

平成 25 年度
環境研究総合推進費補助金 研究事業
総合研究報告書

アジア都市における日本の技術・政策を活用する
資源循環システムの設計手法に関する研究
(3K113002)

平成 26 年 3 月

研究代表者
国立環境研究所 藤田 壮

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業（平成 23 年度～平成 25 年度）

所管 環境省

国庫補助金 135,262,000 円（複数年度の総計）

研究課題名 アジア都市における日本の技術・政策を活用する資源循環システムの設計手法に関する研究

研究期間 平成 23 年 6 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日

研究代表者名 藤田 壮（国立環境研究所）

研究分担者 藤井 実（国立環境研究所）
徐 開欽（国立環境研究所）
珠坪 一晃（国立環境研究所）
水落 元之（国立環境研究所）
岡寺 智大（国立環境研究所）
小林 拓朗（国立環境研究所）
小野寺 崇（国立環境研究所）
戸川 卓哉（国立環境研究所）
蛭江 美孝（国立環境研究所）
谷川 寛樹（名古屋大学大学院）
加藤 博和（名古屋大学大学院）
奥岡 桂次郎（名古屋大学大学院）
韓 驥（名古屋大学大学院）
吉田 登（和歌山大学）
金澤 孝彰（和歌山大学）
山本 祐吾（和歌山大学）
町村 尚（大阪大学大学院）
松井 孝典（大阪大学大学院）

研究協力者

大西 悟（国立環境研究所）、陳 旭東（国立環境研究所）、孫 穎（横浜国立大学）、
大場 真（東京農業大学）、山口 直久（エックス都市研究所）、
千葉 俊彦（エックス都市研究所）、根本 康男（エックス都市研究所）

目次

| | |
|---|-----|
| 総合研究報告書概要 | 1 |
| 本文 | |
| 第1章 有機系循環資源のリサイクル技術調査と複合リサイクルシステムの評価 | 12 |
| 1.1 概要 | 12 |
| 1.2 有機系循環資源のリサイクル手法の技術調査 | 12 |
| 1.3 アジア地域に適合するリサイクルシステムの設計 | 17 |
| 1.4 アジアへの適用の検討 | 28 |
| 1.5 まとめ | 30 |
| 第2章 アジア地域に適した有機性廃棄物処理技術の開発 | 32 |
| 2.1 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現状調査 | 32 |
| 2.2 無動力攪拌技術を用いた家庭用バイオガス施設の技術改善 | 34 |
| 2.3 無動力攪拌バイオガス施設の実装スケールにおける流体力学シミュレーション | 37 |
| 第3章 アジア地域インフラデータベースの構築 | 41 |
| 3.1 研究背景と目的 | 41 |
| 3.2 研究方法 | 41 |
| 3.3 結果と考察 | 45 |
| 第4章 自然資源 GIS データベースの構築と分析 | 53 |
| 4.1 自然資源 GIS データベースのコンセプトと応用 | 53 |
| 4.2 中国遼寧省における自然資源データベースを利用したサービス収支分析 | 53 |
| 4.3 エクアドルにおける自然資源 GIS の応用 | 62 |
| 4.4 マクロ指標による自然資源需要予測モデルの開発 | 64 |
| 4.5 まとめと提言 | 67 |
| 第5章 都市排水の適正処理システムの開発 | 70 |
| 5.1 背景および実施内容 | 70 |
| 5.2 都市排水処理システムの現状 | 70 |
| 5.3 実証排水処理試験 | 79 |
| 5.4 まとめ | 83 |
| 第6章 産業連関分析を用いた環境技術方策の移転効果の評価 | 85 |
| 6.1 研究背景と目的 | 85 |
| 6.2 研究方法 | 89 |
| 6.3 結果と考察 | 93 |
| 研究発表 | 102 |
| 論文発表 | |
| 学会等発表 | |
| 受賞 | |
| 知的財産権の取得状況 | 120 |
| 研究概要図 | 121 |
| 英文概要 | 122 |

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

研究課題名：アジア都市における日本の技術・政策を活用する資源循環システムの設計手法に関する研究

研究番号：3K113002

国庫補助金清算所要額：135,262,000 円（複数年度の総計）

研究期間：平成23年6月1日～平成26年3月31日

研究代表者名：藤田 壮（国立環境研究所）

研究分担者：藤井 実（国立環境研究所）、徐 開欽（国立環境研究所）、珠坪 一晃（国立環境研究所）、水落 元之（国立環境研究所）、岡寺 智大（国立環境研究所）、小林 拓朗（国立環境研究所）、小野寺 崇（国立環境研究所）、戸川 卓哉（国立環境研究所）、蛭江美孝（国立環境研究所）、谷川 寛樹（名古屋大学大学院）、加藤 博和（名古屋大学大学院）、奥岡 桂次郎（名古屋大学大学院）、韓 驥（名古屋大学大学院）、吉田 登（和歌山大学）、金澤 孝彰（和歌山大学）、山本 祐吾（和歌山大学）、町村 尚（大阪大学大学院）、松井 孝典（大阪大学大学院）

研究目的：

国内自治体、企業および環境省との連携によって、日本の先進的な循環技術・制度インベントリを構築し、都市の特性に応じた技術パッケージを構築する手法を確立するとともに、社会実証を通じて、その高度化と検証を進める。国内の資源循環・リサイクル技術フローの分節化と再構築による「リエンジニアリング」プロセスと、技術の運用効率を高める社会制度パッケージの定量的設計プロセスを構築する。そのうえで、アジアの具体的なモデル都市を定めて、中国科学院および都市行政機関等との連携で地域の産業・廃棄物の発生分布と環境基盤施設の整備、政策情報を含む循環経済都市データベースと、技術・制度シミュレーションモデルを構築し、都市や地域での社会実証によりシステムの高度化と実用性向上をめざす。地域の循環特性に応じた実現ガイドラインを構築し、アジア都市への汎用化を進めることで、国内事業者への還元を図り、早期の技術普及・事業展開の支援を目指す。

研究方法：

アジアの資源循環を支える技術・施策調査とシステム設計、計画や導入効果算定の基礎となるデータベース構築、事業を推進するための実証研究やシナリオ分析を行う各サブテーマについて研究を実施した。

1. 国内循環技術・施策の定量的インベントリ構築とリエンジニアリング分析

1.1 有機系循環資源のリサイクル技術調査と複合リサイクルシステムの評価

経済成長の著しいアジアの諸都市における循環型社会の構築に資するため、既に実施されている廃プラスチックや古紙などの高品質なマテリアルリサイクルに加え、組織的な分別収集を前提に、ある程度品質の高い有機系循環資源（混合プラスチックや雑紙）を、素材産業や火力発電所等の既存炉を活用して高効率・低コストでリサイクルする「スマートリサイクル」推進の検討を行う。その際重要となる、分別後の低品質の有機系循環資源やアジア地域の厨芥の割合が高く含水率の高い廃棄物の高効率活用を行うため、複合型リサイクル・処理システムを検討し、日本国内の循環技術のリエンジニアリング（再構築）のための情報収集を行うとともに、その効果を試行的に評価した。また、動脈産業の更なる積極的活用に関する検討を行い、アジア諸国における課題を整理した。これらの研究成果に基づき、アジア地域への環境産業地区設計ガイドラインを作成して瀋陽市政府と共有した。

1.2 アジア地域に適した有機性廃棄物オンサイト処理技術の開発

アジア農村家庭で普及しているオンサイトの有機性廃棄物バイオガス化施設の調査を実施し、普及状況・技術特性等を整理して技術的な課題を明らかにした。とくに、固形性有機物の沈殿・蓄積および原料投入口付近の負荷集中が主要な問題であることから、発酵生成ガスによって引き起こされるサイフォン現象を利用した無動力の攪拌機構を有するバイオガス装置を開発した。まず、10 L のミニチュアスケールの装置（無動力攪拌機構ありの装置とそれがない装置の2系列）を用いて実験室内で約1年に及ぶ連続処理実験を行った。

2. アジア拠点都市の循環経済 GIS データベースの構築

2.1 アジア地域インフラデータベースの構築

瀋陽市と遼寧省の住宅部門の建築廃棄物の年間発生量について、住宅延床面積に廃棄率を乗じることで推計する。瀋陽市と遼寧省において、1978年から2012年までの間に建てられた住宅延床面積の集計より、年間にマテリアルストック純増の推計方法は、式 3-1 を用いて推計した。

$$\Delta MS_i^t = \Delta A^t \cdot I_i^t \quad (3-1)$$

ただし、 i : 建築資材種 {セメント、コンクリート、ガラス、土沙、木材など}、 t : 時間[年]、 ΔA : 着工住宅延床面積[m²]、 I : 物質投入原単位[kg/m²]、である。

建築物の廃棄率曲線は、瀋陽市鉄西区ケーススタディエリアの廃棄量より以下の式で推計した。また、それを用いて瀋陽市と遼寧省の建築廃棄物量を検討した。

$$W_i^t = \sum_{\tau} \Delta MS_i^{\tau} \times N \quad (3-2)$$

$$N = \frac{K}{1 + a \cdot \exp(-bx)} \quad (3-3)$$

ただし、 W ：住宅廃棄物量[t]、 N ：建築物の廃棄率、 x ：建築物の築年数、 K ：飽和定数、 a 、 b ：関数の係数、である。

現地調査(Yuan and Fan, 2012)から中国における建築廃棄物のリサイクル率は5%に至っていないが、日本および韓国の建築廃棄物のリサイクル率は95%を上回っている。そこで、中国は循環型社会を目指し日本および韓国の建築廃棄物リサイクル技術を導入すると仮定した。および日本最大級の建築廃棄物中間処分所の処理能力は毎日1千トンに相当する(約365トン/年)。例えば、東京でのリサイクルーペア会社は日本最大級の建築廃棄物中間処分所として、石処理機およびコンクリート処理機などの先進処理設備を備えている。これらの機械は同時に処理作業をすると、毎日960トンの建築廃棄物処理ポテンシャルがある。

中国の将来推計において、これらの先進的な中間処分所を建設し、リサイクル率を高めたケースについて推計を行った。

2.2 自然資源 GIS データベースの構築と分析

アジアの大都市において、都市周辺の自然を含む資源循環システムの拡張は検討に値する。生態系プロセスモデルと連携した自然資源 GIS データベースを構築し、地域循環創出施策においてこれを用いた資源需給分析の有効性を示すことを目的とした。ケーススタディとして、①中国遼寧省における森林バイオマスおよび水資源需給、②エクアドルにおける農業残渣のバイオエタノール利用、③日本におけるバイオマス需要予測を実施した。①は生態系プロセスモデル Biome-BGC によって森林バイオマスおよび水資源供給ポテンシャル分布を推定し、サービス充足指数 (SSI) を用いて需要と比較した。②は農業残渣収量を Biome-BGC によって予測し、LC-CO₂ によって最適なバイオマス利用計画を策定するとともに気候変動による CO₂ 削減効果の影響を評価した。③は社会のマクロ指標からバイオマス・水・土地資源需要を予測するモデルを作成し、自給率を変化させたシナリオによる資源の内部循環度の変化を評価した。

3. 拠点都市の資源技術施策シナリオの設計と社会実証展開

3.1. 都市排水の適正処理システムの開発

都市における排水処理システムは、水環境保全や衛生設備としての観点から重要なインフラである。開発途上国では、主に経済的な理由から、水環境保全や衛生学的な安全性確保に寄与する排水処理システムの普及が遅れている。特に人口密集地域においては未だに水環境汚染が生じており、エネルギー消費が少なく、維持管理容易な適地型排水処理システムの開発と展開が必要となる。本研究では、バンコク（東南アジアの典型的な都市として選定）を対象として都市排水処理の現状について調査を行った。また調査の結果を踏まえ、都市排水の分散・省エネルギー処理に対応可能な適地型処理システム（高度好気性ろ床）を用いた都市下水の実証処理試験を行った。

3.2 産業連関分析を用いた環境技術方策の移転効果の評価

中国地区投入産出表（42部門，2002・2007年版），中国能源統計、中国鋼鉄工業年鑑をもとに環境技術方策の移転効果についての評価フレームを構築する。これをもとに中国の主要鉄鋼生産5省（河北省、遼寧省、山西省、河北省、江蘇省）を比較対象として、化石燃料エネルギー消費原単位の推移を分析し、レオンチェフ逆行列を求めて鉄鋼部門における誘発CO₂（カーボンフットプリント）の下流側産業への前方連関（Forward linkage effect），上流側産業への後方連関（Backward linkage effect）の変化を分析する。次に今後導入が期待される、乾式消火技術（CDQ）、炉頂圧発電技術（TRT）、転炉ガス回収技術(BOF)、廃プラ高炉還元（WPRCO）、下水汚泥の高炉吹込(SSRBF)の省エネ・低炭素技術方策を抽出し、これらを遼寧省の鉄鋼部門に対して適用した場合の省内外、地域間、国内外での誘発CO₂削減効果について分析、評価を行う。

結果と考察：

1. 国内循環技術・施策の定量的インベントリ構築とリエンジニアリング分析

1.1 有機系循環資源のリサイクル技術調査と複合リサイクルシステムの評価

食品廃棄物および下水汚泥のリサイクル技術として乾燥燃料化、炭化、メタン発酵技術を対象としてインベントリ調査を行い、技術の概要、導入実績、プロセスの物質収支およびエネルギー収支等を整理した。また、下水汚泥処理プロセスの違いによる消費エネルギーの違いを整理した。

混合プラスチックや雑紙類の産業での原燃料利用を大幅に拡大する、スマートリサイクルの推進には、発生源での分別収集が重要な要素となるが、環境省、瀋陽大学等と共同で行ったプラスチックの分別収集実験では、環境教育と、分別区分の分かり易い表示によって、適切な分別が実施されることが確認された。

アジア地域では一般廃棄物中の厨芥類の割合が高く、また高品質な循環資源を分別して利用した際には、残りの低品質な廃棄物の処理が必要となる。これら低品質な廃棄物からも高効率で電力を回収する仕組を提供する、循環技術のリエンジニアリングの一事例として、焼却・メタン発酵の複合発電システム（図（概要）1）について、プロセス設計に基づく評価を行い、全量焼却する場合や、メタン発酵・発電と焼却・発電を個別に行うケースと比較して、より多くの電力を生産できることが示された。厨芥の割合によって、全量焼却と比較して、25%～30%売電量が増加する結果となった。アジア地域でのリサイクルの高度化にとって、有効な技術となり得ると考えられる。

これらの成果に基づき、循環型社会形成にむけて、動脈側と静脈側の産業システムと都市の循環政策とが連携する循環圏システムを設計する方法論を構築し、アジア地域に適合する資源循環の技術・政策パッケージの作成、循環経済都市の設計・評価のためのデータベースの構築、環境産業地区設計のためのガイドラインを作成して、瀋陽市政府と共有した。

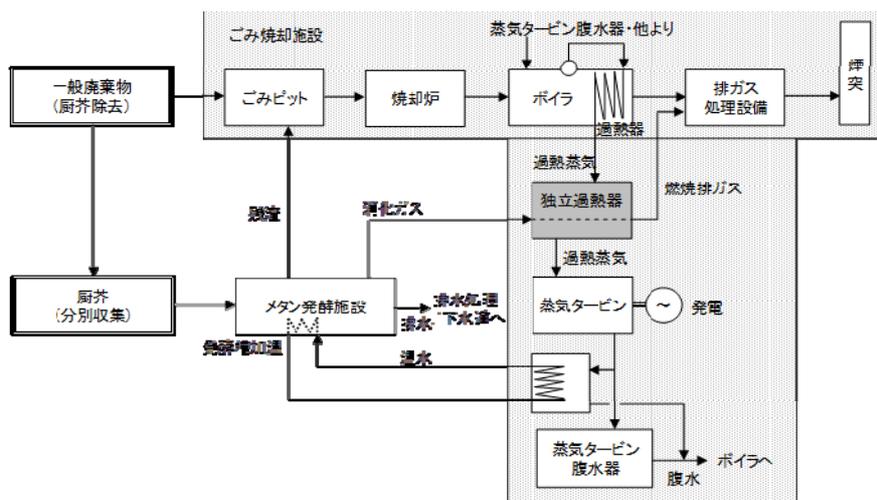


図 (概要) 1 焼却・メタン発酵複合発電システムの概略 (本文中図 1-7 の再掲)

1.2 アジア地域に適した有機性廃棄物オンサイト処理技術の開発

実験結果から、無動力攪拌機構を有する装置は、それが無い装置と比較して許容有機物負荷の約倍程度の上昇、原料中の有機物成分の沈殿蓄積の回避、10~20%のメタン化率上昇の3つ点で優れた性能が得られることが明らかとなった。次に、無動力攪拌リアクターの実装を想定したデザインの確立を目的として、流体力学シミュレーションを用いた室内装置と実装装置との流体挙動の比較と、攪拌強度を決定すると考えられるサイフォンU字管の長さによる影響を検討した結果、実装スケールの装置においても、サイフォンによる十分な攪拌と沈殿破壊が期待できる事が示唆され、またデザインに際しては、攪拌強度を決定づけるU字管の長さが重要であることが明らかとなった。

2. アジア拠点都市の循環経済 GIS データベースの構築

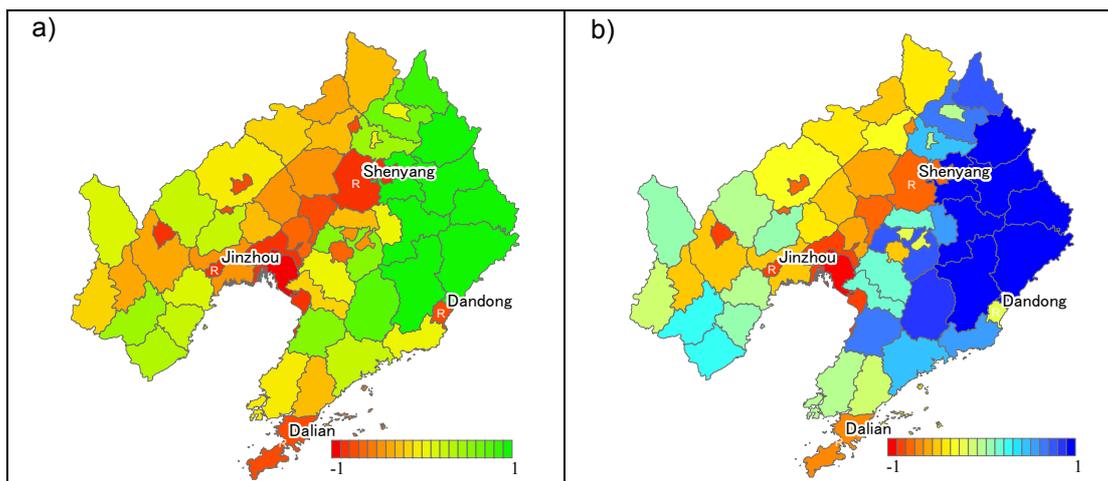
2.1 アジア地域インフラデータベースの構築

瀋陽市鉄西区の建物廃棄曲線の利用により、2013年から2020年までの廃棄物量を推計した。累積した廃棄物量は2013年に72百万トン进行ベースとして、4%の増加率で2020年には94百万トンに達した。将来にわたって、年間の発生廃棄物量の増加率はほぼ同じであり、年間の発生廃棄物量は約3.1百万トンであった。特に、2020年に発生する廃棄物量としては3.3百万トンになると予想される。遼寧省の建築廃棄量については、累積した廃棄物量は2013年の730百万トン进行ベースとして、3%の増加率で2020年は902百万トンに達した。将来における年間に発生する廃棄物量の増加率はほぼ変化せず、年間の発生廃棄物量は約24.6百万トンである。特に、2020年の発生廃棄物量は24.9百万トンに上ると推計された。

また、先進的中間処分所を仮定した場合、2020年の瀋陽市について3.3百万トンの住宅廃棄物を処理するには、10カ所の建築廃棄物中間処分所(処理能力:960トン/日)が必要であることが示された。同様に2020年の遼寧省については、24.9百万トンの住宅廃棄物を処理するには、71カ所の建築廃棄物中間処分所(処理能力:960トン/日)が必要であることが示された。

2.2 都市排水の適正処理システムの開発

ケーススタディの結果、①中国遼寧省における森林バイオマスおよび水資源需給では、地域によってバイオマスおよび水資源の需給バランスが大きく異なり(図(概要)2)、地域ごとに望ましい資源管理が異なること、バランスが異なる地域間連携が有効であることが示された。②エクアドルにおける農業残渣のバイオエタノール利用では、サトウキビ残渣の利用によるCO₂削減効果が高かったが、気候変動による収量変化は原料選択に影響を与え、削減効果が複雑に変化した。③日本におけるバイオマス需要予測では、経済・人口などの指標による需要予測モデルを作成し、木材よりも食糧自給率を高める施策が、内部循環度をより高めることが示された。



図（概要）2 遼寧省の県別森林資源サービス充足指数（SSI） a) バイオマス、b) 水資源
 （本文中図 4-4 の再掲）

3. 拠点都市の資源技術施策シナリオの設計と社会実証展開

3.1 都市排水の適正処理システムの開発

バンコクにおける都市排水処理システムの現状把握を行い、その排水処理状況や消費エネルギー（電力）に関する調査を実施した。その結果、現状の大規模処理施設は下水道の汚水収集性能が不十分（低流入有機物濃度）のため水質汚濁防止への効果は低く、その低い汚濁負荷とスケールメリットから下水 1 m³ 処理当たりの電力消費は少なかった。一方、分流下水を処理する小規模下水処理施設は、汚水の効率的な収集と処理（汚濁防止）という点で非常に有効であるが、運転に伴う電力消費や余剰汚泥の発生量が大型処理施設と比較して多いため、維持管理費用の削減の観点から、消費電力や余剰汚泥の削減を達成することが技術普及の鍵と考えられた。

現地における高度好気性ろ床の合流下水（低有機物濃度、大規模処理場）、分流下水（高有機物濃度、小規模処理場）を供した実証排水処理試験の結果、実証技術は既存の好気性排水処理（活性汚泥法、OD 法）と同等の処理水質を維持しつつ、短い処理時間（省スペース、建設費削減）で、大幅な電力消費の削減（50～85%）、余剰汚泥の削減（77～89%）が達成できることが実証された。バンコク首都圏庁(BMA)では、即効的な汚染対策として集合住宅排水を処理する小規模処理施設（排水量 1,000～2,000 m³/day）への開発技術の導入についての検討を開始しており、今後の BMA の下水道整備計画のマスタープランへの反映が見込まれる（図（概要）3）。

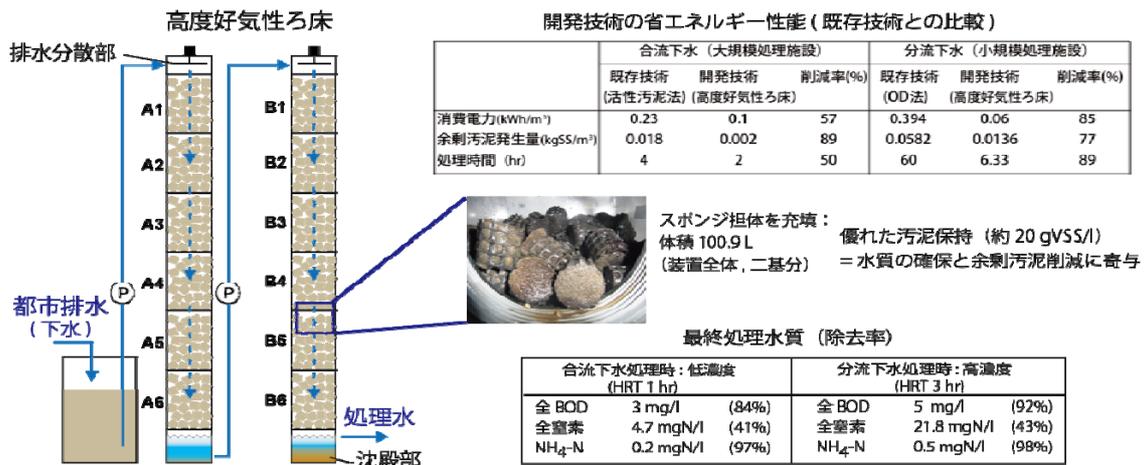
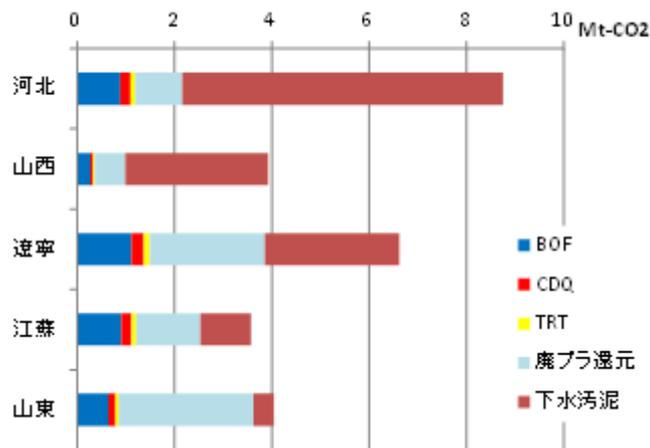


図 (概要) 3 都市排水の実証処理試験の概要と処理性能

3.2 産業連関分析を用いた環境技術方策の移転効果の評価

鉄鋼産業への資源循環、低炭素技術導入による誘発 CO₂ 削減効果を分析した。まず粗鋼トン当たりのエネルギー消費原単位の推移を分析した結果、1990年代後半以降の省エネ・低炭素化が顕著であるものの近年でも中国国内にはまだ大きな削減余地が残されていることが明らかになった。次に、カーボンフットプリントの2002年と2007年での時系列変化の要因分析を行った結果、遼寧省と山東省では建設産業から、遼寧省では一般機械と電気機械からの CO₂ 誘発量の変化が大きいことから、産業クラスターを考慮に入れた資源循環や低炭素技術施策が有効であることが示唆された。また、5つの環境技術の中では、廃プラ還元技術と乾燥汚泥高炉吹き込み技術の削減効果が大きく、日本の先導技術であるこれらの環境技術移転のポテンシャルの大きさがうかがわれる結果となった。地域的には、各省の産業構造を踏まえ、山東省では廃プラ還元技術の効果が大きく、河北省と山西省は乾燥汚泥高炉吹き込み技術の効果が大きい、など省ごとに異なる削減構造の違いが明らかとなり、各地域に導入が効果的な技術を明らかにすることができた。さらに、地域を超えて及ぼす誘発 CO₂ 削減効果を分析した結果、特に内陸部の中央中国 (Central China)、北西中国 (North West China)、南西中国 (South West China) への低炭素技術導入は沿海州地域に対して大きな誘発 CO₂ 削減の効果をもたらしていることが分かった (図 (概要) 4)。



図（概要）4 各省鉄鋼業への省エネ・低炭素技術導入による誘発 CO₂ 削減効果
 (本文中図 6-10 の再掲)

環境政策への貢献：

- 経済発展の著しいアジア地域において、外部要因の変化に対しても頑強で、廃棄物の特性を活かし、既存施設を活用して高効率・低コストのリサイクルの実施と、厨芥類などを多く含む低品質な廃棄物からも高効率に発電するシステムの設計・評価方法は、アジア地域の廃棄物政策に貢献するものであると考えられる。
- 中国都市内のマテリアルストックの蓄積傾向が明らかになることにより、今後の建設系排出物の処理対策の検討を行うことが可能になる。
- バンコクを対象として既存都市排水処理の現状を調査した結果、下水道における汚濁負荷の収集能力不足や、処理場の多大な電力消費など、開発途上国において下水処理システムの普及を妨げる要因を明らかにした。また高度好気性ろ床による現地処理試験を行い、その優れた排水処理性能と省エネルギー性能を実証した。本成果は、下水処理システムの普及が進んでいない地域や水環境汚染が深刻な地域での機動的な分散処理技術導入の一案として、排水処理システムの整備計画等に貢献する見込みである。
- 社会経済の発展が著しい中国では、動脈産業技術装置の導入拡大が見込まれるため、動脈産業部門に対して日本の環境・資源循環技術を適用することが効果的である。その際、消費側の地域は鉄鋼生産地への低炭素技術導入に伴い、自らの最終需要¹が域外に誘発させている CO₂ が削減される便益を受ける。低炭素技術の導入には大きな投資が必要となることから、その費用負担を考えていく環境政策の適用の際には、このようなカーボンフットプリントの情報が資するものと考えられる。

¹最終需要とは、産業等の原材料として再び生産過程に入って中間消費されるもの以外に、家計や一般政府の消費あるいは資本形成等として最終的に需要されるものをいう。

研究成果の実現可能性：

- アジアでの効率的かつ経済的な有機系一般廃棄物の資源循環・処理システムの構築に向けて、素材産業活用型のリサイクルと、それを補完するために、要素技術を組み合わせるリエンジニアリングによる、焼却・メタン発酵複合発電システムについて検討を行った。いずれの実施にも市民の分別収集への参加が鍵となるが、瀋陽大学での分別実験の成功は、実施可能性を示唆している。また、複合発電システムは含水率の高い廃棄物からも効率的に電力生産できることが評価された。類似のシステム構成を持つ施設が建設中であることから、普及する可能性は高いと言えるが、その機能を発揮させるためには、有機系一般廃棄物全体を俯瞰して、適材適所でのリサイクルを可能とする制度設計が求められる。
- 構築した 4dGIS データベースは中国国内での物質の蓄積特性を定量化することにも有効であることを示した。より現実に即した廃棄物政策を実現するためには最近 10 年間のより細かいデータベースを構築する必要があることが分かった。
- 都市排水の適正処理システムは、現地の大規模処理場（合流下水，低有機物濃度）および小規模処理場（分流下水，高有機物濃度）に高度好気性ろ床を設置し、都市排水の処理試験を通年で実施することで、その優れた排水処理性能を実証した。加えて、運転に伴う消費電力や余剰汚泥の発生量を評価した結果、既存の排水処理システムと比較して 57～85%の電力消費削減、77～89%の余剰汚泥の削減という、優れた性能を示した。その優れた維持管理性や経済性から開発途上国における機動的な排水処理技術として普及する可能性は高いと考えられる。
- 日本の鉄鋼産業では一般的な乾式消火技術、炉頂圧発電、転炉ガス回収技術に加え、廃プラ高炉還元、下水汚泥の高炉吹込技術の適用による誘発 CO₂ 削減量を評価した。対象となる産業分野において先進的な省エネルギー・環境技術を世界的に採用することで当該の産業からの排出量を削減する戦略であるセクトラル・アプローチにおいて、本研究の知見は、導入効果の高い地域を選ぶ情報として活用が期待される。

結論：

- 循環技術のアジア展開に必要となる、大規模および小規模分散型の各技術の調査を実施した。また、これらの技術を組み合わせて複合効果の得られるシステムの設計を行い、その効果を試算し、効率的なリサイクルが実施可能なシステムとなることを確認した。日本のリサイクル技術と親和性の高い、ごみの分別収集に関する実証実験を行い、環境教育の効果も確認した。
- 無動力攪拌機構を有するオンサイトの有機性廃棄物バイオガス化装置は、それが無い装置と比較して許容有機物負荷の約倍程度の上昇、原料中の有機物成分の沈殿蓄積の回避、10～20%のメタン化率上昇の点で優れた性能が得られることが明らかとなった。
- 作成した瀋陽市鉄西区の建物廃棄曲線の利用により、2013 年から 2020 年までの廃棄物量を推計した。住宅廃棄物を処理するには、建築廃棄物中間処分所(処理能力：960 ト

ン/日)が、2020年の瀋陽市においては10カ所、遼寧省においては71カ所が必要であることが示された。

- 生態系プロセスモデルと連携した自然資源 GIS データベースは、気候や人為管理によるバイオマス供給ポテンシャル変化を予測でき、また森林からの水資源供給も評価できた。定量的・空間的に推定された自然資源供給ポテンシャルは、都市における需要と比較することで需給バランスが評価でき、サービス充足指数や資源循環度などの指標によって可視化できた。
- バンコクの大規模処理施設は下水道の汚水収集性能が不十分（低流入有機物濃度）であり、水質汚濁防止への効果が低い。高度好気性ろ床の現地実験では、大幅な電力消費の削減（50～85%）、余剰汚泥の削減（77～89%）が達成できることが実証された。
- 中国内の主要な鉄鋼生産5省（河北省、遼寧省、山西省、河北省、江蘇省）および地域間の取引を示す産業連関表を用いて、省エネルギー・低炭素技術を中国の鉄鋼業に導入した場合の、当該地域および域外への誘発CO₂削減効果を分析した。分析の結果、省ごとの削減構造の違いや、地域を超えて及ぼす誘発CO₂削減効果を明らかにした。
- 研究期間を通じて複数回の国際会議を開催し、研究の進展に資するための意見交換や成果の共有を行った。2013年11月26-27日には中国科学院と共催で International Symposium on Regional Sustainable Development を瀋陽市において開催し、日、中、米などから60名程度の研究者が参加した。本成果を受け、資源循環分野では著名な国際学術誌である Journal of Cleaner Production に Towards post fossil carbon societies: regenerative and preventative eco-industrial development と題する特集号を組むことが決定し、研究成果を広く普及させることに貢献できると考えられる。

第1章 有機系循環資源のリサイクル技術調査と複合リサイクルシステムの評価

1.1 概要

アジアの諸都市における循環型社会の構築に資する高品質なマテリアルリサイクルに加え、ある程度品質の高い有機系循環資源（混合プラスチックや雑紙）を、素材産業や火力発電所等の既存炉を活用して高効率・低コストでリサイクルする「スマートリサイクル」¹⁾の検討を行うとともに、残りの低品質の有機系循環資源の高効率活用を行うため、複合型リサイクル・処理システムを検討し、日本国内の循環技術のリエンジニアリング（再構築）のための情報収集を行うとともに、その効果を試行的に評価した。その結果、複合型リサイクル・処理システムは、廃棄物からの高度なエネルギー回収が可能であることが確認された。また、動脈産業の更なる積極的活用に関する検討を行い、アジア諸国における課題を整理した。これらの研究成果に基づき、アジア地域への環境産業地区設計ガイドラインを試作した。

1.2 有機系循環資源のリサイクル手法の技術調査

1.2.1 動脈産業施設の積極活用に関する基礎的検討

鉄鋼やセメント、製紙、化学、発電所などの動脈産業施設で循環資源や再生可能資源を利用することができれば、循環資源が大規模・高効率に利用できるとともに、既存の施設を活用したりリサイクルとなるため、リサイクル又は適正処理のための設備投資や運転費用を軽減できることが期待される。動脈産業を活用したりリサイクルについては、これまでも実施されているが、その量はリサイクルの対象となり得る有機系廃棄物の一部に過ぎない。有機系循環資源をより積極的に投入できる装置構造について、文献調査や必要な場合にはヒアリング調査などを通じて、基礎的検討を実施し、関連技術情報や関連動向の情報整理を実施した。具体的には、中国において発電の主力である石炭火力発電所と、鉄鋼業のコークス炉および高炉における廃プラスチック・古紙等の利用拡大の可能な技術について、回収システム、前処理システム、必要な設備変更（付帯施設）、実際の利活用事業の実態、脱塩素技術、投入施設、石炭代替の有機資源投入可能量、CO₂削減効果等、施設間連携やハイブリッド化などに焦点を当て、当該システムの新しい技術動向把握の調査を実施した。

(1) 石炭火力発電所における木質バイオマス・廃プラスチック・古紙の利用拡大可能な技術

石炭火力発電所では、多くの電力会社の石炭火力発電所が採用している微粉炭火力発電技術（USC）と、その他の工業で採用している流動床ボイラー技術に大別される。

石炭火力は微粉炭燃焼方式（微粉炭火力発電技術）が主流であり、この方式では、バイオマスやプラスチック等を投入する場合、微粉炭同様に破碎等の前処理が必要になる。流動床ボイラー技術（流動床方式）は、従来型の発電用ボイラーが高品位炭や油・ガス等の化石燃料にしか対応できないのに対し、低品位炭やバイオマス、スラッジ、廃プラスチック

ク、廃タイヤなどをも燃料として使用できる幅広い燃料適合性があるとされ、クラレ玉島工場（70t/h）、出光興産千葉製油所（300t/h）、宇部興産伊佐工場（210 t/h）等に整備されている。

ヒアリングや文献調査結果によれば、微粉炭方式は RPF の投入は技術的に困難であり、木質バイオマスの利用では、混合ミルの利用可能性より専用ミルの設置が必要であり、この課題を克服すれば導入は可能になるとみられる。一方、木質バイオマスの場合、現状では海外由来のチップがコスト競争力を有している。流動床ボイラーは、出光興産の千葉製油所の循環流動床ボイラーは、石炭を年間約 20 万 t 使用するのに対して RPF は年間 1 万 t 程度利用している。受け入れる RPF については塩素管理を徹底しており、発電所側では特別な受入施設を設置することなく利用できている。国産の間伐材チップの受入れは、コスト面や安定供給の面で課題を残し、建設系の木材チップは重金属等の混入が懸念されている。

尚、最近注目の石炭ガス化は、これまでのものと比較して、発電コスト（整備コスト）が 1 割程度高くなる傾向であり、補助金がないとその整備は厳しいという見方がある。中・長期的に石炭ガス化複合発電（IGCC）などの導入による更なる高効率化および CO₂ の分離・回収技術の開発などが促進されるとみられる。ガス発電等のコンバインド方式も、理論的には可能性があるが、日本の天然ガスの値段は高いため、コストメリットがあるかが課題になる。

(2) コークス炉・高炉における木質バイオマス・廃プラスチック・古紙の利用拡大可能な技術

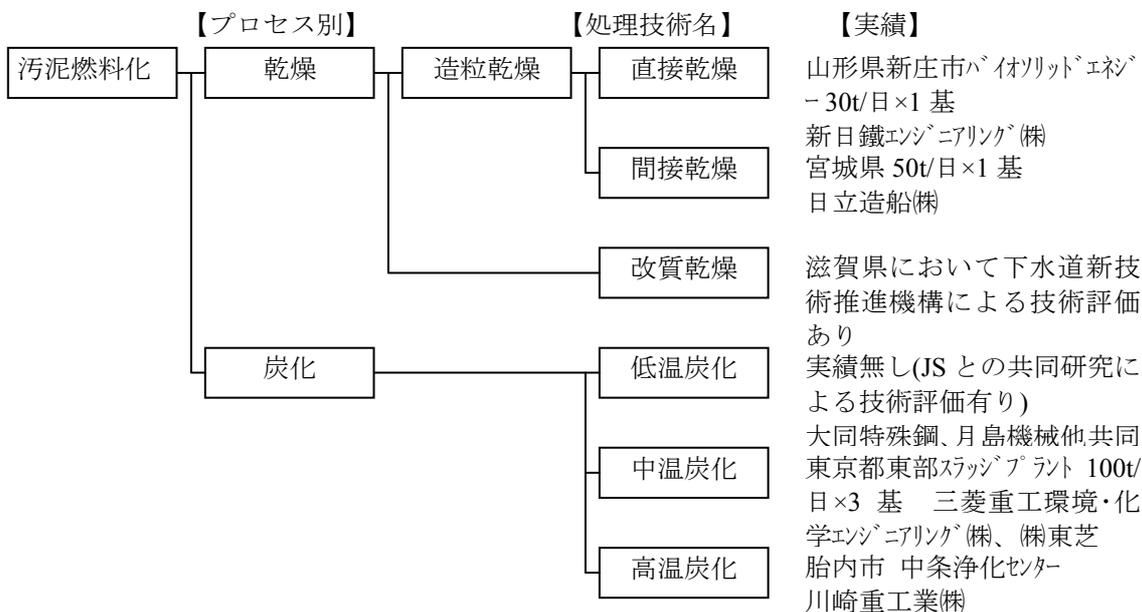
コークス炉・高炉における木質バイオマス・廃プラスチック・古紙の利用の可能性は、脱塩素を中心とする技術を投入前の前処理システムを構築すれば、十分にその利用拡大可能である。

特に、塩素濃度の許容が高いとされるコークス炉原燃料化システムを例にみると、技術的には 1~2%程度の投入が可能とされている。現行では、容器包装リサイクル法の入札制度を利用したプラスチックの受入れを主体に実施しており、受入量の確保に制約があるとされている。新日鐵住金(株)では、旧住金のコークス炉での受入れ体制を整備すれば、現行の量である約 20 万 t 程度を追加で受け入れる可能性（能力）があることを示唆している。こうした点にかんがみると、技術的な課題より制度的な課題を関係者は示唆していると考えられる。

1.2.2 下水汚泥のリサイクル技術

下水汚泥中の固形物の約 8 割が有機物で占められており、エネルギー資源と生物活性資材としての資源として捉えることが出来る。エネルギー資源としては固形物の直接的な燃料化やガス化による利用が考えられ、生物活性資材としては、微生物を利用するメタン発酵やコンポスト等による有効利用が考えられる。下水汚泥を固形燃料として利用する技術

は、汚泥乾燥技術と汚泥炭化技術に大別される（図 1-1）。



- ・直接乾燥：熱風や過熱蒸気を用いて汚泥を直接加熱する
- ・間接乾燥：乾燥機の加熱面を介して間接的に汚泥に伝熱し乾燥させる。
- ・改質乾燥：脱水汚泥に蒸気を直接供給し連続的に改質（細胞膜を破壊し疎水化）を行う。

図 1-1 下水汚泥固形燃料化技術の分類

下水汚泥の炭化においては、焼却と比較して脱水汚泥からの N₂O が削減されるメリットが存在する（表 1-1）。

表 1-1 下水汚泥処理方式による脱水汚泥 1 t 当たりから排出される N₂O 排出量*

| 方式 | N ₂ O 排出量 | 地球温暖化係数 (-) | CO ₂ 換算排出量 (kg-CO ₂ /t-cake) | 出典 |
|--------------------|------------------------------|----------------|---|------|
| | (kg-N ₂ O/t-cake) | | | |
| 低温炭化 (250～350℃) | 0.03 | 310 | 9.3 | 予測値 |
| 中温炭化 (500℃程度) | 0.13 | 310 | 40 | 文献 a |
| 高温炭化 (600～800℃) | 0.146 | 310 | 45 | 文献 b |
| 流動焼却 (高温焼却) | 0.645 | 310 | 200 | 文献 c |
| 流動焼却 (通常焼却) | 1.51 | 310 | 468 | 文献 c |

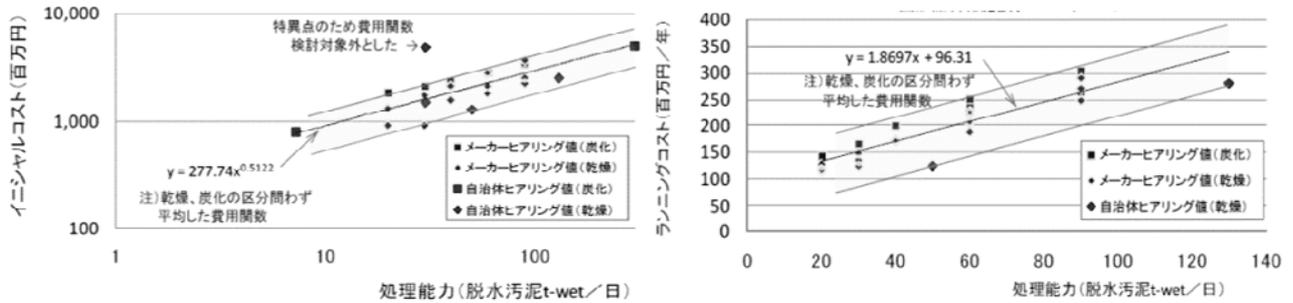
文献 a：上野知威：下水汚泥炭化燃料の実用化、バイオ燃料（株）、環境と地球 No.17(2006)

文献 b：下水道新技術推進機構：炭化システム技術資料

文献 c：環境省：温室効果ガス排出量算定・マニュアル

*出典) 椎屋光昭：石炭火力発電所におけるバイオマス資源活用取組み状況について、再生と利用, Vol.35 (2011)

下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案）において、固形燃料化（造粒乾燥、油温減圧乾燥、炭化）を導入している自治体に対し、設備の緒元やコストに関するヒアリング、アンケートを実施し、また、固形燃料化施設の主要メーカーに対しヒアリングを実施した結果を整理したコストデータが示されている（図 1-2）。



（出典）下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案）

図 1-2 固形燃料化施設のインシヤルコストおよびランニングコスト

1.2.3 食品廃棄物のメタン発酵技術

食品廃棄物のメタン発酵技術は、有機物が嫌気性条件で微生物の活動により分解され、最終的にメタンと二酸化炭素を生成するプロセスである。古くから污水处理での汚泥減量化技術として用いられてきた。

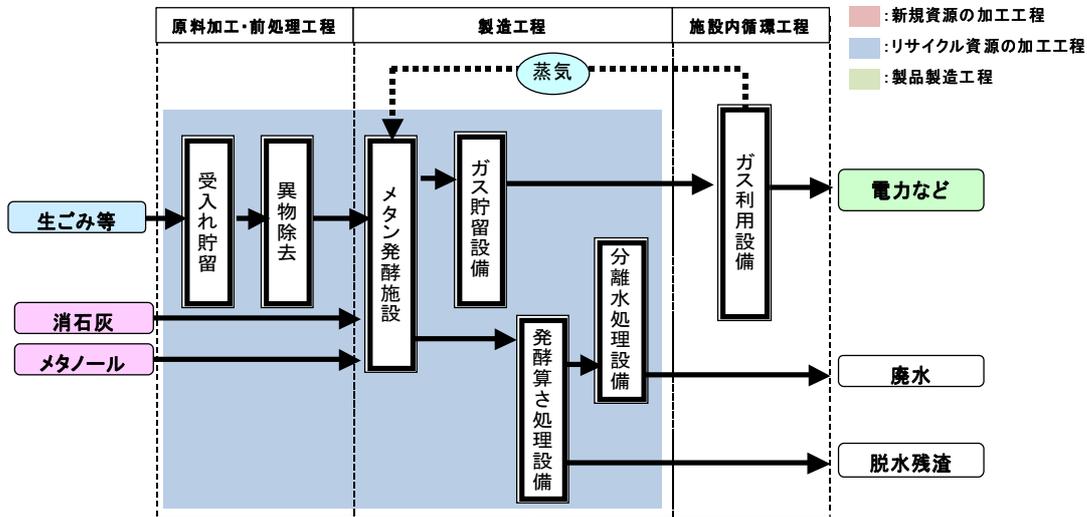


図 1-3 食品廃棄物のメタン発酵プロセス

そのプロセスは、①食品廃棄物の可溶化・加水分解（固形又は高分子有機物を低分子有機物に分解）、②酸生成（低分子有機物から有機酸、アルコール類などを生成）、③酢酸生成（有機酸などから酢酸と水素などを生成）、④メタン生成（酢酸や水素などからメタンと二酸化炭素を生成）、⑤熱回収（メタンから発電・熱供給）となっており（図 1-3）、生ごみ 1t から約 200kWh の電力を発電できる。

固形バイオマスを対象とした発電無しの施設の場合、処理量が数十 t/日以上以上の規模においては概ね 1,000～3,000 万円/(t/日)程度、発電有りの場合は概ね 3,000～5,000 万円/(t/日)程度であり、規模が拡大にするにつれ費用は逡減する傾向が見られる。

1.2.4 下水処理技術

下水処理における汚泥処理プロセスは、濃縮、消化、脱水、焼却、溶融などからなる。既存文献によると汚泥の単位処理プロセスのエネルギー消費原単位は表 1-2 のとおりと整理されている。このデータは、大阪市の 13 箇所の下水処理場の各処理プロセスに投入された汚泥量に対する電力および熱量の消費量実績から算出したものである。

表 1-2 汚泥の単位処理プロセスのエネルギー消費原単位式*

| 処理プロセス | 処理方式区分 | 電力消費原単位 (kWh/t-DS) | 熱消費原単位 (MJ/t-DS) |
|--------|----------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 濃縮 | 重力濃縮 | $640X^{-1.04}(r=-0.96)$ | — |
| | 機械濃縮 | $1,640X^{-0.623}(r=-0.73)$ | — |
| 消化 | 高温消化 | $1,960X^{-0.607}(r=-0.73)$ | $7,550X^{-0.0989}(r=-0.50)$ |
| | 中温消化 | $2,590X^{-0.949}(r=-0.73)$ | $42,507X^{-1.011}(r=-0.71)$ |
| 脱水 | 遠心脱水 | $-1.77X+418(r=-0.81)$ | — |
| | ベルトプレス脱水 | $-110\text{Ln}(X)+540(r=-0.84)$ | — |
| 焼却 | 流動床焼却炉 | $-7.24X+976(r=-0.94)$ | $-5,640\text{Ln}(X)+27,160(r=-0.84)$ |
| | 多段式焼却炉 | $3,240X-0.696(r=-0.96)$ | |
| 溶融 | — | 760 | $24,500X^{-0.415}(r=-0.70)$ |

X：投入固形物量(t-DS/d)、r：相関係数

*出典：惣田訓，池道彦：処理規模を考慮した様々な下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価，再生と利用，Vol.34，No.129（2010）

1.2.5 複合処理施設の事例（下水汚泥の一般廃棄物焼却施設での混焼事例）

京都市山科処理区の石田水環境保全センターでは、昭和 60 年 10 月から、脱水ケーキおよびスクリーンかすを、隣接する一般廃棄物焼却施設である東部クリーンセンターで都市ごみと混焼し、東部クリーンセンターより電気・蒸気の供給を受けている。

混焼システムの導入にあたり必要となった設備は、汚泥乾燥機、造粒機および余熱利用設備である。設備の概要は、表 1-3 に示すとおりである。ごみ焼却炉において脱水ケーキが燃えやすく、火格子から落ちないようにするため、含水率約 70%の脱水ケーキと含水率約 10%の乾燥汚泥を混合して含水率約 40%にしたのち、直径 30mm、長さ 10cm のペレット状にして、東部クリーンセンターへ搬出している。東部クリーンセンターのごみ焼却炉（ストーカ炉）での下水汚泥の混焼比率は 10%以下である。ごみ焼却炉に設置された廃熱ボイラで発生した蒸気はクリーンセンターで発電用に利用されるとともに、一部を石田センターで汚泥乾燥用に使用している。平成 17 年度実績では、余剰蒸気による発電電力で、石田水環境保全センターの全消費電力量の約 64%をまかなった。また、石田水環境保全センターの汚泥処理に要した蒸気使用量は、東部クリーンセンターの全蒸気発生量（534,955t/年）の約 3.5%であった。

表 1-3 混焼のための設備概要

| 施設 | | 形式 | 能力 | 台数その他 |
|------------|-------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 汚泥処理設備 | 汚泥脱水機 | 加温圧搾形スクリープレス脱水機 | 210kg-ps/時間/台 | 8 台 |
| | 乾燥機 | 間接加温型パドルドライヤー | 700kg-H ₂ O/時間/台 | 4 基 |
| | 造粒機 | 二軸スクリー式 (造粒形状 φ30mm×長さ 40~100mm) | 0.7t/時間 | 4 基 |
| 余熱利用設備 | 熱交換器 | 横円筒形多管式 | 2,000,000kcal/時間 507,000kcal/時間 | 各 2 基 |
| 東部クリーンセンター | 焼却炉 | 階段式ストーカ炉 | 200t/24 時間 | 3 基 火床面積 39.24m ² /基 |

1.3 アジア地域に適合するリサイクルシステムの設計

1.3.1 アジア地域に適合するリサイクルシステムの考え方

アジア地域における有機系資源の資源循環の現状および改善の方向性は、次のように考えられる(図 1-4 も参照)。

①プラスチックや厨芥をはじめとする有機系資源の資源循環構築

アジアの諸都市では急速な産業化とともに、産業廃棄物と都市廃棄物が急増している。特に資源循環の観点からは、製造業の拡大とともに機械製品・金属製品の回収事業については民間ベースで始まりつつあるものの、プラスチックや厨芥をはじめとする有機系資源の資源循環は進んでおらず、その有機系資源としての社会的価値を活かして地域の環境汚染を抑制する効率的な資源回収は実現していない。

現状において、これら有機系資源による生活環境への影響は決して軽微なものではなく、また最終処分量削減の観点からも、有機系資源の資源循環・適正処理体制の構築が課題となっている。

⇒ 有機系資源の埋立処分等の回避による生活環境の改善と積極的な循環利用

②下水処理施設の普及促進と下水汚泥の循環体制の構築

都市の衛生状態改善の観点から、今後、アジアの諸都市においては下水道および下水処理施設の普及が進むと考えられる。これは都市計画・公衆衛生からは非常に意義のあることであるが、資源循環の観点からは下水処理に伴って大量の下水汚泥が発生するという側面を有している。

そのため、下水汚泥の循環利用をあらかじめ想定して、有機系資源循環システムの構築を図ることが課題となる。

⇒ 下水処理施設による都市の衛生状態改善と下水汚泥も含めた循環システム構築

③廃棄物分野での温室効果ガス排出量の削減

アジアの諸都市においては、これら有機系資源の大部分は埋立処分もしくは単純焼却されており、CH₄（バイオマス系の有機系資源の埋立処分）、CO₂（プラスチックなど化石燃料系の有機系資源の単純焼却）によって多量の温室効果ガスが排出されている。

これらの有機系資源の適正な循環システムを構築することにより、廃棄物分野での温室効果ガス排出量を削減することが課題となっている。

⇒ **有機系資源の埋立回避および化石燃料・天然資源代替による温室効果ガス削減**

④産業系施設や都市施設と連携した有機系循環資源の循環利用

アジアの諸都市においては、今後も急速な産業発展が見込まれ、産業系施設におけるエネルギー需要は高まると予想される。また、人口増加により電力需要は高まるものと考えられる。加えて、特に寒冷な地域においては都市内での熱供給システムは必須の都市インフラとなるであろう。

有機系資源の循環システムの構築に際しては、材料リサイクルを念頭に置きつつも、このようにエネルギー需要が高まることから、地域の産業構成や都市状況に応じた積極的なエネルギー転換を図ることが課題となる。

⇒ **産業系施設や都市施設と連携した循環システムの構築（マテリアル+熱電供給）**

⑤循環資源の熱利用における需要の変動への対応

特に寒冷な地域においては都市内での熱供給システムの熱源としての循環資源利用が考えられるが、この場合は熱需要の季節変動が非常に大きくなる。また、産業系施設における利用においても、操業状況に即して循環資源の需要が変動する。需要側のニーズに合わせた、フレキシブルな循環資源の供給体制の構築が求められる。

⇒ **需要の変動に応じた可変的なシステムの構築**

⑥アジア諸都市の状況を踏まえた日本技術の移転

アジアの諸都市におけるリサイクルシステムの構築にあたっては、日本発の技術・施策システムの移転が有効と考えられる。

しかしながら、我が国における有機系循環資源のリサイクルは、家庭系の一般廃棄物については精度の良い分別収集、事業系一般廃棄物および産業廃棄物においては、単一性状かつ異物混入率が極めて少ない排出形態を前提としている。一方、アジアの諸都市においては、ある程度の異物の混入を前提とせざるを得ない場合がある。

⇒ **異物混入を許容するリサイクル技術の導入**

⑦都市や産業のスケールを踏まえた日本技術の移転

日本とアジア諸都市においては都市や産業のスケールは自ずと異なる。必ずしも大規模

集約化ではなく、小規模分散型の方が周辺への環境負荷、経済性共に優れる場合もある。日本技術の移転に際して、適正評価モデルを用いたプレスタディによる循環拠点の最適規模設計が重要になる。

⇒ **循環拠点の最適規模設計による全体効率の最適化**

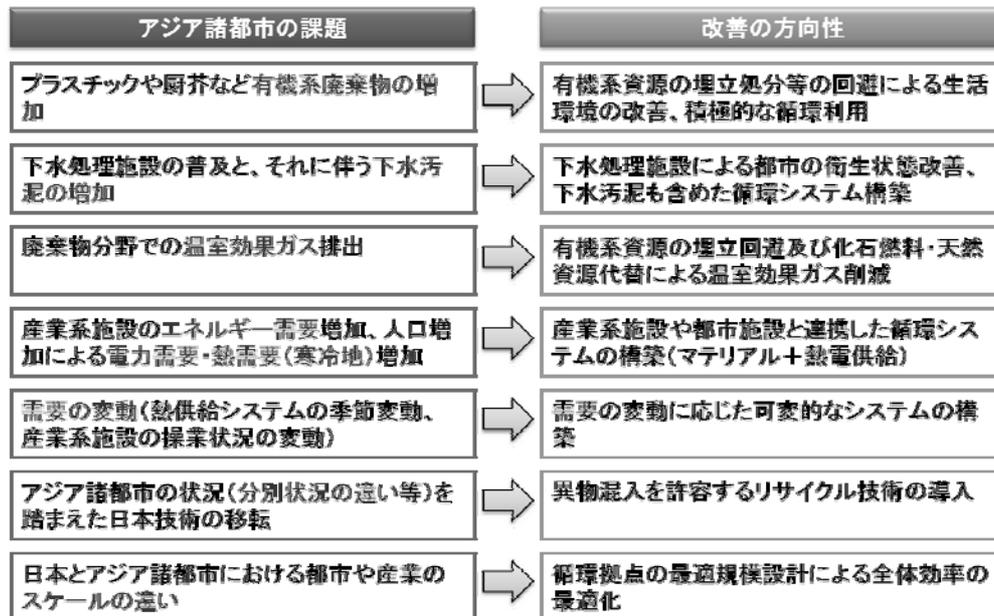


図 1-4 アジア諸都市における課題と改善の方向性

1.3.2 動脈産業活用型リサイクル

(1) 外部要因の変化に対して頑強なリサイクル

リサイクルの効果を高めるには、循環資源の単位重量当たりの効果を高めるとともに、リサイクルの実施量を拡大する必要がある。特に実施量を拡大するには、リサイクルシステムが、空間的に適切な規模で実施されて費用対効果に優れ、それが持続的な仕組みとなっていることが、重要な要件の 1 つになると考えられる。これまでも、廃棄物のリサイクル・処理分野において、情勢変化に対する対策はある程度採られており、石川らの研究例²⁾も存在するが、個々の対策となり得る要素を整理し、頑強なリサイクル・処理システムの設計指針として構造化することが重要である。これにより、様々な情勢変化が生じた場合、例えば原料供給量の減少という観点では、リサイクルの阻害要因ともなり得る 2R (リデュース、リユース) が進展した場合、更に廃棄物からのエネルギー回収と競合し得る省エネルギー化、再生可能エネルギーの導入が進められた際にも、資源循環を通して達成される環境負荷削減量や資源消費削減量の将来に渡る時間積分値の期待値を拡大できることが期待される。外部要因の変化に対して頑強なリサイクルについては、本研究の研究代表者および分担者が参加して実施した先行研究(望ましい地域循環圏形成を支援する評価システムの構築とシナリオ分析、K22013)において整理を行った。経済発展の著しいアジア地域においては、外部要因の変化に対する頑強性が、より重要なファクターになると考え

られる。情勢変化に強いリサイクル・処理システムの構築にとって重要と思われる要素として、以下に述べる4つの要素が挙げられた。

- ・エネルギー・資源の質の考慮と絶対効率の向上
- ・既存高効率施設の活用
- ・施設（機能）の多様性
- ・環境負荷削減確率の高いリサイクル

(2) 動脈産業を積極活用するリサイクルシステム

動脈産業を積極活用するリサイクルシステムについては、先行研究（有機再生廃棄物を対象とする多層複合型資源循環圏の設計と評価システムの構築に関する研究、K22050）において提案・評価を行っている。高品質なプラスチック、雑紙類を分別して地域の拠点に収集し、一部のプラスチックはマテリアルリサイクルを実施し、残りは固形原・燃料に加工して、素材産業や発電所等に輸送して利用することを想定したものである。できるだけ既存施設を活用して、発生量は変動するが活用できれば低炭素化に繋がる循環資源を、最大限受け入れる仕組みは、送電の仕組みであるスマートグリッドと共通するため、スマートリサイクルと呼んでいる。地域で適切な規模の拠点を建設してリサイクルを実施し、焼却炉設置数の削減が可能となった場合、高効率なリサイクルが、全量焼却発電を行うケースと同等もしくはより低い費用で実施できる可能性があることが示された。また本研究における追加的な検討によって、スマートリサイクルでは施設建設などの固定的費用が低減することから、上述の人口減少や消費スタイルの変化等によって廃棄物発生量が減少した場合にも、廃棄物の単位重量当たりの費用が増加しにくいという利点も存在することなどが明らかとなっている。更に本研究においては、残りの低品質の廃棄物（厨芥等）の高効率利用法について、複合施設化を行う場合を検討する（図 1-5）。このように、動脈産業の活用と、複合施設を組み合わせたりサイクル・処理システムは、前述の外部要因の変化に対して頑強なシステムの要件を満たしており、高効率なリサイクルを長期間安定的に行える可能性がある。

なお、スマートリサイクルの推進には、発生源での分別収集が重要な要素となるが、アジアの諸都市では一般的ではない。環境省、瀋陽大学等と共同で行った、瀋陽大学キャンパス内におけるプラスチックの分別収集実験では、リサイクルの意義を伝える環境教育と、分別区分の適切な表示によって、適切な分別が実施されることが確認された。

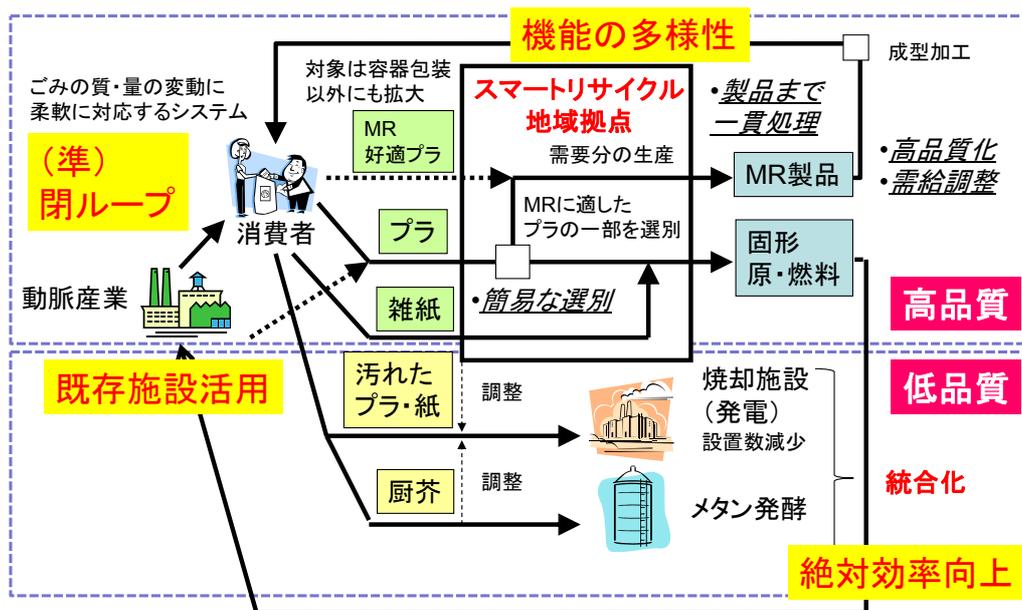


図 1-5 頑強なリサイクル・廃棄物処理システムの構成例

1.3.3 環境教育と分別収集実験

(1) 検討の背景

廃棄物発生源での分別は、リサイクルを効率化する上で重要である。中国においては、日本のような自治体等による組織的な分別収集は行われておらず、インフォーマルなサービスやスカベンジャーによる、リサイクル可能な廃棄物の回収が主となっている。安価な労働力が存在することも一因であるが、中国においても特に沿岸部では労働者の給与水準が増加していることを考えると、持続可能なシステムではない可能性もある。大規模な収集システムが採れないことにより、その後のリサイクルプロセスも細分化し、十分な規模の効果が期待できなくなる。またより理想的には、生産性の低い回収方式から生産性の高い回収方式に転換し、余剰となった労働力は更なるリサイクルの推進のために振り向けられる方が望ましい。

中国では、ごみの排出者自身がごみ分別の必要性や適切な分別方法をそれほど理解していない。そこで、分別収集普及の第一歩として、中国瀋陽市に立地する瀋陽大学のキャンパスを対象に、環境教育を実施すると共に、PET ボトル、ガラス瓶、缶類を対象にリサイクル可能な廃棄物の分別実験を実施した。これら一連の実験は、環境省・平成 23 年度 3R 事業展開・技術評価事業、川崎市・瀋陽市環境にやさしい都市構築モデル事業支援・技術評価検討会（座長：藤田壮）の調査事業の一環として、瀋陽大学の協力により実施されたものであり、本研究課題の研究者らの一部が、その企画段階から研究計画の立案や測定方法等に助言を行い、共同で実施したものである。また、実験の実施に当たっては、上記検討会の事務局である、JFE テクノリサーチの協力を得た。

(2) 実験方法

瀋陽大学キャンパスに、2011年12月、中国語および英語でリサイクル可能、リサイクル不可能とそれぞれ表示されたごみ箱100組（計200個）を設置した。設置場所は、講義棟エリアに39ヶ所、事務棟エリアに30カ所、カフェテリアに5カ所、大学内の寮に20カ所、門やキャンパス間を繋ぐトンネル付近に6カ所とし、これらのうち20カ所は屋外、80カ所は屋内である。まず、従来の分別状況を把握するため、環境教育実施以前の期間において、ごみの排出状況を測定した。各ごみ箱について、リサイクル対象であるPETボトル、瓶、缶の個数および重量と、それ以外のごみの重量を毎日1回測定し、これを平日の1週間継続した。

環境教育は、上記測定の次の1週間で実施された。中国の廃棄物問題の現状、リサイクルの重要性と、その円滑な実施のための分別排出の重要性などが講義で伝えられ、日本のごみ分別の状況についても紹介された。更に分別排出することを促すポスターや看板が、キャンパス内に掲示された。環境教育後の1週間は、環境教育実施前と同様の方法で、リサイクル対象とそれ以外のごみが、各ごみ箱にどのように捨てられているかを測定した。更に次の1週間では、ごみ箱の表示をこれまでのリサイクル可能を意味する言葉から、より具体的にPETボトル、缶、ガラス瓶に変更し、リサイクル可能、不可能の曖昧さから生じる不適切な分別がどの程度減少するかを測定した。各測定は、10名の教員、40名の生徒、20名の衛生担当職員が10のグループに分かれて実施され、各グループが10のごみ箱の測定を担当した。測定に先立ち、測定方法を確認するための講習会が全員を対象に実施された。

(3) 実験結果

測定を行った3週間において、100組のごみ箱の合計で平均して1週間当たり800のPETボトル、150のガラス瓶、500の缶が回収された。図1-6に示すように、適切に分別されない各リサイクル可能な廃棄物の割合は、環境教育の実施、表示の変更を経るに従って、減少していった。またリサイクル不可能な廃棄物が、適切にごみ箱に捨てられる割合も、同様に増加した。

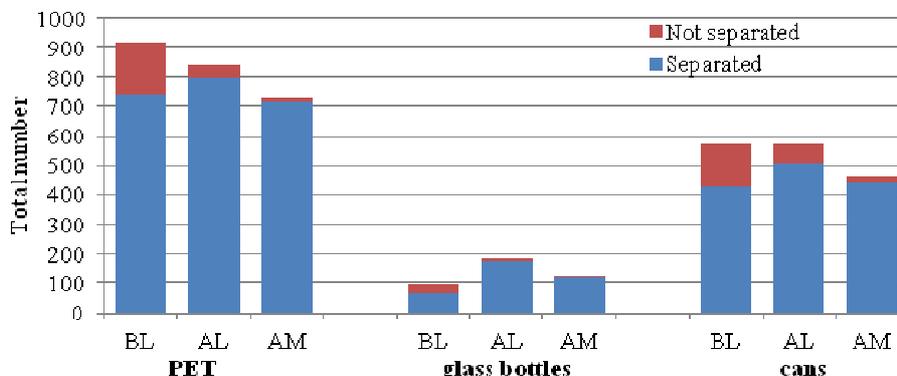


図 1-6 リサイクル可能な廃棄物の排出状況

BL = before lecture（環境教育実施前）, AL = after lecture（環境教育実施後）, AM = after mark modification（ごみ箱の表示変更後）

環境教育の実施や、ごみ箱の表示の変更が適切な分別の割合増加に寄与したかを、t検定によって調査した結果を表 1-4、表 1-5 にそれぞれ示す。

表 1-4 環境教育前後のリサイクル可能な廃棄物の分別率

| Variable | Mean | N | T-test for equality of means | |
|---------------------------|-------|-----|------------------------------|-----------------|
| | | | t | Sig. (2-tailed) |
| PET Separation Rate BL | .8161 | 408 | -8.239 | .000 |
| PET Separation Rate AL | .9541 | 383 | | |
| Bottle Separation Rate BL | .7184 | 87 | -5.144 | .000 |
| Bottle Separation Rate AL | .9486 | 115 | | |
| Can Separation Rate BL | .7322 | 265 | -4.930 | .000 |
| Can Separation Rate AL | .8758 | 282 | | |

BL = before lecture（環境教育実施前）, AL = after lecture（環境教育実施後）

表 1-5 ごみ箱の表示変更前後のリサイクル可能な廃棄物の分別率

| Variable | Mean | N | T-test for equality of means | |
|---------------------------|-------|-----|------------------------------|-----------------|
| | | | t | Sig. (2-tailed) |
| PET Separation Rate AL | .9541 | 383 | -3.565 | .000 |
| PET Separation Rate AM | .9869 | 381 | | |
| Bottle Separation Rate AL | .9486 | 115 | -1.638 | .103 |
| Bottle Separation Rate AM | .9880 | 83 | | |
| Can Separation Rate AL | .8758 | 282 | -2.588 | .010 |
| Can Separation Rate AM | .9354 | 263 | | |

AL = after lecture（環境教育実施後）, AM = after mark modification（ごみ箱の表示変更後）

環境教育の実施前後では、PET ボトル、ガラス瓶、缶のすべてについて統計的に有意な分別率の向上が見られた。環境教育の実施や看板等による分別を促す掲示は、分別行動の変化に正の効果をもたらすことが示された。また、ごみ箱の表示変更前後では、ガラス瓶の分別率の向上は統計的に有意ではなかったが、他の 2 種類ではやはり有意な改善が見られた。ごみの分別に混乱をもたらす可能性のある曖昧なごみ箱の表示から、分別対象を明確に示す表示へと変更することにより、分別がより適切に行われる可能性が示された。

同様の分析により、環境教育の効果は、リサイクル不可能な廃棄物の適切な分別排出の向上にも寄与したことが認められた。中国においても、組織的な分別収集の可能性が示さ

れたことは、今後のリサイクルシステムの効率化にとって、重要な意義を持つと思われる。瀋陽大学では、このような分別の取り組みを市内に拡大していくことが計画されている。

1.3.3 低品質な廃棄物の高効率リサイクルのための焼却・メタン発酵複合発電

(1) 検討の背景

一般廃棄物から混合プラスチックや雑紙類を分別して利用した場合、残りの廃棄物は相対的に厨芥類の割合が増加するため、水分に富む低位発熱量の低い廃棄物となる。この問題点を解決するには、厨芥類を分別してメタン発酵等を行い、含水率の高い廃棄物から効率的にエネルギー回収する方法を併用することが有効である。加えて、メタン発酵と廃棄物の焼却を近接させることにより、焼却排熱をメタン発酵槽の加温や、発酵残差の乾燥に利用するとともに、発酵残差の堆肥としての需要がない場合などに、発酵残差を容易に焼却処理できる利点が存在する。また、発酵により得られるメタンガスには、様々な利用方法が考えられる。都市ガス等の配管に接続して近隣のガス需要に供することができれば、効率の高いガスの利用法となるが、需要が存在しない場合は、オンサイトで利用する必要がある。一般的なものはガスエンジンなどの発電機で発電することであるが、その発電効率は一般的に30%台であり、例えばコンバインドサイクルのガス火力発電所の発電効率が60%程度であることを考えると、ガスの利用効率としてはそれほど高くない。都市ガスと焼却発電を組み合わせたものとしては、スーパーごみ発電が存在する。都市ガスを利用してガスタービンで発電し、タービンの排気ガスを利用して、焼却炉ボイラーの蒸気と熱交換して蒸気を昇温、昇圧することで、蒸気タービンの発電効率を高める仕組みである。一般に焼却炉のボイラーは、ごみ焼却時の燃焼ガスが腐食性に富むために、ボイラー配管を保護する観点から、蒸気を高温化することが難しく、発電効率が低い大きな要因の1つとなっている。都市ガスを利用した加温によって、この効率改善に寄与する仕組みとなっている。建設されたスーパーごみ発電施設的设计値による推計であるが、ガスタービンでの発電量および焼却炉単独で得られる電力量と比較して、加温された蒸気による焼却炉の発電量の増加分の合計と、投入されるガスの熱量を比較すると、見かけ上都市ガスは発電効率60%程度で利用されたことになり、ガスの利用方法として有効であることが分かる。しかし、厨芥の分別によるメタン発酵と焼却炉の組み合わせでは、相対的にメタンガス量が不足することも想定されるため、ここではガスタービンを省略し、メタンガスを用いたスーパーヒーターで焼却炉ボイラーの蒸気を直接過熱するケースを検討する。

(2) 焼却・メタン発酵複合発電システムの概略

検討するメタン発酵・焼却複合発電システムの概要を図1-7に示す。一般に可燃ごみとして焼却処理されている廃棄物のうち、厨芥類を分別収集して湿式（中温）メタン発酵に用い、残りの廃棄物を焼却炉で焼却し高効率発電をする。メタン発酵施設と焼却炉は隣接しているものとし、メタン発酵により発生したガスを用いて焼却炉ボイラーの蒸気を過熱することにより、発電効率を向上させるものである。類似のシステムを持つものが、山口県

防府市で建設中であるが、こちらのメタン発酵は乾式であり、また、余熱利用の方法等も本想定とは異なる可能性がある。プロセス設計を行う利点は、混合プラスチックや雑紙類を分別利用するスマートリサイクルの実施の有無・程度や、国・地域別の厨芥割合の違いなどが、システムの効率にどのように影響するかを評価できる点にある。

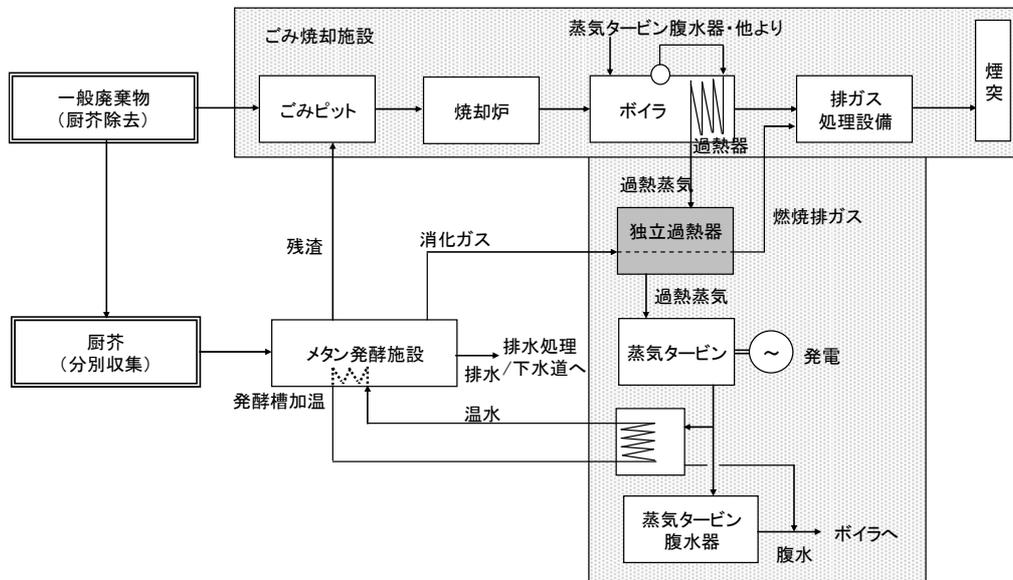


図 1-7 焼却・メタン発酵複合発電システムの概略

(3) 評価方法

複合発電システムの評価は、ごみ焼却、メタン発酵についてそれぞれ熱量等を算定し、その上で、両者をバランスさせた際の発電量を算出した。

・ごみ焼却部分の評価

ごみ量とごみ組成からごみ焼却施設の蒸気発生量を算出する。ごみの物理組成については、分別収集で厨芥類が 50%回収された場合の低位発熱量を基準ケースとする。ボイラーでの熱回収率を設定して、蒸気発生量を算出する。

・メタン発酵部分の評価

メタン発酵施設に投入される厨芥量から消化ガス発生量を算出する。厨芥中の揮発性蒸発残留物 (VS) 分解率を設定し、メタンガスを含む消化ガス発生量を算出する。

・焼却・メタン発酵の熱量バランス

独立過熱器において、ボイラーからの蒸気を消化ガスの燃焼熱で過熱させる熱量とバランスさせる。ここで、ボイラーからの蒸気圧力と温度でバランスするポイントを繰り返し計算で求める。

ごみの組成、および低位発熱量は日本の平均的な値として、環境省の「一般廃棄物処理事業実態調査（平成23年度版）」から全国平均値とし、算出した結果を表1-6に示す。低位発熱量は平均で 8.7×10^3 kJ/kgであった。

表 1-6 ごみ組成割合

| 項目 | 乾基準 (%) |
|---------|---------|
| 紙・布類 | 49.38 |
| プラスチック類 | 21.28 |
| 木・竹・わら類 | 8.97 |
| 厨芥類 | 14.09 |
| 不燃物 | 2.63 |
| その他 | 3.65 |
| 合計 | 100 |

出典：「一般廃棄物処理事業実態調査（平成 23 年度版）」（環境省、平成 25 年 3 月）から全国平均値を算出

その他の設定条件は、以下の通りに設定した。

i) ごみ焼却炉関連

- ・ボイラー熱回収率：85%（施設規模による熱回収率の違いは実機補正係数で補正）
- ・単独または全量焼却の場合のごみ焼却炉ボイラーの蒸気条件：4MPa*400℃
- ・所内電力消費：211kWh/t-廃棄物

ii) メタン発酵施設関連

- ・揮発性蒸発残留物（VS）分解率：80%
- ・メタン発生率：0.5Nm³/kg-VS
- ・消化槽加熱温度：35～40℃（中温発酵を想定）
- ・ガスエンジン発電効率：33%
- ・消費電力量：92kWh/t-厨芥

出典：井上侑香、新しい生ごみメタン発酵発電システム事業について、バイオマス・廃棄物発電によるエネルギー利用の最前線と課題、S&T 出版株式会社、2013.11.22

iii) 発電関連

- ・独立過熱器メタン燃焼排ガス出口温度：150℃
- ・蒸気タービン発電機効率：97%
- ・蒸気タービン排気出口圧力：0.015MPa（湿り度 10%）＝飽和温度 54.0℃
- ・複合システムの蒸気タービン入り口蒸気条件は 500℃を上限

iv) 規模の効果の補正

施設規模が大きくなるとボイラの比表面積が少なくなり、熱効率が向上し、発電効率が増加すると考えられる。そこで、計算上求めた発電量を施設規模で補正するため、実機補正係数を設定した。蒸気条件を変えた場合もこの実機補正係数で施設規模による補正を行

った。高効率ごみ発電施設整備マニュアル・改訂版、環境省、平成 22 年 3 月を参考に、4MPa*400℃の条件に、試算結果が合うように実機補正係数を設定した。

実機補正係数=0.156*Ln(x)-0.0279　ここで、x=施設規模（t/日）

これらの条件の下、処理規模 500t/日、厨芥分別率 90%のケース 1 と、厨芥の割合が相対的に高くなるケース 2（ここでは、ケース 1 の処理量に加えて、周辺地域から分別した厨芥のみを受け入れる場合を想定）について、焼却・メタン発酵複合発電システムで発電を行う場合に加え、同様の廃棄物に対して、メタン発酵・発電および残りの廃棄物の焼却発電をそれぞれ独立に行う場合、厨芥を分別せず全量焼却を行う場合について、評価を行った。

(3) 評価結果

独立過熱器では、蒸気圧力は同じで温度だけが上昇する。圧力は高い方が高い発電効率となるので、できるだけ高い圧力で独立過熱器が熱バランスする入口蒸気温度（=ごみ焼却炉過熱器出口蒸気温度）を求めた。この試算結果と発生蒸気量を表 1-7 に示す。

表 1-7 独立過熱器まわりの試算結果

| ケース | 処理規模 (t/日) | 厨芥分別率 (%) | メタン発生量 (100%換算 Nm ³ /日) | バランスした蒸気圧 力 (MPa) * 温度(℃) | 発生蒸気 量 (t/h) |
|-----|---------------|--------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 1 | 500 | 90 | 11,650 | 10MPa * 390 | 47.7 |
| 2 | 675 | 90 | 29,730 | 10MPa * 311℃ (飽和蒸気) | 56.9 |

算出された各ケース、システム構成別の発電量、所内の電力消費量、これらを差し引きした売電量の結果を表 1-8（ケース 1）および表 1-9（ケース 2）に示す。いずれのケースにおいても複合型は、他に比べて発電量が増加することが示された。また、厨芥の割合が増加するケース 2 において、複合型発電の効果がより高くなることが示された。例えば全量焼却と比較した場合の複合型の売電量は、ケース 1 において 20%程度増加しているのに対し、ケース 2 においては、25%増加する結果となった。厨芥が多く含水率の高い廃棄物から効率的に発電する手段として、有効である可能性が示唆された。また、複合型の利点を活かすには、メタンガスと焼却炉の発生蒸気量のバランスも重要である。

表 1-8 発電量の評価結果（ケース 1）

| 項目 | 比較 | | |
|---------------|--------|----------------|--------|
| | 複合型 | 焼却・メタン発酵 単独 | 全量焼却 |
| 発電量 (kWh/h) | 11,900 | 10,710 | 10,430 |
| 消費電力量 (kWh/h) | 3,850 | 3,690 | 4,010 |
| 売電量 (kWh/h) | 8,050 | 7,010 | 6,420 |

表 1-9 発電量の評価結果（ケース 2）

| 項目 \ 比較 | 統合型 | 焼却・メタン発酵 単独 | 全量焼却 |
|---------------|--------|----------------|--------|
| 発電量 (kWh/h) | 14,390 | 13,180 | 12,440 |
| 消費電力量 (kWh/h) | 4,750 | 4,370 | 5,010 |
| 売電量 (kWh/h) | 9,640 | 8,820 | 7,430 |

1.4 アジアへの適用の検討

1.4.1 焼却・メタン発酵複合発電システムの瀋陽市への適用

研究代表者と分担者の一部は、環境省の実施する「平成 24 年度川崎市・瀋陽市環境にやさしい都市構築モデル事業支援・技術評価検討会」に参加し、川崎市や焼却施設の設計・製造のノウハウを持つ JFE エンジニアリングと共に、前述のような複合発電システムの幾つかのパターンについて詳細な技術評価を実施し、瀋陽市へ導入した際の効果を算定し、結果を瀋陽市において報告した（算定方法は、上述のものとはやや異なる。また、汚泥の乾燥・焼却も評価に加えた）。

瀋陽市で今後追加的に処理方法を決定する必要がある生活ごみ 6000t/日、レストラン厨芥 400t/日、下水汚泥 1000t/日について、複合型リサイクル・処理システム適用（市内の 3 カ所に複合システムを建設することを想定）した場合について、それぞれのリサイクル・処理を個別に行う場合との比較を行った。複合化により、6300 万中国元/年相当の発電量の増加と、19.5 万 t/年の CO₂ 削減効果（瀋陽市の廃棄物部門からの GHG 排出の 22%に相当）が得られる結果となった。

1.4.2 環境産業地区設計ガイドラインの試作

アジアの諸都市では急速な産業化とともに、産業廃棄物と都市廃棄物が急増し、深刻な環境汚染をもたらしている。製造業の拡大とともに機械製品、金属製品の回収事業は民間ベースで始まりつつある。その一方で、プラスチックや厨芥をはじめとする有機系資源については個別の回収事業者が現状の市場ニーズに応じて回収と分別事業を行っているが、廃棄物の有機系資源としての社会的価値を活かして地域の環境汚染を抑制する効率的な資源回収が実現していない。これらの資源回収について日本の循環技術についての期待は大きいものの、循環型の社会制度や基盤の整備を含めた社会制度システムが存在しない市場メカニズムだけによる状況では、日本国内の技術をそのまま適用する視点のみでは、技術展開が円滑に進捗しない例も多くみられる。

特に中国では 2009 年に循環経済促進法が施行され、2011 年からの第 12 次国家 5 カ年計画が制定、運用されていく中で、低炭素を実現する資源循環システムへの志向が顕在化している。日本発信の高水準の循環技術と環境社会の知見を活かす統合的なシステム設計と、その実践的な展開に向けての社会投資を受け入れることのできる水準に、経済発展と社会的な実行能力が達しつつある。

循環型社会形成にむけて、動脈側と静脈側の産業システムと都市の循環政策とが連携する循環圏システムを設計するガイドラインを構築し、中国をはじめとするアジアの諸都市への一般化を進める科学的手法の提供を行うことが有効であると思われる。資源循環の技術・政策パッケージの作成、循環経済都市の設計・評価のためのデータベースの構築の検討成果を踏まえて、環境産業地区を設計するためのガイドラインを試作した。構成は表 1-10 の通りである。また、コンテンツの一例として、事業実施計画策定から実施までの流れを図 1-8 に示す。

表 1-10 環境産業地区設計ガイドラインの構成

| | | |
|---|-----|--------------------------|
| 1 | | アジアの諸都市における環境産業地区の概念 |
| | 1.1 | 環境産業地区とは |
| | (1) | アジア諸国の主要都市の持続可能な発展に向けて |
| | (2) | 日本から発信する「循環経済技術モデル」 |
| | (3) | 循環経済都市の中核を担う環境産業地区 |
| | 1.2 | 環境産業地区を構成する要素 |
| | (1) | 環境産業地区における主要な事業モデル例 |
| | 1.3 | 環境産業地区形成により期待される効果 |
| | (1) | 日中環境都市連携の成果 |
| | (2) | 低炭素の国際的地域づくりに向けての拠点形成の促進 |
| 2 | | 環境産業地区の軸となる事業モデル |
| | 2.1 | 製鉄連携モデル（コークス炉、高炉還元） |
| | (1) | コークス炉化学原料化 |
| | (2) | 高炉原料化システム |
| | 2.2 | セメント連携モデル（原燃料利用） |
| | 2.3 | 製紙連携モデル（原燃料利用） |
| | (1) | ミックスペーパー製紙原料化 |
| | 2.4 | 発電連携モデル（石炭火力混焼） |
| 3 | | 環境産業地区の設計 |
| | 3.1 | 地域のシーズとニーズの把握 |
| | 3.2 | 基本方針の策定 |
| | 3.3 | 環境産業地区構想の策定 |

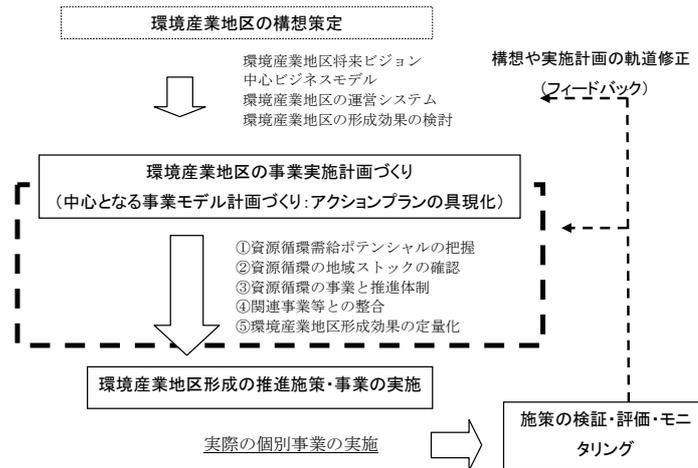


図 1-8 事業実施計画策定から実施までの流れの例

1.5 まとめ

- アジア都市における循環型社会の構築に資するため、主として一般廃棄物中の有機系循環資源のリサイクル・処理に関する調査・整理を行うとともに、特に既存設備を利用して高効率なリサイクルが可能な、動脈産業活用型のリサイクルについて、循環資源活用拡大の可能性を調査した。
- 人口減少に伴う廃棄物量の減少が予測される国内、経済発展の著しいアジア諸国など、外部要因の変化に対して頑強なリサイクル・処理システムに求められる要件を整理し、混合プラスチックや雑紙類などの高品質な循環資源を動脈産業でより大規模に活用するリサイクルを含む、システム構成を提示した。
- 効率的なリサイクルの推進に重要となる、廃棄物の分別収集実験を瀋陽大学において実施し、環境教育と分かり易い分別区分表示との組み合わせにより、適切な分別収集が可能であることが示された。
- アジアの諸都市では一般廃棄物中の厨芥類の割合が高く、また高品質な循環資源を分別して利用した際には、残りの低品質な廃棄物の処理が必要となる。頑強なリサイクル・処理システムの一部として、これら低品質な廃棄物からも高効率で電力を回収する仕組みを提供する循環技術のリエンジニアリングの一事例として、焼却・メタン発酵の複合発電システムについて、プロセス設計に基づく評価を行った。その結果、全量焼却する場合や、メタン発酵・発電と焼却・発電を個別に行うケースと比較して、より多くの電力を生産できることが示された。アジア地域でのリサイクルの高度化にとって、有効な技術となり得ると考えられる。
- 循環型社会形成にむけて、動脈側と静脈側の産業システムと都市の循環政策とが連携する循環圏システムを設計する方法論を構築し、中国の他都市およびアジアの都市への一般化を進める科学的手法の提供を目指して、資源循環の技術・政策パッケージの作成、循環経済都市の設計・評価のためのデータベースの構築、環境産業地区設計のためのガイドラインの試作を行った。

参考文献

- 1) Fujii, M., Fujita, T., Chen, X., Ohnishi, S. and Yamaguchi, N. : Smart recycling of organic solid wastes in an environmentally sustainable society, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.63, pp.1-8, 2012.
- 2) 石川晴菜, 中谷隼, 菊池康紀, 平尾雅彦 : 変動に対する頑健性・柔軟性を考慮したリサイクルシステム設計, 第8回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, pp.328-329. 2013.
- 3) 藤井実, 藤田壮, 陳旭東, 大西悟, 大迫政浩, 森口 祐一, 山口直久 : 長期的視点からのプラスチックおよび雑紙のリサイクルシステムの検討, *環境システム研究論文集*, 39, pp.II_439-447, 2011.

第2章 アジア地域に適した有機性廃棄物処理技術の開発

2.1 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現状調査

戸別に小規模なメタン発酵槽を設置し、家庭から排出される有機性廃棄物を原料として、回収したバイオガスを家庭で使用するシステム(家庭用バイオガス施設)は、世界中で広く使用されている。特に中国ではその歴史が長く、中国式システムとして広く認知されている。また、世界で最も多くの施設が中国に存在し、2010年にはそれは4000万基に達したという。もちろん中国では共同利用型の小～中～大規模バイオガスプラントの建設も推進されており、その施設数は合計5万基を上回り(2009年末)¹⁾、こちらも世界最多である。家庭用施設の場合は、ほとんどが農村に建設されており、特に内陸の貧困な地域に対して重点的に普及が行われてきた。これは、バイオガス施設が「新農村建設政策」を背景とした、農村の生産力向上、環境改善、収入増加を目的とした農村振興策としての役割を持つからである。一方で2000年代以降、中国は急速な経済発展の中でエネルギー不足の問題に直面したことから、再生可能エネルギーの利用を重要な課題として位置づけており、その中で家庭用バイオガス施設の普及は、具体的数値目標を示して重点的に推進する項目となっている。そうした政策的背景のもとで、研究開発および基準化、政府の財政援助・技術者育成、バイオガス施設を核とした農業を行う地域づくりを通して、家庭用バイオガス施設の普及が行われてきた。このような家庭用バイオガス施設のシステムおよび技術は、日本がこれまで見本としてきた欧米のそれらとは異質であり、我が国のバイオガス政策に示唆を与えることがあるかもしれない。

中国においては、2000年代以降に農村家庭用バイオガス施設の建設数は急激な伸びを見せている。図2-1に示すように、全国の家庭用バイオガス施設数は、90年代までは500万基程度であったが、2000年代には毎年100万基以上の増加率で増大し、2009年末時点で3507万基に達した。ただし、威らが報告しているように²⁾原料不足や維持費用負担の問題で、一度建設した施設の使用を停止している場合がある。統計資料によれば¹⁾、現在も利用中の施設は存在する全施設数の92%に相当する3230万基である(2009年末)。

次に、各地区の家庭用バイオガス施設数、年間バイオガス生成量および戸別バイオガス生成量を図2-2にまとめた。施設数に注目すると、目立って多数の施設を有するのは河北省が北限であり、冬期に寒冷となる東北部や西北部では相対的な施設数は明らかに少なく、多い地区でも80万基程度である。家庭用バイオガス発酵槽は、基本的には無加温で運転されるため、寒冷地域での低い反応効率は従来問題点として指摘されていた。コストをかけない発酵槽加温の仕組みも開発されてきたが、施設数は大きく伸びていないようである。一方で、温暖な地域では発酵槽の運転が効率的に行われると考えられるが、施設数は温暖な地域で必ずしも多いわけではなく、内陸部に集中しているようである。沿岸部にあり、農民の所得が全国平均の倍程度である上海市、江蘇省、浙江省では施設数が明らかに小さい。300万基を超える施設を有する地区は、河南省、四川省、広西区の3つである。家庭用バイオガス施設由来の年間ガス発生量は、全国で1241億 m^3 であり、上記3地区では年間

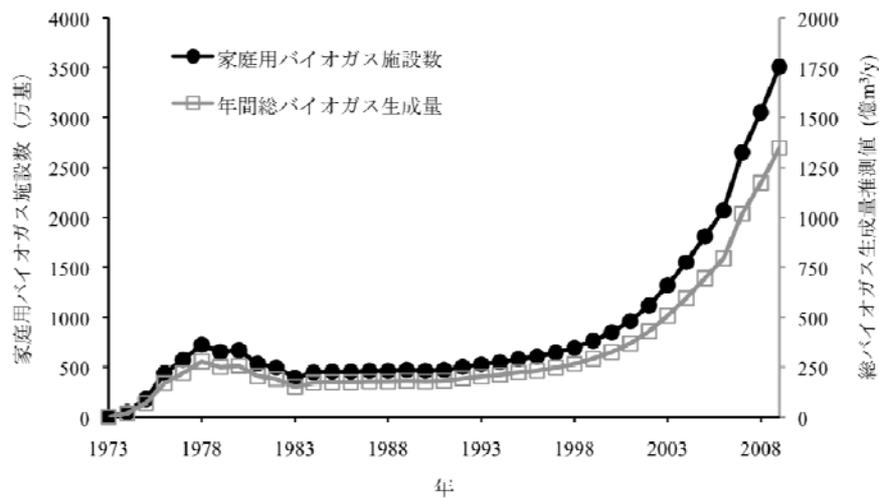


図 2-1 中国全土に存在する家庭用バイオガス施設数の推移^{1)、3)、4)}と年間総バイオガス生成量。バイオガス生成量は、年間の戸別バイオガス生成量を 2009 年の平均値 380 m³/y と仮定したときの推測値

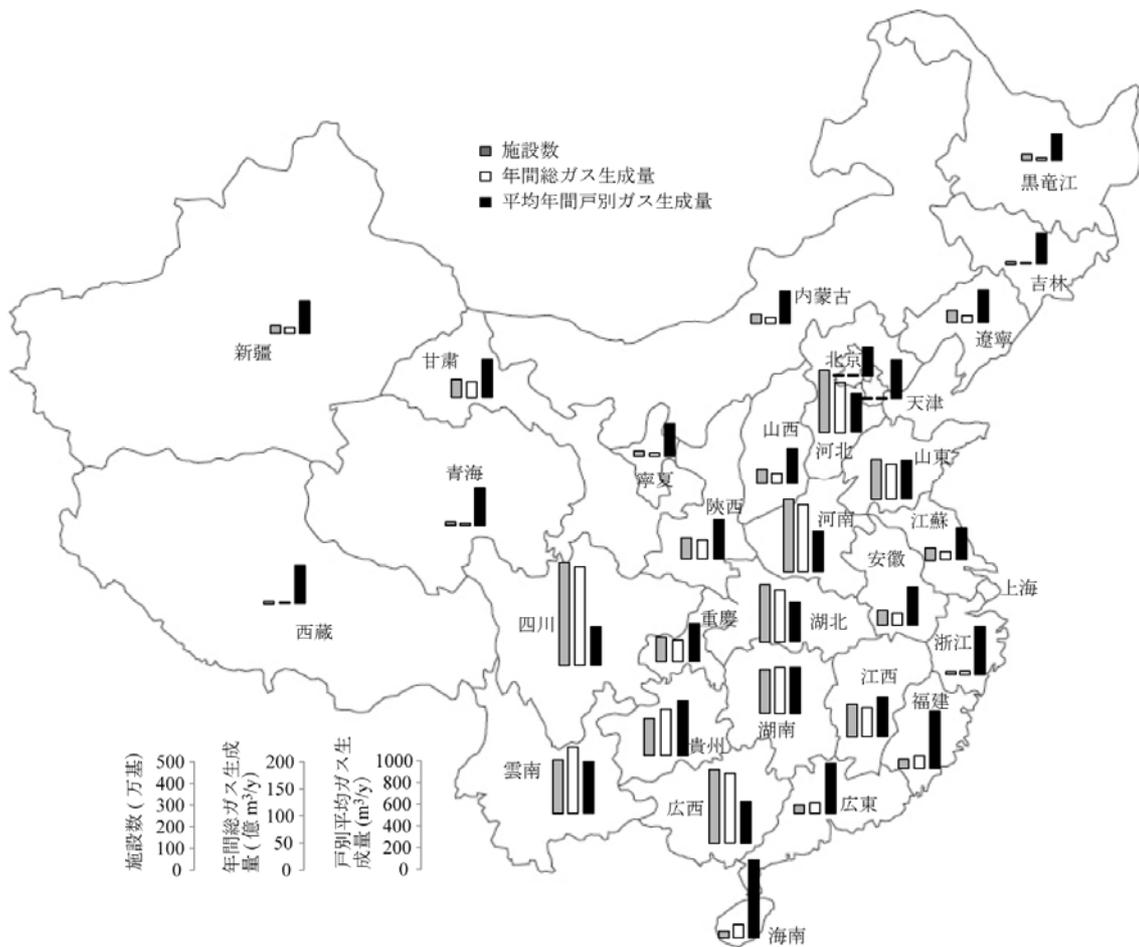


図 2-2 各地区の家庭用バイオガス施設数、年間総バイオガス生成量および平均年間戸別バイオガス生成量¹⁾

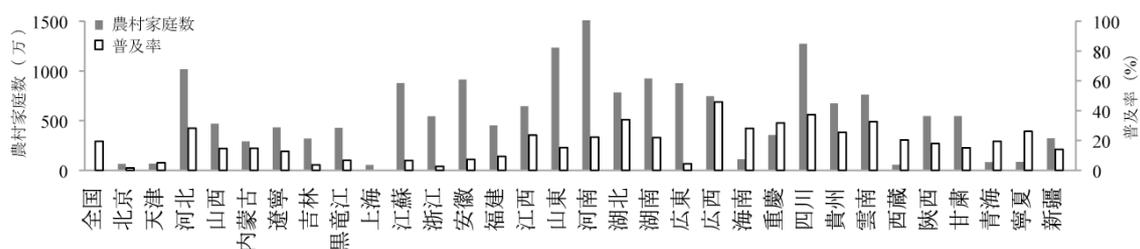


図 2-3 各地区の農村家庭数と家庭用バイオガス施設普及率の試算結果^{1)、5)}

115～168 億 m³ のバイオガスが発生している。一戸あたり年間バイオガス生成量は、242～720 m³ の範囲で分布しており、上海以南の温暖な地域におけるその値は、それ以外の地域におけるそれと比較して明らかに高い。バイオガス 1m³あたりの熱量は 6000 kcal であるため、全国での発生バイオガスのエネルギーは 744 T cal に達し、中国固有石炭換算係数(7000 kcal/kg)を用いて換算すると、これは 1 億 600 万トンの標準石炭のエネルギーに相当する。

施設普及のポテンシャルと現在の普及率を把握するため、2009 年版の農村人口統計データを利用し、図 2-3 に農村家庭数(1 家 4 人と仮定して農村人口から算出)と農村家庭数に占める家庭用バイオガス施設数の割合(普及率)をまとめた。いずれも 50%以下の普及率であるが、特に広西区、四川省、重慶市、雲南省等南方内陸部において 30%～50%程度の高い普及率を示している。全国平均では 19.4%の普及率であり、これからも施設の導入可能な世帯数はまだ 1 億 4000 万あると想定される。図からみて安徽省、河南省、山東省、広東省などは、まだ大きな普及ポテンシャルを有していると考えられる。政府の目標では 2020 年までに家庭用バイオガス施設の普及率を 70%まで引き上げるとしており、今後も活発な建設推進が継続されていくことが予想される。

2.2 無動力攪拌技術を用いた家庭用バイオガス施設の技術改善

2.2.1 研究の目的

アジア地域、特に中国における汚水および有機性廃棄物の分散型処理技術の動向について調査を行い、地域によって採用される技術は多様であるものの、(1)維持管理容易、(2)無動力で処理可能、(3)省スペースの 3 要素を重視した技術の開発・普及が実施されていることを確認した。とりわけ近年は、無動力・小規模のバイオガス施設の建設の伸びが顕著であり、その施設数は全国で 4 千万基を上回るまで増加した¹⁾。このような普及の拡大は中国だけではなく、ネパールやベトナム等アジアの他地域でも報告されている^{2)、3)}。当バイオガス化装置に係る技術的な調査の結果、無動力で自動攪拌機構を持たないために固形物沈殿が生じることと、投入原料の分散が不十分であることから投入口付近で負荷増大による酸性化が生じる場合があることを発見した。本研究では、無動力であるという従来の特徴を損なわずに発生ガスを利用した自動的攪拌機能を備えたバイオガスリアクターを開発し、その攪拌の効果を明らかにするため、攪拌無しの装置との比較実験を実施した。

2.2.2 実験方法

基質は、食堂残飯に重量比で 1.4 倍の水道水を添加し、カッターポンプで破碎したものを
 用いた。基質は 4℃の完全混合フィードタンクに貯留され、タイマー制御のポンプによって
 各反応装置へ毎日規定量が投入された。基質の平均 COD 濃度は $104.8 \pm 18.6 \text{ g/L}$ で TS および
 VS の平均濃度はそれぞれ $100.3 \pm 10.4 \text{ g/L}$ 、 $95.1 \pm 10.0 \text{ g/L}$ であった。開発した無動力攪拌装置
 の動作機構は図 2-4 に示す通りである。図 2-4 の R2 の装置左側の仕切り内部は気相部が密
 閉されガスが蓄積する構造である。また仕切りには U 字管が埋め込まれており、液および
 ガスが仕切りの反対側へ出入りできるようになっている。左側の仕切り内部ではバイオガ
 スの発生によって液面が徐々に下降し、ガスが一定量蓄積して U 字管下部まで達したとき
 に、蓄積されたガスはサイフォン現象により一気に反対側へ移動する。それと同時にガス
 蓄積により押し出されていた液体は引き戻される。このときに生じる液体の流動によって
 攪拌が行われる。有効容積 10L の無動力攪拌装置(R1)と同容積で U 字管と密閉チャンバ
 ーを持たない対照無攪拌装置(R2)を実験に使用した。また、R1 と R2 の内部に分布する汚泥
 の性状を把握するため、各リアクターには流入口付近から P1～P9 まで合計 9 箇所のサンプ
 リングポートが取り付けられている(図 2-5)。R1 と R2 の温度は温水循環で 35℃に保持した。

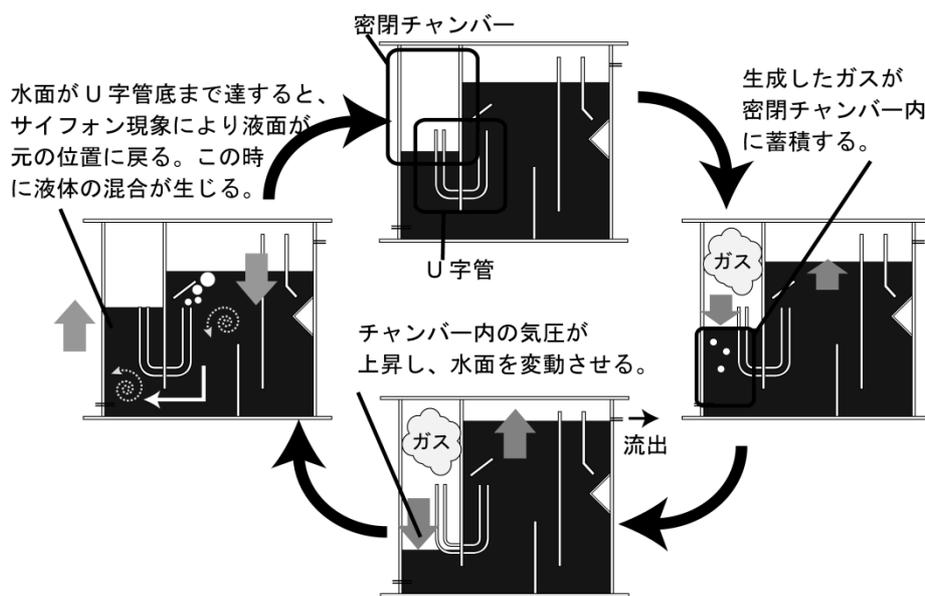


図 2-4 開発装置の攪拌機構

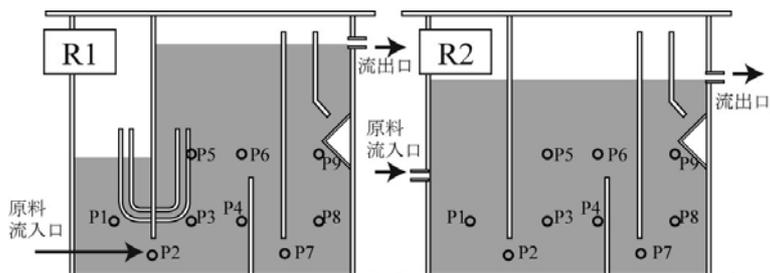


図 2-5 実験装置の概要図

2.2.3 実験結果と考察

図 2-6 は R1 と R2 における原料の滞留時間(HRT)、COD 容積負荷および槽容積あたりのガス生成速度の経日変化を示している。最初は HRT60 日からスタートしたが、グラフには HRT30 日の期間からのデータを記載している。HRT は 30 日、15 日、10 日、7.5 日の順に次第に短縮しながら運転を行った。COD 容積負荷は、それぞれの期間 2.9~3.8 kg/m³/d (HRT30 日)、6.9~8.7 kg/m³/d (HRT15 日)、8.9~12.6 kg/m³/d (HRT10 日)、11.9~18.2 kg/m³/d (HRT7.5 日)の範囲で推移した。R1 では HRT30 日から HRT7.5 日まで、負荷とガス生成速度が同時に増加しながら、各条件で一定水準の安定したガス生成速度が得られた。R2 では、HRT30 日と 15 日の期間には安定したガス生成が継続されたが、HRT10 日に切り替えてからすぐにガス生成速度が減少する傾向を見せた。槽内の pH は、ガス生成速度の減少に伴い、最低で 3.4 まで低下した。以上の結果は、サイフォン式無動力攪拌の導入によって、許容可能な負荷の水準が明らかに拡大されたことを実証している。

各 HRT 条件において、運転日数が HRT と同じ時間だけ経過した後を詳細データ取得期間と定めて、その期間のそれぞれの系列のデータの平均値をまとめた。流出液中の COD 濃度は、HRT 短縮に伴って全体的に増大する傾向が確認された。流入と流出の濃度から算出した COD 減量化率は、2 系とも HRT 短縮に応じて減少する傾向があった。R1 は HRT30 日の期間は平均 93.2%、HRT15 日の期間は平均 82.6%であったのに対し、R2 はそれぞれ 89.8%、81.3%であり顕著な差は認められなかったが、減量化された COD 分のメタン化率には大きな違いが現れた。HRT30 日、15 日において R1 は流入 COD のメタン化率は 92.1%、83.4%であったのに対し、R2 は、それよりも 10~20%低かった。上で述べた R1 と R2 間で COD 減量化率に違いが生じなかったのは、流入した COD の一部が槽内に沈殿、蓄積されて排出されなかったためであると考えるのが適当である。実際に、HRT15 日の期間に P1 から P9 までのポートからサンプリングを行い、槽内の汚泥を分析すると、同時期において R1 では槽全体に渡ってほぼ均一な低い濃度(約 20 g/L)で VS が分布しているのに対し、R2 では、R1 と比較して明らかに高い VS 濃度であり、かつ槽上部よりも下部の方が高い濃度であった。R2 槽上部における VS 濃度は 17~27 g/L、下部におけるそれは 89~112 g/L であった。これらのことから、サイフォン式無動力攪拌の導入は、有機物成分の沈殿蓄積を防ぐと共にメタン化率を上昇させることが明らかとなった。

2.2.4 まとめ

サイフォンを利用した無動力攪拌機構を有するバイオガスリアクターを作成し、連続実験を行ったところ、この攪拌機構を有する装置は、それがない装置と比較して許容有機物負荷の約倍程度の上昇、原料中の有機物成分の沈殿蓄積の回避、10~20%のメタン化率上昇の 3 つ点で優れた性能が得られることが明らかとなった。

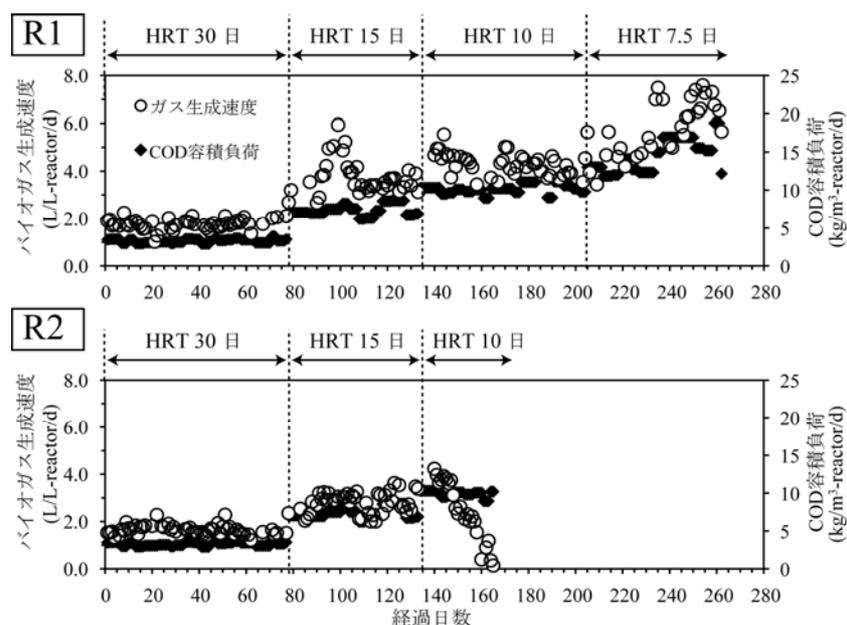


図 2-6 実験期間中の COD 容積負荷とバイオガス生成速度の推移

2.3 無動力攪拌バイオガス施設の実装スケールにおける流体力学シミュレーション

2.3.1 研究の目的

前節においてサイフォンを利用した発酵ガスによる無動力の攪拌機構を利用したバイオガスリアクターを開発し、室内実験による性能評価を実施した。室内実験装置は容量 10 リットルであるが、アジア諸国で実際に導入されている装置は数 m^3 の容積を有している⁶⁾ことから、そのスケール差は考慮する必要がある。本節では、無動力攪拌リアクターの実装を想定したデザインの確立を目的として、流体力学シミュレーションを用いた室内装置と実装装置との流体挙動の比較と、攪拌強度を決定すると考えられるサイフォン U 字管の長さによる影響を検討した。

2.3.2 分析条件

本研究では、サイフォン式攪拌による槽内沈殿物の巻き上げをシミュレーションして比較することにした。室内実験装置は前節と同じスケール、実装装置のスケールは図 2-7 のようになっている。容積は $2m^3$ を想定している。リアクターの内部には前節の実験結果を元にして粘度 $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の均一な汚泥で満たされているとした。分析ソフトとして FLUENT 6.3 を用いて、Qi らの方法⁷⁾に従い乱流モデルを解析した。

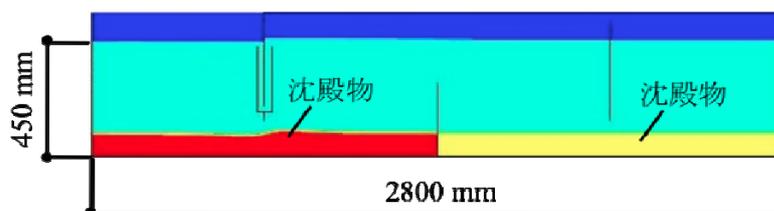


図 2-7 検討した実装スケールリアクターのモデル (濃青は気相部)

2.3.3 実験結果と考察

サイフォン攪拌サイクルを通した室内用リアクター(A)と実装スケールリアクター(B)との攪拌状況を比較した結果が図 2-8 である。リアクターは仕切り板によって4つのチャンパーに分けられており、図の一番左のチャンパーから原料が流入し、一番右のチャンパーから流出する。図の槽内汚泥が完全に沈殿したと仮定して、サイフォン式攪拌が生じた後の沈殿物の挙動を追跡した。結果から、サイフォン式攪拌によって沈殿物が巻き上げられること、異なる区間に存在する沈殿物同士が互いに混合されることが、A と B の両方において確認された。スケールアップにあたって、室内用と比較して横幅を広くとることになったが、図 2-8(B)からわかるように、左側チャンパーの沈殿物と右側チャンパーのそれが互いに前後に移入して混合されることが示された。このことは、室内用リアクターで観察されたような槽内の均質化による負荷の分散と同様のことが実装スケールリアクターでも起こることを示唆している。以上のことから、室内用リアクターで確認された攪拌の効果と同様の効果が、実装スケールの装置においても期待できる事が示唆された。

次に、実装スケールリアクターにおける U 字管デザインが攪拌に及ぼす影響を調べるため、U 字管の鉛直方向の高さを 150 mm、210 mm、270 mm の3段階に設定してそれぞれシミュレーションした。図 2-9 は図 2-8 とどうような攪拌サイクル終了時における沈殿物の分

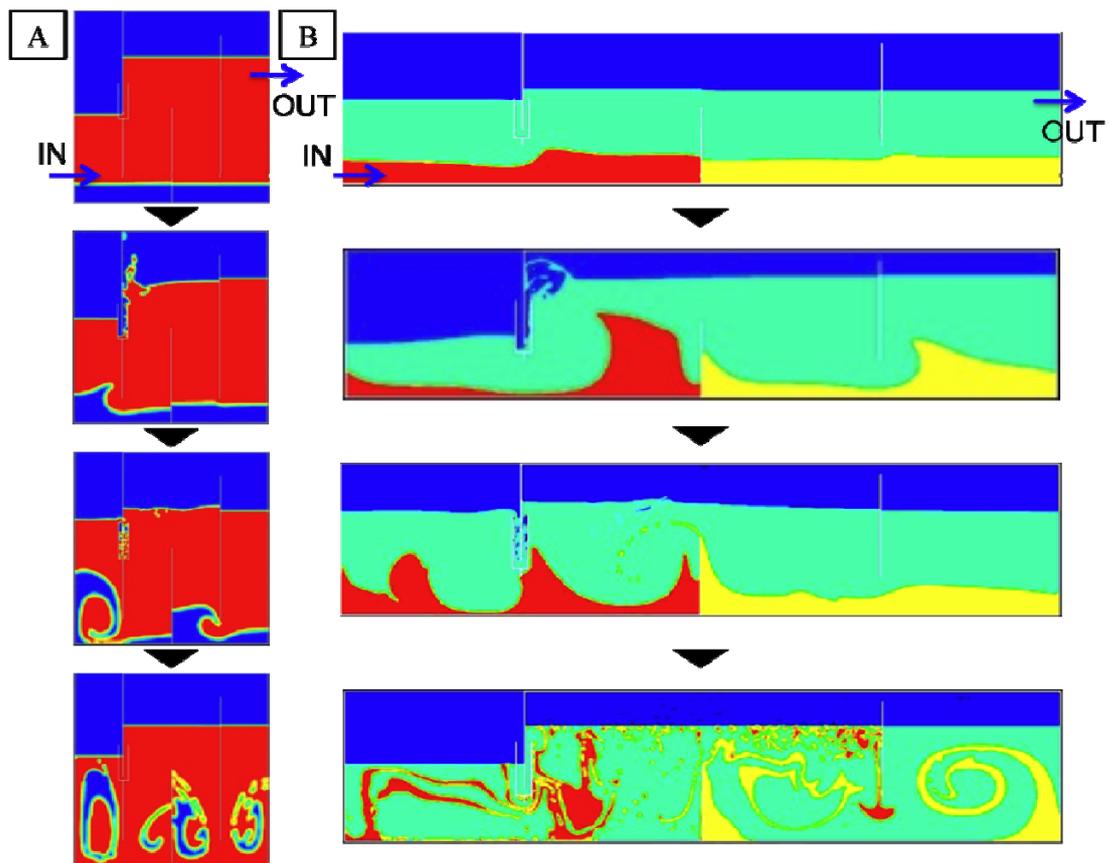


図 2-8 室内用リアクターと実装スケールリアクターとの攪拌状況の比較

布を示している。図から明らかなように、U字管高さの増大に従って、沈殿物の分散が促進されることがわかった。本リアクターでは、U字管の位置から横方向の距離が大きくなるに従い沈殿物巻き上げおよび分散の程度が小さくなる傾向がある。図 2-9 の 3 つの結果からは、沈殿物巻き上げの点から判断して、U字管長さが 210 mm 以上が望ましいと考えられる。

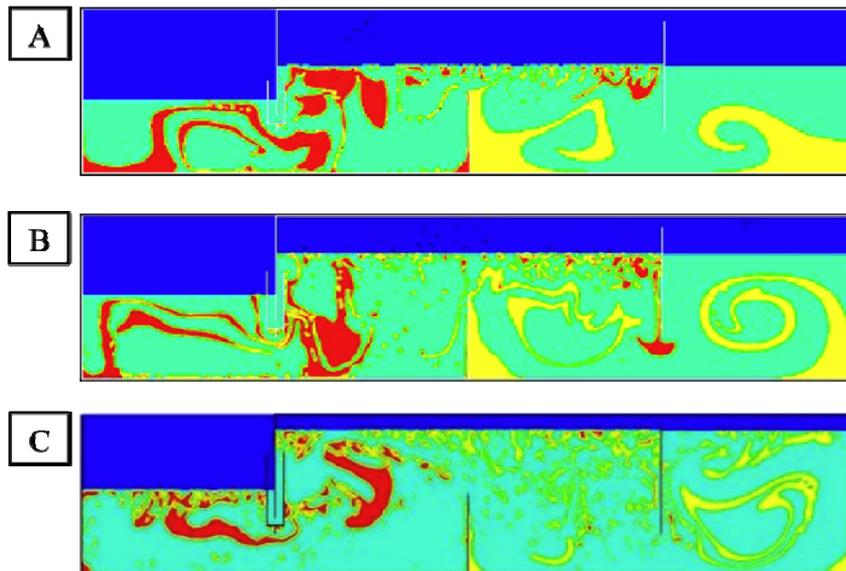


図 2-9 実装スケールリアクターにおける U 字管の長さが攪拌に及ぼす影響 (A は U 字管高さ 150 mm、B は 210 mm、C は 270 mm)

2.3.4 まとめ

無動力攪拌リアクターの実装を想定したデザインの確立を目的として、流体力学シミュレーションを用いた室内装置と実装装置との流体挙動の比較と、攪拌強度を決定すると考えられるサイフォン U 字管の長さによる影響を検討した結果、実装スケールの装置においても、サイフォンによる十分な攪拌が期待できる事が示唆され、またデザインに際しては、攪拌強度を決定づける U 字管の長さが重要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 中国農業部：中国農業統計資料 2009, 中国農業出版社, 北京 (2010)
- 2) 戚智勇, 劉瑜, 劉木求: メタンガスの活用による農山村振興の実態と課題 -中国湖北省恩施市を事例として-, 農村計画学会誌, 27, 203-208 (2009)
- 3) 中国農業部：中国農業統計資料 2006, 中国農業出版社, 北京 (2008)
- 4) Chen, Y., Yang, G., Sweeney, S., Feng, Y.: Household biogas use in rural China: A study of opportunities and constraints, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1) 545-549 (2010).
- 5) 中国国家统计局：中国統計年鑑 2009 年版(2009),
http://www.spic.jst.go.jp/statistics/yb09_index.html (2011.7 参照)

- 6) 小林拓朗, 徐開欽, 李玉友 : 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現況, 用水と廃水, 53(9), 707-717, (2011)
- 7) Qi, W.K., Hojo, T., Li, Y.Y. : Hydraulic characteristics simulation of an innovative self-agitation anaerobic baffled reactor (SA-ABR), *Bioresour. Technol.*, 136, 94-101, (2013)
- 8) Kobayashi T. , Wu Y., Xu K-Q., Li Y-Y. : Effect of Mixing Driven by Siphon Flow: Parallel Experiments Using the Anaerobic Reactors with Different Mixing Modes. *Energies*, 6 (8), 4207-4222, (2013)

第3章 アジア地域インフラデータベースの構築

3.1 研究背景と目的

近年、中国は高い成長率を維持しており、高度経済成長とインフラ建設の進展により、資源の需要が急増している。大規模なインフラの建設は自然資源消費量の増加の原因になり、大量の建設廃棄物や二酸化炭素の排出といった環境負荷も引き起こした。建設資材の投入とエネルギー消費の削減は持続可能な発展を考慮する上で大変重要である。本研究では、主に中国を対象とした地域別から都市レベルまでのマルチスケール分析により、インフラ整備に伴う建設マテリアルの需要の増大および社会経済発展との関係性を時間的・空間的に解明することを目的とする。広域スケールでは、地域別に中国の31省のマテリアルストックを対象とし、都市スケールでは遼寧省瀋陽市のマテリアルストックの蓄積と代謝特性を対象として分析する。特に4d-GIS(four-dimension Geographical Information System : 4次元地理情報システム)データベースを構築することによって、建物と社会基盤施設の時間的・空間的な分布と変化に明らかにし、地域の代謝特性を明らかにするための建築物の平均寿命と廃棄率曲線を推計することである。さらに、推計された建築物の平均寿命と廃棄率曲線より、瀋陽市と遼寧省を対象として、住宅廃棄物量を推計することで、2020年に瀋陽市と遼寧省における中間処分所の設立を検討する。

3.2 研究方法

本研究では、4d-GISを利用してインフラの時間変遷と空間分布を把握する。建築物、道路、鉄道を含むインフラの資源蓄積量(Material Stock)の推計には、以下の式を利用する。

$$MS_{i,n} = \sum_a (A_{n,a} \times MI_{i,a}) \quad (3.1)$$

ただし、MS : エリア n 内に存在する資材種別 i の合計資源蓄積量(Material Stock)[kg]、 A : エリア n 内に存在する構造種別 a である構造物延床面積[m²]、MI : 建物構造種別 a である構造物の単位面積あたりに投入される資材種別 i の物質量(資材投入原単位)[kg/m²]、である。

3.2.1 中国31省を対象としたマテリアルストック推計

中国の建築物、道路、鉄道を含むインフラ整備の変遷とマテリアルの需要(セメント、鉄鋼、木材、アルミ、他建設資材)に関連する基礎データを31の省別に整備した。また、1978年から2008年までの社会経済発展、インフラ整備の変遷と資源需要の関係性を明らかにし、マテリアルストックの生産性について地域格差を時系列で示した。

建築物の推計フローを図3-1に示す。図の左側は農村部の推計フローを、右側は都市部の計算フローを示しており、地域性に応じた推計を行った。1977年以前の延べ床面積と1978年以降の着工量より建築物の現況を推計し、Ouyang *et al.*(2008)とDURCEP(1986)より住宅と業務建物に分配することで、建築物の用途別の推計を行った。また、Song *et al.* (2004)^{*}と

Ouyang *et al.* (2007)より、図 3-2 に示す耐用年数の分布関数を用いて資材投入原単位を乗じることで推計した。

次に道路の推計フローを図 3-3 に示す。道路種・構造種ごとに規模を推計し、資材投入原単位を乗じることで推計を行った。図 3-4 に鉄道の推計フローを示す。道路と同様に、種ごとに資材投入原単位を乗じることで推計を行った。

また、資材投入原単位は、Zheng *et al.*(2012)より、表 3-1 に示す値を用いた。

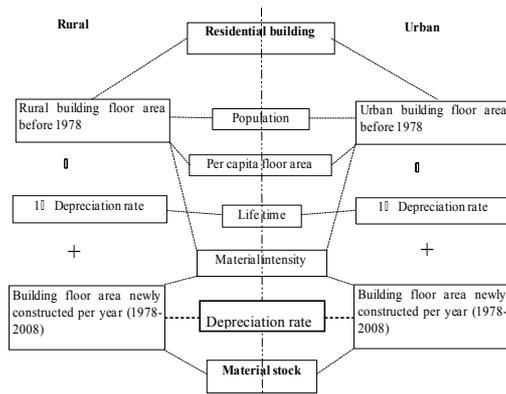


図 3-1 建築物推計フロー

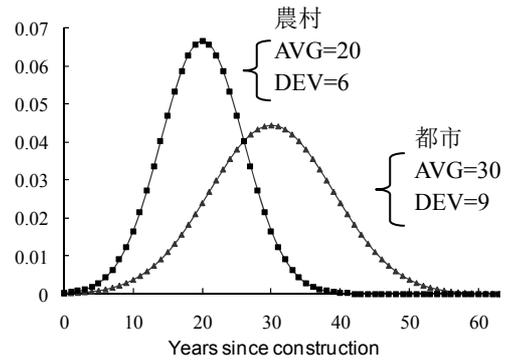


図 3-2 耐用年数分布関数

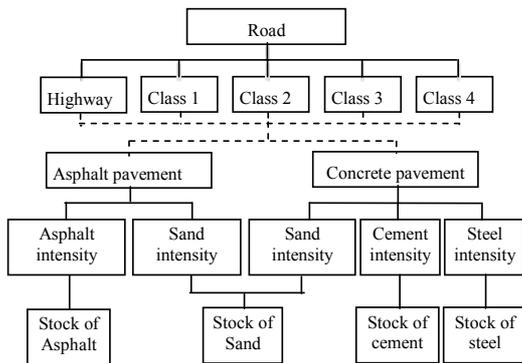


図 3-3 道路推計フロー

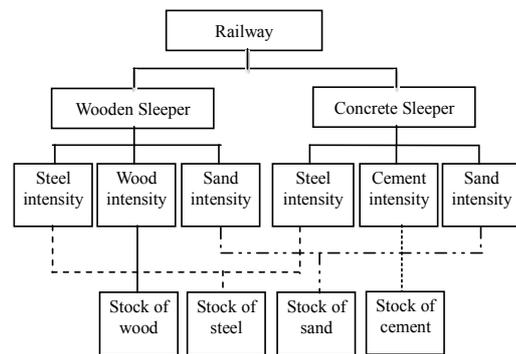


図 3-4 鉄道推計フロー

表 3-1 構造種別の資材投入原単位

| Type | Year | Residential building (kg/m ²) | | Road (kg/m ²) | | | | Railway (kg/m) | | |
|-------------|-------|---|-------|---------------------------|---------|---------|---------|----------------|----------|--------|
| | | Urban | Rural | Highway | Class 1 | Class 2 | Class 3 | Class 4 | Concrete | Wooden |
| Lime | 1980s | 20 | 20 | | | | | | | |
| | 2000s | 25 | 25 | | | | | | | |
| Sand gravel | 1980s | 800 | 800 | 440 | 450 | 390 | 350 | 330 | 5350 | 5010 |
| | 2000s | 750 | 750 | 440 | 450 | 390 | 350 | 330 | 5340 | 5000 |
| Glass | 1980s | 1.8 | 1.8 | | | | | | | |
| | 2000s | 2 | 2 | | | | | | | |
| Wood | 1980s | 20 | 25 | | | | | | | 150 |
| | 2000s | 15 | 20 | | | | | | | 140 |
| Asphalt | 1980s | | | 13 | 9 | 8 | 4 | 3 | | |
| | 2000s | | | 13 | 9 | 8 | 4 | 3 | | |
| Steel | 1980s | 23 | 4 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | | | 220 | 200 |
| | 2000s | 40 | 6 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | | | 230 | 205 |
| Brick | 1980s | 220 | 400 | | | | | | | |
| | 2000s | 180 | 280 | | | | | | | |
| Cement | 1980s | 190 | 190 | 115 | 110 | 68 | 65 | 59 | 150 | |
| | 2000s | 220 | 220 | 115 | 110 | 68 | 65 | 59 | 160 | |

3.2.2 瀋陽市鉄西区ケーススタディエリアにおける 4d-GIS データベースの構築

都市代謝の特性を定量化するためのケーススタディとして、瀋陽市の中でも近代において急速に発展した鉄西地区 10 平方キロの区域を選択し、1910 年から 2011 年までの間の 8 年分の 4d-GIS データベースを構築する。図 3-5 に示すように、まず、ケーススタディエリアに関する現存の GIS データ、歴史地図、地上写真、空中写真、瀋陽市の歴史に関する文献などの資料を収集する。次に、GIS を用いて処理するため、紙地図をスキャンし、ジオメトリック校正とベクトル化を行い、GIS を用いて、各年度の建物・道路・鉄道を表示するポリゴンやラインを描く。次に、写真資料と歴史文献を参考にし、各建物の階数、建物構造別、建築年代、道路と鉄道の種類などの属性情報を含めて GIS データを構築する。このような作業を年代別に繰り返すことにより、4d-GIS データベースを構築する。

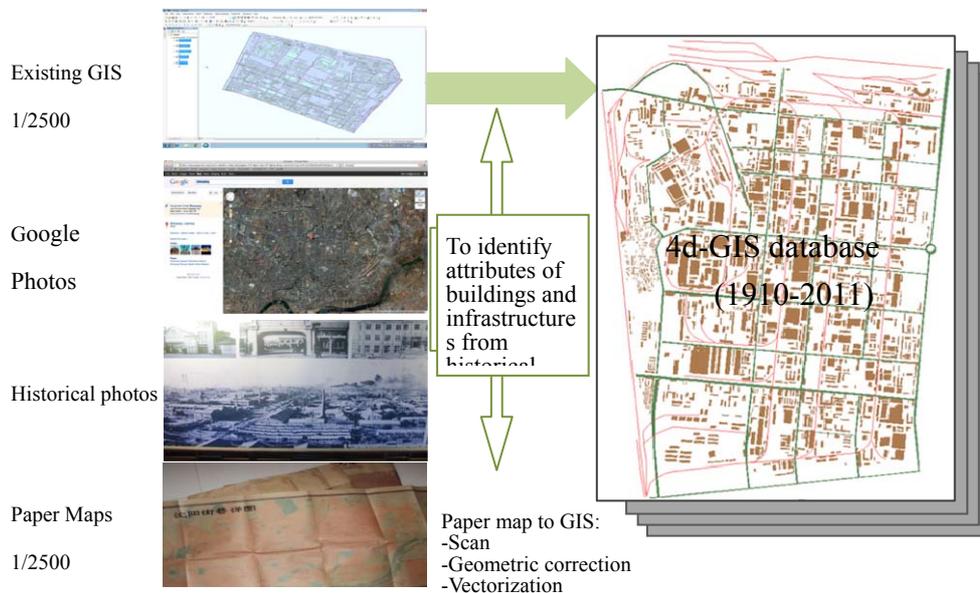


図 3-5 4d-GIS データベースの構築

3.2.3 瀋陽市鉄西区における建物の廃棄率曲線の推計

地域における物質代謝の特性を定量化するためには、重量比率の高い建築物および社会基盤施設の代謝特性を明らかにすることが重要となる。代謝特性を明らかにすることが可能となると、今後当該地域から排出される物質量の把握や、排出量の処理に必要な処理施設の整備戦略、当該地域の更新に必要な物質の供給戦略等、地域の将来の資源・環境計画の一助となると考えられる。

本研究において、Tanikawa and Hashimoto (2009)⁴⁾を参考し、以下の式に示すように、ロジスティック関数を用いて建物の廃棄率曲線を推計する。

$$N = \frac{K}{1 + a \cdot \exp(-bx)} \quad (3.2)$$

ただし、 N ：建物の廃棄率、 x ：建物の築年数[year]、 K ：飽和定数、 a 、 b ：関数のパラメーター、である。

建築物の耐用年数を各年代に建築された建築物の廃棄率 N が 50%になるまでの時間と定義すると、得られた曲線より平均寿命を求めることができる。本ケーススタディエリアでは、五つの時期に建築された建物（1989-1910, 1911-1932, 1933-1947, 1948-1968, 1968-1978）の廃棄曲線および平均寿命を推計した。

3.2.4 2020 年における瀋陽市と遼寧省の住宅廃棄量の推計

瀋陽市と遼寧省の住宅廃棄物の年間発生量については、年間に発生するマテリアルストックに、当年度の廃棄率を乗じることにより、推計する。2020 年の住宅廃棄物量は当年の年間別住宅廃棄物発生量の総合により推計する。

瀋陽市と遼寧省において、1978 年から 2012 年までの間に建てられたマテリアルストックを推計したデータを表 3-2 に示す。

表 3-2 瀋陽市と遼寧省における各年度新規住宅の集計データ

| Type | Content | Data Source |
|-----------------------------|--|---|
| Residential building | <ul style="list-style-type: none"> Per capita floor areas of residential buildings newly constructed every year in Liaoning Province Per capita floor areas of residential buildings newly constructed every year in Shenyang city | <ul style="list-style-type: none"> China Statistical Yearbook (1996–2012) China Rural Statistic Yearbook (1986-2012) Statistical Yearbook in Liaoning province and Shenyang city (1990-2012) |
| Population Factors | <ul style="list-style-type: none"> Urban and rural population in Liaoning province and Shenyang city | <ul style="list-style-type: none"> Comprehensive Statistical Data and Materials on 60 Years of New China (2010) |

式(3.1)、式(3.2)より、瀋陽市鉄西区ケーススタディエリアの各年代における建築物の廃棄率曲線を用いて、以下の式より瀋陽市と遼寧省の廃棄物量の推計を検討した。

$$W_i^t = \sum_{\tau} \Delta MS_i^{\tau} \times N \quad (3.3)$$

ただし、 W ：住宅廃棄物量[kg]、 N ：建物の廃棄率、 x ：建物の築年数[year]、である。また、本検討で用いた資材投入原単位を表 3-3 に示した。

表 3-3 建物・道路・鉄道の物資投入原単位

| Type | Class | Years built | Steel | Wood | Brick | Sand& Gravel | Cement | Glass | Lime | Asphalt | | |
|--|------------------|--|----------------|-----------|-------|--------------|--------|-------|------|---------|----|---|
| Residential building (kg/m ²) | Brick-concrete | 1989-1949 | 14 | 20 | 636 | 1038 | 148 | 1 | 32 | 1 | | |
| | | 1950-1959 | 14 | 20 | 636 | 1038 | 148 | 1 | 32 | 1 | | |
| | | 1960-1979 | 16 | 22 | 674 | 1189 | 157 | 2 | 32 | 1 | | |
| | | 1980-2011 | 21 | 24 | 705 | 1345 | 172 | 2 | 32 | 2 | | |
| | | 1975-1979 | 17 | 22 | 107 | 1066 | 153 | 2 | 19 | 2 | | |
| | Steel-concrete | 1960-1989 | 32 | 22 | 174 | 1113 | 181 | 2 | 27 | 2 | | |
| | | 1990-2011 | 75 | 26 | 16 | 1451 | 238 | 2 | 33 | 2 | | |
| | | Non-residential building (kg/m ²) | Brick-concrete | 1989-1949 | 28 | 14 | 615 | 964 | 168 | 2 | 40 | 2 |
| | | | | 1950-1959 | 26 | 14 | 615 | 964 | 168 | 2 | 40 | 2 |
| | | | | 1960-1979 | 26 | 15 | 570 | 1091 | 185 | 2 | 48 | 2 |
| 1980-2011 | 28 | | | 34 | 541 | 1216 | 215 | 2 | 48 | 2 | | |
| Reinforced concrete | 1975-1979 | 24 | 17 | 36 | 1231 | 271 | 2 | 6 | 1 | | | |
| | 1990-1989 | 43 | 22 | 315 | 1514 | 320 | 2 | 28 | 2 | | | |
| | 1990-2011 | 80 | 27 | 234 | 1438 | 418 | 2 | 28 | 2 | | | |
| Road (kg/m ²) | First-class | | 0.07 | | | 1099 | 118.25 | | | | | |
| | Second class | | 0.07 | | | 598 | 124.65 | | | | | |
| Railway (ton/km) | Wooden sleeper | | 200 | 150 | | 5007 | | | | | | |
| | Concrete sleeper | | 222 | | | 5244 | 149 | | | | | |

Source: Shi *et al.*(2012)³, Zheng *et al.*(2012)⁵

3.2.5 瀋陽市と遼寧省における建築廃棄物の中間処分所の推計

現地調査(Yuan and Fan, 2012)⁶から中国における建築廃棄物のリサイクル率は5%に至っていないが、日本および韓国の建築廃棄物のリサイクル率は95%を上回っている。そこで、中国は循環型社会を目指し日本および韓国の建築廃棄物リサイクル技術を導入すると仮定した。およびおよび日本最大級の建築廃棄物中間処分所の処理能力は毎日1千トンに相当する(約365トン/年)。例えば、東京でのリサイクラーペア会社は日本最大級の建築廃棄物中間処分所として、石処理機およびコンクリート処理機などの先進処理設備を備えている。これらの機械は同時に処理作業をすると、毎日960トンの建築廃棄物処理ポテンシャルがある。

中国の将来推計において、これらの先進的な中間処分所を建設し、リサイクル率を高めたケースについて推計を行った。

3.3 結果と考察

3.3.1 中国31省を対象としたマテリアルストック推計

中国の建築物、道路、鉄道を含むインフラ整備の変遷とマテリアルの需要(セメント、鉄鋼、木材、アルミ、他建設資材)に関連する基礎データを31の省別に整備した。

マテリアルストックの推計結果について中国全体を図3-6に、省別を図3-7に示す。

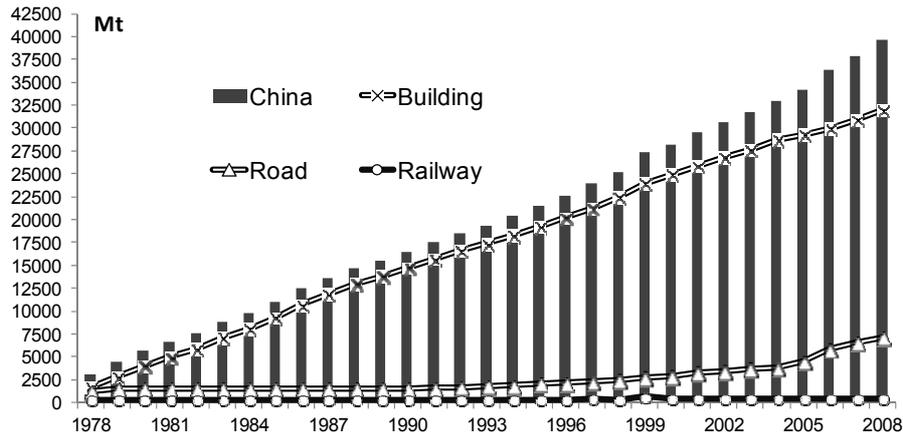


図 3-6 中国全体のマテリアルストック推計結果

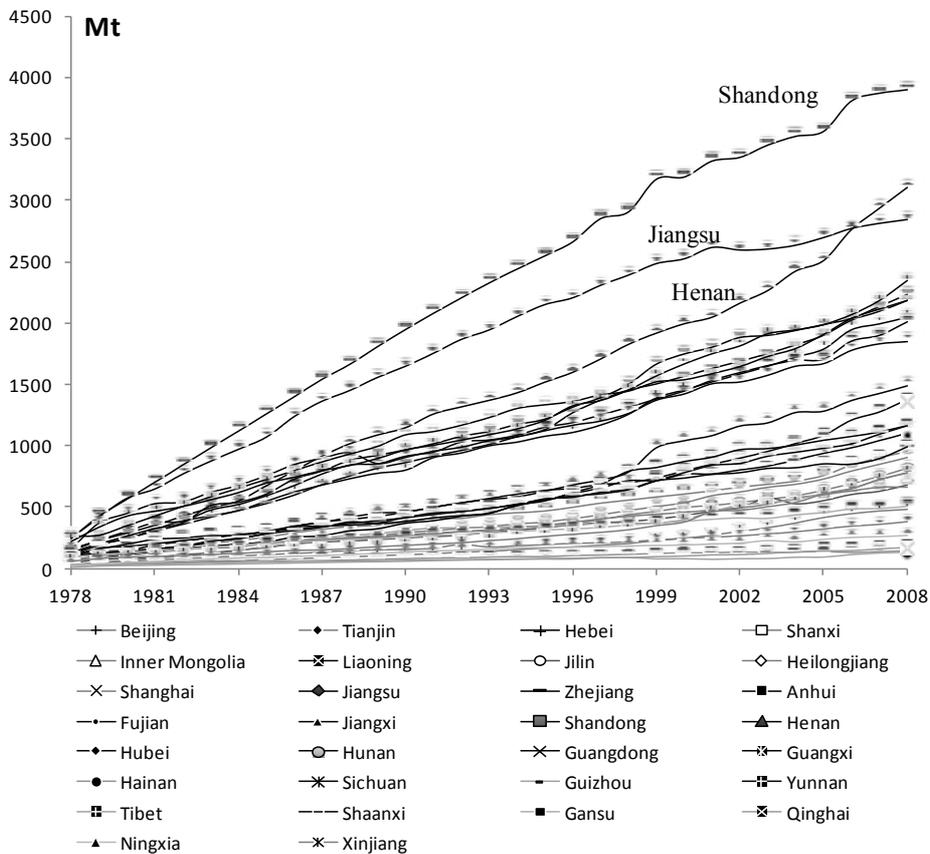


図 3-7 省別のマテリアルストック推計結果

中国全体では、特に建築物が顕著な増加を示しており、省別には Shandong(山東省)や Jiangsu(江蘇省)、Henan(河南省)において大きな増加があることが示された。

次に、31 省のマテリアルストックの変化について、空間的な分布を図 3-8 に示した。図より、東部の海岸沿いでマテリアルストックが大きく増加していることから、河岸沿いの経済発展著しい地域ほど多量の資材投入がなされたことが示された。

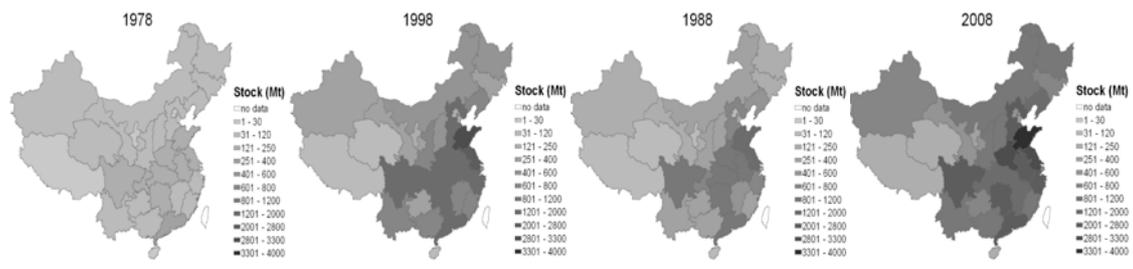


図 3-8 省別のマテリアルストックの空間分布

3.3.2 瀋陽市鉄西区ケーススタディエリアにおける 4d-GIS データベースの構築

都市代謝の特性を定量化するためのケーススタディとして、瀋陽市の中でも近代において急速に発展した鉄西地区 10 平方キロの区域を選択し、1910 年から 2011 年までの間の 8 年分の 4d-GIS データベースを構築した。図 3-9 に示すように、中国の瀋陽市の鉄西地区 10 km² のケーススタディエリアにおける 1910 年から 2011 年までの約 100 年間、8 年次分の 4d-GIS データベースを構築した。このケーススタディエリアでの交通インフラと建物の時間的・空間的な分布の変化について定量的な分析を行った。

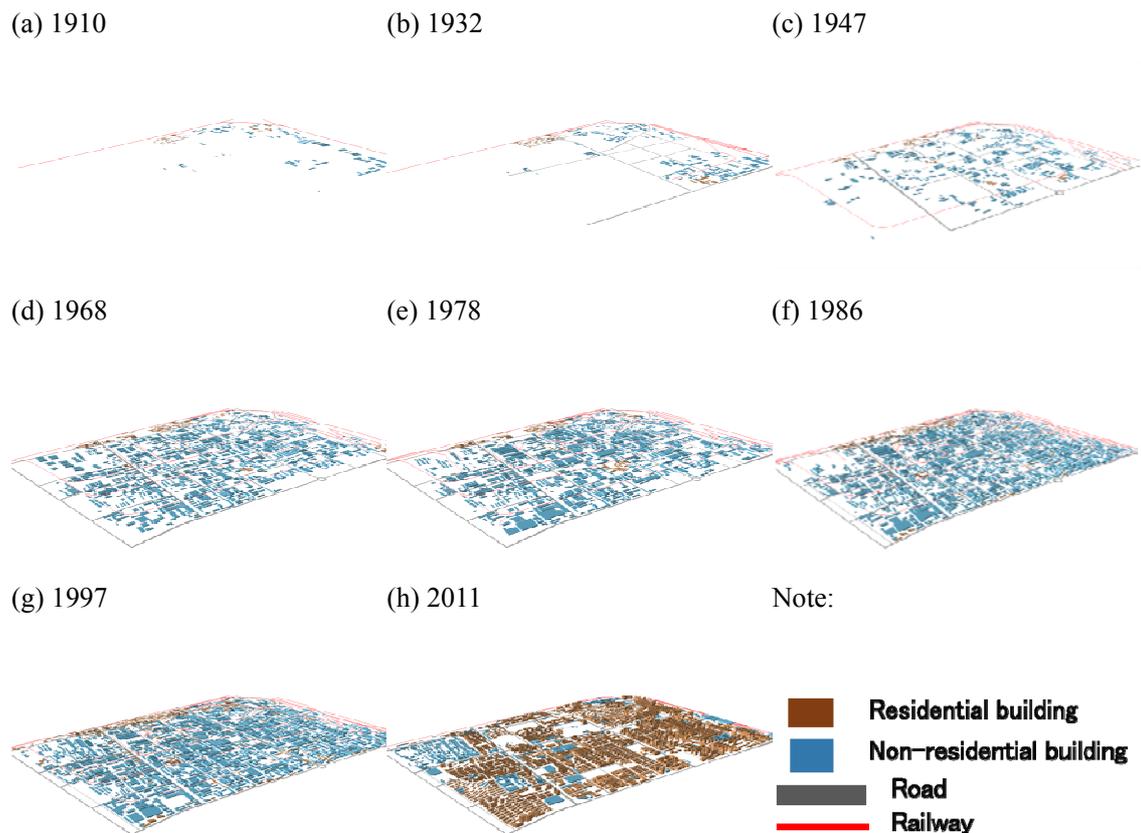


図 3-9 瀋陽市鉄西区における 4d-GIS データベース (1910-2011)

図 3-10 にケーススタディエリアにおける 1910 年から 2011 年までの構造物種類別のマテリアルストックの経年変化を示す。このエリアのマテリアルストックは 1.3 百万トン（1910 年）から 69 億トン（2010 年）に増加し、主に建物を中心に蓄積されている。1997 年までは緩やかに増加していたが、1997 年以降建物用途の変化および高層化が進み急激にストックが増加した。これは、瀋陽市鉄西区に 2002 年から 2012 年まで、“Moving the East and Transforming the West（東搬西建）”（Liu, Y.J., 2009）¹⁾ という政策により、鉄西区東部の主な工場を西部に移動し、東部は住宅と商業区として再開発したことによる。図 3-11 はケーススタディエリアにおけるインフラ建築資材別マテリアルストックの経年変化を示す。全ての年代において、コンクリート骨材や構造物基礎部分に使われる砂と砂利の割合が最も多い結果となった。

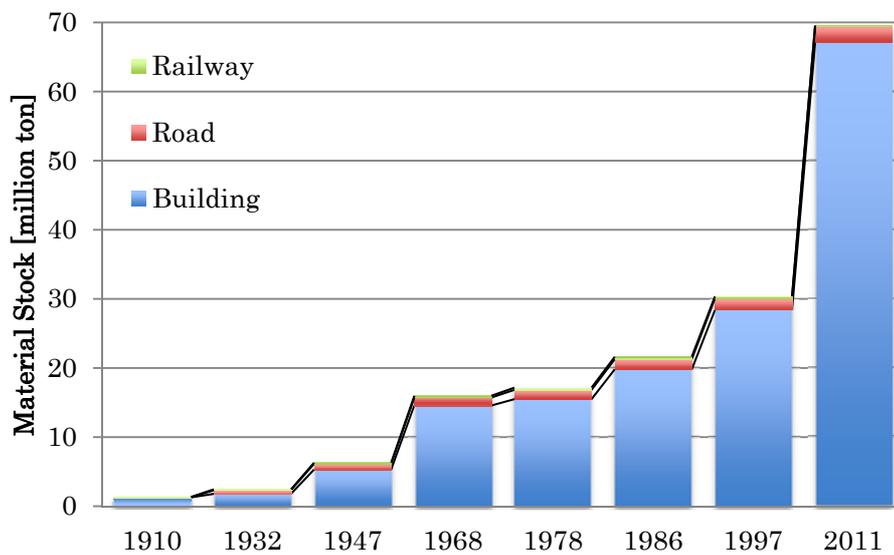


図 3-10 ケーススタディエリアにおける構造物種類別物質ストック量の変化

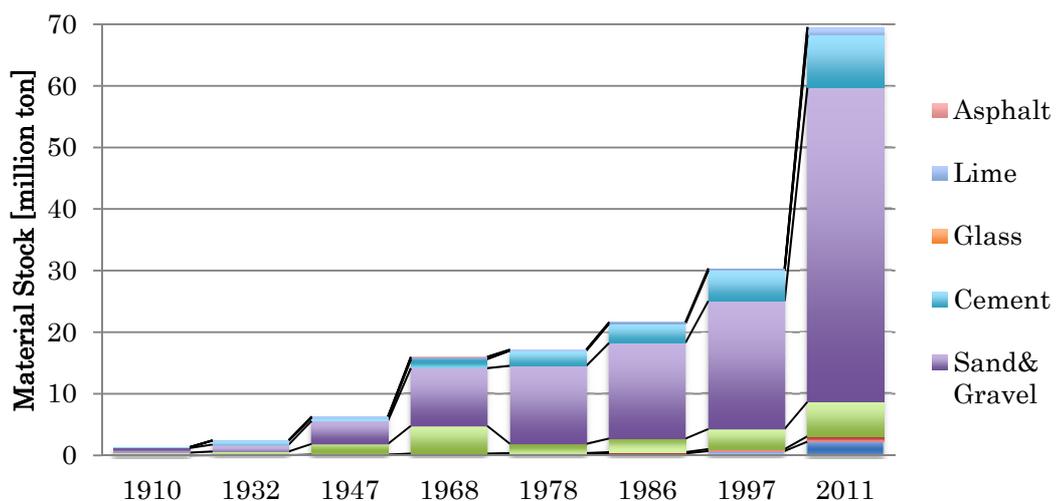


図 3-11 ケーススタディエリアにおけるインフラ建築資材別物質ストック量の変化

3.3.3 瀋陽市鉄西区における建物の廃棄率曲線の推計

地域における物質代謝の特性を定量化するためには、重量比率の高い建築物および社会基盤施設の代謝特性を明らかにすることが重要となる。

表 3-4 に、各年代に建築された建築物の廃棄率曲線のパラメーターを推計した結果を示す。1979年から1986年、1987年から1997年、および1998年から2011年の期間に建てられた建物の築年数が短いため、廃棄曲線のパラメーターの推計に十分なデータが得られない結果となった。

表 3-4 瀋陽市鉄西区における建物廃棄曲線のパラメーターと寿命

| N=K/(1+a*exp(-bx)) | Period of built year | | | | | | | | Average life span(year) |
|--|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
| | 1889-1910 | 1911-1932 | 1933-1947 | 1948-1968 | 1969-1978 | 1979-1986 | 1987-1997 | 1998-2011 | |
| All buildings | | | | | | | | | |
| Number of samples | 235 | 280 | 524 | 1197 | 398 | 945 | 983 | 1141 | |
| K | 0.97 | 0.95 | 1.01 | 0.95 | 0.95 | n.s. | n.s. | n.s. | |
| a | 12.22 | 12.23 | 5.95 | 1.31 | 5.54 | - | - | - | |
| b | 0.09 | 0.15 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | - | - | - | |
| E ² (sum of squares due to error) | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | - | - | - | |
| Life Span x' (t=50%) | 25 | 18 | 35 | 35 | 23 | - | - | - | 28 |

Note: n.s. Not significant.

図 3-12 に、ケーススタディエリア（瀋陽市鉄西区）における各期間に建てられた建物の廃棄率曲線を示す。実線は過去の建物の廃棄率の推移で、点線は 2012 から 2020 年までの建物の廃棄率の予測値を示す。建築物の廃棄率が 50% の年数を平均寿命であると仮定すると、ケーススタディエリアにおける建物全体の平均寿命は 28 年と推定された。この結果は既往研究（Song、2004）²⁾による 30 年と近い値となった。

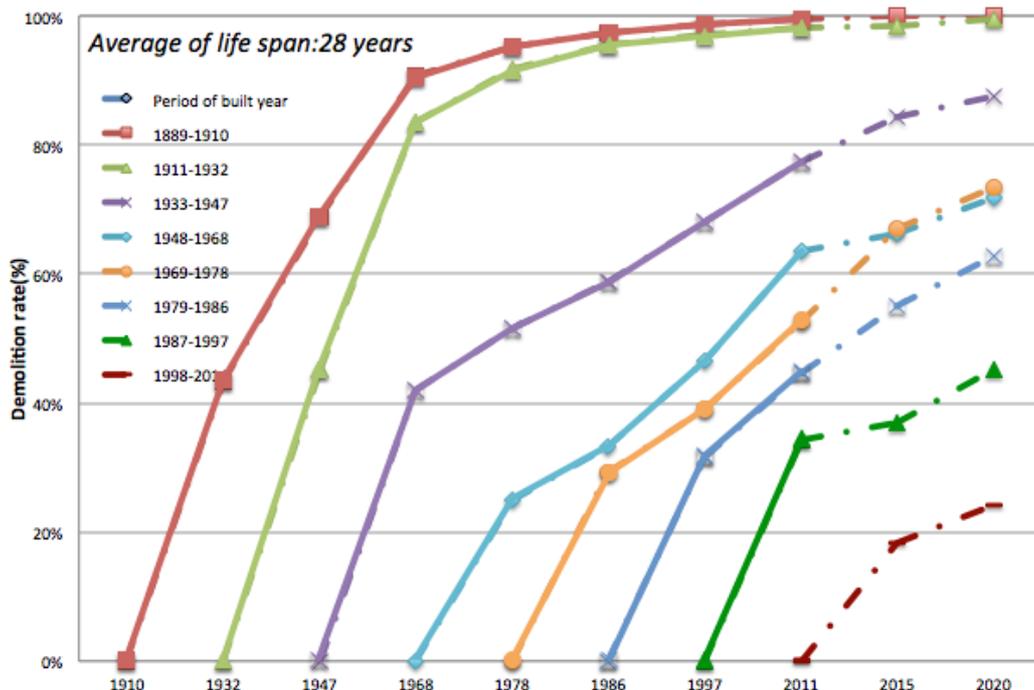


図 3-12 瀋陽市鉄西区における年代別の建築物廃棄率曲線

3.3.4 2020 年における瀋陽市と遼寧省の住宅廃棄量の推計

瀋陽市と遼寧省の住宅廃棄物の年間発生量については、年間に発生するマテリアルストックに、当年度の廃棄率を乗じることにより、推計した。2013 年から 2020 年の住宅廃棄物量は当年の年間別住宅廃棄物発生量の総合により推計した。

瀋陽市の住宅廃棄量を図 3-13 に示した。累積した廃棄物量は 2013 年に 72 百万トンベースとして、4%の増加率で 2020 年には 94 百万トンに増加する結果となった。

将来の 8 年間、年間の発生廃棄物量の増加率はほぼ同様である。また、年間の発生廃棄物量は約 3.1 百万トンである。特に、2020 年に発生する廃棄物量としては 3.3 百万トンになると予想される。

遼寧省の住宅廃棄量は次の図 3-14 の示したようになる。累積した廃棄物量は 2013 年の 730 百万トンベースとして、3%の増加率で 2020 年は 902 百万トンに増加する見込みである。将来の 7 年間、年間に発生する廃棄物量の増加率はほぼ同じである。また、年間の発生廃棄物量は約 24.6 百万トンである。特に、2020 年の発生廃棄物量としては 24.9 百万トンになると予想される。

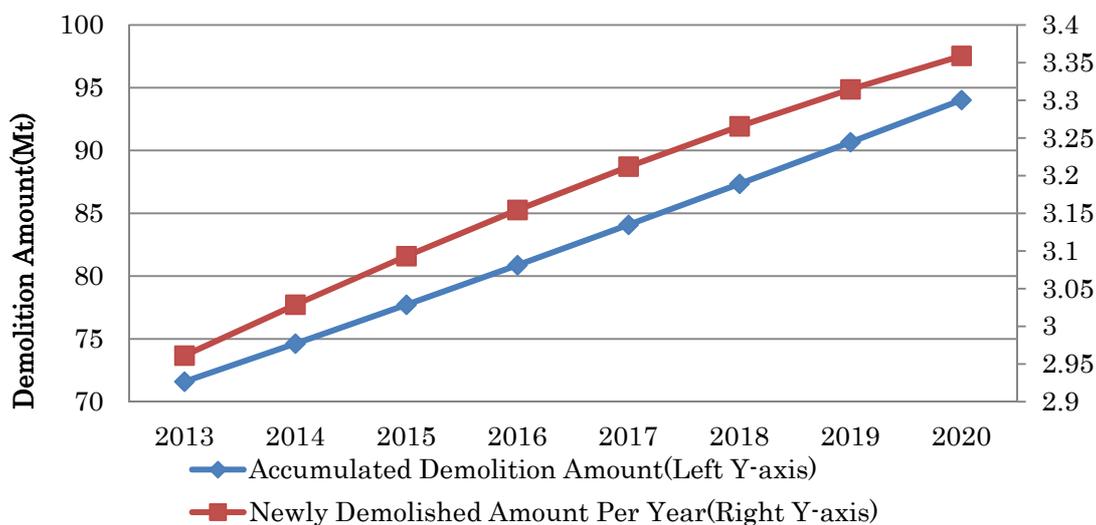


図 3-13 瀋陽市の年間の住宅廃棄物発生量

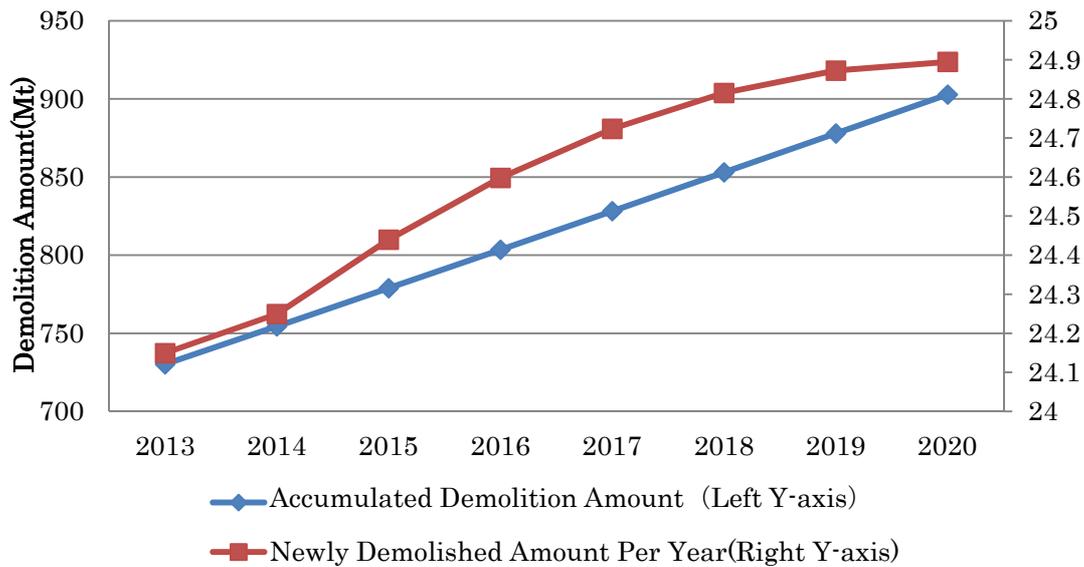


図 3-14 遼寧省の年間の住宅廃棄物発生量

3.3.5 瀋陽市と遼寧省における建築廃棄物の中間処分所の推計

本研究の推計により、3.3 百万トンの住宅廃棄物を処理するには、2020 年の瀋陽市は、10 カ所の建築廃棄物中間処分所（処理能力：960 トン/日）が必要となる。24.9 百万トンの住宅廃棄物を処理するには、2020 年の遼寧省は、71 カ所の建築廃棄物中間処分所（処理能力：960 トン/日）が必要となる。

3.4 結論

4d-GIS データによる地理的分布と時間的変化を考慮したシミュレーションモデルの構築により、社会経済発展とインフラ整備の変遷および資源需要の関係性を解明できるとともに、街区レベルの将来発展シナリオを設定し、低炭素と循環型社会に関する政策の実施効果を評価できることが示唆された。都市構造物のマテリアルストックが 130 万トンから 69 億トンに増加することが示され、このエリアにおける年代別建物の廃棄曲線を推計し、建物の平均寿命が 28 年であることが明らかになった。廃棄率曲線より、2020 年の瀋陽市の住宅廃棄物量は 3.3 百万トンになると推計された。リサイクル率を高めるために、2020 年の瀋陽市は、10 カ所の建築廃棄物中間処分所（処理能力：960 トン/日）が必要となる一方、2020 年の遼寧省は 24.9 百万トンの住宅廃棄物を処理するには、10 カ所の建築廃棄物中間処分所（処理能力：960 トン/日）が必要と予想され、71 カ所の建築廃棄物中間処分所（処理能力：960 トン/日）が必要となることが示された。

参考文献

- 1) Liu, Y.J. (2009): Discussing the Transformation and Revitalization of the Old Industrial Base by Analyzing the Industrial Development History of Shenyang Tiexi District, Northeast Normal University master's thesis.

- 2) Song, C.H. (2004): Whole life and highgrade quality—stick to the idea of giving first consideration for the people and implement housing performance certification. *Housing Science*, 9, 3-7 (in Chinese).
- 3) Shi, F., Huang, T., Tanikawa, H., Han, J., Hashimoto, S., Moriguchi, Y. (2012) : Toward a Low Carbon---Dematerialization Society-Measuring the Materials Demand and CO₂ Emissions of Building and Transport Infrastructure Construction in China, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 00, pp. 1-13.
- 4) Tanikawa, H., Hashimoto, S. (2009) : Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS, *BUILDING RESEARCH AND INFORMATION*, Vol.37, No.5-6, pp.483-502
- 5) Zheng, L.C., Han, J., Tanikawa, H. (2012) : Analysis of Material Stock Accumulated in Residential buildings & Transport Infrastructures and its Regional Disparity in China, *Journal of Environmental Information Science*, 40-5, pp. 51-60.
- 6) Yuan, E. J. and Fan, G. Y. (2012) :
http://www.cenews.com.cn/xwzx/sj/201108/t20110811_705080.html(in Chinese)

第4章 自然資源 GIS データベースの構築と分析

4.1 自然資源 GIS データベースのコンセプトと応用

エコロジーの概念を適用して都市活動や産業活動における資源、廃棄物、排熱などの物質・エネルギーフローを循環型に移行する施策は、資源効率、環境負荷、経済性などの面で多様な便益を生じる。発展途上国における都市・産業エコロジーは未成熟であるが、先進国の技術、施策を地域特性に応じて最適化して導入することで、今後急速な普及が期待される。一方、途上国の都市では伝統的に、周辺の森林、農地などの生態系で生産されるバイオマス資源を都市内で消費し、また都市から発生する有機性廃棄物を生態系に還元するなど、都市と周辺生態系を通じたバイオマスの循環利活用が行われていた。しかし近年の急速な経済発展や都市の拡大により、バイオマス資源は国内外の生産地からの長距離輸送により都市に流入し、有機性廃棄物は最終処分されて還流せず、都市と周辺生態系間の物質循環は断絶化する傾向にある。伝統的な都市と周辺生態系間の資源循環を再評価し、これと都市内の物質循環を有機的に結合することにより、より効率的な都市・産業システムを構築できる可能性がある。

本章は都市・産業エコロジーにおける都市内物質循環と、都市と周辺生態系間の物質的循環を統合したシステム設計、評価、施策提案を目途とし、自然資源 GIS データベースを構築し、これを用いた資源需給分析の有効性を示すことを目的とした。ここで開発した GIS データベースのコンセプトは、①森林、草原、農地などのバイオマス生産ポテンシャルを定量的に評価する、②データは地理情報を持ち GIS によって空間的解析を可能とする、③気候等の自然条件や人為的管理活動によるバイオマス生産ポテンシャル変化を生態系プロセスモデルとの連携によって予測できることである。このコンセプトに基づいて開発したデータベースの有効性を検証するため、中国における森林資源とエクアドルにおける農業残渣資源のケーススタディに応用した。前者では森林バイオマスだけでなく、森林から供給される水資源も併せて評価した。後者では気候変動を考慮して、バイオマス生産ポテンシャル変化の影響評価が可能であることを示した。さらに日本を対象とし、人間社会のバイオマス資源需要をモデル化することで、自然資源需要の将来予測をおこなうモデルを開発した。

4.2 中国遼寧省における自然資源データベースを利用したサービス収支分析

4.2.1 背景と目的

本研究は、中国遼寧省を研究対象地域とし、物質的資源として森林で生産されるバイオマスと森林から流出する水を対象とした。森林のバイオマス生産力と水循環は、森林の立地環境、林種、施業に依存するため、単純な原単位法によるこれらの推計は不十分である。このため、生態系における物質循環を生物地球化学的過程に基づいて記述した生態系モデルを利用することで、信頼性の高い資源供給力を推定するとともに、地域の環境と都市の資源需要特性に応じた森林施業を設計できると考えられる。

以上のような目的設定に基づき、本研究は生態系モデル Biome-BGC を用いて遼寧省の森林資源（バイオマスおよび水）供給ポテンシャルを GIS データベース化し、地域内都市とそれらの周辺森林における資源需給バランスの分析をおこなった。

4.2.2 方法

(1) 研究対象地域

本研究は対象地域を、中国遼寧省とした（図 4-1）。遼寧省の面積は 14 万 7000 km²で、2005 年の総人口は 4173 万人である¹⁾。中国の東北三省のひとつであり、地理的位置は北緯 38°42′～43°29′、東経 118°49′～125°47′である。南側は渤海湾に遼東半島が突出し、南西側は河北省、西側は内モンゴル自治区、北側は吉林省、東側は鴨緑江を挟んで北朝鮮に接している。気候は冷温帯に属し、瀋陽の年平均気温平年値は 8.7℃、年降水量平年値は 765 mm である。

遼寧省は瀋陽、大連などの都市部を中心に、中国の中では工業化が早く進展した地域である。2005 年の人口密度は 283 人 km⁻²で、中国平均 2 倍である¹⁾。都市化率（市街区人口対全人口比）は 0.43 で中国平均の 0.30 よりも高く¹⁾、都市の資源需要密度が高いと考えられる。一方、2005 年の森林被覆率は 32%で、中国の平均 18%より高く²⁾、比較的森林資源が豊かである。しかし人口当たり年間水資源量は 896 m³で、中国平均の 2152 m³の半分以下である²⁾。都市用水の水源は、都市近郊に建設された多数のダム貯水池に依存している。

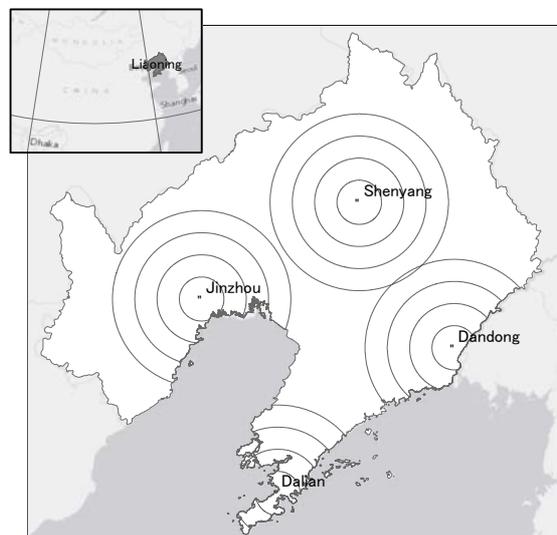


図 4-1 研究対象地域（遼寧省）と、4 都市（瀋陽、大連、丹東、錦州）を中心とする半径 25, 50, 75, 100 km 圏

(2) Biome-BGC の改良

本研究は対象地域の面積あたり森林資源供給力を推定するため、生態系モデル Biome-BGC 4.2³⁾を使用した。Biome-BGC は生物地球化学的プロセスに基づいて陸域生態系内の炭素・窒素・水循環を計算するモデルである。日気象値（最高・最低気温、降水量、

平均飽差、日射量)を入力とし、植生機能タイプ(落葉広葉樹林など)の生理的パラメータ、サイトの物理化学的パラメータ(土壌、窒素沈着など)を考慮し、植物成長・枯死(光合成、呼吸、同化物の器官分配、フェノロジー、落葉、枯死など)、土壌有機物動態(分解、無機化)、水循環(遮断、蒸発散、流出)を日単位で逐次計算する。

オリジナル版 Biome-BGC の土壌水循環スキームは土壌を1層のみで表現し、飽和容水量または圃場容水量を超える場合のみしか流出が発生しないため正確な水資源供給ポテンシャルを求められず、また乾燥ストレスによるバイオマス供給ポテンシャル低下も十分に考慮できない。これを改良するため、土壌を表層と深層の2層化し、①含水率による透水性変化、②浸透容量を超える水の表面流出、③深層からの重力排水、④水ポテンシャル勾配による層間水移動の各スキームを加えた。

(3) 森林資源供給ポテンシャル分布推定

対象地域における森林生態系の供給サービスを評価し、自然資源 GIS データベースを構築するため、バイオマスおよび水資源供給ポテンシャル分布を推定した。推定手順のフローチャートを、**図 4-2** に示す。推定方法は、林種(落葉広葉樹林、常緑針葉樹林)および森林施業別の土地面積あたりバイオマスおよび水資源供給力の推定と、対象地域内の林種別森林面積推定から成る。対象地域は気候傾度が大きく、場所によって森林生産力が異なると考えられる。このため、面積当たり森林資源供給力は緯経度 30'メッシュで推定をおこなった。また森林面積の分布は、林種別に 1 km メッシュで推定し、これらより 1 km メッシュの森林資源供給ポテンシャルを求めた。

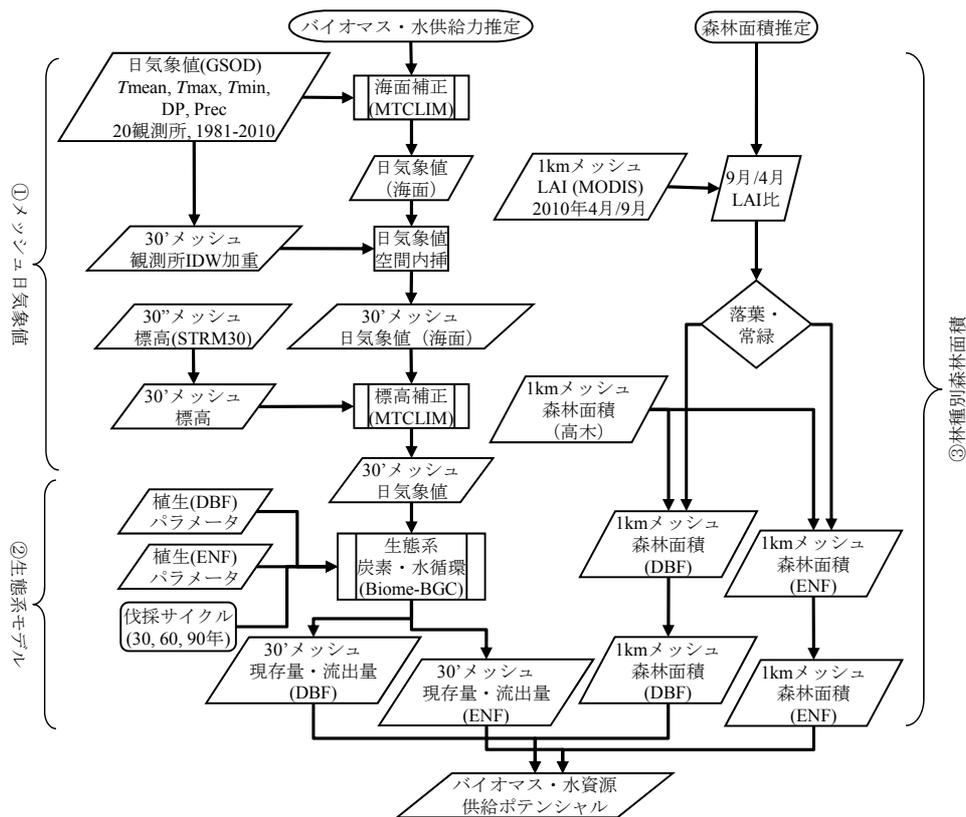


図 4-2 森林バイオマス・水資源供給ポテンシャル推定方法のフローチャート

(4) 林種・施業別森林資源供給力

森林資源供給力の推定は、①生態系モデルに入力する 30'メッシュ日気象値の作成と、②生態系モデルによる林種・施業別シミュレーションから成る（図 4-2 の①②参照）。30'メッシュ日気象値を作成するため、対象領域の遼寧省内および周辺の 20 箇所の気象観測所における 1981 年～2010 年の日気象値データ（最高・最低気温、平均露点温度、降水量）を取得した⁴⁾。これらの地点データから 30'メッシュデータを作成した。空間的計算処理には、地理情報システム（GIS）である ArcGIS 10.1 (ESRI)、標高を考慮した気象データの変換には、MT-CLIM を使用した。

次に、30'メッシュ日気象値を入力として、Biome-BGC によって面積当たり森林資源供給力を計算した。植生機能タイプとして、対象地域の主要林種である落葉広葉樹林（DBF）と常緑針葉樹林（ENF）を選択した。植生およびサイトパラメータは、すべてモデルの規定値とした。シミュレーションでは、はじめに土壌の初期状態を求めるためのスピニアップ計算をおこない、続いて 180 年間の本計算をおこなった。入力データとして、メッシュ化した 30 年間（1981～2010 年）の日気象値を循環利用した。本計算では、異なる伐採サイクル（短伐期：30 年、中伐期：60 年、長伐期：90 年）の森林施業を設定し、各サイクルの期首に植林、期末に皆伐をおこなうこととした。シミュレーション結果から、面積当たりの年間森林バイオマス資源供給力は、最終サイクル期末における地上バイオマス現存量を伐採

サイクルの年数で除した値とし、また水資源供給力は、最終サイクルにおける平均年間流出量 (out flow) とした。

(5) 林種別森林面積

林種別森林面積推定手順を、**図 4-2** に示す (③の手順)。対象地域内の林種 (落葉広葉樹林 DBF、常緑針葉樹林 ENF) を分類するため、人工衛星 MODIS の 1 km 分解能 8 日間コンポジット葉面積 (LAI) レベル 4 データ (MOD15A2)⁷⁾ を使用した。上記の Biome-BGC によるシミュレーションによって、対象地域の DBF の展葉期は 5 月上旬、落葉期は 10 月上旬と推定されたため、展葉前の 2010 年 4 月 23 日および落葉前の最大 LAI 期である 2010 年 9 月 14 日のデータを取得した。9 月 4 月の LAI の比演算をおこない、LAI 比 > 2 を DBF、それ以外を ENF と分類した。この分類を元に、1 km メッシュ土地利用データ⁸⁾ から「森林-高木」カテゴリーの面積割合を用いて、対象地域の 1 km メッシュ DBF および ENF の面積分布を得た。なお、対象地域では落葉針葉樹林 (DNF) の造林も行われているが、面積が小さいため、落葉林はすべて DBF と仮定した。

(6) 森林生態系サービス需給分析

都市活動において消費されるバイオマスおよび水を地域内森林の供給生態系サービスによって充足できるかどうかを評価するため、サービス充足指数 (Service Sufficiency Index; SSI) を提案した。SSI はサービス別の地域内需要量と供給量から、 $SSI = (供給量 - 需要量) \div (供給量 + 需要量)$ で計算され、全需要量を外部依存するとき -1、全供給量を外部に提供できるとき +1、地域内で収支が均衡するときに 0 となる。

遼寧省内の 4 つの拠点都市 (瀋陽、大連、丹東、錦州) を選択し、これらにおける資源需要と周辺森林の供給のバランスを SSI によって評価した。各都市の市街区の幾何学的重心を中心とする半径 25, 50, 75, 100 km の同心円状ゾーンを設定し (**図 4-1** 参照)、各ゾーン内の資源需給分析をおこなった。また県レベルおよび市レベルの需給も分析した。この分析のため、まず 2005 年の統計による遼寧省内の市、市街区ごとの人口と面積¹⁾ から、各ゾーンの人口を推計した。サービス需要量として、バイオマスおよび水資源需要量は、各ゾーンの人口に 2005 年の中国の一人当たり木材消費量¹⁾ または一人当たり水消費量¹⁾ を乗じて求めた。サービス供給量として、生態系モデルにより求めたバイオマス供給および水資源供給ポテンシャルを、ゾーン内で積算した。

4.2.3 結果と考察

(1) Biome-BGC の改良

土壌水循環スキームの改良の結果、日流出量の不自然な変化を解消することができた。オリジナル版による計算結果と比較すると、伐期 60 年の落葉広葉樹林の年蒸発散量は平均 -3%、年流出量は平均 +6%、年最大葉面積指数および純一次生産は平均 -2% 変化した。この結果、土壌水循環プロセスの改良によって、正確な水資源供給ポテンシャル推定と乾燥ス

トレスによるバイオマス供給ポテンシャル低下を考慮が可能となった。

(2) 林種・施業別森林資源供給力

遼寧省における年平均気温の30年（1981～2010年）平均値は10.7℃で、南部の遼寧半島先端では13℃以上、東北部に向かって低下し、最低では8℃以下であった。年降水量の平均値は744mmで、東部では1100mmを超えるが、西部に向かって低下し、最低では約500mmであった。このように、対象地域では特に降水量の東西方向の傾度が大きく、東部では落葉広葉樹林または針広混交林、西部では半乾燥草原が潜在植生となると考えられる。

生態系モデル Biome-BGC によって推定した面積当たり森林資源供給力を、表 4-1 に示す。対象地域において、樹木成長速度は落葉広葉樹林 (DBF) が常緑針葉樹林 (ENF) より大きく、期末の地上部現存量は DBF>ENF であった。同様にバイオマス供給力も DBF>ENF であった。伐採サイクルが長いほど期末の地上部現存量は大きくなるが、これを伐採サイクルで除したバイオマス供給力については、伐採サイクルによる差は小さかった。伐採サイクルが長いほど年蒸発散量は大きかったが、その差は DBF より ENF でより大きかった。水供給力（年流出量）は降水量と蒸発散量の差であるが、その地理的変動はバイオマス供給力や蒸発散量よりも大きかった。水供給力は、伐採サイクルが短いほど大きくなった。同期間内のバイオマス成長量と蒸発散量の比を、水利用効率 (WUE) と定義した。WUE は DBF>ENF であり、また伐採サイクル 60 年における WUE が最大となった。

伐採サイクル60年の落葉広葉樹林のバイオマスおよび水供給力の分布を、図 4-2 に示す。バイオマス・水供給力ともに、年降水量と相似の分布を示し、降水量が大きい東部では森林成長が大きく、また森林からの流出が大きいことがわかる。

表 4-1 Biome-BGC による面積当たり森林資源供給力の推定結果

| Forest type | Deciduous broad leaf (DBF) | | | Evergreen needle leaf (ENF) | | |
|---|-------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|---------------|
| | 30 | 60 | 90 | 30 | 60 | 90 |
| Logging cycle (y) | | | | | | |
| Above ground biomass at the end of final cycle (kgC m ⁻²) | 12.5 ±1.2 | 24.0 ±2.6 | 33.1 ±3.7 | 7.5 ±0.8 | 15.5 ±2.1 | 21.2 ±3.0 |
| Wood productivity (kgC m ⁻² y ⁻¹) | 0.42 ±0.04 | 0.40 ±0.04 | 0.37 ±0.04 | 0.25 ±0.03 | 0.26 ±0.04 | 0.24 ±0.03 |
| Annual evapotranspiration (mm) | 590 ±65 | 605 ±71 | 611 ±73 | 551 ±71 | 616 ±92 | 636 ±98 |
| Annual out flow (water yield) (mm = kg-water m ⁻² y ⁻¹) | 153 ±125 | 138 ±119 | 133 ±117 | 193 ±117 | 128 ±93 | 107 ±86 |
| Water use efficiency (WUE) (kgC (1000 kg-water) ⁻¹) | 0.58 ±0.12 | 0.68 ±0.09 | 0.61 ±0.08 | 0.42 ±0.06 | 0.48 ±0.08 | 0.39 ±0.07 |

Upper: average, lower: SD

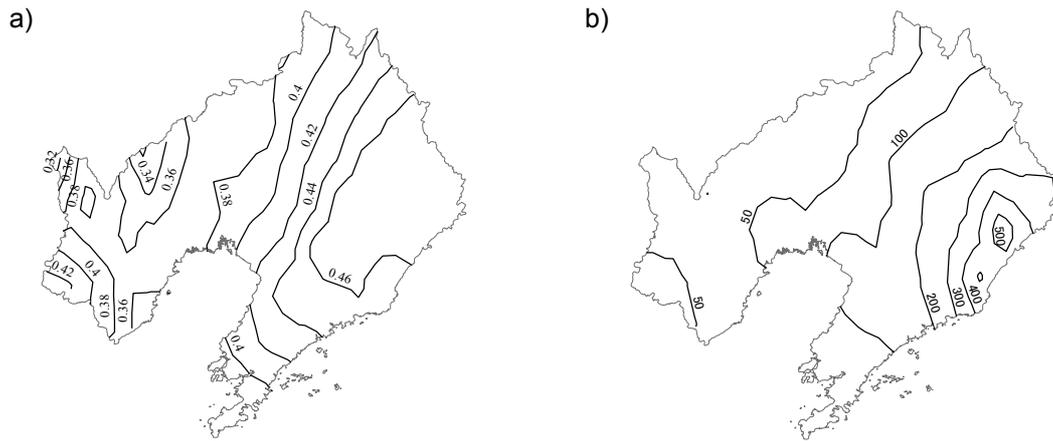


図 4-2 Biome-BGC によって推定した伐採サイクル 60 年の落葉広葉樹林の a) バイオマス供給力分布 ($\text{kgC m}^{-2} \text{y}^{-1}$)、b) 水供給力 (年流出量) 分布 (mm)。

(3) 林種別森林面積および森林資源供給ポテンシャル分布

9 月/4 月の LAI 比より推定した落葉広葉樹林 (DBF)、常緑針葉樹林 (ENF) の対象地域内の面積はそれぞれ、 $31,476 \text{ km}^2$ 、 $9,905 \text{ km}^2$ 、合計 $41,318 \text{ km}^2$ であった。2005 年の統計による遼寧省の森林面積は $48,053 \text{ km}^2$ であり²⁾、推定値との差は、使用した 2000 年の森林被覆率データ以後の植林面積と考えられる。DBF、ENF とともに伐採サイクル 60 年の中伐期施業を仮定すると、対象地域のバイオマス供給ポテンシャルは DBF が $14.0 \times 10^6 \text{ tC y}^{-1}$ 、ENF が $4.1 \times 10^6 \text{ tC y}^{-1}$ 、合計 $18.1 \times 10^6 \text{ tC y}^{-1}$ であった。

(4) 自然資源需給分析

対象地域において都市の人間活動が必要とする自然資源を周辺の森林生態系の供給サービスによって充足できるかどうかを評価するため、4 都市 (瀋陽、大連、丹東、錦州) から同心円ゾーン内の森林資源供給ポテンシャルと資源需要を比較し、サービス充足指数 (SSI) を計算した。最大都市の瀋陽では、撫順など周辺の衛星都市を含め、100 km 圏に 1,300 万人が居住している。100 km 圏の人口は瀋陽に続き、錦州、大連、丹東の順に多かった。丹東は東部の森林地帯の中に位置するため、25 km 圏でも森林被覆率が 0.4 を超えているが、他の都市の 25 km 圏の森林被覆率は 0.1 以下であった。大連と錦州の周辺は 100 km 圏でも森林被覆率が 0.1 程度であったが、瀋陽は市街の東方に森林地帯が広がっているため、100 km 圏の森林被覆率は 0.2 を超えた。

2005 年の中国の人口当たり年間木材消費量は 0.35 m^3 であり¹⁾、これは木材の乾燥比重を 0.7 とすると 0.50 tdw となる。また人口当たり水消費量は、 59 m^3 である¹⁾。図 4-3 に、各都市中心から 25, 50, 75, 100 km 圏の人バイオマスおよび水資源の SSI を示す。瀋陽、大連、錦州では 100 km 圏までのバイオマス SSI はマイナスであり需要を満たせないが、丹東では 25 km 圏以上では SSI がプラスであった。瀋陽では周辺の森林被覆率が高いため、圏域を広げるとバイオマス需要を満たせる可能性があるが、周辺の森林被覆率が小さい大連と錦州ではバイオマス需給を均衡できない。同様に、丹東は 25 km 圏以上、瀋陽は 100 km 圏で水需要を森林からの流出水で満たせるが、大連と錦州は水供給が不足している。

県別に推計したバイオマスと水資源の SSI を、図 4-4 に示す。バイオマス SSI の平均値は 0.19、水資源 SSI の平均値は 0.57 で、どちらの SSI も人口密度が高い都市部で大きなマイナス、西部の乾燥地帯でマイナス、東部の森林地帯でプラスを示した。都市部のうち瀋陽および丹東は森林地帯に隣接し、自治体間連携によって収支均衡が可能である。バイオマスと水資源の需給を定量的に比較すると、異なる物理単位の比較であるため、直接の比較は困難である。SSI は無次元で値域が等しいため、異なるサービスの需給バランスを比較できる。バイオマス SSI と水資源 SSI の差を県別に、図 4-5 に示す。東部乾燥地帯ではバイオマス資源よりも水資源サービス収支がより厳しいことがわかる。県別および市別（県より大きな行政単位）で SSI を計算し、ヒストグラムを図 4-6 に示す。県別ではバイオマス、水資源ともに正負に SSI が大きな県が多数見られたが、空間的により大きな市別では、SSI の絶対値は小さくなり、資源需給の不均衡がある程度緩和されたことがわかる。

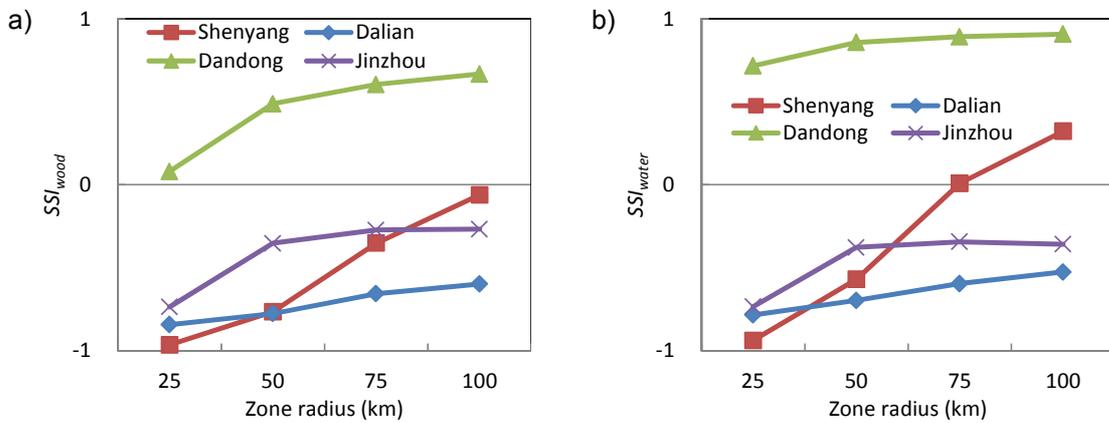


図 4-3 4 都市から等距離圏におけるサービス充足指数 (SSI) a) バイオマス、b) 水資源

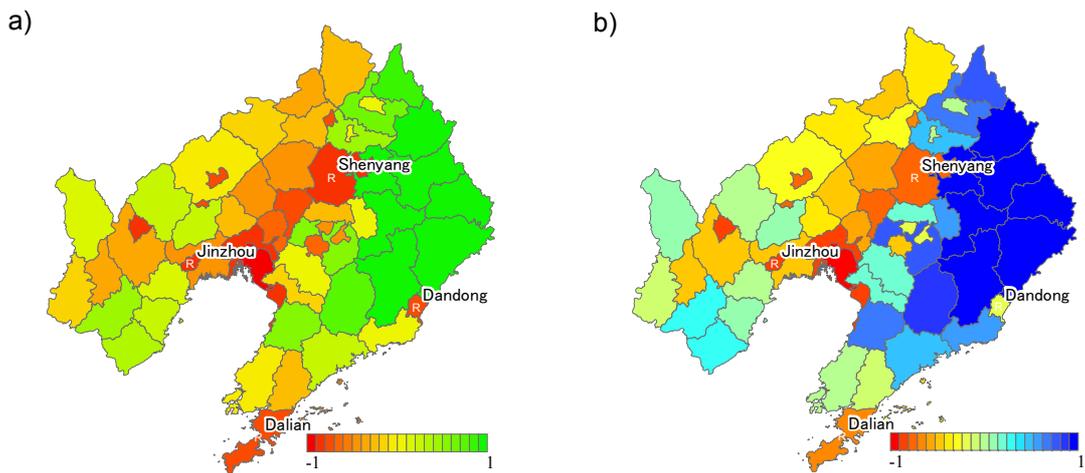


図 4-4 遼寧省の県別森林資源サービス充足指数 (SSI) a) バイオマス、b) 水資源

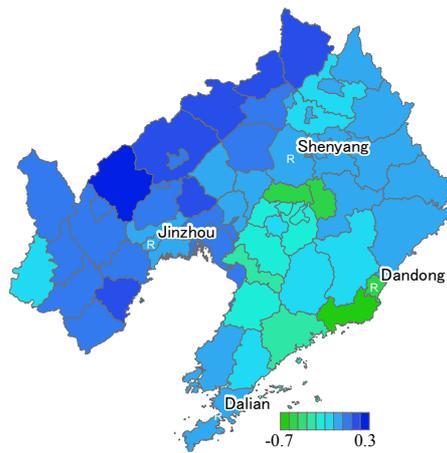


図 4-5 遼寧省の県別森林資源サービス充足指数 (SSI) の差 (バイオマス-水資源)

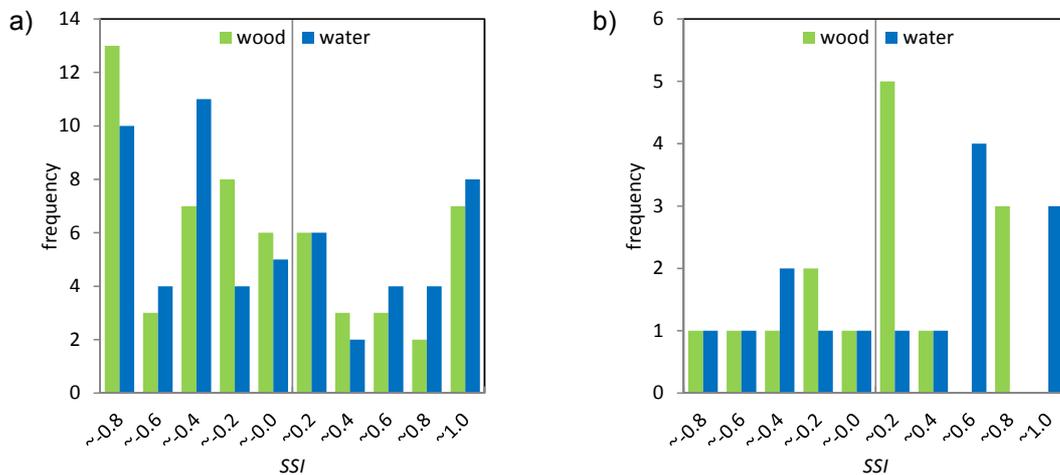


図 4-6 遼寧省のバイオマス・水資源サービス充足指数 (SSI) の頻度分布 a) 県別、b) 市別

4.2.4 まとめ

中国遼寧省を対象地域とし、生態系モデル Biome-BGC を用いて森林生態系のバイオマスおよび水供給力の分布を推定し、GIS データベースを作成した。サービス充足指数 (SSI) を用いて、都市のバイオマスおよび水需要と周辺森林の資源供給サービスの需給分析をおこなった。東部森林地帯ではバイオマス、水資源とも、供給ポテンシャルは需要を満たし、瀋陽では圏域を拡大することで需給がほぼ均衡すると考えられる。大連と錦州周辺は森林被覆率が低く、降水量が少ないことから、周辺森林による資源供給は需要に対し不足した。以上のように、本研究は、生態系モデルによる森林バイオマス成長と水循環のシミュレーション結果を利用し、地域の自然・社会環境を考慮した自然資源需給バランスの評価が行えることを示した。

4.3 エクアドルにおける自然資源 GIS の応用

4.3.1 背景と目的

自然資源 GIS データベースを応用し、国レベルの資源循環利用の効果を評価するため、エクアドルにおける農業残渣を利用したバイオマスエネルギー利用システムの最適化と環境性評価をおこなった。エクアドルは農作物の周年栽培、多期作が可能な赤道直下に位置する農業国であり、エネルギー資源としての農業残渣のポテンシャルが高い。また産油国でありながら、石油精製施設を持たないことから、輸送・発電用燃料を輸入に頼っている。このため、農業残渣のエネルギー利用は、環境・経済の両面で効果が期待される。また将来予想される気候変動の影響により、主要なエネルギー源である水力発電の安定供給に対する不安があり、農業残渣バイオマスの利用計画においても、気候変動の影響をあらかじめ考慮しておく必要がある。

以上の背景より、エクアドルにおける有効な農業残渣のエネルギー利用を策を提示してその環境性を評価すると共に、気候変動が最適解と化と環境性に及ぼす影響を予測することを目的とした。

4.3.2 方法

エクアドルを対象地域とし、4種の作物（イネ、バナナ、サトウキビ、トウモロコシ）の生産耕地の GIS データ⁹⁾を収集し、これを全国7地域に分割した。各地域の幾何学的重心にバイオエタノール工場を設置することとし、原料（作物残渣）収集、エタノール製造、製品（E15 ガソリン）輸送をライフサイクルとする LC-CO₂ を評価した。このとき、原料供給量と製品需要量を制約条件として、LC-CO₂ を最小化（ガソリン代替による CO₂ 削減効果を最大化）するよう、各工場における作物別残渣使用量を最適化した。

気候変動によって農業残渣供給量に変化したときに、バイオエタノールによる CO₂ 削減効果の変化を予測するため、生態系プロセスモデルで計算される純一次生産（NPP）を元に農業残渣生産量を予測するモデルを作成した。まず生態系モデル Biome-BGC を用いて各作物に相当する植生種の NPP を計算し、県別作物収量統計と比較して NPP から作物収量を予測する線形モデルを作成した。このモデルでは、県別に生産技術要因（品種、かんがい、肥料投入量など）の差を考慮している。次に各作物の草穀比（可食部と非可食部の比）を用いて、作物種・県別に NPP から農業残渣収量を予測した。

気候変動ケースとして、IPCC 第4次評価報告（AR4）で報告された SRES-A1B シナリオによる気候変動シミュレーション結果を集計したデータセット（multi-model dataset; MMD）¹⁰⁾より、南米アマゾン地域（AMZ）における年平均気温と年降水量の現在からの変化予測の統計値を参照し、全予測値分布の 25%、50%、75%パーセンタイル値を3つのケース（"mild", "medium", "severe"）とした。各ケースでは、1980年～1999年と比較して2080年～2099年に年平均気温がそれぞれ+2.6°C, +3.3°C, +3.7°C、年降水量がそれぞれ+6%, 0%, -3%変化する。さらに Biome-BGC による気候変動後の NPP 計算においては、3つの気候変動ケースに加えて、大気 CO₂ 濃度増加による CO₂ 施肥効果を考慮する場合（674 ppm）

と考慮しない場合（352 ppm）の2通りの予測をおこなった。

4.3.3 結果と考察

Biome-BGC によって計算した各気候変動ケースにおける作物種別純一次生産（NPP）の平均値を、表 4-2 に示す。現在の気候における NPP はサトウキビ、トウモロコシ、バナナ、イネの順に高かった。C₄ 植物であるサトウキビとトウモロコシは、熱帯気候に適応して生産性が高かった。またバナナとサトウキビの生産では窒素肥料が多用されるため、自然環境下の植生より高い NPP を示した。CO₂ 施肥効果を考慮しない場合、気候変動下の NPP 予測値は全作物で低下し、C₃ 植物であるバナナとイネはより強く影響されると予測された。一方 CO₂ 施肥効果を考慮する場合、NPP 予測値は全作物で増加し、気温と降水量の影響よりも大気 CO₂ 濃度の影響のほうが強いことが示された。

NPP から作物収量を予測するモデルの精度は、相対誤差で 23~56%で、特にバナナの予測精度は低かった。これはバナナの生産様式が商業的プランテーションから粗放的栽培まで多様であり、同一県内でも収量が大きく異なること、プランテーション更新のサイクルによって統計年による収量変動が大きいことが原因と考えられる。

現在と将来の気候変動下において、LC-CO₂ で最適化したときの農業残渣からのバイオエタノール生産量と CO₂ 排出量を、表 4-3 に示す。現在の気候下では、原料のほとんどはサトウキビが占めたが、これは残渣収量が大きいこととエタノール収率が高いため、原料としての優位性が高いことが原因である。LC-CO₂ の中ではエタノール製造プロセスからの排出が最も大きく、原料輸送と製品輸送による負荷は小さかった。ガソリン代替効果を差し引くと、LC-CO₂ 総計は-185.0 ktCO₂-eq y⁻¹ となり、農業残渣からのバイオエタノール利用の CO₂ 削減効果が示された。

CO₂ 施肥効果を考慮しない場合、気候変動下で農業残渣収量の低下によって作物種別エタノール生産量の構成が変化した。すなわちサトウキビの比率が低下し、替わってバナナの利用が拡大した。バナナは最も気候変動による収量減が大きいにもかかわらず利用量が増加した原因は、サトウキビ残渣が不足する工場付近で他の原料作物が栽培されていなかったためである。原料として優位なサトウキビから不利なバナナに転換された結果、LC-CO₂ 総計は”severe”ケースで-172.9 ktCO₂-eq y⁻¹ に増加し、CO₂ 削減効果が低下した。

一方 CO₂ 施肥効果を考慮する場合、NPP は平均的に全作物で増加するにもかかわらず、作物種別エタノール生産量および LC-CO₂ の内訳と総計はほとんど変化しなかった。これを空間的に詳細に調べると、気候変動による NPP の変化は場所によって幅が大きく、主要なエタノール原料の供給地で必ずしもサトウキビ残渣収量が増加していないことが要因であった。このように、気候変動に伴う農業残渣収量変化がバイオエタノール利用による CO₂ 削減効果に影響することはわかったが、その応答経路は複雑であり、収量増加が必ずしも削減効果を拡大しないこともある。

表4-2 Biome-BGCによって計算した各気候変動ケースにおける作物種別純一次生産（NPP）の平均値（ $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ ）と現在からの変化率。

| Crop | Present Case | Climate change cases | | | | | |
|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------|---------------|------------------------------------|----------------|----------------|
| | | Without CO ₂ fertilization | | | With CO ₂ fertilization | | |
| | | Mild | Medium | Severe | Mild | Medium | Severe |
| Rice | 488 | 471 (-3%) | 451 (-8%) | 440 (-9%) | 574 (+18%) | 554 (+13%) | 543 (+11%) |
| Banana | 490 | 420 (-14%) | 386 (-21%) | 371 (-24%) | 652 (+33%) | 618 (+26%) | 599 (+22%) |
| Sugarcane | 1355 | 1337 (-1%) | 1297 (-4%) | 1276 (-6%) | 1635 (+21%) | 1592 (+18%) | 1569 (+16%) |
| Corn | 713 | 730 (+2%) | 708 (-1%) | 696 (-2%) | 911 (+28%) | 895 (+26%) | 884 (+24%) |

表 4-3 各気候変動ケースにおいて CO₂ 削減効果を最適化した場合のバイオエタノール生産量と CO₂ 排出量

| | Present case | Climate change cases | | | | | |
|--|--------------|---------------------------------------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|
| | | Without CO ₂ fertilization | | | With CO ₂ fertilization | | |
| | | Mild | Medium | Severe | Mild | Medium | Severe |
| Ethanol production (ML y ⁻¹) | | | | | | | |
| total | 318.3 | 318.3 | 318.3 | 318.3 | 318.3 | 318.3 | 318.3 |
| by rice | 0.0 | 8.6 | 10.4 | 9.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| by banana | 0.5 | 0.4 | 19.2 | 40.0 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| by sugarcane | 317.8 | 309.2 | 288.7 | 269.2 | 317.9 | 317.9 | 317.9 |
| by corn | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CO ₂ emission (ktCO ₂ -eq y ⁻¹) | | | | | | | |
| total | -185.0 | -183.4 | -178.8 | -172.9 | -183.4 | -183.5 | -183.6 |
| by feedstock collection | 8.3 | 8.5 | 9.2 | 11.2 | 10.4 | 10.3 | 10.2 |
| by refinery process | 251.5 | 252.9 | 256.8 | 260.7 | 251.5 | 251.5 | 251.5 |
| by product delivery | 7.3 | 7.3 | 7.3 | 7.3 | 6.9 | 6.9 | 6.9 |
| by reduced gasoline consumption | -452.1 | -452.1 | -452.1 | -452.1 | -452.1 | -452.1 | -452.1 |
| CO ₂ reduction per unit ethanol (gCO ₂ -eq L ⁻¹) | 581 | 576 | 562 | 543 | 576 | 577 | 577 |

4.4 マクロ指標による自然資源需要予測モデルの開発

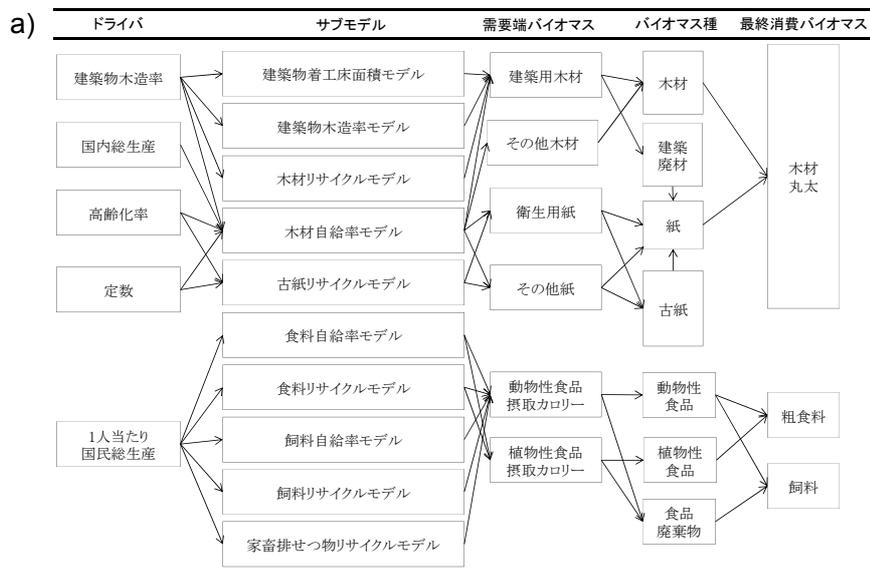
4.4.1 背景と目的

自然資源の持続的な利用には、木質・食料資源の過剰・過小利用を修正し、需給を均衡させて循環度を高め、その基盤である水資源・土地資源の適正管理を考慮する必要がある。一方で、バイオマス資源は近年のアジアを含めたグローバル化に大きく影響を受けるため、バイオマス自給率の適正な管理は生態系サービスの持続的利用と安全保障の観点から極めて重要な課題である。そこで本研究では、日本を対象として、バイオマス供給生態系サービス、水資源、土地資源の需要構造を統合的に物質フローで表現できるモデルを開発し、木材・食料自給率が変化する場合のシナリオ下で、バイオマス物質循環度の応答と水需要・土地資源効率性と需給バランスを分析して、バイオマス供給生態系サービスの持続性を評価できるモデルを開発することを目的とした。

4.4.2 モデルの概要

はじめに、バイオマス供給生態系サービスのフローおよび需要予測モデルを構築した（図 4-7a）。日本国内で消費される木材、紙、食料を対象とし、バイオマス変換産業、バイオマス消費産業、民生・家庭部門、静脈産業から、建築用木材、その他木材、衛生用紙、その他紙、動物性・植物性食品摂取カロリーまでのバイオマス需要予測モデルを構築した。次に、このバイオマス生産に必要な水資源を生活用水・工業用水・農業用水と定義し、先述のバイオマス供給サービスフローと結合して家庭・商業施設、紙バイオマス変換産業、食料品バイオマス変換産業、バイオマス消費産業、農業の水需要・土地資源需要についてのモデルも統合した（図 4-7b）。

ここで開発された需要モデルについて、マクロ指標である総人口、高齢化率、木造建築物率、住宅着工面積、国内総生産、カロリーベース食料自給率、木材自給率、1人1日当たり摂取カロリーをドライバとして設定して各種自給率が変動した際の将来予測が可能となるように改良し、2050年まで現状トレンドで推移する BAU、木材・食料自給率が 2050 年で 100%になる SSMAX、食料自給率のみが 2050 年で 100%になる食料自給率上昇 FSS、木材自給率が 2050 年で 100%になる木材自給率上昇 WSS の 4 シナリオを設定し、バイオマス循環、水・土地資源効率、需給バランスを評価した。



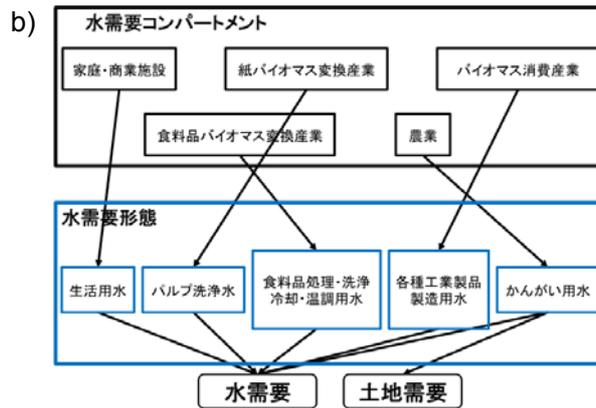
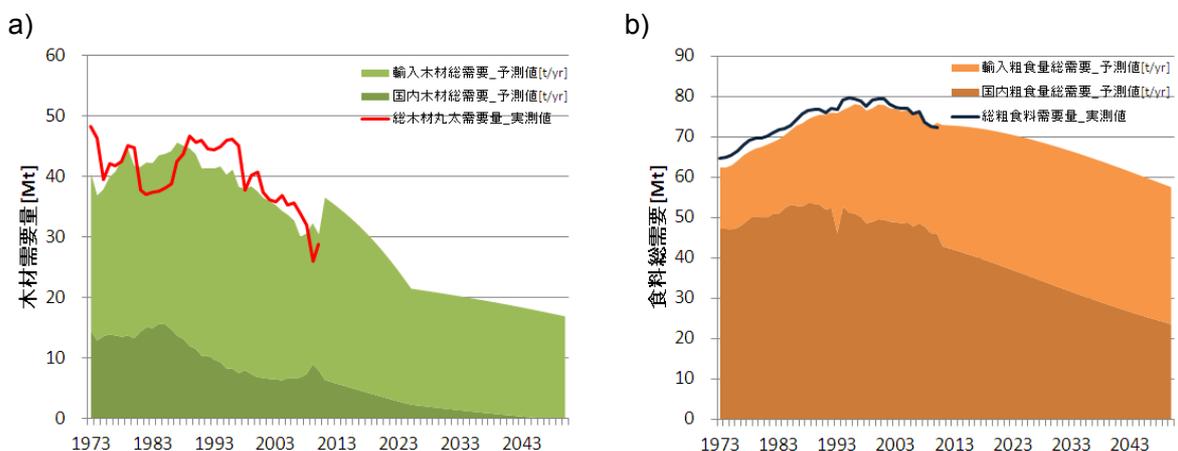


図 4-7 バイオマス・水・土地資源需要予測モデルの概要 a) バイオマス資源需要、b) 水および土地資源需要

4.4.3 結果と考察

まず図 4-8 にモデルのバリデーションの結果を示す。木材、食料、水需要それぞれについてモデルの妥当性が確認できた。次に、このモデルを用いたシナリオ評価として、内部循環度の将来予測結果を図 4-9 に示す。図中の縦軸の内部循環度は 1 に近いほど対象システム内での循環が高いことを意味するが、BAU シナリオと比較すると WSS シナリオは、FSS シナリオや SSMAX シナリオのような内部循環度の改善は見られず、木材自給率よりも食料自給率を上昇させるほうが内部循環度を高めることが示唆された。その一方で、自給率を高めた場合の水資源需要については、BAU シナリオでは総水需要は 2010 年から 2050 年で 820 億 $\text{m}^3 \text{年}^{-1}$ から 553 億 $\text{m}^3 \text{年}^{-1}$ と約 3 分の 2 に減少したが、FSS シナリオでは総水需要は 2015 年まで漸増傾向、その後は減少傾向となり、2050 年では 768 億 $\text{m}^3 \text{年}^{-1}$ と BAU シナリオの 1.4 倍の水需要が予測された。そして土地資源需要については、FSS シナリオでは 2010 年の農地面積 311 万 ha から 2050 年では 587 万 ha と約 1.9 倍拡大することが予測された。現状では日本が有する水資源賦存量は 4,100 億 $\text{m}^3 \text{年}^{-1}$ 、農地面積は 460 万 ha という観点からは水資源と比較して土地資源がより内部循環度の向上に対する制約条件になると考えられる。



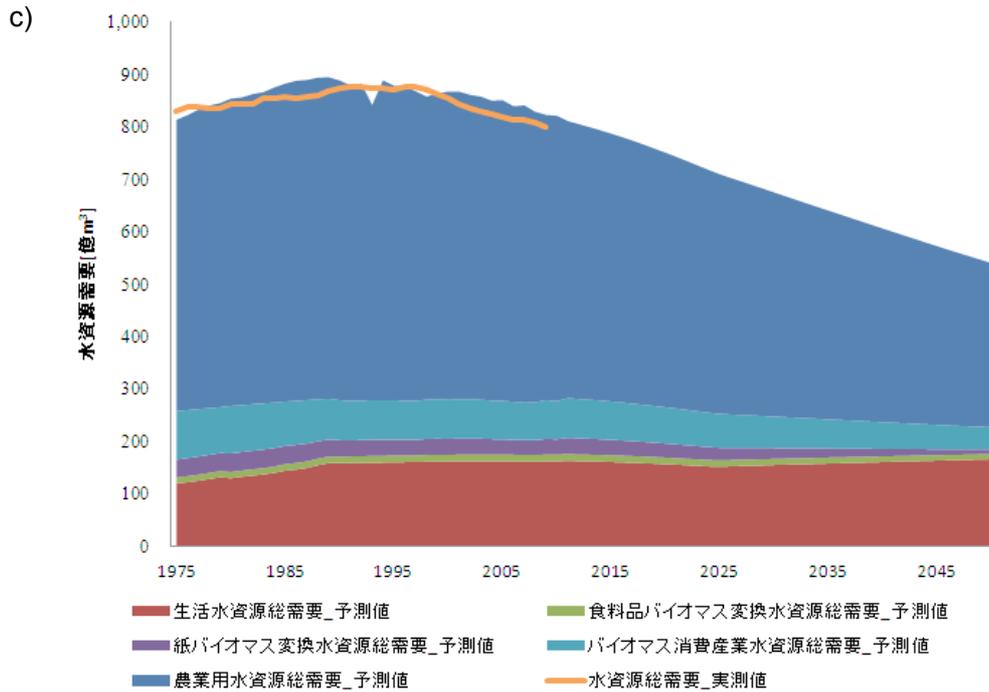


図 4-8 需要予測モデルによる資源需要の過去・将来予測 a) 木材、b) 食料、c) 水

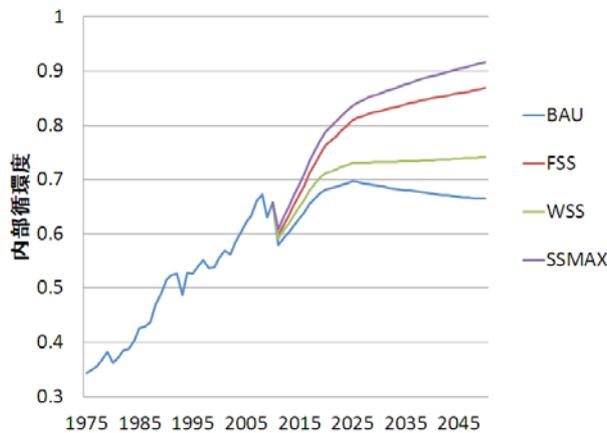


図 4-9 シナリオ別のバイオマス内部循環度

4.5 まとめと提言

本章は都市・産業エコロジーにおける都市内物質循環と、都市と周辺生態系間の物質的循環を統合したシステム設計、評価、施策提案を目途とし、自然資源 GIS データベースを構築し、これを用いた資源需給分析の有効性を示した。本データベースは生態系プロセスモデル Biome-BGC との連携によって、気候や人為管理によるバイオマス供給ポテンシャル変化を予測でき、また森林からの水資源供給も評価できた。定量的・空間的に推定された自然資源供給ポテンシャルは、都市における需要と比較することで需給バランスが評価でき、サービス充足指数や資源循環度などの指標によって可視化できた。中国、エクアド

ル、日本における応用ケーススタディから、以下のようなまとめと提言ができる。

①バイオマス、水、炭素吸収源などの自然資源の賦存量は、その供給源である生態系の立地環境、種類、管理方法、さらには気候変動などによって時空間的に大きく変化する。自然資源供給ポテンシャルの評価には、これらの要因を考慮できる生態系プロセスモデルの利用が有効である。

②自然資源の利用において、地域内の資源需給の均衡化と循環利用度の向上を図ることが重要である。自然資源需要は人口、高齢化率、家屋構造、国内総生産などのドライバーを考慮して、将来予測が可能である。地域内の自然資源自給率を高めることで、資源内部循環度を高めることができる。

③木質資源と水資源、炭素吸収と木材生産など、自然資源利用においては、相乗効果と同時に種々のトレードオフが発生しうる。これらのトレードオフを明らかにした上で、資源投入（経済、労働力、土地）も考慮した費用効果分析によって、望ましい生態系管理目標を策定できる。

参考文献

- 1) 国家統計局城市社会経済調査司編：中国城市統計年鑑 2005，中国統計出版社，北京，pp. 471 (2006)
- 2) 国家統計局・国家環境保護総局編：中国環境統計年鑑2006，中国統計出版社，北京，pp. 215 (2006)
- 3) Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG), Montana University: Biome-BGC, (<http://www.ntsug.umt.edu/project/biome-bgc> 最終アクセス日 2012/05/15)
- 4) National Climatic Data Center (NCDC): NNDC Climate Data Online Global Summary of the Day (GSOD), (<http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv=> 最終アクセス日 2012/05/15)
- 5) Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG), Montana University: MT-CLIM, (<http://www.ntsug.umt.edu/project/mtclim> 最終アクセス日 2012/05/15)
- 6) Jet Propulsion Laboratory (JPL), NASA: Shuttle Radar Topography Mission, (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html> 最終アクセス日 2012/05/15)
- 7) Land Process Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS: Leaf Area Index - Fraction of Photosynthetically Active Radiation 8-Day L4 Global 1km (MOD15A2) (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/leaf_area_index_fraction_of_photosynthetically_active_radiation/8_day_l4_global_1km/mod15a2 最終アクセス日 2012/05/15)
- 8) 中国科学院データセンター：中国人文・経済・環境・気象データ集土地利用データ
- 9) Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca in Ecuador (MAGAP): Estadísticas SPR (<http://servicios.agricultura.gob.ec/sinagap/index.php/superficie-produccion-y-rendimiento> 最終アクセス日 2013/08/01)

10) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Regional Climate Projections - Chapter 11,
In: Fourth Assessment Report on Climate Change 2007. Cambridge University Press, Cambridge,
United Kingdom and New York, USA (2007)

第5章 都市排水の適正処理システムの開発

5.1 背景および実施内容

都市における排水処理システムは、水環境保全や衛生設備としての観点から重要なインフラとして認識されている。開発途上国では、経済の活性化が主要な政策課題となっている一方、水環境保全や衛生学的な安全性確保に寄与する排水処理システムの普及が遅れている。そのため、特に人口密集地域においては、水環境汚染が生じており、適切な排水処理システムの開発・導入が急務である。

排水処理インフラ整備のためには多くの資金が必要であり、また現状の処理システム（活性汚泥法）は、使用エネルギーやコストの観点から開発途上国の経済状況に適合していない。東南アジア地域の大都市部では、先進国と同様好気性排水処理システム（活性汚泥法）の導入が進みつつあるが、経済発展に伴う都市圏拡大に排水管理が追従出来ていない。加えて、既存の下水収集システムは、殆どが合流式であり、汚濁負荷の削減への効果は不明確である。また下水道の延長や改修はコスト/時間に非効率であること、運転に関わるエネルギー消費量が大きいこと等から、分散型処理に対応可能な適地型排水処理システムの開発と展開が必要となる。そこで、バンコク（タイ、東南アジアの典型的な都市として選定）を対象として都市排水処理の現状（処理システムの概要、処理水質、エネルギー消費量）について調査を行った。また調査の結果を踏まえ、都市排水の分散・省エネルギー処理に対応可能な適地型排水処理システム（好気性ろ床）を用いた都市下水の連続処理試験を行い、その水質浄化能やエネルギー消費量などの実証評価を実施した。

5.2 都市排水処理システムの現状

5.2.1 都市排水処理システムの概要（現存技術）

現在わが国では、約12%程度の人口が分散型の下水処理施設（浄化槽、農村集落排水処理施設、コミュニティプラント等）を利用している¹⁾。アジア地域の開発途上国では、都市域の拡大が急速に進んでおり、大型都市インフラである下水道の普及には、長時間を要すると考えられる。さらに、いったん大規模な処理場を設置してしまうと、人口の増減に伴い下水量が変化した場合に、処理場の規模と下水量とのミスマッチが発生する難点もある。

図5-1に、現状の生物処理法による都市排水処理システムの体系を示す。都市排水処理技術システムは、利用する微生物に応じて、好気性処理と嫌気性処理に大別される。

好気性処理は、処理対象の排水に空気（酸素）を供給する事（=曝気）で好気性微生物による有機物分解を行う方法で水質や安定性に優れるが、使用電力や余剰汚泥の発生量（=使用エネルギー）が多く、処理コストも高い。これに対して、嫌気性処理では、嫌気性微生物を利用して有機物分解を行うため、曝気電力が不要かつ余剰汚泥の発生量が少ない（嫌気性微生物の増殖収率が低い）という特徴がある。このため、処理に関わるエネルギー消費量が少なく、コストも安価である。しかしながら、水質は好気性処理法と比較して悪く、水温や流量などの変動に対して不安定である。

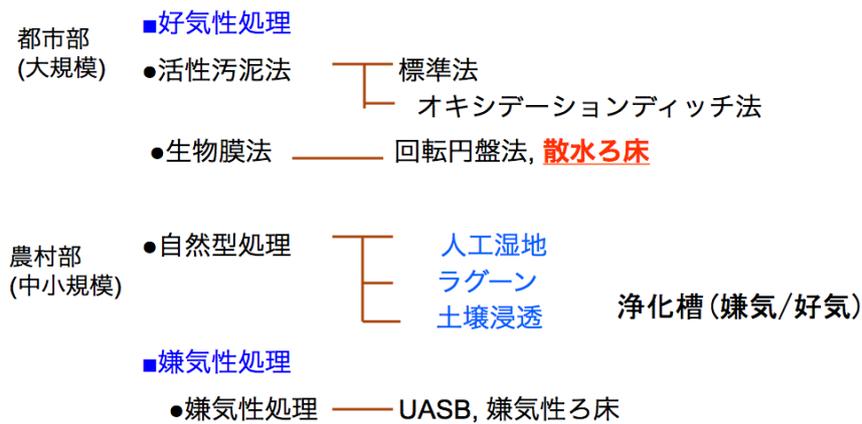


図5-1 生物処理法による都市排水処理システム

中小規模の好気性処理技術としては、オキシレーションディッチ法（OD法：Oxidation Ditch）、回転円盤法（RBC法：Rotating Biological Contactor）、散水ろ床法等が国内では主要な技術として用いられている。また、農村地域（主に発展途上国）では、人工湿地、ラグーン、土壌浸透自然浄化法などの自然型の処理が適用されている例もある。国内の下水道未整備地域では、小規模処理法である浄化槽（嫌気/好気処理）が普及しており、途上国においても処理性能は低いが、各家庭規模での腐敗槽（Septic tank）の設置が行われている場合が多い。

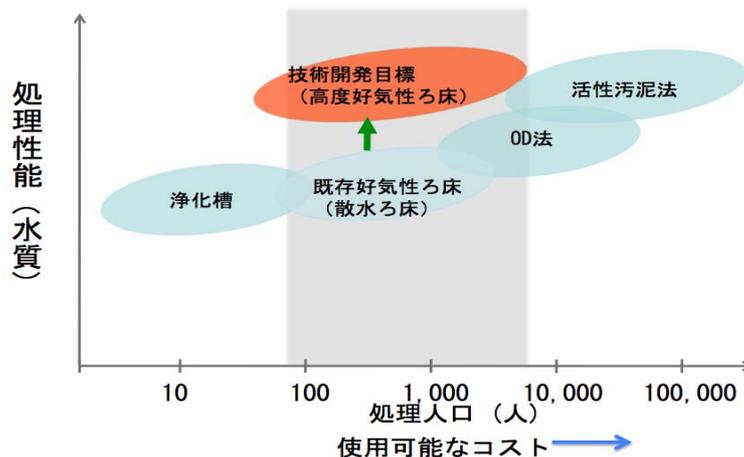


図5-2 都市排水処理技術の適用処理人口（規模）と処理水質との関連

図5-2には、都市排水処理技術の適用処理人口（規模）と処理水質との関連を示した。処理人口100人から10,000人程度の規模での処理に対応可能な技術として、活性汚泥法やOD法、散水ろ床法（好気性ろ床法）等が考えられる。即効的な汚染対策として人口密集地や郊外域における排水の分流収集と分散処理を考える場合、施設の建設コストが比較的安く（省

スペース)、また発生する汚泥量の削減(汚泥の運搬・処理費用を低く抑える事が出来る)が可能かつ、維持管理が比較的容易な生物膜法(散水ろ床等)を中心とした適地型排水処理技術の開発・性能実証が必要であると考えられる。

現状の散水ろ床法(TF法:Trickling Filter)では、碎石や硬質プラスチックなどのろ材を反応槽内に充填した構造となっている。流入排水は装置上部から散水により供給し、ろ材の表面を流下する際に表面に形成された生物膜により浄化(有機物除去)が行われる仕組みである。

TF法は上部から散水するだけの非常にシンプルな仕組みであり、好気性処理法でありながらエアレーションなどを行う必要がないため電力消費量が少なく、運転コストが安価であるというメリットがある²⁾。しかしながら、既存の散水ろ床では、硬質のろ材表面にのみ生物膜が形成されるため、浄化を担う保持汚泥(微生物)の量が少ない事、排水と保持汚泥との接触時間を長く維持する事が困難であるため必ずしも水質が安定していない。以上の考察より、散水ろ床法を基礎として、より水質の向上と安定化を図ることの出来る、高度好気性ろ床法(ATF: Advanced aerobic Trickling Filter)の開発と、現地における実証試験による性能評価を実施する事とした。本研究で性能実証を行った高度好気性ろ床は、都市下水の嫌気性処理(UASB法: Upflow Anaerobic Sludge Blanket)の後処理法として開発されてきた技術であり²⁾、スポンジを担体(ろ材)として用いることで、高い汚泥保持能(高い汚泥濃度、長い汚泥滞留時間)を有するため、有機物に加えアンモニア性窒素の効率的な除去が期待出来る。また、高い汚泥濃度の維持による低いF/M比(Food Microorganism Ratio)の実現と生息する生物の多様性(微生物に加え、微小動物も生息)の高さから、活性汚泥に比べ余剰汚泥の発生量の削減が期待出来る。一方、同技術を都市下水の直接浄化に適用した例は無く、本研究における実証性能評価は新しい試みとなる。

5.2.2 東南アジア地域における都市排水処理の現状

都市排水処理システムの普及が遅れており、今後も都市郊外部での人口増加などにより、水環境汚染が深刻化すると考えられる東南アジア地域における都市排水処理の現状について、バンコク首都圏を対象として調査を行った。

(1) バンコクにおける下水処理設備の導入状況

バンコクはタイの首都であり、その経済規模はシンガポール、クアラルンプールに次いで東南アジアで3位である。1981年にJICAの協力の下で、下水道整備に関するマスタープランが作成された。1999年には、汚泥処理や、排水・汚泥の再利用も含めたマスタープランの改定が行われた(図5-3)。表5-1には、バンコク都内の下水処理場の概要を示した³⁾。現在、都市の中心部に7つの下水処理場が稼働しており、192 km²の市街地から発生する実流入下水量 675,000 m³/日(下水処理能力 992,000 m³/日)を処理している。また、下水道の普及率は約40%程度である(20計画区のうち7区画のみ処理施設が導入)。BMA(Bangkok Metropolitan Administration)が2008年に策定した実行計画(実施期間2009~2012年)では2020年の下水処理率60%を整備目標としている。その他、バンコク都内にはNHA(タイ国住宅公社)

から移管された 12 ヶ所の小規模処理場（コミュニティープラント）、Makkasan Pond、Rama IX Pond の運河水浄化施設があり、BMAが運転管理している。現在までの経緯からも、大規模な下水道整備には時間と費用がかかるため、主要な下水管への接続が困難な地域に対しては維持管理が容易で、省エネルギーな分散型処理の適用が有効であると考えられる。

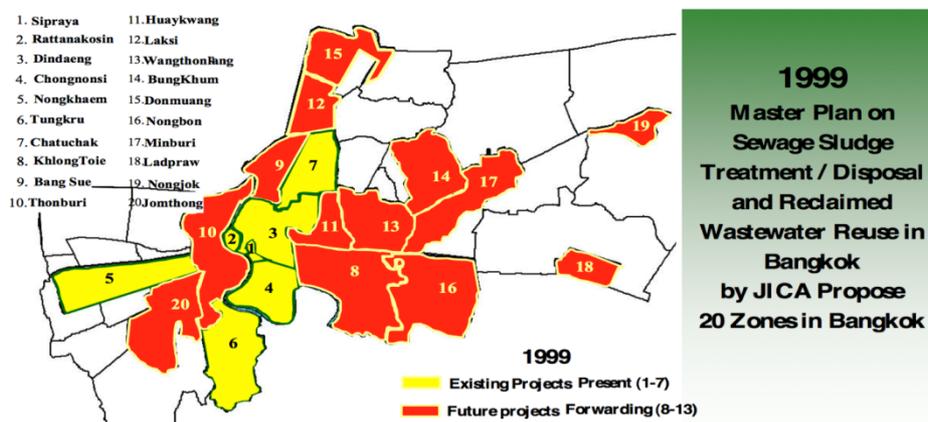


図5-3 バンコク都における下水道整備マスタープラン

表5-1 バンコク都の下水処理設備の概要

| 下水処理区名 | 処理区面積 (km ²) | 計画人口 (人) | 処理能力 (m ³ /日) | 運転開始年 | 資金源 (BMA : 政府) | コスト (百万 Baht) |
|------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-------|----------------|---------------|
| 1. Si Praya | 2.7 | 120,000 | 30,000 | 1994 | BMA 100 % | 464 |
| 2. Rattanakosin | 4.1 | 70,000 | 40,000 | 2000 | 政府 100% | 883 |
| 3. Din Daeng | 37.0 | 1,080,000 | 350,000 | 2004 | 25 : 75 | 6,382 |
| 4. Chong Nonsi | 28.5 | 580,000 | 200,000 | 2000 | 40 : 60 | 4,552 |
| 5. Nong Khaem | 44.0 | 520,000 | 157,000 | 2002 | 40 : 60 | 2,348 |
| 6. Thung Khru | 42.0 | 177,000 | 65,000 | 2002 | 40 : 60 | 1,760 |
| 7. Chatuchak | 33.4 | 432,000 | 150,000 | 2005 | 60 : 40 | 3,482 |
| 8. コミュニティ・プラント (12 プラント) | | | 25,700 | | | |
| 合計 | 191.7 | 2,979,000 | 1,017,700 | | | 19,871 |
| 計画中の BMA 下水処理プロジェクト(F/S ベース) | | | | | | |
| 1. Bang Sue | 21.0 | 250,000 | 120,000 | 2012 | BMA 100 % | 4,732 |
| 2. Klong Toei | 56.0 | 485,000 | 360,000 | | 60 : 40 | 11,046 |
| 3. Thon Buri | 59.0 | 704,000 | 305,000 | | | 11,561 |
| 合計 | 136.0 | 1,439,000 | 785,000 | | | 27,339 |

コストは下水処理場と遮集管の建設費の計

(2) 下水道および下水処理設備の概要と水環境汚染の状況

バンコク都の下水道は、雨水排水を目的に整備されてきた経緯から、汚水と雨水を同一の管渠で排除する合流式下水道が一般的である（図5-4）。乾期は、合流式管渠に汚水のみが流入し、全量が遮集管渠により収集・下水処理場で処理される。雨期は、合流式管渠を雨水と汚水が流下し、運河に排水される直前で雨水吐き室において一定量（通常、乾期汚水量の約5倍）が遮集され、遮集管にて下水処理場に送水される。下水処理場では、流入汚

水を処理場能力内で処理し、処理能力を超える分はスクリーンでゴミを取り除き河川・水路に放流する。現在、バンコク都には 1,000 ヶ所以上の雨水吐き室が設置されている。

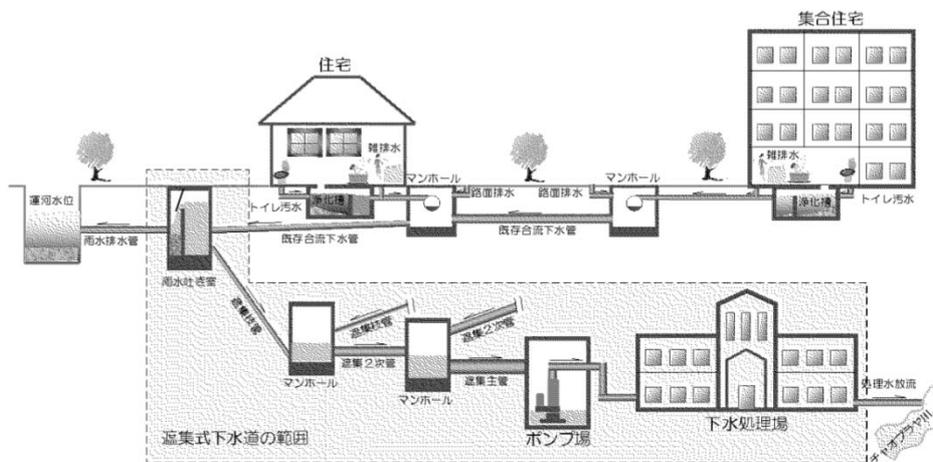


図5-4 バンコク都における下水道構造の概要図

また、遮集式下水道が整備されていない地域では、汚水、雨水とも、合流式下水道管渠により収集され、そのまま河川・水路に放流されているため水質汚濁の一因となっている。

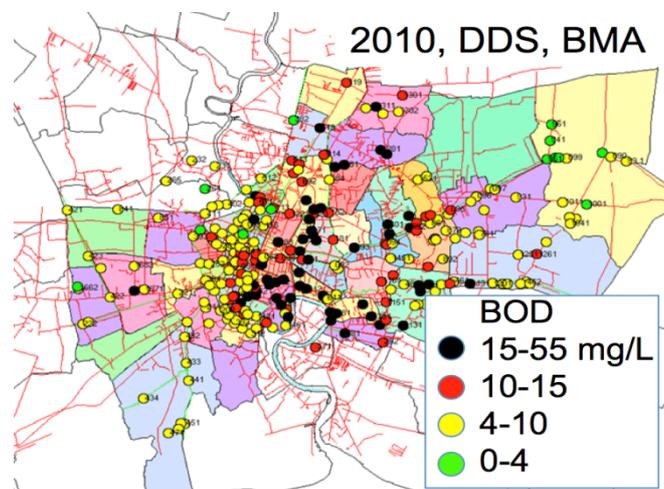


図5-5 バンコク都内の主要な水路のBOD濃度 (mg/L), BMA, DDS年報(2010)

図5-5には、バンコク都内の主要な水路のBOD濃度を示す。これより、下水道設備の導入がなされている人口密集地域においても水質汚染が生じている事が分かる(図5-3との対比)。また、バンコク都中心を流れるチャオプラヤ川においても、乾期である一月から二月にかけて、BOD濃度は4~5 mg/lに達している(データ示さず)。遮集管渠による下水道は、既存の排水管を活用して公共用水域の汚濁負荷削減効果を期待できるので、低コスト型の下水道システムといえるが、水環境保全の観点からは、今後改善が必要である。

表5-2 バンコク都の下水処理場の排水処理性能

| Sewage treatment plant | Design Flow (m ³ /d) | Actual Flow (m ³ /d) | BOD Inf. (mg/l) | BOD Eff. (mg/l) | % BOD Removal (%) | SS Inf. (mg/l) | SS Eff. (mg/l) | % SS Removal (%) | T-N Inf. (mg/l) | T-N Eff. (mg/l) | T-N Removal (%) | T-P Inf. (mg/l) | T-P Eff. (mg/l) | T-P Removal (%) | Reclaimed Water (%) | Operation Cost (Baht/m ³) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------|
| 1. Si Phraya | 30,000 | 34,373 | 53.7 | 4.8 | 91.1 | 73.8 | 6.1 | 91.8 | 12.5 | 8.9 | 28.5 | 1.5 | 1.3 | 13.3 | 3.3 | 2.1 |
| 2. Rattanakosion | 40,000 | 32,906 | 78.6 | 11.5 | 85.4 | 72.4 | 11.7 | 83.9 | 9.3 | 5.7 | 39.3 | 3.8 | 1.3 | 65.8 | 1.3 | 1.6 |
| 3. Din Daeng | 350,000 | 197,957 | 29.7 | 4.6 | 84.7 | 35.4 | 9.4 | 73.5 | 13.3 | 8.0 | 40.2 | 2.3 | 1.4 | 37.7 | 0.2 | 3.5 |
| 4. Chong Nonsri | 200,000 | 111,807 | 33.3 | 5.7 | 82.9 | 60.5 | 10.6 | 82.5 | 10.4 | 5.9 | 43.5 | 2.5 | 1.6 | 35.7 | 8.3 | 2.0 |
| 5. Thung Kru | 65,000 | 48,607 | 34.8 | 4.4 | 87.4 | 56.1 | 8.4 | 85.1 | 11.5 | 6.9 | 40.0 | 1.6 | 0.9 | 42.2 | 0.5 | 2.1 |
| 6. Nong Khaem | 157,000 | 116,524 | 41.1 | 4.5 | 89.0 | 72.2 | 8.0 | 89.0 | 12.7 | 7.5 | 41.1 | 2.0 | 0.8 | 60.9 | 1.5 | 2.3 |
| 7. Chatuchak | 150,000 | 127,548 | 33.4 | 10.2 | 69.3 | 47.0 | 11.5 | 75.5 | 13.4 | 8.3 | 38.5 | 1.8 | 1.4 | 25.9 | 2.4 | 1.4 |

稼働中の下水処理場の排水処理状況（2005～2009年の平均、Din Daengのみ2007～2009年の平均）を表5-2に示した。これより、バンコク都の流入排水のBODは、30～79 mg/lと比較的低く、日本国内の下水の三分の一から五分の一程度の有機物濃度であることが分かった。これは、例えばUASB法などの嫌気性処理を施した下水処理水と同等の水質であり、高度好気性ろ床による直接処理が可能な程度に低濃度である。またSS濃度や全窒素濃度(T-N)も、日本国内の排水の三分の一程度である。これは、家庭への腐敗槽の設置が義務付けられている事に加え、遮集管を通して収集される下水が運河からの逆流水、地下水、雨水の流入により薄まるためと考えられる。

バンコク都内にはNHA(タイ国住宅公社)から移管された12ヶ所の小規模処理場およびMakkasan Pond、Rama IX Pondの運河水浄化施設があり、BMA(バンコク首都圏庁)が運転管理している。現在までの経緯から、大規模な下水道整備には時間と費用がかかるため、主要下水管への接続が困難な地域、水質汚濁が深刻な地域に対しては、分散型処理の適用が有効であると考えられる。そこで、既存の小規模処理施設における排水処理状況を調査した(2012年8月)。表5-3には、調査を行った小規模処理施設における水質の概要を示した。

表5-3 小規模下水処理場の排水処理性能(流入、処理水質)

| 処理場 | Klong Chan | | Bang Na | | Klong Toey | |
|---------------------------|------------|------|---------|------|------------|------|
| | 流入水 | 処理水 | 流入水 | 処理水 | 流入水 | 処理水 |
| 温度 | 30.4 | 30.7 | 29.3 | 30.3 | 30.7 | 31.1 |
| DO (mg/L) | N.A. | N.A. | 2.02 | 4.35 | 1.15 | 2.98 |
| SS (mg/L) | 153 | 15 | 72 | 1 | 72 | 1 |
| Total BOD (mg/L) | 58 | 20 | 102 | 5 | 146 | 4 |
| Soluble BOD (mg/L) | 14 | 8 | 71 | 5 | 88 | 5 |
| Total COD (mg/L) | 114 | 53 | 248 | 15 | 286 | 15 |
| Soluble COD (mg/L) | 46 | 46 | 137 | 15 | 191 | 8 |
| TN (mg/L) | 30.2 | 25.1 | 42.3 | 17.8 | 29.0 | 18.0 |
| NH ₄ -N (mg/L) | 9.7 | 9.3 | 27.4 | 5.3 | 27.5 | 16.5 |

小規模処理施設では、主に集合住宅より分流式で下水の収集を行っているため、流入BOD濃度は60～150 mg/lと比較的高い事が分かる。即ち、遮集管による下水収集を行っている大

規模処理場に比べて適切に汚濁負荷を収集・処理出来ていると言える。これらの処理場では、活性汚泥法 (Klong Chan, Klong Toey)、OD法 (Bang Na) により下水処理を行っており、処理水質は良好であった。一方、流入有機物濃度が高いため、消費電力は0.3～0.5 kWh/m³と大規模処理場の約1.5～2倍 (処理場運営費の40%程度が電力) であり、余剰汚泥の発生量も0.06～0.12 kgSS/m³と多かった。以上の結果より、分流式の下水収集と分散型 (小規模) の下水処理は、水環境汚染の防止のために有効であるが、一方、処理に関わるエネルギーの削減が必要である事が明らかになった。

表5-4 下水処理場の排水基準 (BMAによる)

| 水質項目 | 単位 | 建築物排水基準 | BMA排水基準 |
|-------------|------|---------|---------|
| 1. pH | | 5-9 | 5-9 |
| 2. BOD | mg/l | <20 | <20 |
| 3. SS | mg/l | <30 | <30 |
| 4. 全窒素* | mg/l | | <10 |
| 5. ケルダール性窒素 | mg/l | <35 | |
| 6. アンモニア性窒素 | mg/l | | <5 |
| 7. 全リン | mg/l | | <2 |
| 8. 溶存酸素濃度 | mg/l | | >5 |

注) *流入下水のBOD/N値が4以上の場合に適用

表5-4にはバンコク首都圏庁(BMA)が定めた下水処理場の排水基準を示す。BMAは、下水処理場の放流水に対して、“BMA Requirement”として、Public Health Act(1992)で規定されているBuilding Effluent Standard (Type A:最大の建築物に適用する排水基準) に準拠し、アンモニア性窒素、リン、DOを横出し規制値としている。全窒素については、流入下水の濃度がBOD/N \geq 4の場合に適用し、生物学的水処理機能に配慮した規制となっている。表5-2に示した処理場における処理水質は、概ね良好であり、BMAの定める排出基準値 (表5-4) を満たしている。但し、全窒素については運転状況によっては基準値を満たせない場合もあり、窒素除去を安定的に進めるための技術開発が必要である。

(3) 下水処理施設における電力消費状況

途上国において下水処理設備の導入が遅れている原因の一つが、運転に関わる維持管理コストの捻出である。そこで、下水処理において主要なコストの一つである電力消費量について、BMAの管理する下水処理施設 (20施設: 大規模処理場7箇所、小規模処理場13箇所) について調査を行った。BMAの下水道部 (Department of Drainage and Sewerage) の協力を得て、月間報告書の12ヶ月分 (2012年1月～12月) の月間電力消費量 (kWh/月) および月ごとの日平均処理水量 (m³/日) を収集した。その後、日平均処理水量に月別日数 (29～31日) を乗じ、月ごとの総処理水量 (m³/月) を算出し、その値で月間電力消費量を除することにより、処理水量あたりの電力消費強度 (kWh/m³) を求めた⁴⁾。

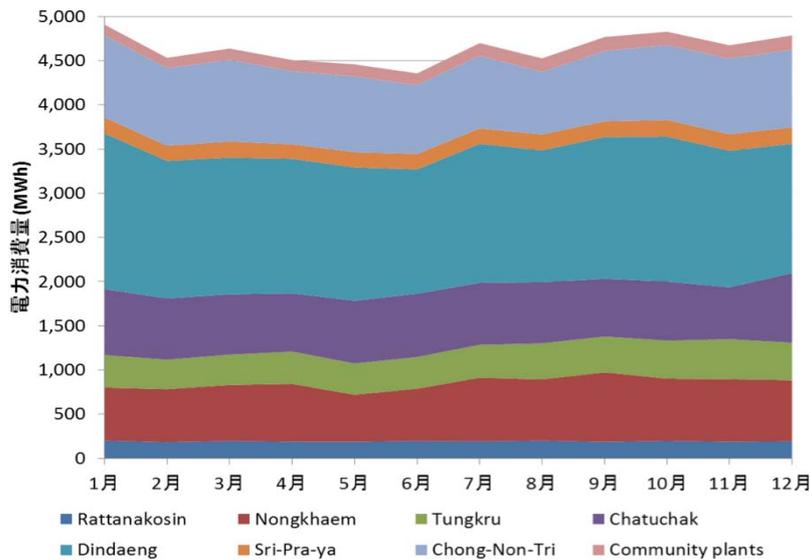


図5-6 バンコク首都圏庁における下水処理設備の電力消費量（月別）

BMA 管理の下水処理場では、年間 55.7 GWh の電力が消費され、その内、97%は大規模下水処理場で消費されていた（図 5-6）。処理水量の多さから、Dindaeng 大規模下水処理場の電力消費量が最も大きく、全体の 33%を消費していた。また、月別では 2012 年 1 月の電力消費量（4.9 GWh）が最も大きくなっているものの、年間を通じて下水処理場の消費電力の月ごとの変動率は比較的小さかった。

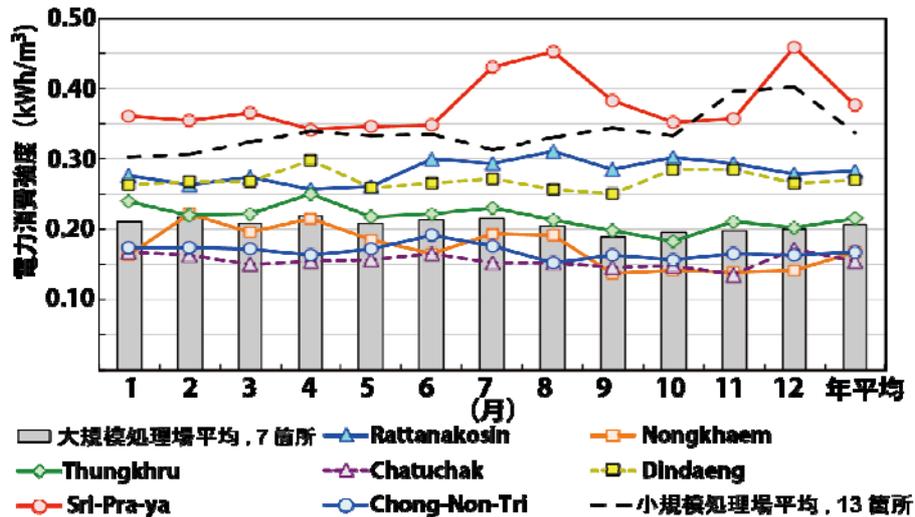


図5-7 バンコク首都圏庁における下水処理設備の電力消費強度

BMA の全処理場の電力消費強度の年平均値は 0.206 kWh/m^3 となった（図 5-7）。また、大規模下水処理場全体の電力消費強度の年平均値は 0.204 kWh/m^3 となった。一方、コミプラ下水を処理する小規模処理場全体の電力消費強度の年平均値は 0.338 kWh/m^3 と高い値を

示す事が明らかとなった。これは、小規模処理場では高有機物濃度の下水を処理している事と、機械設備のスケールメリットの小ささが原因と考えられる。しかしながら、大規模処理場の中でも、Sri-Pra-ya 処理場の電力消費強度は高い値（年平均 0.376 kWh/m³）を示した。本処理場は大規模下水処理場の中で最も下水処理容量が小さい（設計容量：30,000 m³/日、年平均処理水量 15,552 m³/日）処理場であり、処理場の一日あたりの下水処理量（規模）と電力消費強度との負の相関が推測される。

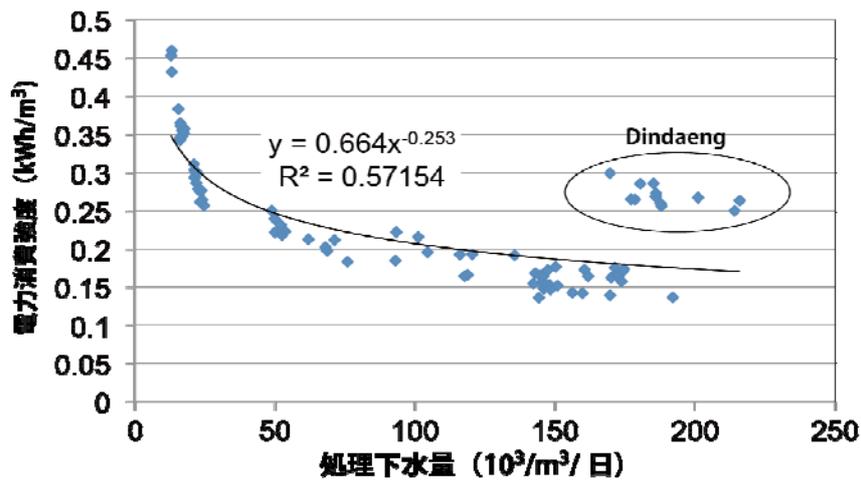


図5-8 大規模処理場における下水処理量と電力消費強度との関係

大規模下水処理場 7 箇所における下水処理量と電力消費強度との相関を見ると、一日当たりの下水処理量が増えるにつれて電力消費強度が低下する傾向が明らかになった（図5-8）。これは下水処理量が大きくなるほど下水処理場のエネルギー効率が改善される傾向にあることを示している。また、本結果から Dindaeng 下水処理場は、同規模の下水処理強度の下水処理場に比べて電力消費強度が高くなるという結果が得られた。これは Dindaeng 下水処理場では、BOD 成分などの有機物だけでなく栄養塩（窒素およびリン）除去を行なう唯一の処理場である事が原因と考えられる。

一方、集合住宅から排出される下水を処理する小規模処理施設 13 箇所（コミュニティプラント、以下、コミプラと略す）で同様の相関を調査したところ、有意な相関関係はみられなかった。これはコミプラの処理下水量の範囲が 300~3,000 m³/日と小さく、その範囲内では電力消費強度に対するスケールメリットが働きにくいと推察される。また、大規模処理場では活性汚泥法に基づいた処理方法が採られているのに対し、コミプラでは活性汚泥法他、オキシデーションディッチ法、曝気ラグーン法および酸化ポンド法といった多様な処理方法が採られているという違いがある。加えて、処理場間での下水水質（有機物濃度、窒素濃度）の差も大きい事も要因として挙げられる。そのため、コミプラでは、そうした技術間や下水水質の差異による影響を除外した形での評価が必要と考えられる。

5.3 実証排水処理試験

バンコク首都圏庁における現状の排水処理技術に関する調査の結果を踏まえ、適地型の省エネルギー排水処理技術（高度好気性ろ床）の実証性能評価試験を現地で実施した。

5.3.1 排水処理試験装置および処理試験の概要

都市排水の分散処理に対応可能で、省エネルギー（省電力）、余剰汚泥の発生量が少ない、維持管理容易をいう要件を満たす、高度好気性ろ床を対象技術として選定した。高度好気性ろ床による東南アジア地域での都市排水の直接処理に関する知見は無く、現地における実排水（都市下水）処理試験による性能評価を通年で実施した。

排水処理試験装置の概要を図 5-9 に示す。全カラム部の高さが約 2.53 m の反応槽を二基準備した。反応槽は、一基ごとに塩化ビニル製のカラム（断面のサイズ 23 cm×23 cm）を 6 段（それぞれ、上から A1～A6、B1～B6 と示す）積み重ねた構造となっており、ランダムパッキング型のスポンジ担体（円柱形、直径および高さ 33 mm）を各カラムに 300 個（充填高 30 cm）充填した。スポンジ担体の充填率は約 0.53 であり、一基あたりのスポンジ担体の体積は 50.47 l である（装置全体二基分で、100.9 l）。カラム部の接続部には、サンプリング口を設けており、装置高さ方向での水質の変化を調査できる構造とした。

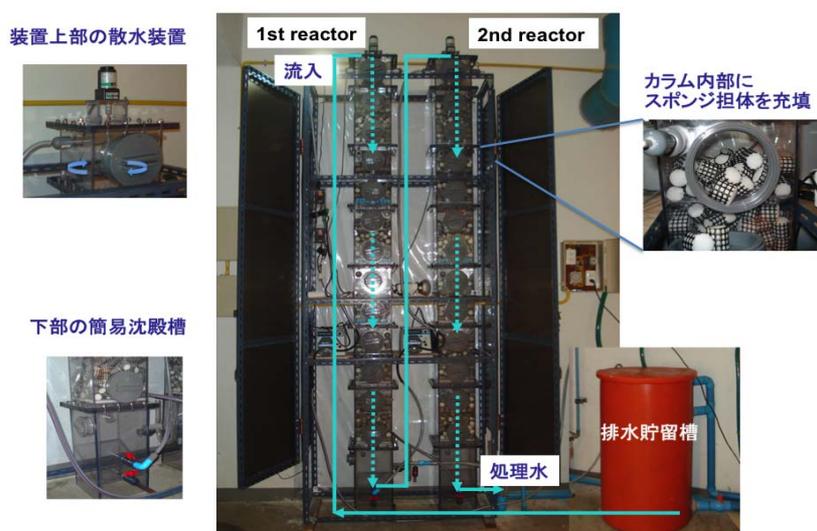


図 5-9 都市排水の実証処理試験装置の概要

排水処理試験装置は、BMA およびキングモンクット工科大学トンブリ校の協力を得て、バンコク都の Thung Khru 処理場（図 5-3, 表 5-1, 6.参照）の建屋内に設置を行った。スクリーン通過後の実都市排水（合流下水）をタイマー動作により、一定時間間隔（30～60 分に一回）で貯留槽に汲み上げ、排水処理試験装置に連続的に供給した。排水の装置への供給は上部の散水装置より排水を滴下させ、自然通気により酸素を供給する構造（=外部曝気動力無し）とした。処理試験は、一基目の処理水を二基目に流入させる直列処理方式で行い、外気温条件で運転を行った。約 1 年間の実証処理試験後、即効的な汚染対策や技術導

入による省エネルギー効果が高いと考えられる小規模排水処理場（Bang Na 処理場、図 5-10）に実証試験装置を移設し、分流下水（高有機物濃度）の処理性能評価を実施した。

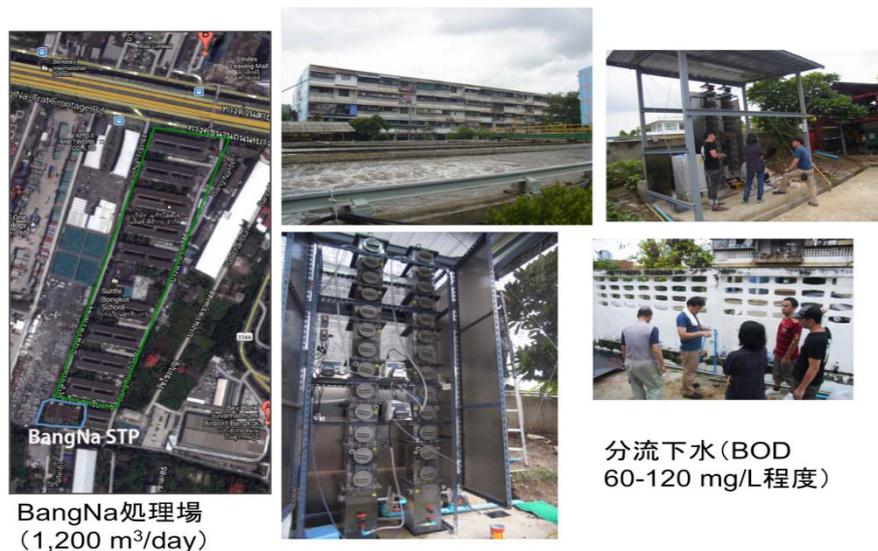


図 5-10 都市排水の実証処理試験装置の概要

(Bang Na 処理場に設置、8600 人規模の集合住宅排水を処理)

5.3.2 排水処理試験の結果（合流下水、大規模処理場）

合流下水の連続処理試験は、Thung Khru 処理場において 2012 年 2 月から約 1 年の期間行った⁵⁾。運転期間において担体当たりの排水滞留時間（処理時間）を 4 時間、3 時間、2 時間、1.5 時間、1 時間と段階的に短縮して性能評価を実施した。

表5-5 高度好気性ろ床による排水処理性能（流入・処理水質）：合流下水

| | 処理時間 2時間 | | | 処理時間 1時間 | | |
|----------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | 下水 | 前段DHS | 後段DHS | 下水 | 前段DHS | 後段DHS |
| DO | - | 4.8 | 5.6 | - | 3.5 | 5.2 |
| SS | 33 | 9 | 1 | 30 | 16 | 5 |
| 全COD | 63 | 36 | 25 | 61 | 36 | 20 |
| 溶解性COD | 34 | 22 | 17 | 32 | 22 | 16 |
| 全BOD | 15 | 3 | 2 | 19 | 6 | 3 |
| 溶解性BOD | 6 | 3 | 2 | 9 | 3 | 2 |
| 全窒素 | 7.9 | 6.0 | 4.9 | 7.9 | 5.3 | 4.7 |
| アンモニア性窒素 | 6.9 | 0.1 | 0.1 | 7.2 | 2.0 | 0.2 |
| 硝酸性窒素 | - | 3.1 | 2.7 | - | 2.2 | 2.6 |

単位: mg/L

表 5-5 に処理時間 2 時間および 1 時間時の排水処理性能（下水、処理水の水質）を示した⁴⁾。年間を通じて下水の温度は、平均 31℃と高く、全 BOD(total BOD)は、15～19 mg/l と低い値であった。高度好気性ろ床は、処理時間 1 時間においても、全 BOD 除去率 84%、アンモニア除去率 97%、全窒素除去率 41%と既存の活性汚泥法と同等以上の優れた排水処理性能を示した。本処理装置における担体の充填率は、0.53（53%）であり、装置の体積当たりの処理時間は約 2 時間となるが、既存処理施設（処理時間 4 時間程度）と比べて省スペー

ス化が図れる可能性が示された。また、運転期間を通じて余剰汚泥の発生量は、著しく少なかった（0.002 kgSS/m³程度）。

図 5-11 には、処理時間 2 時間における装置の排水流下方向での水質変化を示した。これより、ろ床型排水処理装置では、排水を上部から滴下するだけで、溶存酸素が供給され、それに伴って BOD とアンモニア性窒素の酸化が進行することが明らかになった。また、スポンジ担体の汚泥濃度は、約 20 gVSS/l と活性汚泥法の汚泥濃度の 5～10 倍に達しており、優れた汚泥保持能が処理水質の維持と、余剰汚泥の削減に寄与している事が分かった。

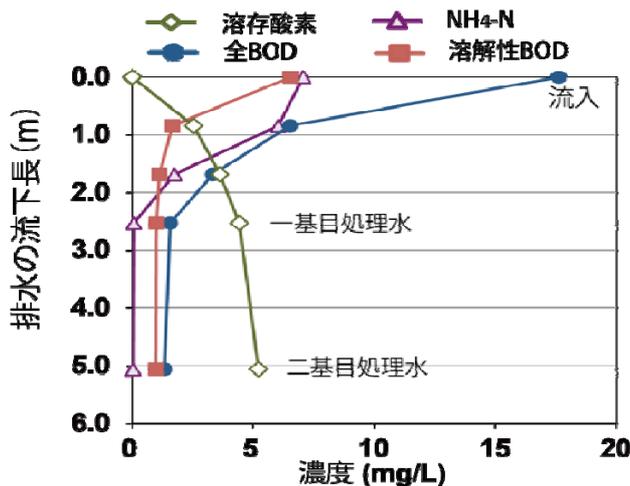


図 5-11 排水流下方向における水質変化（合流下水）

高度好気性ろ床での電力消費量は約 0.1 kWh/m³（ポンプ揚程 16-20 m とした場合の理論値）、余剰汚泥発生量は 0.002 kgSS/m³（実測値）であり、既存活性汚泥法（0.23 kWh/m³, 0.018 kgSS/m³）に対し、電力で 57%、汚泥で 89%（沈砂池での汚泥発生を考慮せず）の削減効果を示した。以上の結果より、提案する高度好気性ろ床は、低有機物濃度の合流下水に対しても優れた処理水質と省エネ性能を発揮出来る事が明らかになった。

5.3.3 排水処理試験の結果（分流下水、小規模処理場）

分流下水の連続処理試験は、BangNa 処理場において 2013 年 8 月から約 7 ヶ月の期間行った。運転期間において担体当たりの排水滞留時間（処理時間）を 6 時間、3 時と短縮して性能評価を実施した。

表 5-6 に処理時間 6 時間および 3 時間時の排水処理性能（下水、処理水の水質）を示した⁶⁾。集合住宅（設計人口 8600 人）から排出される下水量は、約 1,200 m³/day であり、その有機物濃度は、全 COD で 147～167 mg/l、全 BOD で 59～78 mg/l と合流下水（表 5-5）よりも 3 倍以上高い値であった。これは、集合住宅からの下水収集を分流式の配管で行っているためであり、水質汚濁物質の効率的な収集が行えている事を示すものである。また、有機物濃度の増加と共に、全窒素の濃度も 31.5～38.1 mgN/l と合流下水の約 4 倍に達していた。高度好気性ろ床は、HRT6 時間で運転を開始し、処理性能が安定した事を確認した上で、運転

開始後 95 日目（11 月上旬）に HRT を 3 時間に短縮した。HRT の短縮後も大きな処理水質の悪化はみられず、既存の好気性排水処理（オキシデーションディッチ法）と同等の処理水質を達成した。最終的な処理性能は、処理時間 3 時間において、全 BOD 除去率 92%、アンモニア除去率 98%、全窒素除去率 43%であった。

表5-6 高度好気性ろ床による排水処理性能（流入・処理水質）：分流下水

| | HRT 6 hr | | | HRT 3 hr | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 下水 | 前段DHSeff | 後段DHSeff | 下水 | 前段DHSeff | 後段DHSeff |
| 温度 | 29.3 (1.3) | 28.8 (1.3) | 28.5 (1.3) | 27.1 (1.9) | 26.6 (2.2) | 26.1 (2.3) |
| pH | 7.5 (0.3) | 7.6 (0.5) | 8.1 (0.3) | 7.5 (0.1) | 7.4 (0.3) | 8.0 (0.2) |
| DO (mg/L) | 0.8 (0.8) | 5.3 (0.6) | 6.2 (0.4) | 0.3 (0.2) | 4.3 (0.4) | 6.0 (0.3) |
| SS (mg/L) | 41.4 (18.2) | 11.4 (7.5) | 2.4 (1.5) | 40.9 (8.9) | 15.8 (9.8) | 8.7 (3.7) |
| 全COD (mg/L) | 147 (66) | 36 (18) | 20 (10) | 167 (54) | 51 (19) | 34 (14) |
| 溶解性COD (mg/L) | 84 (35) | 24 (13) | 12 (8) | 108 (35) | 39 (16) | 26 (13) |
| 全BOD (mg/L) | 78 (34) | 13 (5) | 6 (3) | 59 (15) | 16 (6) | 5 (3) |
| 溶解性BOD (mg/L) | 40 (23) | 6 (3) | 4 (2) | 28 (8) | 6 (2) | 2 (2) |
| 全窒素 (mg/L) | 31.5 (12.6) | 16.5 (7.0) | 13.7 (5.7) | 38.1 (7.2) | 26.6 (5.8) | 21.8 (6.4) |
| 溶解性窒素 (mg/L) | 28.7 (12.5) | 14.7 (5.8) | 12.6 (5.3) | 34.5 (6.8) | 24.1 (5.1) | 19.8 (6.1) |
| アンモニア性窒素 (mg/L) | 25.5 (9.6) | 0.9 (1.1) | 0.2 (0.2) | 29.3 (6.3) | 5.7 (4.1) | 0.5 (0.1) |
| 硝酸性窒素 (mg/L) | 3.2 (1.3) | 10.0 (2.1) | 10.1 (2.3) | 2.0 (0.4) | 12.1 (2.0) | 12.6 (2.1) |
| 亜硝酸性窒素 (mg/L) | 0.0 (0.0) | 0.2 (0.5) | 0.0 (0.0) | 0.0 (0.0) | 0.6 (0.5) | 0.1 (0.2) |
| Coliform (CFU/mL) GM | 7.36×10^4 | 4.70×10^2 | 5.50×10^0 | 4.13×10^4 | 5.39×10^2 | 4.94×10^1 |
| E. coli (CFU/mL) GM | 3.57×10^4 | 2.16×10^1 | 1.36×10^0 | 2.66×10^4 | 9.18×10^1 | 5.38×10^0 |

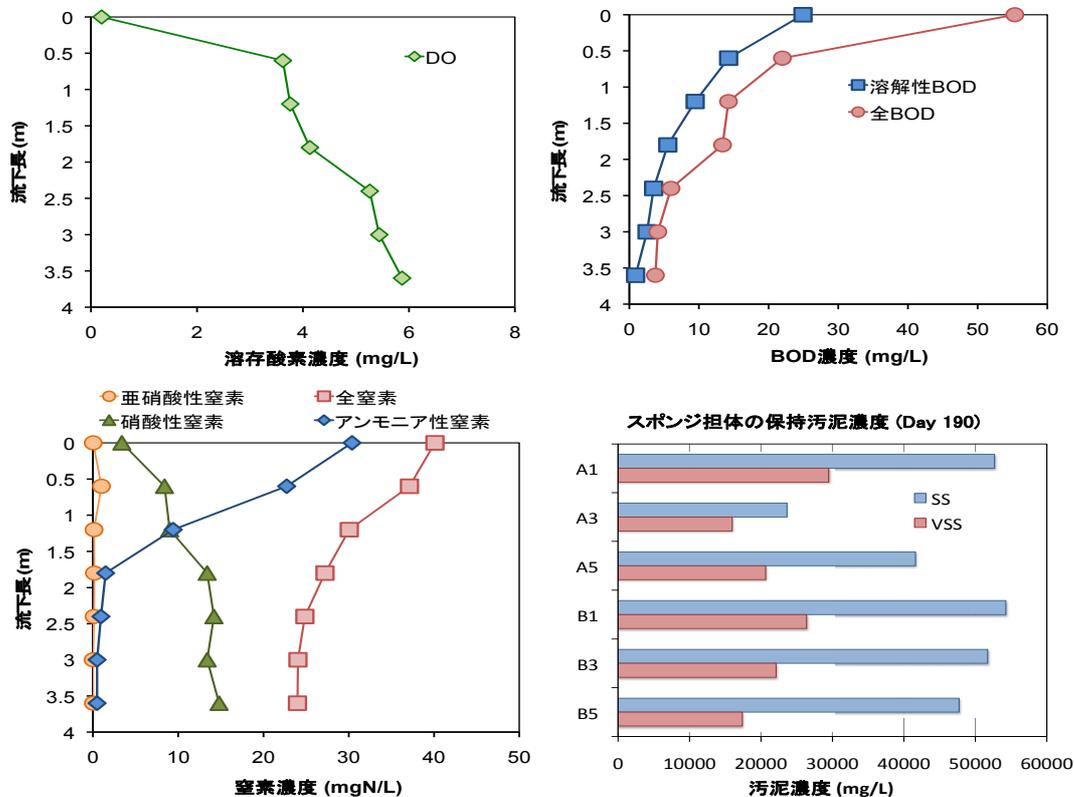


図 5-12 排水流下方向における水質および汚泥濃度の変化（分流下水）

図 5-12 には、処理時間 3 時間における装置の排水流下方向での水質変化を示した。有機物濃度、窒素濃度の高い、分流下水の処理においても、排水の滴下により素早く溶存酸素が供給され、それに伴って BOD とアンモニア性窒素の酸化が進行することが確認された。また、BOD とアンモニア性窒素の大部分は、一基目の装置で大部分が分解されていた。糞便汚染の指標生物である E. coli についても、好気性ろ床の処理において 3 log 以上が除去され、処理水の衛生学的な安全性の確保が確認できた(表 5-6)。スポンジ担体の汚泥濃度は、約 20 gVSS/l と非常に高い濃度に達しており、この装置内への高濃度汚泥（好気性微生物）保持が好気性ろ床における水質の確保と、余剰汚泥の削減に寄与している事が確認できた。

その他、分流下水の処理で問題となる下水中の油脂（n-Hexane 抽出物）の除去能について評価を行ったところ、流入下水中の濃度 86.0 mg/l が最終的に 1.6 mg/l にまで低下（除去率 98%）しており、優れた油脂処理性能が確認された。

分流下水の処理における高度好気性ろ床の電力消費量は約 0.06 kWh/m³（ポンプ揚程 8-10 m とした場合の理論値）、余剰汚泥発生量は 0.0136 kgSS/m³（実測値）であり、既存活性汚泥法（0.394 kWh/m³, 0.0582* kgSS/m³, *余剰汚泥濃度を 10 gSS/l と仮定した時の値）に対し、電力で 85%、汚泥で 77%（沈砂池での汚泥発生を考慮せず）の削減効果を示した。以上の結果より、提案する高度好気性ろ床は、高有機物濃度の分流下水に対しても優れた浄化能と省エネ性能を安定的に発揮出来る事が明らかになった。

5.4 まとめ

バンコク（タイ）をモデルケースとして開発途上国における都市排水処理システムの現状把握を行い、その排水処理状況や消費エネルギー（電力）に関する調査を実施した。その結果、現状の大規模処理施設は下水の収集性能が不十分（流入有機物濃度）のため、水質汚濁防止への効果は低く、総電力消費削減の観点からは、大規模処理設備における省電力化の効果が大きいことが推察された。一方、分流下水を処理する小規模下水処理施設は、汚濁物質の収集と効率的な処理という観点からは有効であるが、運転に伴う電力消費量や余剰汚泥の発生量が小規模処理施設と比較して多いため、維持管理費用（=手間）の削減の観点からも、消費電力や余剰汚泥の削減を達成することが技術普及の鍵と考えられた。

表5-7 既存排水処理技術と開発技術の省エネルギー性能の比較

| | 合流下水（大規模処理施設） | | | 分流下水（小規模処理施設） | | |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------|---------------|-------------------|--------|
| | 既存技術 (活性汚泥法) | 開発技術 (高度好気性ろ床) | 削減率(%) | 既存技術 (OD法) | 開発技術 (高度好気性ろ床) | 削減率(%) |
| 消費電力(kWh/m ³) | 0.23 | 0.1 | 57 | 0.394 | 0.06 | 85 |
| 余剰汚泥発生量(kgSS/m ³) | 0.018 | 0.002 | 89 | 0.0582 | 0.0136 | 77 |
| 処理時間* (hr) | 4 | 2 | 50 | 60 | 6.33 | 89 |

*好気性ろ床は、装置の体積に基づいた滞留時間（スポンジ充填率を考慮）を示した。

また、分流下水処理における滞留時間は沈殿池を含む実滞留時間を示した。

現地における高度好気性ろ床の合流下水（低有機物濃度、大規模処理場）、分流下水（高有機物濃度、小規模処理場）を供した実証排水処理試験の結果、実証技術は既存の好気性排水処理（活性汚泥法、OD法）と同等の処理水質を維持しつつ、短い処理時間（省スペース、建設費削減）で、大幅な電力消費の削減（50～85%）、余剰汚泥の削減（77～89%）が達成できることが明らかになった。現在、バンコク首都圏庁(BMA)では、即効的な汚染対策として集合住宅排水を処理する小規模処理施設（排水量 1,000～2,000 m³/day）への開発技術の導入についての検討を開始し、今後の BMA の下水道整備計画のマスタープランへの反映が予定されている。

参考文献

- 1) (社)日本下水道協会: 持続可能な下水道事業の推進に向けて ～今後の中長期における取り組み～, 3, (2008) (<http://www.jswa.jp/wp/wp-content/uploads/2011/03/019.pdf>)
- 2) 須藤隆一編, 微生物固定化法による排水処理, 第4章 生物ろ過法, 産業用水調査会, 129-154, (1998)
- 3) Tanaka H., Takahashi M., Yoneyama Y., Syutsubo K., Kato K., Nagano A., Yamaguchi T., Harada H. : Development of an energy saving system with high effluent quality for municipal wastewater treatment by UASB-DHS, *Water Science and Technology*, 66(6), 1186-1194, (2012)
- 4) 独立行政法人 国際協力機構(JICA), 株式会社 東京設計事務所(TEC), 日本工営株式会社(NK): タイ国バンコク下水道整備事業準備調査ファイナルレポート(I) 概略マスタープラン 第1巻 要約, 5, (2011)
- 5) 岡寺智大, 珠坪一晃, 小野寺崇, Wilasinee Yoochatchaval : バンコク都 (BMA) の下水処理とエネルギー消費, 環境システム研究論文発表会第41回講演集, 81-85, (2013)
- 6) 小野寺崇, 珠坪一晃, 水落元之, 岡寺智大, 藤田壮, 角野晴彦, Yoochatchaval Wilasinee : タイ・バンコクにおける開発途上国向け下水処理技術の実証試験, 第50回下水道研究発表会講演集, P-9, 25-27, (2013)
- 7) Yoochatchaval W., Onodera T., Sumino H., Yamaguchi T., Mizuochi M., Okadera T., Syutsubo K. : Development of Down-flow Hanging Sponge Reactor for the low strength sewage treatment, 7th IWA International Conference on Efficient Use and Management of Water, Proceedings CD-ROM, (2013)

第6章 産業連関分析を用いた環境技術方策の移転効果の評価

6.1 研究背景と目的

6.1.1 中国の経済発展とCO₂削減への対応

中国経済は1978年の改革開放以来30年以上にわたり、急速に発展を遂げてきた。特に、2002年のWTO加盟を契機に、中国経済がグローバル経済に組み入れられたことにより、経済成長は加速的に進展した。近年、景気の減速懸念や輸出依存型から内需型、投資依存型から消費型への転換など経済政策上の課題を抱えながらも、農村の都市化等を示されるように潜在的な経済成長の原動力を有しており、経済成長のカーブは緩やかに移行するものの、当面は堅調な成長を持続するものとみられている。

一方、中国経済の発展とともに環境問題もますます深刻になっている。2009年11月、中国国務院はCO₂の削減についての会議を開催し、その中で中国政府は2020年までの温室効果ガスの排出削減をめぐる行動目標を発表し、国内総生産(GDP)1万元あたり(単位GDP)のCO₂排出量を2005年比で40%から45%削減することを発表するなど、経済成長とともにCO₂の削減への対応が急務となっている。

6.1.2 資源循環技術の施策シナリオと環境技術移転

アジア、中国の拠点都市の資源技術施策シナリオでは、急速な経済発展に伴い動脈産業インフラの構築が進行しつつあることに留意する必要がある。

遼寧省を始め、中国では複数の省が、鉄鋼生産都市を抱えている。日本においても川崎エコタウン、ひょうごエコタウン、北九州エコタウンなど多くのエコタウン形成に鉄鋼産業のインフラや技術が寄与してきた。特に鉄鋼業は中国では工業の食料と知られており、ローカル、グローバルを含む地域を跨ぐ様々な産業に部品、部材の中間財を提供するサプライチェーンを構成しながら最終需要とつながっている。最終需要とは、産業等の原材料として再び生産過程に入って中間消費されるもの以外に、家計や一般政府の消費あるいは資本形成等として最終的に需要されるものをいう。しかし、産業社会の進展に伴い最終需要変化は産業構造に影響を及ぼし、鉄鋼業のサプライチェーンを大きく変化させる。

中国での資源循環技術施策を展開するにあたっては、これら動脈産業のインフラに環境技術を移転することにより、動脈産業インフラを高効率な資源循環技術が組み込まれたシステムとして構成することが重要となる。

6.1.3 日中の鉄鋼生産およびエネルギー消費原単位の推移

日中の粗鋼生産と粗鋼トンあたりエネルギー消費原単位の推移について、中国鋼鉄年鑑および日本鉄鋼連盟の統計データを用いて、図6-1に1985年以降の粗鋼生産と粗鋼トンあたりエネルギー消費原単位の経年変化を示す。

日本はすでに1970年代にエネルギー効率の高い生産プロセスを確立しており、1980年代以降もその効率を維持しながら推移している。中国は1980年代以降、エネルギー効率を大

大きく改善している。2000年以降、鉄鋼生産が飛躍的に拡大してからは粗鋼あたりエネルギー消費原単位の改善は穏やかであるが、1990年代におけるエネルギー効率の改善は著しい。遼寧省の粗鋼トンあたりエネルギー消費原単位は中国の平均より高く推移しており、省エネルギー（低炭素）技術の導入がやや遅れていることが示唆される（図6-2）。

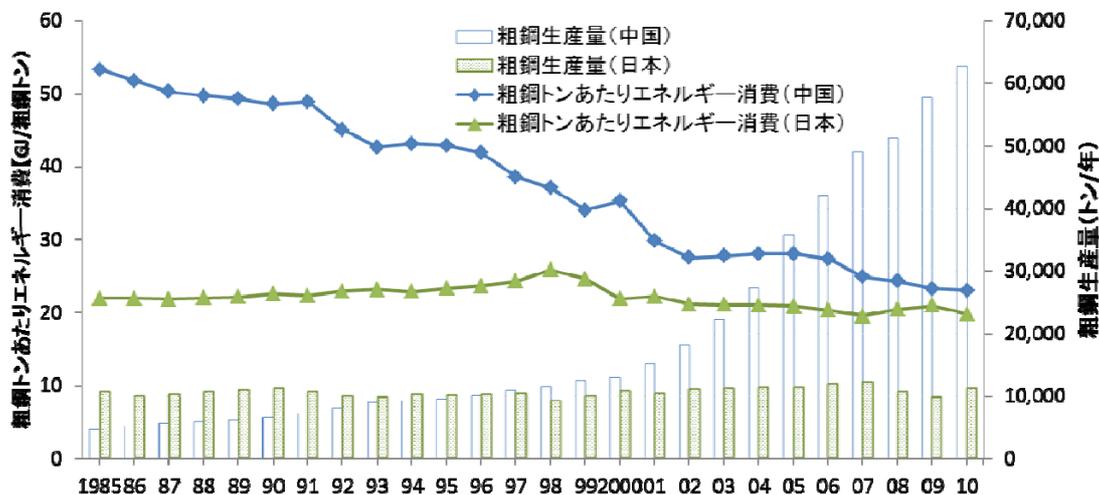


図 6-1 日中の粗鋼生産と粗鋼トンあたりエネルギー消費の経年変化

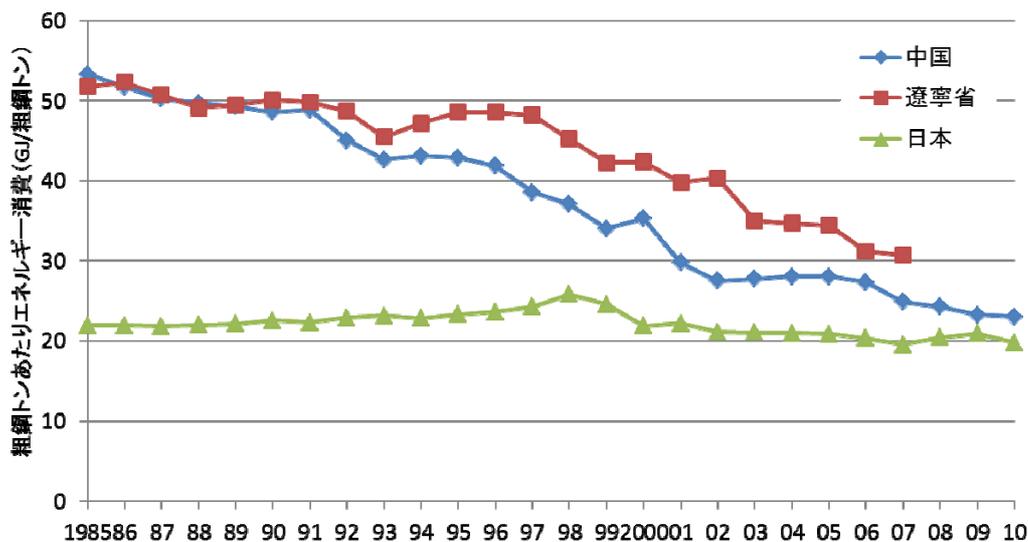


図 6-2 日本、中国、遼寧省の粗鋼トンあたりエネルギー消費の経年変化

6.1.4 世界の主要国における鉄鋼の省エネルギー技術普及率と省エネポテンシャル

2007年、世界の鉄鋼業界は、インドネシア・バリ島で開かれた国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP13）において、京都議定書後の地球温暖化防止に対する取り組みとして、産業ごとに世界共通の環境・省エネ技術基盤を持ったもの同士が連携する「グローバル・セクター・アプローチ」を提唱した。セクター・アプローチは、対象となる産業分野において先進的な省エネルギー・環境技術を世界的に採用することで当該の産業からの排出量を削減し、炭素リーケージを回避しながら、世界全体の温室効果ガスの排出削減を目

指すものであり、トップランナー方式にも共通する戦略である。セクトラル・アプローチは利用可能な技術の普及を中心に据えた現実的なアプローチと言われている。利用可能な環境技術・省エネルギー技術が世界に広く普及することは、先進国はもとより世界全体の技術進歩をも促進させる効果をもたらす。

鉄鋼生産プロセスにおける省エネルギー・低炭素技術には様々なものがある。Oda ら⁵⁾は主な鉄鋼生産国、地域における代表的な省エネルギー（低炭素）技術の普及率について調査を行った（図 6-3）。連続鋳造やコークス炉ガスの回収はすでに途上国においても高い普及率を示しているが、それ以外に代表的な省エネルギー（低炭素）技術として知られている乾式消火技術（CDQ）、炉頂圧発電技術（TRT）、転炉ガス回収技術（BOF）では先進国と途上国との間で普及率に大きな格差がみられる。

さらに、近年科学技術の進捗とともに、さらに鉄鋼業に関する新しい環境技術が提案されている。炭素集約度の高い石炭を代替する廃プラ高炉還元技術(WPRCO)はプラスチック製容器包装をリサイクルして、石炭を代替する技術である。コークス炉でプラスチックを熱分解し、炭化水素油、コークス、コークス炉ガスを生成し、それぞれ化学原料、製鉄原料、発電（発電効率 40%）・水素ガスなどへ有効利用する。製鉄原料の輸入炭を削減できるとともに、生成された炭化水素油やコークス炉ガスは原油の代替となるため、天然資源削減効果が高く、廃棄物由来のプラスチックで代替することで CO₂ の排出も抑制できる。また下水乾燥汚泥の高炉吹込(SSRBF) では、下水汚泥を製鉄プロセスの中で使用される微粉炭の代用品として再利用する。高炉中に還元剤として下水汚泥を添加し、下水汚泥中の炭素および水素により鉄鉱石の還元処理を行うことで、従来の石炭系還元剤と同程度に鉄鉱石の還元処理を行うことが可能となり、更にはバイオマス資源の有効利用も促進可能となる。これらをふまえて、本章で分析する鉄鋼の省エネルギー・低炭素技術として、以下の 5 つを対象とする。それぞれの技術の概要を図 6-4 に示す。

- ・ 乾式消火技術（CDQ）
- ・ 炉頂圧発電技術（TRT）
- ・ 転炉ガス回収技術(BOF)
- ・ 廃プラ高炉還元 (WPRCO)
- ・ 汚泥の高炉吹込(SSRBF)

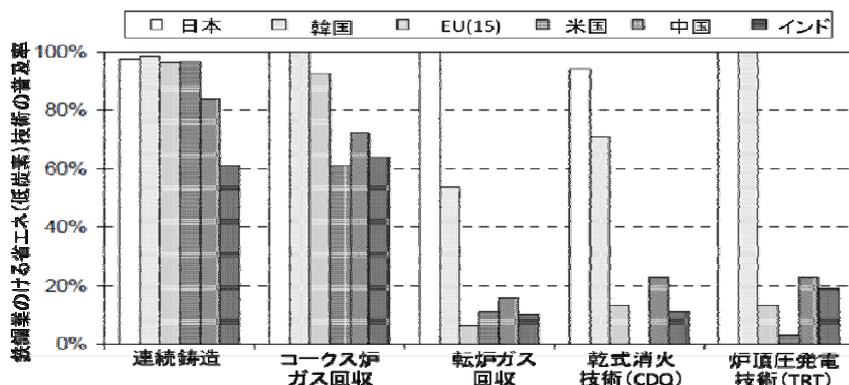
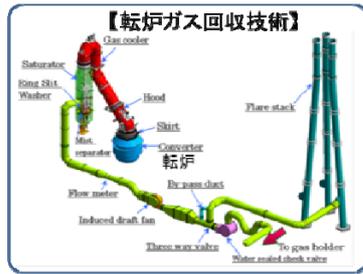
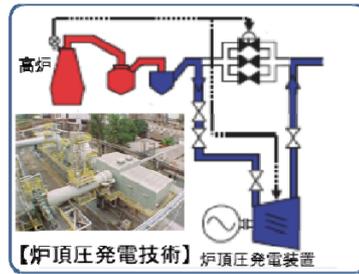


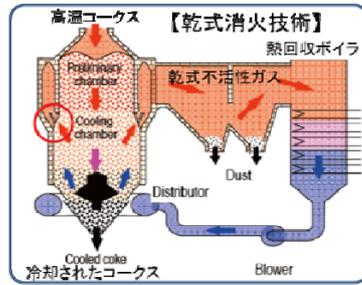
図 6-3 主要鉄鋼生産国・地域における代表的な省エネ（低炭素）技術の普及率⁵⁾



鉄鋼を鋼にする転炉工程でのガスを回収し熱源や発電に利用

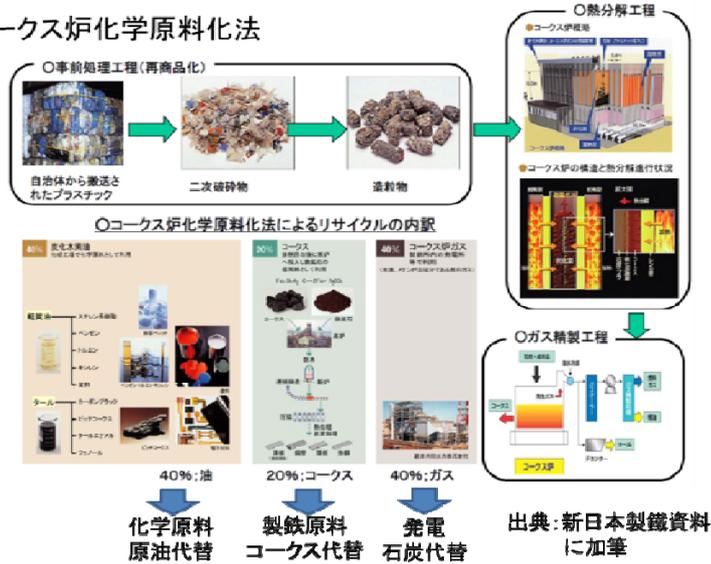


高炉ガスが炉頂部分で有する0.3~0.4MPaの圧力を利用して発電



1000℃の高温コークスを不活性ガスで乾式冷却することによりコークス副熱を回収し発電

コークス炉化学原料化法



下水乾燥微粉化汚泥の高炉吹き込み添加(還元剤)

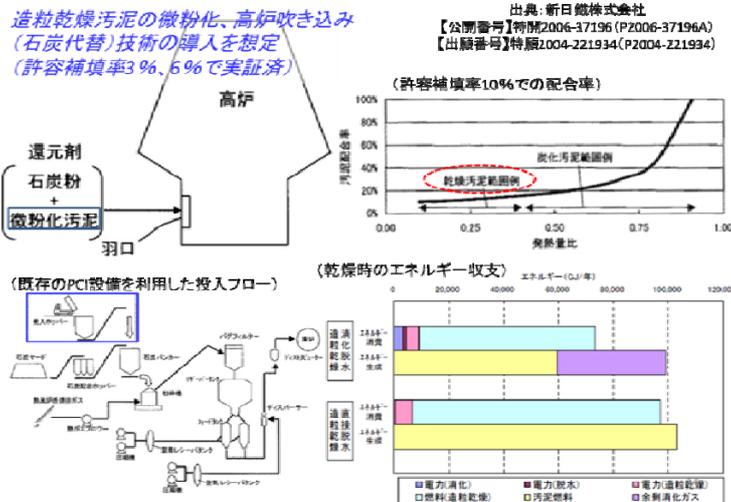


図 6-4 鉄鋼の省エネルギー・低炭素技術の概要

6.1.5 研究の目的

中国で資源循環技術の施策シナリオを考える際に温室効果ガス削減をぬきにして考えることはできない。特に、鉄鋼などの素材産業においては、その産業において生産される財が最終製品として消費主体に提供されるわけではなく、自動車、電気機器、建造物など最終製品の原材料、中間財として様々な製造業に投入される構造をもつ。製品の生産工程では組立時よりむしろ素材製造時における CO₂ 排出が大きい、一方で素材生産量そのものは素材を原料とする製造業のサプライチェーンを通して最終需要がそのカギを握る。したがって、鉄鋼業と鉄を原料とする製造業、その製品を消費する最終需要主体との連関構造をふまえて施策を講じることが重要である。

経済発展に伴う住宅など社会資本形成や自動車など耐久消費財などの消費など、最終消費が直接的、間接的に誘発する CO₂ 排出構造を分析する上で、カーボンフットプリント分析が有効である¹⁾。中国の鉄鋼業と CO₂ 排出に関する研究として、韓頴ら²⁾は中国の鋼鉄工業の二酸化炭素排出量を予測している。Zhang and Wang³⁾は生産関数モデルを用いて、省エネルギー技術効率を評価している。また産業連関表を用いた中国の CO₂ 排出に関する研究では、例えば Minx J.C ら⁴⁾は産業連関表を用いてカーボンフットプリントの分析を行った。しかし、各省の鉄鋼業や地域に環境技術を導入した場合の直接的・間接的な波及効果について産業連関表を用いて解析した研究事例はない。そこで本研究においては、経済統計として使われている産業連関表を用いて、鉄鋼業を対象に、資源循環および低炭素技術方策の適用が鉄鋼業のサプライチェーンに関連する産業や地域に及ぼす効果について分析を行うことを目的とする。

6.2 研究方法

6.2.1 分析に用いるデータ

(1) 産業連関表データ

省レベルの産業連関表データについては、国家统计局国民经济核算司編著による中国地区投入産出表の 2002 年⁶⁾および 2007 年のデータ⁷⁾が公表されており、これを用いることとする。部門数は 42 部門である。中国地区投入産出表において、鉄鋼業は独立した部門としては存在しない。本研究では「金属冶炼及压延加工业」（鉄鋼を主とし、他の金属も含まれる）を鉄鋼部門として取り扱う。ちなみに、日本の産業連関表では鉄鋼、非鉄金属がそれぞれ独立した部門として存在する。なお、2002 年のデータについては、移輸出と移輸入のデータが分けられていなかったため、李善同らによる改訂版データを用いた。

また、中国地域間や国際間の財取引が卓越する中で、遼寧省を含む各地域への技術導入が他地域にどのような波及効果をもたらすかを分析するために、中国の地域間産業連関表 China Multi-regional Input-Output table 2007⁸⁾を用いた。さらに、中国以外の地域との関係を分析するために、アジア経済研究所が作成した日中地域間国際産業連関表（2000 年）⁹⁾を用いた。同連関表は、中国 7 地域、日本 8 地域、ASEAN、東アジア、米国地域から構成されている。分析の便宜上、日本については 8 地域区分を全国 1 地域に統合した。部門数

は 10 部門である。

(2) 燃料種類別エネルギー消費量データ

中国の省レベルのエネルギー消費データについては省によって産業連関表 42 部門以上の詳細な区分で公開しているところもあれば、省統計年鑑では全く公開していないところまで様々である。そこでまず省の統計年鑑における記載情報を確認し、42 部門に対応している部門のデータはそのまま用い、より詳細な部門のデータに分かれている場合には 42 部門の区分にあわせて統合した。42 部門よりも粗い部門区分の表（データがない場合は中国能源統計¹⁰⁾の省レベルのバランス表を利用）では、その消費データをその区分に該当する産業連関表の各部門における、石炭部門（煤炭开采和洗选业、部門番号 02）、石油部門（石油加工、炼焦及核燃料加工业、部門番号 11）からの投入額の比によって配分した。

(3) 燃料種類別熱量換算・CO₂ 排出係数データ

燃料種類別熱量換算データは、中国の総合能耗計算通則¹¹⁾に規定された数値を用いた。CO₂ 排出係数は IPCC ガイドライン¹¹⁾の値を用いた（表 6-1）。

表 6-1 燃料種別熱量換算・CO₂ 排出係数

| | | 石炭 | コークス | 原油 | ガソリン | 灯油 | 軽油 | 重油 | 天然ガス |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 熱量換算原単位(総合能源通則) | kJ/kg | 20908 | 28435 | 41816 | 43070 | 43070 | 42652 | 41816 | 38931 |
| 熱量あたりCO ₂ 排出原単位 | tC/TJ | 25.8 | 29.4 | 20 | 18.9 | 19.6 | 20.2 | 21.1 | 15.3 |

(4) GDP デフレーター

SDA による要因分析を行う際には 2 時点の産業連関表を扱うため、価格表示を実質化しておく必要がある。ここでは、中国における GDP デフレーター¹²⁾の値をもとに、2007 年産業連関表の値に 195.16/248.58 を乗じ、2002 年実質価格に換算して計算を行った。

6.2.2 分析方法

鉄鋼業への省エネルギー（低炭素）技術の導入効果の分析フローを図 6-5 に示す。Oda⁵⁾により、各省エネルギー（低炭素）技術の導入によるエネルギー削減効果の原単位が 0.9GJ/t-crude steel（転炉ガス回収）、150kWh/t-coke（乾式消火技術）、30kWh/t-pig iron（炉頂圧発電設備）と得られている。これをもとに鉄鋼部門が電力部門から投入する投入係数を変化させ、変化後の投入係数行列にて逆行列を作成し、二酸化炭素の誘発量を求めて、従来の誘発量との差を分析する。廃プラ高炉還元は年間の各省コークス消費量の 1%分を廃プラで代替すると想定した。製鉄の時、消費された原料石炭、コークス、原油を代替するので、鉄鋼部門の CO₂ 直接排出係数と COG ガス発電代替による電力部門の CO₂ 直接排出係数とオイルコークス等の生成のための原油代替量を減少させるが、一方廃プラ洗浄やベール輸送による環境への負荷もあり、従って鉄鋼部門の水道供給部門からの投入係数や鉄鋼部門の運輸部門からの投入係数を増加させる。下水汚泥の高炉吹き込みは下水汚泥を従来製鉄プ

プロセスの中で使用される微粉炭の代用品として再利用するので、下水汚泥の高炉吹き込み量に応じて各地域鉄鋼業の生産量あたり CO₂ 排出原単位を削減させる。一方汚泥の乾燥と輸送のために、電力熱部門、運輸部門、石炭コーク部門から水道部門への投入金額が増加する。それぞれの投入係数・投入金額の変化を表 6-2 に示す。

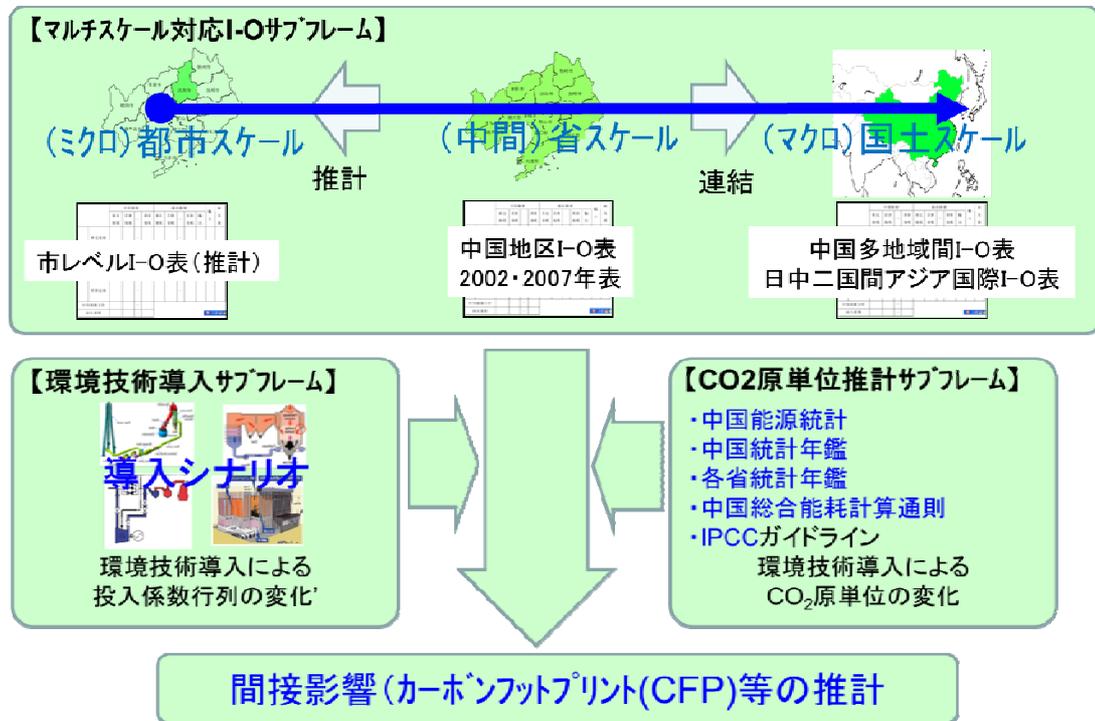


図 6-5 鉄鋼業への省エネルギー（低炭素）技術の導入効果の推計フロー

表6-2 技術導入に伴う投入係数変化

| 環境技術 | 投入係数, 投入金額の変化 |
|-------------|---|
| BOF/CDQ/TRT | (-) 省エネルギー技術効率に対応して電力熱部門(No.23)から鉄鋼業部門(No.14)への投入金額を削減. |
| WPRCO | (-) 廃プラの投入量に応じて各地域の石炭選別部門(No.2)から, 鉄鋼業部門(14)への投入係数を削減. (+) 廃プラの洗浄と輸送に伴い各地域の水供給部門と交通部門から, 自地域の鉄部門への投入係数が増加. |
| SSRBF | (-) 下水汚泥の高炉吹き込み量に応じて各地域鉄鋼業(No.14)の生産量あたりCO ₂ 排出原単位を削減. (+) 汚泥の乾燥と輸送のために, 電力熱部門(No.23), 運輸部門(No.23), 石炭コーク部門(No.27)から水道部門(No.29)への投入金額が増加. |

BOF(Basic Oxygen Furnace): 転炉ガス回収

CDQ(Coke Dry Quenching): 乾式コークス冷却

TRT(Top pressure Recovery Turbine): 炉頂圧回収

WPRCO(Waste Plastic Recycling to Coke Oven): 廃プラスチックのコークス炉での有効利用

SSRBF(Sewage Sludge Recycling to Blast Furnace): 下水汚泥の高炉での有効利用

6.3 結果と考察

6.3.1 主要鉄鋼生産省における鉄鋼業のCO₂誘発構造

中国では地域によって、産業構造が異なる。ここでは2007年の粗鋼生産量が上位5省に位置する、河北省、山西省、遼寧省、江蘇省、山東省を対象として分析を行う。この5つの省においては、まず後方関連（サプライチェーンの上流側の産業に波及する誘発効果）に着目すると、鉄鋼生産時に、鉄鋼業が各産業に誘発した二酸化炭素誘発量は図6-6のように示される。

2002年と2007年を比較すると、河北省、山西省、遼寧省、江蘇省、山東省の鉄鋼業は石炭(採掘と選別)、石炭石油製品(主にコークス)、電力熱供給業、この3つの産業への誘発割合が非常に大きい。鉄鋼業では石炭からコークスを製造し、鉄鉱石の中の鉄の酸化物を還元する。また製鉄の工程では多くの電力を消費するという、鉄鋼生産に伴う、原料投入や加工での上流過程での二酸化炭素誘発量（カーボンフットプリント）が大きいものと推察される。

2007年における河北省の鉄鋼業から各産業への誘発量は他の省より非常に多い。河北省の粗鋼生産量は2002年2659.6(万トン)に対して、2007年は10569.2万トンであり約4倍に増加していることが要因である。さらに2007年の河北省においては、鉄鋼業が金属鉱物業(主に鉄鉱石の採掘)へ誘発した二酸化炭素の量は他の省に比較すると圧倒的に多い。その理由として2007年における河北省での鉄鉱石生産量が30953.96(万トン)と、中国全体の43%を占め、多くの鉄鉱石が採掘されたことが挙げられる。2002年と2007年を比較すると、山西省と遼寧省での変化は少ない。一方、江蘇省と山東省の鉄鋼業が誘発した二酸化炭素増加率は非常に高い。江蘇省と山東省は沿海地域にあり、近年の経済発展が著しく、多くの鉄鋼工場が建設されている。生産効率は相対的に高い。日本の鉄鋼業の一貫生産と違って、中国では、原材料石炭と鉄鉱石の有無によって、地域間の生産構造の格差が大きい。江蘇省と山東省では鉄鉱石が少ないので、他の地域から銑鉄が提供され、粗鋼へと加工されるため石炭部門への誘発量が少ない。遼寧省と河北省においては、石炭の採掘と選別が盛んであり、鉄鋼業から誘発する二酸化炭素量が多いものと考えられる。

次に、前方関連（サプライチェーンの下流側産業から誘発される効果）に着目すると、各産業から鉄鋼業に誘発する二酸化炭素の量は図6-7のように示される。

鉄鋼は、それを原材料とする、さまざまな工業製品で使われている。特に製造業が生産を行う時、多くの鉄鋼が必要とされる。特に一般機械から鉄鋼業に誘発した二酸化炭素量が非常に多い。

山西省や山東省では建設産業から、江蘇省では電気機械から、遼寧省では、一般・特殊設備産業からのCO₂誘発が大きいことが分かり、これらの産業クラスターを考慮に入れた資源循環や低炭素技術施策が有効であることが示唆される。

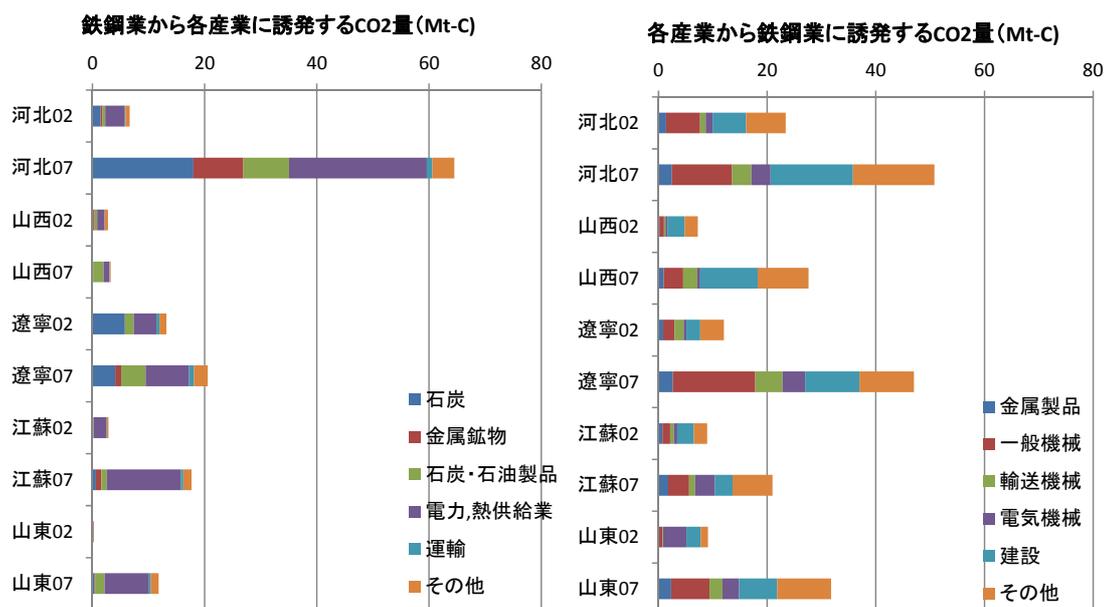


図 6-6 鉄鋼業から各産業に誘発する CO₂

図 6-7 各産業から鉄鋼業に誘発する CO₂

さらに、2002年と2007年の2時点における誘発構造の変化要因を分析するために、SDA(Structural Decomposition Analysis)を用いて要因分析を行った。産業連関表を用いた鉄鋼生産による二酸化炭素の2002年の誘発量と2007年誘発量の変化E1 - E0は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 E1 - E0 &= D1 * B1 * F1 - D0 * B0 * F0 \\
 &= (\Delta D + D0) * B1 * F1 - D0 * B0 * F0 \\
 &= \Delta D * B1 * F1 + D0 * (\Delta B + B0) * F1 - D0 * B0 * F0 \\
 &= \Delta D * B1 * F1 + D0 * \Delta B * F1 + D0 * B0 * (\Delta F + F0) - D0 * B0 * F0 \\
 &= \Delta D * B1 * F1 + D0 * \Delta B * F1 + D0 * B0 * \Delta F
 \end{aligned}$$

2002年と2007年の差は Δ で表示される。この式の最終的な展開式の第1項、第2項、第3項はそれぞれ、CO₂排出強度変化要因、産業構造変化要因、最終需要変化要因による寄与分を表す。これにより、二酸化炭素誘発量の変化がどのような要因によりもたらされたかについて要因を分解して調べることができる。SDA分析の結果を図6-8、図6-9に示す。

2002年から2007年までの5年間に、二酸化炭素削減を目指して、中国政府は鉄鋼業に様々な省エネ・低炭素炭素技術導入などエネルギー効率を高める改善を進めた。その結果、鉄鋼生産量あたりの二酸化炭素排出強度は小さくなる。特に河北省では鉄鋼の生産量が多いので、その効果が一番顕著である。一方、産業構造の変化によって、鉄鋼の用途が広くなり、鉄鋼業に関連する産業との結びつきが強くなっている。

最終需要は最終消費、固定資本形成、輸出と移出この3つが多くを占めるが、山東省と

江蘇省は沿海地域にあり、近年、海外への輸出量が増加している。

河北省、江蘇省では、遼寧省と同様、最終需要変化が最もCO₂誘発量増加に寄与した。特に河北省において最終需要変化の寄与が最も大きい。山東省では産業構造変化の寄与が最も大きい。産業構造変化の寄与については、遼寧省、河北省では素材産業としての特徴を反映して、各産業が鉄鋼業に誘発したCO₂量増加の要因としては寄与が大きく、鉄鋼業から各産業に誘発したCO₂増加の要因としては寄与が相対的に小さくなっている。これに対して、江蘇省では逆に後方連関側でのCO₂誘発量変化において産業構造変化の寄与が大きい傾向を示している。このように、各省とも2002年から2007年にかけて、鉄鋼業におけるCO₂誘発量は増加したものの、各省によって異なる要因の傾向が伺われた。

また各産業が鉄鋼業に誘発したCO₂の増加要因については、生産設備の拡大による最終需要の増加とともに、鉄を原料とする多くの部品から構成される工業製品を生産する産業が拡大し、鉄鋼部門への生産波及効果が高まったことが増加要因として顕著に作用したことが定量的に確認された。

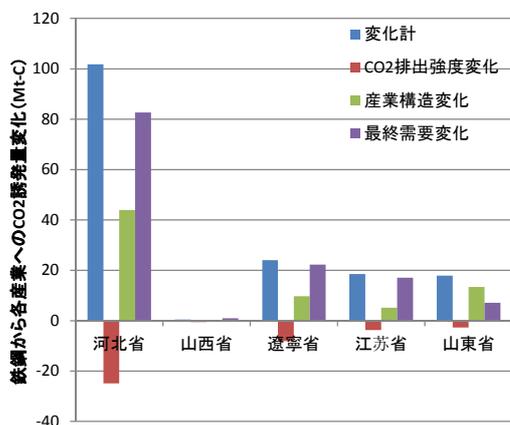


図 6-8 鉄鋼から各産業への CO₂ 誘発量変化

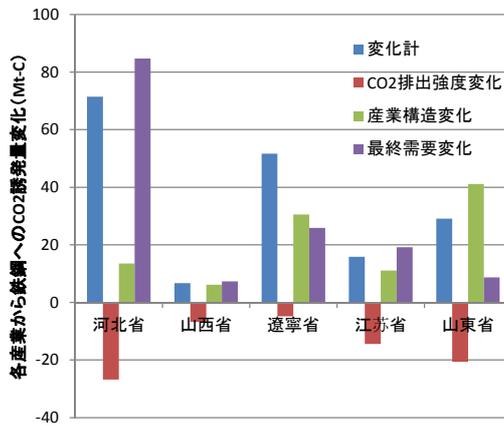


図 6-9 鉄鋼から各産業への CO₂ 誘発量変化

6.3.2 各省の鉄鋼産業への低炭素技術の導入効果分析

大型の製鉄プラント(年間粗鋼生産量100万トン)に、

- ・ 乾式消火技術 (CDQ)
- ・ 炉頂圧発電技術 (TRT)
- ・ 転炉ガス回収技術(BOF)
- ・ 廃プラ高炉還元 (WPRCO)
- ・ 汚泥の高炉吹込(SSRBF)

の各技術の導入を想定する。WPRCOでは、コークスの消費量の1%に対して省内から回収される廃プラを代替する。またSSRBFでは、各省から排出される汚泥を利用して微粉炭の代用品として高炉に吹き込む。この5つの技術を遼寧省、江蘇省、河北省、山東省、山西省にそれぞれ導入した結果は図6-10のように示される。

全体的に見ると、河北における削減効果が大きい。導入された技術の中においては、廃

プラの高炉還元技術と下水汚泥の高炉吹込み技術の効果が一番顕著である。これは、廃プラや下水汚泥の利用に伴って石炭消費が大きく削減されることによるものと考えられる。各省で利用可能な廃プラや下水汚泥量が異なるため、省ごとに削減効果が大きく異なる。三つの節電技術の中で、転炉ガス回収技術(BOF)は他の2つ技術より効果が圧倒的に大きい。

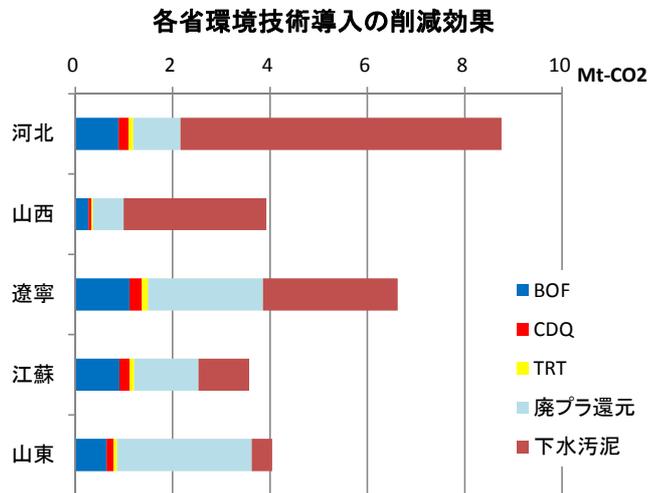


図6-10 各省への環境技術導入の削減効果

各技術導入効果について、後方連関（サプライチェーンの上流側の産業に波及する誘発効果）および前方連関（サプライチェーンの下流側産業から誘発される効果）から考察する。後方連関としては、石炭選別部門と電力部門でのCO₂削減効果が伺える。一方、下水汚泥の高炉吹込み技術は水道部門への財投入が増加するため、誘発CO₂が増加する。前方連関に着目すると、コークス、一般機械、輸送機械、運輸、建設産業から鉄鋼業に誘発するCO₂誘発量の削減が大きいことが分かる。

河北省(図6-11)と山西省(図6-13)においては、石炭や鉄鉱石の資源が豊富であり、原材料として他の省に提供しているため、石炭の消費量が多い。乾燥汚泥の導入は石炭を代替するため、効果が大きい。遼寧省(図6-12)では、一般・特殊設備産業からのCO₂誘発が大きい。山東省(図6-15)では廃プラ還元の導入が一番効果がある。他の省は下水汚泥の効果が一番大きい。山東省の人口は多。様々なインフラが建設されているため、建設業部門の効果が大きい。江蘇省(図6-14)では銑鉄の生産量は少ない。単位あたりの石炭とコークスの消費量が少ないので、削減効果が一番小さい。前方連関に着目すると遼寧省と河北省では、鉄鋼業だけではなく、一般・特殊機械、建設業でのCO₂削減効果も大きい。これらの産業クラスターを考慮に入れた資源循環や低炭素技術導入が重要であることが示唆される。

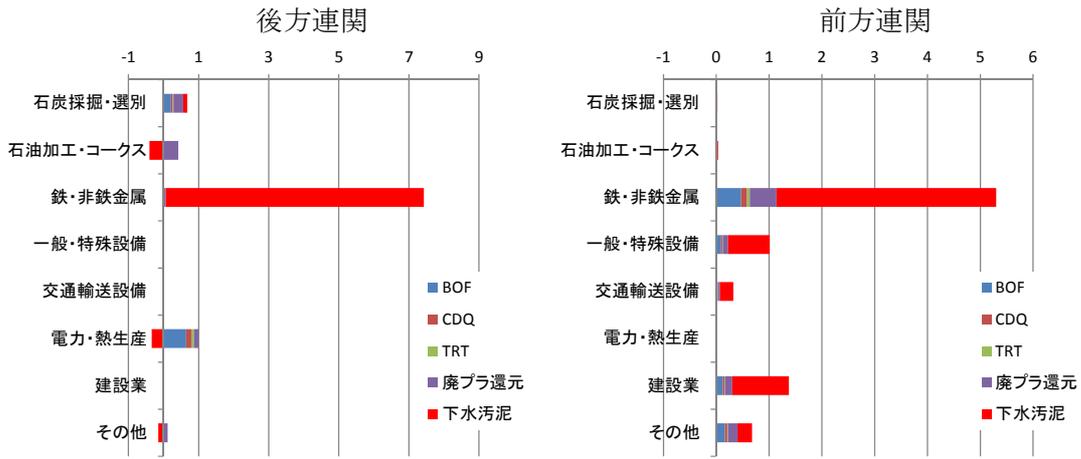


図 6-11 河北省前方連関産業と後方連関産業における CO₂ 削減効果(Mt-CO₂)

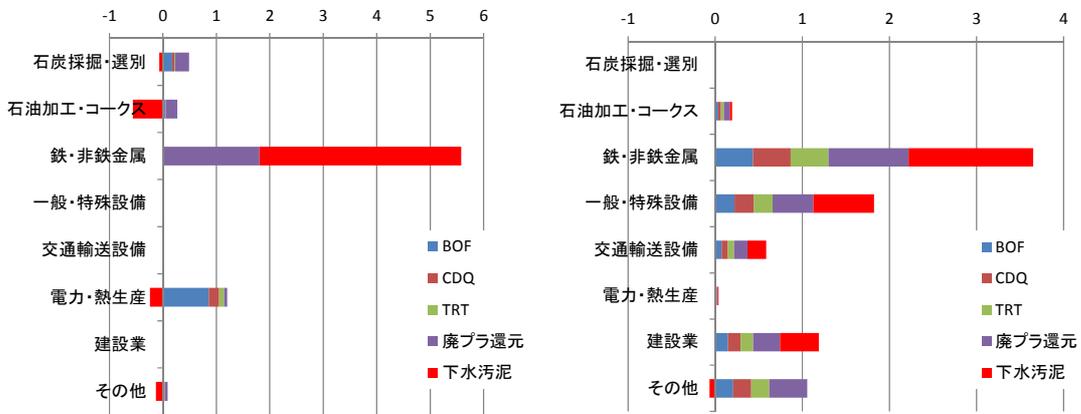


図 6-12 遼寧省前方連関産業と後方連関産業における CO₂ 削減効果(Mt-CO₂)



図 6-13 山西省前方連関産業と後方連関産業における CO₂ 削減効果(Mt-CO₂)

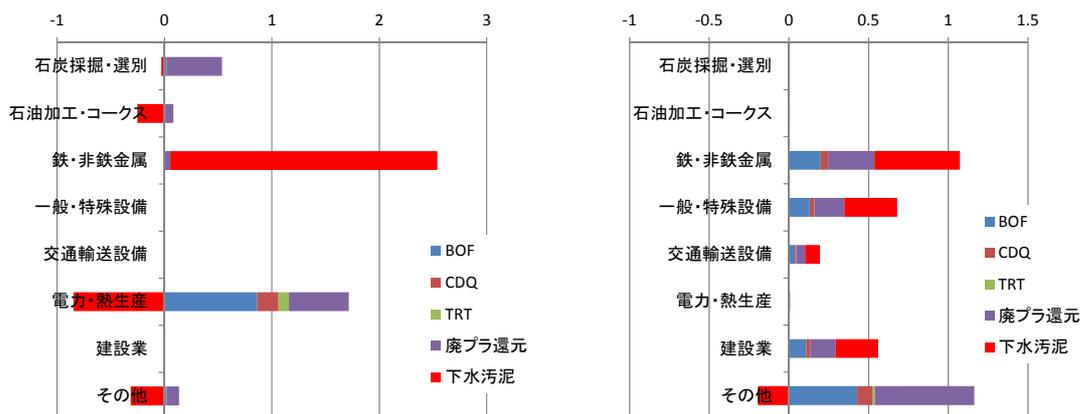


図 6-14 江蘇省前方関連産業と後方関連産業における CO₂ 削減効果(Mt-CO₂)

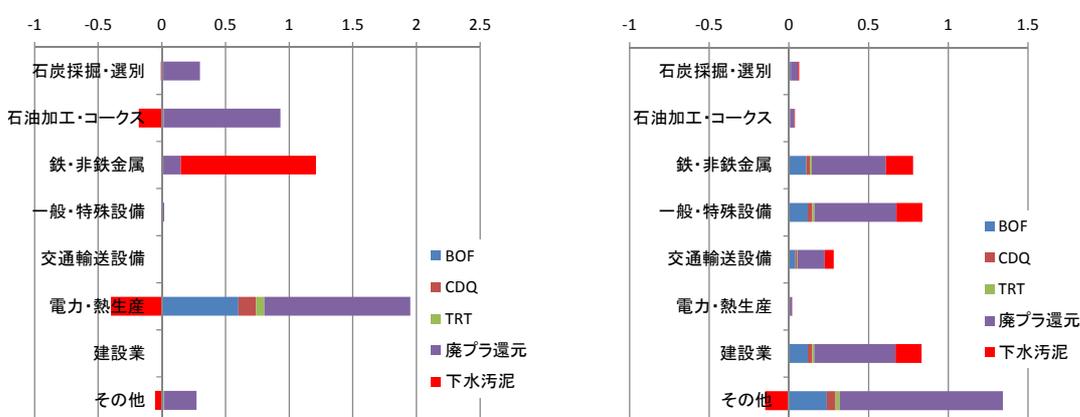


図 6-15 山東省前方関連産業と後方関連産業における CO₂ 削減効果(Mt-CO₂)

6.3.3 鉄鋼産業への低炭素技術導入がもたらす地域を越えた誘発 CO₂ 削減効果の分析

ここでは、低炭素技術の導入に伴う、地域を越えた誘発 CO₂ 量の削減効果について分析した結果を示す。導入する技術と前提条件は、前節と同じとする。

図 6-16 には、主要鉄鋼生産省の 1 つである遼寧省を含む東北中国 (North East China) に低炭素技術を導入した場合の誘発 CO₂ 削減効果を後方連関 (サプライチェーンの上流側の産業に波及する誘発効果) および前方連関 (サプライチェーンの下流側産業から誘発される効果) に着目して整理した結果を示す。東北中国地方の場合、後方連関に着目すると、どの域外地域に対しても、あまり大きな CO₂ 削減効果は認められない。これは、東北中国地域が石炭などの鉄鋼生産の原料の多くを自治域内で賄っていることによるものである。他方、前方連関に着目すると、北京市、天津市、河北省、山東省からなる北部中国 (North China) と江蘇省、上海市、浙江省からなる東部中国 (East China) が東北中国に誘発していた CO₂ 量の削減効果が大きいことが示された。北部中国および東部中国は近年の中国経済発展の中核となってきた沿海州地域であり、これら沿海州地域で生産される最終機械製品や建造される土木建築インフラなどを通じた地域間の相互依存効果の大きさを反映した結果と考えられる。

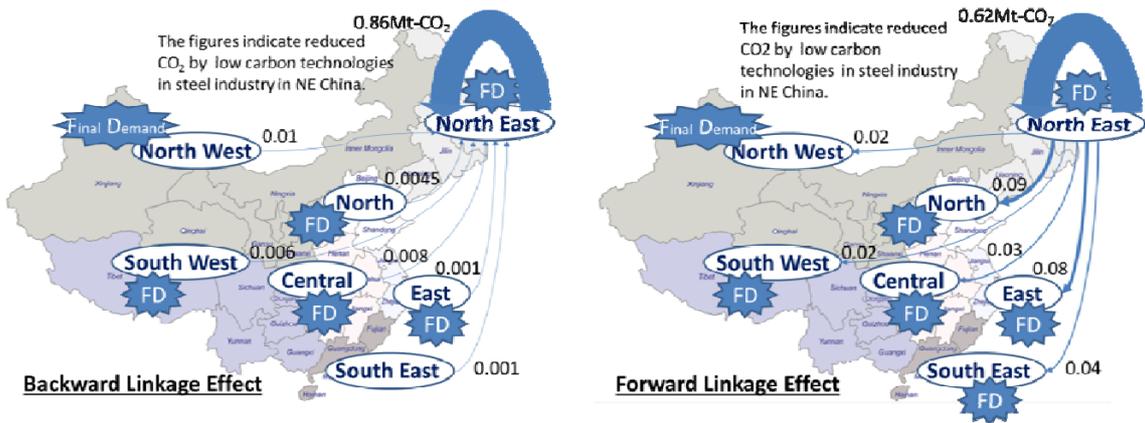
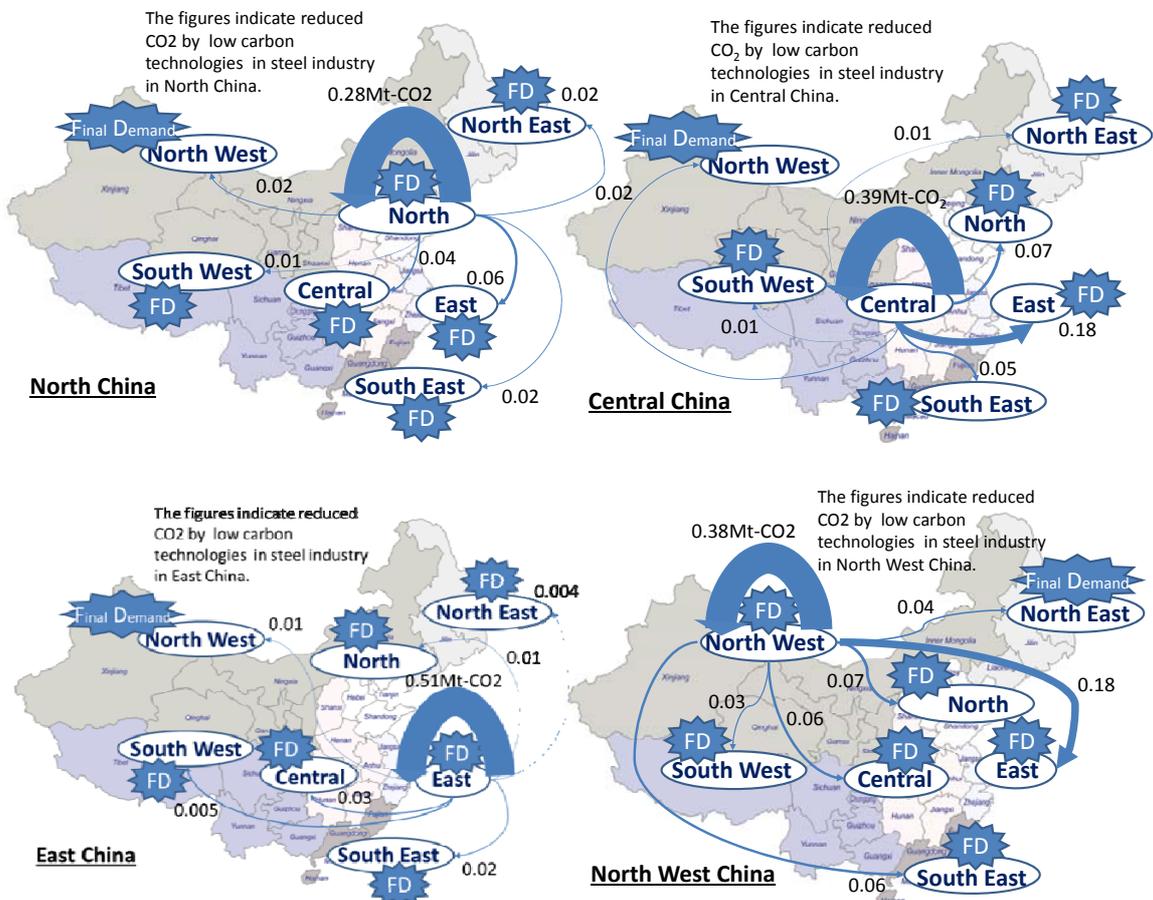


図 6-16 東北中国地域への低炭素技術導入に伴う誘発 CO₂ 削減効果

次に、前方連関に着目して地域間での誘発 CO₂ 削減効果を比較した結果を図 6-17 に示す。北部中国（North China）、東部中国（East China）、南東中国（South East China）への低炭素技術導入は域外に比較的小さな誘発 CO₂ 削減効果をもたらすのに対して、中央中国（Central China）、北西中国（North West China）、南西中国（South West China）への低炭素技術導入は沿海州地域に対して大きな誘発 CO₂ 削減の効果をもたらしていることが分かる。さらに地域の境界を国外に広げて分析を行うと、日本や東アジア、米国に対しても大きな誘発 CO₂ 削減の効果をもたらしていることが明らかになった（図 6-18）。



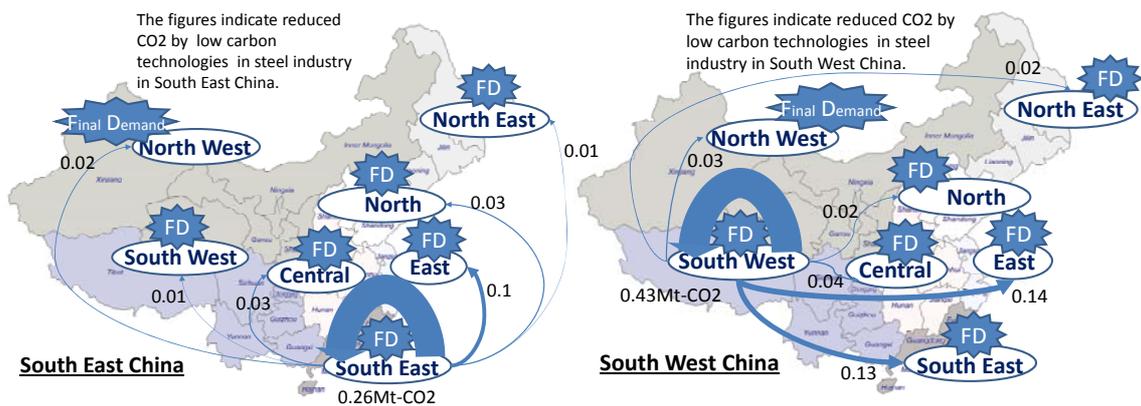


図 6-17 中国各地域への低炭素技術導入が域外から誘発されている CO₂ を削減する効果

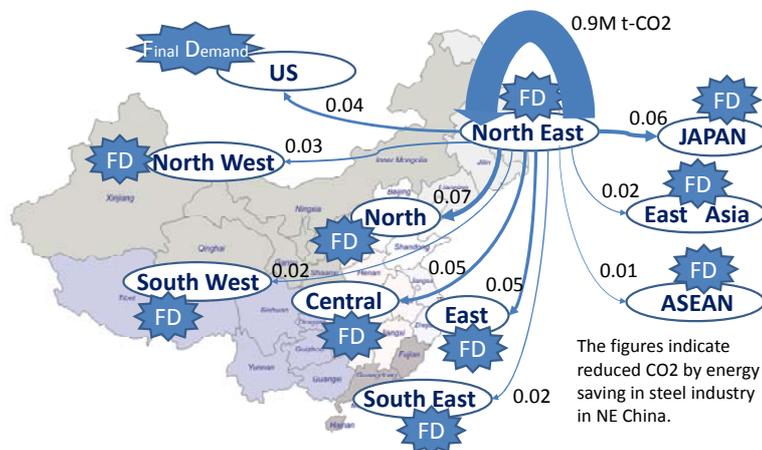


図 6-18 東北中国への低炭素技術導入が国内外から誘発されている CO₂ を削減する効果

このように、CO₂の排出を生産地ベースではなく、CO₂排出と引き換えにもたらされる財やサービスを最終的に享受する消費地ベースに帰着させて考えるならば、太い矢印の先にある地域は、この鉄鋼生産地への低炭素技術に伴い、域外に誘発させている CO₂ が削減される便益を受けることになる。また、その削減される誘発量の大きさや地域間依存の構造は、導入する地域によって大きく異なることが示された。このような低炭素技術の導入には大きな投資が必要となることから、その費用負担を考えていく際には、このようなカーボンフットプリントの情報が資するものと考えられる。

6.5 結論

本研究では、中国内の主要な鉄鋼生産5省（河北省、遼寧省、山西省、河北省、江蘇省）および地域間の取引を示す産業連関表を用いて、これらの地域に対して今後導入が期待される省エネルギー・低炭素技術を中国の鉄鋼業に導入した場合の、当該地域および域外への誘発 CO₂削減効果を分析した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2002年と2007年との時系列変化の要因分析の結果、遼寧省と山東省では建設産業から、遼寧省では一般機械と電気機械からのCO₂誘発量の変化が大きいことから、産業クラスタを考慮に入れた資源循環や低炭素技術施策が有効であることを示した。
- (2) 5つの環境技術の中では、廃プラ還元技術と乾燥汚泥高炉吹き込み技術の削減効果が大きく、また各省の産業構造を踏まえ、山東省では廃プラ還元技術の効果が大きく、河北省と山西省は乾燥汚泥高炉吹き込み技術の効果が大きい、など省ごとに異なる削減構造の違いが明らかとなった。
- (3) 地域を超えて及ぼす誘発CO₂削減効果を分析した結果、特に内陸部の中央中国（Central China）、北西中国（North West China）、南西中国（South West China）への低炭素技術導入は沿海州地域に対して大きな誘発CO₂削減の効果をもたらしていることが分かった。
- (4) このような低炭素技術の導入には大きな投資が必要となることから、その費用負担を考えていく際には、このようなカーボンフットプリントの情報が資するものと考えられる。

参考文献

- 1) Minx J.C., Wiedmann T., Wood R., Peters G.P., Lenzen M., Owen A. Scott, K., Barrett J., Hubacek, K., Baiocchi G., Paul A., Dawkins E., Briggs J., Guan D., Suhj S., Ackerman F. : Input-Output Analysis And Carbon Footprinting: An Overview Of Applications, Economic Systems Research, Vol.21, No.3, pp.187-216, (2009)
- 2) 韩颖, 李廉水, 孙宁 : 中国钢铁工业二氧化碳排放研究 TQ028. 2; X511, (2009)
- 3) Zhang J., Wang G. : Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector, Energy, Vol.33, pp.525-537, (2008)
- 4) Minx J. C., Baiocchi G, Peters G. P., Weber C. L., Guan D., Hubacek K. : A “Carbonizing Dragon”: China’s fast growing CO₂ emissions revisited, Environ. Sci. Technol., Vol.45, No.21, pp 9144-9153, (2011)
- 5) Oda J., Akimoto K., Sano F., Tomoda T. : Diffusion of energy efficient technologies and CO₂ emission reductions in iron and steel sector, Energy Economics, 29 (4), 868-888, (2007)
- 6) 国家統計局国民経済核算司編著 : 中国地区投入産出表 2002, (2008)
- 7) 国家統計局国民経済核算司編著 : 中国地区投入産出表 2007, (2011)
- 8) National Bureau of Statistics of China : China Multi Regional Input-Output Model 2002-2007, China Statistics Press, (2012)
- 9) Institute of Developing Economies, Japan External Trade Organization: 2000 Transnational Interregional Input-Output Table between China-Japan. , (2007)
- 10) 国家统计局能源统计司编 : 中国能源统计年鉴, 中国统计出版社

研究発表 :

1 査読つき論文

- Syutsubo K., Yoochatchaval W., Tsushima I., Araki N., Kubota K., Onodera T., Takahashi M., Yamaguchi T., Yoneyama Y. : Evaluation of sludge properties in a pilot-scale UASB reactor for sewage treatment in temperate region. *Water Science and Technology*, 64 (10), 1959-1966, 2011
- Takahashi M., Ohya A., Kawakami S., Yoneyama Y., Onodera T., Syutsubo K., Yamazaki S., Araki N., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T. : Evaluation of Treatment Characteristics and Sludge Properties in a UASB Reactor Treating Municipal Sewage at Ambient Temperature. *International Journal of Environment Research*, 5 (4), 821-826, 2011
- Xi F., Geng Y., Chen X., Zhang Y., Wang X., Xue B., Dong H., Liu Z., Ren W., Fujita T. et al. : Contributing to local policy making on GHG emission reduction through inventorying and attribution: A case study of Shenyang, China, *Energy Policy*, 39(10):5999-6010, 2011
- Akira Sano, Akira Senga, Hiroshi Yamazaki, Hiroki Inoue, Kai-Qin Xu, Yuhei Inamori, Extraction of raw sewage sludge containing iron phosphate for Phosphorus recovery, *Chemosphere*, Vol.89, Issue 10, 1243-1247, 2012
- Chun-Feng Chu, Kai-Qin Xu, Yoshitaka Ebie, Yu-You Li, Yuhei Inamori : Hydrogen and methane potential based on the nature of food waste materials in a two-stage thermophilic fermentation process, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, Issue 14, 10611-10618, 2012
- Fujii M., Fujita T., Chen X., Ohnishi S., Yamaguchi N. : Smart recycling of organic solid wastes in an environmentally sustainable, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 63:1-8, 2012
- M. Ooba, T. Fujita, M. Mizuochi, M. Fujii, T. Machimura, T. Matsui : Sustainable Use of Regional Wood Biomass in Kushida River Basin, Japan, *Waste Biomass Valor.*, vol.4, issue 4, pp.425-433, 2012
- Muneshi Sugawara, Munehiro Kondo, Hiroshi Yamazaki, Kai-Qin Xu, Ryuhei Inamori and Yuhei Inamori : Evaluation of Nutrient Removal Performance in a Bench-scale Johkasou system using Phosphorus Removal Pellet, *Journal of Bioindustrial Science*, Vol.1, No. 1, 25-31, 2012
- Noboru Yoshida, Geng Yong, Tsuyoshi Fujita, Yiqi Go : Spillover effects of low-carbon technological renovation in China with interregional and global value chains, *Proceedings of the 9th World Congress of Regional Science Association International (RSAI2012)*, CD-ROM, 2012
- Onodera T., Sase S., Choeisai P., Yoochatchaval W., Sumino H., Yamaguchi T., Ebie Y., Xu K-Q., Tomioka N., Mizuochi M., Syutsubo K. : Evaluation of process performance and sludge properties of an up-flow staged sludge blanket (USSB) reactor for treatment of molasses wastewater, *International Journal of Environmental Research*, 6 (4), 1015-1024, 2012

- Ohnishi S., Fujita T., Chen X., Fujii M. : Econometric analysis of the performance of recycling projects in Japanese Eco-Towns. *Journal of Cleaner Production*, 33, 217-225, 2012
- Shamsul Izhar, Satoshi Uehara, Noboru Yoshida, Yugo Yamamoto, Tohru Morioka, Masatoshi Nagai : Hydrodenitrogenation of fast pyrolysis bio-oil derived from sewage sludge on NiMo/Al₂O₃ sulfide catalyst, *Fuel Processing Technology*, Vol.93, No.1, pp.10-115, 2012
- Shi, F., Hang, T., Tanikawa, H., Han, J., Hashimoto, S., and Moriguchi, Y. Toward a low carbon-dematerialization society : measuring the materials demand and CO₂ emissions of building and transport infrastructure construction in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2012
- Sumino H., Majima K., Danshita T., Yonezawa M., Kojima Seiki, Kawakami S., Takaishi Y., Syutsubo K. : Challenge of Middle-strength Wastewater Treatment by a DHS Reactor. International workshop on “Development of Technological Research Platform for Application of Water Environment Improvement (wastewater treatment) Technology in Southeast Asia” Proceedings, 33-37, 2012
- Sumino H., Murota R., Miyashita A., Imachi H., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. : Treatment of low-strength wastewater in an anaerobic down-flow hanging sponge(AnDHS) reactor at low temperature, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47, 1803-1808, 2012
- Syutsubo K., Yoochatchaval W., Onodera T. , Kubota K., Yamaguchi T., Takahasi M., Harada H. : Pilot scale study of sewage treatment by combination of UASB and DHS (trickling filter) -Evaluation of sludge properties in a pilot scale UASB reactor for sewage treatment in temperate region-. International workshop on “Development of Technological Research Platform for Application of Water Environment Improvement (wastewater treatment) Technology in Southeast Asia” Proceedings, 39-46, 2012
- Takuro Kobayashi, Kaiqin Xu, Yu-You Li and Yuhei Inamori : Effect of sludge circulation on characteristics of hydrogen production in a two-stage hydrogen-methane fermentation process treating food wastes, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 7, April 2012, Pages 5602-5611, 2012
- Takuro Kobayashi, Kaiqin Xu, Yu-You Li and Yuhei Inamori : Performance evaluation and effect of biogas circulation rate of a bubble column for biological desulfurization, *Water Science and Technology*, 66(9):1914-22, 2012
- Takurou Kobayashi, Kaiqin Xu, Yuyou Li and Yuhei Inamori : Evaluation of hydrogen and methane production from municipal solid wastes with different compositions of fat, protein, cellulosic materials and the other carbohydrates, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol.37, Issue 20, 15711-15718, 2012
- Yoochatchaval W., Onodera T. , Sumino H., Mizuochi M., Banjongproo P., Kessomboon S., Syutsubo K. : Demonstration of Trickling Filter System for Direct Treatment of Municipal Wastewater at Thung khru STP, Bangkok, Thailand. International workshop on “Development

of Technological Research Platform for Application of Water Environment Improvement (wastewater treatment) Technology in Southeast Asia” Proceedings, 47-52, 2012

- Zheng, L.C., Han, J., Tanikawa, H. : Analysis of material stock accumulated in residential building & transport infrastructures and its regional disparity in China, *Journal of Environmental Information Science*, 2012
- Cherry Myo Lwin, Seiji Hashimoto, Hiroki Tanikawa : Comparing Gross and Net Additions to Material Stock for Roadways in Japan, *International Journal of Engineering and Research and Applications*, Vol.3, Issue.1, 1119-1124, 2013
- Chin X., Fujita T., Hayashi Y., Kato H., Geng Y. : Determining optimal resource recycling boundary at regional level: A case study on Tokyo Metropolitan Area in Japan. *European Journal of Operational Research*, 2013
- Dong H., Geng Y., Sarkis J., Fujita T., Okadera T., Xue B. : Regional water footprint evaluation in China: A case of Liaoning. *Science of the Total Environment*, 442, 215-224, 2013
- Dong L., Fujita T., Zhang H, Dai M, Fujii M., Ohnishi S., Geng Y, Liu Z : Promoting low-carbon city through industrial symbiosis: A case in China by applying HPIMO model, *Energy Policy*, 61, 864-873, 2013
- Dong L., Zhang Hui, Fujita T., Ohnishi S., Li Huiquan, Fujii M., Dong H. : Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan, *Journal of Cleaner Production*, 59, 226-238, 2013
- Hou, W., H. Tanikawa : The Material Consumption of the Wastewater Treatment Infrastructure in China: An Index Decomposition Analysis, *Journal of International Review of Civil Engineering*, 4, 6, 2013
- Huijuan Dong, Yong Geng, Fengming Xi, Fujita T. : Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid lifecycle assessment approach, *Energy Policy*, 57, 298-307, 2013
- Kanzo Y, Ruike K, Inamori R, Suzuki R, Xu K, Inamori Y : Analysis of absorption and accumulation of blue-green algae toxin Microcystin in the Komatsuna cultivation, *Journal of Bioindustrial Science*, Vol.2, No. 1, 12-16, 2013
- Ling Ziwei, Tong Xinnan, Li Yahong, Wang Xinzhe, Xu Kaiqin and Kong Hainan : Study on Nitrogen Removal Process of Treatments for Slightly Contaminated Water on Hybrid Constructed Wetlands, *Research of Environmental Sciences*, 26(3):320-325, 2013 (in Chinese)
- Lwin, C.M., S. Hashimoto, H. Tanikawa : Evaluation of Material Stocks, GAS and NAS for Infrastructure in Japan: Moving towards a Sustainable Stock-type Society, *Journal of International Review of Civil Engineering*, 4, 3, 118-127, 2013
- Ma Z., Xue B., Geng Y., Ren W., Fujita T. : Co-benefits analysis on climate change and environmental effects of wind-power: A case study from Xinjiang, China. *Renewable Energy*, 57, 35-42, 2013

- Noboru Yoshida, Yiqi Wu, Takaaki Kanazawa, Yugo Yamamoto, Tsuyoshi Fujita, Tomohiro Okadera and Geng Yong : Multi-Regional Carbon Footprint Reduction in Steel Sector in China due to Low Carbon Technology Implementation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.G (Environmental Research)*, Vol.69, No.6, pp.II_383-390, 2013
- Okadera T., Chontanawat J. : Water Footprint For Energy in Thailand. 6th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection Conference Proceedings, 322-326, 2013
- Takuro Kobayashi, Ya-Peng Wu, Kai-Qin Xu, Yu-You Li : Effect of mixing driven by siphon flow: parallel experiments using the anaerobic reactors with different mixing modes, *Energies*, 6(8), 4207-4222, 2013
- Yoochatchaval W., Onodera T., Sumino H., Yamaguchi T., Mizuochi M., Okadera T., Syutsubo K. : Development of Down-flow Hanging Sponge Reactor for the low strength sewage treatment. 7th IWA International Conference on Efficient Use and Management of Water, Proceedings CD-ROM, 2013
- Yoshida N., Wu Y., Kanazawa T., Yamamoto Y., Fujita T., Okadera T., Geng Y. : Multi-Regional Carbon Footprint Reduction in Steel Sector in China due to Low Carbon Technology Implementation. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)*, 69 (6), 383-390, 2013
- Zhang H, Dong L., Li H, Fujita T., Ohnishi S., Tang Q : Analysis of low-carbon industrial symbiosis technology for carbon mitigation in a Chinese iron/steel industrial park: A case study with carbon flow analysis. *Energy Policy*, 61, 1400-1411, 2013
- Zhang Hui, Dong L., Li Huiquan, Chen Bo, Tang Qing, Fujita T. : Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese steelmaking plant: A hybrid material/energy flow analysis case study, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2, 67-80, 2013
- Zhijiang Lu, Jieming Li, Ryuhei Inamori, Kaiqin Xu, Norio Sugiura, Yuhei Inamori : Comparative Study on Purification Characteristics of Various Submerged Macrophyte Species in Different Seasons, *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 49(1), 11-19, 2013
- Dong H., Ohnishi S., Fujita T., Geng Y., Fujii M., Dong L. : Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki. *ENERGY*, 64, 277-286, 2014
- Dong L., Gu Fumei, Fujita T., Hayashi Yoshitsugu , Gao Jie : Uncovering opportunity of low-carbon city promotion with industrial system innovation: Case study on industrial symbiosis projects in China, *Energy Policy*, 65, 388-397, 2014
- Onodera T., Matsunaga, K., Kubota, K., Taniguchi, R., Harada, H., Syutsubo, K., Okubo, T., Uemura, S., Araki, N., Yamada, M., Yamauchi, M., Yamaguchi, T. : Characterization of the

retained sludge in a down-flow hanging sponge (DHS) reactor with emphasis on its low excess sludge production, *Bioresource Technology*, 136, 169-175, 2014

- Onodera, T., Tandukar, M., Sugiyana, D., Uemura, S., Ohashi, A., Harada, H. : Development of a sixth-generation down-flow hanging sponge (DHS) reactor using rigid sponge media for post-treatment of UASB treating municipal sewage, *Bioresource Technology*, 152, 93-100, 2014
- 孫穎, 宮寺哲彦, 藤田壯 : 中国における産業別グリーンサプライチェーンマネジメント (GSCM) の実証研究—瀋陽市の製造企業の事例—, *土木学会論文集 G(環境), 環境システム研究論文集*, 39, II_395-II_403, 2011
- 孫穎, 渡邊雅士, 森晶寿, 藤田壯, 宮寺哲彦 : 環境配慮型経営の展開と推進要因—日中企業の国際比較—, *環境科学会誌*, 24(4):275-289, 2011
- 藤井実, 藤田壯, 陳旭東, 大西悟, 大迫政浩, 森口祐一, 山口直久, 長期的視点からのプラスチックおよび雑紙のリサイクルシステムの検討, *環境システム研究論文集*, 39, II_439-II_447, 2011
- 吉田登, 佐藤雅俊, 金子泰純 : 産業廃棄物の広域移動における地域間での排出誘発・移動構造変化に関する分析, *地域学研究 Vol.41, No.4*, pp.969-984, 2012
- 呉懿奇・吉田登 : 産業連関表を用いた中国各地域での鉄鋼生産における二酸化炭素誘発構造変化の分析, 第40回土木学会環境システム研究論文発表会講演集, pp.3019-324, 2012
- 侯曉馨, 梁涵璋, 韓驥, 谷川寛樹 : 中国の土地利用変化による建築マテリアル消費に関する研究-社会経済分析と地理空間分析を用いて, *環境情報科学学術研究論文集*, 26, 43-48, 2012
- 三島一仁, 山本祐吾 : ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価, *土木学会論文集 G (環境)* , Vol.68, No.6, pp. II_245-II_253, 2012
- 山崎宏史, 蛭江美孝, 徐開欽, 稲森悠平, 西村修 : ディスポーザ導入時における浄化槽処理性能に及ぼすスクリーンと汚泥返送量の影響, *水環境学会誌*, 35(1), 1-8, 2012
- 山本祐吾, 古野間達, 吉田登, 盛岡通 : 下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価, *土木学会論文集 G (環境)* , 68(5), pp. I_137-I_146, 2012
- 珠坪一晃 : 低濃度有機性廃水の無加温メタン発酵処理技術の開発, 公益社団法人 土木学会 環境工学委員会編, 平成23年度「重点研究課題」調査研究報告書, 公益社団法人 土木学会 環境工学委員会, 22-30, 2012
- 蛭江美孝, 山崎宏史, 小椋有未永, 徐開欽 : 浄化槽における CH₄, N₂O 排出量に及ぼす原水流入変動と嫌気-好気循環の影響解析, *水環境学会誌*, 35(2), 27-32, 2012
- 岡寺智大, 珠坪一晃, 小野寺崇, Wilasinee Yoochatchaval : バンコク都 (BMA) の下水処理とエネルギー消費, 第41回環境システム研究論文発表会講演集, 81-85, 2013

- 宮岡佑馬, 幡本将史, 珠坪一晃, 小野寺崇, 多川正, 上村繁樹, 荒木信夫, 山口隆司: 下水処理 UASB 後段の DHS リアクターにおける排水処理特性と真核生物群集構造の季節変動, 土木学会論文集 G(環境), 69(7), 257-264, 2013
- 呉 亜鵬, 小林 拓朗, 徐開欽, 李 玉友: サイフォン式無動力攪拌のメタン発酵に及ぼす効果:異なる攪拌方式の比較実験, 環境技術, 42(5): 291-299, 2013
- 菅原崇聖, 木持謙, 田畑洋輔, 手塚圭治, 稲森隆平, 徐開欽, 稲森悠平: 鉄電解リン除去方式生活排水処理浄化槽システムにおける省エネルギー運転と浄化性能, 水処理生物学会誌, 49 (1) , 31-36, 2013
- 長谷川正利, 大西暁生, 奥岡桂次郎, 戸川卓哉, 谷川寛樹: 持続可能な社会へ向けた CO₂ 排出量およびマテリアルストック・フローの将来分析ー北陸三県の市町村を対象としてー, 土木学会論文集 G(環境), 69, 6, II_13-II_23, 2013
- 田中健介, 早川容平, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: 都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究, 土木学会論文集 G(環境), 69, 6, II_15-II_34, 2013
- 呂志江, 賀数邦彦, 杉浦則夫, 稲森隆平, 徐開欽, 稲森悠平: 大型水生動植物生態系モデルによる界面活性剤の生態環境リスク影響評価, 日本水処理生物学会, 49 (1) , 21-30, 2013

2 査読なし論文

- 小林拓朗, 日高平, 小野寺崇: 嫌気性微生物処理分野における最近の研究動向, 水環境学会誌, 36(12), pp. 422-429, 2013
- 珠坪一晃: 有機性廃水のメタン発酵処理技術, 用水と廃水, 55(10), 53-61, 2013

3 口頭・ポスター発表、解説等

- Fujii M., Fujita T., Chen X., Ohnishi S. : Cost effective recycling system utilizing unused local resources and facilities, 6th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2011 Conference), Abstracts of 6th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2011 Conference), 2011 年 6 月
- Han, J. and Tanikawa, H. : Impact analysis of urban rail transport on energy demand and CO₂ emissions. 2011 World Congress on Engineering and Technology, CD-ROM, Shanghai, China, October 2011.
- Hou, W.X., Tanikawa, H., Tsurumi, T., Managi, S., Shirakawa, H. : Study on quantification of relationship between land use and GDP based on Global scale spatial information. Proceedings of the Thirteenth International Summer Symposium, JSCE, Vol.13, 325-327, 2011.
- Lwin, C., Han, J., Shirakawa, H., Tanikawa, H. : Study on the correlation between material stock of roadways and industrial structure change in Japan. Proceedings of the Thirteenth International Summer Symposium, JSCE, Vol.13, 305-308, 2011.

- Mizuochi M. : Status of water environment in China and conservation measures, EAEP2011 The 5th International Symposium on the East Asia Environmental, Fukuoka, 2011
- Noboru Yoshida : Input-output Evaluation on Eco-restructuring of Manufacturing Process to Improve Industrial Symbiosis: A Case Study of Steel Production at Hyogo Eco-town, Northeast Asia Eco-Forum 2011 Sustainable Development and Regional Ecological Security, 2011
- Okadera T. : Footprinting analysis of water and carbon by using input-output table in Liaoning Province. International Research Workshop on Eco-City, Eco-Region and Eco- Management in Tsukuba, 2011
- Okadera T. : Regional Footprinting Analysis of Water and Carbon in Liaoning Province by Using Input-Output Table. Northeast Asia Eco-Forum on Sustainable Development and Regional Ecological Security, Northeast Asia Eco-Forum on Sustainable Development and Regional Ecological Security Program, 2011
- Okuoka, K., Onishi, K., Shirakawa, H., Tanikawa, H. : The study on optimization of proper size of sound material cycle area -material stock intensity per person with virtual urban area model. Proceedings of the Thirteenth International Summer Symposium, JSCE, Vol.13, 313-316, 2011.
- Shi, F., Tanikawa, H., Hang, T., Onishi, A., and Imura, H. : The regional disparity of resource productivity and economic development in China. 2011 World Congress on Engineering and Technology, CD-ROM, Shanghai, China, October 2011.
- Sun Y.,Fujita T.,Mori A.,ZHU Q.H. : Drivers and practices of Green supply chain management in Japan and China: A comparative study, Abstracts of 6th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2011 Conference), Abstracts of Abstracts of 6th International Conference on Industrial Ecology (ISIE 2011 Conference), 2011 年 6 月
- Syutsubo K. : Development of Sustainable Wastewater Treatment Technology for Reductions of Energy Consumption and Green House Gas Emission. Northeast Asia Eco-Forum, Abstracts of Northeast Asia Eco-Forum, 16 , 2011
- T. Machimura : Design of Regional Service Linkages among Cities, Farms and Forests to Attain Environmental and Socio-economic Co-benefits, Northeast Asia Eco-Forum on Sustainable Development and Regional Ecological Security, Sep. 21-22, 2011, Shenyang
- T. Machimura : Linking natural and social fluxes, AsiaFlux Workshop 2011, Nov. 9-12, 2011, Johor, Malaysia
- T. Machimura, T. Matsui and M. Ooba : Design of regional service linkages among cities, farms and forests to attain environmental and socio-economic co-benefits. International Research Symposium for Green Development, September 23, 2011, Shenyang, China.
- T. Machimura : Design of Regional Service Linkages among Cities, Farms and Forests to Attain Environmental and Socio-economic Co-benefits. Northeast Asia Eco-Forum on Sustainable Development and Regional Ecological Security, September 21-22, 2011, Shenyang, China.

- T. Machimura : Linking natural and social fluxes. AsiaFlux Workshop 2011, November 9-12, 2011, Johor, Malaysia.
- Tian, X., Shi, F., Chang, M., Tanikawa, H., Imura, H. : Evaluation of Carbon Footprint in China: A Regional Analysis Under Consumption-Based Carbon Emission Measurement. Proceedings of the Thirteenth International Summer Symposium, JSCE, Vol.13, 317-320, 2011.
- Xu, J.Y., Han, J., Tanikawa, H., Schandl, H. : Multi-Scale integrated analysis of China's societal metabolism: a case study of Guangdong province. Proceedings of the Thirteenth International Summer Symposium, JSCE, Vol.13, 309-312, 2011
- Yoochatchaval W., Yamaguchi T., Choeisai P., Onodera T., Mizuochi M., Fujita T., Syutsubo K. : Treatment of Sewage by the Down-flow Hanging Sponge at Tropical Temperature. The 4th IWA-ASPIRE, Abstracts of The 4th IWA-ASPIRE, 408, 2011
- Cherry Myo Lwin, Yohei Hayakawa, Ji Han, Hiroki Tanikawa, Seiji Hasimoto : Evaluation of Resource Efficiency and Prefectural Disparity of Roadway Material Stock and Flow towards a Countrywise Sustainability: A Case Study in Japan, Eco Balance 2012, 慶応義塾大学, H24.11.22
- Dong Liang, Fujita Tsuyoshi : Dai Ming. Urban energy conservation planning and CO₂ mitigation: a case study in Chinese heavy industrial city using hybrid energy input-output model. ISIE-MFA 2012 "Socio-Economic Metabolism", Darmstadt University of Technology, Germany. September, 2012
- Dong Liang, Fujita Tsuyoshi, Ohnishi Satoshi : Co-benefit Opportunity of Industrial Symbiosis in Iron and Steel Industry: Kawasaki's Experience and China's Practice. The Third ISIE Asia-Pacific Meeting, Tsinghua University, Beijing, China, October, 2012
- Fujii M., Fujita T., Ohnishi S. , Dong L. : Study on a Robust and Cost Effective Recycling System of Organic Municipal Solid Wastes. The Third ISIE Asia-Pacific Meeting, Abstracts, 2012
- Hanwei Liang, Ryo Shimizu, Hiroki Tanikawa, Yasunari Matsuno : Application of High Resolution SRD Data for Modelling Building Stock, Case Study of Sapporo, Eco Balance 2012, 慶応義塾大学, H24.11.22
- Hanwei Liang, Wanxin Hou, Ji Han, Hiroki Tanikawa : Modeling Building Stock Based On 3d-GIS Nighttime Lighthats Imagery : Case Study of Nagoya, Japan, The 3rd ISIE Asia-Pacific Meeting 2012, 中国・精華大学, H24.10.21
- Hiroki Tanikawa, Tomer Fishman, Shi Feng, Ji Han, Heinz Schandl, Fridolin Krausmann : Is there a material stock saturation of nations, ISIE-MFA 2012, ドイツ・ダルムシュタット工科大学, H24.9.27
- Ji Han, Licheng Zheng, Hiroki Tanikawa : Material Stock and its Regional Disparity in China's Residential Building and Infrastructure, The 3rd ISIE Asia-Pacific Meeting 2012, 中国・精華大学, H24.10.21

- Kobayashi T. , Xu K-Q., Wu Y-P., Li Y-Y. : Effect of self-agitation: a performance comparison between a reactor with self-agitation system and a completely stirred reactor and an unstirred reactor under increasing organic load. International Workshop on Kitchen Waste-Based Bioenergy, Abstract, 77, 2012
- Kyaw Nyunt Maung, Cherry Myo Lwin, Kenji Sugimoto, Hiroki Tanikawa : Estimation on Sustainable Carbon Stock with using GIS-Case Study in Kitakyushu city, Japan, 第40回環境システム研究論文発表会, 和歌山大学, H24.10.20, 2012
- M. Ooba : Ecosystem Service Assessment for Wood Biomass Utilization for Recovering Plans of the Great East Japan Earthquake Regions, The 2012 China-US Joint Symposium, Sep. 17, 2012, Shenyang
- M. Ooba, K. Hayashi, M. Fujii, H. Ito, T. Ota, X. Chen : Ecological and Economical Assessment of Wood Biomass Production in Japan, SETAC Europe 18th LCA Case Study Symposium, Abstract, MPRS09-12, Nov. 26, 2012, Copenhagen
- Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita : Designing and evaluation of complex recycling system for high-efficiency organic wastes use, The 2012 China-US Joint Symposium, September 17-19, 2012, Shenyang, China,
- Miyaoka Y., Hatamoto M., Onodera T. , Syutsubo K., Yamaguchi T. : Microfaunal community structure in an aerobic tricking filter system for sewage treatment. The 4th IWA Asia-Pacific Young Water Professionals Conference 2012, Abstracts, 2012
- Noboru Yoshida, Yong Geng, Tsuyoshi Fujita, Yiqi Wu : Spillover-effects of low-carbon technological renovation in China with interregional and global value chains, the 9th World Congress of Regional Science Association International, 2012
- Noboru Yoshida, Geng Yong, Tsuyoshi Fujita, Yiqi Go : Spillover effects of low-carbon technological renovation in China with interregional and global value chains, the 9th World Congress of Regional Science Association International, May 9-12, 2012, Timisoara, Romania
- Noboru Yoshida, Takaaki Kanazawa, Yugo Yamamoto : The 2012 China-US Joint Symposium“Land Use, Ecosystem Services, and Sustainable Development”, Shenyang, China, 2012
- Ohnishi S. , Fujita T., Fujii M. : Evaluation System for Regional Circulation Centered Around Energy Intensive Industry, The Third International Society of Industrial Ecology Asia-Pacific Meeting, 2012
- Onodera T. , Yoochatchaval W., Banjongproo P., Sumino H., Yamaguchi T., Mizuochi M., Syutsubo K. : Direct treatment of low-strength municipal sewage by a trickling filter system in Bangkok, Thailand. The 4th IWA Asia-Pacific Young Water Professionals Conference 2012, Abstracts, 2012

- T. Machimura, T. Matsui, M. Ooba, N. Kirikawa, Y. Mori : Demand-supply assessment of forest ecosystem provisioning services in Liaoning, China by an ecosystem model and remote sensing, The 2012 China-US Joint Symposium, Sep. 17, 2012, Shenyang
- T. Machimura, T. Matsui, M. Ooba, N. Kirikawa, Y. Mori : Demand-supply Assessment of Forest Ecosystem Provisioning Services in Liaoning, China by Using an Ecosystem Model, International Association of Vegetation Science 2012, Abstract, p. 160, Jul. 26, 2012, Mokpo, Korea.
- Tian Xin, Chang Miao, Hiroki Tanikawa : Carbon Dioxide Emission Cost of Industrialization in China : A Case Study for Beijing, The 3rd ISIE Asia-Pacific Meeting 2012, 中国・精華大学, H24.10.21
- Togawa T., Fujita T. : Estimation model of regional energy supply and demand management system, 2012 China-US Joint Symposium, Land Use, Ecosystem Services, and Sustainable Development, September 17-19, 2012, Shenyang, China., 2012
- Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, Heinz Schandl : Establishment of a Model of Material Stock Saturation in Japan, 第 40 回環境システム研究論文発表会, 和歌山大学, H24.10.20
- Wanxin Hou, Hanwei Liang, Ji Han, Hiroki Tanikawa : Relationship Between Material Consumption And Land Use Change In China Based On Spatial Information, The 3rd ISIE Asia-Pacific Meeting 2012, 中国・精華大学, H24.10.21
- BADISS M., Suemura T., Inamori R., Satake T., Xu K-Q., Inamori Y. : Comparison of AOSD and fix ON/OFF intermittent aeration in wastewater treatment Performances, 日本水处理生物学会第 50 回大会, Abstracts, 64, 2013
- Chinnachodteeranun, R., F. Kuroiwa, H. Tanikawa : Anthropogenic Disturbance on Topography at Regional Scale using DEMs Extracted from Multi Space and Airborne Data Towards Regional Applications, 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea, 2013
- Dong H., Fujita T., Geng Y. : Carbon footprint evaluation at industrial park level: A Hybrid Life Cycle Assessment Approach. 7th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference, Abstracts, 2013
- Dong H., Ohnishi S., Fujita T., Geng Y., Fujii M., Dong L. : Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis based on hybrid LCA. 19th SETAC Europe LCA Case Study Symposium, Abstracts, 2013
- Dong L., Fujita T., Fujii M., Ohnishi S. : Bring brightness of low-carbon district in China through industrial symbiosis. International Symposium on Regional Sustainable Development, Shenyang, China, 2013
- Dong Liang, 张辉, 藤田壮, 藤井実, 戸川卓哉, 大西悟, DONG Huijuan : Life Cycle Thinking for Industrial Symbiosis: Case Study in China's Iron/Steel Industrial Park Using SFA

and Value Chain Analysis. 第8回日本 LCA 学会研究発表会, 第8回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 300-301, 2013

- Dong Liang, Zhang Hui, 藤田壮, 藤井実, 戸川卓哉, 大西悟, DONG Huijuan : Life Cycle Thinking for Industrial Symbiosis: Case Study in China's Iron/Steel Industrial Park Using SFA and Value Chain Analysis. 日本 LCA 学会第8回研究発表会, 第8回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 300-301, 2013
- Fujii M., Fujita T., Ohnishi S., Dong L., Togawa T. : Study on an energy-efficient recycling system of household organic wastes for building sustainable recycling system. 7th International Conference of the International Society for Industrial Ecology, Abstracts, 2013
- H. Tanikawa : Material Stock Analysis of Urban Infrastructures and Buildings, 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea, 2013
- J. C. Garcia M., T. Machimura, T. Matsui and T. Miyauchi : Estimating potential and planning of bioethanol production from agro-residue based on model predicted NPP in Ecuador, 日本農業気象学会近畿支部大会, 2013年11月30日, 大阪
- Kobayashi T. , Wu Y., Xu K-Q., Li Y.Y. : Effect of automatic mixing by a siphon on anaerobic digestion - comparative experiments using reactors with different mixing mode. 13th world congress on anaerobic digestion, Proceedings of 13th world congress on anaerobic digestion, 2013
- Liang, H., R. Shimizu, H. Tanikawa, Y. Matsuno : Application of multi-sensor remotely sensed imageries and 3D GIS Data for modeling building Stock : Case study of Nagoya, 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea, 2013
- Licheng Zheng,ji Han,Kenji Sugimoto,Hiroki Tanikawa : Spatial Material Stock Analysis Using 4D-GIS: A Case Study in Tiexi District of Shenyang , China,平成24年度土木学会中部支部, 愛知工業大学,H25.3.8, 2013
- M. Ooba, K. Hayashi, T. Machimura, T. Matsui : Ecosystem Service Assessment for Wood Biomass Utilization by Coupled Modeling Approach, International Symposium on Agricultural Meteorology 2013, Extended Abstract, p.121,Mar. 29, 2013, Ishikawa
- Martihnico-Perez, M. F. G., C. M. Lwin, K. Okuoka, H. Tanikawa : Development of Indicators for Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA) in the Philippines, ISETS'13 Conference, Nagoya, Japan, 2013
- Maung, K. N., C. M. Lwin, K. Sugimoto, K. Okuoka, H. Tanikawa : Evaluation of Material Accumulation on Infrastructure Development and its Implications: An Empirical Case Study in Myanmar, ISETS'13 Conference, Nagoya, Japan , 2013
- Noboru Yoshida, Yiqi Wu, Yugo Yamamoto, Takaaki Kanazawa, Tomohiro Okadera, Tsuyoshi Fujita, Yong Geng : Multi-scale carbon footprint reduction by low carbon technologies in steel setcor in China through industrial & regional input-output linkages, The 7th International Conference of the International Society for Industrial Ecology, 2013

- Noboru Yoshida : Carbon footprint analysis of steel production in China - inter-regional and future perspective - , International Symposium on Regional Sustainable Development, Shenyang, China, 2013
- Okadera T., Chontanawat J. : Water for bio-energy in Thailand. The 1st International Conference on Research and Development of Tropical and Sub-tropical Crops (iCRDC 2013), Abstracts, S-1, 2013
- Okadera T., Chontanawat J. : Water for energy production: renewable energy in Thailand. The 13th Science Council of Asia Conference International Symposium on Role of Science in Asia: Facing the Challenges of AEC2015, Abstract Book, 30, 2013
- Okadera T., Chontanawat J. : Water footprint for energy in Thailand. 6th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, Conference Proceedings, 322-326, 2013
- Okuoka, K., T. Fishman, H. Tanikawa : A Study on Population Distribution and Optimal Size of Urban Area from the Aspect of Material Intensity per Person using the Virtual Urban Area Model, 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea, 2013
- Onodera, T. : Pilot-scale experiment on cost-effective sewage treatment system in Bangkok, Thailand, International Symposium on Regional Sustainable Development, Chenyang, China, 2013
- T. Machimura, T. Matsui, N. Kirikawa, Y. Mori. M. Ooba, : A Model Based Study of Biomass Use Strategies Depending on Climate and Potential of Provisioning Ecosystem Services, International Symposium on Agricultural Meteorology 2013, Extended Abstract, p.120, Mar. 29, 2013, Ishikawa
- T. Machimura, T. Matsui, R. N. Shaw, J. C. Garcia M. D. A, M. Ooba : Ecosystem Service Demand and Supply as Measures of Sustainable Ecosystem Use, International Symposium on Regional Sustainable Development, Nov. 27, 2013, Shenyang
- Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa : A Scenario of Construction Material Balance in Japan, 平成 24 年度土木学会中部支部, 愛知工業大学, H25.3.8
- WU Yapeng, 李玉友, 小林拓朗, 徐開欽 : 水質浄化沈水植物刈取り残さのメタン発酵特性, 第 48 回日本水環境学会年会, 同講演集, 76, 2013
- Yan F., Kobayashi T. , Takahashi S., Li Y.Y. : Microbial community and methanol conversion during long-term continuous operation of a methanol-fed UASB reactor. 13th world congress on anaerobic digestion, Proceedings of 13th world congress on anaerobic digestion, 2013
- Qi W.K., Kobayashi T., Liu Y.Y., Li Y.Y. : Characteristics simulation of self-agitation anaerobic digestion reactor. 第 48 回日本水環境学会年会, 同講演集, 291, 2014
- 鬼頭祥平, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹 : ヒートアイランド緩和策による影響の評価, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11

- 鬼頭祐介, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: MSIASM を用いた地域の持続可能性評価: 日本の都道府県を対象としたケーススタディ, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- 黒岩史, 韓驥, 谷川寛樹: 標高の変化に基づく土石移動量の推計に関する研究, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- 三宅悠介, 奥岡桂次郎, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 名古屋都市圏における建設系排出物の地域循環圏構築に関する基礎的研究, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- 珠坪一晃: 省エネルギーと資源循環を可能にする次世代型排水処理技術の開発, 産業と環境, 38 (9), 61-65, 2011
- 珠坪一晃: 省エネルギーと資源循環を可能にする次世代型排水処理技術の開発, 産業と環境, 38 (9), 61-65, 2011
- 水落元之, 久山哲雄, 小柳秀明: 中国の水環境および下水処理場の現況について, 環境技術, 40, 746-750, 2011
- 早川容平, 韓驥, 谷川寛樹: 経年 GIS データベースを用いた道路構造物の物質量推計に関する研究, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- 孫穎, 宮寺哲彦, 藤田壮: グリーンサプライチェーンマネジメントの実践に関する産業間の比較研究: 中国企業の事例, 環境経済・政策学会 2011 年大会, 環境経済・政策学会 2011 年大会予稿集, 2011 年 9 月
- 孫穎, 宮寺哲彦, 藤田壮: 中国における産業別グリーンサプライチェーンマネジメント (GSCM) の実証研究—瀋陽市の製造企業の事例—, 土木学会第 39 回環境システム研究論文発表会, 土木学会論文集 G (環境), 39:II 395-II 403, 2011 年 10 月
- 町村 尚, 松井孝典, 切川菜央, 森 祐樹, 大場 真: 自然・社会システム統合モデルによるバイオマス資源循環度評価, 日本農業気象学会近畿支部講演論文集, 4, 6-7, 2011.
- 鄭立成, 韓驥, 谷川寛樹: Is Regional Disparity of Material Stock widening in China, 土木学会 平成 23 年度全国大会, 愛媛大学城北キャンパス, 2011.9.9
- 田中健介, 奥岡桂次郎, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 日本全国の橋梁の物質ストックの推計に関する研究, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- 稲森悠平, 稲森隆平, 菅原崇聖, 徐開欽: 低炭素社会対応型の省エネ・創エネ浄化槽処理システムによる高度化対策, 日中環境産業 (旧: 資源環境対策), 48(8):26-36, 2012
- 稲森悠平, 徐開欽, 井上廣輝, 稲森隆平, 須藤隆一: 生活排水対策の要としての浄化槽の性能評価における日本型システム国際標準化の必然性, 用水と廃水, 54(11):14-26, 2012
- 奥岡桂次郎, 大西暁生, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 都市圏の低物質・低炭素化に向けた人口規模とその分布の検討, 環境科学会 2012 年会, 横浜国立大学, H24.9.13
- 岡本信広, 岡寺智大: 中国の地域間仮想水交易と水資源配分の公平性評価, 日本地域学会第 49 回(2012 年)年次大会 (設立 50 周年記念), 同学術発表論文集, 2012

- 角野晴彦, 森夏希, 井上祥大, 珠坪一晃, 小野寺崇, 水落元之: 無曝気・バルキング管理不要の DHS システムによる下水の有機物・窒素除去. 第 46 回日本水環境学会年会, 第 46 回日本水環境学会年会講演集, 599, 2012
- 鬼頭祐介, 奥岡桂次郎, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 時間の投入構造に関する基礎的研究, 第 9 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, H24.12.4
- 宮岡佑馬, 宮地賢一, 幡本将史, 山口隆司, 荒木信夫, 多川正, 小野寺崇, 珠坪一晃: 嫌気下水処理水の好気性ろ床による処理特性と高次生物叢の構造解析, 土木学会関東支部新潟会第 30 回研究調査発表会, 同予稿集, 484-485, 2012
- 宮地賢一, 山口隆司, 角野晴彦, 珠坪一晃: 好気性ろ床における保持汚泥の微生物群集構造解析. 第 46 回日本水環境学会年会, 第 46 回日本水環境学会年会講演集, 365, 2012
- 呉亜鵬, 小林拓朗, 李玉友, 徐開欽: サイフォン式無動力攪拌リアクターによる嫌気性処理特性の完全混合、無攪拌各リアクターとの比較評価. 第 15 回日本水環境学会シンポジウム, 同予稿集, 71-72, 2012
- 呉懿奇, 吉田登: 産業連関表を用いた中国各地域での鉄鋼生産における二酸化炭素誘発構造変化の分析, 第 40 回環境システム論文発表会講演集 ISSN135-9589, 2012
- 侯曉馨, 梁涵璋, 韓驥, 谷川寛樹: 中国の土地利用変化によるマテリアル消費に関する研究-社会経済分析と地理空間分析を用いて, 第 9 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, H24.12.
- 山下拓也, 幡本将史, 谷川大輔, 高橋優信, 山口隆司, Choeisai P., 珠坪一晃, 山崎慎一, 荒木信夫: タイの実下水を対象とした省エネルギー型排水処理技術の開発. 第 46 回日本水環境学会年会, 第 46 回日本水環境学会年会講演集, 485, 2012
- 珠坪一晃: 低濃度産業排水処理の省エネ化(無加温メタン発酵技術の開発), 土木学会平成 23 年度環境工学委員会研究ワークショップ, 土木学会平成 23 年度環境工学委員会研究ワークショップ予稿集, 22-33, 2012
- 珠坪一晃: 低濃度有機性廃水の無加温メタン発酵処理システム, 倉根隆一郎監修, バイオ活用による汚染・廃水の新処理法, シーエムシー出版, 143-152, 2012
- 珠坪一晃, 小野寺崇, Yoochatchaval W., 角野晴彦, 水落元之, 岡寺智大, 藤田壮: 東南アジア地域に展開可能な適切下水処理システムの開発, 第 49 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 211-213, 2012
- 珠坪一晃: 低濃度有機性廃水の無加温メタン発酵処理システム, 倉根隆一郎監修, バイオ活用による汚染・廃水の新処理法, シーエムシー出版, 143-152, 2012
- 徐開欽, 稲森悠平, 須藤隆一: 省エネ・低炭素社会対応型の有機性排水処理技術の高度化と展望, 産業と環境, 41(5), 73-82, 2012
- 徐開欽, 楊新泌: 中国における水環境の現状と分散型排水処理システムの動向, 月刊浄化槽, No.333, 33-39, 2012
- 森夏希, 井上祥大, 角野晴彦, 藤田壮, 水落元之, 小野寺崇, 珠坪一晃: 好気型 DHS と無酸素型 DHS リアクターを組み合わせた下水の有機物・窒素除去システムの開発, 平

成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 503-504, 2012

- ・ 森夏希, 井上祥大, 角野晴彦, 小野寺崇, 水落元之, 珠坪一晃: 好気型 DHS/無酸素型 DHS による下水の有機物・窒素除去, 第 49 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 16-18, 2012
- ・ 石原和弥, 前新将, 山末英嗣, 谷川寛樹: TMR 指標を用いた建設資材のリサイクルにおける環境影響評価, 第 40 回環境システム研究論文発表会, 和歌山大学, H24.10.20
- ・ 大場真, 林希一郎, 町村尚, 松井孝典: 地域における物質循環, 生態系サービス評価モデル (BGC-ES2), 農業環境工学関連学会 2012 年合同大会, 2012 年 9 月 13 日, 宇都宮. (要旨集, CD-ROM)
- ・ 段下剛志, 馬島孝治, 角野晴彦, 高石有希子, 珠坪一晃, 大橋晶良, 原田秀樹: DHS リアクターによる中有機物濃度の食品工場廃水の長期連続処理, 第 49 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 84-86, 2012
- ・ 町村尚, 松井孝典, 切川菜央, 森祐樹, 大場真: 生態系モデルを利用した中国遼寧省の森林生態系供給サービスの需給分析, 日本農業気象学会近畿支部大会, 日本農業気象学会近畿支部講演論文集, 第 5 号, pp., 2012 年 12 月 1 日, 堺
- ・ 鄭立成, 韓驥, 谷川寛樹: Spatial material stock analysis of Shenyang City in China using 4d-GIS, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 信州大学 長野 (工学) キャンパス, 2012.3
- ・ 陶村貴, Mahmoud Badiss, 稲森隆平, 徐開欽, 馮伝平, 許春蓮, 岡崎和也, 佐竹隆顕: AOSD システムを活用した浄化槽の間欠曝気高度化技法の開発, 日中環境産業, 48(8):46-50, 2012
- ・ 馬島孝治, 角野晴彦, 米澤愛美, 川上周司, 高石有希子, 珠坪一晃: 豆腐工場模擬排水を連続処理する酸素 DHS リアクターの特性, 第 49 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 7-9, 2012
- ・ 稲森悠平, 稲森隆平, 鈴木理恵, 陶村貴, 徐開欽: バイオエコシステムを活用した環境低負荷資源循環型省エネ高度処理. 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同予稿集, 63-64, 2013
- ・ 稲森悠平, 鈴木理恵, 稲森隆平, 徐開欽: 第 6 編:有機性廃棄物資源化施設 特論 1:バイオオマスからの水素・メタン発酵クリーンエネルギー回収技術, 環境技術会誌, NO.152, 347-350, 2013
- ・ 稲森悠平, 鈴木理恵, 稲森隆平, 徐開欽: 第 6 編:有機性廃棄物資源化施設 特論 2:生物処理における汚泥減量化, 環境技術会誌, NO.152, 351-354, 2013
- ・ 稲森悠平, 鈴木理恵, 稲森隆平, 徐開欽: 第 6 編:有機性廃棄物資源化施設 特論 3:バイオオマスとしての未利用資源を活用した水素発酵, 環境技術会誌, NO.152, 355-358, 2013
- ・ 奥岡桂次郎, 大西暁生, 谷川寛樹: コンクリート塊の地域循環圏に関する将来分析, 土木学会第 41 回環境システム研究論文発表会, 2013

- ・ 奥岡桂次郎, 大西暁生, 白川博章, 谷川寛樹: 低物質・低炭素型都市圏構築に向けた最適な人口規模と人口分布の検討, 土木学会第 21 回地球環境シンポジウム, 2013
- ・ 岡寺智大, Jaruan Chontanawat: バンコクと周辺地域の電力供給にかかる水需要, 応用地域学会 2013 年度第 27 回研究発表大会, 2013
- ・ 岡寺智大, 珠坪一晃, 小野寺崇, Wilasinee Yoochatchaval: バンコク都 (BMA) の下水処理とエネルギー消費. 環境システム研究論文発表会第 41 回, 同講演集, 81-85, 2013
- ・ 鬼頭祐介, 奥岡桂次郎, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 社会基盤整備と産業構造を考慮した地域間の時間投入に関する構造, 平成 24 年度土木学会中部支部, 愛知工業大学, H25.3.8
- ・ 宮岡佑馬, 宮地賢一, 幡本将史, 山口隆司, 荒木信夫, 多川正, 小野寺崇, 珠坪一晃: 嫌気性下水処理システム後段の DHS リアクター保持汚泥中の真核生物叢解析, 第 47 回日本水環境学会年会講演集, 419pp, 2013
- ・ 戸川卓哉, 藤田壮, 谷口知史, 藤井実, 大西悟: 地域特性を考慮したエネルギー需給マッチングの計画支援システム. 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会, 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 252-253, 2013
- ・ 呉懿奇, 吉田登: 中国の主要鉄鋼生産地域への環境技術導入に伴う CO₂ 排出削減構造の投入産出分析, 日本地域学会第 50 回(2013 年)年次大会, 2013
- ・ 光崎貴洋, 奥岡桂次郎, 山末英嗣, 谷川寛樹: GIS を用いた建設副産物の TMR 指標による品質を考量したリサイクル性評価?和歌山市中心部を対象としたケーススタディ, 環境科学会 2013 年会, 2013
- ・ 光崎貴洋, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: 総物質関与量を用いたコンクリート塊の循環利用の評価, 環境情報科学学会第 10 回ポスターセッション, 2013
- ・ 光崎貴洋, 石原和弥, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: TMR 指標を用いた建築副産物の質を考量したリサイクル性評価~和歌山市中心部を対象としたケーススタディ~, 平成 25 年度土木学会関西支部, 2013
- ・ 柴久喜哲至, 喜田義一, 本橋昭夫, 近藤宗浩, 菅原宗聖, 稲森悠平, 嶋原己八, 徐開欽: 錠剤型リン除去剤を用いた高度処理浄化槽システム開発, 月刊浄化槽, No.448:25-29, 2013
- ・ 徐開欽, 小林拓朗, 稲森悠平: アジア地域の環境修復と再生のためのバイオエコ技術の展開, 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同予稿集, 45-46, 2013
- ・ 小島誠貴, 米澤愛美, 川上周司, 馬島孝治, 角野晴彦, 高石有希子, 珠坪一晃: 豆腐工場排水を連続処理する酸素 DHS リアクターの微生物群集構造解析. 第 47 回日本水環境学会年会, 同講演集, 683, 2013
- ・ 小野寺崇, 珠坪一晃, 水落元之, 岡寺智大, 藤田壮, 角野晴彦, Yoochatchaval Wilasinee: タイ・バンコクにおける開発途上国向け下水処理技術の実証試験, 下水道研究発表会第 50 回, 同予稿集, 25-27, 2013

- ・ 小野寺崇, 金谷弦, 珠坪一晃, 宮岡佑馬, 宮地賢一, 幡本将史, 山口隆司: 炭素・窒素安定同位体比による DHS リアクターにおける食物連鎖網の評価, 第 47 回日本水環境学会年会講演集, 405pp, 2013
- ・ 小野寺崇, 金谷弦, 珠坪一晃, 宮岡佑馬, 幡本将史, 山口隆司: 下水処理リアクターにおける炭素・窒素安定同位体比の空間的・微生物的分布の解析, 第 50 回環境工学研究フォーラム講演集, pp. 209-211, 2013
- ・ 小林拓朗, 徐開欽: 微細藻類のグラニュール化とそれを利用したバイオガスアップグレード方法の開発, 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同講演集, 276-277, 2013
- ・ 小林拓朗, 徐開欽, 柳田大地, 佐竹隆顕, 稲森悠平: 嫌気・微好気条件下における膜分離リアクターの水質浄化・膜ろ過・ガス生成特性の比較, 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同講演集, 51-52, 2013
- ・ 新田健斗, 稲森悠平, 稲森隆平, 佐野彰, 徐開欽, 陶村貴, 野口寛, 中川彰利, 馮伝平, 許春蓮: セラミック平膜を用いた省エネ型膜分離活性汚泥法におけるファウリング抑制, 下水道研究発表会第 50 回, 同予稿集, 328-330, 2013
- ・ 森夏希, 白村嘉希, 角野晴彦, 珠坪一晃, 小野寺崇, 水落元之: DHS システムによる学校下水の有機物・窒素除去, 第 47 回日本水環境学会年会, 同講演集, 421, 2013
- ・ 神田玲子, 稲森隆平, 鈴木理恵, 徐開欽, 稲森悠平: 水酸化マグネシウム活用技法の水底泥界面に生息する水生生物影響からの効果解析, 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同予稿集, 59-60, 2013
- ・ 神田玲子, 中澤雄太, 稲森隆平, 鈴木理恵, 村上和仁, 徐開欽, 稲森悠平: 水生生物の成長に及ぼす環境改善剤水酸化マグネシウムの影響解析評価, 日本水処理生物学会第 50 回大会, 同予稿集, 36, 2013
- ・ 石原和弥, 奥岡桂次郎, 山末英嗣, 谷川寛樹: 関与物質総量を考慮した建設副産物のリサイクル性評価に関する研究, 平成 24 年度土木学会中部支部, 愛知工業大学, H25.3.8
- ・ 大場真: 生態系・コストモデルによるバイオマス利用と生態系サービスの定量的アセスメント, テーマ別シンポジウム「森林資源の積極的な利用に伴う生態系サービス間のトレードオフ: 森林管理と流域管理のバランスポイントを探る」, 第 124 回日本森林学会大会, 講演要旨集, pp.77, 2013 年 3 月 26 日, 盛岡.
- ・ 大場真, 林希一郎, ダカール アンビカ: プロセスベースドモデルによる森林管理の生態系サービスへの影響評価, 日本生態学会第 60 回大会, 2013 年 3 月 7 日, 静岡. (web)
- ・ 大西悟, 藤田壮, 藤井実, 戸川卓哉, Dong Liang: 地域循環による各主体の GHG アカウティングへの影響分析, 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会, 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 262-263, 2013
- ・ 段下剛志, 角野晴彦, 高石有希子, 珠坪一晃, 大橋晶良, 原田秀樹: 酸素供給型 DHS リアクターによるデンプン含有排水の高速処理の試み, 第 47 回日本水環境学会年会, 同講演集, 672, 2013

- ・ 張健, BADISS Mahmoud, 陶村貴, 稲森隆平, 佐竹隆顕, 徐開欽, 稲森悠平: AOSD 制御による活性汚泥システムの処理特性と生物相等の解析, 日本水処理生物学会第 50 回大会, 同予稿集, 63, 2013
- ・ 陳曦, 稲森悠平, 稲森隆平, 徐開欽: 有用微細藻類 NSX の異なる培養条件における増殖特性と脂質成分の比較解析, 日本水処理生物学会第 50 回大会, 同予稿集, 38, 2013
- ・ 田中健介, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: 低物質社会に向けた資源蓄積量の生産性に関する研究, 環境科学会 2013 年会, 2013
- ・ 藤井実, 藤田壮, 大西悟, 戸川卓哉, Dong Liang: 効率的リサイクル・廃棄物処理のための統合型処理拠点の検討. 日本 LCA 学会第 8 回研究発表会, 同予稿集, 166-167, 2013
- ・ 藤井実: 日本における低炭素型循環システムの瀋陽への展開, 環境にやさしい都市フォーラム, 2013 年 3 月 22 日, 瀋陽黎明国際ホテル, 中国
- ・ 馬島孝治, 角野晴彦, 米澤愛美, 川上周司, 高石有希子, 珠坪一晃: 酸素供給型スポンジ散水ろ床「Hi-DHS リアクター」による豆腐工場模擬排水の連続処理, 第 47 回日本水環境学会年会, 同講演集, 404, 2013
- ・ 木持謙, 菅原崇聖, 手塚圭治, 徐開欽, 稲森悠平: 環境負荷低減のための生物膜小型浄化槽への間欠運転導入効果と新技術開発. 日本水環境学会シンポジウム第 16 回, 同予稿集, 53-54, 2013
- ・ 柳田大地, 佐竹隆顕, 野口寛, 小林拓朗, 徐開欽, 稲森悠平: 嫌気性 MBR に対する脱硫を目的としたマイクロエアレーションの適用と高効率化, 第 48 回日本水環境学会年会, 同講演集, 73, 2013
- ・ 有川美穂, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹. 人工林管理と木造住宅の炭素固定効果の空間分析, 第 8 回環境情報科学ポスターセッション, 日本大学会館, 2011.11
- ・ 岩崎真, 田畑洋輔, 木持謙, 菅原崇聖, 近藤宗浩, 徐開欽, 稲森悠平: 生活排水の省エネ型高度合併処理浄化槽における栄養塩類・温室効果ガス削減機能の解析. 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 621, 2014
- ・ 佐藤優輝, 稲森隆平, 張健, 陶村貴, 徐開欽, 稲森悠平: AOSD 酸素供給自動制御システムを導入した生活排水の省エネ/高度処理技術の開発. 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 649, 2014
- ・ 三浦望, 稲森隆平, 稲森悠平, 佐々木茂雄, 林紀男, 村上和仁, 徐開欽: 水生動植物モデル生態系を用いた環境汚染物質の再生効果と評価に関する研究. 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 624, 2014
- ・ 小林拓朗: 嫌気性技術による排水・廃棄物処理と未利用バイオマスからのエネルギー生産, 水環境学会誌, 37 (1), 9, 2014
- ・ 小林拓朗, 李玉友: 嫌気性消化に関する IWA 第 13 回国際会議(13 th World Congress on Anaerobic Digestion)参加報告, 再生と利用, 37 (142), 77-84, 2014

- 新田健斗, 佐竹隆顯, 野口寛, 佐野彰, 徐開欽, 稲森隆平, 稲森悠平, 陶村貴: セラミック平膜を用いた膜分離活性泥法におけるファウリング抑制手法の開発, 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 280, 2014
- 神田玲子, 稲森隆平, 鈴木理恵, 村上和仁, 徐開欽, 稲森悠平: 水酸化マグネシウムを活用した環境改善手法における適正添加量の開発評価, 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 16, 2014
- 張健, 稲森隆平, 陶村貴, BADDIS Mahmoud, 佐竹隆顯, 徐開欽, 稲森悠平: AOSD 制御を導入した活性汚泥システムにおける処理特性と生物相等の関係解析, 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 401, 2014
- 陳曦, 佐竹隆顯, 稲森隆平, 稲森悠平, 徐開欽: 有用微細藻類 NSX の下水等を基質とする培養条件の違いと増殖特性脂質・成分の比較解析, 第 48 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 403, 2014

4 受賞

- 奥岡桂次郎, 大西暁生, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 都市圏の低物質・低炭素化に向けた人口規模とその分布の検討, 環境科学会 201 年会 ポスドクおよび博士課程学生の部 優秀発表賞 (富士電機賞), H24.9.13
- 小野寺崇, 珠坪一晃, 水落元之, 岡寺智大, 藤田壮, 角野晴彦, Yoochatchaval Wilasinee: タイ・バンコクにおける開発途上国向け下水処理技術の実証試験, 下水道研究発表会第 50 回, ポスター発表セッション優秀賞, 2013

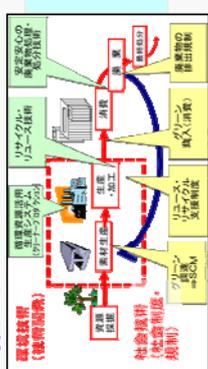
知的財産権の取得状況:

特になし

アジア都市における日本の技術・政策を活用する資源循環システムの設計手法

サブテーマ1; 国内循環技術・施策の定量的インベントリ構築とリエンジニアリング分析
(国立環境研)

(研究協働; 川崎市・瀋陽大学・環境省)



- ◎ エコタウン技術群及び水・資源・エネルギー複合循環技術・政策システムの解析
- ◎ 循環技術インベントリを構築し、そのアジア展開のリエンジニアリング分析のプロセスを開発する

方法論の検証と一般化

対象データの同定

技術データの精度

システムの実証

サブテーマ2; アジア拠点都市の循環経済GISデータベースの構築
(国立環境研・名古屋大学・大阪大学)

(研究協働; 中国瀋陽市・中国科学院)

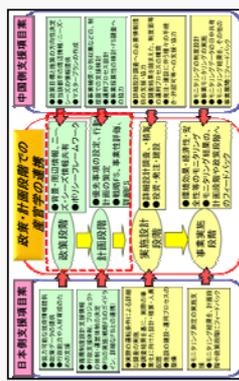
- ◎ 中国拠点都市で国際連携研究を循環経済に関する統計情報, 既存調査を統合する地域循環地理情報のGISデータベースを構築
- ◎ 家庭、事業、産業、建設廃棄物の発生分布GISデータベースの構築とそのプロセスを一般化

方法論の検証と一般化

サブテーマ3; 拠点都市の資源技術施策シナリオの設計と社会実証展開
(国立環境研・和歌山大学)

(研究協働; 瀋陽市、JICA、日本環境省、中国科学院、中国環境保護部)

- ◎ 国内の循環技術を中核とする中国、アジアでの循環施設・拠点の技術構成とその効率を高める回収、分別、再生資源の再利用促進に都市立地政策を組み合わせた定量的な地域循環施策パッケージ
- ◎ 循環圏形成に伴う直接・間接経済効果の時空間の階層的な評価システム
- ◎ 循環型都市再生地区を形成する官民連携の事業システムを設計して、他地域展開の一般化のフレームワークを構築



英文概要

研究課題名 : Planning and evaluation system for resource circulation in Asia cities based on the Japanese environmental technologies and policies

研究代表者および所属 : FUJITA Tsuyoshi (National Institute for Environmental Studies, NIES)

研究分担者および所属 :

FUJII Minoru (NIES), XU Kaiqin (NIES),
SYUTSUBO Kazuaki (NIES), MIZUOCHI Motoyuki (NIES),
OKADERA Tomohiro (NIES), KOBAYASHI Takuro (NIES),
ONODERA Takashi (NIES), TOGAWA Takuya (NIES),
TANIKAWA Hiroki (Nagoya University), KATO Hirokazu (Nagoya University),
OKUOKA Keijiro (Nagoya University), YOSHIDA Noboru (Wakayama University),
KANAZAWA Takaaki (Wakayama University), YAMAMOTO Yugo (Wakayama University),
MACHIMURA Takashi (Osaka University), MATSUI Takanori (Osaka University)

要旨 :

We proposed a system to reduce CO₂ emission efficiently and economically through strategic recycling and treatment of municipal solid wastes (MSW) with two recycling options. One option is to utilize higher quality wastes as a substitute of fossil fuels in industries. The other option is a combined system of incineration and methane fermentation connected through a super heater in order to maximize power generation from lower quality wastes which contain plenty of moisture. It was revealed that the system can effectively recover resources and energy from MSW.

We reviewed on-site organic-waste biogasification technologies installed in Asia. The distribution of these facilities and technical standards required to improve such on-site technologies were examined. An efficient biogas reactor customized to suit the needs of rural Asian regions was developed. The results of continuous 1-year experiments demonstrated that our newly developed biogas reactors could be operated successfully, without acidification or deposit formation, at a high organic loading rate. In addition, we constructed a flow dynamics model to simulate the scale-up of our newly developed reactor, and showed sufficient mixing occurred in a full-scale reactor.

Then we estimates the evolution of material stock of residential building and transport infrastructures including roads and railways in 31 provinces from 1978 to 2008 based on material stock accounting method, and constructed a 4d-GIS database to investigate the temporal and spatial characteristics of the material stock accumulation in infrastructures including building, road, railway and water pipelines.

By applying the method to Tiexi district of Shenyang city in North-east China, we can grasp the features of material stock distribution in the last hundred years, and moreover we can evaluate the

those low carbon and material cycling policies' effect through the community level 4d-GIS database.

A natural resources GIS database combined with an ecosystem process model developed in this study is capable to evaluate natural resources supply potential that is variable by climate and management practice. Estimated natural resources supply potential coupled with evaluation indicators can be used to assess and visualize the resource demand-supply balance in urban and industry systems.

Both survey of present wastewater treatment system in Bangkok (Thailand) and on site performance evaluation test of an advanced trickling filter system for municipal sewage were conducted. These results proved that reduction of energy consumption of treatment system is essential to spread the municipal wastewater treatment system in developing countries. Also, the advanced trickling filter system showed superior performance of removal of pollutants (both organic carbon and ammonium nitrogen) together with significant achievement of energy (electricity, excess sludge) reduction.

In the analysis, we attempt to evaluate the province-level and the multi-regional carbon footprint of steel-related low-carbon technological renovation by using input-output analysis. As a result of the analysis, it was revealed that: 1) implementation of low-carbon technologies would provide a significant contribution to carbon footprint reduction in steel production; 2) the structures of carbon footprint reduction are different among regions due to variations of multi-regional steel production and consumption linkages; 3) the interdependencies among the different carbon footprints in each region can be used as basic information regarding regional collaboration to reduce carbon dioxide emissions in the spreading global value chain.

キーワード : Waste material recycling, Improvement of urban infrastructure and construction, Policy Research, GIS, International cooperation