



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地理空間モデルを用いた地域バイオマスエネルギー利用システムの評価
Author(s)	福田, 陽一朗
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第13739号
Issue Date	2019-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13739
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75854
Type	doctoral thesis
File Information	Yoichiro_FUKUDA.pdf



博士論文

地理空間モデルを用いた
地域バイオマスエネルギー利用システムの評価

(Evaluation of local bioenergy utilization system
by using geospatial model)

北海道大学大学院環境科学院

福田 陽一郎

Yoichiro Fukuda

令和元年 (2019)

要旨

バイオマスエネルギーは、バイオマス資源に由来するエネルギーである。バイオマス資源は、日本においては「動植物に由来する有機物である資源（原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭を除く）」と定義されている。バイオマスエネルギーは、その利用過程が作物生産を含む生物の生産活動を介した炭素循環に内在し、かつ社会、環境、経済に対し持続可能な形で利用されることによって、大気中の二酸化炭素を増加させない再生可能エネルギーとしての価値を発揮し、気候変動対策やエネルギーセキュリティ向上の観点から国際的にも国内的にも役割が期待されている。特に近年、日本においては再生可能エネルギー電力の固定価格買取制度(FIT)のもと、大規模なバイオマス発電施設の普及が急速に進み、資源利用量が増大している。一方で、バイオマスは一般に広く薄く存在する資源であり、そのエネルギー密度の低さに起因する輸送コストの課題が指摘されている。またバイオマス発電施設において多量に発生する余熱回収や、エネルギー変換効率の高い熱利用が十分に進んでいないといった課題も存在している。こうした課題を踏まえた上で、バイオマス資源の輸送コストやエネルギー利用における空間依存性を正しく見積ることが、その利用システムの実装可能性を評価する上で重要であると考えられる。そのため本研究では、地理空間モデルによる資源ポテンシャル評価およびバイオマスエネルギーの利用システム評価を行った。

本研究ではまず、バイオマスエネルギー利用の事業化検討において頻繁に課題として指摘される輸送コストに着目し、市町村における資源の優位性について検討した。これまで、様々なバイオマス資源のポテンシャルを総合的に推定、比較を行った事例は存在するが、推計スケールが市町村や都道府県などの空間スケールにとどまり、地域内における小規模なエネルギー利用を検討するために必要と考えられる解像度で資源ポテンシャルを比較した事例は存在しない。そこで本研究では、統計資料を元に 11 種のバイオマス資源の利用可能量を把握し、さらに地理情報システム (GIS) を用いて、約 1 km メッシュの空間スケールで一様かつ高解像度な資源の空間分布を推計した。この結果、木質バイオマスのように比較的多くの地域で利用可能な資源がある一方、穀物系農業廃棄物や牛ふんなどは地域偏在性が高いことが示された。こ

れをもとに、実際の道路網データにもとづくネットワーク解析を行い、地域内の資源へのアクセス時間、および単位輸送コストと各資源の資源ポテンシャルとの関係性を把握した。富良野市におけるケーススタディの結果では、ポテンシャル総量では未利用間伐材および伐採残材が最も豊富であることが示されたが、穀物系農業廃棄物がより需要地近隣に分布していることから資源へのアクセス性に優れ、輸送コストの観点からは、穀物系農業廃棄物が比較優位であることが明らかになった。

次に、地域の木質バイオマスを活用し、大規模な地域熱供給を実施するシナリオについて、地理空間モデルによる評価を行った。暖房や給湯熱の広域供給技術である地域熱供給は、欧州を中心として実装が進んでおり、現在日本における最終エネルギー消費の過半を占める熱セクターの脱炭素化への貢献が期待される。木質バイオマスによる広域地域熱供給のサプライチェーンは、木質バイオマスの収穫から加工までのプロセスの見積り、加工施設やエネルギー供給プラントの立地条件、さらに適切な熱導管ネットワークの配置の検討など、上流工程から下流工程までの全体で空間的な要因が事業性を大きく左右すると考えられるが、こうしたサプライチェーン全体を空間的にモデル化して評価した先行研究は存在しない。そこで本研究では、森林資源の分布やこれを利用する際の伐採シナリオ、道路ネットワークに基づく輸送コストや熱導管配置の推定、施設立地といった空間的要因を地理空間モデルとしてモデル化し、熱のみを利用した場合あるいは発電余熱を回収した場合のエネルギー利用のコスト構造や CO₂ 排出削減効果を定量化して比較評価した。旭川市中心部への熱供給を想定したケーススタディを実施した結果、伐採時に未利用となる土場残材のみを利用する抑制的な資源利用シナリオ、ならびにより積極的に伐採木の全木をエネルギー利用する積極的なシナリオのいずれにおいても、熱供給のみを実施する条件では採算性が得られないことが示唆された。一方、発電を実施する条件では、多くの場合余熱を回収せず発電のみを行った場合にのみ事業採算性が成立することが示唆された。余熱を回収する場合、土場残材を利用する場合に一部の条件（プラントの立地や設備容量および集荷範囲）において事業採算性が期待される結果が得られたが、全体を通して余熱回収はコストであり、採算性を低下させることが示唆された。この結果は、現在日本でバイオマス発電事業が FIT 制度によって有利な価格条件での売電が保証されているため電力事

業の採算性が成立しやすい状況にあることに起因しており、他方で熱のみを供給するシステムや発電余熱を有効に利用するシステムの事業性の向上には、資本費の直接補助に留まらない熱供給に関する政策誘導が必要になると考えられた。一方、CO₂ 排出削減効果の観点からは、サプライチェーンの各工程のうち、熱供給に要するポンプの電力消費由来の排出量がいずれの条件においても全体の 8 割以上となり、排出源として多くを占めることが明らかになった。熱のみを供給するモデルでは一定の排出削減効果が期待されたが、発電余熱を回収するモデルでは、熱導管の総延長の増大によってポンプ動力由来の排出量が増大し、プラントの立地条件および熱供給条件によっては実質的な排出削減効果が得られない結果となった。この結果から、熱供給による排出削減効果を得るためには適切な施設立地の選定と熱供給範囲の設定が重要となることが示唆された。

本研究を通じて、地理空間情報に基づくバイオマスエネルギー利用システムの検討の効果や重要性が具体化されるとともに、資源ポテンシャルや輸送コスト、サプライチェーン全体を通じたコスト構造ならびに CO₂ 排出削減効果についての知見が得られた。これらは、バイオマスエネルギーの効率的な活用による脱炭素化の実現に向け今後必要となる措置の検討において重要な知見である。また、本研究で提案した資源ポテンシャルや輸送コストの評価手法は全国的に、地域熱供給を念頭に置いた木質バイオマスの熱エネルギー利用モデルは北海道や東北地域など寒冷地における都市地域においてそれぞれ適用することが可能であり、本研究で提示したアプローチが環境、社会、経済に対して持続可能なバイオマスエネルギー利用の実現に貢献するものとする。

Abstract

Bioenergy is energy derived from biomass resources. Biomass resources are defined as "a resource which is an organic substance derived from animals or plants (excluding crude oil, petroleum gas, combustible natural gas and coal)" in Japan. When bioenergy is used within the carbon cycle through the production of living things, including crop production, and is used in a sustainable manner for society, environment and economy, it can be considered as a renewable energy source that does not increase the amount of CO₂ in the atmosphere. Thus, the biomass energy is expected to play a role both internationally and domestically in terms of mitigating climate change and improving energy security. Especially, in recent years, the amount of biomass resource utilization is increased, because large-scale biomass power generation facilities have been spreading rapidly under the Feed-in Tariff (FIT) scheme for renewable electricity in Japan. On the other hand, biomass resources exist widely and sparsely in general, and thus, the problem of transportation cost due to low energy density has been pointed out. There are also problems of insufficient heat utilization such as excess heat from biomass power generation facilities and heat from heat dedicated facility which has high energy conversion efficiency. From these viewpoint, it is important to estimate accurately the transportation cost of biomass resources and the spatial dependency of energy utilization in order to evaluate the feasibility of implementing biomass utilization systems. Therefore, in this study, evaluation of resource potential and utilization system of bioenergy were carried out using the geospatial model.

Firstly, in this study, the author focused on the transportation costs which are frequently recognized as a problem in the commercialization of bioenergy and examined the preferability of resources in municipalities. Although there were previous studies which has been comprehensively estimated and compared between the potential of various biomass resources, the resolution of these studies is limited to the spatial scale of municipalities or prefectures. There is no study which is satisfied the required resolution which considered necessary to estimate feasibility of small-scale energy utilization within the region. Therefore, in this study, the available biomass resources of 11 species was estimated based on

statistical data. Subsequently, the spatial distribution of resources at spatially uniform and high-resolution scale, i.e. 1 km mesh, was estimated using the Geographic Information System (GIS). As a result, while there are resources which is able to utilized in many regions, such as woody biomass, some resources was distributed non-uniformly such as crop residue and cow manure. Based on this result, the relationship between accessible time to resources or unit transportation cost and resource potential of each resource in the region was calculated with carrying network analysis procedure based on the actual road network data. The results of the case study in Furano City showed that unutilized thinned wood and logging residues were the most abundant in terms of the total potential, however, crop residue was more prefer to access because it is distributed near demand areas. Therefore, crop residue was considered as comparative reasonable throughout the region in terms of transportation costs.

Subsequently, the heat supply scenario with large-scale district heating (DH) system utilizing regional woody biomass was evaluated using geospatial model. DH is the large-scale heat supply technology for space heating and hot water supply which is equipped mainly in Europe. It is expected that DH will contribute to decarbonize of the heat sector which currently accounts for the majority of final energy consumption in Japan. Spatial factors, such as processes of resource supply from harvesting to chipping of woody biomass, location of processing facilities and energy supply plants, and consideration of appropriate DH pipe network arrangements, are considered to have a major influence on the whole supply chains of energy utilization system. However, there is no previous study which evaluated the whole supply chain of energy utilization system with regional woody biomass by geospatial model. Therefore, in this study, spatial factors such as the distribution of forest resources, the harvesting scenario when using forest resources, the estimation of transportation cost and DH pipe arrangement based on the road network and the location of facilities, were modeled as geospatial model. Using this model, the cost breakdown structure and CO₂ emission reduction effect of energy utilization were quantified and evaluated in each energy utilization strategy which only heat was supplied or excess heat from power generation was supplied. As a result of a case study on the heat supply to the central area of Asahikawa City, it was found that the energy utilization strategy which only heat was supplied were not profitable

in either a restrained resource supply scenario in which only unused logging residues on harvesting or a more aggressive resource supply scenario in which whole harvested trees were utilized as energy. On the other hand, in many cases, it was suggested as profitable when only power generation was performed without excess heat recovery. In the case of utilizing of excess heat, the expected profitability was obtained only under some conditions (plant location, facility capacity and transportation distance of resource). However, it was suggested that excess heat utilization is not a cost effective process in any condition considered in this study and which lowers profitability. This result is attributable to the fact that the electricity derived from woody biomass is now guaranteed selling at favorable price conditions under the FIT scheme in Japan. So the power generation project is likely to be profitable. In order to improve the feasibility of systems which only supply heat from heat dedicated facility or supply excess heat from power generation, any political incentive on heat supply was considered to be necessary beyond direct capital subsidies. On the other hand, from the viewpoint of CO₂ emission reduction effect, it was clarified that the emission derived from the power consumption of pumps required for heat supply accounts for more than 80% of the whole process of the supply chain under any condition. In the strategy for only heat utilization, a certain amount of emission reduction was expected, whereas in the strategy for excess heat utilization from power generation, there was no substantial emission reduction effect in some cases because emissions from pump power increased due to an increase in the length of the DH pipe which depends on plant location and heat supply conditions. These results suggest that the appropriate site selection of facilities and the setting of heat supply range are important in order to obtain the emission reduction effect by heat supply.

Through this study, the effectiveness and importance of evaluating for bioenergy utilization systems based on geospatial model were clarified, and valuable knowledges were obtained on resource potential, transportation cost, cost structure of supplied energy throughout the supply chain and CO₂ emission reduction effect. These findings are important in examining measures that will be necessary in the future to realize decarbonization through efficient utilization of bioenergy. The evaluation methods for resource potential and transportation cost can be applied nationwide, and the heat supply model of woody biomass

via DH can be applied to urban areas in cold regions such as Hokkaido and Tohoku region. The approach presented in this study will contribute to the realization of sustainable use of bioenergy for the environment, society and economy.

略語・記号一覧

2DS	世界の平均気温上昇を産業革命前比で 2°C未満に抑える目標 (2 degree Celsius scenario)
A_j	メッシュ j における面積[m ²]
A_{xj}	メッシュ j の土地利用種 x の面積[m ²]
a	資源量 X に対する単位重量[Mg/(X の数量単位)]
a_h	住宅構造 h の人員あたり延べ床面積[m ² /人]
a_{ij}	市町村／農業集落 i とメッシュ j の交差面ポリゴン ij の面積[m ²]
a_{xij}	交差面 ij における土地利用種 x の面積[m ²]
B2DS	世界の平均気温上昇を産業革命前比で 2°Cよりも十分低く抑える目標 (Beyond 2 degree Celsius scenario)
BECCS	熱利用および発電におけるバイオマス燃焼時 CO ₂ 回収・貯留技術 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
C_A	減価償却費および利子返済費[円/年]
C_B	労務費[円/年]
C_C	メンテナンスコスト[円/年]
C_{const}	建設費[円]
C_D	保険料[円/年]
C_E	管理費[円/年]
C_F	灰処理費[円/年]
C_G	ユーティリティコスト[円/年]
CHP	熱電併給 (Combined Heat and Power)
C_p	熱媒の定圧比熱[J/kg・K]
C_{Rjy}	資源 y をメッシュ j から集約点まで輸送する際の往復コスト[円]
C_{Tjy}	メッシュ j における資源 y の総輸送コスト[円]

c	資本回収係数[-]
c_{el}	電力単価[円/kWh]
c_f	時間あたり燃料費[円/時間]
c_o	時間あたりオペレーター費[円/時間]
c_v	時間あたり車両コスト[円/時間]
c_y	資源 y の輸送手段の時間あたり単位コスト[円/時間]
D	木材密度[kg/m ³]
DH	地域熱供給（District Heating）
d	パイプ内径[m]
$\overline{d}_y$	資源 y の輸送時における嵩密度[kg/m ³]
ΔP	熱導管内の圧力損失[Pa]
ΔT	温度差[K]
E_{jy}	メッシュ j における資源 y のエネルギーポテンシャル[GJ]
e_y	資源 y の単位重量当たりの低位発熱量[GJ/Mg]
ϵ	管壁等価粗さ[m]
ϵ_{el}	電力量あたりの排出係数[kg-CO ₂ /GJ]
ϵ_j	工程 j における燃料の排出係数[kg-CO ₂ /GJ]
$\epsilon_{kerosene}$	灯油の熱量あたり排出係数[kg-CO ₂ /GJ]
η_n	モーター効率[-]
η_p	ポンプ効率[-]
F_j	工程 j における燃料費[円/年]
FIT	再生可能エネルギー電力の固定価格買取制度（Feed-in Tariff）
$F_{operator}$	一人あたり人件費[円/年]
f_e	バイオマス拡大係数[-]
f_{peak}	ピーク期の平均熱負荷／年間平均熱負荷[-]
GHG	温室効果ガス（greenhouse gas）

GIS	地理情報システム (Geographic Information System)
h	住宅構造 (戸建て住宅または共同住宅)
h_p	ポンプ水頭[m]
h_r	熱伝導率[W/m/K]
IEA	国際エネルギー機関 (International Energy Agency)
i	年利[-]
k	管および断熱材の熱通過率[W/m ² /K]
LHV	低位発熱量 (Lower Heating Value)
l	管長[m]
MST	最小全域木 (Minimum Spanning Tree)
m_y	資源 y の含水率[-]
μ	熱媒の粘度[Pa・s]
$N_{operator}$	従業員数[人]
n_h	住宅構造 h の居住人口[人]
ν	熱媒の流速[m/s]
PS	熱源容量[kW]
P_i	エネルギー種 i の販売収益[円/年]
p_i	エネルギー i の単価[円/kWh または 円/MJ]
p_j	工程 j における燃料の単価[円/L]
Q	熱損失[J]
Q_{annual}	年間の総熱需要[TJ]
Q_d	パイプのセグメントにおける熱負荷[J]
Q'_{el}	売電量[kWh/年]
Q'_{heat}	売熱量[GJ/年]
Q'_i	売却したエネルギー種 i のエネルギー量[kWh または MJ]
Q'_{pump}	熱供給時のポンプ電力消費量[kWh/年]

q_h	住宅構造 h の延べ床面積あたり年間熱エネルギー消費原単位[MJ/m ² ・年]
Re	レイノルズ数[-]
λ	熱媒の動摩擦係数[-]
RDF	ごみ固形燃料 (Refused Derived Fuel)
RHI	再生可能エネルギー熱の固定価格買取制度 (Renewable Heat Incentive)
ρ	熱媒の密度[kg/m ³]
RPS	再生可能エネルギー電力の導入達成比率を義務付ける制度 (Renewables Portfolio Standard)
T	熱媒温度[K]
T_j	メッシュ j から集約点までの輸送時間[時間]
T_{out}	管外部温度[K]
t	運用時間[s]
τ	償却期間[年]
UNFCCC	気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change)
u_y	資源 y の積載可能な生重量[Mg]
V_s	幹の体積[m ³]
V_v	体積流量[m ³ /s]
v_y	資源 y の積載可能容量[m ³]
W	資源の重量[Mg]
W'	ポンプ動力[kW]
W_i	市町村／農業集落 i における推定資源量[Mg]
W_j	メッシュ j における推定資源量[Mg]
W_{jy}	資源 y のメッシュ j における乾燥重量[Mg]
$W_{residue}$	幹材以外の地上部重量[Mg]
W_{whole}	樹木の地上部全体 (全木) の重量[Mg]

w	管部および断熱材厚さ[m]
w_{ij}	市町村／農業集落 <i>i</i> とメッシュ <i>j</i> の交差面ポリゴン <i>ij</i> の資源量[Mg]
X	資源量[頭][人][円][m ²]

目次

第1章：緒論.....	1
1.1. バイオマスとバイオマスエネルギーの定義.....	1
1.2. バイオマスエネルギーの役割	2
1.3. 日本における取り組み	3
1.4. 動機と目的	4
1.5. 本論文の構成	5
第2章： バイオマスエネルギーのマッピングとポテンシャル評価.....	9
2.1. 緒言	9
2.2. 空間分布の推定	11
2.2.1. バイオマス資源のマッピング	11
2.2.2. 空間解像度の統一	13
2.3. 到達圏の解析	14
2.3.1. 到達時間	14
2.3.2. 輸送コスト	15
2.3.3. 解析対象地の設定	16
2.4. 結果と考察	17
2.5. 結論と今後の展開	20
第3章： 熱利用を志向した広域木質バイオマス利用システムの評価	36

3.1. 緒言	36
3.2. データと方法	37
3.2.1. 資源供給ポテンシャル推定モデル	38
3.2.2. 熱需要の推定	39
3.2.3. 最適な熱導管配置の推定と配管条件の決定	40
3.2.4. エネルギー供給モデル	41
3.2.5. コスト	42
3.2.6. 収益	44
3.2.7. CO ₂ 排出量・排出削減量	45
3.2.8. 計算処理に用いるソフトウェア、ライブラリおよびデータ	45
3.2.9. 解析対象地の設定	46
3.3. 結果	47
3.3.1. 資源利用シナリオ別の資源供給ポテンシャルとエネルギー供給における 充当可能性	47
3.3.2. 各エネルギー利用モデルにおける事業性と CO ₂ 排出削減効果の評価	48
3.4. 考察	52
3.5. 結論	56
第4章：まとめ	83
4.1. 各章で得られた知見の概要	83
4.2. バイオマスによる熱利用の拡大に関する考察	84

4.3. 課題と今後の展望	86
謝辞	90
引用文献	92
補遺	103
A1. パイプ内径の評価	103
A2. 圧力損失の評価	104
A3. ポンプ動力の評価	105
A4. 配管における熱損失	106
A5. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおけるエネルギー供給コストの内訳	107
A6. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける CO ₂ 排出および排出削減量の内訳	109
A7. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおけるエネルギー供給コストの内訳	111
A8. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける CO ₂ 排出および排出削減量の内訳	114

第1章：緒論

1.1. バイオマスとバイオマスエネルギーの定義

バイオマスエネルギーは、バイオマス資源から得られるエネルギーであり、人類が最も古くから利用してきたエネルギーの一つである。バイオマスは元来、現在に至るまで生態学において生物量を表す用語として利用されてきたものであるが、オイルショック以降、化石資源の代替エネルギーとなりうる「エネルギー資源としての生物資源」の意味合いを含むようになった（日本エネルギー学会 2009）。

根源的には、バイオマスエネルギーは太陽光のエネルギーが光合成によって有機物内の化学結合として蓄えられたものである。有機物を構成する炭素、水素、酸素原子間の共有結合が、消化、燃焼、分解といったプロセスにおいて切断される際に、結合エネルギーとして蓄積されていた化学エネルギーが放出され（McKendry 2002）、このエネルギーが利用者によって回収される。原油、石油ガス、可燃性天然ガス、石炭といった資源もこうした視点から見れば太古の生産活動によって蓄積された同種のエネルギーであるが、現代において再生可能エネルギーに分類されるバイオマスエネルギーにはこれらの化石資源は含まれない。そのため、この点をより明示的にした「生きているか、最近まで生きていた生物に由来する生物物質」（Biomass Energy Centre 2006, Forest Research 2019）とするバイオマスの定義も多く引用されている（例えば Long et al. 2013）。

日本政府は 2009 年、バイオマスの活用の推進に関する施策を総合的かつ計画的に推進するため、バイオマス活用推進基本法（平成 21 年法律第 52 号）を施行した。同法ではバイオマスを「動植物に由来する有機物である資源（原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭を除く）」と定義している。

以下、本稿では特に断らない限り、「バイオマス」をバイオマス活用推進基本法で定義された資源を指して用いるものとし、これに由来するエネルギーをバイオマスエネルギーと呼称する。

1.2. バイオマスエネルギーの役割

バイオマスエネルギーは、薪や木炭の利用といった伝統的なバイオマス利用を含めれば、現在も世界で最も多く利用されている再生可能エネルギーである。2018年の報告によれば、世界の総エネルギー消費の約13%をバイオマスエネルギーが占めており、このうち途上国における伝統的バイオマス利用（調理・暖房熱）を除く5%が現代的バイオマスエネルギー利用である（REN21 2018）。バイオマスエネルギー利用は、作物生産を含む生物の生産活動を介した炭素循環におけるエネルギーの利用プロセス（Fig. 1-1）であり、この範疇を逸脱しない形でエネルギー利用は大気中の二酸化炭素を増加させない。一方で、バイオマスエネルギー利用はエネルギー作物の生産拡大などに伴う食料生産との競合や土地利用の変化を引き起こしうるため、社会、環境、経済への許容不可能なインパクトをもたらさない持続可能な形で生産・利用されることによってのみ温室効果ガス（greenhouse gas; GHG）削減の役割を担うべきであるとされ（IEA 2017）、「バイオマスエネルギーの持続可能性基準」が国際標準化されている（ISO13065 2015）。

2015年12月11日、気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC）に基づくパリ協定が合意された。これを踏まえ、国際エネルギー機関（International Energy Agency; IEA）は、気候変動対策におけるバイオマスエネルギーの役割を踏まえたロードマップを示し、世界の平均気温上昇を産業革命前比で2°C未満に抑える2°C目標（2 degree Celsius scenario; 2DS）においては、伝統的バイオマス利用が過半を占めている現状から、熱利用、電力、産業利用、輸送部門その他における利用量およびシェアを大幅に拡大するとともに、途上国における伝統的バイオマス利用を現代的なエネルギー利用へ移行することが必要であるとしている（Fig. 1-2; IEA 2017）。さらに2°Cよりも十分低く抑える目標（Beyond 2 degree Celsius scenario; B2DS）では、シナリオによっては産業熱利用および発電におけるバイオマス燃焼時CO₂回収・貯留技術であるBioenergy with Carbon Capture and Storage（BECCS）の実装によるネガティブエミッションが重要な役割を果たす（IEA 2017, IPCC 2018）ものと位置付けられている。

1.3. 日本における取り組み

日本におけるバイオマス利用の取り組みは、バイオマス活用推進基本法に基づくバイオマス活用推進基本計画（2010年12月策定、2016年9月改訂）に準拠する形で推進されている。同計画では、「環境負荷の少ない持続的な社会」、「農林漁業・農山漁村の活性化」及び「新たな産業創出」という3つの観点のもと、2025年時点で①炭素換算 2,600万トンの資源利用、②都道府県または市区町村におけるバイオマス活用推進基本計画の策定拡大、③バイオマスを活用したエネルギーや製品産業による 5,000 億円市場の形成という達成目標を設定し、バイオマス資源のエネルギー利用およびマテリアル利用を推進する（農林水産省 2016）としている。

また、日本はエネルギー自給率が 2016 年時点で 8%と、OECD 諸国の中でも最も自給率の低い国の一つ（IEA 2018）であり、非化石エネルギーへの移行と同時にエネルギーセキュリティ向上の観点からも、地域エネルギーであるバイオマスエネルギー利用に向けた構造転換が重要な課題である。

想定されるバイオマスエネルギー利用の主な方法は①発電、②熱、③車両燃料（バイオ燃料製造）だが、「国産バイオ燃料の生産では高コスト構造が改善できず、バイオエタノールの大規模実証事業が中止となる」（農林水産省 2016）などの状況もあり、国内におけるバイオマスエネルギー利用は発電・熱が主体となっている。特にバイオマス発電については、2012 年 7 月に施行された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（平成 23 年 8 月 30 日法律第 108 号）」によってバイオマスを含む再生可能エネルギー電力の固定価格買取制度（Feed-in Tariff: FIT）が開始となり、発電事業者にとって有利な売電価格が設定されたことから急速に普及が進んでいる。2019 年 3 月現在、FIT 制度を利用したバイオマス発電の設備容量は合計 2.90 GW、計画を含めた認定設備容量では 9.01 GW にのぼっている（資源エネルギー庁 2019a）。第 4 次エネルギー基本計画（2014 年 4 月）の策定を受け、経済産業省によって取りまとめられた長期エネルギー需給見通し（2015 年 7 月）では、2030 年のバイオマス発電導入量として電源構成の 3.7~4.6%に相当する 394~490 億 kWh（設備容量では 6.02~7.28 GW）を見込んでおり（経済産業省 2015）、現在の認定設備容量は既にこの見通しを上回っている。

このように、FIT 制度の施行により急速に普及したバイオマス発電は、太陽光発電や風力発電に対して気象条件による変動がなく安定的な運用が可能である一方、その余熱はほとんど利用されていないことが課題となっている（Aikawa 2018）。前述のバイオマス活用推進基本計画では、現在の国内におけるバイオマスエネルギー利用は地域内で循環利用する取組や熱利用などが十分に進んでおらず、売電以外に地域が主体となる持続的な事業のモデルが確立していない点を課題として指摘している。関連して、バイオマス利用システムを検討するにあたっては、一般にバイオマスが広く薄く存在し、その収集にコストを要することが課題とされていることから、収集・運搬から変換・加工、利用に至るまでを一つのシステムとして捉え、事業的に成立し得る技術体系を構築することが重要であるとされている（農林水産省 2016）。

1.4. 動機と目的

ここまで概観したように、バイオマスエネルギー利用は、気候変動対策やエネルギーセキュリティ向上の観点などから国際的にも国内的にも役割が期待されている。一方、バイオマスエネルギー利用は、バイオマス資源のエネルギー密度の低さや空間分布密度の低さによって輸送コストが利用コストに与える影響が大きくなりやすく、資源利用のための加工拠点の立地選定や需要地への搬送など、資源の空間的な分布が効率的な資源利用におけるサプライチェーンを検討する上で重要な要素となっている。また、特に日本におけるバイオマスエネルギー利用において十分な水準に達していないとされる熱利用は、熱を電力のように長距離輸送することが困難であることから、エネルギー需要地における熱需要の空間分布およびその空間密度、すなわち空間的な特性をふまえて利用システムを検討することが重要となる。

このように、地域におけるバイオマスエネルギーの熱利用は、資源の調達からエネルギー利用に至るまで、地理空間的な特性がその利用可能性や効果に大きく影響すると考えられる一方で、市町村などの地域スケールでバイオマス資源をエネルギー利用するにあたり、空間特性をふまえた利用可能性やシステム評価の取り組みは十分に行われているとは言い難く、資源利用における輸送コスト、立地に応じたバイオマスエネルギー利用システムのコスト構造や事業性、温室効果ガス排出削減効果も十分に明らかにされていない。

本研究では、地理情報システム（Geographic Information System; GIS）を用いてバイオマス資源の空間分布を把握し、資源の分布に基づく輸送性から見た資源ポテンシャルを評価するとともに、熱利用を志向したバイオマスエネルギー利用システムをサプライチェーン全体にわたり地理空間モデルとしてモデル化し、これを用いて資源の空間分布に基づく事業性および温室効果ガス排出削減効果を評価する。これによってバイオマス資源の輸送コストから見た資源ポテンシャルを明らかにするとともに、これを含むバイオマス資源の調達コストおよびエネルギー供給に要するコスト、ならびにエネルギー利用の事業性と排出削減効果を明らかにする。さらに、これらの結果を踏まえ、日本における熱利用を志向したバイオマスエネルギー利用システムの課題と今後のあり方について議論する。

1.5. 本論文の構成

本章では、本研究の背景と内外の概況、研究の目的と構成について述べる。

第2章では、特にバイオマス資源の輸送性に着目し、様々なバイオマス資源についてその利用可能量の空間分布を同一かつ詳細な空間単位で北海道全域にわたって推定するとともに、これに基づき輸送コストとエネルギー利用可能と期待される資源ポテンシャルとの関係性を把握する手法を開発した。北海道の中央域に位置する中規模中山間都市である富良野市を対象としたケーススタディによって得られた評価結果に基づき、輸送性の観点から見た優位性のあるバイオマス資源について議論する。

第3章では、特に木質バイオマス、具体的には伐採木全木あるいは土場残材をエネルギー資源として広域に熱利用することを想定し、燃焼によって熱のみを生産し地域熱供給によって供給するシナリオと発電時の余熱を回収して地域熱供給によって供給するシナリオを評価する空間モデルを構築した。このモデルを用いて、解析対象地とした旭川市を中心とした木質バイオマス資源の資源ポテンシャルおよび熱利用シナリオに応じた利用可能性を評価するとともに、サプライチェーン全体を空間モデルとしてモデル化することにより、エネルギー供給に要するコストやその事業性、ならびに温室効果ガス排出削減効果について、施設の立地点や資源の最大輸送距離、エネルギー供給範囲やプラント規模などのパラメータに応じた変化を明らか

にし、地域における熱利用を志向した木質バイオマスエネルギー利用の可能性について議論する。

第4章では、これらの結果を踏まえたバイオマスエネルギー利用における課題を整理し、特に日本における今後のバイオマス熱利用について必要と考えられる活用推進方策について議論するとともに、空間的な依存性が高いバイオマス資源の利活用に向け、本研究において提示する空間モデルによる評価の有効性や課題、発展性などについて議論し、全体を取りまとめる。

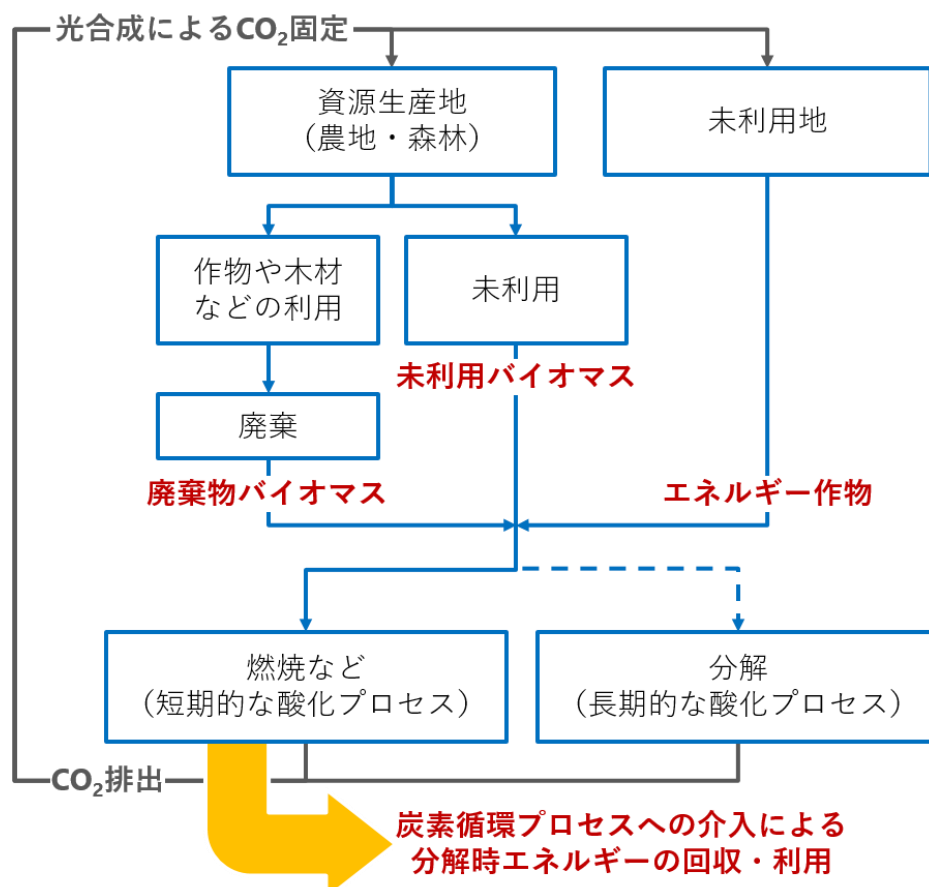


Fig. 1-1. 炭素循環とバイオマスエネルギー利用の概念図。Aikawa (2018) を元に筆者作成。青線は物質の流れ、灰線は CO₂ の流れを示す。

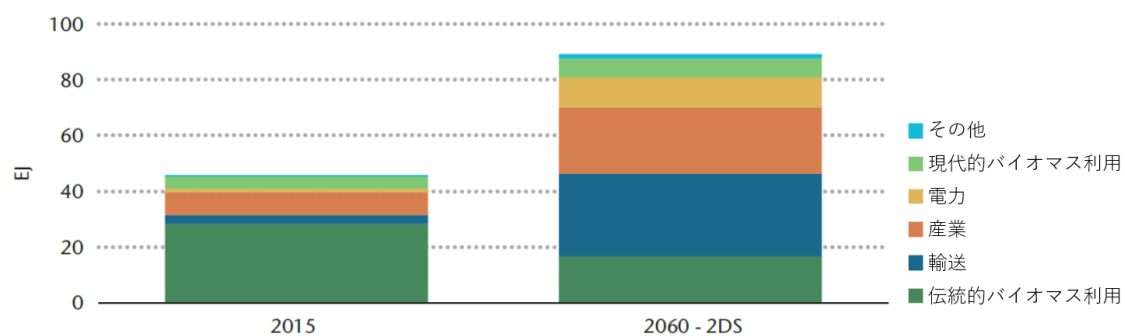


Fig. 1-2. 最終エネルギー消費における部門別バイオマスエネルギーの寄与。2015年時点での実績および2℃目標（気温上昇を産業革命前比で2度未満に抑える目標; 2DS）における2060年時点での目標値。（IEA 2017）

第2章：バイオマスエネルギーのマッピングとポテンシャル評価

2.1. 緒言

バイオマス資源は未利用間伐材、農業残渣、生ごみなど多様な資源からなる。これらの資源量および利用可能性は地域によって異なり、その条件も多様である。バイオマス資源は、エネルギー密度が化石燃料より低く、また資源によっては空間的な資源密度も低いため、資源の利用ポテンシャルを空間的に把握することはバイオマスエネルギーの利用施設の立地選定や事業化における事業性の判断など、その後の事業計画における重要なステップとなる (Calvert 2011, Long et al. 2013)。こうした観点から、バイオマス資源のポテンシャルに関する様々な検討が行われてきた。例えば日本では、山本ら (2007) は、残渣系バイオマス資源に関する商品統計から日本全国のバイオマスバランス表を作成し、これに基づきバイオマスの流れを分析することによって 10 地域ごとに供給ポテンシャルを評価した。この結果によれば、1 人当たりのポテンシャルが最も高いのは北海道地域であった。井内 (2004) は、日本の各自治体において多くの種類のバイオマス資源の総合的な推定を行った。このデータは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) によりさらに改良が加えられ、NEDO のホームページで公開された。

(同サイトは 2018 年 9 月に公開終了。)

一方、これらのバイオマス資源は分布が空間的に広く分散し、密度が低いほど輸送コストが高くなる傾向があるため、その効率的な利用には空間データが重要な役割を果たす (Calvert 2011, Long et al. 2013)。特に、大規模なシステムでは一般にスケールメリットが働き固定費などが有利になるとされるが、バイオマスエネルギー施設に関しては、このような大規模システムではエネルギー変換のためにより多くの原料を必要とし、結果的に輸送コストが高くなると指摘されている (Shabani et al. 2013)。この観点から、バイオマス資源は小規模利用に親和性が高いと考えられ、世界各地で輸送コストを考慮した多くの研究が行われている。例えば、Noon and Daly (1996) は、テネシー川流域における石炭火力発電所への木質燃料の供給コストを試算する意思決定支援システム BRAVO を提案した。BRAVO は、GIS ベースのプラットフォームを用いてバイオマス資源の輸送コストを空間的に解析した事例としては最も古いものの一

つである。また、Panichelli and Gnansounou (2008) は、森林伐採時に発生する残材を利用するエネルギープラントを地域に配置するにあたり、輸送距離に基づいて施設の最適な空間配置を得る手法であるロケーション・アロケーションモデルを用いた意思決定支援システムを提案した。Zambelli et al. (2012) は、オープンソース GIS フレームワークの一つである GRASS GIS および PostGIS を用いて、森林バイオマスの利用可能性を評価するツールである BIOMASFOR を提案した。現在、本ツールは GRASS GIS の拡張機能の一つとして利用可能である。また Nepal et al. (2014) は、ヤナギなどの短伐期木質資源の栽培による資源供給の経済的実現可能性について、資源収量および生産コスト、輸送コストを踏まえた栽培地の立地適合性を GIS ベースのモデルによって評価した。

日本でも特定のバイオマス資源を用いた研究がいくつか行われている。木質バイオマスについては、Yagi and Nakata (2011) が、輸送コストなどの入力データをもとに最適なプラント規模、施設立地、プラント数および各プラントにおける発電コストを分析するツールを構築した。彼らは、ケーススタディとして宮城県における 2 km メッシュ規模の林地残材、未利用間伐材、おがくず、製材端材を対象とした資源分布データを作成し、これを評価した。Kinoshita et al. (2009) は、GIS を使用し、伐採と木質バイオマス収集に要する空間コストを伐採からチップ化までの一連の作業過程を考慮して計算した。ケーススタディエリアである高知県梶原町における資源分布データは森林簿から林小班（森林管理や施業上で単位となる小領域）に基づき作成され、林小班サイズは 0.01~1 ha であった。同様のアプローチは別の事例でも採用されており、Yoshioka et al. (2011) は中部地方のある町を対象として 50 m グリッドのデータを用いた試算を、Ooba et al. (2012) は櫛田川流域（三重県）の林小班スケールでの試算をそれぞれ行っている。牛ふんなどの家畜ふん尿については、伊藤・中田 (2008) が岩手県葛巻町における 1 km 資源データに基づき、Yagi and Nakata (2011) と同様の方法で最適なバイオガスプラント配置を分析した。Yabe (2013) は、北海道全域の農業集落データを用いて牛ふん尿の発生量分布図を作成し、この空間データを基にしたロケーション・アロケーションモデルによる解析によってバイオガスプラントの最適配置を分析した。

これらの研究は、いずれも空間的な資源分布データに基づいて輸送コストの寄与を評価する

ものであるが、対象とするバイオマス資源は一部に限られている。一方、様々なバイオマス資源を対象とした資源分布データベースは、市町村単位や都道府県単位など、比較的大きな空間解像度を単位として検討されたものであり、特に小規模なバイオマスエネルギーの利用計画における輸送コストの検討に必要と考えられる空間解像度での資源分布情報を提供できるものにはなっていない。

このような背景を踏まえて本研究では、実際の道路網に基づく資源へのアクセス性を考慮することにより、地域内の様々なバイオマス資源についてそのエネルギー利用における利用可能性を輸送コストの点から評価することを目的とする。具体的には以下の手続きによって、様々なバイオマス資源の分布を同一の空間スケールおよび資源量で整理するとともに、GIS による輸送コストの試算を行った。

1. 様々な資源から成るバイオマス資源の空間分布について、北海道全域で一様な空間スケールで構成される空間データベース（ジオデータベース）を構築した。
2. 実際の道路網データに基づくネットワーク解析を行い、資源への到達可能時間と利用可能エネルギー量の関係を把握する手法を提案し、ケーススタディとして富良野市を対象とした解析を実施した。
3. 到達可能時間の推定結果に基づき、資源毎の輸送コストを算出し、輸送コストの観点から地域における有望な資源とその量を算出した。

2.2. 空間分布の推定

2.2.1. バイオマス資源のマッピング

まず、それぞれのバイオマス資源に関連する統計データから資源の空間分布を推定した。空間分布を推定するにあたって必要となる地理空間処理（ベクタ処理およびラスタ処理）には、GRASS GIS 6.4.3 と QGIS 2.4.0 を使用した。作成したデータベースは軽量データベースエンジンである SQLite を使用し、バッチ処理には Python 2.7.5 を使用した。これらのソフトウェアはフリー、オープンソースであり、ソース非開示の（プロプライエタリな）ソフトウェアに比較

して処理の透明性が高く、かつ低コストで実装可能である。

本研究で対象としたバイオマス資源は、牛ふん、家庭系生ごみ、事業系生ごみ、有機汚泥、下水汚泥、未利用間伐材および伐採残材、製材端材、建築廃材、公園剪定枝、果樹剪定枝および穀物系農業廃棄物であり、算出された資源量とその空間分布は、準拠する統計データの空間スケールに依存する。これらのポテンシャルは主に(2-1)式によって計算した。

$$W = aX \quad (2-1)$$

ここで、 W は資源の重量[Mg]、 X は資源量[頭][人][円][m²]、 a は資源量 X に対する単位重量[Mg/(X の数量単位)]であり、推定の方法論は井内 (2004) に基づく。Table 2-1 に資源 X の資源量、および空間単位を示す。なお、下水汚泥の処理量については、処理施設における処理実績データから直接把握した。

森林管理や伐採で発生する森林由来のバイオマス資源は、未利用間伐材や伐採残材（林地残材、土場残材）として利用されずに放置されるものを多く含む。未利用間伐材は、伐倒後に搬出されず、林内に全木が放置されるものを指す。伐採残材は、伐採後に林内または土場に残された枝条および根本材（追い上げ材）であり、利用間伐または主伐において発生する。本章ではこれらの発生量を、年間伐採量およびバイオマス拡大係数 f_e および木材の密度 D によって推定した。 f_e は幹材積に対する全木材積の体積比であり、Yoshioka et al. (2011) で設定されている値を参照し、100/92 とした。また木材の密度 D は、井内 (2004) における樹種別の値を参照した。全木および残材の発生量は、(2-2),(2-3)式により算出した。

$$W_{whole} = V_s \cdot f_e \cdot D \quad (2-2)$$

$$W_{residue} = V_s \cdot (f_e - 1) \cdot D \quad (2-3)$$

ここで、 W_{whole} は樹木の地上部全体（全木）の重量[Mg]、 $W_{residue}$ は幹材以外の地上部重量[Mg]、 V_s は幹の体積[m³]である。(2-2) 式は未利用間伐材に、(2-3)式は伐採残材の資源量推定にそれぞれ利用した。

森林の管轄および樹種毎の資源量は、伐採実績の5年平均（北海道林業統計 平成19年度～

23年度)をもとに算出し、伐採制限のない普通林の小班に分配した。

2.2.2. 空間解像度の統一

バイオマス資源の一部は、市町村や農業集落、林小班といった大きなスケールや非定形の地物単位 (Table 1-1 参照) に基づいて推定された。これらの資源ポテンシャルを同様に評価するため、データを「基準地域メッシュ」に統一した。基準地域メッシュは、地理座標系 (緯度 - 経度座標) に基づいて日本全域に適用される、一種のグリッドシステムである。一つのメッシュは緯度差 30'', 経度差 45'' で分けられ、メッシュ矩形の一边の長さが約 1 km であることから一般に 1 km メッシュとも呼ばれるが、正確には緯度経度によって定義されているため座標によって辺長やメッシュ面積は若干異なる。日本の基幹統計の一部は、この基準地域メッシュ単位で集計されており、こうした統計は地域メッシュ統計と呼ばれる。生ごみ、有機汚泥、製材廃材、公園剪定枝、下水汚泥については、推定に使用した統計データが地域メッシュ統計であり、(2-1)式による推定の段階で既に基準地域メッシュ単位で分布が推定されている。

これ以外のバイオマス資源については、非定形地物で推定された資源量の再分配処理を行った。手順は以下の通りである。

- 1) それぞれの資源分布に関連する空間データ (土地利用、植生調査結果、森林 GIS データ) に基づき、資源量を小領域に分配する
- 2) 小領域とメッシュポリゴンを重ね合わせ、交差によって得られる各細分領域 (セグメント) に資源量を面積按分する
- 3) 各メッシュで資源量を合計する

土地利用データに基づき分布を推定する資源は、建設廃棄物 (関連付けられる土地利用種は市街地) および穀物系農業廃棄物 (関連付けられる土地利用種は水田・農地) である。各メッシュ j における利用可能な資源重量 W_j [Mg] は、以下の式によって算出する。

$$a_{xij} = A_{xj} \cdot \frac{a_{ij}}{A_j}$$

(2-4)

$$w_{ij} = W_i \cdot \frac{a_{xij}}{\sum_j a_{xij}} \quad (2-5)$$

$$W_j = \sum_i w_{ij} \quad (2-6)$$

ここで、 W_i は市町村／農業集落*i*における推定資源量[Mg]、 A_j 、 W_j は、それぞれ各メッシュ*j*における面積[m²]および推定資源量[Mg]、 A_{xj} は、メッシュ*j*の土地利用種*x*の面積[m²]、 a_{ij} と w_{ij} はそれぞれ市町村／農業集落*i*とメッシュ*j*の交差セグメントポリゴン*ij*の面積[m²]および資源量[Mg]、 a_{xij} は、セグメント*ij*における土地利用種*x*の面積[m²]である。これらの関係を Fig. 2-1 に示す。

植生調査結果に基づき分布を推定する資源は、牛ふん（関連付けられる植生タイプは草地）および果樹剪定枝（関連付けられる植生タイプは果樹園）である。一般的に牛ふんは畜舎と草地の双方で発生すると考えられるが、個々の畜舎の位置データは入手できなかったため、畜舎は草地に付随して立地するものとして扱い、草地の分布に基づき再分配を行った。

2.3. 到達圏の解析

2.3.1. 到達時間

2.1 で述べたように、輸送コストは地域のバイオマス利用の最適化に不可欠な要素であり、輸送コストの推計には多くのモデルが開発されている。先行研究における資源輸送コストを推定する方法論は、大きく二種に分類される。一つは、発生地と利用地間の直線距離に基づき輸送距離を推定するものである。伊藤・中田 (2008) は直線距離をそのまま輸送距離として扱っているほか、直線距離に対して一定の比率を適用し、実際の道路長を推定した例もみられる (Yagi and Nakata 2011, Kinoshita et al. 2009, Ooba et al. 2012)。もう一つの手法は、実際の道路網データに基づくものであり、GIS を用いたネットワーク解析 (Routing) を利用する (Yoshioka et al. 2011, Yabe 2013)。直接距離に対して一定比率を適用する手法は簡便ではあるが、対象地域の地形や道路密度によって異なる道路網の蛇行性 (tortuosity) に依存する (Calvert 2011)。

このため、実道路網に基づいた **Routing** を用いた方がより適切な資源輸送性を評価できると期待される。

本研究では、実際の道路網データ（数値地図 2500）を用いた **Routing** により、前節で推定した資源ポテンシャルデータに基づく到達時間解析を行った。最短経路解析は、**Dijkstra 法**（Dijkstra 1959）に基づく **GRASS GIS** のベクタ処理モジュール（**v.net**）を用いた。本研究では、市町村内での資源利用を想定し、市町村の代表点として市町村役場位置を搬送先とする処理を行った。一般道（小路、徒歩道や階段などを含まない）かつ高速道路を除く無料道路のみを利用するものとし、最高速度の条件は道路交通に関する規制（道路構造令（昭和 45 年 10 月 29 日政令第 320 号））を参考とし、Table 2-2 に示す通り幅員に応じた値を設定した。

また実際の輸送プロセスでは交通状況、信号、交差点など制限要因が想定される。これらの制限要因の寄与を考慮するため、北海道における実際の交通データ（2010 年道路交通センサスデータ）を用いて実勢速度（調査における道路上の測定速度）と制限速度の関係を検討した。Fig. 2-2 に、実勢速度と制限速度の比の度数分布を示した。この結果に基づき、実勢速度と制限速度の比の平均値である 0.88 を最高速度に乗じた速度を実勢速度として扱うこととした。

2.3.2. 輸送コスト

資源への到達時間に基づき、各メッシュにおける各資源の輸送コストを計算した。メッシュ j における資源 y の総輸送コスト C_{Tjy} [円] を (2-7)～(2-9) 式により計算した。

$$u_y = \bar{d}_y \cdot v_y \quad (2-7)$$

$$C_{Riy} = T_j \cdot 2 \cdot c_y \quad (2-8)$$

$$C_{Tjy} = C_{Rjy} \cdot \frac{W_{jy}}{u_y \cdot (1 - m_y)} \quad (2-9)$$

u_y は資源 y の積載可能な生重量 [Mg]、 $\bar{d}_y$ は資源 y の輸送時における嵩密度 [Mg/m³]、 v_y は資源 y の積載可能量 [Mg]、 C_{Rjy} は資源 y をメッシュ j から集約点まで輸送する際の往復コスト [円]、 T_j

はメッシュ j から集約点までの輸送時間[時間]、 c_y は資源 y の輸送手段の時間あたり単位コスト[円/時間]、 W_{jy} は資源 y のメッシュ j における乾燥重量[Mg]、 m_y は資源 y の含水率である。単位輸送コスト c_y は(2-10)式で算出する。

$$c_y = c_v + c_f + c_o \quad (2-10)$$

ここで、 c_v は車両コスト、 c_f は燃料費、 c_o はオペレーター費である。これらのパラメータ値をTable 2-3に示す。

さらに資源のポテンシャルを同様に比較するため、資源量を(2-11)式で低位発熱量 (lower heating value; LHV) に変換し、これを資源のエネルギーポテンシャルとした。

$$E_{jy} = W_{jy} \cdot e_y \quad (2-11)$$

ここで、 E_{jy} は、メッシュ j における資源 y のエネルギーポテンシャル[GJ]、 e_y は資源 y の単位重量当たりの低位発熱量[GJ/Mg]である。

最後に、これらの結果をバイオマス資源別に積算し、市町村における輸送コストに対する累積資源ポテンシャルの関係を把握した。

2.3.3. 解析対象地の設定

本研究では、輸送コストに関する解析対象地として富良野市 (Fig. 2-3) を設定した。富良野市は北海道のほぼ中央に位置し、面積は約 600 km²、人口は約 25,000 人である。平成 22 年度国勢調査 (総務省統計局 2013) ベースでは、北方領土を除く道内 179 市町村における人口順位は 31 位と全体の上位 20%に含まれる比較的規模の大きな自治体であり、生ごみなどの有機廃棄物が一定量発生すると見込まれる。一方で、郊外には多くの耕地や森林が分布しており、これらの土地利用に由来するバイオマス資源も賦存している。市は環境や再生可能エネルギー利用に関する様々な地域計画 (環境基本計画、環境保全行動計画、地球温暖化対策実行計画、地域新エネルギービジョン) を策定している。可燃ごみは燃料化ごみとして市内で固形燃料 (Refused Derived Fuel; RDF) 化を行っており、製造された RDF は市内の温浴施設や市外の製紙工場などでエネルギー利用されている。こうした取り組みから市民の間での固形燃料ごみを

含むごみ分別も浸透しており、一般廃棄物のリサイクル率は全国平均 20%に対して 2003 年から 2012 年までの 10 年間の実績値平均が 61%と高い水準を達成している。このように富良野市では一般廃棄物由来の有機系廃棄物利用は一定の成果を挙げているものの、一方でその他のバイオマス資源の活用は進んでいない。

富良野市は上述のとおり、一定の人口があるため生活由来の生ごみや建築廃材などの発生が見込まれる一方で、耕地や森林が分布していることから農業廃棄物や森林バイオマスも一定量賦存しており、人口は比較的多いものの典型的な中山間地域であると考えられる。また、可燃ごみ以外のバイオマス資源の活用は進んでいないため、分布しているバイオマス資源の多くは未利用であり、利用可能であると考えられる。こうしたことから、本研究では富良野市を解析対象地として設定し、ケーススタディを実施した。地域内における資源分布は 2.2 で推計した結果を使用し、2.3.1 で述べたように Routing における資源の搬送先は富良野市役所とした (Fig. 2-4)。

2.4. 結果と考察

2.2 および 2.3 で述べた手順により、資源の空間データベースを構築し、実道路網に基づく資源へのアクセス性を到達時間と輸送コストの両面から把握した。

資源分布の推定結果を Fig. 2-5(a) (穀物系農業廃棄物)、Fig. 2-5(b) (厨芥 (家庭系生ごみ、事業系生ごみ) および汚泥 (有機汚泥、下水汚泥))、Fig. 2-5(c) (木質バイオマス (未利用間伐材および伐採残材、製材廃材、建設廃材、剪定枝))、Fig. 2-5(d) (牛ふん) に集約してそれぞれ示す。

穀物系農業廃棄物 (Fig. 2-5(a)) では、特に水田が多く、米の作付けが盛んに行われている空知地域および上川地域での利用可能量分布が特に多い傾向となっている。一方、十勝や北見、後志地域などに分布しているのは主に麦に由来する穀物系農業廃棄物 (麦わら・麦稈) であると考えられる。

厨芥 (Fig. 2-5(b)) は、人口の集中する都市部に多く賦存する傾向が得られた。これは、家庭系生ごみの分布が人口分布に基づき推定されていることに加えて、事業系生ごみが従業員数の

分布に基づき推定されており、従業員数の多い事業所が比較的都市部に多いことが主な要因である。一方で、食品加工業などから発生する有機汚泥や下水処理施設で発生する下水汚泥は加工施設や処理施設の立地に依存するため局所性が強く、全道の分布を推計した同図においては視覚的には明らかではなかった。

木質バイオマス (Fig. 2-5(c)) は、比較的全道的に分布しており、都市や中山間地域の双方に発生源のある資源である。一部の山地では分布が見られないが、これは伐採に関して制限が適用されていることが要因であると考えられる。また、札幌などの都市圏では、新築や解体に伴う建築廃材の他、製材業が操業している場合にはこれらの端材、ならびに都市公園由来の公園剪定枝の発生があるものと期待される。果樹剪定枝については、道内の果樹園の多くが余市町や仁木町周辺に分布しているため他の木質バイオマス資源に比べ特定地域への偏在性が強い。

牛ふん (Fig. 2-5(d)) については、酪農および畜産業に由来して発生する。2.2.2 で述べたとおり、一般に牛ふんは草地の他に畜舎で発生するものが一定量あるものと考えられるが、これらについても草地面積に応じて分布が推定されているため、実際の発生量分布よりも分布密度が低く推計されているものと考えられる。

Fig. 2-6(a)～2-6(c)は、富良野市における資源ポテンシャル[TJ]と、資源毎の重量[wet-Mg]および資源ポテンシャル[GJ]に基づく到達可能時間、または単位輸送コストの関係をそれぞれ示したものである。単位輸送コスト、積載量 (Table 2-3) および低位発熱量は資源によって異なるものの、Fig. 2-6(a)～2-6(c)における資源間の関係は類似している。

比較の結果、未利用間伐材と伐採残材（森林バイオマス）および穀物系農業廃棄物が総量では最も高い資源ポテンシャルを持つことがわかった。この地域で最大のポテンシャルを有するのは森林バイオマスであったが、集約点から 20 分圏内では穀物系農業廃棄物のポテンシャルが高い。これは、一般的に耕作地が森林地域よりも都市の中心地域近くに分布しているためである。さらに、穀物系農業廃棄物の単位重量または単位エネルギー当たり輸送コストは、穀物系農業廃棄物の総量を利用して森林バイオマスのそれより低い (Fig. 2-6(b),2-6(c))。この結果は、輸送コストの観点から見れば穀物系農業廃棄物が比較的優位な資源であることを示唆している。

Fig. 2-6(b) に重量あたりの輸送コストを示す。バイオマス資源は、資源が発生する供給サイトから乾燥、破砕などの中間処理を行う加工サイトへ生の状態で輸送されることが多く、バイオマスの種類によっては高い含水率、あるいは低い嵩密度 (Table 2-3) を有する。このため、資源の重量あたり単位輸送コストは直接納入価格に影響することから、重量あたりの輸送コストは資源供給者サイドにとってイメージしやすい表現である。

一方、エネルギー利用者サイドでは資源のエネルギーポテンシャルに基づく単位輸送コストの表現 (Fig. 2-6(c)) がより親和的であると考えられる。例えば富良野市における資源の熱量単価は 200 円/GJ 以下であり、過去 3 年間 (2012 年 4 月～2015 年 3 月) の北海道内における灯油の平均価格 (97 円/L) から算出される当該期間の灯油 LHV 相当価格 (2,643 円/GJ) の 10% 以下である。このようなデータは、バイオマス利用システムの事業性について検討する上で有用である。

富良野市では、一定の人口があることから厨芥類の発生も見込まれたが、市域全体では賦存量、エネルギーポテンシャルともに木質バイオマス (未利用間伐材および伐採残材) や穀物系農業廃棄物が多いと推計された。また総量では森林バイオマスがより大きな賦存量を有していたが、穀物系農業廃棄物がより中心地近くに分布していることから利用性が高い結果であった。こうした傾向は、流域によって市町村界が分割され、河川の流路周辺に形成された平野部に農地が分布することの多い中山間地域では典型的な傾向であるものと類推される。このため、特に穀物系農業廃棄物の分布が集中している空知や上川地域では、富良野市と同様の傾向が得られると期待される。一方で都市地域では生ごみなどの厨芥や廃材、剪定枝といった都市地域由来の木質バイオマス、酪農地域では牛ふんなどが相対的に高いポテンシャルを有すると考えられる。本研究で示したアプローチによって、輸送の観点から資源の優位性を評価することは、バイオマス利用における地域の特性を把握する手法として有用であると考えられる。

本研究で推定した輸送コストは、輸送機器への積み込み・積み下ろしコストとこれに要する時間を考慮していない。一部の資源では積み込み・積み下ろし作業に多くの時間やコストが必要となる場合があることから、本研究で推定された輸送コストはこの点において過小評価となっている。また、資源の調達コストは、輸送コストだけでなく加工・配送などその他の工程に

かかるコストも含まれる。これら他工程に要するコストと本研究で得られたデータを統合することにより、この地域におけるバイオマス資源の利用可能性をより具体化することができる。

本研究で用いた統計データの一部は、個人情報保護の観点から秘匿データ（空白データ）となっているため、秘匿部における資源分布は推定されていない。このため秘匿を含むデータに基づく推計結果は過小評価となっている。またいくつかの種（豚ふん尿や鶏ふんなど）は、資源に関連する空間データが得られなかったため、メッシュデータへの空間的な再分配ができず、本研究では評価対象に含めることができなかった。さらなる信頼性向上のためには、適切なデータの収集、あるいは整備が必要である。

本研究では、道路幅に基づいて各道路の最大速度条件を仮定した。これらのデータは、地域の実態に即した条件により、より現実的な推定結果に改善することができると期待される。また本研究で利用した道路網データは、林道や林内作業道はカバーされていない。より適切な到達圏解析には、林道も含めた道路網データの統合が必要である。

2.5. 結論と今後の展開

本研究では、11種のバイオマス資源を対象として、従来提案されていたものよりも均一かつ高解像度（1 km メッシュ）な資源量分布データベースを構築した。木質バイオマスは比較的多くの地域で利用可能な資源となることが期待される一方、穀物系農業廃棄物や牛ふんなど地域偏在性が高い資源もみられた。

この資源量分布データベースを利用して実道路網データに基づく資源への到達性解析を行い、地域の集約地を中心とした到達可能時間と輸送コストを推定した。これにより、資源の分布と実際の輸送を想定した資源毎の輸送コストと資源ポテンシャルとの関係を示した。本研究で解析対象地とした富良野市では、穀物系農業廃棄物が森林バイオマスよりも中心地近くに分布していることから、20分以内での到達圏では穀物系農業廃棄物のエネルギーポテンシャルがより優位であり、その単位輸送コストは森林バイオマスよりも安価であると考えられた。したがって、輸送コストの観点からは、穀物系農業廃棄物は富良野市において比較的に利用しやすい資源であると考えられる。一般的に山間の平野部に市街地や農地があることが多い中山間地

域では、穀物系農業廃棄物が賦存している場合には類似の結果が得られると期待され、この点において富良野市における結果は耕作地を有する中山間地域の傾向を代表するものと考えられる。一方で、都市地域では生ごみなどの厨芥や廃材、剪定枝といった都市地域由来の木質バイオマス、酪農地域では牛ふんなどが相対的に高いポテンシャルを有すると考えられる。本研究で示したアプローチによって輸送の観点から資源の優位性を評価することは、バイオマス利用における地域の特性を把握する手法として有用であると期待され、本研究で解析対象地とした富良野市以外、とりわけ富良野市と特徴の異なる地域における資源の利用可能性を可視化することが今後の取組として重要である。

また、各市町村においてバイオマス資源を利用する際に課題となる輸送コストを左右する地理空間的要因としては、市町村の地理的形状やその中における資源分布、さらにこれらの資源を集約して加工や集約を行うサイトとの空間的な関係性、さらに地域における道路網の密度や蛇行性などが挙げられるが、本研究ではこうした地域の地理空間的特性を指標とした類型化は実施していない。他地域での解析の実施と合わせて、地理空間指標に基づき地域特性の類型化・一般化を行うことによって、バイオマス資源の利用可能性の観点から見た各地域を特徴づけ、より可能性のあるバイオマス資源の利活用を提示するといった取り組みへ発展できる可能性も考えられる。

ジオデータベースは、林道、交通状況、秘匿データをカバーする地域統計などの追加的利用によって、その精度向上が期待される。また、輸送以外の調達工程を含むコスト評価との統合により、より実地的な水準で資源利用可能性について検討が可能となる。本研究で用いた統計のほとんどは日本全体をカバーしているため、本手法は国内他地域にも適用が可能である。また、一部の統計調査は更新が終了したものの多くは統計調査結果の公開に合わせてデータを更新可能である。できるだけ新たなデータに基づく解析を実施することによって、より実地的なポテンシャルの評価結果が得られることが期待され、地域のバイオマス資源の具体的な利用に結びつく可能性が高まると考えられる。

Table 2-1. 本研究で推計したバイオマス資源およびその原典データ

バイオマス資源	対応数量 X	空間単位	引用資料
牛ふん	飼養頭数	農業集落	[75]
家庭系生ごみ	人口	基準地域メッシュ	[18],[39],[105]
事業系生ごみ	従業員数	基準地域メッシュ	[13],[103]
有機汚泥	生産額	基準地域メッシュ	[16],[46]
未利用間伐材 ／伐採残材	林小班面積 (非制限林)	林小班	[14],[15],[17], [20],[21],[25],[58]
製材端材	製品出荷額	基準地域メッシュ	[46]
建築廃材	建物延床面積	市町村	[52],[102]
公園剪定枝	都市公園面積	基準地域メッシュ	[54]
果樹剪定枝	栽培面積	農業集落	[75]
穀物系農業廃棄物	当該作物作付面積	農業集落	[19],[57], [76],[77],[79]

各資源の資源量は、資源量に対応した数量 X およびこの数量に基づく単位重量との積によって推定した（2-1 式参照）。推定した資源量の空間単位は推定に使用したデータの空間単位に準ずる。

Table 2-2. 道路網データに適用した制限速度条件

道路幅員	制限速度 [km/h]
3m未満	30
3m以上 5.5m未満	40
5.5m以上 19.5m未満	50
19.5m以上	60
不明	30

条件は道路構造令を踏まえ決定した。

Table 2-3. 輸送に使用すると想定した車両の種別、サイズ、単位コスト、積載時の嵩密度、積載量および輸送時における各バイオマス資源の含水率

バイオマス資源	車両 (サイズ)	車両 コスト [円/時]	燃料費 [円/時]	人件費 [円/時]	単位 コスト c_y [円/時]	嵩密度 $\bar{d}_y$ [湿潤Mg/m ³]	積載量 u_y [湿潤Mg]	含水率 m_y [%]	単位熱量 e_y [GJ/絶乾Mg]
牛ふん	バキューム カー (8t)	8,610	1,638	1,700	11,948	-	8	80	5.8
下水汚泥								90	8.9
家庭系生ごみ	バツカー 車 (4m ³)	2,900	649	1,700	5,249	0.74	3	80	20.5
事業系生ごみ								90	2.9
有機汚泥									
未利用間伐材 ／伐採残材						0.2	2		
公園剪定枝								50	
果樹剪定枝	トラック (4t,10m ³)	1,520	932	1,700	4,152	0.1	1		19.7
製材端材						0.14	1.4		
建築廃材						0.15	1.5	13	
穀物系農業廃棄物						0.29	2.9	15	15.2

コストに関するデータは北海道開発局 (2014) に基づき設定した。その他のパラメータは引用文献[2],[11],[23],[33],[37],[38],[43],[44],[70],[109]を参照した。

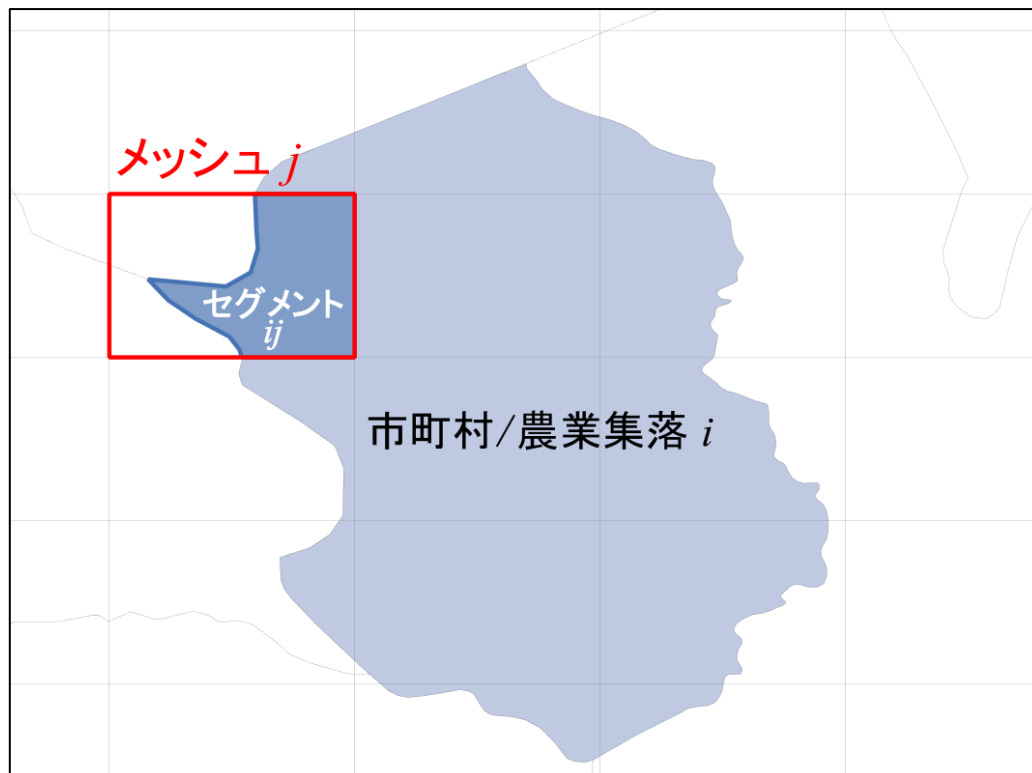


Fig. 2-1. 市町村／農業集落 i 、メッシュ j 、およびこれらの交差セグメント ij の関係性

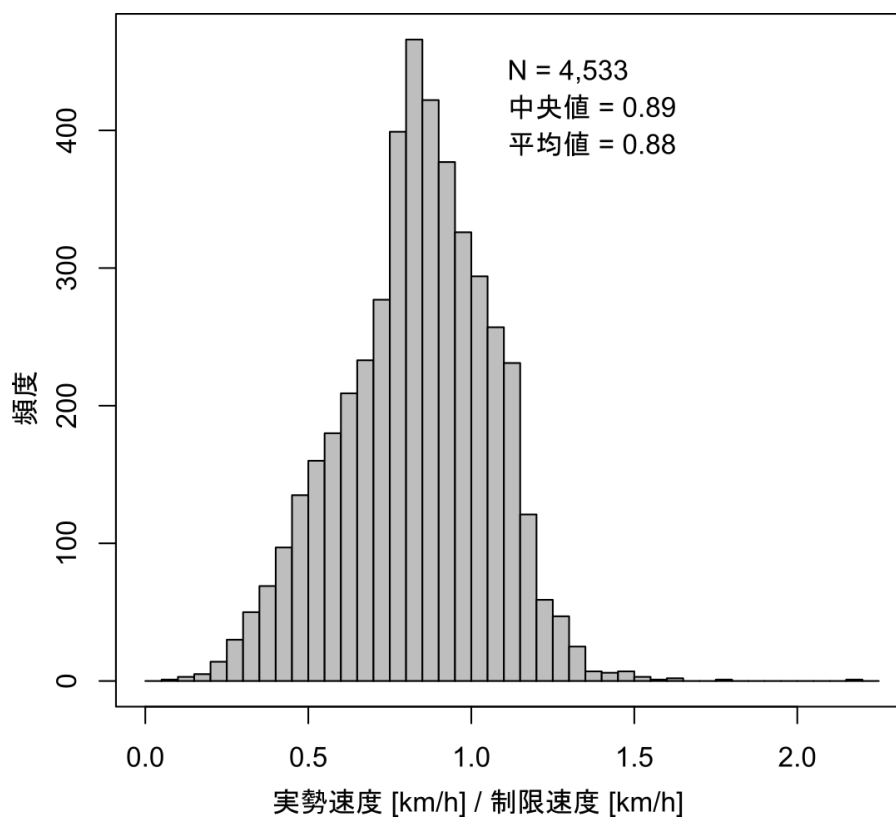


Fig. 2-2. 北海道における制限速度に対する実勢速度の比の頻度分布

実道路における車両の実勢速度を当該道路における制限速度で割った値。(国土交通省 2010)

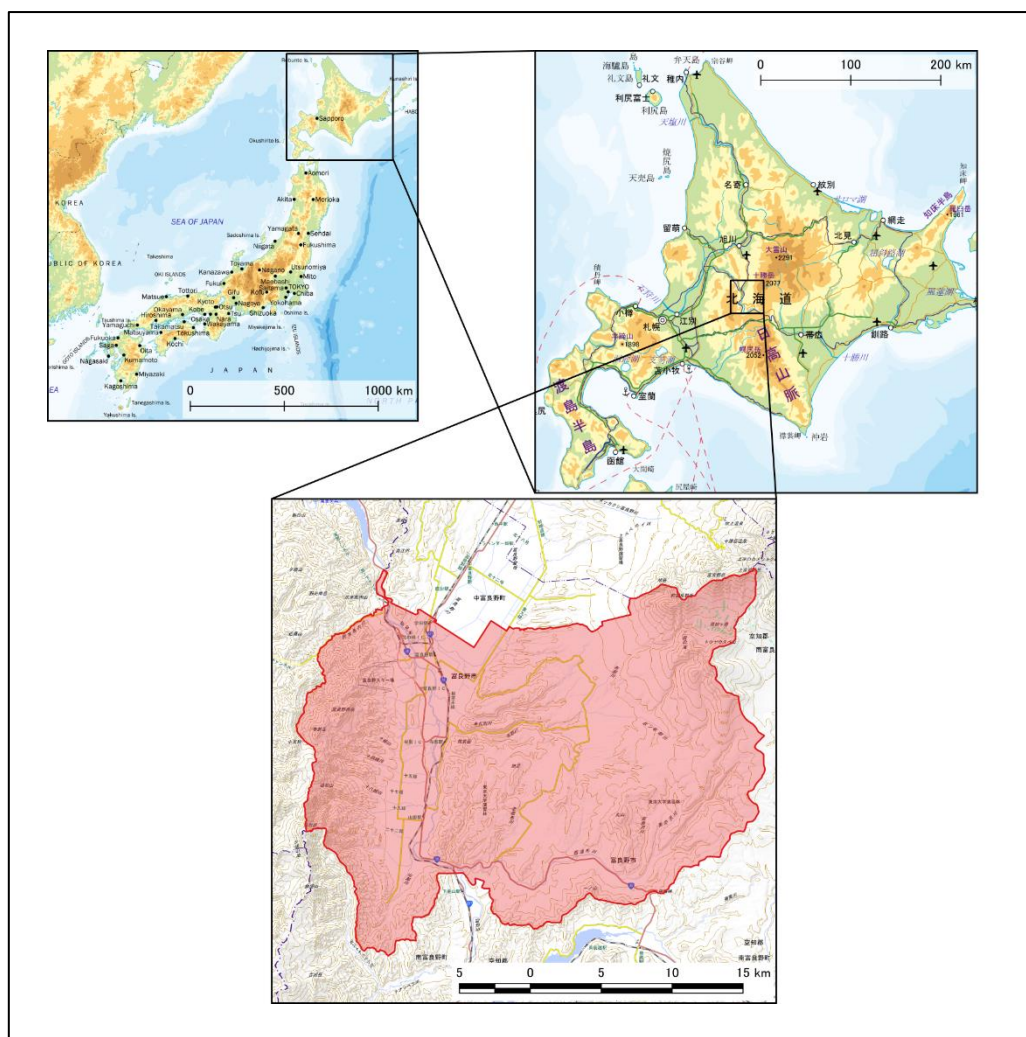


Fig. 2-3. ケーススタディ対象地（富良野市）（地理院タイル（標準地図）を加工して作成）

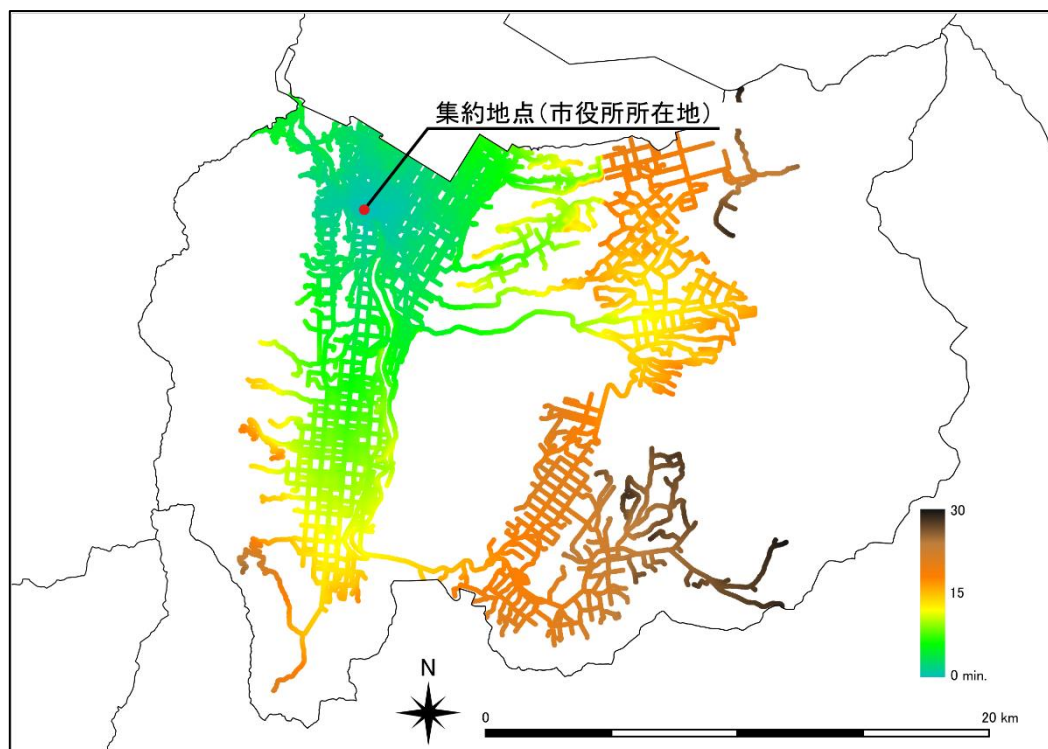


Fig. 2-4. 富良野市における集約地点（市役所）からの到達可能時間[分]の分布

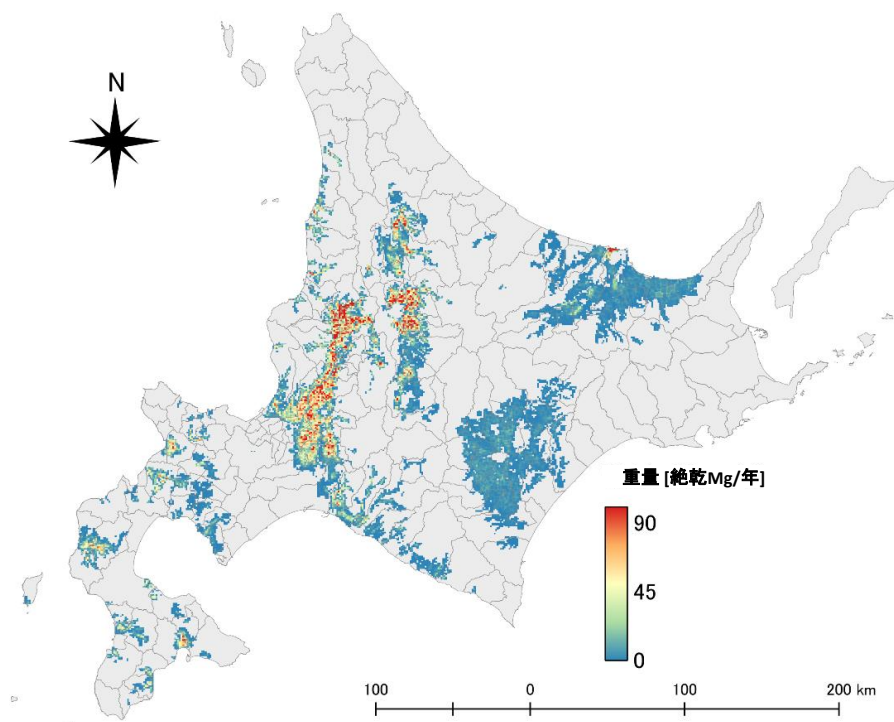


Fig. 2-5(a). 穀物系農業廃棄物の基準地域メッシュにおける利用可能量分布

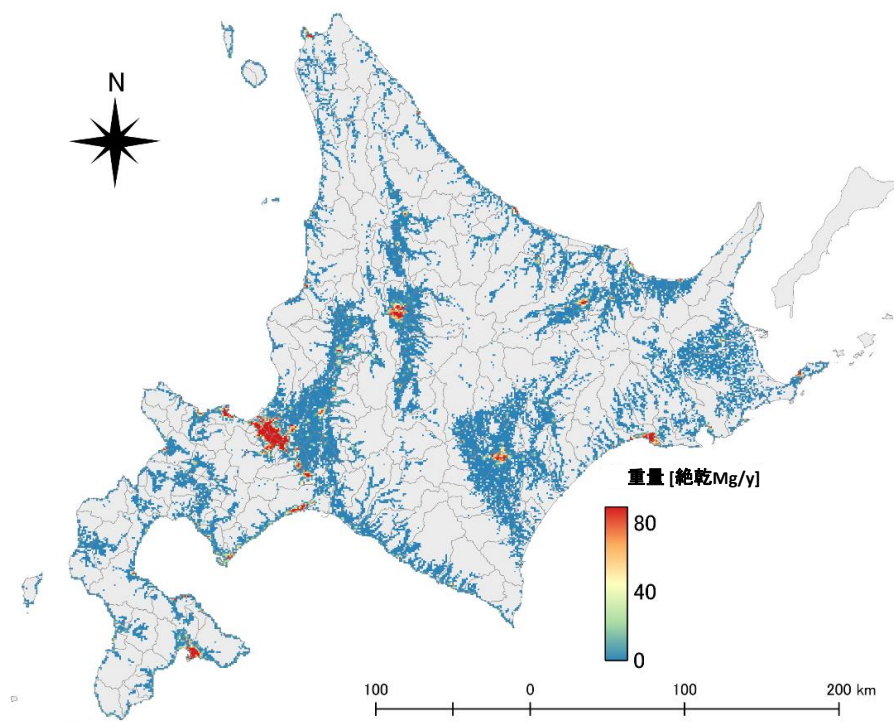


Fig. 2-5(b). 厨芥（家庭系生ごみ、事業系生ごみ）および汚泥（有機汚泥、下水汚泥）の基準地域メッシュにおける利用可能量分布

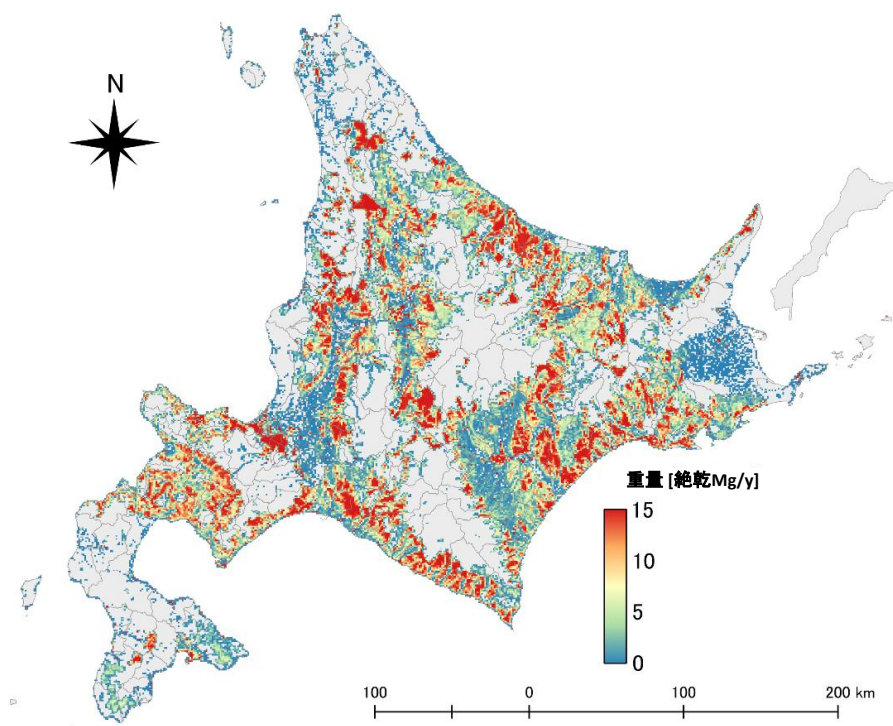


Fig. 2-5(c). 木質バイオマス（未利用間伐材または伐採残材、製材端材、建築廃材、公園剪定枝および果樹剪定枝）穀物系農業廃棄物の基準地域メッシュにおける利用可能量分布

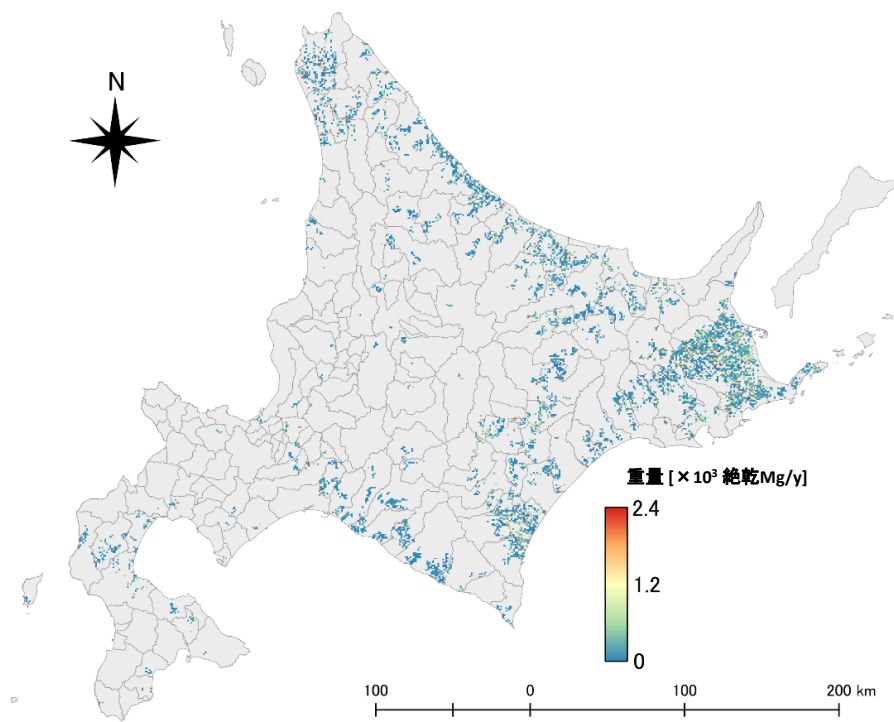


Fig. 2-5(d). 牛ふんの基準地域メッシュにおける利用可能量分布

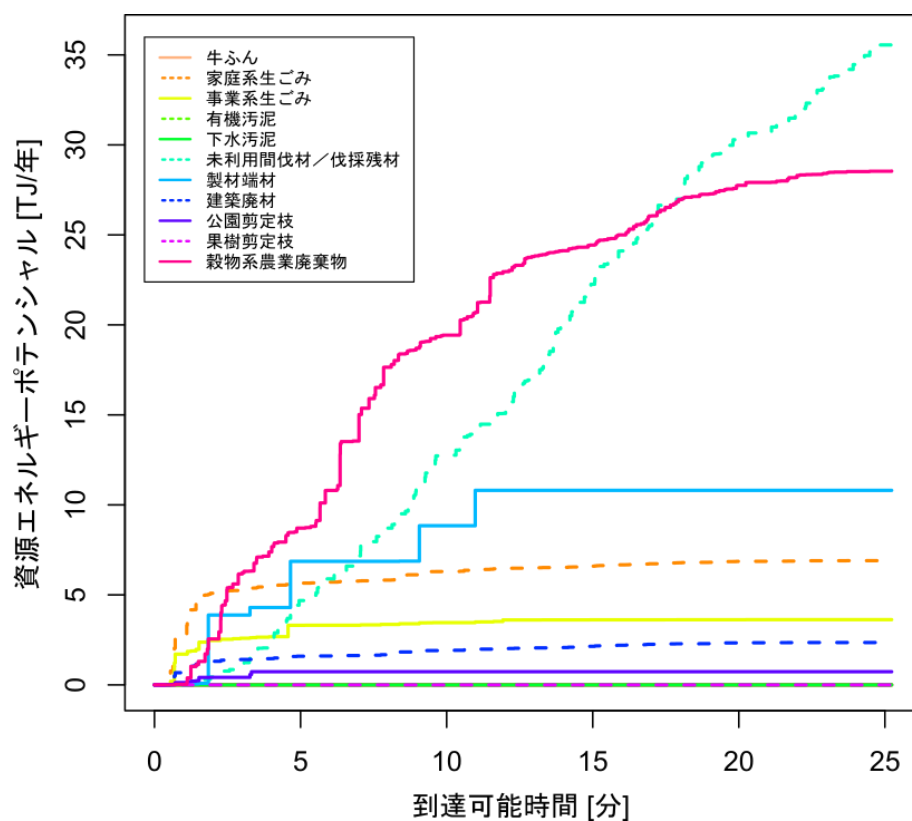


Fig. 2-6(a). 北海道富良野市における到達可能時間に対する各バイオマス資源の累積資源エネルギーポテンシャル

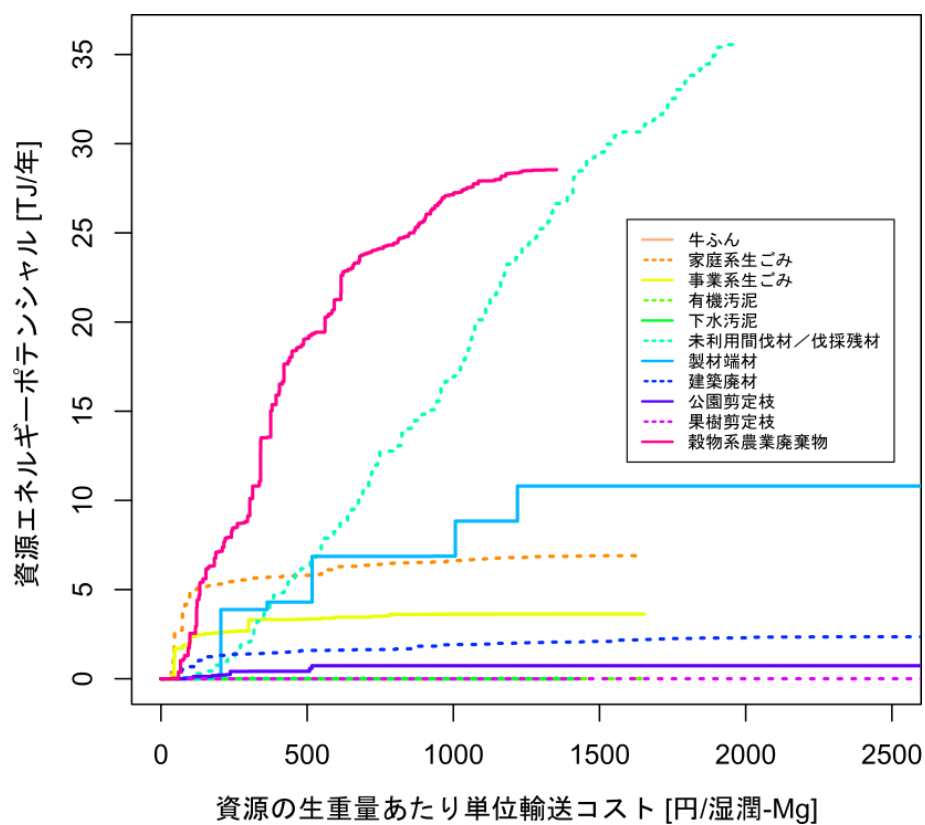


Fig. 2-6(b). 北海道富良野市における各バイオマス資源の生重量あたり単位輸送コストに対する累積資源エネルギーポテンシャル

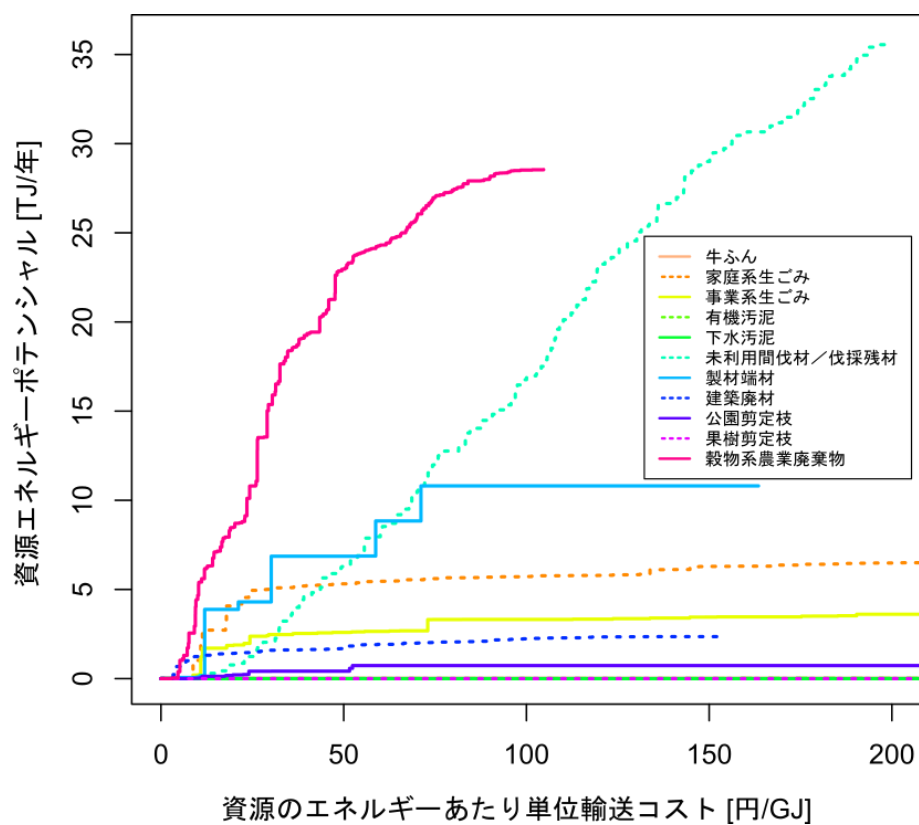


Fig. 2-6(c). 北海道富良野市における資源のエネルギーあたり単位輸送コストに対する累積資源エネルギーポテンシャル

第3章：熱利用を志向した広域木質バイオマス利用システムの評価

3.1. 緒言

日本は、国土の 67%を森林が占めており（林野庁 2018）、世界の中でも豊富な森林資源を有する森林国である。このため、森林バイオマスエネルギー、すなわち木質バイオマスエネルギーが有望な資源として期待されてきた。特に発電に関しては第 1 章で触れた通り、2012 年に FIT 制度が施行されて以降多くの発電施設が設置され、また認定済みの設備容量は長期エネルギー需給見通しで設定された目標を上回っている。しかしながら、近年運開した木質バイオマス発電施設の多くは直接燃焼による発電のみを目的とした設備であり、発電効率は 20-40%程度であると同時に、その余熱の多くは利用されていない。他方、木質バイオマスボイラーの熱効率は多くが 80%以上であり、資源の有効エネルギーの多くを回収できるため、特に欧州諸国では盛んに利用されているが、日本での木質バイオマスの熱利用は限定的である。

（Aikawa 2018）

木質バイオマスによる熱電併給（Combined Heat and Power; CHP）や大規模な熱利用においては、地域熱供給（District Heating; DH）が有効である。欧州では、熱セクターにおける脱炭素化の方策として DH が推進されている（Li et al. 2017, Werner 2017）。地域熱供給の利用は、国によってその利用率の差異が大きいが、アイスランド、デンマーク、スウェーデン、フィンランドなど最も積極的な諸国においては、建物の半分近くかそれ以上が熱供給によって供給されている（Werner 2017）。一方、日本における DH の導入は限られており、特に家庭部門への再生可能エネルギー由来の DH はほとんど見られない（Fujii et al. 2019）。

パリ協定を締結した UNFCCC 第 21 回締約国会合（COP21）に先立ち日本政府が UNFCCC 事務局へ提出した約束草案では、2013 年度時点の排出量 1,235 Tg の 16%を家庭部門が占める現状を踏まえ、同部門の排出削減目標を 39%（201 Tg→122 Tg）と設定している（環境省 2015）。この排出量の一部は暖房などの熱に由来するものであるが、同部門の熱需要は寒冷地である北海道が最も大きく、その多くは冬期の暖房需要である。2014 年度の実績によれば、日本全国での家庭部門におけるエネルギー消費のうち、石油系が占める割合は 27%（1,936,642 TJ のう

ち 517,245 TJ) であるが、北海道では 65% (159,430 TJ のうち 103,586 TJ) に達する (北海道経済部 2017)。家庭部門における石油系エネルギーの多くは暖房など熱需要に充てられており、熱セクターの脱炭素化は GHG 削減において特に重要である。

木質バイオマスエネルギー利用システムは、資源密度の低さから資源収集に係るコストが大きくなるため、その事業性の評価には空間的な解析が重要となる。このため、GIS を活用した検討事例が多く見られる (例えば Möller and Nielsen 2007, Panichelli and Gnansounou 2008, Zhang et al. 2017)。国内でも同様に、Kinoshita et al. (2009)、Kinoshita et al. (2010) や Yoshioka et al. (2011) などにおいて、資源利用コストが検討されている。一方、熱利用についても、熱需要の空間分布に基づく効率的な熱供給が事業性を左右する。Unternährer et al. (2017) は、DH の適切な配管配置を空間的に見積もる手法を提案している。国内でも、熱需要分布や配管ネットワークを空間的に評価した事例がみられる (Dou et al. 2018, Fujii et al. 2019)。

しかし、木質バイオマスの収穫から加工までの上流工程と、熱供給を行う下流工程までを繋いだサプライチェーン全体を空間的にモデル化して評価した先行研究は存在しない。そこで本研究では、木質バイオマスエネルギー熱を地域熱供給で利用する想定可能な複数のシナリオについて、熱供給のコスト構造やその事業性、ならびに低炭素化の効果を空間モデルによって評価することにより、施設の立地点や資源の最大輸送距離、エネルギー供給範囲やプラント規模などのパラメータに応じた変化を明らかにするとともに、地域における熱利用を志向した木質バイオマスエネルギー利用の可能性や課題を明らかにする。

3.2. データと方法

本研究では、木質バイオマスの資源量ならびに資源コスト、および規模の異なる複数のエネルギー利用シナリオからなる空間評価モデル (木質バイオマスエネルギー利用システム評価モデル) を構築した。モデルでは需給バランスを考慮した事業コストを評価し、これを元にエネルギー利用システムのエネルギーコスト内訳およびコスト収支、GHG 排出削減効果を比較する。評価モデルのプロセスフローを Fig. 3-1 に、評価対象プロセスのシステム境界を Fig. 3-2 にそれぞれ示す。

3.2.1. 資源供給ポテンシャル推定モデル

本研究では、Kinoshita et al. (2009) が構築した「木質バイオマス利用ポテンシャル評価モデル」を拡張したモデルを構築し、資源供給ポテンシャルを空間的に推定した。Kinoshita et al. (2009) では、伐倒 (felling)、集材 (forwarding)、造材 (bucking)、運材 (transporting)、破碎 (chipping) が評価されているが、本研究ではこれに加えて残材搬送 (residue transporting) および破碎後のチップ配送 (chip transporting) に係るコストについても同様のモデルで考慮した。

エネルギーとして利用する木質バイオマスの形態はチップを想定し、収集、搬送、破碎の各工程におけるコストを計上して資源コストを算出した。ただし、破碎は移動式チップパを利用するものとし、破碎プラントの建設コストおよび資源の乾燥・保管に関するコストは考慮しなかった。

資源供給のポテンシャルは、集材距離や搬送距離に大きく影響を受ける。本モデルでは従前のモデル (Kinoshita et al. 2009) を拡張し、実際の道路ネットワークを考慮した集材距離、運搬距離を評価する (Fig. 3-3)。集材距離は近接道路までの直線距離で、搬送距離については道路上の点からの道路距離で把握し、最大集材距離や最大搬送距離による資源のフィルタリングを行った。本研究では最大集材距離を 500 m とし、最大搬送距離はシナリオ毎に設定した。また搬送時の実勢車両走行速度は第2章と同様、道路制限速度の 0.88 倍とした。

エネルギー利用にあたって前提となる木質バイオマスの物性は Gaderer (2016) を参照し、Table 3-1 に示した。なお、破碎前の工程は全て材積ベースで扱うため、破碎より前の工程における体積以外の物性は考慮しなかった。

利用する資源として、北海道の造林木として代表的な樹種であるカラマツ (*Larix leptolepis*)、トドマツ (*Abies sachalinensis*)、アカエゾマツ (*Picea glehnii*)、およびエゾマツ (*Picea jezoensis*) を対象とした。これらの造林地からの伐採施業は施業体系図に従って実施するものとし、樹種毎の施業体系は代表的と考えられる条件を設定した (Table 3-2; 北海道立林業試験場 2007, 北海道立総合研究機構林業試験場 2015, 同 2017)。伐採の制限が設定されていない普通林のみを資源利用可能な森林とし、これらの森林から林齢に応じ前述の施業体系に従って木材の生産が実施されるものとした。なお、資源の分布は森林 GIS データに基づき推定し、100 m 解像度の

ラストデータとして扱った。

本研究で想定する集材シナリオは全木集材とし、搬出を伴う間伐および主伐で生産される造材木、および土場残材を利用した。各工程で使用する施業機器は以下の通りとした。

- 伐倒：チェーンソー
- 造材：プロセッサ
- 集材：スキッター
- 運材：7.5 tトラック
- 残材搬送：4 tトラック
- 破碎：中型チップ
- チップ搬送：7.5 tトラック

搬送トラックの荷台容積は、一般的な車両を勘案して7.5 tトラックは20 m³、4 tトラックでは8 m³とした。

3.2.2. 熱需要の推定

本研究では、熱の供給先として家庭における暖房熱および給湯熱を想定し、熱需要の空間分布を推定した。年間の合計熱需要を推定するにあたり、以下の式で人口あたり推定年間熱需要 q [MJ/(人・年)]を算出した。

$$q = \frac{\sum_h (a_h \times q_h \times n_h)}{\sum_h n_h} \quad (3-1)$$

ここで、 h は住宅構造（戸建て住宅または共同住宅）、 a_h 、 q_h 、 n_h はそれぞれ住宅構造 h の人員あたり延べ床面積[m²/人]、延べ床面積あたり年間熱エネルギー消費原単位[MJ/(m²・年)]、居住人口[人]である。この熱需要原単位に人口データを乗じて1 km レベルの年間熱需要を推計し、この結果を居住地のある位置へ均等に分配することにより熱需要分布を推定した。居住地の空間分布は、100 m レベルの土地利用データにおける建物用地のクラスを居住地とし、各セルの重心点をその代表点とした。(Fig. 3-4)

3.2.3. 最適な熱導管配置の推定と配管条件の決定

集中型熱源を配置し地域熱供給を行う場合、熱導管に係るコストが重要であり、現実的な熱導管ネットワーク配置の推定が必要となる。本研究では Unternährer et al. (2017) の提案手法に倣い、隣接する需要点をノード（節点）として結合した平面連結グラフ（グラフを構成する任意のノード間を辿る路が存在し、かつ交差のないグラフ）をドロネー三角形分割によって作成し、Dijkstra 法（Dijkstra 1959）による最短経路解析によって隣接した需要ノード間の道路網上の距離を求め、さらに Kruskal のアルゴリズム（Kruskal 1956）によって得られるこのグラフにおける最小全域木（Minimum Spanning Tree; MST）を適切な熱導管ネットワークとした。この MST が表す配管ネットワークを主管とし、需要点から主管へ接続する枝管は、需要点と MST 上における最近接点とを結ぶ直線とした。

熱供給において、ポンプ動力と配管径はコストに大きく影響する重要な因子である。配管径は供給すべき熱量と熱媒流量によって決定され、必要なポンプ動力は配管における圧力損失で決定される。

本研究では Dou et al. (2018) による手法を参照し、所要ポンプ動力 W' [kW] および主管の配管径 D [m] を決定した。熱媒は温水とし、熱供給条件は往 80℃、復 60℃の密閉系とした。圧力損失は直管部の圧力損失のみを考慮し、局部抵抗や機器類の圧力損失は考慮しなかった。本研究で用いた熱供給条件下での熱媒の物性値を Table 3-1 に示した（都市環境エネルギー協会 2013）。その他の供給条件は Dou et al. (2018) と同様とした。なお、枝管の配管径は 0.15 m とし、熱媒の流速は主管と同じとした。

熱供給配管における熱損失については、多くの既往研究（下田ら 2001, Kayfeci 2014, Togawa et al. 2014, Yemao et al. 2019）で述べられている通り、配管径や配管長、熱媒温度、断熱といった条件で熱力学的に見積もることが可能である。熱力学的手法に基づいて配管レイアウトやサイズから熱損失を見積もる場合、配管レイアウトを事前に決定する必要がある。一方で、熱源規模に基づき熱供給範囲を決定する場合、供給可能な熱量を決定するために熱損失を事前に見積もっておく必要がある。配管レイアウトを推定する処理は大きな計算コストを必要とするため、供給可能な熱量を元に試行錯誤的に熱供給可能範囲を決定することは困難である。

そこで本研究では、規模の異なる配管レイアウト（半径 1 km～10 km）に基づく熱損失を下田ら (2001) および Togawa et al. (2014) の手法と条件で見積り、熱需要に対する熱損失の比率を調べた。この結果、熱損失は供給熱の 8.5%～47.5% と見積もられた。この結果に基づき、本研究では配管系における熱損失 (f_{loss}) を一律に需要の 20% とした。

3.2.4. エネルギー供給モデル

3.2.4.1 中規模分散型エネルギー利用モデル

このモデルは熱需要を一定の区画単位で集約し、それぞれの区画において熱導管を介した地域熱供給によって熱需要を賄うものである (Fig. 3-2 A)。このモデルの前提として次を設定する。

- 対象地域内に一箇所設置した中間加工地で木質チップを製造し、各需要区画へ配送する。
- 資源調達コストの低い資源から優先して調達し、資源が不足する場合は外部から購入する。
- 需要地ではチップボイラーで区画毎に熱供給を行う。

熱源の設置箇所は熱需要点の分布に基づいて設定する。熱供給区画内の需要点を包含する最小の凸多角形（全ての内角が 180° 以下である多角形）である凸包図を生成し、この面の重心点を近接する道路上の点へ移動した位置を熱源設置箇所とした (Fig. 3-5)。中間加工地から熱源設置箇所への資源搬送は最短経路によるものとし、熱源から区域内への熱供給は既述の熱導管ネットワークを介して行われるものとした。

設置する熱源の容量は、ピーク需要期（冬期）における熱負荷に合わせて決定した。ピーク需要期における月あたり平均熱負荷を設置する熱源容量とし、月内の熱需要変動は蓄熱槽などの熱ストレージによって吸収できるものとした。年間平均熱負荷とピーク期の月あたり平均熱負荷との比（heat load factor; f_{peak} ）は Rosa et al. (2012) を参照して 2.0 とし、以下の式で熱源容量 PS [kW] を決定した。

$$PS = \frac{Q_{annual} \times 10^9 \times f_{peak}}{60 \times 60 \times 24 \times 365 \times (1 - f_{loss})}$$

ここで、 Q_{annual} は年間の総熱需要[TJ]である。

3.2.4.2 大規模集中型エネルギー利用モデル

このモデルは資源を集約した拠点で発電を行い、発電で発生した余熱を一定の範囲内に熱供給することによって地域の熱需要を賄うものである (Fig. 3-2 B)。発電施設は木質バイオマス専焼型とし、このモデルの前提として次の条件を設定する。

- 対象地域内にバイオマス発電施設を一箇所設置し、そこへ資源を集約して発電を行う。
- 資源調達コストの低い資源から優先して調達し、資源が不足する場合は外部から購入する。
- 中間加工地は設けず、発電拠点へ直接搬入してチップへ加工し、発電を行うものとする。
- 発電施設は、稼働時には定格出力で終日運転することとし、年間稼働日数は年 330 日 (柳田ら 2015) とする。
- 発電で発生した余熱は地域内の熱需要へ熱導管を介して熱供給する。熱供給範囲は、発電施設からの距離の順位に基づく供給可能な最大範囲とし、熱供給の可能性判定は中規模分散型エネルギー利用モデルと同様に **heat load factor** によってピーク需要に基づき判定する。非ピーク期における余剰熱は廃棄する。
- 電力市場の受け入れ余力は十分にあるものとし、発電した電力は全量定額で売電されるものとする。

なおこのモデルでは、プラントの設備容量は地域の熱需要を考慮せず任意に決定する。

3.2.5. コスト

資源生産に係るコストは、前述の通り Kinoshita et al. (2009) のモデルを利用した。また、地域資源だけで需要を満たせない場合に購入する場合のチップの単価は国内で流通する燃料チップ価格 (日本木質バイオマスエネルギー協会 2019a) を念頭に 12,000[円/dry-Mg]とした。

エネルギー利用に係る年あたりコスト[円/年]は、以下を考慮する。

$$C = C_A + C_B + C_C + C_D + C_E + C_F + C_G \quad (3-3)$$

ここで、 C_A は減価償却費および利子返済費、 C_B は労務費、 C_C はメンテナンスコスト、 C_D は保険料、 C_E は管理費、 C_F は灰処理費、 C_G はユーティリティコスト（単位は全て[円/年]）である。

減価償却費および利子返済費 C_A は建設費 C_{const} [円]および資本回収係数 c によって年額に換算し、以下の式で算出する。

$$C_A = c \cdot C_{const} \quad (3-4)$$

年利を i 、償却期間を τ [年]とした場合の資本回収係数 c は以下で定義される。本研究では、耐用年数を償却期間として扱う。

$$c = \frac{i}{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^\tau} \quad (3-5)$$

建設費 C_{const} は、熱施設および発電施設については次の関係式で算出する。係数 a および b については、国内の既存プラント事例を整理した結果から設定した。（Table 3-3）

$$C_{const} = a \times PS^b \quad (3-6)$$

ポンプおよび地域熱供給配管の建設費は、Dou et al. (2018) および Togawa et al. (2014) を参照して算出する。労務費 C_C は従業員数 $N_{operator}$ [人]および一人あたり人件費 $F_{operator}$ [円/人・年]から算出する。

$$C_C = N_{operator} \times F_{operator} \quad (3-7)$$

発電施設の従業員数は既往研究（柳田ら 2015）に基づき算出した。熱施設については国内における参考事例に乏しいため、本研究では燃料の受け入れ、ボイラーならびに熱供給管理および緊急時対応を想定して2名とした。

メンテナンスコスト C_C 、保険料 C_D 、管理費 C_E 、灰処理費 C_F 、ユーティリティコスト C_G についても柳田ら (2015) に基づき算出した。使用するコスト比率は柳田ら (2015) および住友ら

(2015) から得た。なお、地域熱供給配管については、労務費、保険料、管理費、灰処理費は要しないものとして考慮しなかった。また熱施設のユーティリティコスト、固定資産税、熱ストレージ、資源の保管に係るコストについては参考情報が不十分であるため考慮しなかった。本研究で考慮したコスト、あるいはコストを算出するためのパラメータを Table 3-3 に示す。

配管に係るユーティリティコストとして、年間のポンプ駆動に要する電力料金 C_{G-pump} [円/年] を計上する。

$$C_{G-pump} = c_{el} \cdot W' \cdot \frac{24 \cdot 365}{f_{peak}} \quad (3-8)$$

ここで、 c_{el} は電力単価 [円/kWh] であり、北海道電力における電力料金従量単価 18.12 円/kWh を適用した。また、 W' はポンプ動力 [kW] である。

プラントの熱効率および熱回収効率、発電効率、所内率 (発電した電力を自家消費する比率) は既往研究の値を引用した (Table 3-4)。

3.2.6. 収益

本モデルにおけるシステムの収益 [円/年] は、売電収益と売熱収益であり、以下で算出した。

$$P_i = \sum_i Q'_i \cdot p_i \quad (3-9)$$

ここで、 P_i はエネルギー種 i の販売収益 [円/年]、 Q'_i は売却したエネルギー量 [kWh または MJ]、 p_i はエネルギー i の単価 [円/kWh または円/MJ] である。本研究で用いた各単価を Table 3-5 に示す。なお、熱の単価 [円/MJ] は灯油の LHV あたり価格相当とし、灯油単価は 2018 年 4 月～2019 年 3 月の北海道内給油所店頭小売平均価格 94 円/L (石油情報センター 2019)、灯油の LHV は 36.7GJ/L (資源エネルギー庁 2007) とした。また、電力の売電単価は 2019 年 5 月現在の FIT 買取価格のうち、「間伐材等由来の木質バイオマス」区分における買取価格 (資源エネルギー

庁 2019) を参照した。

3.2.7. CO₂排出量・排出削減量

CO₂ の排出削減量 R [Mg/年] は、以下の式を用いて算出した。

$$R = \frac{Q'_{heat} \times \epsilon_{kerosene} + Q'_{el} \times \epsilon_{el} - \left(\sum_j \frac{F_j}{p_j} \times \epsilon_j + Q'_{pump} \times \epsilon_{el} \right)}{1000} \quad (3-10)$$

ここで、 Q'_{heat} は売熱量 [GJ/年]、 $\epsilon_{kerosene}$ は熱量あたりの灯油の排出係数 [kg-CO₂/GJ]、 Q'_{el} は売電量 [kWh/年]、 ϵ_{el} は電力量あたりの排出係数 [kg-CO₂/kWh]、 F_j は工程 j における燃料費 [円/年]、 p_j および ϵ_j はそれぞれ工程 j における燃料の単価 [円/L] および排出係数 [kg-CO₂/GJ] である。工程 j としては、資源生産の各工程すなわち、伐倒、集材、造材、運材、残材搬送、破砕およびチップ搬送を考慮する。 Q'_{pump} は熱供給時のポンプ電力消費量 [kWh/年] である。本研究で用いたエネルギー毎の単価（石油情報センター 2019, 北海道電力株式会社 2019）、LHV（資源エネルギー庁 2007）、排出係数（国立環境研究所 2014, 環境省 2018）を Table 3-6 に示す。

3.2.8. 計算処理に用いるソフトウェア、ライブラリおよびデータ

本研究で構築した処理モデルには、オープンソースのソフトウェアおよびライブラリ群を使用した。ラスタプロセスおよびベクタプロセスには GRASS GIS 7.6、データベース処理およびベクタプロセスには軽量データベースエンジンである SQLite の空間拡張である SpatiaLite 5.0、処理の統合および配列計算には Python 2.7、およびその科学技術計算モジュールである NumPy 1.16、Pandas 0.20、道路データなどのネットワークグラフ演算には SpatiaLite および NetworkX 2.0 を利用した。なお、これらのソフトウェアはいずれも無料で利用することが可能であり、またオープンソースであることから移植性に優れる。

木質バイオマス資源量の推定には国有林、道有林、民有林における森林 GIS データ（林野庁 北海道森林管理局 2009, 北海道水産林務部森林計画課 2016, 北海道水産林務部道有林課

2016) および 100 m メッシュ土地利用データ (国土交通省 2014) を、生産コスト推定のための標高データは 10 m Digital Elevation Model (DEM) (国土地理院) を、資源搬送コストおよび熱供給配管コスト推定のための道路データとしてデジタル道路地図データベース (日本デジタル道路地図協会 2015) をそれぞれ用いた。熱需要の推定には住宅構造別延べ床面積あたり熱需要データ (北海道消費者協会 2008)、北海道内の住宅構造別人員あたり延べ床面積データ (総務省統計局 2015) および 1 km レベルの人口・世帯数データ (総務省統計局 2010) を用いた。また市町村境界データは国土交通省 (2016) を使用した。

3.2.9. 解析対象地の設定

本研究では、ケーススタディとして北海道旭川市 (Fig. 3-6) を対象とした分析を行った。旭川市は、日本の最北地域である北海道の中北部に位置する内陸の中核都市である。評価対象とする中心地区の人口は 157,638、評価地域全体の人口密度は 662 人/km² であり、2 章でケーススタディを行った富良野市に比較して、市街地の面積、人口および人口密度はいずれも大きい。旭川市における 30 年間の年平均気温は 6.9℃、最も寒い時期の月平均最低気温は -12.7℃ で、年積雪日数は 142.2 日の積雪寒冷地域である。積雪寒冷地であることから厳寒期の暖房需要は大きく、また人口密度から熱需要密度も高いと想定されるため、比較的地域熱供給の導入に適した都市環境であると考えられるが、現状では既存の大規模地域熱供給は行われていない。また、付近には資源利用における競合の要因となり得る大規模な木質バイオマス発電施設は建設されていない。さらに、内陸の都市であることから、都市周辺の全方位に森林が分布しており、森林由来の木質バイオマス資源の利用には適した条件であると考えられる。こうした条件を踏まえ、本研究では本地域をケーススタディエリアとして選定した。なお、ケーススタディにおける評価期間は、プラントのライフタイム 15 年間を仮定した。

中規模分散型エネルギー利用モデルの評価において熱供給を行う単位区画は、基準地域メッシュで定められた範囲 (緯度差 30'', 経度差 45'') とした。第 2 章で述べたとおり、このメッシュは約 1 km 辺長からなる矩形区画である。一定の熱需要がなければ熱供給を実施するメリットが得られないことに加え、熱供給網の構築プロセスが適用できないことから、この区画内

に需要地点が3点以上ある場合に熱供給を行うこととし、熱供給網を作成した。ケーススタディ対象エリアは、 16×16 の256区画を含み、このうち条件を満たす区画数は181であった。作成した熱供給網とボイラー位置を Fig. 3-7 に示す。

このモデルでは、供給熱量あたりのエネルギー原価、および CO_2 排出の収支を評価した。評価エリアの熱需要に対して全熱需要の20%~100%の範囲で熱供給を行い、各条件につき最大資源搬送距離を50 km~200 kmまで変化させた場合の供給熱の原価構成の変化を見積もった。熱供給区画を限定する際には、各区画における熱導管延長あたり熱需要、すなわち導管熱密度[GJ/m]の高い区画ほど事業性が高いとみなし、導管熱密度が高い区画から優先して熱供給を行うこととした。

大規模集中型エネルギー利用モデルの評価では、売電した電力量あたりの原価構成、および CO_2 排出の収支を評価した。設置する発電プラントの規模として国内の既設プラント事例を念頭に1 MW、2 MW、5 MW、10 MW、20 MW、50 MWを仮定した。余熱供給範囲は、Fig. 3-8 に示すようにプラント規模に応じた供給可能な熱量を元に設定した。

中規模分散型エネルギー利用モデルにおける破碎施設、および大規模集中型エネルギー利用モデルにおけるバイオマス発電プラントはいずれも評価エリア内に設置するものとし、それらの候補地を Fig. 3-9 に示した。候補地は、エリア内に空間的に均等に作成した点を至近道路上に移動することにより作成した。

3.3. 結果

3.3.1. 資源利用シナリオ別の資源供給ポテンシャルとエネルギー供給における充当可能性

Fig. 3-10 に、最大搬送距離と利用可能な資源量との関係性を評価した結果を示す。ここでは、伐採木をすべてエネルギー利用する（資源量最大の）シナリオと、未利用材である土場残材のみをエネルギー利用する（資源量最小の）シナリオを評価する。集約地点は既述の通り Fig. 3-9 に示した候補地点としたが、集約地点の違いによる利用可能量の変化は小さかったため、Fig. 3-10 に示されている資源量の幅は主に年変動によるものである。また、最大搬送距離と利用可

能な資源量との関係性においては、ケーススタディエリアでは 100 km から 150 km までの区域における資源増加率が大きい結果となった。

中規模分散型エネルギー利用モデルでは、評価エリアの 20%に対して熱供給を行う最も抑制的なエネルギー供給シナリオの場合でも、未利用の土場残材を利用する場合には搬送距離 100 km 以下の条件では全ての年で資源が不足し、最大搬送距離 200 km とした場合も多く、多くの年で資源量が不足するため外部材の購入が必要となる。全木をエネルギー利用する場合には、いずれの年も 100 km 未満、多くの年では 50 km 未満の搬送距離でエネルギー需要に対する充当が可能となる。

一方、全域に対して熱供給を行う最も積極的なエネルギーシナリオの場合には、全木をエネルギー利用する場合でも、少なくとも 100 km 超の範囲からの集荷が必要である。最大搬送距離を 200 km まで拡大することにより、ほぼ地域資源による充当が可能となる。

大規模集中型エネルギー利用モデルでは、全木をエネルギー利用する場合には想定した最大規模のプラント（50 MW）の場合であっても、いずれの年も 150 km 未満の搬送距離で所要資源量を調達可能であった。また、5 MW 以下の規模のプラントの場合は、いずれの年も 50 km 圏内の資源搬送で所要資源量を充足可能である。土場残材のみを利用するシナリオでは、2 MW 以下の規模ではいずれの年も 150 km 圏内での資源搬送で所要資源量を充足可能である。また、最大 200 km 圏まで搬送距離を拡大すれば、多くの年で 10 MW 規模までは充足可能である。

3.3.2. 各エネルギー利用モデルにおける事業性と CO₂ 排出削減効果の評価

3.3.2.1 中規模分散型エネルギー利用モデル

全木利用、土場残材利用における供給熱量あたりのコスト構成の推計結果を Fig. 3-11 に示す。Fig. 3-11 は評価期間の平均結果であり、年によるコスト変動幅はエラーバーで示している。いずれも、破碎施設の立地点の選択によるコストへの影響は供給熱 1 MJ あたり 1 円以下と小さく、全体の傾向も変化しない結果であったため、一例として立地候補点 8 の結果を示している。

全木をエネルギー利用するシナリオ (Fig. 3-11(a)) の場合、前述のとおり、最も供給先を限定した条件 (熱供給先 20%) では多くの場合搬送距離 50 km 圏内からの資源利用で需要に対し充当可能である。このため、搬送可能距離を拡大しても熱供給原価はほとんど変化しない。熱供給先をさらに拡大した条件では、資源搬送距離の拡大によって輸送コストが増大する一方、外部材の調達量は抑えられる。熱供給先を全域 (100%) まで拡大した場合も、搬送距離を 200 km まで拡大することで外部材の調達量を最小限に抑えることができるが、輸送コストやプラント固定費、熱供給に要するコストなどが増大し、熱供給のコストは供給先を 20% とした場合に比較して供給熱 1 MJ あたり 2 円以上増加する。全木をエネルギー利用する場合、用材を生産するコスト (伐倒、集材、造材、運材) も全てエネルギー資源コストに含まれ、搬送距離 50 km 圏内の場合でも外部材より資源コストは高上がりとなっている。このため、外部材をより多く購入することになる熱供給範囲を拡大した条件 (Fig. 3-11(a) 熱供給範囲= 40%, 60% および 80% の 50 km 搬送条件) では、搬送距離 50 km、熱供給範囲を 20% とした場合よりもエネルギーコストは安価となっている。なお、熱供給範囲を全域に拡大した場合には、熱供給先に熱効率の低い区画が含まれるためプラントおよび熱導管コストが上昇する。

一方、土場残材のみを利用する場合 (Fig. 3-11(b)) には用材を生産するコスト (伐倒、集材、造材、運材) は資源コストとして考慮しない。このため、比較的近距离に限って資源を利用する場合には資源コストが比較的安価となる場合もあるが、いずれの条件でも 200 km まで搬送距離を延長しても資源量は不足し、全ての条件において外部材の調達が必要となる。熱供給先を拡大するほど外部材の調達量が増加するため、相対的に地域材の調達コストの占める割合が低下し、搬送距離を拡大した際のコスト増加が緩やかになっている。

Fig. 3-11 には、灯油の熱量 (LHV) 相当あたり単価と同じ水準で熱を販売した場合の収益を青線で示している。このモデルでは、本研究で想定したいずれの条件 (利用資源、搬送距離、熱供給範囲) においても、熱供給コストは売熱価格を 3 倍～4 倍程度上回っており、事業成立可能性は見出せない。

CO₂ 排出量および削減効果の収支の推計結果を Fig. 3-12 に示す。この結果でも、破碎施設の立地点による変化は小さかったため、一例として候補地点 8 の結果を示している。全木利用の

場合 (Fig. 3-12(a))、熱供給によって既存の熱需要で消費される化石燃料 (灯油) 相当の排出が削減され、収支では熱需要 GJ あたり 19 kg~32 kg の削減効果 (赤点) が見込まれる。一方、エネルギー供給までのプロセス全体を通じた排出量では、熱媒の搬送に係るポンプ動力由来の排出量が全体の 84~96% と大半を占めている。土場残材を利用する場合 (Fig. 3-12(b)) についても、全体収支で熱需要 GJ あたり 24 kg~35 kg の削減効果と評価され、全木利用の場合の結果と同様、ポンプ動力由来の排出量が大半を占めており、全体の傾向に大きな違いはみられなかった。なお、土場残材利用では前述の通り、全ての条件で地域材の資源量が不足し外部材の調達が必要になるが、そのプロセス排出量は評価外であるため結果の不確実性が増大している。

3.3.2.2 大規模集中型エネルギー利用モデル

このモデルで見積もった売電電力の原価構成を Fig. 3-13 に示す。原価構成に関しては、最も事業性の高いケース (候補地 13) の結果 (Fig. 3-13 (a)および(b)) と、最も事業性の低いケース (候補地 19) の結果 (Fig. 3-13 (c)および(d)) は大きく異なっている。すなわち、このモデルではプラントの立地点によって事業性が大きく変化する。

前述の通り、全木利用の場合は 5 MW 規模のプラントの場合では 50 km 圏内の集荷で所要資源量を充足可能である。このため、これらの条件では搬送距離を拡大してもコストの変化は見られない (Fig. 3-13(a)および(c))。なお、50 MW の場合は資源搬送距離 100 km までは年によって外部材の調達が必要となるため距離に応じてエネルギー原価が増加しているが、これによるエネルギー供給コストに対する影響はプラントサイズによる影響に比べて小さい。

土場残材を利用する場合には、用材生産のためのコストがエネルギーコストとして考慮されないため、エネルギー供給のコスト (Fig. 3-13(b)および(d))における積み上げ棒の総計) は総じて全木利用の結果 (Fig. 3-13(a)および(c)) に比べて小さい。また、20 MW 以上の規模ではいずれの条件でも外部材の調達が必要となる。

Fig. 3-13 にはそれぞれ、電力の売電単価 (青線) ならびに、電力の売電単価に熱の販売単価を加算した価格 (茶線) を示した。この事業モデルは発電が主たる目的であるため、資源コス

ト（伐倒、集材、造材、運材、残材搬送、破碎、外部材の購入）およびプラントコストは発電のための原価であると考えることができる。全木を利用する場合には、10 MW 以上の規模では売電収益（青線）が発電単価を上回り、事業性が期待される（Fig. 3-13(a)および(c)）。また、土場残材を利用するシナリオではいずれの条件においても（平均発電単価では）収益性が期待される（Fig. 3-13(b)および(d)）。また、スケールメリットによってプラントコストが下がるため、プラント規模のスケールアップによって収益性は向上する。

これに対して、熱の販売を含めた全体収支（茶線）では、土場残材を利用するシナリオにおいて立地条件が恵まれていれば収益がコストを上回り事業成立可能性が見込まれる場合がある（Fig. 3-13(b)）ものの、その他の条件やシナリオでは多くの場合事業性は期待できない。特に、先に述べたようにプラントの立地によっては熱供給コスト（熱導管コスト、ポンプ設備費、ポンプ動力）のうち熱導管コストとポンプ動力が増大し、全体の収支ではコストが収益の 2.5 倍を上回る場合（Fig. 3-13(c) 1 MW）も想定された。

CO₂ 排出量および削減効果の収支の推計結果を Fig. 3-14 に示す。全木利用の場合の CO₂ 排出削減効果では、熱供給条件のよい立地条件では売電電力 1 kWh あたり 0.43～0.80 kg の実質削減ポテンシャルが期待された（Fig. 3-14(a)）。ただし、プラント規模が拡大した場合、熱供給範囲の拡大に伴ってポンプ由来の排出量が増加し、全体の削減効果が低下する傾向が見られた。特にプラントサイズが 10 MW を超えると、内訳では熱による排出削減量（黄緑）をポンプ由来の排出量（薄茶）が上回っている。一方、立地条件の悪い候補地では、プラント規模が最大の場合には 1 kWh あたり 0.37 kg の実質削減ポテンシャルが期待されるものの、プラント規模が 1 MW の場合にはポンプ動力由来の排出量が大きくなり、実質削減効果が得られない可能性も示された（Fig. 3-14(c)）。

なお、土場残材を利用する場合も、熱供給条件のよい立地条件では売電電力 1 kWh あたり 0.44～0.80 kg、熱供給条件の悪い立地条件では同-0.26～0.38kg の実質削減ポテンシャルが見込まれたが、ポンプ動力由来の排出量が支配的であり、全木利用の条件に対して全体の排出傾向に大きな違いはみられなかった。また、中規模分散型エネルギー利用モデル（3.3.2.1）の結果と同様、土場残材を利用する場合は外部材の調達量が増加するが、そのプロセス排出量は評価

外であるため結果の不確実性が増大する。

3.4. 考察

最大搬送距離に対する資源供給ポテンシャルは、100 km～150 km 圏内での増加率が大い結果が得られた。もし、資源が空間的に均質に分布し、かつ道路密度も均質であるならば、利用可能な資源量は搬送距離に対して二次相関で増大することが期待される。この結果は、道路網の配置や森林分布の不均質さに加え、海などの到達不可能なエリアが含まれることによるものと考えられる。なお、本研究において用いた道路のデータは実際の道路網に基づくデータであるが、未舗装林道の多くは考慮していない。このため、収集可能な資源量が過小評価となっていると同時に、集材コストが過大評価となっている可能性がある。

木質バイオマスを利用した熱供給システムでは、発電を行わず熱供給のみを行う場合の事業性に困難がある結果となった。これは、特に配管およびポンプ動力のコストへの寄与が大いことによる。一方、発電を実施する場合には、土場残材のみを利用する場合や、プラント規模10 MW 以上の場合など条件によっては事業性があるものと認められた。これは、売電による収益が大きく熱供給のコストを吸収できるためであり、余熱の熱供給によって事業全体の収益性を向上させるという結果ではない。既述の通り、日本ではFIT 制度によって木質バイオマス発電の売電価格が設定されており、市場価格の1.7～2.2 倍の価格で下支えされている（Table 3-5）。現在、小規模（2 MW 未満）の発電設備に対して高い買取価格が設定されているものの、本研究の結果からは、事業性は大規模プラントの方が優れることが示唆されており、資源調達が可能であれば大規模プラントの設置に対して比較的強い経済的動機が働くと考えられる。

CO₂ 排出削減効果の点では、熱供給のみを実施する場合はいずれの条件においても一定の排出削減効果が期待された。また発電事業においても、余熱を熱供給することによるCO₂ 排出削減効果は売電単独の場合よりも向上する場合があるため、この点において余熱を利用するメリットは認められる。ただし、近接する熱需要までの距離が大きい場合やプラント規模が大きく熱供給可能な範囲が拡大した場合には、ポンプ動力に伴う排出量が大きくなり、そのメリットが失われる条件もあるため、熱供給の効果を得るには適切な施設立地の選定と熱供給範囲の

設定が重要となる。

本研究の結果から、木質バイオマスによる地域熱供給プロセスにおける CO₂ 排出量削減は、燃料生産プロセスの低炭素化よりも、多くのエネルギーを要する熱媒搬送動力に係る電力消費量の低減や、動力に用いる電力の低炭素化が重要である点が示唆された。例えば、Sheng and Duanmu (2016) で提案されているようなポンプの分散配置によってポンプ動力を低減するなどの方策により、事業性とともな CO₂ 排出削減効果の改善が期待できる。なお、本研究では外部材の調達プロセスに係る CO₂ 排出量は評価されていないため、この調達先によってはサプライチェーン排出量が大幅に増加する可能性がある。

木質バイオマスの地域熱供給による熱利用は国内にはほとんど例がない一方、先行する欧州では盛んに導入されている。Werner (2016) によれば、2013 年現在、欧州各国における熱供給価格は様々な熱源を含んだ数値ではあるが 4.4~28.9 ユーロ/GJ (1 ユーロ 125 円換算で 0.55~3.6 円/MJ 相当) と報告されており、本研究で試算された熱施設からの熱の供給コスト (7 円/MJ 以上 (Fig.3-11 参照)) よりもかなり低い。これは、本研究で設定したエネルギー供給までのサプライチェーンにおける各要素コスト (資源生産、設備費やプラントコストなど) や運用条件のいずれかが過大であることに起因する可能性も考えられる。この点については実際のエネルギー利用事例に基づく試算結果の検証が必要であり、今後の課題である。しかし同時に、現在日本国内において、木質バイオマスによる地域熱供給がほとんど事業化されていないという事実は、この熱利用システムが現在の国内市場では競争力を持たないことを示しているとも言えるだろう。他方、既述のとおり木質バイオマスによる熱供給は一定の CO₂ 排出削減効果が期待され、日本国内で進んでいない熱部門の低炭素化の有効なオプションとなり得ることから、その導入促進に向け、国内市場の成長を下支えするための何らかの政策誘導が必要であると考えられる。

本研究で構築したモデルでは、森林管理コスト、すなわち造林に要するコストや保育に要するコストは資源調達コストに含まれていない。したがって、これらのコストを含めた場合には地域の木質バイオマス資源の調達コストは上昇し、結果として地域材の価格競争力は外部材に対してさらに低下すると考えられる。現在日本では、戦後再造林や拡大造林によって植栽され

た造林地の多くが収穫期を迎えている。しかし、国産材市場は長きにわたって低迷し、材価も頭打ちの状況が続いてきたことから、森林管理コストを含めた収穫までのコストを素材販売によって回収できない状況が続いている。最新の森林・林業白書（林野庁 2019）では、一例としてスギ造林地の事例が以下のように述べられている。「50 年生のスギ人工林の主伐を行った場合の木材収入は、平成 30（2018）年の山元立木価格に基づく試算では 94 万円/ha となるが、これに対して、「平成 25 年度林業経営統計調査報告」によるスギ人工林 50 年生（10 齢級）までの造林及び保育にかかる経費は、全国平均で 121 万円/ha（地域によって 114 万円/ha から 245 万円/ha まで）となっている。」この例ではスギ人工林を挙げているが、原典である平成 25 年度林業経営統計調査報告（農林水産省 2015）では北海道における集計も行われており、カラマツ林の育林に要する経費で 96 万円/ha、エゾマツ・トドマツでは 200 万円/ha（いずれも 50 年生までの造林及び保育経費）となっている。これらの経費には伐採や搬送に要する経費は含まれていないため、いずれも本研究では考慮されていない。主伐段階におけるカラマツとトドマツ林分の立木幹材積をそれぞれ 312 m³/ha、338 m³/ha（Table 3-2）、燃焼時含水率を 35%とした場合の素材の実密度をそれぞれ 0.62 Mg/m³、0.56 Mg/m³（熊崎・沢辺 2013）、同含水率における定位発熱量を 10.8 MJ/kg（Table 3-1）と仮定した場合の木質バイオマスの熱量あたり森林管理経費は 0.46 円/MJ、0.98 円/MJ となる。間伐の条件下での検討やエネルギー変換効率などを考慮していないためそのまま合算することはできないが、本研究における熱利用モデル（中規模分散型エネルギー利用モデル）において全木材を利用した場合のエネルギー供給コストが 8～11 円/MJ であったことから、仮に森林管理の経費をエネルギー供給コストに加えた場合、数%～十数%のオーダーで供給コストを高める方向に影響する可能性が類推される。

他方で、日本では多くの場合、森林管理に要するコストは公的な助成金などによって下支えされており、森林管理コストをエネルギー供給コストへ上積みすることについては、資源利用の対象となる森林の森林経営の実態を踏まえて検討することが实际的である。特に、持続可能な森林経営は立木や素材などの木材生産とその販売に伴う経済活動であるだけでなく、森林の水土保全機能や生態的機能の保全、森林・林産業に伴う地域の雇用創出といった社会的な価値も有する営みであることも重要な側面である。こうした観点から、今後の森林資源のエネルギー

一利用については、森林管理も含めたライフサイクル全体にわたる一側面として、その意義を位置づけていくことも重要である。

本研究では、既存の木質バイオマスエネルギー利用状況は反映されていない。本研究におけるケーススタディ対象地である旭川市の近郊には大規模な木質バイオマス発電所は稼働していないが、北海道内には既に複数のバイオマス発電施設が稼働しており、施設立地と搬送距離によっては資源競合の可能性があるため、利用できる資源に限られる可能性がある。旭川は前述の通り内陸の都市であり、市域の全方位から資源を収集、運搬することができるという点で、地域資源の調達という点では合理性があると考えられる一方、現在日本国内で設置されているバイオマス発電所の多くは沿岸部に立地している（日本木質バイオマスエネルギー協会 2019b）。これは、タービンによる発電時に多量の冷却水を容易に調達できることが理由の一つであると考えられるが、同時に船舶による大量の燃料材を外部から調達する上でも合理性があると考えられる。これらの発電施設には石炭やパームヤシ殻（PKS）との混焼施設も含まれており、木質バイオマス専焼施設だけではないことに留意が必要であるが、資源調達の観点から施設立地点について今後さらに検討することが必要と考えられる。また、沿岸部は都市近郊や工場が多く立地する地域である場合が多く、現状ではほとんど利用されていない発電時の余剰熱の受け皿となる熱需要が大きい地域でもあると考えられる。こうした観点から、本研究で構築したモデルによる余剰熱の利用可能性の評価が期待される。

本研究で構築したモデルは、寒冷地において特に熱需要密度の高い都市地域における比較的広域への熱供給を念頭にしたエネルギー利用モデルである。一方で、これ以外の地域においてもバイオマス資源を対象として輸送コストを抑えながら効率よくエネルギー利用するシナリオの検討も、地域におけるエネルギー利用の観点からは重要である。例えば、小規模なボイラーやストーブなどの個別分散型熱源によるエネルギー利用や、1000 kW 以下の小型発電による CHP を想定したシナリオなどが考えられ、今後の重要な取り組みとして期待される。また、地域熱供給では、木質バイオマス以外にも、地域の工場排熱や廃棄物処理施設における焼却余熱、太陽熱、地熱・温泉熱、地中熱やその他の熱源を複合的に利用できる点も重要な利点となる。特に変動性熱源が存在する場合は、負荷変動を平準化するために木質バイオマスボイラーを利

用して熱の供給安定性を高める方策も考えられる。

3.5. 結論

本研究では、木質バイオマスエネルギー由来の熱を地域熱供給で利用するシナリオについて、熱供給のコスト構造や低炭素化の効果を空間モデルによって評価した。資源として伐採可能なカラマツ、トドマツ、アカエゾマツ、およびエゾマツを全木材利用、土場残材利用した場合の供給可能量を試算し、エネルギー利用の規模に対する地域材の供給可能性を把握した。

供給ポテンシャルに基づく熱利用シナリオを評価した結果、熱供給のみを行う場合はいずれのシナリオにおいても事業性が低い結果となった。一方、発電余熱を利用するシナリオでは売電収益によって事業性が担保されるため、条件によっては熱供給事業による余熱利用が見込める結果が得られた。各シナリオの CO₂ 排出削減効果については、熱供給のみを実施する場合はいずれも効果を上げるが、発電余熱を利用する場合には、熱供給条件によっては効果が失われる可能性が示唆された。余熱利用を行う場合には、適切な立地選定と熱供給範囲の設定が重要となる。また発電事業では、季節間蓄熱を行わない限り発生した熱の半量程度は棄てられるため、効率的な熱利用を実現するためには、単独熱供給事業の事業性改善が必要である。このためには、運用段階を含む政策的な下支えが必要であると考えられる。

Table 3-1. 本研究で用いた木材および熱媒（水）の物性値

木材の物性値	含水率		35 %
	嵩密度	(丸太*)	0.59 Mg/m ³
		(チップ)	0.26 Mg/m ³
	低位発熱量(LHV)		10.8 MJ/kg
水の物性値	密度	ρ	980 kg/m ³
	定圧比熱	C_p	4.19 kJ/kg/K
	粘度	μ	0.43 mPa・s

* 層積(積み重ねた状態)での値

Table 3-2. 本研究で仮定した施業体系

樹種	単位	カラマツ		トドマツ		アカエゾマツ／エゾマツ	
植栽本数	/ha	1500		2000		2500	
間伐／主伐時条件 (搬出を伴う伐採のみ)							
林齢	年	35	60	40	60	30	60
立木本数	/ha	900	600	953	667	1610	1079
幹材積	m ³ /ha	234	312	275	338	149	470
伐採率	無次元	0.33	1	0.3	1	0.33	1

植栽本数は北海道において平均的と考えられる条件を考慮し、[25]、[26] および [27] を参照して設定した。本研究では伐倒後に搬出を伴う施業においてのみ資源回収可能であるとし、伐採時の施業条件はこうした施業実施時の値のみを示した。

Table 3-3. コストに関するパラメータ

コストまたはパラメータ	バイオマス熱施設		バイオマス発電施設		ポンプ		熱導管		単位
	値	引用	値	引用	値	引用	値	引用	
建設費	$1.0876 \times PS^{0.6955}$	-	$4.4525 \times PS^{0.7217}$	-	$0.0598W'$	[7]	$(213D+32) \times L$	[111]	10^6 円
年利率	3%	[120]	3%	[120]	1.15%	[7]	1.15%	[7]	%
従業員数	2	-		[120]					人
年間人件費	5,000,000	[120]	5,000,000	[120]					円/人
メンテナンスコスト率	3%	[120]	3%	[120]	2%	[110]	2%	[110]	%
保険料率	0.4%	[120]	0.4%	[120]					%
管理費率	25%	[120]	25%	[120]					%
ユーティリティコスト			$3,823 \times PS + 10,281,107$	[120]					円
供用年数	15	[120]	15	[120]	15	[110]	30	[110]	年

PS, W', D および L はそれぞれプラントの設備容量 [kW]、ポンプ容量 [kW]、熱導管内径 [m] および熱導管延長 [km] を表す。熱施設および発電施設のプラント建設費は(3-6)式に対応する。熱施設における従業員数については国内における参考事例に乏しいため、本研究では燃料の受け入れ、ボイラーならびに熱供給管理および緊急時対応を想定して独自に設定した。

Table 3-4. 本研究で仮定したエネルギープラントの効率

	値	単位	引用
バイオマス熱施設			
熱利用効率	70	%	[10]
バイオマス発電施設			
発電効率	$5.762 \times \ln(PS) - 26.65$	%	[120]
所内率	$0.1505 \times \exp(-1.841 \times 10^{-5} \times PS)$	%	[120]
熱回収効率	50	%	[85]

PS はプラントの設備容量 [kW] を表す。

Table 3-5. 本研究で仮定したエネルギー販売単価

エネルギー種		販売価格	引用
熱		2.56 [円/MJ]	[93]
電力	(プラント規模)		
	< 2 MW	40 [円/kWh]	[98]
	2 MW ≤	32 [円/kWh]	[98]

Table 3-6. 調達するエネルギーの単価、低位発熱量および排出係数

エネルギー種	単価	低位発熱量	排出係数	引用
灯油	94 [円/L]	36.7 [GJ/L]	67.8 [kg-CO ₂ /GJ]	[58],[93],[96]
軽油	133 [円/L]	37.7 [GJ/L]	68.6 [kg-CO ₂ /GJ]	[58],[93],[96]
電力	18.12 [円/kWh]		0.666 [kg-CO ₂ /kWh]	[22],[41]

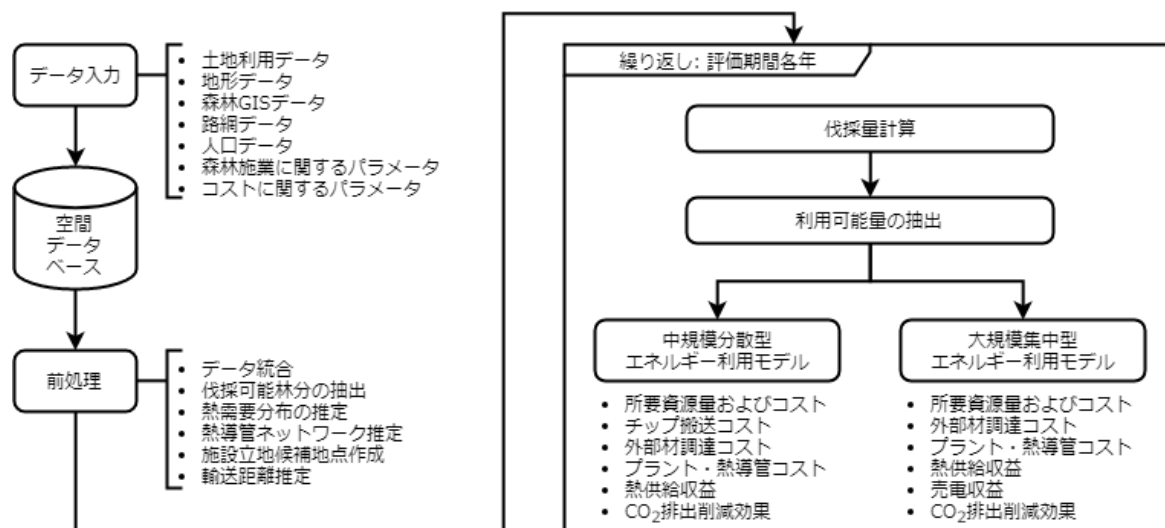


Fig. 3-1. 本研究で構築したモデルの処理プロセス

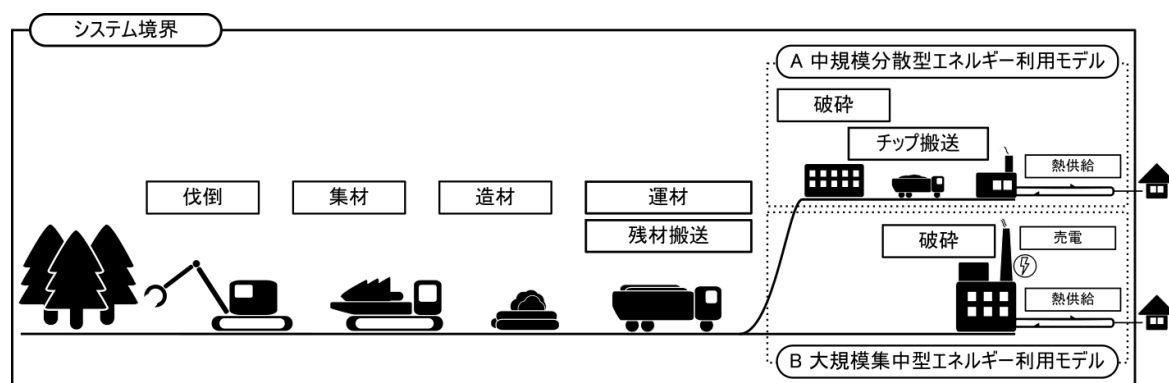
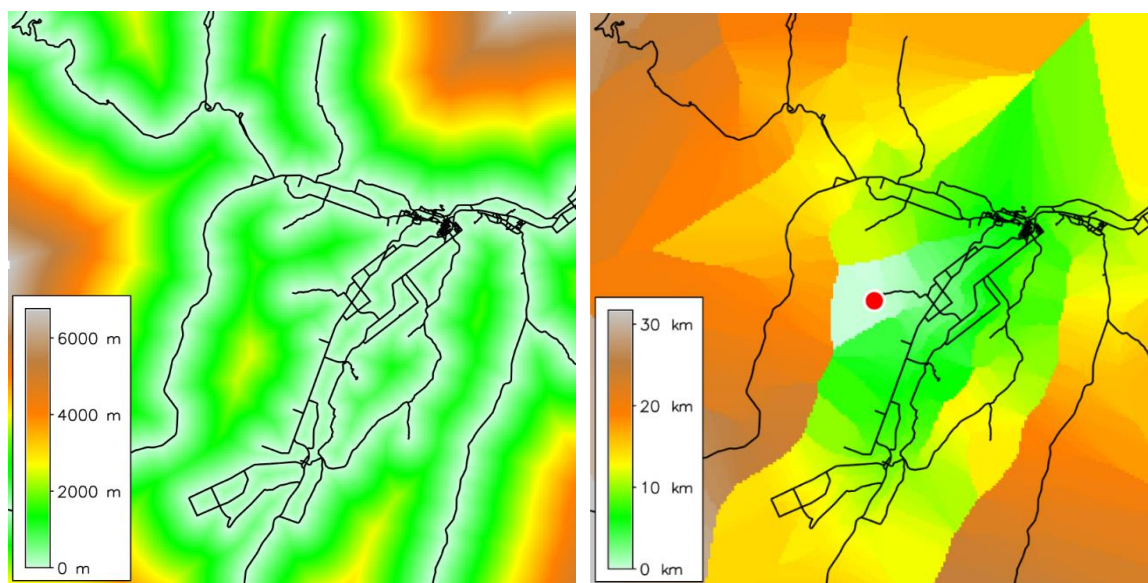


Fig. 3-2. 本研究におけるシステム境界

実線矩形で示された工程は本研究において考慮した資源調達からエネルギー供給までの各工程を表す。点線矩形で示した領域はエネルギー利用モデルを表す。



(a) 集材距離[m]

(b) 運材・残材搬送距離[km]

Fig. 3-3. (a)至近道路までの集材距離および(b)集材後の集約地点（赤点）への運材・残材搬送距離の空間的な推定例

細い黒線は道路を表す。

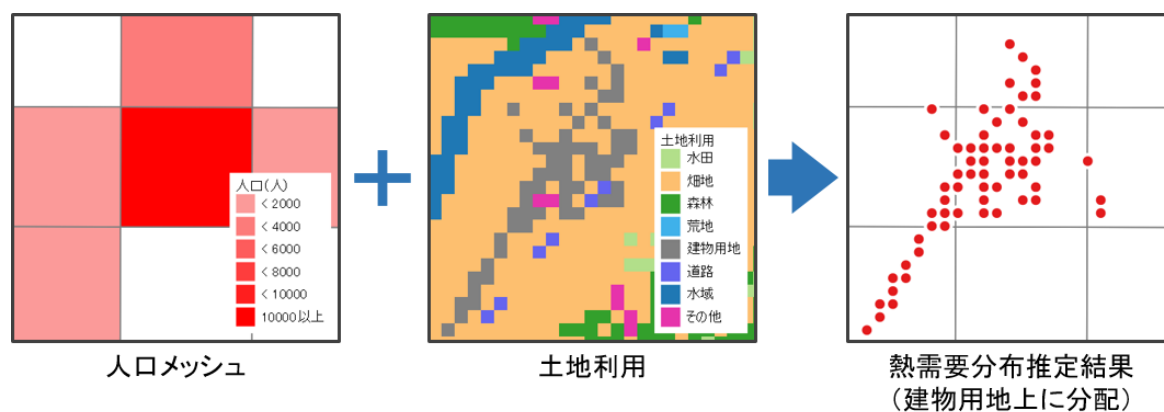


Fig. 3-4. 熱需要分布の推定

熱需要の空間分布は、1 km メッシュサイズの人口データに基づき、人口あたりの年間熱需要を乗ずることによって推定し、さらに 100 m メッシュサイズの土地利用図を用いて建物用地に分類されたメッシュへ均等に配分した。配分後の熱需要（赤点）は、それぞれのメッシュ中心座標を代表点として扱った。

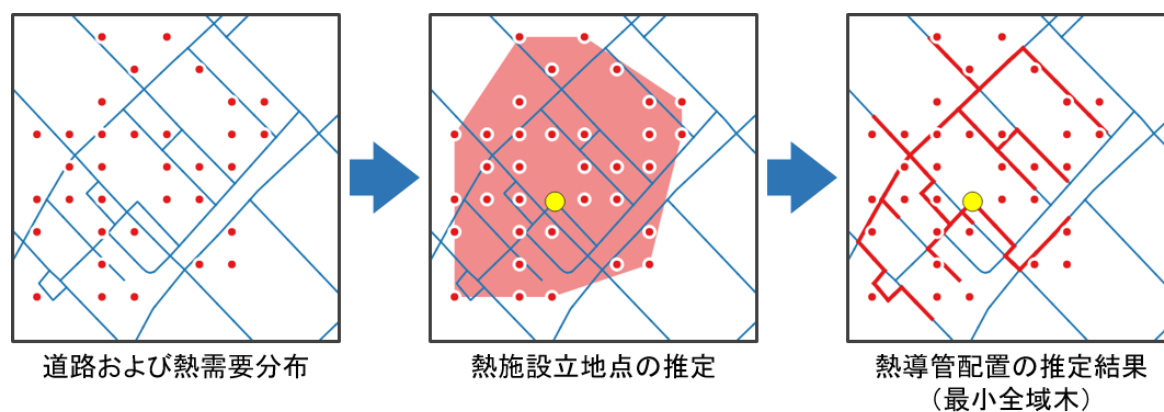


Fig. 3-5. 熱施設の立地選定および熱導管配置の推定

熱施設（黄点）の立地は区域内の需要点（赤点）を包含する凸包図の重心からの最近接道路位置とした。熱導管配置（赤線）は Unternährer et al. (2017) の手法に基づき、隣接する需要点間を結ぶ最短経路集合における最小全域木推定によって推定した。

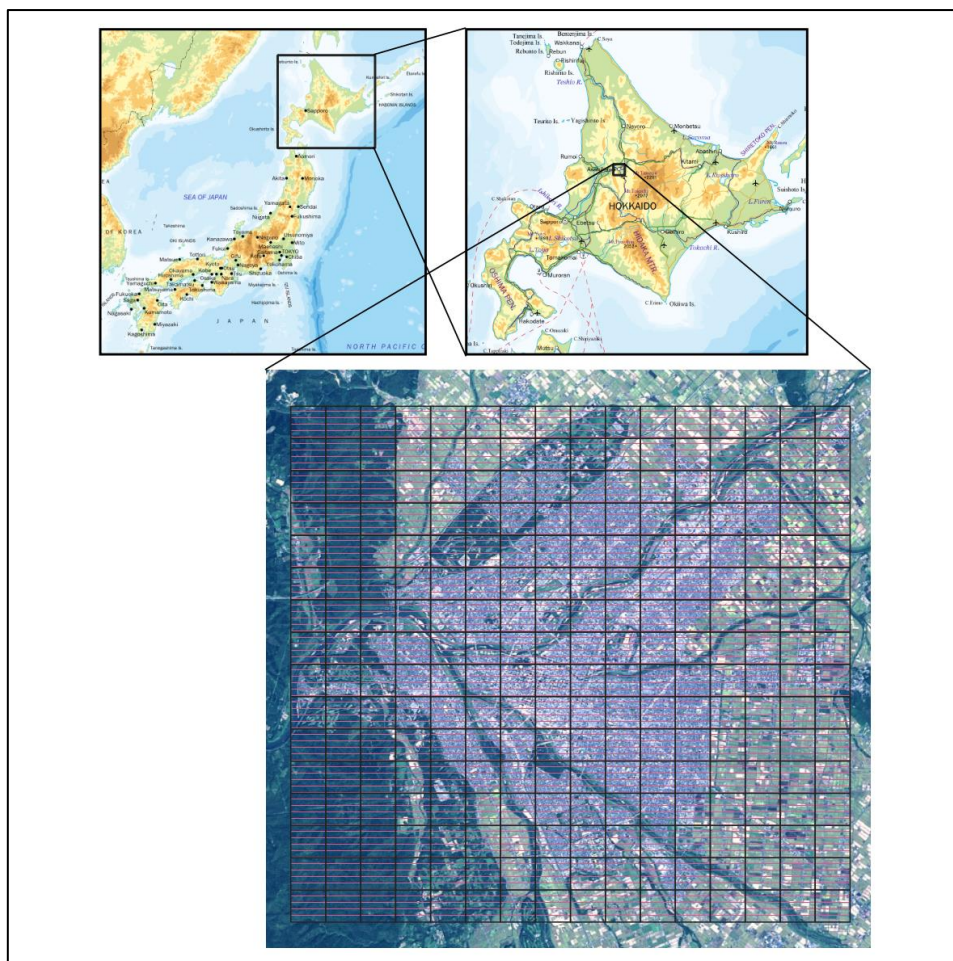


Fig. 3-6. ケーススタディ対象地（旭川市）（地理院タイル（標準地図および航空写真）を加工して作成）

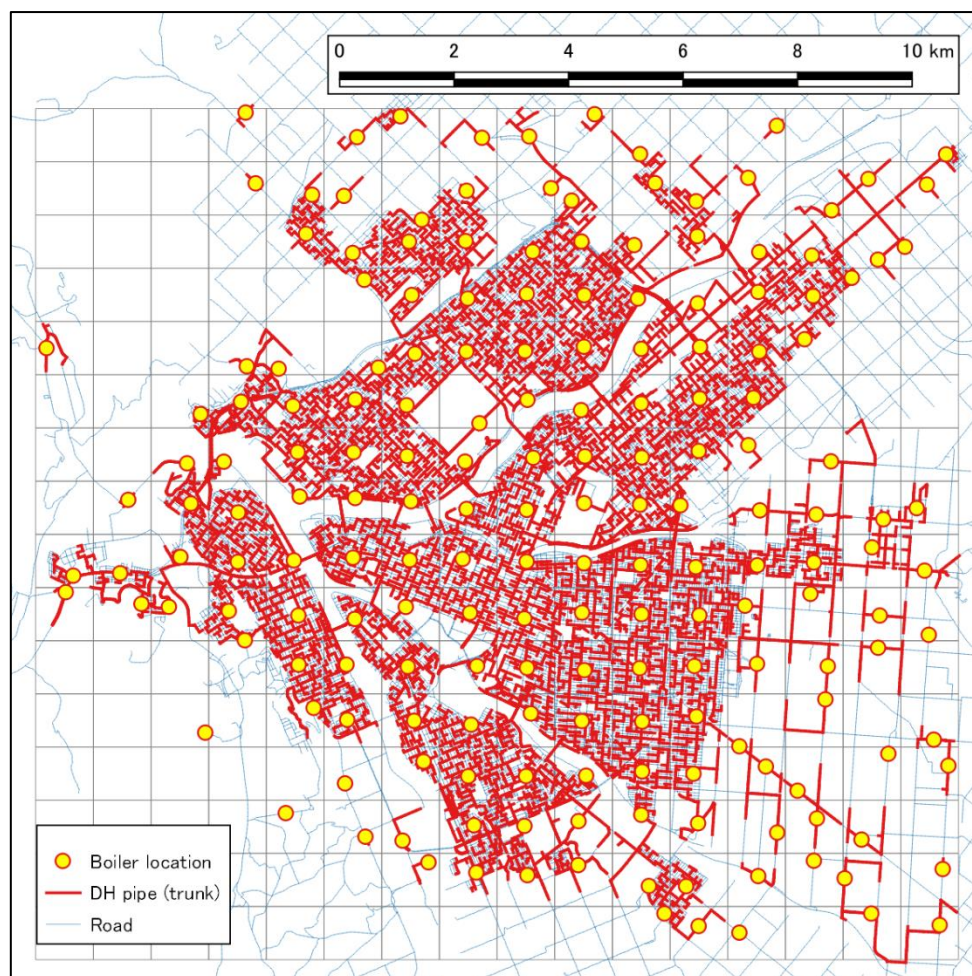


Fig. 3-7. 各熱供給範囲における熱導管配置（赤線、主管のみ表示）と熱施設の立地（黄点）

推定結果

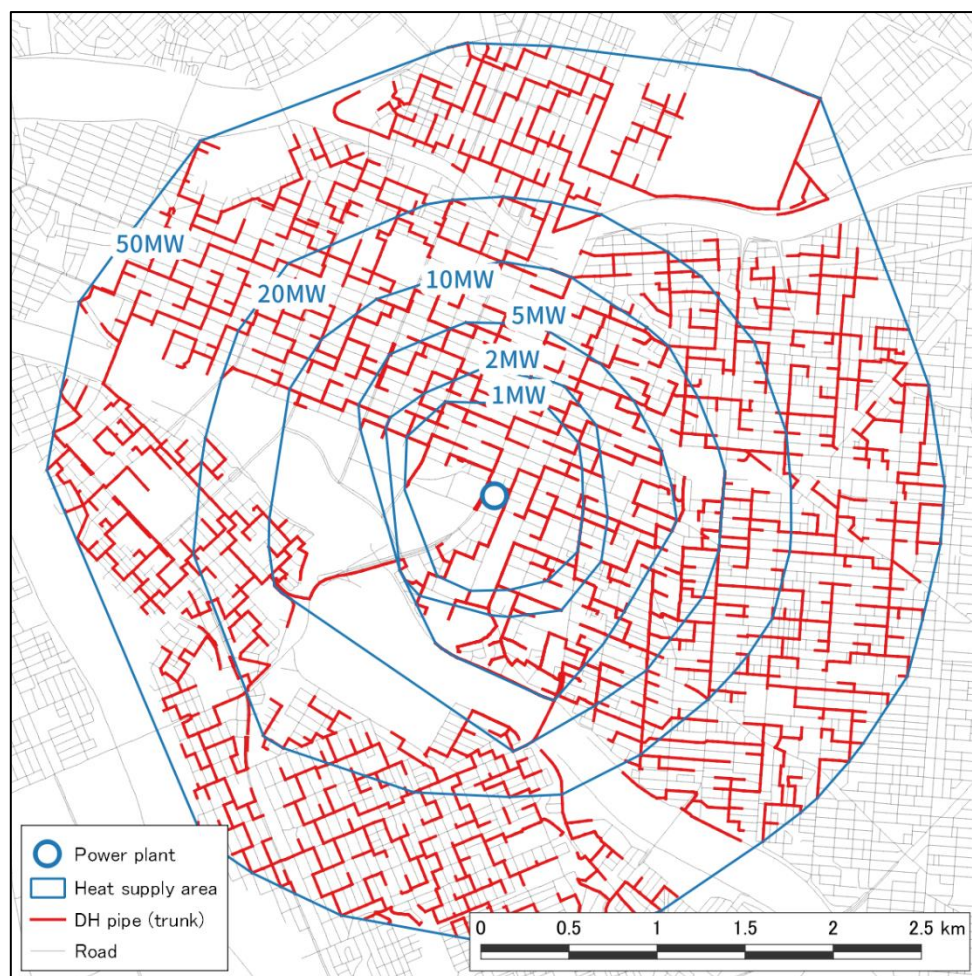


Fig. 3-8. 発電施設からの熱導管配置推定結果の例（赤線、主管のみ表示）

青丸はプラントの立地点、青線は熱供給可能範囲、青線上の MW 数値は対応するプラントの設備容量を表す。

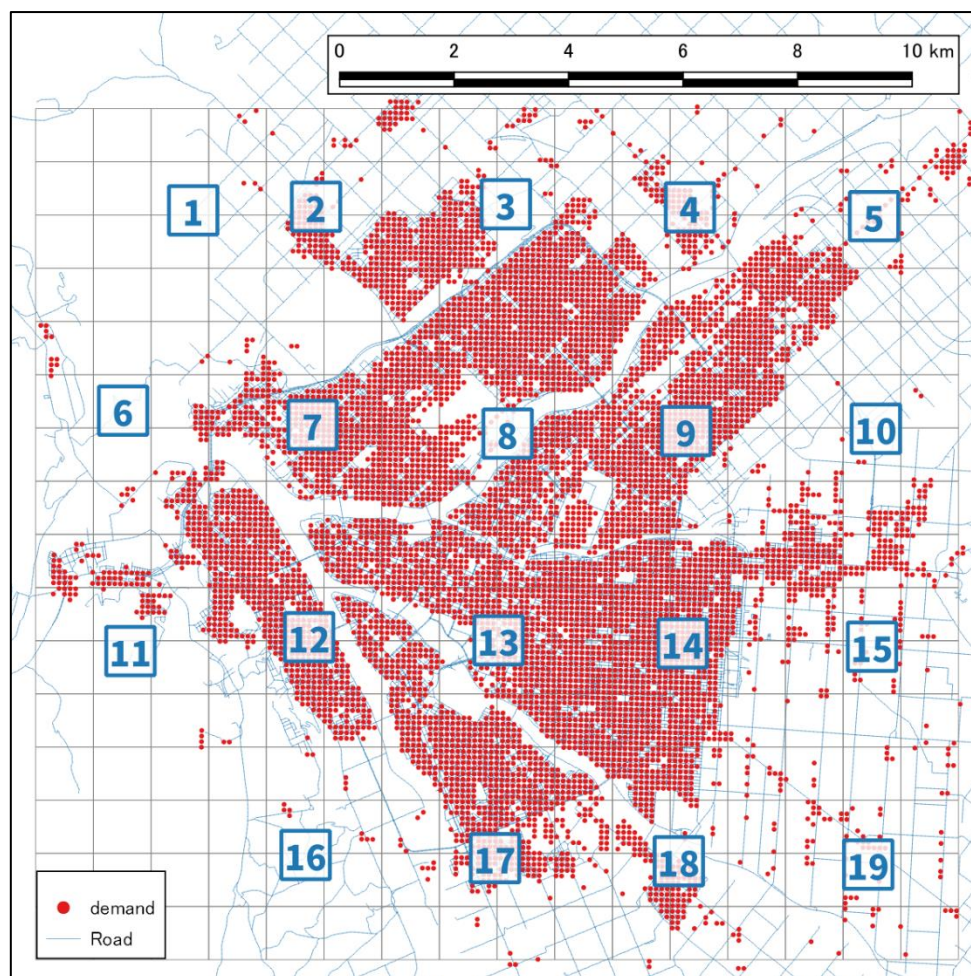


Fig. 3-9. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける破碎施設、および大規模集中型エネルギー利用モデルにおける発電施設の立地候補地点（青数字で示した地点）
需要点分布（赤点）は人口、人口あたり単位熱需要および建物用地の分布から推定した。

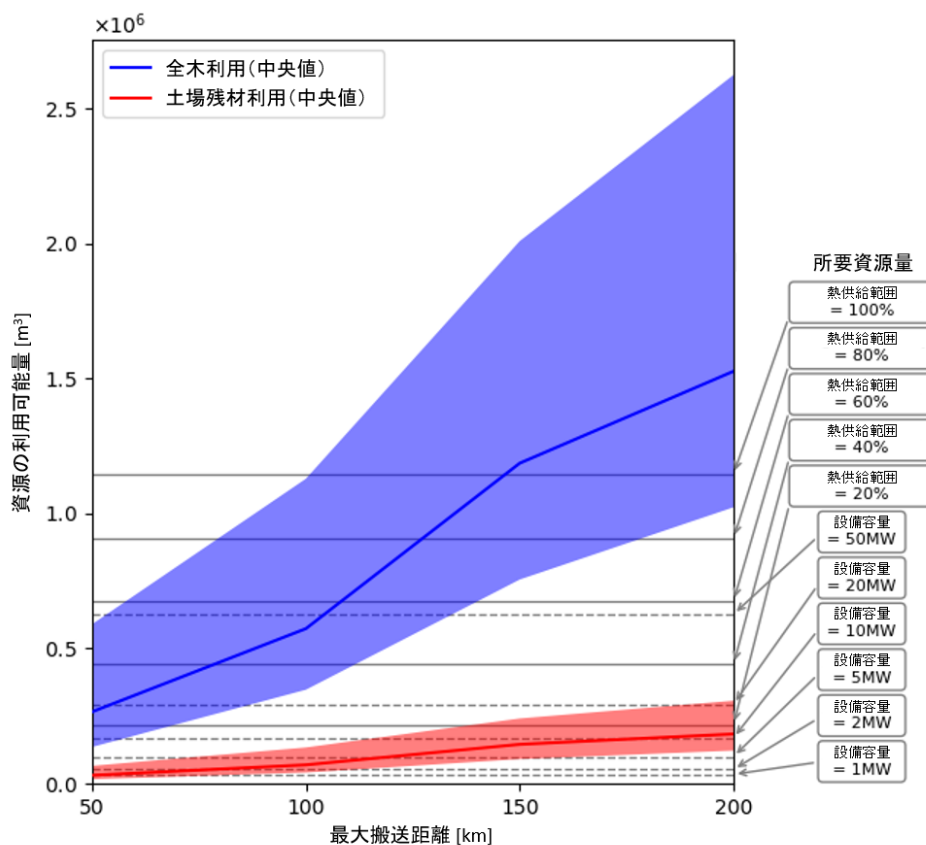
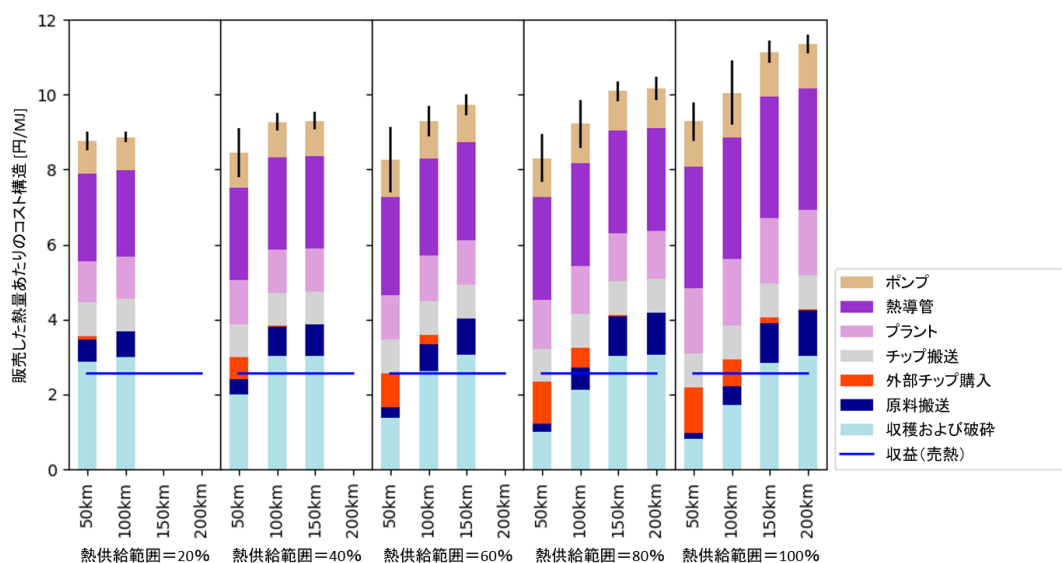
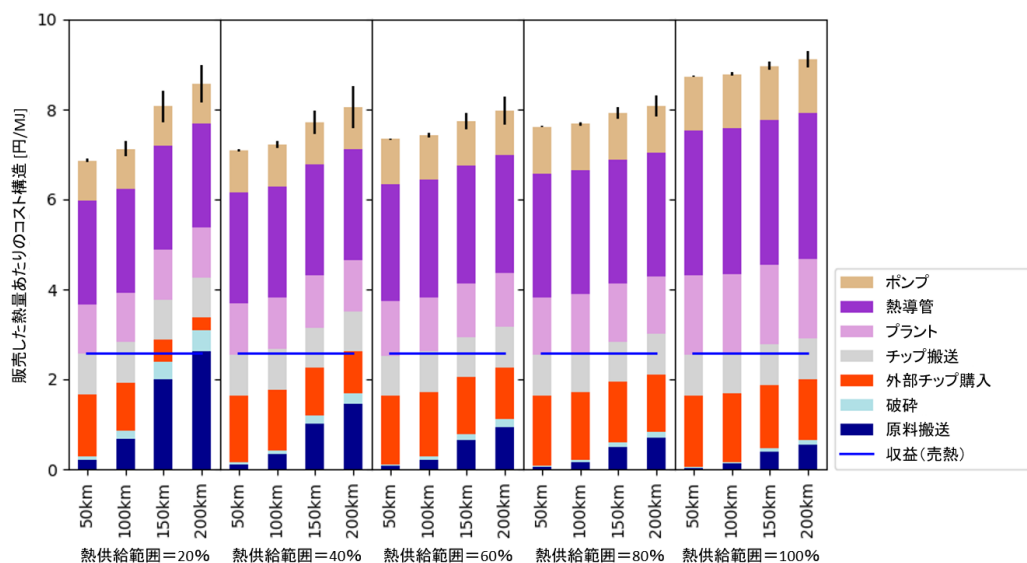


Fig. 3-10. 評価期間における最大搬送距離 [km] および資源の利用可能量 [m^3]

青および赤の実線は評価期間内の全ての集約地点における全木および土場残材の利用可能量の中央値、各色の淡色領域はそれらの変動幅をそれぞれ表す。灰色の実線は中規模分散型エネルギー利用モデルにおける熱供給範囲のカバー率毎の必要資源量、灰色の点線は大規模集中型エネルギー利用モデルにおけるプラントの設備容量毎の必要資源量をそれぞれ表す。



(a) 全木利用

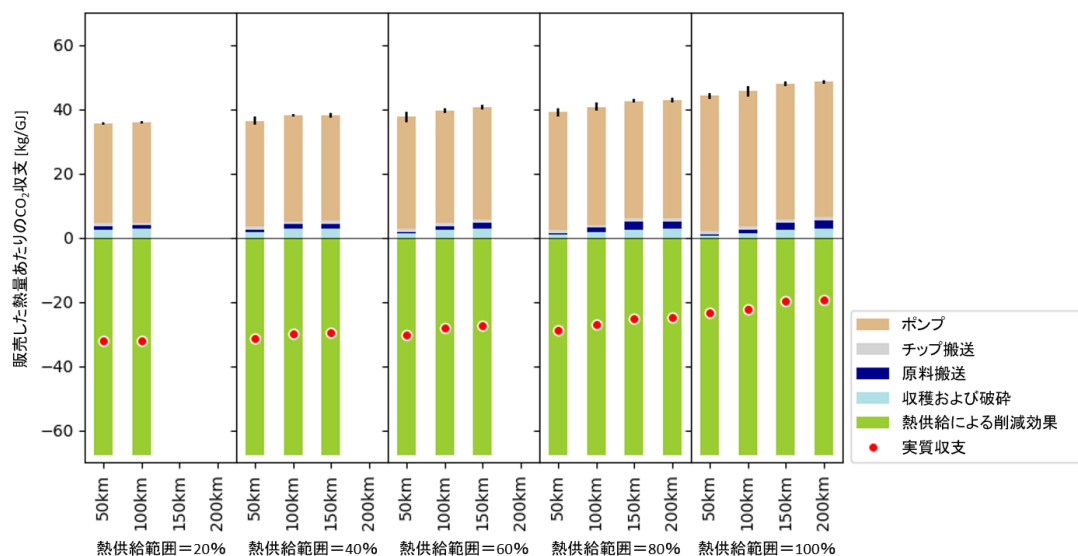


(b) 土場残材利用

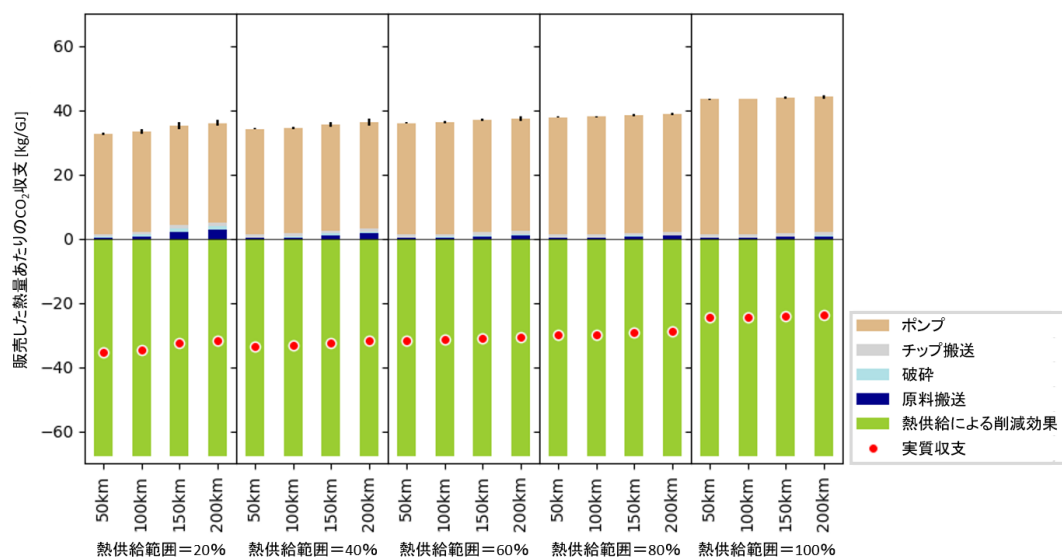
Fig. 3-11. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 8 に破碎施設を設置した場合の供給した熱量あたりの平均コスト構成

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間におけるコストの年次変動幅、青線は灯油の LHV 相当単価で熱を供給した場合の収益をそれぞれ表す。なお、評価したコストのうち、伐倒、集材、造材、および破碎は「収穫および破碎」、運材および残材搬送は「原料搬送」、

ポンプ設備費およびポンプ稼働にかかる動力は「ポンプ」としてカテゴリーを集約している。また、各熱供給範囲において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合のコスト推定結果は示していない。



(a) 全木利用

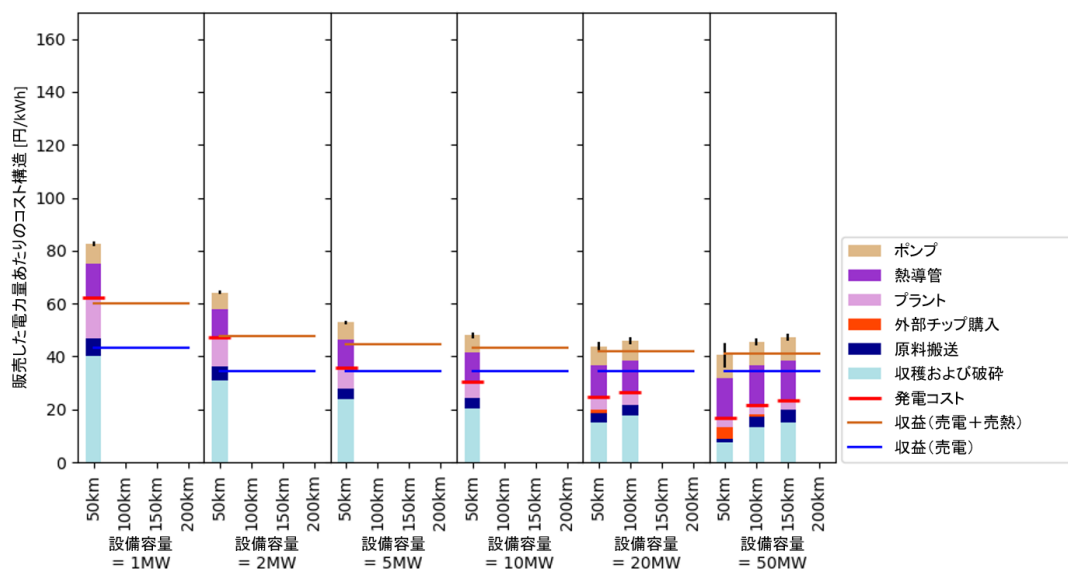


(b) 土場残材利用

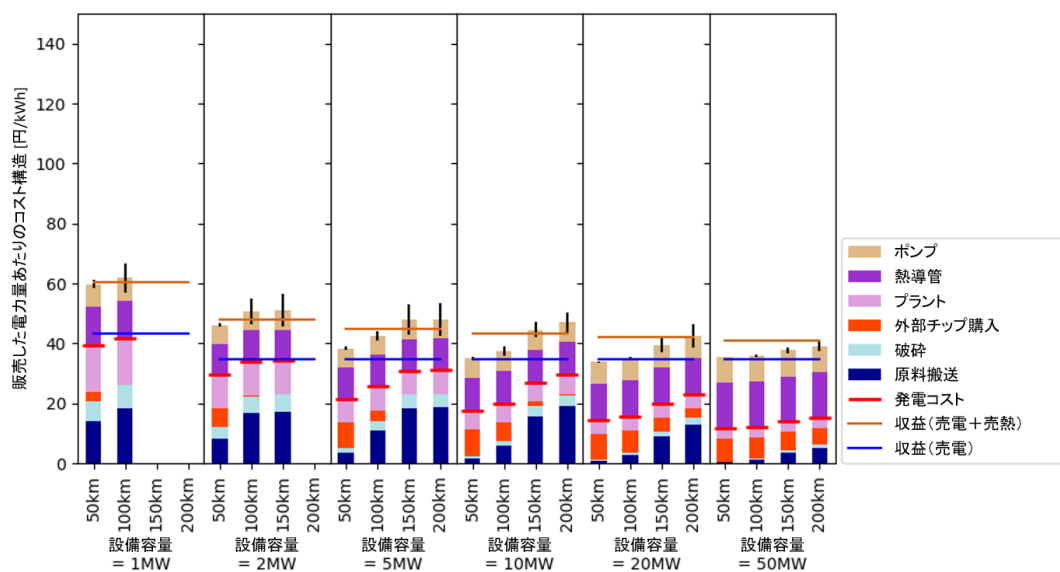
Fig. 3-12. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 8 に破碎施設を設置した場合の供給した熱量あたりの平均 CO₂ 排出源の内訳および排出削減効果

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間における年次変動幅、赤点は実質排出削減効果を表す。なお、評価した排出量のうち、伐倒、集材、造材、および破碎は「収穫および破碎」、運材および残材搬送は「原料搬送」としてカテゴリーを集約している。また、各熱供

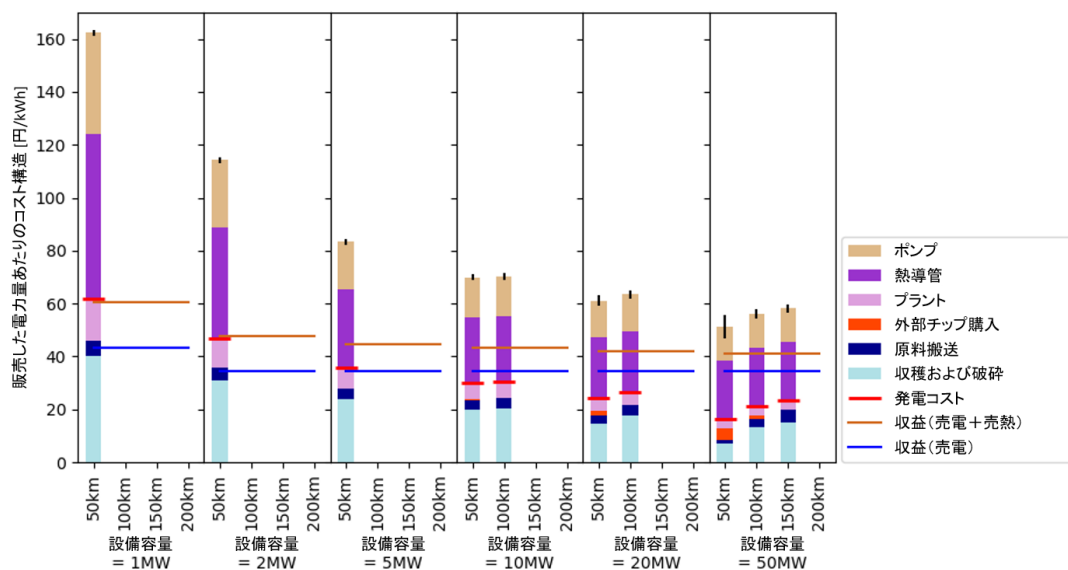
給範囲において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合の排出および排出削減効果の推定結果は示していない。



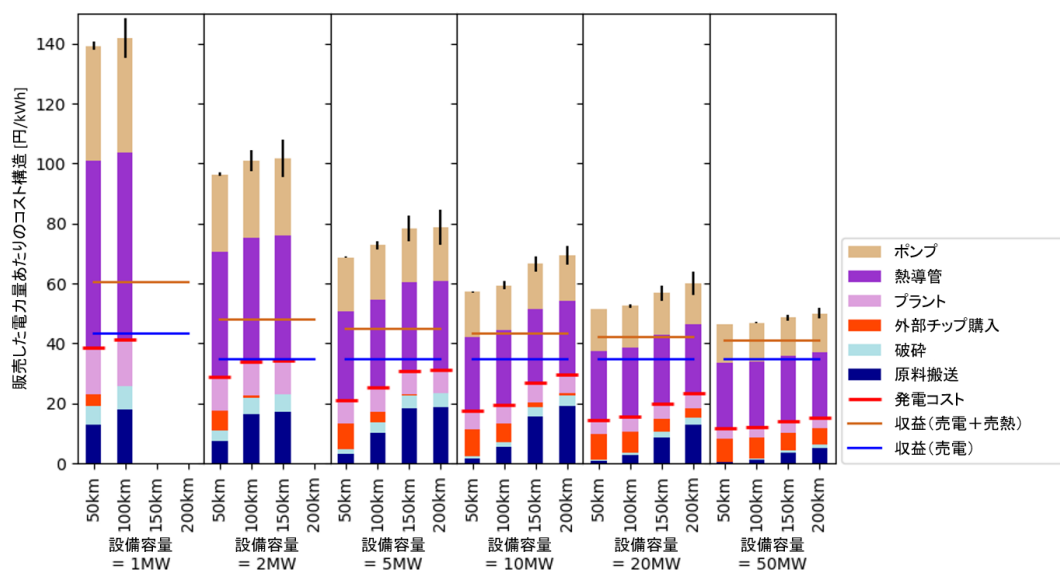
(a) 全木利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(b) 土場残材利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(c) 全木利用（立地候補地点 19：ワーストケース）

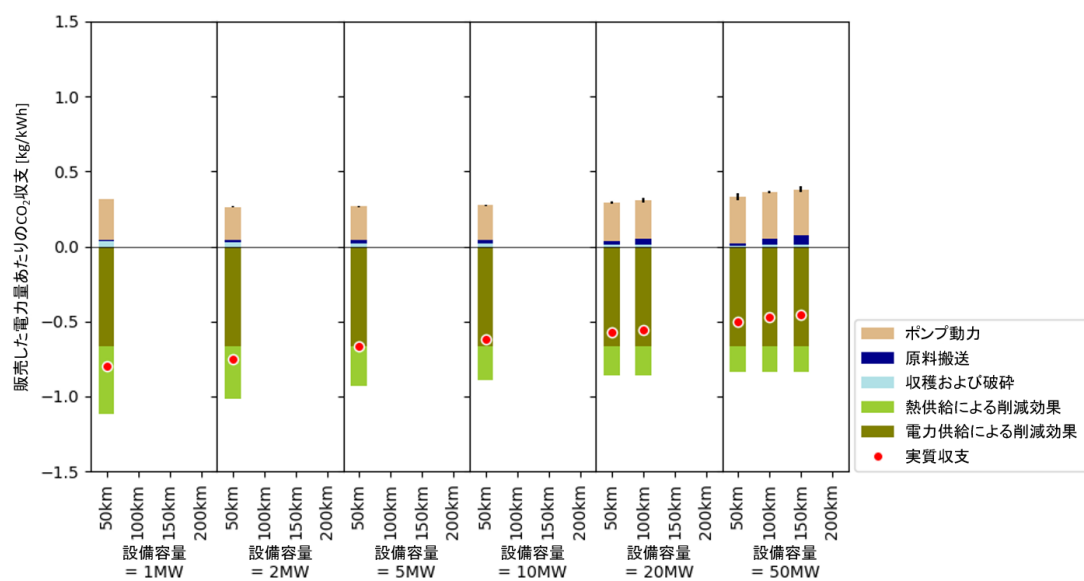


(d) 土場残材利用（立地候補地点 19：ワーストケース）

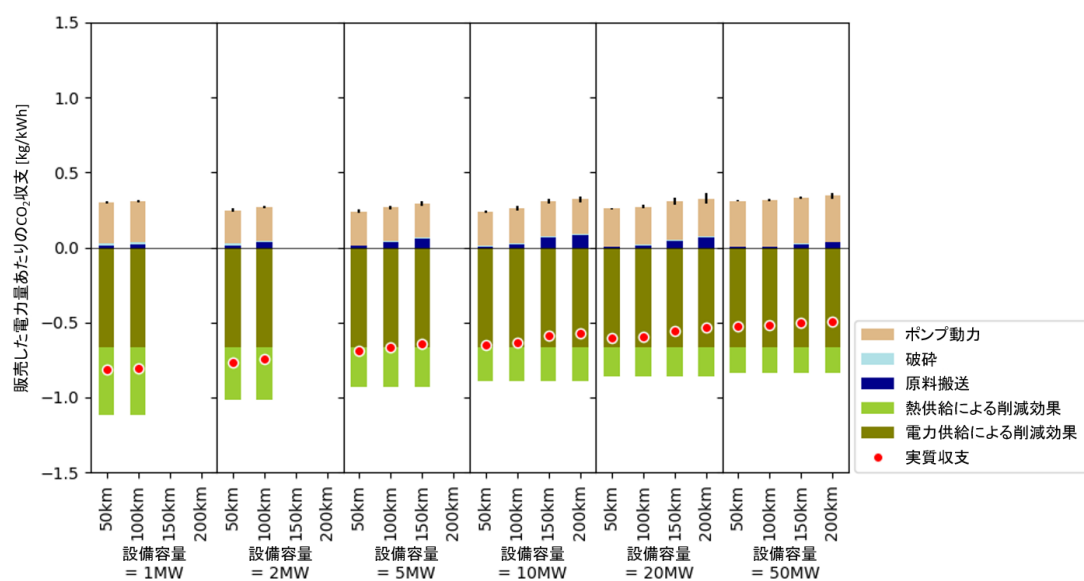
Fig. 3-13. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 13 にプラントを設置した場合（ベストケース：(a)および(b)）と立地候補地点 19 にプラントを設置した場合（ワーストケース：(c)および(d)）での販売した電力量あたりの平均コスト構成

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間におけるコストの年次変動幅、赤線は発電に必要なコスト、青線は売電によって得られる収益、茶線は発電によって得られる収益に灯

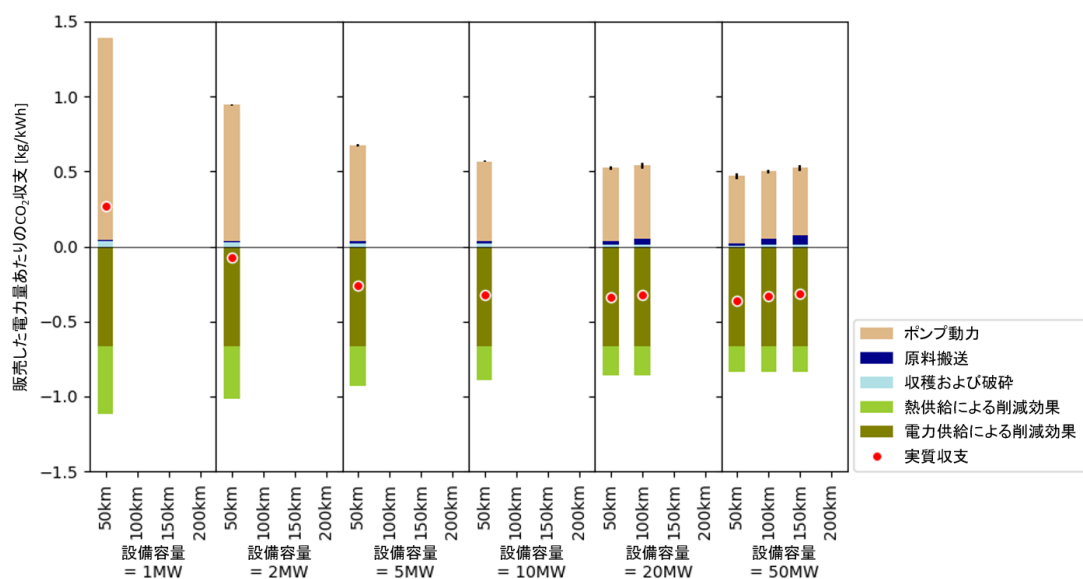
油の LHV 相当単価で熱を供給した場合に得られる収益を加えた値をそれぞれ表す。なお、評価したコストのうち、伐倒、集材、造材、および破碎は「収穫および破碎」、運材および残材搬送は「原料搬送」、ポンプ設備費およびポンプ稼働にかかる動力は「ポンプ」としてカテゴリーを集約している。また、各プラントの設備容量において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合のコスト推定結果は示していない。



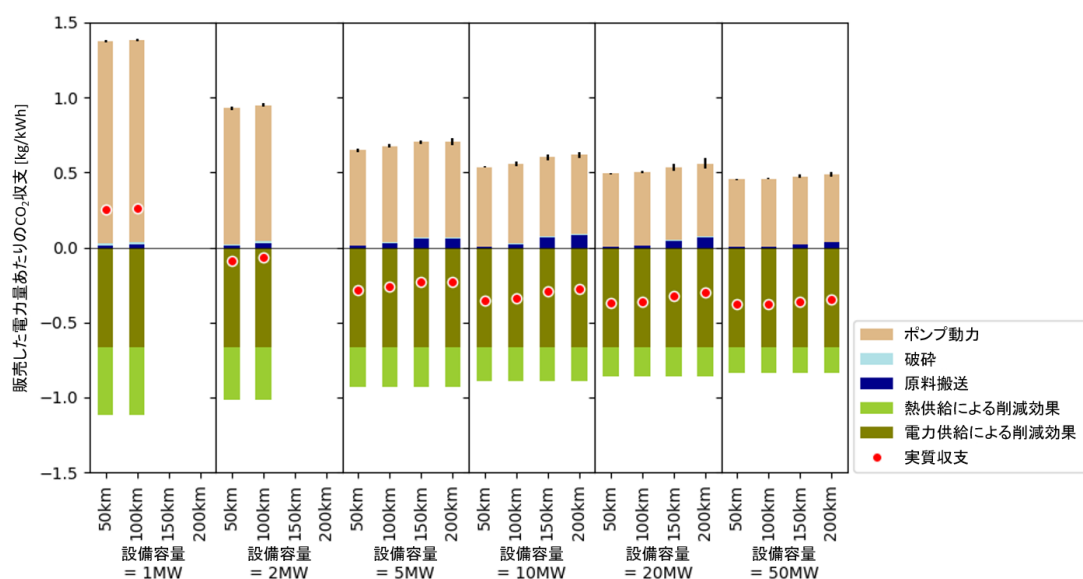
(a) 全木利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(b) 土場残材利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(c) 全木利用（立地候補地点 19：ワーストケース）



(b) 土場残材利用（立地候補地点 19：ワーストケース）

Fig. 3-14. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける、全木利用シナリオの元で販売した電力量あたりの CO₂ 排出源の内訳および排出削減効果

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間における年次変動幅、赤点は実質排出削減効果を表す。なお、評価した排出量のうち、伐倒、集材、造材、および破碎は「収穫および破碎」、運材および残材搬送は「原料搬送」としてカテゴリーを集約している。また、各プラ

ントの設備容量において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合の排出および排出削減効果の推定結果は示していない。

第4章：まとめ

4.1. 各章で得られた知見の概要

本研究では、バイオマスエネルギー利用を進める上で、その資源特性である空間密度の低さに着目し、地理空間情報を用いたポテンシャルや事業性の評価モデルを構築した。

第2章では、資源の空間分布を一樣な空間解像度の元で詳細にマッピングすることにより、様々なバイオマス資源の空間分布を比較した。これによって、種々のバイオマス資源の空間的偏在性が把握された。次に、バイオマスエネルギー利用の事業化検討において頻繁に指摘される輸送コストに着目し、輸送コストの観点から地域のバイオマス資源の優位性について検討した。富良野市を対象地として実施した解析の結果では、市域全体の利用可能量では森林バイオマスが最も豊富であると見積もられた一方、輸送コストの観点からは、より中心地近郊に分布する穀物系農業廃棄物がより安価であり、優位性のある資源であると評価された。

第3章では、木質バイオマスに着目し、より大規模なエネルギー利用、特に熱利用を前提としたバイオマスエネルギー利用システムについて、資源分布、道路ネットワーク、施設立地、熱供給条件および地域熱供給における熱導管ネットワークなどの地理的条件に左右される要素を含むサプライチェーン全体を地理空間モデルとしてモデル化し、資源の供給可能性や事業性、GHG 削減効果を評価した。エネルギー利用の方法として、現在多くが未利用となっているバイオマス発電の余熱利用および、欧州を中心に都市部で多くの事例がある地域熱供給をモデル化した。未利用バイオマスである土場残材のみを利用するシナリオに加え、より積極的に伐採木を利用するシナリオも評価することによって、エネルギー利用の規模と資源搬送距離に応じた資源供給ポテンシャルについて一定の示唆が得られた。また、このモデルに基づく評価の結果として、発電を行う場合にのみ事業採算性が得られた。これは FIT 制度による売電収入の下支えによるものであり、地域熱供給事業の実施は事業採算性を向上させないことから、熱事業単独での採算性確保には困難があることが示唆された。国内におけるバイオマスを利用した地域熱供給事業の事例がほとんどないため、本研究で想定したコストや運用条件が過大となっている可能性も残されるものの、採算性確保には相当なコスト改善が必要になると考えられ

た。また、特に発電プラントを中心として熱供給を行う場合には、事業性および GHG 削減効果はプラントの立地条件に影響を受け、条件によってはメリットが得られない可能性も示唆された。

4.2. バイオマスによる熱利用の拡大に関する考察

第3章で得られた結果は、発電余熱を利用するシナリオにおいては、条件によっては発電に加えて熱供給を行った場合にも収益性が見込める余地があるものの、全体としては熱供給に要するコストを売熱による収益で回収できない(熱供給を行うことによって全体の収益性が向上しない)ことを示唆している。また、プラントに係る費用や熱導管の敷設費などの固定費以外にも原料費やポンプの消費電力といったランニングコストに相当するコスト比率も大きい。

最新の自然エネルギー世界白書 (REN21 2018) は、近年のバイオマスエネルギー市場の動向について次のように報告している。「バイオマスエネルギー市場のうち、熱利用については低調であり、近年の成長率は年率2%を下回っている。これは政策面での配慮の欠如と、化石燃料価格の低さによるものと考えられている。一方で発電市場は急速に拡大しており、2017年には発電量ベースで11%増加した。」日本国内の状況についても第1章で述べたとおり、熱利用が低調であり発電が主体となっている状況は類似している。

2017年度における日本の最終エネルギー消費約13.5 EJのうち、運輸3.1 EJ、電力3.5 EJを除く約6.9 EJが熱エネルギーであると見積もられ(資源エネルギー庁 2019b)、国内のエネルギー需要の過半が熱である。一方、エネルギー基本計画を受けて作成される長期エネルギー需給見通しでは、電力に関する長期的目標および電源構成が示されているのに対して、熱に関しては「廃熱回収・再生可能エネルギー熱を含む熱利用の面的な拡大など地産地消の取組を推進する」との言及(経済産業省 2015)にとどまっており、熱に関する具体的な構造転換の内容や目標は設定されていない。バイオマスエネルギー利用は、限られた資源量を有効利用する観点からも、エネルギー回収率の高い熱利用や発電における余熱回収を行うことによって、熱セクターの低炭素化ならびに自給率向上において更に役割を担うことが期待される。

これまで日本においては、こうした熱利用を目的としたバイオマスエネルギー利用を促進す

るため、木質バイオマスボイラーなどの熱源設備の設置に対し、主に設備導入に関する固定費への助成が行われてきた。一方、本研究における分析結果からは、プラントの設置費用などの初期投資に限定した助成だけでは事業採算性を確保できないことが示唆されている。

再生可能エネルギー電力の普及においては、これまで各国で様々な普及促進策が講じられてきた。経済的な側面からの方策としては、主に税制による促進策（一定期間の課税免除、税額の減免や控除）や税制によらない促進策（助成金、FIT、無利子または低利子による貸付）が、規則や規制による方策としては再生可能エネルギー電力の導入達成比率を義務付ける RPS（Renewables Portfolio Standard）制度、燃料生産に関する情報開示およびグリーン電力購入の義務付けといった方法が挙げられる（Hassan 2019）。日本で 2012 年に施行された後バイオマス発電の急速な普及を誘発した FIT 制度は、再生可能エネルギー電力の均等化発電原価を踏まえて設定された固定価格で一定期間の買い取りを保証することで、事業者の適切な設備運用によって投資回収を促す仕組みである。非効率な事業や過度な国民負担を誘発しないような価格設定や制度設計が必要であるが、こうしたスキームは再生可能エネルギーの普及拡大に一定の成果を上げることが期待される。

再生可能エネルギー熱に関しては、熱の固定価格買取制度である Renewable Heat Incentive（RHI）が FIT に類似した制度として挙げられる。英国では 2011 年から本制度を導入しており、施行後に導入された非家庭部門（non-domestic）における再生可能エネルギー熱の 76%（熱量ベース）がバイオマス燃焼によるものとなっている。また家庭部門（domestic）では、制度運用初期段階で非常に高い買取価格（タリフ）が設定されたため急速にバイオマスボイラーが導入されたが、その後の価格改定によって導入量は減少し、2013 年時点での同部門における熱源別の導入比率は各種ヒートポンプや太陽熱設備が多くを占め、バイオマス熱の割合は 9%にとどまっている（Lowes et al. 2019）。同国では現在も制度は継続しているが、その導入促進効果や成否については今後の検証が待たれる。

Beerepoot et al. (2012) は、再生可能エネルギー熱の導入に向けた政策誘導に関して、技術の成熟度と市場の成熟度に応じて適切な誘導策は異なることを指摘している。すなわち、効果的な市場刺激政策を実施するためには、現在の国内技術や市場の成熟度を適切に把握し、これを

踏まえた施策のデザインを行うことが必要である。現在の日本における木質バイオマス熱利用に関する技術や市場の成熟度を明らかにすることは本研究の主題ではないため、英国で導入された RHI を含む先に述べた普及促進策やその他の方策のうち、日本においてどのような方策が最も有効であるかをここで提示することは困難である。しかし前述の通り、少なくとも本研究の結果は、地域熱供給によるバイオマスの熱利用においては設備に関する固定費だけでなくポンプの動力に掛かるコストを含む運用コストの比率も大きいことから、設備固定費に対する助成では普及促進の方策としては不十分であることを示唆している。今後、現行の化石燃料を主体とした熱利用システムに対する競争力を高めていくためには、国内市場の活性化を図り、熱供給に関する各要素コストのコストダウンを誘発するため、固定費への助成にとどまらないスキームが必要である。同様の趣旨の提言が関連団体からも提起されている（日本木質バイオマスエネルギー協会 2018）ことから、本研究で得られた示唆は業界における課題認識とも共通するものである。こうした新たな助成スキームの実現には、急速なバイオマス発電の普及に繋がった FIT 制度と同様に、国が主体となることが最も強力な推進力となるものと期待される。一方で、電力に比べて熱は需要の地域差が大きいと、とりわけ寒冷地ゆえ熱需要が最も大きい北海道が取り組みを進めることが、有効なモデルケースになるものと考えられる。

第3章で述べたとおり、本研究において設定したサプライチェーンにおける各要素コストや運用条件は、実際のエネルギー利用事例を踏まえさらに検証と改善が行われるべきであるが、本研究で実施したアプローチによるエネルギー供給コストやCO₂排出削減効果の解析は、今後のあるべき促進政策をデザインする上で有益な示唆を提供できるものと考えられる。

4.3. 課題と今後の展望

本研究では、2章で述べた資源毎の輸送性解析や3章で述べた木質バイオマス資源の収穫時における集材や搬送、破碎後の木質チップ搬送の各プロセスや熱導管による熱媒搬送において、地形条件を考慮していない。したがって、集材時における荷揚げや荷下げ（伐採地から土場まで引き上げることあるいは引き下げる）、搬送時の地形に応じた距離の変化、熱媒搬送の圧力損失への影響は無視されており、より実際的な条件で見積りを実施するにあたっての

今後の課題である。

熱密度の高い都市部における地域熱供給は欧州を中心として普及しているが、木質バイオマスを想定したモデルによる評価の結果、いわゆる残材を主体とした広域熱供給事業には資源ポテンシャルおよびコストの両面から慎重な検討が必要であることが示唆された（第3章）。間伐材や主伐材の積極的なエネルギー利用によって地域材によるエネルギー自給率を高めることも可能であるが、建築用材やマテリアル利用などを優先するカスケード利用の観点からは疑問が残ることに加え、より広範囲に熱供給を行う条件では長距離に渡る資源の搬送が必要となり他地域との資源利用の競合を招く可能性にも配慮が必要となる。一方で、本研究で熱供給によるエネルギー利用を検討した旭川市は道内第二位の都市であり、こうした都市部におけるポテンシャルが比較的高い建築廃材や公園剪定枝など、未利用のバイオマス資源の活用可能性については未考慮である。このため、第2章でとりまとめたポテンシャルマップに基づきその他の未利用地域資源に対象を拡大することによって、より有効な資源利用シナリオを提示できる可能性がある。その際、第2章で実施した輸送性の観点から比較優位となる資源のポテンシャルを（より広域に）把握することによって、有望な資源を絞り込むことができる。第3章では、森林バイオマス資源のサプライチェーン全体のモデル化を行ったが、資源利用のサプライチェーンをモデル化するプロセスには大きな作業コストを要するため、これに先立って地域におけるバイオマス資源として利用対象となりうる資源を絞り込むことは、実用上有用なステップである。

また、第3章で検討した一定の区画に分割して熱供給を行うシナリオにおいても、その熱供給区画は1 kmのメッシュ区画についての検討に限られている。欧州ではより広範囲な熱供給も実施されているが、供給規模を拡大することによるスケールメリットが期待される一方、供給時のポンプ動力の増大や熱損失の増大によるGHG排出削減効果の低下ならびに事業性の悪化が懸念される。このため、熱需要の空間分布に基づいて適切な熱供給範囲を決定することは重要なプロセスである。熱需要の空間分割については既存の方法論が提案されており、例えばUnternährer et al. (2017) は、空間クラスタリング処理を用いて熱需要点群を適正な規模に分割する方法を提案している。今後、こうしたプロセスを実装することにより、より実際的なモデ

ルへ改善できるものと期待される。また熱導管における熱損失についても、供給規模に応じたより正確な見積りが必要である。

また、地域熱供給は熱需要密度の高い都市部で適用可能な熱利用のオプションであり、郊外地域や中山間地域では、地域熱供給とは異なる熱利用の検討が必要となる。薪・チップ・ペレットボイラーあるいはストーブ等による個別熱源による小規模分散型熱利用シナリオや、1000 kW 以下の小型発電による CHP を想定したシナリオなどがその候補の一つとなり得ると期待されるが、本研究で構築したエネルギー利用モデルは、そのままこれらのエネルギー利用シナリオに適用することができないため、こうしたエネルギー利用システムに即したモデルへ改良・応用することが今後の課題である。また本研究では、エネルギー利用シナリオの成立に必要な、実装のための一般化された条件（資源やエネルギー供給施設等の地理空間上の関係性、必要となる人口規模および密度、ならびにこれに伴う熱密度、エネルギー供給規模など）については十分な分析、評価が行われていない。それぞれの地域の特性に基づき最適なエネルギー利用モデルを提案するためにも、事業成立条件の明確化や、先に述べた新たなエネルギー利用のシナリオと併せた比較検討が待たれる。また、こうした展開においても、第2章で構築した資源ポテンシャルマップは基盤データとして有効に利用できると期待される。

また近年、都市の空洞化や空き家の急速な増加が深刻な社会問題として懸念されている。地域熱供給は水道や都市ガスと同様に都市インフラとして整備されるものであることから、熱供給の効率性だけでなく、長期にわたるインフラの維持の観点からも、今後の人口動態を踏まえた慎重な検討が重要な論点となる。地域熱供給を含む新たなエネルギー供給システムは、脱炭素化やエネルギー自給といった側面と同時に、都市のコンパクト化といった持続可能な都市の再デザインの側面からも検討が必要である。併せて、喫緊の課題である気候変動に対する適応の観点からは、気候変動に伴う熱需要の変化を加味した検討も必要となる。本研究では、人口や気候、資源ポテンシャルに関する条件については、現在の状況を前提とした条件での検討を行ったが、今後、本研究で提案した資源ポテンシャルやエネルギー利用シナリオの評価を、将来的な条件の変化を踏まえて応用することが重要となる。このためには、人口動態や気候変動、土地利用変化に関する他の時空間モデルと統合し、時間の次元を加えた動的なエネルギー利用

モデルとして発展させることが期待される。これによって、地域でバイオマス資源を有効かつ効率的にエネルギー利用できる土地利用のあり方を提示すると同時に、環境や社会との関係性を踏まえつつ、脱炭素化を達成しうる持続可能な都市のあり方を提示することにも貢献できる可能性がある。

第3章では、本研究で構築したモデルにおいて森林管理コストが外部化されていることについて議論した。戦後の大規模な再造林および拡大造林で植栽された造林木の多くが収穫期を迎えている一方、人口減少時代を迎えた日本において今後木材需要の減少が懸念される中、バイオマスエネルギー利用はこうした林産資源活用の受け皿の一つとなり得ると期待される。地域産業としての森林・林産業が持続可能であることが、地域の雇用の維持、ひいては地域社会の維持において重要であると同時に、森林の多面的機能を維持していく上で重要な営みであることから、森林バイオマスエネルギー利用の推進は、エネルギーセキュリティの向上ならびにエネルギーの脱炭素化の観点に留まらない意義を有している。今後、本研究で構築した森林バイオマスエネルギー利用のサプライチェーンモデルを森林管理プロセスまで更に拡張し、バイオマスエネルギー利用を新たな森林経営の一側面として位置づけることによって、新しい森林利用や森林管理のあり方の提起や実現につながるものと期待される。

本研究では、地理空間モデルによる輸送コスト解析や熱供給事業に関する評価を通して、地域における資源の利用可能性やエネルギー供給の実現可能性およびその効果は、空間的な条件、すなわち資源分布や輸送距離、施設立地条件、熱供給条件などによって大きく左右されることが定量化された。この取り組みによって、地域における適切なバイオマスエネルギー利用システムの検討においては空間情報を踏まえた検討が重要であることが示されたと考える。さらに、本研究を通じて明らかにされた資源ポテンシャルやその輸送コスト、サプライチェーン全体を通じた森林バイオマスエネルギー利用システムのコスト構造やCO₂排出削減効果に関する知見は、バイオマスエネルギーの効果的な活用による脱炭素化の実現に向けて今後進めるべき施策を議論、検討する上で重要な知見であると考ええる。本研究で提示した地理空間モデルを利用したアプローチは、環境、社会、経済に対して持続可能なバイオマスエネルギー利用の実現に大いに貢献すると期待される。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、有形無形様々な形で、たいへん多くの方にご助力をいただきました。ここに記して感謝を表します。

北海道大学大学院地球環境科学研究院、藤井賢彦准教授には指導教員として終始、細部に渡るご指導をいただきました。感謝申し上げます。また、同学院の甲山隆司名誉教授、山形与志樹客員教授ならびに渡辺悌二教授、北方生物圏フィールド科学センターの荒木肇教授ならびに柴田英昭教授には、副査として貴重なご助言とご指導をいただきました。感謝申し上げます。とりわけ、山形与志樹客員教授には、3章について研究の機会やデータを快く与えていただくとともに、多くのご指導を賜りました。感謝申し上げます。

筆者の所属する北海道立総合研究機構環境・地質研究本部および環境科学研究センターの職員の皆様には、社会人学生として業務の傍ら本研究に取り組むことについて、共有データやPC環境の利用についての理解と、温かい励ましを随所でいただきました。全てをここに記すことはできませんが、とりわけ環境科学研究センターの野口泉部長、小野理研究主幹、阿賀裕英主査、丹羽忍主査、山口勝透主査、北川理恵様、大谷康博様、山田朝子様には感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたっては、様々なオープンソースソフトウェア（Open Source Software; OSS）に大いに助けられました。特に本研究では、QGIS、GRASS GIS、SpatiaLite、GDAL/OGRなど、地理空間情報を取り扱う様々なオープンソースソフトウェア・ライブラリ群を最大限活用しました。これらは Free & Open Source Software for Geospatial (FOSS4G) と呼ばれ、FOSS4Gを含む OSS 群はいずれも有志のユーザーでもある開発者によって開発されると同時に、以前は難しかった解析や処理が数年のうちに実装されるなど、不断のフィードバックに基づく目覚ましい改良が進められています。本研究で実施したいいくつかの分析は、こうした新たな実装によって可能になったものであり、その実装なくして未熟な筆者には成し遂げることはできませんでした。これら OSS の開発者、およびそのユーザーコミュニティ、とりわけ GRASS GIS の開発陣ならびに SpatiaLite の開発者である Alessandro Furieri 氏には間接的ながらも極めて大きな恩恵を受けたと言えます。ここに記し、感謝の意を表します。

常に多くの励ましと、時として少々の皮肉とをもって筆者に心の平穏をもたらし、また時として文字通り温かな食卓にも招いてくれた多くの仲間には最大限の感謝を表します。また、本研究の取り掛かりにあたって惜しみなく貴重なデータや情報を提供し、かつ友人として快く議論にも応じてくれた宮崎稔也氏にも本当に感謝します。そして、筆者の取組みを当初から深い興味をもって聞いてくださるとともに、多くの示唆を与えてくださった故・泉徹氏にも感謝します。さらに、電腦世界の彼方から、文字や音や絵など様々な形で常に無条件の励ましをくださった皆様にも心から感謝します。

最後に、いつも遠方から激励の言葉とともに、心身とも支えてくれた家族に感謝します。

引用文献

- [1] Aikawa, T. (2018). Restructuring Japan's Bioenergy Strategy (pp. 1–36). Renewable Energy Institute.
- [2] Angus-Hankin, Stokes, & Twaddle. (1995). The transportation of fuelwood from forest to facility. *Biomass and Bioenergy*, 9(1-5), 191–203. doi:10.1016/0961-9534(95)00091-7
- [3] Beerepoot, M., & Marmion, A. (2012). Policies for Renewable Heat. OECD.
doi:10.1787/5k3wb8gtfjhf-en
- [4] Biomass Energy Centre. (2006). What is biomass.
https://web.archive.org/web/20061008081905/http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=76,15049&_dad=portal&_schema=PORTAL (accessed 2019/05/04)
- [5] Calvert, K. (2011). Geomatics and bioenergy feasibility assessments: Taking stock and looking forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1117–1124.
doi:10.1016/j.rser.2010.11.014
- [6] Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. doi:10.1007/BF01386390
- [7] Dou, Y., Togawa, T., Dong, L., Fujii, M., Ohnishi, S., Tanikawa, H., & Fujita, T. (2018). Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: A case in Fukushima, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 406–416. doi:10.1016/j.resconrec.2016.03.006
- [8] Forest Research. (2019). What is biomass.
<https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/biomass-energy-resources/general-biomass-information/what-is-biomass/> (accessed 2019/05/04)

-
- [9] Fujii, S., Furubayashi, T., & Nakata, T. (2019). Design and Analysis of District Heating Systems Utilizing Excess Heat in Japan. *Energies*, 12(7), 1202. doi:10.3390/en12071202
- [10] Gaderer, M. (2016). *Handbook of Combustion* (pp. 1–37). WILEY-VCH
doi:10.1002/9783527628148.hoc058.pub2
- [11] 玄地 裕, 鳥飼 仁, 梶本 武志, 請川 孝治 (2009). 和歌山県における果樹剪定枝を利用したバイオマス燃料システム. 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 4, 238–239.
doi:10.11539/ilcaj.2008.0.119.0
- [12] GRASS GIS, <https://grass.osgeo.org/>
- [13] 羽原 浩史, 松藤 敏彦, 田中 信壽 (2002). 事業系ごみ量と組成の事業所種類別発生・循環流れ推計法に関する研究. *廃棄物学会論文誌*, 13(5), 315–324.
doi:10.3985/jswme.13.315
- [14] 北海道 (2008). 平成 19 年度北海道林業統計.
- [15] 北海道 (2009). 平成 20 年度北海道林業統計.
- [16] 北海道 (2009). 平成 21 年北海道産業廃棄物処理状況調査.
- [17] 北海道 (2010). 平成 21 年度北海道林業統計.
- [18] 北海道 (2010). 北海道廃棄物処理計画.
- [19] 北海道 (2010). 北海道循環型社会形成推進基本計画.
- [20] 北海道 (2011). 平成 22 年度北海道林業統計.
- [21] 北海道 (2013). 平成 23 年度北海道林業統計.
- [22] 北海道電力株式会社 (2019). 法人電力料金単価表.
<https://www.hepco.co.jp/business/price/unitprice/unitprice04.html>

- [23] 北海道開発局 (2014). 建設機械等損料表北海道補正版.
- [24] 北海道経済部 (2017). 北海道エネルギー関連データ集.
- [25] 北海道立林業試験場 (2007). カラマツ人工林施業の手引き.
- [26] 北海道立総合研究機構林業試験場 (2015). トドマツ人工林施業の手引.
- [27] 北海道立総合研究機構林業試験場 (2018). アカエゾマツ人工林施業の手引.
- [28] 北海道消費者協会 (2008). 平成 19 年度北海道家庭用エネルギー消費実態調査報告書.
- [29] 北海道水産林務部道有林課 (2016). 道有林森林資源情報資料.
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/dyr/DOP.htm> (downloaded 2019/02/23)
- [30] 北海道水産林務部森林計画課 (2016). 森林計画関係資料.
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/OPD.htm> (downloaded 2019/02/23)
- [31] IEA. (2017). Technology Roadmap : Delivering Sustainable Bioenergy.
doi:10.1787/9789264287600-en
- [32] IEA. (2018). World Energy Balances.
- [33] 芋生 憲司 (2010). エタノール原料としての未利用バイオマスの収集・運搬. *農業機械学会誌*, 75(1), 4-7.
- [34] IPCC. (2014). Summary for Policymakers (pp. 1-33).
- [35] IPCC. (2018). Summary for Policymakers (pp. 1-26).
- [36] 伊藤 吉紀, 中田 俊彦 (2008). 家畜排泄物の地理的分布を考慮したバイオマス利活用プラントの配置と促進方策の検討. *日本エネルギー学会誌*, 87(1), 56-67.
doi:10.3775/jie.87.56
- [37] 井内正直 (2004). バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発—賦存量データベ

- ース及び収集コスト評価モデル—（研究報告：Y03023）．電力中央研究所報告．
- [38] 環境省 (2007). 一般廃棄物会計基準.
- [39] 環境省 (2012). 平成 22 年一般廃棄物処理実態調査（処理状況）．
- [40] 環境省 (2015). 日本の約束草案.
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/mat01_indc.pdf (accessed 2019/05/06)
- [41] 環境省 (2018). 電気事業者別排出係数（平成 29 年度実績）．
- [42] 環境省生物多様性センター (1999). 第 5 回自然環境保全基礎調査植生調査.
- [43] 加藤 仁, 金井 源太, 小林 有一, 竹倉 憲弘, 薬師堂 謙一 (2011). システムダイナミックス手法による稲わら回収モデルの研究. *農作業研究*, 46(4), 179–187.
doi:10.4035/jsfwr.46.179
- [44] 加藤 仁, 竹倉 憲弘 (2012). (jp) 稲わら収集のダイナミックスモデル. *農業機械学会誌*, 74(5), 338–342. doi:10.11357/jsam.74.338
- [45] Kayfeci, M. (2014). Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials. *Energy and Buildings*, 69, 278–284.
doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.017
- [46] 経済産業省 (2007). 平成 17 年工業統計.
- [47] 経済産業省 (2015). 長期エネルギー需給見通し
- [48] Kinoshita, T., Inoue, K., Iwao, K., Kagemoto, H., & Yamagata, Y. (2009). A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS. *Applied Energy*, 86(1), 1–8.
doi:10.1016/j.apenergy.2008.03.017
- [49] Kinoshita, T., Ohki, T., & Yamagata, Y. (2010). Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. *Applied Energy*, 87(9), 2923–2927. doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.025

- [50] 国土地理院. 基盤地図情報 数値標高モデル (10m) .
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (downloaded 2016/08/30)
- [51] 国土地理院. 数値地図 2500 (空間データ基盤) .
- [52] 国土交通省 (2006). 平成 17 年度建築着工統計.
- [53] 国土交通省 (2011). 平成 22 年度道路交通センサス.
- [54] 国土交通省. 国土数値情報. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (accessed 2019/05/06)
- [55] 国土交通省 (2014). 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ.
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (downloaded 2017/04/03)
- [56] 国土交通省 (2016). 国土数値情報 行政区域データ.
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03.html> (downloaded 2017/01/09)
- [57] 国土交通省北海道局 (2004). 平成 15 年度有機性廃棄物広域総合処理基盤整備推進調査報告書.
- [58] 国立環境研究所 (2014). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- [59] Kruskal, J. (1956). On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7(1), 48. doi:10.2307/2033241
- [60] 熊崎 実, 沢辺 攻 (2013). 木質資源とことん活用読本 (p. 44). 農山漁村文化協会
- [61] Li, Y., Rezgui, Y., & Zhu, H. (2017). District heating and cooling optimization and enhancement – Towards integration of renewables, storage and smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 281–294. doi:10.1016/j.rser.2017.01.061
- [62] Long, H., Li, X., Wang, H., & Jia, J. (2013). Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 344–352.
doi:10.1016/j.rser.2013.05.035

-
- [63] Lowes, R., Woodman, B., & Fitch-Roy, O. (2019). Policy change, power and the development of Great Britain's Renewable Heat Incentive. *Energy Policy*, 131, 410–421.
doi:10.1016/j.enpol.2019.04.041
- [64] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. doi:10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- [65] Möller, B., & Nielsen, P. (2007). Analysing transport costs of Danish forest wood chip resources by means of continuous cost surfaces. *Biomass and Bioenergy*, 31(5).
doi:10.1016/j.biombioe.2007.01.018
- [66] Nepal, S., Contreras, M., Lhotka, J., & Stainback, G. (2014). A spatially explicit model to identify suitable sites to establish dedicated woody energy crops. *Biomass and Bioenergy*, 71, 245–255. doi:10.1016/j.biombioe.2014.10.002
- [67] NetworkX, <http://networkx.github.io/>
- [68] 日本デジタル道路地図協会 (2015). Digital Road Map version 2709A.
<http://www.drm.jp/> (purchased 2016/02)
- [69] 日本エネルギー学会 (2009). バイオマスハンドブック 第2版 (p. 2). オーム社
- [70] 日本建設業連合会 (2012). 建築系混合廃棄物の原単位調査報告書.
- [71] 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2018). 木質バイオマス熱利用の加速度的な拡大について (提言) .
- [72] 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2019). 発電用木質バイオマス燃料の需給動向調査. 東京ビッグサイト.
- [73] 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2019). FIT 認定木質バイオマス発電所一覧 (全国版) .

- <https://www.jwba.or.jp/データベース/一般公開用データ-目次/fit> 制度における木質バイオマス発電所/ (accessed 2019/07/16)
- [74] Noon, C., & Daly, M. (1996). GIS-based biomass resource assessment with BRAVO. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 101–109. doi:10.1016/0961-9534(95)00065-8
- [75] 農林水産省 (2008). 2005 年農林業センサス.
- [76] 農林水産省 (2008). 平成 19 年度耕地及び作付面積統計.
- [77] 農林水産省 (2009). 平成 19 年度作物統計.
- [78] 農林水産省 (2010). バイオマス活用推進基本計画.
- [79] 農林水産省 (2012). 2010 年世界農林業センサス.
- [80] 農林水産省 (2015). 平成 25 年度林業経営統計調査報告（確報）.
- [81] NumPy, <http://www.numpy.org/>
- [82] Ooba, M., Fujita, T., Mizuochi, M., Fujii, M., Machimura, T., & Matsui, T. (2012). Sustainable Use of Regional Wood Biomass in Kushida River Basin, Japan. *Waste and Biomass Valorization*, 3(4), 425–433. doi:10.1007/s12649-012-9157-z
- [83] Pandas, <https://pandas.pydata.org/>
- [84] Panichelli, L., & Gnansounou, E. (2008). GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities. *Biomass and Bioenergy*, 32(4), 289–300. doi:10.1016/j.biombioe.2007.10.008
- [85] Persson, U. (2015). Stratego. Enhanced heating and cooling plans. Quantifying the Excess Heat Available for District Heating in Europe. Work Package 2. Background Report 7.

-
- [86] Python, <https://www.python.org/>
- [87] Ranta, T. (2005). Logging residues from regeneration fellings for biofuel production a GIS-based availability analysis in Finland. *Biomass and Bioenergy*, 28(2), 171–182.
doi:10.1016/j.biombioe.2004.08.010
- [88] REN21. (2018). Renewables 2018 Global Status Report.
- [89] 林野庁 (2009). 林野庁業務資料（国有林 GIS データ）.
- [90] 林野庁 (2018). 平成 29 年度森林・林業白書.
- [91] 林野庁 (2019). 平成 30 年度森林・林業白書.
- [92] Rosa, D., Boulter, Church, & Svendsen. (2012). District heating (DH) network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study. *Energy*, 45(1), 960–974. doi:10.1016/j.energy.2012.06.062
- [93] 石油情報センター (2015, June 5). 給油所小売価格.
- [94] Shabani, N., Akhtari, S., & Sowlati, T. (2013). Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 299–311.
doi:10.1016/j.rser.2013.03.005
- [95] Sheng, X., & Duanmu, L. (2016). Electricity consumption and economic analyses of district heating system with distributed variable speed pumps. *Energy and Buildings*, 118, 291–300.
doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.005
- [96] 資源エネルギー庁 (2007). エネルギー源別標準発熱量一覧表.
- [97] 資源エネルギー庁 (2018). 第 5 次エネルギー基本計画.
- [98] 資源エネルギー庁 (2019). 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト.
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> (accessed 2019/07/20)

- [99] 資源エネルギー庁 (2019). 平成 29 年度 (2017 年度) におけるエネルギー需給実績 (確報) .
- [100] 下田 吉之, 柳 邦治, 水野 稔 (2001). 熱需要の変動を考慮した清掃工場廃熱活用熱電併給システムに関する研究. *空気調和・衛生工学会 論文集*, 26(80), 27–35.
doi:10.18948/shase.26.80_27
- [101] 新エネルギー産業技術総合開発機構 (2014). バイオマス賦存量・利用可能量の推計.
- [102] 総務省 (2006). 平成 17 年度固定資産の価格等の概要調書.
- [103] 総務省統計局 (2007). 平成 18 年事業所・企業統計.
- [104] 総務省統計局 (2010). 国勢調査に関する地域メッシュ統計.
- [105] 総務省統計局 (2013). 平成 22 年国勢調査.
- [106] 総務省統計局 (2015). 平成 25 年住宅・土地統計調査結果.
- [107] Spatialite, <https://www.gaia-gis.it/gaia-sins/>
- [108] SQLite, <https://www.sqlite.org/>
- [109] Sultana, A., & Kumar, A. (2011). Optimal configuration and combination of multiple lignocellulosic biomass feedstocks delivery to a biorefinery. *Bioresource Technology*, 102(21), 9947–9956. doi:10.1016/j.biortech.2011.07.119
- [110] 住友 雄太, 古林 敬顕, 中田 俊彦 (2015). 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), 1–11.
- [111] Togawa, T., Fujita, T., Dong, L., Fujii, M., & Ooba, M. (2014). Feasibility assessment of the use of power plant-sourced waste heat for plant factory heating considering spatial configuration. *Journal of Cleaner Production*, 81, 60–69. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.010

- [112] 都市環境エネルギー協会 (2013). 地域冷暖房技術手引書改訂第4版.
- [113] Unternährer, J., Moret, S., Joost, S., & Maréchal, F. (2017). Spatial clustering for district heating integration in urban energy systems: Application to geothermal energy. *Applied Energy*, 190, 749–763. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.136
- [114] Werner, S. (2016). European District Heating Price Series. ENERGIFORSK
- [115] Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617–631. doi:10.1016/j.energy.2017.04.045
- [116] Yabe, N. (2013). Environmental and economic evaluations of centralized biogas plants running on cow manure in Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy*, 49, 143–151. doi:10.1016/j.biombioe.2012.12.001
- [117] 八木 賢治郎, 中田 俊彦 (2008). 資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス小規模ガス化システムの経済性評価. *日本エネルギー学会誌*, 86(2), 109–118. doi:10.3775/jie.86.109
- [118] Yagi, K., & Nakata, T. (2011). Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technical characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2883–2892. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.032
- [119] 山本 博巳, 福田 桂, 井上 貴至, 山地 憲治 (2007). わが国の地域別バイオマスバランス表の開発によるバイオエネルギー資源量のシステム評価. *日本エネルギー学会誌*, 86(6), 403–410. doi:10.3775/jie.86.403
- [120] 柳田 高志, 吉田 貴紘, 久保山 裕史, 陣川 雅樹 (2015). 再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した木質バイオマス発電事業における原料調達価格と損益分岐点の関係. *日本エネルギー学会誌*, 94(3), 311–320. doi:10.3775/jie.94.311
- [121] Yemao, L., Pan, W., Xia, J., & Jiang, Y. (2019). Combined heat and water system for long-

- distance heat transportation. *Energy*, 172, 401–408. doi:10.1016/j.energy.2019.01.139
- [122] Yoshioka, T., Sakurai, R., Aruga, K., Sakai, H., Kobayashi, H., & Inoue, K. (2011). A GIS-based analysis on the relationship between the annual available amount and the procurement cost of forest biomass in a mountainous region in Japan. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4530–4537. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.029
- [123] Zambelli, P., Lora, C., Spinelli, R., Tattoni, C., Vitti, A., Zatelli, P., & Ciolli, M. (2012). A GIS decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production. *Environmental Modelling & Software*, 38, 203–213. doi:10.1016/j.envsoft.2012.05.016
- [124] Zhang, F., Wang, J., Liu, S., Zhang, S., & Sutherland, J. W. (2017). Integrating GIS with optimization method for a biofuel feedstock supply chain. *Biomass and Bioenergy*, 98, 194–205. doi:10.1016/j.biombioe.2017.01.004

補遺

A1. パイプ内径の評価

熱供給に使用する熱導管パイプ内径は、体積流量および熱媒の流速によって得られる。

体積流量 V_v [m³/s]は以下で求める。

$$V_v = \frac{Q_d}{C_p \rho t \cdot \Delta T} \quad (\text{A-1})$$

C_p : 熱媒の定圧比熱[J/kg・K]

ρ : 熱媒の密度[kg/m³]

t : 運用時間[s]

ΔT : 温度差[K]

Q_d : パイプのセグメントにおける熱負荷[J]

これを元に、熱媒の流速 v [m/s]からパイプ内径 d [m]を以下の式から求める。

$$d = \sqrt{\frac{4V_v}{\pi v}} \quad (\text{A-2})$$

v : 熱媒の流速[m/s]

A2. 圧力損失の評価

本研究では、熱導管における圧力損失 $\Delta P[\text{Pa}]$ を直管部の圧力損失とし、これを求める以下の式（ダルシーワイスバッハの式）を使用した。

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$$

(A-3)

λ : 熱媒の動摩擦係数

l : 管長[m]

d : 管径[m]

熱導管内の流れの状態は乱流であるとみなすことができ、このときの熱媒の摩擦係数 λ は流れの状態を表す物理量であるレイノルズ数 Re を用いて以下のように表せる。

$$\lambda = 0.0055 \cdot \left(1 + \left(20000 \frac{\epsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

(A-4)

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

(A-5)

ϵ : 管壁等価粗さ[m]

μ : 熱媒の粘度 [Pa・s]

A3. ポンプ動力の評価

送水に必要なポンプ動力 W' [W]は以下の式によって求める。

$$W' = \frac{\rho g V_v h}{\eta_p \eta_n} \quad (\text{A-6})$$

h_p : ポンプ水頭[m]

η_p : ポンプ効率

η_n : モーター効率

ポンプ水頭は圧力損失 ΔP によって以下のように表せる。

$$h_p = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (\text{A-7})$$

したがって、所要ポンプ動力は

$$W' = \frac{\Delta P V_v}{\eta_p \eta_n} \quad (\text{A-8})$$

となる。なお、本研究ではポンプ効率 η_p を 0.7、モーター効率 η_n を 0.9 とした。

A4. 配管における熱損失

配管における微小区間 dx における温度低下 dT による熱収支から、以下の等式が成り立つ。

$$C_p \rho V_v \frac{dT}{dx} = \pi dk(T_{out} - T) \quad (\text{A-9})$$

k : 管および断熱材の熱通過率[W/m²/K]

T_{out} : 管外部温度[K]

T : 熱媒温度[K]

熱通過率は熱伝導率 h_r [W/m/K]と管部（および断熱材厚さ） w [m]により、以下のように表される。

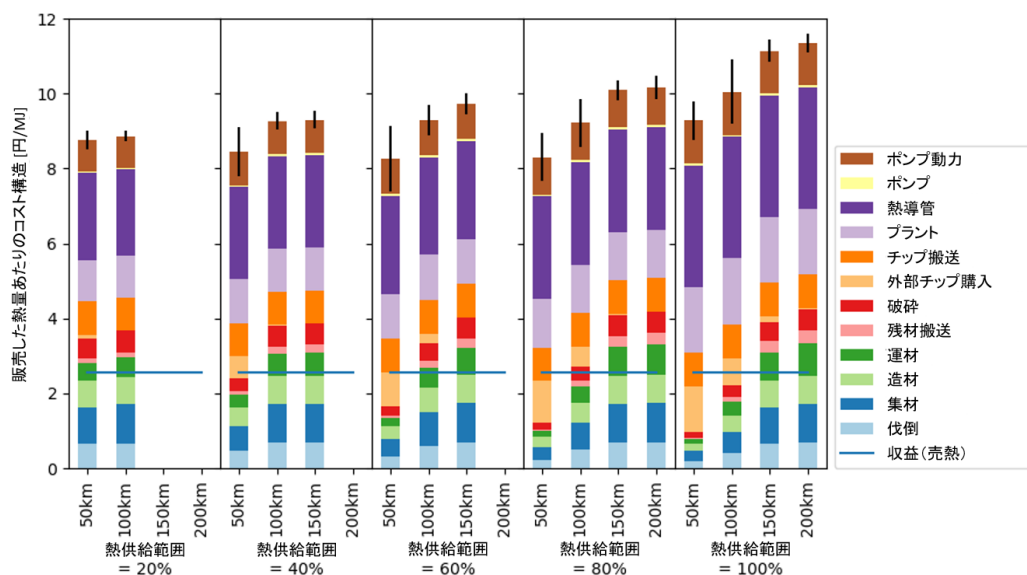
$$k = h_r w \quad (\text{A-10})$$

前記の熱収支式を送水・還水温度 $T_s \rightarrow T_d$ 、管長 $0 \rightarrow l$ で定積分することにより、送水区間における熱損失 Q は以下の形になる。

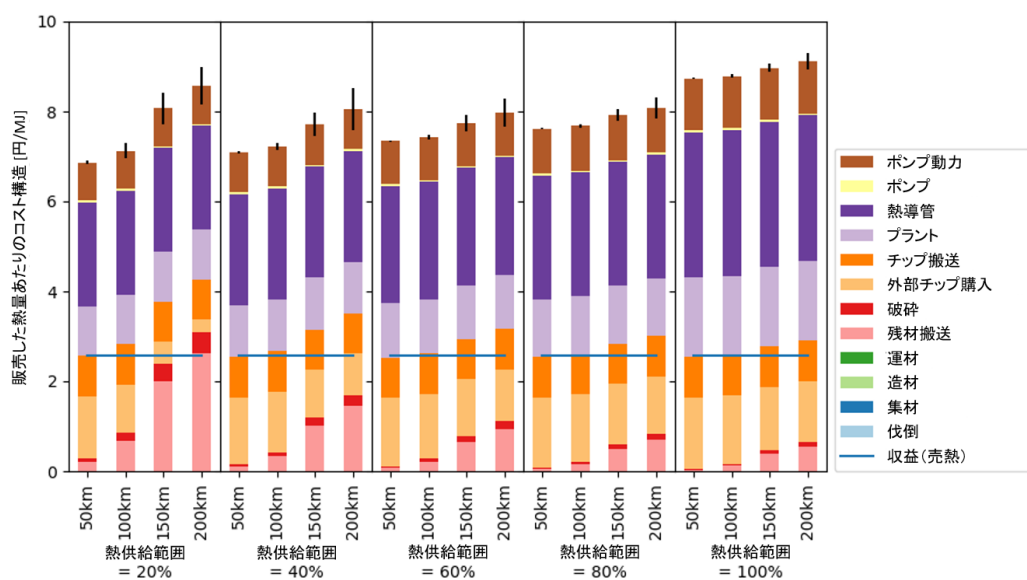
$$\begin{aligned} Q &= C_p \rho V_v (T_s - T_d) \\ &= C_p \rho V_v (T_s - T_{out}) \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi dlhw}{C_p \rho V_v}\right) \right) \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

A5. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおけるエネルギー供給コストの内訳

3.3.2.1 では一部のコスト要素を集約した図を示したが、ここではその内訳を示したものを掲載する。



(a) 全木利用



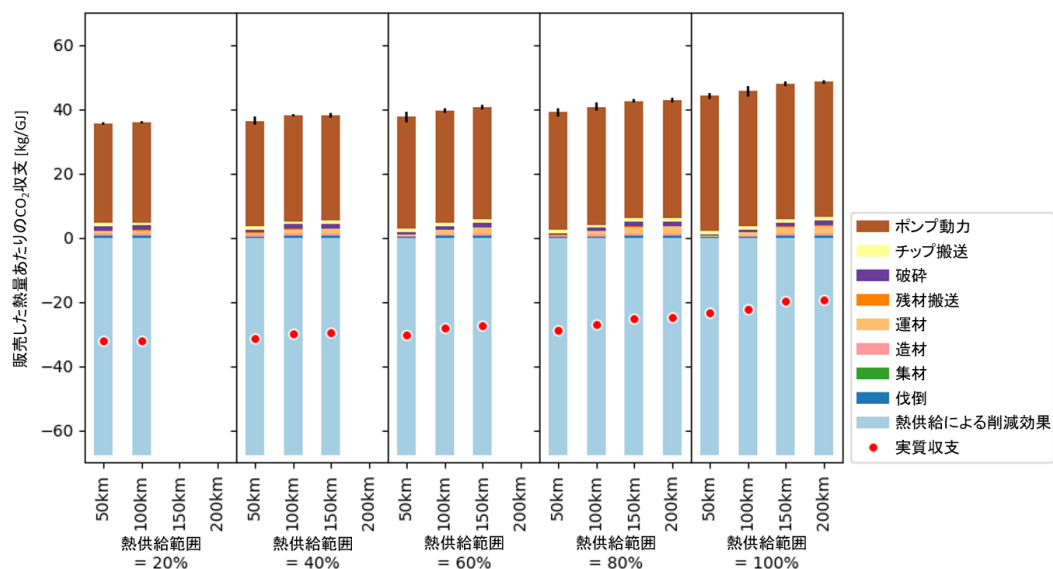
(b) 土場残材利用

Fig. A-1. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 8 に破碎施設を設置した場合の供給した熱量あたりの平均コスト構成

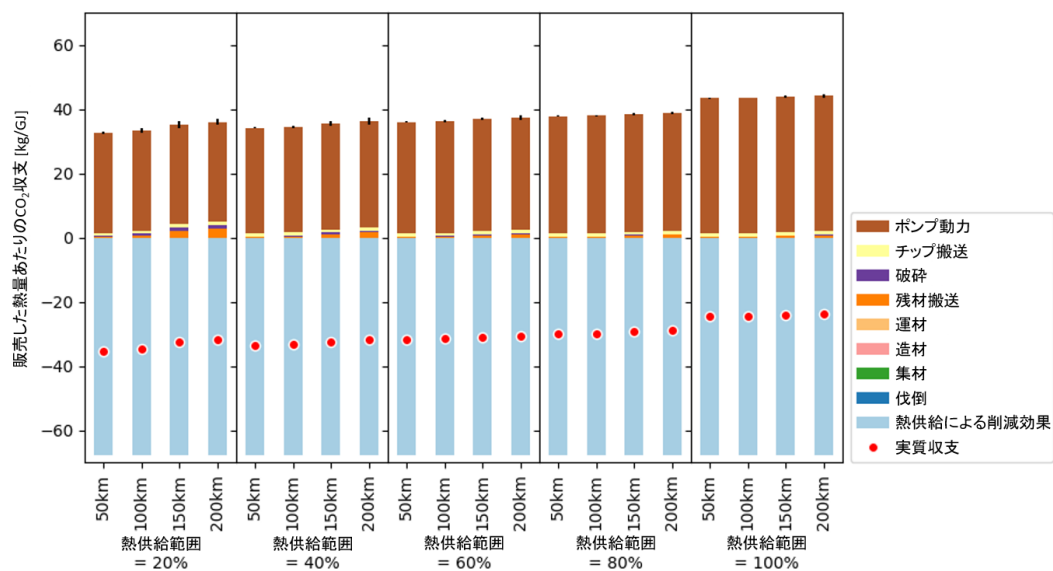
km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間におけるコストの年次変動幅、青線は灯油の LHV 相当単価で熱を供給した場合の収益をそれぞれ表す。各熱供給範囲において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合のコスト推定結果は示していない。

A6. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける CO₂ 排出および排出削減量の内訳

3.3.2.1 では一部の排出量を集約した図を示したが、ここではその内訳を示したものを掲載する。



(a) 全木利用



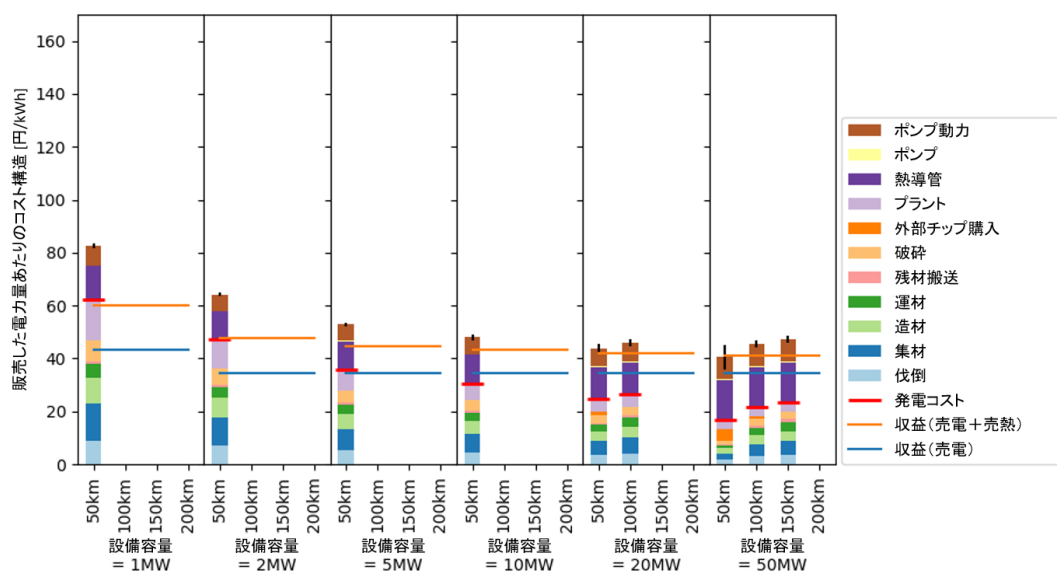
(b) 土場残材利用

Fig. A-2. 中規模分散型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 8 に破碎施設を設置した場合の供給した熱量あたりの平均 CO₂ 排出源の内訳および排出削減効果

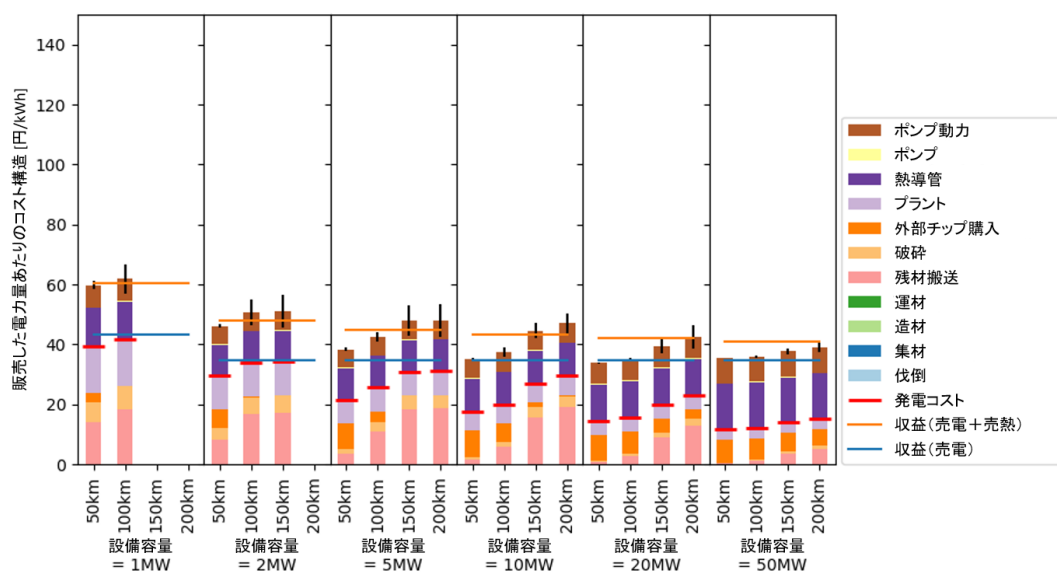
km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間における年次変動幅、赤点は実質排出削減効果を表す。各熱供給範囲において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合の排出および排出削減効果の推定結果は示していない。

A7. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおけるエネルギー供給コストの内訳

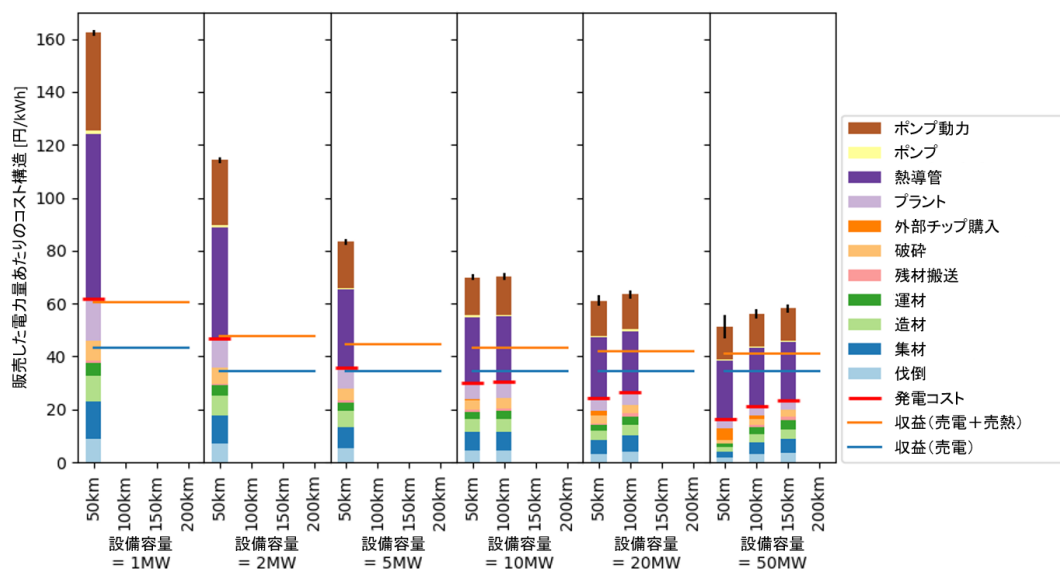
3.3.2.2 では一部のコスト要素を集約した図を示したが、ここではその内訳を示したものを掲載する。



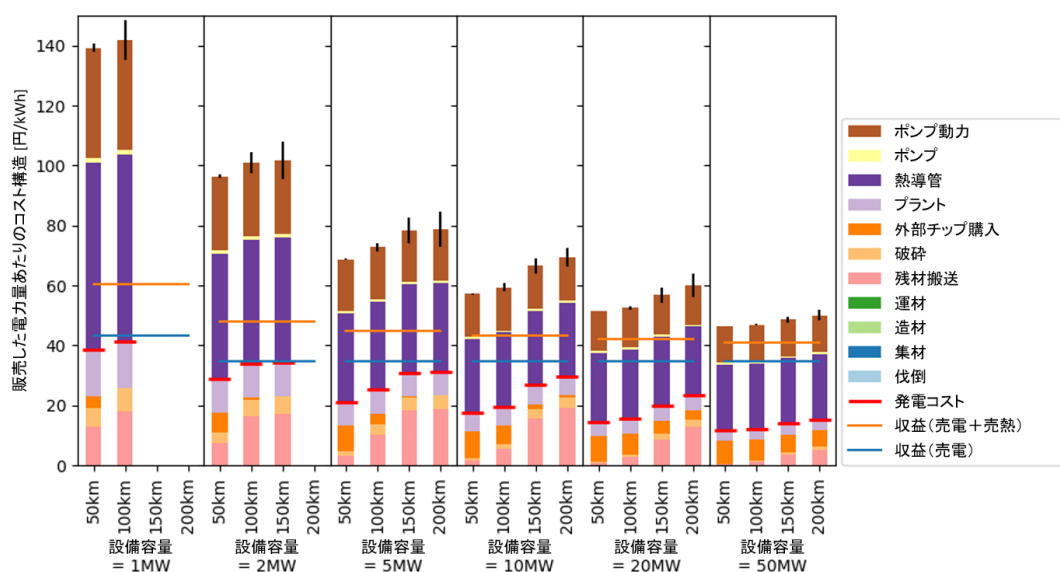
(a) 全木利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(b) 土場残材利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(c) 全木利用（立地候補地点 19：ワーストケース）



(d) 土場残材利用（立地候補地点 19：ワーストケース）

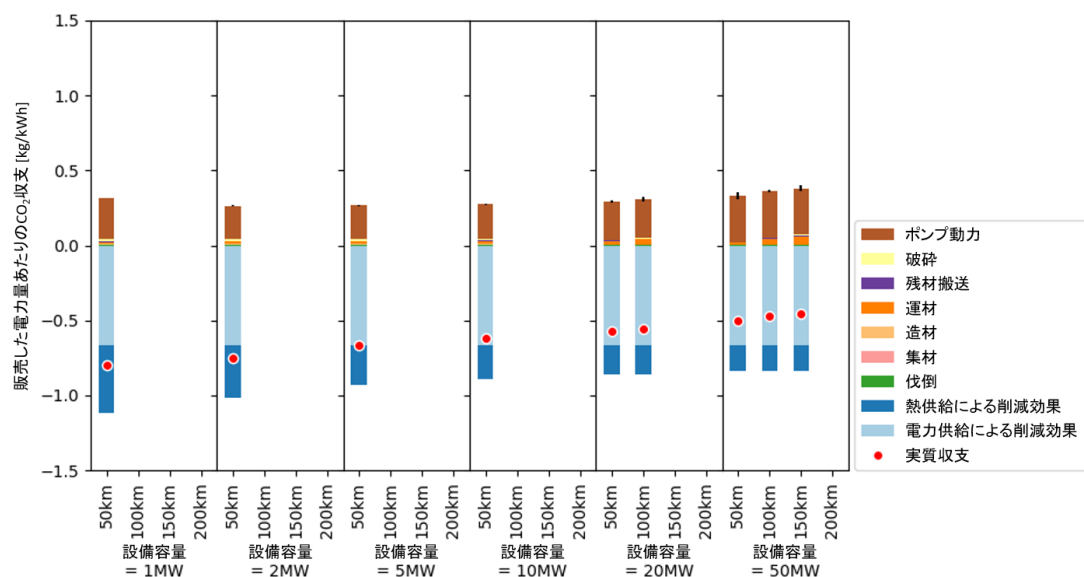
Fig. A-3. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける、立地候補地点 13 にプラントを設置した場合（ベストケース：(a)および(b)）と立地候補地点 19 にプラントを設置した場合（ワーストケース：(c)および(d)）での販売した電力量あたりの平均コスト構成

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間におけるコストの年次変動幅、赤線は発電に必要なコスト、青線は売電によって得られる収益、橙線は発電によって得られる収益に灯

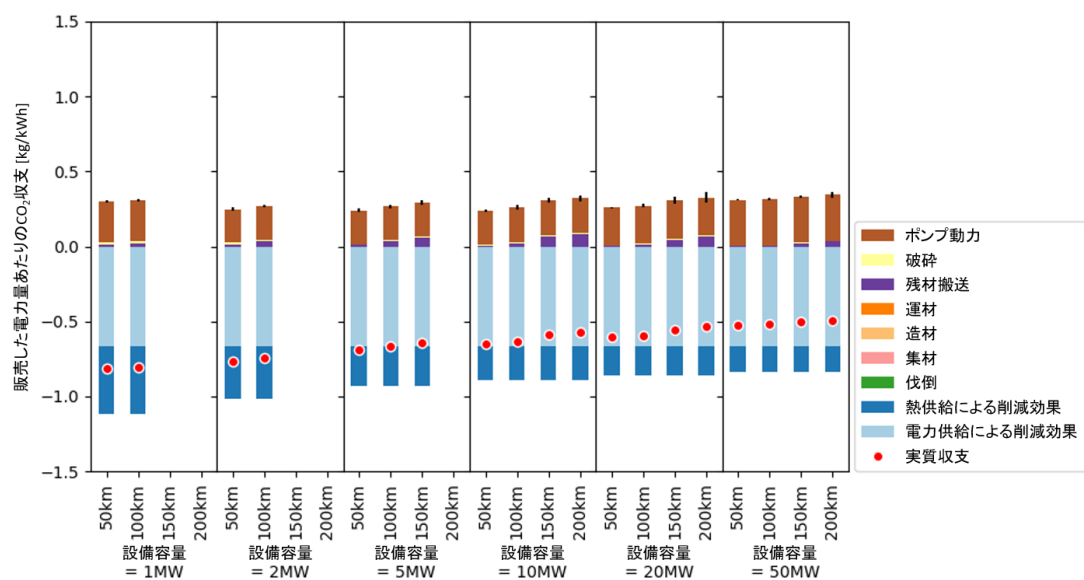
油の LHV 相当単価で熱を供給した場合に得られる収益を加えた値をそれぞれ表す。各プラントの設備容量において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合のコスト推定結果は示していない。

A8. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける CO₂ 排出および排出削減量の内訳

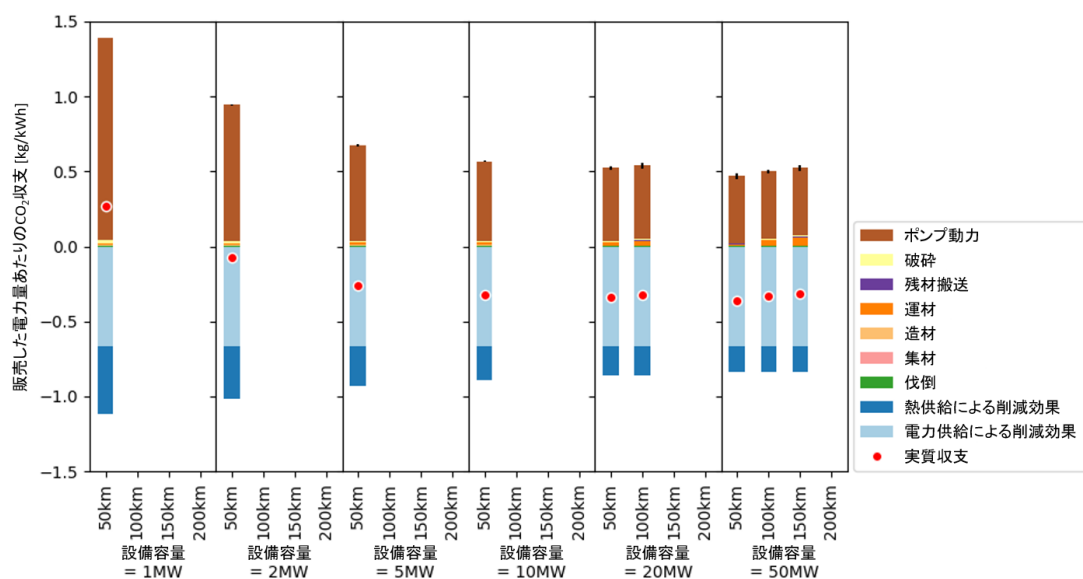
3.3.2.2 では一部の排出量を集約した図を示したが、ここではその内訳を示したものを掲載する。



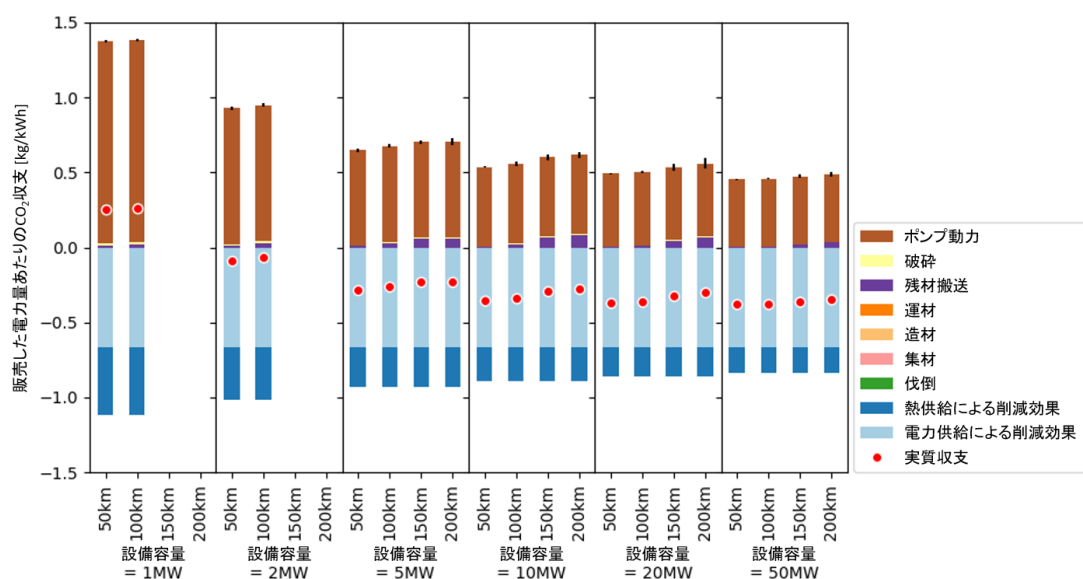
(a) 全木利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(b) 土場残材利用（立地候補地点 13：ベストケース）



(c) 全木利用（立地候補地点 19：ワーストケース）



(d) 土場残材利用（立地候補地点 19：ワーストケース）

Fig. A-4. 大規模集中型エネルギー利用モデルにおける、全木利用シナリオの元で販売した電力量あたりのCO₂排出源の内訳および排出削減効果

km 値は最大搬送距離条件、エラーバーは評価期間における年次変動幅、赤点は実質排出削減効果を表す。各プラントの設備容量において、地域資源によって既に需要が充足されており搬送距離を拡大しても結果が変化しない場合の排出および排出削減効果の推定結果は示して

いない。