

# エネルギー自立型避難所体育館の検討 —太陽熱温水システムの計算モデル構築—

伊澤康一\*・薬師神光希\*\*・宋城基\*\*\*

## Examination of solar hot water floor heating system aiming at ZEB shelter gymnasium

Koichi ISAWA\*, Koki YAKUSHIJIN\*\* and Sung Ki SONG \*\*\*

### ABSTRACT

The goal of this study is to improve the thermal environment of evacuation centers and to propose energy-independent ZEB-based evacuation centers. The authors have focused on the solar hot water floor heating system and examined the design and operation method of both the building skin system and building equipment system of the evacuation center gymnasium by numerical analysis. In this research, we tried to make our own calculation model of solar water heating system for the purpose of sufficient control in the operation of building equipment. As a result, we were able to make a computational model of the solar water heating system based on the measured values. As the next step, the heat load of the gymnasium arena where the hot water floor heating system is installed is calculated by general-purpose software, and it is input to the calculation model of the solar hot water system made this time to carry out a case study.

キーワード：避難所，体育館，建築熱環境，太陽熱温水，温水床暖房，ZEB，数値解析

Keywords: Shelter, Gymnasium, Building thermal environment, Solar hot water, Hot water floor heating, Net Zero Energy Building, Numerical analysis

### 1. 背景・目的・方法

近年、想定を超える自然災害が増加しており、避難所への避難を余儀なくされる場合も多い。しかし、避難所環境は劣悪であり、それに起因する災害関連死も生じている。また、ライフライン途絶時と長期避難所暮らしの双方に対応できるエネルギー自立型の避難所を構築することが求められている。したがって、本研究では、避難所の環境を改善するとともに、エネルギー自立型の ZEB 化された避難所を提案することを目標とした。

平常時・非常時の双方において機能する自立型 ZEB 避難所は、太陽熱利用、太陽光発電+蓄電池、燃料電池、水素

エネルギーなどのトータルシステムの組み合わせ技術によって構築することを視野に入れている。一例として、居住環境のエネルギー需要の約半分に相当する熱需要に対しては太陽熱温水システムで熱供給し、残り半分の電力需要に対しては太陽光発電・蓄電システム・コージェネレーション等で電力供給するシステムが考えられる(図1)。

それら要素技術のうち、本研究ではまず太陽熱利用に着目した。避難所での問題としてトイレに次いで暖房設備であることが指摘されており[1]、避難所にも冷暖房設備の設置が望ましいと考える。災害関連死の症状としては呼吸器疾患・循環器疾患による症状が上位2つであり、その要因としては

疲労や寒さなど避難所環境に起因するものが上位を占めている（東日本大震災時）。

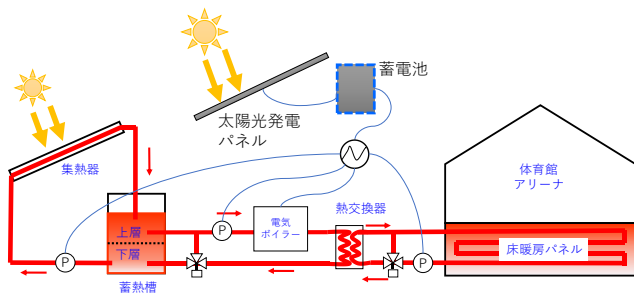


図1 エネルギー自立型避難所体育館

以上の背景から、筆者らは、太陽熱温水床暖房システムに着目し、太陽熱を利用する避難所の外皮・設備システムのデザインと運用方法を、数値解析によって検討してきた。

既往研究[2]における太陽熱温水システムの計算モデルでは、汎用ソフトの制約上、建築設備運用の十分な制御ロジックを設定することができなかった。

そこで本研究では、十分な制御を行なうことを目的として、太陽熱温水システムの計算モデルを、Excel VBA で自作構築することを試みた。

## 2. 計算モデルの検討

### 2. 1 モデル化対象システム

広島工業大学（広島市佐伯区）にある既存避難所体育館の屋上に設定されている太陽熱利用システム[3]を対象とした。

図2に、設備系統図を示す。「集熱器」（写真1）でつくった温水を「蓄熱槽」（写真2）に貯え、所要温度よりも低い場合は「ボイラー」（写真3）で温水を加熱し、その温水の持つ熱を「給湯」・「プール」・「暖房」の3つの熱負荷へ供給するシステムとなっている。

図3に、図2をデフォルト化したものを示す。対象システムで特徴的なのは、蓄熱槽下層からボイラー・熱負荷へ温水が送られ、熱負荷から戻ってくる温水は蓄熱槽上層に入るといった点である。なお、一般的には、蓄熱槽上層からボイラー・熱負荷へ温水が送られ、熱負荷から戻ってくる温水は蓄熱槽下層に入るといったシステムが用いられることが多い。本研究では、対象システムの特徴を反映してモデル化することとした。「蓄熱槽」において、「給湯系統」・「プール系統」・「暖房系統」が合流していることから、「給湯」・「プール」・「暖房」の3つの熱負荷を一つの「熱負荷システム」としてまとめることにした。

図4に、図3の3つの熱負荷を一つの「熱負荷システム」として簡略化したものを示す。「集熱器」・「蓄熱槽上層」・「蓄熱槽下層」の3つのシステムについて、3本のエネルギー収支式を立て、それらを連立して解くことによって、集熱器出口温度・蓄熱槽上層温度・蓄熱槽下層温度の3点が求まる[4]。

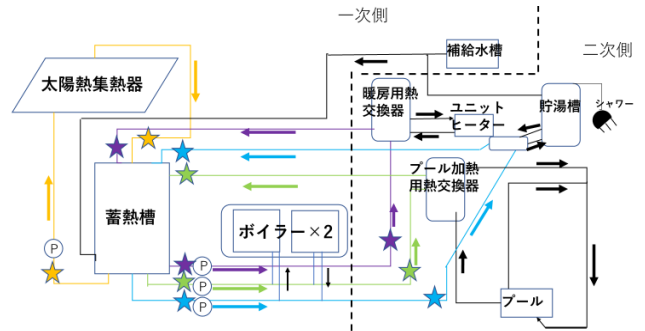


図2 対象システム（詳細版）



写真1 集熱器



写真2 蓄熱槽



写真3 ボイラー

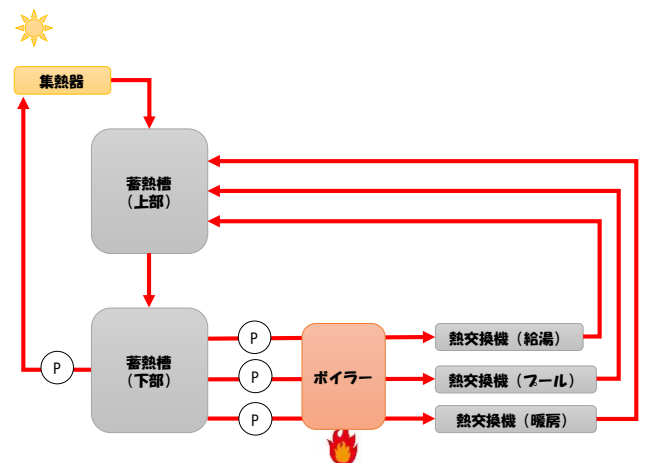


図3 対象システム（デフォルト版）

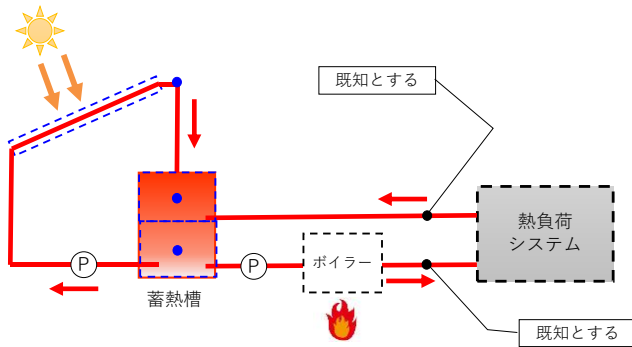


図4 モデル化対象システム

## 2. 2 太陽熱温水床暖房システム

図5に、計算モデル構築後に実施予定の太陽熱温水床暖房システムを示す。想定システムは、「集熱器」・「蓄熱槽」・「ボイラー」・「熱交換器」・「床暖房パネル」・「体育館アリーナ」(写真4)で構成する。太陽熱集熱器でつくった温水を蓄熱槽に貯え、その温水を体育館2階アリーナの床暖房パネルへ循環させるシステムを想定した。なお、計算モデルに入力する体育館アリーナの熱負荷は、汎用ソフトEESLISM[5]によって求めたものを使用する予定である。

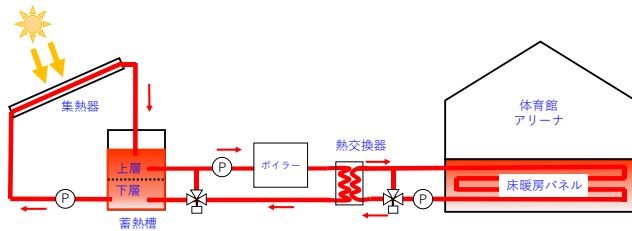


図5 太陽熱温水床暖房システム



写真4 体育館アリーナ

## 2. 3 理論式

文献[4]に示される理論式を、図4に特有の系統(蓄熱槽下層から熱負荷へ送り、熱負荷から蓄熱槽上層へ返る)を反映して定式化し直した。表1に各システムのエネルギー収支式を、表2に理論式を、表3に記号表を示す。

表1 エネルギー収支式

<p>&lt;システム①：集熱器&gt;          [日射] + [実効放射]          + [蓄熱槽下層から入る水が持つ熱]          = [蓄熱槽上層へ出る水が持つ熱] + [放熱]</p>
---

### <システム②：蓄熱槽上層>

[集熱器から入る水が持つ熱]  
 + [熱負荷から入る(戻る)水が持つ熱]  
 = [蓄熱槽上層に溜まる熱]  
 + [蓄熱槽下層へ出る水が持つ熱] + [放熱]

### <システム③：蓄熱槽下層>

[蓄熱槽上層から入る水が持つ熱]  
 = [蓄熱槽下層に溜まる熱]  
 + [集熱器へ出る水が持つ熱]  
 + [ボイラーへ出る水が持つ熱] + [放熱]

表2 理論式

#### <システム① 集熱器>

$$t_{out} = t_e - (t_e - t_{s2}) \text{Exp} \left( -\frac{K_c \cdot A_c}{c_w \rho_w Q_c} \right) \quad (1)$$

#### <システム② 蓄熱槽上層>

$$\begin{aligned} & c_w \rho_w Q_c (t_{out} - t_o) \\ & + c_w \rho_w Q_f (t_{return} - t_o) \\ & = c_w \rho_w V_{t1} \frac{t_{s1} - t_{s1p}}{\Delta \tau} \\ & c_w \rho_w (Q_c + Q_f) (t_{s1} - t_o) + K_f S_{t1} (t_{s1} - t_{ox}) \quad (2) \end{aligned}$$

#### <システム③ 蓄熱槽下層>

$$\begin{aligned} & c_w \rho_w (Q_c + Q_f) (t_{s1} - t_o) \\ & = c_w \rho_w V_{t2} \frac{t_{s2} - t_{s2p}}{\Delta \tau} \\ & + c_w \rho_w Q_c (t_{s2} - t_o) \\ & + c_w \rho_w Q_f (t_{s2} - t_o) + K_f S_{t2} (t_{s2} - t_{ox}) \quad (3) \end{aligned}$$

表3 記号表

<p><math>t_{out}</math> : 集熱器出口水温 [°C]  <math>t_e</math> : 相当外気温 [°C]  <math>t_{s1}</math> : 蓄熱槽上層温 [°C]  <math>t_{s2}</math> : 蓄熱槽下層温 [°C]  <math>t_{s1p}</math> : 一時刻前の蓄熱槽上層温 [°C]  <math>t_{s2p}</math> : 一時刻前の蓄熱槽下層温 [°C]  <math>\Delta t</math> : 計算時間間隔[s]  <math>t_{ox}</math> : 蓄熱槽の周囲温度[°C]  <math>t_r</math> : 室温[°C]  <math>t_o</math> : 外気温[°C]  <math>c_w</math> : 水の比熱 [J/(kg · K)]  <math>\rho_w</math> : 水の密度 [kg/m³]  <math>Q_c</math> : 集熱器循環流量 [m³/s]  <math>K_c</math> : 集熱器配管温水から外気までの熱貫流率[W/(m² · K)]</p>
---

$A_c$ : 集熱面積 [m <sup>2</sup> ]
$K_f$ : 蓄熱槽の熱貫流率 [W/(m <sup>2</sup> ・K)]
$S_{t1}$ : 蓄熱槽上部の表面積 [m <sup>2</sup> ]
$S_{t2}$ : 蓄熱槽下部の表面積 [m <sup>2</sup> ]
$V_{t1}$ : 蓄熱槽上部の貯水量[m <sup>3</sup> ]
$V_{t2}$ : 蓄熱槽下部の貯水量[m <sup>3</sup> ]
$Q_f$ : 負荷系統循環流量 [m <sup>3</sup> /s]
$t_{return}$ : 熱負荷戻り水温[°C]

### 3. 入力データの検討

#### 3. 1 実測データの整理

広島工業大学キャンパス（広島市佐伯区）で測定された2019年1月1日～1月31日の1ヵ月間のデータを用いた。計算結果の評価期間としては、日射量が少なく気温が低い1月26日に着目し、その前後を含めた1月25日～27日の3日間とした。1月1日から1月24日までを助走計算とした。なお、熱量の積算値は、1月1日～31日の1ヵ月間とした。

図6に、日射量と実効放射量を示す。日射量は、実測した水平面全天日射量を直散分離した後に集熱器へ入射する全日射量を求めた。実効放射量は、外気温・外気相対湿度の実測値に加えて、曇量(0≦C≦10)を5(中間的な値)として与えて算出した。

図7に、外気温と相当外気温を示す。相当外気温は、日射量と実効放射の影響を外気温に加味して算出される。

図8に、集熱系統・給湯系統・プール系統・暖房系統の流量をそれぞれ示す。集熱流量を見ると、曇天日の1/26では、流量が絞られていることが確認できる。給湯流量と暖房流量は、利用時間である15:00～18:00に多くなっている。プール流量は、終日310 L/minで一定となっている。

表4に、各種熱量の算出式を示す。「集熱量」・「蓄熱槽による供給熱量」・「ボイラー加熱量」・「熱負荷」の4つの算出式を示した。集熱量は、入口と出口の温度差と流量から算出した。供給熱量は行きと返りの温度差と流量から算出、加熱量はボイラー通過後と往きの温度差と流量から算出、熱負荷は戻りとボイラー通過後の温度差と流量から算出した。

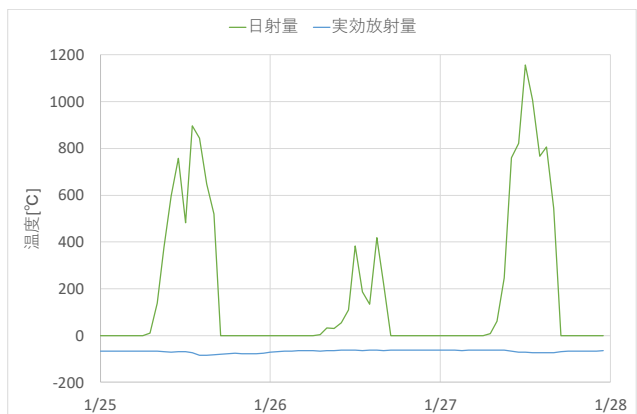


図6 日射と実効放射

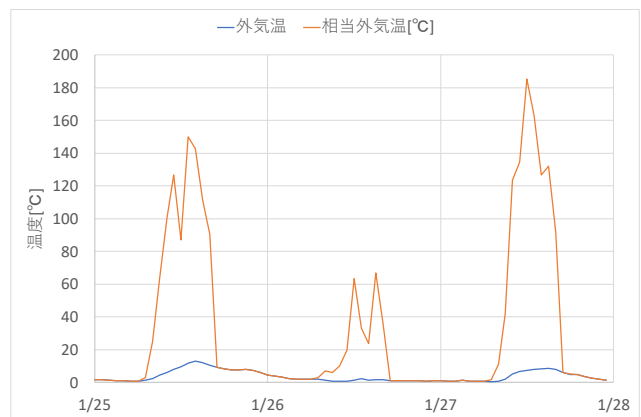


図7 外気温と相当外気温

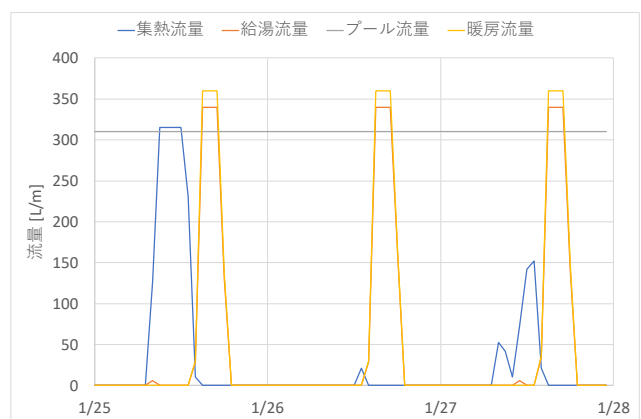
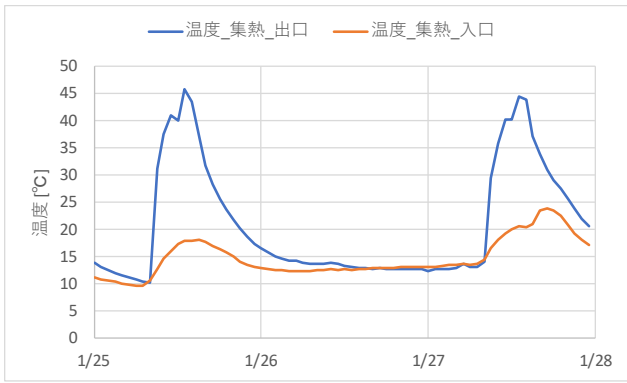


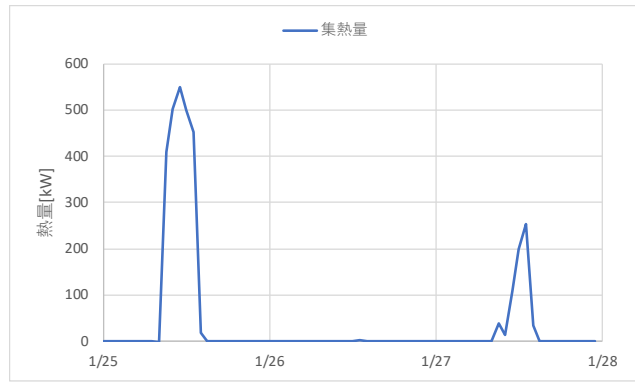
図8 各部流量

表4 熱量の計算式

<p><b>[集熱量]</b>  <math display="block">= [\text{水の比熱}] \times [\text{水の密度}] \times [\text{流量}] \times ( [\text{出口温度}] - [\text{入口温度}] )</math></p> <p><b>[蓄熱槽由来の供給熱量]</b>  <math display="block">= [\text{水の比熱}] \times [\text{水の密度}] \times [\text{流量}] \times ( [\text{行き温度}] - [\text{戻り温度}] )</math></p> <p><b>[ボイラーによる加熱量]</b>  <math display="block">= [\text{水の比熱}] \times [\text{水の密度}] \times [\text{流量}] \times ( [\text{ボイラー通過後温度}] - [\text{行き温度}] )</math></p> <p><b>[熱負荷]</b>  <math display="block">= [\text{水の比熱}] \times [\text{水の密度}] \times [\text{流量}] \times ( [\text{戻り温度}] - [\text{ボイラー通過後温度}] )</math></p>
---

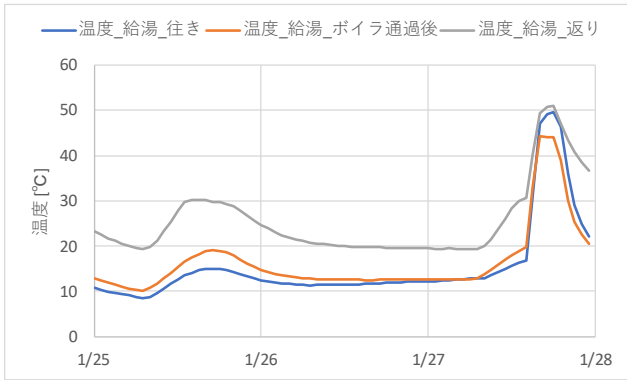


a)温度

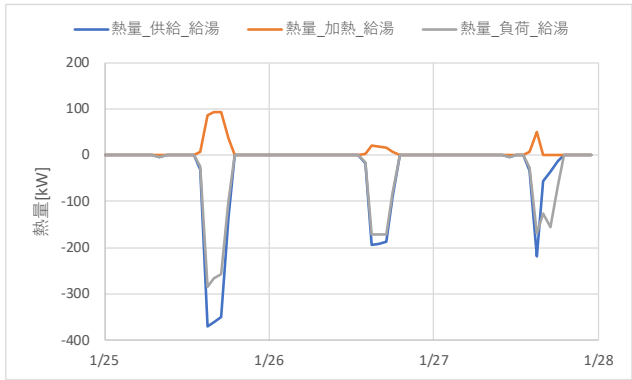


b)熱量

図9 集熱器

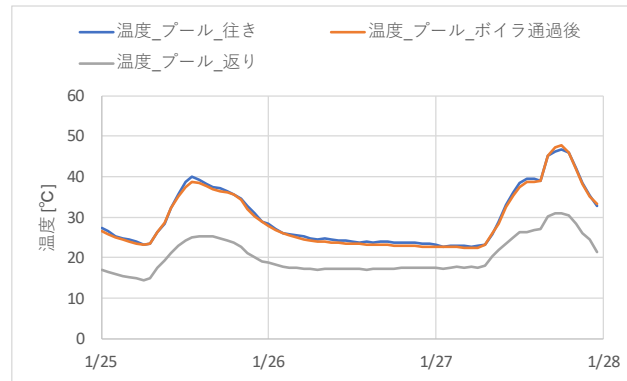


a)温度



b)熱量

図10 給湯負荷

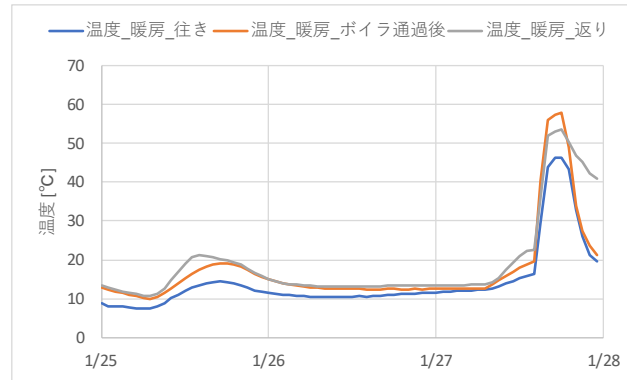


a)温度

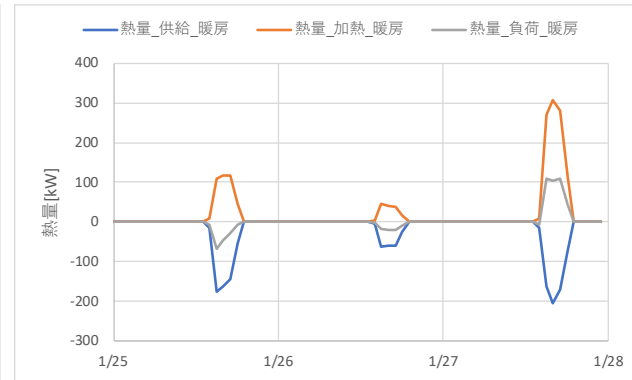


b)熱量

図11 プール負荷



a)温度



b)熱量

図12 暖房負荷

図9に、集熱器における a) 温度と b) 集熱量を示す。日射量の多い1/25,27では集熱し、曇天日の1/26ではほとんど集熱していない。

図10に、給湯負荷における a) 温度と b) 熱量を示す。  
 a) 温度は、行き・ボイラー通過後・返りの3つを示した。  
 b) 熱量は、蓄熱槽による供給熱量、ボイラー加熱量、熱負荷の3つを示した。a)を見ると、行き温度に比べてボイラー通過後温度が高くなっているが、それよりもさらに返り温度が高くなっている。b)を見ると、供給と負荷が負の値を示し、供給されるのではなく逆に供給している。これらの原因として以下の2つを推測している。1つは、返り温度の測定位置が不適切であったため逆流した温度を計測した可能性がある。もう1つは、給湯系統内にある貯湯槽で何らかの加熱があった可能性も考えられる。これらの原因は、今後の実測で究明したい。

図11に、プール負荷における a) 温度と b) 熱量を示す。  
 a)を見ると、行き温度とボイラー通過後温度がほぼ等しい。プール系統ではボイラー加熱がほとんどなかったと考えられる。返り温度は、ボイラー通過後温度よりも5~15℃程度低くなっている。

図12に、暖房負荷における a) 温度と b) 熱量を示す。  
 a)を見ると、行き温度に比べてボイラー通過後温度が高くなっているが、それよりもさらに返り温度が高くなっている時間帯も見られる。b)を見ると、供給と負荷が負の値を示し、供給されるのではなく逆に供給している。これらは、図10の給湯負荷と同じ状況であり、今後の実測によって原因究明したい。

図13に、1月(1ヵ月間)の積算熱量を示す。利用を見ると、プールでの熱利用がほとんどである。供給の内訳としては、蓄熱槽由来が大半を占め、ボイラー由来は小さい。

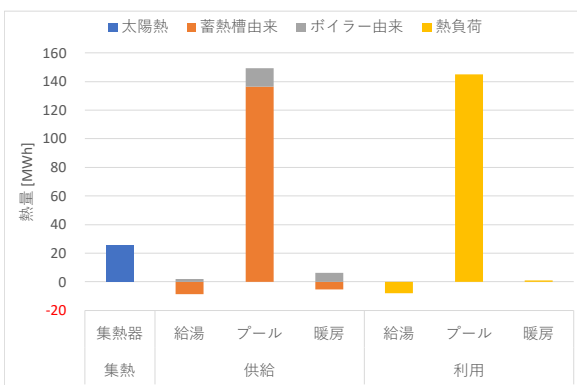


図13 積算熱量 (熱負荷3系統)

### 3.2 入力データの整理

計算モデルへの入力データとしては、熱負荷を流れる流量、熱負荷の入口温度・出口温度となる。それらは、「給湯系統」・「プール系統」・「暖房系統」の3系統を総合した値となる。

図14に、熱負荷システムの流量を示す。「給湯系統」・「プール系統」・「暖房系統」の合計値とした。プール流量 310

L/min をベースとして、給湯・暖房の流量が増える夕方に合計で約 1000 L/min になっている。

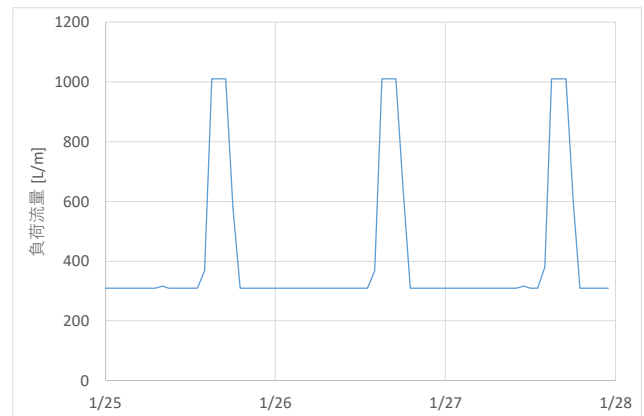
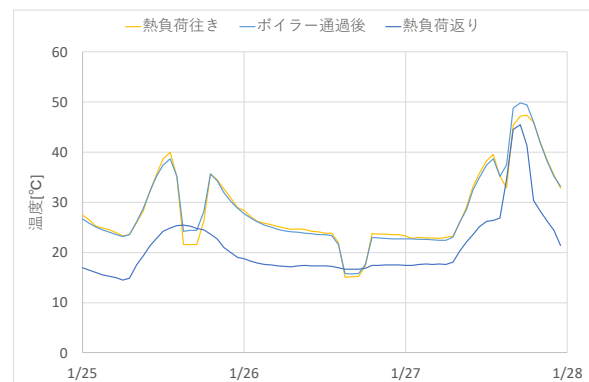
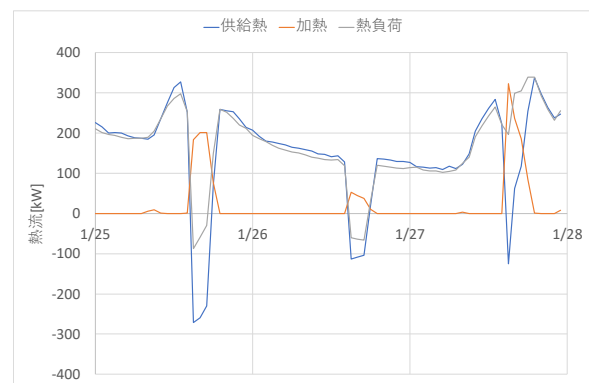


図14 熱負荷流量 (熱負荷1系統に統合)

図15に、暖房負荷における a) 温度と b) 熱量を示す。熱負荷システムの行き・ボイラー通過後・返りの温度は、「給湯」・「プール」・「暖房」の各々の行き・ボイラー通過後・返りの温度を流量重み付け平均して算出した。行き温度とボイラー通過後温度がほぼ等しいことから、ボイラー加熱がほとんどなかったと考えられる。b)を見ると、夕方の時間帯において、供給と負荷が負の値を示し、供給されるのではなく逆に供給している。一方で、同じく夕方の時間帯において、加熱が正の値となっている。ボイラーで加熱した熱によって蓄熱槽を加熱していた可能性が考えられる。



a) 温度



b) 熱量

図15 熱負荷システム

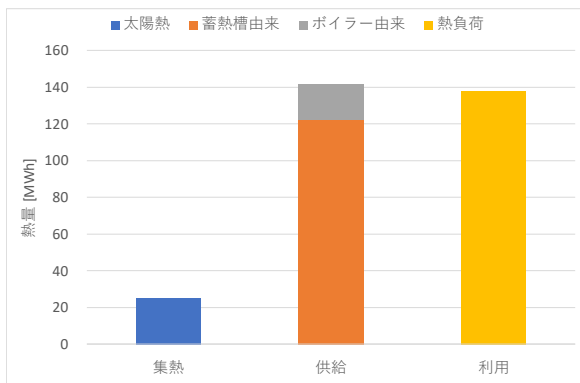


図 16 積算熱量 (熱負荷 1 系統に統合)

図 16 に、熱負荷を 1 系統に統合した場合の 1 月 (1 カ月間) の積算熱量を示す。利用熱量に対し、蓄熱槽由来が大半を占め、ボイラー由来は小さい。しかしながら、図 15 に関連して述べたことを勘案すると、蓄熱槽由来には間接的なボイラー由来が含まれている可能性が考えられる。

#### 4. 計算値と実測値の関係

図 17 に、集熱器出口温度の計算値と実測値を示す。なお、集熱ポンプが停止し、流量がゼロの時間帯の計算値は除外した。日中において計算値が実測値からずれる場合があるが、これは、日射量の瞬時値が大きいときの影響と推測する。

図 18 に、集熱器出口の計算値と実測値の関係を示す。日射量の瞬時値が大きいときの影響それを除けば、温度の傾向としてはある程度再現できていると考えた。

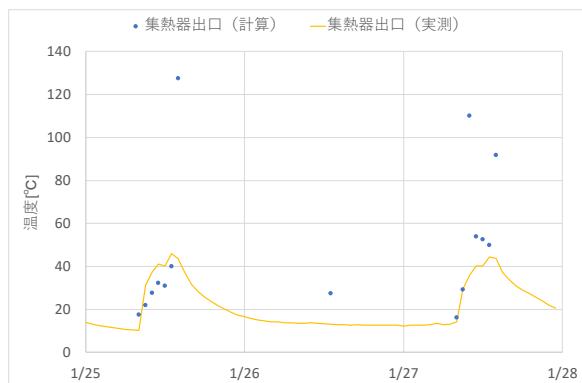


図 17 集熱器出口温度 (計算値と実測値)

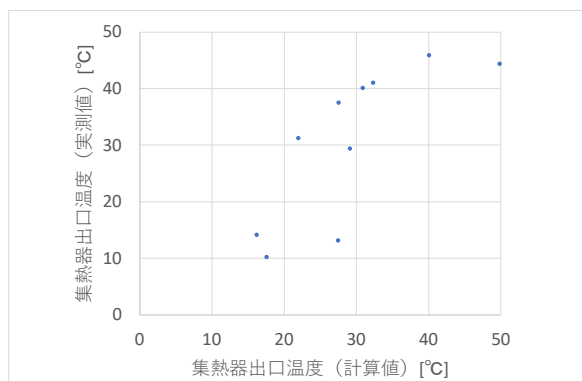


図 18 集熱器出口温度 (計算値と実測値の関係)

図 19 に、蓄熱槽上層・下層温度の計算値と、集熱入口温度・熱負荷行き温度の実測値を示す。今回の実測では、「蓄熱槽温度」そのものを計測していない。そこで、「集熱器入口温度」と「熱負荷行き温度」を参考して調整することにした。しかし、「集熱器入口温度」は、配管熱ロスのため「蓄熱槽温度」よりも低い可能性が考えられる。また、「熱負荷行き温度」は、逆流の影響を受ける計測位置であったため、実際の温度よりも高めに計測されたことがわかっている。そこで今回の計算モデルでは、計算された「蓄熱槽温度」が、「集熱器入口温度」と「熱負荷行き温度」の間に入っていれば、概ね傾向をモデル化できたと見なした。

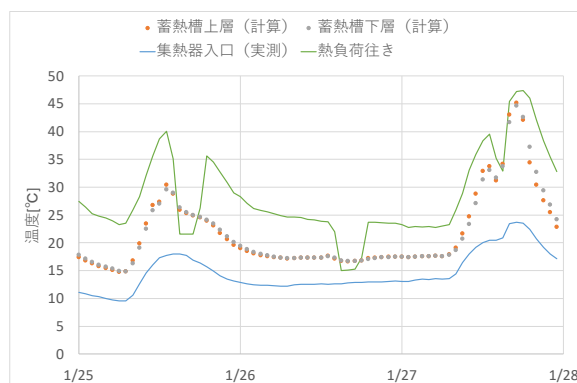


図 19 蓄熱槽温度と集熱器出口温度・熱負荷行き温度

#### 5. おわりに

##### 5. 1 結論

実測値に基づいて、太陽熱温水システムの計算モデルを構築した。

##### 5. 2 今後の課題

温水床暖房システムが設置された体育館アリーナの熱負荷を汎用ソフトによって算出し、今回構築した太陽熱温水システムの計算モデルに入力してケーススタディを実施する。建物仕様としては、既存外皮や ZEB 外皮を予定している。

##### 【参考文献】

- [1] 文部科学省：平成 23 年度東日本大震災における学校等の対応等に関する調査研究報告書、平成 24 年。
- [2] Koichi ISAWA1, Sung-Ki SONG and Koki YAKUSHIJIN: Numerical analysis of solar hot water floor heating system aiming at ZEB shelter gymnasium, Proceedings of the 11th SOLARIS 2021, Lecture number B73, 2021.9.
- [3] 宋城基・伊澤康一：自立型避難所体育館に関する研究 (その 1) 30 年間使用の太陽熱利用システムの運用状況と性能, 日本太陽エネルギー学会講演論文集, pp.91-94, 2020.11.
- [4] 田中俊六監修・宇田川光弘ほか著：最新建築設備工学 (改訂版), 井上書院, pp.71-73, 2010 年。
- [5] 宇田川光弘・佐藤 誠：EESLISM4.5 による建築のエネルギーシステムシミュレーション, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.729-732, 1999.

