

研 究 期 報

No. 118

2023 年 6 月

四 国 電 力 株 式 会 社
四 国 電 力 送 配 電 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 總 合 研 究 所

研究期報 1 1 8 号 目次

数値流体解析による流れ場の再現（第1報） 1

Reproduction of flow field by computational fluid dynamics (the first report)

保温材の上から配管減肉を点検可能な技術および現場適用例 6

Technology of inspection of piping over thermal insulation and examples of field applications

受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発 11

Development of wearable device for visualization of hydrogen flame by passive infrared spectroscopy

小学校における環境モニタリングシステムの導入による

換気行動変容に関する研究 20

Ventilation behavior changes by employing environmental monitoring system for elementary schools

建築設備を活用した電力需給調整に関する研究

～貯湯槽を有する給湯システムの利用可能性評価～ 30

Study on adjustment of electricity supply and demand by building services
- Assessment of the availability of storage type hot water supply system as a DR resource -

数値流体解析による流れ場の再現(第1報)

目 的

原子力や火力の発電プラントの炭素鋼配管では、流れ加速型腐食（FAC）などによる配管減肉が生じることがある。日本機械学会の規格に従って、超音波による肉厚測定により保守的な管理がなされているが、補強板下などの肉厚測定が難しい箇所に対しては、減肉分布予測が望まれている。

本稿では、FACによる減肉予測に先立って実施した、バックステップ流れを対象とした数値流体力学（CFD）解析による再現事例を報告する。

主な成果

1. バックステップ流れの再現結果

バックステップ流れ実験を対象に、流れの再現解析を行った。剥離点から再付着点の間に発生する再循環領域および下流での速度回復などの定性的な流れ場を再現できた（図1）。

2. 再現結果の実験値との比較

再付着点位置、流れ方向平均速度分布および乱流運動エネルギー分布について実験値との比較を行った。解析における再付着点位置は、実験値の範囲内であった（表1）。また、流れ方向平均速度分布および乱流運動エネルギー分布は、定量的、定性的に実験とおおむね一致していることを確認した（図2，図3）。

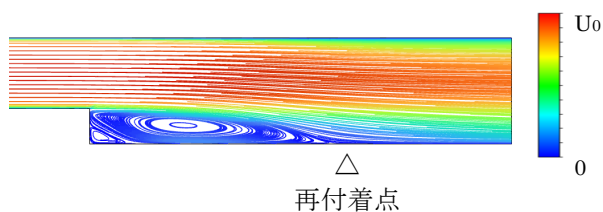


図1 流跡線

表1 再付着点の位置の比較

実験値	解析値
6.5H~7.5H	7.4H

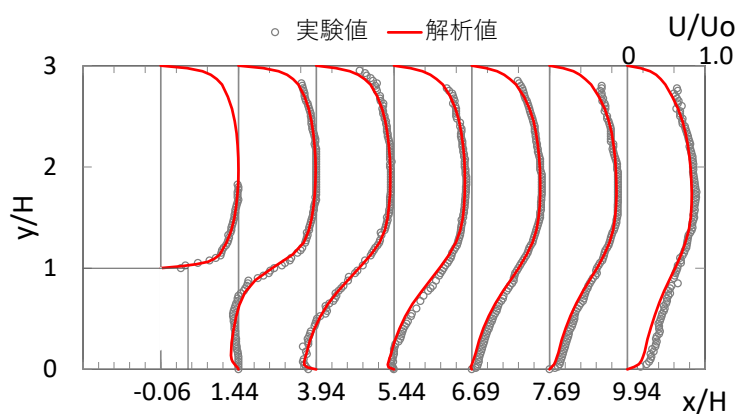


図2 流れ方向平均速度分布の実験値と解析値の比較例

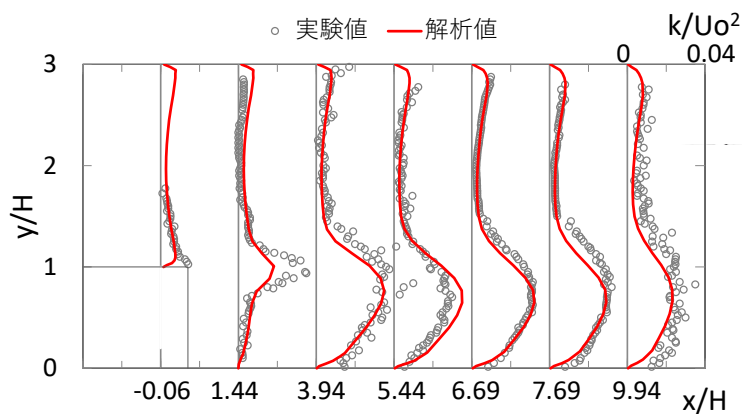


図3 乱流運動エネルギー分布の実験値と解析値の比較例

研究担当者	小川口深雪, 杉本健二 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	流れ加速型腐食, FAC, 数値流体解析, CFD, バックステップ, 再付着点, RANS, SST k- ω
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

保温材の上から配管減肉を点検可能な技術および現場適用例

目 的

本研究では、火力発電所の屋外保温配管について、保温材下の配管外面の腐食によるトラブル防止のために、保温材を解体することなく保温材の上から点検可能な技術を用いて、火力発電所の配管を試験的に点検し実用性および点検精度の評価をしたうえで、従来の配管点検方法から新たな方法への転換を図る。

主な成果

1. 点検技術の調査

保温材の上から配管点検可能な技術について、非破壊検査業務を取扱う企業へヒアリングを実施した結果、放射線を用いた画像撮影による点検や超音波（ガイド波）を用いて点検する方法などがあり、口径 250A 以下の配管が対象の放射線画像撮影による点検技術として、携帯式保温配管 RT 装置（CUI-Vision）や工業用ワイヤレスフラットパネル（DREAMS）の存在を確認した。（図 1, 2）

2. 点検技術の検証

CUI-Vision や DREAMS の技術を用いて、火力発電所の配管を試験的に点検した結果、CUI-Vision による外面腐食簡易点検や DREAMS による残肉厚測定が可能であることを確認した。（図 3～6）

さらに、DREAMS を用いて点検した配管を切断し配管断面を観察した結果、DREAMS の残肉厚測定値と実際の配管腐食状態との相違がほとんどないことが分かり、測定精度の高さを検証することができた。

3. 現場適用

DREAMS の技術を本格的に現場適用して、燃料タンク廻りの燃料小口径配管（15～50A）の合計 131 か所を対象に点検を実施した結果、点検開始から点検結果受領までにかかる時間の短縮、点検コストの低減など、従来の保温材の解体を伴う点検方法に比べて多くのメリットが得られることを確認できた。

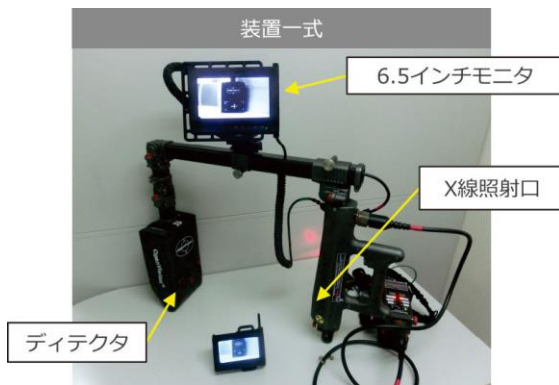


図1 CUI-Vision 装置外観



図2 DREAMS システム構成概略図



図3 CUI-Vision による撮影作業状況



図4 CUI-Vision による撮影画像例



図5 DREAMS による撮影作業状況

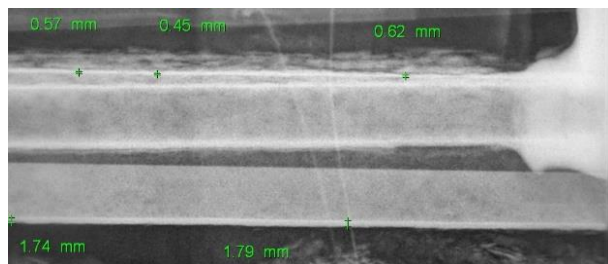


図6 DREAMS による撮影画像および残肉厚測定値

研究担当者	鬼勢章 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	保温材下腐食、非破壊試験、配管肉厚測定
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発

目 的

水素に着火した際、その炎は人の目に見えない。水素火炎は紫外線検知センサによって監視されているが、火炎の位置がわからないことや誤報が発生するという課題が指摘されている。また、現場では、安全面から作業員がハンズフリーで水素火炎の位置を特定することが望ましい。これらの背景に鑑み、著者らは水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの研究開発を行った。本稿ではその詳細について報告する。

主な成果

1. 水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの開発

受動赤外分光法と AR 技術を適用し、水素火炎の発する近赤外光を撮像し、ウェアラブルデバイス上で水素火炎を可視化して表示する装置を開発した。

装置は片眼に装着する方式とし、 $\phi 12.5$ mm の小径な近赤外用レンズ光学系と同径の光学フィルタ、モジュールタイプの AR デバイス、画像処理回路を組み合わせ、小型・軽量の装置の開発を行った。装置の外形寸法は 135×96×55 mm であり、重量は 190 g である。イメージセンサには 1/4 型の CMOS 素子を適用した。

2. 水素火炎可視化性能の機能評価

開発した装置を用いて水素火炎の可視化性能を評価し、昼間屋外環境下、離隔距離 10 m にて約 4 cm の水素火炎を可視化できることを確認した。

また、装置の撮像結果と別途可視カメラで撮像した、装置の撮像結果と同等な画角の可視画像とを比較し、マシンビジョンで生じる収差による周辺光量の減少や背景のボケが抑制され、明瞭な水素火炎の撮像結果が得られていることを確認した。

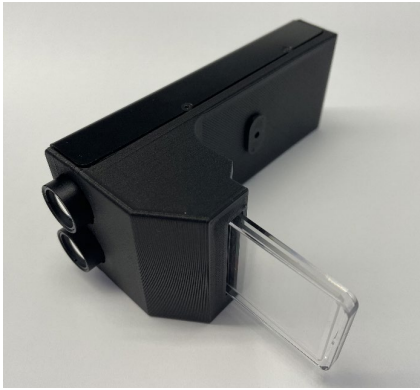


図1 装置外観

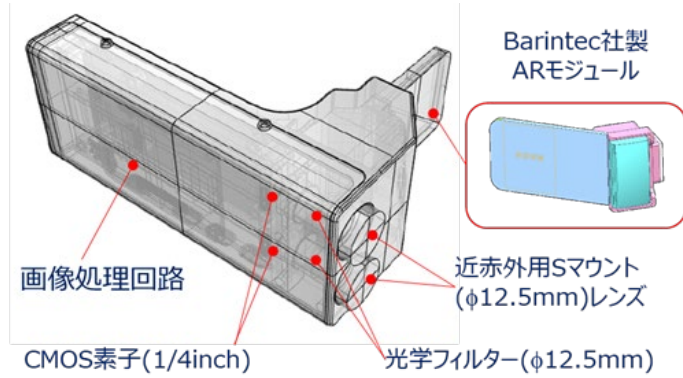


図2 ウェアラブルデバイスの光学構成

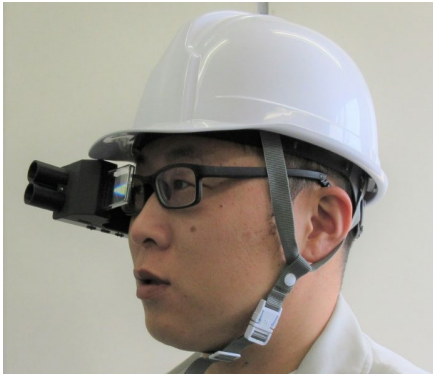


図3 ヘルメットマウント時の装置外観



図4 水素火炎の可視化画面

研究担当者	荻田将一 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部) 田中武海 (九州計測器株式会社 新事業推進室)
キーワード	水素火炎, 水素火災, 可視化, 遠隔計測, IR, 保安, DX, AR, ウェアラブル
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

小学校における環境モニタリングシステムの導入による 換気行動変容に関する研究

目 的

新型コロナウイルスの流行下において、密閉・密集・密接の「3密」に代表される基本的な感染対策が重要視されてきた。これに加え、ワクチンの接種率の向上や罹患による免疫の取得などで集団免疫を獲得し、以前のような大流行を回避し現在は小康状態を保っている状況である。2023年5月には、感染症法上の新型コロナウイルスの扱いが2類から季節性インフルエンザと同等の5類へと移行した。しかし、感染拡大防止の観点からは手洗いや換気などの励行は必要とされている。昨冬、オミクロン株による学校施設でのクラスターが全国的に発生していたこともあり、学校などの人員密度の高い教室においては適正な換気量を確保し「密閉」を防ぐことが引き続き重要とされている。

地方自治体の小学校においては、近年校舎の建て替えが進んでいるが未だに換気設備が無く窓開け換気のみ教室も多数存在する。このような教室において、モニタリングシステム (Energy Minder) のLED表示を実施することで、児童の換気行動変容を促し、過度・過小な換気を防ぎ良好な空気環境を保つことに有用であることを示す。また、近年建て替えが実施された校舎においても、機械換気設備に加え、窓開けによる換気も併用している学校が多いため、同様のモニタリングを行い、LED表示による行動変容の効果を確認する。

主な成果

1. LED表示による児童の行動変容

窓開け換気のみ教室においてLED表示を実施することで、児童の換気行動変容を促し、良好な空気環境を保つことに有用であることが計測データを統計学処理した結果において示された (図1, 2)。また、機械換気設備を有する教室においてもアンケート結果より同様の有用性を確認した。

2. 機械換気設備の実状把握とメンテナンスの効果検証

全熱交換型を含む換気設備の実情把握を行い、適正なメンテナンスが行われていない場合には、換気設備のみで必要な風量を確保できないことが示唆された。このため、フィルター清掃等を試行することで、風量回復が可能であることを確認した (図3, 4)。

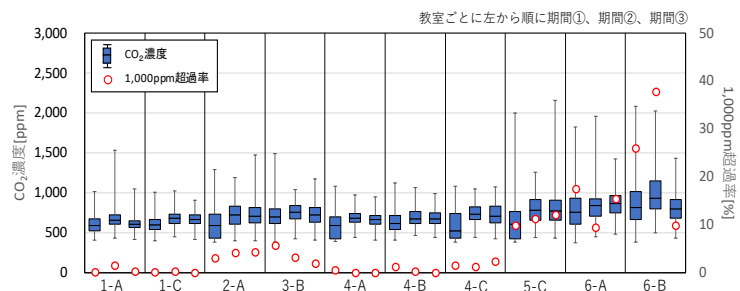


図1 CO₂濃度が有意な上昇傾向を示した教室（過度な換気を防止）

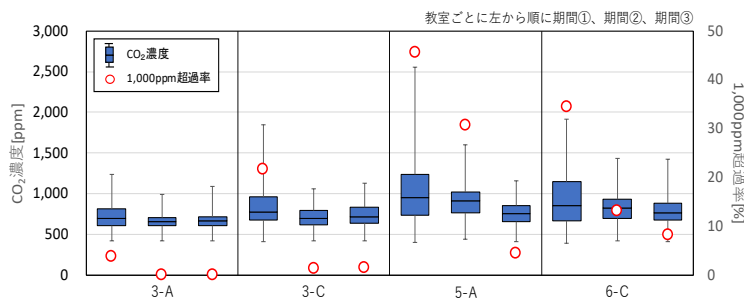


図2 CO₂濃度が有意な低下傾向を示した教室（過小な換気を防止）

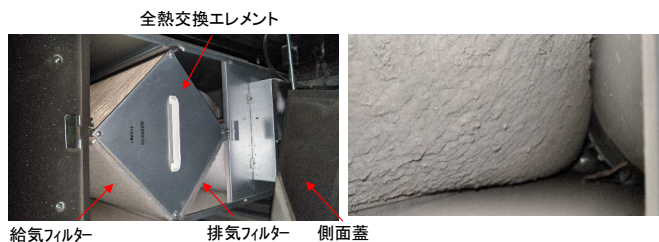


図3 清掃前の全熱交換器フィルター等の状況

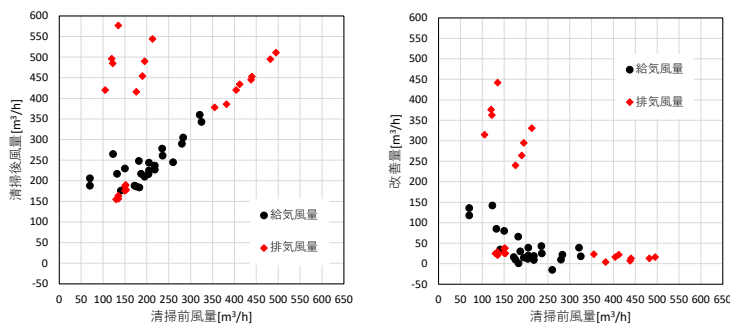


図4 清掃前後の変化量（左図：風量 右図：改善量）

研究担当者	天野雄一朗，松田健太郎（四国電力株式会社 土木建築部） 藤井良平（株式会社四国総合研究所 土木技術部） 堀岡建吾，井上貴之（株式会社四電技術コンサルタント 建築部）
キーワード	モニタリング，二酸化炭素濃度，行動変容，換気，メンテナンス
問い合わせ先	四国電力株式会社 土木建築部 建築技術グループ 天野 TEL 087-821-5061（代表） E-mail amano15500@yonden.co.jp https://www.yonden.co.jp/

[無断転載を禁ず]

**建築設備を活用した電力需給調整に関する研究
～貯湯槽を有する給湯システムの利用可能性評価～**

目 的

東日本大震災に伴う電力需給のひっ迫を契機として、再生可能エネルギーの普及拡大が推進された。代表的な再生可能エネルギーである太陽光・風力は出力が天候に左右され、供給量が制御しづらいという性質を有しており、導入量が増えるにつれて電力需給における課題として顕在化するようになった。このような背景から、従来所与のものとして考えられていた電力需要を供給事情に合わせて調整するデマンドレスポンス（以下、DR）の概念が登場した。DR の代表的な手法としては蓄電池設備・自家発電設備の稼働を調整することが挙げられるが、本研究では空調設備・給湯設備といった建築設備を DR に用いる可能性に着目している。

本報では、実際の建物を題材として、貯湯槽を有する給湯システム（図 1）の DR リソースとしての利用可能性評価や、DR を可能とする運用方法について検討した結果について報告する。

主な成果

1. 給湯システムにおける給湯負荷や損失熱量の実態調査

DR への利用可能性を評価するには、電力消費量の発生パターンを変化させられることに加え、給湯負荷（湯の使用量）に対して湯切れを生じさせないこと、循環配管等から生じる損失熱量に対して貯湯槽の温度を維持することが制約条件となるため、実測調査により給湯負荷や損失熱量の定量化を図った（図 2）。

2. 貯湯槽を有する給湯システムの利用可能性評価

貯湯槽を有する給湯システムを DR に用いる可能性を評価するため、冬期、夏期の下げ DR を想定したシミュレーション検討を実施した。ヒートポンプ給湯機の稼働条件を調整することで制約条件を満たしつつ、DR に利用できる可能性を示した（図 3）。

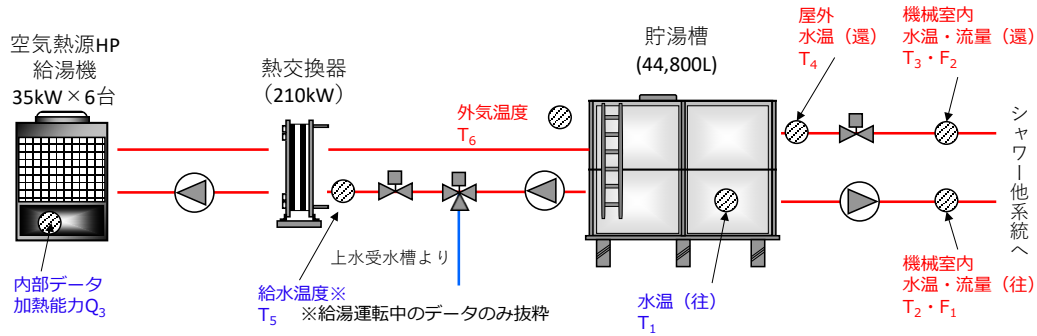
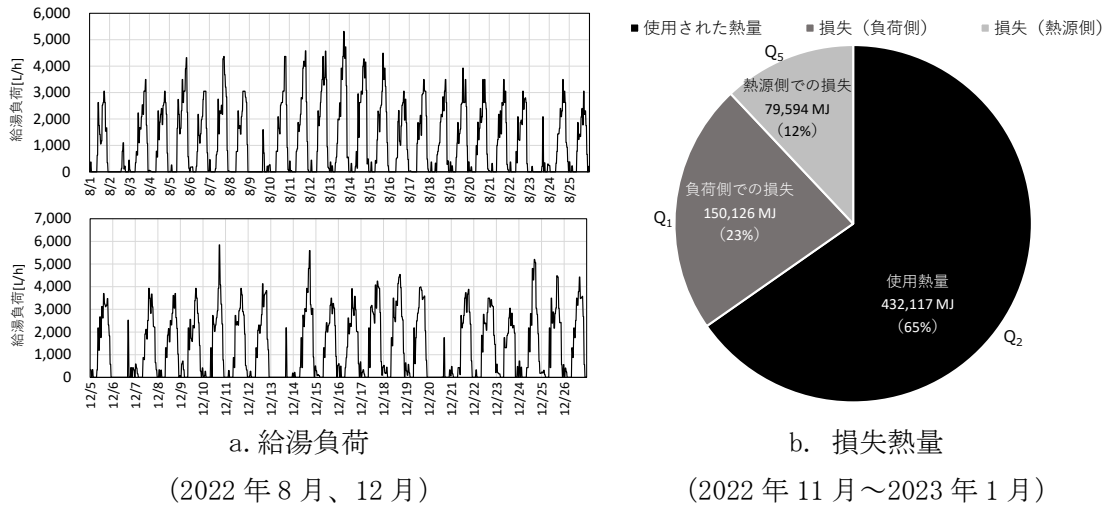
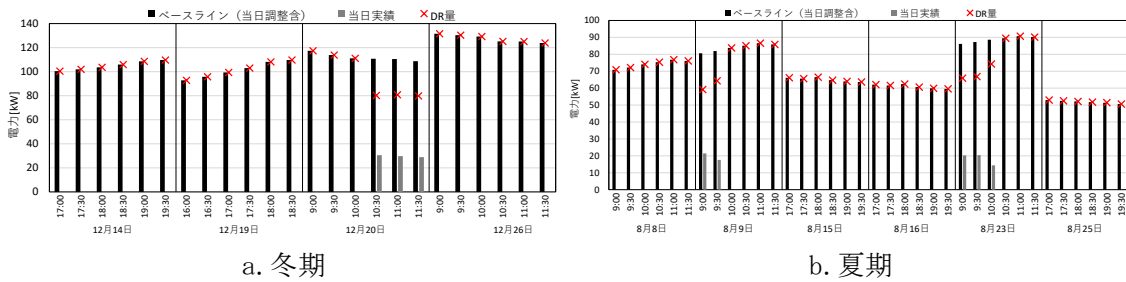


図1 貯湯槽を有する給湯設備



a. 給湯負荷 (2022年8月、12月) b. 損失熱量 (2022年11月～2023年1月)

図2 実測結果



a. 冬期 b. 夏期

図3 DR量の評価結果

研究担当者	藤井良平 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 天野雄一郎 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	デマンドレスポンス, 建築設備, 給湯設備、貯湯槽
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

数値流体解析による流れ場の再現(第1報)

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 小川口深雪
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 杉本 健二

キーワード : 流れ加速型腐食
数値流体力学
バックステップ
再付着
RANS
SST k- ω

Key Words : FAC
CFD
backward-facing step
reattachment
RANS
SST k- ω

Reproduction of flow field by computational fluid dynamics (the first report)

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Miyuki Ogawaguchi, Kenji Sugimoto

Abstract

The pipe wall thinning phenomenon due to flow-accelerated corrosion (FAC) sometimes occurs in carbon steel piping in power plants. In accordance with the pipe wall thinning management rules established by the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), the wall thinning is conservatively controlled by measuring wall thickness using ultrasonic waves. However, for locations where wall thickness measurement is difficult, such as under reinforcement plates, it is desirable to predict the distribution of wall thinning. In this paper, we report on a case study of backward-facing step flow simulation using computational fluid dynamics (CFD), which was conducted prior to the prediction of wall thinning by FAC.

The CFD simulation reproduced qualitative flow fields such as the recirculation region that occurs between the separation and reattachment points and the velocity recovery downstream. The reattachment length, mean velocity distribution, and turbulent kinetic energy distribution were compared with experimental data. The reattachment length in the analysis was within the range of the experimental values. The mean velocity and turbulent kinetic energy distributions were found to be in good agreement with the experimental data, both quantitatively and qualitatively.

1. はじめに

原子力や火力の発電プラントの給水・復水系統などの炭素鋼配管では、流れ加速型腐食（FAC：Flow-Accelerated Corrosion）などによる配管減肉が生じることがあり、仮に配管破損に至った場合には高エネルギー流体が噴出し、人や設備に対して大きな影響を与える可能性があるため、適切な管理が求められている。現在では、日本機械学会の規格^{1),2)}に従って、超音波による肉厚測定により保守的な管理がなされているが、補強板下などの肉厚測定が難しい箇所に対しては、減肉分布予測が望まれている。

FACのメカニズムについては一部未解明の点が残されているものの、配管内面における鉄イオンの溶出が、流れ場の局所的な乱れにより加速される一種の腐食現象と考えられている。FACの発生・進展傾向は、環境（温度、溶存酸素濃度、pH等の水質）、配管材料（クロム等の含有量）、流れ場（流速、配管形状）により大きな影響を受けることが知られている³⁾。FACの発生しやすい配管形状としては、流路断面積が変化するオリフィスや流れ方向が曲げられるエルボ等があり、実際にFACが発生している部位の例として、PWRでは主給水ポンプ吸込配管、ヒータードレン・給水加熱器抽気配管が挙げられる¹⁾。

本稿では、FACによる減肉予測に先立って実施した、バックステップ流れを対象とした数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）解析による再現事例を報告する。

2. 流れ場の再現解析

2.1 バックステップ流れ

バックステップ流れは、図1のようにステップ（段差）で流路が急拡大する流れであり、最も基本的な流れ場のひとつとして、これまでに多くの実験的および解析的研究が行われている。上流からの流れは、ステップ直後で壁面から離れ（剥離）、下流側で再度壁面に沿って流れる（再付着）。さらに下流側においては、徐々に発達した流れ場に回復していく。剥離点と再付着点の間では再循環領域が存在し、壁面付近において主流とは逆方向の流れが発生する。また、ステップで剥離した流れは剥離せん断層と呼ばれ、図1のようなせん断層が存在することが知られている⁴⁾。

流路の形状は2次元で単純な構造となるが、流れの剥離、再循環、再付着や速度回復など複雑な乱流現象を伴う流れ場として知られている。

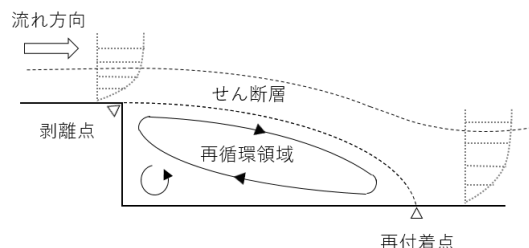


図1 バックステップ流れのパターン⁴⁾

2.2 実験体系

バックステップ流れの再現解析として、伊藤らの実験⁵⁾を対象とした。伊藤らは、表2に示すようなバックステップ（ステップ高さ40mm、流路拡大率1.5）を持つ流れ場に対し、三次元画像処理流速計を用いてステップ後方の剥離再付着流の乱流測定を行った。作動流体である水に投入されたトレーサ粒子を3台のCCDカメラによって撮影、三次元画像処理することで、流速および乱流運動エネルギーなどを算出している。測定領域は、流れ方向をステップ位置上流8mmからステップ位置下流480mmとし、奥行き方向を40mmとしている。

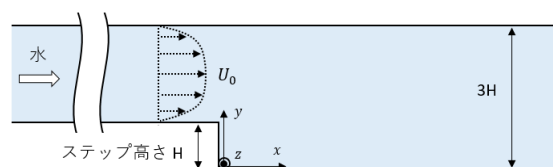


図2 実験の模式図⁵⁾

表1 実験条件⁵⁾

流路拡大率	1.5
ステップ高さ	H = 40mm
ステップのレイノルズ数	$(U_0 H) / \nu = 5400$
測定領域	$-0.2 < x/H < 12.0$
	$0.0 < y/H < 3.0$
	$-0.5 < z/H < 0.5$

3. 解析方法

3.1 基礎方程式と乱流モデル

数値流体力学の基礎方程式は、流体の運動方程

式である Navier-Stokes 方程式と質量保存則である連続の式がある。しかし、非線型偏微分方程式である Navier-Stokes 方程式をコンピュータで解くには、膨大な計算時間およびメモリが必要となる。そのため、時間的および空間的に平均化を行うことで計算コストを削減している。

平均化手法のひとつとして、流速を時間平均成分と変動成分に分解(レイノルズ分解)して平均化操作を施した乱流モデルをレイノルズ平均モデル(RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes)と呼ぶ。レイノルズ平均化した基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と連続の式を以下に示す⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ : 流体の密度、 u_i : 平均速度成分、 u_i' : 変動速度成分、 p : 平均化された圧力、 μ : 粘性係数とする。

レイノルズ平均化することで、乱流の影響を表す付加的な項が(1)式右辺の第3項に現れる。(1)式を閉じるため、このレイノルズ応力($\rho \overline{u_i' u_j'}$)をモデル化する必要があり、工学的には $k-\varepsilon$ モデルに代表される乱流モデルが使用される。ここでは、SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルの基礎方程式として、乱流運動エネルギー k と比散逸率 ω の輸送方程式(3)(4)を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 G_k , G_ω : 平均速度勾配による乱流運動エネルギー k および比散逸率 ω の発生、 Γ_k , Γ_ω : k および ω の有効拡散係数、 Y_k , Y_ω : 乱流による k および ω の散逸、 D_ω : クロス拡散項、 S_k , S_ω : 補正項とする。

本稿では、事前に複数の乱流モデルを試し、再付着点位置の再現性が最も高かった SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルを選定する。SST $k-\varepsilon$ 乱流モデルは、壁面近傍の乱流挙動をモデル化し易く、剥離を伴う流れ場の再現性に定評がある。

3.2 解析モデル

解析モデルを図3に、解析条件を表2に示す。作動流体は水であり、実験でのレイノルズ数(Re=5400)を再現する流速を流入境界に設定した。ここで、上流部の助走区間を長め(150H)に設定し、ステップ上流の速度分布の再現精度を高めた。実験における測定領域をモデル化するため、高さ方向(y方向)やステップの壁面にはNo Slip条件を与えた。ここで、再付着点位置を評価するにあたり、壁面近傍の再現精度を確保するために5層の境界層を設定した。さらに、奥行き方向(z方向)の境界面には鏡面境界としてSlip条件を、流出境界には基準圧力0Paを与えた。

解析には汎用数値流体解析ソフトウェアANSYS Fluent 2022 R2 (Ver. 22.2)を使用した。

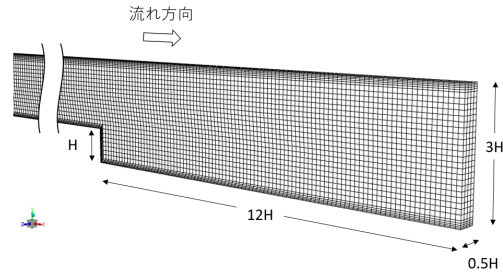


図3 解析モデル

表2 解析条件

乱流モデル	SST $k-\varepsilon$
流体密度	998.2 kg/m ³
流体粘性係数	1.003×10 ⁻³ Pa·s
境界条件	流入境界 : 0.136 m/s 流出境界 : 0 Pa 壁面境界 : No Slip 条件 鏡面境界 : Slip 条件
計算領域	-150 < x/H < 12.0 0.0 < y/H < 3.0 0.0 < z/H < 0.5
メッシュ数	127,648 cells

4. 解析結果

4.1 流れのパターンおよび再付着点

バックステップ流れのパターンを見るため、流跡線を確認した(図4)。赤色部分は流速が速く、青色部分は流速が遅いことを示す。ステップ直後の剥離点から再付着点の間に、流速が遅い再循環領域が発生していることが確認できる。また、下流に向かうにつれて速度分布の回復傾向がみられる。以上のことは、一般的に知られている挙動と一致しており、定性的な流れを再現できていると考えられる。

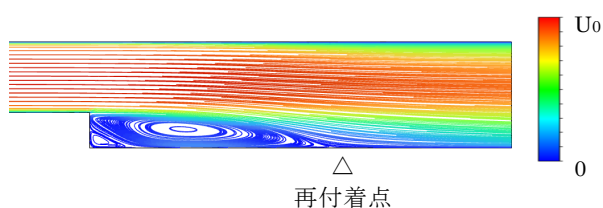


図4 流跡線

次に、再付着点の位置の比較を行う。再付着点付近では流れの方向が変化するため、壁面せん断応力が小さくなる(図5)。そのため、解析における再付着点は、壁面せん断応力によって評価した。

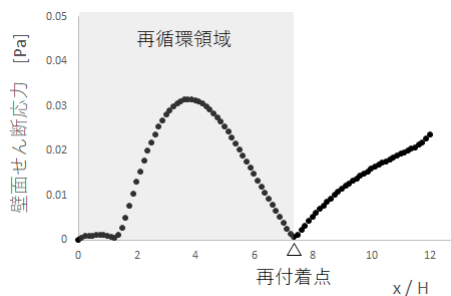


図5 壁面せん断応力と再付着点の関係

再付着点位置の実験値と解析値の比較を表3に示す。図5から求めた解析値は、実験値の範囲内となっており、良好に再付着点位置を再現できたと考えられる。参考までに、伊藤らの実験のレイノルズ数に該当するAdamsら⁴⁾によって整理された実験データを表3に付記する。今回の解析値はこれら類似実験の結果とも整合する。

表3 再付着点の位置の比較

実験値 ⁵⁾	6.5H~7.5H
解析値	7.4H
(参考)Adamsらの整理 ⁴⁾	6H~8H

4.2 流速分布

流れ方向(x方向)平均速度分布および乱流運動エネルギー分布に対して実験値と解析値の比較を行う。図6は、代表断面における流れ方向の平均速度分布に対する、実験値と解析値の比較を示している。x/H=1.44断面における逆流方向のピーク位置など一部異なるものの、解析値と実験値は、定性的にも定量的にもおおむね一致していることがわかる。

今回、ステップ上流部の流速分布を実験値と一致させるために助走領域を長めに設定した。これにより、ステップ下流側の流れ場の再現精度が向上したと考える。

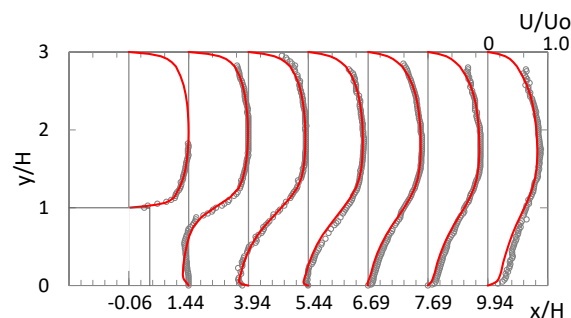


図6 流れ方向平均速度分布の実験値⁵⁾と解析値の比較(○:実験値, -:解析値)

4.3 乱流エネルギー分布

FAC減肉評価において重要なパラメータのひとつと考えられている乱流運動エネルギー分布を確認する。代表断面における乱流運動エネルギー分布に対する、実験値と解析値の比較を図7に示す。乱流運動エネルギーはせん断層境界に沿って大きな値を示しており、定性的な挙動は実験値とよく一致している。

乱流運動エネルギーの最大値が、x/H=1.44断面において過小評価、x/H=5.44断面において過大評価となるのを除けば、おおむね定量的にも一致していると考えられる。なお、x/H=1.44断面における過小評価は、その上流部であるx/H=-0.06断面の壁面近傍における乱流運動エネルギーが、実験より小さくなっているためと考え

られる。今後、壁面近傍の乱流運動エネルギーの再現に課題が残る。

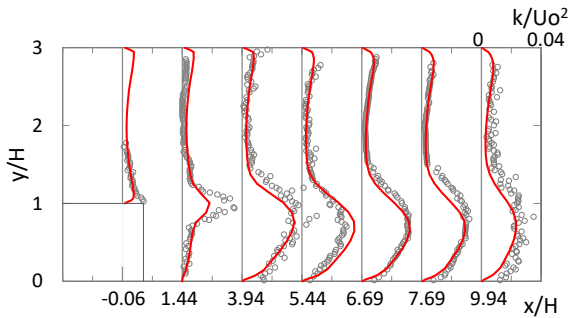


図7 乱流運動エネルギー分布の実験⁵⁾と解析の比較 (○：実験値，－：解析値)

- 4) A. W. Adams and J. P. Johnston: “Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Part 2: Reattachment length and wall shear stress”, *Exp. Fluids* 6, pp.493-499, 1988
- 5) 伊藤信明, 笠木伸英: 「三次元画像処理流速計によるステップ後方剥離再付着乱流の計測」, *流れの可視化*, Vol.9, No.34, pp.245-248, 1989
- 6) Ansys Inc.: “Ansys Fluent Theory Guide 2022R2”, 2022

5. まとめ

バックステップ流れ実験を対象に、流れの再現解析を行った。再循環領域および速度回復など、定性的な流れ場を再現できた。

実験値との比較を行った結果、再付着点の位置は良好に再現できており、また、流れ方向平均速度分布および乱流運動エネルギー分布は、一部を除き定量的、定性的に実験とおおむね一致していることが確認された。

今後は、他の流れ場の再現解析を試みるとともに、実験や実機の減肉データと流体力学パラメータの関連性調査等を予定している。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 日本機械学会: 「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2016年版)」, JSME S CA1-2016
- 2) 日本機械学会: 「発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格 (2016年版)」, JSME S NG1-2016
- 3) 歌野原陽一, 村瀬道雄, 中村晶: 「炭素鋼配管での流れ加速型腐食に関する研究」, 日本機械学会 流体工学部門ホームページ, 2016 https://www.jsme-fed.org/papertech/2016_01/001.html

保温材の上から配管減肉を点検可能な技術および現場適用例

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 鬼勢 章

キーワード： 保温材下腐食
非破壊試験
配管肉厚測定

Key Words : CUI
NDI
Pipe Wall Thickness
Measurement

Technology of inspection of piping over thermal insulation and examples of field applications

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department

Akira Kisei

Abstract

In order to prevent problems, inspections of thermal insulation piping are generally conducted by dismantling the insulation and visually inspecting the exterior surface or measuring the remaining wall thickness at representative locations with an ultrasonic thickness gauge.

However, in order to inspect a lot of piping in a thermal power plant, dismantling and restoring the insulation requires a great deal of work, time, and cost.

On the other hand, companies that handle nondestructive inspection services have developed technology that enables inspection of piping over thermal insulation, but there are few examples of its application at the thermal power plant of Shikoku Electric Power Co, Inc.

This paper reports on an experimental inspection of piping at a thermal power plant using the technology that enables inspection over thermal insulation, and on the evaluation of the practicality and inspection accuracy of the technology.

1. はじめに

火力発電所の屋外保温配管について、保温材下の配管外面の腐食によるトラブル発生が課題となっており、トラブル防止のために実施する保温配管の点検は一般的に、保温材を解体して外観目視点検や超音波厚さ計で代表部位の残肉厚を測定する。

しかしながら、火力発電所の広範囲に及ぶ配管をもれなく点検するためには、保温材の解体・復旧作業に多大な労力、時間およびコストがかかる。

一方で、非破壊検査業務を取扱う企業等が、保温材の上から配管点検可能な技術を開発しているが、四国電力の火力発電所で本技術が適用されている事例はほとんどない。

そこで、保温材の上から点検可能な技術を用いて火力発電所の配管を試験的に点検し、実用性および点検精度の評価をしたうえで、従来の配管点検方法から新たな方法へ転換した事例について報告する。

2. 技術調査

2.1 点検技術の調査

保温材の上から配管点検可能な技術について、非破壊検査業務を取扱う企業へヒアリングを実施した結果、放射線を用いた画像撮影による点検や超音波（ガイド波）を用いて点検する方法などが確認された。

調査対象技術のうち、口径 250A 以下の配管へ適用される技術の概要について以下に説明する。

(1) 携帯式保温配管 RT 装置(CUI-Vision)

配管表面に発生した錆こぶの有無を確認できる技術であり、放射線（低エネルギーエックス線）を用いて撮影する。CUI-Vision の装置外観を図 1 に示す。重量が約 7kg で電源不要（バッテリー式）なため取扱いが容易なことが特徴であるが、配管肉厚の測定はできず、配管外面の凹凸を撮影画像から読み取ることにより腐食の有無を判定する。

CUI-Vision で簡易点検した結果をもとに詳細点検対象配管を選定するという用途が想定される。

(2) 工業用ワイヤレスフラットパネル(DREAMS)

配管の残肉厚を測定できる技術であり、放射線（エックス線またはガンマ線）を用いて撮影する。

DREAMS のシステム構成概略図を図 2 に示す。前述の CUI-Vision よりも鮮明な画像を撮影できる。

フィルムや CR(コンピューテッドラジオグラフィ)による撮影とは異なり、フィルムの現像やイメージングプレートをスキャン装置で読取る必要がないため、撮影現場に設置した PC 画面ですぐに画像を確認でき、撮影の失敗もその場で分かり迅速に再撮影できるため作業の手戻りが少ない。

放射線にエックス線を使用する場合は、エックス線照射装置に電源が必要なうえ、同装置に一定の大きさおよび重量があるため、配管周辺に電源を確保できない、または配管周辺のスペースが狭い場合は点検が困難となる。

一方、放射線にガンマ線を使用する場合は、エックス線の場合の上記制約は発生しないが、ガンマ線源使用に関する官庁への届出が事前に必要のため、突発的な点検には対応できない。

なお、配管周辺のスペースが狭くてフラットパネル（図 3）が設置できない場合は、エックス線およびガンマ線どちらの場合でも点検できないため、点検対象配管の撮影の可否について、点検業者と現場確認のうえ事前に検討することが望ましい。

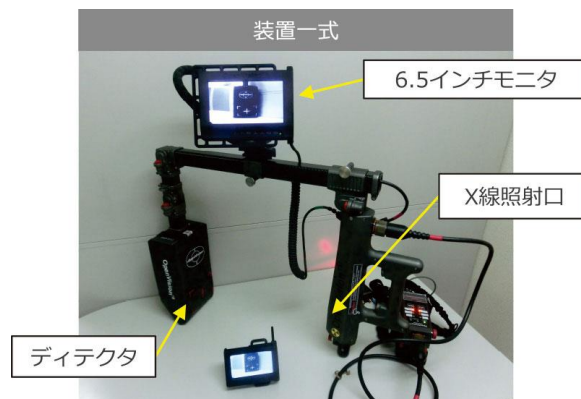


図 1 CUI-Vision 装置外観¹⁾



図 2 DREAMS システム構成概略図²⁾

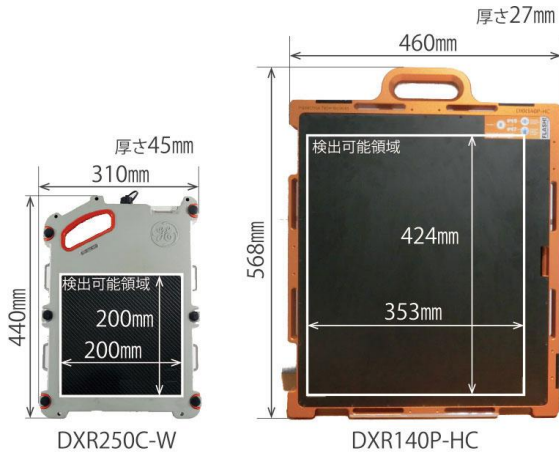


図3 フラットパネル（放射線読取装置）外観²⁾

2.2 点検技術の検証

(1) 携帯式保温配管 RT 装置(CUI-Vision)

図4のようにCUI-Visionで火力発電所の配管を実際に撮影した。

撮影画像例を図5に示す。配管は黒色、保温材は白色で表示される。

撮影画像以外にも保温外装板の損傷状況等を加味して、総合的に外面腐食の可能性を判定する。



図4 CUI-Visionによる撮影作業状況



図5 CUI-Visionによる撮影画像例

(2) 工業用ワイヤレスフラットパネル(DREAMS)

DREAMSについては、図6のように火力発電所で試験的な点検を実施したのち、残肉厚測定精度の検証を併せて実施した。なお、放射線源は配管周辺のスペースを考慮して、ガンマ線源を用いた。

図7に点検対象配管の撮影画像および画像解析による残肉厚測定値を示す。撮影範囲内の最小残肉厚は、大気開放のブロー配管において0.45mmとなっていた。

この配管は取替することになったため、保温材を解体し配管の外面を確認すると、図8のとおり腐食がかなり進行していた。また、図9のように配管を切断して配管断面を観察したところ、DREAMSの残肉厚測定値との相違はほとんどなく、測定精度の高さを検証することができた。



図6 DREAMSによる撮影作業状況

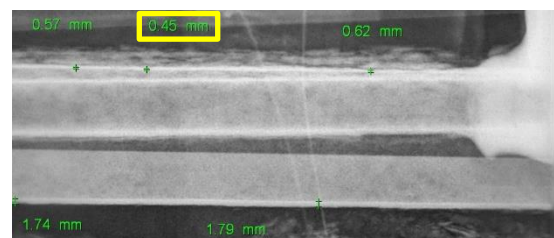


図7 DREAMSによる撮影画像および残肉厚測定値



図8 配管外面腐食状況



図9 配管断面状況

2.3 調査結果まとめ

DREAMS の残肉厚測定値と点検対象配管の外表面腐食状況や配管断面状況とを比較した結果、DREAMS の点検精度の高さが確認できた。

この検証結果を踏まえ、DREAMS の技術を本格的に現場適用することとした。

3 現場適用

3.1 点検対象

点検対象配管は燃料タンク廻りの燃料小口径配管（15～50A）であり、点検箇所数は合計 131 か所である。

点検着手前に撮影機器を配管周辺に設置できるかどうか現場確認をして点検の可否を判断し、点検対象配管を最終的に確定した。

3.2 点検方法

DREAMS での配管点検においては、DREAMS で撮影する前に CUI-Vision で外表面腐食が懸念される配管を洗い出してから、当該配管のみを DREAMS で残肉厚測定するという 2 ステップを想定していた。

しかし、2.2 項の検証結果により、従来の超音波厚さ計と同程度の測定精度を確保できることが確認されたため、今回は CUI-Vision を使用せずに、全配管を DREAMS で残肉厚測定することで、外表面腐食の有無を定量的に評価することとした。

放射線源は試験時と同じくガンマ線源を用いて、周辺スペースが狭い配管の撮影に配慮した。

放射線を配管へ照射して撮影をするため、図 10 のように点検中は放射線管理区域の設定や明示および周辺監視を実施し、他工事の作業員や発電所員が管理区域へ立入らないよう厳重に管理した。

フラットパネルから画像解析用 PC へのデータ

送受信はワイヤレス (Wi-Fi) で行うため、図 11 のように撮影場所と PC 設置場所とは十分距離をとることが可能であり、作業員の安全を確保したうえで撮影作業を進めた。

フラットパネルおよびガンマ線照射装置先端金具の設置作業については、図 12 のように撮影位置に応じて適切な固定工具を用いるとともに、作業が困難と思われるような狭隘な場所での配管点検についても、図 13 のようなきめ細かい対応により、点検不可能な配管が極力発生しないよう配慮した。



図10 点検中の放射線管理区域明示状況

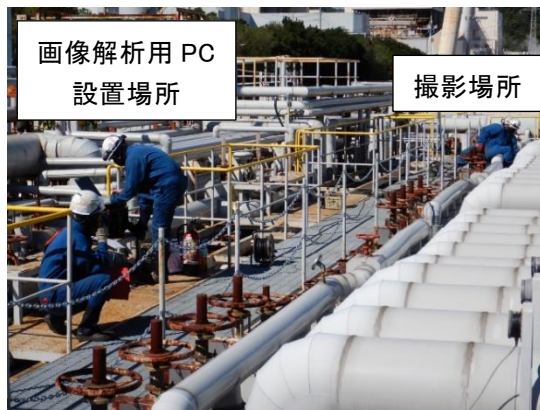


図11 撮影作業実施状況



図12 フラットパネル設置作業実施状況



図 13 狭隘な場所の撮影装置設置作業実施状況

3.3 点検結果

DREAMS の技術を実格的に現場適用した結果、試験時には分からなかった DREAMS のメリットが以下の通り確認できた。

- ・保温材の解体、復旧作業が必要ないことにより、点検開始から点検結果受領までにかかる時間を従来の方法よりも短縮でき、配管取替により早く着手できた。点検コストも同様に低減できた。
- ・一般的に配管点検では「異常なし」と判定される配管がほとんどであるが（今回の点検においても「異常なし」の配管は全体の約 88%）、従来の方法では「異常なし」の配管に対しても保温材を解体する必要があるため、費用面および産廃処理等の環境負荷の観点で無駄が多かった。DREAMS の現場適用により、これらの無駄をなくすことができた。
- ・超音波厚さ計は、探触子を当てた部位しか残肉厚を測定できないが、DREAMS では撮影範囲内の残肉厚を網羅的に測定・観察できた。
- ・古い設備で設計図面が存在しないなど、配管仕様が確認できない場合でも、撮影画像内に配管健全全部が存在すれば配管口径や肉厚を特定できた。（配管材質は同種系統他部位の仕様から推定）

4. まとめ

保温材の上から配管点検する方法のうち、放射線を用いて配管を画像撮影し残肉厚を測定できる技術である DREAMS について、火力発電所の配管を用いて試験的に点検し、精度の高い残肉厚測定結果が得られることを確認した。

この検証結果を受け、DREAMS を本格的に現場適用したところ、試験時には確認できなかった多く

のメリットがあることが分かったため、次回の配管点検においても DREAMS の技術を活用することとなった。

【謝辞】

本業務は、四国電力(株)火力部および火力発電所より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) (株)ウィズソル HP
(<https://www.withsol.co.jp/business/service/menu18.html>)
- 2) (株)ウィズソル HP
(<https://www.withsol.co.jp/business/service/menu20.html>)

受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発

株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部 荻田 将一
九州計測器(株)新事業推進室 田中 武海

キーワード： 水素火炎
可視化
遠隔計測
保安
AR

Key Words : Hydrogen flame
Visualization
Remote sensing
Security
AR

Development of wearable device for visualization of hydrogen flame by passive infrared spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department

Masakazu Ogita

Kyushu Keisokki Co.,Ltd., New business project team

Takemi Tanaka

Abstract

Flames caused by hydrogen gas ignition are invisible. At sites where hydrogen gas is used, UV sensors are used to monitor the hydrogen flame, however it has been pointed out that the location of the hydrogen flame cannot be identified, or false positives is happening. From a safety standpoint, it is appropriate for the operator to be able to check the location of the hydrogen flame hands-free. Therefore, the authors developed a wearable device to visualize the hydrogen flame in a hands-free manner. This paper reports the details of the development.

1. 序論

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が示されたことから、既存の化石燃料から、CN-LNG、CN-LPG、アンモニアや水素等、脱炭素燃料を用いる取り組みが加速している。水素エネルギーを取り巻く環境は社会実装フェーズへと加速しており、FCVの普及促進や水素ステーションの実運用を中心に様々な施策が進められている。FCVは2020年度に4万台、2025年度に20万台程度の普及を、水素ステーションについては2020年度に160箇所、2025年度に320箇所程度の普及配備が目標として挙げられている¹⁾。これに伴い、図1に示す通り、水素ステーション・スタンドの設置数の急増と共に、水素由来の事故件数も増加している。

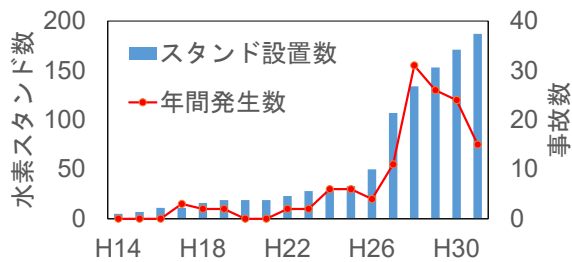


図1 水素スタンド設置数と事故件数の推移

現在までに水素エネルギー関連施設で発生した火災事案は少数であるものの^{2,3)}、事故件数の増加を見据え、対策を講じておくことが急務であると考えられる。

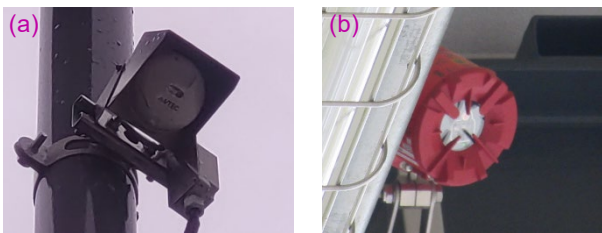


図2 現行の火炎検知装置の一例

(a) アンテナック製, (b) 新コスモス電機製

水素の安全利用に関しては高圧ガス保安法を軸として諸法令に定められている。重大事故の一つとして想定される漏えい水素への着火事故に関しては、水素火炎が目視できないことから、「水素火炎が発する紫外線を検知する方法により、常時、

水素火炎の発生を監視する」と規定され、現行はこれに準じた図2に示すような火炎検知装置((a)アンテナック製, (b)新コスモス電機製)の設置が義務付けられている^{4,5)}。

しかし、現行の火炎検知装置は火炎の有無を判定して警報発報することを基本としており、水素火炎の領域を認識できないという課題がある。このため、水素火炎の位置の特定は巡視する作業員に依存している。このような原理的な課題が指摘されているものの、火炎検知装置以外の保全設備の拡充は十分に行われていないというのが実状である。

また、消火活動の現場を想定すると、単純に水素火炎を確認するだけでなく、可搬性があり、消火活動を行いながらハンズフリーで水素火炎の位置や規模を確認できる装置が望ましい。

これらの背景に鑑み、著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置^{6,7)}と、スマートデバイスを融合させた、肉眼で視認できない水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの研究開発を行った。本稿では本装置の検出原理や装置の詳細について報告する。

2. 水素火炎の光学的特性

図3は昼間屋外と屋内（背景光がある場合とない場合）における燃焼中の水素火炎の視認性を比較した事例である。

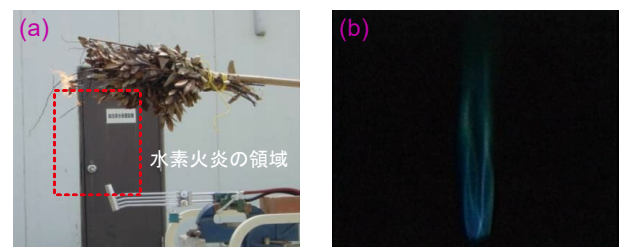


図3 水素火炎の視認性
(a) 昼間屋外, (b) 屋内暗室

図3(a)に示す通り昼間屋外の写真では、バーナから水素火炎が生じ、上部にかざされている箒に延焼しているが、水素火炎そのものは全く確認できない。図3(b)に示す通り、周囲に外乱光のない屋内暗室環境下では、僅かに青紫色の可視光の発光が確認できる。これは撮影に用いた CCD 検出器の分光感度特性が人間の可視領域より広いため、

確認できるものであり、実環境での視認は非常に困難である。

水素由来の火災現場では水素以外の可燃物が燃焼することにより炭化水素の火炎が発生するため、火災の規模をある程度想定することは可能であると考えられるが、火災の初期やパイプライン等水素以外の可燃物の少ない状況で水素火炎を早期発見することはやはり困難である。これは、消火活動の現場を想定すると、鎮火確認等で水素火炎の残火の有無を視認することが困難であることを示している。

一般に、燃焼は可燃物による光や熱の放出を伴う酸化反応であり、水素の場合も同様である。

図4に紫外から近赤外領域における水素火炎の発光スペクトル、及び地表における太陽光スペクトルを示す。

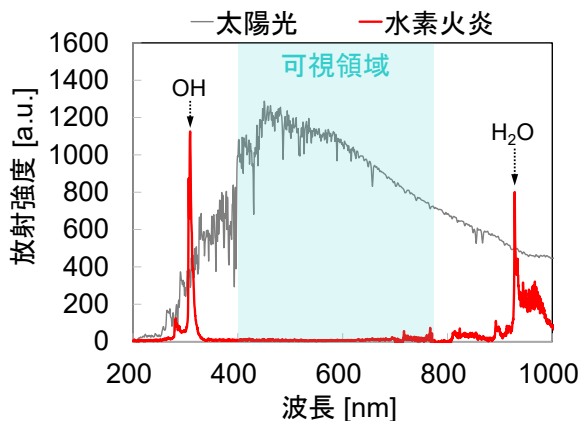


図4 紫外から近赤外領域における水素火炎の発光スペクトル、及び太陽光スペクトル

図4に示す通り、水素火炎の場合、燃料に炭素を含まないことから、可視領域に生じる炭素を含むラジカルの発光は生じない。このため、水素火炎は人間には視認できない⁸⁾。一方、紫外領域や近赤外領域にOHラジカルやH₂Oの比較的急峻なピークをもつ発光が確認できる。

紫外域では278 nm～320 nmに発光があり、そのピーク波長は307 nm～309 nmである。これは水素火炎の比較的中心部に生じるOHラジカルの発光によるものである^{9,10)}。紫外線を検知する方式の火災検知装置はこの波長域の光を捉えることで火炎の発生を判定している。

近赤外領域は925 nm～1000 nmに発光があり、

そのピーク波長は925 nm～950 nmである。これはOHラジカルの層を覆うように生じる水素の燃焼過程において生じる高温のH₂Oの発光によるものである。更に長波長側の1.3 μm～1.4 μm付近にも発光があり、これを利用した検知手法も存在している。

高温の水蒸気が結露することにより生じる熱線は一般に赤外線と呼ばれる波長域の約8 μm～14 μm帯の電磁波であり、H₂Oによる発光よりも更に広範囲の領域から発生する。この波長域を用いて火炎や高温・熱領域を可視化する装置がサーモカメラである。図5に水素火炎の模式図を示す。

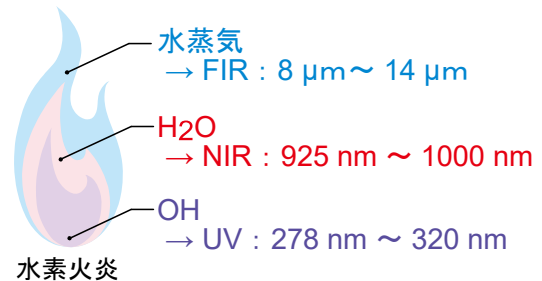


図5 水素火炎の模式図

これらの水素火炎の燃焼由来の自発光を選択的に捉えることで水素火炎の可視化が可能となる。

3. 計測手法

3.1 水素火炎の可視化手法

図4に示した通り、地表における太陽光スペクトルは広い波長域に存在しており¹¹⁾、水素火炎の発光スペクトルの領域と重なっているため、単一波長のみで水素火炎の発生を判定する手法では誤検知が生じる可能性が高くなる。

また、太陽光の他に、突発的に観測視野内に生じる可能性のある各種ランプ光源やアーク溶接等の発光が外乱光となり誤検知の要因となる。

前述の水素火炎の光学的特性と外乱光の影響を踏まえ、著者らは水素火炎の紫外領域や赤外領域の発光を特殊なカメラで選択的に捉え、画像処理を施すことにより可視化する技術を確立し、想定する状況に応じた複数の火炎可視化装置を開発している。著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置の内、現場に携帯して使用することを想定し開発した装置の外観、及び装置構成を図6に示す。

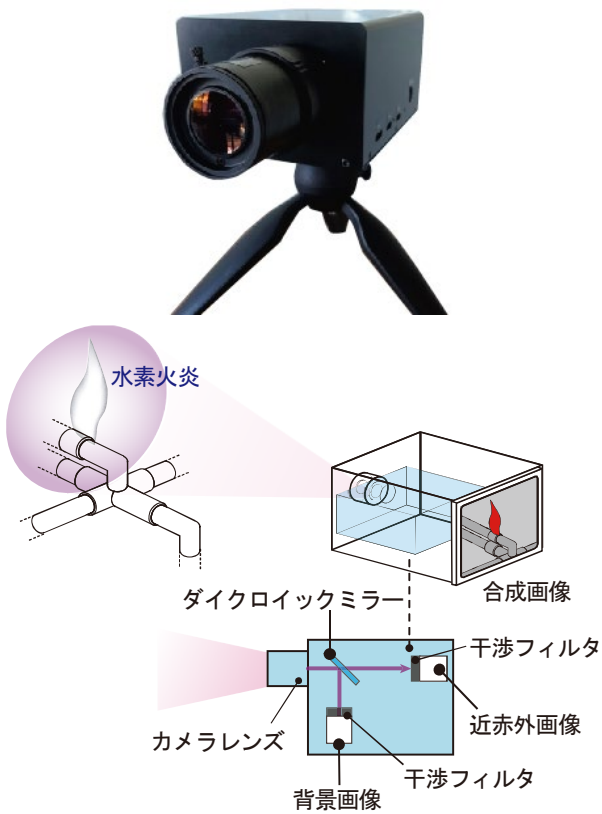


図6 火炎可視化装置の外観，及び装置構成

図6に示す装置は、水素火炎の近赤外領域の発光を捉える手法を適用しており、装置の小型化と低コスト化を目標に、画像処理と装置構成の簡素化を行ったものである。図7に火炎可視化装置の画像処理フローを示す。

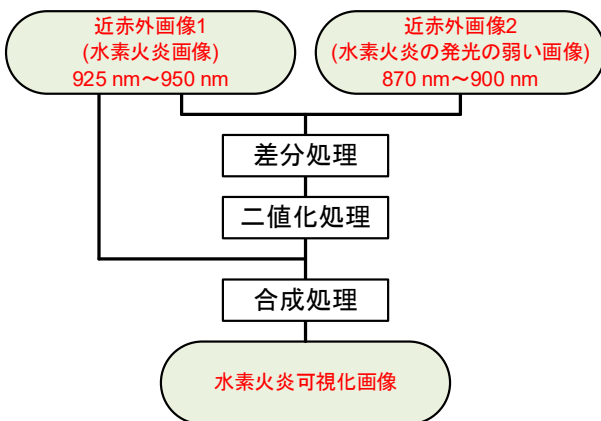


図7 火炎可視化装置の画像処理フロー

カメラレンズで捉えた光は特定の波長で光を分離させるダイクロミックミラーにより分配される。本装置では900 nmより長波長の光を透過し、短波

長の光を反射するダイクロミックミラーを配している。透過側は925 nm～950 nmの水素火炎の発光のピークを含む波長域の光(近赤外画像1)に、反射側はその近傍における背景画像となる870 nm～900 nmの水素火炎の発光の弱い波長域を含む光(近赤外画像2)となる。分配後の光は光学フィルタにより波長選択後、CMOS素子に導かれる。その後、画像を差分・二値化処理することで水素火炎の領域を抽出し、可視化画像を出力している。

現場で使用するウェアラブルデバイスは軽量・小型・安価な装置が要求される。これに鑑み、火炎可視化装置の各種手法の内、最も簡易な構成となる本手法を基に、研究開発を行った。

3.2 スマートデバイスの選定

本研究開発は火炎可視化装置とスマートデバイスを融合させたウェアラブルデバイスの開発であり、火炎可視化装置で取得した可視化情報をデバイスのモニタ上に投影するものである。図8にウェアラブルデバイスの製品イメージを示す。

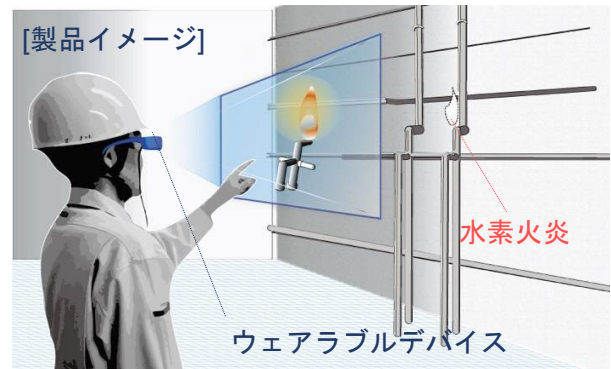


図8 ウェアラブルデバイスのイメージ図

図8に示す様に、装着した作業員がモニタを介して水素火炎の領域を視認できるようになるため、火炎の早期発見、初期対応の迅速化が可能となる。

また、モニタ上への温度や酸素濃度、位置の表示機能、監視室への通信機能等を付加することで、現場の状況が指揮系統や他の作業員と共有できる、作業指示情報を視覚的に共有できる等、副次的なメリットも生まれる。

本装置に適用した、現実の物質空間と仮想空間を融合させる技術は総称してXR (Cross Reality, Extended Reality)と呼ばれている。表1にXR技術に含まれる各技術の特徴を示す。

表 1 XR 技術に含まれる技術の特徴

種別	AR	MR	VR
	拡張現実	複合現実	仮想現実
体験する空間	デバイス上に拡張された現実世界	現実世界 + 仮想世界	仮想世界
現実の物体の視認	可能	可能	不可能
コンテンツへの接触	デバイス上で可能	可能	不可能
使用デバイスの例	スマートフォン ARグラス	MR グラス	VR グラス

拡張現実 (Augmented Reality: AR) は、現実世界に仮想世界を重ね合わせて体験できる技術のことであり、スマートフォンやヘッドマウントディスプレイを通して現実世界を見た時に、仮想のデータや画像を現実世界に重ねて表現する。XR 技術の中で最も普及している技術であり、産業用途では、製品や装置・設備の 3D CAD データをもとに、仮想空間で試作品を検証することに用いられている他、作業指示を表示し、点検業務支援を行うこと等に用いられている。

複合現実 (Mixed Reality: MR) は、AR と同様に現実世界に仮想世界を重ね合わせて体験できる技術であるが、現実世界の情報を反映しない AR と違い、現実世界の情報を用いて仮想世界と相互にリアルタイムで影響し合う複合的な空間を構築する技術である。建設業では現実世界に建築物の間取りの情報を重ね合わせ、出来形の確認を行うこと等に用いられている。

仮想現実 (Virtual Reality: VR) は、仮想世界を現実のように体験できる技術のことであり、ヘッドマウントディスプレイを通して視野内に 360° の仮想空間を表現する。体感型のゲームを始め、作業教育の教材として VR 研修等で用いられている。

この他に現在の世界と過去の情報を混同させ、実時間・実空間に存在しているかのように見せる代替現実 (Substitutional Reality: SR) と呼ばれる技術も存在している。近年、VR や AR を複合した技術等も登場していることから技術の明確な線引きは成されていない。

水素火炎をデバイスのモニタ上に表現する場合、

現実世界の情報が必要となるため、AR、もしくは MR 技術が適当であり、XR 技術を表現するためには、それぞれ専用のデバイスが必要となる。MR デバイスはそれ単体で数十万円程度の販売価格であり、AR デバイスと比較して大型で重量があるため、軽量・小型・安価な装置の開発は困難である。

また、スマートデバイスの表示方式は、透過ディスプレイ上に画像や映像を投影する光学シースルー方式や、装着者の視界を外界から完全に遮断し、前面に配したカメラの映像を非透過型ディスプレイに投影するビデオシースルー (ビデオパススルー) 方式が挙げられるが、ビデオシースルー方式はデバイスの電源喪失時に装着者の視界がブラックアウトするため、現場使用には適さないと判断し検討対象から除外した。

以上のことから、軽量・小型・安価な AR デバイスの調査を行ったところ、国内でモジュールタイプの AR ディスプレイ (以下、AR モジュール) を販売している Barintec 社を見出した。AR モジュールの外観を図 9 に示す。



図 9 Barintec 製 AR モジュールの外観

AR モジュールは導光板技術を用いた小型・軽量の AR デバイスであり、透過ディスプレイと画像形成部の基部からなる。他の AR デバイスと比較して大型の導光板を内蔵している。解像度は水平 1280 × 垂直 720 pixels, 視野角は 35° ~ 25°, 重量 26 g, 明るさは 1000 nits ~ 2000 nits という仕様である。現行のスマートフォン相当のピーク輝度を持っており、昼間屋外環境下でも十分な視認性を有している。また、装置は数万円程度で調達でき、大きなコストダウンが可能となる。

以上のことから、本研究開発では、AR デバイスとして AR モジュールを適用した。

4. 装置開発

4.1 ハードウェアの開発

図 10 に開発したウェアラブルデバイスの光学構成を示す。

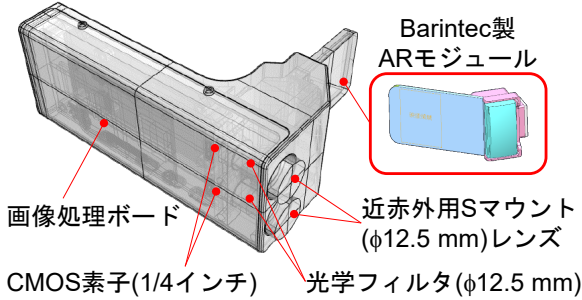


図 10 ウェアラブルデバイスの光学構成

AR モジュールの適用に伴い、ハードウェアは片眼に装着する方式とし小型化を図った。また、光学系に用いる光学フィルタやカメラレンズは既製品を適用することで、低コスト化を行った。

光学系は光軸を 2 つに独立させ水素火炎画像と背景画像を別々に取得する二眼式とした。これにより空間的にスペースが必要となるダイクロイックミラーが必要なくなり、従来の装置と比較して光学系の小型化につながった。

カメラレンズは直径φ12.5 mmの小径のカメラレンズ(ユニバース光学工業製 近赤外用 S マウントレンズ VH160D900)を適用した。伴って、波長選択を行う光学フィルタの直径もφ12.5 mmとした。それぞれ水素火炎画像側は(Andover 製 バンドパスフィルタ 930FS10-12.5)を、背景画像側は(Andover 製 バンドパスフィルタ 900FS10-12.5)を適用した。イメージセンサは 1/4 型、808 万画素の CMOS 素子(SONY 製 MX219)の赤外線カットフィルタが無いものを適用した。

CMOS 素子後段の画像処理回路で可視化処理後、装置内で有線接続された AR モジュールに水素火炎の可視化画像を表示する。図 11 に装置外観を、表 2 に装置仕様を示す。

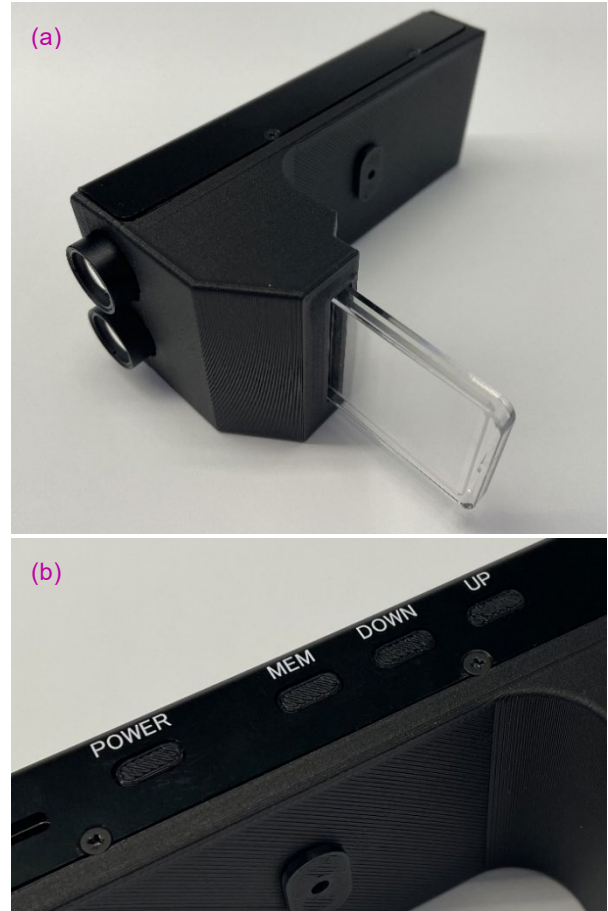


図 11 装置外観
(a)装置上面、(b)装置底面

表 2 装置仕様

フレームレート	10 fps 以上
画像保存	内部メモリ, USBメモリ (USB-A)
電源	USB-C DC5 V
電流	平均 2 A
メモリ	4 GB
ストレージ	16 GB
外形寸法	135×96×55 mm
重量	190 g

装置の外形寸法はディスプレイ部を含めて 135×96×55 mmであり、重量は 190 gである。操作用のボタンはヘルメットを被って使用することを想定してスペースのない装置上面ではなく装置底面に配置した。また、オプションとして屋外使用時、太陽光の強い照り込みや反射があった場合に用いる、外付けの遮光バレルを製作した。遮光バレル装着時の外観を図 12 に、ヘルメットマウント時の装置外観を図 13 に示す。



図 12 遮光バレル装着時の装置外観

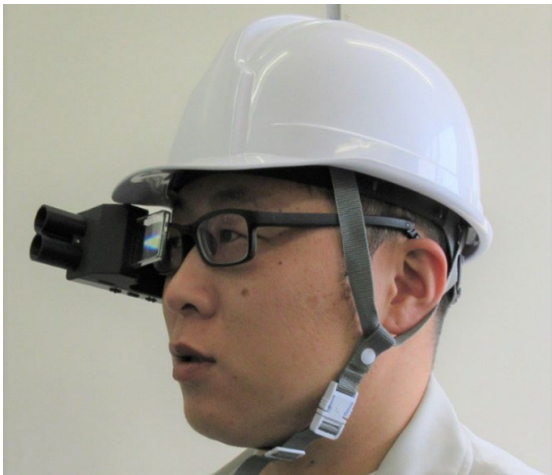


図 13 ヘルメットマウント時の装置外観

4.2 ソフトウェアの開発

ソフトウェアはハードウェアで取得した画像を水素火炎の可視化画像として出力する機能が求められる。本装置では2つの近赤外画像の合成処理を行う手法を用いる。CMOS素子で撮像した画像はR・G・Bの3つのチャンネルで出力される。差分・二値化処理を行うには輝度情報を持つグレースケール画像にする必要がある。グレースケール化には複数の計算方式があるが、本研究開発では式(1)を用いている。輝度値 Y は、

$$Y = 0.299I_R + 0.587I_G + 0.114I_B \quad (1)$$

で表される。ここで I_R, I_G, I_B はRGB値の赤、緑、青であり、変換後のグレースケール画像は0~255までの256段階の階調を持つ。

差分にて背景を除きたい場合、2つの画像の背景の輝度値を同等に補正する必要がある。本装置では、両画像の輝度の中央値を取得し、その比率

で一方の画像の輝度値の補正を行っている。装置ではこの補正値をゲイン値として示している。

差分後の画像は2つの画像の輝度差の情報を持つ。2つの画像は異なる波長の光を取得しているため、補正して差分を行っても背景の物体に輝度差が残る。背景に残った輝度差は水素火炎の可視化では誤検知の要因となるため、輝度値をある値で二値化処理することでこれを除している。装置ではこの値を閾値として示している。

両処理後、輝度値の残った領域を赤色に着色し、背景画像と重ねることで水素火炎の可視化画像を出力している。

また、水素火炎の可視化時、ソフトウェアには画像処理、各種設定・調整、データの保存等の機能が求められる。

以上の機能についてユーザビリティを考慮して、ソフトウェアの設計・開発を行った。図14にソフトウェアの画面構成を図15に比較のため可視カメラにて別途撮影した同等の画角の撮像環境画像を示す。



図 14 ソフトウェアの画面構成



図 15 撮像環境

図 14, 及び図 15 は画像前方のガストーチから水素ガスを放出し着火している。図 14 のように、抽出した水素火炎領域は赤色に着色された後、画面上に表示される。装置は右目片眼に装着しての使用を想定して開発を行った。視野の端の情報を視認する場合は大きく眼球移動をする必要があり、視認性の点で妥当ではないため、水素火炎の可視化画像は画面左側に配した。水素火炎の可視化画像のズームや、撮像、各種設定は、装置底部の操作作用のボタンにて行う。

5. 機能評価

開発した装置にて行った機能評価試験の試験状況を図 16 に、水素火炎の撮像結果を図 17 に、比較のため、可視カメラにて別途撮影した火炎の撮像結果と同等の画角の可視画像を図 18 に示す。



図 16 機能評価試験の状況



図 17 水素火炎の撮像結果



図 18 撮像結果と同等の画角の可視画像

機能評価試験は 3 月、昼間屋外環境下にて実施した。装置と水素火炎の着火位置は 10 m 離れた。水素ガスは $\phi 2$ mm のノズルから放出し、火炎長が約 4 cm になるように流量を調整した。撮像方向は北向き、当日は微風であった。

図 18 の可視画像上では水素火炎が視認できないが、図 17 の装置の撮像結果では水素火炎の形状がはっきりと視認できている。収差による周辺光量の減少や背景のボケもなく非常に明瞭な水素火炎の撮像結果が得られた。

6. まとめ

著者らがこれまでに開発した火炎可視化装置と、スマートデバイスを融合させた、肉眼で視認できない水素火炎をハンズフリーで可視化するウェアラブルデバイスの研究開発を行い、開発した実機を用いて行った機能評価試験により、水素火炎の可視化機能を確認した。

今後は継続して研究開発を実施し、装置の装着性の向上や、ソフトウェアのユーザビリティの向上、改善点の抽出を行うと共に、現場で機能する安全製品の提供を目指し、より現場使用に即した製品の開発を行う予定である。

【謝辞】

本研究開発の一部は、福岡県水素グリーン成長戦略会議令和 4 年度製品開発支援事業として実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：
「水素基本戦略」, pp.24-25 (2017).
- 2) 高圧ガス保安協会:「水素スタンドにおける事故の注意事項について」, pp.2-3 (2020).
- 3) 高圧ガス保安協会:「高圧ガス事故事例データベースにおける水素スタンド関連の高圧ガス事故（平成30年まで）」
- 4) 鈴木健吾:「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.195, pp.30-36 (2019).
- 5) 北口久雄:「水素用ガスセンサの現状と課題」, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.35-40 (2005).
- 6) 三木啓史, 守家輔, 市川幸司, 二宮英樹, 関丈夫, 願下敏彦, 菅守叶, 武智啓, 「水素火炎・水素ガス可視化技術の開発」 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.1, pp.53-58 (2005).
- 7) 福地哲生, 二宮英樹:「OH 発光の差分画像計測による水素火炎の可視化」, 電気学会論文 C, Vol.127, No.5, pp.692-698 (2007).
- 8) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一:「燃焼現象の基礎」, オーム社, pp154-156
- 9) H. L. Barnes and H. S. Smith : 「Flame Imaging System」 U.S.Patent, No. 5,726,632 (1998).
- 10) 幸田清一郎, 田久保嘉隆:「火炎の分光学的計測とその応用」, 学会出版センター, pp113-118
- 11) ASTM G 173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2. 9. 2.

小学校における環境モニタリングシステムの導入による 換気行動変容に関する研究

四国電力(株)	土木建築部	天野 雄一郎
四国電力(株)	土木建築部	松田 健太郎
(株)四国総合研究所	土木技術部	藤井 良平
(株)四電技術コンサルタント	建築部	堀岡 建吾
(株)四電技術コンサルタント	建築部	井上 貴之

キーワード： モニタリング
二酸化炭素濃度
行動変容
換気
メンテナンス

Key Words : Monitoring
Carbon dioxide concentration
Behavior change
Ventilation
Maintenance

Ventilation behavior changes by employing environmental monitoring system for elementary schools

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Department

Yuichiro Amano and Kentaro Matsuda

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Ryohei Fujii

Yonden Consultants, Inc., Architectural Department

Kengo Horioka and Takayuki Inoue

Abstract

Experiments and questionnaires were conducted at an elementary school to determine the effect of environment monitoring system on ventilation behavior. The LED lamp display according to the carbon dioxide concentration served as a criterion for decision-making on ventilation behavior, and the percentage of carbon dioxide concentrations exceeding the standard (1,000 ppm) decreased for many classrooms. Alternatively, in some classrooms, excessive ventilation was fixed, and the thermal environment was also improved. Moreover, the children's involvement in opening windows for ventilation increased. In addition to, we report on measurement results of indoor environment obtained in classrooms employing air to air total heat exchanger at an elementary school. The indoor air environment in the classrooms is sufficiently also utilising cross ventilation with opening windows. Moreover, measurement of the ventilation systems' air flow rate of before and after cleaning including at other schools are operated.

1. はじめに

新型コロナウイルスの流行下において、密閉・密集・密接の「3密」に代表される基本的な感染対策が重要視されてきた。しかし、ワクチンの接種率の向上や罹患による免疫の取得などで集団免疫を獲得し、以前のような大流行を回避し現在は小康状態を保っている状況である。2023年5月には、感染症法上の新型コロナウイルスの扱いが2類から季節性インフルエンザと同等の5類へと移行した。しかし、感染拡大防止の観点からは手洗いや換気などの励行は必要とされている。

小学校教室の空調・換気設備に着目すると、近年冷暖房設備の普及が急速に進んでいるが、2003年の改正建築基準法施行前に建てられた小学校教室の多くは機械換気設備を有していない。冷暖房中であっても換気は窓や戸の開放によって行われるため、外気の侵入による室内温熱環境の悪化や、窓や戸を閉め切ることによる換気量不足が懸念される。昨冬、オミクロン株による学校施設でのクラスターが全国的に発生していたこともあり、学校などの人員密度の高い教室においては適正な換気量を確保し「密閉」を防ぐことが重要とされている。

本研究では新型コロナウイルス流行下における小学校教室の換気を感染症対策・温熱環境・エネルギー消費量の面から適正化する手法としてモニタリングによる行動変容に着目し、その有用性の検証を進めている。本報では、窓開けによる小学校を対象としたモニタリングシステムによる教室内環境の計測概要・室内環境の推移や行動変容について、LEDランプ導入前後における室内CO₂濃度や室内温度の変化をより詳細に分析し、その相関性について有意差検定を実施した結果および換気環境と感染リスクについて算出した結果について報告する。また、近年建て替えが実施された校舎では、全熱交換型を含む機械換気設備が採用されているが、窓開けによる換気も併用している学校が多いため、機械換気設備を有する教室の空気環境の実情を把握するため同様な手法でモニタリング計測を行った結果についても報告する。

2. 対象施設

2.1 窓開け換気のための教室(A小学校)

窓開け換気のための教室として香川県高松市に所

在するA小学校を対象施設とした。校舎は南北2棟あり、1,2年生の教室が位置する南校舎は昭和30年代に竣工したRC造3階建、3年生以上の教室が位置する北校舎は昭和50年代に竣工したRC造4階建の建物である。全ての教室は片廊下型に配置されており、北側に廊下が位置する(図1)。調査期間においては各学年3学級の編成となっており、1学級あたり30~35人程度の児童が在籍している。教室の大きさは7.0m(幅)×9.0m(奥行)×3.15m:南校舎, 3.0m:北校舎(高さ)である(図2, 3)。

壁付換気扇を有する職員室を除き、全教室に機械換気設備は設置されておらず、換気は専ら窓や戸の開放により行われる。各教室の南側には外気と直接通じる窓が上下3か所、廊下に面する北側には2か所の引き違い戸、その間には開閉可能な腰窓とそれらの上部には常時開放されている回転窓が存在する。廊下と階段は窓や昇降口等の開口部より常に外気に対して開放されている。新型コロナウイルスへの対策として授業中、休み時間の教室の窓開け換気が励行されているが、実施の詳細は教員の判断によるため学級毎に窓や戸の開放状況が異なる。

教室の空調設備はガスヒートポンプパッケージ空調機であり、各教室に冷房7.1kW(暖房8.0kW)の室内機が2台存在する。新型コロナウイルス流行下においては窓の開放が積極的に行われ外気導入量が多いこともあり、教員への聞き取りを行ったところほとんどの学級で室内機の設定温度を冷房時には下限、暖房時には上限にしており、風量は常に最大とのことであった。実際に各教室の暖房時の設定温度を調査したところ、ほとんどの室内機は25~28℃設定であることを確認した。

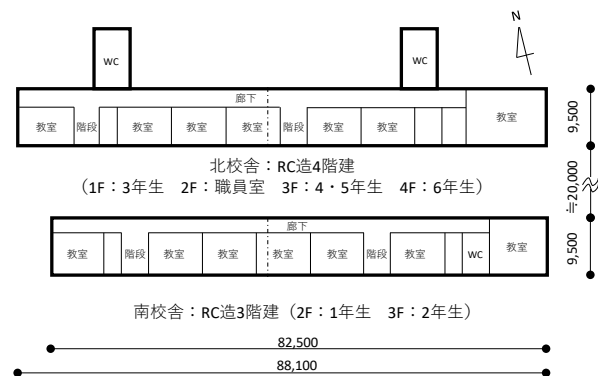


図1 教室配置図(A小学校)

2.2 機械換気設備を有する教室(B 小学校)

機械換気設備を有する教室として香川県高松市に所在する B 小学校を対象施設とした。B 小学校は 2010 年竣工(経年 12 年), RC 造 4 階建である。計測教室は, 各学年の代表 1 学級の計 6 教室とした。なお, 1 学級あたり 30 名程度の児童が在籍しており, 教室の大きさは 9m(幅) × 8m(奥行) × 2.9m(高さ)である(図 4, 5)。

各教室の空調設備は, 天井カセット型ガスヒートポンプパッケージ空調室内機: 冷房 9.0kW(暖房 10.0kW) が 2 台設置されている。また天井埋め込み型式の全熱交換型第 1 種換気設備(以下, 全熱交換器)が 1 台設置されており, ダクトにより給気用と排気用の吹出口が教室内に各 2 つ設置されている。仕様書上の風量は, 強運転時 1,000m³/h, 弱運転時 790m³/h(設計風量: 860m³/h)であり, 通常は全熱交換モードの強運転で運転している。

教室の南側は外気と直接通じる窓が 3 か所とベランダ出入口, 北側は廊下に面した全面引き戸となっており, 計測期間においては全熱交換器を運転しながら, 適宜窓開けを行っている状況であった。廊下はホールとなっており, 外部に直接通じる連窓が設置されている。窓の開閉方法については, 学校全体で廊下側の扉は常時全開にしており, また, ベランダ側の窓については教員が中心に実施している状況であった。

3. 環境モニタリングシステム

四国電力グループが開発した無線式環境モニタリングシステム「Energy Minder」(以下, E/M)を用いて, 対象施設内の計測を行った。E/M はデータ収集装置(Network Computer, 以下, NC)と, 各種センサが接続可能なセンサユニット(Networked Intelligent Cell, 以下 NICE)から構成されており, NICE の計測値が NC に送信される。NC-NICE 間の通信方式は回折性に優れ, 干渉物が多い建物内でも安定した通信が可能である 920MHz 帯の無線通信を採用しており, マルチホップ通信方式により自動的に通信網を構築する。

NC で収集されたデータはインターネットを經由して遠隔から確認することができる他, 計測項目ごとに閾値を設定し電子メールで警報を発信することもできる(図 6)。今回は温度, 湿度, CO₂濃度を計測できるセンサ(SENSIRION 社 SCD30)を接

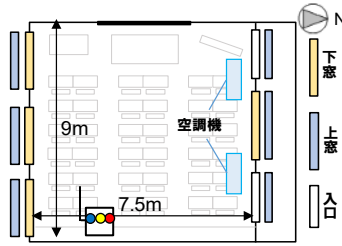


図 2 平面図(A 小学校)



図 3 教室内観(A 小学校)

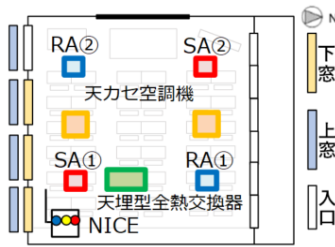


図 4 平面図(B 小学校)



図 5 教室内観(B 小学校)

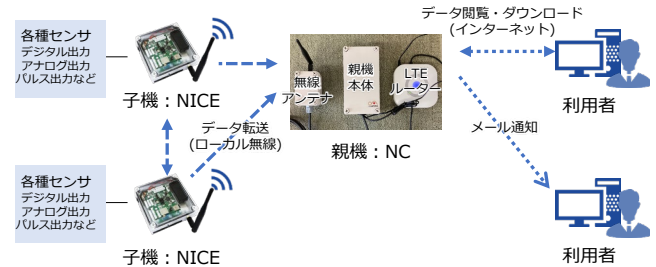


図 6 Energy Minder 概要

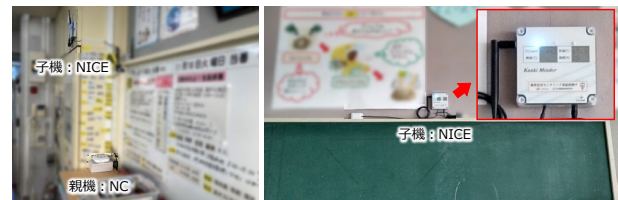


図 7 Energy Minder 設置状況(左:職員室 右:教室)

続し, 教室内のデータ収集を行うと同時に, CO₂濃度の計測値により NICE 表面の LED ランプを異なる色に点灯させ, 換気に関する行動変容を促すこととした。

4. A 小学校での換気行動変容に関する実証実験

4.1 実験概要

教室および職員室の計 19 室を対象として 1 分間隔で各室の温湿度, CO₂濃度の計測を行った。予備計測としてある教室の前方 2 か所, 後方 3 か所の CO₂濃度を同時計測したところ, 場所による差がほとんど見られなかったことから, 可能な限り同時に測定できる教室を増やす目的から, 各教室で後方中央の 1 か所に NICE を設置することとし

た(図7)。なお、NICEは中継器としても機能するため、マルチホップで通信網を構築することが可能であるが、職員室に設置したNCに対して各教室のNICEはシングルホップでの直接的な通信が可能であった。

2021年11月より計測を開始し、2022年11月現在も継続中であるが、本研究では最も寒い期間の換気状況を評価するため2021年12月2日から2022年2月17日を解析対象期間とした。

計測開始から一定期間はCO₂濃度に応じたLEDランプの点灯を行わずに現状把握を行い、途中からLEDランプを点灯させることで、点灯の有無による空気環境の変化および行動変容の評価を試みる計画とした。この時、各教員に対してランプの点灯パターンの閾値を説明したうえで、黄色・赤色ランプ点灯時には窓開け換気を行うことを推奨した。また、2022年1月21日から高松市に「まん延防止等重点措置」が適用されたため、これが換気行動に影響を及ぼす可能性を考慮し、期間を表1の通りに区分し、評価・考察を行った。

4.2 実測結果(CO₂濃度)

表1に計測期間とLED表示の有無を示す。同計測期間における実測結果について、授業が行われる平日8:00~15:00の時間帯を対象とした、各期間、各教室における室内CO₂濃度および1,000ppmを超過した割合を図8~10に示す。なお、本報では各教室を1-A(1は学年、Aはクラス分類)という形で記す。全期間で全ての教室のCO₂濃度の中央値は1,000ppmを下回っているものの、多くの教室で1,000ppmを超過することがあった。特に5,6年生でCO₂濃度が高い傾向が見られるが、これは体格差による呼出量の差が要因と考えられる。次に、期間①と②におけるLEDランプ点灯の有無に伴う影響を評価するため、Wilcoxonの符号付順位和検定³⁾により有意水準0.05での有意差を検定の上、CO₂濃度変化の傾向ごとに計測結果を評価した。

(1) CO₂濃度が有意な上昇傾向を示した教室

該当した計10教室の計測結果を図11に示す。多くの教室において期間①のCO₂濃度の中央値が600~700ppm程度であり、また期間②③では全ての教室でLEDランプの点灯状況に応じて窓開けを行うよう行動が変化した。5-C, 6-Aを除く8教室では期間①では常時あるいは定期的に窓開けを

表1 計測期間とLED表示の有無

期間	期間	LED表示	備考
期間①	2021年12月2日~ 2021年12月27日	無	冬休み期間(12月25日~1月10日)は評価対象外
期間②	2021年12月28日~ 2022年1月21日	有	
期間③	2022年1月22日~ 2022年2月17日	有	まん延防止等重点措置適用期間

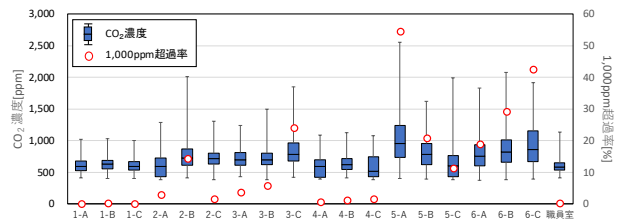


図8 実験結果(期間①)

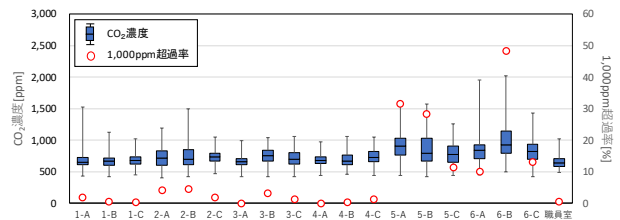


図9 実験結果(期間②)

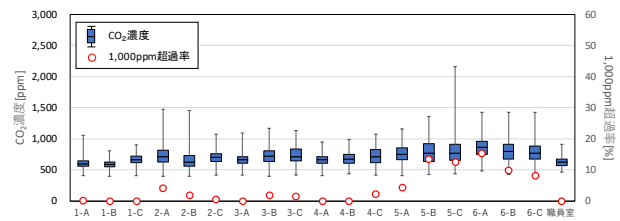


図10 実験結果(期間③)

行う習慣があったが、期間②以降はLEDランプの点灯状況を判断指標として随時の換気を行うようになり、過度な換気が抑制された結果、CO₂濃度の上昇に繋がったと考えられる。

(2) CO₂濃度が有意な低下傾向を示した教室

該当した計4教室の計測結果を図12に示す。各教室に共通して、期間①のCO₂濃度の中央値が700~900ppm程度と比較的高く、期間②③ではLEDランプの点灯状況に応じて窓開けを行うよう行動が変化している。1,000ppm超過率が低下していることから、期間②以降はLEDランプの点灯に応じて換気行動が取られたものと推測される。

(3) CO₂濃度に有意差が生じていない教室

該当した計4教室の計測結果を図13に示す。いずれの教室も期間②③ではLEDランプを換気行動の判断基準としていたとのアンケート回答であっ

た。1,000ppm 超過率を見ると、2-B では期間①から期間②③にかけて大幅に低下していることから、LED ランプの点灯に応じて換気行動がとられたものと推測される。一方、5-B では1,500ppm を超過することはほぼ無いものの、1,000ppm 超過率は期間①よりも期間②の方が高く、LED ランプの具体的な活用状況が異なることが示唆される。

4.3 実測結果(室内温度)

授業が行われる平日 8:00~15:00 の時間帯を対象として室温の分析を行った。実測期間中の外気温については対象施設に最も近い高松地方気象台の日平均外気温データを参照しており、期間①よりも期間②③の方が低いことが確認された(図 14)。なお、空調機の使用は各教室の教員の判断に委ねられる運用だが、基本的には12月から空調機が使用されており、本実測期間においても授業中に空調機が稼働していたと推測される。

期間①から期間②にかけて CO₂ 濃度が上昇傾向を示した教室における室温の計測結果を図 15 に示す。なお、図中には当時の学校環境衛生基準⁴⁾で望ましいとされる室温の下限値である 17℃を下回ったデータ数の割合を付記している。外気温が低いにも関わらず期間②③の室温が期間①と比較し上昇する傾向を示した教室が半数ほど存在しているが、これは当該教室の CO₂ 濃度が上昇していることから、低温の外気導入量が減少したことにより温熱環境が改善したものと考えられる。期間①から期間②にかけて CO₂ 濃度が低下傾向を示した教室における室温の計測結果を図 16 に示す。4 教室で共通の傾向は見られないが、期間①の CO₂ 濃度中央値が全教室で最も高かった 5-A、それに次ぐ 6-C に注目すると、室温がやや低下傾向にあることが確認できる。

全学年教室の全期間のデータ(n=18 教室×3 期間=54)を対象を広げ、室温・CO₂ 濃度の中央値を散布図上にプロットし、95%確率楕円を付記したものを図 17 に示す。近似直線の傾きが正となり CO₂ 濃度が高いほど室温が高いという妥当な傾向が確認され、換気量の確保を前提の上、過度な換気を抑制することで温熱環境の維持を図ることが可能である。また、寒冷な外気導入の抑制は空調機処理熱量の低下にも繋がることから、空調エネルギー消費量の削減にも寄与すると考えらえる。

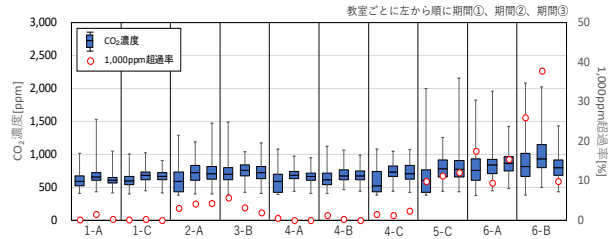


図 11 CO₂ 濃度が有意な上昇傾向を示した教室

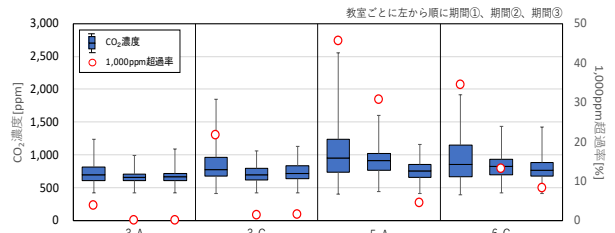


図 12 CO₂ 濃度が有意な低下傾向を示した教室

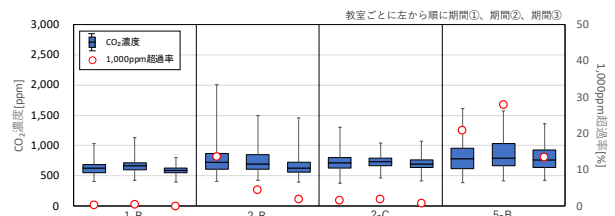


図 13 CO₂ 濃度に有意差が生じていない教室

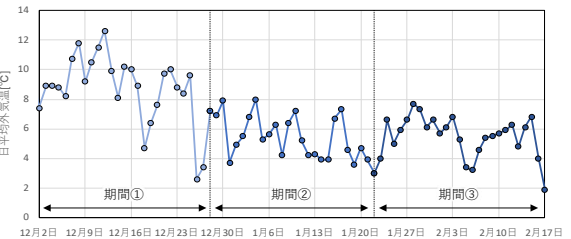


図 14 日平均外気温の推移(気象台データ)

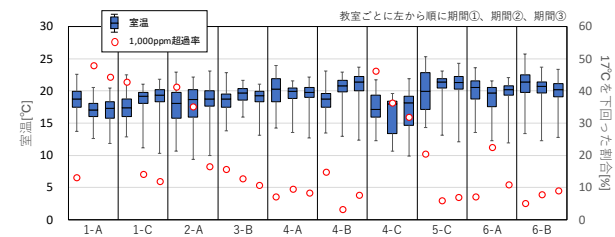


図 15 CO₂ 濃度が有意な上昇傾向を示した

教室における室温の計測結果

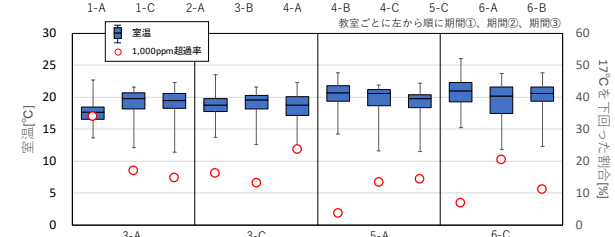


図 16 CO₂ 濃度が有意な低下傾向を示した教室における室温の計測結果

5. 感染リスク評価

各教室のクラス人員や室内 CO₂ 濃度データ等を用いて、授業中の換気量および感染リスクについて分析した。対象教室の授業中の換気量 Q は SHASE の連続発生(供給)法⁵⁾を用いて単室条件として算出し、在室者の CO₂ 呼出量は田島ら⁶⁾の CO₂ 呼出量推定式である式 3-1 および式 3-2 を用いた。体重と身長は文献⁶⁾データを参照し、小学校 1 年生から 6 年生を 7 才から 12 才、教員を 30 才台として身長と体重を設定した。

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_p \times Met \times C_a \times C_g) \quad 3-1$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725} \quad 3-2$$

ただし、 P_{CO_2} :CO₂呼出量[m³/h], A_p :体表面積[m²], W :体重[kg], H :身長[cm], Met :エネルギー代謝率, C_a :年齢係数(18~29 歳基礎代謝量⁷⁾に対する比), C_g :性別係数(男性 1.00 女性 0.73)

また完全混合条件で室内の感染確率を求めるために式 3-3 の Wells-Riley モデル⁷⁾を用いた。現時点で新型コロナウイルスの感染に関する児童についてのデータは充実していないと考え、算出時には REHVA によるデルタ株に関する呼吸量と量子発生値⁸⁾を用いた。再生産数は式 3-4 により求めた。なお、各種算出は学年ごとの平均の値を算出している。

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right) \quad 3-3$$

$$R = P \times (x - 1) \quad 3-4$$

ただし、 P :感染確率, I :感染者数[人], p :呼吸量[m³/s], q :量子発生量[quanta/s], t :暴露時間[s], Q :外気供給率[m³/s], R :再生産数[-], x :在籍者数[人]

図 18~20 に各期間における学年ごとの CO₂ 濃度を、図 21 に各期間、各学年の再生産数の平均値を、表 2 に各期間における感染確率および再生産数を示す。図 18~20 より、期間①から②にかけて全体的な CO₂ 濃度が 1,000ppm に漸近する傾向が確認される。これは LED ランプの導入により窓開け換気の判断材料となる指標ができたことから、ランプ点灯の閾値である 1,000ppm を基準に換気が行われていたためと考えられる。図 21 および表 2 より、全ての期間で再生産数が 1 を大きく下回っていることから、感染対策上の換気は十分に行われていると考えられる。したがって、再生産数を指標の一つとして換気量を適正化することで、室内

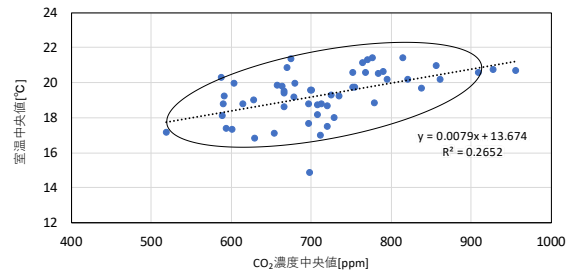


図 17 室温中央値と CO₂ 濃度中央値の相関

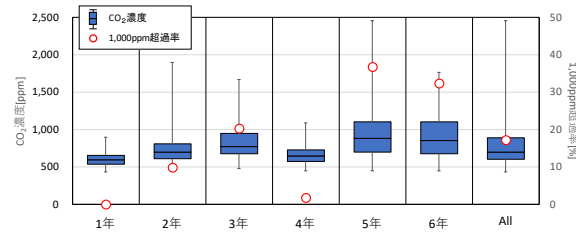


図 18 期間①における学年ごとの CO₂ 濃度

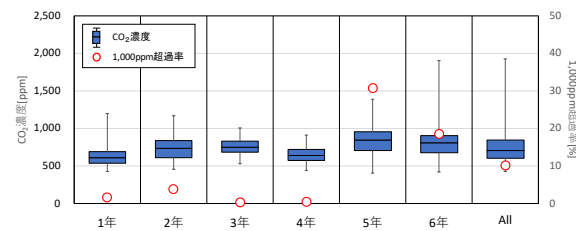


図 19 期間②における学年ごとの CO₂ 濃度

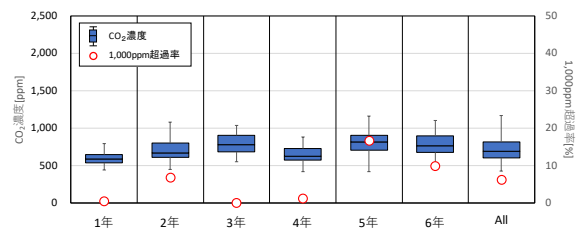


図 20 期間③における学年ごとの CO₂ 濃度

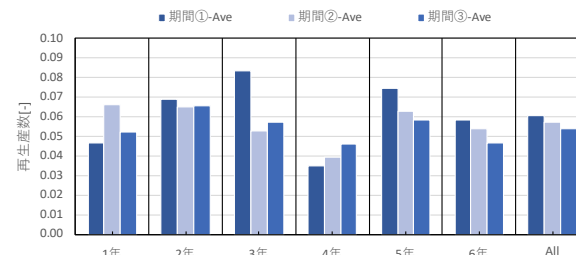


図 21 授業時間の再生産数(平均)

環境と空調のエネルギー消費量の更なる適正化に寄与すると考えられる。なお、本研究では LED ランプ点灯の閾値を 1,000ppm および 1,500ppm としていたことから、CO₂ 濃度が 1,000ppm を境に窓開け換気が行われていたと考えられるが、例えば 1,300ppm を最初の閾値とすることで窓開けに関する行動変容を促すことが比較的容易に可能であるとされる。

表 2 期間ごとの各学年の感染確率および再生産率（左：期間①，中央：期間②，右：期間③）

学年	1	2	3	4	5	6	ALL	学年	1	2	3	4	5	6	ALL	学年	1	2	3	4	5	6	ALL
Q [m ³ /h] Ave	1,707	1,776	1,198	2,967	1,933	2,174	1,958	Q [m ³ /h] Ave	1,231	1,446	1,704	1,950	1,598	2,039	1,654	Q [m ³ /h] Ave	1,437	1,213	1,748	1,510	1,387	1,713	1,487
Q [m ³ /h] Max	29,987	66,266	7,412	73,225	49,780	14,263	73,225	Q [m ³ /h] Max	4,047	11,747	7,718	6,340	13,128	16,288	16,288	Q [m ³ /h] Max	5,760	4,670	10,084	4,362	8,514	7,482	10,084
Q [m ³ /h] Min	400	121	161	597	179	358	121	Q [m ³ /h] Min	74	453	588	648	335	338	74	Q [m ³ /h] Min	494	476	613	687	560	786	476
P [%] Ave	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.2	P [%] Ave	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	P [%] Ave	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
P [%] Max	0.5	1.7	1.3	0.3	1.1	0.6	1.7	P [%] Max	2.7	0.4	0.3	0.3	0.6	0.6	2.7	P [%] Max	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4
P [%] Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	P [%] Min	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	P [%] Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
R [-] Ave	0.05	0.07	0.08	0.03	0.07	0.06	0.06	R [-] Ave	0.07	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05	0.06	R [-] Ave	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
R [-] Max	0.13	0.53	0.40	0.10	0.34	0.19	0.53	R [-] Max	0.70	0.13	0.11	0.09	0.17	0.20	0.70	R [-] Max	0.11	0.13	0.11	0.09	0.10	0.09	0.13
R [-] Min	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	R [-] Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	R [-] Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
n	249	238	179	189	224	262	1,341	n	131	143	93	114	140	142	763	n	59	63	41	63	63	63	352

6. B 小学校での換気行動変容に関する実証実験

6.1 実験概要

計測期間は夏期の 2022 年 9 月 1 日～10 月 14 日とし、9 月 14 日の午後に LED ランプを設置した。LED 表示の有無による窓開け換気の状態と行動変容の差異を評価するため、①冷房有・LED 表示無(2022 年 9 月 1 日～9 月 14 日)、②冷房有・LED 表示有(2022 年 9 月 15 日～10 月 2 日)、③冷房無・LED 表示有(2022 年 10 月 3 日～10 月 14 日)とし、各学年における①～③の期間内の代表 1 週間の測定結果を図 22～24 に示す。計測期間中、学校環境衛生基準である 1,500ppm を超えることは殆ど無かった。冷房有の期間①と②を比較したが、CO₂ 濃度に大きな差は無く LED による換気行動変容は確認できなかった。冷房の有無の差のあった②と③を比較すると平均 CO₂ 濃度は③の方が 200ppm 以上低くなった。③は中間期となり冷房を停止し窓開け等で積極的に外気を導入した結果と推測される。冷房有の①と②の期間において全熱交換器を稼働させていたことが確認されているが、1,000ppm 以上になる時間帯も多かったため、在室者の換気行動の状況を調査した。

また、各クラスの担任の教員に対して実施したアンケートでは、廊下側の扉は常に全開にするという学校の指示もあり、教室と廊下側のホール部分は常時空気が流動し、ホールを間接的に通じて外気と接するような状況であることがわかった。ベランダ側の外気と直接接する窓においては、低学年(1, 2 年生)と中学年(3, 4 年生)は先生が中心となり、常時一定の窓を開ける運用となっているのに対し、高学年(5, 6 年生)では、LED の状況により児童が窓開けを実施しているという回答であった。これらの結果により、LED 表示が行動変容の一助となっていることが示唆された。

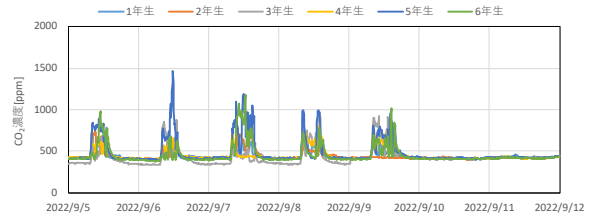


図 22 CO₂ 濃度推移 (冷房有・LED 無 : 9/5-12)

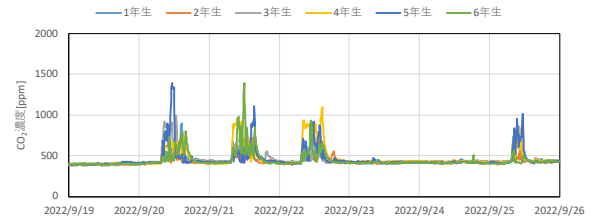


図 23 CO₂ 濃度推移 (冷房有・LED 有 : 9/19-25)

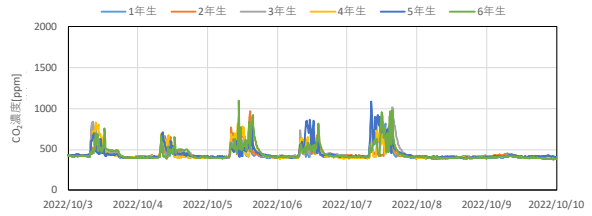


図 24 CO₂ 濃度推移 (冷房無・LED 有 : 10/3-9)

6.2 換気設備の状況調査

換気設備の状況調査および清掃は 2, 4, 6 年生の 3 教室を対象とした。なお、使用開始後 10 年以上の間、フィルター・エレメントの清掃や交換は行っていない。風量はキャプチャーフード風量計(日本カノマックス社製)で吹出口(SA), 吸込口(RA)毎に計測し、評価した。また、外部の給気口、排気口についても状況を確認した(図 25)。天井埋込型の全熱交換器のフィルターと全熱交換エレメントを確認したところ、フィルターはチョークの粉や衣類の繊維、ホコリなどでほぼ閉塞した状態であった。全熱交換エレメントはフィルターが閉塞したため、端部より直接空気が流入することでホコリなどが付着している状況であった(図 26)。

清掃は、天井内の全熱交換器の側面から、給気フィルターと排気フィルターを取外し、掃除機で埃等を吸引後に水洗いを行い、乾燥させて再度装着した。エレメントはフィルターと同様に側面から取外し後、ブラシで表面のごみを落とししながら、掃除機で吸引し、清掃後再度装着した(図 27, 28)。清掃前後の風量を表 3 にまとめる。清掃前の風量は、設計風量：860m³/h に対し、給気風量、排気風量ともに約 40～80%減と全体的に低い傾向であることがわかる。

図 29 に冬期の風量測定の際のフィルター他の清掃前後の給気・排気風量と清掃前の風量に対して清掃を行うことによる風量の改善量(増加量)を示す。給気風量・排気風量共に清掃前の風量が小さいほど清掃による効果大きい傾向にある。給気風量に関して、清掃前風量が 200 m³/h を下回る場合、フィルター他の清掃により 50 m³/h 以上の風量の増加があるケースもあった。排気風量に関して、清掃前風量が約 200 m³/h の場合 250～450 m³/h の風量増加が認められるケースもあった。

しかしながら、清掃前風量が小さいものでも清掃後の増加が小さいケースも存在した。また、2年生教室は給気風量が多く、逆に 4, 6年生教室では排気風量の方が多いという違った傾向を示しており、施工の状況の確認や機器内部の詳細なメカニズムの検討が望まれる。更に、フィルター他の目詰まりだけでなく、外気からの取入口なども防虫網などにホコリなどが付着して開口率が極端に下がっており、試験的に簡易な清掃を実施した結果、風量を 50%程度増加させることができたため、これも風量が低下している一要因として示唆された。調査後に、全教室のフィルター・エレメント清掃が行われたため、本報で報告した以外の教室においても、今後風量調査を実施する。

6.3 他の学校施設における換気設備の状況調査

近年、建て替えられた学校施設では、全熱交換型換気設備の採用が多くみられる。全熱交換器は、比較的換気量の多い教室や外気温度が暑い、寒いなどの厳しい条件下において省エネルギーや温熱環境の向上に寄与することがわかっている。しかし、設計時点でこのような利点を考慮し採用した場合でも、清掃等のメンテナンスができていない場合には前節で報告したように、風量減少による



図 25 風量測定・外部給気口確認状況
全熱交換エレメント

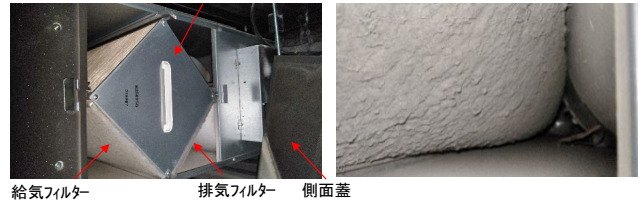


図 26 全熱交換器フィルター等の状況



図 27 清掃状況



図 28 清掃前後のフィルター・エレメントの状況
(左：清掃前，右：清掃後)

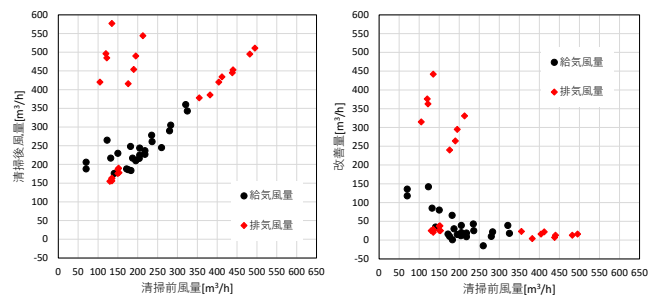


図 29 清掃前後の変化量 (左：風量，右：改善量)

空気環境の悪化や窓開け併用によるエネルギー消費量の増加を招く懸念がある。このため、他の学校施設における全熱交換器の状況調査を行った。

対象としたC中学校は、築8年のRC造の校舎であり、天井カセット型の全熱交換器（設計風量：410m³/h×2台、定格風量：強運転時500m³/h・台、弱運転300m³/h・台）を採用している。この学校も空調設備のフィルター清掃は毎年実施しているが、換気設備のメンテナンス作業は竣工以来実施していない。フィルターとエレメントの状況を図30に示す。この教室も黒板を採用していることから、特に排気（RA）側のフィルターでは、チョーク他のホコリによるフィルターの閉塞が確認された。また、エレメントについてもフィルター同様の閉塞が確認された。給気（SA）側のフィルターについてもホコリや虫などによる閉塞が確認された。このため、各学年が使用する教室から、A～Fの6教室をランダムに抜き出し風量調査を行ったところ、強運転・弱運転、全熱交換・普通運転の組み合わせにおいて、給気側で最大20%程度、排気側で最大70%程度の減少が確認された（表4）。

調査後、B小学校同様に清掃業者による清掃を全教室で実施しフィルター・エレメントの閉塞は解消されていることから、今後、風量調査を実施し換気量の評価を行う予定である（図31）。

表3 清掃前後での風量変化

運転方法	設定強度	風向	風量[m ³ /h]						
			2年生		4年生		6年生		
			清掃前	清掃後	清掃前	清掃後	清掃前	清掃後	
全熱交換	風量(弱)	給気風量	SA①	280	290	183	184	187	217
			SA②	205	244	150	230	70	188
			合計	485	534	333	414	257	405
		排気風量	RA①	135	163	176	416	105	420
			RA②	135	163	190	454	122	485
			合計	270	326	366	870	227	905
	風量(強)	給気風量	SA①	325	343	132	217	182	248
			SA②	235	278	123	265	70	206
			合計	560	621	255	482	252	454
		排気風量	RA①	150	187	195	490	120	496
			RA②	152	190	213	544	135	577
			合計	302	377	408	1034	255	1073
普通換気	風量(弱)	給気風量	SA①	283	305	176	186	218	227
			SA②	205	225	195	210	141	176
			合計	488	530	371	396	359	403
		排気風量	RA①	130	155	382	386	355	378
			RA②	135	156	404	420	412	434
			合計	265	311	786	806	767	812
	風量(強)	給気風量	SA①	321	360	204	216	260	245
			SA②	236	261	218	237	172	188
			合計	557	621	422	453	432	433
		排気風量	RA①	150	176	440	453	438	445
			RA②	153	178	482	495	495	511
			合計	303	354	922	948	933	956

表4 清掃前の風量

運転方法	設定強度	風向	風量[m ³ /h]						
			A	B	C	D	E	F	
全熱交換	風量(弱)	給気風量	SA①	280	280	275	250	330	260
			SA②	260	330	280	245	315	280
			合計	540	610	555	495	645	540
		排気風量	RA①	100	240	105	95	245	95
			RA②	110	50	75	95	235	85
			合計	210	290	180	190	480	180
	風量(強)	給気風量	SA①	425	450	440	390	535	410
			SA②	430	515	445	385	530	430
			合計	855	965	885	775	1065	840
		排気風量	RA①	155	375	200	150	395	150
			RA②	160	85	135	150	380	125
			合計	315	460	335	300	775	275
普通換気	風量(弱)	給気風量	SA①	270	300	285	255	350	260
			SA②	270	340	280	235	340	270
			合計	540	640	565	490	690	530
		排気風量	RA①	95	280	150	110	265	115
			RA②	105	70	105	90	245	85
			合計	200	350	255	200	510	200
	風量(強)	給気風量	SA①	440	460	420	385	540	410
			SA②	420	520	440	380	525	420
			合計	860	980	860	765	1065	830
		排気風量	RA①	160	435	245	165	430	180
			RA②	165	120	185	160	390	140
			合計	325	555	430	325	820	320



図30 清掃前の状況
(左:フィルター, 右:エレメント)



図31 清掃後の状況
(左:フィルター, 右:エレメント)

7. おわりに

機械換気設備を有していないA小学校の教室に環境モニタリングシステムを導入し、新型コロナウイルス流行下における冬期の換気状況の実態調査を行うとともにCO₂濃度に応じたLEDランプの点灯が換気行動に及ぼす影響を検証した。また、機械換気設備を有するB小学校の教室の空気環境の状況も把握するため同様の手法でモニタリング計測を行い、更に必要に応じてフィルター等の状況調査と簡易清掃を実施した。同様の状況調査をC中学校においても実施した。

得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 換気設備を有しない A 小学校においては、CO₂濃度に応じた LED ランプの点灯を行う前は教室ごとに窓開けの習慣（常時開放、定期的に開放など）が異なり、教室によっては CO₂濃度が 1,000ppm を超過するデータが多く存在した。
- 2) LED ランプにより CO₂濃度の可視化を行ったところ、全教室において換気行動の判断基準として用いられるようになった。1,000ppm, 1,500ppm を閾値としてランプの色を変化させると、多くの教室で CO₂濃度が 1,000ppm を超過する割合が減少した。
- 3) CO₂濃度の中央値が 600~700ppm 程度と低い教室で、LED ランプの点灯を行うようになってから CO₂濃度が上昇する傾向が見られた。CO₂濃度と室温には相関性が確認され、適度な換気を行うことで CO₂濃度を基準内に収めつつ、室温の維持を両立できる可能性が示唆された。
- 4) LED ランプの点灯後は窓開けに対して児童が関与する教室が増加した。LED ランプの点灯というわかりやすい判断基準が設けられたことにより児童の換気行動が促されたものと考えられる。
- 5) 計測期間中における新型コロナウイルスの再生産数が十分に低いことを計算で確認し、これをもとに LED ランプの閾値変更等を通じて更なる換気量の適正化が可能であると考えられる。
- 6) 換気設備を有する B 小学校において、計測期間を通して窓開け換気を併用していたことから教室の空気環境は概ね問題なかったものの、フィルター・エレメントのメンテナンス不足に起因する全熱交換器の風量低下が散見された。
- 7) C 中学校においても、B 小学校同様にメンテナンス不足が原因による風量低下が確認されたため、各施設で清掃が行われた。これらの事象は空気環境の悪化に加え、エネルギー消費量の増加にもつながる可能性があるため、適正なメンテナンス方法について検討する必要がある。

以上のように、本報では小学校における実証を通じて環境モニタリングが換気行動変容に及ぼす効果を定量的に評価し、その有用性を示した。換気方式は学校によって異なるため、それぞれの換気方式に応じたモニタリング手法とその適用性を検討することが、今後必要であろうと考える。

【謝辞】

実証実験、アンケート調査にご協力頂いた対象施設の先生方はじめ関係者の皆様、調査、分析をご指導いただいた豊橋技術科学大学 田島昌樹教授、無線式環境モニタリングシステム Energy Minder の開発者であり、計測にご協力頂いた四国総合研究所 中西美一氏に深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 天野雄一朗他：小学校を対象とした環境モニタリングシステムによる換気行動変容に関する研究 その1 実測とアンケートによる行動変容の分析，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第 8 巻，p.321-324，2022
- 2) 藤井良平他：小学校における環境モニタリングシステムの導入による換気行動変容に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 88 巻，第 808 号，p.521-528,2023.6
- 3) 丹後俊郎，古川俊之：統計ライブラリー 医学への統計学【第 3 版】，p.64-78，149，朝倉書店，2013
- 4) 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]，文部科学省 HP(参照 2022.08.19)
- 5) 空気調和・衛生工学会：トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法，p.18，2003
- 6) 田島昌樹他：換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定，日本建築学会，日本建築学会環境計論文集，第 81 巻，第 728 号，p.885-892，2016.10
- 7) 田畑泉 田中茂穂 引原有輝：改訂版「身体活動のメッツ(METs)表」，2008.2
- 8) Riley, E. C., Murphy, G., Riley, R. L.: Airborne spread of measles in a suburban elementary school. American Journal of Epidemiology, Volume 107, Issue 5, p.421-432, 1978.5
- 9) REHVA: COVID 19 GUIDANCE version 4.1, 2021.4

建築設備を活用した電力需給調整に関する研究 ～貯湯槽を有する給湯システムの利用可能性評価～

(株)四国総合研究所 土木技術部 藤井 良平
四国電力(株) 土木建築部 天野 雄一郎

キーワード： デマンドレスポンス
建築設備
給湯設備
貯湯槽

Key Words : Demand response
Building services
Hot water supply system
Hot water storage tank

**Study on adjustment of electricity supply and demand by building services
- Assessment of the availability of storage type hot water supply system as a DR resource -**

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Ryohei Fujii

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Department

Yuichiro Amano

Abstract

Demand Response (DR) is a concept that changes the pattern of consumer demand for electricity, depending on supply. It is expected to play a role in the further expansion of renewable energies and the stabilization of electricity supply and demand. Batteries and generator equipment are considered the most important resources, but we think that building services can be used.

This paper focus on the evaluation of availability of hot water supply system as a DR resource, including an actual measurement result of hot water supply demand and heat loss.

1. はじめに

東日本大震災に伴う電力需給のひっ迫を契機とし、国策として再生可能エネルギーの普及・拡大が推進された。2012年7月から始まった「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（FIT法）」の経済的インセンティブ付与もあり、再生可能エネルギーは急速な普及・拡大を見せた。しかし、代表的な再生可能エネルギーである太陽光・風力は出力が天候に左右され、供給量が制御しづらいという性質を有しており、導入量が増えるにつれ、電力需給上の大きな課題として顕在化するようになった。

このような背景から、従来所与のものとして考えられていた電力需要を供給事情に合わせて調整するデマンドレスポンス（以下DR）の概念が登場し、一般送配電事業者が公募する電源I'（厳気象対応調整力）や容量市場（発動指令電源）において下げDR（需要抑制）が調整力として扱われるようになった。

また、近年のカーボンニュートラル化を背景とした諸制度においてもDRが重要な施策として位置付けられ、例えば改正省エネ法（2023年4月施行）では、「電気の需要の最適化」として大規模需要家のDRの取り組みについて実施回数が評価される他、再エネ出力制御や需給ひっ迫など需給状況に応じて1次エネルギー使用量換算係数が調整されるなど、DRを促進する制度設計が進められている¹⁾。

DRの代表的な手法としては蓄電池設備・自家発電設備の稼働を調整することが挙げられるが、本研究では空調設備・給湯設備といった建築設備をDRに用いる可能性に着目している^{2,3)}。かつて電力負荷平準化・夜間電力の活用を目的として普及が進んだ蓄熱式空調システムは、蓄熱槽がバッファとなり熱需要と熱供給の発生タイミングを一致させなくてもよいという性質を有していることから、DRとの親和性が高いと考えられる。貯湯槽を有する給湯システムについても同様のことがいえる（図1）。

本報では、実際の建物を題材として、貯湯槽を有する給湯システムのDRリソースとしての利用可能性の評価や、DRを可能とする運用方法について検討した結果について述べる。

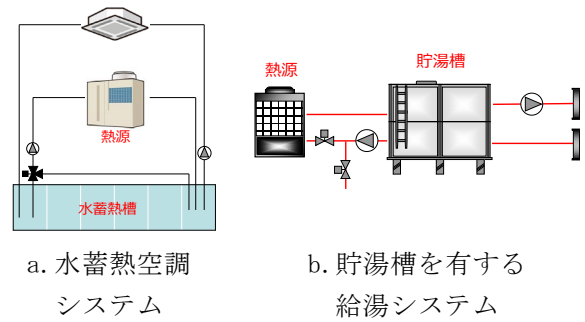


図1 本研究で対象とする建築設備

2. 検討概要

貯湯槽を有する給湯システムが採用された温浴施設を題材とし、給湯システムの運用によってDRに対応できるかどうかを評価する。稼働中の施設における実証実験が困難であったため、シミュレーションによる検討を行うこととした。

DRへの利用可能性を評価するには、電力消費量の発生パターンを変化させられることに加え、給湯負荷（湯の使用量）に対して湯切れを生じさせないこと、循環配管等から生じる損失熱量に対して貯湯槽の温度（条例により一般に60℃）を維持することなど、制約条件を満たしているかを考慮する必要がある。シミュレーション検討に先立って、実測調査により給湯負荷や損失熱量の定量化を図り、計算に用いることとした。

3. 実測調査

3.1 対象建物

徳島県に位置する日帰り温浴施設のうち、浴室のシャワーやレストランの厨房、トイレの手洗い等（以下、シャワー他系統）に湯を供給する給湯システム（図2）を対象とする。主要な機器の仕様は表1に示す通りである。給湯機は給湯運転と保温運転の2つの運転パターンで動作する。前者では上水を加熱し貯湯槽に供給するため、貯湯槽の残湯量が増加するが、後者では貯湯槽内の湯を昇温するだけで残湯量には変化が生じない。

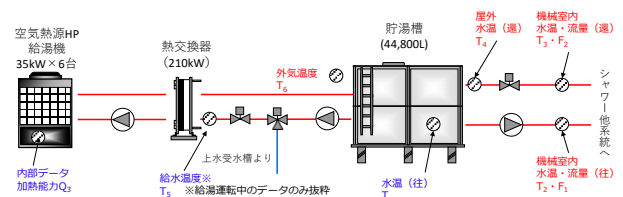


図2 対象とする給湯システムと計測点

表 1 主要機器仕様

項目	仕様
給湯機	空気熱源ヒートポンプ給湯機 6台
	冬期貯湯加熱能力 35.0kW/台
	冬期貯湯消費電力 10.7kW/台
	冬期保温加熱能力 13.0kW/台
冬期保温消費電力 5.0kW/台	
熱交換器	プレート式、向流型、交換熱量 200kW
貯湯槽	開放型 FRP パネル貯湯槽
	容量 44,800L ポリスチレンフォーム 50mm 保温

3.2 調査結果

(1) 給湯負荷

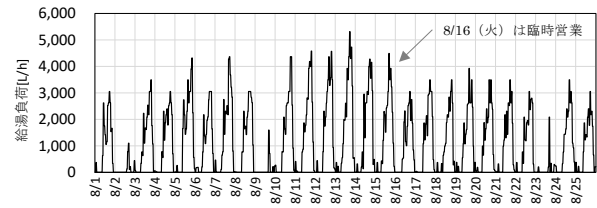
給湯システムのコントローラでは、各部の温度や流量、貯湯槽の水位など運転管理のため様々なデータが集積されている。これを利用し、シャワー他系統の給湯負荷を分析した。一例として2022年8月、12月の給湯負荷実測値を図3に示す。週に1日、給湯負荷が極端に小さい日が出現しているのは、毎週火曜日が温浴施設の定休日になっているためである。施設の利用者の入浴スケジュールが給湯負荷の変動に影響していると考えられ、概ね17時～20時に給湯負荷がピークを迎える日が多い。得られた給湯負荷の時系列データはシミュレーションの与条件として利用する。

(2) 損失熱量

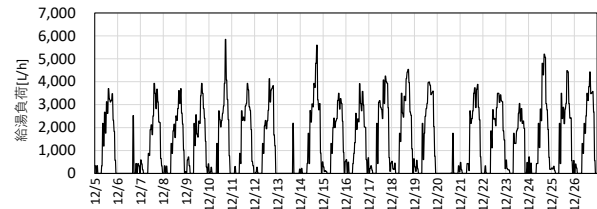
湯の循環に伴って生じる損失熱量の定量化を試みる。実測調査は2022年11月29日から2023年1月28日にかけて行い、既設の計測点を補う形で計測点を充実させ、コントローラから直接的にデータが得られる給湯機の生成熱量 (Q_3) 以外は式1～6により算出する。 Q_5 は貯湯槽からの損失熱量、給湯機と熱交換器およびその間の配管からの損失熱量の和であるが、今回の計測では両者を区分し個別に把握することが困難であったため両者の和を Q_5 として扱い、期間積算値により評価を行った。

(a) 往流量 F_1 、還流量 F_2

往流量 F_1 、還流量 F_2 の日積算値を図4に示す。 F_1 は日によって比較の変動が大きく、後述の使用熱量 Q_2 と似た傾向を示した。 F_2 が大きい日はいずれも温浴施設の定休日であるが、 $F_1 < F_2$ となること



a. 2022年8月1日～25日



b. 2022年12月5日～26日

図 3 給湯負荷実測値

$$Q_1 = Q_{1i} + Q_{1o} \quad \text{式 1}$$

$$Q_{1i} = (T_2 - T_3) \times F_2 \times \rho c \quad \text{式 2}$$

$$Q_{1o} = \{(T_1 - T_2) \times F_1 + (T_3 - T_4) \times F_2\} \times \rho c \quad \text{式 3}$$

$$Q_2 = T_2 \times (F_1 - F_2) \times \rho c \quad \text{式 4}$$

$$Q_4 = T_5 \times V \times \rho c \quad \text{式 5}$$

$$Q_5 = Q_3 + Q_4 - Q_1 - Q_2 \quad \text{式 6}$$

ここに、

Q_1 : 貯湯槽を含まない負荷側の損失熱量[kW]

Q_{1i} : Q_1 のうち建物内での損失熱量[kW]

Q_{1o} : Q_1 のうち屋外での損失熱量[kW]

Q_2 : シャワー他系統での使用熱量[kW]

Q_3 : 給湯機の生成熱量[kW]

Q_4 : 補給される上水が 0°C 基準で有する熱量[kW]

Q_5 : 貯湯槽を含む熱源側の損失熱量[kW]

T_1 : 貯湯槽温度[°C], T_2 : 機械室内往温度[°C], T_3 : 機械室内還温度[°C], T_4 : 屋外還温度[°C], T_5 : 給水温度[°C]

F_1 : 往流量[L/min] F_2 : 還流量[L/min]

ρ : 水の密度[kg/m³], c : 水の比熱[kJ/kg°C], V : 補給水量[L/min]

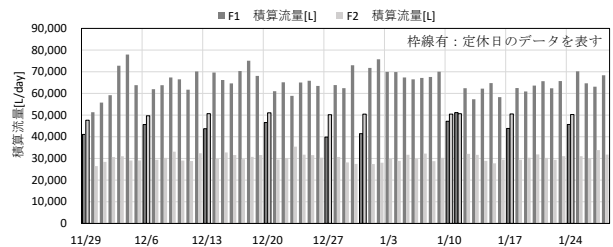


図 4 F_1 、 F_2 日積算値

から、混合栓等から上水が給湯系統に混入していることが疑われる。

(b) 貯湯槽を含まない負荷側の損失熱量 Q_1

Q_1 を Q_{1i} 、 Q_{1o} に分け、日平均外気温とともに日積算値を集約した結果を図5に示す。定休日の Q_{1i} が大きく算出されているのは、図4で示したように定休日の F_2 が大きいためである。定休日を除外し Q_{1i} 、 Q_{1o} と日平均外気温の相関を確認した結果を図6に示す。いずれも日平均外気温が高いほど損失熱量が小さくなるという傾向が見られ、屋外の損失熱量である Q_{1o} が外気温とより強い相関を示したのは妥当な結果であるといえる。

(c) シャワー他系統での使用熱量 Q_2

Q_2 を日単位で積算した結果を図7に示す。外気温との相関は特に見られなかった。 Q_2 が極小、または負となっているのはすべて定休日であり、 $F_1 < F_2$ となることが原因である。

(d) 全体の熱収支

計測期間全体の給湯機の生成熱量 (Q_3)、補給される上水の保有熱量 (Q_4) の和に対し、シャワー他系統で使用される熱量 (Q_2) は65%、負荷側での損失熱量 (Q_1) は23%、貯湯槽を含む熱源側での損失熱量 (Q_5) は12%という割合となった(図8)。

(e) 損失熱量推定式

シミュレーション上で損失熱量を妥当に扱うことを目的として、実測値あるいは計算値が得られるものを説明変数とした回帰式により、損失熱量の推定を試みる。ここまでの分析により定休日と営業日で損失熱量の傾向に差があることがわかっているが、営業日でも営業時間帯(10:00~21:00)か否かで Q_1 の傾向が大きく異なることが確認されたため、表2の通りに時間帯を3区分し Q_{1i} 、 Q_{1o} それぞれに q と ΔT の2つを説明変数として重回帰分析により推定式を作成した。推定式による Q_1 の推定値と実測値を比較した結果を図9に示す。一部範囲で誤差が大きいが、概ね精度よく再現できており、全データ ($n=87,840$) のRMSEは11.48であった。

貯湯槽を含む熱源側での損失熱量 Q_5 については、厳密には Q_1 と発生タイミングが異なると考えられるが、便宜的に Q_1 と Q_5 の期間積算値の比率から Q_1 に定率(12/23)を乗じて設定することとし、 Q_1 、 Q_5 の和を給湯システム全体の損失熱量として計算に組み込む。

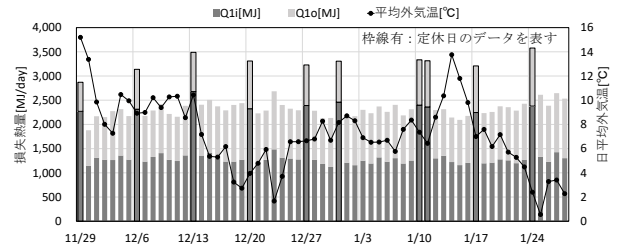


図5 Q_1 日積算値と日平均外気温

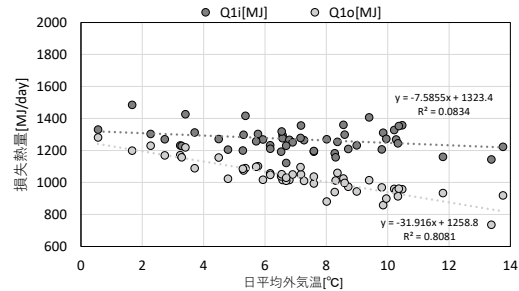


図6 Q_{1i} 、 Q_{1o} 日積算値と日平均外気温の比較

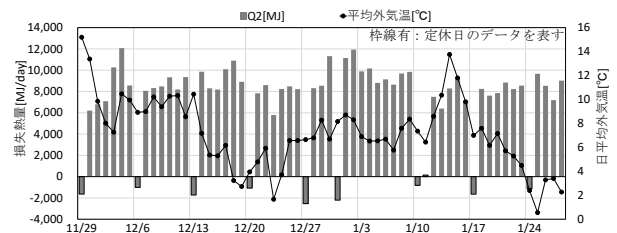


図7 Q_2 日積算値と日平均外気温

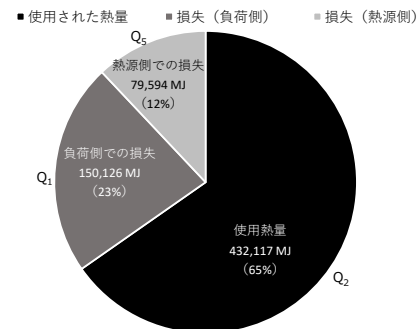


図8 Q_1 、 Q_2 、 Q_5 の比率

表2 時間帯区分と損失熱量推定式

時間帯	推定式
営業日	$Q_{1i} = 0$ ($F_2=0$ の時間帯が多いため) 式7
10-21	$Q_{1o} = -8.313 + 0.086 \times q + 0.286 \times \Delta T$ 式8
営業日	$Q_{1i} = 22.213 + 0.119 \times q + 0.027 \times \Delta T$ 式9
21-10	$Q_{1o} = -17.014 + 0.132 \times q + 0.545 \times \Delta T$ 式10
定休日	$Q_{1i} = 26.486 - 0.195 \times q - 0.005 \times \Delta T$ 式11
	$Q_{1o} = -16.226 + 0.094 \times q + 0.499 \times \Delta T$ 式12

ここに、 q :給湯負荷[L/min]、 ΔT :貯湯槽と外気の温度差[°C]

4 シミュレーション検討

4.1 機器のモデル化

(1) 給湯機

空気を熱源としたヒートポンプ機器は一般に外気温が高くなるほど効率が上昇し、温水の出口温度が高くなるほど効率が低下するという特性を有する。外気温や水温等を説明変数とした多項式によりこのような特性を表現したシミュレーションツールの例として LCEM ツール⁴⁾が挙げられる。

LCEM ツールの空調用空気熱源ヒートポンプの機器特性に関する多項式をベースとし、実測データを用いて係数を調整することで、給湯機の特性を再現する多項式を運転種別ごとに作成した。COP（給湯機の効率を表す指標、加熱能力を消費電力で除して算出する）の推定精度を図 10 に示す。

実測データの分析結果を踏まえ、給湯機の加熱能力は給湯運転中には外気温に応じて 35kW、37kW、40kW のいずれか、保温運転中には 13kW で安定するものとし、加熱能力を COP で除して消費電力を計算する。

(2) 熱交換器

熱交換器の伝熱に関する基礎式を式 13 に示す。熱交換器出入口温度、給湯機流量の実測データを基に、熱交換器の特性を表す伝熱係数 KA を求めた結果、31,596 と同定された。計算上は給湯機の加熱能力が熱交換器での交換熱量に一致するものとし、貯湯槽側流量は給湯運転時には出湯温度設定により変流量、保温運転時には 4,500L/h で一定とした。貯湯槽側入口温度は給湯運転時には上水温度、保温運転時には貯湯槽温度になるものとし、交換熱量および流量、伝熱係数から残り 3 点の温度を計算する。

(3) 貯湯槽

1 質点モデルとして水量収支およびエネルギー収支から残湯量、貯湯槽温度の計算を行う。

4.2 計算フロー

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、水温の関係に基づき給湯機の運転を決定し、電力消費量を計算する。貯湯槽については、給湯機の運転と給湯負荷、損失熱量から次時刻の貯湯槽残湯量、水温を計算する。これらを繰り返して、時系列の計算を行う。

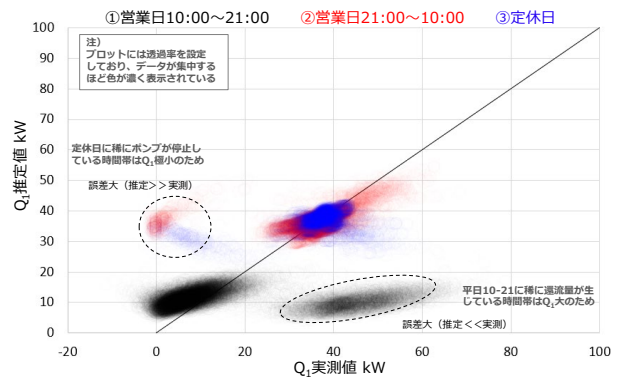


図 9 損失熱量推定式による Q₁ 推定精度

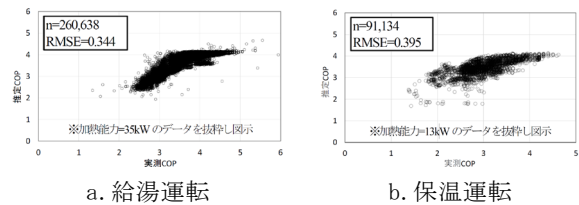


図 10 給湯機 COP 推定精度

$$Q = K \times A \times \Delta T_{LMTD} \quad \text{式 13}$$

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]

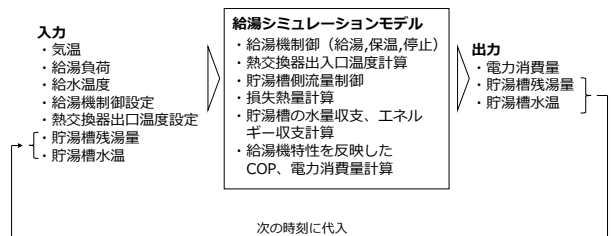


図 11 計算フロー

4.3 DR を想定した運用

電力需給ひっ迫時に電力需要を低減させる「下げ DR」を対象として、DR の 3 時間前に指令を受けてから、貯湯槽温度の維持や湯切れ防止といった制約条件を満たしつつ 3 時間連続の下げ DR を成立させられるかを検討する。

計算は 30 分間隔で行い、High 4 of 5（当日調整あり）により設定されたベースライン⁵⁾に対して DR 時間帯に低減できた消費電力（以下、DR 量）を DR 成否の評価指標とする。

(1) 冬期の下げ DR を想定した検討

12 月 5 日～12 月 26 日を計算期間とし、下げ DR の時間帯は過去の四国エリアの電力需給データ⁶⁾

表3 計算期間とDR日の設定（冬期）

月	火	水	木	金	土	日
12/5	12/6	12/7	12/8	12/9	12/10	12/11
12/12	12/13	12/14 ^{*1}	12/15	12/16	12/17	12/18
12/19 ^{*2}	12/20 ^{*3}	12/21	12/22	12/23	12/24	12/25
12/26 ^{*3}	下げDRの時間帯 *1:17:00～20:00 *2:16:00～19:00 *3:9:00～12:00					

から冬期に予備率が低くなりやすい、すなわち需給ひっ迫が生じやすい時間帯を確認したうえで複数パターンを設定を行うことを意図して計4回の下げDRを設定した（表3）。

通常日の日中（9:00～20:00）に給湯機が稼働していなければ、DR実施日に給湯機を停止できたとしても下げDRが成立しない。そのため、通常日は主に日中に貯湯を行う設定とした（表4）。給湯負荷（図3a）や外気温は実測値を入力条件とし、計算開始時の初期条件は残湯量 40,000L、貯湯槽温度 60℃とした。

期間中設定した計4回の下げDRについて、DR量の計算結果を図12に示す。DR対象の時間帯のほとんどで給湯機を停止させられ、電力消費量が生じていないことがわかる。12月20日の10:30～12:00は保温運転を行わざるを得ず、他と比べてDR量が低下した。24コマの平均値は107.8kW、最低値は79.8kWであった。ベースラインが若干変動しているのは外気温による給湯機のCOP変動が計算に含まれているためである。残湯量・貯湯槽温度の計算結果は図13に示す通りで、湯切れを生じさせず、貯湯槽温度を60℃以上に維持できていることがわかる。

(2) 夏期の下げDRを想定した検討

8月1日～8月25日を計算期間とし、この間6回の下げDRが生じるものとして設定した（表5）。下げDRの時間帯は過去の四国エリアの電力需給データ⁶⁾を参照し、前項と同様に需給ひっ迫が生じやすい時間帯を確認したうえで複数パターンの設定を行うことを意図した。冬期と比べ午前中の給湯負荷が少ない日が多く、午前中の給湯運転が行われにくいと考えられたため、前項での給湯機の運用設定（表4）から、通常日9:00～20:00に貯湯運転を開始する残湯量を90%に変更することとした（表6）。給湯負荷（図3b）や外気温は実測値を入力条件とし、計算開始時の初期条件は残湯量 40,000L、貯湯槽温度 60℃とした。

期間中設定した計6回の下げDRについて、DR

表4 運用方法についての設定（冬期）

区分	運用方法
通常日	<ul style="list-style-type: none"> 9:00～20:00 残湯量 80%未満で貯湯運転開始 貯湯槽入口 80℃設定 20:00～9:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始 60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
定休日	<ul style="list-style-type: none"> 前日 22:00～22:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
DR日	<ul style="list-style-type: none"> DR3h前に貯湯運転開始 貯湯槽容量100%で停止、満水の場合保温運転に切替 DR時間帯は残湯量 20%未満で貯湯運転開始 その他の時間帯は通常日および定休日の設定を適用

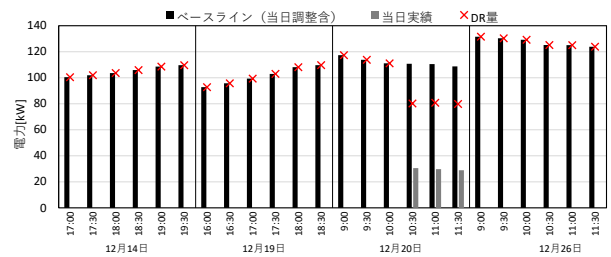


図12 DR量の評価結果（冬期）

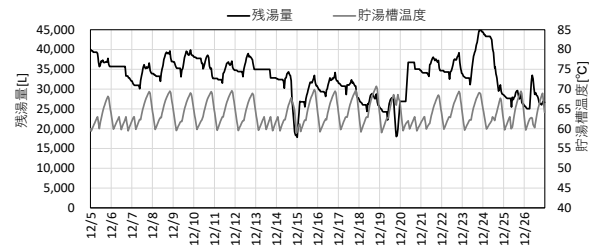


図13 残湯量・貯湯槽温度計算結果（冬期）

表5 計算期間とDR日の設定（夏期）

月	火	水	木	金	土	日
8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6	8/7
8/8 ^{*1}	8/9 ^{*1}	8/10	8/11	8/12	8/13	8/14
8/15 ^{*2}	8/16 ^{*2}	8/17	8/18	8/19	8/20	8/21
8/22	8/23 ^{*1}	8/24	8/25 ^{*2}			

下げDRの時間帯 *1: 9:00～12:00 *2: 17:00～20:00

表6 運用方法についての設定（夏期）

区分	運用方法
通常日	<ul style="list-style-type: none"> 9:00～20:00 残湯量 90%未満で貯湯運転開始、貯湯槽入口 80℃設定 20:00～9:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
定休日	<ul style="list-style-type: none"> 前日 22:00～22:00 残湯量 40%未満で貯湯運転開始、60%回復で停止 貯湯槽温度 60℃未満で保温運転開始、63℃到達で停止
DR日	<ul style="list-style-type: none"> DR3h前に貯湯運転開始 貯湯槽容量100%で停止、満水の場合保温運転に切替 DR時間帯は残湯量 20%未満で貯湯運転開始 その他の時間帯は通常日および定休日の設定を適用

量の計算結果を図 14 に示す。DR 対象の時間帯のほとんどで給湯機を停止させられ、電力消費量が生じていないことがわかる。給湯機が稼働した 8 月 9 日、23 日はいずれも貯湯槽温度が 60℃を下回り保温運転が行われていた。外気温の差により夏期の方が COP が高い分、冬期と比べ給湯機の消費電力が減少したため DR 量も減少し、36 コマの平均値は 68.2kW、最低値は 50.6kW であった。残湯量・貯湯槽温度の計算結果は図 15 に示す通りで、湯切れを生じさせず、貯湯槽温度を 60℃以上に維持できていることがわかる。

5. まとめ

本報では、主にシミュレーションにより貯湯槽を有する給湯システムを下げ DR に用いる可能性を評価した。冬期・夏期の下げ DR への適用を想定した検討では湯切れ防止、貯湯槽温度の維持といった制約条件を満たしたうえで一定の DR 量を抛出できるという結果が得られた。

【謝辞】

本研究は、四国電力㈱土木建築部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：「改正省エネ法におけるディマンドリスポンス（電気の需要の最適化）の促進について」, 2022.11
- 2) 福庭彬大, 住吉大輔, 天野雄一郎, 藤井良平：「建築設備を活用した電力需給調整に関する研究（その 6）水蓄熱槽を利用した電力需給調整の手法検討と広域ポテンシャルに関する研究」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9
- 3) 藤井良平, 天野雄一郎, 赤井仁志, 猪俣海斗：「建築設備を活用した電力需給調整に関する研究（その 7）給湯システムを活用した需給調整に関するケーススタディ」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：「ライフサイクルエネルギーマネジメント（LCEM）」, https://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html

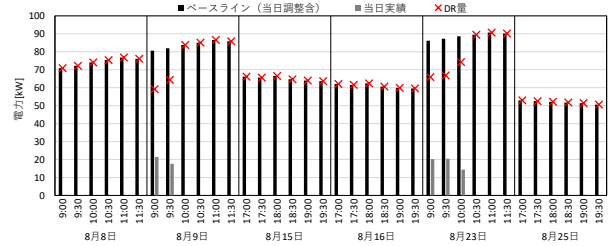


図 14 DR 量の評価結果（夏期）

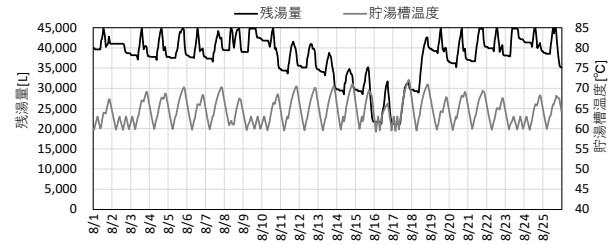


図 15 残湯量・貯湯槽温度計算結果（夏期）

- 5) 経済産業省資源エネルギー庁：「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するガイドライン（令和 2 年 6 月改訂版）」, 2020.6
- 6) 四国電力送配電株式会社：需給関連情報（需給実績）の公表について, https://www.yonden.co.jp/nw/renewable_energy/data/supply_demand.html

最後に執筆者、編集ならびに審査にあられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研究期報 第118号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 塚本正敏
株四国総合研究所

発行 株四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
TEL (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@sken.co.jp