

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06327

研究課題名(和文) 既存中・小規模建築物におけるセントラル空調システム効率向上のためのシステム開発

研究課題名(英文) A Study on Energy Efficiency of HVAC System for Small or Middle Scale Existing Building

研究代表者

尹 奎英 (Yoon, Gyuyoung)

名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・准教授

研究者番号：80437079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：実際の簡易蓄熱槽を構築して実測実験を行い、その蓄放熱性能を評価した。簡易蓄熱槽は、体積1m<sup>3</sup>となる小型の水槽を用いており、蓄熱量は約20MJ～30MJとなることがわかった。また、熱伝導と移流を考慮する数値解析モデルを作成し、実測実験から得られた蓄放熱性能と比較検討を行った。その結果、開発した数値モデルは高い精度で簡易蓄熱槽の熱的挙動を再現できることを確認できた。シミュレーションにより、本提案システムの導入による省エネルギー効果を明らかにできた。提案システムを導入することで、空調システムのエネルギー消費量を約30%低減でき、システムCOPは約70%向上できることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：I constructed an actual simplified thermal storage tank and measured the thermal performance of the tank. The simple thermal storage tank uses a small water tank with a volume of a cubic meter. A numerical analysis model that considers heat conduction and water flow inside the tank was developed and compared with the measurement results from the experiment. By comparing the results of the numerical analysis model with the actual measurement results, the accuracy of the model could be confirmed then the accuracy was improved. A simulation model of the air conditioning system including the developed numerical analysis model was constructed and it was confirmed that the proposal system could achieve the energy saving by 30% around and 70% of system efficiency improvement.

研究分野：建築環境設備工学

キーワード：小型水蓄熱槽 既存空調システム 効率向上

## 1. 研究開始当初の背景

1) 中・小規模の既存建物の空調システムに対する省エネ対策が強く求められている。

近年、日本の最終エネルギー消費実態を鑑みて、民生部門、特に、空調分野における省エネ対策は緊急の事案である。また、既存建物のストックを規模別にみると、1,000m<sup>2</sup>未満の小規模建物が全体の約9割を占める。そのために、平成20年5月の省エネ法改正においても、事業者単位で法規制が課せられることや300m<sup>2</sup>以上の建築物までに法適用の範囲を広げたのもこれの現れである。

2) 省エネ意識の向上・節電行動により、建物の内部発熱(照明・OA機器)減少が著しい。

省エネ意識の向上・節電行動により、建物の内部発熱(照明、OA機器)の減少が急速に浸透しており、冷房負荷減少・暖房負荷増大が起きている。これを受けて、冷房運転時の部分負荷効率改善及び暖房運転時の運転効率向上が今まで以上に要求されるようになった。

一般に空調システムは、負荷率50%以下の運転時間が年間の約70%以上を占めるとされており、前述の内部発熱減少は、特に冷房運転時の部分負荷運転時間をさらに長くし、低負荷運転時の効率低下は大きくなると予想される。

3) 中・小規模建物の空調システムにおけるエネルギーマネジメントは皆無に近い。

中・小規模建物の空調システムは、スケールの小ささから経済面での制約を大きく受けて、システムのエネルギーマネジメントは皆無に近い状態である。このような現状のゆえ、上記の内部発熱減少に対応したエネルギーマネジメントの実施は到底不可能であり、運転効率の低下は否めない。

4) 既存の空調システムに適用可能なシステムの提案が必要である。

中・小規模建物の空調システムへの適用を実現するためには、シンプルで適用が非常に容易なシステムでなければならない。適用が考えられる既往の提案技術は国内外問わず多数存在する。顕熱・潜熱蓄材を熱媒にして日単位の熱負荷平準化を図るシステムや、二次側の負荷予測が必要な場合もあり、中・小規模の既存建物空調システムには適していない。これらのことから、既往の提案技術は、中・小規模建物の既存空調システムへの適用は容易な技術とはいえない。

## 2. 研究の目的

本研究提案は、中・小規模建物における既存セントラル空調システムの効率向上のためのシステム開発である。空調システムのバイパス配管に簡易蓄熱槽を装着し、負荷平準化を図り空調システムの運転効率向上を目指す。これより、中・小規模建物の既存空調システムの低負荷運転時の効率改善を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

1) 簡易蓄熱槽の構築と蓄放熱性能評価

簡易蓄熱槽は、本提案システムの核心となる要素である。実際の簡易蓄熱槽を構築して、実測実験を行い、その蓄放熱性能を評価する。簡易蓄熱槽は、体積1m<sup>3</sup>となる小型の水槽を用いており、PCMを投入して蓄熱量の増大をはかる。また、PCMの配置を工夫して蓄放熱性能を向上できる配置を事前に検討する。

2) 簡易蓄熱槽の数値解析モデル化と精度検証

簡易蓄熱槽に対して熱伝導と移流を考慮する数値解析モデルを作成する。また、実測実験から得られた蓄放熱性能と比較検討を行い、数値解析モデルの精度を確認・向上をはかる。

3) 提案システムの有効性検証

上記の簡易蓄熱槽における数値解析モデルを含む空調システムのシミュレーションモデルを構築し、本提案システムの導入による省エネルギー効果を検証する。

## 4. 研究成果

1) 簡易蓄熱槽の構築と蓄放熱性能評価

図1に簡易蓄熱槽の概念図を示す。槽の大きさは一辺が1mとなる立方体を基本ユニットとする、小型の温度成層型蓄熱槽を想定する。槽内の水位は80cmとしている。

また、蓄熱槽への流入水の流速を抑えるため、流入及び流出口にはディフューザーを設置する。PCMは56枚設置し、一段に8枚のPCMを配置してそれらが互いに重なり合うように7段重ねた。この配置は、CFDによる事前検討の結果を反映したものであり、PCMの水平配置が流入水の流速を遅らせて温度成層を乱さないことがわかったためである。

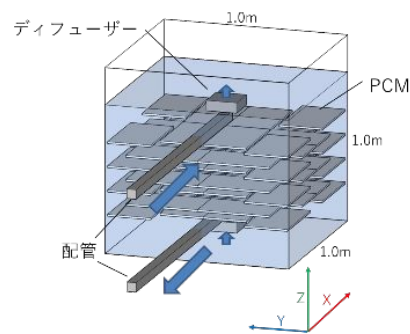


図1 簡易蓄熱槽の概念図

図2に簡易蓄熱槽の実験装置概念図を示す。図示の実験装置は、簡易蓄熱槽の蓄熱と放熱性能を評価するために、蓄熱運転と放熱運転を切り替えながら蓄熱槽への往還温度、流量を測定する。

温度計測点は槽内の平面上に3点、鉛直方向にそれぞれ5点の合計15点と、槽上部と下部に接続する配管に設置した。蓄放熱には37.5kWの空冷ヒートポンプチャラーを接続し、バルブ切り替えによって槽流入方向を切り替える。流量は既報でのR値モデルを利用し

た検討から、200, 160, 120 L/min の 3 パターンとし、チラー出口付近のバルブによって調節した。

実験開始前の初期状態として、槽内及び接続配管内を 45 に調節する。その後配管回路を循環回路とした状態でチラーを暖房運転させ、T1 の温度が 50 となった時点で蓄熱回路へと切り替える。T3 の温度が 49 となった時点で満蓄とし、循環回路へと切り替えると同時にチラーを冷房運転とする。

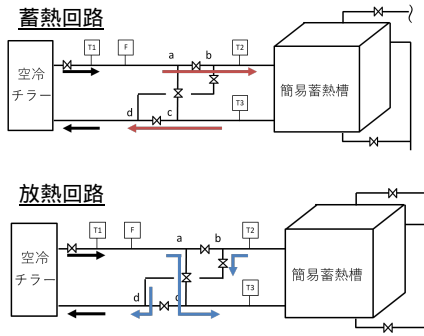


図 3 実験装置概要と配管回路

図 4 に実測実験の結果を示す。なお、流入流量 200 L/min のケースのみを示し、他のケースの結果は割愛する。

各流量における全ての温度計測点の温度変化を示しており、(a)は PCM なし、(b)は PCM ありである。蓄熱開始時、放熱開始時共に、槽内流入水 (T2, T3) の温度が大きく変動しているが、これは槽内冷水がチラーへと一気に流れ込むためである。槽内温度変化を見ると、流量が少ないほど槽出入口温度 (T2, T3) の差は大きく、より多くの熱量を蓄放熱していることが分かる。

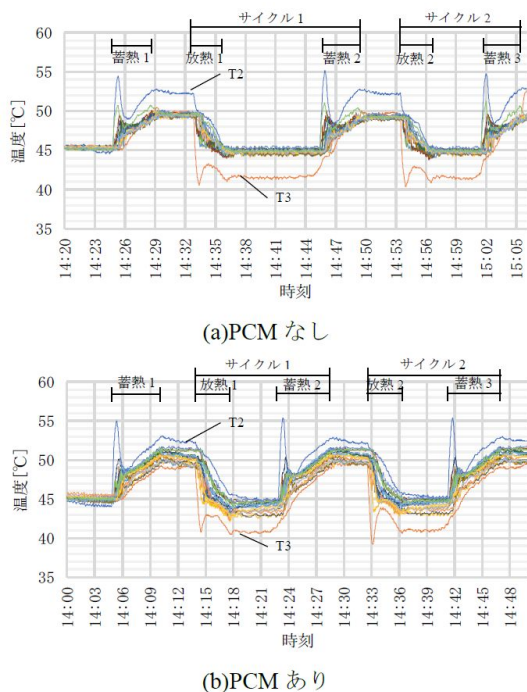


図 4 実測実験結果 (流量 200 L/min)

表 1 に各サイクルの蓄放熱量を示す。蓄放熱のサイクルは図 4 を参照されたい。本検討では、最初の蓄熱運転を除き、1 回目の放熱運転から蓄熱運転までの 1 サイクル、2 回目の放熱・蓄熱運転を 2 サイクルと定義して、評価した。蓄放熱のバランス (a/b) を確認した結果、全ての検討パターンにおいて 1 に近い値となり、安定した蓄放熱を行うことができていていることを示している。

蓄放熱量は流量 200 と 160 L/min においては PCM ありの方が向上しているが、120 L/min ではほぼ変化がないことを確認した。PCM を入れることによる温度成層化の促進効果と蓄放熱量の増加は、流量が多いほど強くみられた。逆に 120 L/min のような低流量では PCM の有無による差がほとんどないことが確認できた。

以上より、簡易蓄熱槽の蓄放熱量は流入する温水流量によりことなるが、約 20MJ から 30MJ となることがわかった。また、今回のように PCM を投入したことで、流量の多いケースにおいて蓄放熱量が整流効果により向上されることが確認できた。

表 1 簡易蓄熱槽の蓄放熱量性能評価

流量 [L/min]	PCM なし				PCM あり			
	#1 #%	放熱量 b[MJ]	蓄熱量 a[MJ]	a/b	#1 #%	放熱量 b[MJ]	蓄熱量 a[MJ]	a/b
200	1	14.3	13.6	0.95	1	19.7	21.2	1.07
	2	13.7	14.3	1.05	2	18.7	20.8	1.11
160	1	18.8	19.4	1.03	1	21.9	22.9	1.05
	2	18.7	19.9	1.07	2	22.3	23.4	1.05
120	1	32.5	34.3	1.06	1	29.6	30.2	1.02
	2	31.9	29.2	0.91	2	29.3	30.1	1.03

## 2) 簡易蓄熱槽の数値解析モデル化と精度検証

図 5 に簡易蓄熱槽における数値解析モデル図を示す。PCM との伝熱を考慮した簡易蓄熱槽の非定常解析モデルを作成した。簡易蓄熱槽を単純化し、高さ Z 方向に 11 個のセルに分割した 2 次元モデルとした。各セルの高さは実際の PCM の設置間隔 (40mm) に基づいて設定している。ディフューザーから水面もしくは槽底部までの範囲は完全混合となることが予想されるため、一つのセルとしている。モデルの奥行き Y は、水と PCM の接する伝熱面積が実情と一致するようにし、幅 X は水と PCM それぞれについて実際の容積と整合するようにした。

伝熱計算は、水だけのセルでは移流のみを考慮し、PCM と隣接するセルでは、移流の他に PCM の熱量変化、水と PCM 間に伝熱を考慮した。PCM の温度は PCM の保有熱量と温度のプロフィールを用いて保有熱量を温度に置き換えて与えた。

PCM の影響を受けると考えられる層 (n=2~10) において、通常の移流に加えて上下のセルを行き来する流れを追加した。その流量はセルに流入する流量と同量としている。こうすることで、槽流入流量の増加による蓄熱性能低下を再現することが可能となっている。

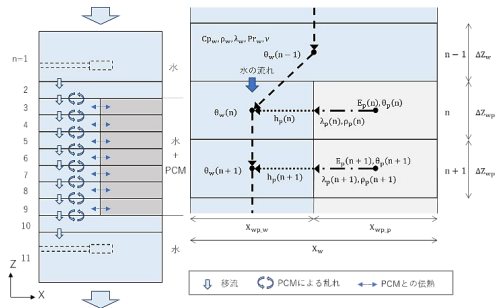


図5 簡易蓄熱槽の数値解析モデル概念図  
以下に、簡易蓄熱槽内の熱収支式を示す。

・PCMの影響を受けない層(n=1, 11)

$$n=1 \quad \theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) + \frac{C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma}$$

$$n=11 \quad \theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) + \frac{C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n-1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma}$$

・PCMの影響を受ける層(n=2-10)

移流による温度変化

$$n=2 \quad \theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) + \frac{C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n-1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma} + \frac{C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n+1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma}$$

$$n=3-9 \quad \theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) + \frac{2C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n-1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma} + \frac{C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n+1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma}$$

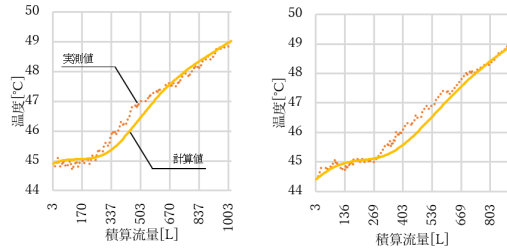
$$n=10 \quad \theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) + \frac{2C_{p,w} \rho_w Q (\theta_w^0(n-1) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma}$$

伝熱による温度変化

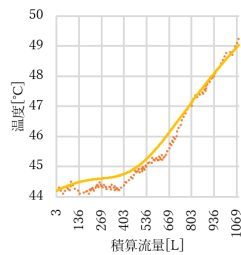
$$\theta_w^0(n) = \theta_w^0(n) - \frac{(\theta_w^0(n) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{C_{p,w} \rho_w X_w \Delta Z_w \gamma \left( \frac{1}{\lambda_w^0(n)} + \frac{\lambda_{w,p}}{2\lambda_p^0(n)} \right)}$$

PCMの熱収支

$$E_p^0(n) = E_p^0(n) + \frac{-(\theta_w^0(n) - \theta_w^0(n)) \Delta t}{\rho_w X_w \Delta Z_w \gamma \left( \frac{1}{\lambda_w^0(n)} + \frac{\lambda_{w,p}}{2\lambda_p^0(n)} \right)}$$



(a) 200 [L/min] (b) 160 [L/min]



(c) 120 [L/min]

図6 数値モデルの精度検証

簡易蓄熱槽の実物大模型を作成し、数値モデルの応答を比較した。流量は200, 160, 120 L/minの3パターンである。図6 (a)~(c)に槽内温度を45℃とした状態からの蓄熱運転を行った際の槽出口温度の応答を比較している。どの流量においても概ね実験値に近い値を得ることができていることが分かる。また、放熱時に関しても実験値に近い結果を得ることができている。

また、実測値に対する数値モデルの蓄放熱量誤差を確認した結果、全ての流量において誤差は5%未満に収められており、その精度は十分であることが認められた。

### 3) 提案システムの有効性検証

前述の簡易蓄熱槽数値モデルを含む空調システムのシミュレーションモデルを構築し、本提案システムの省エネ性能を検討した。

まず、本検討のために、モデル建物を想定した。想定建物は、東京所在の基準階面積約500 m<sup>2</sup>、延床面積5,000 m<sup>2</sup>の10階建て事務所ビルである。

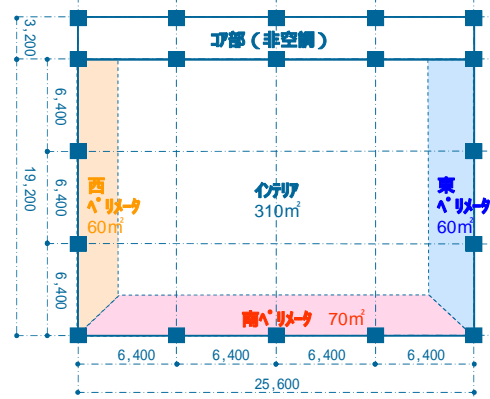


図7 モデル建物の基準階平面図

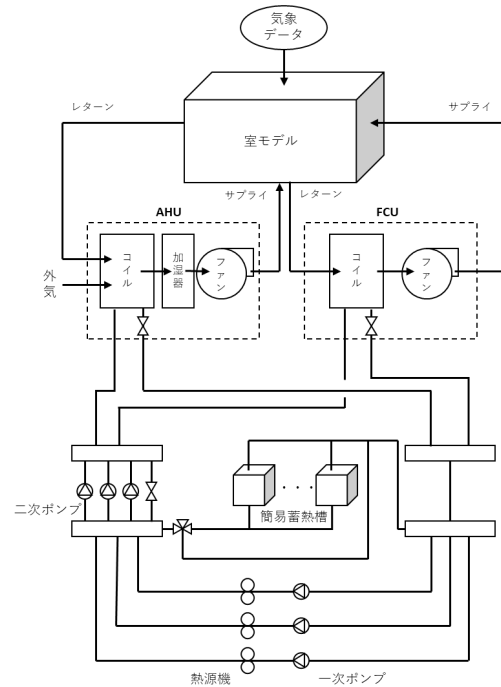


図8 構築した空調システムのシミュレーションモデル

表2 熱負荷条件

期間	冬期(12~3月)	
室内条件	・温度 22	
	・湿度 40%Rh	
空調時間	8時~21時(8時~9時は予熱運転)	
内部発熱等	・照明 20W/m <sup>2</sup>	・在室者 0.2人/m <sup>2</sup>
	・機器 20W/m <sup>2</sup>	・外気導入量 25 m <sup>3</sup> /h・人

図7に基準階平面図、表2に熱負荷条件を示す。空調時間は8~21時であり、8時から1時間の予熱運転を行う。ここには暖房期間内の12月2日のみの結果を示す。

空調システムは熱源として空冷ヒートポンプチャラーを用い、一次ポンプは定流量、二次ポンプは変流量方式としている。また、空調二次側システムは空調機とファンコイルユニット(以後、FCUと記す)からなる水空気方式とした。

図8に構築したシステムモデルの概念図を示す。室モデルを含む空調システム全体をシミュレーションの対象とし、室温を計算しながら、空調搬送機器や熱源機器のエネルギー消費量を算出するモデルである。

バイパス配管には簡易蓄熱槽を6ユニット(熱源機の温水流量86 $\frac{m^3}{min}$ に対して、1ユニットあたり約143 $\frac{m^3}{min}$ となる)設置している。また、蓄熱運転時に熱源還り水温低下に起因する熱源機運転台数の増加を避けるため、三方弁によってバイパス流量の一部は簡易蓄熱槽を経由しないようにした。こうすることで、蓄熱運転開始直後に熱源機運転台数を増やすことなく、運転を行うことができる。

空調機は変風量方式とし、室温に応じて風量を変動させて、コイル温水量は給気温度を一定に保つように調節している。外気導入は在室人数に対して必要な外気量を導入している。ただし、予熱運転時間は外気導入をカットすると同時に室温緩和を行った。FCUは定風量方式とし、室温に応じて変流量制御とした。

ここで、簡易蓄熱槽のユニット数を変更することによるシステムの省エネ性能への影響を検討した。ユニット数を減少させた場合、1ユニットあたりの流入流量が増加し、蓄熱性能の低下が起こる。そのためユニット数は可能な限り多くすることが望ましいが、既存建物の設置可能スペースやイニシャルコストを考えると、ユニット数を減少させたときの省エネ性能を把握する必要がある。そこで今回は6ユニットに加えて4ユニットの場合のシミュレーションも行い、槽流入流量増加がシステムの省エネ性能に与える影響を検討する。なお、既報3)でR値モデルによる計算手法を用いて、簡易蓄熱槽の十分な蓄熱性能を確保するため、1ユニットあたりの流入流量の上限は200 $\frac{m^3}{min}$ としている。

図9にシミュレーションで得られたエネルギー消費量とSCOPの比較を示す。従来システムに比べて提案システム(6ユニット)の熱源機のエネルギー消費量は約30%減少し、一次ポンプのエネルギー消費量も減少している。これは簡易蓄熱槽の蓄熱時に熱源機が高い負荷率で運転を行い、放熱時には運転を停止させることができたためである。

SCOPは70%向上している。また、ユニット数の異なる提案システム同士を比較すると、4ユニットの方がエネルギー消費量は増加し、

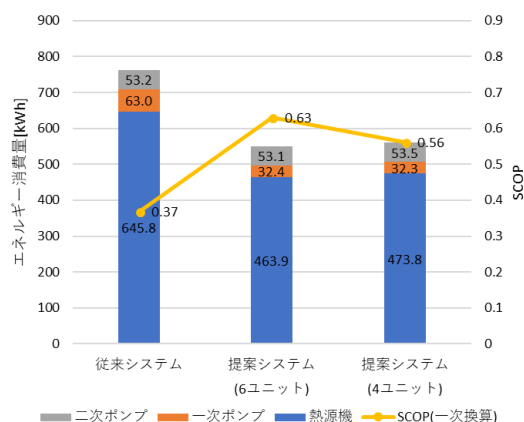


図9 各ケースのエネルギー消費量とシステム COP 比較

SCOPも低下しているが、その差はわずかである。なお、各機器の発停にかかる負荷は今考慮していない。よって、簡易蓄熱槽のユニット数減少による蓄熱性能の低下がシステムの省エネ性能に与える影響は少ないことが分かった。

以上より、本提案システムの省エネルギー効果は確認できた。また、簡易蓄熱槽の設置個数はその省エネ効果に大きな影響を与えず、熱源機器の冷水流量、設置コストを考慮して必要最小限の個数に設定することが望ましいことがわかった。

今後は、構築できたシミュレーションモデルを用いて異なるCOP特性を有する熱源機器について導入した際の効果を検討する。また、提案システムの設計及び運用指針をまとめて実際のシステムへの適用、そしてその普及に努めていく予定である。

#### <引用文献>

- 1) 下田吉之、建築エネルギーモデルの地域スケールへの展開、緊急講演会名古屋ワークショップ、平成23年5月
- 2) 空気調和システムのライフサイクルエネルギーマネジメントガイドライン、国土交通省、平成22年5月
- 3) 非住宅建築・設備の省エネルギー技術指針、空気調和・衛生工学会省エネルギー委員会、平成21年3月
- 4) 柴広有ほか、蓄熱式冷凍サイクルの運転方法、特開2001-2278371) 樋津ら：CFD解析による鉛直流入型ディフューザーを有する温度成層型水蓄熱槽に関する検討 流量変化と槽内水位が蓄熱性能に及ぼす影響、日本建築学会近畿支部研究報告集、2014.5, pp.245-248
- 5) 横田ら：中温度潜熱蓄熱槽の蓄放熱シミュレーション その2、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2012.9, pp.2633-2636

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Kenta Maruyama, Gyuyoung Yoon and

Takeshi Watanabe : A Study on Energy Efficiency Improving method of Existing Air Conditioning System by Using a Simple Thermal Energy Storage Tank  
IBPSA Asia Conference Asim 2016 Jeju, Korea 1-9 2016年11月

〔学会発表〕(計 5 件)

丸山健太、尹奎英、渡邊剛：簡易蓄熱槽を用いた既存空調システムの省エネ化に関する研究 第5報 実測実験による簡易蓄熱槽内温度分布の分析、日本建築学会東海支部研究報告集 2018年2月

丸山健太、尹奎英、渡邊剛：簡易蓄熱槽による既存空調システムの運転効率改善手法に関する研究(第6報)シミュレーションによるシステム導入効果の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会 2017年9月

丸山健太、尹奎英、渡邊剛：簡易蓄熱槽を用いた既存空調システムの省エネ化に関する研究 第4報 熱源機のオンオフ運転を考慮した提案システムの有効性検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 2017年8月

丸山健太、尹奎英、渡邊剛：簡易蓄熱槽を用いた既存空調システムの省エネ化に関する研究(第5報)空調二次側システム及び室温モデルを含むシミュレーションモデルによる検討、空気調和・衛生工学会中部支部学術発表会 第18号 2017年3月

丸山健太、尹奎英、渡邊剛：簡易蓄熱槽による既存空調システムの運転効率改善手法に関する研究(第4報)シミュレーション結果とPCM配置方法の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会 2016年9月

取得状況(計 1 件)

名称：水冷式空調システム及びその運転制御方法

発明者：尹奎英、渡邊剛

権利者：尹奎英、渡邊剛

種類：

番号：特願 2012-230395

取得年月日：2014年5月8日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

尹奎英 (Yoon, Gyuyoung)

名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・准教授

研究者番号：80437079