん源に近い場所で排気をとることがBSC周囲の環境を維持するために有効であると考えられる。

4.3 追加検証

以上を踏まえ、複数ヶ所(A点およびC点)を発じん源とした場合について、排気風量バランスを極端に偏らせずに発じん源近くの排気風量を大きくした条件であるCase 7を追加検証した(図-8)。結果、Case 1~6よりも改善が見られ、BSC吸込の基準化濃度は0.5程度であった。

5. まとめ

本報では、BSCの移設に伴う清浄度要求箇所の移動に対応するために考案した“気流最適化システム”の有用性について確認した。各排気口の風量バランスを複数パターン与え、空気清浄度への影響を検証した結果として以下が挙げられる。

- 1) 排気風量バランスは極端な偏りが無い方がBSC吸込の清浄度は良好である。
- 2) 発じん源近くの排気風量を大きくとることが有効である。

排気風量のバランスと清浄度には相関が確認された。BSCの移設が想定される場合や発じん源が移動する場合に本システムを導入することは有用であると考えられる。また、実測とシミュレーションの結果は概ね一致しており、本システム導入の際はシミュレーションにて効果検証が可能であると考えられる。

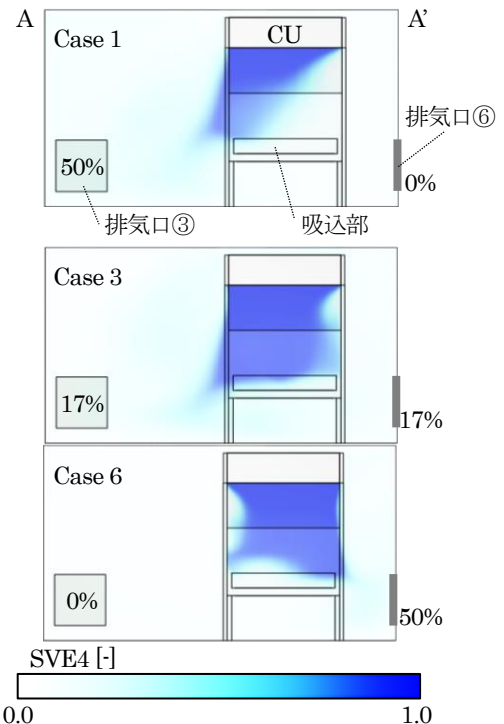


図-7 BSC吸込面(A-A)でのCU気流のSVE4分布

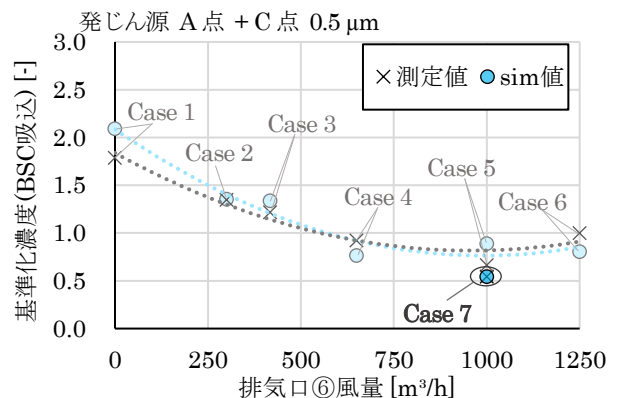


図-8 複数発じん源での基準化濃度 (BSC吸込)

参考文献

- 1) 中岡将士、植村聡、中澤賢：再生医療の細胞培養施設の気流改善に関する研究：空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2014) ,pp.65~68
- 2) 日本空気清浄協会編：クリーンルーム環境の計画と設計、3版、(オーム社、2000) ,pp 48~50
- 3) 鈴木良延、藤井修二、早川一：クリーンルーム用衣服着衣者からの発じん量および発じん機構：日本建築学会計画系論文報告集 (1988) ,pp 44~53
- 4) REHVA編：換気効率ガイドブック、(社団法人空気調和・衛生工学会、2009) ,pp 1~81
- 5) 小林光、加藤信介、村上周三：不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究：空気調和・衛生工学会論文集 No.68 ,pp (1998) 30~36

B-10

地中熱ヒートポンプ空調システムを備えた住宅の省エネルギー性能に関する研究

(その7) 実験に基づく水平型埋設管まわりの地中温度の分析

○加藤太一 (秋田県立大学), 竹内仁哉 (秋田県立大学)

長谷川兼一 (秋田県立大学), 松本真一 (秋田県立大学)

Study for Energy Saving Effect of Grand Source Heat Pump System
(Part 7) Analysis of Ground Temperature Distribution During Space

Heating and Cooling on Horizontal Ground Heat Exchanger in Full-scale Test House

Kato Taichi (Akita Prefectural University), Hasegawa Kenichi (Akita Prefectural University),
Matsumoto Shin-ichi (Akita Prefectural University), Takeuchi Jinya (Akita Prefectural University)

キーワード: 地中熱, 水平採熱方式, 実験, 地中温度

1. はじめに

東北地方の日本海側地域では、地中冷熱・温熱のポテンシャルが高く、再生可能エネルギーとしての活用が期待されている¹⁾。しかし、地中熱ヒートポンプ空調システム(以降、GSHP)の住宅への適用例は少なく、省エネルギー性能を適切に評価した研究例も極めて少ない。本研究グループでは、本学構内に建設された実大試験家屋に設置されたGSHPを対象として、暖冷房実験によるGSHPの基本性能を評価している²⁾。これまで、外気や日射の影響を受けやすい地中浅層部を対象とした水平採熱方式、冷房期においてはボアホール方式(以降、垂直採熱方式)と同等の暖冷房能力であることを確認した。しかしながら、外乱条件以外にGSHPの稼働条件が地中温度に与える影響については不明のままである。

本研究では、実大試験家屋に導入された水平採熱方式を対象として、GSHPのエネルギー消費効率(以降、COP)向上に寄与する影響因子であると考えられる地中温度に着目し、暖冷房実験により外気などの外界条件やGSHPの稼働条件が地中埋設管まわりの地中温度に与える影響について明らかにすることを目的とする。

室)、玄関ホール、機械室から構成されている。試験室2室は、両室ともに第一種換気方式が採用され、北側壁面にヒートポンプ式エアコンとGSHPの放熱器、機械室にはGSHP本体が設置されている。採熱は、水平採熱方式とし、地中0.4～1.5mの浅層部に掘ったトレンチの両側面と底面の計3面に架橋ポリエチレン製の熱伝導性の高い全長約190mのチューブ(内径:13A)をU字状に敷設し、熱需要に応じて使用するトレンチを選択可能な2系統のトレンチを埋設している。

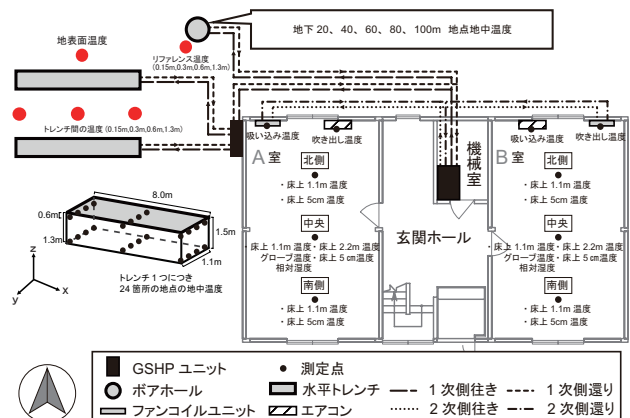


図-1 実大試験家屋・測定概要

2. 実大試験家屋概要

図1に実大試験家屋の1階平面図と測定ポイント、地中採熱方式の導入位置を示す。1階は、比較対照実験を可能とするため、規模や断熱・気密性能を同一仕様とした試験室2室(西側:A室, 東側:B



写真1 GSHP本体



写真1 水平配管

各試験室の断熱性能は外皮平均熱貫流率 U_A 値で $0.95W/(m^2 \cdot K)$, 気密性能を表す相当隙間面積 (C 値) は各室とも $2.4cm^2/m^2$ である。

3. エネルギー消費効率に影響を及ぼす要因分析 3.2 分析方法

既往研究²⁾により, GSHP の二次側送水温度や FCU の稼働台数, 負荷率などの運用方法に配慮すればエネルギー消費効率向上の可能性があることを確認している。しかし, 各実験条件の COP に影響を及ぼす要因については検討されていない。そこで, 既往研究で実施された暖冷房実験の実験条件を対象²⁾に, 実験条件とした送水温度や FCU 稼働台数に加え, 地中温度や外気温などによる COP への影響度を把握するために重回帰分析を実施した。

重回帰分析では, 目的変数を COP とし, 説明変数を実送水温度, FCU 稼働台数, 内部発熱に加え, COP の変動に関連深い外気温やトレンチ内の地中温度, 2 次側流量, 1 次側還り温度それぞれの期間平均値を含む 7 因子とした。なお, 暖房実験については内部発熱を実験条件としていなかったため, これを除く 6 因子で分析をした。また P 値が 0.05 未満であれば, その説明変数は目的変数に対して有意であるとした。

3.3 分析結果

表 1 に冷房実験, 表 2, 表 3 に暖房実験の重回帰分析結果を示す^{注1)}。既往研究²⁾では二次側送水温度, FCU 稼働台数, 内部負荷が特に COP を向上させる要因としたが, 分析の結果, 地中温度は暖冷房実験ともに COP を向上させる要因となることを確認した。

4. 暖冷房実験

4.1 実験概要

実験は既往研究と同様の実大試験家屋で行い, 測定概要については, 既往研究²⁾での測定点に加え, 採熱や放熱の影響を受けない地点で深さ 0.15m, 0.3m, 0.6m, 1.3m, の 4 点 (以降, リファレンス温度) や地表面温度, 2 つのトレンチの間に 3 箇所を深さ方向に 4 点の地中温度を測定項目に追加した。

4.2 実験条件

暖冷房実験では 4 ケース設定した。Case S-1, Case W-1 は GSHP を停止, Case S-2 は送水温度 $7^{\circ}C$, Case W-2 では送水温度 $45^{\circ}C$ として運転

表-1 冷房実験の重回帰分析結果

	係数	標準偏回帰係数	標準誤差	t	P 値
切片	9.16	-0.61	1.26	7.3	<0.05
送水温度	0.16	0.59	0.01	15.28	<0.05
地中温度	-0.33	-0.3	0.05	-7.12	<0.05
FCU稼働台数	0.75	0.39	0.08	9.18	<0.05

表-2 暖房実験の重回帰分析結果
(地中温度を含む)

	係数	標準偏回帰係数	標準誤差	t	P 値
切片	1.88	0	0.36	5.28	<0.05
二次側流量	0.01	0.04	0.05	0.23	0.83
地中温度	0.21	0.99	0.03	6.21	<0.05
外気温	0.00	0.01	0.03	0.05	0.97

表-3 暖房実験の重回帰分析結果
(送水温度を含む)

	係数	標準偏回帰係数	標準誤差	t	P 値
切片	7.12	0	0.24	30.21	<0.05
送水温度	-0.09	-0.98	0.01	-18.19	<0.05
FCU稼働台数	-0.25	-0.2	0.07	-3.73	<0.05

する条件である。実験期間は, 冷房期, 暖房期ともに連続した約 1 カ月間とした。

4.3 実験結果

(1) 温度推移

図 2, 図 3 に暖冷房実験の外気温, トレンチ内の地中温度, リファレンス温度の温度推移を示す。

冷房実験では, Case S-1 は外気温に比べてトレンチ内の地中温度は地中深さが深くなるにつれ変動が小さく, 特に地中深さ 0.6m, 1.3m の温度推移は Case S-1 で約 $24^{\circ}C$, 約 $22^{\circ}C$ と安定している。Case S-2 のトレンチ内の地中温度は, Case S-1 と同様に安定しており, GSHP の運転に伴う地中放熱による地中温度の顕著な上昇は見られなかった。この理由として, Case S-2 の外気温の中央値は約 $21^{\circ}C$ で室内設定温度の $25^{\circ}C$ より低く, 冷房負荷が小さくなり地中への放熱量が少なかったことが起因している。

暖房実験では, Case W-1 は冷房期と同様に地中温度は安定した推移を示し, 地中深さ 0.6m, 1.3m の温度推移は約 $10^{\circ}C$, 約 $12^{\circ}C$ と安定した推移を示す。しかし, GSHP の運転開始に伴い, リファレンス温度と比べ, トレンチ内の地中温度は急激に低下し, 最大で約 $12^{\circ}C$ 低下した。その後, Case W-2 の後半には緩やかになる。

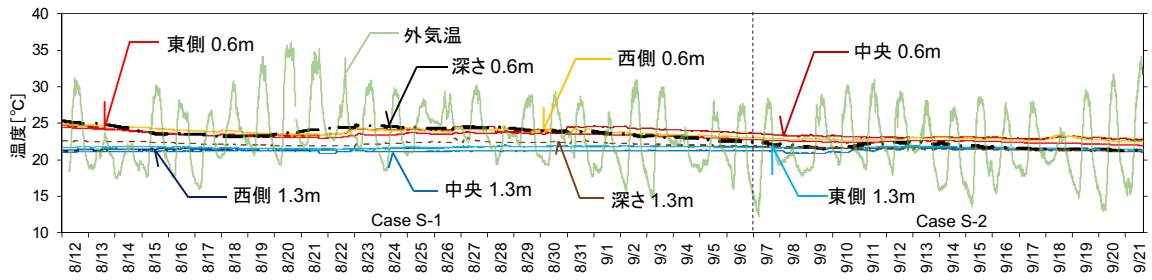


図-2 冷房期の温度推移 (8/12 ~ 9/21)

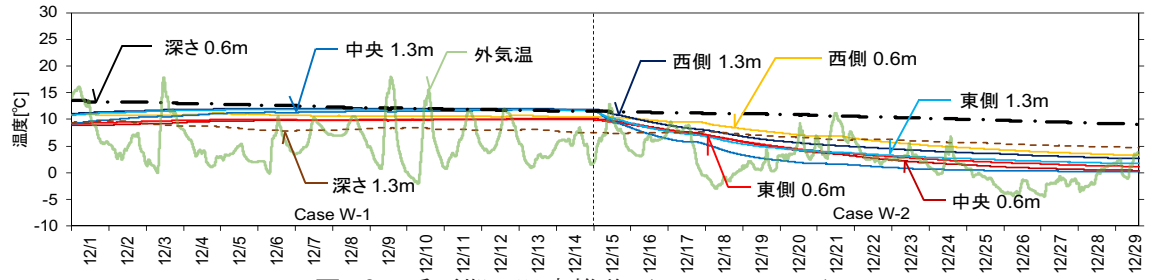


図-3 暖房期の温度推移 (12/1 ~ 12/29)

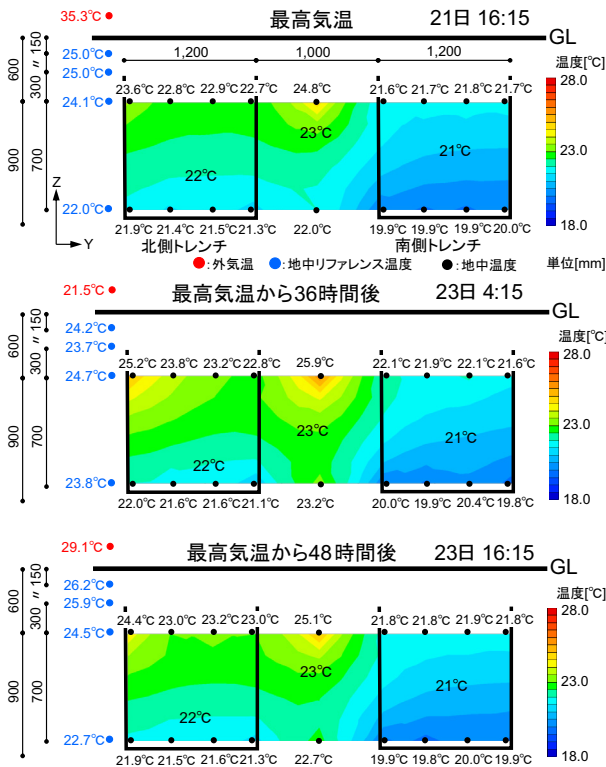


図-4 冷房期の地中温度コンター図 (Y-Z断面, X=8.0m)

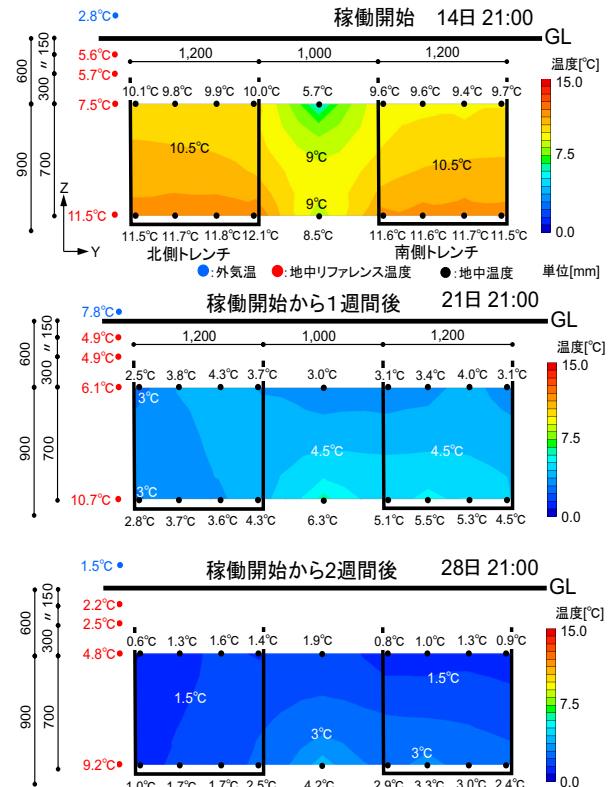


図-5 暖房期の地中温度コンター図 (Y-Z断面, X=8.0m)

(2) 地中温度分布

図4にCaseS-1の実験期間中の最高気温時、その後36時間経過した地中温度分布、図5にCaseW-2のGSHP運転開始時、その後2週間経過した地中温度分布を

示す。図2, 4より、地中温度は最高気温時から時間遅れで徐々に上昇する。一方、図3, 5に示すように、GSHPの暖房運転開始に伴い、地中採熱の影響による地中温度の低下が顕著となる。GSHPを稼働続けると、

地中深さによる温度差が小さくなる。また、設計段階ではトレンチの間隔を 1m 程度開ければ、トレンチ同士で影響を及ぼすことはないと言われていたがトレンチ間の温度も低下していることが確認できる。

5. まとめ

本研究により、GSHP の COP 向上に寄与する地中温度に着目し、重回帰分析や実験により地中温度への影響を検討した結果、地中温度が COP 上昇の要因になりうることや地中温度に対する外気温の影響や GSHP の稼働による影響について確認することができた。今後は GSHP の稼働条件を変化させた長期的な実験やスペクトル解析により詳細な地中温度への影響を検討する必要がある。

謝辞

本研究は、平成 30 年度公益社団法人・前川報恩会の学術研究助成（研究代表者：竹内仁哉）、ならびに 2021 年度秋田県立大学・創造的研究推進事業の一環として研究補助を受けて実施している。実験を実施するにあたり、サンポット株式会社の関係各位には多くの貴重なご助言、ご協力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

注釈

注 1) 暖房実験の分析では送水温度と地中温度に相関が見られたため、分析を 2 つに分けて行った。

参考文献

- 1) 松本真一：25 年間の拡張アメダス気象データに基づく浅層地中温度の計算，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第 5 巻：pp121-124 2014.9.
- 2) 小田島 賢成：住宅用ヒートポンプ空調システムにおける採熱方式とエネルギー消費効率に関する研究 秋田県立大学 令和 2 年度修士論文，2021 年 3 月

B-11

特殊地中熱交換器の性能検証と評価（第1報）

○進堂 晃央，田中 雅人，中元 秀則，小野 勇人（ミサワ環境技術(株)），赤井 仁志（福島大学），
新田 信二（㈱タツミ電工），勝又 雅浩，佐久山 邦宏，佐々木 隆二，高橋 善浩（㈱ユアテック）

Performance verification and evaluation of special ground heat exchanger (1st report)
Shindou Akio, Tanaka Masato, Nakamoto Hidenori, Ono Hayato (Misawa Environmental Technology Co., Ltd.), Akai Hitoshi (Fukushima University), Nitta Shinji (Tatsumi Denko Co., Ltd.), Katsumata Masahiro, Sakuyama Kunihiro, Sasaki Ryuji, Takahashi Yoshihiro (Yurtec Co., Ltd.)

キーワード：地中熱ヒートポンプ，地盤特性，熱応答試験，地中熱交換器

はじめに

欧州では古くから地中熱利用が行なわれており、様々な形状の地中熱交換器が実用化されている。それらの地中熱交換器をベースとして、日本特有の現場条件や施工条件に適応した地中熱交換器の開発を進めている。その一環として、スイス製の特殊地中熱交換器（以下、特殊型）の性能評価を行なった。本稿では特殊型と日本製地中熱交換器（以下、従来型）にて行なった熱応答試験とその結果を基に行なった性能評価について報告する。

1. 地中熱交換器の概要

特殊型の形状を図-1に示す。また、特殊型と従来型の仕様を表-1に示す。特殊型の表面には波状の凹凸がついており、表面積が広いこと、内部流体が乱流になること、パイプ径が大きく熱容量が大きいことから採熱効率の向上が図られている。GL-50 m まで掘削したボアホールに特殊型は U チューブ 1 本、従来型は U チューブ 2 本を挿入した。これらの地中熱交換器は、離隔を 5m 取り、福島市の福島大学構内に設置した。ボアホールに特殊型を挿入する際は、従来型の挿入用治具を使用した。問題なく設置することができた。施工に関しては、従来型と比較して特に問題はないことが確認できた。

2. 熱応答試験

2.1 試験の概要

熱応答試験は、地中熱交換器内に熱負荷を与えた循環水を循環して得られる温度や地中温度の経時変化より、地盤の有効熱伝導率と地中熱交換器の熱抵抗を推定する試験である。地中熱交換器の熱抵抗が低いと地中熱利用システムに必要な地中

熱交換器の長さを短くすることができる。

試験方法には、「温水循環試験」と「温度回復試験」がある。温水循環試験は、ヒーターによって一定加熱した循環水を地中熱交換器に循環させ、地中熱交換器の出入口温度と流量を計測する。その計測結果から循環時法と呼ばれる手法を用いて地盤の有効熱伝導率等を推定する。温度回復試験は、温水循環試験終了後に地中熱交換器内に設置



図-1 特殊地中熱交換器の形状

表-1 地中熱交換器の仕様

	特殊型	従来型
先端部形状		
外径	φ63mm	φ42mm
肉厚	2.9mm	3.9mm
材質	PE100	PE100

した温度センサーにより、地中熱交換器内の温度回復状況を計測する。その計測結果から回復時法と呼ばれる手法を用いて地盤の有効熱伝導率等を推定する。試験は「一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書」¹⁾に基づいて行なった。これらの試験を特殊型と従来型でそれぞれ行なった。

2.2 試験結果

熱応答試験にて計測したデータを基に、地盤の有効熱伝導率と地中熱交換器の熱抵抗を算出した。結果を表-2に示す。地中温度と有効熱伝導率は近い値となり、双方の地中熱交換器を設置した地盤条件が概ね同じであることが確認できた。地中熱交換器の熱抵抗は特殊型が 0.044K/(W/m)と従来型の 0.066K/(W/m)より 33%低い値となった。

表-2 試験結果一覧

	特殊型	従来型
地中熱交換器仕様	シングル Uチューブ L=50m	ダブル Uチューブ L=50m
地中温度	14.1℃	13.9℃
有効熱伝導率 (循環時法)	1.71 W/(m・K)	1.78 W/(m・K)
有効熱伝導率 (回復時法)	1.87 W/(m・K)	1.80 W/(m・K)
循環時法と回復時法の平均値	1.79 W/(m・K)	1.79 W/(m・K)
地中熱交換器の熱抵抗	0.044 m・K/W	0.066 m・K/W

3. 地中熱利用システム導入コストの検証

熱応答試験によって得られた値をもとに、冷暖房能力が 10kW の地中熱ヒートポンプを利用した空調システムを導入する際のコストを試算した。結果を図-1に示す。地中熱交換器 1本あたりの設置コストは、Uチューブの価格が高価であるため特殊型の方が高くなる。しかしながら、地中熱交換器の熱抵抗が低いとシステムに必要な地中熱交換器の本数を少なくすることができる。地中熱設計用のソフトウェア²⁾を使用して、特殊型と従来

型のそれぞれに必要な地中熱交換器 (L=50m) の必要本数をシミュレーションした結果、特殊型は 3本、従来型では 4本となった。地中熱交換器の設置本数を削減できることが大きな要因となり、特殊型を導入する方が従来型を導入するより 21%安価になった。

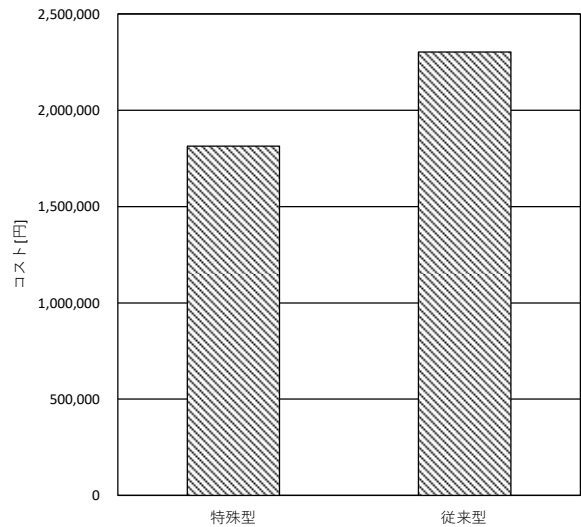


図-2 導入コストの比較

4. まとめ

特殊型の地中熱交換器と従来型の地中熱交換器の性能を検証するために熱応答試験を実施した。その結果、地中熱交換器の熱抵抗が特殊型の方が従来型よりも 33%低い値となった。この性能の違いを評価するために、地中熱ヒートポンプシステムを導入する際のコストを試算した。その結果、地中熱交換器の設置本数を削減できることが大きな要因となり、特殊型を導入する方が従来型を導入するよりも約 20%のコストダウンを行うことができる。

謝辞

この度の性能検証は福島県の「福島県海外連携型再生可能エネルギー関連研究開発支援事業」の成果である。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) NPO 法人地中熱利用促進協会編:一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書 (2018)
- 2) Gaia Geothermal 社 : Ground Loop Design (2020)

B-12

特殊地中熱交換器の性能検証と評価（第2報）

○佐久山 邦宏，勝又 雅浩，佐々木 隆二，新倉 万結（㈱ユアテック），赤井 仁志（福島大学），
新田 信二（㈱タツミ電工），田中 雅人，中元 秀則，進堂 晃央，小野 勇人（ミサワ環境技術㈱）

Performance verification and evaluation of special ground heat exchanger (2nd report)
Sakuyama Kunihiro, Katsumata Masahiro, Sasaki Ryuji, Shinkura Mayu (Yurtec Co., Ltd.),
Akai Hitoshi (Fukushima University), Nitta Shinji (Tatsumi Denko Co., Ltd.), Tanaka Masato,
Nakamoto Hidenori, Shindou Akio, Ono Hayato (Misawa Environmental Technology Co., Ltd.)

キーワード：地中熱ヒートポンプ，地盤特性，熱応答試験，地中熱交換器

はじめに

第1報の通り、福島大学においてスイス製の特殊地中熱交換器（以下、特殊型）の性能評価を行ない、その優位性を確認することができた。タツミ電工㈱の事務所に特殊型の地中熱交換器をヒートポンプに接続し、運転データから性能を評価する実証事業を行なっている。その際に設置した地中熱交換器にて熱応答試験を実施し、地盤の有効熱伝導率と地中熱交換器の熱抵抗を算出し、当該敷地の地盤特性と特殊型の性能評価を行なった。

1. 実証事業の概要

本事業では福島県田村郡三春町にあるタツミ電工㈱の事務所に地中熱ヒートポンプを設置し、その熱源として深さ30mと50mの地中熱交換器をそれぞれ1本ずつ埋設した。システムの概要図を図-1に示す。地中熱交換器30mと50mを切り替え、採放熱量や電力量を解析、評価し、特殊型の設計手法を確立する予定である。この深さ50mの地中熱交換器を使用して熱応答試験を行なった。

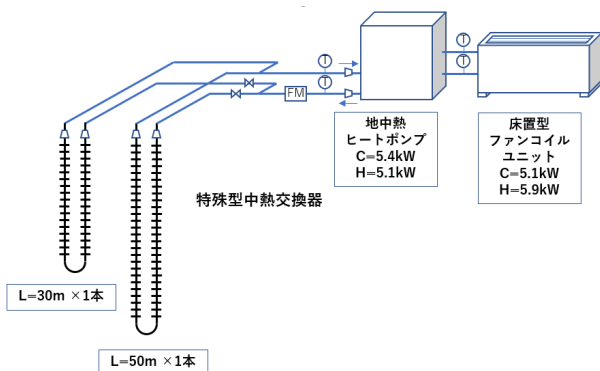


図-1 システム概要図

2. 熱応答試験

熱応答試験ではヒーターによって加熱した水を地中熱交換器内に循環させ、地中熱交換器の循環水温度と流量を計測する温水循環試験と、この温水循環試験終了後に地中熱交換器内に事前に設置した温度センサーにより地中温度の回復状況を計測する温度回復試験を実施した。これらの試験は「一定加熱・温水循環方式熱応答試験（TRT）技術書」¹⁾に基づいて行った。それぞれの計測データから、循環時法と回復時法を用いて地盤の有効熱伝導率と地中熱交換器の熱抵抗の解析を行った結果を表-1に示す。地盤の有効熱伝導率の各解析方法の平均は3.57W/(m・K)となった。

表-1 試験結果一覧

	特殊型
地中熱交換器仕様	シングルUチューブ L=50m
有効熱伝導率（循環時法）	3.31 W/(m・K)
有効熱伝導率（回復時法）	3.83 W/(m・K)
循環時法と回復時法の平均値	3.57 W/(m・K)
地中熱交換器の熱抵抗	0.041 m・K/W

地盤の有効熱伝導率の値が高いと、例えば冷房の場合であれば冷房排熱で温まった地盤の熱を周辺に伝え易いことから、地中熱ヒートポンプの効率が高くなる。深さ50mの地中熱交換器を埋設した際に行ったボーリングの柱状図を図-2に示

す。花崗岩、花崗閃緑岩が主体となっており、日本シームレス地質図²⁾でも三春町周辺の地質は、花崗岩が分布している。一般的な地盤の有効熱伝導率を表-2に示す。花崗岩は $3.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と高い値である。試験結果は概ねこの値に近い値となった。日本国内の有効熱伝導率の平均的な値は $1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 前後とされており、当該敷地の有効熱伝導率は高いことから、地中熱ヒートポンプシステムに適していると判断できる。GL-15m付近の熱伝導率が地下水の影響により非常に高くなっており、地中熱交換器の長さが50m未満でも性能を満足させる可能性もある。

表-2 地盤・岩盤の有効熱伝導率³⁾

	有効熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	
	飽和	不飽和
砂	1.53	1.19
砂礫	2.0	
シルト	1.44	
粘土	1.27	0.92
火山灰	1.18	0.90
泥炭	1.22	0.88
ローム層	1.0	0.72
岩(重量)	3.1	
岩(軽量)	1.4	
花崗岩	3.5	

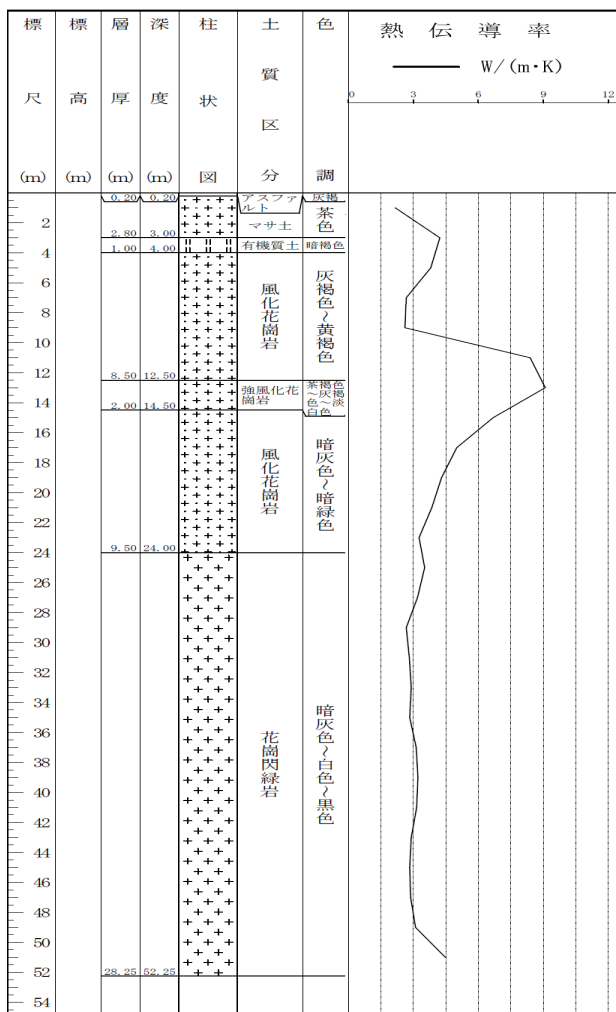


図-2 ボーリング柱状図

また、地中熱交換器の熱抵抗は $0.041\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ となった。第1報の福島大学に設置した特殊型の地中熱交換器は $0.044\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ であり、その値に近い良好な結果となった。

3. まとめ

地中熱利用設備の初期コストは比較的高額であり、普及の妨げとなっている。掘削長を短くできれば、イニシャルコストも下がり、普及促進に大きな効果がある。本事業の目的は、特殊型の設計根拠を確立し、同地域におけるイニシャルコストを削減することである。当該敷地で熱応答試験を行なった結果、地盤の有効熱伝導率は日本国内の平均的な値よりも大幅に高く、地中熱交換器の熱抵抗も良好な値だったため、同地域での地中熱利用システムは他地域に比べて安価になる。今後は実際の運転データを解析し、採放熱量や電力量を評価する予定である。

謝辞

この度の性能検証は福島県の「再生可能エネルギー事業化実証研究支援事業」の成果である。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) NPO 法人地中熱利用促進協会編:一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書(2018)
- 2) 産総研地質調査総合センター:20万分の1日本シームレス地質図 (<https://gbank.gsj.jp/seamless/seamless2015/2d/>)
- 3) 北海道大学環境システム工学研究室編浩文:地中熱ヒートポンプシステム(2020-10), pp.46

B-13

VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用

(その5) 給湯設備改修による効率変化 (給湯機 COP)

○ 宮川 卓 (北海道大学), 赤井 仁志 (福島大学 / 北海道大学), 濱田 靖弘,
猪俣 海斗 (北海道大学), 天野 雄一郎(四国電力(株)), 藤井 良平((株)四国総合研究所)

Utilization of central hot water supply system including hot water storage as VPP resources
(Part 5) Efficiency change due to hot water supply equipment repair (COP of hot water heater)

Miyagawa Suguru (Hokkaido University), Akai Hitoshi (Fukushima University/Hokkaido University), Hamada Yasuhiro, Inomata Kaito (Hokkaido University),
Amano Yuichiro(Shikoku Electric Power),
Fujii Ryohei(Shikoku Research Institute)

キーワード：VPP 給湯, 貯湯, 熱交換器

はじめに

中央式給湯設備は仮想発電所において、制御性の高いリソースとして電力需給調整に役立つ可能性を有すると注目されている。

本報はVPPリソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用に関する一連の研究¹⁾の第5報であり、日帰り入浴施設の2016年9月の給湯設備改修による効率変化について述べたものである。

1. 熱交換器の設置

本研究の解析対象施設は日帰り温浴施設であり、図-1のシステムで稼働している。

空気熱源ヒートポンプ給湯機は6台で運転し、シャワー系統と厨房系統に用いられている。改修以前は、井水を直接給湯機で加熱し、貯湯槽を経由して使用されていた。井水の水質による給湯機の劣化を防ぐために、熱交換器が増設された。これにより、給湯機-熱交換器間は密閉回路になり、貯湯槽の昇温や給湯は熱交換器を介して行われるようになった。

2. 空気熱源ヒートポンプ給湯機の効率変化

熱交換器の設置によって従来よりも給湯機の出入口温度が高くなることによる効率低下が予想される。そこで熱交換器設置前後での給湯機の効率変化についての解析を行った。解析対象について、熱交換器設置前のデータとして2016年1月-8月、設置後のデータとして2018年1月-8月のデータを用いた。

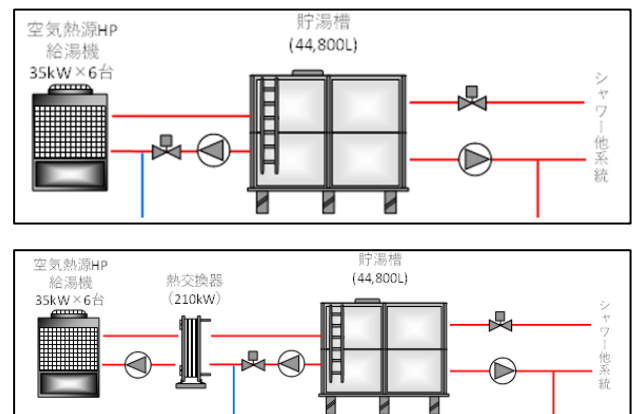


図-1 給湯システム (上：改修前、下：改修後)

2.1 給湯機のデータと解析方法

今回の解析では空気熱源ヒートポンプ給湯機の1分データを用いた。6台同時に給湯運転もしくは保温運転している時間を抽出し、平均値を扱った。熱交換器設置後は、運転開始直後に循環配管の初期温度の影響と思われる異常値が見られたため、保温運転中の給湯機入口温度が貯湯槽温度を下回るデータを除外した。熱交換器設置前後の出入口温度・流量・消費電力の変化を解析した上で、COPの変化を比較した。

外気温度0℃、5℃、10℃、15℃、20℃、25℃について2℃の幅(±1)を持たせてデータを抽出したところ、正規分布に基づいていたため、それぞれ一標本のt検定を用いて母平均の信頼区間を導いた。その範囲の平均値を代表値として散布図を作成した。また外気温度は5℃刻みの値を用いた。

ここで COP は以下の式により求める。

$$\text{COP} = \frac{4.186 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right] \times \text{流量} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \times \text{出入口温度差} \left[\text{C} \right]}{\text{消費電力} \left[\text{kW} \right]}$$

2.2 出入口温度の変化

図-2 は出湯温度と外気温度の関係を示している。給湯運転と保温運転ともに変化は小さかったが、外気温度が高い時には設置後の出湯温度が高い結果となった。

図-3 は入水温度と外気温度の関係を示している。外気温度によって差はあるものの、給湯運転では設置後に約 5℃高くなり、保温運転では約 1℃高くなる結果となった。

また出入口温度差としては、給湯運転では設置後に約 5℃小さくなり、保温運転では約 0.5℃大きくなった。

2.3 流量の変化

図-4 は流量と外気温度の関係を示している。給湯運転では流量が大きくなり、保温運転では流量が小さくなる結果となった。

2.4 消費電力・加熱能力の変化

消費電力は設置前後で変化が生じなかった。また給湯機の加熱能力の変化も見られなかった。

2.5 COP の変化

図-5 は COP と外気温度の関係を示している。給湯・保温運転ともに変化が生じない結果となった。

3 まとめと考察

本報では給湯設備改修前後での給湯機の効率変化について検討した。熱交換器設置により、予想通り出入口温度が高くなる結果となった。しかし同時に流量にも変化が生じ、COP としての変化は概ね生じなかった。給湯運転では出入口温度差が減少した一方で流量は上昇し、COP としては設置前後での違いは見られなかった。保温運転では出入口温度差は僅かに大きくなり、流量は減少したことで、COP の変化は生じなかった。

参考文献

- 1) 藤井良平他：VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用（その 1）再生可能エネルギー由来の電力の状況，空気調和・衛生工学会東北支部第 9 回学術・技術報告会論文集，（2020-3），pp. 97～100

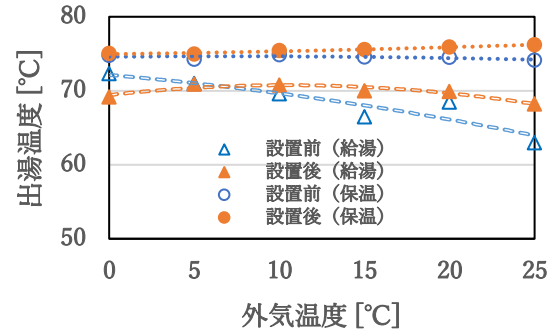


図-2 出湯温度の変化

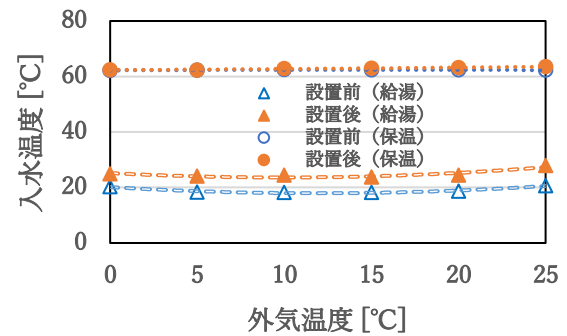


図-3 入水温度の変化

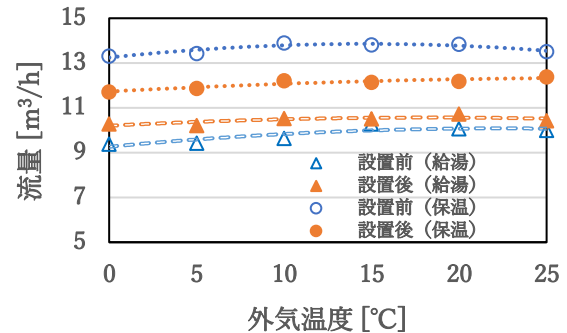


図-4 流量の変化

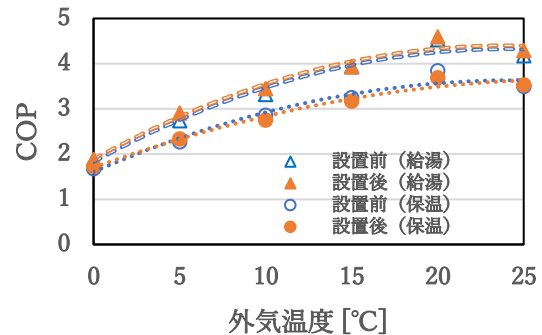


図-5 COP の変化

B-14

VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用

(その6) 給湯設備改修による効率変化(給湯機デフロスト運転)

○ 猪俣 海斗(北海道大学), 赤井 仁志(福島大学 / 北海道大学), 濱田 靖弘,
宮川 卓(北海道大学), 天野 雄一郎(四国電力(株)), 藤井 良平((株)四国総合研究所)

Utilization of central hot water supply system including hot water storage as VPP resources
(Part 6) Efficiency change due to hot water supply equipment repair (water heater defrost operation)

Inomata Kaito (Hokkaido University), Akai Hitoshi (Fukushima University/Hokkaido University), Hamada Yasuhiro, Miyagawa Suguru (Hokkaido University),
Amano Yuichiro(Shikoku Electric Power),
Fujii Ryohei(Shikoku Research Institute)

キーワード：再生可能エネルギー VPP 給湯 貯湯 ヒートポンプ 入浴施設

はじめに

再生可能エネルギー由来の電力の増加に伴って生じる出力制御を抑制するため、電力の需給バランスを調整する必要がある。中央式給湯設備をVPP リソースとして活用することは、電力の需給バランスを調整できる可能性を有する。本研究では実際の施設の実測データを解析し、需給調整への適用性を検討することである。本研究の解析対象施設は、2015年に竣工したものの、2016年に井水の水質によるヒートポンプ給湯機の劣化を防ぐ目的で熱交換器が増設された。前報(その5)では熱交換器の設置によってヒートポンプ給湯機の出入口温度が変化し、ヒートポンプ給湯機の効率にどのような影響を及ぼすかを評価したが、本報ではヒートポンプ給湯機のデフロスト運転にも影響が表れているかを分析する。

1. 解析対象施設の概要

1.1 熱交換器設置前後の給湯システム

解析対象とする給湯システムにおける熱交換器設置前、設置後のシステム系統図を図-1と図-2に示す。設置前は上水受水槽から井水を給水し、ヒートポンプ給湯機で直接井水を加熱し貯湯槽に送っていた。対して、設置後はヒートポンプ給湯機側が密閉回路となり、貯湯槽側の井水を熱交換器により間接的に加熱している。また、ヒートポンプ給湯機側の補給水は腐食対策を考慮して、水道水により補給することとした。

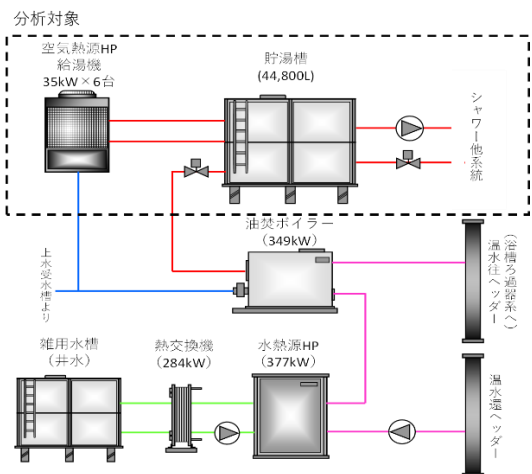


図-1 給湯システム系統図 (熱交換器取付前)

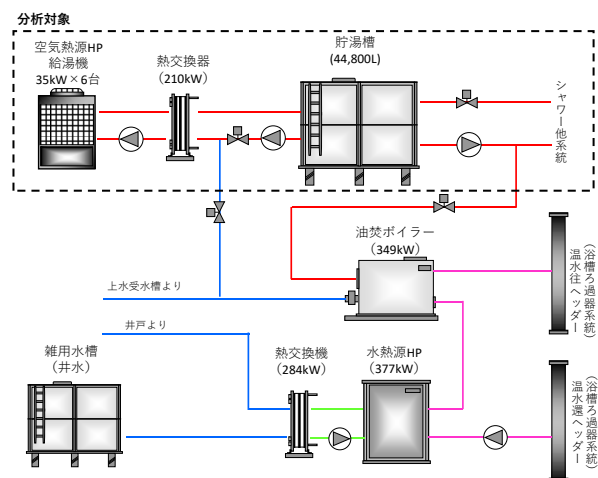


図-2 給湯システム系統図 (熱交換器取付後)

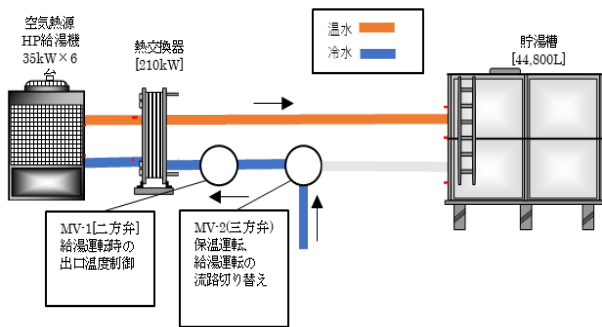


図-3 給湯運転時 湯の流れ

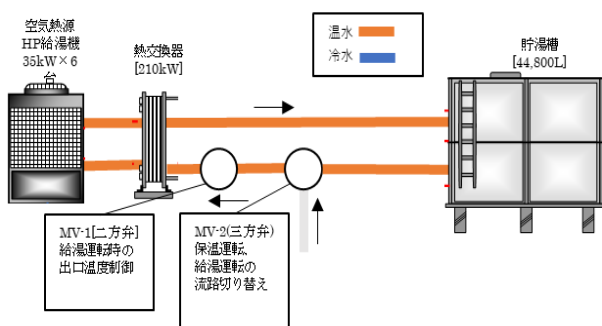


図-4 保温運転時 湯の流れ

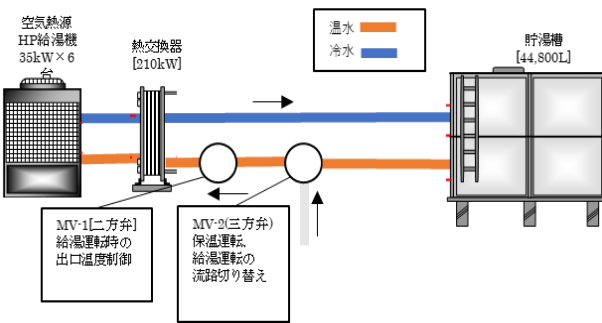


図-5 デフロスト運転時 湯の流れ

1.2 熱交換器設置後の湯の流れ

熱交換器設置後のヒートポンプ給湯機、熱交換器、貯湯槽の間の流路について、給湯運転時、保温運転時、デフロスト運転時に分けてそれぞれ図-3、図-4、図-5に示す。図中のMV-2(三方弁)により、給湯運転と保温運転の流路が切り替えられる。また、MV-1(二方弁)によって給湯運転時に流量を調整することで出口温度の制御が行われる。デフロスト運転時にはMV-2が保温運転時と同じ方向に弁が開き、貯湯槽の熱量を用いてデフロスト運転を行う。この時、熱交換器から給湯機への出口温度に温度設定があり、その設置値にな

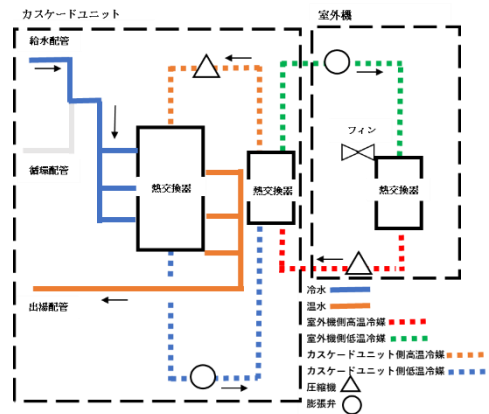


図-6 ヒートポンプ給湯機のシステム(給湯運転時)

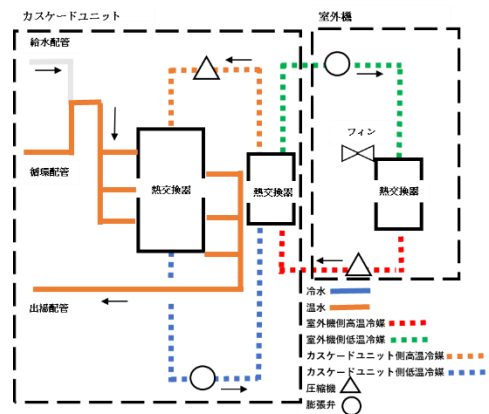


図-7 ヒートポンプ給湯機のシステム(保温運転時)

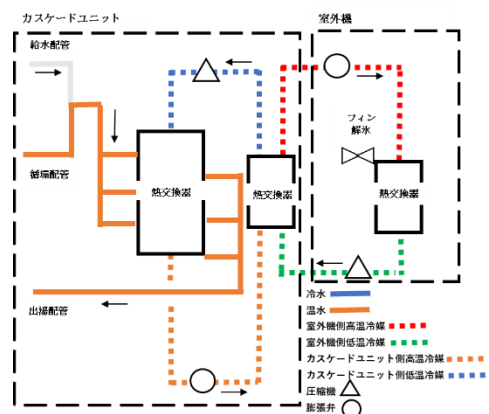


図-8 ヒートポンプ給湯機のシステム(デフロスト運転時)

るようにMV-2の開度を調整し、貯湯槽-熱交換器側の流量が調整される。

1.3 ヒートポンプ給湯機のシステムについて

給湯運転、保温運転、デフロスト運転時のヒートポンプのシステムの概要を図-5、図-6、図-7に

表-1 デフロスト運転 時間・頻度

2016年 1月 [平均気温 5.18℃]					2018年 1月 [平均気温 4.88℃]				
ヒートポンプ給湯機 No	発生日数 [日]	運転合計時間 [分]	運転回数 [回]	平均運転時間 [分/回]	ヒートポンプ給湯機 No	発生日数 [日]	運転合計時間 [分]	運転回数 [回]	平均運転時間 [分/回]
1	31	1414	180	7.85	1	30	1968	245	8.03
2	28	1414	163	8.67	2	29	2189	239	9.15
3	26	1617	191	8.46	3	31	2304	258	8.93
4	25	1760	203	8.66	4	30	2664	268	9.94
5	25	1560	170	9.17	5	29	2555	265	9.64
6	27	1392	157	8.86	6	29	2274	247	9.2

それぞれ示す。ヒートポンプ給湯機内は冷媒と外気間、冷媒と冷媒間、水と冷媒間で3つの熱交換器を有する。給湯運転時は給水配管から出た水を加熱し、保温運転時は循環配管から出た水を加熱する。循環配管の水から採熱し、フィンを解氷している。

2. 熱交換器設置がデフロスト運転に与える影響の評価

熱交換器の設置によって、給湯機の入水温度や出湯温度などの運転条件が変化することが予想される。これに伴い冬期の給湯機の運転効率に影響を及ぼすデフロスト運転にも影響が及んでいる可能性があると考えられる。本章では熱交換器の設置前と設置後の実測データを解析し、熱交換器の設置がヒートポンプ給湯機のデフロスト運転に与える影響について考察する。

2.1. デフロスト運転の運転時間、運転頻度の分析

外気温度が低く、デフロスト運転が最も多く発生する1月を対象に、熱交換器の設置前の代表データとして2016年を、熱交換器の設置後の代表データとして2018年についてデフロスト運転の月の合計時間、デフロストの発生日数を解析した。結果を表-1に示す。結果から、設置前に比べ、設置後の方がデフロスト運転の発生日数は増加し、それに伴い、デフロスト運転の合計運転時間も増加したことが分かった。この原因としては熱交換器設置後の2018年の月の平均気温が2016年に比べて低いためであると考えられる。また、熱交換器設置後の方が1回当たりの平均運転時間は長

くなることが分かった。これは熱交換器の設置により、貯湯槽からの返り湯を直接使用することができなくなり、熱交換器が設定する熱交換器から給湯機への出口温度が低いことが原因として考えられる。

2.2. 代表日のヒートポンプ給湯機の挙動

前節で熱交換器の設置によりヒートポンプ給湯機の入口温度が低下することでデフロスト運転1回当たりの平均運転時間が長くなる状況が確認された。本章ではより詳細なヒートポンプ給湯機のデフロスト運転時の挙動を分析するために、熱交換器の設置前後で代表日を選定し、ヒートポンプ給湯機の出湯温度と入水温度の挙動について分析した。表-1から熱交換器の設置前後でともにデフロスト運転を最も行っていたヒートポンプ給湯機No.4をヒートポンプ給湯機の代表として選定した。また、代表日としては2016年と2018年でともにデフロスト運転が生じていた1月の第2週の土曜日を選定した。それぞれ出湯温度と入水温度について分析した結果を図-1、図-2に示す。結果から、熱交換器の設置前はデフロスト運転時の入水温度が55℃前後と高く、出湯温度の低下も少ないが、熱交換器の設置後はデフロスト運転時の入水温度は20℃前後にまで大幅に低下し、出湯温度も大幅に低下した。このように入水温度に差が生じた原因としては以下のようなことが考えられる。熱交換器の設置前は貯湯槽からの返り湯の熱量を直接デフロスト運転に使用することができたため、デフロスト運転時の入水温度が高くなった。これに対して熱交換器の設置後は図-5のようにデフ

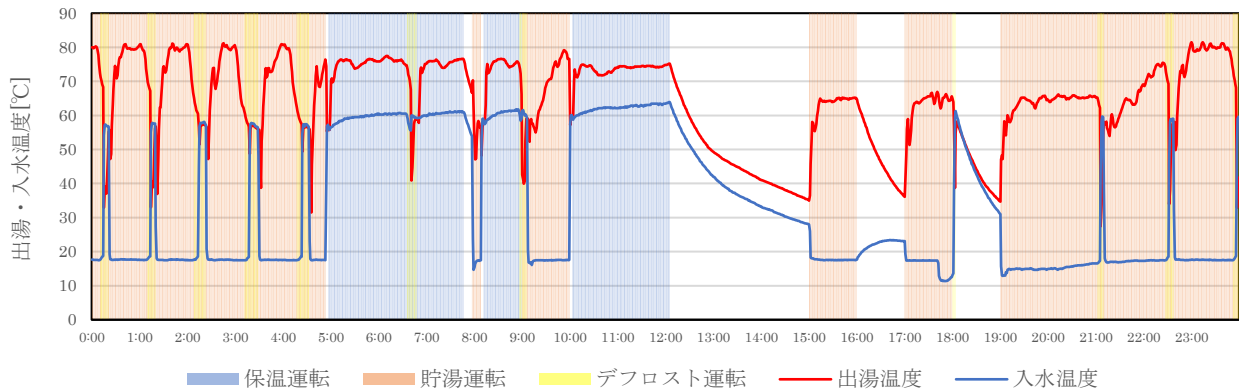


図-9 2016年 第2週土曜日 出湯・入水温度推移

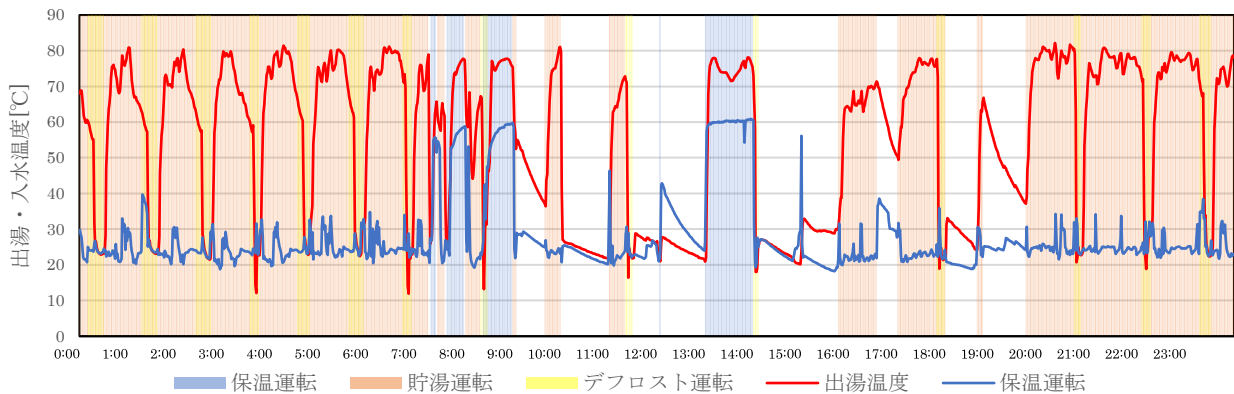


図-10 2018年 第2週土曜日 出湯・入水温度推移

ロスト運転時の熱交換器から給湯機への出口温度はMV-2の開度によって設定値になるように調整される。この貯湯槽から熱交換器への入水温度が20℃前後の低い温度に設定されているため、熱交換器の設置後はヒートポンプ給湯機の入水温度も低くなったと考えられる。デフロスト運転時のヒートポンプ給湯機への入水温度が低下すると、図-8のカスケードユニット内と室外機内の冷媒の温度も低下する。それにより室外機内のフィンの解凍を行う際に低い冷媒の温度で解凍を行うことになり、フィンの解凍に時間がかかる、つまりデフロスト運転1回当たりの平均運転時間が長くなると考えられる。

まとめ

熱交換器設置後、貯湯槽から熱交換器への入水温度をデフロスト運転時に低く設定していること

により、デフロスト運転1回当たりの平均運転時間が長くなる可能性が示唆された、よってデフロスト運転時の設定入水温度を上げることでデフロスト運転1回当たりの平均運転時間は減少すると考えられる。しかし、熱交換器が設定する給湯機の入口温度を高くしても、その分貯湯槽内の湯の熱量をデフロスト運転に利用することになるため、給湯機の入口温度を高くした分、貯湯槽内の湯が損失する熱量が高くなることが予想される。熱交換器が設定する給湯機の入水温度はデフロスト運転の時間と、貯湯槽内の湯が損失する熱量のバランスを考え調整する必要があると考えられる。

参考文献

- 1)宮川卓他:VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用(その5)給湯設備改修による効率変化(給湯機 COP), 空気調和・衛生工学会東北支部第11回学術・技術報告会論文集, (2022-3)

B-15

VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用

(その7) 実測データに基づくシミュレーションモデルの構築とケーススタディ

○藤井良平 (㈱四国総合研究所), 天野雄一郎 (四国電力㈱), 赤井仁志 (福島大学/北海道大学),

濱田靖弘, 猪俣海斗, 宮川卓 (北海道大学)

Utilization of central hot water supply system including hot water storage as VPP resources
(Part7)Construction of simulation model based on measurement data and case studies

Fujii Ryohei (Shikoku Research Institute), Amano Yuichiro (Shikoku Electric Power),
Akai Hitoshi (Fukushima University/Hokkaido University),
Hamada Yasuhiro, Inomata Kaito, Miyagawa Suguru (Hokkaido University)

キーワード : VPP, 給湯

はじめに

貯湯を含む中央式給湯設備は、熱源機の稼働時間をある程度調整できるという性質から、電力需給調整に適用できる可能性を有する。

給湯負荷の日積算値から1日の給湯機の運転時間を設定し、簡易な計算を行った結果について既報¹⁾で報告済みであるが、今回、給湯負荷を動的に扱い、貯湯槽の残湯量、水温等も計算に含め、需給調整への適用性を検討した結果を報告する。

1. 対象とする給湯システム

対象とする給湯システム概要を図-1に、主要な機器の仕様を表-1に示す。給湯システムのコントローラおよび制御盤で収集されているデータ(以降、内部データ)により、機器の特性を分析する。

2. シミュレーションモデルの構築

2.1 給湯機

内部データをもとに給湯機のCOP推定式を作成する。式1~4に示す通りに給湯機の負荷率、出口温度、外気温からCOPを推定するものとし、Excelのソルバー機能を用いて実測値との誤差が最小となる $a_1 \sim a_8$ の組み合わせを最小二乗法により求めた。給湯運転、保温運転の $a_1 \sim a_8$ の同定値とCOP推定精度を図-2、図-3に示す。

今回の計算上は給湯機の台数制御は行われず、全台運転を前提とする。加熱能力・流量は実測データの分析結果を踏まえ、給湯運転中は外気温に

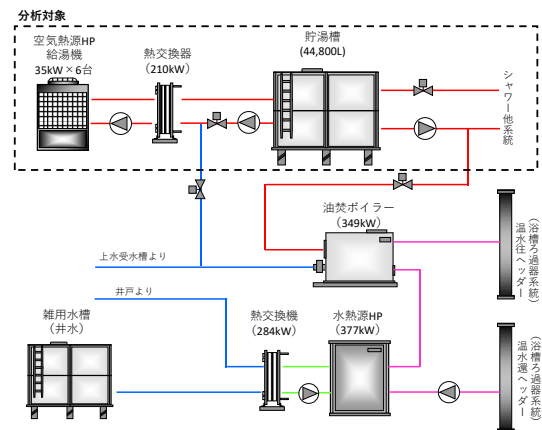


図-1 給湯システム概要

表-1 機器仕様

機器	仕様
給湯機	空気熱源ヒートポンプ 給湯加熱能力 35kW/台 保温加熱能力 13kW/台
熱交換器	プレート式・向流式・210kW
貯湯槽	開放型 FRP パネル貯湯槽 ポリスチレンフォーム 50mm 保温 呼称容量 48.0m ³

$$COP = f_1 \times f_2 \times f_3 \quad \dots \text{式 1}$$

$$f_1 = a_1 \times q^3 + a_2 \times q^2 + a_3 \times q + a_4 \quad \dots \text{式 2}$$

$$f_2 = 1 - a_5 \times (T_{out} - 55) \quad \dots \text{式 3}$$

$$f_3 = a_6 \times T_o^2 + a_7 \times T_o + a_8 \quad \dots \text{式 4}$$

ここに、 q :負荷率[-]、 T_{out} :給湯機出口温度[°C]、 T_o :外気温[°C]

より 35~40kW/台・650L/h/台、保温運転中は外気温によらず 13kW/台・750L/h/台で一定として設定する。

2.2 熱交換器

熱交換器の伝熱に関する基礎式を式 5 に示す。熱交換器出入口温度、給湯機流量等の内部データをもとに、熱交換器の特性を表すKA (伝熱係数 [W/K]) を求めた結果、KAは 31,596 と同定された。給湯機流量、出入口温度差から求めた交換熱量の実測値と、KAと ΔT_{LMTD} により算出した計算値を比較した結果を図-4 に示す。

計算上は貯湯槽側の入口温度が給湯運転中は上水温度、保温運転中は貯湯槽水温と一致するとし、交換熱量 (=給湯機加熱能力) をKAで除して算出した ΔT_{LMTD} を用いて、給湯機側の出入口温度を求める。実測データの分析結果を踏まえ、貯湯槽側流量については給湯運転中は出湯温度設定により変流量、保温運転中は定流量 (4,500L/h) とする。

2.3 損失熱量

配管の損失熱量は式 6,7 に示す通りに求める²⁾。屋外配管については、現地調査の際にラッキングのシール切れなどが散見され、保温材の含水が相当に進行していると予想されたため、屋外の断熱材の熱伝導率を大きくする設定を行った (表-2)。

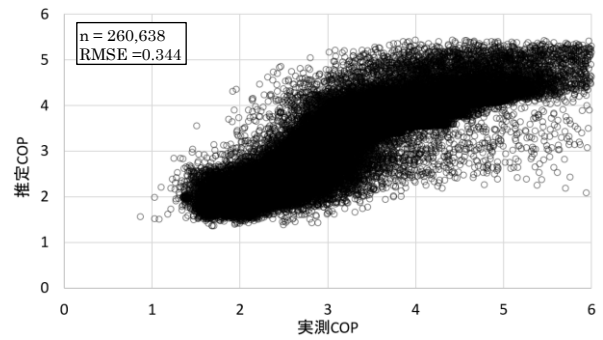
屋外部では管外周囲温度は外気温であるとし、屋内部は管外周囲温度を 20°C で一定とする。また、屋内部はフランジ・バルブ類の保温未施工部分があるとして、損失熱量を 10% 上乘せする³⁾。

表-2 損失熱量計算における設定値

部位	管径[mm]	管長 [m]	K_L [W/m・K]
屋外往	80	60	2.260
屋外還	25	60	1.140
屋内往	32	150	0.351
屋内還	25	150	0.298

2.4 計算概要

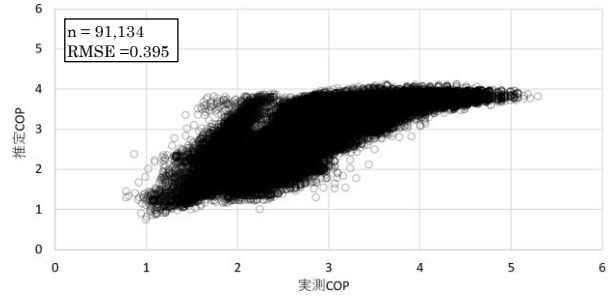
シミュレーションの概要を図-5 に示す。計算間隔は 30 分とし、時刻ごとの給湯機制御設定値 (給湯開始/終了水量、保温開始/終了水温) と貯湯槽残湯量、水温の条件に基づき給湯機の運転を決定し、電力消費量を計算する。給湯機の運転状況および給湯負荷、損失熱量の計算結果より次時刻の貯湯槽残湯量、水温を計算する。



$$a_1: -0.163 \quad a_2: -3.677 \quad a_3: 5.409 \quad a_4: 1.139$$

$$a_5: 0.010 \quad a_6: -0.002 \quad a_7: 0.082 \quad a_8: 0.857$$

図-2 給湯運転時の COP 推定精度



$$a_1: -1.347 \quad a_2: 2.011 \quad a_3: 2.613 \quad a_4: -0.330$$

$$a_5: 0.011 \quad a_6: -0.002 \quad a_7: 0.087 \quad a_8: 0.741$$

図-3 保温運転時の COP 推定精度

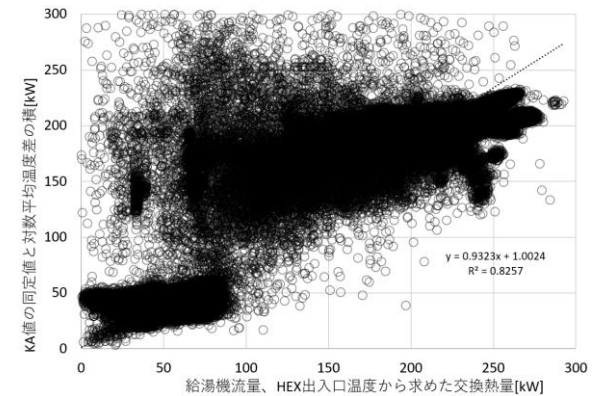


図-4 熱交換器交換熱量 実測値と計算値の比較

$$Q = K \times A \times \Delta T_{LMTD} \quad \dots \text{式 5}$$

$$q = l \times K_L \times (t_w - t_o) \quad \dots \text{式 6}$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\alpha_w d_0} + \frac{\log_e(d_1/d_0)}{\lambda_1} + \frac{\log_e(d_2/d_1)}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_o d_2} \right\} \quad \dots \text{式 7}$$

ここに、 Q :交換熱量[W]、 K :熱通過率[W/m²K]、 A :伝熱面積 [m²]、 ΔT_{LMTD} :対数平均温度差[K]、 l :管長[m]、 q :損失熱量[W]、 K_L :線熱通過率[W/m・K]、 t_w :管内水温[°C]、 t_o :管外周囲温度[°C]、 α_w :管内対流熱伝達率[W/m²・K]、 α_o :管外総合熱伝達率[W/m²・K]、 d_0 :管半径 (内径) [m]、 d_1 :管半径 (外径) [m]、 d_2 : d_1 に保温を加えた厚さ[m]

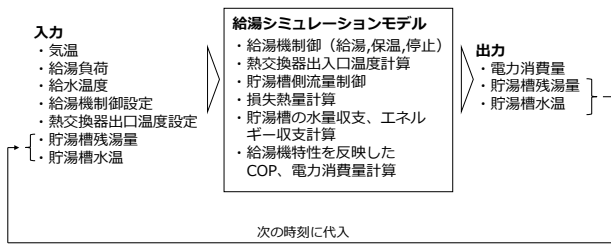


図-5 計算イメージ

3. ケーススタディ

前章までに構築したシミュレーションモデルを用いて、給湯システムを電力需給調整に用いることを想定した検討を行う。今回の検討では、電力需要を意図的に高める上げDR、意図的に低下させる下げDRの2パターンを対象とし、残湯量や貯湯槽水温を必要温度(60℃)以上に保ったうえで、通常運転と比べて電力消費量を変化させられるかを定量的に評価する。計算開始時の初期条件はいずれのケースも残湯量40,000L、貯湯槽水温60℃とした。また、給湯負荷、外気温については2018年の実測値を使用している。

3.1 上げDRを想定したケーススタディ

比較的電力需要が小さく、太陽光発電の出力が大きいことが多い5月の1週間を対象とする。この期間の給湯機の制御設定値を表-3に示す。上げDRは毎日10:00~14:00の4時間を想定し、この時間帯に給湯運転(貯湯槽が満水の場合には保温運転)を行い、通常時と比較して電力消費量を高められるかを検証する。比較対象とする通常時には、この時間帯に給湯機が停止していることが求められるため、給湯運転の開始水量を低減させ、給湯運転が行われにくい条件設定を行った。

通常時と上げDR時の電力消費量計算結果を図-6、図-7に示す。通常運転では定休日である火曜を除き10:00~14:00の時間帯に給湯機が停止し、電力消費量が生じていない一方で、上げDR時にはこの時間帯に給湯運転が行われており、通常時と比較して電力消費量を50kW程度高めることに成功しているのがわかる。貯湯槽残湯量を図-8に、貯湯槽水温を図-9に示す。給湯機の運転パターンが変化した影響が残湯量、水温に現れているが、いずれのケースにおいても湯切れ防止や貯湯槽温度の維持といった制約条件を満たしていた。

表-3 上げDRケーススタディにおける設定値

	時間帯	給湯運転		保温運転	
		開始水量 [L]	終了水量 [L]	開始水温 [°C]	終了水温 [°C]
通常時	前日 22:00 ~ 当日 4:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)	60	63
	4:00~8:00	40,320 (90%)	44,800 (100%)		
	8:00~10:00 14:00~22:00	17,920 (40%)	35,840 (80%)		
	10:00~14:00	13,440 (30%)	22,400 (50%)		
定休日 (火曜)	前日 22:00 ~ 当日 10:00 14:00~22:00	17,920 (40%)	26,880 (60%)	60	63
	10:00~14:00	13,440 (30%)	22,400 (50%)		
上げDR	10:00~14:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)	70	75

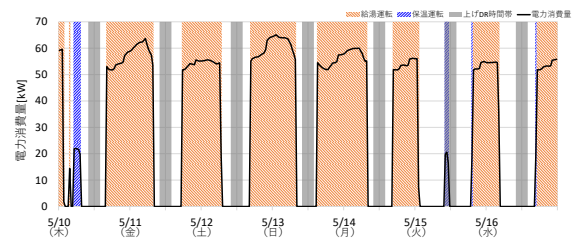


図-6 電力消費量 (通常運転)

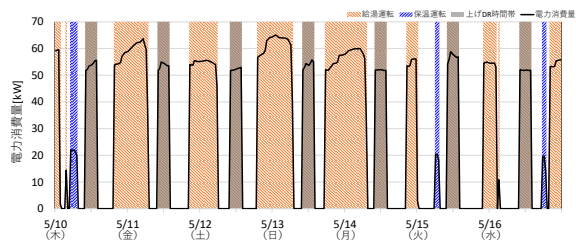


図-7 電力消費量 (上げDR)

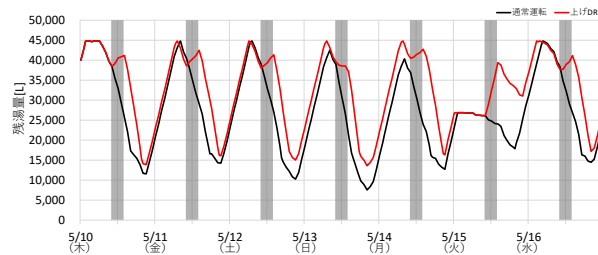


図-8 貯湯槽残湯量 (通常時と上げDR比較)

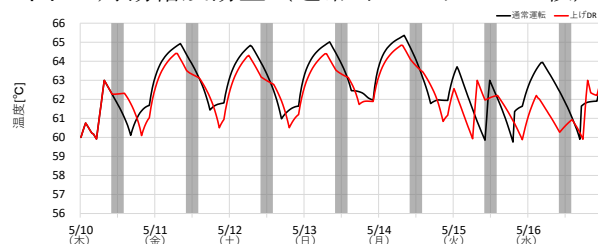


図-9 貯湯槽水温 (通常時と上げDR比較)

3.2 下げDRを想定したケーススタディ

比較的電力需要が大きく、太陽光発電の出力が小さいことが多い12月の1週間を対象とする。この期間の給湯機の制御設定値を表-4に示す。下げDRは平日15:00~18:00の3時間を想定し、この時間帯に給湯機を停止させ、通常時と比較して電力消費量を下げられるかを検証する。下げDRの時間帯に給湯機を確実に停止させるため、直前の12:00~15:00にかけて積極的に給湯運転を行う設定とした。比較対象とする通常時には、15:00~18:00に給湯機が運転するように、給湯運転が行われやすい条件を設定した。

通常時と下げDR時の電力消費量計算結果を図-10、図-11に示す。通常運転では15:00~18:00の時間帯に給湯運転が行われている一方で、下げDR時にはこの時間帯に給湯機が停止し、通常時と比較して電力消費量を60kW程度低減した。貯湯槽残湯量を図-12に、貯湯槽水温を図-13に示す。給湯機の運転パターンが変化した影響が現れているが、いずれのケースにおいても湯切れ防止や貯湯槽温度の維持といった制約条件を満たした。

まとめ

本報では貯湯を含む中央式給湯設備を電力需給調整に用いることを想定した検討を行った。

給湯開始(終了)水位の設定を変化させることにより、残湯量、貯湯槽水温の維持といった制約条件を満たしながら、電力消費量の発生パターンを変化させ、所定の時間帯の電力消費量を調整するDRへの適用性を示した。

今後は電気料金やDR報酬を含めたコスト面での評価、運転パターンの変化によるエネルギー効率の評価も対象として検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 猪俣海斗他: VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用(その4)実測データを用いたシミュレーション、年間給湯負荷、空気調和・衛生工学会東北支部第10回学術・技術報告会論文集, (2021-3), pp.73~76
- 2) 田中俊六他: 最新 建築設備工学, 井上書院, (2002-9), p28
- 3) 空気調和・衛生工学会: 給排水衛生設備計画設計の実務の知識改定4版, オーム社, (2017-3), p102

表-4 下げDR ケーススタディにおける設定値

		給湯運転		保温運転	
		開始水量 [L]	終了水量 [L]	開始水温 [°C]	終了水温 [°C]
通常時	前日 22:00 ~ 当日 4:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)	60	63
	4:00~8:00	40,320 (90%)	44,800 (100%)		
	8:00~15:00 18:00~22:00	17,920 (40%)	35,840 (80%)		
	15:00~18:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)		
定休日 (火曜)	前日 22:00 ~ 当日 15:00 18:00~22:00	17,920 (40%)	26,880 (60%)	60	63
	15:00~18:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)		
下げDR	12:00~15:00	44,800 (100%)	44,800 (100%)	60	63
	15:00~18:00	13,440 (30%)	22,400 (50%)		

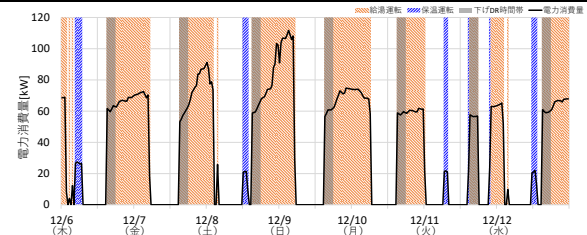


図-10 電力消費量 (通常運転)

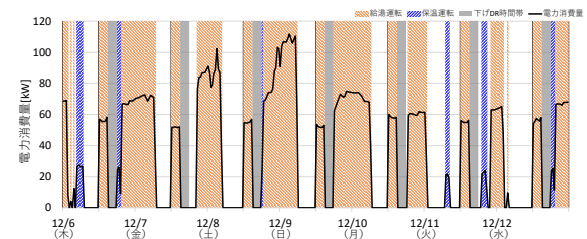


図-11 電力消費量 (下げDR運転)

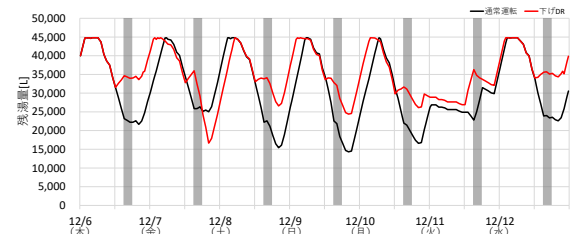


図-12 貯湯槽残湯量 (通常時と下げDR比較)

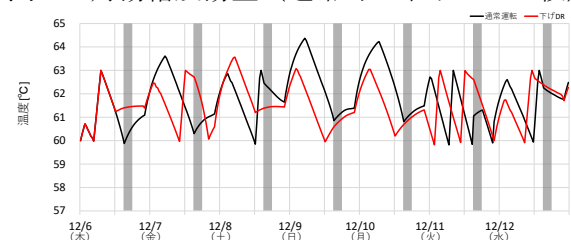


図-13 貯湯槽水温 (通常時と下げDR比較)

B-16

VPP リソースとしての貯湯を含む中央式給湯設備の活用

(その8) VPP を考慮したヒートポンプ給湯システム計画・設計の方向性

○赤井仁志 (福島大学/北海道大学), 濱田靖弘, 猪俣海斗, 宮川卓 (北海道大学),

天野雄一郎 (四国電力(株)), 藤井良平 (株四国総合研究所)

Utilization of central hot water supply system including hot water storage as VPP resources
(Part8) Direction of Heat Pump Hot Water System Planning and Design Considering VPP

Akai Hitoshi (Fukushima University / Hokkaido University),
Hamada Yasuhiro, Inomata Kaito, Miyagawa Suguru (Hokkaido University),
Amano Yuichiro (Shikoku Electric Power), Fujii Ryohei (Shikoku Research Institute)

キーワード : VPP Demand Response ヒートポンプ給湯 VRE

はじめに

発電時に二酸化炭素を排出しない太陽光発電や風力発電等の VRE の利用は、2050 年までにカーボンニュートラルを目指している日本には重要である。行き場のない VRE を有効活用するヒートポンプによる貯湯と蓄熱は肝要であるが、日本では蓄電の方向が強い。セクターカップリングの中に” Power to Heat ”がある。日本国内では電気自動車へのシフトの報道はされても、VRE をヒートポンプで活用する報道は皆無に近い。

寿命が短く、導入コストの高価な蓄電に比べ、貯湯・蓄熱は比較的安価に導入でき、寿命も長い。とくに、給湯は年間を通してエネルギー負荷がある。2030 年度までに国内にある約 140 基の石炭火力発電所のうち約 100 基の非効率な旧式発電所を休廃止の対象とする方針が示され、東日本大震災後と同様に、時間帯や季節によっては電力不足が予想されることから電力利用を抑制する時間帯が生じる可能性がある。

現在の上げ DR (需要創出型 DR) の傾向や、石炭火力発電所の休廃止に伴う下げ DR (需要抑制型 DR) 等を考慮した VPP の需要側リソースとしての給湯・貯湯の計画・設計等を考察する。

1. ヒートポンプ給湯システム計画・設計の課題

給湯でのヒートポンプ活用は、加熱能力当たりの導入コストが高額であること、受電設備や幹線等の電気設備への影響、電力基本料金等から、ミニマム設計が必要である。ヒートポンプ給湯機の加熱能力の設計では、燃焼機器を熱源機器とした設計を踏襲していることも多く、データ整備、設

計法や施工法等も含めた再考察が不可欠である。

1.1 使用湯量(とうりょう)原単位の特定

『空気調和・衛生工学便覧』に掲載されている使用水量・使用湯量の原単位が、給湯>(給水+給湯)の例もある。湯切れを回避しようと過大な原単位になっている可能性がある。

1.2 設計用給水温度設置

設計用給水温度設定では、冬季の低い給水温度のみが用いられるのが一般的である。その給水温度も、浄水場の出口温度を用いることもある。建築側の貯水槽の有無、貯水槽の設置場所(屋外か屋内か等)、貯水槽の容量等を考慮せず、実際にヒートポンプに入る給水温度と乖離した水温を用いることが通常である。給水温度は、ヒートポンプの COP と加熱能力を左右することから、季節ごとの的確な水温を用いる必要がある。

1.3 ヒートポンプ冷媒特性と損失熱量の特定

ヒートポンプに使われる冷媒の特性により、昇温上限温度、昇温温度差により COP に違いが生じる。とくに後者は、貯湯槽を含む給湯回路からの損失熱量の影響を考慮する必要がある。しかし、給湯回路からの損失熱量の実態が把握されていない。システムごとの特性を分類して、季節ごとの損失熱量を特定する必要がある。

1.4 デフロスト運転の性能低下の特定

加温のみをするヒートポンプ給湯機は、デフロスト運転による性能低下の特定は大事である。しかし、デフロストの影響は、温度や湿度、フードの有無や形状等の要素に左右されることから曖昧である。また、降雪・積雪、雪質等も関わる。

1.5 貯湯槽形式の選択

燃焼機器による時期は、通常、密閉式貯湯槽を用いた。深夜電力利用の電気ヒータ加温やハイブリッド給湯システムの出現で、開放式貯湯槽も用いられるようになる。密閉式か、開放式が適当か、建物用途ごとに検討すべきである。

1.6 再生可能エネルギー熱利用の熱源温度特定

再生可能エネルギー熱利用が進む中、地中熱や地下水熱のヒートポンプ熱源水温度は、特定できるようになっている。温泉排湯熱や下水熱、太陽熱温度の予測法も開発が急がれる。

2. VPP を考慮したヒートポンプ給湯システムの計画・設計法の基本的方向性

アグリゲータによる VPP のインセンティブを受けようとする場合、kW 報酬や kWh 報酬の分類、上げ DR や下げ DR 等の要因がある。制度の変更は十分に有り得る。PPA や独立送電網等の制度も普及することから制度変更への追従が容易にでき得る遠隔監視と制御によるヒートポンプ稼働と貯湯のシステム開発・導入が必須である。

ドイツでは、ヒートポンプの他に電気ヒータも併用するシステムが用いられている。現在の日本の電気料金(基本料金)制度では適応は難しいが、制度変更に対応できるシステムも必要である。

3. ヒートポンプ稼働と貯湯の制御

VPP や DR によらず、JEPX の一日前市場（スポット市場）によるヒートポンプ稼働と貯湯のスケジュール運転も有り得る。柔軟なフィードフォワード制御の方向性を示さなければならない。

4. 実稼働データ収集による設計と制御への反映

動的な給湯負荷・加熱負荷等の原単位データが足りない。過大にならない容量設計のために、5～10 程度の建物用途別の動的データを収集する必要がある。将来的に建物用途ごとに千～万程度の日動的データによりシミュレーションを行い、湯切れ発生の頻度と容量を特定する。データには、利用者数や給水温度等も含める。空気熱源の場合、表 1 のような要因もあることから解析・評価に加える（大きな影響のない要素も有り得る）。

(一財)ヒートポンプ・蓄熱センターなどがデータ収集・解析を行い、設計や制御へ反映できる仕組み作りを模索すべきである。村川三郎氏の MSWC プログラム（動的給水給湯負荷算定法、開発プログラム）の活用も視野に入れるべきである。

表 1 空気熱源ヒートポンプ給湯機の機器ごとの性能の違いの影響要因

要素	項目
機器本体	機器ごとの個体差
付属機器等 (防雪フード)	吸込側・吹出側の取付の有無
	形状・形式
設置状況 (一般事項)	ショートサーキットの有無
	設置場所(風通し・日陰の影響)
	設置方向 (熱交換器ない側の方向)
設置状況 (気象影響)	熱交換器部の離隔距離
	季節ごとの温湿度
	季節ごとの風向・風速
設置状況 (降雪影響)	季節ごとの日射
	季節ごとの雪質・降雪量
	基礎高さ
	機器周辺の融雪の有無
	パラペット等建物による吹溜り

5. 今後の方向性

湯切れを恐れ、過大なシステム容量になる傾向がある。貯湯槽に連結型潜熱回収型ガス給湯器を並列でつないだ簡易的ハイブリッド給湯システムの採用が現実的だと考えている。

おわりに

VRE の利活用は、輸入している化石燃料の対価として海外に流れているエネルギー費用を国内に還流させることに繋がる。また、かつてのオイルショック、産油国の事情に左右されないエネルギー安全保障の立場からも大切である。

参考文献

- 1) 赤井仁志:再エネ由来電力を浴場・給湯でエコ+安全に使う!, えねるみくす, Vol.99, No.4, pp.397～403(2020-7)
- 2) 赤井仁志:給排水衛生設備を中心とした再生可能エネルギーと多熱源利用システム, 空気調和・衛生工学, 第94巻, 第9号, pp.59～63(2020-9)
- 3) 赤井仁志:熱エネルギーとして給湯の需要と活用法～RHC100 と VPP リソースから考える, 給排水設備研究, Vol.33, No.3, pp.4～10(2020-10)

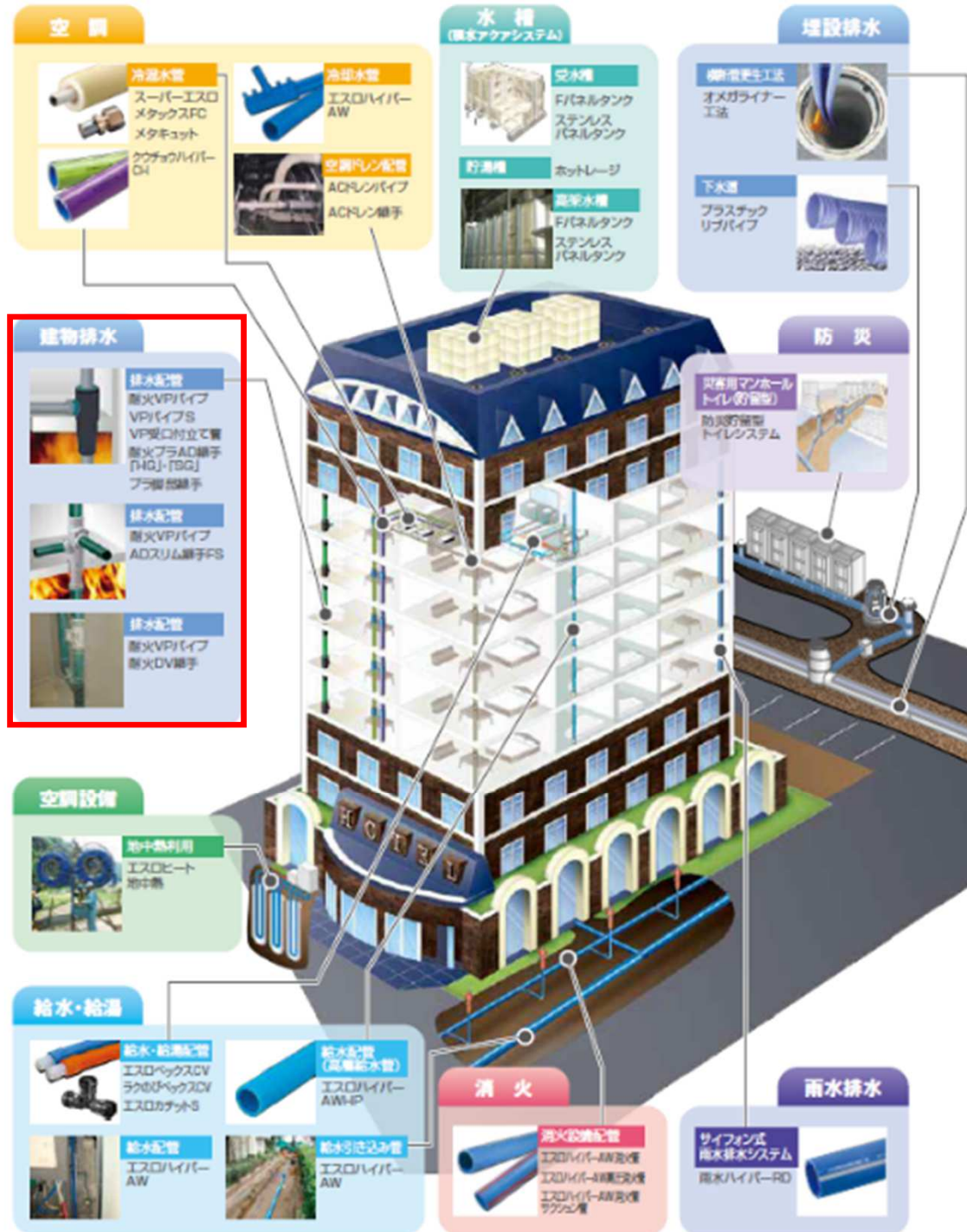
G-1

建築現場における排水配管のご提案

積水化学工業株式会社

積水化学工業では主に**プラスチック**を使用した配管材をご提案しております。

製品一覧 ▶ ホテル



建築現場における樹脂配管のご提案

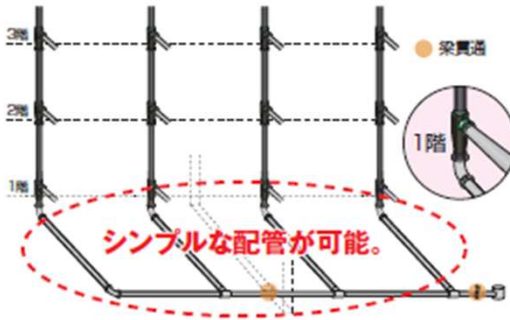
積水化学工業株式会社

排水

エスロン 耐火プラAD継手「HG」「SG」



最下階住戸排水を、排水立て管系統に合流。



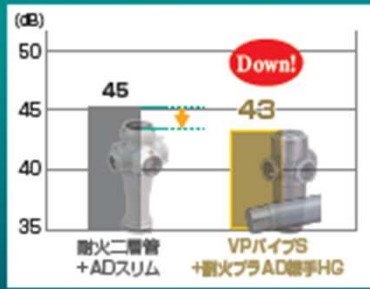
システム導入のメリット

<p>維持管理性の向上 最下階住戸の排水管も、他の階と同一の方法で維持管理が可能。</p>	<p>最下階住戸の間取り変更が容易 最下階住戸の排水配管もスラブ上部での配管になるため、間取り変更への対応が容易。</p>
<p>設計・施工が容易 他の配管との干渉や文差配管が低減され、配管勾配の確保が容易。</p>	<p>施工省力化・建物強度上有利 スラブ、梁の貫通が少なく、ポイント数が減少。</p>
<p>省スペース化と施工費・材料費のコストダウン</p>	

※別途見積り
※最下階単独排水管・通気管が不要。

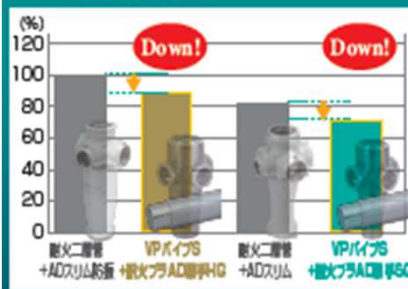
遮音性能が大幅アップ!

遮音設計を一新。非常に高い遮音性を実現します。



更に経済的に!

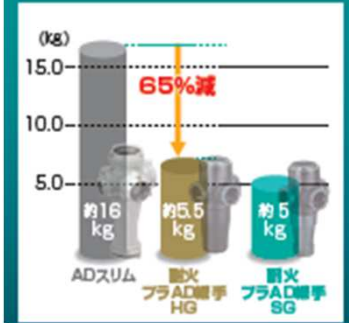
VP管との認定を取得。経済的な配管が可能です。



※パイプが防火区画貫通する場合は耐火VP管で貫通してください。

施工性も更に進化!

継手重量はADスリムの約1/3。簡単に持ち運びできます。



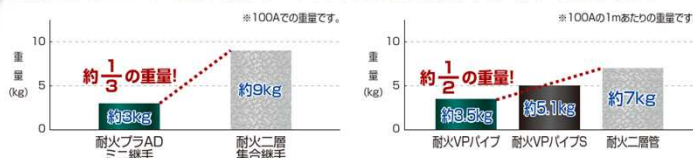
建築物用耐火性硬質ポリ塩化ビニル管・継手(建物排水・通気用)

排水

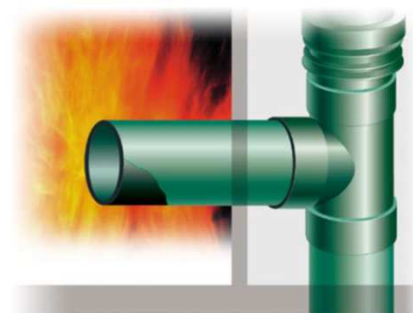
耐火VPパイプ配管システム

- 易施工**
- 立て管、横枝管には塩化ビニル管と同寸法の耐火VPパイプを接続。耐火二層管と比べて、切断作業、取り扱い性に優れます。
 - 横枝接続はゴム輪ワンタッチ。パイプの熱伸縮の吸収も行います。

- 軽量コンパクト**
- 耐火プラADミニ継手、耐火VPパイプは、従来品の半分以下の重さです。



- 胴体径が小さく、スリーブ径のサイズダウンが図れます。



SEKISUI

環境・ライフラインカンパニー
https://eslontimes.com

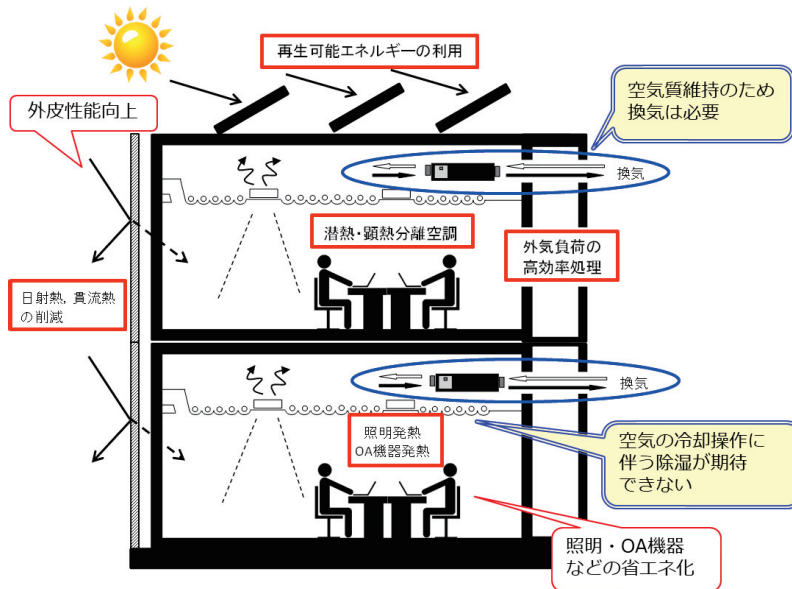


G-2

高効率な外気処理及び、居室内の調湿が可能な
小型デシカント空調機のご紹介

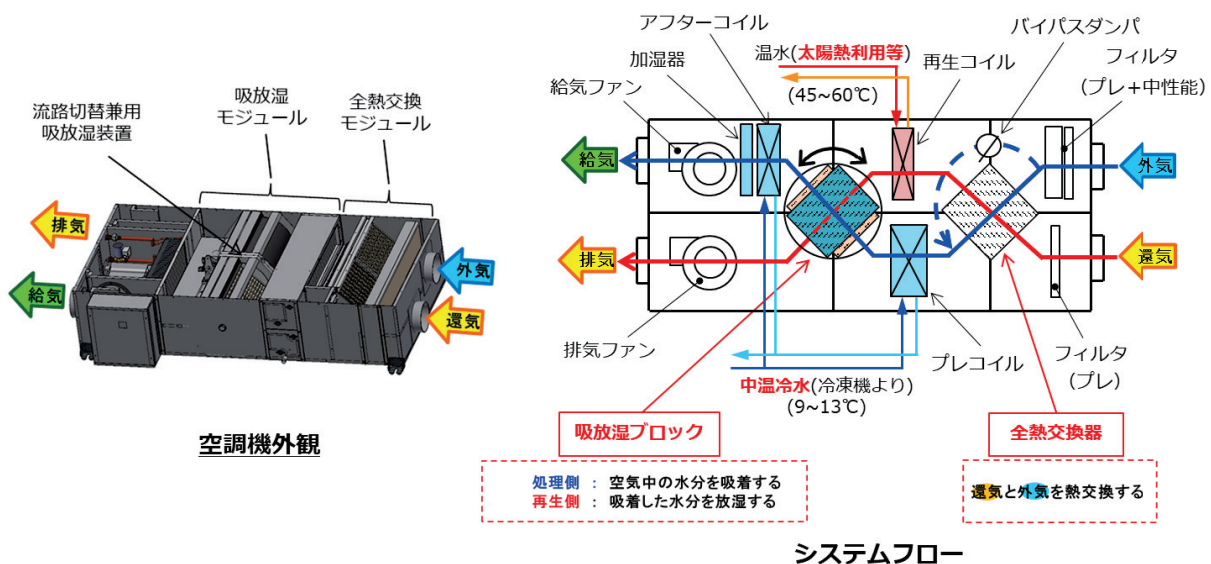
クボタ空調株式会社

1. ZEB化へのアプローチ



再生可能エネルギー熱を活用して高効率に外気処理を行うとともに、室内の湿度調整を行うことができ、**機械室を持たない建物にも天井内に設置**することで採用可能な「**調湿外気処理ユニット**」を開発しました。

2. 調湿外気処理ユニットの概要



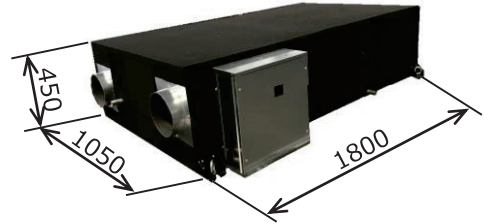
高効率な外気処理及び居室内の調湿を行う、**小型デシカント空調機**です。
空気の流路を切替え、吸湿と放湿を繰り返し、**安定した除湿・加湿運転が可能**です。

高効率な外気処理及び、居室内の調湿が可能な
小型デシカント空調機のご紹介

クボタ空調株式会社

3. 調湿外気処理ユニットの特徴

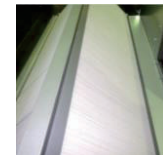
(1) 天井内設置が可能 (小型化)
機器内に搭載している各構成部品を最適化し、
天井内に設置可能なサイズとしています。
1,800mm x 1,050mm x 450mm



空調機外寸(mm)

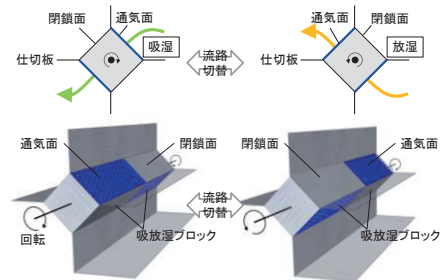
(2) 効率の高い全熱交換器
高分子吸着材(※)透湿膜を採用した全熱交換器を搭載して
おり、**全熱交換効率は60%以上**を有しています。

※ 高分子吸着材・・・有機高分子系の吸放湿材料であり低温で再生が可能で、
且つ、多量の水分を吸着できる特徴を持ちます。



高分子吸着剤全熱交換器

(3) 新構造の吸放湿モジュールを搭載
新構造の吸放湿モジュールにより、**高い除湿性能
と安定した除湿・加湿運転**を行います。



吸放湿モジュール流路切替動作

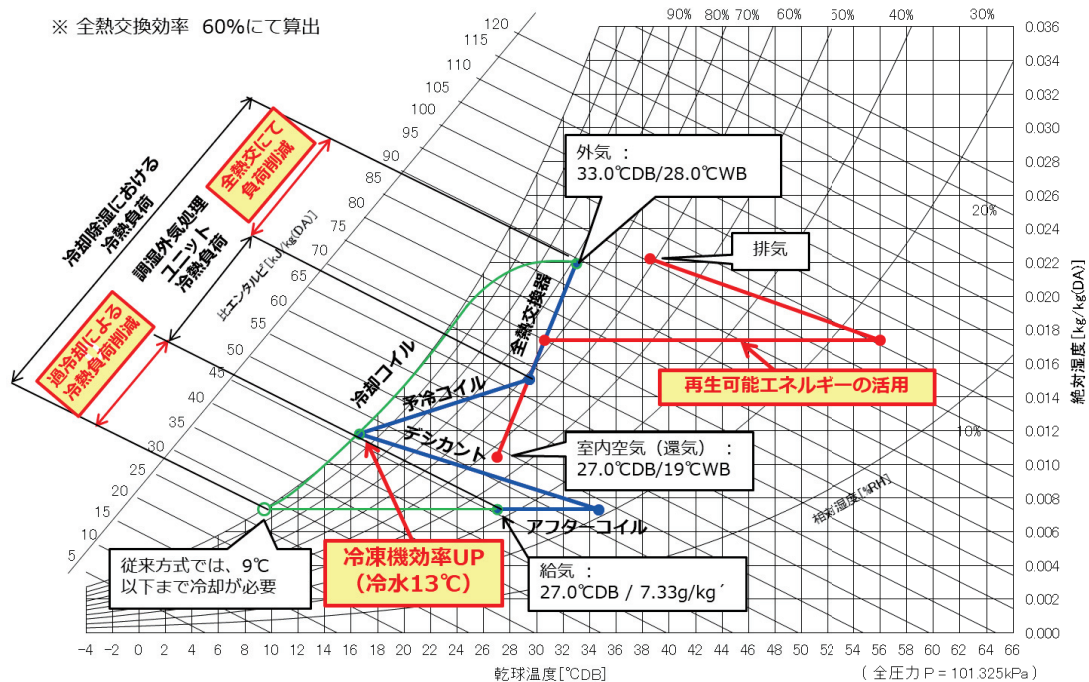
(4) 制御ユニットコントローラ搭載
専用の制御ユニットにより、
**精度の高い温度湿度の
コントロール**が可能です。



制御コントローラ

4. 調湿外気処理ユニットでの省エネ効果 (事例)

※ 全熱交換効率 60%にて算出

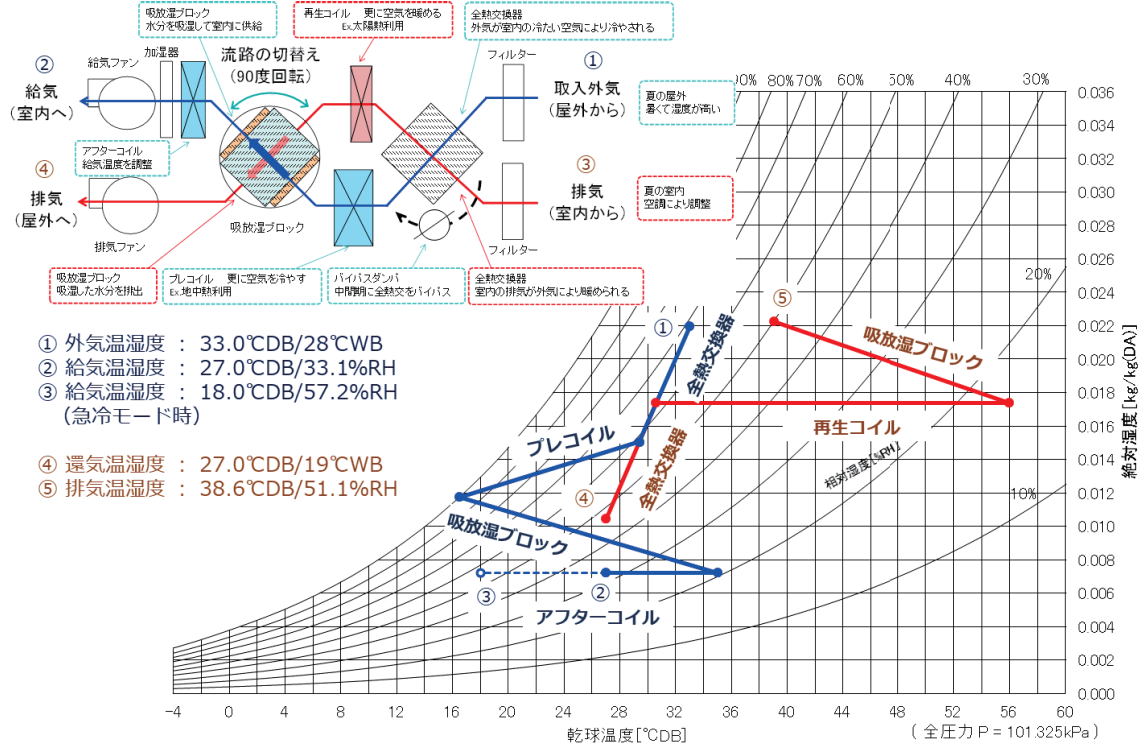


夏期ピーク時の冷熱負荷 ⇒ 冷却除湿比 **53%削減**

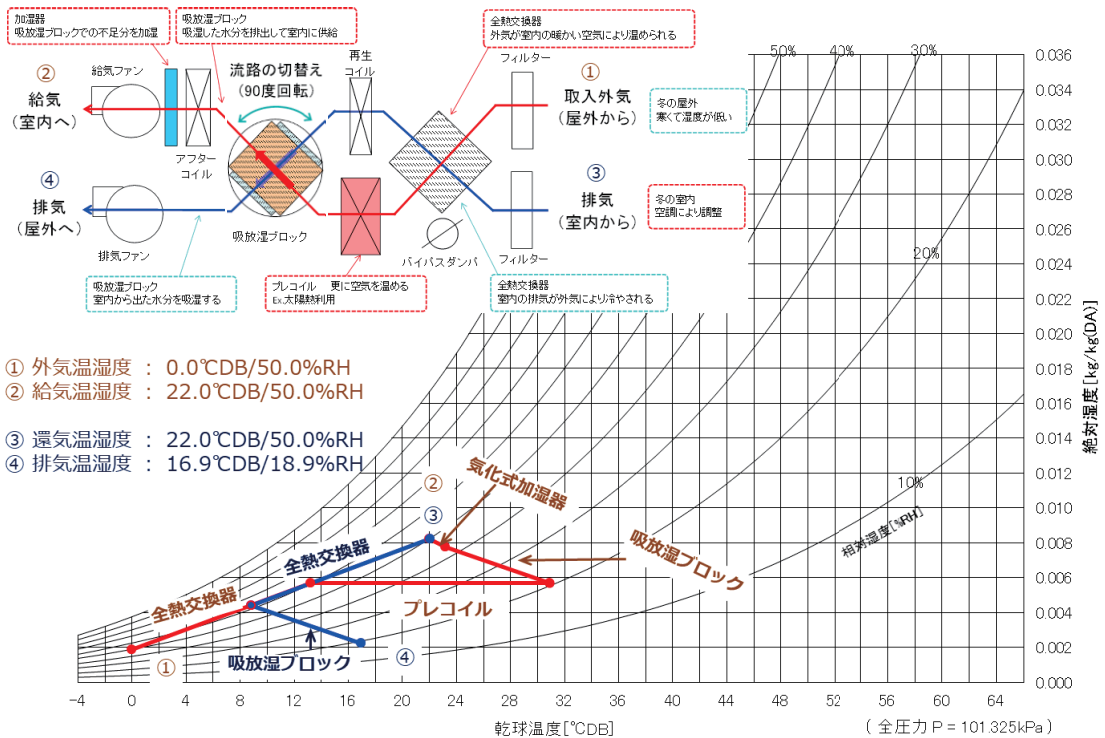
高効率な外気処理及び、居室内の調湿が可能な
小型デシカント空調機のご紹介

クボタ空調株式会社

5. 夏期除湿運転時エアフローと空氣の動き



6. 冬期加湿運転時エアフローと空氣の動き

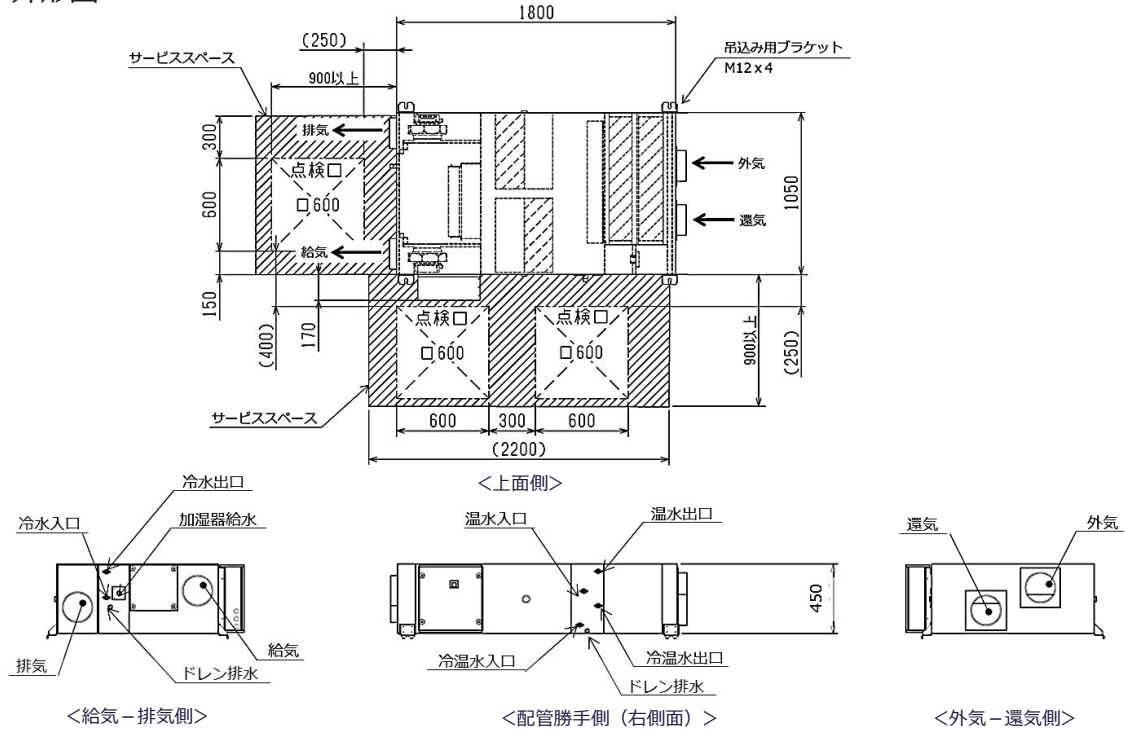


高効率な外気処理及び、居室内の調湿が可能な
小型デシカント空調機のご紹介

クボタ空調株式会社

7. 調湿外気処理ユニット仕様

(1) 外形図



(2) 仕様一覧

機種名	DHM-50C		
電源	単相 200V 50 / 60Hz		
風量	500m ³ /h		
機外静圧	150Pa / 300Pa		
冷房時除湿性能※1	冷水温度	9℃	13℃
	温水温度	45℃	60℃
	全熱能力	7.77kW	7.27kW
	潜熱能力	6.26kW	
	除湿量	8.78kg/h	
	消費電力	0.45kW※3 / 0.65kW※4	
暖房時加湿性能※2 温水温度：45℃	全熱能力	6.39kW	
	潜熱能力	2.70kW	
	加湿量	4.94kg/h (最大加湿時)	
	消費電力	0.44kW※3 / 0.64kW※4	
加湿器	種類	気化式加湿器	
	加湿量	1.2kg/h	
運転重量	250kg		
運転音 (A特性)	47dB※3 / 52dB※4		



(SA-EA側)



(OA-RA側)

空調機外観

※1 室外条件：33℃CDB/28℃CWB，室内条件：27℃CDB/19℃CWB
 ※2 室外条件：0℃CDB/50%RH，室内条件：22℃CDB/50%RH時
 ※3 機外静圧：150Pa選定時
 ※4 機外静圧：300Pa選定時

G-3

再生可能エネルギー活用やBCP対応力を向上したスマートビル
エネルギーマネジメントシステム「I.SEM®」
小型直流統合電源「MSEG®」

株式会社 竹中工務店

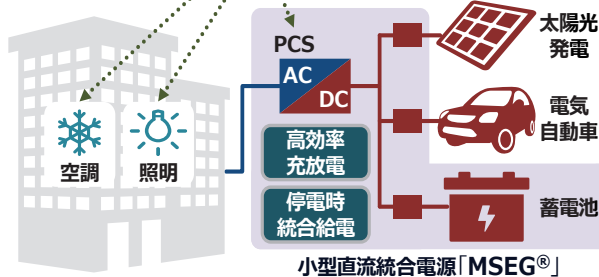
近年、ビルに求められるニーズが変化しています。

- 🌱 再生可能エネルギーの導入による**脱炭素化の推進**
- ⚡ 分散電源を活用した契約電力の低減やデマンドレスポンス(DR)※による**エネルギーコストの低減**
- ⚠️ 震災や台風などの自然災害による停電に備えた**BCP対応力の強化**

※「デマンドレスポンス(DR)」: 電力需給の逼迫が予想される際、需要家側で電力使用を抑制又は分散電源を稼働させ、需給バランスを保つ仕組み。



I.SEM
再生可能エネルギー活用やデマンドレスポンス等を実現するエネルギーマネジメントシステムです。



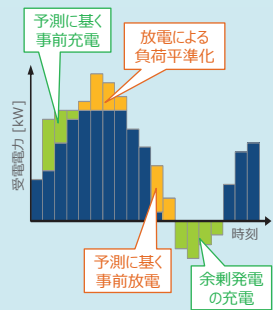
MSEG (Multi-Source Energy Gateway)
太陽光発電、蓄電池、電気自動車等の電源を直流でつなぎ、効率良く充放電できる統合電源システムです。

I.SEMのエネルギーマネジメント機能により、お客様のニーズに応えます。

🌱 太陽光発電の余剰発電をできる限り自家消費して、脱炭素化を推進したい。

PV自家消費制御

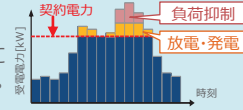
- 過去の実績値や天気予報から建物負荷電力量・太陽光発電量を予測します。
- 予測に応じて事前に充電・放電を行い、放電による負荷平準化と余剰発電の充電によって太陽光発電の自家消費率を向上します。



⚡ ピーク電力を抑え、電力基本料金を低減したい。

デマンド制御

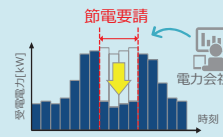
分散電源や照明・空調負荷を最適に制御し、契約電力の超過を防ぎます。



⚡ 電力網の節電に貢献し、インセンティブ(報奨金)を獲得したい。

DR制御

電力会社やアグリゲータ※からの節電要請を受けて分散電源や負荷設備を制御し、要請された節電を達成します。



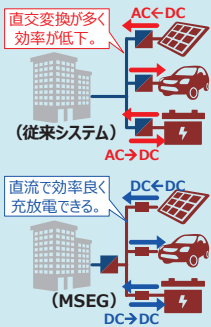
※「アグリゲータ」: 電力会社からの節電要請に対して、多数の需要家群をまとめて管理・制御し、要求された節電を達成するサービス事業者。

MSEGの導入により、再エネ利用を効率化すると共に、BCP機能を向上します。

🌱 分散電源を効率良く活用したい。

高効率充放電

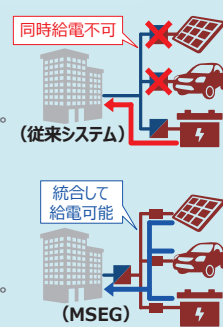
- 交流で連系する従来システムでは、分散電源間で直流/交流の変換が生じるため、効率が低下します。
- 直流で連系するMSEGでは、直流間の変換効率が高いため、太陽光で発電した電力を効率良く充放電できます。
- また、蓄電池には電気自動車で使用したりユースバッテリーを採用でき、蓄電資源の有効活用にも貢献します。



⚠️ 災害による停電時にも、電力供給を継続したい。

停電時統合給電

- 交流で連系する従来システムでは、停電時に電源間で周波数の同期が取れないため、同時給電ができません。
- MSEGは直流で連系するため周波数の同期が不要であり、停電時でも複数の分散電源を統合した給電が可能です。
- プラグインハイブリッド車(PHV)や燃料電池車(FCV)による給電も可能です。



再生可能エネルギー活用やBCP対応力を向上したスマートビル
エネルギーマネジメントシステム「I.SEM®」
小型直流統合電源「MSEG®」

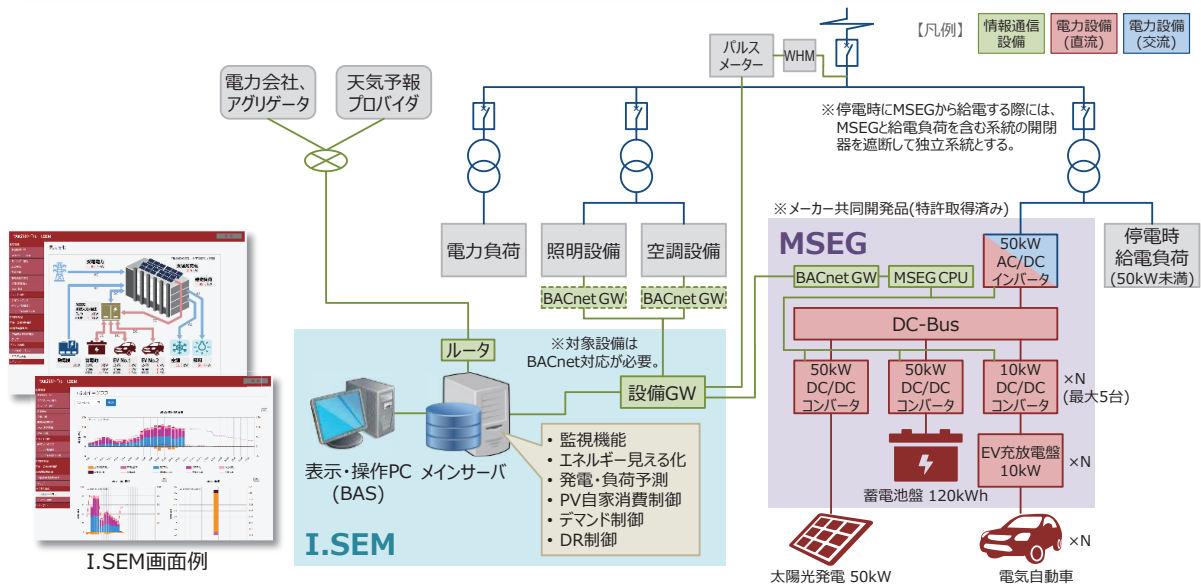
株式会社 竹中工務店

I.SEM エネルギーマネジメント機能

監視機能	<ul style="list-style-type: none"> MSEGを含む電源設備の状態・計測値を表示し、設定値の確認・変更を行います。 MSEGを含む電源設備のエラー発報を表示し、警報メールを送信します。 MSEGを含む設備に対して、設定したスケジュールに沿って発停・設定変更指令の送信を行います。
エネルギー見える化	<ul style="list-style-type: none"> 現在および過去の建物負荷電力量・太陽光発電量のデータを表示します。
発電・負荷予測☆	<ul style="list-style-type: none"> 気象予報データや、過去の建物負荷電力量・太陽光発電量・気象データ(気温、湿度、日射量)を用いて、建物負荷電力量・太陽光発電量を予測します。
PV自家消費制御☆ (特許取得済み)	<ul style="list-style-type: none"> 発電・負荷予測に基づき、事前に蓄電池に充電し、高負荷時に放電することで、負荷を平準化します。 また、太陽光発電による逆潮流が予測される場合、事前に蓄電池から放電して蓄電池残量を空けておき、逆潮流分を蓄電します。 負荷に対して大きな容量の太陽光発電が設置された建物において、蓄電池を負荷平準化にも活用しながら、休日や中間季の逆潮流を抑制し、再生可能エネルギーの自家消費を向上します。
デマンド制御☆	<ul style="list-style-type: none"> 「目標最大デマンド」を設定し、30分毎の電力量が目標値を超えないように、MSEG、空調・照明設備等に対して制御指令を行い、契約電力の超過を回避します。
DR制御☆ ※DR:デマンドレスポンス	<ul style="list-style-type: none"> 電力会社またはアグリゲータからの節電要請に対して自動で応答し、30分毎の削減量を達成します。(現状では、「調整力公募(電源1')」および「容量市場」※による節電要請に対応します。) (電力会社・アグリゲータからの指令の通信仕様に相違がある場合、別途開発が必要となります。) ※DRメニューの一つで、系統電力逼迫時に発動され、3時間前に要請を受けて3時間の節電を行う。

☆の機能は、必要な機能だけを選択して導入することができます。

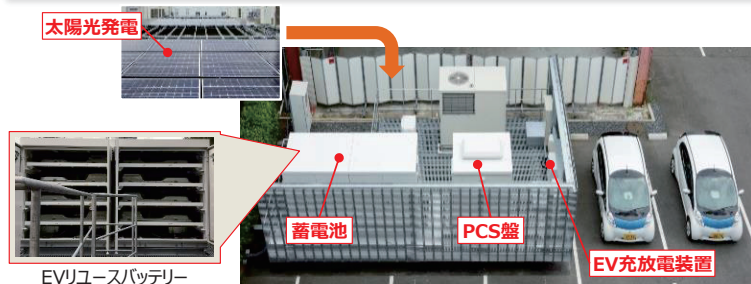
システム構成例 (I.SEM + MSEG)



MSEG設備仕様

直流交流変換	入出力: 50kW(三相)
蓄電池	充放電出力: 50kW 蓄電容量: 120kWh
太陽光発電	入力: 50kW
電気自動車充放電装置	充放電出力: 10kW 接続可能台数: 最大5台 通信方式: CHAdeMO

導入事例: TAKイーヴァック新砂本社ビル



公益社団法人空気調和・衛生工学会の概要

空気調和・衛生工学会は、暖冷房・換気、給水・排水、衛生設備など一般市民の生活と密着した設備やその仕組み・原理などを扱う学問領域で活動する学術団体です。

本会はこの領域の研究者と実際にこれらの設備の設計や施工を行う設計者・技術者、装置を製作するエンジニア、運転・管理技術者等の会員で構成され、日本にある工学系の中では 10 番目の規模の学会です。

また、創立時より「学理と工業は両輪である」との理念と「空気調和と衛生設備に関する専門学会」との立場をもって運営されており、現在もこれを継承しています。

【会員数】

個人					法人	合計
正会員	名誉会員	特別会員	学生会員	小計	賛助会員	
14,534 名	30 名	48 名	284 名	14,896 名	488(社)	15,384 名

2021 年 3 月末現在

【沿革】

- 1917 年（大正 6 年） 7 月 28 日 “暖房冷蔵協会” として創立（会員数約 150 名）
- 1927 年（昭和 2 年） “社団法人衛生工業協会” へと改称
- 1962 年（昭和 37 年） “社団法人空気調和・衛生工学会” へと改組
- 1973 年（昭和 48 年） 5 月 12 日 **東北支部設立**
- 2012 年（平成 24 年） 公益社団法人の認定を受け移行
- 2017 年（平成 29 年） 100 周年

【本部】

〒162-0825 東京都新宿区神楽坂 4-8 神楽坂プラザビル 4F

【会長】

大塚 雅之（関東学院大学・教授）

【ホームページ】

<http://www.shasej.org/>

空気調和・衛生工学会東北支部 メンバー

■ 東北支部運営委員 【2021年（第49期）・2022年（第50期）】

役 職	氏 名	所 属
支部長	小林 光	東北大学大学院工学研究科
副支部長 会計幹事	田原 誠	(株)竹中工務店 東北支店
副支部長 (総務・事業担当)	菅原 正則	宮城教育大学
総務幹事	金田 清満	新菱冷熱工業(株)東北支社
	佐々木 匡	新日本空調(株)東北支店
事業幹事	石島 和明	大成建設(株)東北支店
	小山 琢	三建設備工業(株)東北支店
	月野 智弘	(株)ピーエーシー仙台支所
	新沼 久雄	(株)興盛工業所
	許 雷	東北工業大学
	須知 秀行	(株)朝日工業社 東北支店
	赤井 仁志	福島大学
	岩淵 克也	(株)ユアテック
	大石 洋之	東北工業大学
	目黒 正浩	東北地方整備局
鈴木 道哉	東北学院大学	
委員	荒川 博之	高砂熱学工業(株)東北支店
	宮本 健太郎	三機工業(株)東北支店
	早瀬 訓	東北電力(株)本店
	佐々木 修	(株)アトマックス
	小林 仁	仙台高等専門学校
	松隈 達也	(株)大気社 東北支店
	牧野 泰弘	ダイダン(株)東北支店
	山田 英明	東洋熱工業(株)東北支店
	須藤 諭	東北文化学園大学
	後藤 正徳	第一工業(株)東北支店
一條 佑介	東北文化学園大学	

■ 賛助会員

社名	住所	番地	ビル名
北関東空調工業(株)	いわき市平字柳町	3	
(株)興盛工業所	仙台市宮城野区日の出町	1-1-35	
新日本空調(株)東北支店	仙台市青葉区一番町	3-7-1	電力ビル
新菱冷熱工業(株)東北支社	仙台市青葉区国分町	3-6-1	仙台パークビル
高砂熱学工業(株)東北支店	仙台市青葉区一番町	2-4-1	興和ビル
第一工業(株)東北支店	仙台市青葉区片平	1-5-20	Ever-I 片平丁ビル 4階
(株)東北開発コンサルタント	仙台市青葉区大町	2-15-33	大町電力ビル新館
東北電力(株)	仙台市青葉区中山	7-2-1	
(株)ユアテック	仙台市宮城野区榴岡	4-1-1	
大成建設(株)東北支店	仙台市青葉区一番町	3-1-1	仙台ファーストタワー
三建設備工業(株)東北支店	仙台市青葉区本町	1-13-22	仙台松村ビル 5F
(株)朝日工業社東北支店	仙台市青葉区春日町	3-21	
(株)竹中工務店 東北支店	仙台市青葉区国分町	3-4-33	
三機工業(株)東北支店	仙台市青葉区一番町	2-8-10	
サンポット(株)	花巻市北湯口第2地割	1-26	
(株)アークズ会津	会津若松市千石町	4-50	
東北エネルギーサービス(株)	仙台市青葉区大町	2-2-25	
ジョンソンコントロールズ(株) 東北支店	仙台市若林区新寺	1-3-45	AI.Premium 8F
(株)大気社東北支店	仙台市青葉区二日町	12-30	
東日本興業(株)	仙台市青葉区一番町	3-7-1	
弘栄設備工業(株)	山形市大字風間字地藏山下	2068	
有限会社トータルライフプラン	福島県いわき市泉玉露	7-11-10	サンハイツ泉 103
(公財)ふくしま海洋科学館	福島県いわき市小名浜辰巳町	50	
東洋熱工業(株)東北支店	宮城県仙台市青葉区本町	1-12-7	
(株)福島地下開発	福島県郡山市田村町金屋	110	
ミサワ環境技術(株) 福島営業所	福島県会津若松市新横町	1-37	
(株)アーズクリーン東北	宮城県仙台市若林区伊在	2-14-17	
熱研プラント工業(株)	宮城県仙台市宮城野区扇町	5-8-4	
(株)アステム	宮城県刈田郡蔵王町矢附川	1-2	
有限会社都市建築設計集団	宮城県仙台市青葉区一番町		
東和管工(株)	青森県青森市野内	272-4	

2022年2月現在

公益社団法人 空気調和・衛生工学会 東北支部
過去優秀発表奨励賞受賞者

第10回

令和3年3月10日(水) ZOOMミーティング

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-4	秋田県産木材を用いた小規模事務所建築のLCAに関する研究	全 堯	秋田県立大学
A-5	雨水利用施設の二酸化炭素排出量に関する研究	福井 啓太	福井水環境研究所
A-11	CFD解析を用いたF病院の病室における温熱・空気環境の検討	中島 由佳	千葉工業大学
A-13	天井吹出口毎に風量制御する空気式放射空調システムの開発	鈴木 恵	三機工業(株)

第9回 新型コロナウイルス感染拡大予防のため中止。審査なし。

第8回

平成31年3月13日(水) 東北大学川内北キャンパス

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-3	オフィスコンバージョンに対応した圧送排水システムの性能評価と設計・計画手法に関する研究 その1 圧送排水が既存排水立て管の排水性能に与える影響の検討	本村 雄大	関東学院大学
B-4	熱環境からみた冬期の居住性能に関する36年間の推移 —東北地方都市部における地域特性の分析—	増田早也花	秋田県立大学
B-3	乳幼児と高齢者の体温調節反応の特性に関する文献調査 —主として暑熱環境と寒冷環境について—	小林 集地	秋田県立大学

第7回

平成30年3月9日(金) 東北文化学園大学

講演 No.	講演題目	発表者	所属
B-11	災害時の避難所の飲み水とトイレに関するガイドライン その1 避難所の概要と飲み水	福井 啓太	東北文化学園大学
B-3	寒冷地における庁舎建築の環境性能に関する実態調査 —熱源機運転実績と省エネルギー性の評価—	山口 拓真	秋田県立大学
B-10	原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究 その3 原発事故被災地における 空間放射線ベクトル場の特性に関する研究	中島 主策	東北大学
A-12	屋外歩行者を対象とした人体熱生理モデルの精度検証と実市街地を対象とした都市温暖化適応策の評価	大場 優作	東北大学

第6回

平成29年3月14日(火) 東北学院大学多賀城キャンパス

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-2	都市部オフィスビルにおける緑陰形成効果と空気熱源機器効率向上に関する研究	土屋 茂樹	三機工業(株)
A-10	住宅のダンプネスの経年変化が小児・児童の呼吸器系症状に及ぼす影響に関する研究	佐藤 愛美	秋田県立大学
B-15	ゼオライト/水系を用いた一体型吸着蓄熱槽の性能試験	佐々木 賢知	三機工業(株)
A-9	住宅のダンプネスとアレルギー疾患の因果構造の解明に向けた基礎研究	佐藤 有希	秋田県立大学

公益社団法人 空気調和・衛生工学会 東北支部
過去優秀発表奨励賞受賞者

第5回

平成28年3月11日(金) 東北工業大学八木山キャンパス

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-4	脳卒中死亡と住環境要因との関連性に関する調査研究	貝沼 拓哉	秋田県立大学
A-6	住宅のダンプネスの評価法の構築と子供の健康影響に関する統計分析	竹鼻 紫	秋田県立大学
A-19	浅層土壌による螺旋状地中熱交換器の埋設工法の開発と評価 その2:改良後の実証試験計画・結果	瀬川 和幸	東北電力(株)
A-21	太陽光発電を用いたエネルギー自給型まちづくりの検討	菅野 智之	東北学院大学

第4回

平成27年3月10日(火) 東北大学 人間・環境系校舎

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-3	集合住宅への介護用圧送トイレシステムの適用の可能性	松尾 隆史	関東学院大学
A-9	PCMを利用したパッシブ温度管理型グリーンハウスの開発	澤田 真吾	東北大学
A-23	東日本大震災後の避難施設に関する研究 -防災システムの概要と稼働状況-	村上 美穂	仙台高等専門学校
A-24	避難者が製作できる段ボールルームの提案	相澤 華絵	宮城教育大学
B-7	サーバ室におけるラック型前面吹出しユニットの評価	岩崎 守顕	三機工業(株)

公益社団法人 空気調和・衛生工学会 東北支部
過去優秀発表奨励賞受賞者

第3回

平成26年3月18日(火) 株式会社ユアテック 本社

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-2	秋田県立大学におけるエネルギー消費特性の分析と環境負荷削減の適応手法の可能性に関する研究	庄司 侑椰	秋田県立大学
A-5	東日本大震災後の東北地方の福祉施設におけるエネルギー消費に関する調査	伊藤 梓	東北文化学園大学
B-16	室温の上昇・下降が人間の覚醒状態に及ぼす影響に関する被験者実験	平松 美紀	東北大学
P-1	オフセットを有する排水立て管システムの排水能力把握に関する研究	杉本 遼太	関東学院大学

第2回

平成25年3月12日(火) 東北文化学園大学

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-4	東日本大震災時の仙台市水道被害の実態分析 ～大規模地震時における上水道被害に関する研究～	菅原 章斗	東北工業大学
B-13	全国事務所建物における電力系・燃焼系熱源設備併用建物のエネルギー消費原単位 －DECC平成21年度調査データによる分析	井城 依真	東北文化学園大学
B-16	水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵容器内の充填状態変化と応力発現の検討	川上 理亮	高砂熱学工業(株)

第1回

平成24年3月14日(水) 東北工業大学 八木山キャンパス

講演 No.	講演題目	発表者	所属
A-11	グリース阻集器の油脂分解技術の評価試験 (その1) 評価試験の基礎的実験	草刈 洋行	(株)ユアテック
A-15	洗浄水量4.0Lを有する超節水型大便器の排水性能の検討	各務 紘史	関東学院大学
B-8	大規模震災時における応急給水施設の整備方策に関する研究 －仙台市を対象とした検討－	石橋 直也	東北工業大学
B-12	公共建物における空調機器の予測制御システムの適用に関する研究 その1 システムの概要と日射量の推計式について	松本 若菜	仙台高等専門学校
P-4	在室スケジュールに基づいた予熱暖房による熱負荷低減効果	田中 恵莉	宮城教育大学