

41. 都市の食料消費起因の物質フローに関する分析：東京と台北の比較

Analysis on Material Flow Pertinent to Food Consumption in Urban Area
: Comparison between Tokyo and Taipei

○薛 咏海* ・ 松本 亨* ・ 金子慎治**
Yonghai XUE*, Toru MATSUMOTO*, Shinji KANEKO**

ABSTRACT: This study first analyzed the development of waste and waste water treatment and disposal system in Tokyo and Taipei. Based on statistic data, Material Flow Analysis (MFA) and Substance Flow Analysis (SFA) were used for quantifying Nitrogen flow from food supply to emission to air, water and soil. First per capita per day protein supply from Food supply and utilization yearbook of Japan and Taiwan were used for calculation of per capita per day Nitrogen supply. Then MFA was used for calculating material flow of kitchen waste and human waste in waste and waste water treatment and disposal system. Next, emission from waste and waste water treatment and disposal system to air, water and soil was determined by statistic data and literature review. Finally, use the Nitrogen concentration in each material in the system, the Nitrogen flow was calculated. The result shows that the input of Nitrogen in Tokyo and Taipei gradually increased, and most Nitrogen were emitted as human waste into surface water. But with increase of incineration of waste and treatment of waste water, more and more Nitrogen were converted into gas, emitting into air. Waste compost and Kitchen waste as feeding stuff also help Taipei to recycle Nitrogen instead of emitting to surface water.

KEYWORDS: nitrogen, MFA, SFA, waste, wastewater, food consumption

1 はじめに

人類は、経済発展の過程で例外なく都市への人口集中を経験している。日本の場合も1950-60年代にかけて都市化が進行した。都市への人口集中は、生活のため、あるいは産業活動のための物質・エネルギー消費の集中に繋がる。都市活動を支える莫大な資源・エネルギー代謝は、適切な処理が実行されないと大気や水、土壌の汚染の原因となる。そのため、自然環境と経済活動の間、あるいは様々な経済主体間の物質フローを客観的、定量的に把握することは、都市活動と環境問題の関わりを分析するうえで極めて重要である。

台湾の場合は、1970年代に高度経済発展が始まった。急速な都市化と産業化が進む中、廃棄物や排水の問題は、都市の中の重大な環境負荷として重要視されるようになった。多くの国と同様、台湾でも廃棄物処理・処分場や排水処理場の建設のための資金や用地確保の問題に直面している。

本研究では、都市の特に地下環境への人間活動の影響を見るために、都市活動による物質循環を解明するものである。可能な限り過去に遡ることで、都市化、ライフスタイル変化と物質循環の変化の関係を解析・モデル化することで、地下環境に与える人間活動の因果関係を明らかにする。分析の対象セクターは順次拡大させる必要があるが、まず家庭部門の食料消費起因の物質循環について解析する。その理由は、都市の炭素、窒素、リンの循環のうち、家庭部門の食料消費に付随する部分が大きいからである。これまでの著者らの他都市の分析事例では、60%前後を占めることがわかっている¹⁾。

主な目的は次の3点である。

*北九州市立大学国際環境工学研究科 Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu, Hibikino 1-1, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, 808-0135 Japan

**広島大学大学院国際協力研究科 Graduate School for International Development and cooperation, Hiroshima University

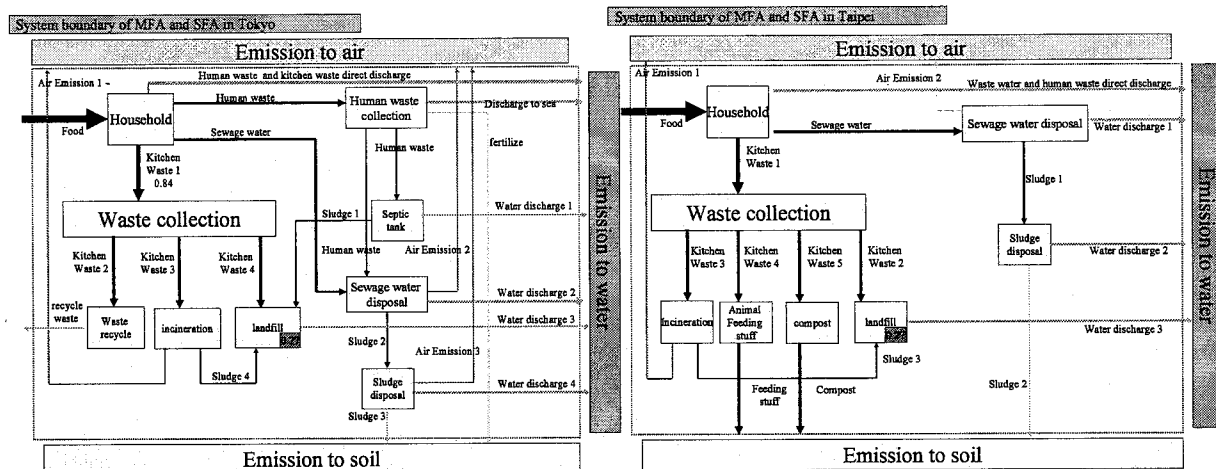


図1 物資フローの概念とシステム境界（東京と台北）

- 1) 物質フロー分析（SFA: Substance Flow Analysis）の手法を用いて著しく発展した 20 世紀の東京及び台北両都市の窒素フローを定量化すること
- 2) 窒素フローにおける排水処理及び廃棄物処理システム整備の影響を解析すること
- 3) 異なる発展段階にある 2 都市の環境負荷と汚染の関係を比較すること

2 研究手法

SFA は、特定地域における特定物質のインプット、ストック、アウトプットを追跡、評価する手法である。質量保存の法則に基づいており、製品や特定物質の物質収支を定式化する²⁾。この手法は、廃棄物管理や特定物質の管理、都市代謝分析のような様々な分野における意思決定を支援するために用いられ、広く確立された手法である。また同時に、経済活動に伴う物質フローも重要な課題になっているため、近年の SFA は伝統的なアプローチよりも総合的になってきている。また、環境汚染の原因を突き止めるのにも役立つ³⁾。

本研究の目的は、前述したとおり長期的なライフスタイルの変化が、家庭、産業、企業などの部門の物質収支に与える影響を分析することである。そのため、典型的な SFA の手順に加えて、都市化と人間活動（水需要、エネルギー消費、物質消費の増加）の変化についても分析する。分析手順は以下である。

- ①物質、プロセス、システム境界の設定
- ②製品中の成分濃度と製品の流動測定
- ③物質フローの計算
- ④結果の表示と解釈

本研究では、東京（23 区）と台北市を研究対象として選定した。システム境界は図 1 に示すとおりであり、以下のようなプロセスを含む。

- ・家庭部門への食料消費による窒素のインプット
- ・家庭部門から発生し廃棄物処理・処分システムに投入される厨芥ごみ
- ・家庭部門から発生し下水処理システムに投入される排水
- ・家庭部門から発生しし尿処理システムに投入されるし尿
- ・家庭部門からの直接排出
- ・処理施設における処理後の大気、水、土壌への放出

本研究におけるすべての窒素に係わる物質のフローは、文献資料（政府

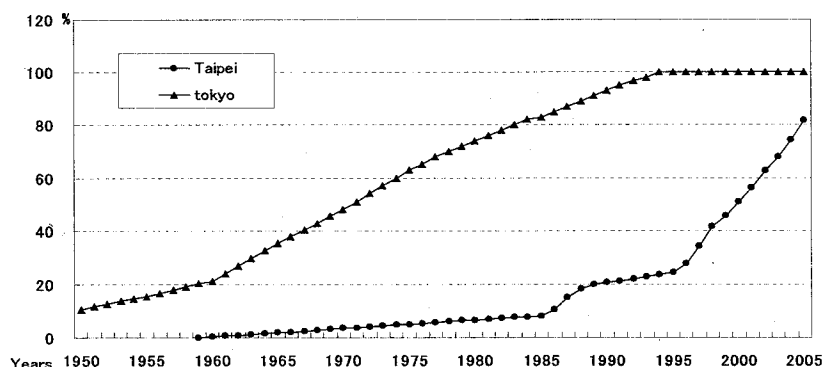


図2 東京と台北の下水処理率の推移

統計、学術的出版物、文献等）や現地調査（アンケート、ヒアリング、現地視察）により得た情報から決定した。表1に、情報源と計算式を示している。次章では、両都市の下水処理システム、廃棄物処理・処分システム、し尿処理・処分システムの発展過程を紹介、分析する。

3 都市環境インフラ整備の歴史

3.1 排水処理システムの整備

著しく発展した都市である東京では、排水処理システムが始まって100年以上が経過する。1873年、最初の下水管渠が建設され、1922年に下水処理施設が稼働している。1994年には図2に示すように、管渠の接続率と汚水処理率は共に100%に達している。

一方で、東京に比べると新興都市である台北では、1959年に汚水収集システムが始まり、その後緩やかに拡張された。汚水処理率は1986年までの27年間で10%に達した。その後、建設を加速させ、2005年に汚水処理率は81.9%に達した。

表1 窒素に関する情報源と計算方法

City	Material	Calculation for Nitrogen content	Data source
Tokyo	Food	Protein supply * Conversion rate	Food supply and utilization yearbook of Japan
	Kitchen waste 1	waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	Tokyo statistic yearbook, Comparison statistic Yearbook of Japan metropolises, Waste quality investigation of Tokyo,
	Kitchen waste 2	Recycling waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Kitchen waste 3	Incineration waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Kitchen waste 4	Landfill waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Human waste 1	Human waste * N in Human waste	Tokyo statistic yearbook, Operation yearbook of sewage system in Tokyo, Sewage related data in website http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/fukyu/fukyu.htm
	Human waste 2	Human waste to septic tank * N in Human waste	
	Human waste 3	Human waste to sewage system * N in Human waste	
	Discharge to sea	Human waste discharge to sea * N in Human waste	
	Fertilizer	Human waste recycling as Fertilizer * N in Human waste	Thitiphon sinsupan (2004) Bacini et al. (1986/1997) Thitiphon sinsupan (2004) Waste quality investigation report of Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo
	Water discharge 2	Discharge water * N in discharge water after treatment	
	sewage water	Sewage water * N in Input water to sewage treatment system	
	Sludge 1	N balance of Septic tank	
	Sludge 2	N balance of sewage water disposal	Thitiphon sinsupan (2004) Thitiphon sinsupan (2004) Thitiphon sinsupan (2004) Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo
	Sludge 3	N balance of Sludge disposal	
	Sludge 4	N balance of Incineration	
	Water discharge 1	% N discharge in waste water of septic	
	Water discharge 3	% N discharge in waste water of landfill	
	Water discharge 4	% N discharge in waste water of Sludge disposal	
	Air Emission 1	% N emitting to air by waste incineration	Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo
	Air Emission 2	% N emitting to air by waste water treatment	
	Air Emission 3	% N emitting to air by Sludge incineration	
	direct discharge	N balance of household	
Taipei	Food	Protein supply * Conversion rate	Food supply and utilization yearbook of Taiwan
	Kitchen waste 1	waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	Taipei statistic yearbook, Environment report of Taipei city
	Kitchen waste 2	Landfill waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Kitchen waste 3	Feeding stuff waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Kitchen waste 4	Compost waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	
	Kitchen waste 5	Incineration waste*kitchen waste conten*N in Kitchen waste	http://www.sew.gov.tw/Aboutus/Manage.aspx?apcode=Aboutus_Manage&lvl=0&itid=M_01_07_01_04
	feeding stuff	N balance of Incineration	
	compost	% N discharge in waste water of Sludge disposal	
	Water discharge 1	Discharge water * N in discharge water after treatment	
	sewage water	Sewage water * N in Input water to sewage treatment system	Thitiphon sinsupan (2004) Thitiphon sinsupan (2004) Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo
	Sludge 1	N balance of Septic tank	
	Sludge 2	N balance of sewage water disposal	
	Sludge 3	N balance of Sludge disposal	
	Water discharge 2	% N discharge in waste water of septic	Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo Operation yearbook of sewage system in Tokyo
	Water discharge 3	% N discharge in waste water of landfill	
	Air Emission 1	% N emitting to air by waste incineration	
	Air Emission 2	% N emitting to air by waste water treatment	
	direct discharge	N balance of household	

3.2 廃棄物処理・処分システムの整備

図3は、東京における廃棄物の量と処理方法の変化を示している。1960～70年代にかけて経済が急速に発展し、1960年には129万t（0.42kg/人・日）であった廃棄物収集量は、1975年には510万t（1.60kg/人・日）にまで増大した。その後10年間、500万t以上という状況が続くが1985年以降徐々に減少し、2004年には373万t（1.22kg/人・日）になっている。同時期に、焼却率も増加しており、1960年には10%だったが2004年には78.6%となっている。1960年から2004年にかけて人口はさほど変化しなかったが、廃棄物収集量が増加した大きな要因は一人当たりの廃棄物発生量が増加したためである。

図4より、1970年代の台北の廃棄物量の増大は、人口増加が大きな要因となっていることがわかる。さらに1980～90年代には、一人当たりの廃棄物発生量が増加したために急速に廃棄物総量が増加しており、1998年に総量で

155 万 t/年、1 人あたり発生量で 1.61kg/人・日と、各々が最も高い値に達した。1999 年以降リサイクル政策の推進により減少している。2000 年には、台北は廃棄物収集料金制度を変更し、ゴミ袋単位の収集料金とすることで汚染者負担の原則を徹底した。2002 年には、リサイクル可能な厨芥ごみの分別収集を開始した。これらの政策は台北の廃棄物総量を 54 万 t (0.56kg/人・日) まで減少させることとなった。この値は、最も廃棄物量が多かった 1988 年のほぼ 3 分の 1 の値である。

表 1 には、台北市の廃棄物処理・処分施設、政策の発展の経緯を示す。1985 年まで、都市生活廃棄物はすべて川の近くに野積みされており、環境を著しく汚染していた。1986 年に最初の埋め立て処分場が建設、運営されたのをきっかけに、その後すべての廃棄物が埋め立て処分されるようになった。1991 年に焼却炉が稼働し、2005 年には 3 基の焼却炉が建設、稼働しており、焼却率は 84% に達している。

3. 3 し尿の処理・処分システムの状況

図 5 は、東京におけるし尿収集率と処理法を示している。1960 年代初頭、家庭から出るし尿の収集率は約 60% だったが、その後下水普及率や排水処理率の増加とともにし尿の収集率や収集量は大きく減少し、最も多かった 29,000 m³ から 2004 年には約 3,000 m³ になっている。下水道以外の現在の主要な処理方法は海洋投棄であるが、1982 年以前は汚水浄化槽と海洋投棄であった。台北では、下水道を除くし尿の主要な処理方法は浄化槽である。

4 家庭における窒素供給

図 6 は、東京と台北における 1 人 1 日あたり窒素供給量を示す。窒素供給量は、1 人 1 日あたりタンパク質供給量を用いて算出した。都市別のタンパク質供給量のデータは存在していないため、日本と台湾のタンパク質供給量を東京と台北に用いた。その結果、1960 年から 1995 年にかけて 1 人 1 日あたり窒素供給量は増加し、1996 年から 2004 年にかけて漸減したことがわかる。1965 年の台北の窒素供給量は 10.39g/人・日であり、東京の 12.46g/人・日を

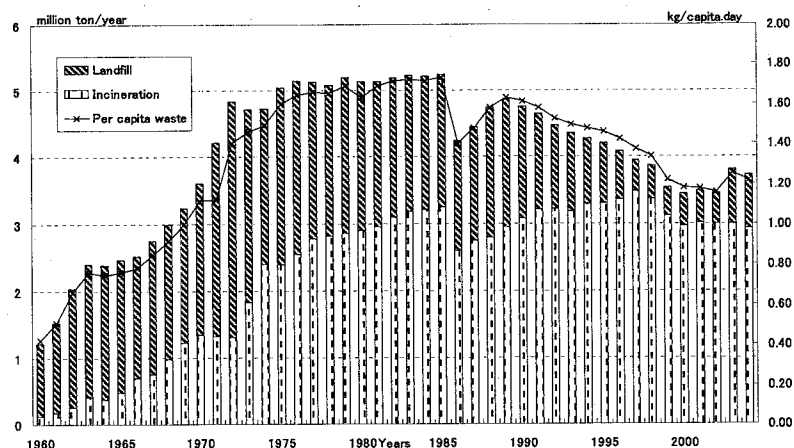


図 3 東京の一般廃棄物処理の推移

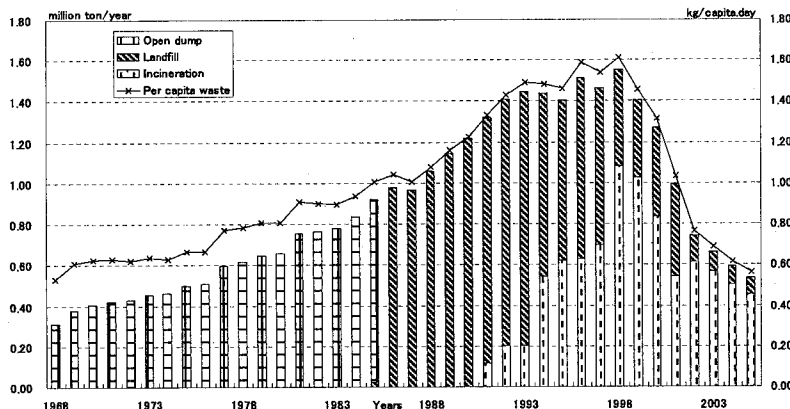


図 4 台北の一般廃棄物処理の推移

表 2 台北の一般廃棄物処理の施設整備と政策の推移

1970-	mainly landfill	1969-1985	Neihu Open damp	near to river
		1985-1993	Fudekeng landfill	single liner with leachate simple treatment
1992-	mainly incineration	1994-	Shanzhuku Landfill	double liner with biological leachate treatment
		1991-	Neihu Incinerator	900tons/day
		1995-	Mushan Incinerator	1500tons/day
		1998-	Beitou Incinerator	1800tons/day
		1992-	regularly collection of recyclable waste	
		1995-	waste must be put into trash truck directly	
2000	pay by plastic bag	July, 2000	the disposal fee for waste will be collected according to the use of plastic bag, but recyclable waste is free	
2002	zero emission objective in 2010	Promote of separate collection of recyclable waste		
		promote of kichen waste recycling programm		
		Reuse of gutter sludges		
		reuse of incinerator ashes		
		vitrification of fly ashes		
		disaster waster disposal by recycling and incineration		

下回っていたが、その後逆転し、台北では1997年に17.02g/人・日、東京では1996年に14.51g/人・日とそれぞれ最大値に達した。

5 結果と考察

図7に、東京（1960年、1980年、2004年）と台北（1970年、1980年、2004年）の家庭部門の窒素フローをそれぞれ示す。これを見ると、窒素の最も大きな放出源（約7割）がし尿として、自然界またはし尿収集システム、下水処理システムに排出されていることがわかる。そして、わずかな窒素が、厨芥ごみとして廃棄物収集システムに排出されており、その割合は3～20%程度である。

1960年の東京では大部分の窒素が、直接地表水として、あるいは処理後に排出されており、その割合は68%が地表水、4.3%が大気、8.2%が土壤に排出され、残り19%が埋め立て処分場に蓄積されていた。その後、排水処理率や廃棄物、汚泥の焼却率の増加に伴い、窒素の大気への排出量は徐々に増加し、1980年に18%、2004年には48%になった。

東京と比較すると、台北の排水・廃棄物処理システムはまだ整備の過程といえる。これらの都市環境インフラが未整備の段階では、ほとんどすべての窒素分が地表水に直接排出されていたが、1970-80年にかけて急速に整備された。2004年には、廃棄物の焼却施設と下水処理システムの貢献により、18%の窒素分が大気に放出されるようになった。厨芥ごみの飼料化・堆肥化と、下水汚泥のリサイクルによって、窒素分の15%を再度利用している。

6 まとめ

本研究では、東京と台北市を対象として、長期間の窒素フローを分析した。対象年は、東京が1960-2000年、台北市が1970-2004年である。食料消費から、大気、水、土壤への放出を、マテリアルフロー分析（MFA）、物質フロー分析（SFA）の手法により定量化した。

その結果、1960年代、東京では1人1日あたり窒素供給量が徐々に増加したのに対し、台北では急速に増加した。これは1960年以降の家庭の食料消費による窒素負荷の増加が経済の発展とよく比例していることが改めてわかった。

窒素の大部分は、し尿として水域に排出される。それは、都市にとって大きな環境負荷の原因となる可能性を意味する。廃棄物の焼却や汚水処理の増加により、窒素の水域への排出を大気への排出へと変化させることができた。さらに、厨芥ごみや下水汚泥のリサイクルも、水域への排出削減に寄与している現状が明らかになった。

長期的なデータの不足（特に汚泥、排ガス、水域への排出に関するデータ）により、大気、水域、土壤への窒素排出量の推計は多くの仮定に基づき相対的に粗くなっている。そのため、今後の課題としては、これらの排出データの改善に焦点を当てる予定である。また、工業部門・農業部門まで分析境界を拡大し、より総合的に分析すること、さらにはアジアのより多くの巨大都市に適用することも課題である

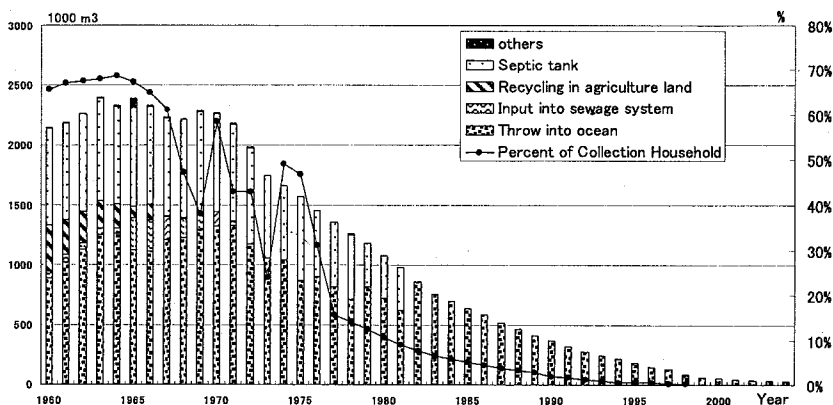


図5 東京のし尿処理の推移

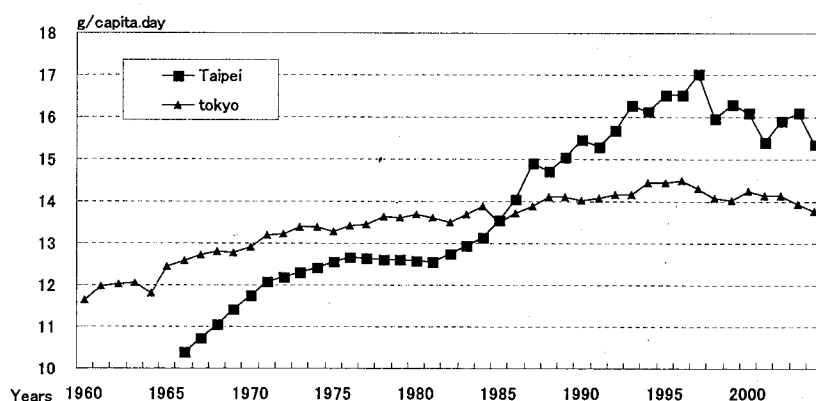


図6 東京と台北の窒素供給量の推移

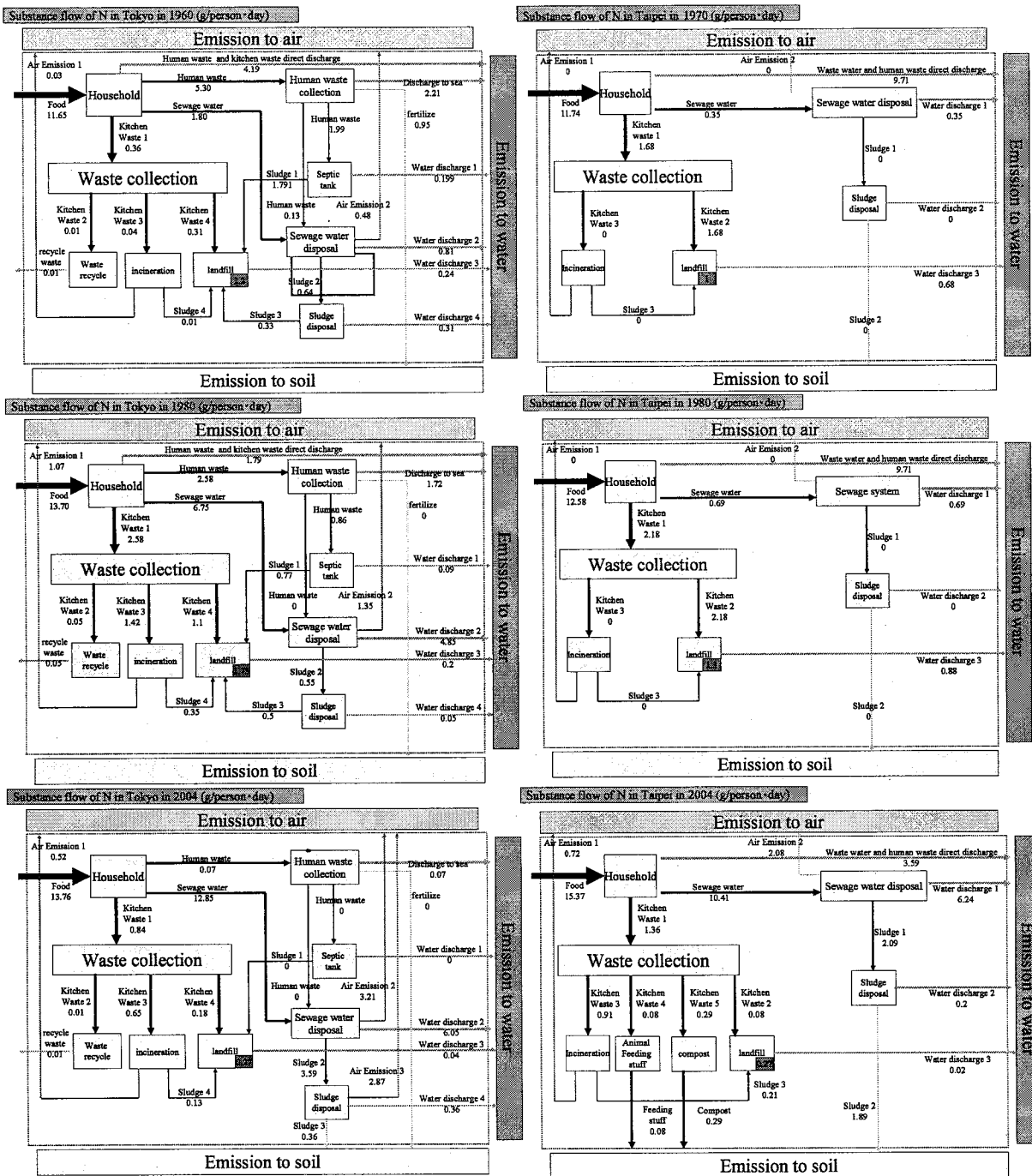


図7 東京と台北の窒素循環の推移

参考文献

- 1) 松本 亨, 岩尾拓美, 大迫洋子, 井村秀文: 都市の有機物資源循環システムの評価に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 28, pp. 21-32, 2000
- 2) Brunner P.H., Rechberger, H., (2004) Practical Handbook of Material Flow Analysis, Levis Publishers, Vienna
- 3) Natthira T., Stephen M., T. David W. (2005) Incorporating phosphorus management considerations into wastewater management practices, Environmental Science & Policy, (8):1-15