

(12) 地下水の窒素汚染とその原因に関する基礎的考察

Fundamental considerations on nitrogen pollution
of groundwater and its causes

国包章一*, 真柄泰基*

Shoichi KUNIKANE*, Yasumoto MAGARA*

ABSTRACT; The statistical data of municipal water supply were analysed to assess nitrogen pollution of groundwater in each prefecture of Japan. The weighted mean concentration of nitrate plus nitrite nitrogen in groundwater for all over Japan was $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in 1970 F.Y., $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in 1975 F.Y. and $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in 1980 F.Y., and no obvious trend was found. The weighted mean concentration of shallow well water for all over Japan was about $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in these three years which was always higher than the concentration of any other groundwater such as deep well and spring waters.

To compare with the above result the mean nitrogen concentration in groundwater was estimated supposing that nitrogen loaded the ground from such sources as domestic wastewater, chemical fertilizer, and livestock and poultry wastes would be uniformly diluted with effective rainfall. The estimated mean nitrogen concentration in groundwater for all over Japan was $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which was approximate to the actual weighted mean concentration of nitrate plus nitrite nitrogen in groundwater. From aspect of contribution to groundwater nitrogen pollution, chemical fertilizer had the largest proportion, and livestock and poultry wastes the second largest, and domestic wastewater had only a negligible proportion. The actual and estimated nitrogen concentrations in groundwater in each prefecture did not always agree with each other, and the reasons were discussed.

KEYWORDS; Groundwater pollution, Nitrate nitrogen, Water supply, Estimation, Nitrogen source

1. はじめに

地下水は表流水に比べて水源として種々の利点がある。地下水は一般に水質が良好で、水温も年間を通じてほぼ安定しており、しかも比較的容易に取水できる。このため地下水は、水道水、工業用水、及び農業用水として広く利用されてきた。近年、東京・大阪をはじめいくつかの地域で地下水の過剰揚水による地盤沈下が問題となり、その利用に法的な規制が加えられたが、その水源としての重要性は依然として変わっていない。

しかしながら、表流水の水質に関しては規制があるにも拘らず、地下水の水質に関しては現在でも規制が全くなく、このため本来は水質が良好であるはずの地下水も、徐々に汚染が進行しているものと考えられる。例えば浮田¹⁾は、北九州市及び宇部市で、水道水源として利用されている地下水について検討しており、水源

* 国立公衆衛生院 The Institute of Public Health

によつては硝酸態窒素の濃度が、経年的に著しく上昇していることを明らかにしている。地下水はその存在状態が表流水と大いに異なり、水の流れを肉眼で観察できないばかりでなく、移動速度が一般に極めて遅い。それゆゑ、地下水の汚染状況を正確に把握することは非常に困難であり、断片的な情報しかえられていない。まして、全国的な汚染状況については殆んどわかっていないのが実情である。

そこで本研究では地下水のとくに窒素による汚染に焦点をあてて、その現状と汚染の原因について明らかにするために、水道水源地下水の硝酸態窒素による全国的な汚染状況について検討するとともに、その原因について考察を加えた。水道水源の硝酸態窒素による汚染はそれ自体が衛生上の問題であり、また地下水の窒素による汚染は、湖沼など表流水域の富栄養化とも密接な関係があると考えられる。

2. 水道水源地下水の硝酸態窒素による汚染状況

2.1 水道水源としての地下水の位置づけ

昭和55年度における水道による取水量の水源別内訳をみると、伏流水が7.1%、浅井戸が6.6%、及び深井戸が14.5%を占めており、これらをあわせると地下水への依存率は28.2%となる。²⁾ことに近年の浅井戸と深井戸についての需要増には著しいものがある。坂本の報告によれば、1965年から1979年までの14年間に於ける増加率は、全取水量が2.05倍に対して、浅井戸は3.89倍、深井戸は2.85倍にも達しており、表流水の2.07倍をいずれもこえている。また、この間に全国の水道普及率は約69%から約91%へと上昇した。これらの経緯を考えあわせると、近年における水道普及率の急速な伸びは、浅井戸と深井戸の開発に負う所が大きいと言える。

規模別に水源の内訳をみてみると、給水人口が25万人未満の水道では、地下水への依存率が最も高くなっている。⁴⁾しかし、地下水を水源としている水道では、原水水質が良くないために支障をきたしている場合がある。とくに以下で述べる硝酸・亜硝酸態窒素に関しては、処理技術が確立されていないこともあり、水源の変更や他の浄水との混合により対処しているのが実情である。⁵⁾しかし、現実には代替水源がなく、その対策に苦慮している水道も多いようである。また、地下水を水源としている水道が上記のように概して小規模であるために、水質管理の面で問題があることも多い。はじめに述べたように地下水水質に関する規制が全くなく、監視体制も確立されていない現状を考えあわせると、地下水に主として依存している小規模水道は、水質の面からみて不安定な状況に置かれていると言わざるをえない。

2.2 汚染状況の全国的な推移

全国の水道水源地下水の窒素による汚染状況を明らかにするために、「水道統計」(社日本水道協会)に記載されている上水道の原水水質データをもとに、地下水中の硝酸・亜硝酸態窒素濃度(硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計濃度、以下同じ)の頻度分布、及びその取水量による荷重平均濃度について調べた。「水道統計」にはアンモニア態窒素の濃度も記載されているが、その濃度は概して低く、またデータの不備が多いので、ここでは考慮に入れないことにした。対象年度は昭和45、50、及び55年度とし、伏流水は同じ地下水でも他とは性格が異なるので、とりあえず対象からはずしたが、湧水は対象としてとり上げた。採用したデータは、取水量と硝酸・亜硝酸態窒素濃度がそろってあるものに限った。サンプル数は45年度が593、50年度が1,058、及び55年度が1,313である。

Fig 1は上記の各年度について、全国における濃度階級別の相対出現頻度を示したものである。昭和53年に飲料水の試験方法が改正され、これに伴って硝酸態窒素の分析方法が変わったことを考慮する必要があるが、 $1 \sim 7 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ の濃度範囲においては、いずれの階級でも年を経るごとに相対頻度が高くなっており、なかでもとくに浅井戸の出現頻度が高くなってきている。しかしながら、 $7 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ 以上の場合においては、明確な経年変化の傾向が認められない。硝酸・亜硝酸態窒素濃度が飲料水基準の $10 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ をこえる事例は、図中に示したように各年度とも1~3例が認められており、数十 $\text{mg} \cdot \ell^{-1}$ というような顕著に高い値も報告されている。原水中の硝酸態窒素は、通常の浄水処理で除去することは困難なので、仮にこのような高い濃

度で常に検出されるとすれば、その原因と影響について詳しく検討する必要がある。

次に、同じデータを用いて水源の種別ごとに、地下水中の硝酸・亜硝酸態窒素濃度を、取水量により荷重平均した結果について、Table 1 に示す。地下水の取水量は滞水層の規模を反映していると考えられるので、単純平均よりも荷重平均の方が、地下水の全般的な汚染状況を知る上で適切であると考えられる。また、このようにして計算すれば、その結果を土壌に対する窒素負荷と関連づけて評価することも可能である。

Table 1 の結果から、全国の水道で利用している地下水の硝酸・亜硝酸態窒素の平均濃度は、45年度が $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、50年度が $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、及び55年度が $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であることがわかる。これを水源の種別ごとにみれば、浅井戸が各年度とも $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前後で最も高いが、少なくとも55年度に関しては、深井戸や湧水などとそれほど大きな差が認められない。経年的な変化はあまり明確でないものの、湧水とその他では年を追うごとにかなり濃度が上昇している。昭和45年度に深井戸でやや高い平均濃度がえられているのは、さきに Fig. 1 に示した異常値による影響が大きいからで、これを除くと他の年度とはほぼ同じ程度の濃度になる。なお、これらの各年度における全サンプルについての地下水取水量は、上水道による全地下水取水量（伏流水を除き、湧水を含む）の過半を占めることを確認しており、代表性という点に関してはまず問題がない。

2.3 各都道府県ごとの汚染状況

前記の結果を各都道府県ごとに整理したのが Fig. 2 (a), 2 (b) である。これらの図では取水量を横軸に、硝酸・亜硝酸態窒素量を縦軸にとって、両対数で示しているので、等濃度線は平行な直線で表わされる。ここでは、各都道府県ごとのサンプル数が10未満のものは、地下水の汚染状況を正確に反映していないと考えて除外した。このようにすると45年度は除外例が多くなるので、50年度と55年度だけについて図示した。サンプル数が多くても取水量が少ないものについては代表性に乏しいと考えなければならないが、群馬・東京・神奈川などは45年度も含めて3ヶ年とも、 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前後かこれ以上の比較的高い値を示している。これに

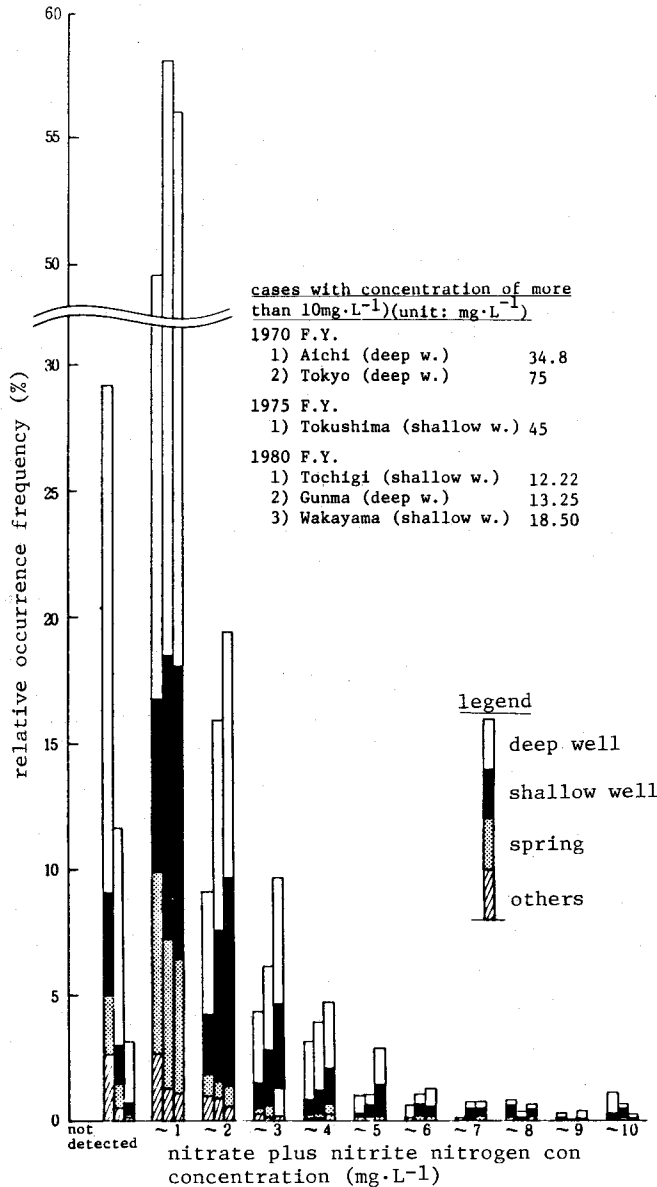


Fig. 1 Relative occurrence frequency of nitrate and nitrite concentrations in groundwater used for municipal water supply (left-1970 F.Y., middle-1975 F.Y., and right-1980 F.Y. for each rank of concentration)

Table 1 Current status of nitrogen pollution of groundwater
used for municipal water supply in Japan

F. Y.	Item	Deep well	Shallow well	Spring	Others ¹⁾	Total
1970	Abstracted water volume ($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	2,097	647	309	283	3,336
	Amount of nitrogen abstracted ²⁾ ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	3,037	1,000	164	232	4,433
	Mean nitrogen concentration ³⁾ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.45	1.55	0.53	0.82	1.33
1975	Abstracted water volume ($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	3,299	1,129	393	367	5,188
	Amount of nitrogen abstracted ²⁾ ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	2,999	1,875	357	488	5,721
	Mean nitrogen concentration ³⁾ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.91	1.66	0.91	1.33	1.10
1980	Abstracted water volume ($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	3,161	1,532	425	242	5,360
	Amount of nitrogen abstracted ²⁾ ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	3,446	2,566	517	346	6,875
	Mean nitrogen concentration ³⁾ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.09	1.67	1.22	1.43	1.28

- 1) Including those which are reported only about the result after mixing water from duplicate types of groundwater source and those whose types of groundwater source are not defined
- 2) Abstracted due to groundwater abstraction; nitrate plus nitrite nitrogen.
- 3) Weighted mean concentration dividing the amount of nitrate plus nitrite nitrogen by the water volume

対して大阪・千葉などは、これらの3ヶ年とも $0.5 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ 前後かそれ以下の低い値を示している。また、濃度 $1 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ を基準にとると、50年度はこれを下まわるものが多いが、55年度には逆にこれを上まわるものが多くなっていることが認められる。

これらの図には示していないが、水源の種別ごとに各都道府県の荷重平均濃度をみてみると、例えば $2 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ を基準にとれば、浅井戸でこの値をこえるケースが3ヶ年とも最も多く、深井戸でこれをこえるケースも各年度でいくつか認められる。とくに浅井戸については、群馬・埼玉・東京・神奈川の各都県で3ヶ年とも平均値が $2 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ をこえている。

このような地下水の窒素による汚染の原因については以下で検討を加えるが、少なくとも各都道府県ごとの硝酸・亜硝酸態窒素の荷重平均濃度と、同一サンプルについての塩素イオンの荷重平均濃度との間には、50及び55年度のいずれも有意な相関が認められなかった。三村は東京都下の洪積台地に位置する浅井戸及び深井戸について、硝酸態窒素と塩素イオンとの間に相関を認めており、小倉らも東京西郊の青柳段丘に位置する浅井戸について、これらの両者の間に相関があることを示唆している。これらはいずれも対象地域が限定されており、しかも家庭排水による影響が相対的に高い地域なので、このことが上のような結果をもたらしたものと考えられる。

3. 土壌に対する窒素負荷に関する解析

3.1 解析方法

水道水源地下水の硝酸態窒素による汚染の原因について検討するために、土壌に対する窒素負荷について

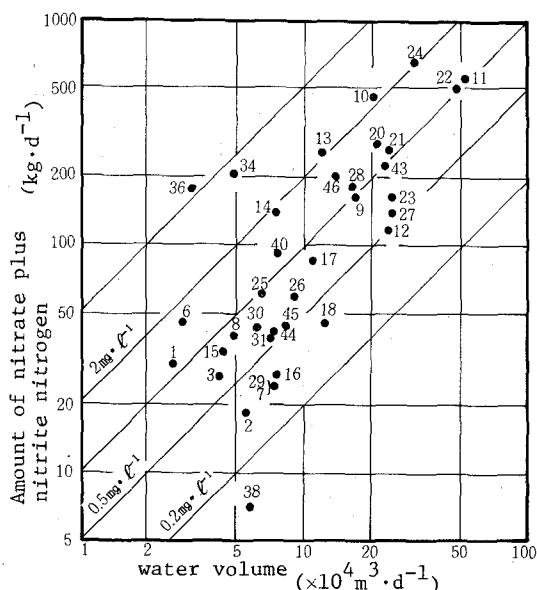


Fig. 2 (a) Relationship between water volume and amount of nitrate plus nitrogen abstracted from groundwater by municipal water supply (1975 F.Y.)

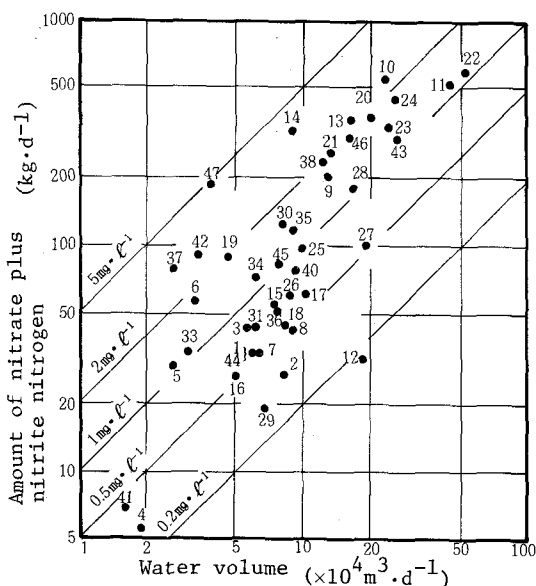


Fig. 2 (b) Relationship between water volume and amount of nitrate plus nitrogen abstracted from groundwater by municipal water supply (1980 F.Y.)

Code

1 Hokkaido	9 Tochigi	17 Ishikawa	25 Shiga	34 Hiroshima	43 Kumamoto
2 Aomori	10 Gunma	18 Fukui	26 Kyoto	35 Yamaguchi	44 Oita
3 Iwate	11 Saitama	19 Yamanashi	27 Osaka	36 Tokushima	45 Miyazaki
4 Miyagi	12 Chiba	20 Nagano	28 Hyogo	37 Kagawa	46 Kagoshima
5 Akita	13 Tokyo	21 Gifu	29 Nara	38 Ehime	47 Okinawa
6 Yamagata	14 Kanagawa	22 Shizuoka	30 Wakayama	40 Fukuoka	
7 Hukushima	15 Niigata	23 Aichi	31 Tottori	41 Saga	
8 Ibaraki	16 Toyama	24 Mie	33 Okayama	42 Nagasaki	

解析した。地下水に対して窒素負荷をもたらす要因としては、し尿・雑排水などの家庭排水、化学肥料、牛・豚・鶏など家畜の排泄物、食品工場などからの工場排水、さらには雨水などがあげられる。ここではこれらのうち主要な要因と考えられる家庭排水、化学肥料、及び家畜排泄物だけをとり上げ、農地など土壤に負荷される窒素量を各都道府県ごとに計算して求めた。さらに、この値と降水量との関係から地下水中の窒素濃度を推定するとともに、さきに求めた実際の地下水についての硝酸・亜硝酸態窒素の荷重平均濃度と比較検討した。解析の具体的な方法は以下のとおりである。

まず、上記の3つの要因について、地下水汚染に関係する窒素の発生負荷量を次のようにして算定した。

(1) 家庭排水

① し尿

自家処理分と収集し尿のうちの農村還元分の全量が農地還元の対象になると考え、これらの平均窒素濃度を $5,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ とした。

② 雑排水

各都道府県の人口から下水道による水洗化人口を差し引いた人口を対象とし、窒素負荷原単位を $2 \text{ g} \cdot \text{capita}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ とした。

(2) 化学肥料

各都道府県ごとの窒素肥料入荷実績量をそのまま用いた。

(3) 家畜排泄物

Table 2 に示した農林水産省調べによる原単位を用い、これに各都道府県ごとの牛・豚・鶏の飼育頭羽数を乗じた。

次に、これらのうち実際に農地など土壤に負荷される窒素量の割合（以下では、これを土壤への負荷率と呼ぶ）を、Table 3 のように設定した。この表では農地での作物による窒素吸収率¹⁾を、浮田による推定結果に基づいて 0.3 と仮定し、すでにこの分を差し引いている。農地還元¹⁾の比率も浮田が使用した値をそのまま用いた。雑排水の BOD 流出率は人口の密集度に関係することが知られているが⁹⁾、窒素については適当な資料がないので、ここでは土壤への負荷率を 0.3 と仮定した。

Table 2 Per capita nitrogen load of livestock and poultry wastes

Livestock and poultry	Annual amount of excreta per capita* (wet weight t·y ⁻¹)			Nitrogen content* (wet %)	Amount of nitrogen excreted per capita	
	Feces	Urine	Total		Per year (kg·y ⁻¹)	Per day (g·d ⁻¹)
Dairy cattle	10.8	5.5	16.3	0.36	58.7	161
Cattle	4.2	2.2	6.4		23.0	63.1
Pig	0.8	1.3	2.1	0.63	13.2	36.2
Broiler	0.036	—	0.036	1.66	0.598	1.64
Chicken	0.055	—	0.055		0.913	2.50

*) Based on a survey by Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

以上のようにして求めた各都道府県における土壤への窒素負荷量から、それぞれの単位面積当りの窒素負荷量（以下では、これを窒素負荷密度と呼ぶ）を計算した。地下水の汚染を考える上で、負荷密度が重要な指標となることは、すでに桜井ら¹⁰⁾が指摘しているとおりである。さらに、土壤に対する窒素負荷密度から地下水中の窒素濃度を推定した。これに際しては、降水量から蒸発散による損失量を差し引いて求めた各都道府県ごとの賦存高にに応じて、上記の負荷が均等に希釈され、この水の一部分が地下水となり、残りが表流水となると仮定した。このようにすれば、各都道府県における地下水の窒素汚染がどの程度のものであるかを、

推定することができると考えられる。また、同じ考え方により、全国についての窒素負荷量と水資源賦存量から、全国平均の窒素負荷密度と地下水中の窒素濃度も推定した。なお、賦存高は昭和31～48年の平均値を用いた。その他の統計資料は原則として昭和55年度のものを用いた。

3.2 解析結果ならびに地下水汚染状況との比較
Table 4 は上記のような

Table 3 Proportion of the amount of nitrogen loaded the ground to the total amount of nitrogen generated

Source			Proportion loaded the ground ¹⁾
Domestic wastewater	Human excreta	Disposed individually	$0.95^{2)} \times 0.7^{3)} = 0.665$
		Reclaimed in rural area	
	Domestic wastewater excluding human excreta		0.3
Chemical fertilizer			$0.7^{3)}$
Livestock and poultry wastes	Cattle		$0.95^{2)} \times 0.7^{3)} = 0.665$
	Pig		$0.75^{2)} \times 0.7^{3)} = 0.525$
	Poultry		$0.95^{2)} \times 0.7^{3)} = 0.665$

- 1) Subtracted the proportion of plant uptake
- 2) Proportion of the amount of nitrogen reclaimed in rural area to the total amount of nitrogen generated; applying the same value for human excreta as that for cattle and poultry wastes
- 3) $1 - (\text{proportion of plant uptake}, 0.3)$

解析結果のうち、全国をひとまとめにした場合について示したものである。解析に使用した統計資料を欄外にあわせて記した。この結果によると、作物による吸収分を除いた土壌に対する窒素負荷量は、全国で年間約90万tであり、このうち化学肥料が約59%を占め、次いで家畜排泄物が約37%で、家庭排水はわずかに4%程度にしかすぎない。これを単位面積当りの負荷密度になおすと、全国土についての平均値は $2.38 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ となる。さらに、これを賦存高の全国平均値で割ると、地下水中の推定窒素濃度は $2.00 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ となる。実際にはここで言う土壌に対する負荷が、すべてそのまま地下水に到達するわけではなく、かなりの部分は表面流出によって失われると考えられるが、地下水を涵養する水の平均推定窒素濃度は、上記の $2 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ と考えてよい。この結果は、さきに示した全国の水道水源地下水についての、昭和55年度における硝酸・亜硝酸態窒素の荷重平均濃度に近い値である。なお、各要因ごとの寄与を濃度で表わせば、化学肥料が $1.19 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ 、家畜排泄物が $0.73 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ 、及び家庭排水が $0.08 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ である。

桜井¹²⁾は、農村地帯である長野県菅平高原での地下水の硝酸態窒素による高濃度汚染について、その原因が農地からの肥料の溶脱によるとし、有機質肥料使用量の減少と化学肥料の多用がこの傾向を促進していると指摘している。また、浮田¹¹⁾は、昭和30年頃を境に人糞などの有機質肥料が減少に転じて、一方では化学肥料の使用量が著しく増加し、これが地下水中の窒素濃度を高める主な要因となったことを示唆している。Table 4の結果は、これらの指摘が妥当であることを示すものと言えよう。とくに有機質肥料に比して化学肥料が多用されていることは、環境保全の面からだけでなく、農地の地力保持の面からも問題がある。化学肥料や家畜排泄物に比較して家庭排水による窒素負荷量は意外に小さく、平均的にみれば殆んど無視できる程度である。しかしながら、人口密度が高い地域では、以下に述べるようにその寄与率はだいぶ大きな値となる。

次に、各都道府県ごとに推定した地下水中の窒素濃度の分布をFig. 3に示す。茨城・埼玉・千葉・香川で $5 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ 以上の高い値がみられるのをはじめ、東北の一部、関東から東海、瀬戸内海沿岸、九州の大部分などで比較的高い値を示している。これらは、大都市圏かその周辺で人口密度が高く、しかも近郊農業が盛んな地域、又は大都市圏からは離れているが農畜産業が非常に盛んな地域である。都道府県別にみると要因別寄与率にはおのずと差があり、とくに家庭排水の寄与率は、上位より順に東京が28.9%、大阪が18.3%、神奈川が10.8%、埼玉が9.9%などとなっている。

Fig. 3の結果と比較するために、Fig. 2(b)に示した昭和55年度についての水道水源地下水の平均窒素濃度の分布を、同じ地図を用いてFig. 4に示した。実際の地下水中の全国平均濃度が $1.28 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ であるのに対して、負荷より推定した全国平均濃度が $2.00 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ であるので、多くの都道府県ではFig. 4よりもFig. 3で濃度階級が高くなっている。とくに茨城・千葉などは大きな違いがある。しかし、これらの各県でも村岡¹³⁾や加藤¹⁴⁾らの報告によれば、少なくとも個人家庭用やかんがい用の井戸水が、硝酸態窒素などによりかなり汚染されていることが明らかなである。また、Fig. 4よりFig. 3で逆に濃度階級が低くなっている場合も若干あるが、これらのうち高知は地下水のサンプル数が3例しかないので、信頼性が非常に低い。

以上のように、これらの分布傾向には共通する点も認められるが、一致しない点もあった。このことからみて、上記のような比較には限界があると考えられる。実測値に関してはサンプルの数が限られていて、その分布にも偏りがあり、しかも硝酸・亜硝酸態窒素だけの濃度であることが問題である。また、推定値に関しては脱窒やアンモニアの揮散のほか、降雨などを考慮する必要があると考えられる。しかし、現状では地下水の窒素による汚染に関して利用できるデータが非常に限られており、全国的な状況を知る上ではこれ以上に詳しい検討を行うことが困難である。

4. 地下水の窒素汚染に関する考察

水道ではもともと水量が十分でかつ水質が良好な水源を選んで取水している。このこともあって、上水道水源として利用されている地下水の大部分は、それほど深刻な硝酸態窒素による汚染を受けていないことが明らかとなった。しかし、簡易水道や専用水道も対象に含めた厚生省の調査によれば、原水の硝酸・亜硝酸

Table 4 Nitrogen load on the ground from each specified source and its contribution to nitrogen concentration in Japanese groundwater

Source		Nitrogen load ¹⁾ on the ground ¹⁾ ($\times 10^3 \text{ t} \cdot \text{y}^{-1}$)	Areal nitrogen load on the ground ²⁾ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$)	Estimated contribution to nitrogen concentration in groundwater ³⁾ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Domestic waste water	Human excreta ⁴⁾	16.5	36.2	0.10
	Domestic wastewater excluding human excreta ⁵⁾	19.6		
Chemical fertilizer ⁶⁾		533.7	1.41	1.19
Livestock and poultry wastes ⁷⁾	Cattle	112.6	329.3	0.87
	Pig	65.9		
	Poultry	150.8		
Total		899.2	2.38	2.00

- 1) (the amount of nitrogen generated) $\times$ (the proportion of the amount of nitrogen loaded the ground shown in Table 3)
- 2) Assuming that the total land area of Japan is $377,708 \text{ km}^2$
- 3) Supposing that the total amount of nitrogen loaded the ground is uniformly diluted with the water volume of annual mean effective rainfall over the land area ($4494.49 \times 10^8 \text{ m}^3$)
- 4) Human excreta disposed individually and collected night soil reclaimed in rural area; based on "Waste Management in Japan 1980 F.Y." (Ministry of Health and Welfare)
- 5) For the population not served by sewerage system; based on "National Census 1980" (Prime Minister's Office) and "Sewage Works Statistics 1980 F.Y." (Japan Sewage Works Association)
- 6) Using the carried-in amount in 1979 fertilizer year; based on a survey by Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries
- 7) Using the livestock and poultry populations; based on "Chikusan Kogai Taisaku Zensho 1979" (Keiran-Niku Information Center Co.)

窒素濃度が基準値の $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ をこえる事例は、昭和55年度で100例以上にのぼり、この大部分が地下水を水源としている場合である。さらに、個人家庭用の井戸水については、これら以上に汚染が進んでいることが推察される¹⁵⁾。現在のところ、全国における地下水の窒素汚染に関するまとまった資料は「水道統計」だけであり、これだけではその実態が十分に明らかではないので、今後もっと多くのデータを蓄積する必要がある。

農地からの窒素の流出に関しては水域の富栄養化との関連で一時議論されたが、まだ満足な解答がえられただけではない。地下水の窒素汚染を考える上においても、この点が現実には1つの障害となる。ここでは流出率を考慮に入れないで、土壌に対する窒素負荷量が、降水量から損失量をさし引いた賦存高に応じて、均等に希釈されると仮定した。この方法によれば、土壌表面において窒素負荷と降水が、地下水系と表流水系へそれぞれどのような割合で分配されるかという点については、考慮しなくてもよい。降水の流出に関しては、賦存高のうちほぼ半分が直接流出となり、残りが基底流出となるというのが定説である。これらのうち基底流出の大部分は、土壌に浸透していったんは地下水となり、直接流出する部分もその多くは、土壌表面を伝って表流水系に流出すると考えられる。以上のようなことから、地下水中の窒素濃度をマクロ的に推定するには、ここで用いた方法がさしあたり適当であると考えられる。しかしながら、対象地域を限定して

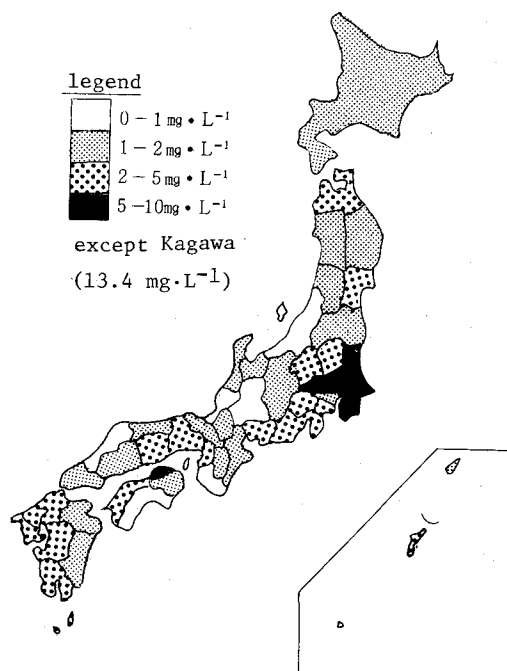


Fig. 3 Distribution of nitrogen concentrations in groundwater estimated from nitrogen load on the ground

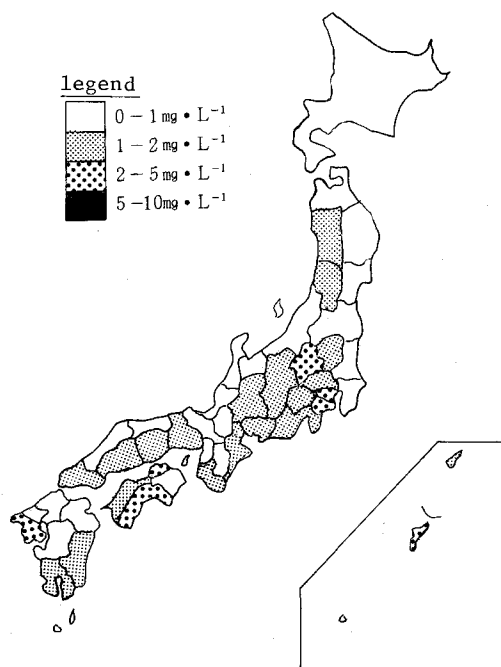


Fig. 4 Distribution of nitrate plus nitrite nitrogen concentrations in groundwater abstracted by municipal water supply (weighted mean concentration by using abstracted water volume; based on "Water Works Statistics 1980 F.Y.")

詳しく検討する場合には、土地利用なども考慮して地域をいくつかに分け、水と窒素の挙動を細かく検討する必要がある。

土壌中及び地下水中における窒素の挙動に関しては、少なくとも定性的にはかなりよく明らかにされている。Bolt¹⁶⁾らは、土壌中に窒素がどのような化学形態で存在し、それぞれがどのような反応を受けたり、またどのような経路を経て移動するかという点について総説している。しかしながら、窒素収支を明らかにするという観点から、これらの点について定量的に論じた例は殆んどない。今後は、不飽和帯から浅層地下水、さらには深層地下水への移動、及び脱窒・アンモニアの揮散・有機態窒素の無機化などを総合的に考慮した、地下水の窒素収支に関する研究が重要な課題となるだろう。環境中における窒素の挙動は非常に複雑であり、様々な媒体を通して、生物学的及び化学的にその存在形態を変化させながら循環している。窒素による地下水の汚染は、土壌の汚染や表流水域の汚染と密接なかわりがあるだけでなく、大気汚染とも関係していると考えられ、環境全体を通しての窒素の循環のなかで、地下水の窒素による汚染をとらえることが重要である。

5. 結論

- (1) 上水道の水源となっている全国の地下水の荷重平均による硝酸・亜硝酸態窒素濃度は、昭和45年度が $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、50年度が $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、及び55年度が $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ で、経年的な変化は認められなかった。
- (2) 地下水のなかでも浅井戸の硝酸・亜硝酸態窒素濃度は最も高く、上記の各年度とも $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前後であった。

- (3) 土壌に対する窒素負荷に基づいて地下水中の窒素濃度を推定したところ、その全国平均濃度は $2.00 \text{ mg} \cdot \ell^{-1}$ であり、実測値に基づく荷重平均濃度に近い値がえられた。
- (4) 上記の推定結果について要因別にみると、寄与率が最も高いのは化学肥料で、次いで家畜排泄物が高く、家庭排水の寄与率は一般には無視できる程度であった。
- (5) 都道府県別の地下水における硝酸・亜硝酸態窒素濃度の分布は、土壌に対する窒素負荷より推定した窒素濃度の分布とは必ずしも一致しなかった。

参考文献

- 1) 浮田正夫(1982)：わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究，京都大学博士論文
- 2) 厚生省環境衛生局水道環境部編(1982)：昭和55年度水道統計，(社)日本水道協会，P. 38
- 3) 坂本弘道(1982)：わが国の水道水の需給分析，水道協会雑誌，Vol. 51, No. 11, P. 2～21
- 4) 厚生省水道環境部水道整備課・日本水道協会水道統計編纂専門委員会(1982)：水道統計の経年分析，水道協会雑誌，Vol. 51, No. 7, P. 40～72
- 5) 日本水道協会(1982)：高度処理施設の標準化に関する調査報告書，昭和57年3月，P. 9
- 6) 三村秀一(1965)：地下水中の硝酸性窒素，水道協会雑誌，No. 368，P. 62～68
- 7) 小倉紀雄，宇田川隆男(1978)：青柳段丘の浅層地下水水質——とくに硝酸塩について——，水道協会雑誌，No. 529, P. 32～41
- 8) 厚生省水道環境部監修(1979)：廃棄物処理施設構造指針解説，し尿処理施設構造指針篇，(社)全国都市清掃会議，P. 12
- 9) 建設省編(1980)：流域別下水道整備総合計画調査，指針と解説，昭和55年，日本下水道協会，P. 38
- 10) 桜井善雄，中本信忠，浅沼信治，鈴木彰—長野県(1975)：長野県下における浅層地下水汚染の現状——2——し尿浄化槽放流水の地下浸透方式における土壌ならびに地下水質に及ぼす影響調査結果，昭和50年度報告書，P. 45
- 11) 地域振興整備公団編(1982)：地域統計要覧，昭和57年版，P. 267
- 12) 桜井善雄(1975)：農地排水による河川および地下水の汚染，農業土木学会誌，Vol. 43, P. 518～524
- 13) 村岡浩爾，津野洋，細見正明(1978)：湖の富栄養化に及ぼす沿岸地下水の挙動について(第1報)，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，P. 291～292
- 14) 加藤正，春日辰雄，平本和夫，立本英機，中川良三(1982)：市川市における井戸水の実態(I)——柏井地区の井戸水——，水道協会雑誌，Vol. 51, No. 6, P. 48～52
- 15) 環境庁水質保全局水質管理課(1983)：昭和57年度地下水汚染実態調査結果，昭和58年8月
- 16) G. H. Bolt はか編著，岩田進午ほか訳(1980)：土壌の化学，学会出版センター P. 220～233