

論文・報告

太陽熱と地中熱のハイブリッド空調

Hybrid Air-conditioning System by Solar Heater and Geothermal Heat Pump

畠中 真一 *1
Shinichi HATAKENAKA

越後 滋 *2
Shigeru ECHIGO

甲木 里沙 *3
Risa KATSUKI

勝俣 盛 *1
Mori KATSUMATA

太陽エネルギーの利用方法として、太陽光発電が脚光を浴びているが、いまだ設備導入のコストと発電効率については改良途上の技術であると言える。社会活動の中では、製造過程における加熱や融解、あるいは、生活環境における暖房や給湯など、電気エネルギーが熱源として利用されるシーンが極めて多い。電気の利便性は高いものの、敢えて太陽エネルギーを電気に変換せず、熱としてそのまま蓄積し、使用する用途を模索することで、設備にかかるコストの削減と太陽エネルギーを有効活用できると期待されることから、本検討では、暖房の補助熱源として太陽熱集熱器を導入して、その効果を計測により確認したので、結果を報告する。

キーワード：太陽熱，真空二重管集熱器，暖房，地中熱，ハイブリッド

1. はじめに

我が国では、高度成長期以来のエネルギー使用量の急激な増加と時期を同じくして、オイルショックや地球温暖化問題、原発問題に伴う節電など、エネルギーの需給に関わる課題と向き合ってきた。特に温暖化対策に数値目標が掲げられて以来、太陽光発電や風力発電が大幅に普及してきたことは記憶に新しい。このように、自然エネルギーを電気エネルギーに変換することは、輸送性や可用性の面で大きなメリットがあり、既存のストックがそのまま活用できることから国策の一つとしても太陽光発電が推進されている。しかしながら、電気エネルギーへの変換効率は10~15%程度にとどまっていることから、さらなる改良が求められていることも事実である。

一方、太陽の熱エネルギーを利用した温水器は、40年以上前から一般家庭用として販売されている。太陽熱温水器では、太陽光の持つエネルギーを吸収する効率は50%を超えと言われており、変換効率の高さに加え、設備がシンプルであることも大きな特徴である。このため、給湯・暖房・凍結防止といった温熱を使用する用途には、太陽エネルギーを熱として蓄積し、温熱源として利用する方が、発電に比べて格段に効率が高いことが判っている。2011年には、都道府県に先立って東京都が太陽熱利用に関する補助金制度を開始しており、徐々に全国的に展開されてきている。

このように太陽エネルギーを熱源として利用する方法が再認識される中、筆者らは近年普及が進んでいる真空二重管採熱パネルを使用した集熱器を導入し(写真1)、貯湯システムの運転状況を計測し、本方式の変換効率や使用性について検討を行ったので、その結果の一部を報告する。

2. 太陽熱集熱器の概要

(1) 集熱方式

太陽熱利用における集熱方式は、平板型、集光型、真空管型の3つに大別することができる。平板型の集熱器は、太陽光を吸収しやすい黒色パネルの内部に配管を施し、ここに水を循環させて水温を上昇させるものである。



写真1 試験設置した真空二重管式太陽熱集熱システム

*1 川田テクノロジーズ株式会社 主幹
*2 川田テクノロジーズ株式会社 所長

*3 川田テクノロジーズ株式会社

平板型集熱パネルにタンクを一体化させた家庭向けのモデルではパネル勾配と温度差による密度変化により、自然対流だけで水が循環されるため外部電源を必要としないタイプもあり、設置が極めて容易であることから、給湯用の民生品としても数十年にわたり利用されている。

集光型はレンズや凹面鏡、多数の反射鏡等を介して太陽光を一点に集め、極めて高い温度を作ることができることから、小型の物ではオリンピック聖火の採火に使われる着火源のような鏡や、野外調理用のツール等としても利用されている。大型化して、太陽熱発電に活用されている例もあるが、集光型では太陽を追尾する機構が必要となるため、精緻な制御を行うには高度な技術と、相応の設備が必要とされ、用途が限られていると言える。

これに対し真空管型の構造は図1に示すように、集熱の機構を真空層で包み込むことで、一旦吸収した熱エネルギーを逃がさない構造となっていることから、高い効率で太陽熱を収集することができる。真空管の内側に取り込まれた熱が中心部の銅管製のヒートパイプに伝わると、パイプ内部に封入されている作動液の蒸発と凝縮の態変化サイクルにより、温度の低い頂部へと熱が集まる構造となっている。写真2に示すような集熱器単体を直射日光下に置いておくと、熱媒伝達部は200℃近い高温になるという試験結果もある。また、ガラス管が円筒形であるため、時間と共に変化する太陽高度（日周運動）の影響を比較的受けにくいという特徴を持っている。

近年の製造技術や輸送技術の進歩により、低コストで供給できるようになったという背景もあり、真空管型の太陽熱集熱システムの普及が進んでいる。本検討においても、今後利用の拡大が予想される真空管型集熱器を導入して試験を実施した。

(2) 設備概要

太陽熱集熱試験システムを設置した場所は、栃木県宇都宮市の東に隣接する芳賀郡の自社敷地内の試験フィールドである。設備の諸元を表1に示す。集熱試験システムは、40本の真空管型集熱器を平行に並べた集熱パネル、300リットルの容量を持つ貯湯タンク、および、その間で熱を移動させる集熱媒体と蓄熱ポンプにより構成されている。なお栃木県は、2010年までの30年間の観測データによれば日照時間が年間1911時間程度と、ほぼ全国平均（約1900時間）に近い天候の地域である。

(3) 集熱と蓄熱のしくみ

太陽熱を貯湯タンクに蓄熱する模式図を図2に示す。パネルが赤外線を含む太陽光（電磁波エネルギー）を受けると真空層内部の集熱層（図1参照）により熱エネルギーに変換され熱伝導板に伝えられる。さらに真空管中心

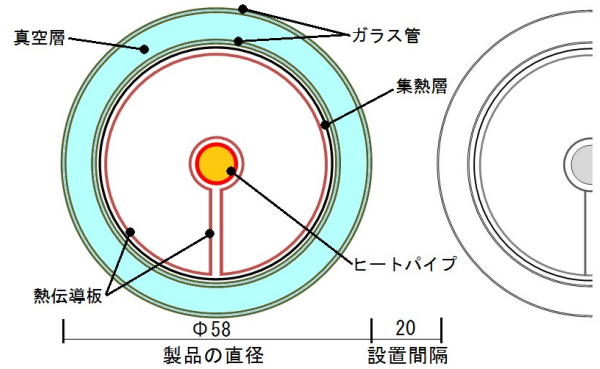


図1 真空管型集熱器の断面構造および隣接距離



写真2 真空管型集熱器の端部構造

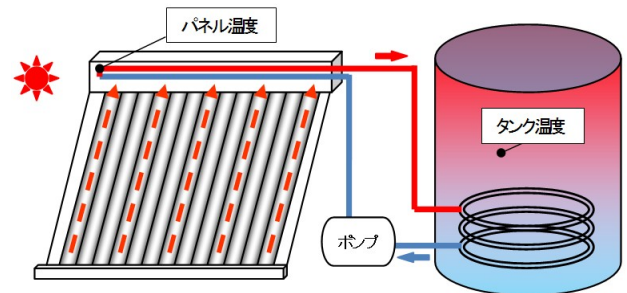


図2 集熱と蓄熱のしくみ

表1 設備の概要 (Oventrop 社製)

集熱パネル	
外形寸法	1 995H×1 632W×2 枚=6.51m ²
有効集熱面積	1.88 m ² ×2 枚=3.76 m ²
設置角度	真南向き 仰角 36.4 度
真空管	1 710L×55 φ (有効径)×40 本
貯湯タンク	
外形寸法	1 334H×700 φ×1 槽
容量	300 リットル
蓄熱ポンプ	
駆動トリガー	パネルとタンクの温度差
集熱媒体	プロピレングリコール(40%)
流量	約 5 リットル/分
消費電力	約 60W

部のヒートパイプの効果によってパネル上部に集積され、熱媒体の温度を上昇させる。

一方、ポンプ制御器はパネル上部の温度と貯湯タンクの温度を常に監視しており、この温度差をトリガーとして、熱媒体循環ポンプの運転と停止を制御している。本試験では、パネル温度がタンク温度より6℃以上高くなると運転を開始し、4℃以下で停止するよう設定してある。熱媒体を循環させるポンプの消費電力は60W程度であり、晴天時には2000W程度の集熱量が維持されるため、電力の数十倍の熱量を蓄えることができるという計算となる。

3. 試験方法と結果

本システムでは、集熱パネルへ出入りする熱媒体の温度差と流量の関係から、採熱量を継続的に測定している。標準化にあたり集熱パネルの面積は、表1に示す外形寸法を基準として算出しているため、メーカーのカタログ値などとは定義が異なる場合があることを最初に述べておく。

また日射量の評価についても、各時刻の日射強度を太陽の高度と方位角および集熱パネルの設置角度により補正した値を使用している。

(1) 通年測定データ

月別の日平均集熱量と集熱効率を図3に示す。平均集熱量(図中■)は、12月と6月に極小となり、3月と9~10月に大きくなる傾向が見られる。集熱パネルの設置仰角は36.4度であり、この地域における春分・秋分点での南中高度角にほぼ一致させてあることから、春分・秋分時期の正午頃には集熱パネルに太陽光線がほぼ垂直に差し込むこととなる。これとは反対に、集熱パネルに対して太陽光が最も大きな傾きを持って差し込む12月と6月に極小値を迎えている。6月には、梅雨とも重なることから、集熱量としては最小値となったものと考えられる。

集熱効率(図中—)は、NEDOが公開している過去20年間の平均日射量データ¹⁾との比較における熱の吸収効率を算出したものである。図3に示すように、集熱効率の月別の平均値では35~45%の範囲で変動があるものの、集熱量の増減と同様に増減していることから、日射強度との相関があると考えられ、年間平均としては40%程度の集熱効率が期待できると判断される。また、最も気温の低下する2月前後に着目すると、集熱効率は低下しておらず、集熱効率に及ぼす気温の影響はほとんど無視できるものと思われる。

(2) 貯湯温度が及ぼす集熱効率への影響

貯湯タンク内が比較的高い温度で保たれている状態と、

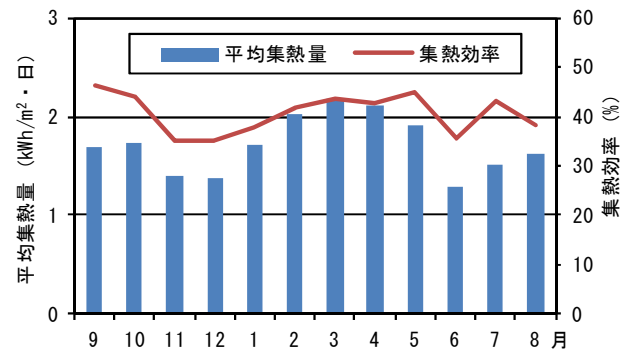
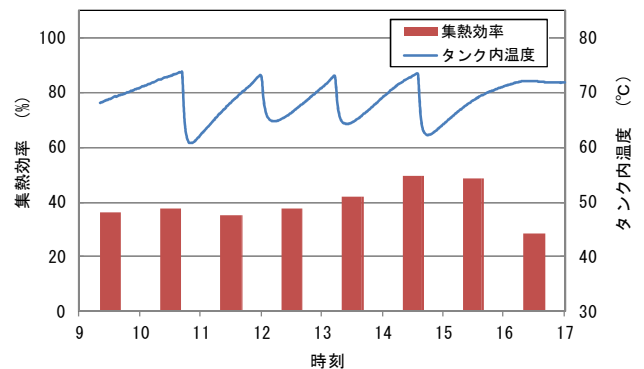
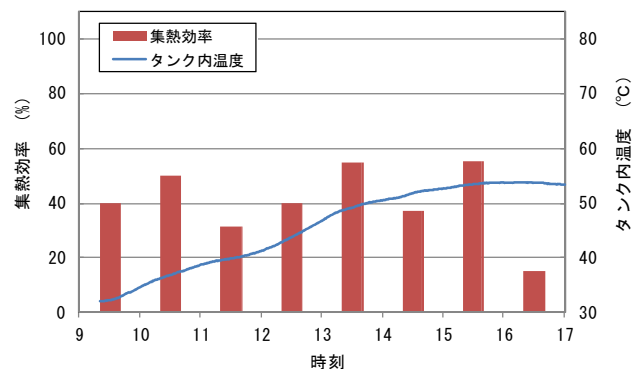


図3 月別の日平均集熱量と集熱効率

(2012年9月~2013年8月)



(a) 高温時(60~75℃)



(b) 低温時(32~55℃)

図4 貯湯温度と集熱効率の変化

タンクの湯を使用した後の比較的低い温度の状態では、循環ポンプの稼働率が上昇し、採熱効率が変動することが懸念されたことから、実測により確認することとした。

貯湯タンクは、タンク下層の水温が設定温度より高くなると自動的に排水を開始し、排水した量だけの水道水を注入して、過熱による沸騰を防止する機構を備えている。上限値を75℃程度に設定した場合の晴天時の温度変化の様子を図4(a)に示す。10時から15時にかけては、1.0~1.5時間毎に注水され、タンク内温度(図中—)は低下と上昇を繰り返すものの、60~75℃の高温に保たれた状態にあると言える。この日の1時間毎の採熱効率(図中■)は35~50%の範囲で変動しており、日中の平均値としては39%であった。

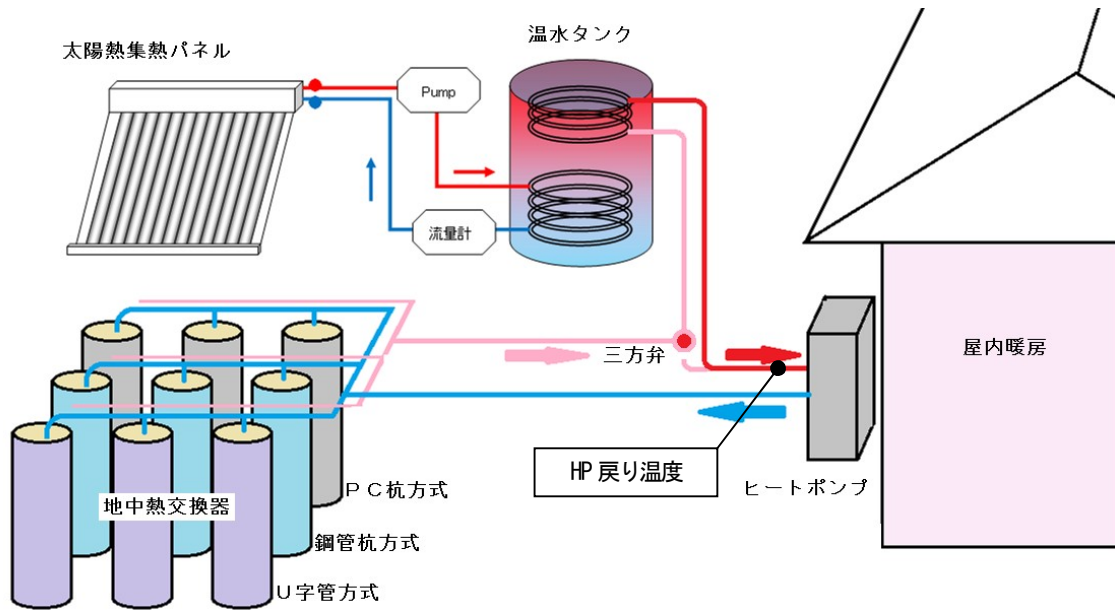


図5 地中熱空調への導入方法

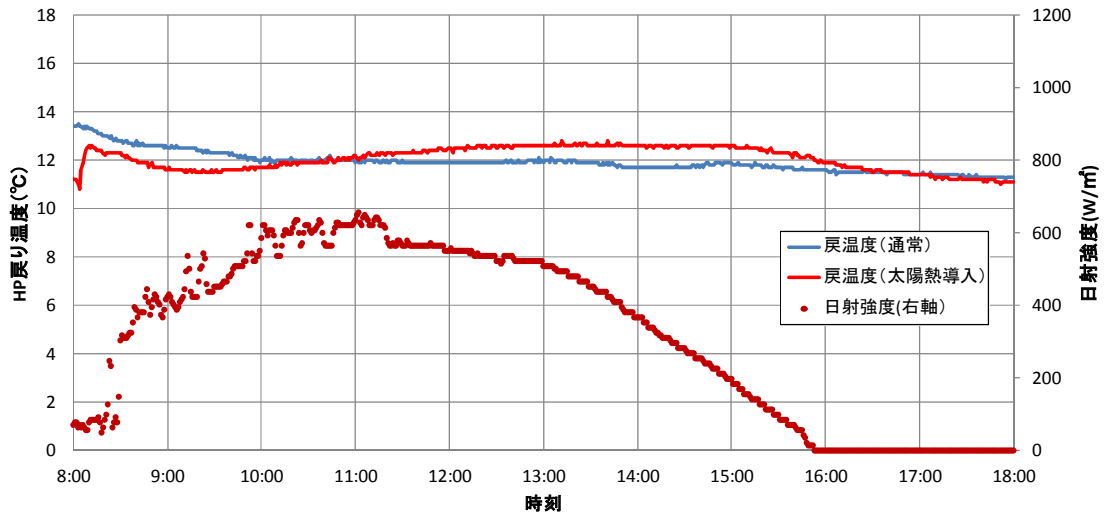


図6 戻り温度と日射強度の変化

次に比較のため、午前9時前にタンクの水を全量入れ替え、タンク温度が30℃程度からスタートした場合の測定結果を図4(b)に示す。タンクの温度は55℃以下であり、前述の結果より平均で25℃程度低い条件となっている。このように低い温度条件における採熱効率は30～55%の範囲で変動しており、先の試験より大きな変動幅を示しているものの、日中の平均値としては40%であり、貯湯タンクの温度変化と採熱効率の間に有意な差はほとんどないものと考えられる。

(3) 太陽熱と地中熱のハイブリッド空調

太陽熱を集熱する場合、一般家庭であれば年間を通じて給湯需要があるので、蓄積した太陽熱を直接給湯することで有効に利用することができる。ところが、事務所や店舗の場合、厨房や浴場を併設した施設でないと温熱源の用途が限られていることから、ロードヒーティング

への適用やビニルハウス（農業分野）への熱源提供などの用途あるいは、温熱源を冷房に活用する技術について実用性を検討しているところである。その一環として今回、オフィス建物での温熱源活用として、収集した熱を冬期の暖房の補助熱源として使用した。

試験に使用した建物では既に、地中熱による空調を導入しており、図5に示すように9本の地中熱交換器（深さ20m）と、出力10kWの地中熱ヒートポンプ（以下、HPと表記）を使用して、約100 m²の事務所の空調を行っている。³⁾

太陽熱集熱システムの貯湯タンクは、下層部と上層部に熱交換用のコイルパイプが設置されており、下層部のコイルは太陽熱をタンクに蓄熱する機能を、また、上層部のコイルは蓄熱した温熱源を媒体に取り出す機能を有している。今回、貯湯タンクの熱を暖房の補助熱源として取り出すために、図5の地中熱交換器から戻ってくる

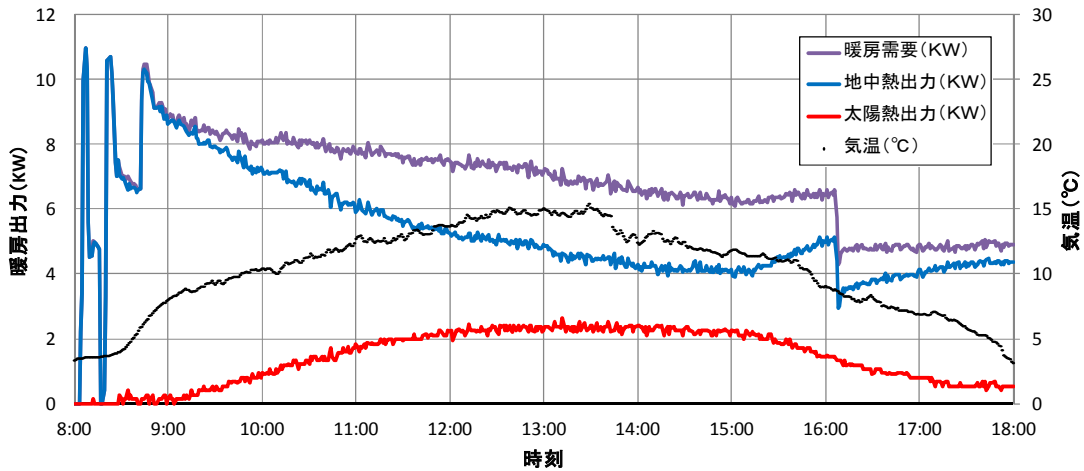


図7 自然エネルギーからの採熱量の変化

熱交換媒体を迂回させ、貯湯タンクの上層部のコイルを通ずることで昇温した後、HPへ戻す構成とした。また、冷房時期には三方弁を切り替えることで、貯湯タンクを迂回せずに地中熱交換器から直接HPへ戻すことができるようにしてある。

図6は、地中熱交換媒体のHP戻り温度の時間変化の一例を示したものである。太陽熱を導入しない場合の戻り温度(図中-)は、暖房運転開始直後と夕方の気温が低下する時間帯に顕著に低下している。一方、太陽熱を導入した場合(図中+)も、暖房運転開始直後には戻り温度の低下が見られるものの、日中の日射強度(図中・)の上昇とともにHP戻り温度が上昇し、運転開始時の温度が低いにも関わらず日中は非導入時より高い戻り温度を示した。日射強度がピークを越える11時を過ぎても、HP戻り温度は上昇を続け、戻り温度のピークは2~3時間遅れる結果を示している。この遅れの原因としては、温水タンクのクッション効果による時間遅れと、午後の気温の上昇による暖房需要の低下などが考えられる。さらに、運転終了時の温度も開始時に近い温度となっており、地中温度への負担が軽減していることが判る。

戻り温度の低下は、暖房運転により地中熱交換器周辺の土壌温度が低下していることを意味しており、夕方までに低下した温度幅が、暖房を停止している夜間に回復されれば、日々の熱収支のバランスが取れていることとなる。このような観点からも、運転開始時と終了時の温度差を小さくできる太陽熱の導入は効果が高いと判断される。

次に、太陽熱導入時の地中熱と太陽熱それぞれの採熱量の変化を図7に示す。午前中の暖房需要(図中-)は、運転開始の時間帯にHPの容量に相当する10kW程度のピークを示した後、気温(図中・)の上昇とともに減少し、室温の維持された午後は気温が低下しても、暖房需要に大きな上昇は見られない。この暖房需要をまかなう太陽

熱の出力(図中+)に着目すると、日射強度の増加する時間帯に合わせ上昇し、12~15時頃には2.2kWの出力を維持した後、日没にかけて低下するという変動を示している。地中温度への負荷(図中-)は太陽熱の負担分だけ軽減され、本システムでは最大で30%程度の暖房負荷を太陽熱により負担できることが判った。

表2は、図7に示した一日の熱量と電力を晴天日のエネルギーとして集計したものあり、曇天日は同じ時期の終始小雨の降る一日分の集計結果である。それぞれの暖房需要は、90kWh強とほぼ同一であった。晴天日における自然エネルギーからの採熱量のうち、太陽熱として14kWh以上採熱できており、本システムの採熱量の2割以上を賄えていることが確認された。集熱パネルの能力に換算すると2.2 kWh/m²/dayの集熱量となった。

なお曇天日のデータは、一日中小雨が降っており、日照時間がほぼゼロ(宇都宮の記録で0.1時間)の条件下であったにも関わらず、晴天時の30%以上の集熱量が確保されており、4.47kWh(パネル能力換算値で0.68 kWh/m²/day)の集熱ができていたことが確認された。直射の

表2 暖房エネルギー総括

項目	晴天日	曇天日
	2012/12/06	2012/12/03
地中採熱	54.15 kWh	66.07kWh
太陽採熱	14.27 kWh	4.47 kWh
採熱量合計	<u>68.42kWh</u>	<u>70.54kWh</u>
HP消費電力	22.33 kWh	23.27 kWh
太陽熱集熱器電力	0.42 kWh	0.20 kWh
消費電力合計	<u>22.75kWh</u>	<u>23.47kWh</u>
COP(地のみ)	3.42	3.84
COP(地+太)	4.01	4.01

日射がなくても、明るささえあれば、集熱できることが実証された。

太陽熱集熱器で使用される電力は、制御器と小型の循環ポンプのみであるため、少ない電力で大きな熱量を収集することができる。このため、曇天日においても0.2kWhの集熱器電力に比較して4.47kWhと、約20倍の太陽熱を集熱している。晴天日と曇天日のCOP(成績係数)を算出すると、天候によらずCOP≒4という値となっているが、暖房の補助熱源として利用する場合、暖房需要に対してまずは太陽熱が優先的に消費されて、その不足分を補う形で地中から採熱されており、結果的に、地中熱源の容量に余裕が生じた結果、HP自体の持つ熱交換能力の値に収束されたものと考えられる。

4. おわりに

太陽熱集熱器では集熱したエネルギーを数十℃の湯として蓄えることから、一般家庭での給湯としてそのまま使える手軽さがある。これを業務用として活用するには、年間を通じて給湯需要の発生する浴場施設や飲食店などのサービス業での利用価値が高いとされてきた。今回、オフィス暖房の補助的な熱源として試験的に導入を行い、確実な効果が得られることが確認できた。現状の集熱パネルは、36.4度の仰角に設置しており、この地域における春分・秋分点での南中高度角にほぼ一致させてある。

この角度は一般的に、年間を通じて最大の集熱量となる角度であると考えられるが、この度の実験のように、冬場の熱源としての利用を目的にするのであれば、冬の低い太陽高度に合わせて、より大きな仰角となるように設置することで最適化が図れるものと思われる。

冬場の熱源需要としては、路面の凍結防止なども考えられるが、今後、活用の幅を広げることを目的として、夏場の温熱源の活用方法についても検討を進めてゆく予定であり、吸収式冷温水器を応用した冷房や温度差発電への応用へ向けた試験を行う予定である。

参考文献

- 1)独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO):年間特別日射量データベース(METPV-11), <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- 2)畠中, 越後, 佐藤:埋蔵エネルギーの取り出し方〜地中熱交換器の基本性能の観測(第一報)〜, 川田技報 Vol.29, p.23, 2010.1.
- 3)畠中, 越後, 勝俣, 佐藤, 石下, 白谷:基礎杭型地中熱交換器の性能評価と実用, 川田技報 Vol.30, p.28, 2011.1.
- 4)金山公夫・馬場弘:ソーラーエネルギー利用技術, 森北出版株式会社, 2011.10.
- 5)伊藤義康:分散型エネルギー入門 電力の地産地消と再生可能エネルギーの活用, ブルーバックス, 2012.5.