

## 群馬県における地下水への窒素負荷分布の推定\*

熊谷 貴美代\*\*・富岡 淳\*\*・小澤 邦 壽\*\*

キーワード ①地下水汚染 ②硝酸性窒素 ③発生源 ④畜産 ⑤ GIS

### 要 旨

地下水硝酸性窒素汚染の発生源負荷量を定量的に把握するため、3次メッシュ窒素負荷量分布推計モデルを構築し、群馬県における地下水窒素負荷分布を求めた。群馬県全体では7600tN/yrの窒素が地下水へ負荷されていると推計された。農業負荷分布は広範囲に広がっているのに対し、畜産(過剰施肥)による負荷は高負荷が局所的に分布していることがわかった。硝酸性窒素汚染は畜産排せつ物の過剰な農地還元が大きな要因となっていることが明らかとなり、地下水質の改善のためにはまず畜産排せつ物の過剰施肥を排除することが重要と考えられる。

### 1. はじめに

硝酸性窒素による地下水汚染は全国的に問題となっている。群馬県はとくに汚染が深刻であり、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素の調査が開始された平成12年度以降、基準超過率は13.6%~29.8%と全国平均を大きく上回り、全国ワースト上位が続いている。群馬県内の汚染状況をみると平野部を中心に汚染が進行しており、とくに県南東部の大間々扇状地では40mg/Lを超える濃度が検出されている。この地域では畑作や畜産が盛んであり、負荷原因は農地系および畜産系由来のものが大部分を占めると推定されている<sup>1)</sup>。

硝酸性窒素汚染は施肥、家畜ふん尿、生活排水など発生源が多岐にわたり、それらは地域の人間活動と密接に関係している。このため、各地域の状況に応じた有効な対策を実施することが必要である。複合的な汚染である硝酸性窒素汚染に対し、効果的な環境改善対策を講じるために

は、まずは各汚染源からの負荷量を定量的に把握することが必要である。また発生源寄与率を把握することで削減対策効果の予測にも発展できると考えられる。これまでも窒素負荷量を推計した報告<sup>2,3)</sup>はあるが、いずれも県単位あるいは市町村単位レベルでの広範囲を一括した推定モデルである。地下水汚染の場合、その直上および近傍の狭い範囲での地表面における土地利用状況が大きく影響すると考えられることから、より細分化された地域単位での負荷量推定、発生源解明が必要である。そこで本研究では、地下水窒素汚染に対する発生源負荷を詳細かつ定量的に把握することを目的とし、細分化メッシュによる負荷量推定モデルを構築した。これにより、群馬県における窒素負荷量分布を求め、地下水汚染への影響について考察を行った。

\*Estimation of Nitrogen Load Distribution for Groundwater in Gunma.

\*\*Kimiyo KUMAGAI, Atsushi TOMIOKA, and Kunihisa KOZAWA(群馬県衛生環境研究所)Gunma Prefectural Institute of Public Health and Environmental Sciences

## 2. 方 法

### 2.1 対象地域の概要および使用データ

対象地域は群馬県全域とした。群馬県の北西部は山間部、南東部は関東平野となっており、平野部に市街地、工業地域が集中している。農業においては、平野部では水稲と小麦の二毛作が盛んであり、きゅうりやほうれん草などの野菜の生産量も多い。一方、山間部では水稲は一毛作で、こんにゃくも、キャベツ、レタスなどの野菜や果樹の栽培が盛んである。農産物生産量の全国順位を見ると、こんにゃくも、きゅうり第1位、キャベツ第2位、ほうれん草第3位、小麦、レタス第4位(いずれも平成18年)である。畜産は県中央部の赤城および榛名山麓を中心に酪農、養豚が盛んであり、生産量は生乳全国第4位、豚第5位(平成18年)である。

解析に用いた統計データは2000年を基本とし、当該年度がないものについてはそれにもっとも近い年度のデータを利用した。世界農林業センサス(2000年, 農林水産省), 群馬県工業統計(2000年, 群馬県統計課), 群馬県汚水処理状況(2000年, 群馬県統計課)などの旧市町村でのデータセットおよび土地利用3次メッシュデータ(1997年, 国土交通省), 気候メッシュデータ(2000年, 気象庁)を用いた。また地下水濃度の実測値として, 群馬県地下水質測定結果(概況調査)(平成12~19年度)を用いた。表1に対象年における群馬県の土地利用, 農業, 畜産, 汚水処理の主な概況を, 図1に地下水硝酸性窒素の汚染状況について概況調査における環境基準超過地域を示した。

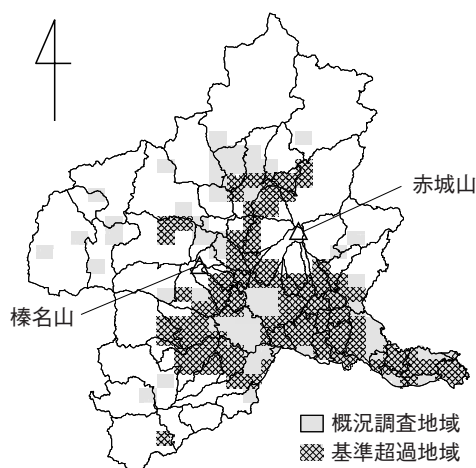


図1 地下水硝酸性窒素および亜硝酸性窒素環境基準超過地域(平成12~19年度)(熊谷ら)

### 2.2 窒素負荷量推計モデルの構築

窒素負荷量は各種統計データを基に算出するが, 既存のほとんどの統計データは市町村毎の集計である。しかしながら地下水汚染においては, 前述したようにより狭い範囲での土地利用状況に影響されると考えられることから, 本モデルは3次標準地域メッシュ(JIS X 0410)(約1 km<sup>2</sup>)を単位に構築し, 最終的にGISデータとして整備した。

窒素発生源は農業, 畜産, 生活排水, 工場, 大気の大分類とした。本研究では, 畜産から発生するふん尿のうち堆肥として使用される分は農業負荷とし, 施肥基準量に対して過剰に農地に投与される分は畜産(過剰施肥)負荷と定義した。原単位法によりそれぞれの窒素発生量を算出し, それに

表1 群馬県の主な概況(2000年)

土地利用					
面積	総面積	田	その他農用地	森林	建物用地
[km <sup>2</sup> ]	6363	401	739	4241	449
農業(主な作物)					
作付面積	水稲	小麦	ほうれん草	キャベツ	
[ha]	14343	6737	1241	3338	
畜産					
頭数	乳用牛	肉用牛	豚	採卵鶏	ブロイラー
[頭・100羽]	49739	65306	438070	33053	26640
汚水処理状況					
人口	全人口	汚水処理人口(うち合併浄化槽)			
[千人]	2019.7	902.3	(169.9)		

溶脱率を乗じることで地下水への窒素負荷を求めた((1)式)。

$$L_i = D_i \times a_i \quad (1)$$

$L_i$  : 発生源  $i$  による地下水への窒素負荷量

$D_i$  : 発生源  $i$  からの窒素発生量

$a_i$  : 発生源  $i$  における溶脱率

種々の統計データより発生源別窒素負荷量を市町村単位で算出し、土地利用3次メッシュデータを基にそれぞれの発生源データを3次メッシュに細分化した。対象地域のメッシュ数は6034メッシュであった。発生源別の負荷量算出結果はGISソフト(Mandara, ver. 8.05)を用いて負荷分布を出力した。

各発生源の負荷量算出方法は以下に示す。

### (1) 農 業

農地における窒素供給量は各種農作物の作付面積と施肥量によって決まる。農作物は水稻、小麦、きゅうり、レタスなど34種に分類し、各作物について群馬県施肥基準<sup>4)</sup>を参考に単位面積当たりの施肥量を設定した。なお、施肥は化学肥料と堆肥を併用するとし、それぞれの施用量は施肥基準に記載されている通りとした。

堆肥中の窒素含有率は、後述する畜産発生ふん量から堆肥化係数<sup>5)</sup>を用いて畜種ごとに堆肥量を算出し、この堆肥量と畜種別堆肥中窒素含有率<sup>4)</sup>(牛ふん堆肥0.7%, 豚ふん堆肥1.8%, 鶏ふん堆肥2.6%)から算出した加重平均値(0.89%)を用いた。化学肥料窒素量と堆肥中窒素含有量の和が農地へ投入される窒素量であり、これに作物別作付面積(農林業センサス)を乗じて窒素発生量とした。溶脱率は水稻については5%, 牧草地では15%<sup>6,7)</sup>, それ以外の作物では國松<sup>8)</sup>の窒素施肥量と溶脱量の関係式を用いて窒素溶脱量を求めた。この関係式により算出された作物別の溶脱率は平均36.8% (34.0~64.6%)であった。

### (2) 畜 産

畜産負荷は家畜排せつ物が堆肥として農地還元されることにより引き起こされる。家畜排せつ物として発生する窒素量の算出には、牛、豚、鶏の頭数(農林業センサス)と家畜ふん尿施設の規模算定に用いられる数値を基に発生するふん尿量を求

表2 家畜排せつ物の原単位

畜 種	生重量 [kg/day/頭羽]		N 原単位 [kgN/day/頭羽]
	ふん	尿	
乳用牛	50	15	0.18
肉用牛	18	7	0.10
豚	2.5	5.4	0.076
採卵鶏	0.1	—	0.0019
ブロイラー	0.087	—	0.0010

め、さらに家畜種ごとのふん尿中の窒素含有率を乗じることによって求めた<sup>9)</sup>。表2に本研究で用いた家畜排せつ物の原単位を示す。群馬県内の全畜産農家を対象に行った畜産排せつ物に関するアンケート調査<sup>10)</sup>によると、肥料としての利用量は発生ふん尿量の65%であり、残りは浄化や減量化されているとの結果が得られている。また同アンケート結果から肥料利用された排せつ物のうち74%が自家利用および同一市町村内で利用されていることが分かっている。このことを考慮して、本モデルにおいては畜産から発生する窒素のうち70%が農地還元され、それらはすべて同一市町村内であると仮定した。農地還元された窒素量が農地で必要とされる施肥基準を超えている場合は、その超過分を過剰施肥と見なし、これを畜産系負荷とした。

### (3) 生活排水

合併浄化槽、単独浄化槽、雑排水のうち地下浸透処理しているものが地下水への負荷となる。下水道は下水処理場から全て河川へ放出されるので、地下水への負荷にはならないとした。窒素発生原単位は合併浄化槽2.4kgN/人/yr、単独浄化槽1.9kgN/人/yr、雑排水0.7kgN/人/yrを用いた<sup>11)</sup>。発生基数には汚水処理施設普及人口統計(群馬県統計課)<sup>12)</sup>, し尿処理統計(群馬県廃棄物政策課)<sup>13)</sup>を使用した。なお単独浄化槽人口に対しては、単独浄化槽および雑排水の合算、非水洗化人口に対しては雑排水のみを負荷とした。地下浸透割合は県南東部の市町村における実際の浄化槽設置状況から、合併浄化槽5%, 単独浄化槽(非水洗化世帯を含む)20%と設定した。溶脱率は文献値90%<sup>6)</sup>を採用した。

### (4) 工 場

工場排水による負荷は産業中分類ごとに推計した。産業中分類別製造品出荷額 [百万円] (群馬

県工業統計)と排水量原単位[m<sup>3</sup>/day/百万円]<sup>11)</sup>、および排水中の窒素濃度<sup>14)</sup>から、窒素排出量を求めた。工場排水は一般的に各事業所で処理された後、公共用水域に放流されるが、本モデルでは地下水への負荷として公共下水道が整備されていない地域を対象にし、工場排水量の10%が地下浸透していると仮定した。溶脱率は文献値より90%<sup>6)</sup>とした。

### (5) 大 気

大気からの負荷としては湿性沈着と乾性沈着があるが、乾性沈着を求めるのに必要なデータが未整備であるため、本モデルでは湿性沈着のみを対象にした。森林地域と森林以外の地域に分け窒素負荷量を算出した。

非森林地域における湿性沈着による窒素負荷量は、群馬県酸性雨調査より前橋(県央)、高崎(県西部)、太田(県東部)、中之条(県北部)の4地点における降水中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>およびNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度から計算した年間湿性沈着量(それぞれ2.04, 1.67, 1.49, 1.50tN/km<sup>2</sup>/yr)<sup>15)</sup>に土地面積と地下浸透率を乗じて求めた。

森林地域においては、大気から供給される窒素分は森林によって吸収されることを考慮し、赤城山中腹のバックグラウンド地点における地下水濃度(実測値0.31mg/L)に涵養水量を乗じたものとした<sup>6)</sup>。

### 2.3 涵養水量の算出

各地域における地下に浸透する水量(涵養水量)は(2)式によって求められる。

$$V_{GW} = (V_R - V_E) \times a \times S \quad (2)$$

V<sub>GW</sub>; 涵養水量

V<sub>R</sub>; 年間降水量

V<sub>E</sub>; 年間蒸発散量

S; 面積

a; 地下浸透率

蒸発散量は気候メッシュデータ(気象庁)の気温データを用いてThornthwaite法<sup>16)</sup>により算出した。地下浸透率は、流出係数<sup>17,18)</sup>を参考に土地利用に応じた値を設定した。なお水田については、非かんがい期(10~5月)は畑地と同じ扱いとし、かんがい期(6~9月)は減水を0.015m/day<sup>19)</sup>から蒸発散分を差し引くことにより地下浸透分を算

出した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 畜産排せつ物および施肥による窒素発生量

畜産頭数から算出された畜産排せつ物量は県全体で315万t/yr、窒素量では20千tN/yrであり、赤城山麓や榛名山麓の市町村に集中的に分布していた。このうち農地還元されて地下負荷となるのは14千tN/yrである。施肥基準と作付面積より求められた農地への全窒素投入量(化学肥料+堆肥)は14千tN/yrであり、化学肥料と堆肥含有窒素の内訳は作物によって異なるが、平均するとおおよそ1:1の割合であった。

### 3.2 地下水への発生源別窒素負荷量

本研究で構築したモデルにより推計した結果、群馬県全体では7.6千tN/yrの窒素が地下浸透していると見積もられた。窒素の発生源割合は各メッシュによって大きく異なるが、県全体で見ると図2に示すとおり農業43%、畜産30%、生活排水6%、工業1%、大気20%であった。

図3に推計モデルにより得られた発生源別窒素負荷分布のうち、農業と畜産(過剰施肥)由来の結果と全発生源合計負荷分布を示す。農業由来の負荷は広範囲にわたって数千kgN/yr/meshの負荷が分布しているのに対し、畜産(過剰施肥)の負荷は赤城南麓、榛名東麓の畜産地域を中心に極めて高い負荷が偏在していた。生活系負荷は一部の地域で1000kgN/yr/meshを越えている程度であった。大気負荷は平野部でおおよそ1000~2000kgN/yr/meshの範囲であり、生活排水や工場よりも大きな負荷量となっていた。メッシュによ

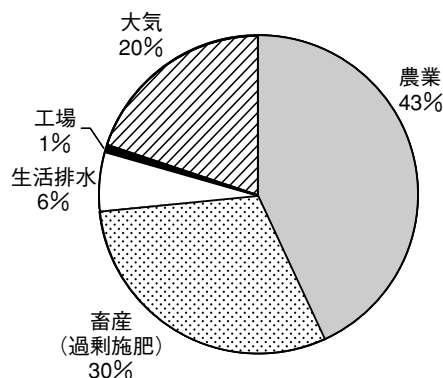


図2 群馬県全体の地下水窒素負荷に対する発生源割合(熊谷ら)

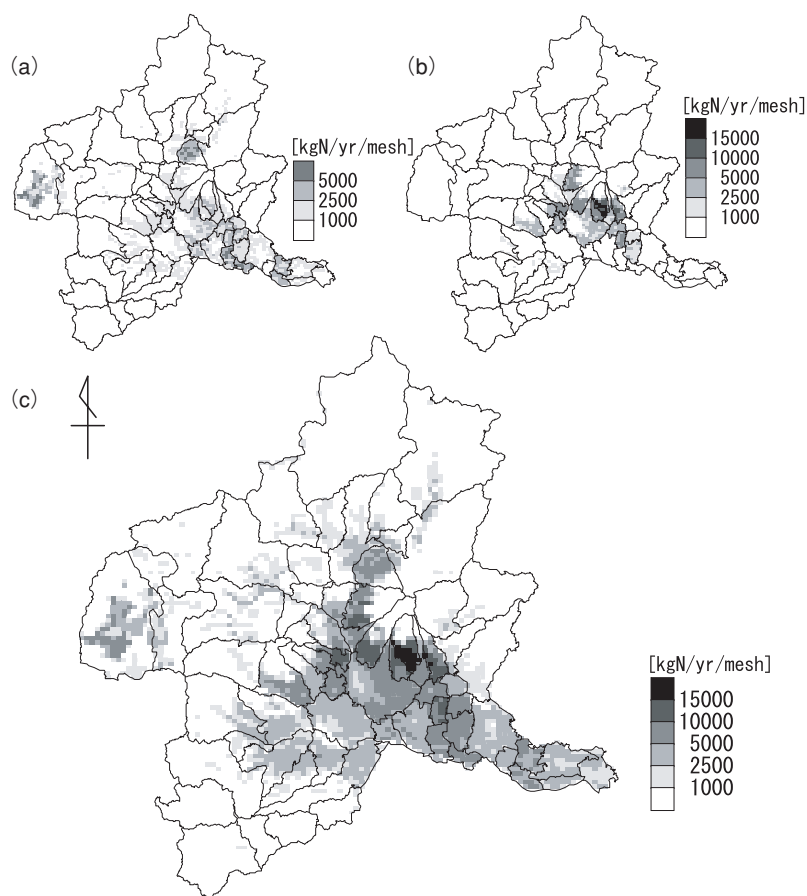


図3 地下水窒素負荷分布(3次メッシュ単位,  $n=6034$ )  
 (a)農業由来,  
 (b)畜産(過剰施肥)由来,  
 (c)全発生源合計, (熊谷ら)

ては大気負荷が農業に匹敵する発生源となっている地点も存在した。本研究では乾性沈着を考慮していないため、大気負荷は過小評価である可能性が高いことを考えると、大気による沈着も無視できない窒素発生源であるといえる。

全負荷量で見ると、赤城、榛名山麓を中心に10000kgN/yr/meshを超える高負荷が分布しているという結果が得られた。これらのメッシュでは、全負荷量のうち畜産(過剰施肥)の占める割合は50~77%と大きな比率となっていた。また野菜類の作付面積が多い北部(旧昭和村)、西部(嬬恋村)、南東部(大間々扇状地地域)の地域でも比較的高い負荷が分布している傾向がみられた。

### 3.3 地下水汚染地域と非汚染地域の窒素負荷量の比較

平成12年度から19年度までの地下水概況調査結果を用いて、地下水質と窒素負荷量との関係を検討した。概況調査は、群馬県を4 kmメッシュで区切り、居住地区を対象に1つのメッシュから1井戸を選定して地下水質を測定している。した

がって、概況調査1メッシュには本モデルの16メッシュが相当する。なお、県境で本モデル3次メッシュデータ数が10に満たない概況調査メッシュは解析の対象外とした。

地下水環境基準を超過したことがある基準超過地域(図1)と基準達成地域のメッシュについて、平均負荷量を算出した結果を図4に示す。基準超過メッシュでは基準達成メッシュの2倍以上の負荷量であった。発生源別に見ると大気、生活排水、工場由来の負荷量はあまり差がないのに対し、基準超過地域における畜産、農業の負荷は基準達成地域に比べ大きな値となっており、畜産負荷は7倍となっていた。このことから、硝酸性窒素汚染は農業と畜産排せつ物の過剰施肥がもっとも大きな原因であり、環境基準達成のためにはまず過剰施肥を削減することが重要であるといえる。不必要な畜産排せつ物の農地還元をなくすために、化学肥料から堆肥への肥料転換や、排せつ物の農地還元以外の利用を検討すべきである。

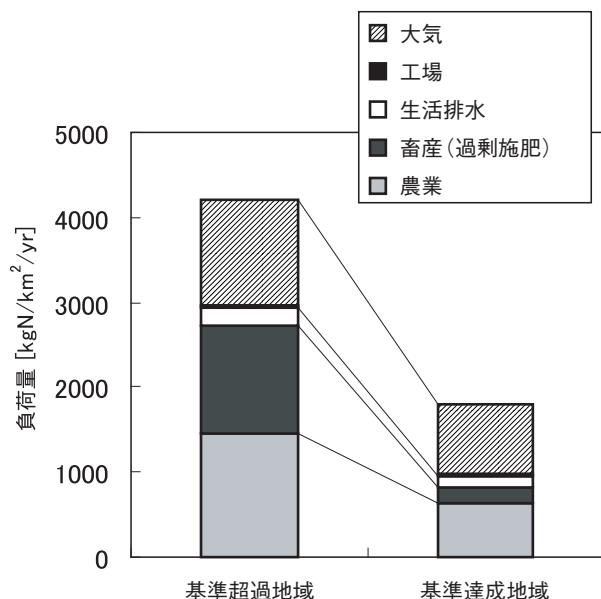


図4 地下水硝酸性窒素濃度の環境基準超過地域と基準達成地域における発生源別窒素負荷量平均値(熊谷ら)

### 3.4 窒素削減効果の評価

家畜排せつ物の過剰施肥が地下水汚染の主たる要因の一つであることが分かったので、この過剰施肥を削減した場合、どの程度地下水質改善効果があるかを推定した。地下水中の窒素濃度を正確に推定するためには、ボーリングデータなどの地質情報や地下水流動解析などを用いなければならず、極めて難しい。そこで本研究では、簡易的に窒素負荷量を涵養水量で除することにより浸透水中の窒素濃度を予測した。予測された濃度が環境基準値10mg/Lを下回れば、その地点では地下水汚染の可能性は極めて低いと考えられる。また逆に10mg/Lを超過していれば、すでに環境基準超過している地点では改善の見込みはほとんどなく、現在基準超過していない地点でも将来的には環境基準超過の可能性があると考えられる。

図3の全負荷量と涵養水量から現状での予測濃度を3次メッシュ単位で求めたところ、全6034メッシュのうち10mg/Lを超過するメッシュ数は694メッシュであり、うち24メッシュは40mg/L以上であった。畜産(過剰施肥)による負荷をすべて排除し0とした場合の予測濃度を算出したところ、10mg/Lを超過する3次メッシュ数は374メッシュと大幅に減少した。したがって畜産(過剰施肥)負荷が大きく、それが主たる汚染原因となっ

ているメッシュでは地下水質の改善が期待される。しかしその一方で、畜産の過剰施肥を削減するだけでは効果が現れないメッシュも存在した。このようなメッシュでは農業負荷削減対策や大気負荷の削減を検討する必要がある。農業負荷の削減対策としては、岐阜県各務原市のように減肥対策により農産物の収量や品質を維持したまま地下水質改善に成功した事例<sup>20)</sup>などがあることから、施肥基準の見直しを視野に入れた農業技術開発を行う必要があると考えられる。また大気由来の窒素負荷は、元は大気中に排出された人為起源の窒素酸化物やアンモニアに起因するものであるから、これらの削減も対策の一つとしてあげられる。

## 4. ま と め

統計データを基に地下水に対する窒素負荷分布推計モデルを構築し、群馬県における地下水窒素負荷分布を得た。これにより、細分化された地域毎に硝酸性窒素汚染の原因を把握することが可能になった。地下水に対する窒素負荷は、とくに畜産が盛んな地域で局所的に高負荷が分布していると推定され、群馬県における硝酸性窒素汚染は、畜産排せつ物の過剰な農地還元と農業による施肥が主たる汚染源であることが明らかとなった。発生源の構成は地域によって大きく異なるが、地下水汚染対策として、まず畜産排せつ物の過剰な農地還元を廃止することが必要であることが分かった。これにより畜産負荷の集中している地域では地下水質の改善効果が期待できると示唆された。畜産排せつ物の過剰施肥を削減するためには、化学肥料から堆肥への肥料転換や家畜排せつ物のバイオマスエネルギー利用など農地還元以外の用途拡大も開発する必要があるだろう。

## 謝 辞

本研究は、JST、群馬県地域結集型研究開発プログラムの一環として行った。研究を遂行するにあたり、ご協力いただいた当所水環境・温泉研究センターの関係諸氏に深く感謝いたします。

## — 参 考 文 献 —

- 1) 小菅香苗, 熊谷貴美代, 飯島明宏, 下田美里, 須藤和

- 久, 富岡淳, 加藤政彦: 地下水硝酸性窒素汚染の解明および負荷量削減対策効果の予測. 水環境学会年会講演集, p. 359, 2008
- 2) 原田靖生: 家畜排泄物の農地施用と窒素の制御. 用水と廃水, **46**, 307-313, 2004
- 3) 島田洋子: 都市域における土壌・地下水の窒素汚染評価モデル—神戸市における土壌への窒素負荷量の推計—. 用水と廃水, **45**, 1076-1084, 2003
- 4) 群馬県農政部: 群馬県作物別施肥基準及び土壌診断基準. 2004
- 5) 群馬県農政部: 群馬県有機性資源循環利用マスタープラン. p. 12, 2002
- 6) 環境省水環境部地下水・地盤環境室監修: 硝酸性窒素による地下水汚染対策の手引. p. 131, 公害研究対策センター, 東京, 2002
- 7) 田淵俊雄, 高村義親: 集水域からの窒素・リンの流出. pp. 67-73, 東京大学出版, 東京, 1985
- 8) 久馬一剛, 祖田修編著, 農業と環境. pp. 129-131, 富民協会, 大阪, 1995
- 9) 原田靖生: 家畜ふん尿の特性と処理利用の基礎知識. 農林水産省畜産局中央畜産技術研修会資料, 1997
- 10) 群馬県畜産課: 家畜ふん尿処理・利用等についてのアンケート結果について. <http://www.pref.gunma.jp/cts>.
- 11) 建設省都市局下水道部監修: 流域別下水道整備総合調査 指針と解説. p. 32-69, p. 190-209, 日本下水道協会, 東京, 1999
- 12) 群馬県下水道環境課: 平成12年度下水(汚水)処理に係わる施設普及人口調査結果. 2001
- 13) 群馬県廃棄物政策課: 平成13年度群馬県の廃棄物. p. 36-37, 2001
- 14) 環境省: 平成14年度水質汚濁物質排出量総合調査(調査結果概要), p. 104-105, 2003
- 15) 群馬県環境保全課: 平成17年度水質測定結果・大気環境調査結果, 2007
- 16) Thornthwaite, C. W.: An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55-94, 1948
- 17) 武田宏: 大規模工業団地計画における流出係数の考え方. 国立防災科学技術センター研究報告, **24**, 69-86, 1980
- 18) 国土交通省河川局監修: 国土交通省河川砂防技術基準同解説・計画編. p. 35, 日本河川協会, 東京, 2005
- 19) 中澤弑仁: 水資源の科学. 朝倉書店, 1991
- 20) 平田健正編著: 土壌・地下水汚染と対策, p. 240-245, 日本環境測定分析協会, 東京, 1996