

# アジアの食料需給に伴う窒素の流れと環境負荷、将来予測

山梨大学大学院総合研究部生命環境学域 新藤純子

## 1. はじめに

ハーバー・ボッシュ法の発明によって、1900年～2000年の100年間に世界の人口は16億人から60億人まで増加することができ<sup>1)</sup>、更に2011年10月31日には70億人に到達したとされている。また、ヘイガー<sup>2)</sup>は、「どれほどの人の生死に関わっているかという視点から、彼らの業績に匹敵するものを他に思いつくだろうか。今の人口の半分は彼らの開発したもののお陰で生きていられているのだ。」と、このアンモニア合成法に人類が如何に依存しているか述べている。アジアにおいてもその効果は大きく、1950年からの60年間の人口増加率は約1.8%/年で、アフリカと中南米に次いで高く、1950年の約14億人から現在の約42億人へと増加した。この間に増加した世界の人口(44.3億人)のうち63%がアジアで増加したこととなり、更にそのうちの44%は南アジア、33%は東アジア、15%が東南アジアでの増大であった。

窒素肥料は大きな恩恵であったが、一方ヨーロッパでは1980年代後半に、地下水や表流水が窒素により酷く汚染されていることが明らかとなり、その汚染の主たる原因が農業であると認識された。OECDでは農業が環境に与える影響に関して、各国の農地における窒素バランス<sup>3)</sup>を指標とした定量的な評価を開始し、またEUでは1991年に硝酸塩指令(Nitrate Directive)<sup>4)</sup>を発して、施肥の時期、量、作付け体系、家畜ふん尿の貯蔵と農地への投入などの適正化を図ること、水質モニタリング結果や地形等に基づいて脆弱地域を設定してより厳しい対策をとることなどを各国に要請し、水環境の改善を図ろうとしている。

本稿では、人口が大きく増加したアジアを対象に、過去数十年間の食料生産の変化とその要因について見てみる。そして食料生産の変化にともなう窒素の循環が変化し、環境への負荷がどのように増大してきたか推定し、更に将来の変化について検討したい。

## 2. アジアの食遷移と食料生産

アジアの多くの国は近年めざましい経済発展をとげている。一般に、経済発展に伴って伝統的な穀物を主とした食事から動物性食品の割合の高い食事へと変化する食遷移が進むと考えられている。日本でも1961年の全タンパク質摂取量に対する動物性タンパク質の割合は、33%(内65%が魚介類)だったのが、1980年代半ばまでに急増し、以降56%程度と安定している。肉などの畜産品の生産におけるタンパク質転換効率(畜産品中タンパク質量の飼料中タンパク質量に対するパーセンテージ)の典型値は、牛肉:5%、豚肉:10%、鶏肉:20%、卵:30%、ミルク:30%程度<sup>5)</sup>である。従って畜産品の消費は作物の直接消費に比べて数倍の飼料作物の生産を必要とするため、食遷移の動向は食料需給や農業による環境負荷発生量に大きな影響を及ぼす。日本の場合、1961年と2009年を比較すると、一人当たりの食料としての穀物の消費量は、158kgから115kgへの減少(人口が1.4倍となったが、総量でもわずかに減少)したにもかかわらず、飼料を含む穀物消費量は、一人当たり215kgから270kg

へ、総量では 2008 万 t から 3413 万 t へと増大した。このように、日本も確かに経済成長とともに西洋化という食遷移が進んだが、到達した現在の食生活は明らかに西洋のそれとは異なり、穀物比率が高く肉消費量は絶対量も比率も低い。

図 1 に中国、ベトナム、インドについて食の変化を人口の変化とともに示した。中国では文化大革命が終わり改革開放路線の開始された 1970 年代後半以降に急激に、まずは穀物の供給量が増大を始め、この時期に動物性タンパク質も徐々に増加している。更に、1990 年頃から穀物は減少に転じ、肉、卵、魚介類の増大が著しく、明らかに食生活が変化している。現在の一人当たりの肉の消費量は 58.2 キログラム/年と、日本の 45.9 キログラム/年を大きく上回っている。また、同じ時期から「他の植物性食品」が増加している。この中には野菜、果物、芋類、大豆以外の油脂作物などが含まれているが、このうち野菜の増加が著しい。ベトナムは中国と似た変化を示し、1990 年頃から肉、魚介類、他の植物性食品のうち野菜の消費量が急激に増大を始めた。これも 1986 年から始まったドイモイによる市場開放政策の影響が大きいように思われる。一方インドの場合は一人当たりのミルク消費量に増加が見られるものの、これまでの 50 年間ほとんど食生活に変化がなく、タンパク質の大部分を穀物と豆類から摂取している。

人口の増加と食遷移により、この間にアジアの食料需要は著しく増加し、生産量もまた増大した。表 1 に、各国およびアジアの人口、穀物需要、穀物生産量および窒素肥料使用量の 1961 年と 2009 年とを比較した。ほとんどの国で、飼料を含む穀物需要は人口の増加率を大きく上回って増大し、これを支えたのが窒素肥

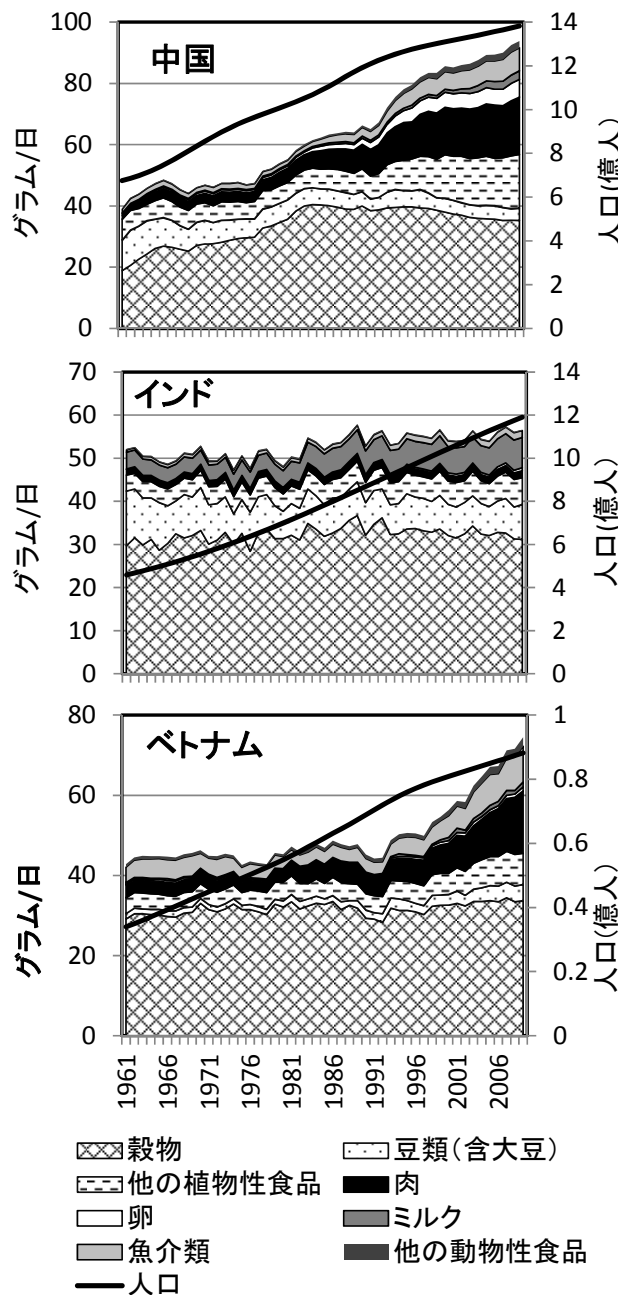


図 1 アジア諸国の食遷移

	中国	インド	ベトナム	アジア
人口	2.05	2.60	2.60	2.43
穀物需要 (食料)	3.32	2.82	2.77	3.10
(全て)	4.23	2.87	4.46	3.84
穀物生産	4.59	2.96	4.82	3.81
窒素肥料	86.7	62.3	111.4	37.5

料の投入であることがわかる。

### 3. 窒素フローの変化

#### (1) 農地の窒素バランス

窒素肥料の使用量の近年の拡大が顕著であるアジアでも欧米と同様に農業が環境へ大きな影響を与えているであろう。東アジア、南アジア、東南アジアの15カ国を対象に、OECDで用いられている窒素バランスの1970年～2007年の変化を推定した。窒素バランスとは農地への窒素のインプット量とアウトプット量の差であり、環境への潜在的な負荷である。インプット量として、化学肥料と作物残渣や家畜ふん尿の投入、豆科作物などの生産に伴う窒素固定、および大気沈着を、アウトプットは作物による吸収とアンモニア揮散を考慮した。ここではOECDとは異なる独自の窒素フローモデル<sup>6)</sup>を用いて試算したので計算法はOECDと多少異なるが、概念は同じである。図2に2007年の結果を示した。1970年には日本と韓国以外の窒素バランスはほとんどゼロ、すなわち作物による吸収量がほとんど肥料などのインプット量釣り合っていたが、多くの国で徐々に、或いは急激増大した。特に中国、バングラ

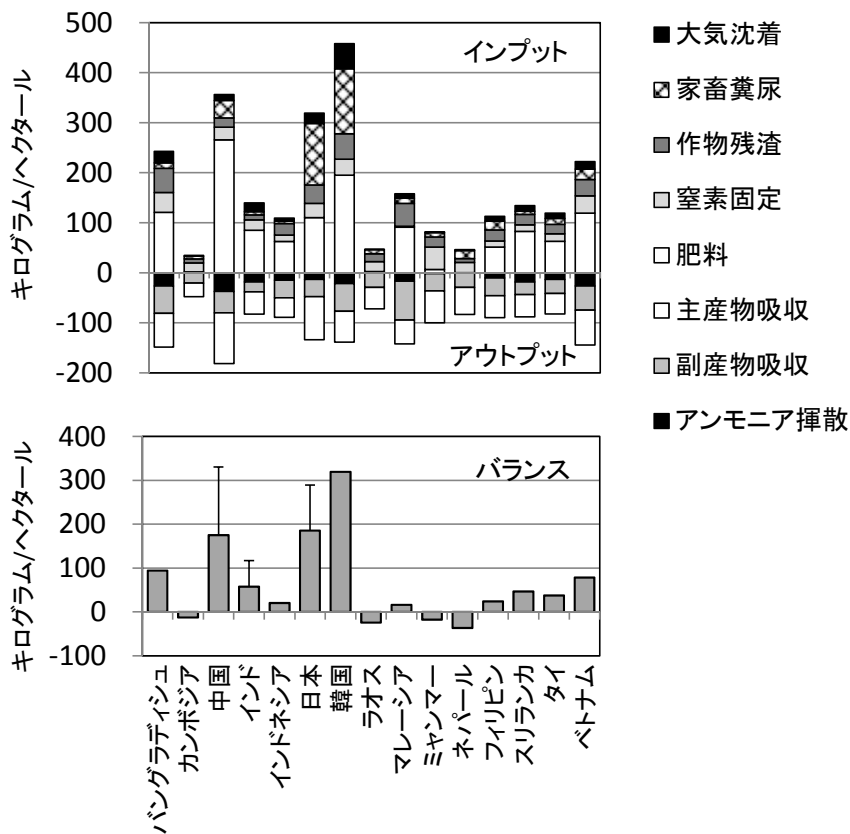


図2 アジア諸国の農地の窒素収支<sup>7)</sup>

注) OECDでは窒素バランスを草地を含む農地面積当たりの量で表しているが、ここでは草地を含まない耕地面積当たりとした。アジアでは草地に施肥を行うことは一般的ではないためである。農地面積当たりとすると広大な草地を持つ中国な値は1/3程度になり、他の国はほとんど変わらない<sup>8)</sup>。

デシユ、ベトナムの増加が顕著である。また、インプットに占める化学肥料の割合が、中国では70~80%、インドは約60%など、多くの国で過半を占めている。中国、インド、日本のエラーバーは、各々省ごと、州ごと、県ごとに求めた窒素バランス推定値の標準偏差を表しているが、窒素バランスの国内での変動はきわめて大きく、中国では北京、天津、上海と江蘇省で400 kg/haを超え、浙江省や福建省など東シナ海に面した地域でも極めて高い値である。インドでもパンジャブ州から西ベンガルへ続くヒンドゥスタン平原で高い値を示している。

## (2) 一人当たりの環境負荷

次に、一人当たりの窒素負荷を比較する。ここでは、農地からの負荷に加えて、人が直接食料を食べて排出する量および肥料や家畜ふん尿から揮散したアンモニアの沈着も考慮する(表2)。中央のカラム(人から/人)は、各国の一人当たり年間タンパク質摂取量に対応する。

日本の場合、一人が5.4 kgの窒素を食料として摂取するために4.0 kgの窒素肥料など合計11.2 kgの窒素を農地に投入し、6.7 kgが余剰となり、合計14.4 kgの窒素が環境への負荷となる。なお、大気沈着には化石燃料由来の窒素は含ま

2007年	農地から kg N/人	人から/人 kg N/人	大気沈着 10 <sup>6</sup> tN	合計/人 kg N/人
日本	6.7	5.4	2.2	14.4
中国	16.2	4.9	4.7	25.7
インド	8.3	3.4	1.3	13.0
ベトナム	8.5	4.3	2.9	15.7

れていない。また下水処理などもこの段階では考慮していない。農地からの負荷も、合計の窒素負荷量も中国が圧倒的に大きい。日本よりタンパク質摂取量の小さいインドやベトナムにおける農地からの負荷は日本を上回り、合計も日本と同程度であることがわかる。日本が十分な食料を得ながら、一人当たりの窒素流出量が相対的に少なくすんでいるのは、日本が食料を外国から輸入しているためであると考えられる。日本は作物、畜産品、高タンパク飼料をいずれも輸入しており、輸入総窒素量は全窒素流入量の53%にも達する。一方、インドと中国とも食料や飼料の貿易はわずかである。中国では最近、輸入による窒素の流入(主として大豆の輸入)が増加してきたが、全流入窒素量に対する輸入窒素量の割合は2007年で4.7%程度である。インドの場合、近年は窒素の輸出国となっているが、この寄与もわずかである。耕地における窒素吸収効率は作目や農地管理方法により異なるが、現在の日本では40%程度である<sup>3),7)</sup>。すなわち、窒素を投入して作物を生産すると収穫窒素量を上回る量の窒素が余剰窒素として環境への負荷となる。日本の食料輸入は結果として環境負荷を減らす効果があったことになる。

## 5. 将来の食糧需要と環境負荷

農業からの窒素負荷の増大は、水環境へ大きな影響を与える。アジア各国においても地下水や表流水の観測から深刻な汚染が存在することが明らかとなっている<sup>9)-13)</sup>。また、本稿では割愛したが、上記のように見積もった窒素負荷に基づいてモデルにより推定した水質分布でも、中国東部の広範な地域やインド北部などで高濃度の窒素汚染が起こっているであろうことも示された。今後アジアでは人口増加も経済発展も継続すると予測されるが、その結果

窒素負荷がどのように推移するであろうか。以下のような簡単な仮定のもとで推定を行い、結果を表3に示した。なお、農地面積は2007年の面積から変化しないと仮定した。

- 1) 人口：国連の3種類の人口推計（高位、中位、低位）のうち川島により最も蓋然性が高いとされた低位推計を用いた。中国、インド、ベトナムを対象として各々の国で2050年までに最大人口となる年(中国:2022年、2007年の1.05倍、インド：2039年、1.21倍、ベトナム：2037年、1.16倍)を対象年として推定した。
- 2) 一人当たりの食料消費量:図1の食品ごとのトレンドなどに基づいて表3に示す値を与えた。たとえば、動物性タンパク質の摂取量については、インドは過去の変化が少ないこと、また中国は既にこれ以上増加しないレベル近くまで達していると考えられることから、両国での増加はわずか（2%増加）であると仮定し、現在増加を続けているベトナムは5%増加すると仮定した。この増加はインドでは主としてミルク、中国とベトナムでは主として鶏肉と豚肉であると仮定し、各々のタンパク質変換係数を用いることにより、この増加分に対応する飼料作物の量を見積もり、これを全て追加的に国内で生産すると仮定した。
- 3) 耕地の窒素利用効率：アジアの数カ国について窒素利用効率(窒素のアウトプット/インプット)の経年変化を図3に示した。日本は期間を通してほぼ0.4であり、中国やインドなど化学肥料の使用量が増加してきた国では、日本の値に近づいている。このトレンドに基づいて対象年の効率を推定した。

		中国			インド			ベトナム		
		2007	2022	比	2007	2039	比	2007	2037	比
人口	億人	13.3	14.0	1.05	11.6	14.2	1.22	0.9	1.0	1.11
一人当たり食料										
総タンパク質	kg N /人	5.26	5.26	1.00	3.36	3.53	1.05	4.16	4.37	1.05
動物性	kg N /人	2.00	2.04	1.02	0.62	0.64	1.02	1.47	1.55	1.05
作物吸収窒素量										
総量	万トン	1762	1916	1.09	1086	1414	1.30	111	143	1.28
耕地面積当たり	kgN/ha	143.8	156	1.09	64.2	84	1.30	118.4	151.9	1.28
農地への総窒素インプット	万トン	4221	4663	1.10	2072	3186	1.54	195	285	1.46
窒素利用効率		0.42	0.41		0.52	0.44		0.57	0.50	
窒素バランス*	kgN/ha	200.6	224.1	1.12	58.2	104.7	1.80	88.8	150.4	1.69

\*窒素バランスの計算には、アンモニア揮散や窒素固定等が含まれていないので、図2の結果と異なる。

一人当たりのタンパク質摂取量、特に動物性タンパク質摂取量の増加、および窒素利用効率の低下を仮定したため、どの国も人口の増加と比較して窒素バランスの増大が大きくなっている。インドの2039年における平均窒素バランス105 kg/haというのは、2007年時点でのビハールやウッタル・プラデシュ州などヒンドゥスタン平原の諸省に次ぐ高い値であり、インド全域で高い負荷となることになる。更にベトナムでも現在の2倍以上、現在の日本や中国と同程度の値が推定された。農地面積率の高いインドやベトナムでは、農地面積当たりの窒素バランスの値が日本と同程度であった場合でも、その水質汚染への影響はより深刻であると考えられる。

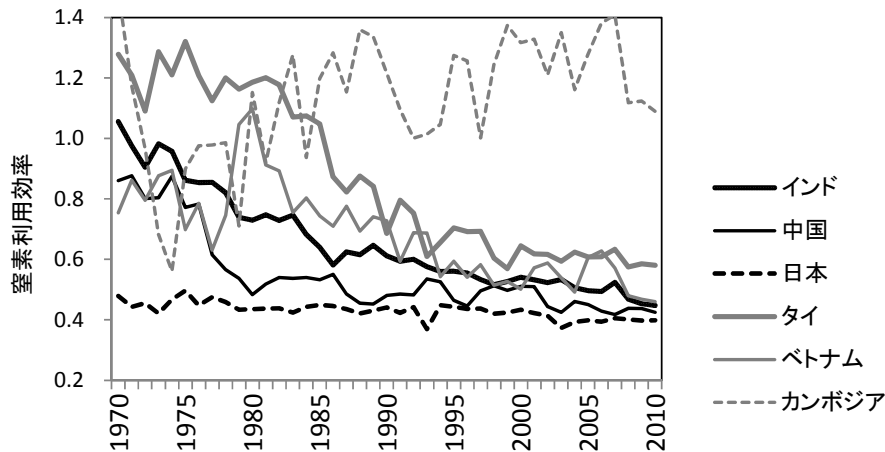


図3 窒素利用効率の経年変化

環境の悪化を低減する第一の方策は、窒素利用効率の向上で有り、対象年の利用効率が中国で0.5に向上し、インドとベトナムで現在の値を維持したと仮定した場合、対象年での窒素バランスは、中国で2007年の0.91倍と現在より小さくなり、インド、ベトナムで各々1.31倍、1.29倍と、表3よりかなり小さな上昇となる。窒素利用効率を上げる何らかの対策がとられるべきであろう。アジアの農業由来の窒素は、欧米と異なって化学肥料の寄与が大きい。そして施肥効率を高めるための方法としては、適切な種類の肥料を使うこと、適切な養分比率（窒素、リン酸、カリウムのバランス）、適切な施肥時期（作物が要求するとき）と施肥場所（土壌ではなく作物に直接など）、硝化抑制剤の利用、脱窒を抑制する水管理、カバークロップの栽培など様々なレベルのものが提案されており<sup>15)</sup>、その実践や効果について様々に研究が行われている。どのような対策がアジアにおいて適切で、有効であるか、どのような規模で導入できるか検討が必要であろう。それぞれの国の条件にも依存するが、食料需要が増加する中で、窒素による環境汚染を悪化させずに、或いは改善させつつ食料を供給することはアジアの大きなチャレンジである。

#### 参考文献

- 1) Smil, V. 2000. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*, Cambridge: The MIT Press.
- 2) ヘイガー、トーマス 2010 『大気を変える錬金術：ハーバー、ボッシュと化学の世紀』 渡会圭子（訳）、みすず書房。
- 3) OECD. 2008. *Environmental performance of agriculture in OECD Countries since 1990*, Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development.
- 4) European Commission. 2010. Report from the Commission to the Council and the European Parliament On implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the

period 2004-2007

- 5) スミル、バーツラフ 2003 『世界を養う』 逸見謙三・柳澤和夫訳、農文協。
- 6) Shindo, J. Okamoto, K. Kawashima, H. and Konohira, E. 2009. "Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005," *Soil Science and Plant Nutrition*, 55.
- 7) 新藤純子 2014 食料生産に伴う窒素循環と環境汚染ーインドとアジア諸国の変化ー, 181-224. 水島司・川島博之(編)「激動のインド 第2巻 環境と開発」、日本経済評論社
- 8) Shindo, J. 2012. "Changes in the nitrogen balance in agricultural land in Japan and 12 other Asian Countries based on a nitrogen-flow model," *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94.
- 9) 中華人民共和国環境保護部 2011 『中国環境状況公報 2011』
- 10) The World Bank. 2006. "CHINA Water Quality Management – Policy and Institutional Considerations"
- 11) Raju, N. J. Ram, P. and Dey, S. 2009. "Groundwater Quality in the Lower Varuna River Basin, Varanasi District, Uttar Pradesh," *Journal of the Geological Society of India*, 73.
- 12) Ramakrishnaiah, C. R. Sadashivaiah, C. and Ranganna, G. 2009. "Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India," *E-Journal of Chemistry*, 6.
- 13) Sankararamakrishnan, N. Sharma, A. K. and Iyengar, L. 2008. "Contamination of nitrate and fluoride in ground water along the Ganges Alluvial Plain of Kanpur district, Uttar Pradesh, India," *Environmental Monitoring and Assessment*, 146.
- 14) 川島博之 2014 インドの農村と食料生産, 119-179. 水島司・川島博之(編)「激動のインド 第2巻 環境と開発」、日本経済評論社
- 15) Giller, K. E. Chalk, P. Dobermann, A. Hammond, L. Heffer, P. Ladha, J. K. Nyamudeza, P. Maene, L. Ssali, H. and Freney, J. 2004. "Emerging technologies to increase the efficiency of use of fertilizer nitrogen," in Mosier, A. R., Syers, J. K., Freney, J. R. (ed.), *Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*, Washington D. C: Island Press.