

統計的手法による熱帯水田流域における窒素負荷原単位の推定

Estimation of nitrogen load factor in a tropical paddy watershed

吉川夏樹* 塩沢昌* Ardiansyah* Budi Indra Setiawan**

Natsuki Yoshikawa Sho Shiozawa Ardiansyah Budi Indra Setiawan

1. はじめに

熱帯アジアモンスーン地域では、近年農業の近代化が急速に進み、化成窒素肥料による水環境の悪化が懸念されている。しかし、信頼できるデータが不足している為、窒素動態は定量的に評価されていない。また、農業、人間活動、降雨から投入された窒素の一部は脱窒や NH₃ 揮散によって大気中に放出され、その全てが河川に流出するわけではない。特に、高気温多湿な熱帯地域では、水田や湿地における脱窒による窒素の大気放出は大きいと予測され、投入量だけでは、それぞれの発生源や吸収源の水質への影響を定量化出来ない。

そこで本研究では、インドネシアの水田流域を対象に、河川水への窒素排出に着目し、窒素の主な面源である水田、負の面源である湿地、及び点源である人口の排出原単位を、現地調査で取得した河川水サンプルの全窒素濃度を使い統計的手法によって推定し、それぞれの水質への影響を把握する事を目的とする。

2. 研究対象地の概要

研究対象地はインドネシア共和国ジャワ島西北端部に位置するチダナウ流域である。対象流域の流域面積は約 220km² で、数百mから千mを越える山々によって囲まれたカルデラ地形を形成している。流域の約 28% (61km²) が水田として利用され、北東部には 21km² のラワダナウ湿地がある(図 1) 熱帯季節風気候に属し、平均降水量は約 2600mm で、雨季 (11~3 月) と乾季 (4~10 月) が明瞭であるが、年変動は大きい。気温は年間を通じて 26 - 28 である。

3. 研究の方法

(1)流域の分割

2004 年 2 月, 10 月, 12 月, 2005 年 7 月に行った現地調査で取得した流域内の河川水サンプル取得地点を出口とし, 流域を調査時毎に 14 ~ 17 の副流域に分割した。分割は山間部を電子標高モデル (DEM) と傾斜角, 低平部を主要河川からの距離を用いて行った。

(2)データ

各副流域の河川出口における窒素負荷量の算出は調査毎に取得した河川水サンプルの全窒素濃度と河川流量推定値の積として求めた。河川流量は現地水資源管理局によって主要河

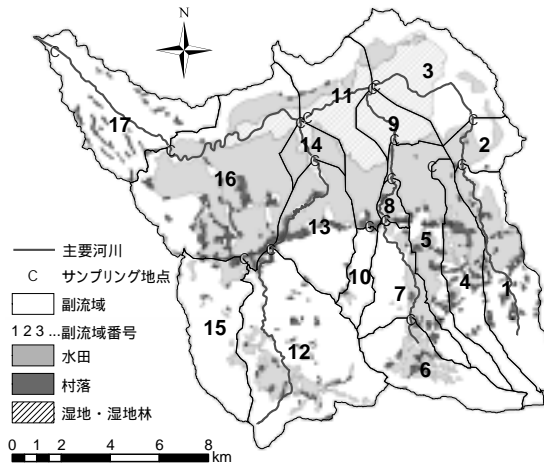


図 1 研究対象地概要 (副流域分割は各調査時の河川水サンプル取得地点によって異なる。図は第 2 回調査時の例)

表 1 各調査時の説明変数と被説明変数データ

2004 年 2 月					2004 年 10 月				
n	ILU _n (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	[水田] _n	[湿地] _n	[人口] _n (人 ha ⁻¹)	n	ILU _n (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	[水田] _n	[湿地] _n	[人口] _n (人 ha ⁻¹)
1	2.25	0.28	0.00	6.71	1	1.42	0.28	0.00	6.71
2	10.02	0.39	0.00	1.33	2	4.60	0.39	0.00	1.33
3	4.14	0.10	0.34	0.05	3	-1.01	0.10	0.34	0.05
4	6.08	0.38	0.00	6.22	4	1.44	0.48	0.00	7.94
5	2.06	0.59	0.00	5.97	5	0.17	0.21	0.00	4.06
6	5.93	0.19	0.00	3.86	6	13.09	0.75	0.00	13.06
7	1.55	0.23	0.00	4.29	7	-6.32	0.04	0.94	0.00
8	48.67	0.75	0.00	13.06	8	0.27	0.24	0.33	2.44
9	-27.52	0.00	0.94	0.00	9	0.64	0.12	0.00	3.92
10	2.83	0.03	0.00	3.25	10	2.79	0.39	0.01	8.45
11	9.52	0.29	0.42	2.23	11	1.71	0.74	0.26	0.00
12	1.59	0.12	0.00	3.92	12	0.88	0.09	0.00	2.82
13	6.17	0.39	0.01	8.45	13	2.88	0.67	0.00	11.86
14	9.57	0.74	0.26	0.00	14	1.65	0.52	0.08	4.88
15	3.62	0.09	0.00	2.82	15	0.20	0.00	0.00	5.09
16	21.91	0.54	0.07	5.73					
17	10.43	0.00	0.00	5.09					

2004 年 12 月					2005 年 7 月				
n	ILU _n (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	[水田] _n	[湿地] _n	[人口] _n (人 ha ⁻¹)	n	ILU _n (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	[水田] _n	[湿地] _n	[人口] _n (人 ha ⁻¹)
1	2.24	0.28	0.00	6.71	1	5.70	0.28	0.00	6.71
2	7.90	0.39	0.00	1.33	2	16.19	0.39	0.00	1.33
3	-1.24	0.10	0.34	0.05	3	-0.84	0.10	0.34	0.05
4	0.94	0.48	0.00	7.94	4	6.33	0.48	0.00	7.94
5	2.09	0.21	0.00	4.06	5	1.58	0.21	0.00	4.06
6	30.17	0.75	0.00	13.06	6	39.15	0.75	0.00	13.06
7	-9.61	0.04	0.94	0.00	7	-12.71	0.04	0.94	0.00
8	5.46	0.24	0.33	2.44	8	4.86	0.03	0.00	3.26
9	0.79	0.12	0.00	3.92	9	6.27	0.29	0.42	2.23
10	6.23	0.39	0.01	8.45	10	2.63	0.12	0.00	3.92
11	5.70	0.74	0.26	0.00	11	11.35	0.39	0.01	8.45
12	1.84	0.09	0.00	2.82	12	-1.55	0.74	0.26	0.00
13	10.83	0.54	0.07	5.73	13	4.42	0.09	0.00	2.82
14	0.25	0.00	0.00	5.09	14	8.64	0.28	0.00	11.86
					15	29.30	0.52	0.08	4.88
					16	6.61	0.00	0.00	5.09

*東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

** ボゴール農科大学 Bogor Agricultural University (IPB)

キーワード：窒素負荷原単位, 熱帯流域, 重回帰分析

表 2 重回帰分析結果

現地調査	負荷原単位 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)	標準誤差	t値	p値	
2004年2月	a ₁	21.9	10.6	2.1	0.06
	a ₂	-20.9	9.1	-2.3	0.04
	a ₃	0.9	0.7	1.2	0.24
2004年10月	a ₁	6.2	2.9	2.2	0.05
	a ₂	-6.9	2.4	-2.9	0.01
	a ₃	0.1	0.2	0.7	0.47
2004年12月	a ₁	16.0	6.6	2.4	0.03
	a ₂	-10.2	5.5	-1.9	0.09
	a ₃	0.4	0.4	1.0	0.35
2005年7月	a ₁	21.2	9.0	2.4	0.03
	a ₂	-14.3	7.9	-1.8	0.09
	a ₃	0.8	0.5	1.6	0.14

川 3 地点で記録されている月 1 回の流量と水位データで流量-水位曲線を作成し、日水位データから日流量を求めた。副流域の比窒素負荷量は、まず流出河川の負荷量から流入河川の負荷量を差し引いた「差し引き負荷量」として求め、流域面積で割ることによって算出した。

各副流域の水田、湿地面積率は、各副流域に含まれる電子地形図上の水田面積、湿地面積を副流域面積で割って求めた。人口密度(人 ha⁻¹) は 2002 年の村毎の人口データを副流域面積で按分する事によって算出した。

4. 重回帰分析

比窒素負荷量(ILU_n)を被説明変数、水田面積率[水田]、湿地面積率[湿地]、人口密度[人口]を説明変数として重回帰分析によって排出窒素負荷原単位を推定した。現地での調査から、これら 3 説明変数以外に河川の窒素負荷に大きく影響を与えるものは無いと考えた。重回帰モデルは、 $y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ をそれぞれ水田、湿地、人口の負荷原単位、 n を副流域番号とすると以下のように表せる。

$$ILU_n = a_1[\text{水田}]_n + a_2[\text{湿地}]_n + a_3[\text{人口}]_n \quad [1]$$

窒素負荷量は TN 濃度と流量の積であるので、時期によって変化が大きい流量に依存している。本来、窒素負荷量は年間積算流量を用いて算出すべきであるが、各調査で河川水サンプル地点が異なり、小流域区分が同一ではないので、上記モデルを調査時毎に適用し、最小自乗法により調査時毎の原単位を推定した。得られた原単位を流域出口における流量で加重平均することで、年間の平均原単位を算出した。

5. 結果と考察

モデルを調査時毎に適用した結果を表 2 に示す。水田の負荷原単位は 6.1~21.9kgN ha⁻¹ y⁻¹ 人口は 0.1~0.9kgN 人⁻¹ y⁻¹ 湿地は-6.9~-20.9kgN ha⁻¹ y⁻¹ という結果となり(表 2)、調査時毎に大きく変動している。河口における流量と各々の係数をプロットした結果が図 2 である。この関係から排出負荷原単位を流量平均した結果、水田の排出負荷原単位は 16.9kgN ha⁻¹ y⁻¹、湿地は-13.8kgN ha⁻¹ y⁻¹、人間は 0.6kgN 人⁻¹ y⁻¹ となった。負荷原単位をモデルに当てはめると以下ようになる。

$$ILU_n = 16.9[\text{水田}]_n - 13.8[\text{湿地}]_n + 0.62[\text{人口}]_n \quad [2]$$

対象流域の水田面積率(26.8%)、人口密度(4.54 person⁻¹ ha⁻¹)、湿地面積率(9.4%)を[2]式に代入すると、流域全体の窒素排出量は 6.0kgN ha⁻¹ y⁻¹ となり、それぞれの排出源、吸収源の全負荷に占める寄与は、水田が 4.5kg ha⁻¹ y⁻¹、湿地が -1.3kg ha⁻¹ y⁻¹、人口が 2.8kg ha⁻¹ y⁻¹ となった。流域窒素収支の分析で、対象流域出口における年間平均窒素比負荷量は、5.6kgN ha⁻¹ y⁻¹ と算出されており、本分析の結果と近い値を示した(椎野, 吉川, 塩沢, 平成 17 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集)。

水田については窒素投入量が、肥料 135kg N ha⁻¹ y⁻¹、降雨約 20 kgN ha⁻¹ y⁻¹、合計 155 kgN ha⁻¹ y⁻¹ である事から、河川による流域外への流出(17 kgN ha⁻¹ y⁻¹)は全窒素インプットの 11%程度となる。人口は現地の年間窒素摂取量が 3kgN 人⁻¹ y⁻¹ 程度であり、負荷原単位(0.6 kg N ha⁻¹ y⁻¹)と比較すると 80%が損失している事になる。また、河川が湿地を通過するだけで、13.8kg N ha⁻¹ y⁻¹ もの窒素が失われている。対象流域は高気温多湿な熱帯水田流域で、脱窒、NH₃ 揮散による窒素の大気放出が大きいと考えられる。

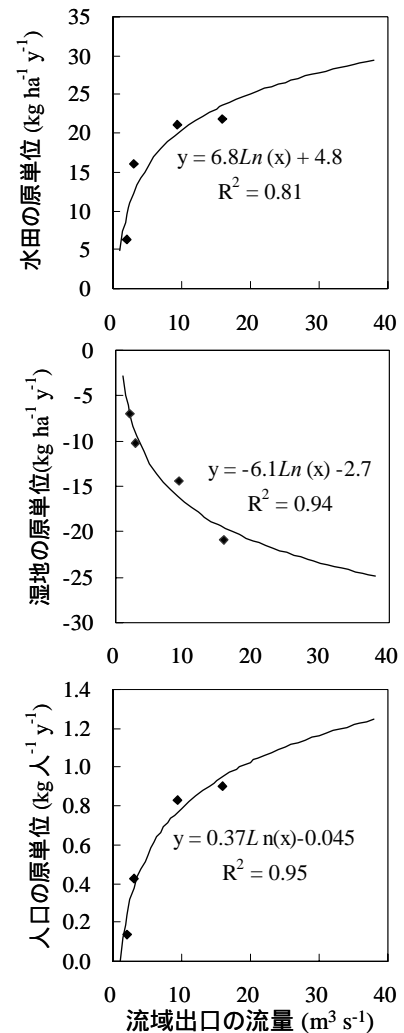


図 2 水田、湿地、人口の負荷原単位と流域出口流量との関係