

既製ドラム缶を利用した地中熱自然冷房システムにおける 雨水タンクの持続性の実験研究

市川 尚紀*1, 崔 軍*2

An Experimental Study on Sustainability of Rainwater-Tank Using Natural Cooling System by Underground Heat with Ready-Made Drums

Takanori ICHIKAWA*1 and Jun CUI*2

We experimented about the sustainability of rainwater tank using natural cooling system by underground heat with ready-made drums in a wooden experimental house. Before the experiment, we enlarged the experimental space bigger than before. Then we considered the sustainability of rainwater tank. The result is as follows. First, the room temperature maintained from 24 to 30.5 degrees for five days and a half day. Then the range of PMV score was -2.0 to +1.5. Next, the rainwater of a tank was used till it rose to 25 degrees, then cooled to the first temperature in about 3.5 days by underground heat. In addition, we can use a rainwater tank during about 1.5 days when the temperature is over 30 degrees. Therefore, we can cool 18 pieces of tatami space if there are four rainwater tanks.

Keywords: Natural cooling system, Rainwater, Underground heat, Ready-made drums

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る中、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。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。そこで著者らは、太陽熱と地中熱に加え、わが国独特の気候要素の「雨水」も使えないかと考えて、建物に降った「雨水」を貯めて、冬は太陽熱で温め、夏は地中熱で冷やして室内環境を調節する新たな自然冷暖房システムの開発を行っている。

このシステムの冷房時に必要な熱源は地中熱であるが、地中熱利用については既に様々な技術が開発されている。具体的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るが、浅層のボーリング穴に雨水で浸した既製品のドラム缶 (以下、雨水タンクと呼ぶ) を埋設し、その冷熱を利用する点で他のシステムとは異なる。原理的には、配管を閉鎖系にして水道水を利用することも考えられるが、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ため、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ニシャ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による波及効果を期待できると考えている。なお、水の比熱はコンクリート

原稿受付 2017年5月10日

*1 近畿大学工学部 建築学科 准教授, 次世代基盤技術研究所 准教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail ichikawa@hiro.kindai.ac.jp

*2 近畿大学工学部 建築学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail sai@hiro.kindai.ac.jp

連絡先: 市川尚紀 (研究代表者)

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。

これまで考案したシステムを実物大の木造実験住宅に設置し、その冷暖房効果の実証実験を行ってきており、それらの結果を既報⁽²⁾、⁽³⁾で報告している。まず既報⁽²⁾では、冬に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。次に既報⁽³⁾では、熱交換器をファンコイルユニット(以下、FCUと呼ぶ)に変更し、また雨水タンクを増設、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て実験を行った。その夏の冷房実験結果では、実験住宅1階の9畳の部屋の室温を24℃~29℃、PMV値^{注1}は±1.0の範囲内に、実験期間の6日間維持することができ、その冷房能力にまだ余力があることも確認した。そこで本報告では、FCUをこの木造実験住宅2階の9畳の部屋にも設置し、同じシステムを用いて、2室計18畳の室内空間の冷房実験を行った結果について考察する。また、雨水を地中に貯める既製ドラム缶を利用した雨水タンクの持続性についても検証することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 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階及び2階の部屋(9畳×2部屋)である。この建物の仕様を図1に示す。

2.2 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流器^{注2}(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、この雨水を雨水タンク(d)へオーバーフローさせ地中熱で冷やす。この雨水タンクは、スチール製の既製ドラム缶(600φ×900h)を溶接によって縦に連結したものである。雨水タンクは4基埋設されており、その長さは5.4m(ドラム缶600φ×900h×6缶、深さ5.2m)である(以下、雨水タンク1~4と呼ぶ)。そして、この雨水を実験室内のFCU(f)

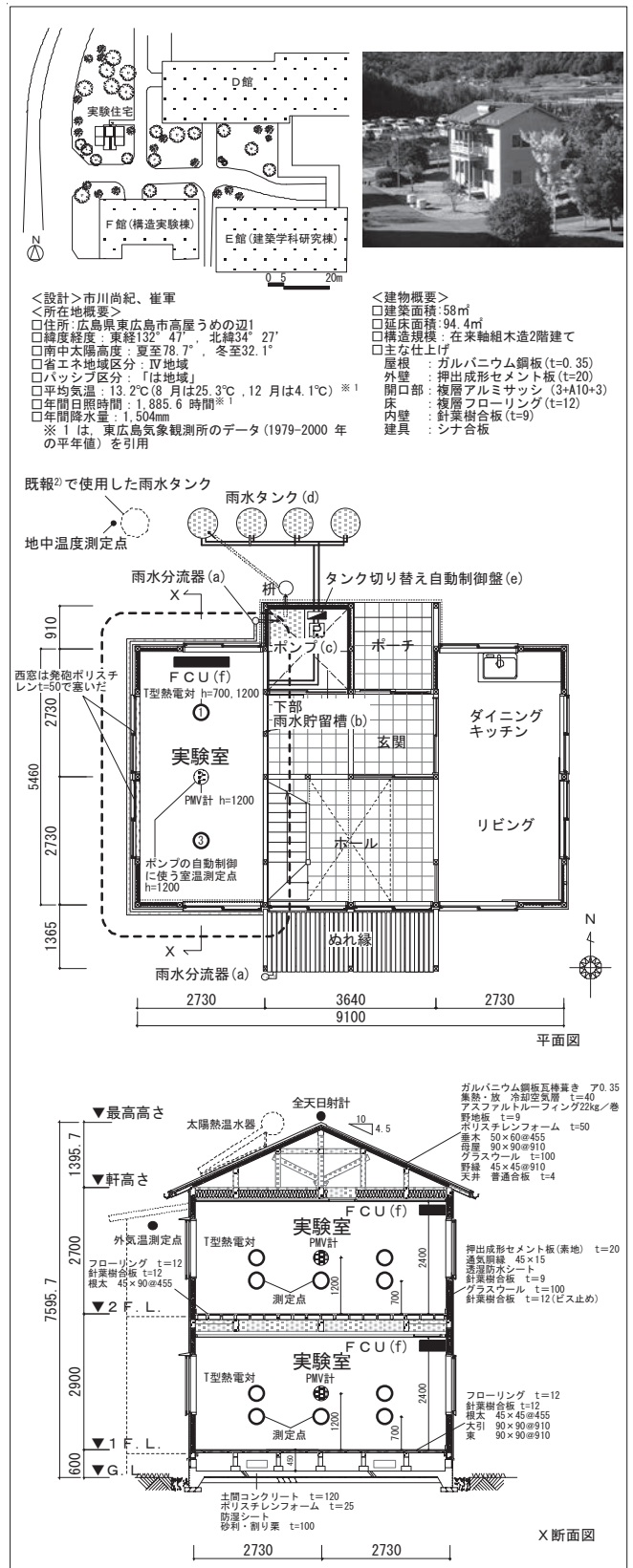


図1. 実験住宅概要

に循環させるシステムとなっている。今回は FCU を実験住宅 2 階の 9 畳の部屋にも増設し、その配管は 1 階の FCU とは並列式とした。これにより、2 台の FCU を個別に稼働・非稼働の操作ができる。その他の仕様は図 2 のとおりである。

さらに本システムでは、雨水タンク内の水温が一定温度まで上がると、自動的に次の雨水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が設けられている。

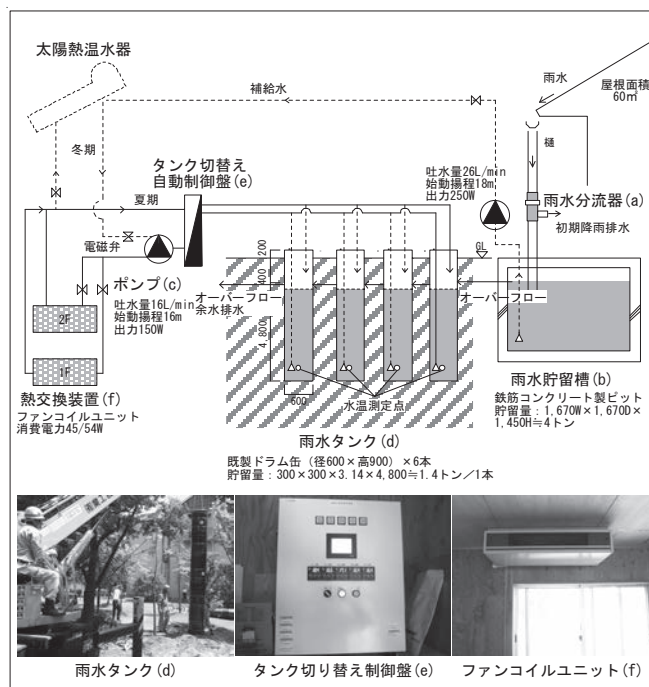


図 2. 自然冷房システム図

2.3 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である。

(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、雨水タンク内の水温による地中温度への影響はないと考える。また、雨水タンク 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℃を超えると、使用する雨水タンクが自動的に切り替わるように設定した。なお、既報⁽²⁾でも、25℃に設定したが、実際には 21℃

で切り替わってしまったため、今回は制御盤の設定を 29℃にして、作動誤差を調整した。

(2)外気温：外気温は直射日光が当たらず、風通しの良い実験住宅 2 階バルコニーの軒下で測定する。

(3)室温・PMV の測定：室温の測定点は、図 1 のように、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 6 地点/室で測定する。また、室内中央の測定点では 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 2 では、室内中央の温度が 25℃を下回るとシステムが停止し、29℃を超えるとシステムが稼働するように設定した。既報⁽³⁾では、各々の設定温度を 24℃, 28℃としたが、室内 PMV 値がやや低い値を示すことが多かったため、今回は各々 1℃高い設定とした。

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当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	タンク切替え設定水温	日程(※3)
1		非稼働		2014. 8. 13-18
2	稼働	≤25℃弁閉 ≥29℃弁開 (※1)	≥25℃ (※2)	2014. 8. 4-8. 9 2014. 8. 21-26 2014. 9. 2-9. 7

※1 既報⁽³⁾では ≤24℃弁閉, ≥28℃弁開としたが、PMV 値がやや低かったため 1℃高く設定した。

※2 既報⁽³⁾では ≥25℃としたが、実際には 21℃で切り替わったため、今回は制御盤の設定を 29℃にして、作動誤差を調整した。

※3 実験 2 (稼働)の後、地中熱で水温を冷やすため、実験 1 (非稼働)を実施し、再び実験 2 を実施する日程とした。記録時間は実験開始日の 9:00 ~ 実験終了日の 18:00 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 室温	実験室内の5点/室 h=700と1200	T型熱電対 (0.32mm)+データロガー
5 PMV・湿度・放射温度	実験室内の中央1点/室 h=1200	PMV計 (1.0met, 0.5cloに設定)

3. 結果と考察

3.1 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と外気温に近い値を示した、8月17日9:00~翌18日9:00までの測定結果を図3と図4に示す。なお、図3の室温は1階の②地点(h=1200mm)と2階の②地点(h=1200mm)の結果である。

この日の最高外気温は14:15の32.9°Cで、最低外気温は翌5:15~5:30の22.9°Cであった。最高室温は1階が18:00の31.4°C、2階が17:35の32.9°Cであった。PMVの最高値は、1階で17:50の2.36、2階が17:30~17:50の2.76であった。また最低値は、1階で6:40の0.59、2階が7:00の0.5であった。1,2階とも外気温よりも遅れながら室温は上昇した。また、既報⁹⁾で実験を行った1階の実験室よりも2階の実験室の方が、日中は1.5°Cほど高くなった。

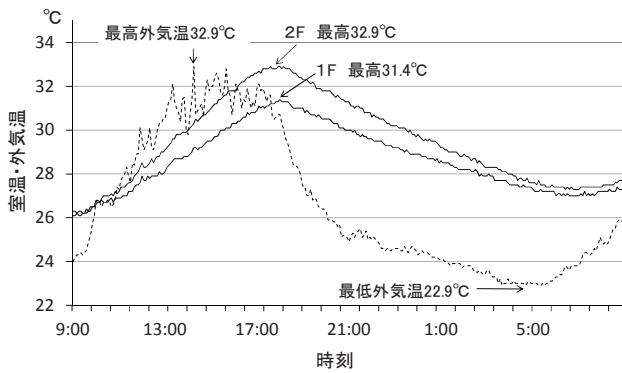


図3. 実験1における外気温・室温(2014.8.17-18)

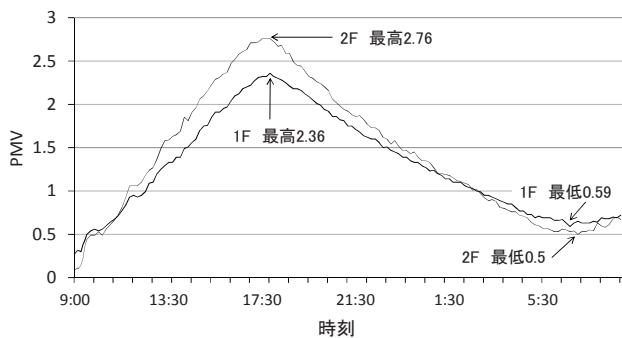


図4. 実験1におけるPMV値(2014.8.17-18)

3.2 システム稼働・水温制御と室温制御 (実験2)

ここでは、水温が25°Cを超えると使用する雨水タンクが自動的に切り替わり、室温が25°Cを下回るとFCUが停止し、29°Cを超えるとFCUが稼働する設定にした実

験2の内、最も気温が高かった2004年9月2日~9月7日の実測結果について考察する。

まず、地中温度と雨水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基の雨水タンクの水中温度は約17°Cで安定していることがわかる。雨水タンク1は9月2日の13:30~17:20と9月3日の11:55~19:10の間に稼働し、水温24.7°Cまで上がったので停止した。9月4日は終日涼しかったため、雨水タンクは稼働せず、翌9月5日の12:30に雨水タンク2が稼働し、その後20:30に停止した。このタンクの水温は24.9°Cに達したため、9月6日は12:55に雨水タンク3が稼働し、その後、室温が下がって15:15に一旦停止したが、9月7日の12:15に再稼働し、実験終了時まで続いた。なお、雨水タンク1が9月3日の19:10に停止した後、稼働前の水温付近まで下がったのは、3日半後の9月7日の9:00頃だった。

次に、実験期間中の室温と外気温の測定結果を図6に示す。なお、図中の室温は1,2階とも②地点(h=700)の測定結果を示す。この結果より、この期間中の前半は最高外気温が25°C以上の夏日が続き、後半になると最高外気温が30°C以上の真夏日が続いたが、他の実験期間も通じて35°C以上の猛暑日になることはなかった。なお、期間中の最高外気温は9月7日の15:30の32.7°C、最低外気温は9月7日の0:35の20.1°Cであった。一方、室温の測定結果より、1階実験室の日中の最高室温は9月5日の14:00の②(h=700)地点で29.4°C、最低室温は9月2日の9:05の③(h=1200)地点で24.0°Cであった。2階実験室の最高室温は9月5日の14:00の③(h=1200)地点で30.5°C、最低室温は9月2日の9:00の②(h=1200)地点で24.1°Cであった。

最後に、PMV値の測定結果を図7に示す。1階PMV値の最高は9月5日の14:00の0.57、最低は9月7日の6:40の-1.84であった。2階PMV値の最高は9月5日の14:00の1.3、最低は9月7日の7:20の-1.84であった。このように、PMV値は1階で-2.0~+1.0、2階で-2.0~+1.5の間で推移した。

以上のように、実験1と比較すると1階平均室温を約1.7°C、2階平均室温を約2.0°C下げ、PMV値で見ると1階では平均約1.8、2階では平均約1.5下げることができたが、これは「やや寒い状態」であった。

3.3 雨水タンク (既製ドラム缶) の持続性

実験2(9月2日~9月7日)の結果では、雨水タンク3本で約5日半の間、冷房効果を持続させることができた

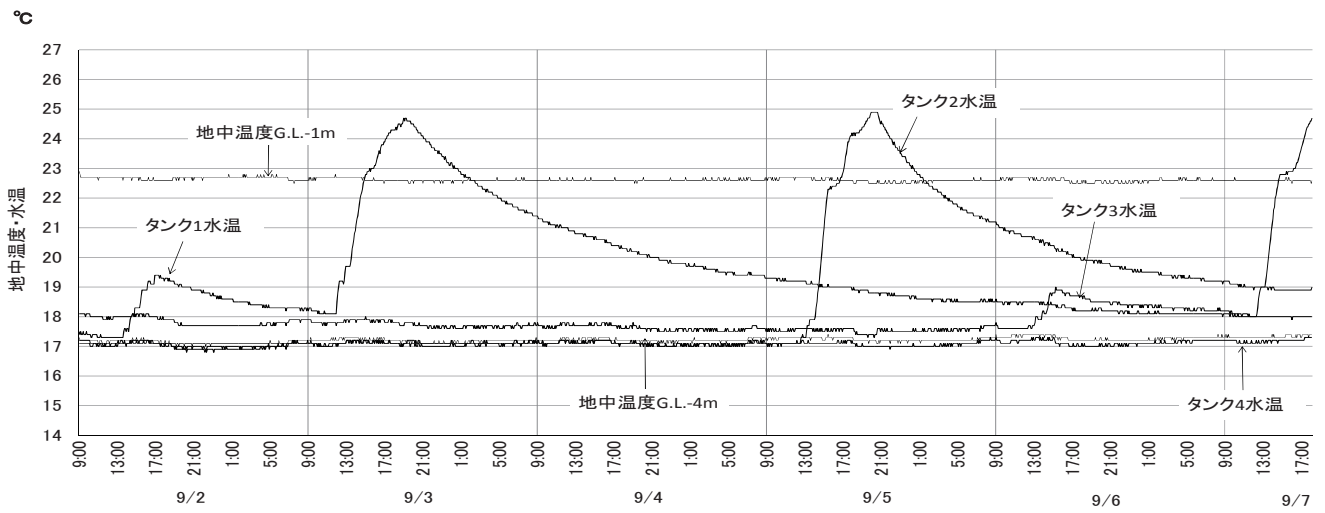


図 5. 実験 2 における水温・地中温度(2014.9.2-9.7)

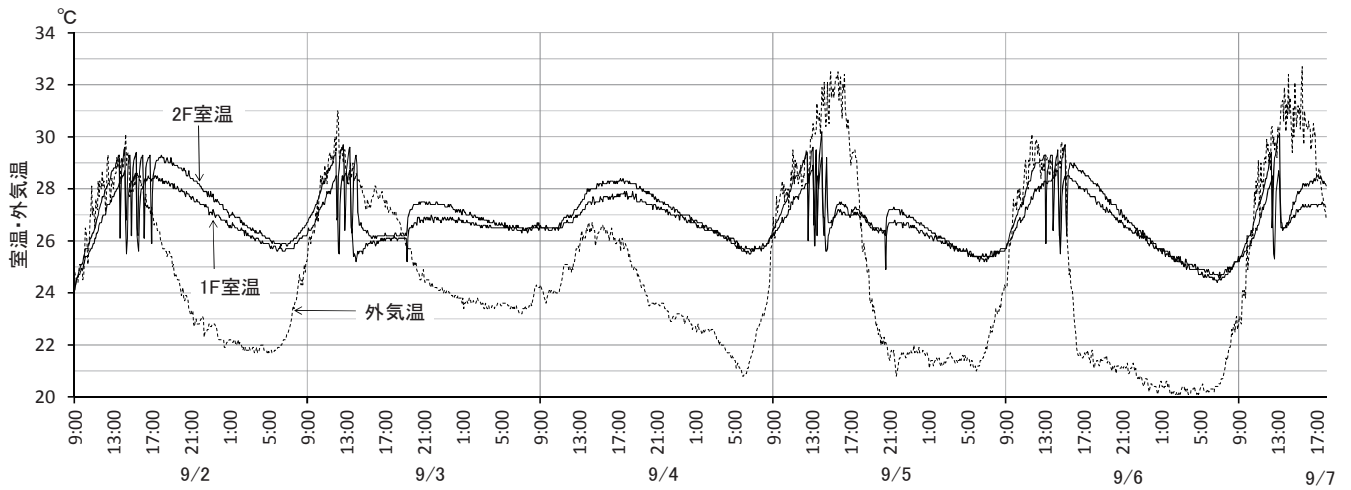


図 6. 実験 2 における室温・外気温(2014.9.2-9.7)

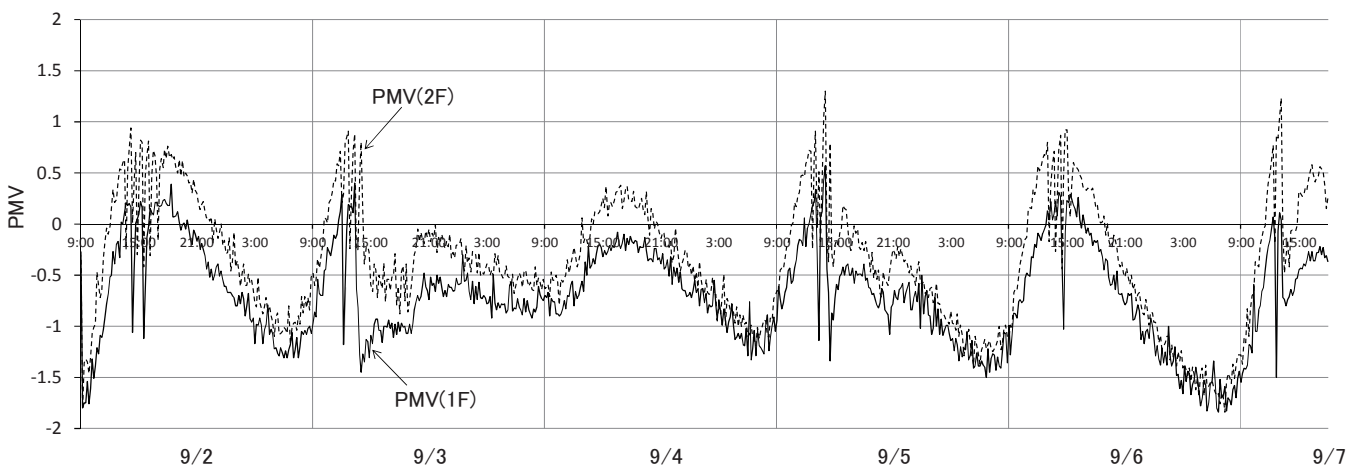


図 7. 実験 2 における PMV 値(2014.9.2-9.7)

ことになる。また、雨水タンク 1 が使用停止してから地中熱によって実験前の水温まで冷えるまでの期間は約 3 日半であったことが分かった。雨水タンク 1 本の稼働期間については、外気温に左右されるため、雨水タンク 1 は約 3 日間使われたが、最も外気温が高かった時に使われた雨水タンク 2 は約 1 日半使用された。

上記の実験結果より、雨水タンク 1 本の使用期間は 1 日半、使用停止後から 3 日半で実験前の水温に地中熱によって冷却されると仮定すると、この 18 畳の部屋を継続的に冷房するためには、何本の雨水タンクが必要かを算定できる。つまり、最初の雨水タンクを使用後、別の雨水タンクで冷房している間に地中熱で冷却するのだが、その期間が 3 日半必要であるため、別の雨水タンクは 3 本必要ということになる(1.5 日×3 本=4.5 日>3.5 日)。したがって、最初の雨水タンクと併せて合計 4 本の雨水タンクがあれば、30℃以上の真夏日が続いても継続冷房が可能ということになる。

しかし、今回の実験結果では PMV 値が低い、すなわち「やや寒い」という結果となり、FCU の停止設定室温をもう少し高くすることで、雨水の冷房利用可能期間が長くなると予想される。したがって、実験条件を再吟味することで、雨水タンク 3 本でも継続冷房が可能になると思われる。

4. まとめ

本報告では、実物大の木造実験住宅を用いた地中熱自然冷房システムの実験対象空間を既報⁹⁾よりも拡張し、その冷房効果を確認した。そして、既製ドラム缶によって製作した雨水タンクの持続性について考察した。その結果を以下にまとめる。

(1)このシステムで、実験初日から最終日の 5 日半を 24℃～30.5℃の室温で、PMV 値も-2.0～+1.5 に維持することができることがわかった。

(2)雨水タンク(深さ 5.2m、容量約 1.4 トン)の雨水は 25℃に上昇するまで使い、その後地中熱で冷却する場合、約 3 日半で使用前の水温まで冷却されることがわかった。また、雨水タンクは 30℃を超える真夏日に使用すると、約 1 日半継続して使用することができる。

(3)上記の実験条件の場合、この雨水タンクが合計 4 本あれば 18 畳の部屋を継続冷房することが可能であることがわかった。また、システムが稼働する設定室温を上げるなどの調整をすることで、雨水タンク 3 本でも継続冷房が可能になると思われる。

なお、今回の実験は夏期の約 1 ヶ月間、継続して実施

したが、気温が平年に比べて低い冷夏であったため、冷房効果を確認するための良好な実験データを得ることができなかった。今後、猛暑日で使用した場合の雨水タンクの持続性について検証する必要がある。

また、これまでの実験の結果、雨水タンクの冷熱を直接冷房に利用する方式で、住宅のリビング程度の広さの部屋を冷房することが可能であることがわかったが、このシステムは、一般的な家庭用空調機に比べると初期費用が高く、また複数のタンクを設置するための広いスペースが必要になる欠点がある。そこで今後は、この雨水タンクとヒートポンプシステムを組み合わせることで、小スペースにも設置可能で、なおかつ暖房にも利用可能な安価なシステムを考案し、その検証実験を行う予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費(学術研究助成基金助成金)基盤研究C(一般)「既製ドラム缶を活用した太陽熱・雨水・地中熱による自然冷暖房システムの開発」(課題番号 25420619、代表者:市川尚紀)によるものである。

また本実験では、当時近畿大学 4 年生であった水田奈沙さんと岡田康裕君の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

注

- (1) PMV: 予想平均温冷感申告(Predicted Mean Vote)の略で、人間が感じる温冷感の指標である。室温、平均放射温度、相対湿度、平均風速、在室者の着衣量、作業量の 6 つの要素を用いて算出され、±1.5 以内が快適と感じる範囲とされている。
- (2) 雨水分流器: 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、分流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流器内壁を伝いながら流れ、外部に排水される。雨量が多くなると分流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 2015
- (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(2011-2), pp.227-232
- (3) 市川尚紀, 崔軍: 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, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 46 号(2014-10), pp.1035-1040