

既製ドラム缶を用いた雨水と地中熱による自然冷房の実験研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON NATURAL COOLING SYSTEM BY RAINWATER AND UNDERGROUND HEAT WITH READY-MADE DRUMS

市川尚紀 ——— * 1 崔 軍 ——— * 2

Takanori ICHIKAWA — * 1 Jun CUI ————— * 2

キーワード:

自然エネルギー, 木造住宅, 雨水, 地中熱

Keywords:

Natural energy, Wooden house, Rainwater, Underground heat

A study on natural cooling system by rainwater and underground heat with ready-made drums in a wooden experimental house is as follows. First, the temperature of rainwater before an experiment was about 15 degrees. Next, water temperature withdrew to about 16 degrees by underground heat in about 3 days after experiment. As a result of having used control of pump and tank, the room temperature maintained 24 - 29 degrees. And PMV maintained less than ± 1 . But, only by control of tank, we cannot continue this system.

1. はじめに

近年、建物運用時の二酸化炭素排出量を削減することが求められ、太陽光発電パネルや高効率の設備機器による省エネルギー建築が次々と誕生し、夏と冬の冷暖房効率が飛躍的に向上している。しかしながら、経済産業省資源エネルギー庁のエネルギー白書¹⁾によると、民生部門の消費エネルギーは今も増加の一途をたどっているという。この要因の一つに、機器の性能向上によるエネルギー削減よりも、機器の増加によるエネルギー消費量の増加が上回っていることがあげられる。そうしたことから、建物の気密性や断熱性の向上に加え、太陽熱や地中熱、風力といった自然エネルギーを有効に利用する省エネルギー技術の普及が重要視されている。

室内環境を調節するための自然エネルギーには、太陽熱や地中熱だけでなく、わが国独特の気候要素の「雨水」も考えられる。水の比熱はコンクリートの約5倍(熱容量は約2倍)もあり、熱を蓄えるには最も適した物質である。しかし雨水は、庭や屋根の散水または中水として利用される程度で、これまで室内の冷暖房には直接使われることはなかった。そこで、建物に降った「雨水」を貯めて、これまでの雨水利用としても使いながら、なおかつ「太陽熱」と「地中熱」の熱利用媒体としても使う、新たな自然冷暖房システムの開発ができないかと考えた。原理的には、配管系を閉鎖系にして水道水を利用することも考えられるが、これまでの雨水利用装置と本システムを併用できれば、自然エネルギー利用のためのインシヤルコストを低減でき、なおかつ、都市型洪水抑制、地下水涵養、その他様々な雨水利用効果を期待できると考えた。

本研究では、実物大の木造実験住宅を用いて「地中熱で冷やした雨水による冷房(夏)」と「太陽熱で温めた雨水による暖房(冬)」のシステムを構築し、その効果を定量的に把握することとする。既報²⁾では、冬は雨水を太陽熱温水器によって温め、夏は地中熱によって冷やし、それを床冷暖房配管に流した時の効果について報告した。その結果では、冬の床暖房効果が若干認められたものの、夏冬ともに室温を調節するまでは至らなかった。そこで、熱交換器を

ファンコイルユニット(FCU)に変更し、雨水保温・保冷タンクを増設、さらに、室温や水温を感知してシステムの稼働を自動制御できるように改良した。本報告では、この改良したシステムで夏季の冷房実験を行った結果について考察することとし、太陽熱による自然冷房効果については次報に譲る。

地中熱利用技術には垂直型と水平型があり、垂直型には、総長100~150mのボーリング孔を利用するボアホール方式や、建物の基礎杭(5~30m程度)を利用する杭方式があり、水平型には、浅層(1.0~2.5m)の地中にチューブを埋設する方式がある。また、埋設したチューブに空気を循環させるタイプと水を循環させるタイプがある。本システムは垂直型の水循環タイプであり、この方式に関する類似の実験研究として岩澤ら³⁾や奈良ら⁴⁾の報告があるが、本システムは浅層のボーリング穴に雨水で浸した既製品のドラム缶を埋設し、その冷熱を利用する点で異なる。

2. 実験住宅概要

この研究に用いる木造実験住宅は、広島県東広島市の近畿大学工学部キャンパス内に建てられている。設計は著者らが行い、建物本体は2008年1月に竣工し、その後、システムの改良を続けながら実験を行い、現在に至る。建物は木造在来構法の総2階建てで、実験を行う部屋は建物西側の1階の部屋(9畳)である。部屋の窓は南と北面のみで、その他、建物の仕様は図1のとおりである。

3. システム概要

本システムの系統図を図2に示す。このシステムを構成する装置は次のとおりである。まず、屋根に降った雨水の初期降雨は大気中の埃が混ざるために、これを排除するための雨水分水器^{注1)}(a)を縦樋下部に設置した。この雨水を、建物の基礎を利用したコンクリート造の雨水貯留槽(b)(約4トン)に貯留する。そして、この雨水を雨水保温・保冷タンク(d)へオーバーフローさせ地中熱で冷やす。このタンクは、スチール製の既製ドラム缶(600φ×900h)を

¹⁾ 近畿大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)
(〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺1番)

²⁾ 近畿大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

¹⁾ Assoc. Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kinki Univ., Ph. D.

²⁾ Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kinki Univ., Dr. Eng.

溶接によって縦に連結したものである。それは、地中熱を雨水に伝えるために適した素材で、既製品のため低価格で入手できるからである。さらに、このタンクの埋設は、電柱を敷設するために用い

る重機を使って約半日で施工できる。既報²⁾では1基のみで実験を行ったが、今回は既存のタンクとは別に4基のタンクを増設し、その長さも4.5m(ドラム缶600φ×900h×5缶)から5.4m(6缶)に延長した。そして、この雨水を実験室内に新設したファンコイルユニット(f)に循環させるシステムとなっている。その他の仕様は図2のとおりである。なお、この雨水貯留槽(b)と雨水保温・保冷タンク(d)には太陽光があたらず、地下のため温度が比較的安定していることから、建物が竣工してから6年間の間、雨水の入れ替えやタンクの掃除をしていないが、藻類等の発生はみられない。

さらに本システムでは、タンク内の水温が一定温度まで上がると、自動的に次のタンクへ切り替えられるように制御盤を設け(e)、また実験室の室温が一定温度以下になるとポンプが停止、一定温度以上になるとポンプが再稼働するように電磁弁を設けた。

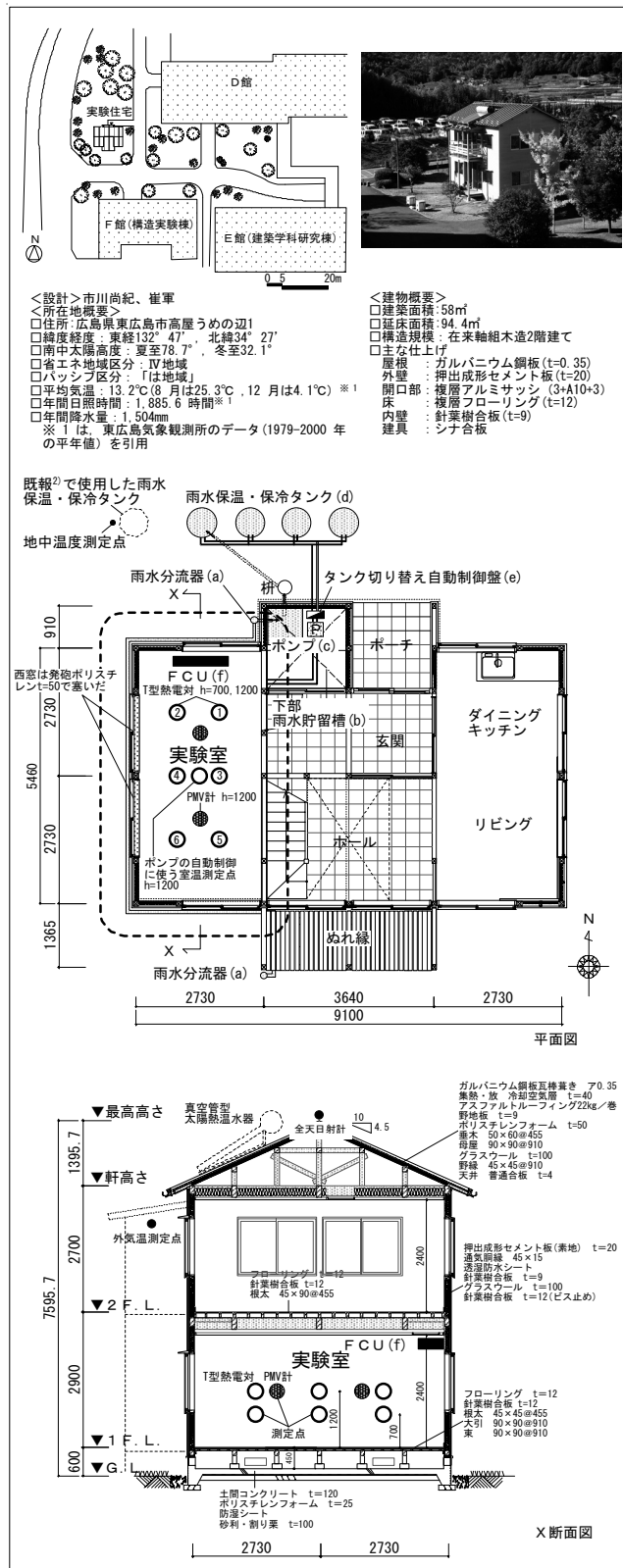


図1 実験住宅概要

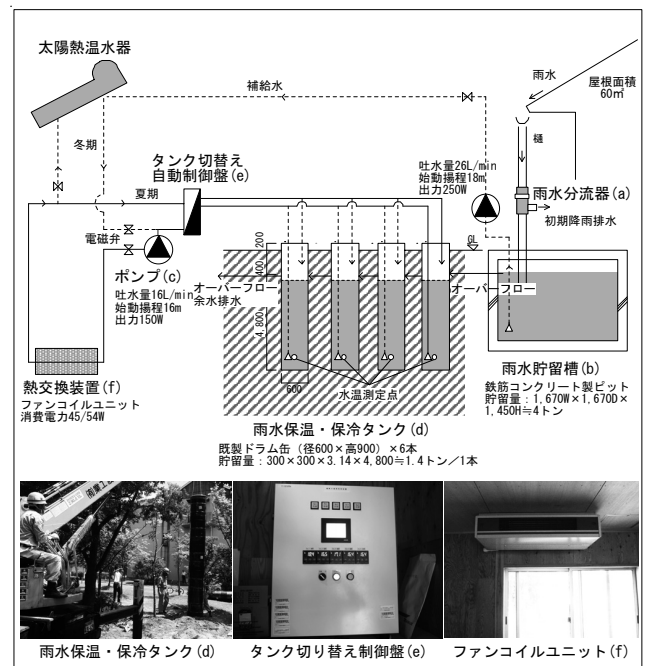


図2 自然冷房システム図

4. 実験方法

本実験の実測条件を表1に、測定項目と使用機器を表2に、測定点の位置を図1に示す。実測内容は以下のとおり。

- (1) 地中温度・水温の測定：地中温度は、既報²⁾の実験時に地中に埋設した熱電対を用いてG.L. -1m、-2m、-3m、-4mの地中温度を測定する(図1)。本実験では、この熱電対近くのタンクを使用しないため、タンク内の雨水の温度による地中温度への影響はないと考える。また、雨水保温・保冷タンク4基すべての雨水採取レベル(G.L. -5m)の水温も測定する(図2)。そして、この水温が25°Cを超えると、使用するタンクが自動的に切り替わるように設定した。
- (2) 外気温・日射強度：外気温は実験住宅2階バルコニーの軒下で測定し、屋根棟部に設置した日射計で日射強度も測定する。
- (3) 室温・PMVの測定：室温の測定点の高さは、図1の実験室内①～⑥地点において、床に座った時の顔の高さであるF.L.+700mmと、椅子に座った時の顔の高さであるF.L.+1200mmの2種類の高さ、計12

地点で測定する。また室内中央付近 2 地点（南側と FCU 側）の PMV 値 (met 値 1.0、clo 値 0.5 に設定) も同時に測定する。なお、実験 3 では、図 1 の③と④の中間の室温が 24℃を下回るとシステムが停止し、28℃を超えるとシステムが稼働するように設定した。

上記いずれもの測定も、実験開始日の 9:00 から終了日の 18:00 まで、5 分間隔でデータロガーに記録することにした。また、この実測実験期間中は人の出入りはしないものとし、床下換気孔も閉じた。さらに、実験室の西窓から測定用の熱電対に直射光があたる可能性が高いため、西窓面を断熱材でふさいだ (図 1)。なお、南北の窓だけでも居室に必要な採光面積は確保できている。

表 1 実測条件

実験NO	FCU	室温設定	水温設定	日程
1	非稼働	-	-	2012.7.26~8.1
2	稼働	-	25℃	2012.8.2~8.7
3		24℃弁閉 28℃弁開		2012.7.20~7.25

※記録時間はいずれも実験開始日の 9:00~実験終了日の 18:00 とした。
 ※実験 3 (システム稼働)の後、しばらく地中熱で水温を冷やす時間を設けるため、実験 1(システム非稼働)を実施し、この期間で雨水を地中熱で冷やしてから実験 2 (システム稼働)を実施するため、このような日程とした。

表 2 測定項目と使用機器

項目	測定点	使用機器
1 地中温度	G. L. -1m, 2m, 3m, 4m	T型熱電対 (0.32mm)+データロガー
2 水温	4基のタンク内のGL-5m	T型熱電対 (0.32mm)+データロガー
3 外気温	実験住宅2階バルコニー軒下	データロガー付温湿度計測器
4 日射強度	実験住宅棟上	全天空式日射計+データロガー
5 室温	実験室内の12点 h=700と1200	T型熱電対 (0.32mm)+データロガー
6 PMV・湿度・放射温度	実験室内の2点 h=1200	PMV計 (1.0met, 0.5cloに設定)

5. 結果と考察

5.1 システム非稼働 (実験 1)

システム非稼働(実験 1)の実験結果の内、後に考察する実験 2 と実験 3 の外気温に近い値を示した 7 月 30 日の測定結果を図 3 に示す。なお、グラフの室温は最高湿度を示した④地点と最低湿度を示した⑥地点の h=1200mm の結果で、湿度は PMV 値 (FCU 側) の測定点の結果を表示している。この日の最高室温は 16:35 の④地点で 35.4℃、最低室温は 6:30 の⑥地点で 27.9℃で、実験室中の④地点は南側の⑥地点よりも、一日中約 0.5℃高かった。また、この日の最高外気温は 13:25 の 34.6℃、最高湿度は 6:30 の 60.4%、最低外気温は 5:10 の 22.9℃、最低湿度は 18:15 の 54.5%であった。

実験室内の 2 点で測定した PMV 値と、室温と放射温度の差を図 4 に示す。PMV 値は、南側の方が FCU 側よりも約 0.1 高かった。また、南側では 14:30~19:55、FCU 側でも 14:45~19:30 と、いずれも約 5 時間の間、3.0 を超えていた。さらに、一日中 1.0 を下回ることもなかったことから、暑くて不快な環境であったことがわかる。なお、簾やブラインドなどで、窓面からの日射を遮蔽する方法をとっていないが、図 4 の室温と放射温度の差は最大で 1.2℃で、最少でも 0℃と、常に放射温度よりも室温の方がやや高かったことから、実験室の床面や壁面の表面温度が日射によって上昇し、PMV 値へ大きく影響することはなかったと考えられる。

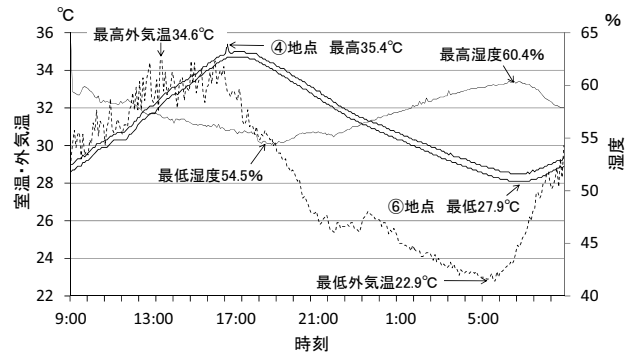


図 3 実験 1 における外気温・室温・湿度 (2012.7.30)

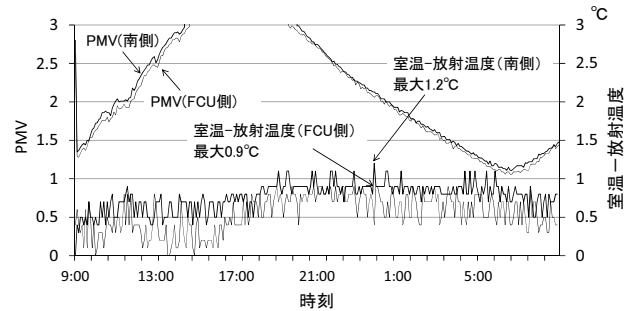


図 4 実験 1 における PMV 値・室温と放射温度の差 (2012.7.30)

5.2 システム稼働・水温制御のみ (実験 2)

ここでは、タンク内の水温が 25℃以上になると、次のタンクに切り替わる自動制御を行った実験 2 の結果について考察する。

地中温度とタンク内の水温の測定結果を図 5 に示す。これより、システムを稼働する前の 4 基の地下タンクの水中温度は約 16℃で安定していることがわかる。この実験は、実験 3 (システム稼働)を行った後、約 1 週間を空けて測定された水温であり、既報²⁾では水温が 20℃以上になるまで使用すると、その後 2 ヶ月経っても 18℃程度までしか水温が低下しなかったため、タンクを 900mm 深くしたことで地中熱による冷却時間が大幅に短縮されたことがわかる。

しかし、システムを稼働すると水温は一気に上昇し、10:25 にタンクが切り替わった。水温が 25℃以上になった時にタンクが切り替わる設定であったが、実際には 20.7℃で切り替わっていたため、自動制御盤に不具合があったと思われる。その後、17:00 にはタンク 3 の水温が 21.8℃まで上がってタンク 4 に切り替わり、20:20 には再びタンク 1 が使われた。そして 24 時間経過した時には、どのタンクの水温も 21~22℃となっていた。その後、水はほとんど冷えることなく、タンクの切り替わる間隔も短くなっていき、最終日には、4 基すべてのタンクの水温が 22℃を超えた。

室温、外気温の測定結果を図 6 に示す。このグラフの室温も h=1200mm の結果を用いた。実験初日の 8 月 2 日の最高室温は 17:00 の④地点で 26.5℃、最低室温は 10:40 の⑥地点で 23.1℃で、一日中室温が 23~27℃で維持されていた。また、④地点は⑥地点よりも一日中約 0.5℃高かった。最高外気温は 13:50 の 34.3℃で、最低外気温は 5:30 の 22.6℃であった。2 日目以降は室温が少しずつ上昇し、最終日には最高室温が 29℃になった。

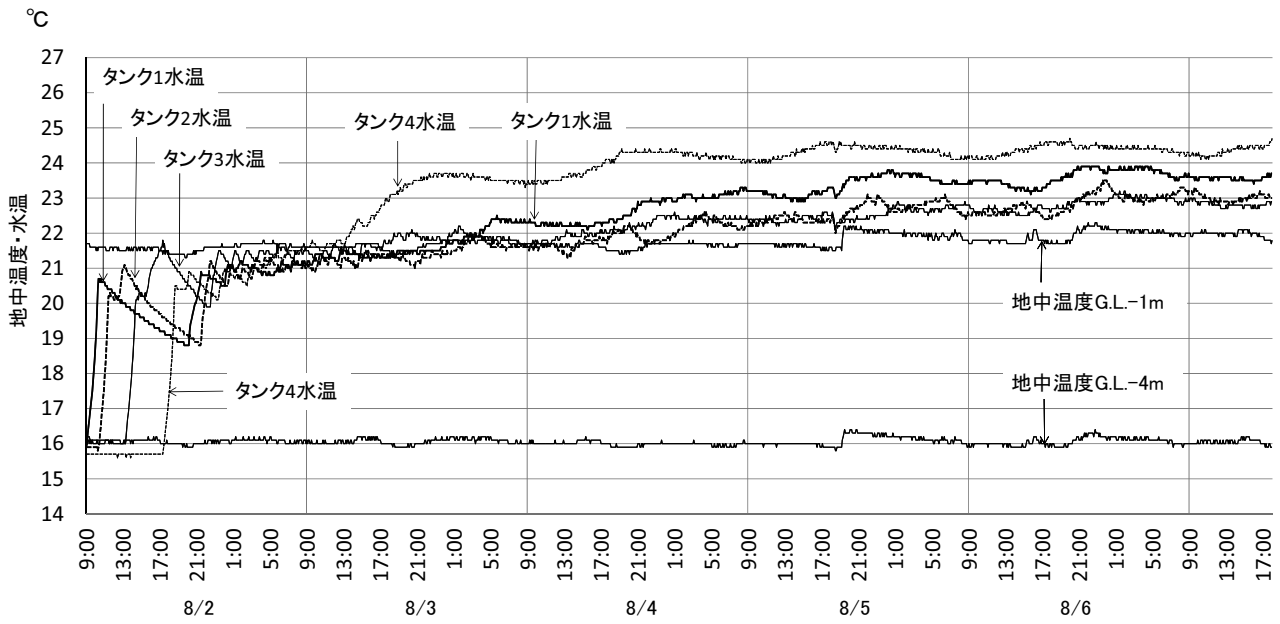


図5 実験2における雨水タンク内の水温・地中温度(2012年8月2日~8月7日)

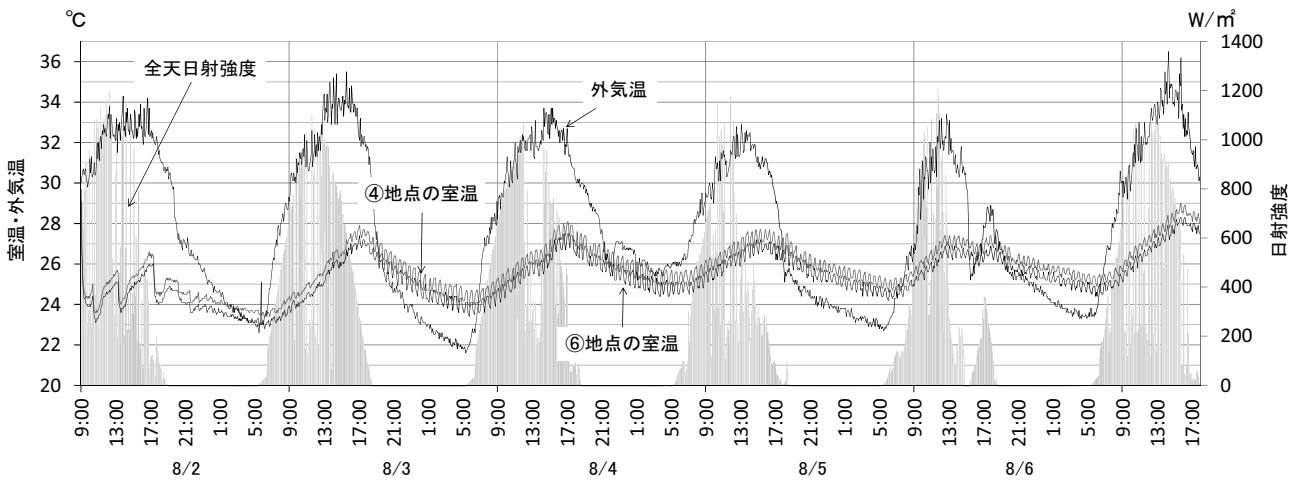


図6 実験2における室温・外気温・日射強度(2012年8月2日~8月7日)

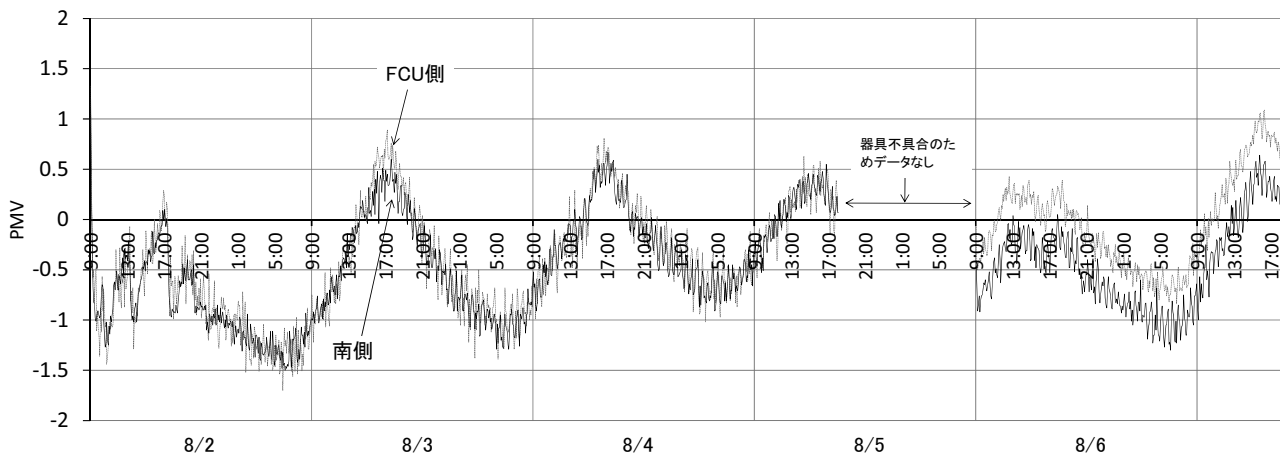


図7 実験2におけるPMV値(2012年8月2日~8月7日)

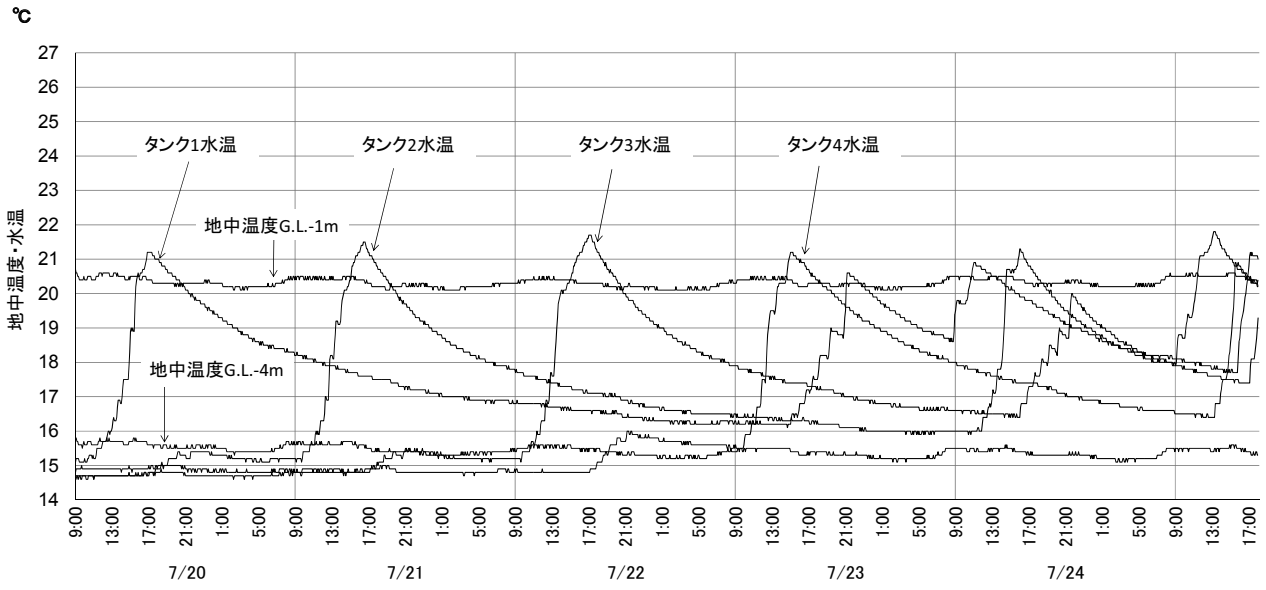


図8 実験3における水温・地中温度(2012年7月20日~7月25日)

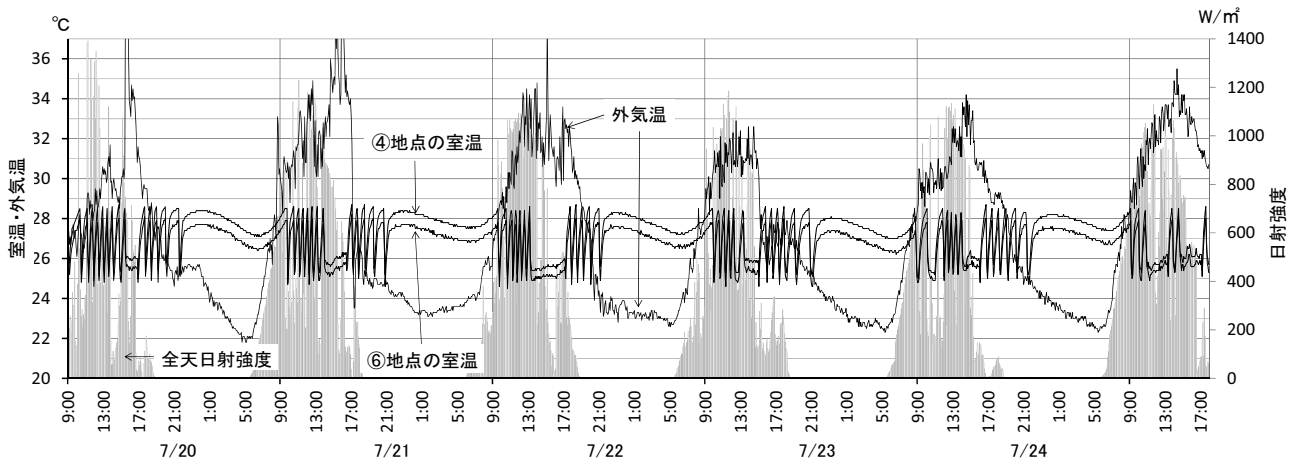


図9 実験3における室温・外気温・日射強度(2012年7月20~7月25日)

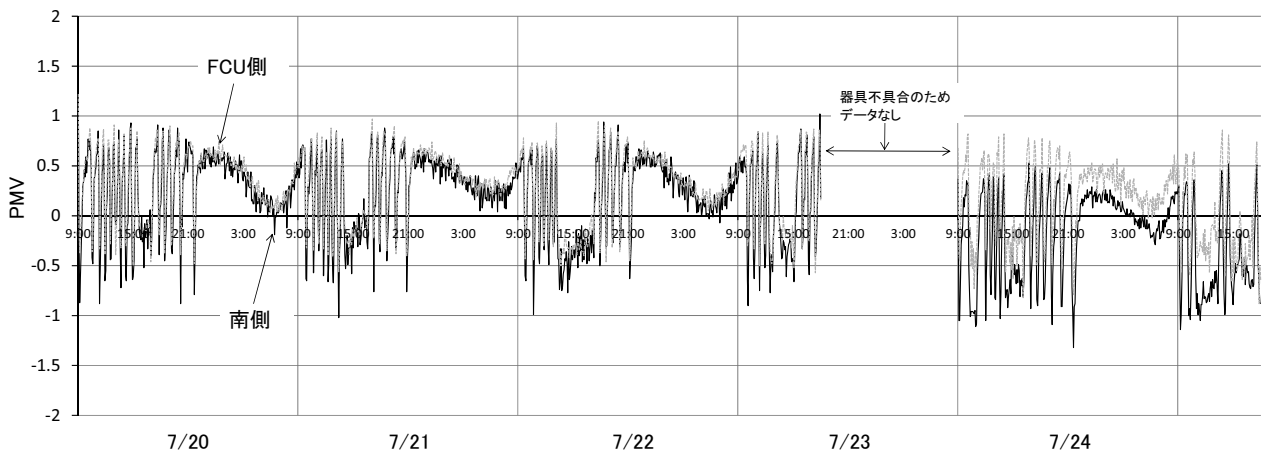


図10 実験3におけるPMV値(2012年7月20~7月25日)

PMV 値の結果を図 7 に示す。初日は一時プラスの値を示すが、他はマイナスの値で、日中でも-1.0 を下回る肌寒い時があった。そして 2 日目以降は、徐々に PMV 値が高くなっていった。また、この実験では FCU を常時稼働しているため、南側の方が吹き出しの冷風が届きやすいこともあり、南側の方が低い値を示す時が多かった。

上記の結果より、このシステムでは実験初日に雨水の冷熱を使いすぎてしまい、最終日には 4 基のタンク内の水温すべてが 21℃ を超え、徐々に室温も上昇し、その変動幅も大きいことから、このシステムでは冷房能力が持続しないと思われる。

5.3 システム稼働・水温制御と室温制御 (実験 3)

次に、タンク内の水温による自動切り替え設定はそのまま、室温が 24℃ を下回るとシステムが停止し、28℃ を超えるとシステムが稼働する設定を加えた実験 3 の結果について考察する。

地中温度とタンク内の水温の測定結果を図 8 に示す。これより、システムを稼働する前の 4 基の地下タンクの水中温度は約 15℃ で安定していることがわかる。これは既報²⁾の実験前の水温よりも約 2℃ 低く、これはタンクを 900mm 深くした効果だと思われる。システム稼働に伴い水温は徐々に上昇し、最高温度は 16:50 で 21.2℃ となり、次のタンク 2 に切り替えられた。この実験においても、水温が 25℃ に達する前にタンクが切り替わっていた。その後、同じパターンで 3 日間が経過した。4 日目は、15:15 に水温が 21.2℃ まで上がり、再びタンク 1 が使われた。その時のタンク 1 の水温は 16.1℃ まで下がっていた。5 日目は、12:50 にタンク 2 に、16:10 にタンク 3 に切り替わった。このように実験後半では、タンクの切り替え頻度が高くなっているものの、使用していないタンク内の水温の冷却時間は、実験 2 に比べて大幅に短縮されていた。

室温、外気温の測定結果を図 9 に示す。実験初日の 7 月 20 日では、最高室温は 17:00 の④地点で 28.6℃、最低室温は 11:55 の⑥地点で 24.6℃ であった。また、実験室中の④地点は南側の⑥地点よりも、一日中約 0.6℃ 高かった。最高外気温は 15:30 の 41.2℃ で、最低外気温は 5:30 の 22℃ であった。また、システムを稼働させて以降、稼働・停止が約 30 分間隔で繰り返して、室温が 24℃ よりも低下していないことから、電磁弁がほぼ正常に動作していることがわかる。ただし、外気温が最も高い時間帯の 15:30~17:00 は、システムが継続して稼働していた。そして、2 日目以降も日中は稼働・停止を繰り返しながら室温を 24℃~29℃ に保っていた。

PMV 値の結果を図 10 に示す。実験初日から最終日まで -1.0~+1.0 の間で推移しており、実験 2 に比べて室温の変動幅も小さく、比較的快適な環境を維持できていたことがわかる。またこの実験では、室温に応じて FCU が稼働したり停止したりするので、吹き出しの冷風の影響を受けやすい南側の PMV 値は、システム稼働時に一時的に低くなる傾向がみられた。

上記の結果より、このシステムでは実験初日から最終日まで 24℃~29℃ の室温で、PMV 値も ±1.0 以内に維持することができ、タンク内の水温も 3 日間で約 16℃ まで冷却できることがわかったため、この実験期間以降も冷房能力は持続可能と思われる。

6. まとめ

本報告では、実物大の木造実験住宅を用いて「地中熱で冷やした雨水による冷房」のシステムを設計・製作し、ファンコイルユニッ

トを用いた冷房実験を行い、そのシステムの効果と持続能力について考察した。その結果を以下にまとめる。

(1) 雨水保温・保冷タンクを新たに 4 基増設し、その長さを 5.4m (深さ G.L. -5.2m) にしたことにより、実験前の雨水の温度は約 15℃ まで冷えており、実験で使用した後も、約 3 日間で地中熱によって 16℃ まで水温を下げる事ができた。

(2) 水温によって使用するタンクの自動制御と、室温によるシステムの稼働・停止の自動制御を併用した結果、室温は 24℃~29℃、PMV 値は ±1.0 以内を、実験期間の 6 日間維持することができた。ただし、水温によるタンクの自動制御のみでは、初日に室内を冷やしすぎ、かつ雨水の冷熱を使い切ってしまったため、システムに持続性がないことが分かった。

7. 課題と展望

本報告では、既製ドラム缶を用いた雨水と地中熱による自然冷房システムによって、9 畳という狭い空間ではあるが、一定の冷房効果があることを確認することができた。しかし当初は、タンク 1 基で一日間の冷房ができないかと考えていたため、使用するタンクが設定よりも早く切り替わってしまったことで、その能力を確認することができなかった。とはいえ、タンクを 900mm 深くすることで、地中熱の冷却効果が大幅に高まったので、さらに本システムを改良して、より広い空間での冷房実験を行うことが次の課題である。

これまでは、本システムの実用化を念頭において、インシヤルコストや現場での施工性を優先的に考慮して実験を行ってきたが、今後は実験結果を踏まえて、地中熱のメカニズムの詳細な数値解析を行い、空調面積とドラム缶の容量・埋設深さとの関係を解明し、さらに人や照明などによる内部発熱も考慮したシステム設計の体系を構築していく必要がある。また本システムには、真空管型の太陽熱温水器も組み込まれているため、冬の暖房効果も検証する必要がある。そして、このシステムによって、どのくらい電力消費量が削減できるのかも検証する予定である。

付記

本実験では、当時近畿大学 4 年生であった犀川徹君、高橋陽君、上野翔太君、河本卓哉君、岡崎聡君の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

注

1) 雨水分水器：屋根面から流される葉などのゴミをストレーナー（ろ過器）で取り除き、分水器内の整流板で内壁を沿うように雨水を流す装置である。流下雨水がごく少量の時（初期降雨）は、表面張力によって分水器内壁を沿ったまま流れ、その雨水は外部に排水される。雨量が多くなると分水器中央部に雨水が落下し、連結された貯留槽へ導かれる仕組みである。

参考文献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁：エネルギー白書 2005
- 2) 市川尚紀、崔軍：木造実験住宅を用いた太陽熱・雨水・地中熱による床冷暖房システムに関する研究，日本建築学会技術報告集，第 17 巻，第 35 号，pp. 227-232, 2011. 2
- 3) 岩澤昭彦、中山茂樹：住宅で使用する地中熱取り込みシステムの可能性の研究-6m の採熱管による採熱試験と床放射冷暖房エネルギーの試算-，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）NO. 41629, pp. 1297-1298, 2009. 8
- 4) 奈良謙伸、奈良顕子：南を向く家-採熱杭による地中熱利用の暖冷房住宅-，日本建築学会大会北海道支部研究報告集 NO. 81, pp. 249-250, 2008. 6

[2014 年 2 月 8 日原稿受理 2014 年 4 月 8 日採用決定]