

木質バイオマスボイラー利用熱源システムの容量設計

白土 博康, 藤澤 拓己

Capacity Design of Heat Source Systems using Woody Biomass Boilers

Hiroyasu SHIRATO, Takumi FUJISAWA

抄 録

当別町の学校をモデルに、施設の暖房熱需要計測方法及び導入予定の木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用の熱源システム全体の制御方法を検討し、数値計算により各ボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計を行った。その結果、木質バイオマスボイラーの寄与率を高く設定できるボイラー容量、蓄熱槽容量を設定できた。需要が平準化されていない施設において、木質バイオマスボイラーの寄与率を増加させるためには、朝の立ち上げ時に木質ボイラーを先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策が有効と考えられた。蓄熱槽の容量に関しては、木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。

キーワード：木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用熱源システム、暖房需要実測、数値計算、ボイラー容量・蓄熱槽容量の最適設計

1. はじめに

我が国では、エネルギー資源の多くを化石燃料に依存しており、将来的なエネルギーの安定利用や気候変動対策の見地から、再生可能エネルギー（以下、「再エネ」）の利用を拡大するとともに、省エネルギー（以下、「省エネ」）の徹底を図ることが不可欠である。

このような状況の中、道総研の第1期エネルギー戦略研究では、「さがす」「つくる」「ためる」「つかう」「しめす」をキーワードに、再エネの賦存量推定から需給モデルの構築まで一連の研究に取り組み、エネルギー賦存量・利用可能量推定手法や統合型GIS（地理情報システム）の構築、可燃ゴミ燃料燃焼システム等の要素技術開発及び施設群のエネルギーベストミックス提案等の成果が得られた¹⁾。

令和元年度からスタートした道総研の第2期エネルギー戦略研究では、エネルギー自給率向上に向けた足がかりを作るため、第1期の成果を継承しつつ、特性の異なる3つの自治体を対象に、社会実装を重視した取組みを行うこととしている。

この中で当別町との取組みでは、地域特性に応じたエネルギー地産地消技術開発、具体的には木質バイオマスや地中熱

の利用拡大を進めており、木質バイオマスに関して、道総研は木のサプライチェーン構築、木質バイオマスボイラーの技術情報提供、省エネに寄与する熱源・制御システム設計支援を行い、公共施設における木質バイオマスボイラー利用熱源システムの実装を支援することとしている。

道内で利用されている木質バイオマスボイラーは海外製のものが多く、実際の運転条件における出力、効率、制御などの設計に必要な情報が不足しており、リスク回避の視点から大容量のボイラーを設置する傾向にある。この場合、ボイラーの頻繁な運転停止による省エネルギー性の低下が懸念されるため、適正な容量のボイラーを導入することが重要である。また、木質バイオマスボイラーで賄い切れない高負荷時は、重油ボイラーなど異種の熱源で対応するシステムが望ましい。さらに、省エネ設計には負荷平準化のための適切な蓄熱槽容量を設定することも必要である。

本報では、木質バイオマスボイラーを利用した熱源システムの省エネルギー化を目的として、耐用年数を迎えた重油ボイラーの木質バイオマスボイラーへの代替が予定されている当別町の2つの公共施設をモデルに、熱需要実測、導入する木質バイオマスボイラーの制御手法の確認と熱源システム全体の制御方法に関する検討、熱供給モデル作成と実測した需要を用いた数値計算によるボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計を行った一連の流れについて報告する。

事業名：戦略研究

課題名：地域特性に応じた再生可能エネルギー供給と省エネルギー技術の社会実装

2. 木質バイオマスボイラー利用熱源システムの概要

図1に検討した熱源システムの概要を示す。検討した公共施設は学校である。木質バイオマスボイラーで発生する熱は、熱交換器を経て蓄熱槽へ送られる。木質バイオマスボイラーは、後述する制御方法で運転される。重油ボイラーは、バックアップとして蓄熱槽の温度が設定値より下がれば稼働し、蓄熱槽の温度が所定値まで回復すると停止する。

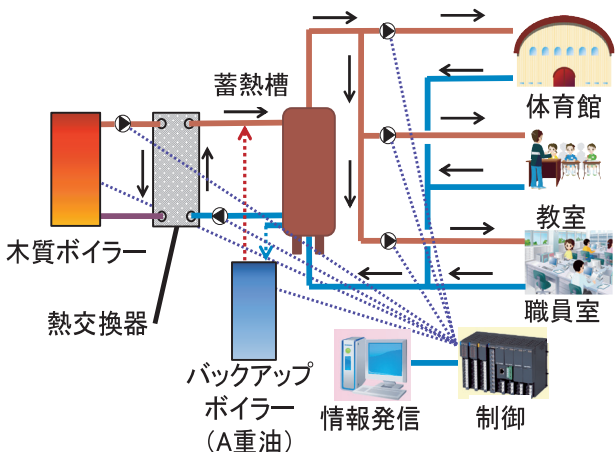


図1 検討した熱源システムの概要

3. モデル施設の熱源システム、熱需要

3.1 モデル施設の熱源システム

表1にモデル施設A, B (以下それぞれ学校A, 学校B)における従来の熱源システムの概要をそれぞれ示す。学校A, 学校Bのどちらの学校にもA重油を熱源とした暖房用のボイラーが2台設置されており、体育館や各教室等のラジエータへ温水が供給される。

表1 学校A, Bにおける熱源システムの概要

学校A

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	465.2	49.9	91.7	2個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	465.2	51.8	88.3	1個	手動オンオフ 運転

学校B

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	581.5	66.3	86.3	1個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	232.6	25.9	88.3	1個	手動オンオフ 運転

3.2 モデル施設の熱需要の計測方法

各学校の暖房熱エネルギー需要量は、体育館や各教室等の系統別に暖房熱エネルギー需要 (以下暖房エネルギー需要) を算出し、その積算値とした。各系統の暖房エネルギー需要は、超音波流量計による温水流量測定 (5分間10秒毎計測) とT型熱電対補償導線による温水配管外表面温度測定 (1分毎連続計測・記録) を行い、(1)式により、算出した。流量は固定値とした。(2)式は(1)式の需要を1時間毎に積算したものである。図2に計測時の写真を示す。なお、温水温度は配管内にシース型熱電対を挿入して測定する方法が正確であるが、配管厚みや配管材料 (SGP管) の熱伝導率を考慮すると、挿入シースで測定した温度と外表面温度には理論上はほとんど差はない。また、設備稼働中の配管改造が困難であった。このことから、本研究では、温水配管の外表面温度を測定する方法を採用した。なお、温度計測時にはT型熱電対補償導線と配管をアルミテープで密着させ、その上から断熱材を施すことにより、可能な限り外部への熱損失を低減させた。

$$q_{\text{demand}} = C_p \times \rho \times f \times (T_1 - T_2) \quad \dots(1)$$

$$Q = \sum (q_{\text{demand}} \times \Delta t) \quad \dots(2)$$

q_{demand} : 暖房エネルギー需要 [kW]

C_p : 水の比熱 4.2 [kJ/(kg・K)]

ρ : 水の密度 1.0 [kg/L]

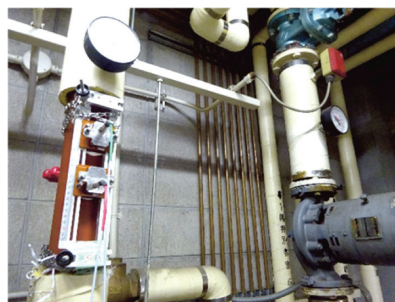
f : 各系統の水の流量 [L/s]

T_2 : 各系統の水のボイラーへの還り温度 [K]

T_1 : 各系統の水のボイラーからの行き温度 [K]

Q : 時間別暖房エネルギー需要量 [kWh/h]

Δt : 1/60 [h]



(a) 系統の流量計測



(b) 系統の配管表面温度計測

図2 計測時の写真

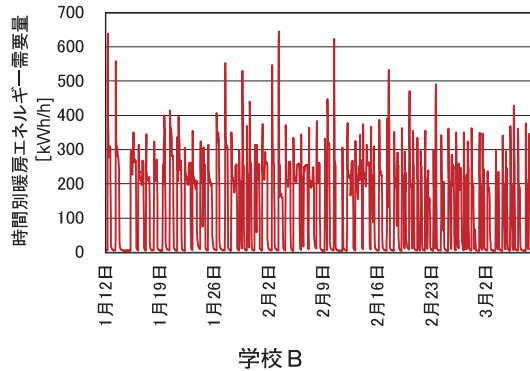
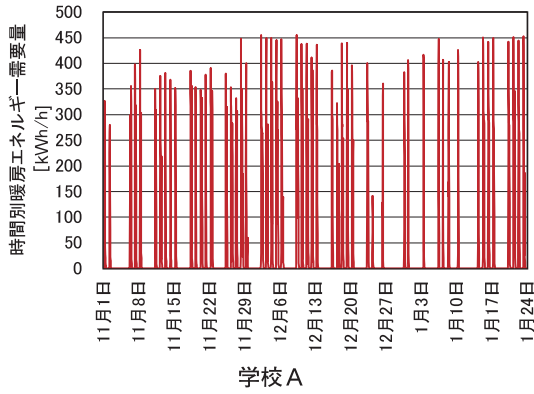


図3 時間別暖房エネルギー需要量

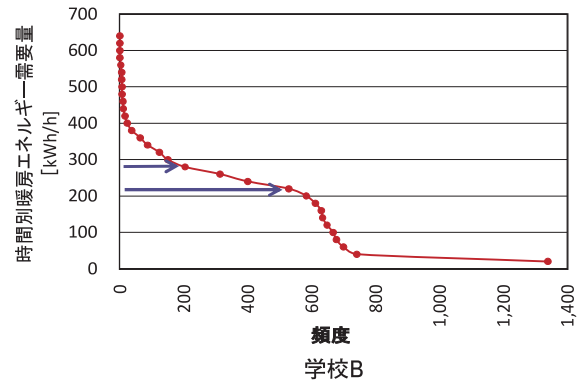
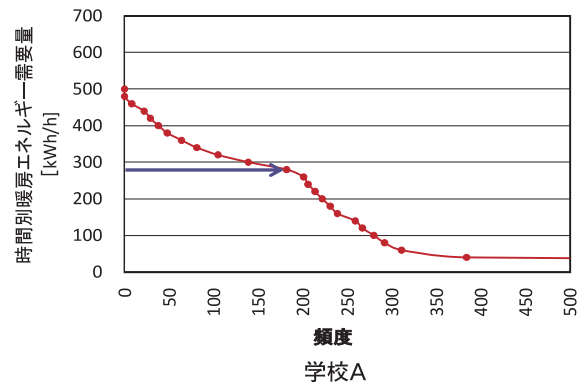


図5 時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布

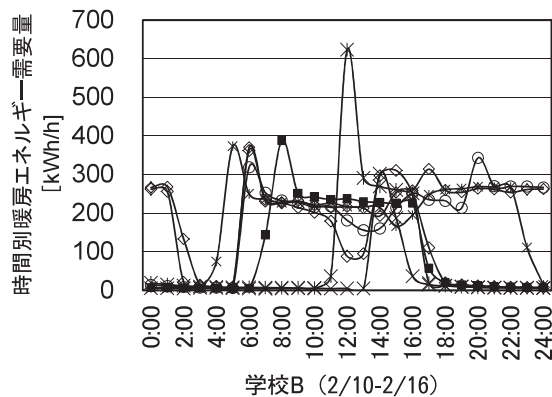
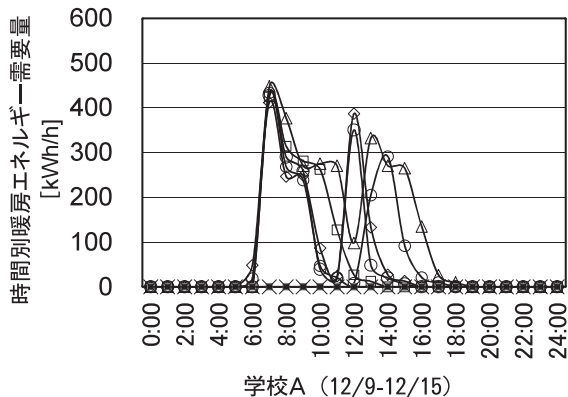


図4 一週間の暖房熱エネルギー需要量
(四角黒塗り:土曜, ×*:日曜・休日, その他:平日)

3.3 モデル施設の熱需要計測結果

図3に時間別暖房エネルギー需要量を、図4に一週間の暖房熱エネルギー需要量をそれぞれ示す。学校Aでは朝の立ち上げ時に時間平均500kW弱の大きな需要があり、それ以降は250~400kWの需要が多い。また、需要は早朝から夕方までに分布しており、夜間と土日は需要がない。学校Bでは250~300kWの領域で多くの需要があり、土日も一定の需要がある。

図5に時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布を示す。

学校Aでは260kW程度に頻度分布の曲値があり、学校Bでは200~280kWに頻度の高い分布が見られる。

本研究では、学校A、Bの需要頻度から、可能な限り定格運転またはそれに近い運転をし、部分負荷運転であっても熱効率が低下する懸念があるオンオフ運転（導入予定ボイラーでは定格に対し、30%未満の負荷で停止する）を極力避ける観点から、木質バイオマスの含水率を考慮した出力が252.8kW、210.8kWであるボイラーを次章の需給シミュレーションに選定した。出力以上の負荷、定格の30%未満の負荷は蓄熱槽からの出力でカバーし、蓄熱槽の容量を使っても賸り切れない負荷は重油ボイラーを稼働して不足分を補う。

図6に各学校における温水配管の表面温度が最も高い系統の行き温水配管表面温度の経時変化を示す。各系統には放熱機器として放射パネルが設置されており、その暖房能力は下記の(3)式で表される^{2,3)}。また、暖房、冷房温度差はJISの暖

房温度差の算出式²⁾に準拠し、(4)式により算出される。さらに暖房能力と暖房温度差には(5)式の関係がある^{2,3)}。

$$Q = C_{pw} \times M_w \times (T_{wo} - T_{wi}) \quad \dots(3)$$

$$Q = B(\Delta T)^n \quad \dots(4) \quad \Delta T = |T_w - T_a| \quad \dots(5)$$

Q：暖房能力 [W]

C_{PW}：水の比熱 [J/(g・K)] = 4.2

M_w：水の質量流量 [g/s]

T_{wo}：放射パネル戻り（出口）水温 [K]

T_{wi}：放射パネル行き（入口）水温 [K]

B, n：試験体形状等で決定される定数 [-]

ΔT：暖房温度差 [K]

T_w：放射パネルの出入口平均温度 [K]

T_a：空気温度 [K]

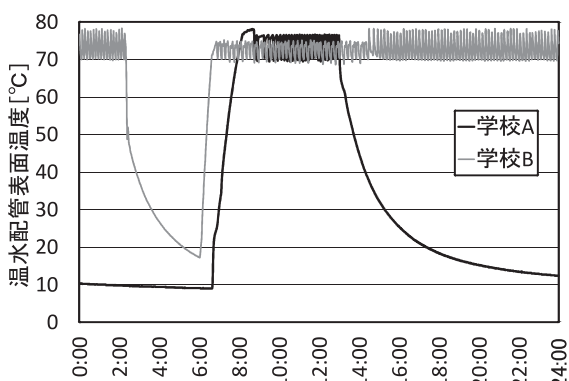


図6 各学校における温水配管の表面温度が最も高い系統の行き温水配管表面温度の経時変化

ここで各学校で行われるのはボイラーの更新だけで、教室などの放射パネルの増設は行われないので、仮に教室内の空気温度が同じであれば、放射パネルの行き温度（入口温度）を学校Aでは70～75℃程度以上、学校Bでは70～78℃程度以上確保することが必要と考えられた。

4. 木質バイオマスボイラーを活用した熱源システムの熱需給シミュレーション

4.1 導入ボイラーの制御の概要

表2に各ボイラーの制御方法を示す。導入予定の木質バイオマスボイラーは、蓄熱槽内の温水温度を感知し、燃焼のオンオフや部分負荷運転を行う制御を行っている。部分負荷運転のロジックは、①ボイラー設定温度までフル運転、②ボイラー設定温度とコントロールヒステリシス（設定幅）の2/3まで100-30%比例制御運転、③残りコントロールヒステリシスの1/3まで30%運転である。

4.2 熱需給計算（シミュレーション）の手法

熱需給シミュレーションは図1をモデルに下記のとおり行った。ただし、木質バイオマスボイラーと蓄熱槽間の熱交換器

の熱交換能力に制限はなく、木質バイオマスボイラーで発生した温水の熱量がすべて蓄熱槽へ導入されるとした。図6から放射パネルの行き温度（入口温度）を70℃以上に保ち、学校Aで75℃以上、学校Bで78℃以上の場合に木質バイオマスボイラーで比例制御が働く運転とした。また、木質バイオマスボイラーの停止温度はボイラーの安全装置が作動する領域から85℃に設定した。

シミュレーションの期間は需要実測を行った日とし（学校A：11/1～1/23、学校B：1/11～3/8）、蓄熱槽は槽内が完全に混合しているとした。蓄熱槽における熱損失は考慮していない。表3にシミュレーションの条件を示す。木質バイオ

表2 各ボイラーの制御方法

A施設

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[℃]	70	75	80	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転(ただし重油ボイラーは70℃未満でオン、75℃以上でオフ)
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

B施設

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[℃]	73	78	81	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転(ただし重油ボイラーは73℃未満でオン、78℃以上でオフ)
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

表3 シミュレーションの条件

学校A

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[℃]	75				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[℃]	10				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[℃]	70				
重油ボイラーストップ温度[℃]	75				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	43.8	52.5	70.0	87.5	131.3

学校B

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[℃]	78				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[℃]	7				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[℃]	73				
重油ボイラーストップ温度[℃]	78				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	35.0	42.0	56.0	70.0	105.0

マスボイラーの出力は前述のとおり252.8kW、または210.8 kWとして検討することとし、バックアップ（重油）ボイラーの出力は465kW（出力581kWの導入を検討、安全率20%）とした。また、蓄熱槽については、設置スペースの関係もあるので、2.5~7.5 m³の間で最適容量の検討を行った。

4.3 熱需給シミュレーションの結果

ここで、1分毎で実施したシミュレーション結果を基に、分別暖房エネルギー需要量 Q_{demand} を(6)式で、分別暖房エネルギー供給量 Q_{supply} を(7)式で定義し、図7に分別暖房エネルギー供給量 Q_{supply} のシミュレーション結果の例を示す。図7では、平均的な熱需要パターンの日を選定して示した（学校A：1/15、学校B：2/14）。

$$Q_{demand} = (q_{demand} \times \Delta t) / 3600 \quad \dots(6)$$

$$Q_{supply} = (q_{supply} \times \Delta t) / 3600 \quad \dots(7)$$

- Q_{demand} ：分別暖房エネルギー需要量 [kWh/min],
- q_{demand} ：暖房エネルギー需要 [kW], Δt ：60[s] (1min),
- Q_{supply} ：分別暖房エネルギー供給量 [kWh/min],
- q_{supply} ：ボイラーからの暖房エネルギー供給（ボイラーの出力）[kW]

図7から重油ボイラー、蓄熱槽からの熱供給は朝の立ち上げ時に多くなっており、学校Bに対して学校Aの方が木質バ

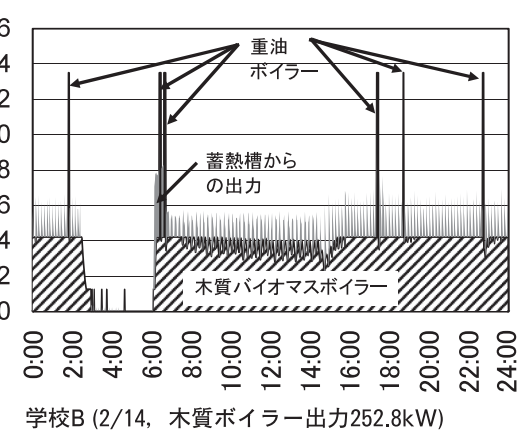
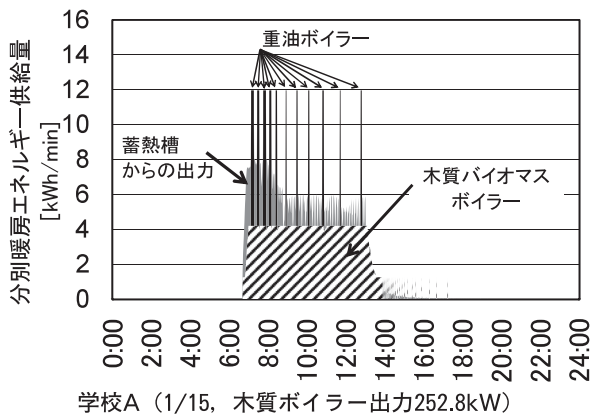


図7 分別暖房エネルギー供給量の経時変化 (シミュレーション結果の例)

イオマスボイラーの出力よりも瞬時の需要が大きい時間が多く、重油ボイラーが稼働する回数が増えていることが分かる。

図8に蓄熱量の経時変化を示す。図8は図7と同じ日のデータを示している。蓄熱量 S は(8)式で定義する。

$$S = Cp_w \times M'w \times (T_{w\ tank} - T_{w\ ini}) / 3.6 \quad \dots(8)$$

S ：蓄熱量 [kWh]

Cp_w ：水の比熱 [MJ/(t·K)] = 4.2

$M'w$ ：水の質量 [t]

$T_{w\ tank}$ ：蓄熱槽内水温 [K]

$T_{w\ ini}$ ：蓄熱槽内初期設定温度 (学校A：343K, 学校B：346K)

図8から、熱需要がない夜間に蓄熱量が最大となり、木質バイオマスボイラーが停止することが分かる。朝大きな需要があると木質バイオマスボイラーが先に稼働し、その後蓄熱量が0 kWh、すなわち蓄熱槽の温度が70°C（学校A）、73°C（学校B）になると重油ボイラーが稼働する。このような制御設定のため、木質バイオマスボイラーの運転・停止回数はA・B両学校とも1回、重油ボイラーの運転・停止回数は学校Aで11回、学校Bで6回となる。ボイラーの運転・停止は省エネ性の低下を引き起こすが、本制御により、木質バイオマスボイラーの運転・停止回数を夜中一朝の間の1回に留めており、本ボイラーの省エネに寄与している。

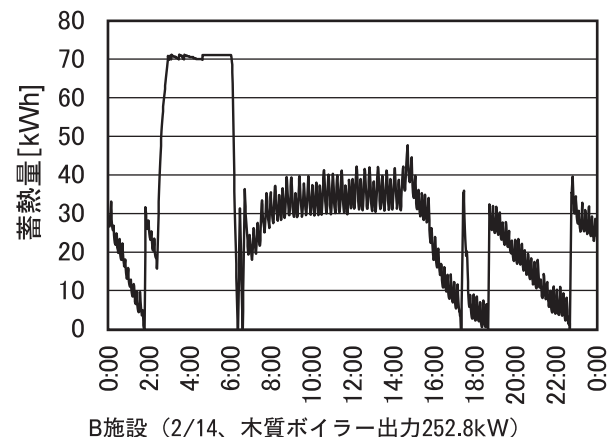
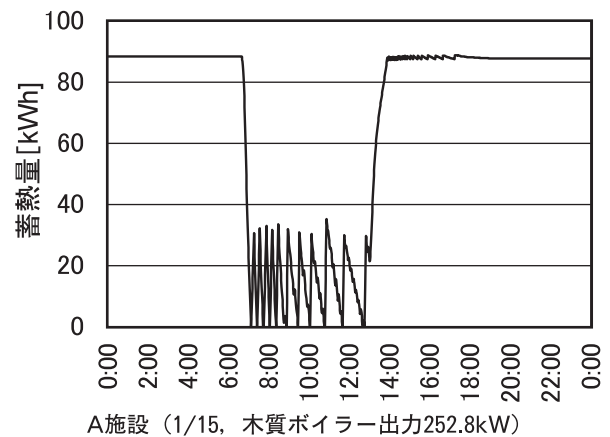


図8 蓄熱量の経時変化の例

図9に蓄熱槽の容量に対する木質バイオマスボイラーの寄与率を木質バイオマスボイラーの出力をパラメータとして示す。木質バイオマスボイラーの寄与率 η は(9)式で定義する。

$$\eta = Q_{\text{output bio}} / (Q_{\text{output bio}} + Q_{\text{output oil}}) \times 100 \quad \dots(9)$$

η ：木質バイオマスボイラーの寄与率[%]

$Q_{\text{output bio}}$ ：木質バイオマスボイラーによる温水出力量[kWh]

$Q_{\text{output oil}}$ ：重油ボイラーによる温水出力量[kWh]

図9から例えば252.8kWの出力のボイラー、蓄熱槽容量を5 m³とすると、木質バイオマスボイラーの寄与率は学校Aで80%以上、学校Bにおいては90%近くまで達しており、本設計は良好と判定できる。学校Aにおいては、需要が学校Bと比較して平準化しておらず、朝の立ち上げ時の需要が大きい。この結果、立ち上げ時に重油ボイラーの稼働回数(稼働時間)が多くなっている。朝の立ち上げ時に木質ボイラーのみを2時間先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策を行うことにより、重油ボイラーの稼働時間、寄与率を低減させることができると考えられる。また、木質バイオマスボイラーの蓄熱槽の容量を増加させると木質バイオマスボイラーの寄与率は増加するが、その傾きは小さく、蓄熱槽容量は木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。この理由は、例えば蓄熱槽容量5 m³は木質

ボイラー、重油ボイラーがフル運転した時の5～10分程度の容量しかないためと考えられる。この結果、蓄熱槽の位置づけは各系統への出力温度を安定させることでしかないため、蓄熱槽は導入コストが高額になる場合や機械室の設置スペースが狭い場合は低容量でも良いと考えられた。

5. 結言

木質バイオマスボイラーの導入が予定されている当別町の学校をモデルに、施設の暖房熱需要計測、導入する木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用の熱源システム全体の制御方法に関する検討、数値計算により各ボイラー容量・蓄熱槽容量の最適設計を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 2つの学校でその暖房熱需要は大きく異なる。学校Aでは、需要は早朝から夕方までに分布しており、土日は需要がないが、学校Bでは比較的需要在平準化しており、土日にも一定の需要がある。
- (2) 時間別暖房エネルギー需要量の実測値の頻度分布から、木質バイオマスの含水率を考慮した出力が252.8kW、210.8kWである木質バイオマスボイラーをシミュレーションに供した。
- (3) 252.8kWの出力のボイラー、蓄熱槽容量を5 m³とすると、木質バイオマスボイラーの寄与率は学校Aで80%以上、学校Bにおいては90%近くまで達しており、良好な設計と判定できる。需要が学校Bと比較して平準化していない学校Aにおける木質バイオマスボイラーの寄与率を増加させるためには、朝の立ち上げ時に木質ボイラーを2時間先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策が有効と考えられる。
- (4) 蓄熱槽の容量を増加させても木質バイオマスボイラーの寄与率は大きく増加せず、蓄熱槽容量は木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。

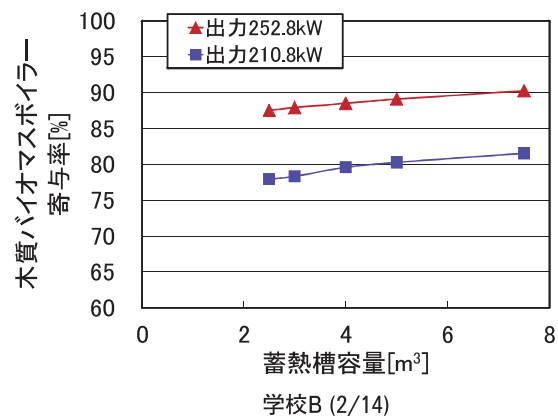
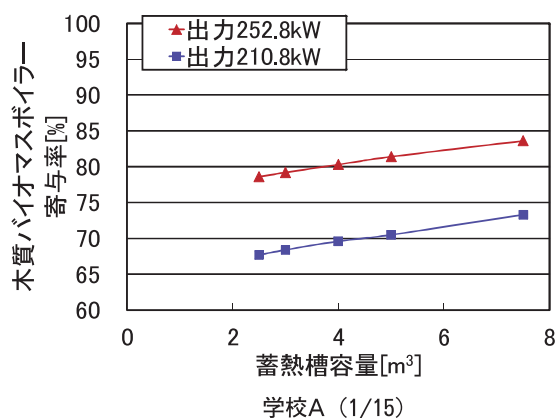


図9 蓄熱槽の容量に対する木質バイオマスボイラーの寄与率

参考文献

- 1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 戦略研究報告書 地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築, (2019)
- 2) JIS A1400, (2007)
- 3) 白土博康他：北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.317, pp15-21, (2018)