

# 宮古島における窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の長期的推移

田 代 豊\* 高 平 兼 司\*

## Long Term Trend of Nitrogen Emission and Nitrogen Concentration of Groundwater in Miyako Island, Okinawa

Yutaka TASHIRO\* and Kaneshi TAKAHIRA\*

\* Okinawa Prefecture Public Health Association, Ozato 2013, Ozato-son, Shimajiri, Okinawa 901-1202, Japan

### Abstract

Groundwater pollution by nitrogen is a common environmental problem in the islands covered with coral limestone. Total annual emission of nitrogen from fertilizers, livestock wastes, and domestic wastes at Miyako Island, Okinawa was examined from 1977 to 1998, and compared with the concentration of nitrogen in groundwater. The trend of nitrogen emission was reflected on the groundwater concentration with the delay of seven years. This suggests that the velocity of nitrogen permeating down to the groundwater is 3 m per year. The amount of nitrogen leaching into the groundwater was 39% of the total nitrogen emission on the ground. These results emphasize the importance of data collection on nitrogen emission in order to predict the future nitrogen concentration of groundwater in coral islands.

**Key words** : nitrogen pollution, groundwater, coral island, water permeation

### 1. はじめに

農業などの人為活動に起因する地下水の硝酸性窒素汚染が問題となって久しい。とりわけ飲用水の大部分を地下水に依存する沖縄・奄美の島々においては住民の健康に影響する重大な問題である。熱帯・亜熱帯のサンゴ石灰岩に被われた島では一般に土壌への浸透水量が多く、地表からの汚染負荷が地下水水質に影響を与えやすいと考えられ<sup>1)</sup>、硝酸性窒素などによる汚染は共通の問題である。

沖縄県の宮古島は、地下水窒素汚染が顕在化している典型的な島であり、かつ水文条件が比較的均一で地下水涵養過程をモデル化して捉えやすい調査地である。同島では、地元関係諸機関が協力して宮古島地下水水質保全対策協議会 (MGCC) を組織し、地下水水質ならびに地上の環境要因について、1989年以降継続的に調査している。

本報告は、隆起サンゴ礁島嶼での人為活動による窒素負荷が地下水帯水層へ浸透する過程を実証的に解明することを目的とし、同協議会の調査報告等これまでに公表されてきた資料を解析し、窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の長期的な推移について研究したものである。

### 2. 調査地の概要

宮古島は、琉球列島のほぼ中央の、北緯24° 43′ ~ 24°

55′, 東経125° 15′ ~ 125° 28′ に位置する。年平均気温は23.1°C (1951年~80年), 年降水量は2033.1 mm (同) で、海洋性亜熱帯気候に属する。面積158.88 km<sup>2</sup>, 最高標高114.6 mの低平な地形をなし、大部分の地質構造は、透水性の低い島尻層群泥岩の基盤の上を透水性の高い琉球石灰岩層が被っている。降水は地表から琉球石灰岩層を浸透し、基盤岩上に不圧地下水として貯留される。島内全体に、主に北西-南東方向の断層が多数走り、帯水層は分離され多数の地下水流域を形成している (Fig. 1)。河川の発達は貧弱であるが、地下水系が発達し多数の湧水がある。

同島の人口は約5万人で、サトウキビ栽培を中心とする農業が盛んである。1997年度の資料<sup>2)</sup>によると、隣接する小島を合わせた宮古本島部の土地利用は、耕地面積56.8%、森林面積14.4%であり、作物作付面積の76%はサトウキビ栽培で占められ、以下飼料作物 (7%), 葉タバコ (7%), 野菜 (3%) などが栽培されている。

### 3. 宮古島における地下水窒素濃度の推移

MGCCは、1989年4月以降現在に至る毎月、島内の各地下水流域を代表すると考えられる地点の地下水硝酸性窒素濃度を測定している。その報告書<sup>2,3)</sup> では、この全期間を通じて測定された15地点から特異的な濃度の急変をしばしば示す地点を除いた13地点 (Fig. 1) について、各地

\* 財団法人沖縄県公衆衛生協会 〒901-1202 沖縄県島尻郡大里村大里2013

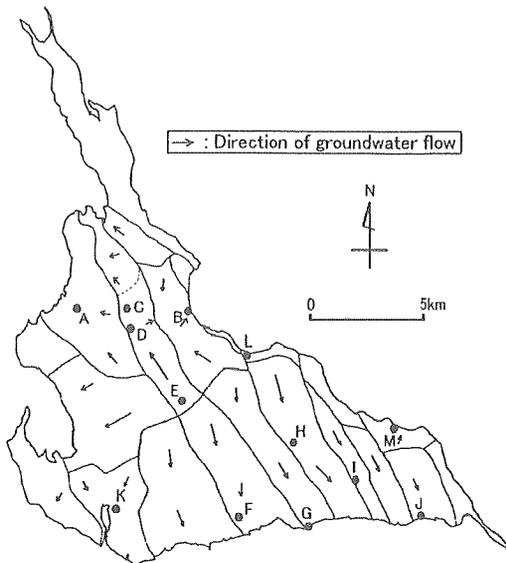


Fig.1 Groundwater basins and monitoring sites (●) by MGCC in Miyako Is.<sup>2)</sup>

点の年度平均濃度を平均し、Fig. 2 のような推移を示している。これらの地点の濃度には極端なばらつきはなく、おおむね安定した値を示している。例えば、1999年度における13地点の年度平均濃度は $5.24 \sim 7.68 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の範囲内にあり、また、同年度内各月の測定値の各地点における標準偏差は1点を除いて $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 未満であり、そのうち8地点は $0.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった。したがって、Fig. 2 に示された値は、同島の地下水全体の平均的な硝酸性窒素濃度の水準を示していると考えられる。なお、これらすべての地下水検体について、亜硝酸およびアンモニア性窒素濃度は硝酸性窒素濃度に比べて著しく低かったため、以下本報告では硝酸性窒素濃度を窒素濃度と同義のものとして扱う。

また、同報告書には宮古島上水道企業団が測定した、1977年度以降の島内3ヶ所の上水道水源地下水の窒素濃度も示されている。Fig. 2 に見られるように、1989年度以降のMGCCによる13地点平均濃度と上水道水源の平均濃度とはおおむね同様に推移し、両測定値の比は $1.04 \sim 1.22$ の範囲内で平均 $1.11$ であった。よって以下では、1989年度以降は上記13地点平均値を、また、1977～88年度については上水道3水源の平均値に $1.11$ を乗じた値を、同島における地下水全体の窒素濃度代表値とした。その推移は1980年代に増大し、1987年度に最大となった後減少している。

#### 4. 自然起源および人為起源による地下水窒素濃度

地下水中の窒素には、人為起因によるもの以外に、降雨中の窒素分や土壌の分解等の自然起源窒素も含まれている。琉球政府企業局<sup>4)</sup>は、1966年に同島内21地点で地下水水質を分析した。このうち、地表からの雨水や汚濁物の直接の混入が水質に強く影響した可能性が高いものを除き、硝酸性窒素濃度最低値は $0.50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。この当時はまだ人為起源窒素濃度が低かったと予想されるので、本報告では、自然起源窒素濃度が長期にわたり一定で、かつ島内全域において一様であると仮定し、これを $0.50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ とおくことにした。そして、前項の窒素濃度代表値からこれを差し引いたものを人為起源窒素濃度とした。

一般に、人為的な影響を受けていない地下水の窒素濃度

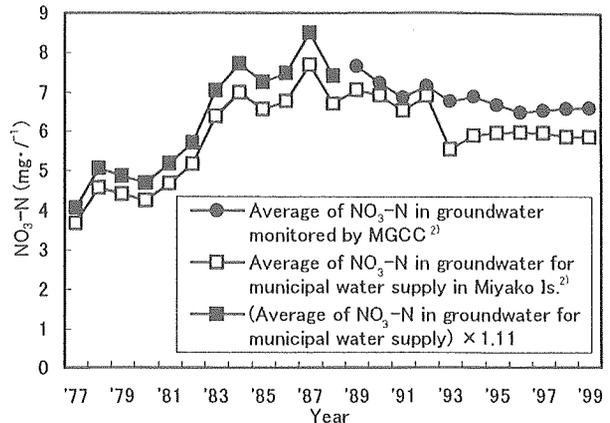


Fig. 2 Concentration of  $\text{NO}_3\text{-N}$  in groundwater in Miyako Is.

は、ほとんどが $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下である<sup>5)</sup>。また、同島と地質や自然環境が似ている奄美群島の沖永良部島でも、上水道水源井戸の水質資料<sup>6)</sup>を見ると、肥料多用によって窒素濃度が増加し始める前の1970年代の値は $0.1 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度であった。上述の $0.50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ はこの範囲内にあり、南西諸島の共通した水準は、およそこの程度であると考えられる。

#### 5. 人為起源窒素負荷発生量

同島における人為的な窒素負荷発生源としては、肥料、家畜排泄物、および生活排水が考えられる。そこで、地表から浸透水とともに帯水層に加えられる窒素量  $L$  は、中西ら<sup>7)</sup>を参考に、次のようなモデルで考えることができる。

$$L = a \cdot (F + M + H) + S \quad \text{---- (1)}$$

なお、 $F$ 、 $M$ 、および  $H$  は、各々、肥料、家畜排泄物、および生活排水に起因して地表で発生する窒素負荷発生量であり、それらの地下水への平均負荷率（地下水中に移行する割合）を  $a$  とする。また、 $S$  は地下水中の自然起源による窒素量である。

本報告では以下に、(1) 式を構成する各人為起源からの窒素負荷発生量を、既存の統計資料等に基づいて過去に遡って算定し、 $L$  との関係を解析することを試みた。なお、行政資料の多くは隣接する小島である池間島、大神島、来間島を含めた集計がなされているので、以下ではそれらを合わせた宮古本島部について窒素量を計算した。

##### 5.1 肥料による窒素負荷発生量

宮古本島部での肥料販売は、同島内にある二つの農業協同組合が主として行っている（民間業者による肥料販売も1990年度まではあったが<sup>2)</sup>、これは全体の数%以内に過ぎないと推定されるため、ここでは無視した）。肥料の使用総量（両農協の販売量）とその窒素量は、1989年度以降公表されている<sup>2)</sup>。また、1987および88年度は、高度化成肥料販売量だけが集計されていたので<sup>2)</sup>、それに基づいて窒素総量を算出した。当時市販肥料の大部分は高度化成肥料であり、集計されていない窒素含率の低い有機肥料などを無視しても窒素量に大きな誤差は生じないと考えられた。

さらにそれ以前は、1976年度以降の両農協の肥料売上金額<sup>2)</sup> から推定した。宮古郡農業共同組合の入荷肥料内訳<sup>3)</sup>によると、1979～85年度はいずれの年も高度化成肥料であ

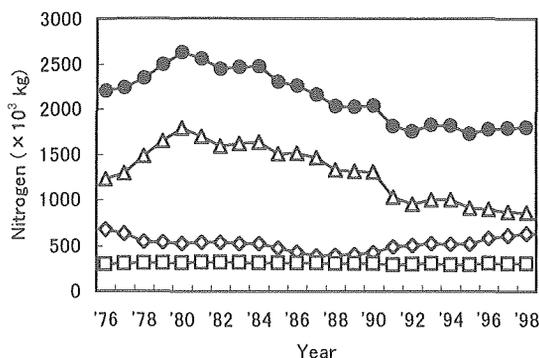


Fig. 3 Nitrogen emission from each source in Miyako Is.

▲ Fertilizers      ◆ Livestock wastes  
 □ Domestic wastes      ● Total

る「尿素入り複合燐加安804」が96%以上を占め、86年度は85%を占めていた。そこで、1976~86年度については、肥料売上金額をこの「804」肥料の小売単価で除し、さらに「804」肥料の窒素含有率(18%)を乗じて、各年の肥料による窒素総量とした(なお、過去の「804」肥料小売単価は直接の資料が見出せなかったため、全国的な高度化成肥料の小売単価<sup>9)</sup>を沖縄における「804」肥料卸単価<sup>9)</sup>と全国的な高度化成肥料の卸単価<sup>9)</sup>の比で補正して用いた)。

以上のようにして求めた宮古本島部における肥料による窒素量を Fig. 3 に示した。この推移は、全国的な肥料販売量の推移とも類似していた。

5.2 家畜排泄物による窒素負荷発生量

宮古島で飼養される家畜の数<sup>10)</sup>は Fig. 4 に示すように推移している。かつて多かった豚、馬、山羊は減少し、近年は肉牛の飼育が増加してきた。

各家畜の飼養数に Table 1 の原単位を乗じ、排泄物から発生する窒素量を計算した結果を Fig. 3 に示した。なお、各々の家畜数は成獣と幼獣に分けて集計し、幼獣には原単位の2分の1の値を用いた。

5.3 生活排水による窒素負荷発生量

宮古島ではし尿を含めた生活排水の大部分が地下浸透処理されている。人口に原単位(人口1人あたり6.2 kg・y<sup>-1</sup>)<sup>9)</sup>を乗じて求めた窒素負荷発生量を、Fig. 3 に示した。人口に大きな変化はなく、窒素量は横ばいであった。

6. 窒素負荷発生総量と地下水窒素濃度との相関

以上のようにして集計された各起源窒素を合計した人為的窒素負荷発生総量の推移を見ると (Fig. 3), 1970年

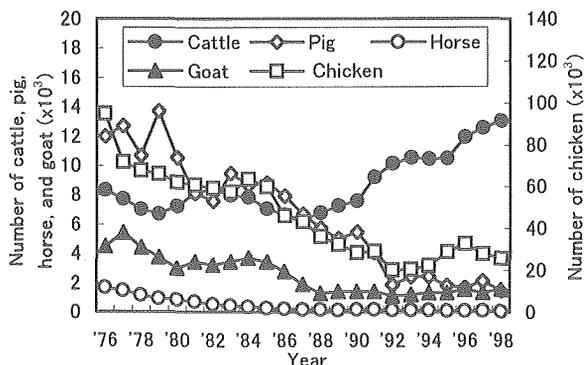


Fig. 4 Number of livestock in Miyako Is.<sup>10)</sup>

Table 1 Annual nitrogen emission from each animal.

Animal		N kg・y <sup>-1</sup>
Cattle <sup>11)</sup>		51.2
Pig <sup>11)</sup>	Sow for reproduction	17.0
	Other pig	11.1
Horse <sup>12)</sup>		54.5
Goat <sup>13)</sup>		11.1
Chicken <sup>11)</sup>		0.62

代に化学肥料使用量の増加に伴って増加し、1980年度に最大となった後減少している。その後、1990年代以降は減少幅が小さくなりほとんど横ばいに近くなった。これを Fig. 2 の代表的な地下水窒素濃度の推移と比較すると、窒素負荷発生量の増減が、地下水窒素濃度の増減に対し、時間的なずれを伴いながら作用していることが推定された。

そこで、1976~91年度の16年間における各年度内人為的窒素負荷発生総量と、その T 年後の各年度の人為起源地下水窒素濃度との関係を線形近似し、T を変えて比較した結果を Table 2 に示した。その結果、T = 7の時に決定係数が最大値 (r<sup>2</sup> = 0.582) をとった。これは、宮古島全体で平均的に見ると、地表で発生した窒素負荷が、その7年後ごろを中心として地下水窒素濃度として反映されていることを示唆している。

なお、各起源によって窒素の環境への放出状況は様々であるので、地下水への負荷率は起源ごとに異なるはずである。したがって、全体の窒素負荷発生総量に占める各起源窒素の割合が変化すれば、(1)式における平均負荷率 a も変動するものと予想される。しかし、ここで見たように、同島における近年の地下水窒素濃度の長期的な増減に大きく寄与したのは、1970年代後半から90年前後にかけての化学肥料施用量の増減であると考えられ、少なくともこの期間においては、平均負荷率の変動が窒素負荷発生量と地下水窒素濃度との関係に与えた影響は比較的小さいと考えられる。そこで、以下ではこの期間において平均負荷率が近似的に一定であったと仮定して議論することにした。

7. 考察

7.1 硝酸性窒素の降下浸透速度

宮古島において、窒素発生源の中心をなしてきたのは、高度化成肥料に含まれるアンモニア性窒素であるが、畑地条件ではこれは速やかに硝化され硝酸イオンとなる。ここで、同島の琉球石灰岩における飽和透水係数は10<sup>-1</sup>cm・s<sup>-1</sup>

Table 2 Correlation between total nitrogen emission (X) and nitrogen concentration in groundwater (C) \*.

Years of the data of N emission	Years of the data of N concentration in groundwater	T	a x 10 <sup>6</sup>	b	r <sup>2</sup>
1976~91	1981~96	5	1.86	2.74	0.290
	1982~97	6	1.95	2.62	0.487
	1983~98	7	1.82	2.98	0.582
	1984~99	8	1.61	3.44	0.427

\*: Correlation between X (kg・y<sup>-1</sup>) in each year of 1976~91 and C (mg・l<sup>-1</sup>) in each T years later was analyzed with the linear model, C = aX + b. Coefficient of determination is expressed as r<sup>2</sup>.

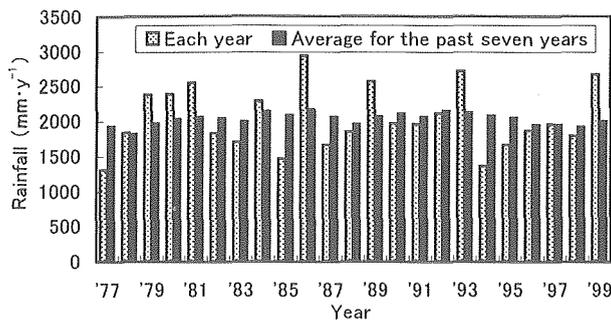


Fig. 5 Annual rainfall in Miyako Is.

で、帯水層内での地下水の流動が速いことが知られている<sup>15)</sup>。また、観測されている帯水層の厚さなどから、浸透水量に比較して多量の貯留水が帯水層内にあるとも考えられない。したがって、上述した負荷発生量に対する地下水窒素濃度の推移の遅れは、硝酸イオンが地表付近から帯水層に達するのに要する時間を示していると考えられる。

同様の地質構造を持つ奄美群島の与論島においても、資料<sup>16)</sup>によると、化学肥料による窒素負荷量は1970年前後に増加した後ほぼ横ばいであるのに対し、地下水硝酸性窒素濃度は1980年代全般にわたって増加を続けており、地表での負荷発生量と地下水中の窒素濃度の推移とは、年単位のずれが生じていたと考えられる。この遅れの程度は、琉球石灰岩に被われた南西諸島でおおむね共通したものである可能性もあり、さらに他の島での調査が望まれる。

ここで、Fig. 5 に宮古島における年降水量の推移を示した。年降水量は毎年大きく変動し、これに応じて地下水量が変動することが、湧水の湧出量や井戸の水位などの観測結果<sup>23)</sup> から確認されている。一方、例えば Fig. 2 のように、地下水窒素濃度の推移には、年降水量と関連した変動はほとんど認められない。これはもっと短期的に月ごとの降水量と窒素濃度の関係を見ても同様である<sup>2)</sup>。

仮に、宮古島において地表からの負荷窒素が数ヶ月以下の時間で速やかに帯水層に到達しているとすると、1年間に地下水面に到達する窒素量は地表の年間窒素負荷発生量によって規定され、降水量が多く地下水量の多い年には希釈により地下水窒素濃度が低下するはずである。これに対し、地下水面より上の地層中に数年間分の窒素分が蓄えられているとすると、それが降水量に比例した速度で順次降下して濃度変動の少ない地下水を常に供給することになる。したがって、上述のような窒素濃度の安定した推移は、地表に負荷された窒素分が帯水層に至るまでの時間が数年以上かかることを支持している。

なお、年降水量の変動はランダムであるので、それに伴う窒素降下速度の変動は、地表に負荷された窒素分が帯水層に至るまでの数年の間に平均化され、地下水面までの到達時間は常にほぼ一定になる。試みに、Fig. 5 には各年までの7年間の平均降水量を示したが、その変動は10%以内であった。このように考えると、帯水層に到達する地下水窒素濃度の長期的な推移は、地表における負荷量の長期的な変遷を一定期間の遅れの後に反映すると考えられる。

宮古島における地下水位等は沖縄総合事務局<sup>17)</sup> などによって調査され、地下水流域区分とともに地下水位等高線図として示されている。それを用い、Fig. 1 のMGCCによ

Table 3 Depth of water table around the monitoring sites of MGCC.

Site*	Depth of water table (m)		
	Min	Max	Average
A	27.5	32.5	30
B	7.5	20	14
C	15	20	18
D	15	20	18
E	22.5	27.5	25
F	40	45	43
G	20	25	23
H	15	30	23
I	5	15	10
J	15	17.5	16
Average			22

\*: Correspond to the sites in Fig. 1.

る水質測定地点について、各地点直近を通っている地下水位等高線に沿って、その測定地点が属する地下水流域内で地表から地下水面までの深さ(地下水位等高線標高と地表面標高との差)の範囲を求めると、Table 3 のようになった。ここでは各流域内における深さの最大、最小値と両者の平均値を示した。なお、13地点のうち3地点(K~M)は、周辺の地下水位等高線が資料中に示されていないので除外した。

地下水面までの深さは場所によって様々であるが、これら10地点を平均するとおよそ22 mであった。したがって、前項の結果から、この深さに達するのにおよそ7年かかるとすると、地表からの窒素分の平均的な降下浸透速度は、 $3 \text{ m}\cdot\text{y}^{-1}$ 程度と求められた。

ただし、宮古島内でも詳細に見れば地域によって地質や地形に様々な違いがあり、この降下浸透速度のばらつきは大きいと予想される。また、帯水層での地下水の流動は速く、各地点で観測された地下水中の窒素は必ずしも直近の地表から降下した窒素分だけによるものではない。その上、窒素分が地層内を下降浸透する過程での分散もあるので、地表で放出された窒素分が地下水面へ到達するに要する時間は、年単位の幅を持っている可能性もある。ちなみに、Table 3 に示した個々の測定地点直近における地下水面までの深さと、その測定地点における地下水窒素濃度変動の遅れの程度との間には明かな関係は見出されなかった。

これまでに報告された、琉球石灰岩層における物質の降下浸透速度を示す事例として、1994年に沖縄本島浦添市で起こった地下送油管からの重油流出事故の調査結果<sup>18)</sup> がある。流出は同年2月にあったと推定され、約3ヶ月後にボーリング調査を実施したところ、地下1.5 m付近から流出が認められ、汚染の中心は地下4.5~5.5 mに達していた。

ここで、この浸透深度を単純に12ヶ月分にする、浸透速度は $14 \text{ m}\cdot\text{y}^{-1}$ 前後となる。難溶性の重油の浸透機構は水溶性物質の場合と異なる点も多く<sup>19)</sup>、この浸透速度には重油の粘性や比重、さらに吸着による遅延などの要因が含まれていることが予想される。また、沖縄気象台で観測されたこの3ヶ月間の降水量は312 mmであり、平年の年降水量約2,000 mmの4分の1と比べて少なかったため、多雨の季節には浸透速度がこれより若干速いことも考えられる。しかしながら、琉球石灰岩層における物質の降下浸透速度がおよそ $10 \text{ m}\cdot\text{y}^{-1}$ 内外であることは、この調査事例からも支

持される。

## 7.2 水の降下浸透速度との関係

水に溶解して浸透する硝酸イオンの降下浸透速度は水の降下浸透速度と関連しているが、両者は必ずしも同一ではない。佐久間ら<sup>20)</sup>は、各種の土壌カラムを用い、土壌への吸着のない塩化物イオンの降下浸透速度が、条件によっては水に比べて2分の1にまで遅れることを観察した。

硝酸イオンも土壌への吸着がほとんどなく、塩化物イオンと似た挙動を示すと考えられる。さらに、ゼロフラックス面以下では晴天時などに地表面での蒸発にともなう毛管流によってイオンが上昇することも考えられるので、前項のように見積もられた窒素濃度分布の降下速度は水の降下浸透速度よりも幾分遅いはずである。したがって、宮古島の地表から地下水面に向かう水の平均降下浸透速度は1年間に10<sup>1</sup> m程度のオーダーであると推定される。

田中<sup>21)</sup>は、世界各地で同位体をトレーサーとして推定された、地下水面に至るまでの土壌水の降下浸透速度をまとめたが、それらはいずれも10<sup>0</sup> m・y<sup>-1</sup>のオーダーであり、関東ロームでは1.28~1.38 m・y<sup>-1</sup>であった。琉球石灰岩層は孔隙の多い構造のため浸透量が大きいとされ、水の降下浸透速度も大きいとされてきたが、本研究の結果はそれと合致するものである。

地下水涵養における水の降下浸透は、鉛直方向への不飽和透水過程と捉えられる。宮古島における琉球石灰岩層の不飽和透水係数  $ku$  (=水の降下浸透速度) の実測例はないが、飽和状態での透水係数  $ks$  については、上述したように10<sup>-1</sup> cm・s<sup>-1</sup>と求められている。ところが、不飽和透水係数は土層の水分飽和度 ( $S$ ) が低くなると著しく小さくなり、透水係数比 ( $ku/ks$ ) は  $S^3 \sim S^4$  に等しいとされている<sup>22)</sup>。よって、宮古島の地層において、この透水係数比が10<sup>-3</sup>程度であると仮定すれば、上述のように推定した水や窒素負荷の降下浸透速度は、これまでの知見とも整合性があるといえる。

なお、宮古島の主要な湧水における湧出量の日ごとの変動を追跡すると、降雨に対する湧出量増加は日単位で応答が現れているが<sup>23)</sup>、このような現象は、降雨によって地表に与えられた水そのものが即座に帯水層に達して起こるとは限らないことが知られている<sup>23)</sup>。

また、窒素汚染と同様に南西諸島の農業地域における水環境問題の一つとして、農業による地下水汚染がある<sup>24)</sup>。本報告で示された窒素濃度分布の下降に要する年単位の時間は、大部分の農業の分解に充分であると予想される。しかしながら、広範囲の地下水流域全体における濃度推移を問題とする窒素汚染とは異なり、農業等の有害物質汚染は局所的な少量の混入に問題の本質がある。これには、未分解の農薬を含有したまま大間隙を通して速やかに下降する一部の浸透水に注目した、本報告とは異なる観点からの研究が必要である。

## 7.3 窒素負荷率と地下水窒素濃度予測

先に触れたように、宮古島の帯水層内における地下水流動速度は大きく、また、浸透水量に比較して多量の貯留水が帯水層内にあるとも考えられない。よって、地下水水質分析によって得られる窒素濃度はその同じ年に地下水面に到達した水中における濃度を反映していると仮定できる。ここではこの仮定に基づき、地表で発生する窒素負荷と地下水窒素濃度との量的な関係について考察する。

宮古島における1977~99年の年間降水量は平均で2,061 mmである。このうち40%が地下水になるとされている<sup>25)</sup>ので、総面積165 km<sup>2</sup>の宮古本島部における年間地下水涵養量は、平均1.4×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>となる。ここで、先に集計した人為的窒素負荷発生総量 (Fig. 3) を、この地下水涵養量で除す。すると、各年度に地表で発生した人為起源窒素が100%地下水に移行したと仮定した場合の、その窒素分が浸透水とともに7年前後の時間を経て地下水帯水層に到達する際の窒素濃度が求められる。1976年度から91年度までについて、この濃度を平均すると、16.8 mg・l<sup>-1</sup>であった。

一方、その7年後の1983年度から98年度までの各年について、実測された地下水窒素濃度代表値から自然起源窒素濃度を差し引いた人為起源窒素濃度を平均すると、6.62 mg・l<sup>-1</sup>であった。これらの比から (1) 式により、地表で発生した人為起源窒素の地下水への平均負荷率は、39%ということになる。

畑地において施用された肥料の溶脱についてはこれまでも多くの研究がある。國松<sup>26)</sup>が日本国内でのこれまでの研究結果を整理して求めた回帰式では、施肥窒素量に対する回帰係数は0.31で、負荷率が31%であったことに相当する。一方、家畜排泄物に関しては、本調査地では肉牛飼育が多く、畜産糞尿に起因する窒素のうち少なくとも糞によるものは畑地への堆肥施用という形を経由して環境に負荷されると考えられる。牛尾らの報告<sup>27)</sup>によると、千葉県で畑地に施用した乾燥牛糞および牛糞堆肥中の窒素分解率は141日間で各々35%と10%であり、これは夏季に行われた実験なので本調査地とも比較しうる。

生活排水に起因する窒素の地下水への移行については、本調査地の参考にできるデータが乏しいが、中西ら<sup>28)</sup>が宮古島の地区ごとに各発生源による窒素負荷発生量と地下水硝酸性窒素濃度とを集計分析した結果によると、生活排水に起因する窒素の負荷率は、化学肥料および家畜排泄物に起因するものに比べ大きな値を得ていた。

以上より、施肥および家畜排泄物中窒素のおよそ30%程度が地下水に移行し、生活排水に起因する窒素の負荷率はそれより大きいとすると、それらの平均として得られた39%という値は、宮古島の全般的な実態に即したものであると考えられる。

次に (1) 式から、Fig. 3 の各年の人為的窒素負荷発生総量を年間地下水涵養量で除したものにこの平均負荷率を乗じ、自然起源窒素濃度を加えたものを、その7年後の地下水窒素濃度の予測値とし、これを Fig. 2 で示した実

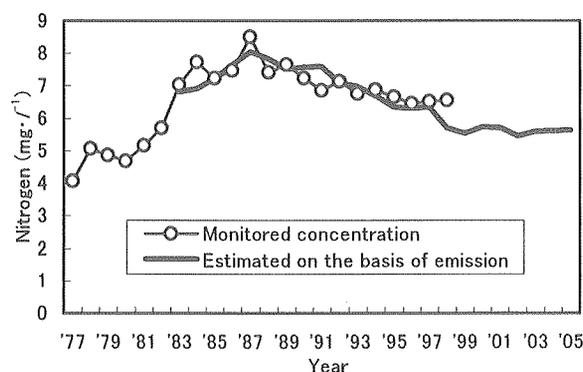


Fig. 6 Comparison of monitored and estimated nitrogen concentration in groundwater at Miyako Is.

測に基づく窒素濃度代表値とともに示すと、Fig. 6 のようになった。この図に見られるように、1983年度から現在に至る予測値は、実測値の推移におおむね合致している。

さらに Fig. 6 には、最近の窒素負荷発生量から将来の地下水窒素濃度を予測したのも示した。これによると、窒素濃度は現在よりさらに若干低下する余地が残されているものの、ここ数年窒素負荷発生量の減少が停滞しているため、少なくとも2,000年代前半はおおむね横ばいとなることが予測される。

ただし、Fig. 4 に示したように、近年宮古島では肉牛飼育が増加しており、これにともなってこれまでのサトウキビ栽培用化学肥料を中心とした窒素負荷の構成割合は大きく変化しつつある。したがって、第6項で述べたように、各起源窒素の負荷率の違いによる平均負荷率の変動が無視できなくなる可能性があり、さらに精度の高い地下水窒素濃度予想のためには、今後各起源別の負荷率に関する知見の集積が必要であろう。

## 8. ま と め

本報告では、これまで公表されているデータに基づいて、宮古島における1976年度から98年度に至る20余年間の窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の推移を比較した。それにより、以下のような結果を得た。

1) 宮古島の地表で発生した窒素負荷量の推移は、その7年後の地下水窒素濃度の推移と最も高く相関していた。

2) 窒素分の平均的な降下浸透速度はおよそ $3\text{ m}\cdot\text{y}^{-1}$ と推定された。これは水の浸透速度に関するこれまでの知見とも整合性がある。

3) 地表で発生する人為起源窒素の地下水への平均負荷率は39%と算定された。

4) 最近の窒素負荷発生量の推移から、少なくとも2,000年代前半は地下水の窒素濃度がおおむね横ばいとなることが予測された。

宮古島以外の隆起サンゴ礁からなる島々において、これらの結果がそのまま適用されるものであるかどうかはさらなる検証が必要であるが、地表の窒素負荷が帯水層に至るのに年単位の時間がかかることから、地下水位と過去の窒素負荷発生量に関するデータがあれば、将来の地下水窒素濃度をある程度予測することが可能であるといえる。

宮古島では、窒素負荷発生総量が、ピーク期に比べてすでに大きく減少している。しかしながら、同島と同じような地質構造の地域で過去数年間の窒素負荷発生量が増加してきた場合、地下水窒素濃度が今後数年に渡って増加し続けることになり、そのような動向を見込んだ上での現状評価と対策検討が必要であると言えよう。

とくに、本調査地において本研究のような解析が可能となったのは、様々な関係者の努力により肥料使用量や地上環境に関する正確な資料が長年にわたって集積され、公表されているからである。同様な地下水汚染のおそれのある他の地域においても、少なくとも基礎的なデータの収集を継続的に実施することが望まれる。

(原稿受付 2001年5月31日)

(原稿受理 2001年9月12日)

## 参 考 文 献

1) 野間泰二 (1992) 琉球石灰岩地帯における地下水の開発と保全, 地下水学会誌, 34, 163-170.

2) 宮古島地下水水質保全対策協議会 (1992~99) 平成3~10年度宮古島地下水水質保全調査報告書.

3) 宮古島地下水水質保全対策協議会 (1990) 宮古島地下水水質保全調査報告, 224pp.

4) 琉球政府企画局 (1966) 1966年度水調査報告書, 110pp.

5) 米国環境保護庁 (1987) 飲料水中の各種化学物質の健康影響評価—健康に関する勧告集—, 388pp., 日本水道協会, 東京.

6) 田代豊, 谷山鉄郎 (1995) 沖永良部島のサンゴ石灰岩地域における集約的畑作と地下水硝酸帯窒素の動態, 熱帯農業, 39, 82-88.

7) 中西康博, 山本洋司, 朴光来, 加藤茂, 熊澤喜久雄 (1995)  $\delta^{15}\text{N}$  値利用による地下水硝酸起源推定法の考案と検証, 日本土壌肥科学雑誌, 66, 544-551.

8) 農林水産省監修 (1989) 1989年ポケット肥料要覧, pp.60-61, 農林統計協会, 東京.

9) 沖縄県農林水産部 (1986) 沖縄県の肥料・機械, 146pp.

10) 沖縄県宮古支庁 (1978~1999) 宮古の農林水産業 (昭和53~平成11年度版).

11) 築城幹典, 原田靖生 (1994) 家畜の窒素排泄量の推定プログラム, 畜産の研究, 48, 773-776.

12) 和賀井文作 (1985) 家畜のふん尿処理と利用, 333pp., 養賢堂, 東京.

13) de Walle, F.B. and Sevenster, J. (1998) Agriculture and the Environment: Minerals, Manure and Measures, pp.1-10, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

14) 増島博, 山本寅吉 (1986) 農業土木技術者のための水質入門, 129pp., 農業土木学会, 東京.

15) 長田実也, 加藤俊典 (1990) 地下ダムと水質問題—琉球石灰岩地帯における地下水の硝酸性窒素濃度の制御, 日本地下水学会秋期講演要旨, 52-55.

16) 川迫倫子, 川島月夫, 米澤守光, 北園正人 (1991) 鹿児島県の地下水質について—第4報 離島地域と論島—, 鹿児島県衛生研究所報, 27, 57-81.

17) 沖縄総合事務局 (1982) 宮古島水文地質図.

18) 渡口輝, 池間修宏, 宮城俊彦, 普天間朝好 (1995) 牧場における重油流出事例, 沖縄県衛生環境研究所報, 29, 125-126.

19) 登坂博行, 伊藤一誠, 蛭原雅之, 稲葉薫, 伊藤彰, 小島圭二 (1996) 多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析, 地下水学会誌, 38, 167-180.

20) 佐久間敏雄, 飯塚文男, 岡島秀夫 (1975) 畑土壌における水分と無機塩類の挙動—第1報 カラム中の水と塩素イオンの移動—, 日本土壌肥科学雑誌, 46, 126-132.

21) 田中正 (1990) 不飽和帯の水, 「水文学」(市川正巳編), pp.131-161, 朝倉書店, 東京.

22) Kochina, P.Y. (1962) Theory of Groundwater Movement, pp.19-21, Princeton University Press, Princeton.

23) 田中正 (1996) 「雨水浸透と地下水涵養」4.1 自然涵養のプロセス, 地下水学会誌, 38, 195-204.

24) 田代豊, 谷山鉄郎 (1996) 集約的農業地域・奄美群島沖永良部島における地下水への農薬混入, 日本作物学会紀事, 65, 77-86.

25) 農林省, 沖縄総合事務局 (1981) 皆福ダム, 33pp.

26) 國松孝男 (1996) 農業による地下水汚染と琵琶湖の水質保全, 「環境保全型農業へのアプローチ」(遠山明編), pp.97-119, 富民協会, 大阪.

27) 牛尾進吾, 吉村直美, 斉藤研二, 中島信夫 (2000) 家畜ふん堆肥および乾燥ふんの夏季における施用後141日間の窒素分解率とその推定, 日本土壌肥科学雑誌, 71, 249-253.

28) 中西康博, 高平兼司, 下地邦輝 (2001) 地下水窒素汚染における起源別窒素負荷率の重回帰法による推定, 日本土壌肥科学雑誌, 72, 365-371.