

E-0701 水・物質・エネルギー統合解析によるアジア拠点都市の自然共生型技術・政策シナリオの設計・評価システムに関する研究

(1) 水・物質・エネルギー解析モデルによる都市・産業活動の技術政策の設計・評価に関する研究

(独) 国立環境研究所

アジア自然共生研究グループ環境技術評価システム研究室

藤田 壮

アジア自然共生研究グループ環境技術評価システム研究室

中山忠暢・橋本禪

(独) 国立環境研究所アジア自然共生研究グループ

中根英昭・徐開欽

東洋大学理工学部 都市環境デザイン学科

村野昭人

<研究協力者>

(独) 国立環境研究所

アジア自然共生研究グループ環境技術評価システム研究室

藤井実・Nguyen Cao Don

中国科学院瀋陽応用生態研究所

耿 涌

武漢大学

王 千甲

平成19～22年度累計予算額：97,645千円（うち、平成22年度予算額：21,404千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 中国遼寧省の流域圏を対象に生態系変化のメカニズムを把握し水質変化の傾向および水質の成分を予測するシステムを構築した。水大気統合型の三次元物理連成モデル（NICEモデル）を中国遼寧省南部のBiliu河流域の分析に適用することにより、Biliuダムの建設および経済発展による環境への影響を評価した。その結果、Biliuダムの下流の環境劣化は、Biliu河の流量の減少および地下水位の低下と大きく関係していることが明らかになった。また、降雨量と気温の変動は正規化差植生指数(NDVI)値を大きく変化させたことも明らかにした。くわえて、水資源の消費量を用いてデカプリング分析を行った結果、大連市における環境負荷が経済成長とともに増加していることが明らかになった。この結果は、生態環境の劣化と環境負荷に影響を与える経済成長、水資源消費量の間に関係性があることを示唆する結果を得た。さらに、デカプリングインディケーターを用いて中国遼河流域の鉄林集水圏を対象とした研究を実施した。廃水と人口成長、経済成長と水供給の関連性に関して新たな予測分析を行った。その結果、鉄林サブ流域の水問題による環境圧力が、人口と経済の成長に伴って益々増加してきていることが明らかになった。これは、都市の生態系に大きな影響を与える水質汚濁と、人口や経済の成長の間に強い関連性が存在していることを示唆する。

さらに、国内の熊本県を対象として、下水道システムと浄化槽の導入シナリオごとの環境効率を定量的に評価して、中国流域圏における評価システムを構築した。その結果、下水道システムに由来するライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量においては管渠建設段階が大きな割合を占めることが分かった。さらに人口密度が環境効率を左右する大きな要素であることが明らかとなった。具体的には、人口密度350人/km<sup>2</sup>以下の自治体では公共下水道よりも浄化槽を導入することで、年間472kt-CO<sub>2</sub>、汚濁負荷除去量あたりでは17.9t-CO<sub>2</sub>/tとなり、最も環境負荷が小さいことがわかった。

[キーワード] NICEモデル、遼河流域、下水道システム、浄化槽、LCA

## 1. はじめに

20世紀末から、中国は飛躍的な経済成長を実現した。世界の工場として人々の豊かな暮らしを支える役割を地球上の隅々にまで提供してきた一方で、その環境汚染は産業都市の人々の暮らしを脅かす水質汚濁や大気汚染をもたらす水準を超え、都市にとどまらずより広域に、さらに国境を超えた地球規模の環境問題を引き起こしつつある。鉄鋼やセメントなどのエネルギー多消費型産業を中核とする産業構造は、温室効果ガスの排出、資源の集中的消費など世界経済への深刻な影響を与える懸念も顕在化しつつあり、循環型経済社会への転換は中国にとってもアジア、地球にとっても避けられない課題となりつつある。近年になって、中国国内の大気汚染と水質汚濁、さらに東シナ海の富栄養化や、黄砂、エアロゾルの越境移動による環境汚染もその深刻さを増しており、中国の行政や産業界においてもこうした「環境費用」の政策を立案するプロセスや企業経営の過程に内部化する動きが現実になりつつある。

産業化と都市化が急速に進むアジア諸国でも行政担当者を始め各界から、日本の環境技術へは大きな期待が寄せられてきたが、環境汚染や環境負荷の排出に対して社会的な関心とそれにとまなう「負担意思」が存在しない状況では、循環型の技術を移出しても伝統型の多量消費多量廃棄の工業生産に対して、市場での競争力を持つことができない。中国の全国人民大会で議論されている、循環経済法はその転換点となると期待されており、日中の環境技術の連携が、理念的な一方向の連携のステージから、実務的な双方向の連携に移行する機運が見られつつある。

本研究で対象とする、中国東北部の重工業地帯である遼寧省（Liaoning province）の主要な河川である遼河（Liaohe River）は中国の7つの主要流域の1つを構成しており、経済発展とともに都市開発が進行した産業経済地域となっている。これらの地域での水不足の圧力により、農業及び地方自治・産業の部門間での水利用をめぐる対立が激化している。中国の有数の産業都市である瀋陽市の周辺部ではその傾向が顕著であり都市周辺地域における社会経済の急速な発展と生活水準の継続的な向上が近年加速しており、結果として産業化と都市化は急激に進んだが、それとともに環境の悪化が深刻になっている。これまでも中国全土、東アジア、そして中国東北部における気象状況や、河川堆積、水不足について分析している研究は数多くある。しかし遼河流域のような都市周辺地域の水質汚染に関しては、この地域での人々の活動に関連した複雑な現象を数値化するためのデータが不足しているという理由で、これまでほとんど議論されてこなかった。低地での環境維持開発を促進するには、生態系変化のメカニズムを理解し、生態系回復を図ることが必要である。流域の環境改善を進めるには水域に流入する汚濁負荷を適切にマネジメントすることが不可欠である。これらの整備を進める上では、地球温暖化問題によるCO<sub>2</sub>排出制約、人口減少といった社会的動向を踏まえ、処理規模や人口密度といった地域特性に応じた環境負荷削減効果の大きい水処理技術を適用することが求められる。

## 2. 研究目的

中国遼寧省環境科学院との連携で包括的な実施計画の設定プロセスの検討研究を進め、地理情報システム(GIS)、情報技術、コンピュータシミュレーション技術などといった現代の情報技術を

利用し、水汚染、水資源調査と利用、そして地域の経済構造とモデルを包括的に調査して、モデルの改善と技術改良を行うとともに、データの収集を進めた。中核としては国立環境研究所で開発した水大気統合型の三次元物理連成の流域解析モデル（NIES Integrated Catchment-based Eco-hydrology (NICE) model ; NICEモデル）を都市域に適用できるように開発を進めるとともに、遼寧省の流域圏で中国研究機関との共同でデータ収集の上でモデル適用を進めて、流域の環境特性と社会経済活動との関連を明らかにした。中国遼寧省南部のBiliu河流域の分析に適用することにより、Biliuダムの建設および経済発展による環境への影響を評価し流域での解析を進めた。その知見を踏まえて中国遼河流域の鉄林集水圏に関する調査を実施することによって、遼河デルタ地帯の典型的な都市周辺地域における水質変数とその潜在的な汚染源を分析し、人口増加と経済成長が環境条件にどのような影響を及ぼすかを調査した。

さらに、拠点都市および周辺圏域での適合性の高い循環型の水系浄化・廃棄物処理技術のインベントリーデータベースおよび水処理技術の導入シナリオを構築し、各技術導入によるCO<sub>2</sub>排出量と汚濁負荷除去量を比較し環境効率を分析することを進めた。対象エリアは、日本の代表的な閉鎖性水域であるとともに、近年環境悪化の著しい有明海・八代海の集水域である熊本県とする。ここでは海域内の汚濁物質の挙動を解明する取り組み、生物生息数に影響を与える因子を解明する取り組み、生物が環境悪化に与えるメカニズムを解明する取り組みなど、様々な取り組みがなされている。一方で、水域における浄化を推進するだけでなく、水域へ流入する負荷量を分析し、汚濁負荷を適切にマネジメントする取り組みも重要となる。平成19年度末の日本における污水処理人口普及率は全国平均では83.7%となっているものの、人口5万人未満の地域では70%未満と低い水準にある。また、主な処理施設である下水道は国土交通省、農業集落排水施設は農林水産省、浄化槽は環境省と、それぞれ管轄が異なっており、各処理施設の特性を活かした総合的な対策が取られているとは言い難い。国および自治体の財政状況が厳しく、また地球温暖化対策が急務となる中、処理規模や人口密度といった地域特性に応じて、環境効率の高い水処理技術を適用することが求められており、国内における算定プロセスの構築を受けて、アジア都市への展開を図った。具体的には、ほぼ県全域が近年環境悪化の著しい有明海・八代海に流れ込む河川の集水域となっている熊本県を対象として、流入負荷軽減策の1つとして有機性廃棄物の循環利用を推進するために、平成20年度までに構築した環境情報データベースを活用して、水処理技術システムの導入の環境負荷削減効果を定量的に評価した。

### 3. 研究方法

#### (1) 中国遼寧省流域における水環境解析

陸域統合型の三次元物理連成の流域解析モデル（NICEモデル）はこれまで、自然的土地利用を主とする流域について開発が進められてきた。NICEモデルは不飽和層の地下水位の勾配からの移動量、有効降水量の地表から地下へ浸透量および河川と地下水の流出量を考慮して、流域の水・熱フラックスを解析するモデルとして構築されてきた。

これまでに開発してきた陸域統合型NICE (NIES Integrated Catchment-based Eco-hydrology) モデルに新たな改良を行った。NICEモデルは、MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) 衛星データから得られるLAI (植生エリアインデックス) やFPAR (光合成有効放射吸収量) 等の指標値と解析することによって植生の季節変化・増殖を考慮し、かつ、河川水・

土壌水分・地下水及び植生間での相互作用を考慮した3次元グリッド型の水・熱・物質収支モデルである<sup>1)</sup>。モデル境界条件として、土地利用・植生・土壌・地質等のGISデータを各3次元グリッドに与えるとともに、図1-1にNICEモデルの全体構造を示す。地表モデルについて衛星データベースを活用して植生状況を推定するSiB2モデル、地下水変動については地下水流動と汚染物質拡散ソフトウェアのMODFLOWを用いる<sup>2)</sup>。

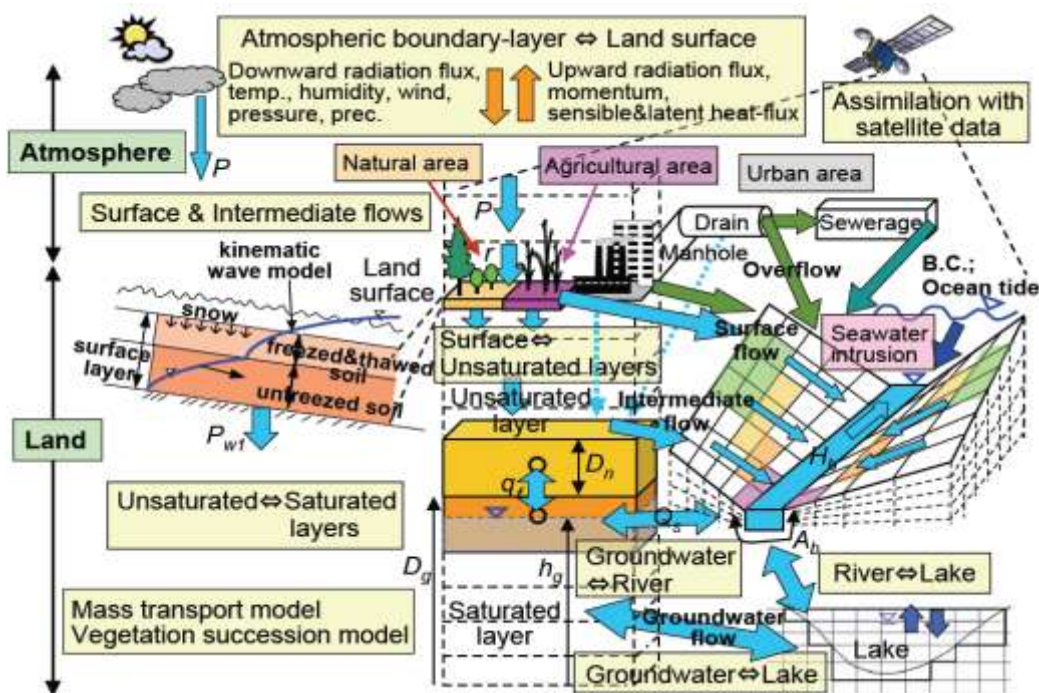


図1-1 陸域統合型の三次元物理連成の流域解析モデル（NICEモデル）

中国遼寧省の中心都市のひとつである大連市の水供給源であるBiliu流域に対してNICEモデルを適用して、都市化、産業化による流域環境への影響を解析し、NOAA/AVHRR 衛星情報を解析することによって、下流域における環境劣化シミュレーション結果の検証を行った。影響要因分析については大連市の社会経済情報を用いたデカップリング分析によって、流域の水資源賦存量のシミュレーションを行い、流域の環境管理政策への知見を検討した。

Biliu 流域は2,814 km<sup>2</sup>の集水域を持ち、中国の重工業の中心である東北部遼寧省の南部に位置する(図1-2)。流域は遼寧省南部では最大のものであり、156 kmの河川延長をもち港湾産業都市大連市の主要な水源となっている<sup>3)4)</sup>。大連市は遼東半島の先端に位置して東の黄海と西の渤海に挟まれた沿岸性の気候帯に位置する都市で、水資源に不足する立地特性を持つ。90年代の急速な産業化、都市化の結果600万の人口と数千の工業施設を有しており、急速な水需要の増加を経験してきた。水供給の恒常的な不足が都市の開発とライフスタイルに影響を与えている状況にある。水消費と都市域のGDPの間には相対的な独立性向（decoupling）が見られている<sup>1)</sup>（図1-3）。

流域の水収支は集計的に算定し、大連市水資源局の河川流量と取水量データと降水量から河川の水フローを算定し<sup>5)</sup>、大連市への水供給量は家庭と産業の水利用データ<sup>6)</sup>から算定した。貯水量については水位観察地と基礎標高値から算定している<sup>7)</sup>。貯水池からの供給量は貯水ダムのトータル水収支から算定される。

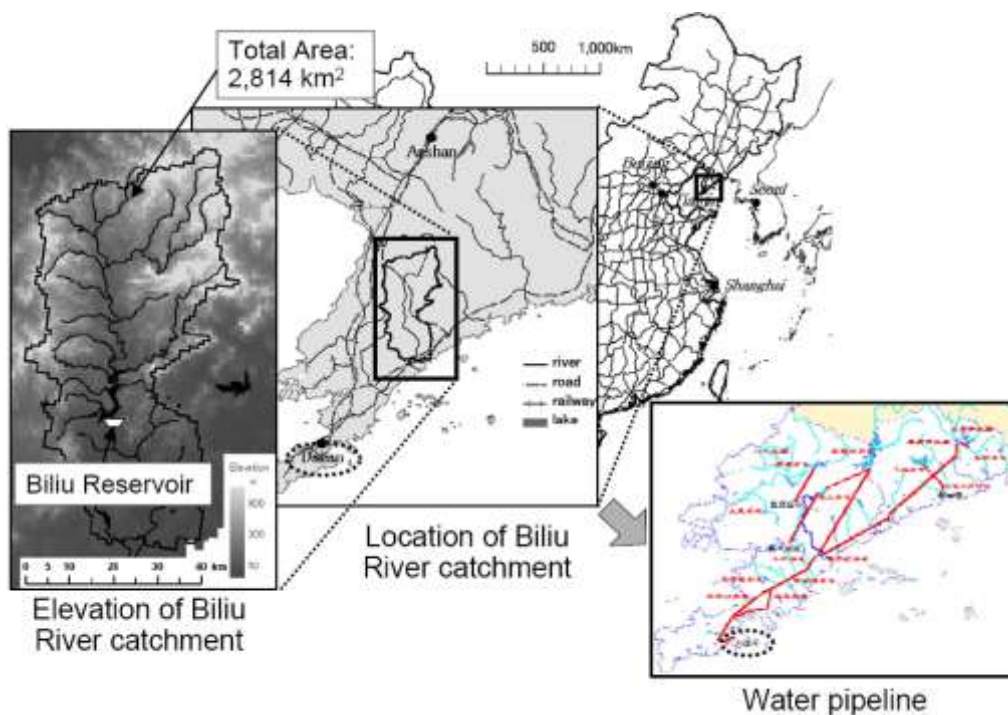


図1-2 中国遼寧省南部 Biliu 流域の立地情報

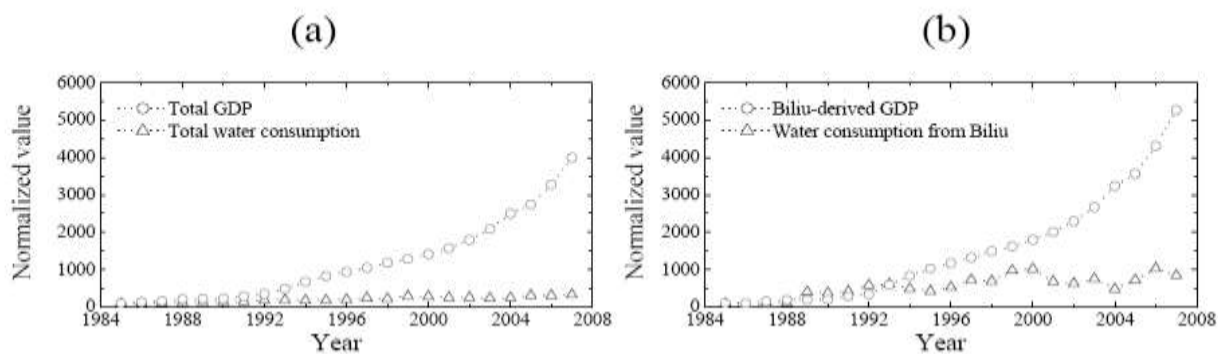


図1-3 (a)大連市のGDPと水消費, (b)大連都市圏のGDPと水消費

Biliu流域の分析をもとにして、遼寧省環境科学院との研究連携を進めて、遼寧省及び中国東北地区最大の河川である遼河の中で、省の首都瀋陽市の北部に位置する鉄林サブ集水圏を対象として、評価研究を展開した。



遼河流域は中国の7大河流域圏の1つであり、中国東北部の産業化と都市化を支えてきた。遼河では1990年代半ばより様々な環境汚染が顕在化しており、中国中央政府が直轄する重点環境管理流域に指定されており、第9次と第10次の五カ年計画で国家と遼寧省でも重要課題として位置付けられている。鉄林市は4つの行政区、3つの郡、及び2つの下位都市から成る総面積12,993km<sup>2</sup>の都市であり、農村と都会の両方の特徴を併せ持つ。遼河は170.1kmにわたり鉄林市の中心部を流れる（図1-4）。デカップリング解析<sup>8)</sup>を用い、人口増加と人類の活動が廃水排出に及ぼす影響と、農業生産が水の供給と化学品の使用に及ぼす影響について調査した。

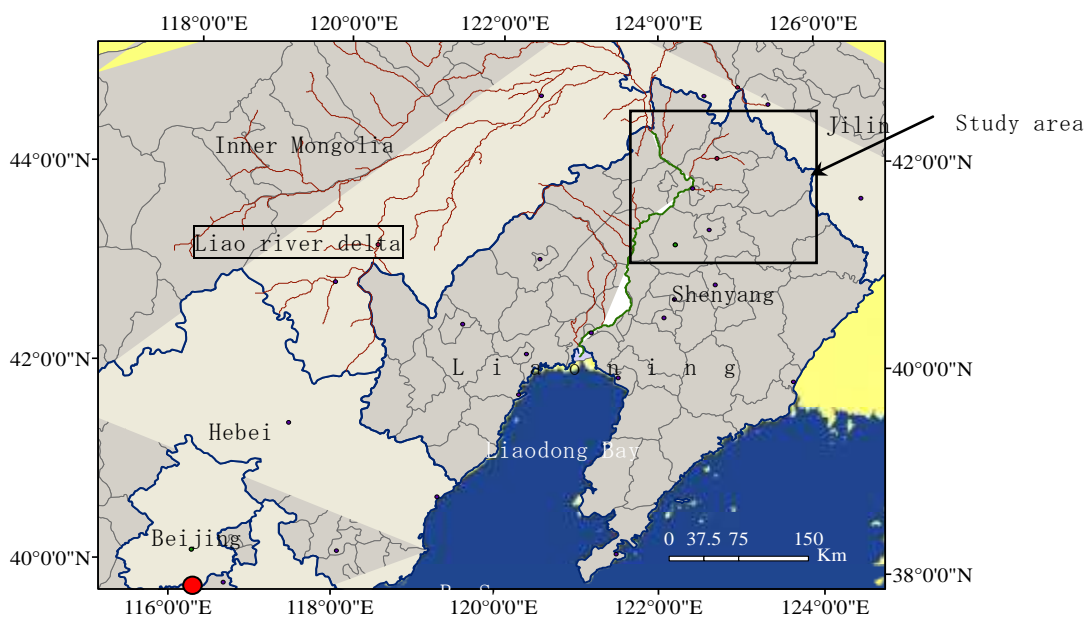


図1-4 中国東北部遼寧省の遼河集水域

## (2) 水環境改善技術の地域展開の評価システム

アジアでの展開を想定して開発した水処理技術計画・評価の全体フレームを図1-5に示す。まず、排水や有機性汚濁負荷の発生源となるセクターごとに、社会統計情報、衛星情報、環境観測情報の複層的なデータを地理情報システム（GIS）上で統合化して、環境資源のデータベースを構築する。データの精度については、一律の基準は設けず、あくまで本システムを用いる意思決定主体の特性に応じて構築することが重要である。政策や規制などの社会技術群として、経済変数の設定、循環施設の規模や立地の設定、土地利用・産業構造の転換、有機廃棄物の分別資源化を取り上げ、社会技術の操作変数を明らかにする。各設定値については、国内における代表値をデフォルト値と設定した上で、システム利用者が地域特性に応じた値を入力できるものとする。さらに、水処理技術群として、標準活性汚泥法、オゾン処理方式などの下水道技術や、合併処理浄化槽、高度処理浄化槽などの浄化槽技術について、初期・運用時それぞれにおけるコスト・投入エネルギーなどを調査し、水処理技術の生産関数を定式化する。最後に、社会技術の操作関数と水処理技術の生産関数を組み合わせた技術政策シナリオを設計し、環境資源のGISデータベース

に基づいてマクロ・ミクロの環境負荷削減効果や事業効率を評価する。汚濁負荷除去量、事業コストと、長期コストとしてのLCCO<sub>2</sub>、それぞれの環境効率を基本指標とした上で、各ステイクホルダーとの協議で具体的な指標を算出し、合意形成に向けた支援ツールとする。

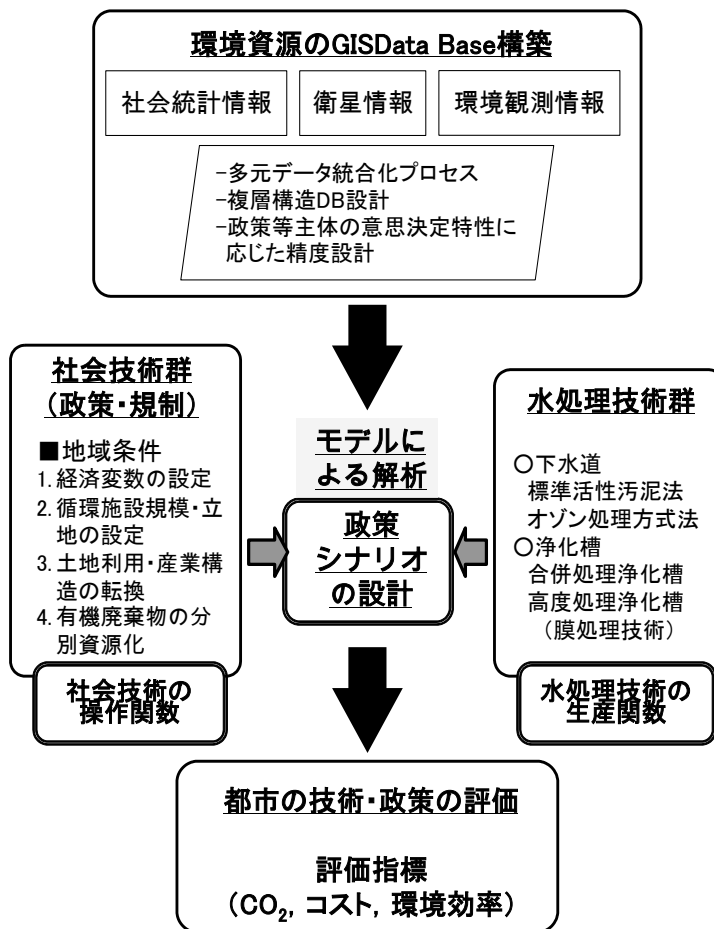


図1-5 水処理技術システムの計画・評価のフレーム

熊本県を対象として、分散型水系浄化技術を普及させた場合の環境負荷削減効果を分析するとともに、環境負荷の削減効果を左右する因子を抽出した。第一に、水処理技術システムの導入に伴う環境負荷量を、ライフサイクルアセスメントを用いて評価する。評価の対象は、下水道の管渠の建設段階、処理場の建設段階、運用段階、浄化槽の設置段階、使用段階の各段階とし、環境負荷の指標としてCO<sub>2</sub>排出量を採用する。建設段階のCO<sub>2</sub>排出量は、耐用年数で除することによって、1年あたりのCO<sub>2</sub>排出量に換算する。次に、下水道の管渠の建設段階のCO<sub>2</sub>排出量を算出は、管渠延長に原単位を乗じて行う。管渠延長の推定には、管渠延長と処理区域面積との相関関係（図1-6）を用いる。ただし、この相関関係は、下水道システムが整備されている地域のデータを基に作成したものである。下水道システムは、人口集中地区すなわち処理面積に対して管渠を密に設置することが求められる地区を中心に整備されている可能性が高い。すなわち、人口が希薄な地区に対して、得られた相関関係をそのまま当てはめると、管渠の密度を過大評価している可能性があり、今後の課題となる。さらに、求めた管渠延長の値を基に、環境省が作成しているマニユ

アル<sup>9)</sup>を用いて、下水道の管渠の建設費を算出する。算出した建設費を、工事種類別の費用割合で按分した上で、各々の産業分類に応じたCO<sub>2</sub>排出量原単位<sup>10)</sup>を乗じ、耐用年数で除して1年当たりのCO<sub>2</sub>排出量を求める。下水処理場の建設段階についても、管渠建設段階と同様に、環境省のマニュアルを用いて建設費を算出し、工事種類別の費用割合、産業分類別のCO<sub>2</sub>排出量原単位、耐用年数を考慮して、年間CO<sub>2</sub>排出量を求める。下水処理場の運用段階については、使用実績データを基にして、下水処理量当たりの電気使用量、油・ガス系燃料使用量、薬品使用量、汚泥処理量を求め、それらの値に環境負荷原単位を乗じて算出する。

浄化槽の設置段階については、製造・輸送・施工の各プロセスにおけるエネルギー使用量データを積み上げた上で、環境負荷原単位<sup>11)</sup>を乗じ、耐用年数で除することで1年当たりのCO<sub>2</sub>排出量を算出する。本研究では5人槽の値を採用し、平均世帯人数を3人とする。

浄化槽の使用段階については、浄化槽の運転実績データを基に、浄化槽の運転に必要な電気使用量の値を算出し、環境負荷原単位を乗じてCO<sub>2</sub>排出量<sup>12)</sup>を求める。水処理技術システムの導入による便益として汚濁負荷除去量を算出し、汚濁負荷除去量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を求めることで、各システムの環境効率を評価する。そこで、水処理技術システムの運転実績データ<sup>13)</sup>より、生物化学的酸素要求量(BOD)除去率を求める(表1-1)。次に、1人1日当たりの平均汚水量および評価対象地域の人口を、BOD除去率に乗じて年間のBOD除去量を算出する。最後に、年間CO<sub>2</sub>排出量を、年間BOD除去量で除することで<sup>14)</sup>、単位汚濁負荷除去量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を算出する。なお、本研究では水質指標としてBODのみを取り上げたが、多様な汚濁負荷指標を一元化した汚濁削減性能指標の考慮が、今後の課題となる。

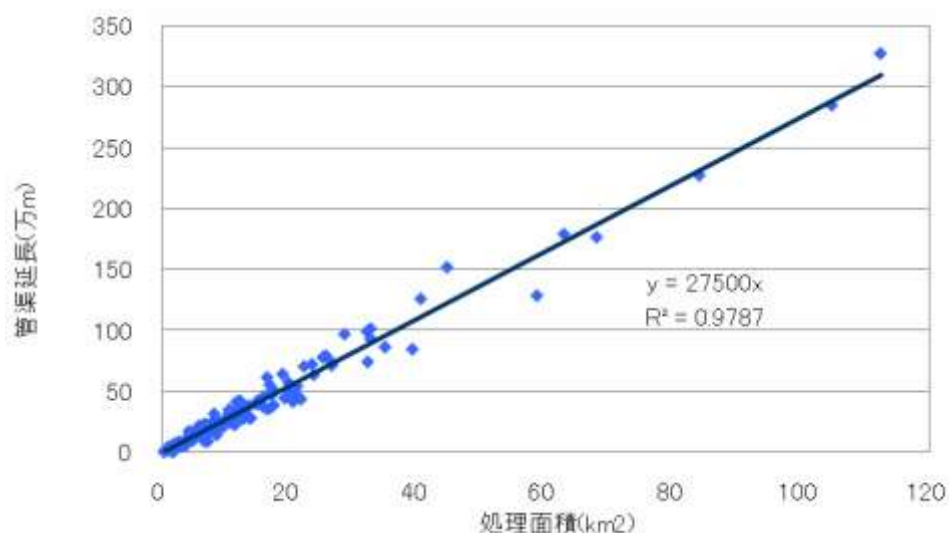


図1-6 管渠延長と処理区域面積の関係



表 1 - 1 汚濁負荷除去能力の設定値

		流入水平均 BOD濃度 (mg/L)	除去率		
			BOD	N	P
下水道システム	標準活性汚泥法	178.3	97.35%	60.70%	71.44%
浄化槽	リン・窒素除去型	180.5	97.03%	70.63%	77.68%

#### 4. 結果・考察

##### (1) 中国遼寧省流域における水環境解析

図1-7にBiliu流域における地下水位（GWI）の変動値を示す。河川流量の減少が集水域での急速な地下水位の低下をもたらしたといえる。特に中流と下流域での地下水位の変化は貯水ダムの整備によって下流域で海水による土壌塩害の影響があることが推定される。

長期の衛星情報データから植生状況の変化を推定した。植生指数（NDVI）データを各ピクセルごとに算定して、植生成長率を算定した。貯水ダム整備後のNDVIの変化を図1-8に示す。右肩下がり傾向は植生が減少していることを示し、右肩上がり傾向は植生の増加を示す。年間のNDVI値は降水量に影響を受けるが、線形回帰の結果が長期的な傾向を示す。黄海沿いの農地においてはNDVI値は小さい傾向を示していたが、その傾向が経年的に拡大する傾向が明らかになった。黄海の沿岸域においてNDVI値の低減は顕著であり、Biliu流域上流の山岳地においては高いNDVI値を示していた。水資源の消費による海水塩害が取水ダム建設後に発現したことが懸念される結果となった。Biliu流域の水資源量と大連市の都市活動の相関性を見るために、重工業・軽工業の年間GDP<sup>6)</sup>を用いた。図1-9に水資源と大連市のGDPの間でのデカップリング分析の結果を示している。デカップリング因子は正で比較的小さな値で推移していることが明らかになった。たとえば、1997-1998の大連市でのデカップリング因子は0.19でOECD加盟国平均の15<sup>3)</sup>よりも著しく小さい傾向を示しており、大連市の都市化、産業化の水資源への圧力が先進諸国に比べると大きいといえる。一方で、1985から2007にかけてデカップリング因子が低下傾向にあり、1993-1994の0.33から2006-2007の0.12に低下しており、1991-1992、1996-1997と2004-2005は負の値を示しており、相対的には1985から2007年にかけての大連市の際立った経済成長は水消費への依存を低減しつつ達成できたともいえる。

流域下流での植生劣化は河川の取水と地下水位低下に密接に関係しており、これは中国北東部の傾向と合致する<sup>7) 8)</sup>。この環境劣化は大連市の産業成長に伴うものであるが結果としては生産支援力と生活支援力の低下につながっているということもできる<sup>9)</sup>。

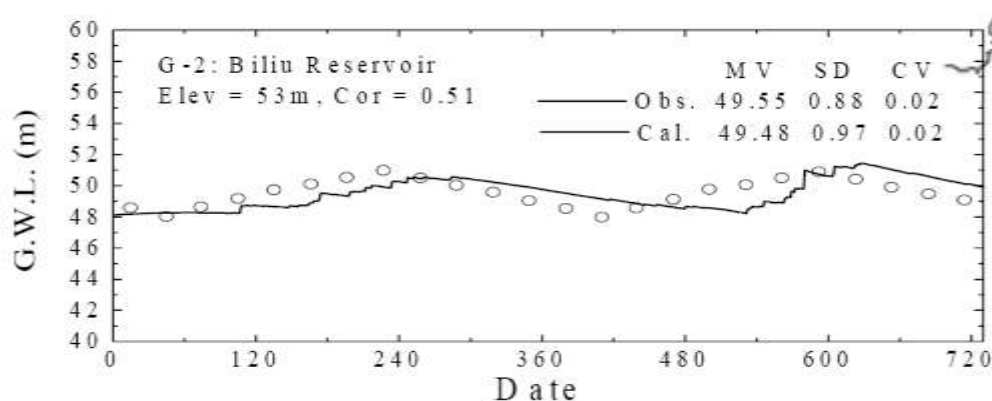


図1-7 Biliu流域における地下水位の年平均値の推定値

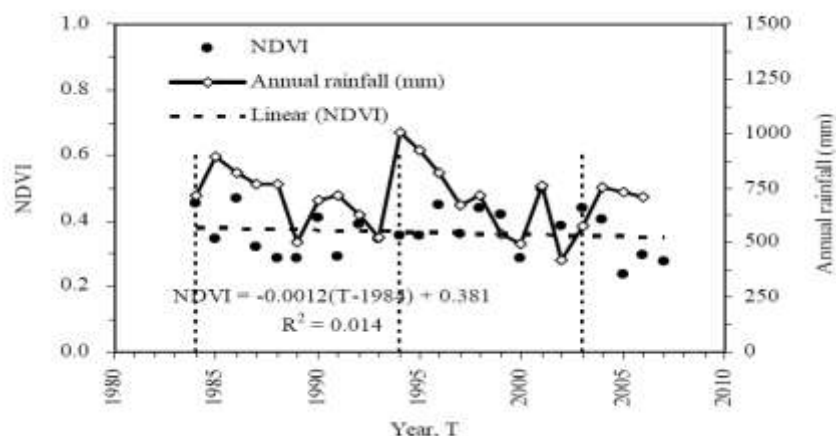


図1-8 Biliu 下流域における NDVI 年平均値の推移

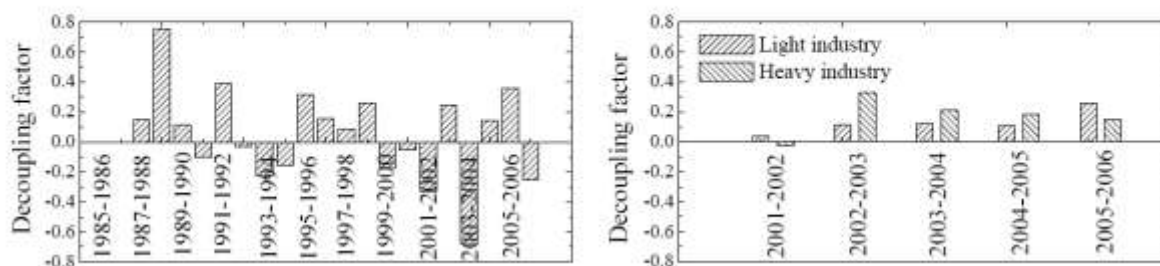


図1-9 NDVI と水消費（左），産業計水消費と GDP（右）  
のデカップリング因子の時系列変化

鉄林集水圏におけるデカップリング因子の値を図1-10に示す。1999-2000、2003-2004、及び2005-2006の期間における廃水排出に関してデカップリング因子はプラスであり、人類の活動からの廃水が人口増加と分離（デカップリング）していることを意味している。また、その他の年ではデカップリング因子はマイナスであった。

農業生産と灌漑への給水の関係を図1-10a（1999-2007）に示す。一般的に、農業生産高は増加傾向にある一方で、灌漑への水の供給は1999-2003と2002-2007から下降している。年間のデカップリング因子の値がプラスの場合、プラスの棒が示すように1999-2003と2005-2006の期間に、デカップリングが生じる。これらのプラスの棒は、ある年から次の年にかけて農業生産高が水の供給よりも速いペースで増加したことを示している。

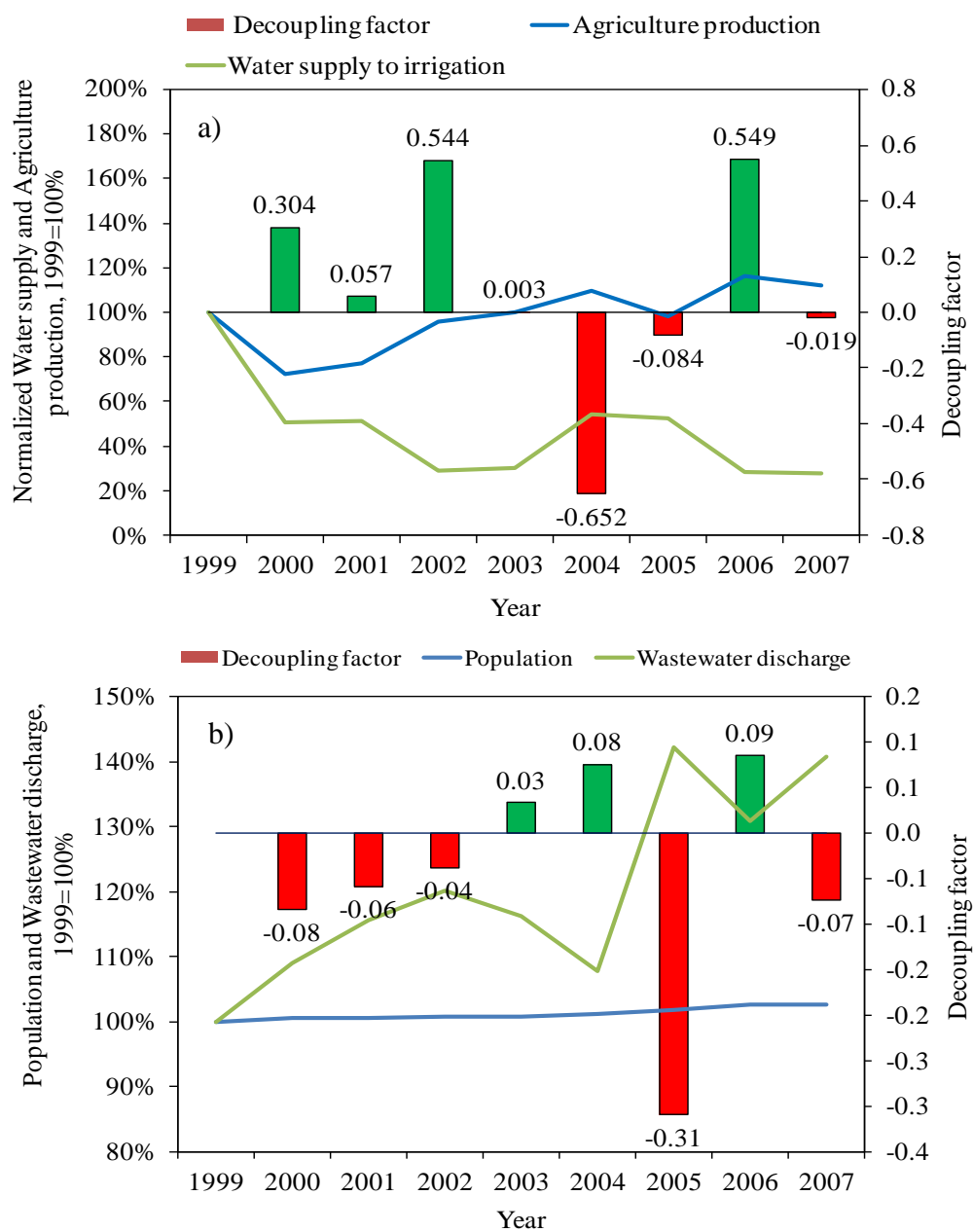


図 1-10 a) 鉄林市における農業生産高と農業への給水（1999-2007）  
 b) 鉄林市における工業廃水・生活廃水と人口（1999-2007）  
 の間のデカップリング分析

## (2) 水処理技術システム導入によるCO<sub>2</sub>排出量の評価結果

水処理技術システムの導入に伴うCO<sub>2</sub>排出量を推計するために、まず、人口密度を500（人/km<sup>2</sup>）と仮定した上、下水道システム導入に伴うCO<sub>2</sub>排出量について、処理区域面積の規模を変化させた感度分析を行った（図 1-11）。図より、下水道においては管渠建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量が多いことが明らかとなった。くわえて、管渠建設にともなうCO<sub>2</sub>排出量の占める割合は、処理区域面積が10km<sup>2</sup>

の時は約74%、500km<sup>2</sup>の時は約91%と、処理区域面積が広がるほど割合が大きくなる結果となった。これは、下水管渠建設段階で発生するCO<sub>2</sub>排出量が処理区域面積に比例することに対して、下水処理場の運用時のCO<sub>2</sub>排出量には、処理区域が大きくなるほど処理効率が向上して相対的に小さくなるためである。

次に、人口密度および処理区域面積を変化させた場合の、水処理技術システム導入による単位汚濁負荷除去量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を算出した（図1-12）。この結果、処理区域面積が大きくなるほど、下水道システムの単位汚濁負荷除去量当たりのCO<sub>2</sub>排出量は小さくなることがわかった。また、浄化槽と比較した場合、人口密度が100人/km<sup>2</sup>の場合には処理区域面積に関わらず浄化槽のCO<sub>2</sub>排出量が大幅に小さくなった。一方で、500人/km<sup>2</sup>の場合には、処理区域面積に関わらず浄化槽のCO<sub>2</sub>排出量が大きくなった。この結果から、人口密度によって、水処理技術システムの環境効率が大きく左右されることが明らかとなった。

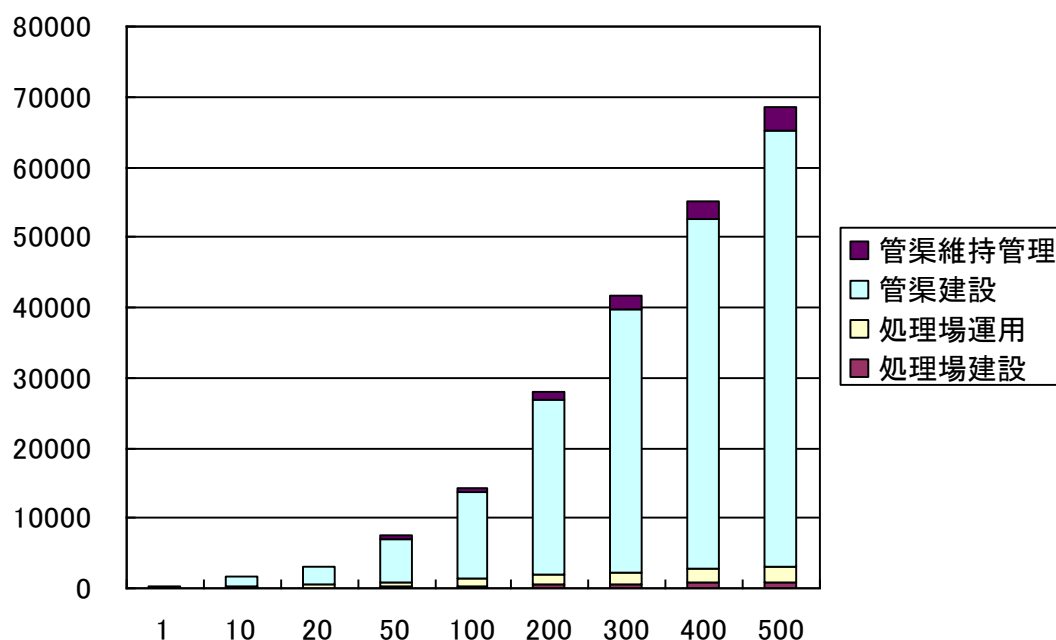


図1-11 人口密度500（人/km<sup>2</sup>）における下水道システム導入に伴う処理規模別のCO<sub>2</sub>排出量（t-CO<sub>2</sub>/year，X軸の数値の単位はkm<sup>2</sup>）

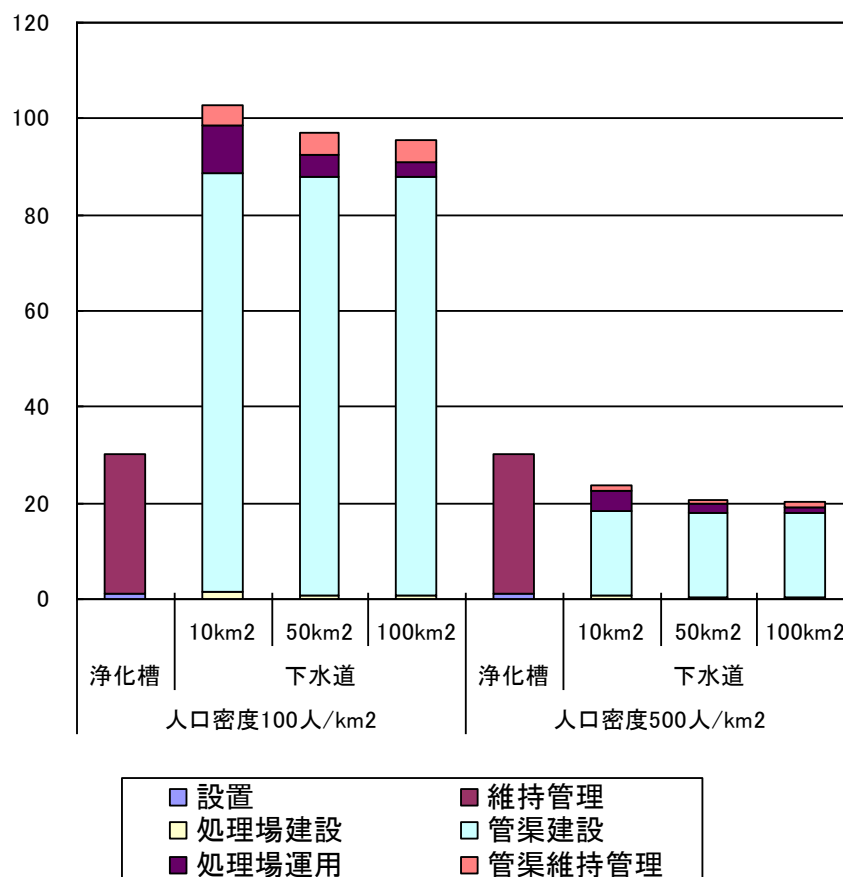


図1-12 水処理技術システムの汚濁負荷除去量当たりのCO<sub>2</sub>排出量 (t-CO<sub>2</sub>/t)

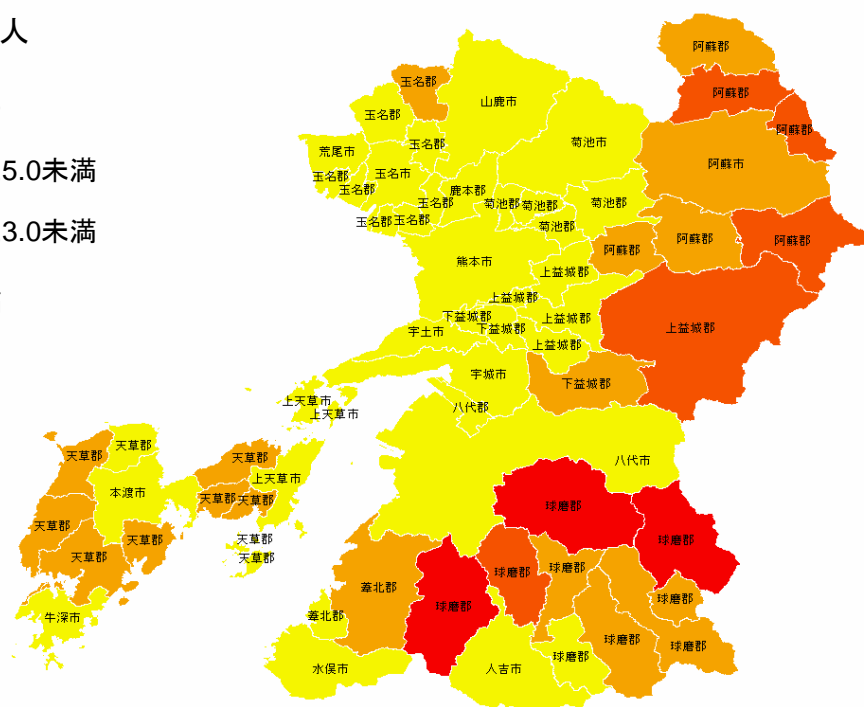
各自治体の人口・面積を、人口密度別に集計した結果を表1-2に示す。県全体の約50%のエリアが、人口密度100人/km<sup>2</sup>以上500人/km<sup>2</sup>未満であり、人口密度100人/km<sup>2</sup>未満のエリアを加えると90%を超えることが分かる。熊本県の各自治体に下水道システムを導入したと仮定した場合の年間CO<sub>2</sub>排出量の分布を図1-13に示す。人口密度の高い熊本市周辺では、1人当たり0.06～0.30t-CO<sub>2</sub>/year程度の値となった一方で、人口密度の低い阿蘇地域や県南部などの山間部では、1人当たりの年間CO<sub>2</sub>排出量が3t-CO<sub>2</sub>以上となっており、一部の自治体では5t-CO<sub>2</sub>を超える結果となった。日本の1人当たりの年間CO<sub>2</sub>排出量が、産業・民生・運輸などの各部門をすべて合わせても約10t-CO<sub>2</sub>であることを考えると、非常に大きい値である。この原因として、すでに述べた通り、人口密度が低い地域において管渠の敷設密度を過大評価している可能性が考えられる。

自治体別の下水道システム導入に伴う1人当たりの年間CO<sub>2</sub>排出量と人口密度の関係を図1-14に、面積との関係を図1-15に示す。人口密度と1人当たりのCO<sub>2</sub>排出量の間には、ほぼ反比例の関係があることが明らかになった。この結果は、下水道システムのライフサイクルCO<sub>2</sub>において、管渠建設段階の占める割合が高いことと、管渠延長を処理区域面積に比例すると仮定して分析を行っていることから妥当な結果といえる。一方、CO<sub>2</sub>排出量と面積の間には、有意な関係は見られなかった。



表 1 - 2 熊本県における人口密度別の人口・面積

人口密度(人/km <sup>2</sup> )	人口(万人)	面積(km <sup>2</sup> )	面積割合(%)
1000以上	66.3	267	3.6
500以上1000未満	26.0	361	4.9
100以上500未満	77.5	3,693	49.9
100未満	16.1	3,085	41.7
合計	185.9	7405.2	100.0

t-CO<sub>2</sub>/year・人図 1 - 1 3 熊本県における下水道システム由来の CO<sub>2</sub> 排出量 (t-CO<sub>2</sub>/year・人)

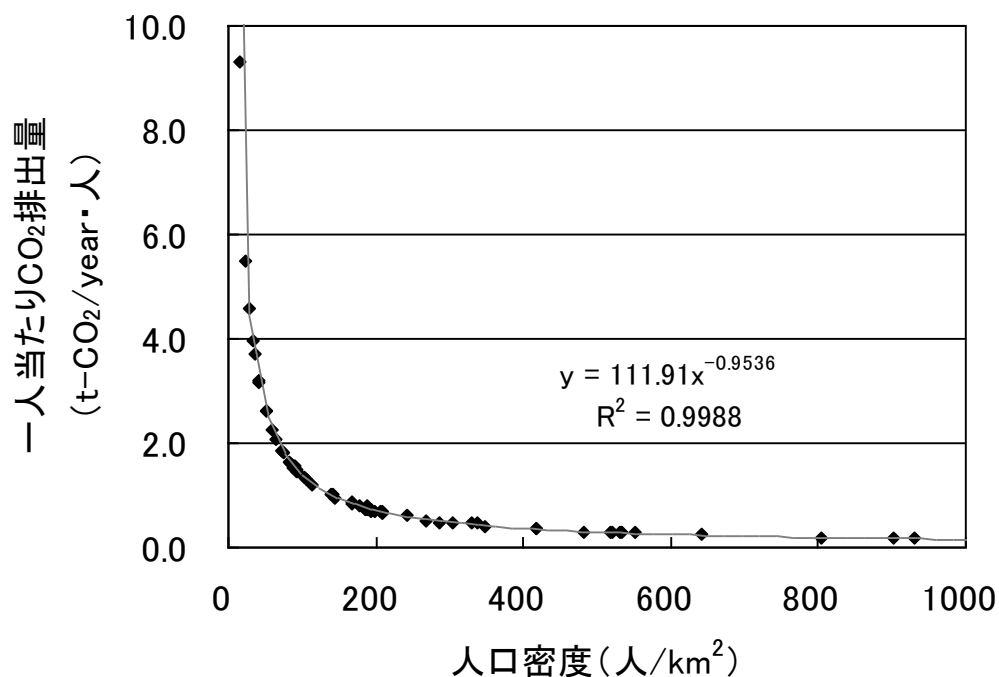


図 1 - 1 4 下水道システム由来の CO<sub>2</sub> 排出量と人口密度の関係

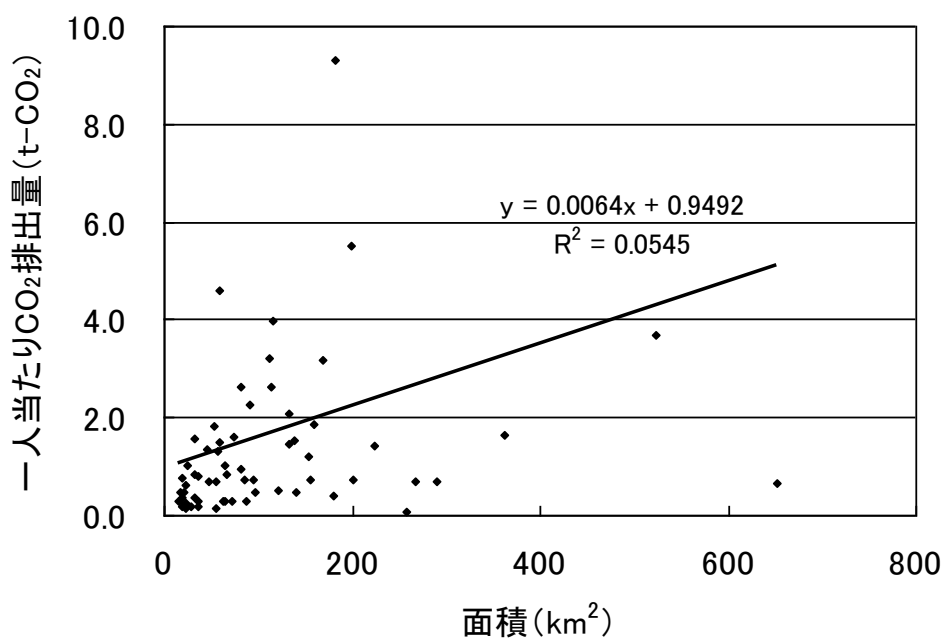


図 1 - 1 5 下水道システム由来の CO<sub>2</sub> 排出量と面積の関係

地域に水処理技術システムを導入した際の環境効率に対し、人口密度が大きな影響を与えることが明らかになったことから、人口密度を考慮した導入シナリオを構築する。

熊本県を対象として、人口密度1000人/km<sup>2</sup>以上の自治体のエリアに下水道システム、それ以外の自治体に浄化槽を導入した場合をシナリオ1、システム導入の分岐点を500人/km<sup>2</sup>以上とした場合をシナリオ2、分岐点を100人/km<sup>2</sup>以上とした場合をシナリオ3とする。そして、全てのエリアに浄化槽を導入した場合をシナリオ4とする。

それぞれのシナリオについて年間CO<sub>2</sub>排出量を算出した結果、シナリオ1では年間522kt-CO<sub>2</sub>、シナリオ2では年間480kt-CO<sub>2</sub>、シナリオ3では年間617kt-CO<sub>2</sub>の排出、シナリオ4では年間798 kt-CO<sub>2</sub>の排出となった。さらに、汚濁負荷除去量あたりのCO<sub>2</sub>排出量を算出した結果、シナリオ1で19.8t-CO<sub>2</sub>/t、シナリオ2で18.2t-CO<sub>2</sub>/t、シナリオ3で23.5t-CO<sub>2</sub>/t、シナリオ4で30.1t-CO<sub>2</sub>/tとなり、500人を分岐点としたシナリオが最小となることが分かった。次に、年間のCO<sub>2</sub>排出量が最小となるシナリオを探るために、分岐点となる人口密度を100人/km<sup>2</sup>から500人/km<sup>2</sup>の間で変化させて分析した。その結果、350人/km<sup>2</sup>を分岐点とする場合(シナリオ5)のCO<sub>2</sub>排出量が最も少なく、年間472kt-CO<sub>2</sub>、汚濁負荷除去量あたりでは17.9t-CO<sub>2</sub>/tという結果となった(図1-16)。

下水道システムのライフサイクルCO<sub>2</sub>の中で、管渠建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量が占める割合が大きかった。そこで最後に、管渠建設における資材使用量の削減、工事におけるエネルギー量の削減などにより、管渠建設のCO<sub>2</sub>排出量が削減されたと仮定した場合の、県全体の水処理技術システム導入によるCO<sub>2</sub>排出量を最小化する分岐点について試算した。その結果、10%削減した場合には、人口密度265人/km<sup>2</sup>、20%削減した場合には250人/km<sup>2</sup>、50%削減した場合には180人/km<sup>2</sup>となった。すなわち、人口密度200~300人/km<sup>2</sup>前後の地域であれば、今後の技術開発次第で下水道システムの効率が良くなる可能性があるが、人口密度100人/km<sup>2</sup>以下の地域では、浄化槽を導入することが妥当であると言える。

なお、汚濁負荷除去量の算出に用いた設定では、下水道システムと浄化槽の水質浄化能力に大きな違いが無かったことから、シナリオごとの年間CO<sub>2</sub>排出量と、汚濁負荷除去量あたりのCO<sub>2</sub>排出量がほぼ比例する結果となった(図1-17)。

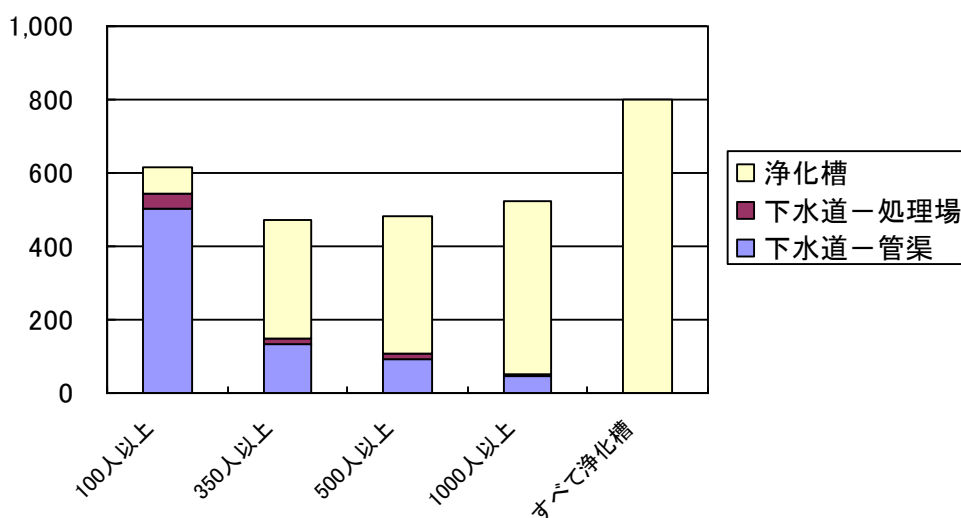


図1-16 熊本県を対象とした水処理技術システム導入によるCO<sub>2</sub>排出量 (kt-CO<sub>2</sub>/year)

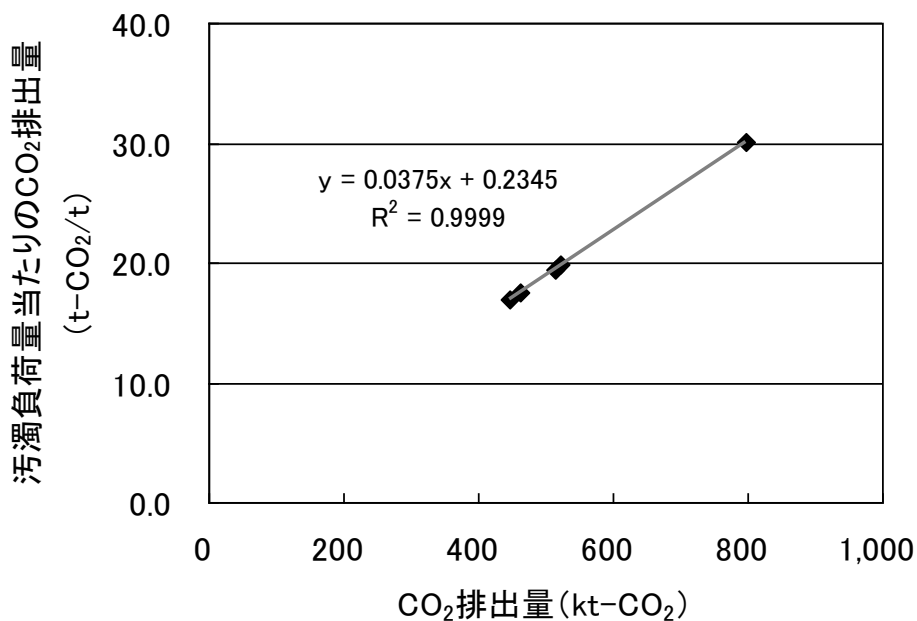


図1-17 CO<sub>2</sub>排出量と汚濁負荷量当たりのCO<sub>2</sub>排出量の関係

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

鉄林区域の遼河を対象としたNICEモデルの更なる開発により、アジア地域における生態系変化のメカニズムの理解を促進し、生態系回復のための水量・水質成分の動力学の傾向予測を行ったことに意義がある。下水道システムや浄化槽などの個別の技術を対象として、環境負荷排出量を算出した研究事例は数多く存在しており、インベントリーデータの整備が進んでいる。一方で、それらのデータを活用して、地域に対して水処理技術を導入することの効果を推計した研究は端緒に付いたばかりである。今回、地域を対象として具体的な技術導入シナリオを設定し、定量的な分析を行ったことは先駆的な取り組みと言える。

### (2) 環境政策への貢献

本研究の成果は、低地での環境維持開発、生態系回復に関する環境政策の制定の際に、生態系変化のメカニズムへの解明に参考となる科学的知見を提供しているものであり、各自治体における水処理技術システムの導入および更新の意思決定の際に、基礎的な知見を与えるものである。今後、自治体との意見交換を通じて、成果の広報・普及に努める。研究者としては、整備が進みつつある建設施工段階のインベントリーデータの取り込みや、新たに開発された技術に関するインベントリーデータを更新することが求められる。

## 6. 引用文献

- 1) Tadabobu Nakayama, Masataka Watanabe; Simulation of drying phenomena associated with vegetation change caused by invasion of alder (*Alnus japonica*) in Kushiro Mire, Water Resources Research, Vol. 40(8), W08402,

- doi: 10.1029/2004WR003174、2004
- 2) Tadanobu Nakayama、Yonghui Yang、Masataka Watanabe、Xiyang Zhang; Simulation of groundwater dynamics in North China Plain by coupled hydrology and agricultural models、Hydrological Processes、Vol. 20(16)、pp. 3441-3466、 doi: 10.1002/hyp.6142、2006
  - 3) Liliang Ren、Meirong Wang、Chunhong Li、Wei Zhang; Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China、 Journal of Hydrology、 Vol. 261(1-4)、 pp.204-217、 2002
  - 4) Wen-Yuan Niu、 William M.Harris; China: the forecast of its environmental situation in the 21st Century、 Journal of Environmental Management、 Vol. 47(2)、 pp.101-114、 1996
  - 5) Dalian Water Resource Bureau ; The classification of the water rent and the collection、 <http://www.swj.dl.gov.cn/info/info/fangxun.aspx?id=81> (in Chinese)、 2007
  - 6) Dalian Water Resource Bureau; Annual report of weather、 river discharge、 groundwater level、 tidal level、 and soil characteristics at the Biliu River catchment、 Interior report of the committee (in Chinese)、 2005-2006
  - 7) Dalian Bureau of Statistics; Dalian statistical yearbook、 China Statistics Press (in Chinese)、 2002-2007
  - 8) OECD; Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth、 2002  
[http://www.oilis.oecd.org/oilis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd\(2002\)1-final](http://www.oilis.oecd.org/oilis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd(2002)1-final)
  - 9) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 廃棄物対策課 浄化槽推進室、生活排水処理施設整備計画策定マニュアル、2002
  - 10) 国立環境研究所：産業連関表による環境負荷データブック(3EID)、2002
  - 11) 井村秀文、森下兼年、池田秀昭、銭谷賢治、楠田哲也：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE及びLC-CO2による評価、土木学会論文集 No. 552/VII-1、pp.75-84、1996
  - 12) 宮原高志、柏木秀仁：下水浄化センターのLCAにおける処理水再利用の効果、下水道協会誌 Vol.43、No.526、2006
  - 13) 井村正博、水野雄次：浄化槽およびブロワの省資源化、省エネ化、月間浄化槽 N0380、pp.23-29、2007
  - 14) 石田整、荒巻俊也、花木啓祐：東京湾流域の下水処理場への排出権取引制度導入効果の推定、土木学会論文集、No.804/VII-37、pp.73-82、2005

## 7. 国際共同研究等の状況

日中環境大臣間で締結された「瀋陽・川崎市の環境にやさしい都市」に関する協力覚書に基づいて、国立環境研究所と中国科学院瀋陽応用生態研究所の間での共同研究として推進した。

## 8. 研究成果の発表状況

## (1) 誌上発表

## 〈論文（査読あり）〉

- 1) 濱野裕之、中山忠暢、堀紘子、藤田壮、田上浩孝；都市スケールの三次元水熱フラックス解析モデルによる都市の緑化施策の評価、環境システム研究論文集、Vol. 37、pp. 93-104、2009
- 2) 橋本禅、若林諒、孫穎、陳旭東、藤田壮、耿涌；中国大連市の一般廃棄物管理施策を対象とした循環経済社会シナリオの設計と評価、環境システム研究論文集、Vol. 37、pp. 301-310、2009
- 3) 村野昭人、滝川清、園田吉弘；熊本県沿岸域を対象とした水処理技術システムの評価、海洋開発論文集、Vol. 25、pp. 503-507、2009
- 4) 村野昭人、滝川清；熊本県を対象とした水処理技術導入シナリオの環境効率の評価、海洋開発論文集、Vol. 26、pp. 651-656、2010
- 5) Tadanobu Nakayama、Ying Sun、Yong Geng；Simulation of water resource and its relation to urban activity in Dalian City、Northern China、Global and Planetary Change Vol. 73(3/4)、pp. 172-185、2010
- 6) Shizuka Hashimoto、Tsuyoshi Fujita、Yong Geng、Emiri Nagasawa；Realizing CO<sub>2</sub> emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki、Journal of Conservation and Recycling、Vol. 54(10)、pp. 704-710、2010
- 7) Tadanobu Nakayama、Tsuyoshi Fujita；Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas、Landscape Urban Planning、Vol. 96(2)、pp. 57-67、2010
- 8) Xudong Chen、Yong Geng、Tsuyoshi Fujita；An Overview of Municipal Solid Waste Management in China、Journal of Waste Management、Vol. 30、pp. 716-724、2010
- 9) Zhu Qinghua、Yong Geng、Tsuyoshi Fujita、Shizuka Hashimoto；Green supply chain management in leading manufacturers: Case studies in Japanese large companies、Management Research News、Vol. 33(4)、2010
- 10) Yong Geng、Bruce Mitchell、Tsuyoshi Fujita、Tadanobu Nakayama；Perspectives on small watershed management in China: the case of Biliu、International Journal of Sustainable Development & World Ecology、Vol. 17(2)、pp. 172-179、2010
- 11) Xudong Chen、Murray E. Haight、Yong Geng、Tsuyoshi Fujita；Managing municipal solid waste from a system perspective: a comparative study of Dalian、China and Waterloo、Canada Sustainable Development、Vol. 18(5)、pp. 282-294、2010
- 12) Xudong Chen、Fengming Xi、Yong Geng、Tsuyoshi Fujita；The potential environmental gains from recycling waste plastics: Simulation of transferring recycling and recovery technologies to shenyang、China. Waste Management、Vol. 31(1)、pp. 168-179、2011



<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 藤田壮、村野昭人、徐開欽、橋本禪；循環型水処理技術・政策の計画・評価システム、第11回日本水環境学会シンポジウム「環境再生のための分散型処理システムの意義とこれからの展望」、9月、2008
- 2) 藤田壮、村野明人、徐開欽、橋本禪；循環型水処理技術・政策の計画・評価システム、第11回日本水環境学会シンポジウム「環境再生のための分散型処理システムの意義とこれからの展望」、9月、2008
- 3) 孫穎、藤田壮、高橋秀行；川崎市の産業レベルにおける環境効率指標の算出—エコタウンの評価に関する基礎研究—、第4回日本LCA学会研究発表会要旨集、pp.190-191、3月、2009
- 4) 橋本禪、藤田壮、孫穎、若林涼；エコタウン技術の展開による中国産業拠点都市における循環経済の促進—大連市の一般廃棄物管理施策を事例として—、第4回日本LCA学会研究発表会、3月、2009
- 5) Xudong Chen、Tsuyoshi Fujita、Yong Geng；Integrating MSW Management with Manufacturing—A System Supporting Industrial Symbiosis of the Kawasaki Eco-Town—、第4回日本LCA学会研究発表会、pp.174-175、3月、2009
- 6) 藤田壮、陳旭東、孫穎；エコタウンを中核とする資源循環の社会効果の評価システムの設計、第4回日本LCA学会研究発表会、pp.176-177、3月、2009
- 7) Tadanobu Nakayama、Sun Ying、Nguyen Cao Don、Tsuyoshi Fujita、Yong Geng；Assessment of simulated water resource and its relation to economic growth in urban city of northern China、Urban Environmental Pollution、6月、2010
- 8) 藤田壮、藤井実、平野勇二郎、陳旭東、大西悟；コベネフィット都市に向けた環境技術政策評価—川崎市における算定システム、環境科学会、9月、2010
- 9) 藤井実、藤田壮、陳旭東、大西悟；有機系廃棄物の資源循環の効率化と地域循環圏の形成、第59回高分子討論会、10月、2010
- 10) Minoru Fujii、Tsuyoshi Fujita、Xudong Chen、Satoshi Ohnishi、Naohisa Yamaguchi；Efficient use of organic municipal solid waste in a sound material-cycle society、ISIE Asia-Pacific Meeting/ISIE MFA-ConAccount Meeting、11月、2010
- 11) Tsuyoshi Fujita、Minoru Fujii、Xudong Chen、Yong Geng、Satoshi Ohnishi；Strategic planning system for co-benefit eco-industrial developments and circular regions、ISIE Asia-Pacific Meeting/ISIE MFA-ConAccount Meeting、11月、2010

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム, セミナーの開催 (主催のもの)

第7回 産業共生研究シンポジウム2010(平成22年11月5日～6日、川崎市産業振興会館のべ100名参加) 他サブテーマ4でまとめて記載する。

(5) マスコミ等への公表・報道等

神奈川新聞 (川崎版) ;エコタウン成果共有へ一市と中国・瀋陽ワークショップ互いの取り組み紹介 2008. 9. 26

(6) その他

特に記載すべき事項はない。