

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K23360

研究課題名（和文）蓄熱輸送を導入した排熱回生量を面的拡充する新熱融通システムの設計と評価

研究課題名（英文）Design and evaluation of a novel heat utilization system with thermal energy storage and transport expanding the area of waste heat recovery

研究代表者

藤井 祥万 (Fujii, Shoma)

東京大学・未来ビジョン研究センター・特任助教

研究者番号：80881200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：開発したバイオマス発電所のプロセスフローダイアグラムより投入熱量と排熱量のバランス、排熱の温度帯を過去の調査と照らし合わせることで、バイオマスを利用した発電所も一般の産業と同様に投入熱量に対する排熱量および温度域が妥当であることを確認した。主に木質バイオマスを利用した事業所のデータベースを作成し、基礎自治体におけるバイオマス由来の排熱量とその温度域、熱需要量とその温度域を推定し、ゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた蓄熱融通技術の数値解析による設計結果を基に、排熱回生ポテンシャルを算出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地域の熱の脱炭素に貢献する、バイオマスの未利用熱を回生する熱融通システムのポテンシャルをトップダウン手法とボトムアップ手法の組み合わせにより定量化した。国や都道府県単位では解像度が粗かった熱の検討を、基礎自治体単位で評価することで、熱融通技術の適用可能性が高い基礎自治体を示すことができ、実装に向けた検討をスピードアップすることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：By comparing the balance between heat input and waste heat and the temperature range of waste heat from the developed process flow diagram of the biomass power plant, the amount of waste heat relative to heat input and the temperature range are reasonable for power plants using biomass as well as for other general industries. A database of industries using biomass was created to estimate the amount of biomass-derived waste heat and its temperature range, and the amount of heat demand and its temperature range in basic municipalities were estimated as well. The waste heat recovery potential was successfully calculated based on the design results of numerical analysis of thermochemical energy storage and transport system using a water vapor adsorption/desorption cycle of zeolite.

研究分野：機械工学

キーワード：熱融通 排熱回収 バイオマス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、我が国において 2030 年に温室効果ガス 30%、2050 年に 80%削減を実現する目標であったが、研究実施中に 2050 年の目標がカーボンニュートラルに引き上げられ、より再生可能エネルギーの早期・大量導入が求められることとなった。しかし再生可能エネルギーは太陽光や風力など、変動制があるものが多く、安定的なエネルギー供給には比較的输出安定性が高いバイオマスエネルギーが注目されている。バイオマスエネルギーの有効利用のキーポイントは熱利用である。例えば木質バイオマス発電は概ね発電効率が 20~30%と低水準であり、エネルギーの多くを排熱として廃棄している。欧州では、例えばドイツでは 2012 年以降、新設のバイオマス発電所は熱電併給が必須とされており、熱利用を含めた総合効率は概ね 70%以上である。国内ではバイオマスエネルギー設備からの排熱を、熱導管を利用して近隣の給湯需要に充当する研究はなされている<sup>(1,2)</sup>。しかし 2013 年での日本での地域熱供給システムの総売熱量は 22902 TJ と例えば人口が 1/25 であるデンマークの 1/4~1/5 程度にとどまっております<sup>(3)</sup>、十分な販売熱量を確保できないことによるコスト高により普及していない。地域熱供給システムが既に普及している欧州では熱電併給の導入難易度は低いが、日本では熱導管を利用した発電所内の給湯需要への充当や隣接している工場への蒸気供給といった数十 m 単位での熱利用方法が多く、バイオマスを含む再エネ熱利用を促進するためには、熱源から熱需要まで数 km~数十 km の熱融通が必要である。熱を空間的に長距離融通する技術として「蓄熱融通」が挙げられる。しかしこれらの研究は主材料開発や機器設計に焦点が充てられており、マクロな視点で蓄熱輸送を含めた場合の排熱回生量を定量化できておらず、事業者にとっても導入難易度が高い。よって、マクロな視点での蓄熱融通の適用ポテンシャル、排熱回生ポテンシャルの定量化が求められている。

### 2. 研究の目的

再生可能エネルギーの大量導入が求められる中、出力安定性が高いバイオマス発電は導入促進が期待されている。しかしバイオマス発電所の発電効率は 20~30%と低水準であり、排熱を同時に利用する熱電併給を実現できるかが普及への鍵となる。欧州と比較して地域熱供給システムが普及していない我が国では、従来の熱導管による熱供給では限界がある。そこで、本研究では木質バイオマスを扱う事業所を中心とし、バイオマス由来の排熱を蓄熱輸送技術によって近隣産業で有効利用し、排熱回生量を面的に拡充する「日本式」の熱電併給システムの構築を目指し、マクロ視点で木質バイオマスを扱う事業所の排熱の回生ポテンシャルを定量化する。木質バイオマス発電所に蓄熱技術を組み込むレトロフィット設計をプロセスシミュレーションで実施し、木質バイオマス発電所と熱需要の統計データと熱可搬距離を併せることで排熱回生量を定量化し、経済的に熱を輸送可能な「熱可搬距離」を算出するとともに必要な蓄熱技術開発へフィードバックすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

まず、バイオマスの発電設備を所有する複数の事業所の熱物質収支を予測するプロセスフローダイアグラムを開発し、排ガスや余剰蒸気などの未利用熱を定量化した。また、発電以外にもバイオマスを熱利用している事業所を想定し、固定価格買取制度の公表データ<sup>(4)</sup>、製糖工場、製紙工場などの汽力発電を所有する工場が所有するボイラやタービンなどのデータ<sup>(5)</sup>、過去のレポートのデータ<sup>(6)</sup>などを整理し、バイオマスを利用する事業所の産業種別とエネルギー投入量を定量化し、バイオマスの独自のデータベースを作成した。熱融通は電力融通と異なり、長距離の輸送が困難であるため、検討単位は都道府県単位よりもより細かくする必要がある。90%以上の基礎自治体が可住地面積の等価半径で 15 km 以内に収まる面積であるため、検討の最小単位を基礎自治体とし、熱融通ポテンシャルを定量化することとした。また、バイオマスを利用した事業所が所在する自治体の最終エネルギー消費を、燃料種、産業種ごとに相関が高い活動量指標(従業員数、事業所数)<sup>(7)</sup>を用いて都道府県の最終エネルギー消費<sup>(8)</sup>から按分することで求めた。さらに燃料種、産業種ごとに排熱、需要温度帯の分布の情報を、アンケート調査<sup>(9,10)</sup>を参考に最終エネルギー消費の情報に追加した。さらに蓄熱輸送技術としてゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた蓄熱輸送システム<sup>(11)</sup>を想定した。移動床・間接熱交換方式を用いた出熱装置および移動床・直接熱交換方式を用いた蓄熱装置の性能を予測する、熱・物質収支を連成した数値解析モデルを開発、修正し、プロセスフローシミュレーションで定義した未利用熱の条件下で、各装置の性能を予測し、規模ごとの性能(蓄熱量、出熱量、必要補助動力等)や装置要件(胴径や熱交換器伝熱面積等)を回帰分析により求め、高速で各規模に応じた蓄熱輸送システムの性能予測、設計を可能とした。各基礎自治体におけるバイオマス由来の 150°Cまでの排熱回収量を蓄熱装置の設計の境界条件である未利用熱量として与え、各規模に応じた蓄熱効率、出熱効率を算出、バイオマスを利用した事業所が所在する自治体それぞれにおける蓄熱融通ポテンシャルを算出した。また、上記境界条件において設計した蓄熱輸送システムに必要な装置類(熱交換器やチャンバー、コンベアなど)や運用上必要なコスト(ブロウ電力、輸送時の燃料など)を見積もり、条件に応じたコスト解析が可能なモデルを開発した。輸送距離は対象基礎自治体の可住地面積の

等価半径とした。

以上の検討から、バイオマス由来の高温の排熱を蓄熱し、より低温の産業低温熱需要に熱融通システムにより熱を供給することを想定し、150°C以上の排熱を回収し100~150°Cの温熱需要に充当することを想定し、熱回生ポテンシャルおよびそのLCOE(Levelized Cost of Energy)を算出した。

#### 4. 研究成果

開発したバイオマス発電所のプロセスフローダイアグラムより排ガスのエネルギー投入量に対する割合や温度域のバランスを定量化した。投入熱量と排熱量のバランス、排熱の温度帯を過去の調査<sup>(9)</sup>と照らし合わせることで、バイオマスを利用した発電所も一般の産業と同様に投入熱量に対する排熱量および温度域が妥当であることを確認した。さらにゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた蓄熱輸送システムの構成装置を数値解析により設計し、出熱装置、蓄熱装置とともに、規模(ゼオライト流量)の増大とともに燃料削減、プロワ動力等が回帰可能であることを確認した。これらの回帰結果をコストモデルに組み込むことで、全1741の基礎自治体におけるバイオマス由来の排熱回収およびコスト概算が可能なモデルを実現した。

3の研究手法に基づいて、バイオマスを利用した事業所由来の排熱を蒸気需要に充当した場合、熱需要全体におけるバイオマス由来の熱の充当率は最大で50%近くなる自治体も存在するが、多くは数%~20%の範囲に収まった。100~150の低温熱に限れば、需要のすべてを代替できる自治体が500以上あることもわかった。熱融通のコストについては、自治体内での熱融通のLCOEを算出し、CAPEX全額を負担する場合は、約102の自治体でLCOEが10円/kWhを下回る可能性があり、CAPEXの100%を補助金等で賄う想定では、約170の自治体がバイオマス由来の排熱を回生する蓄熱融通システムのLCOEが10円/kWhを下回る可能性があり、蓄熱融通システムの初期の導入先として有力な候補先であることが分かった。この想定での経済的な熱の可搬距離は最大でも16km、平均では4.4kmとなった。また、GHGは約350の自治体で削減できる可能性があるものの、残りの自治体では輸送や蓄熱におけるプロワ駆動の電力が支配的となり、現段階での導入はGHGを増大させる可能性があることも分かった。これは電力や輸送が脱炭素していくにつれて緩和されると考えられる。

コストおよびGHG削減において支配的な要因は、出熱側の燃料削減と輸送距離、蓄熱側のプロワ動力である。特に燃料削減と輸送距離は密接な関係があり、1回の輸送あたりでの有効な出熱量を増大させることが重要である。出熱側では現在ボイラ蒸気を吸着材に吸着させて増熱するプロセスを採用しているが、低温熱需要の中でも乾燥プロセスでは排湿潤空気を出熱の吸着用に再利用できるため出熱効率を大幅に向上でき、排熱回収ポテンシャルは大きく増大する可能性があることがわかった。

今回の試算では、排熱回生ポテンシャルと蓄熱融通技術の適用先の候補を経済的な熱可搬距離から算出した。実際の導入検討では、これらの候補地にて、実際の工場の立地や需要の数などから検討するべきであり、今後の課題である。

#### 参考文献

- (1) 住友雄太, 古林敬顕, 中田俊彦, “バイオマス資源と熱需要分布を考慮した中山間地域熱供給システムの設計”, エネルギー・資源学会論文誌, 36(5), (2015), pp.1-11.
- (2) 久保山裕史, 古俣寛隆, 柳田高志, “未利用木質バイオマスを用いた熱電併給事業の成立条件”, 日本森林学会誌, 99(6), (2017), pp. 226-232.
- (3) 認定NPO法人環境エネルギー政策研究所, “第4世代地域熱供給と自然エネルギーへの転換”, available from <<https://www.isep.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/02/3ISEP20181004.pdf>>, (参照日 2022年5月15日)
- (4) 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト, 固定価格買取制度再生可能エネルギー電子申請ホームページ, available from <<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>>, (参照日 2022年5月15日)
- (5) 一般社団法人火力原子力発電技術協会, “火力原子力発電設備要覧(平成29年改訂版)”, (2017)
- (6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第4版)”, (2015).
- (7) 平成28年経済センサス 製造業 市区町村編, 総務省ホームページ, available from <<https://www.stat.go.jp/data/e-census/2016/kekka/gaiyo.html>>, (参照日 2022年5月15日)
- (8) 資源エネルギー庁, “都道府県別エネルギー消費統計”, available from <[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy\\_consumption/ec002/](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/)> (参照日 2022年5月15日).
- (9) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング, “熱需給の実態等に関する包括調査報告書”, (2016).
- (10) 三菱総合研究所, “平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査(熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査)”, (2018).
- (11) Fujii, S., Horie, N., Nakibayashi, K., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., and Nakagaki, T., “Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill”, *Applied Energy*, Vol. 238 (2018), pp.561-571.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujii Shoma, Miyagawa Taiga, Nakagaki Takao, Kanematsu Yuichiro, Kikuchi Yasunori, Hamada Yosuke	4. 巻 47
2. 論文標題 Bench-Scale Demonstration Test and Design of a Moving Bed Counter-Flow Heat Charger for Unused Energy from a Sugar Mill	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU	6. 最初と最後の頁 191 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/kakoronbunshu.47.191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujii Shoma, Kanematsu Yuichiro, Kikuchi Yasunori, Nakagaki Takao	4. 巻 51
2. 論文標題 Effect of bagasse drying on thermal energy storage utilizing zeolite water vapor ad/desorption at a sugar mill	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Energy Storage	6. 最初と最後の頁 104495 ~ 104495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.est.2022.104495	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 ○藤井 祥万, 兼松 祐一郎, 中垣 隆雄, 菊池 康紀
2. 発表標題 製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムのライフサイクルGHG排出量評価
3. 学会等名 化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ○Fujii,S., Kanematsu,Y., Nakagaki,T. and Kikuchi,Y.
2. 発表標題 Techno-economic and environmental aspects of thermochemical energy storage system to utilize unused energy of sugarcane: A case study at sugar mill
3. 学会等名 The 14th Biennial International Conference on EcoBalance (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 O Fujii, S., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y.
2. 発表標題 Integration of experimental study and computer-aided design: A case study in thermal energy storage
3. 学会等名 the 14th International Symposium on Process Systems Engineering, PSE 2021+ (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 O Fujii, S., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y.
2. 発表標題 Polygeneration from sugarcane industries enhanced by functionalizing novel cultivars and excess thermal energy
3. 学会等名 THE 32nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE32) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 O 藤井 祥万, 中垣 隆雄, 兼松 祐一郎, 尾下優子, 菊池 康紀
2. 発表標題 基礎自治体レベルのエネルギーフローを用いた 脱炭素に向けた熱融通の役割の検討
3. 学会等名 第26回動力エネルギー技術シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------