

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その237）

—温度成層型蓄熱槽の実測比較による計算分割数の検討—

**Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Study division number of calculating Thermal Storage Tank by comparison between Simulation Results and Actual Measurements)**

正 会 員 〇中塚 一喜(三晃空調)  
 技術フェロー 柳原 隆司(RY 環境・エネルギー設計)  
 正 会 員 河路 友也(愛知工業大学)  
 技術フェロー 石野 久彌(首都大学東京名誉教授)

正 会 員 二宮 博史(日建設計)  
 名誉会員 中原 信生(環境システック中原研究処)  
 名誉会員 村上 周三(建築環境・省エネルギー機構)

Kazuki NAKATSUKA\*1 Hiroshi NINOMIYA\*2 Ryuji YANAGIHARA\*3

Nobuo NAKAHARA\*4 Tomoya KAWAJI\*5 Shuzo MURAKAMI\*6 Hisaya ISHINO\*7

\*1 Sanko Air Conditioning Co. Ltd. \*2 Nikken Sekkei \*3 RY Environmental and Energy Design Office

\*4 Nakahara Laboratory, Environmental Syst.-Tech. \*5 Aichi Institute of Technology

\*6 Institute for Building Environment and Energy Conservation \*7 Tokyo Metropolitan University

Using CKK as the building and HVAC system model the simulation program ‘BEST’ was verified by comparing with actual system operation results for heat pump system with temperature-stratified thermal storage tanks. This paper presents results of the optimal division number of calculating water thermal storage tank.

はじめに

本報では、BEST 専門版 1810 改良版（以下、BEST と表記）による温度成層型水蓄熱槽の計算結果と実測値を比較し、プログラムの精度を検証した。対象建物は温度成層型水蓄熱槽が採用されている CKK 大学研究棟(以下、CKK ビル)とした。既報<sup>1)</sup>では温水槽の温度成層に一部課題が残っていたが本報で解決に至った経緯を報告する。また、BEST 計算時に入力が必要な温度成層型蓄熱槽における計算分割数の適正值について検証した。

1. 建物概要

建物名称:名古屋大学研究所共同館(8F、延床面積7,046m<sup>2</sup>)  
 建物種別:研究実験棟 竣工:2013年2月  
 一般系統熱源:温度成層蓄熱槽 126m<sup>3</sup>×2槽  
 井水熱源高効率ヒートポンプ(HP)100RT  
 一般系統空調:大温度差確保 FCU+エコ外気導入  
 CKK ビルの主要機器を表1に示す。システム等、詳しくは既報<sup>2)</sup>を参照されたい。蓄熱槽は 126m<sup>3</sup> の温度成層型蓄

熱槽を 2 槽備えているが、設計時の負荷より小さく、熱回収も不可能であったので実運用では 1 槽運転となった。そのため、本論文でも蓄熱槽は 1 槽としてモデル化した。なお本蓄熱槽は上面が外気に接する地盤、底面と側面の一部は地盤に、側面の一部は機械室に面している。

BEST の計算モデルを図1に示す。計算対象は 1 次側のみとし、境界条件として CKK ビル BEMS より取得した外気温度、熱源水の熱源入口温度と流量、2 次側からの還水流量と温度を設定し入力した。

2. 蓄熱槽の実測比較による分割数の検討

2.1 既報での課題とプログラムの修正

前報<sup>1)</sup>では冬期代表日における温水槽の放熱プロフィールが実測値と BEST1805 間で差があることを報告した。双方とも放熱は満蓄からスタートしており、負荷(2 次側からの還

表1 CKK ビルの主要機器表

機器	機器名称	定格能力仕様		台数		
R-1	水熱源ヒートポンプ	冷却出力		1		
		冷却能力	kW		348.5	
		消費電力	kW		56.4	
		冷水入口	°C		14	
				温水出力		
		加熱能力	kW	403.1		
		消費電力	kW	65.4		
		温水入口	°C	33		
温水出口	°C	41				
PC-1	冷温水一次ポンプ	流量	L/min	730	2	
PH-1		動力	kW	3.1		
		変流量制御				
		利用温度差	°C	8		
PCH-1-1	放熱一次ポンプ	流量	L/min	640	2	
		動力	kW	3.7		
		変流量制御				
PCH-2-1~6	放熱二次ポンプ	流量	L/min	140	6	
		動力	kW	2.2		
		変流量制御				
	温度成層型蓄熱槽	蓄熱槽容量	m <sup>3</sup>	126	2	
		槽高さ	m	4.8		

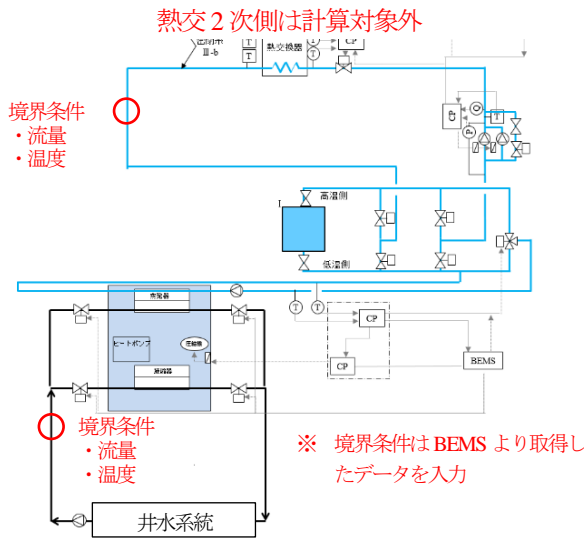


図1. BEST 計算モデル (冷水回路)

り流量と水温)も同じであったが、温度勾配に明確な差が生じていた。原因は温度成層型蓄熱槽の計算において、蓄熱槽の混合域に関して水深を入力された分割数によって計算するはずが、分割せずに計算する不具合があった、且つ設定した分割数が不適切なためであった。BEST1810改良版では不具合は修正され入力された分割数が計算に反映される。適切な分割数については次節で検討する。

## 2.2 BESTによる温度成層型蓄熱槽の計算分割数の検討

BESTでは温度成層型蓄熱槽の分割数を計算に反映することができるが、これまで温度成層型蓄熱槽のシミュレーションを行うに当たって適当な分割数を示唆する知見は見られない。本報では実測値との比較から温度成層型蓄熱槽シミュレーション時の最適な分割数を検討した。本報での評価は実測値温度プロフィールとの相似性と放熱量で行う事とする。なおBESTの温度成層型蓄熱槽のシミュレーションモデルは実用R値モデル<sup>3)</sup>であり、誤差にはシミュレーションモデルそのものの誤差と、計算技法上の誤差(分割数、計算タイムステップの制約など)がある。十分に大きい分割数の計算結果と実測値との誤差は、熱損失の影響を除けば、実用R値モデル自体の誤差であり、計算分割数の影響は計算技法上の誤差で、分割数が多いほどその誤差は縮まる。

図2に実測値とBESTで計算した各分割数の夏期代表日、冬期代表日の放熱時蓄熱槽温度プロフィールを示す。なお蓄熱槽に流入する2次側還り流量、水温は境界条件として実測値を与えているため実測の水蓄熱槽と条件に差はない。熱源から流入する流量、水温に関しても実測と同様の制御値をBESTに入力し、一部起動時等の制御が安定していない時間帯を除きほぼ同一の条件となっている。夏期を見ると分割数が多くなるにしたがって実測値に近づいていくことがわかる。分割数100以下では蓄熱槽から取り出せる熱量が小さく、熱源の追従運転が発生している。蓄熱槽の放熱量が小さくなった原因は分割数が少ない場合、末端槽(槽上部)に還ってきた高い水温が低層まで影響を与えやすく始端槽(槽底部)の水温が熱源の起動条件を与える2次側限界送水温度を超えてしまったことによる。冬期の温度プロ

フィルも夏期と同様で分割数が多くなるにしたがって実測値に近づいている。しかし実測値では槽上部が8時~21時の13時間の間に自然放熱により温度が約0.5°C低くなっているのに対し、BESTでは0.2°Cの低下であった。BESTでは自然放熱が分割槽ごとに計算されており、槽高さ別の温度の違いは考慮されているが、外部温度は全周外気となっている。本建物における槽外部は前述の通り上面が外気、他は地盤ないし内壁でシミュレーションと差がある。

図3は夏期・冬期代表日の同一時刻、同一高さの水温について、横軸に実測値、縦軸にBEST計算結果(50~300分割)をプロットしたものを示した。夏期の場合、追掛け運転が生じない200分割以上あれば本建物の蓄熱槽はBESTで精度よく再現されていると考える。冬期に関しては300分割でも頻度の多い低温域と高音域は概ね一致しているが、頻度の少ない中間槽ないし放熱過程で生じる28°C~35°C帯で差が見られる。R<sup>2</sup>値としては100分割以上ではほぼ差が無く、夏期と同様分割数が200以上あればシミュレーション上精度に問題はない。分割数を多くしても差があるのは、①BESTでは水平温度差を無視している、②自然放熱の熱量に差があり、また放熱量の偏在に対応できない、③実用R値モデル自体の誤差、以上3点によると考えられる。蓄熱温度と外気温度の差が大きい冬期で誤差が大きいことから特に②の自然放熱による誤差が大きいものと予想される。

分割数によるBESTの計算時間について触れておく。分割数を多くすれば温度成層型蓄熱槽の計算精度はあがるが、計算時間が伸びる。今回の計算では分割数300で8分20秒、200で6分32秒、100で4分48秒、50で4分12秒であった。本計算では300分割までであれば計算時間に多大な影響を及ぼさなかったが、BESTの結果ファイルが重くなる点と計算中のグラフ表示機能は100分割から動作が非常に遅くなるため使用できなかった点を付け加えておく。

## 3. 槽高さを変更した場合の検討

### 3.1 計算条件

前節では高さ4.8mの温度成層型蓄熱槽の計算分割数の適正值について実測値比較を行い検討した。本節では槽の

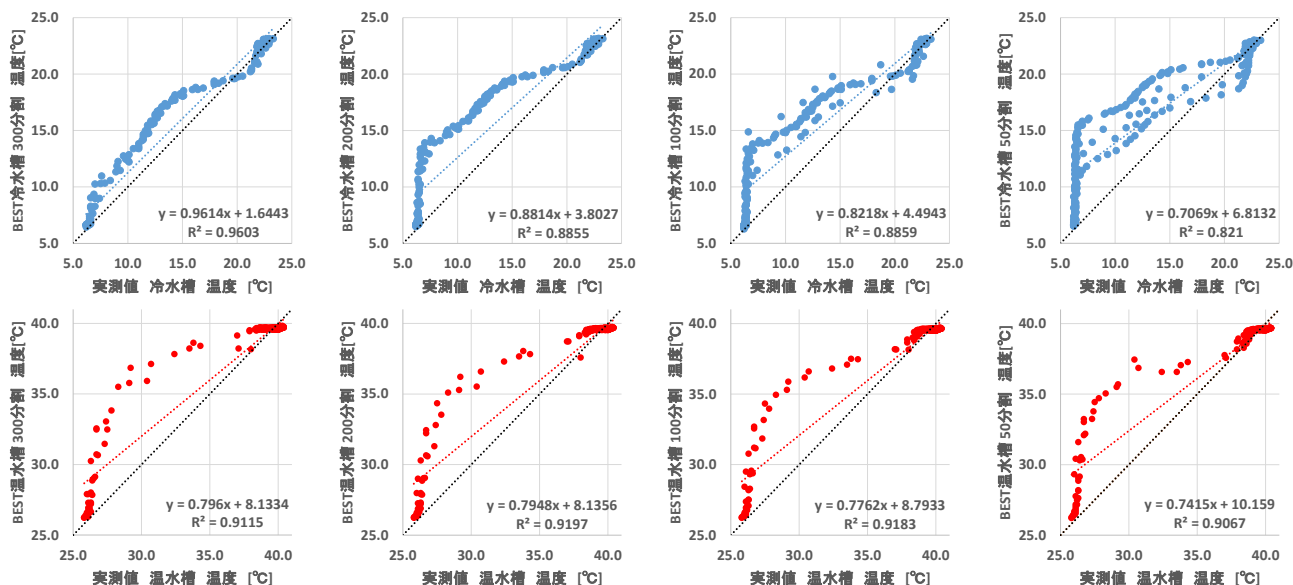


図3. 実測(横軸)とBEST(縦軸). 左から分割数300、200、100、50)の水温計算結果比較 (上段: 冷水、下段: 温水)

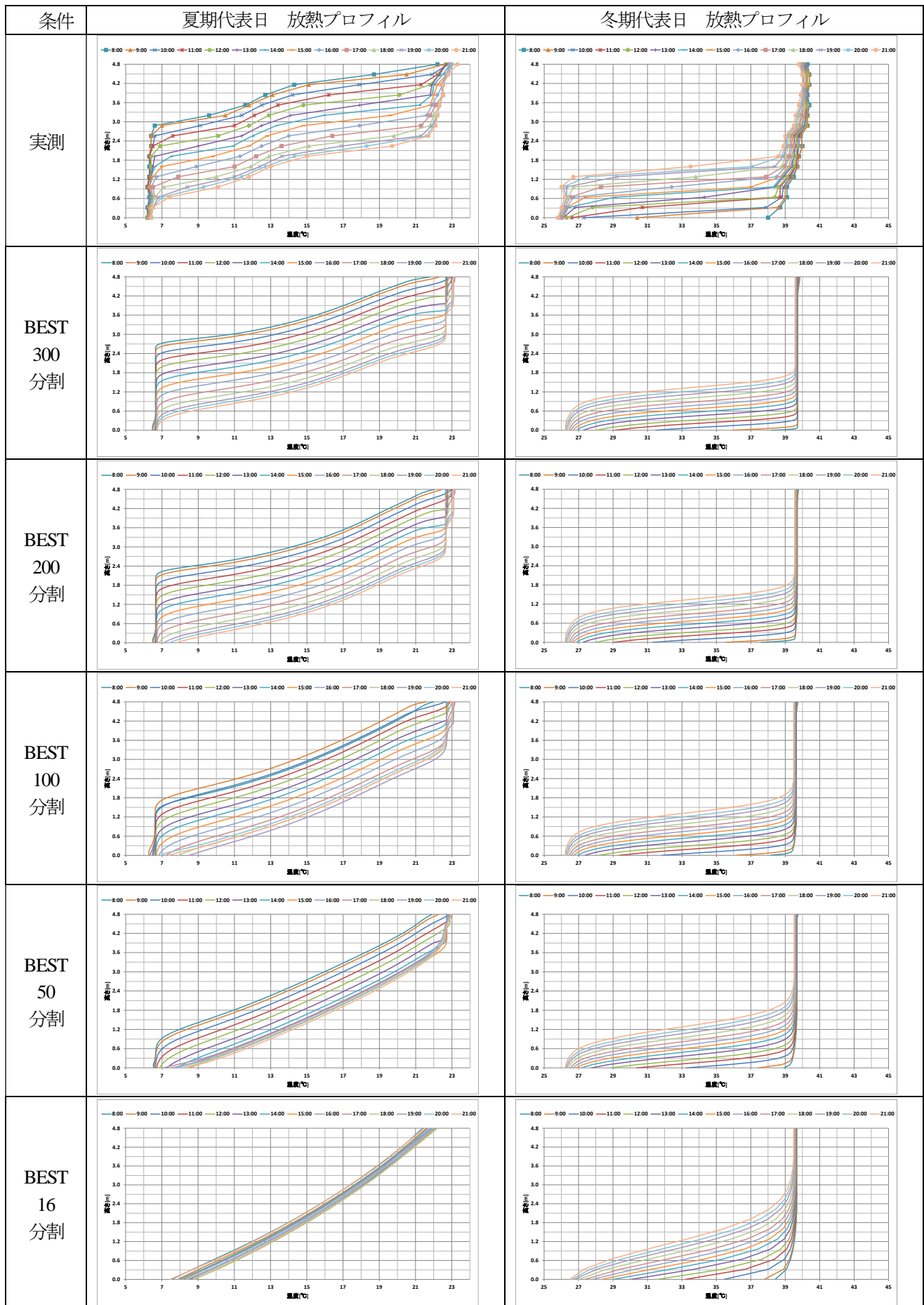


図2. 実測とBESTの夏期代表日、冬期代表日の温度成層型蓄熱槽温度プロフィール

高さを9.6mに変更し分割数(300、200、100、50)の検討を行った。なお槽容量は前節と同様126m<sup>3</sup>とした。

### 3.2 計算結果

図4に分割数300と200の夏期・冬期代表日の温度成層型蓄熱槽温度プロフィールを示す。夏期は槽高さ4.8m時と同様に300分割と200分割間で明確な差があった。特に始端槽側の温度状況は300分割では約6.5°Cを保っていたが、200分割では放熱が進むにつれて上部層の影響から温度が高くなっていった。また槽高さ4.8m時と同様に分割数が少なくなると、放熱量が小さくなり50分割では日中に熱源の追従運転が発生していた。冬期は分割数間で大きな差はなかったが特に100分割以上は300分割とよく一致していた。

槽高さを2倍の9.6mとしても4.8mの場合と同様に大きな差はなかった。今後実測との比較を行い精度検証が必要であるが、分割数として300あればシミュレーション上問題は無いと考える。

最後に表2に各計算時の放熱量をまとめた。実測負荷と放熱量の比較から評価すると槽高さ4.8m時は200分割以上、槽高さ9.6m時は300分割以上が望ましい結果となった。

表2. 各計算時の放熱量

槽高さ [m]	分割数 [-]	夏期代表日 放熱量[MJ]	冬期代表日 放熱量[MJ]
4.8	実測値	3956	2657
4.8	300	4078	2103
4.8	200	4052	2112
4.8	100	3063	2107
4.8	50	2170	2106
4.8	16	516	2131
9.6	300	4086	2168
9.6	200	3485	2164
9.6	100	2646	2164
9.6	50	2051	2154
実測負荷値[MJ]		3945	2193

た。よって本報では槽高さ1mあたり40分割以上を推奨し、最低でも1mあたり30分割必要と結論する。

### おわりに

本報ではBESTの温度成層型蓄熱槽に関するバグ修正の報告に加え、実測値との比較結果を通し計算時の最適な分割数について検証し、下記の知見を得た。

- 1) 槽高さ4.8mの温度成層型蓄熱槽のシミュレーション時の分割数は300以上で精度が良く、最低でも200分割は必要であった。
- 2) 分割数を多くしても実測とシミュレーション間では差があり、要因は①水平温度差の無視、②自然放熱に差がある、③計算モデル化時の誤差、以上3点と考えられる。
- 3) 槽高さを9.6mとしても4.8m時と同様の傾向がみられたが、槽高さ/槽容量ごとに実測値比較を行い精度検証が必要と考える。
- 4) シミュレーションに適切な分割数は温度プロフィールの相似性と実測負荷と放熱量の比較を考慮して、ほぼ槽深さ1mあたり40分割が目安と考えられる。

### 【謝辞】

本報は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画開発委員会」および「プログラム開発委員会」・「蓄熱・蓄電等システム検討WG」の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表します。またCKKビルの運転データの提供等にご協力頂きました名古屋大学の関係各位に御礼申し上げます。

### 【参考文献】

- 1) 中塚ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その219)―水熱源HPと蓄熱槽の実測比較―、2018.9
- 2) 中原ほか：大学施設のトータルビルコミッションの実践研究、第1報～第19報、空気調和・衛生工学会講演論文集、2012～2015
- 3) 川端・中原・相良：蓄熱槽の特性解析に関する研究-その14-運転シミュレーションのための実用R値モデル、1985.9

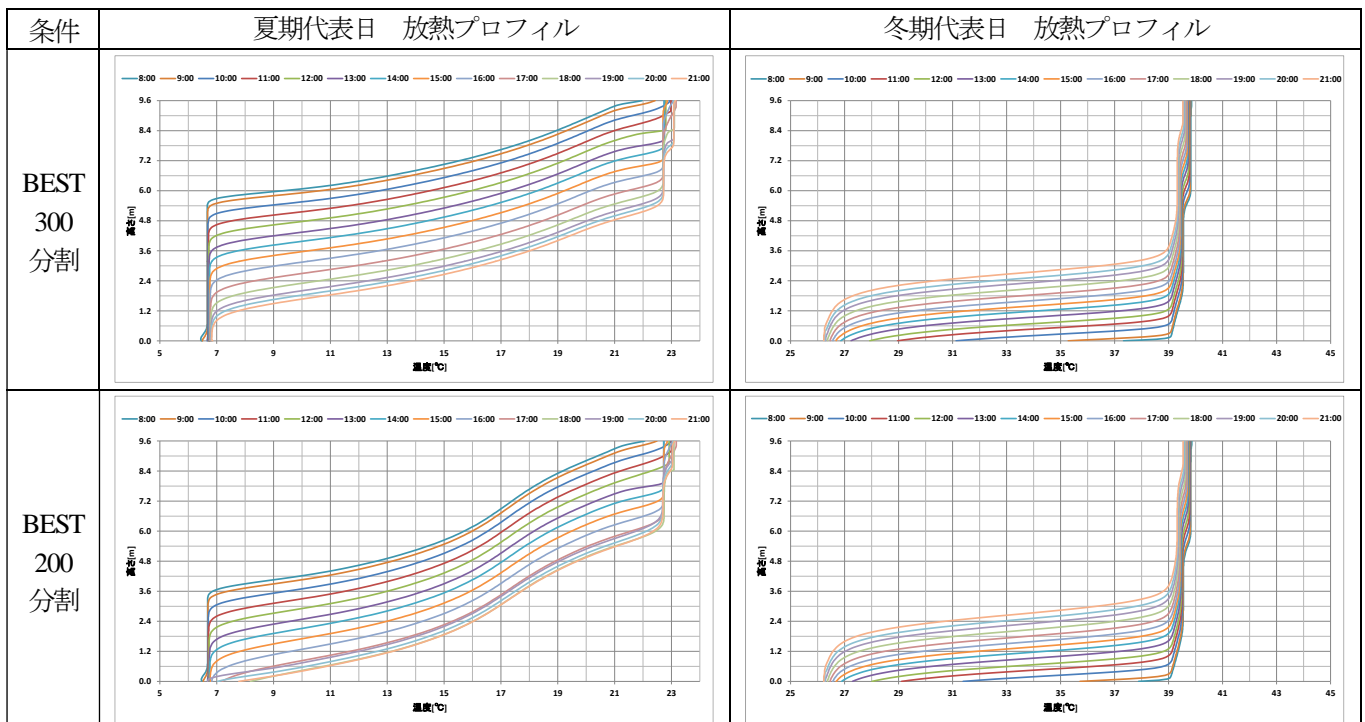


図4. 槽高さ9.6m時のBESTの夏期代表日、冬期代表日の温度成層型蓄熱槽温度プロフィール