

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 18 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560549

研究課題名（和文） マテリアルフロー分析を組み込んだ栄養塩管理方策の評価手法の開発

研究課題名（英文） Nutrients Pollution Control in a Watershed Scale by Material Flow Analysis

研究代表者

荒巻 俊也 (ARAMAKI TOSHIYA)

東洋大学・国際地域学部・教授

研究者番号：90282673

研究成果の概要（和文）：農業、畜産業や水産業（養殖）における食品の生産およびその消費に伴う窒素のマテリアルフロー分析を実施し、流域における栄養塩管理方策の包括的な評価手法を確立した。さらにタイ国チャオプラヤ川下流域を対象地域として適用し、下水道の導入や栄養塩の循環利用による汚濁負荷発生へ与える影響や、マテリアルフロー全体に与える影響を推定した。

研究成果の概要（英文）：This study has developed a methodology to evaluate nutrient pollution control measures in a watershed scale, using Material Flow Analysis on food production and consumption. Then, it was applied for the lower reach of Chao Phraya Basin to discuss on performances by installation of wastewater treatment systems and reuse of nutrients in agricultural sectors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：マテリアルフロー分析、栄養塩、窒素、食料生産、食料消費、流域

1. 研究開始当初の背景

公共用水域の水質改善にむけてさまざまな取り組みが行われてきたが、湖沼や内湾などの閉鎖性水域ではCODや全窒素・全リンなどの環境基準の達成率は依然低い状況にあり、その原因となる栄養塩（窒素、リン）に対しての更なる対策が必要な状況である。対策による効果や影響を事前に評価するために、集水域からの汚濁負荷を推定し、閉鎖性水域における水質シミュレーションを実施する必要がある。しかしこれまでの水質シミュレーションでは、そもそも社会全体として

栄養塩の環境への排出をできるだけ小さくするような対策は考慮できない。

このような対策や社会経済の変化による影響を評価するためには、流域全体の栄養塩のフローを解析し、さまざまな対策を実施した結果そのフローが変化したことにより、どのように水系への排出汚濁負荷が変化するかを推定する必要がある。マテリアルフロー分析（以下、MFA）は、地域スケールでの栄養塩を対象とした解析にも利用されているが、個々のフローの推計精度が十分とは言えず、特に栄養塩の発生源として重要と考え

られる農地のマテリアルフローの解析に課題を残していた。

2. 研究の目的

栄養塩の負荷発生源として重要と考えられる農地や畜産におけるマテリアルフローについて、さまざまなタイプの農地における窒素やリンの収支を参考に解析手法を精査するとともに、農地や畜産による食料生産、食品の加工・消費、廃棄物管理や下水処理を構成要素としたマテリアルフロー分析手法を組み込んだ流域における栄養塩管理方策の包括的な評価手法を確立する。

さらに下水の高度処理など発生源での対策のみならず、食品廃棄物の資源化など上流側での対策による汚濁負荷発生へ与える影響や、マテリアルフロー全体に与える影響を推定する。

3. 研究の方法

(1) 対象地域

本研究で対象として選定したのは、タイ国 Chaophraya 川下流域のデルタ地帯を含むエリアである。Chaophraya 川と Tachin 川から構成され、タイ湾に流れ込んでいる。この地域は、タイ国の首都バンコクを含む地域であり、人口が多く、製造業などの産業が盛んな地域であるとともに農業活動も活発な地域であり、排出汚濁負荷がタイ湾の水質悪化、特に富栄養化を引き起こしている。対象地域には 11 の県 (province) が含まれており、これを空間単位として MFA を実施する。解析は雨季と乾季に分けて実施し、基準年として 2007 年を採用した。

(2) マテリアルフロー・モデルの構築

MFA を実施するにあたって、対象地域における対象物質のマテリアルフロー・モデルを構成する要素を抽出し、その構造をモデル化する必要がある。ここでは窒素を対象として、食料生産および消費という観点から重要と考えられる要素として、農地における穀物などの生産、畜産、食品加工、消費者である家庭、水供給、排水処理、廃棄物処理、農地以外へのノンポイントの窒素負荷を取り上げて、構造モデルを構築した。ここで取り上げた要素では、肥料や大気降下、原料など窒素のインプットとなり、製品、排水、廃棄物、大気への排出が窒素のアウトプットとなる。これらのインプットやアウトプットを統計データや文献資料を用いて定量的に推定し、それらの結果を用いて地域全体での窒素フローを描く。

4. 研究成果

(1) 地域全体における窒素フロー

対象地域の年間の窒素フローの結果を図 1 に示す。フローの大きさの観点から大きいものを挙げていくと、養殖用の餌の利用に伴う窒素の流入 (107 千トン)、養殖用の餌の養殖池への沈降 (90 千トン、ただしこの値は養殖における収支の余剰分として計算されたものである)、農作物の生産 (86 千トン)、農地への施肥 (75 千トン)、家畜の餌の利用に伴う窒素の流入 (62 千トン) などである。特に、水産養殖は餌として大量の窒素の利用をしている一方で、その約 5% しか水産品に窒素が移行していない。農地は、肥料以外に大気からの降下物、窒素固定、および農業用水からも窒素を受け取っており、合計すると 166 千トンと最も多くの窒素を受け入れている。

投入した窒素に対する製品へ移行した窒素の比率で見ると、農地では肥料投入量以上の窒素分が製品に移行している。稲作が中心であることが高い窒素の移行率の理由として考えられる。畜産では 0% 程度、水産養殖では前述したように 5% 程度となっている。このような生産物 (105 千トン) の最終製品への移行 78 千トンと 75% 程度となっている (Agro-industry における原材料から製品への移行率)。さらに、家庭部門 (Domestic sector) で消費された食品に伴う窒素 (52 千トン) のうち、80% 程度の 40 千トンが水系への排出となっている。

対象地域から大気、水系、土壌への窒素の排出量は、それぞれ、33 千トン、117 千トン、129 千トンとなっており、大気への排出量は他の 2 つと比べると小さい。その負荷の主要因は、農地における脱窒や農畜産物加工時の大気中へのロスである。畜産や廃棄物埋立からの排出も多いのではないかと予想されたが、今回の結果では小さかった。ただし、これらについてはデータが不足していることもあるので、解釈に注意が必要である。

水系への排出量では、生活排水、養殖からの排水、畜産排水が主要因となった。農地も 8 千トンと小さい値とは言えないが、前述の 3 項目と比較すると小さい値となった。対象地域は稲作が主体であるため、農地からの排水への窒素負荷はそれほど大きくなかったものと思われる。

土壌への排出量では、水産養殖が 7 割を超え、農地からの排出がそれについだ。ただし、土壌への排出量は、各要素の収支に残りとして計算されている場合が多いため、他と比べて数値の精度が劣るものと考えられる。土壌へ排出後、養殖であれば底泥は浚渫されることが多く、浚渫泥の管理がどうなっているかが重要な要素となるが、ここではそこまで含まれていない。さらに、土壌へ蓄積された窒素は地下水を汚染することが考えられる。

(2) 地域による窒素排出量の違い

対象地域に含まれる 11 県ごとに水系への排出量とその内訳を図 2 に示す。排出量が多いのは、Nakhonpathom、Bangkok、Suphanburi、Samutprakarn の 4 地区で対象地域の排出量の 7 割程度を占めている。しかし、その排出内訳は大きく異なる。最大の排出量である Nakhonpathom では畜産排水がその半分以上を占め、次に水産養殖からの排水の寄与が大きい。次に大きい Bangkok では、生活排水(下水道なし)が 75%を占め、下水道からの排出をあわせると 90%を超えている。Suphanburi では家畜排水からの排出がやや多いものの、農地排水、養殖からの排水、食品加工における排水、生活排水が同程度の排出量となっている。Samutprakarn では 70%が養殖排水からの負荷であり、生活排水からの負荷を合わせると 95%となっている。これはそれぞれの地域の窒素フローの特色を表しており、都市域であるバンコクでは生活系、沿岸部である Samutprakarn では水産養殖、内陸部の Suphanburi では農業が、各地域のフローの主たる構成要素となっているためである。

(3) 発生源ごとの帰属排出負荷量

マテリアルフロー分析では、窒素負荷排出源での活動で生産されるものを消費側まで含めて計算しているため、最終消費により引き起こされる窒素排出負荷量を推計することができる。ここでは、対象流域内で生産される農産物や加工生産物の最終消費を流域内と流域外に分けて、どの程度の窒素排出負荷が域外での消費を満たすために排出されているかを推計する。

表 1 流域内外の消費に伴う一人当たり窒素排出負荷量

	合計	域内消費 用	域外消費 用
生活系	8.50 (3.10)	—	—
農業系	14.4 (5.25)	7.45 (2.72)	6.94 (2.53)
工業系	1.77 (0.65)	0.915 (0.33)	0.853 (0.31)

単位は gN/人・日 (kgN/人・年)

表 1 は、生活系、農業系、工業系からの一人当たり排出負荷量を、農業系、工業系について、域内消費用と域外消費用に分けて試算した値である。一人一日当たり窒素排出負荷量は約 24g であり、そのうち域外消費用の生産に伴う排出負荷量は約 8g と 32%を示していた。この地域は、タイ国において、人口が多いためだけでなく農業など食糧生産において重要な位置を占める地域であり、かなりの窒

素負荷が域外の消費のために排出されている状況が理解できた。

(4) 窒素負荷削減シナリオの評価

ここでは、排水処理に関するシナリオと、排水や廃棄物の再利用に関するシナリオを設定して、その効果を検討する。具体的には、以下に示す 2 通りのシナリオである。

シナリオ 1：下水処理普及シナリオ

生活系排水において小規模も含めた下水処理施設の導入と全量の処理を行う。その際、処理施設における窒素除去率を 30%とする。また、畜産排水への処理も検討し、処理効率が 20%から 40%に増加するものとする。さらに、埋め立て地浸出水も処理施設を設けて適切に処理を行う。

シナリオ 2：再利用シナリオ

対象流域内において、窒素成分の農地還元を行い、化学肥料の利用量を削減する。具体的には、畜産排水や水産養殖の排水における排出窒素成分を農地に還元することとした。農地還元は、同じ県内でのみ行われるものと仮定している。

これら 2 つのシナリオとシナリオ 1、2 を組み合わせたものについて、窒素排出負荷量を排出源ごとに図 3 に示す。現時点では、生活系排水、養殖業排水および畜産排水による窒素負荷が多く、それぞれ 31%、28%、21%を占めている。下水処理普及シナリオは、生活系排水における窒素負荷は削減されるが下水処理施設における窒素除去率が低いため、下水処理水として多くの窒素が排出されてしまう。そのため、畜産排水も 4 分の 1 程度窒素負荷が削減されているものの、全体としての削減率は 15%程度である。一方、再利用シナリオでは畜産排水の 3 分の 2 程度、養殖業排水でも 3 分の 1 程度の窒素負荷を削減することに成功しており、全体としても 24%の負荷削減が見込まれる状況である。また、これらを組み合わせたシナリオでは、全体として 36%の削減効果が見込まれている。

(5) 下水道が窒素フローに与える影響

流域全体からの窒素排出負荷量に対する下水道施設に流入する窒素負荷量の比率、および下水道施設で除去された窒素量との比率をそれぞれ、流域からの窒素負荷削減に対する下水道貢献ポテンシャル、下水処理貢献率とする。表 2 に前述のシナリオについて、それぞれの値を計算したものを示す。下水道普及シナリオにおいて資源循環への貢献ポテンシャルは大きく高まるものの、ここでは窒素除去率が低いため、下水処理貢献率はそれほど大きくなっていない。

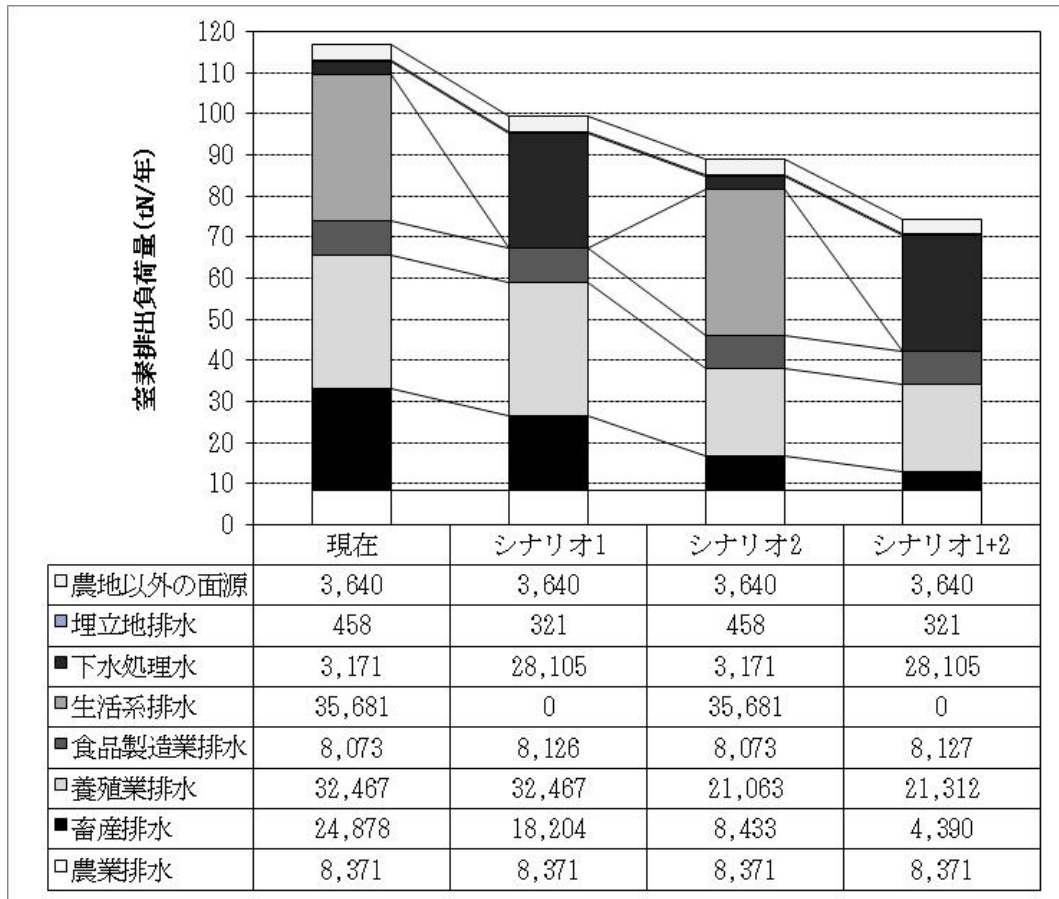


図 3

シナリオごとの窒素排出負荷量の違い

単位はグラフは千トン/年、下の表はトン/年である。

表 2 各シナリオにおける下水道貢献ポテンシャルと下水処理貢献率

	下水道貢献ポテンシャル	下水処理貢献率
現在	3.8%	1.1%
シナリオ1	40%	11.6%
シナリオ2	5.0%	1.5%
シナリオ1+2	53%	15.5%

ここでのシナリオでは、下水道において除去した窒素を農地に還元することを想定していないが、仮に農地へ還元した場合に、農地や畜産、養殖などへの窒素投入量との比を計算することにより、下水道による窒素循環率が計算できる。現在は、窒素投入量が 28 万トン程度あるため、仮に現在除去している窒素を農地に還元した場合でも 0.5%にしかないが、シナリオ1で下水道普及を仮定すると 4.1%程度の窒素が下水道により循環されることになる。

(6) 計算結果の不確実性について

各窒素負荷排出源ごとに、排出量の推定に用いたパラメータについて、データの出典ごとにその不確実性の仮定を行い、それぞれの

排出源ごとの排出量の推定結果について、比較を行った。その結果を図4に示す。図中の数字は不確実性の比率を表すが、埋立地排水や農業排水の比率が大きく精度が低いが、計算結果に与える影響としては、生活系排水や畜産排水の推定精度を向上することが重要であることがわかる。

(7) 成果の位置づけと今後の展望

マテリアルフロー分析を用いることにより、当該流域の窒素フローに下水道などの栄養塩管理方策が与えている影響を定量的に表現することができ、水質管理のための窒素負荷削減への貢献ばかりでなく、窒素循環に与えるポテンシャルや実際の貢献状況を明らかにできることを示した。マテリアルフロー分析は産業エコロジーの分野で議論が進んできたものであるが、具体的な流域の水質管理における有用性を示すことができたものとする。

一方で(6)で示したように、その精度や信頼性については不十分な部分もあり、流域における栄養塩のフローについてさらなる調査研究が必要であろう。

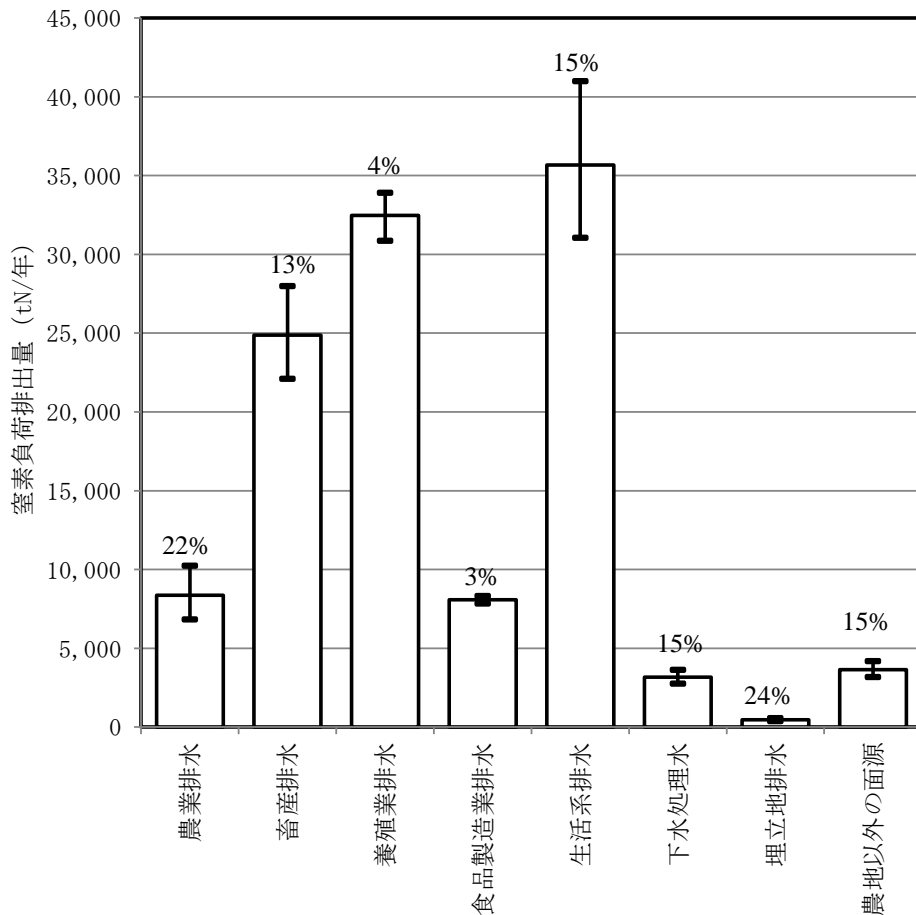


図 4 窒素負荷排出量の不確実性の評価

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- ① T. Aramaki 他、Nutrient pollution problems in Southeast Asian countries、10th international symposium on Southeast Asian Water Environment、2012 年 11 月 9 日、ハノイ (ベトナム)
- ② P. Leelapanang、T. Aramaki、K. Kurisu 他、Nitrogen Flows Assessment of Chaophraya River Delta: Material Flow Analysis through Food Production and Consumption Activities、The 4th IWA-ASPIRE conference and exhibition、2011 年 10 月 5 日、東京
- ③ P. Leelapanang、T. Aramaki、K. Kurisu 他、Integrated Nitrogenous Pollution Management in Chaophraya Delta, Thailand、Urban Environmental Pollution 2010、2010 年 6 月 21 日、ボストン (アメリカ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒巻俊也 (ARAMAKI TOSHIYA)
 東洋大学・国際地域学部・教授
 研究者番号：90282673

(2) 研究分担者 (0)

(3) 連携研究者

栗栖 (長谷川) 聖 (KURISU KIYO)
 東京大学・先端科学技術研究センター・
 講師
 研究者番号：00323519