

一般論文

上海市の都市化が 地域窒素収支に及ぼす影響の解析と対策提案 —社会経済要因を物質循環に結びつけて—

劉 晨^{*†}・林 良嗣^{**}・安成 哲三^{***}

摘 要

本研究は、急速な都市化による人々の生活スタイル（食生活、家庭衛生設備、交通手段）と生産スタイル（農業、工業、サービス業など）の変化が、都市生態システムの窒素循環にどれほど影響を及ぼしているかを定量的に評価し、物質循環の視点から地域環境問題の診断・予防を行うことを目的とする。メガシティである上海市を一例として取り上げ、窒素収支モデルや産業連関分析や現地調査、統計解析などの学際的アプローチによって、農業、工業、家庭から水域へ流出する窒素負荷量の時系列変化を推定した。

その結果、(1) 人為的反応窒素（化学肥料、大気沈降、生物窒素固定および移入食料・飼料）の平均合計投入は、1980年の 3.28×10^5 t-N から、1990年には 3.48×10^5 t-N に、2000年には 3.55×10^5 t-N に増加したが、2008年には 3.23×10^5 t-N に減少したこと；(2) 陸域窒素負荷量に構造的な変化が発生し、化学肥料窒素が窒素負荷の最大要因であったものの、大気からの窒素沈降量と移入食料・飼料からの窒素投入量が年々増加し、地域窒素負荷源が化学肥料から大気沈降と食料・飼料の移入へシフトしたこと；(3) 第二次産業からの排水による窒素負荷が90年代後半はピークに至ったが、2000年以降収まるようになったこと；(4) 農地からの窒素流出量が減少した反面、都市部から水域への窒素流出量が増加したこと；(5) 80年代には上海で生産した肉類や魚は同地域の消費量より多く、一部は域外へ移出していたが、90年代になると域外から移入することになったことなどが明らかとなった。

また、上海市のみを観察した場合には河川への潜在窒素負荷量は2000年以降減少傾向にあり、水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言え、新たな環境対策の提案が急務である。

キーワード：都市化、窒素収支、水環境、生活・生産スタイル、上海市

1. はじめに

都市化とは、人口が都市部に集中する過程であり、人々の生産と生活様式が農村型から都市型へと変化する歴史的な過程でもある。都市化は人類の進歩において必然的に通過する過程であるが、その過程では地域の窒素などの物質循環のバランスを崩し、環境資源へ大きな影響を与えていることを理解

する必要がある（図1）。

例えば、都市化に伴い、人々の生活は都市型生活スタイルへ移りつつあり、肉類などの蛋白質摂取量の増加、人間の排泄物に含まれる窒素含有量の増加、生活排水増加による水域への窒素負荷量の増加へと連鎖する¹⁾。また、水洗トイレや下水道などの普及により、従来肥料として土壌に還元されていた排泄物は生活排水として水域へ排出される割合が

2013年5月31日受付、2014年6月9日受理

* 上智大学地球環境研究所、〒102-0081 東京都千代田区四番町4

** 名古屋大学大学院環境学研究科、〒464-8601 愛知県名古屋千種区不老町D2-1 (510)

*** 総合地球環境学研究所、〒603-8047 京都府京都市北区上賀茂本山457番地4

† Corresponding author: g.chen.liu@gmail.com

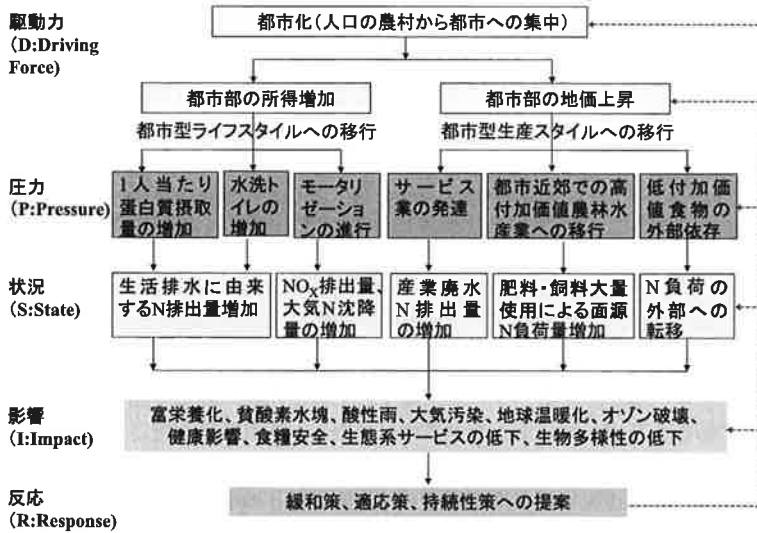


図1 都市化が環境へ窒素負荷を増加させるメカニズム

増加傾向にある。しかし、下水処理施設の未整備や処理能力・運営予算の不足により、大部分の生活用水は処理されずに直接河川へ放出されており、人間の排泄物に多く含まれている窒素は河川・湖沼・海洋の富栄養化を引き起こす原因となる。また、都市化により1人当たりの収入が増加するとともに車の台数が増える。車から排出するNO_xは大気汚染や酸性雨に繋がり、また、大気沈降により陸域の窒素負荷源となる。さらに、地域が都市化されたとき、多くの植生や表土は道路、駐車場、歩道などのような不透水性の表面で置き換えられるので、雨に含まれている窒素や、屋根、道路、地表に蓄積された窒素は排水路、下水道(雨水の排水管)や地下水を通して、最終的には河川、湖沼、貯水池、海に流される。このように、都市型生活や生産スタイルの変化は地域の窒素などの物質循環のバランスを崩し、富栄養化、貧酸素水塊、酸性雨、大気汚染、地球温暖化、オゾン層破壊、健康への影響、食糧安全、生態系サービスの低下、生物多様性の低下などを引き起こす可能性があると考えられる。

中国では、都市化率(全人口に占める都市常住人口の比率)は1949年の10.6%から2009年には47%と、前例のないスピードで急速に増加している。都市の数は、1949年初頭の132から2009年の655まで増加した。さらに、2009年の「中国都市発展報告書」によると、2020年までに中国人口の約50%が都市に居住するようになり、2050年には75%に達するだろうと予測されている。中国の都市

化の急速な進展による環境圧力は、中国の環境問題の重要な要素の一つとなっている。都市部での人口増加や生活・生産スタイルなどの変化が地域の物質循環にどのような影響を与えるか、その影響のメカニズム解明と改善策の検討が必要とされている。

著者らは、これまで中国農村部を主なフィールドとして、継続的に中国にある典型的農業生態系において、現地調査を実施し、食生活や農作や人間排泄物の排出ルートなどの人間活動およびその変化が農業生態系の水・窒素循環に及ぼす影響を定量的に解明してきた¹⁻³⁾。これらの研究により、農業生態系における生活・農業生産スタイルおよびその変化が地域負荷構造の変化に与える影響を定量的に評価する方法論が確立された。また、都市化に伴う食生活の変化が地域窒素負荷に与える影響を明らかにするため、2009年に、上海市の市区、新区(1992年の区設置以降大規模開発が行われている上海新都心地域)、および郊外/農村部在住の18歳以上の成人から、それぞれランダムに抽出した150人ずつ(計450人)にアンケート調査と聞き取り調査を実施し、食物から摂取する窒素の量、今後の消費指向、排泄物に含まれる窒素の排出ルートおよび生活排水の排出ルートの現状把握を行った⁴⁾。

さらに、都市化に伴う産業構造の変化が地域窒素負荷に与える影響を明らかにするため、国家統計局投入産出調査室によって公表された1997年、2002年、2007年の中国産業連関表および中国環境統計年鑑を用いて、第二次産業・サービス業の部門毎の

排水・水質汚染物質 (COD, TN, TP) の排出強度 (単位 GDP 当たりの排水・水質汚染物質の量) を算定し、上海市における都市化に伴う水質汚染物質排出量およびその変化を明らかにした⁵⁾。

本研究は、現在急速な成長下にあるメガシティである上海を一つの代表的な都市生態システムの例に取り上げ、これまで確立した方法論や得られた窒素収支モデルに必要な各パラメータを都市生態系に発展させ、急速な都市化に伴う人々の生活スタイル (食生活, 家庭衛生設備, 交通手段) 及び生産スタイル (農業, 工業, サービス業) の変化が地域の窒素循環や水環境にどれほど影響を及ぼしているかを総合的に検討し、物質循環の視点から地域環境問題の診断・予防的治療を行うことを目的とした。

2. 研究の手法とデータベースの構築

都市生態系の物質循環は外部に依存度が高く、システム内の循環が少ないため、地域窒素収支モデルを図2のように改良した。各フローの計算方法やパラメータの設定や参考文献などは表1に纏めた。

窒素収支モデルにある各フローの時系列変化を分析するため、上海市における1980 - 2008年の各年の人口や農業生産や家庭食料消費などの統計データや産業連関表や現地調査を元に、上海市における窒素収支に関するデータベースを構築し、窒素収支モデルや産業連関分析や統計解析など学際的アプローチによって、農業生産, 工業・サービス部門, 家庭消費から水域へ流出する窒素負荷量の時系列変化を推定した。本研究に用いた主なデータ, 主要パラメータおよびその出典などを表2に纏めた。

農業生産を中心とする各フローの解析の詳細については参考文献1 - 2, 住民の日常生活調査の調査内容やデータ解析の詳細については参考文献3 - 4を参照されたい。また, 産業連関表による各産業部門の排水・水質汚染物質の排出量の推定の詳細については参考文献5を参照されたい。本論文では, 関係ある部分のみを簡単に記述することとする。

なお, 国家統計局投入産出調査室によって公表された産業連関表は1997年, 2002年, 2007年のみであるため, 1980年と1990年は1997年の産業構造

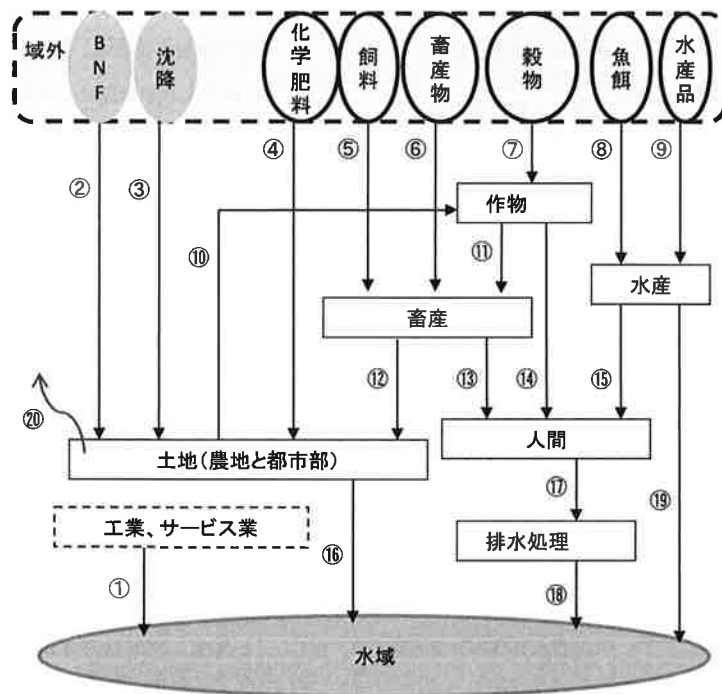


図2 上海市における窒素収支モデル図

域外からの窒素のインプットとしては、生物窒素固定量 (BNF, ②), 大気沈降水量 (③), 窒素化学肥料投入量 (④) および域外からの食料・飼料の流入量 (域内窒素生産量より窒素消費量が多い場合, ⑤~⑨) であり、窒素のアウトプットとしては、作物による収穫窒素量 (⑩), 脱窒やアンモニア揮散などの大気への排出量 (⑳), 河川への流出量, および域外への食料・飼料の流出量 (域内窒素消費量より窒素生産量が多い場合, ⑤~⑨) である。水域への窒素負荷量としては、家庭排水 (⑱), 産業排水 (①), 農地と都市部の流出 (⑰) と養殖池からの流出 (⑲) がある。

表1 各フローの計算方法と主要パラメータの設定およびその出所

番号	内容	計算方法	出所, その他
①	産業排水に由来する窒素負荷量 (ton/年)	産業部門毎の水質汚染物質 (TN: Total Nitrogen) 排出強度 (ton/万元), 単位 GDP 当たりの TN 排出量) × 上海市の産業部門毎の GDP (万元/年)	排出強度の計算は Liu and Huang (2014) ⁵⁾ を参照。
②	BNF: 生物窒素固定量 (ton/年)	各農産物の窒素固定量 (ton/ha/年) × 各農産物の作付け面積 (ha)	各農産物の窒素固定量: Liu et al. (2008b) ²⁾ を参照
③	窒素沈降水量 (ton/年)	窒素沈降水量 = 乾性降水物 + 湿性降水物 乾性降水物 = 湿性降水物 湿性降水物 = 単位面積降水水中窒素の量 (kg/ha) × 土地面積 (ha) / 1000	Zhou et al. (2008) ⁷⁾ を参照し, 以下のように設定した。 都市部: 78.42kg/ha (2008年), 54.89kg/ha (2000年), 39.21kg/ha (1980年と1990年)
④	窒素化学肥料使用量 (ton/年)	化学肥料使用量 × 肥料純度 × 窒素含有率	肥料純度: 24% 窒素含有率: 82%
⑤	飼料用穀物窒素移入・移出量 (ton/年)	域内で必要となる飼料用穀物窒素量 - 域内飼料用穀物窒素生産量	+ は域外から移入; - は域外へ移出
⑥	肉類窒素移入・移出量 (ton/年)	人々の肉類窒素消費量 - 肉類窒素生産量	+ は域外から移入; - は域外へ移出
⑦	食用穀物窒素移入・移出量 (ton/年)	人々の食用穀物窒素消費量 - 食用穀物窒素生産量	+ は域外から移入; - は域外へ移出
⑧	養殖用飼料窒素消費量 (ton/年)	域内養殖品に含まれる窒素量 (ton/年) / 飼料窒素吸収率	飼料窒素吸収率: 18% (本研究では養殖用飼料の統計データが無いため, 全てが域外から製品として購入されたと仮定した。)
⑨	水産品窒素移入・移出量 (ton/年)	人々の水産品窒素消費量 - 域内水産品窒素生産量	+ は域外から移入; - は域外へ移出
⑩	作物窒素生産量 (ton/年)	各作物生産量 × 窒素含有率	各作物窒素含有率: Liu et al. (2008b) ²⁾
⑪	穀物飼料窒素必要量 (ton/年)	各畜産飼養頭数 × 1頭当たり穀物飼料必要量 × 穀物窒素含有率	1頭当たり穀物飼料必要量: Liu et al. (2008b) ²⁾
⑫	家畜排泄物窒素量 (ton/年)	各家畜頭数 × 1頭当たりの排泄物窒素量	1頭当たりの排泄物窒素量: Liu et al. (2008b) ²⁾
⑬	動物性食物からの窒素摂取量 (ton/年)	1人当たり動物性食物からの窒素摂取量 (kg/年) × 人口数 (人) / 1000	劉 (2013) ⁴⁾ を参照。 都市と農村で1人当たり窒素摂取量が異なるため別々に計算して和をもとめた。
⑭	植物性食物からの窒素摂取量 (ton/年)	1人当たり植物性食物からの窒素摂取量 (kg/年) × 人口数 (人) / 1000	劉 (2013) ⁴⁾ を参照。 都市と農村で1人当たり窒素摂取量が異なるため別々に計算して和をもとめた。
⑮	水産品からの食物摂取量 (ton/年)	1人当たり水産品からの窒素摂取量 (kg/年) × 人口数 (人) / 1000	劉 (2013) ⁴⁾ を参照。 都市と農村で1人当たり窒素摂取量が異なるため別々に計算して和をもとめた。
⑯	農村部・都市部からの窒素流出量 (ton/年)	農地への人為反応性窒素インプット総量 × 農地窒素流出率 + 農地以外地域の窒素沈降水量 × 都市部窒素流出率	農地窒素流出率は25%, 都市部窒素流出率は100%と仮定した。
⑰	し尿として家庭排水からの窒素排出量 (ton/年)	⑭ + ⑮ + ⑯	家庭内窒素消費量と家庭排水からの窒素排出量は等しいと仮定した。
⑱	排水処理後の窒素排出量 (ton/年)	⑰ × 排水処理率 × 窒素除去率	1980年, 1990年, 2000年と2008年の排水処理率は都市地域ではそれぞれ30%, 40%, 50%と80%; 農村地域ではそれぞれ10%, 20%, 30%と50%。窒素除去率は都市地域ではそれぞれ10%, 30%, 50%と70%; 農村地域ではそれぞれ10%, 20%, 30%と50%と設定した。Liu and Huang (2014) ⁵⁾ を参考。
⑲	養殖業からの窒素排出量 (ton/年)	投入飼料窒素量 - 域内水産品窒素生産量	養殖品に吸収されなかった飼料に含まれる窒素は養殖池の放水の際周辺水域へ排出されると仮定した。
⑳	脱窒やアンモニア揮散など大気への窒素排出量 (ton/年)		本研究では考慮していない。

表 2 本研究で用いた基礎データ

項目	単位	出所	
農業統計データ	穀物 (米, 麦, トウモロコシ, その他), 豆類 (一般, 大豆, ピーナッツ), 薯類, 油料作物, 綿花, 糖料作物, 蔬菜, 果物 作物面積, 水田, 畑, 耕地面積 化学肥料使用量	ton ha ton	中国国家统计局 中国農村統計年鑑 (1980年, 1985年, 1990年, 1995年, 2000年及び2008年)
家庭日常消費品購入量	穀物類, 豚肉, 牛肉, 羊肉, 家禽肉, 卵類, 水産品類, 乳類や乳製品, 食物油, 蔬菜, 果物	kg/年/人	上海市統計年鑑 (1980年~2010年)
人口	総人口, 都市人口, 農村人口	person	中国国家统计局 各省統計年鑑 (1980, 1985及び1995) 人口センサス (1990及び2000)
気象観測データ	年間降水量	mm	中国国家気象局
	降水中 NO ₃ ⁻ と NH ₄ ⁺ の濃度	mg/L	国家気象観測ネットワーク
土地利用	水田, 畑, 森林, 草地, 都市用地, 荒地など	km ²	中国国家資源・環境情報センター 土地利用データベース
経済	産業連関表	万元	国家統計局投入産出調査室 1997年, 2002年と2007年
環境	各産業部門の排水量及び TN 排出量 各産業部分のエネルギー別消費量	万トン	中国環境統計年鑑 (1980年, 1985年, 1990年, 1995年, 2000年及び2008年)

に準じ、2000年は2002年の産業構造に準じ、2008年は2007年の産業構造を基にして、1980年、1990年、2000年と2008年の第二次産業・サービス業の各産業部門の排水・水質汚染物質 (TN, Total Nitrogen) 排出量を推定した。さらに、各産業部門からの大気汚染物質 NO_x 排出量は各部門のエネルギー消費量に各エネルギーの NO_x 排出原単位⁹⁾を乗ずることにより求めた。

ただ、産業連関表分類およびデータアクセシビリティの限界を考慮し、排水・水質汚染物質排出量に関しては、17の産業部門 (鉱業, 食品製造業, 繊維製造, 皮革&毛皮製品, 紙製紙業, 石油製油, 化学, 非金属&金属製品, 金属加工, 金属製品, 機械&電気&通信設備, 電気&ガス&水の製品およびその提供, その他の製造業, 建築業, 交通&運送&通信業, 卸売&小売業, 他の第三次産業), 大気汚染物質排出量に関しては、6の産業部門 (農林水産, 工業, 建築業, 交通&運送&通信業, 卸売&小売業, ほかの第三次産業) に分割して計算を行った。

3. 都市化に伴う生活・生産スタイルの変化による地域窒素収支への影響解析

3.1 生活スタイルの変化が地域窒素負荷構造の変化に与える影響

2009年の現地調査では、急速な都市化により、上海の食生活は従来の穀物を中心とするものか

ら、副食や動物性蛋白食品などが増加し、食生活の「多様化」、「西洋化」、「高級化」、「簡便化」が進み、量的にも質的にも大きく変化したことが明らかとなった。上海市区、新区の都市部では農村部より食事の種類が多く、また、米、大豆、新鮮野菜など伝統食物は農村部より少なかったが、朝食のパンや昼食のヌードル、肉 (特に牛肉や鶏肉)、牛乳やヨーグルト (以前の消費量は非常に少なかった)、チーズ (ほとんど輸入品)、肉類加工品、豆腐加工品、エビ・カニ・貝などの高級魚介類、ケーキや菓子や酒や飲料などの嗜好品の消費量は農村部より多かった。朝食は以前の「お粥+漬物」から「牛乳+パン+ハム」へ変化し、昼食・夕食のおかずは豚肉スライス、豆腐、搾菜、白菜がほとんどであったが、近年はさまざまな加工食品 (中食) や飲料や果物も食卓に加えるようになってきていることがわかった。

上海市三地域における食物からの1人当たり1日窒素摂取量は上海市市区では19.37g、上海市新区では16.46g、郊外/農村では13.03gであった。市区と新区では肉類から摂取する量が最も多く、25%以上を占めていた。穀物から摂取する蛋白質は両地域とも22-23%であった。一方、郊外/農村では、穀物から摂取する蛋白質が最も多く、33%であり、肉類からは19%であった。ただ、肉類、卵、魚介類、乳製品を合わせた動物性蛋白食品の摂取率は、都

市より農村の方が著しく増加している。(都市では1980年の13.68%から2010年の28.93%に;農村部では1980年の4.65%から2010年の22.09%に)。

また、2000年以降家庭での食物消費量が大きく減少した。都市部での減少は主に食品加工工業の振興や飲食業の中食と外食(特に昼食)の増加によるものであり、農村部では主に農業近代化の普及により労働量が減り、食物摂取量が減ったことによるものである。

1980 - 2010年の上海市における都市部と農村部の一般家庭の1人当たりの主要食物(穀物類、肉類、卵類、魚介類、野菜類、果物類、乳類、食物油の8分類)購入量の統計データを基に家庭内窒素消費量を計算し、その家庭内窒素消費量と家庭排水からの窒素排出量(⑰)は等しいと仮定した場合、上海都市部と農村部で、1980年にはそれぞれ4.21 kg-N/人/年と6.01 kg-N/人/年、1990年には4.03 kg-N/人/年と5.71 kg-N/人/年、2000年には4.20 kg-N/人/年と5.88 kg-N/人/年、2008年には3.33

kg-N/人/年と4.81 kg-N/人/年の窒素がし尿として家庭から環境へ排出されていることになる。ただし、食物購入量とは一般家庭で消費する直接消費であり、パンなどの加工品や外食などが入っていないため、1人当たりの各食物のトータルの摂取量ではなく、家庭内食物消費状態を表している。そこで、各年の都市人口と農村人口を掛けると、家庭からし尿として排出される窒素の量は1980年には4.19 kg-N/人/年、1990年には6.61kg-N/人/年、2000年には7.36kg-N/人/年、2008年には6.79kg-N/人/年となった。また、自家用トイレや排出ルート状況により、表2に示している計算方法で排水処理後の窒素排出量(⑱)を求めると、1980年の4.12万トンから1990年の6.01万トンに増加していることがわかった。この増加は主に都市部の人口増加によるものである。また、2000年以降は排水処理施設の建設や処理技術の改良により、窒素排出量は大幅に減少したことが分かった。

3.2 モータリゼーションの進行による大気環境への影響

1990年から2008年までの5年毎の農業・工業・建築・交通・小売・その他の各産業からのNO_x排出量を図3に示す。2002年頃から、交通部門からのNO_x排出量は工業部門を上回り、その後急速に増加していることがわかる。続いて、上海市周辺気象局の降水中のNO₃⁻とNH₄⁺濃度の観測値を図4に示す。2000年以降NO₃⁻とNH₄⁺濃度は両方とも増加する傾向にあることがわかる。ここで、1980年から2010年間の上海市における主な交通手段の数の変化を図5に示す。バイク(ほとんどが電動バイク)の数は90年代後半から急速に増加し、2005年頃に頭打ちとなった。バスの数は90年代前半から急速に増加している。自家用車は2001年か

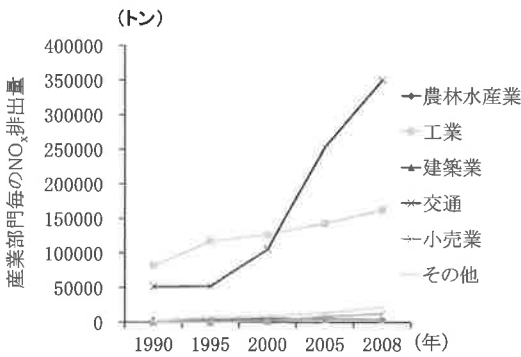


図3 各産業部門からのNO_x排出量

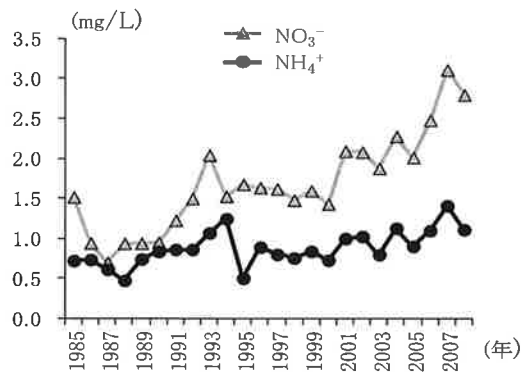


図4 降水中のNO₃⁻とNH₄⁺濃度の観測値

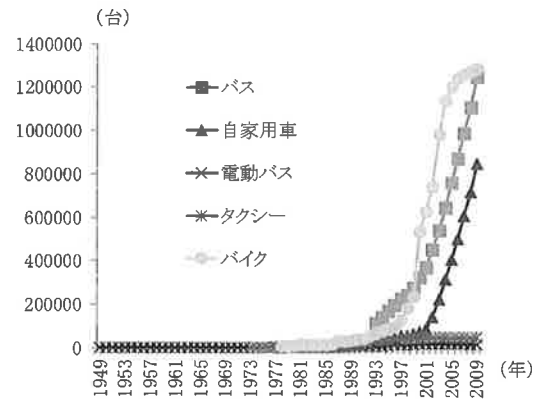


図5 主な交通手段の数の時系列変化

ら急激に増加している。これらの結果は、バスや自家用車の急増に伴い、大気へのNO_x排出量が増加し、大気からの窒素沈降量を増加させた可能性が非常に高いことを示している。

3.3 生産スタイルの変化が地域窒素負荷構造の変化に与える影響

上海市の土地利用変化を解析した結果、都市面積の拡大に伴い、農地面積や農業生産構造は大きく変化していることがわかった。1990 - 2005年の都市面積の増加分の約7割は水田の都市化によるものである。また、穀物総生産量は90年代後半の250万トンから2002年の100万トンまで減少し、その後横ばい状態となっている。一方、高付加価値の温室野菜や果実栽培や養殖池が増加し、一次生産よりも二次生産に重点が移されるようになった。家畜飼養の形態も、各家庭で飼養されていた豚や鶏や水牛は大規模な畜舎飼養へと変わってきている。

また、米の消費については、上海市地元産の米の需要が減少し、他地域（例えば中国東北産のお米がよく売られている）から移入した米の消費が多くなっている。一方、上海農村部で生産されたお米は食用から地酒生産用へと変化している。

さらに、住宅地と農地の分離や農村労働者の高齢化による労働力の不足などにより、農村部では、土地改良のために、人間・家畜排泄物の一部は農地（主に住宅の近くにある野菜畑）に戻されてはいるが、500kg/ha以上の化学窒素肥料が使用されており、化学肥料に強く依存する農業生産が行われている

ことがわかった。

図6は第二次産業・サービス業からの排水・TN排出総量を示すが、この図から、1997年から2007年までに急速に減少したことがわかった。この排水・TN排出総量が減少した主な原因は、次のようになる。

(1) 産業用水のリサイクル率が1992年の41%から、2002年の47%、2005年の58%に増加することによって、産業排水量が低下した。

(2) 上海政府が強力な対策を取り、水質汚染物質を制御した。例えば、生物化学的酸素要求量(BOD)の約25%を生み出している数カ所のパルプ工場が、1980年代と1990年代に閉鎖された。食品、皮革、紙、医薬産業は、濃縮有機排出物を排出しているが、これらの産業に対して、上海市環境保護局は、1990年代中頃、前処理を行うよう強く指導し、同時に、点在していた産業単位を工業団地に移転させるよう、強く指導した。

(3) これらの規制努力に加えて、上海政府は、数多くの下水処理プラントおよび市全土にわたる下水排水網を確立・管理した結果、産業水質汚染物質の制御が、特に1997年以来、強化された。下水処理プラント数は、1997年から2002年までの間に、22から31に増加し、2007年には45まで増加した。到達可能な排水処理能力は、2000年の100万m³/dayから、2008年の673万m³/dayまで増大した。2009年には、約78%の産業排水が処理されるようになった。

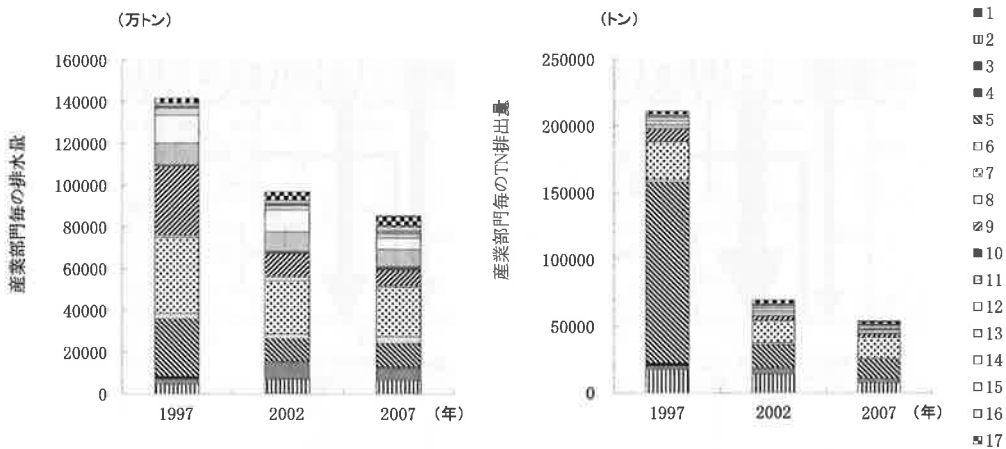


図6 第二次産業・サービス業からの工業排水・TN排出量

(1: 鉱業, 2: 食品製造, 3: 繊維製造, 4: 皮革, 毛皮, 及びその製品, 5: 製紙, 及び紙製品の製造, 6: 石油精製, コークス, 7: 化学製品, 8: 非金属鉱物製品, 9: 金属加工, 10: 金属製品, 11: 機械, 電気, 通信機器, 12: 電気, ガス, 水道の生産・供給, 13: その他の製造業, 14: 建設, 15: 運輸, 通信, 16: 卸売, 小売業, 17: その他の産業)

部門毎の直接排水量をみると、紙製造業、化学、金属製造、サービス業部門に集中していることがわかった。特に汚染物質 TN 排出量は紙製造業に集中している。紙製造業は1997年には最も高いTN排出量を占めていたが、紙生産量の低下及び排出強度の減少により、2002年以降は劇的に減少したことがわかった。一方、サービス業からの排水やTN排出量が増加する傾向にある。

3.4 陸域窒素負荷構造の変化

1980年から2008年までの10年毎の農業・工業・生活などの人間活動による上海市水域への潜在窒素負荷量を図7に示す。その特性は、次のように要約できる。

(1) 人為的反応窒素（すなわち、化学肥料、大気沈降、生物による窒素固定および移入食料・飼料）の平均合計投入量は、1980年の 3.28×10^5 t-N から、1990年には 3.48×10^5 t-N に、2000年には 3.55×10^5 t-N に増加したが、2008年には 3.23×10^5 t-N に減少した。化学肥料窒素は、窒素負荷の最大要因であったが、総投入量に占める割合は1980年の62%から、1990年には57%、2000年には46%、2008年には34%に減少した。その一方で、大気沈降による窒素投入量と食料・飼料移入量の総投入量に占める割合は1980年の15%と18%から、1990年には14%と25%、2000年には20%と31%、2008年には31%と32%に増加している。大気沈降量の増

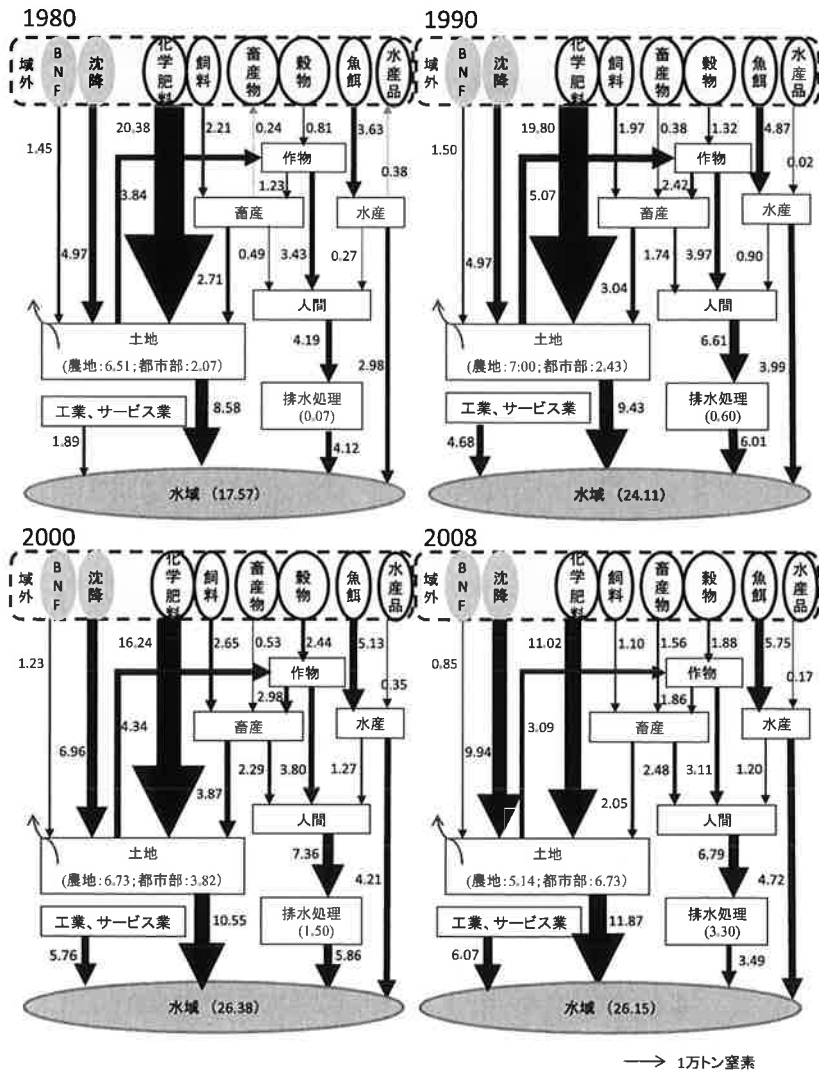


図7 上海市における陸域窒素負荷構造の変化

加は自動車の使用の増加によるものと考えられている。一方化学肥料窒素の減少と移入食料・飼料の増加の主な要因は都市面積の拡大による農地面積・農業生産の縮小によるものである。

(2) 水域への窒素負荷総量(図2の①, ⑬, ⑱と⑲の和)は2000年当りにピークに至り、その後減少傾向にある。そのうち、土地からの窒素流出量は総量の約4~5割、工業・サービス業は1~2割、家庭排水は1~2割を占めている。

(3) 農地からの窒素流出量が減少した反面、都市部から地面や河川のコンクリートなど人工物被覆によって水域への窒素流出量が増加した。農地からの窒素流出量の土地から窒素流出総量(図2の⑬)に占める割合は1980年の76%から1990年の74%、2000年の64%、2008年の43%まで減少した。一方、都市部からの窒素流出量は1980年の24%から2008年の57%まで増加した。

(4) 工業・サービス業(特に紙と紙製品の製造業; 図2の①)からの排水による窒素負荷量は1997年の 2.11×10^5 t-Nから、2002年には 6.95×10^4 t-Nに、2007年には 5.39×10^4 t-Nへと劇的に減少した。その減少は前述したように製造業からサービス業への産業の構造的変化、工場排水処理技術の改良および工場の外部への移転によるものである。ただ、サービス業からの排水や窒素負荷量が増加する傾向にある。

(5) 食料需給については1980年には肉(図2の⑥)や水産品(図2の⑨)などの生産量が消費量を上回り、域外へ移出されていたが、90年代より域外から移入する事態になった。食料や飼料の移入は上海で消費される窒素が他の地域に依存していることを意味している。

(6) 急速な人口増加と生活水準向上によって、家庭排水からの窒素負荷量(図2の⑰)は増加しているが、2000年以降は排水処理率や処理能力の向上により水域への窒素負荷量(図2の⑱)が減少している。

(7) 養殖漁業(図2の⑲)も一つの大きな窒素負荷源であり、水域への窒素負荷総量の約2割前後を占めている。

3.5 上海市内および周辺地域の水環境の変化

1982 - 2005年の上海市の水質観測データによると、市内・郊外地域にある主要河川の水質は2000年前後から改善しつつあるが、周辺農村地域の水質は悪化している⁸⁾。また、1986 - 2007年の「上海市環境質量報告書」に発表された黄浦江上流水源地(上海市の西南辺縁部)の水質状況(図8)によると、1990年以降はCOD(化学的酸素要求量)などの

各指標は悪化傾向にあり、特にDO(溶存酸素、数値が低いほど水質が悪い)は低下し、2005年以降は環境基準Ⅳ類¹⁾にまで悪化した。COD_{Mn}(過マンガン酸カリウムによるCOD)、BOD、NH₄-Nは90年代後半に一度ピークに達した後、一旦は減少傾向になったが、2000年前半から再び増加傾向となり、2007年には、COD_{Mn}とBODは環境基準Ⅲ類¹⁾に分類され、富栄養化の原因となるNH₄-NはⅣ類¹⁾となった。いずれにしても上海市における生活用水の水源地の水質として望ましくない状況である。

3.6 他地域・他生態系への負荷移転

前述したように、汚染が深刻な一部の工業(製紙業、化学工業など)は賃金高騰や上海市の汚染源抑制政策、産業構造変化などの影響を受け、周辺の中大都市、農村または海外へ移転している。

また第二次産業のみではなく、食料生産も地元で生産せず、域外へ移出する状況へと変化しつつある。例えば、窒素負荷量の多い家畜飼養のほとんどは、近年上海市農村部から他地域へ移転される傾向にある。このことから、窒素の負荷が大都市から中小都市、農村へ移転する「汚染転移」が発生していると考えられる。

さらに、長江における流量や窒素負荷量の長期変動は、夏季の東シナ海大陸棚域における表層塩分の低下、表層低塩分水中のDIN(溶解性無機態窒素)濃度の上昇に影響しているという研究報告もある^{9, 10)}。

つまり、都市部の窒素負荷問題はローカルな環境問題に留まらず、水や大気の循環によってグローバルな環境問題に拡大し、海洋生態系や森林生態系、土壌生態系など広範囲に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、上海という大都市だけを観察した場合には、一見水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域や他の生態系を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言える。

4. 窒素収支解析に基づく都市化対策の提案

本研究は、世界に注目されているメガシティー上海市を例として、都市を一つのエコシステムとして捉えて、急速な都市化による人々の生活スタイル(食生活、家庭衛生設備、交通手段)や生産スタイルの変化が都市生態システムの窒素循環に及ぼす影響を定量的に評価した。都市化に伴って、生活・生産スタイルが大きく変化し、それが地域の窒素負荷構造に大きな影響を与えることが明らかとなった。また、今後上海市において、特に郊外/農村部

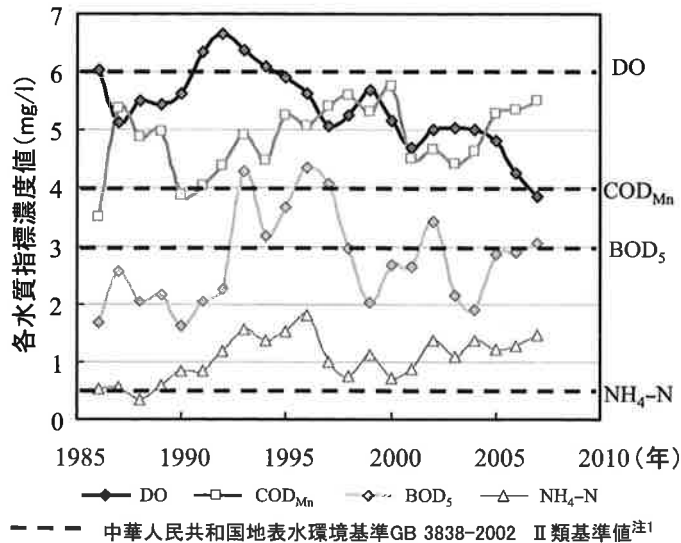


図8 上海市黄浦江上流の水質変動

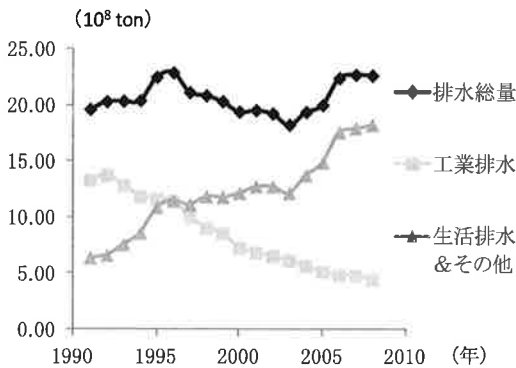


図9 上海市における工業・生活排水の時系列変化

の食物消費構造は動物性食物や野菜果物の割合が増加する傾向にあり、人々の食生活の変化により地域への窒素負荷量はさらに増加する傾向にある。なお、自家用車の利用も今後増加する傾向にあり、エアロゾルによる大気汚染や気候変動、また大気沈降により陸への窒素負荷の増加が懸念される。

また、上海市統計年鑑によると、1999年以降、総GDPに占めるサービス業の割合は第二次産業を追い抜き、2008年には約6割を占めるようになった。さらに、1996年以降、生活排水量などは工業排水量を上回り、2008年には総排水量の80%を占めるに至っている(図9)。都市人口の増加及び一人あたりの家庭水消費の増加は生活排水の増加を引き起こしていると考えられる。つまり上海市では産業構造の変化により、「工業汚染」から人口集中・大

量消費に基づいた「都市型汚染」へ変化しているといえる。

これまでに上海市政府は積極的にTop-down式の大膽な水質汚染「治療」をたくさん実施し、一部水域では水質改善が見られたものの、周辺地域の湖ではアオコが、東シナ海では赤潮や大型クラゲが頻繁に発生している。グローバルな水・大気循環によって、中国国内のみではなく、より一層広域化した環境問題が発生する可能性が示唆されている。

これらの解析結果に基づく、この地域の新たな環境対策としては、(1)他地域・他生態系への窒素負荷移転を防止するための総合型流域管理、(2)都市中心地域の点源汚染について、下水処理に窒素・リンの高度除去処理技術の導入、(3)農地からの面源汚染については過剰化学肥料農業からの脱出、および地域内窒素循環に基づく「循環型社会」の形成、(4)市民参加による低窒素負荷社会の形成(トップダウンだけでなくボトムアップの政策立案と市民参加型の実践)、(5)市民への正しい情報の伝達および環境教育の普及、(6)国際的枠組みへの参加、例えば、東シナ海の水質汚濁問題の解決など周辺諸国との連携、などが必要と考えられる。

5. ま と め

本研究で示した解析手法は、都市化が環境へ及ぼす影響評価だけではなく、地域の環境政策および地域の持続可能な発展を検討するのにも極めて重要である。これまで都市化の問題は、工学、自然科学、社会科学など、それぞれの分野で別々に取り組まれ

てきた。しかし、自然科学分野では人為要因を詳細に取り扱うことは少ないため、必ずしも現実に沿った結果とはならず、その成果を政策や制度に直接反映させることは困難である。一方で、社会科学の分野では、制度変更による自然界への波及メカニズムを詳細に扱うことは少ないため、社会科学の分野で最適と考える都市化の対応策は、部分的な対応策でしかない可能性がある。

本研究は、産業構造の変化や生活スタイルの変化などの社会経済の要素と、自然現象としての窒素循環の変化との関係を総合的に分析することにより、自然科学分野と社会科学分野の融合を試みた。今後は、産業構造の変化や生活スタイルの変化などが大気、土壌の窒素循環に与える影響を分析に取り入れ、より総合的な改善策や適応策を提示し、都市化全体をより俯瞰的に考慮した統合的な対応策を検討できるアプローチを構築していきたい。

なお、ここで求めた水域への窒素負荷量は各窒素負荷源から水域へ排出する潜在窒素負荷量であり、土壌や河川、あるいは排泄物貯留・運搬中の脱窒、揮発などは考慮していない。また、家庭内窒素消費量と家庭排水からの窒素排出量は等しいと仮定しているため、家庭からの食品残渣や残飯などが多い場合は家庭排水からの窒素負荷量を過大に評価している可能性がある。一方、生活雑排水の影響を考慮していないため、家庭排水からの窒素負荷量を過小に評価している可能性もある。これらの不確実性は今後の研究を通してより明確にする予定である。

謝 辞

この研究は、文部科学省の名古屋大学グローバルCOEプログラム「地球学から基礎・臨床環境学への展開」、JSPS 科研費 25340122、環境省の地球推進費「東シナ海環境保全に向けた長江デルタ・陸域環境管理手法の開発に関する研究」の助成を受けたものである。

注

注1 地表水環境基準 (GB 3838-2002) では、生態機能と利用目的によって水域をIからVまでの5種類に分類している。I類水域は水源地上流と国家自然保護区; II類水域は一級集中生活用水源保護区、貴重な水生生物の生息地、魚やえびなど産卵地、稚魚などの餌場; III類水域は二級集中生活用水源保護区、魚やえびなどの回遊区、水産養殖などの漁業水域および浴場などである。IV類水域は工業用水水源、非直接接触親水や行楽水域である。V類水域は農業用水源や一般景観用水である。水域の分類に対して、水質基準値をI級、II級、

III級、IV級、V級とV級以下の六つのレベルを定めている。V級水質基準をクリアできない水域は、水質汚染が深刻で、利用価値が失われていることを意味する。

文 献

- 1) Liu C., Q.X. Wang, M. Mizuochi, K.L. Wang, Y.M. Lin (2008a) Human Behavioral Impact on Nitrogen Flow — A Case Study in the Rural Areas of the Middle and Lower Reaches of Changjiang River, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125, 84-92.
- 2) Liu C., M. Watanabe and Q.X. Wang (2008b) Changes in Nitrogen Budgets and Nitrogen Use Efficiency in the Agroecosystems of the Changjiang River Basin between 1980 and 2000. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80, 19-37.
- 3) Liu C., Q.X. Wang, A.L. Lei, Y.H. Yang, Z. Ouyang, Y.M. Lin, Y. Li, K.L. Wang (2009) Parameters of the Regional Nitrogen Balance Model: A field investigation of 6 ecosystems of China. *Biogeochemistry*, 94, 175-190.
- 4) 劉 晨 (2013) 上海市における食生活が土壌環境に及ぼす窒素・リン負荷量の推定. *環境科学会誌* 26(5), 421-429.
- 5) Liu C. and T. Huang (2014) Recent Trends in Wastewater Flow and Pollutant Loads due to Urbanization in Shanghai. *Water Environment Research* 86(5), 433-444.
- 6) 科学技術庁 科学技術政策研究所 (1991) アジア地域のエネルギー消費構造と地球環境影響物質 (SO_x, NO_x, CO₂) 排出量の動態解析 (NISTEP REPORT No.21).
- 7) Zhou J.C., G.T. Shi, Z.L. Chen, C.J. Bi, and S.Y. Xu (2009) Contamination Characteristics of nitrogen in rainwater of Shanghai. *Environmental Pollution and Control* 31(11), 30-34. (in Chinese with English abstract)
- 8) Wang J.Y., L.J. Da, K. Song, and B.L. Li (2008) Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China. *Environmental Pollution* 152, 2, 387-393.
- 9) Li M.T., K.X. Xu, M. Watanabe, Z.Y. Chen (2007) Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71, 3-12.
- 10) 松岡雄二・中田英昭・田中勝久・清本容子・岡村和磨 (2006) 東シナ海北部における夏季の表層塩分と栄養塩濃度の長期変動. 2006年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p108, 2006.

Impact Assessment of Urbanization on Regional Nitrogen Balance in the Mega-city Shanghai and Potential Solutions —by Linking Socioeconomic Factors with Material Flow —

Chen LIU^{*}, Yoshitsugu HAYASHI^{**} and Tetsuzo YASUNARI^{***}

(* Research Institute of Global Environmental Studies, Sophia University,
4 Yonbancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0081, Japan

** Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
D2-1(510) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

*** Research Institute for Humanity and Nature,
457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto, Kyoto 603-8047, Japan)

Abstract

To diagnose and prevent environmental problems that threaten urban sustainability, the impact of changes in lifestyle (human diet, waste disposal and transportation) and production style (agriculture, industry and service industry) with the rapid urbanization, on regional nitrogen (N) balance and the water environment was quantitatively evaluated. Shanghai was chosen as a case study to investigate the temporal changes in N flow during 1980-2008 by a multidisciplinary approach (a regional nitrogen mass balance model, a field survey, input-output analysis and statistical analysis). The main results can be summarized as follows: (1) The total input of anthropogenic reactive nitrogen (i.e., chemical fertilizer, atmospheric deposition, biological nitrogen fixation, and imported food/feed) has increased from 3.28×10^5 t-N in 1980, to 3.48×10^5 t-N in 1990, and to 3.55×10^5 t-N in 2000, while it decreased to 3.23×10^5 t-N in 2008. (2) The nitrogen balance changed structurally. The nitrogen input by atmospheric deposition and imported food/feed increased rapidly, thus the main source of the local nitrogen load shifted to nitrogen deposited from the atmospheric and nitrogen imported food/feed from the previous main source of nitrogen load, chemical fertilizer. (3) Nitrogen in wastewater from industries reached the peak in the late 90's and finally fell into place since 2000. (4) Nitrogen runoff from farmland has decreased, while that from urban runoff increased. (5) The production of food such as meat and fish surpassed consumption, and became an export sector in 1980s. However, it was necessary to import food and feed from other regions since 1990s, which means that the nitrogen consumed in Shanghai has come to be more dependent on other regions. Overall, although the total potential nitrogen load in Shanghai is decreasing since 2000 and water pollution problems seems to have been improved, the problem is shifted and the areas affected expanded to the surrounding areas through water and air cycling and the food/feed chain. Further effective measurements are necessary.

Key Words: Urbanization, nitrogen balance, water environment, life and production style, Shanghai city