

(57) ハノイ市における汚水管理・農業・畜産 に注目したリンフロー分析

原田 英典^{1*}・足立 匡¹・藤井 滋穂¹・Nguyen Pham Hong Lien¹・Huynh Trung Hai²

¹京都大学大学院地球環境学堂 (〒606-8501京都市左京区吉田本町)

²ハノイ理工科大学環境理工学研究所 (ベトナム国ハノイ市キムリエン区ダイコヴィエト通1)

* E-mail: h.harada@globeenv.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

ベトナムのハノイ市都市区および郊外区を対象に、177世帯への訪問調査に基づき汚水ストリーム、および農業・畜産廃棄物の管理形態を明らかにし、リンフローを作成した。総量および単位面積当たりの系外へのリン移出量としては、それぞれ郊外区農業 (22,580 ton-P/year) および都市区人間生活 (136 kg-P/ha/year) からの排出が最も大きかった。都市区では、人間生活由来のリンの95%が系外移出していた。また、腐敗汚泥として623 tonのリンが都市区に貯留されていた。一方、郊外区では、系外への移出は主に農業に依っていた。家畜糞尿および農業残渣の利用率はそれぞれ67%および78%であり、家庭由来有機系廃棄物は83% (主に畜産に)、排水は37% (主に農業に) が循環利用されていた。

Key Words: Hanoi, phosphorus, wastewater, agriculture, stock breeding

1. 背景

アジア途上国の多くの都市では近年急速な都市化・工業化が進んでおり、ベトナムもその例外ではない。首都ハノイ市は2008年の周辺地域合併に伴い、人口が320万人から620万人へ増加し、とりわけ郊外部では都市部の拡大による市街地化、工業団地の増加など、その変化は著しい。

ハノイ市近郊地域を含め、ベトナム北部は伝統的にし尿を農業利用してきた習慣があるなど、家庭からの廃棄物、畜産廃棄物、あるいは農業残渣といった地域資源の利用が残る。現在ハノイ市近郊では都市部で消費される食物のうち、野菜類で62~83%、豚で50~73%、魚類で46%を供給しているが¹⁾、市の急速な拡大に伴い、近郊農業によりハノイ市都市部に食糧を供給する役割はより重要になっている。現在ではこれらの地域も都市化・工業化の影響を受け、化学肥料使用量の増加、水稲から利益の大きい野菜への生産の移行などが起こりつつある。

ハノイ市南部は都市排水を直接受け入れる農業地域でもある。日本の多くの都市とは異なり、河川の上流部に都市部、下流域に郊外部が広がる。下水道

をはじめとした汚水処理インフラが未整備の中、都市排水は河川を通じて郊外に流れ込む。この水の灌漑用水利用に伴う栄養塩類の供給が、一定の役割を果たしているという報告もある一方、ハノイ市都市部から大量の汚水が流れ着くことで、灌漑システムに深刻な汚染が生じているという報告²⁾もある。

こうした中、有機物汚濁の低減に向けた取り組み (例えばICEM³⁾) が行われているが、一方で、同地域では富栄養化問題も深刻である。Huongら⁴⁾による富栄養化した湖沼の研究、Dungら⁵⁾による河川での栄養塩類濃度の研究などがあるが、栄養塩類の管理に向けた面的な情報の整備が急務である。

マテリアルフロー分析 (MFA) は、こうした資源あるいは汚染物質の管理方策の策定に必要な、定量的な情報を得ることができる手法である。特に枯渇資源であるリンについては、資源循環も考慮した適正管理が重要視され、ハノイをフィールドとしたMFA研究がいくつかある。例えばMontangeroら⁶⁾は衛生施設での栄養塩類の挙動を分析した。しかし、この研究ではハノイ市都市部の衛生問題、特に汚水の排出に焦点が当てられており、MFAの境界が都市および表流水に限定されていた。一方、Khaiら⁷⁾は

実際に地域資源を利用しているハノイ市郊外区の特定地域にて、農業に関する栄養塩類収支を明らかにしたが、農業に主眼が置かれ、汚水・廃棄物管理の観点からの検討はなされていない。

このように、近年のハノイでは地域の栄養塩類管理の在り方に大きな変化が生じつつある。多様な要因が複雑に絡み合う中、適切な栄養塩類管理のため、汚水、廃棄物、農業および畜産のいずれも含めた栄養塩類フロー、特にリンフローの把握は、地域の適切な資源管理に資する。本研究では、まずハノイ市郊外区にて、農業および畜産への利用に着目した汚水・廃棄物・畜産廃棄物の管理形態についての調査を行った。これに基づき、ハノイ市の都市区および郊外区でのリンのマテリアルフローを構築し、ハノイ市でのリンの適正管理についての検討を行った。

2. 方法

(1) 対象地域の概要

本研究で対象とするハノイ市の地図を図-1に示す。ハノイ市は2008年に行政区の合併によって拡大し、人口、面積ともに急増した。本研究ではフロー作成の対象地としてハノイ市都市区（9区）、および拡大前のハノイ市の郊外区（6区）と拡大後に新たにハノイ市となった郊外区（15区）のすべてを対象とし、都市区および郊外区についてリンフローを作成した。表-1に地域ごとの人口および面積を示す。

(2) 汚水・廃棄物ストリームおよび肥料使用量調査

本調査で主対象とする汚水および廃棄物は、人し尿、家庭排水・汚泥、家庭由来有機性廃棄物、家畜

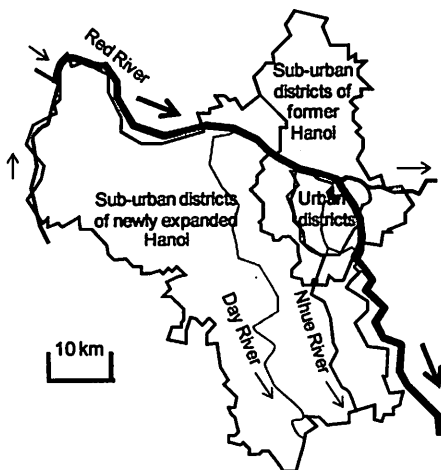


図-1 ハノイ市行政区界および主要河川

糞尿、農業残渣である。なお都市区の人し尿、家庭排水・汚泥のストリームについては、Haradaら⁸⁾に依った。郊外区については、質問紙を用いた個別訪問調査を行い、当該物質のストリームおよび管理形態を調査する共に、化学肥料の使用量調査を行った。

訪問調査の対象は6区9コミュニティ（Co Nhue, Dong Ngac, Hien Giang, Hoang Long, Kim Bai, Kim An, Bien Giang, Chuc Son および Mai Dich）の177世帯、また調査時期は2009年10~12月および2010年5月である。なお、住民台帳の閲覧が困難なため、訪問世帯の抽出はハノイの主要河川であるNhue川およびDay川沿いのできるだけ典型的な集落を選択し、訪問時に集落内で聞き取り可能な世帯とした。調査地点・世帯数共に一定規模に達したことで、本研究で目的とするハノイ市郊外区全体のフローを構築するために必要な水準の代表性は得られたと考える。

(3) リンフローの構築

上記で得られた情報に基づき、ハノイ市都市区および郊外区それぞれについて、リンのマテリアルフローを構築した。マテリアルフローモデルにおける境界条件を図-2に示す。またモデル中のプロセスとして、人間生活（Human life）、農業（Agriculture）、畜産（Stockbreeding）および市場（Market）を設定した。なお、農業プロセスでのリンの土壌への蓄積は土壌を系外としたため、本研究では系外への移動量として計算した。また市場プロセスは、他プロセスからの製品の受け皿としての役割に加え、系外とのやりとりで全体の収支バランス

表-1 ハノイ市の人口および面積

District	Population ('000)	Area (km ²)
Urban district	2,179	179
Suburban district		
Former part	1,337	742
Expanded part	2,834	2,427

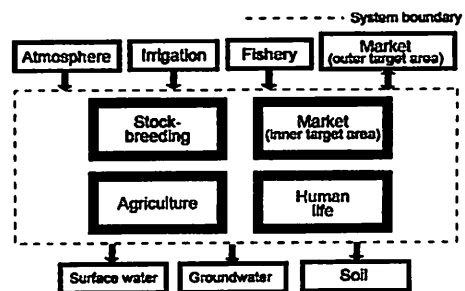


図-2 本研究のシステム境界

を維持プロセスとして概念的に設定した。市場以外のプロセスで系外へ過剰に流出するリンが、系外から市場を経て系内に供給されることで、全体の収支バランスが維持される。水産業は、そのほとんどが開放環境中で行われているため、当該プロセス自体は系外とし、生産物が系内へ移入することとした。

各プロセスの制約条件を以下の式(1)-(31)に示す。なお、以下の式で、 I_{ij} はプロセス*j*におけるプロセス*i*からのリンの移入量、および O_{ij} はプロセス*i*における*j*への移出量を表す。また、添え字 *h*, *a*, *s*, *m*, *f*, および *o* はそれぞれ人間生活、農業、畜産、市場、水産、および系外を意味する。その他の変数については表-2 に示す。なお、表-2 の変数の一部は数値が設定されていないが、これらの値は前項で示した調査を元に後ほど設定する。

a) 農業プロセス

以下の式(1)-(9)に従うものとした。

$$I_{h-a} + I_{s-a} + I_{m-a} + I_{a-a} + I_{o-a} = O_{a-s} + O_{a-m} + O_{a-a} + O_{a-o} \quad (1)$$

$$I_{h-a} = U_{ex} \times P \times R_{ex-a} + U_{gr} \times P \times R_{gr-a} + U_{osw} \times P \times R_{osw-a} \quad (2)$$

$$I_{s-a} = \sum(U_{ie,i} \times H_i \times R_{ie-a,i}) \quad (3)$$

$$I_{o-a} = P_r \times \sum S_i \times C_r + I_r \times R_{ir} \times C_{ir} \quad (4)$$

$$I_{a-a} = \sum(U_{ap,i} \times P_{a,i} \times R_{res,i}) \times R_{res-a} \quad (5)$$

$$I_{m-a} = U_{a,f} \times \sum S_i + P_{cmp} \times C_{cmp} \quad (6)$$

$$O_{a-m} = \sum(U_{ap,i} \times P_{a,i}) \quad (7)$$

$$O_{a-s} = \sum(U_{ap,i} \times P_{a,i} \times R_{res,i}) \times R_{res-s} \quad (8)$$

$$O_{a-a} = I_{a-a} \quad (9)$$

なお、 O_{a-o} については式(1)より差分として求めた。

b) 人間生活プロセス

以下の式(10)-(15)に従うものとした。

$$I_{m-h} = O_{h-a} + O_{h-s} + O_{h-m} + O_{h-o} \quad (10)$$

$$I_{m-h} = U_{ex} \times P + U_{gr} \times P + U_{osw} \times P \quad (11)$$

$$O_{h-a} = I_{h-a} \quad (12)$$

$$O_{h-s} = U_{osw} \times P \times R_{osw-s} \quad (13)$$

$$O_{h-m} = P_{cmp} \times C_{cmp} \quad (14)$$

$$O_{h-o} = U_{ex} \times P \times (1 - R_{ex-a}) + U_{gr} \times P + U_{osw} \times P \times (1 - R_{osw-a} - R_{osw-s}) - P_{cmp} \times C_{cmp} \quad (15)$$

なお、式(14)において、都市環境公社が堆肥化する生ごみ（一部、腐敗槽汚泥を含む）は、コンポストとして市場に入るものとした。

c) 畜産プロセス

以下の式(16)-(22)に従うものとした。

$$I_{a-s} + I_{h-s} + I_{m-s} + I_{o-s} = O_{s-a} + O_{s-m} + O_{s-o} \quad (16)$$

$$I_{h-s} = O_{h-s} \quad (17)$$

$$I_{a-s} = O_{a-s} \quad (18)$$

$$O_{s-a} = I_{s-a} \quad (19)$$

$$O_{s-m} = \sum(U_{s,i} \times P_{s,i} \times H_i) \quad (20)$$

$$O_{s-o} = \sum(U_{ie,i} \times H_i) - O_{s-a} \quad (21)$$

$$I_{m-s} = (O_{s-a} + O_{s-m} + O_{s-o}) \times R_{sm} \quad (22)$$

なお、 I_{o-s} については式(16)より差分として求めた。

d) 市場プロセス

以下の式(23)-(31)に従うものとした。

$$I_{a-m} + I_{h-m} + I_{s-m} + I_{f-m} + I_{o-m} = O_{m-a} + O_{m-h} + O_{m-s} + O_{m-o} \quad (23)$$

$$I_{a-m} = O_{a-m} \quad (24)$$

$$I_{h-m} = O_{h-m} \quad (25)$$

$$I_{s-m} = O_{s-m} \quad (26)$$

$$O_{m-a} = I_{m-a} \quad (27)$$

$$O_{m-h} = I_{m-h} \quad (28)$$

$$O_{m-s} = I_{m-s} \quad (29)$$

$$O_{m-o} = 0 \quad (30)$$

$$I_{f-m} = U_f \times P_f \quad (31)$$

なお、 O_{m-o} および I_{o-m} は、市場から系外への移出量および系外から市場への移入量の収支結果として扱った。他プロセスの収支結果から、系全体の収支を維持するためには I_{o-m} は O_{m-o} を上回る必要があるため、実際には系内市場から系外への移出は存在するものの、市場を介した移出入の合計として式(30)は妥当である。 I_{o-m} は式(23)より差分として求めた。

表-2 マテリアルフローモデルの変数一覧

Symbol	Explanation	Unit	Data
U_{ex}	Unit phosphorus amount in human excreta	g/cap/day	1.0 ¹
U_{gr}	Unit phosphorus amount in greywater	g/cap/day	1
	Urban district		0.6
	Suburban district		0.4
U_{ow}	Unit phosphorus amount in organic solid waste	g/cap/day	0.83 ²
$U_{k,i}$	Unit phosphorus amount in livestock excretion for livestock <i>i</i>	g/head/day	3
	Cattle and buffalo		25.6
	Pig		11.3
	Poultry		1.2
$U_{ap,i}$	Unit phosphorus amount in agricultural product <i>i</i>	ton-P/ton	4
	Rice		0.0026
	Maize		0.0011
	Tuber		0.0015
$U_{a,f}$	Unit fertilizer use for agriculture	ton-P/ha	Investigated in this study
$U_{s,i}$	Unit phosphorus amount in stockbreeding product for product <i>i</i>	ton-P/ton	5
	Pig		0.0018
	Cattle and buffalo		0.0016
	Poultry (meat)		0.01
	Egg		0.09

表-2 マテリアルフローモデルの変数一覧 (続き)

Symbol	Explanation	Unit	Data
U_f	Unit phosphorus amount in fishery product	ton-P/ton	0.002 ⁵
R_{ex-a}	Ratio of excreta used for agriculture	-	Investigated in this study
R_{gw-a}	Ratio of greywater used for agriculture	-	Investigated in this study
R_{om-a}	Ratio of organic solid waste used for agriculture	-	Investigated in this study
R_{ex-l}	Ratio of livestock excretion used for agriculture for livestock l	-	Investigated in this study
R_f	Ratio of farmer using irrigation	-	0.96 ⁶
R_{res-l}	Ratio of agricultural residue to production for product l	-	⁷
	Rice		0.53
	Maize		1.73
	Tuber		0.38
R_{res-a}	Ratio of agricultural residue used for agriculture	-	Investigated in this study
R_{res-l}	Ratio of agricultural residue used for stockbreeding	-	Investigated in this study
R_{om-l}	Ratio of organic solid waste used for stockbreeding	-	Investigated in this study
R_{mf}	Ratio of market feed to all stockbreeding feed	-	Investigated in this study
C_r	Phosphorus concentration of rain	mg/L	0.004 ⁹
C_{ir}	Phosphorus concentration of irrigation water	mg/L	¹⁰
	Urban district		0.55
	Suburban district		0.24
C_{comp}	Phosphorus concentration of compost produced by a public company	%	0.5 ¹¹
P	Population	person	See Table 1
H_i	Number of livestock i	head/year	¹²
	-Urban: Pig		71,085
	Cattle		4,506
	Buffalo		390
	Poultry		188,162
	-Suburban: Pig		1,539,454
	Cattle		231,003
	Buffalo		38,914
	Poultry		14,542,197
P_r	Precipitation	mm/year	1,733 ^{12,13}
S_i	Area of farmland for agricultural product i	ha	¹²
	-Urban: Rice		1,440
	Maize		1,317
	Tuber		171
	-Suburban: Rice		204,590
	Maize		24,524
	Tuber		4,983
I_r	Average irrigation amount in Vietnam	m ³ /ha/year	16,200 ¹⁴

表-2 マテリアルフローモデルの変数一覧 (続き)

Symbol	Explanation	Unit	Data
$P_{a,l}$	Agricultural production for product l	ton/year	¹²
	-Urban: Rice		8,209
	Maize		5,604
	Tuber		1,326
	-Suburban: Rice		1,166,345
	Maize		104,326
	Tuber		38,620
P_{comp}	Production capacity of a composting plant using solid wastes and septage collected by a public company	ton/year	13,260 ¹¹
$P_{l,l}$	Livestock production for livestock l		¹⁵
	Pig	ton/head	0.096
	Cattle and buffalo	ton/head	0.41
	Poultry (meat)	ton/head	0.0016
	Egg	piece/year	150
P_f	Production of fishery	ton/year	¹²
	Urban district		2,769
	Suburban district		33,822

1: Busserら⁹, 2: Kawai¹⁰, World Bank¹¹, および中村ら¹²より筆者が作成, 3: 中村ら¹², 有機質資源化推進会議¹³, 横山¹⁴, および北海道立農業畜産試験場家畜糞尿プロジェクト研究チーム¹⁵を参考に設定(原単位の妥当性については本文中で検討), 4: 中村ら¹²およびThuyら¹⁶より筆者が作成, 5: 文部科学省¹⁷, 6: Thuyら¹⁸, 7: 尾和¹⁹, 9: 田淵および高村¹⁹, 10: JICA およびHPC²⁰, 11: ハノイ都市環境公社への聞き取り, 12: HSO²¹, 13: 2002-2005年のハノイでの平均値, 14: FAO²², 15: GSO²³および農林水産省²⁴より単位生育頭数あたりの生産量を筆者が作成。注: 実際には10種の農作物を対象に計算を行ったが, ここでは農作物は3種のみ表に示す。

3. 結果と考察

(1) トイレ汚水および廃棄物ストリーム

ハノイ市郊区でのトイレ汚水管理についてのインタビュー結果を, トイレ系汚水が環境中に排出されるまでのストリームとして図-3に示す。さらに, 都市区との比較のため, Haradaら⁸による同様の都市区でのストリーム調査結果を図-4に示す。ハノイ市郊区では, 多くのトイレ系汚水(56.3%)が今も農業利用されていた一方, 都市区では大部分のトイレは水洗化され, 腐敗槽に接続されていた。腐敗槽越流水は土壌浸透などを経ず, 直接下水管に流れ込むが, ハノイでは下水道整備の遅れからその大部分は, 下水処理場を経ることなく水環境中に放流される。

郊区区においてし尿分離トイレが15%程度利用されていたことは注目に値する(図-3)。これは, 1950年代に主に北部ベトナムに導入された, 大便と

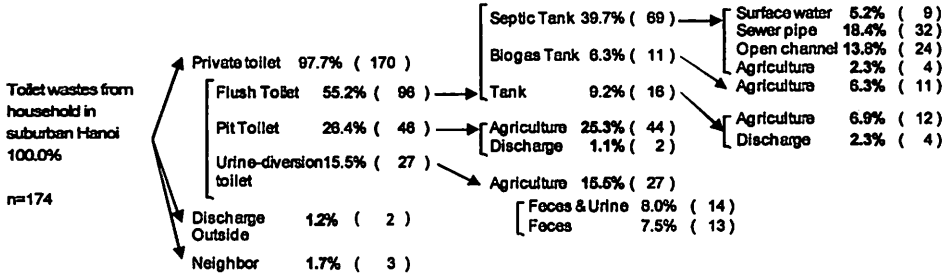


図-3 ハノイ市郊外区におけるトイレ系汚水のストリーム(n=174) 括弧内はサンプル数を表す。

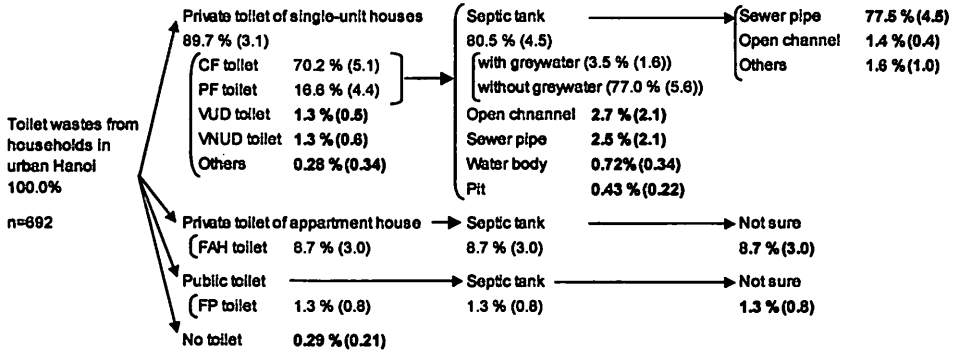


図-4 ハノイ市都市区におけるトイレ汚水のストリーム(Harada ら⁸⁾)。データは統計的なサンプリングに基づき、括弧内は標準誤差を表す。なお、CF toilet, PF toilet, VUD toilet, VNUD toilet, FAH toilet, および FP toilet はそれぞれ水流式トイレ、注水式トイレ、尿尿分離式槽型トイレ、および非尿尿分離式槽型トイレ、集合住宅水洗トイレ、公共水洗トイレを表す。

尿を分離処理・農業利用する方式のトイレである。途上国における環境に調和した衛生改善のアプローチとして、近年複数の地域で国際機関あるいは NGO などに取り上げられている。北部ベトナムはその実践の歴史を持つ数少ない地域であるものの、近年は水洗トイレに置きかえられつつある。なお、これら地域では、都市区とは異なり腐敗槽の普及率は低く、新たに導入される水洗トイレは未処理のまま直接水路等に汚水を排出するものも多い。

郊外区における家庭由来の有機性廃棄物（主に生ごみ）、農業残渣、および家畜糞尿の管理形態についてのインタビュー結果を表-3、4 および 5 にまとめた。いずれについても、大部分が農業あるいは畜産のために有効利用されていることが分かった。種類により利用方法は異なり、家庭由来の有機性廃棄物は大部分（79%）が畜産利用されていた一方、農業残渣ではほぼ半分（53%）が農業利用され、畜産廃棄物では家畜種に異なるもののその大部分が農業利用されていた。特に、豚糞尿に関しては、全回答世帯で農業利用されていた。

それぞれの主な利用方法については、家庭由来の有機性廃棄物では、業者による回収後、一旦茹であ

表-3 郊外区での家庭由来の有機性廃棄物管理形態の調査結果 (n=171)

Item	Proportion
Used for agriculture	4%
Used for stockbreeding	79%
Used for others	5%
Discharged etc.	12%

表-4 郊外区での農業残渣管理形態の調査結果 (n=171)

Item	Proportion
Used for agriculture	53%
Used for stockbreeding	26%
Used for fuel	4%
Discharged etc.	18%

表-5 郊外区での家畜糞尿管理形態の調査結果

Item	Pig		Poultry		Cattle	
	%	(n)	%	(n)	%	(n)
Used for agriculture	100	(54)	81	(120)	85	(44)
Discharged to river/pond	0	(0)	1	(1)	0	(0)
Not treated	0	(0)	16	(23)	15	(8)
Burnt	0	(0)	1	(1)	0	(0)
Given to neighbor	0	(0)	1	(1)	0	(0)
Used for fishery	0	(0)	1	(2)	0	(0)

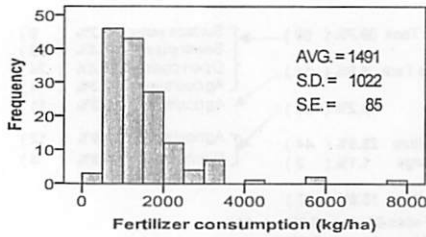


図-5 ハノイ郊外区での化学肥料使用量 (n=146)

げられた後に家畜の飼料として利用されていた。農業残渣および畜産廃棄物に関しては、直接あるいは農家にて堆肥化の後に、農地利用されていた。

ハノイ市郊外区における化学肥料の年間使用量のインタビュー結果を図-5に示す。ハノイ市郊外区では、全肥料種の合計で平均1,491 kg/ha/yearの化学肥料を使用していた。これは、Syら²⁾によるベトナムでの化学肥料使用量平均200 kg/ha/yearよりも非常に多い。ハノイ地域の化学肥料使用量は他地域と比べて多く、しばしばベトナムでの平均の10倍を上回るとの報告²⁾があり、本調査でもこれと同様の傾向が得られた。

(2) マテリアルフローモデルのための変数の設定

第2章で示した方法でマテリアルフローを構築する上で、表-2中の未設定の変数の値を決定する必要がある。前項までの結果より、モデル構築のための変数を設定した。以下、設定した数値を解説する。

汚水に関する項目である R_{ex-a} （農業利用されるし尿の割合）については、図-3および4において農業利用されているトイレ系汚水の割合を用いた。 R_{gr-a} （雑排水の農業利用割合）については、今回の郊外区での調査およびHaradaら⁹⁾の都市区での調査共に、ほぼ未処理で放流されていたため、0とした。

R_{osw-a} （家庭由来有機系廃棄物の農業利用割合）については、郊外区では表-3の値を用いた。また都市区では、都市ゴミ収集がほぼ行き渡っているため0とした。 $R_{l-a,i}$ （家畜種ごとの農業への糞尿利用割合）については、郊外区では表-5の値を用いた。なお、都市区でも一部畜産が営まれているが、郊外区に近い地域での畜産と考え、郊外区と同じ値を用いた。同様に、 R_{res-a} （農業残渣の農業利用割合）および R_{res-s} （農業残渣の畜産利用割合）についても、郊外区および都市区ともに表-4の値を用いた。

R_{osw-s} （家庭由来有機性廃棄物の畜産利用割合）については、郊外区は表-3の値を用いた。都市区においては、JICAおよびHPC²⁵⁾に基づき、0.01とした。また、 R_{osw-m} （家庭由来有機性廃棄物の公社による

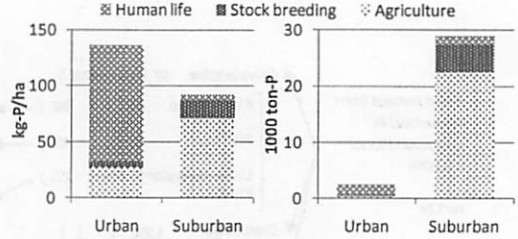


図-6 単位面積当たり（左図）および総量（右図）としての系外への移出量

堆肥化割合)については、郊外区のインタビューでは確認できなかったため0とした。

R_{sm} （家畜への全飼料に占める市場からの飼料の割合）については、家畜糞尿の管理形態を調査した際に追加調査を行い、本モデルでは0.403とした。 U_{af} （単位面積あたりの肥料利用量）については、ハノイ郊外の肥料使用量の平均値1,491 kg/ha（標準誤差84.6）（図-5）、およびSyら¹⁵⁾に基づき得られた肥料全体に含まれる P_2O_5 の重量比8.6%より、55.9 kg-P/haとした。都市区の農業においても全段落と同様に郊外区と同じ値を用いた。なお、郊外区において U_{af} の精度は全体フローに大きな影響を与えるが、9地域146世帯におよぶ調査により、十分に小さい標準誤差で肥料使用量の平均値を得たことから、フロー計算に用いる上で妥当と判断した。

(3) 都市区および郊外区における系外への移出量

都市区および郊外区それぞれにおけるプロセスごとの系外への移出量 (O_{a-o} , O_{h-o} , O_{s-o} および O_{m-o}) を図-6に示す。都市区と郊外区を比較すると、総量では郊外区から系外への移出量合計 (29,038 ton-P/year) は都市区 (2,434 ton-P/year) の11.9倍に及んでいたが、一方で、単位面積当たりでは都市区の移出量 (136 kg-P/ha/year) は郊外区 (92 kg-P/ha/year) の1.5倍となっていた。さらに、都市区における移出の76%は人間生活由来 (102 kg-P/ha/year) であり、そのうち86%は排水であった。郊外区における移出の78%は農業由来 (71 kg-P/ha/year) であった。特に都市区における人間生活からの面積当たり移出量は多く、郊外区の農業と比べても1.4倍に及ぶ。

以上より、ハノイ市全体としてのリン資源管理としては郊外区農業での適正管理が重要となる一方、汚染制御の観点からは面積当たり移出量が大い都市区生活排水が大きな影響を与えると言えるだろう。

(4) 都市区および郊外区におけるリンフロー

ハノイ市都市区および郊外区のリンフローの結果を図-7および8に示す。なお、原則として各フロー

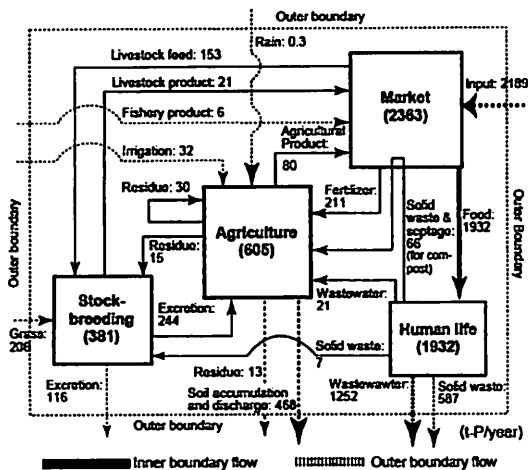


図-7 ハノイ市都市区におけるリンフロー

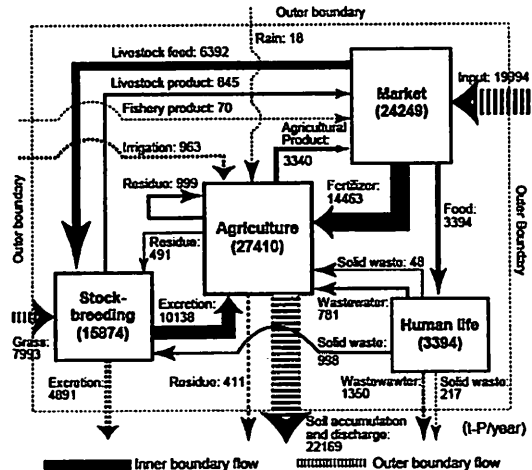


図-8 ハノイ市郊区におけるリンフロー

は要素の積み上げにより求めたが、畜産への系外からの移入（Grass），農業から系外への農業残渣以外の移出（Soil accumulation and discharge），および系外から市場への移入（Input）については、それぞれ畜産，農業，および市場プロセスにおける収支バランスより差分として求めた結果である（2章3節を参照）。

a) 都市区のリフロー

都市区における主要なフローは、系外から市場へ移入するフロー，および市場から食糧が人間生活に移入し、排水として系外に移出するフローであった（図-7）。3章1節で述べたように、この背景として下水処理インフラの普及率が低い現状がある（詳細は3章5節にて後述）。前述のように、ハノイは元々し尿循環の文化を持つなど、地域資源の活用が盛んな地域だったと考えられるが、現在の都市部においては人間生活に移入するリン（1,932 ton-P/year）の大部分が系外に流出し、4.9%（94 ton-P/year）しか有効利用されていなかった。ハノイ市都市環境公社による廃棄物および汚泥のコンポスト化による有効利用は3.4%（66 ton-P/year）であった。現在ハノイでは3Rプロジェクト²⁰などが進められていることから、廃棄物および汚泥のコンポスト化による人間生活から農業へのフローは、今後は増大するものと期待される。

現在も進む都市の拡大に伴い、農業および畜産に関連するフローはしだいに縮小し、一方で生活系のフローは増大するであろう。都市区での系外への最も主要なフローは人間生活から排水（生活系の系外移出の68%）である。リン資源の適正管理のためには固形廃棄物を中心とした3Rの取り組みと合わせ、排水フローの適正な改善が重要となるだろう。

b) 郊区のリフロー

郊区における主なフローは、系外から市場への移入のフロー，および市場から農地に移入し、系外に移出するフローであった（図-8）。農業から系外へのフロー（22,580 ton-P/year，残渣を含む）は系外への移出全体（29,038 ton-P/year）の78%を占める。ただし先述のように、農業残渣分を除いた農業から系外への移出フローは、農業プロセスにて他のフローとの差分として求めたため、一定程度の誤差は含まれる。特に、後述の家畜糞尿の原単位の幅により、畜産からの移入量に見込まれる誤差の影響を受ける。しかし、農業プロセスにおける最も主要なフローである市場からの肥料としての移入は現地調査に基づいており、また農業活動の主要な要素である農地面積および生産量もハノイの統計²¹に基づいていることから、フロー全体を把握する上で必要な精度は備えていると考え、以下考察を進める。

農業自身における地域資源の利用が農業への移入量全体の47%（12,947 ton-P/year）を占める一方で、市場由来の化学肥料が53%（14,463 ton-P/year）を占めた。農業での地域資源の利用は盛んであるものの、多量のリンが肥料として市場を通じて系外から移入し、農地に蓄積あるいは農地から流出している現状が示された。

家畜糞尿および農業残渣の利用率は、それぞれ67%および78%であった。特に畜産は放牧に伴う系外（草）からの移入を含めると、60%のリンを地域資源に依っていた。しかし、前述のように畜産プロセスでの系外からの移入は、その他のフローからの残渣として計算されており、また、家畜糞尿由来リン排出量の原単位は文献^{12), 13), 14), 15)}により幅がある（例えば牛のリン排泄量では8.7~38.9 g/head/day）。

本研究では、サンプル数が多く最も妥当性が高いと考えられた原単位を用いており(表-2)、フロー全体を把握する上で必要な精度を備えたと考えるが、畜産プロセスの詳細の把握のためには、現地の状況に適合したより正確な原単位の調査が必要だろう。

日本ではリン移入量に対して畜産製品として移出するリンの割合が概ね1割程度となる(例えば、都築²⁷⁾)のに比べ、本研究のそれは低かった(5.3%)。この理由としては、上述の原単位の幅に加え、ベトナムの地域性が考えられる。ベトナムでは役牛(特に水牛)が今も用いられ、日本の肉用牛と比べ単位の食肉を得るまでに多くの飼料を消費すると考えられる。また、生乳を飲む習慣があまり普及しておらず、リンを多く含む乳製品を計算に含んでいない。

人間生活から移出するリン(人尿等を含む排水および生活系廃棄物に由来)は、都市区ではほとんどが系外に流出していたが、郊外区では廃棄物は83%(主に畜産に)、排水(人尿を含む)は37%(主に農業に)が循環利用されており、生活由来のリンも一定割合が有効利用されていた。

このように、郊外では伝統的な資源循環により今も高い割合でリンが循環利用されているものの、化学肥料の利用が急速に広がっていると推察される。Khair⁷⁾は、ハノイ郊外部の農業でのリンの過剰施肥を報告すると共に、土壌へのリン蓄積のリスクについて言及している。本研究では適正な農地への投入量についての検討は行わなかったが、現在の高い割合での地域資源の利用を維持しつつ、市場からの化学肥料の投入を適切に管理することが、ハノイ市郊外部のリン管理上は重要であろう。

一方、灌漑用水からの農業へのリン移入は全体の3.5%を占めた。ハノイ市中心部はNhue川上流部(Tu Lich川を含む)に位置し、その下流には複数の郊外区が位置するため、都市区にて系外に排出されたリンの一部は郊外にて農業利用されている。しか

表-6 ハノイ都市区における腐敗槽汚泥計算の諸元

Symbol	Explanation	Unit	Data
H_s	Household size in Hanoi	person/household	4.7 ¹⁾
V_{st}	Volume of septic tanks in Hanoi	m ³	12.8 ²⁾
R_{st}	Ratio of households using septic tanks		90.5 ³⁾
A_{s-pb}	Collected amount of septage by a public company	m ³	19,864 ⁴⁾
A_{s-pv}	Collected amount of septage by private companies	m ³	80,220 ⁴⁾
C_{stg}	Concentrations of phosphorus in septage	mg-P/L	116 ⁵⁾

1: ハノイの統計²¹⁾より, 2: Harada⁹⁾より, 3: 本稿図-4より, 4: 安達²⁸⁾より, および5: 原田²⁹⁾より。

し、農業全体としてのその割合は限定的だったことから、むしろ強度に汚染された灌漑水による衛生問題が懸念されるだろう。

(5) 都市区における排水フローの詳細

単位面積当たりの系外移出量が最も大きかった都市区生活排水フローの詳細を、ここまでの結果に基づき図-9に、また比較のため郊外区のそれを図-10に示す。なお、現状での生活排水処理において重要な役割を担う腐敗槽に関連するフローについても下の式(32)-(34)、および表-6に基づき追記した。

$$S_{stg} = P/H_s \times R_{st} \times V_{st} \times C_{stg} \quad (32)$$

$$O_{desludge} = (A_{s-pb} + A_{s-pv}) \times C_{stg} \quad (33)$$

$$E_{st} = I_{st} - O_{desludge} \quad (34)$$

ここで、 S_{stg} (ton-P/year)は都市区の腐敗槽中の貯留汚泥に含まれるリン量、および $O_{desludge}$ (ton-P/year)は都市区で現在引き抜かれている腐敗槽汚泥中のリン量、 E_{st} (ton-P/year)は腐敗槽処理水に含まれるリン量、 I_{st} (ton-P/year)は腐敗槽流入水に含まれるリン量である。なお、式(34)では、貯留汚泥と上澄みは平衡状態にあると仮定した。郊外区で用いられる腐敗槽等の詳細は不明であるが、汚泥引き抜きはほぼ実施されていないとした。

図-9に示すように、都市区では、生活排水由来のリンの56.6%は一旦は腐敗槽に流入するものの、その大部分は腐敗槽より流出していた。下水処理インフラの整備はごく限られており(7%)、その大部分は未処理のまま水環境中に流出していると考えられた。一方、図-10に示すように、郊外区でも腐

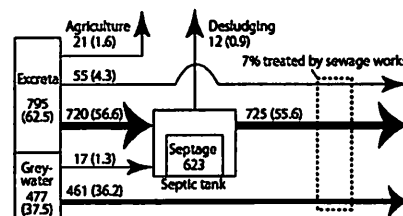


図-9 都市区における生活排水のリンフロー(腐敗槽汚泥以外の単位は ton-P/year, 腐敗槽汚泥の単位は ton-P)。なお、()内は発生総量に対する割合を示す。

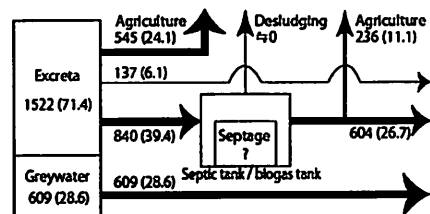


図-10 郊外区における生活排水のリンフロー(ton-P/year)。なお、()内は発生総量に対する割合を示す。

腐敗槽等がリンの主要な移流先ではあるが、都市区と異なり、し尿の農業利用および腐敗槽等処理水の農業利用を合わせると35%が農業利用されていた。農業利用はし尿系汚水のみで行われており、都市区および郊外区共に、生活系排水のリンの3割から4割を含む雑排水は、未利用・ほぼ未処理のまま放流されていた。

多くのリンが一時的に流入する都市区腐敗槽でのリン除去はごく限られていた(図-9)が、その理由には腐敗槽汚泥が長期に渡り引き抜かれずその運転状況が劣悪であると共に、そもそも腐敗槽はリン除去機能が低いことなどが挙げられる。一方で、汚泥の長期貯留の結果、623 tonものリンが都市区に腐敗槽汚泥として貯留されている。これは、比較的回収しやすい重要な都市内リン資源ともいえるだろう。

4. 結論

本研究では、ハノイ市都市区および郊外区を対象に、汚水ストリームおよび農業・畜産廃棄物の管理形態を明らかにしたと共に、当該地域のリンフローを構築した。総量および単位面積当たりの系外へのリン移出量としては、それぞれ郊外区農業および都市区人間生活からの排出が最も多かった。ハノイ市全体としてのリン資源管理としては郊外区農業での適正管理が重要となる一方、汚染制御の観点からは面積当たり移出量が多い都市区生活排水が大きな影響を与えうるだろう。

リン資源の適正管理のためには、都市区では、現在実施されている固形廃棄物を中心とした3Rの取り組みと合わせ、排水フローの適正な改善が重要となるだろう。また、都市部にて大量に貯留されている腐敗槽汚泥は、比較的回収しやすい重要な都市内リン資源ともいえる。郊外区では、現在の高い割合の地域資源の利用を維持しつつ、市場からの化学肥料の移入を適切に管理することが、系外へのリンの移出を制御する上で重要だろう。

本研究では、特に農業および畜産の現地データが不足したため、複数の原単位に日本のデータを利用した。ハノイの農業・畜産の実態をより正確に表すには、特に家畜糞尿に関する現地でのデータ整備が重要となるだろう。にもかかわらず、データが乏しい中、本研究では汚水管理、農業および畜産を統合したフローを作成することができ、一定レベルの定量情報を示した意義は大きい。

さらには、都市化および工業化が進むハノイ郊外

地域において、その経時的な変化と、代替策を含めた将来におけるリンフローについての分析を進めることは、同地域の今後のリン資源管理方策の策定に資するだろう。

謝辞：本研究の一部は科研費補助金(21860049)、循環型社会形成推進科研費補助金(K2117)、および京都大学グローバルCOEプログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」による助成をいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Van den Berg, L. M., Van Wijk, M. S. and Hoi, P. V.: The transformation of agriculture and rural life downstream of Hanoi, *Environment and Urbanization*, 15 (1), 35-52, 2003.
- 2) Sy, D. T., Vien, T. D. and Quang, N. V.: *Environment and food safety in peri-urban Hanoi*, SEARUSYN, CARES-HUA and WURC, 2005.
- 3) The International Center for Environmental Management: *Improving water quality in the Day/Nhue River basin: capacity building and pollution sources inventory*, Ministry of Natural Resources and Environment, Hanoi, 2007.
- 4) Huong, L. L., Anh, D. K. and Anh, T. T.: Estimation and prediction of eutrophication in West Lake, *VNU Journal of Science, Earth Sciences*, 23, 45-50.
- 5) Duong, T. T., Coste, M., Feurtet-Mazel, A., Dang, D. K., Gold, C., Park, Y. S. and Boudou A.: Impact of urban pollution from the Hanoi area on benthic diatom communities collected from the Red, Nhue and Tolich rivers (Vietnam), *Hydrobiologia*, 563, 201-216, 2006.
- 6) Montangero, A. and Belevi, H.: Assessing nutrient flow in septic tanks by eliciting expert judgment: A promising method in the context of developing countries, *Water Research*, 41 (5), 1052-1064, 2006.
- 7) Khai, N. M., Ha, P. Q. and Oborn, I.: Nutrient flows in small-scale peri-urban vegetable farming systems in Southeast Asia-A case study in Hanoi, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 122, 192-202, 2007.
- 8) Harada, H., Dong, N. T. and Matsui, S.: A measure for provisional-and-urgent sanitary improvement in developing countries: septic-tank performance improvement, *Water Science and Technology*, 58 (6), 1305-1311, 2008.
- 9) Busser, S., Nga, P. T., Morel, A. and Anh, N. V.: Characteristics and quantities of domestic wastewater in urban and peri-urban households in Hanoi, *Proceedings of the Environmental Science & Technology for Sustainability of Asia*, The 6th General Seminar of the Core University Program, Kumamoto, October 2-4, 2006.

- 10) Kawai, K.: *A proposal for the promotion of municipal solid waste recycling in Hanoi, Vietnam*, Ph.D dissertation of Kyoto University, 2007.
- 11) The World Bank: *Vietnam Environmental Monitor 2004 Solid Waste*, Hanoi, 2004.
- 12) 中村真人, 柚山義人: 各種バイオマス成分のデータベース整備, 農工研技報, 203, 57-80, 2005.
- 13) 有機質資源化推進会議: 有機廃棄物資源化大辞典, 農山漁村文化協会, 東京, 1997.
- 14) 横山達平: 水稲および園芸作物における家畜糞尿の有効利用技術, 東北農業研究 別号, 9, 19-30, 1996.
- 15) 北海道立農業畜産試験場 家畜糞尿プロジェクト研究チーム: 家畜糞尿処理利用の手引き 1999, 北海道立農業畜産試験場 家畜糞尿プロジェクト研究チーム, 1999.
- 16) Thuy, N. T. T., Wu, M. H. and Lai, T. V.: *Northern Vietnam*, The World Vegetable Center, AVRDC, Tainan, 1998.
- 17) 文部科学省: 五訂増補日本食品標準成分表, 国立印刷局, 東京, 2008.
- 18) 尾和尚人: 我が国の農作物の養分収支, 環境保全型農業研究連絡会ニュース, No. 33, 1996.
- 19) 田淵俊雄, 高村義親: 集水域からの窒素・リンの流出, 大学出版協会, 東京, 1985.
- 20) JICA and HPC: *The study on environmental improvement for Hanoi city in the Socialist Republic of Vietnam*, JICA and Hanoi People's Committee, 2000.
- 21) Hanoi Statistical Office: *Hanoi Statistical Year Book 2008*, Hanoi Statistical Office, Hanoi. 2008.
- 22) FAO: AQUASTAT (<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>, アクセス日: 2010/5/20).
- 23) General Statistic Office: *Statistical Yearbook of Vietnam 2007*, General Statistic Office, Hanoi, 2008.
- 24) 農林水産省: 畜産物流統計<平成 19 年>, 農林統計協会, 東京, 2009.
- 25) JICA and HPC: *The comprehensive urban development programme in Hanoi, capital city of the Socialist Republic of Vietnam*, JICA and Hanoi People's Committee, 2007.
- 26) JICA: 循環型社会の形成に向けてのハノイ市 3R イニシアティブ活性化支援プロジェクト (<http://www.jica.go.jp/project/vietnam/0601774/>, アクセス日: 2010/5/20).
- 27) 都築淳: リン資源の適正管理に向けた市町村レベルでの Material Flow Analysis, 東京大学大学院修士論文, 2006.
- 28) 安達理央太, 藤井滋穂, 原田英典, 足立匡, 田中周平, Nguyen Pham Hong Lien: ハノイ都市部における家庭系汚水および廃棄物からの資源回収ポテンシャルの定量的評価, 環境衛生工学研究, 23(3), 228-234.
- 29) 原田英典, 藤井滋穂, 松井三郎, Nguyen The Dong: ベトナムハノイ市における腐敗槽処理水・汚泥調査, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 金沢, 2010. (2010.5.21 受付)

Phosphorus Flow Analysis in Hanoi Focusing on Wastewater, Agriculture and Stockbreeding

Hidenori HARADA¹, Tasuku ADACHI¹, Shigeo FUJII¹, Nguyen Pham Hong LIEN¹
and Huynh Trung HAI²

¹Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

²Institute for Environmental Science and Technology, Hanoi University of Science and Technology

Material flows were constructed on phosphorus for urban and suburban districts of Hanoi based on a field survey on 177 households on the management of wastewater, agriculture and stockbreeding. It was found that the agriculture in suburban districts emitted the largest amount of phosphorus (22,580 ton-P/year) in to the environment; the human life in urban districts did the largest amount of phosphorus per area (136 kg-P/ha/year). In urban districts, 95% of total input to human life was discharged into the environment. In addition, 623 tons of phosphorus were stored as septage. In suburban districts, the largest amount of phosphorus was emitted from agriculture. Sixty-seven and 78% of phosphorus in livestock excreta and agricultural residues were respectively reused. Also, 83% of phosphorus in household-organic wastes was used mainly for stockbreeding, and 37% of domestic wastewater was done mainly for agriculture.