

5-1 地域物質フローモデル・都市エネルギー最適利用モデルの構築

片山裕規（(財)科学技術交流財団）

1. 研究の目的と概要

地域社会を持続的に発展させていくためには、資源・エネルギーを有効利用する技術や制度の導入拡大が急務となっている。その一つとして、都市の一般廃棄物をマテリアルリサイクルまたはサーマルリサイクルによって再利用することが行われている。これらのリサイクルを導入する場合には、地域の規模や構成、環境性や経済性などの様々な要因を考慮し、ベストミックスを実現していくことが重要である。マテリアルリサイクル技術の場合、技術的には省エネルギー性などは地域に依存しないが、その導入可能性、すなわちリサイクル製品の需要は地域によって異なる。一方、サーマルリサイクル技術の場合、特に熱供給を行う場合には、省エネルギー効果やCO₂排出削減効果は地域の需要構成や密度によって大きく異なる。マテリアル・サーマルリサイクル技術のベストミックスを実現するためには、このような地域の特徴を考慮することが重要である。

本研究では、任意のエリアや市区町村単位を対象として、一次エネルギー削減やCO₂排出削減等の観点から、地域に適したマテリアル・サーマルリサイクル技術のベストミックスを簡易的に算定するためのツールの構築を行った。本ツールは、各種のマテリアル・サーマルリサイクル技術に関するデータベース、メッシュ統計情報に基づく地域データベースを備え、地域の一般廃棄物の排出量と内訳、エネルギー需要の構成と密度に応じて最適なりサイクル技術の選択を行うことができる。

本ツールでは、検討対象地域として、1) 愛知県内の任意の10km×10kmのエリア、2) 市区町村に加えて、3) 仮想都市を選択できる。検討対象地域における各種の需要データに関しては、一般公開されているメッシュ統計情報等に基づいているため、国内の様々な地域にも適用可能である。したがって、本ツールは、自治体や地方団体が一般廃棄物のマテリアル・サーマルリサイクルを検討する初期の段階で、各種技術の適用効果を概算するような利用において有効と考えられる。また、本ツールによって様々な地域におけるサーマルリサイクルの効果を明らかにすることにより、マテリアルリサイクル技術を導入していくための技術開発目標の設定を行うことができる。

2. フェーズ I の成果

2-1. 目的及び目標

フェーズ I では、ツールの概要設計を行うとともに、ツールを構成する個々のプログラムやデータベースの構築を行う。特に、サーマルリサイクル技術に関して、一般廃棄物の処理量、周辺地域の需要構成・密度に応じた地域熱供給の最適導入地域の算定プログラムを開発し、仮想都市を対象として、サーマルリサイクルの最適導入形態の検討を行う。また、サーマルリサイクル技術について、将来的な導入可能性や現状技術のスケールメリット等について実態調査を行い、エネルギー効率等に関するスケールメリットを定式化し、ツールで用いるためのデータベースを構築する。また、各種マテリアルリサイクル技術についても、文献調査を中心として、エネルギー収支およびバージン材料からの製造に対する省エネルギー性に関して調査を行い、データベース化する。

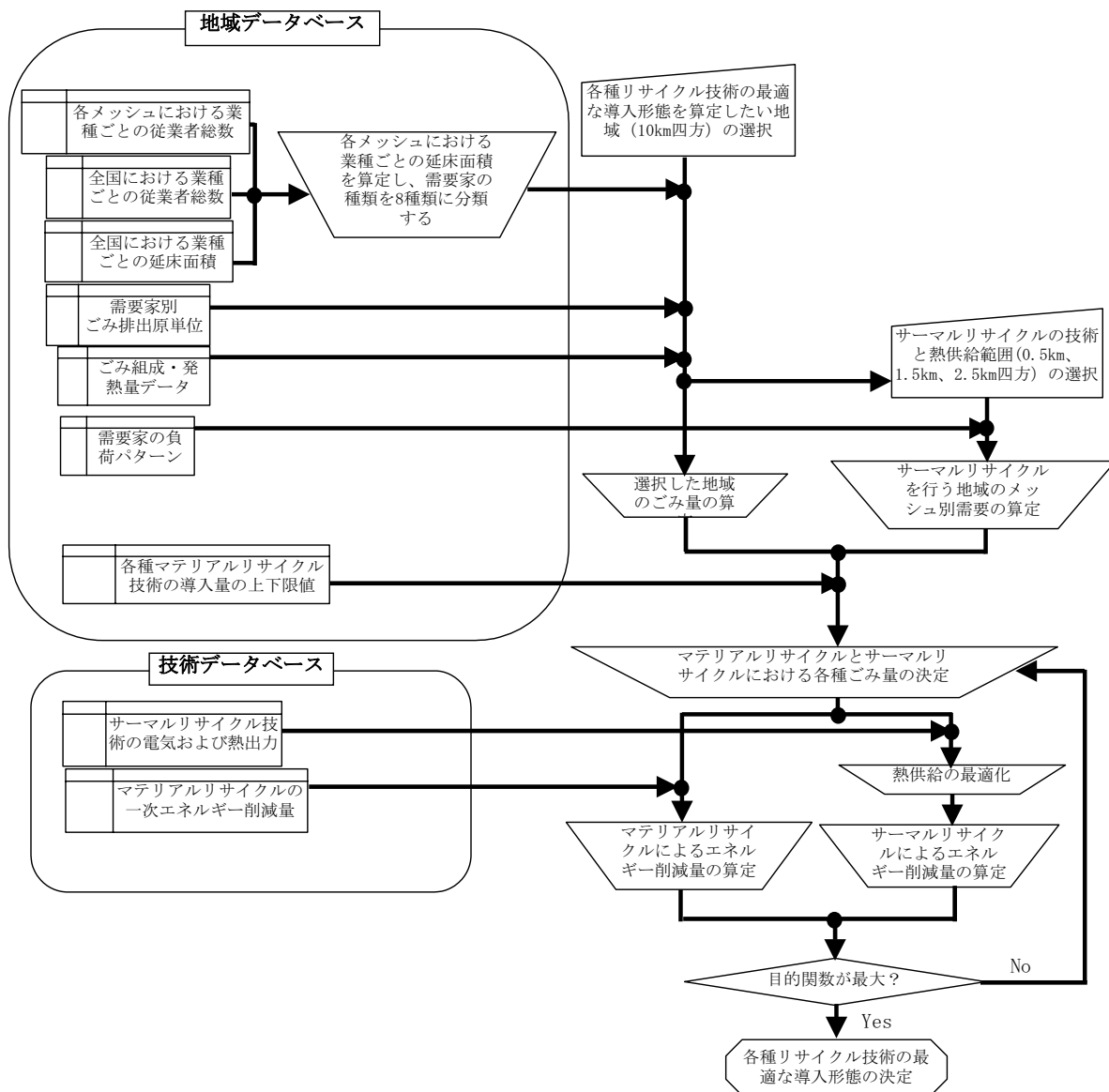


図1 ツールの計算フローチャート

2-2. ツールの概要設計

2-2-1 ツールにおけるマテリアル・サーマルリサイクルの選択方法

本ツールは、任意の地域を対象として、そこから発生する一般廃棄物に対する各種マテリアル・サーマルリサイクル技術の最適な導入形態について、一次エネルギー削減量最大化またはCO₂排出削減量最大化の様々な観点から算定するものである。図1に本ツールのフローチャートを示す。また、図2に本ツールに

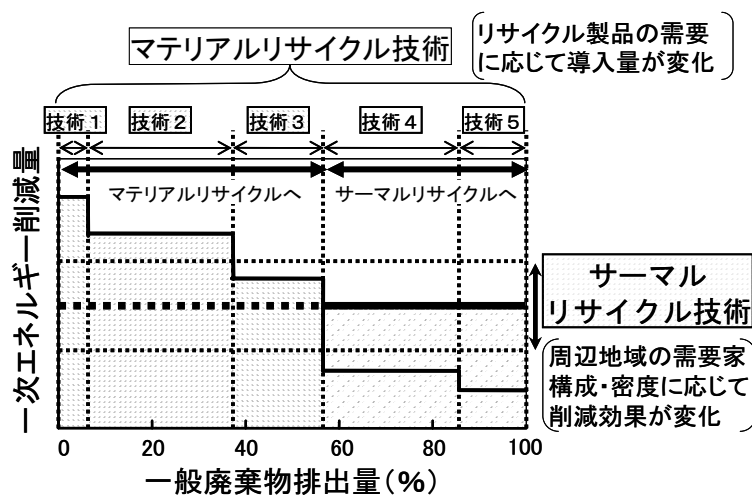


図2 マテリアル・サーマルリサイクル技術選択メカニズム

におけるマテリアルリサイクル技術とサーマルリサイクル技術の選択メカニズムを示す。マテリアルリサイクルにおける一次エネルギー削減量等は地域的な差が小さいと考えられるのに対し、特に熱供給を伴うサーマルリサイクルについては、導入される地域によって効果が異なる。そこで本ツールでは、地域メッシュ統計情報に基づき、検討対象地域をメッシュモデルとして表すことによってサーマルリサイクルとしての熱供給の導入効果を算定する。その結果をマテリアルリサイクル技術導入の基準値とし、検討対象地域の各メッシュからの一般廃棄物に対して最適なマテリアル・サーマルリサイクル技術の選択を行う。

なお、サーマルリサイクルの導入効果は、熱供給の効率や稼働率等、周辺の需要家構成に依存するだけでなく、廃棄物の収集量によるサーマルリサイクル技術のスケールメリットによっても変化する。また、マテリアルリサイクルについても、リサイクルによって製造された製品の需要は検討対象地域ごとに異なる。本ツールでは、各種の需要家情報は地域データベースを備え、地域データベースに基づき、図2に示すようにマテリアルリサイクル製品の需要について上下限値を設定し、マテリアルリサイクルの導入可能性を算定することができる。

本ツールにおける一連の計算は、整数計画法によって定式化されている。しかし、グラフィカルユーザーインターフェース (GUI) を備えることにより、ユーザは複雑な計算を意識することなく、以下に示す様に、地図上での検討対象地域の選択や目的に応じて各種の値を設定するだけで、計算を実行することができる。

2-2-2 計算手順

計算手順は以下の通りである。

1. マテリアル・サーマルリサイクル技術の導入を検討する地域を選択する。本ツールでは、以下の3ケースから選択できる。
 - a. 仮想都市 (2km×2km のメッシュで構成される正方形のエリア)
 - b. 愛知県内の任意の 10km×10km エリア
 - c. 愛知県内の市区町村
2. サーマルリサイクル技術として、従来型ごみ発電やガス化+燃料電池システム等から一つ選択する。また、熱供給範囲を 0.5km×0.5km、1.5km×1.5km および 2.5km×2.5km 四方の大きさの中から選択する。(仮想都市の場合は 2.5km×2.5km 四方のみ)
3. マテリアルリサイクル製品の供給量について、上下限値を設定する。愛知県内の実際の地域を対象とするケースについては、検討対象地域におけるバージン素材からの製品消費量をリサイクル製品需要のデフォルト値とするが、目的に応じて個別に設定を変更することも可能である。
4. 最適化計算を実行し、一次エネルギー削減量最大化、コスト最小化およびCO₂排出量最小化等の評価項目について、地域の最適なりサイクル技術の導入形態等の結果を出力する。

2-2-3. 最適地域熱供給地域の算定プログラム

本ツールでは、一般廃棄物のサーマルリサイクルとして、ごみ発電だけでなく、その排熱を利用した地域熱供給を考慮する。本ツールで想定している地域のエネルギーフローを図3に示す。同図右側上段の需要家群は、現状のシステム (系統電力、都市ガス、灯油、LPG) によってエネルギー供給が行われる。サーマルリサイクル導入時には、一部の需要家に対して地域熱供給が導入され、ごみ発電所の排熱を温水や暖房用に利用する。熱供給は 50℃の温水によって行われ、排熱が不足する場合は、補助ボイラが用いられる。補助ボイラ用の燃料は、地域の都市ガス普及状況を考慮して、都市ガスまたは重油のいずれかが自動的に選択される。なお、一般的には吸収式冷凍機等の導入によって冷熱の供

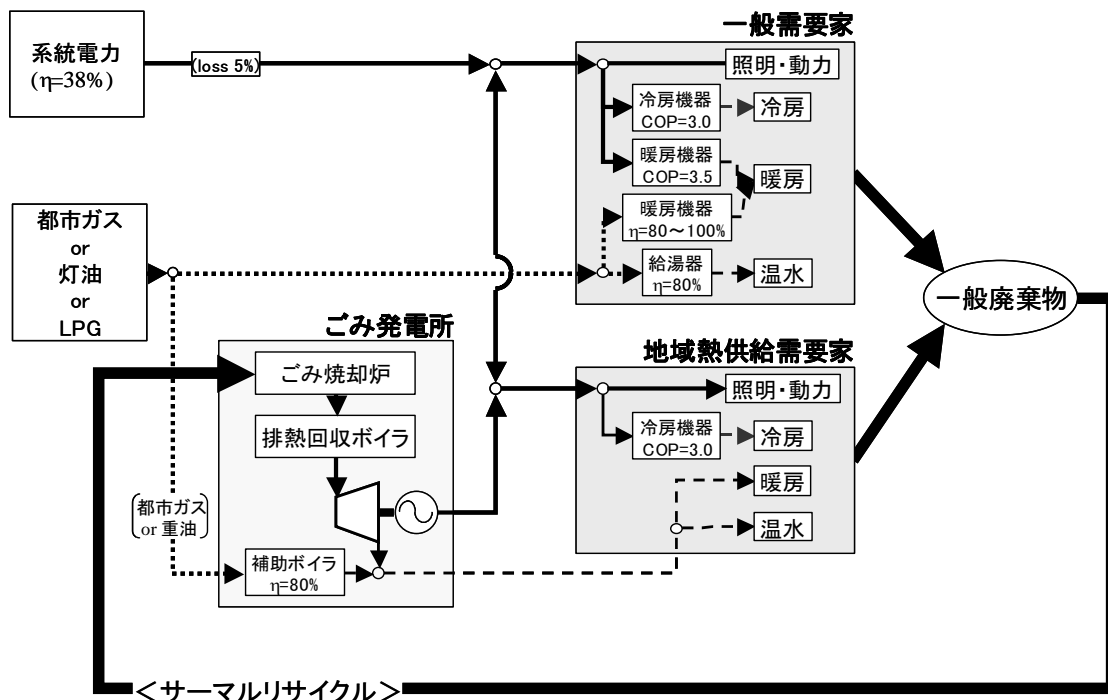


図3 ごみ発電所からの地域熱供給導入時のエネルギーフロー

給も可能と考えられるが、本ツールでは考慮していない。

地域熱供給の最適導入形態や導入効果は、地域の需要構成や密度によって大きく異なる。そこで本ツールでは、ごみ発電所の周辺地域を図4に示すようなブロックモデルによって表し、混合整数計画法を用いて、一次エネルギー最小化などの目的関数に応じて地域熱供給が行われるブロックを算定する。各ブロックの需要家構成については、地域メッシュ統計情報等に基づき設定する。ただし、計算簡単化のため、各ブロック内に需要家が均一に分布していると想定する。ごみ発電所は中心ブロックに位置し、熱供給対象の候補となる範囲としては、

- 1) 中心ブロックのみ、
- 2) 9ブロック (1.5km×1.5km)、
- 3) 25ブロック (2.5km×2.5km)

の3通りを選択できるものとした。また、ごみ発電所が位置する中心から各ブロックまでとブロック内に配管距離を考慮して、熱損失およびポンプ動力を算定する。なお、熱損失およびポンプ動力算定の簡単化のため、熱輸送配管は、ごみ発電所が位置するブロックから各ブロックまで個別に設置されるものとした。

後述するように、各ブロックの需要構成としては、実際の地域情報に基づき設定する場合と、任意

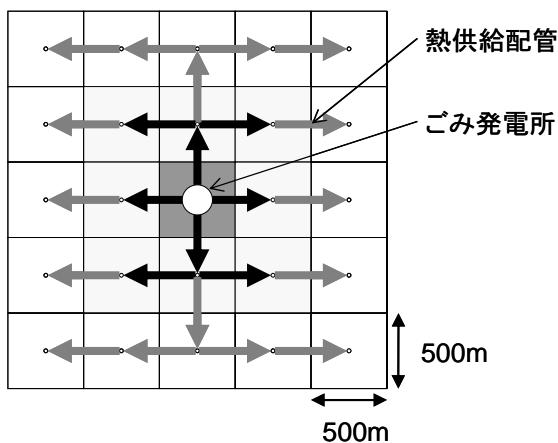


図4 熱供給対象地域のブロック化

の仮想的な需要構成を設定する場合とを考慮した。ただし、実際の地域情報に基づく場合も含めて、需要家は8種類（戸建住宅、集合住宅、事務所、店舗、ホテル、病院、飲食店および学校）とした。各需要家について、文献調査に基づき、電力、冷暖房および温水の各需要パターン（12ヶ月×24時間）を設定した。戸建住宅の給湯負荷の原単位および負荷パターンは文献(1)のものを用いた。冷暖房および照明・動力負荷の負荷原単位は文献(2)より作成し、負荷パターンは文献(3)のものを用いた。集合住宅については、文献(3)の負荷原単位および負荷パターンを用いた。事務所、店舗、ホテル、病院の負荷原単位および負荷パターンについては文献(4)の値を用いた。飲食店および学校の負荷原単位は文献(5)より引用し、負荷パターンはそれぞれ文献(6)および文献(7)から独自に作成した。

2-2-4. 一般廃棄物とマテリアルリサイクル技術の調査

本ツールでは、各種マテリアルリサイクル技術の選択するため、需要家からの一般廃棄物についても、PET、その他プラスチック類、紙類、厨芥、その他可燃物の5種類の排出量を算定する。仮想都市の場合については、各需要家からの一般廃棄物の排出原単位として表1の値を用いて需要家の構成に応じて仮想都市全体の一般廃棄物の総排出量を算定し⁽⁸⁾、一般廃棄物の内訳については名古屋市の実績値を参照した。実際の地域を対象とする場合には、地域の実情に応じて各需要家の一般廃棄物の排出原単位および内訳を設定するが、データが得られない場合には、仮想都市と同様に表1の値と名古屋市の実績値に基づき設定する。

表1 仮想都市における需要家のごみ排出原単位等

	排出原単位	可燃ごみ 排出割合	古紙 回収率	可燃ごみ 排出量
住宅	1.5 kg/人日	73 %	10 %	49.28 t/日
事務所	54 g/m ² 日	82 %	40 %	53.14 t/日
店舗	75 g/m ² 日	75 %	40 %	1.18 t/日
ホテル	69 g/m ² 日	77 %	40 %	3.19 t/日
病院	33 g/m ² 日	60 %	40 %	0.36 t/日
飲食店	75 g/m ² 日	75 %	40 %	1.18 t/日
学校	45 g/m ² 日	80 %	40 %	0.64 t/日

表2 マテリアルリサイクル技術のエネルギー収支の調査結果の一例

入力	出力	一次エネルギー消費量 (MJ/t) *		マテリアルリサイクルによる一次エネルギー削減量 (MJ/t) *	文献
		リサイクル材料 使用時	バージン材料 使用時		
PET	PET	30,038	81,105	51,067	(9)
プラスチック	生成油	4,870	5,784	914	(10)
プラスチック	生成ガス	11,470	20,600	9,130	(10)
紙類	機械パルプ	3,344	30,176	26,832	(11)
紙類	化学パルプ	3,344	26,984	23,640	(11)
厨芥	メタン	836	2,150	1,314	(12)

* : 一次エネルギー消費量の単位重量は入力の廃棄物重量基準

一般廃棄物マテリアルリサイクル技術するエネルギー収支の調査結果の一例を表2に示す。調査結果に基づき、本ツールではPET、その他のプラスチック、紙類、厨芥類およびその他可燃物について、バージン素材からの製造における一次エネルギー消費量、マテリアルリサイクル技術における一次エネルギー消費量、およびバージン素材に対する一次エネルギー削減量などが入力されている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

2-3. 考察及びフェーズ I のまとめ

最適地域熱供給の算定プログラムは概ね完成できた。マテリアルリサイクル技術におけるエネルギー収支については、プラスチックや紙など、代表的な数値を得たのみであったため、フェーズ II においても引き続き調査することとした。

3. フェーズ II の成果

3-1. 目的及び目標

フェーズ II では、マテリアルリサイクル技術とサーマルリサイクル技術のベストミックスを算定するための最適化計算プログラムを構築する。また、フェーズ I で行った仮想都市における検討に加えて、愛知県内の任意の 10km×10km のエリアや市区町村単位でマテリアルリサイクル技術・サーマルリサイクル技術の選択を行えるようにするため、各種地域需要データを収集し、データベース化してツールに組み込む。また、一連の計算を簡単に行うために GUI を構築する。

3-2. ツールの改良

3-2-1. 地域データの収集

家庭部門に関しては平成 12 年度国勢調査⁽¹²⁾、業務部門に関しては平成 13 年度事業所統計調査⁽¹³⁾に基づき、500m×500m (一部は 1km×1km) のメッシュ毎に各種需要家データを設定した。その際、需要家の種類をエネルギー需要やごみの排出原単位⁽⁸⁾に関するデータが得られる 8 種類 (戸建住宅、集合住宅、事務所、店舗、ホテル、病院、飲食店および学校) に分類した。家庭部門については、各メッシュの人口に基づきエネルギー需要や一般廃棄物を算定した。また、業務部門については、各メッシュについて利用可能な業種別の就業員数を用い、全国規模での就業員数と延床面積との関係から、各メッシュにおける業種別の延床面積を算出し、エネルギー需要等を想定した。

3-2-2. GUI の構築

整数計画法を用いて定式化された一連の計算を簡単に実行するために、GUI を構築した。実際の操作手順に沿って、GUI の内容を示す。なお、本報告書では、愛知県内の任意の 10km×10km エリアを対象とする場合を例として GUI の内容を示す。

1. タイトルウィンドウにおいて、検討対象地域を次の 3 ケースの中から選択する。
 - a. 仮想都市 (2km×2km のメッシュで構成される正方形のエリア)
 - b. 愛知県内の任意の 10km×10km エリア
 - c. 愛知県内の市区町村
2. 愛知県内の任意の 10km×10km の地域を選択すると、図5に示すウィンドウが表示され、愛知県の中から検討対象とする 10km×10km のエリアを選択する。選択したエリア



図5 検討対象エリア (10km×10km) の
選択ウィンドウ

の地域情報として、各メッシュにおける人口や一般廃棄物量を表示できる。また、図6に示すように、選択したエリア全体の一般廃棄物の総排出量とその内訳を円グラフで表示できる。

3. 検討対象エリアの選択が終了すると、図7に示すウィンドウが表示され、マテリアルリサイクルのエネルギー消費原単位を設定する。マテリアルリサイクル技術の調査結果に基づき表2に示した値をデフォルト値としているが、ツールの利用者が独自に値を設定することも可能である。
4. 図7のウィンドウでは、各種マテリアルリサイクル製品の供給量の上下限値を設定する。この値は、検討対象地域におけるバージン素材からの製品消費量をデフォルト値としているが、個々に設定を変更することも可能である。
5. マテリアルリサイクル技術・製品需要に関する設定が終了すると、図8に示すようなサーマルリサイクル技術導入地域の拡大図が表示され、以下の3項目について設定を行う。
 - i. サーマルリサイクル技術の選択

従来型ごみ発電やガス化+燃料電池システム等から一つを選択する。これらについては、発電効率や熱回収効率は、予めデフォルト値が入力されているが、独自に設定しなおすことも可能である。
 - ii. 熱供給可能範囲の選択

熱供給の候補となる範囲を 0.5km × 0.5km、1.5km × 1.5km および 2.5km × 2.5km の中から選択する。後述する最適化計算により、一次エネルギー消費削減量を最大化する熱供給ブロックが決定される。但し、最適化計算によって熱供給ブロックを決定するのではなく、手動で任意のブロックを選択することにより、特定のブロックへの熱供給の導入効果を算定することができる。なお、熱供給の候補地域を選択する際の補



図6 一般廃棄物の内訳の表示ウィンドウ



図7 マテリアルリサイクルに関する各種項目の設定ウィンドウ



図8 サーマルリサイクルに関する各種項目の設定ウィンドウ

助的な情報として、本ツールでは、各メッシュにおける人口や一般廃棄物の発生量を表示することができる。また、熱供給対象となりえる需要家として、病院やホテルなどの熱需要の大きい需要家については、個別に位置と施設名を表示できる。

5. マテリアル・サーマルリサイクルの設定を終了した後、マテリアル・サーマルリサイクル技術の最適形態の計算を実行する。
6. 図9に示すように、計算結果として、マテリアルリサイクルおよびサーマルリサイクルされる

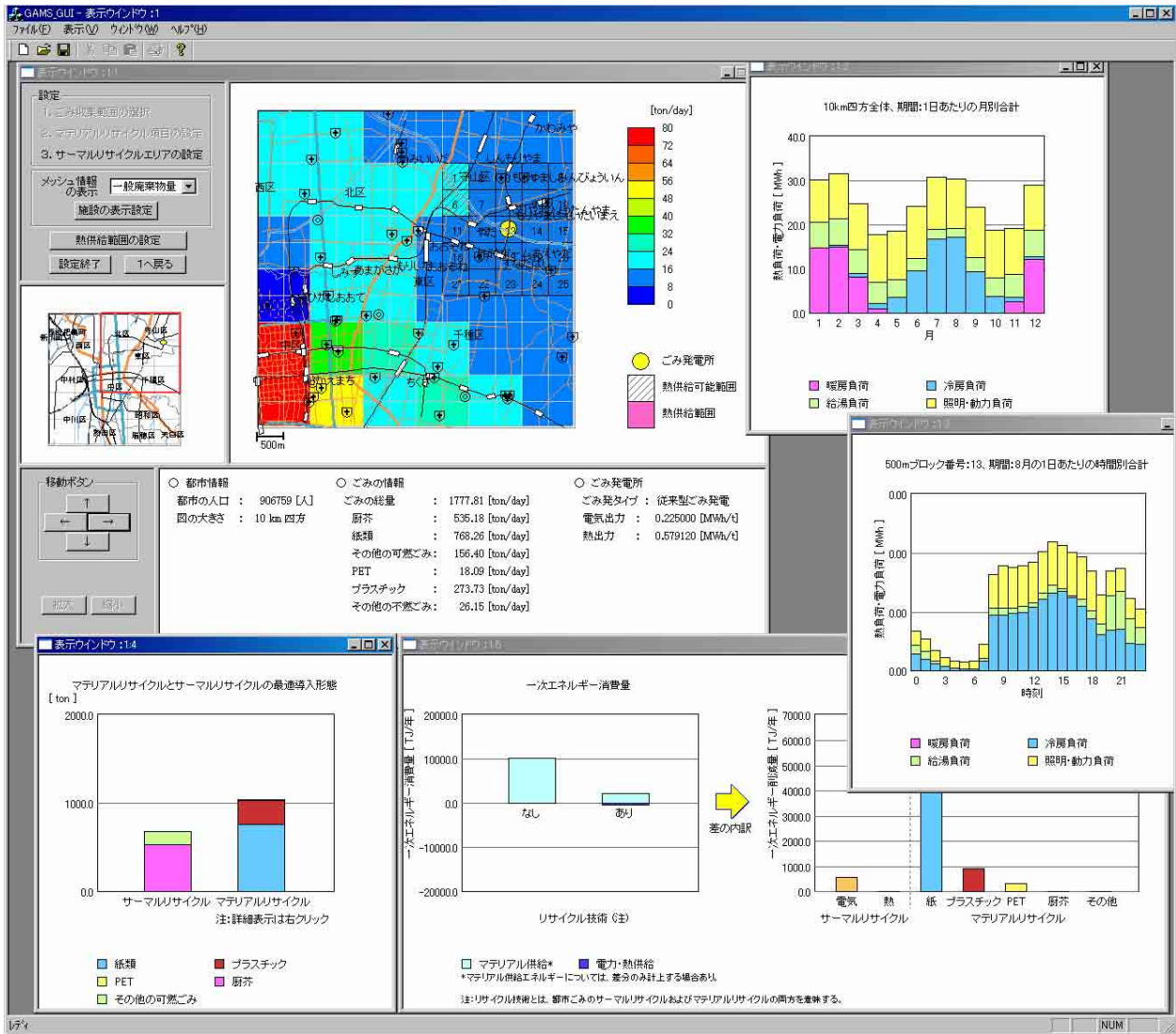


図9 計算結果の出力ウィンドウ

一般廃棄物の内訳、各種マテリアル技術およびサーマルリサイクルにおける一次エネルギー削減量・CO₂排出削減量などを表示する。

3-2-3. 計算例

構築したツールを用いた計算例として、全てのマテリアルリサイクル製品の供給量の上限値を0と設定することにより、サーマルリサイクルのみによる一次エネルギー削減量を計算した。一般廃棄物の収集範囲として、図10に示す名古屋市中心部が位置する2次メッシュ(メッシュコード:523657)とした。このエリアの人口は842,936人、一般廃棄物の排出量は約1904t/日である。

熱供給の候補地域の選択として、次の3ケースを想定した。

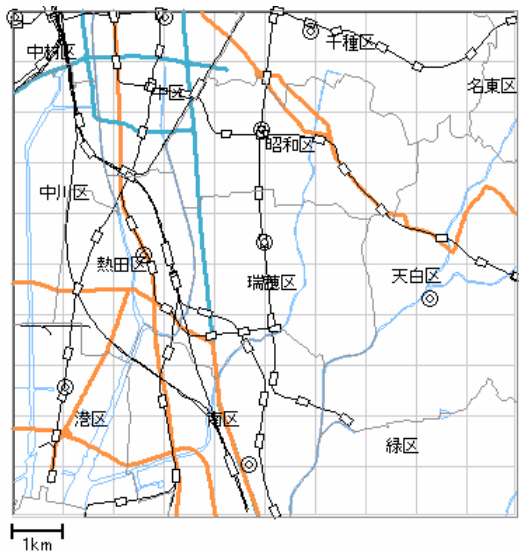


図 10 名古屋市中心部を含む 2 次メッシュ

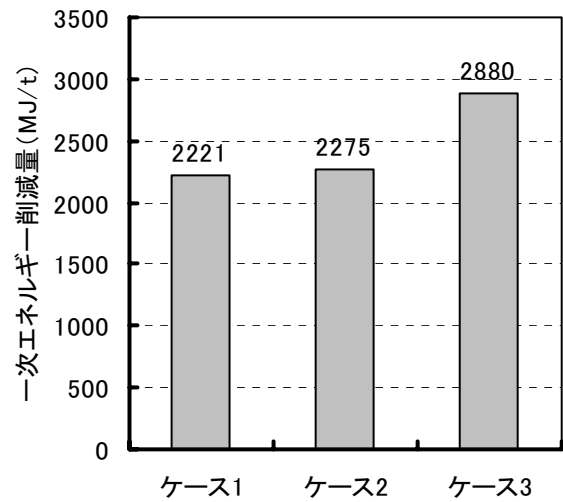


図 11 サーマルリサイクルの適用効果の計算例

ケース 1 人口が一番少ない 500m×500m の 1 メッシュ

ケース 2 人口が一番多い 500m×500m の 1 メッシュ

ケース 3 暖房と給湯の年間需要が一番多い 2.5km×2.5km の 25 メッシュ

結果を図 11 に示す。ケース 1 やケース 2 では、熱需要が小さいため、ごみ発電所からの熱出力のほとんどは利用されず、廃熱として捨てられた。このため一次エネルギー削減量は、ほとんどが発電によるものであり、小さい。これに対してケース 3 では、25 メッシュ中 17 メッシュに対して熱供給が行われ、一般廃棄物 1t あたりの一次エネルギー削減量は 2880 MJ/t と最も大きくなった。

3-3. 考察及びフェーズ II のまとめ

フェーズ II では、地図上で検討対象地域を選択し、目的に応じて各種の値を設定するための GUI を構築し、ツールとしてのフレームワークを完成することができた。各種のマテリアル・サーマルリサイクル技術については、プラスチックや紙など、代表的な数値をデフォルト値として設定した。さらに、検討対象地域の情報については、ツール全体で共通の原単位を設定することにより、ツールを用いた計算を実行可能な状態にすることができた。

4. 成果の達成度

熱輸送効率の簡易計算を用いた最適熱供給エリアの算定、マテリアルリサイクルとサーマルリサイクルの選択のアルゴリズムなど、全体の計算プログラムの構築については、概ね当初設定した目標を達成できた。また、本ツールの利用をサポートするための GUI についても概ね当初設定した目標を達成できた。以上のように、ツールとしてのフレームワークは概ね完成できた。しかし、計算に用いるデータについては、当初の予想よりもデータの入手が困難であり、特にマテリアルリサイクル製品の需要については、十分なデータを収集することはできなかった。

5. 今後の課題

本ツールは、自治体や地方団体が一般廃棄物のマテリアルリサイクルおよびサーマルリサイクルのベストミックスを検討する初期の段階で、各種技術の適用効果を概算する等のコンサルティングへの利用において有効と考えられる。また、本ツールによって様々な地域におけるサーマルリサイクルの効果を明らかにすることにより、マテリアルリサイクル技術を導入していくための技術開発目標の設

定を行うことができる。

このようなツールの利用を促進するためには、今後、以下の改善が必要と考えられる。まず、マテリアルリサイクル技術に関する情報収集については、個別メーカー等への聞き取り調査に加えて、バージン素材を用いる関連技術データに基づく推定などにより、データを拡充する必要がある。これらのデータの拡充は、ツールの利用からのフィードバックによって実現することが望ましく、自己増殖的に各種のリサイクル技術情報を収集、データベース化するための仕組みを構築することが重要である。

また、特に、サーマルリサイクルの導入評価については、他の未利用エネルギーやCGSなどの分散型エネルギー源の影響を考慮する必要がある。これらについては、個別に導入ポテンシャルを算定し地域情報としてデータベース化できているため、今後は、構築中のツールに組み込むためのプログラムの見直しを行う必要がある。

【文献】

- (1) (財)日本ガス機器検査協会：「平成元年度 省エネルギー形ガス燃焼機器の燃焼性能の標準化に関する研究調査報告書」 pp.8-11 (1991)
- (2) 財団法人省エネルギーセンター：「家庭におけるライフスタイルの変化とエネルギー消費に関する実体調査研究報告書」 (1998)
- (3) 尾島俊雄研究室著：「建築の光熱水原単位[東京版]」 (1995)
- (4) 柏木著：「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2000」 日本工業出版 pp35-40, pp249-257 (2000)
- (5) (財)日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター：「民生部門エネルギー消費実態調査(総括編)」 (1995)
- (6) 村川他：「業務用ちゅう房における各種調理機器の使われ方とエネルギー消費量の解析」 空気調和・衛生工学論文集 No.69 pp61-73 (1998)
- (7) 大阪ガス、東京ガス、熊谷組、大林組：「環境調和型高効率エネルギー利用システム開発 最適システム設計技術の研究 トータルシステムの設計・評価の研究 平成6年度成果報告書」 NEDO pp37 (1995)
- (8) 谷口、伊藤著：「地球環境都市デザイン」 理工図書 (1999)
- (9) 今中勲：「ライフサイクルインベントリー分析の手引き」、化学工業日報社 (1998)
- (10) プラスチック処理促進協会：「平成10年度 廃棄物燃料化事業普及基盤整備調査報告書」、pp.12-13、pp.58-60 (1999)
- (11) 古紙リサイクル推進検討会：「今後の古紙リサイクルの向上に向けて 報告書」、pp.28-30 (2000)
- (12) 総務省統計局：「地域メッシュ統計 平成12年度国勢調査」 (2002)
- (13) 総務省統計局：「地域メッシュ統計 平成13年度事業所統計調査」 (2003)