

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

(2) 東アジア・国土・都市圏のマルチスケール環境フラックス解析システムに関する研究

慶應義塾大学大学院・政策メディア研究科

渡邊正孝・高崎健二

(独) 国立環境研究所アジア自然共生研究グループ

岡寺智大

慶應義塾大学環境情報学部

丹治三則

平成19年～22年度累計予算額：37,266千円（うち、平成22年度予算額：9,309千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 陸域-地下水統合管理モデルと都市スケールと圏域・国土スケール間のインターフェイスを持ち、水・物質・エネルギーインベントリーを用いた環境支持力への影響評価システムを設計するために、中国の主要都市を選定し産業別のマクロインベントリーモデルと、汚濁負荷量の発生量を算出する市・県別の分布型の地理情報をデータ基盤として汚濁負荷インベントリーモデルを開発した。

開発したインベントリーモデルを用いて、中国の圏域・国土スケールで汚濁負荷量を分析すると、CODで約9割、全窒素で約6割、全燐で約9割が農畜産業由来であることが明らかになった。

そこで、農業、畜産業の面源負荷量について、家畜糞尿の処理と循環農業を促進する有機物循環マネジメント施策を設計するための技術調査を実施した。その結果、中国の農村では、戸用の三結合のメタンガス発酵槽(トイレ、豚舎及びメタンガス発酵槽三者一体モデル)で、人間・家畜の糞便が自動的にメタンガス発酵池に排出され、発酵後直接メタンガスとして利用されるシステムが有効であることが明らかになった。

以上のような農畜連携型の有機物資源循環利用システムの核となる技術を用いて、長江流域を対象に、畜産業の主な汚濁負荷輩出要因となる豚舎へ適用し汚濁負荷削減効果を評価した。長江流域では、三峡ダム上流の重慶市周辺、長江中流域の武漢市、漢口周辺に多くの畜舎が立地しており汚濁負荷発生源となっている。この地域からの汚濁負荷発生量を抑制するために、この技術を当該地域の畜舎の全てに適応したと仮定してその効果を推計すると、CODでは最高で全産業の総汚濁負荷量の20%～30%を削減する可能性が示された。

[キーワード] 産業連関分析、排出インベントリー、フットプリント分析、面源負荷削減、メタンガス発酵技術

1. はじめに

東アジアでは、水資源とエネルギー供給が逼迫する状況が顕在化しており、産業化と都市化の拠点となる都市とその周辺圏域で自然共生的なマネジメントを実現することが緊急の課題となる。とくに、中国の都市・産業機能は日本と世界への製品やサービス供給基地としての重要性を増しており、わが国の持続可能な発展に向けても、国内拠点と中国の大都市が連携するエネルギー、物質および水資源の共生的な利用の枠

組みを提案し、都市・産業ガバナンスを設計するシステム構築が緊急課題となっている。

東アジアの拠点都市を対象とした定量的なインベントリーと統合的な環境フラックス解析システムを構築することにより、地域環境保全力を高める都市・産業のあり方を議論するための、都市・産業システムの代替的な技術・政策シナリオの設計と評価を可能にする。従来からある環境負荷を集計的に評価するアプローチではなく、「環境フラックス」の空間分布と時間変化を定量的に算定するシステムにより、産業拠点を軸とする都市活動と水・物質・エネルギーの共生的利用システムの構築と、水系循環と熱需給の都市環境インフラの形成を中核的とする自然共生型の都市戦略の構築システムを形成する。

2. 研究目的

都市・圏域のマルチスケール間での物質、財、サービスの移動・流通に伴う水・熱・物質の連関、都市・地域内での水・熱・物質のマスマランスおよび分布構造を把握するシステムを開発する。平成22年度は、水・物質・エネルギーをベースとする環境支持力への影響評価のため、遼寧省を対象に水需要、汚濁負荷、エネルギー、CO₂排出の統合的なインベントリーを作成した。また、水資源消費量、汚濁負荷発生量（化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全燐(T-P))の分布型のインベントリーモデルを活用し、汚濁負荷発生量を削減する技術システムの環境影響評価を実施した。特に、三峡ダム上流域を対象に、農業、畜産業の面源負荷量について、家畜糞尿の農地還元等の有機物循環マネジメント施策を設計し、その効果を評価した。

3. 研究方法

(1) マクロインベントリーモデルの開発

1) 基本モデル

エネルギー消費・CO₂排出インベントリーは、産業連関表をベースとするため、式(1)のモデル式から求めることができる。

$$\mathbf{EL}^{ind} = \hat{\mathbf{D}}\mathbf{B}(\hat{\mathbf{F}} - \hat{\mathbf{M}}) \quad (1)$$

ただし、

\mathbf{EL}^{ind} : 水需要、汚濁負荷、CO₂排出ベクトル、 $\hat{\mathbf{D}}$: 水需要、汚濁負荷、CO₂排出原単位対角化行列、

\mathbf{B} : レオンチェフの逆行列、 $\hat{\mathbf{F}}$: 最終需要対角化行列、 $\hat{\mathbf{M}}$: 最終需要対角化行列

ここで、 d_i^p : 水需要、汚濁負荷、CO₂排出原単位、 b_{ij} : レオンチェフの逆行列の要素単位、 f_j : 部門jの最終需要、 m_j : 部門jの最終需要とすると、式(1)より式(2)の式が求まる。

$$EL^{ind} = \begin{pmatrix} d_1^p b_{11} f_1 & \cdots & d_1^p b_{1n} f_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_n^p b_{n1} f_1 & \cdots & d_n^p b_{nn} f_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_1^p b_{11} m_1 & \cdots & d_1^p b_{1n} m_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_n^p b_{n1} m_1 & \cdots & d_n^p b_{nn} m_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

これらのモデル式を遼寧省に適用することで、上海市の水需要、汚濁負荷、CO₂排出インベントリーを構築する。

2) 水需要原単位、汚濁負荷排出原単位、CO₂排出原単位の推計

a. 部門統合

遼寧省産業連関表¹⁾、中国能源統計年鑑²⁾、中国水資源公報³⁾、中国環境年鑑⁴⁾、遼寧省統計年鑑⁵⁾の部門分類に基づき、各統計間の整合性が取れるよう産業分類を38部門に統合した(表2-1)。

表2-1 統合部門分類

1	農業	12	化学工業	23	電力供熱	34	社会服務
2	煤炭	13	非金属製品	24	煤氣生産	35	衛生福祉
3	石油	14	金属加工	25	水道供給	36	教育文化
4	金属採掘	15	金属製品	26	建築業	37	科学研究
5	非金属採掘	16	機械工業	27	貨物運送	38	行政其他
6	食品製造	17	交通設備	28	郵政通信		
7	紡績業	18	電気機械	29	商業		
8	服装皮革	19	電子通信	30	飲食業		
9	木材・家具	20	メーター	31	旅客運送		
10	造紙・文具	21	機械修理	32	金融保険		
11	石油コークス	22	其他製造	33	不動産		

b. 水需要原単位および汚濁負荷排出原単位の推計

中国水資源公報³⁾のデータを基にして、遼寧省の水需要原単位の推計をおこなった。ただし、用水量は農業、工業、生活の3分類のみであるため、工業用水は全国の部門別工業用水量のデータに基づき配分することで推計した。また、建設業および第三次産業(表2-1中27-38)については、従業者数と1人当たりの生活用水量から、水需要量を推計した。汚濁負荷排出原単位は、水需要原単位に排出係数および汚濁負荷濃度を乗じて求めた。排出係数は中国水資源公報³⁾の消耗率から設定した。汚濁負荷濃度は中国環境年鑑⁴⁾のCODデータをベースに推計した。

c. CO₂排出原単位の推計

中国能源統計年鑑²⁾の遼寧省のエネルギーバランス表(2000年)を基にして、エネルギー消費及びCO₂排出原単位の推計を行った。遼寧省エネルギーバランス表の部門分類は、6部門であるため、遼寧省統計年鑑⁵⁾の工業部門別燃料種類別消費量のデータで補正することで、詳細なエネルギー物量表を作成した。さらに日中共通IO表⁶⁾の燃料種類別発熱量を用いて、エネルギー物量表からエネルギーカロリー表を作成し、燃料種別炭素含有量(kg/kcal)をベースに、各部門別のCO₂排出表の推計を行った。これらのデータベースを用いて、CO₂排出原単位を設定した。

(2) 分布型インベントリーモデルを用いた環境技術シナリオ評価

1) 分布型インベントリーモデルの開発

産業別の汚濁負荷の発生量を算出する分布型の汚濁負荷イベントリーモデルを用いて、経済活動とのリンケージをもつ汚濁負荷量の分析モデルを開発することを想定して、産業区分46分類、地域区分31省市別に負荷量を計算している。中国では、汚濁負荷量のうち農畜産業(面源負荷ノンポイントソース)の占める割合が高いといわれている。過剰な施肥が最も大きな原因となるが、その作物別の内訳を明らかにした研究は少ない。そこで本研究では、農林水産業について農業3種(米、小麦、野菜、果樹、その他作物)、畜産業6種(豚、山羊・羊、その他家畜、豚肉、その他肉類、卵・牛乳)に区分し算出している。

2) メタン発酵施設を用いた環境負荷削減シナリオ評価(精査)

a. 中国におけるメタン発酵槽の普及と実態

中国のメタンガスの応用は70年代では殆ど農村での展開であった。建設された600万個のメタンガス発酵池は殆ど農村家用メタンガス発酵槽及び少量の大中型人間・家畜糞便メタンガス発酵槽であった。メタンガスタワーの設計と施工の基準が不統一で、円形から、長方形等各形状のものが有り、コンクリート、レンガ等各種材料のもの等様々な類型であった。

80年代に入ると、メタンガス研究に従事する科学技術者と現場の綿密な共同研究により、農村メタンガスタワーの設計、施工マニュアルを作った。現有のメタンガス発酵池の改良、改造、淘汰等を再編したと同時に、農村メタンガス生態農業モデルプロジェクトを推進した。例えば、広西の“養殖-メタンガス-植栽”三位一体モデル；gang州の“豚-メタンガス-果樹園”エネルギー生態モデル；遼寧省のプラチック、メタンガス発酵槽、畜舎とトイレ組み合わせの“四位一体”北方エネルギー生態モデル等がある。農村メタンガスと農業生態を緊密に連携させ、農村経済及び農業生産の発展を促進した。80年代の整頓と発展を経て、1992年には農村戸用メタンガス発酵槽は498万個に達し、大中型メタンガスプロジェクト439箇所、全国メタンガス発生量は12億 m^3 に達した。1997年末に、全国農村戸用メタンガス発酵池は638万個、大中型メタンガスプロジェクトは600以上あり、年間メタンガスは13億 m^3 に上った。

現在、中国の農村の戸用メタンガス発酵槽はいずれも三結合のメタンガス発酵槽、即ちトイレ、豚舎及びメタンガス発酵槽三者一体モデルで、人間・家畜の糞便が自動的にメタンガス発酵池に排出され、発酵後直接メタンガスとして利用され、簡便で経済的である。発酵の方式は基本的に間歇的に原料加入、半連続的な発酵となっている。年平均のメタンガス発生量は概ね $0.2m^3/m^3$ 以上である。6-8 m^3 のメタンガス発酵槽は毎年薪2000-2500kgが節約できる換算となる。糞便は発酵を通じて、除虫、殺菌効果があり、伝染病と寄生虫病の発病率が大幅に減少し、農村環境衛生が大幅改善された。また、メタンガス発酵槽を通じて、糞便が腐熟し、肥料としての効果があり、農作物の増産、病虫害の減少に寄与した。

中国における大中型メタンガスプロジェクトは、1936年に開始し、中華国瑞天然瓦斯総行寧波分行が建設した浙江舟山普陀山洪筏禅院内の125.172 m^3 のメタンガス発酵槽は炊事と照明に使われ、発酵原料は糞便、厨房廃棄物と青草となっている。本ガス発酵池は現在も原状のままである。1958年に広東の番禺で最大の農業メタンガスプロジェクトが建設され(番禺市橋メタンガス発電所)、容積3000 m^3 、44kWメタンガス発電機が稼動された。1964年に河南南陽メタノール工場で2000 m^3 の工業メタンガス発酵槽が建設され、メタノール廃液を利用してメタンガスを産出した。80年代にさらに2つ5000 m^3 の型工業メタンガス発酵槽を建設した。現在この工場にはメタンガスタワー容量

12000m³、貯蔵タンク30000m³、脱硫装置及び関連設備を持つことになった。年間産出メタンガス1200万m³、1日メタンガス4万m³余りを産出し、南陽市215機関と12751戸住民に燃料を提供している。また、メタンガスを利用して、CH₂Cl₂とCHCl₃を生産し、1993年の生産量は1020トンに達し、1000万元余りの価値に匹敵し、メタノール廃液の嫌気性消化後のCOD除去率84%以上、BOD除去率90.8%、浮遊物質除去率96.5%となり、環境汚染の低減にも寄与した。

南陽メタノール工場の大型メタンガスプロジェクト模範効果のもと、80年代には、多くの酒工場、糖工場、食品加工工場と畜牧舎に大中型メタンガス発酵槽を全国的に建設した。90年代に、大中型メタンガスプロジェクトの技術が成熟し、標準化レベルに達した。

b. 中国におけるメタン発酵技術の利点

中国の環境、エネルギー重視の傾向により、メタンガスプロジェクトは単にエネルギープロジェクトのみならず、環境、生態プロジェクト及び資源回収利用と緊密に連携した統合システムになっている。メタノール廃水、澱粉廃水からメタンガスを生産する場合、固液分離が応用され、固体廃棄物は飼料になり、廃液は嫌気性消化と好気処理の後排出することにより環境基準を満たすことができる。糞便、ごみは嫌気消化後無機複合肥料等になる。メタンガスプロジェクトはエネルギー效益のみならず、環境效益もあり、経済效益も高められ、この相乗効果がメタンガスプロジェクトの発展にも促進するものと考えられる。

メタンガスプロジェクトは中国での発展歴史が浅く、ヨーロッパより数十年遅れていたが、発展速度が速い。技術の面では、一部はすでに国際先進レベルに達している。メタンガスプロジェクトの各技術は現在成熟しており、国民経済発展と生活水準が高められ、環境保護に対する日増しの重視にしたがって、メタンガスプロジェクトは廃棄物の処理、エネルギーの回収の重要手段として、環境保護プロジェクトに欠かせない存在の一部となりつつある。鉱物資源の枯渇はいずれ発生し、廃棄物を利用し、生物エネルギーの開発は少量エネルギーの重要な役割の一部になることが期待される。

近年は生態農業の角度から、野菜ハウス大圃内で小型メタンガス発酵槽を建設し、メタンガスをベースとした生態循環の形成が可能である。特色として野菜を生産するのみならず、優質な有機肥料の提供、エネルギーの節約、コスト削減、無公害野菜の生産が可能となる等、多くの複合的効果を見込むことが可能となる。メタンガスの温室ハウス野菜生産中における综合利用の利点として、

- ① 温度を高め、エネルギーの節約： 温室ハウス野菜生産のキーは温度にある。従来の加熱方法ではエネルギー消費が高く、コストの増大、管理の複雑化が問題である。メタンガスの有効利用は簡便で、専門人員の管理が不要で、投資が少なく、受益期間が長い利点がある。また、メタンガスの熱量が高く、一般的に20900-23000kJ/m³、である。したがって5m³のメタンガス発酵槽の場合、1日メタンガスの生産量は4~5m³得られるため、9~10haの温室野菜ハウスで計算した場合、朝温度が最低時に点火すると、毎日11万kJの熱量が提供でき、ハウスの温度を2-3℃上昇させられる。凍害を防止し、生活にも便利をもたらす。
- ② 肥料の提供： メタンガス発酵層の残渣、廃液は優質な肥料を兼ねている。作物の糞や家畜糞尿及び人間の糞尿並びに生活ごみ等が発酵層で発酵を通じて、大量なメタンガスが産出し、メタンガス発酵槽中の嫌気環境は糞便中の大量な病原菌の活性を低下或いは死滅させ、優質

無菌な有機肥料となる。これらの有機質肥料のN、P、K含有量は明らかに高い。発酵を通じて糞の肥料は有効の窒素40%高められ、肥料効果が20%増加でき、土壌構造の改良、保水能力の増強が期待できる。また、発酵槽の廃液は豊富な可溶性無機塩類が含まれており、作物に吸収しやすい多様な栄養成分も含まれ、即効肥料としても使われている。この液体肥料は殺虫、除菌作用もあり、農薬使用量の減少にも寄与している。

- ③ 温室野菜ハウスの大気質量の改善：メタンガスは燃焼によって、CO₂とN₂ガスを放出し、ハウス内のCO₂とN₂濃度が増加し、ハウス内気体の肥料成分不足問題の解決に寄与する。温度が適切であれば、これらの化合物は糖に変化可能で、野菜の品質を高め、生産量を高める。試験の結果から、ハウス内に気体肥料の利用によって、キュウリ10%、唐辛子12%、トマト15%増産された。その他の野菜にも明らかな増産効果があった。しかし、野菜ハウス内の気体肥料使用時CO₂濃度は高すぎではいけない。1000-1500ppmの範囲内に制御すべきである。過量になると、増産どころか、植物の気孔を閉鎖させ、不良現象をもたらす。

農村の台所で薪をメタンガスに換えることによって、森林保護のみならず、“メタンガス生態農業” 総合利用技術の普及に伴い、農業発展及び農民の増収が見られた。1戸の農民8m³のメタンガス発酵槽を設けることによって、5人家族の照明、炊事に供用でき、毎年約4-5トンの木材、概ね3ム（15ム=1ha）の森林に相当する。貴州省では現在メタンガス発酵槽が13万個あり、毎年約60万ムの森林植被を保護することになる。貴州省は山が高く険しく、生態環境が大変脆弱の省であり年間数千万トンの土砂が長江と珠江に流入している。近年では貴州省でグリーンプロジェクトが展開され、長江、珠江上流等地区で集中的にメタンガス技術を推進し、長江と珠江のグリーンプロジェクトの一部となっている。2001年から中央政府は5000万元を無償で融資し、年間10万戸の農民がメタンガスを利用する計画を推進している。このようにメタンガス発酵槽およびメタンガス生態農業の普及は、長江上流域の汚濁負荷源の大多数を占めるノンポイント汚濁負荷源の削減に大きな効果が期待できる。

c. 技術評価方法

表 2 - 2 中国の養豚農家における規模別戸数

	万戸							
	総数	～5頭	～10頭	～20頭	～30頭	～50頭	～100頭	101頭以上
養豚農家数	13515.5	10457.5	2229	613.8	134.6	50.3	20	8.6
割合	100.0%	77.4%	16.5%	4.5%	1.0%	0.4%	0.1%	0.1%

出典：中国第一次農業普查資料

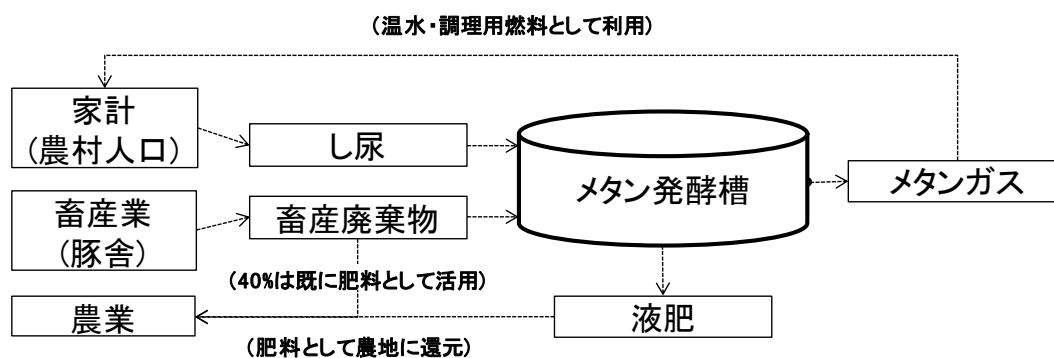


図 2 - 1 技術評価の模式図

技術の適用範囲とした産業は主に家計と畜産業である。家計については、全人口のうち農村人口のみを対象とし、畜産業では牛、豚、鶏と種々の家畜が対象となるが、これまでの導入実績から豚のみを対象とした。現在の家畜糞尿の堆肥化率について、文献より調査し発生量のうち40%はすでに農地還元されており残りの60%が野済みにされている。野済みされている家畜糞尿と処理されていない農村家計からの汚濁負荷について対象としている。野済み糞尿からの水系へのCOD、窒素流出率は40%、リン流出率は17%と設定している。

本技術が適用されてきた農家の規模を考慮すると、平均家畜頭数が10頭未満の小規模畜産農家が対象となる。中国第一次農業普查資料によれば(表2-2)、家畜頭数別の養豚農家戸数は、5頭の経営戸数が最も多く全体の77%を占めている。次いで5頭～10頭程度の経営体が多く16.5%を占める。これを豚の頭数に換算すると5頭以下農家で飼育される豚頭数は全体の約50%、5頭～10頭以下の養豚農家で飼育される豚頭数は23%を占めている。このことを基準値として、シナリオ1(50%の家畜で本技術を適用した場合)、シナリオ2(75%の家畜に本技術を導入した場合)の2つのシナリオを検討した。

ここでの評価項目については、農村家計、豚舎から排出される汚濁負荷量(COD、T-N、T-P)、メタンを活用することで削減されるエネルギー消費量、肥料を代替することで削減される窒素肥料、リン肥料量を対象とした。液肥となった全窒素、全リンについては全量農地に還元したと仮定している(図2-1)。

4. 結果・考察

(1) マクロインベントリーモデルを用いた環境負荷分析結果

1) 遼寧省の水需要構造

遼寧省の水需要構造（図2-2）を見ると、年間400億m³水需要が発生しており、150億m³が取水され、58億m³が排水されている。また、水需要の64%は製造業によるものであるが、再利用水の利用が進んでおり、取水量に占める製造業の割合は19%にとどまっている。

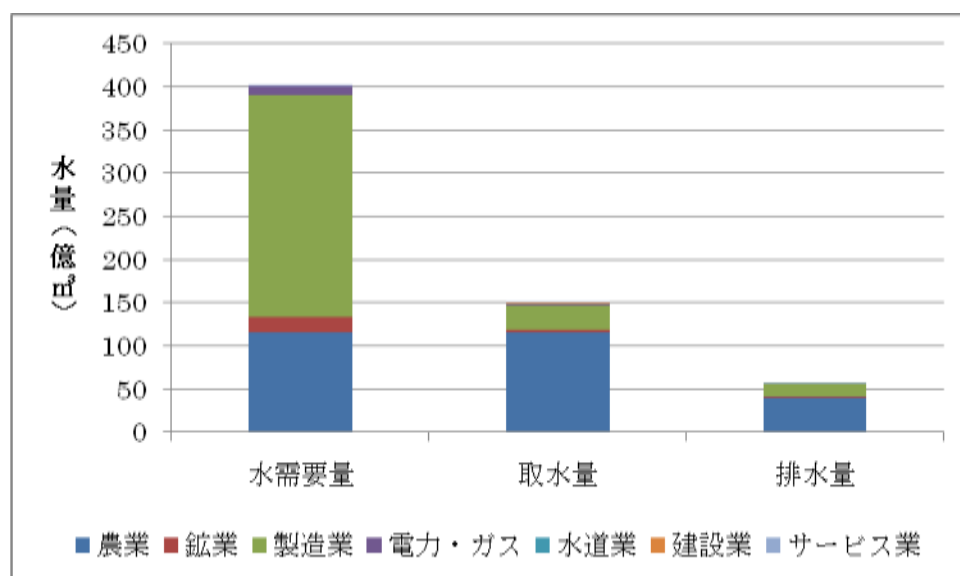


図2-2 遼寧省の水需要構造

2) 遼寧省の汚濁負荷排出構造

遼寧省ではCODが293万t-COD、T-Nが28万t-N、T-Pが3万t-P排出されるとの結果が得られた（図2-3）。どの汚濁物質も農業からの排出が最も高く、CODと燐の8~9割、窒素の6割が農業部門からの排出となる。窒素は製造業部門からも3割近くが排出されているため、結果として農業部門の割合が他の水質汚濁指標に比べて低くなっている。

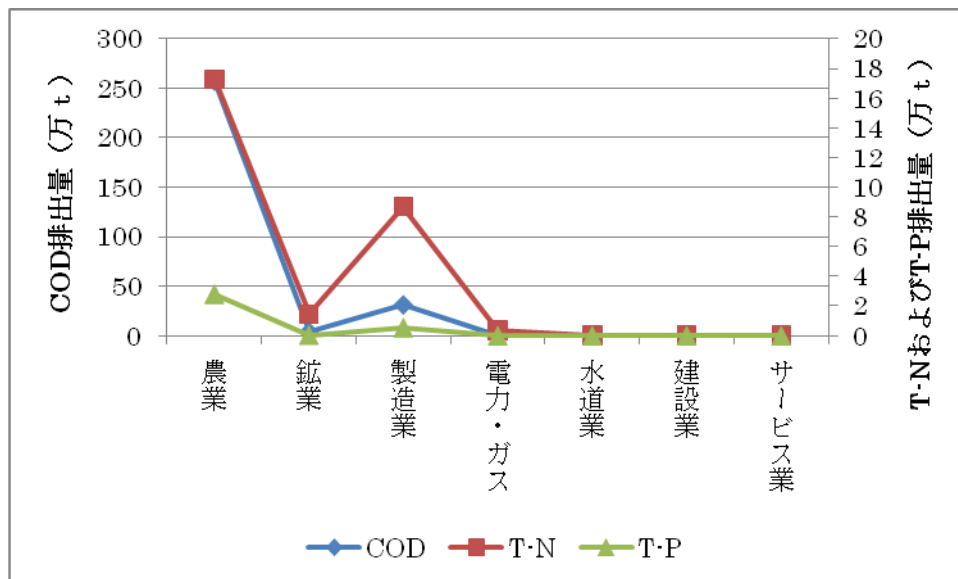
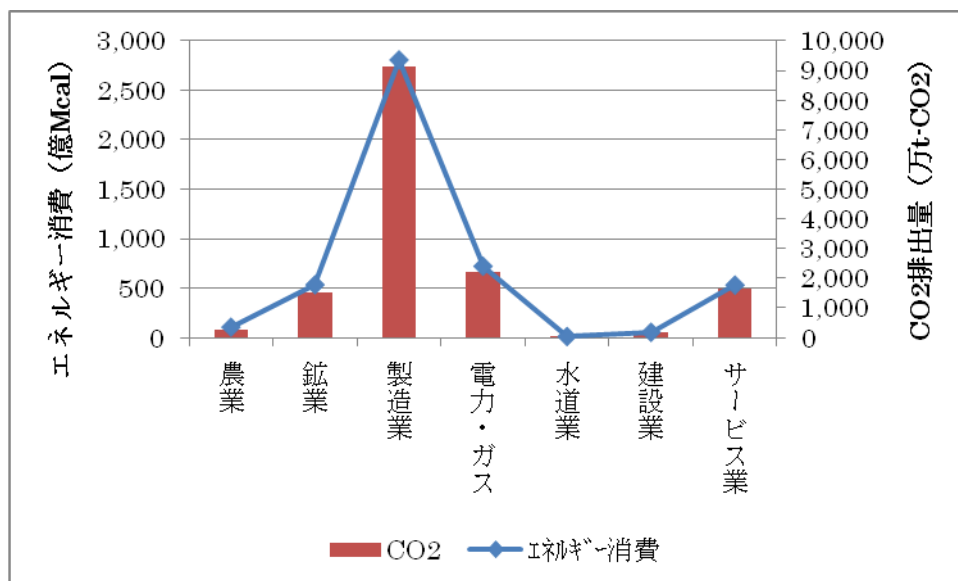


図 2-3 遼寧省の汚濁負荷排出構造

3) 遼寧省のエネルギー消費とCO₂排出

遼寧省のエネルギー消費は4700億Mcalのエネルギーを消費しており、それに伴い1.5億t-CO₂のCO₂が排出されるという結果が得られた(図2-4)。また、エネルギー消費、CO₂排出共に、製造業の割合が最も高く、約6割が製造業となる。

図 2-4 遼寧省のエネルギー消費とCO₂排出

4) 遼寧省のフットプリント分析

本研究で求めたフラックスデータに基づき、ウォーターフットプリントとカーボンフットプリントについて考察する。遼寧省のウォーターフットプリント(図2-5)では、生産活動により年間150億m³の水資源消費がなされており、内43%が域外で間接消費される(Virtual water export)。また、Virtual water exportの63%は国内貿易に起因する。一方で、遼寧省内の水資源消費の32%

に相当する水（External water footprint）を域外に誘発する構造にあり、その内77%は他省の水資源に依存している。しかし、Virtual water exportとExternal water footprintの差分をとると、ネットで17億 m^3 の水資源が遼寧省以外の地域で間接的に消費されており、78%は国際貿易によるものであることが明らかとなった。

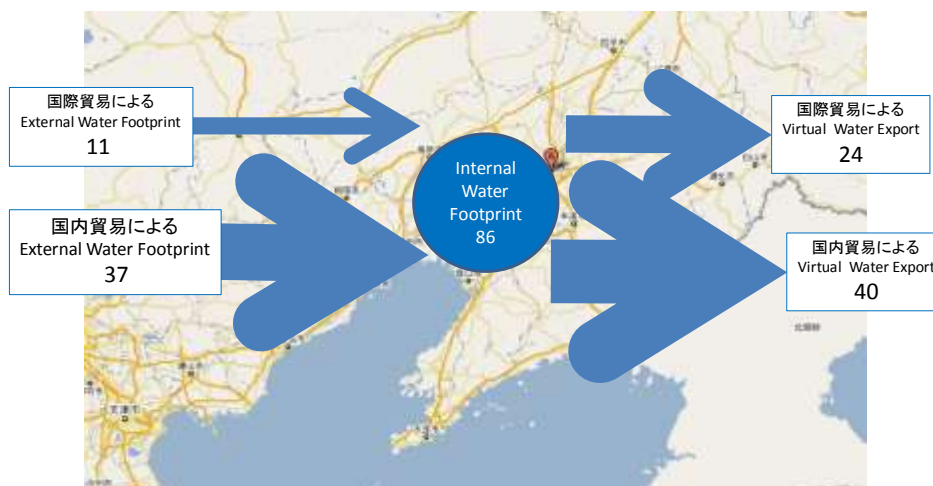


図 2 - 5 遼寧省のウォーターフットプリント（億 m^3 /年）

一方、遼寧省のカーボンフットプリント（図 2 - 6）については、生産活動により年間1.5億 $t-CO_2$ の CO_2 排出がなされており、内73%が域外で間接消費され、内63%は国内貿易に起因する。一方で、遼寧省内の CO_2 排出量の54%に相当の CO_2 をを域外に誘発する構造にある。しかし、国内貿易および国際貿易に伴うカーボンフットプリントの差分をとると、ネットで2883万 $t-CO_2$ となり、遼寧省内のカーボンフットプリントの71%に相当する CO_2 が、国内外貿易により遼寧省で発生していることがわかった。



図 2 - 6 遼寧省のカーボンフットプリント（万 $t-CO_2$ /年）

(2) 分布インベントリーを活用した汚濁負荷削減効果の評価

1) 分布型インベントリーを用いた地域別の汚濁負荷量推計

まず、開発した分布型のインベントリーを用いて長江流域の各産業の汚濁負荷発生量を分析した。長江流域の地域区分は図2-7のとおりである。

各地域のCOD発生量は、寸灘上流では22,100,000(t/yr)、寸灘から大通までの中流域(Ⅱ地域)では31,965,000(t/yr)、大通よりも下流域では10,226,000(t/yr)であり、中流域からの排出量が全体の約50%を占めている。各地域のCOD排出量を産業別に汚濁負荷量を比較すると、Ⅰ地域では、畜産業46%、耕種農業31%、Ⅱ地域では畜産業41%、耕種農業32%、Ⅲ地域では耕種農業53%、畜産業19%と畜産業、農業の占める割合が大きいことがわかる。

次に、窒素負荷総量を比較すると、寸灘上流(Ⅰ地域)の排出量は1,570,000(t/yr)、寸灘から大通までの中流域(Ⅱ地域)では2,400,000(t/yr)、大通よりも下流域(Ⅲ地域)では950,000(t/yr)であった。

各セクターからの排出量をみると、農業と畜産業の占める割合は総窒素排出量の50%以上を占めており、都市部でも32%の排出量を占めている。農業と畜産業の合計量はⅠ地域では810,000(t/yr)、Ⅱ地域では1,230,000(t/yr)、Ⅲ地域では450,000(t/yr)になる。主要な排出量を占める畜産セクターのシェアは、Ⅰ地域とⅡ地域において下流のⅢ地域よりも相対的に高い(それぞれⅠ:23%、Ⅱ:23%、Ⅲ:10%)。一方で、Ⅲ地域では、農業セクターから排出される窒素負荷量のシェアが高く38%に達する。このことから、長江流域に排出される汚濁負荷量のうち面源負荷量が依然として主要な要因であることが明らかにされた。

地域の燐負荷量の推計結果は、Ⅰ地域で210,000(t/yr)、Ⅱ地域で290,000(t/yr)、Ⅲ地域で100,000(t/yr)、Ⅲ地域のうち上海市で11,000(t/yr)であった。農業と畜産業の占める割合はいずれの地域でも80%を超えている。Ⅰ地域とⅡ地域で農業・畜産業が主な要因となり、Ⅲ地域では畜産業の割合が低下し農業セクターが最大の排出要因となることは、窒素負荷量の排出構造と同様の傾向である。下流域(Ⅲ地域や上海市)と上流地域(Ⅱ地域、Ⅲ地域)と比較すると、下流域では農業、畜産業以外の産業セクター排出割合が増加していた(図2-8)。

地域Ⅰ:最上流～寸灘上流, 地域Ⅱ:寸灘～大通, Ⅲ:大通～河口

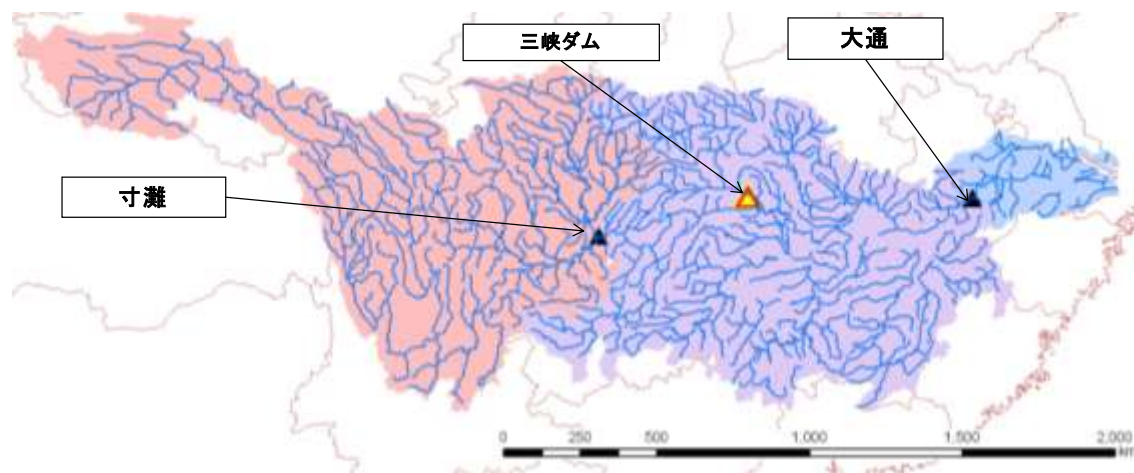
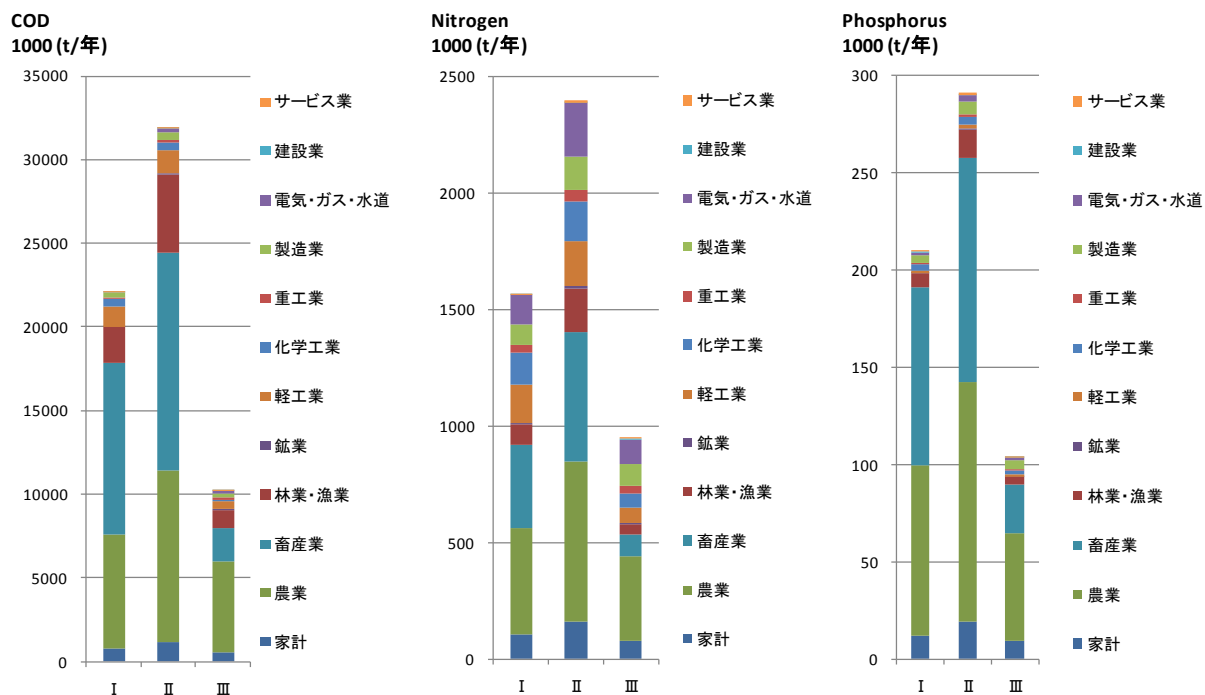


図2-7 長江流域の地域区分



I:寸灘上流, II:寸灘~大通, III:大通下流

図2-8 分布型インベントリを用いた長江各流域の汚濁負荷発生量評価

2) 小規模メタン発酵技術を用いた汚濁負荷の削減効果

5頭から10頭程度の小規模の豚舎から排出される畜産廃棄物のうち、農地還元等で有効利用されていると考えられる分を差し引いた残渣物を、小規模メタン発酵施設を用いて処理し、さらに家計から排出されるし尿を加えて処理した場合の、汚濁負荷削減効果（COD、T-N、T-P）について評価をおこなった。その結果を表2-3に示す。

CODについて、畜舎の豚数が0頭~5頭程度の畜舎すべてに本技術が導入できたと仮定した場合（技術普及率50%シナリオ）、農村家計および畜産業から排出されるCODは、I地域で31%、II地域で29%、III地域で21%程度削減できる可能性が示唆された。また0頭~10頭までの豚舎のすべてに本技術を適用するとした場合にCODはI地域で47%、II地域で44%、III地域で31%削減できることが明らかにされた。畜産業のうち豚飼育への依存の高いI地域（最上流から寸灘地域）では、汚濁負荷を削減するためにより効果的である。全窒素、全燐についても、同様の傾向であり、いずれのシナリオにおいても家計、畜産系から排出される汚濁負荷量のうち40%~50%の改善効果があることが明らかにされた。

次に市県別に、小規模メタン発酵技術適用の有無によってCODの排出量を評価したものを図2-9に示す。図2-9の上図は、現在の畜産業、農村家計からの汚濁負荷排出量を示しているが、寸灘よりも上流側のI地域、寸灘~大通間のII地域において、畜産業が集中するために年間10,000t以上のCOD負荷量の高い地域が散見される。これに対して小規模のメタン発酵技術を用いたシナリオ（図2-9下図）では、30%~50%程度の汚濁負荷量の削減が見込まれることが明らかにされた。

表 2 - 3 メタン発酵技術を用いた汚濁負荷削減効果

COD排出量および削減率

技術普及率	0%	50%	75%	100%	
I	排出量(t/yr)	967136	665729	515025	364321
	削減率(%)		31	47	62
II	排出量(t/yr)	2928147	2074332	1647425	1220517
	削減率(%)		29	44	58
III	排出量(t/yr)	831691	660505	574912	489319
	削減率(%)		21	31	41
合計		4726974	3400566	2737362	2074157

T-N排出量および削減率

技術普及率	0%	50%	75%	100%	
I	排出量(t/yr)	96054	60541	42784	25028
	削減率(%)		37	55	74
II	排出量(t/yr)	290198	189669	139404	89139
	削減率(%)		35	52	69
III	排出量(t/yr)	82330	62180	52105	42030
	削減率(%)		24	37	49
合計		468581	312389	234293	156197

T-P排出量および削減率

技術普及率	0%	50%	75%	100%	
I	排出量(t/yr)	11363	7150	5043	2937
	削減率(%)		37	56	74
II	排出量(t/yr)	34317	22406	16450	10495
	削減率(%)		35	52	69
III	排出量(t/yr)	9731	7345	6152	4959
	削減率(%)		25	37	49
合計		55411	36901	27646	18391

技術普及率0%シナリオ

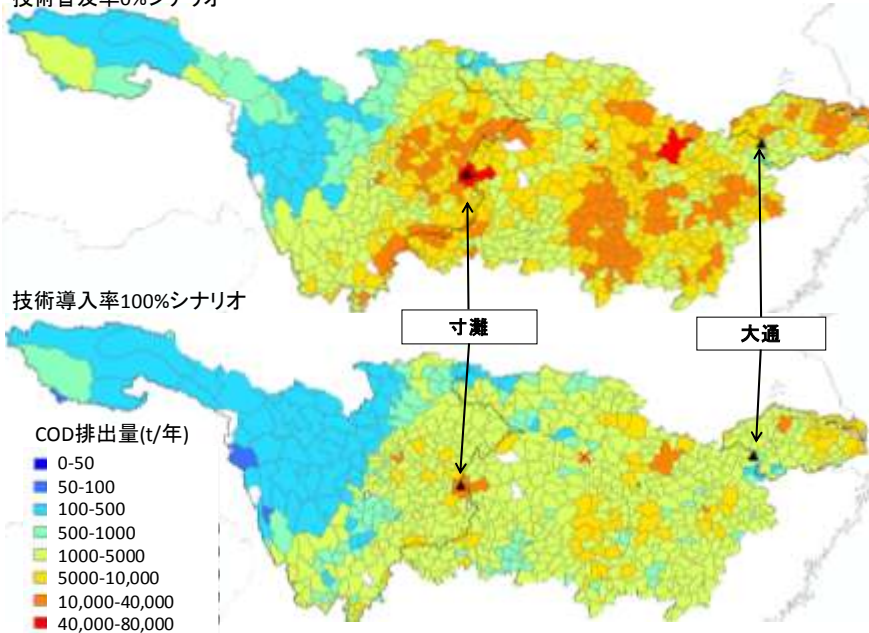


図 2 - 9 長江流域の汚濁負荷物質(COD)削減効果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

近年、産業連関分析を用いて水資源に対するインベントリーの構築が進められているが、汚濁負荷まで内包した研究成果はかなり少ない状況であり、本研究成果の学術的な意義は大きい。これまで当該地域において面源負荷量の推定を実施してきた研究は数多くあるが、全産業を対象にした汚濁負荷インベントリー開発は研究例が少なく学術的な価値が高いだけでなく、水質汚濁物質の排出総量規制等の政策的な応用が期待される。

(2) 環境政策への貢献

三峡ダム上流域、太湖流域等における水質汚濁物質の排出総量規制等の政策的な応用が期待される。また、近年発展途上国を中心に人畜一体型のメタン発酵装置の活用したCDM事業において、環境負荷削減の科学的根拠となる方法論を開発した。今後、国内外の学会および雑誌を通じて、成果の広報・普及に努める。

6. 引用文献

- 1) 遼寧省産業連関表 (1997, 内部資料)
- 2) 国家統計局工業交通統計司, 国家發展和改革委員会能源局編 (2004) 中国能源統計年鑑 2000-2002, 中国統計出版社
- 3) 中華人民共和国水利部 (2001) 中国水資源公報2000, 中国水利水電出版社
- 4) 中国環境年鑑編集委員会編 (2001) 中国環境年鑑2001, 中国環境年鑑社
- 5) 遼寧省統計局 編 (2003) 遼寧省統計年鑑2003, 中国統計出版社
- 6) 通商産業研究所, 慶応義塾大学産業研究所, 中国環境問題産業連関分析研究会 (1995) 日中共通分類エネルギー消費・大気汚染分析用産業連関表 (改訂版)

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<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) Kazunori Tanji、Tomohiro Okadera、Masataka Watanabe: An analysis of dependency and eco-efficiency about water consumption and environmental loads by interregional trade in China、USSEE 2009 Conf. Sci. Policy Sustainable Future、2009

2) Tomohiro Okadera、Masataka Watanabe、Nobuhiro Okamoto: A regional inventory of water demand and water pollutant discharge in the Yangtze River and China as a whole based on an inter-regional input-output analysis model. 18th Int. Input-Output Conf、Abstracts、44-45、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)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない