

栃木県南部畑作地帯の地下水水質の実態ならびに 多量施肥による水質およびユウガオ収量への影響

宮崎成生

摘要：県内有数の畑作地帯である壬生台地を対象に農業用地下水水質の実態調査を行った。農業用地下水の硝酸態窒素濃度は環境基準値 10mgL^{-1} を超えることはなかったが、県内の地下水としては高い値であった。また、安定同位体を用いた方法（ $\delta^{15}\text{N}$ 値利用法）により、農業用地下水に含まれる硝酸態窒素の50~60%は、施用した化学肥料由来と推測した。同時に、ユウガオを標準栽培および多肥栽培し、果実の収量と硝酸態窒素の地下への浸透を調査した。多肥栽培による果実の収量は標準栽培の1.1倍であり、増収分は肥料購入費の増加分とほぼ同じで経済的メリットはなかった。作土に施用した窒素は硝酸態窒素として降水により地下に浸透し、その速度は年間107cmであった。施用窒素に対する地下への溶脱率は標準栽培が22.5%、多肥栽培が41.1%であり、多肥栽培が地下水の硝酸態窒素汚染の原因になることを示した。

キーワード：畑作地帯，地下水，硝酸態窒素， $\delta^{15}\text{N}$ ，ユウガオ，窒素溶脱率

Studies on the actual and qualitative condition of underground water in the areas in southern Tochigi prefecture that plant upland crops

Naruo MIYAZAKI

Summary : We analyzed the quality of the underground water at the Mibu plateau of the areas planting foremost upland crops in Tochigi prefecture. Our results showed that although the concentration of nitrate nitrogen in the underground water did not exceed environmental standard (10mg L^{-1}), the concentration was higher than that in other areas in Tochigi prefecture. According to the results obtained from experiments using the $\delta^{15}\text{N}$ value method, it was estimated that 50-60% of the nitrate nitrogen in the underground water for agricultural use, had been extracted by the chemical fertilizers applied to the soil. Simultaneously, in a different experiment, the yield of bottle gourd plant and the leaching of nitrate nitrogen from the soil were compared between plots that had been treated with standard fertilizer and plots that had been treated with heavy fertilizer. The yield of bottle gourd in the heavy fertilizer-treated plots was 10% higher than that in the standard fertilizer-treated plots. From the viewpoint of cost performance, there was no economic advantage because the increase in income from the high yield was equivalent to the increased cost for fertilizer. The nitrogen applied to plow layer soils is leached as nitrate nitrogen by precipitation, and the rate of leaching of nitrogen in the soil is 107cm per year. The percentage of leached fertilizer nitrogen was 22.5% in the standard fertilizer-treated plot and 41.1% in the heavy fertilizer-treated plot.

It is suggested that the pollution of nitrate nitrogen in underground water is caused by cultivation of crops using heavy fertilizer.

Key words : upland field, underground water, nitrate nitrogen, $\delta^{15}\text{N}$, bottle gourd, nitrogen leaching

I 緒 言

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の過剰摂取が人の健康を害することから、1999年2月に水質の $\text{NO}_3\text{-N}$ は環境基準の健康項目に指定され、常時監視されることとなった。基準値は 10mgL^{-1} 以下であり、この値を超えた場合は、原因の究明と適切な対策を検討しなければならない。

我が国の地下水は、1991年の農林水産省農業用地下水調査によると182地点のうち15.4%¹⁾で、また、1998年に35都道府県が行った調査によると6.3%の井戸²⁾で環境基準値を超える $\text{NO}_3\text{-N}$ が検出された。

工場・事業所排水、生活排水、家畜排泄物の浸透と並んで、農地への施肥も地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を高める一因と考えられており、特に畑作地域での過剰施肥が地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 汚染をもたらすとする報告^{1, 3, 6, 20)}がされている。本県においても南部の畑作地帯で、農業用地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が環境基準値内ではあるが、県内他地域に比較して高い傾向にあった¹²⁾。この地域は、本県特産品かんぴょうの原料となるユウガオの主産地である。ユウガオは、肥料による濃度障害を起こしにくいため過剰に施肥される傾向にある。この地域周辺では化学肥料窒素で施肥基準値 0.3Mgha^{-1} の2倍程度施用されている報告⁷⁾があり、地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ による汚染が懸念されている。

本県は水源に位置し、県内の地下水汚染は他の地域へも影響を与えることになるため、地下水水質を保全することは重要である。農業は本来、物質循環機能を利用し環境に最も調和した産業のひとつである。しかし、多肥集約的な農業を進めた結果、窒素過剰や微量元素の欠乏など養分バランスが不均衡になるとともに肥料成分の流失など環境負荷が起きている^{1, 3, 6, 20)}。現在の人口を維持する食糧生産のためには、肥料の役割は重要であり、必要不可欠である。適切な肥培管理を行い、余分な成分の系外への排出をできるだけ減らした持続可能な農業を進める必要がある。

そこで、本県南部畑作地帯の農業用地下水水質の実態を調査するとともに安定同位体を用いて地下水の化学肥

料窒素による汚染を推測した。また、ユウガオ栽培での多量施肥が収量および水質に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

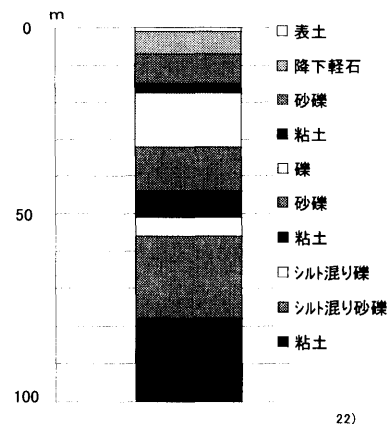
II 試験方法

1. 地下水および地表水水質実態調査

1) 採水地点および採水方法

調査地域は、壬生町藤井を中心とした 25km^2 で、姿川と黒川に挟まれた台地上にあり、ユウガオ等露地野菜、水田、畜産および住宅が混在している。水田率は44.5%と県平均78%¹⁹⁾に比較して低く、県内有数の畑作地帯である。土壌は表層多腐植質黒ボク土である。地質は表層が関東ローム層と段丘砂礫層からなっており、下部には砂礫層を主とし、砂層、泥層を挟む半固結堆積物が地下100m付近まで分布し深層地下水の帯水層をなしている²²⁾。

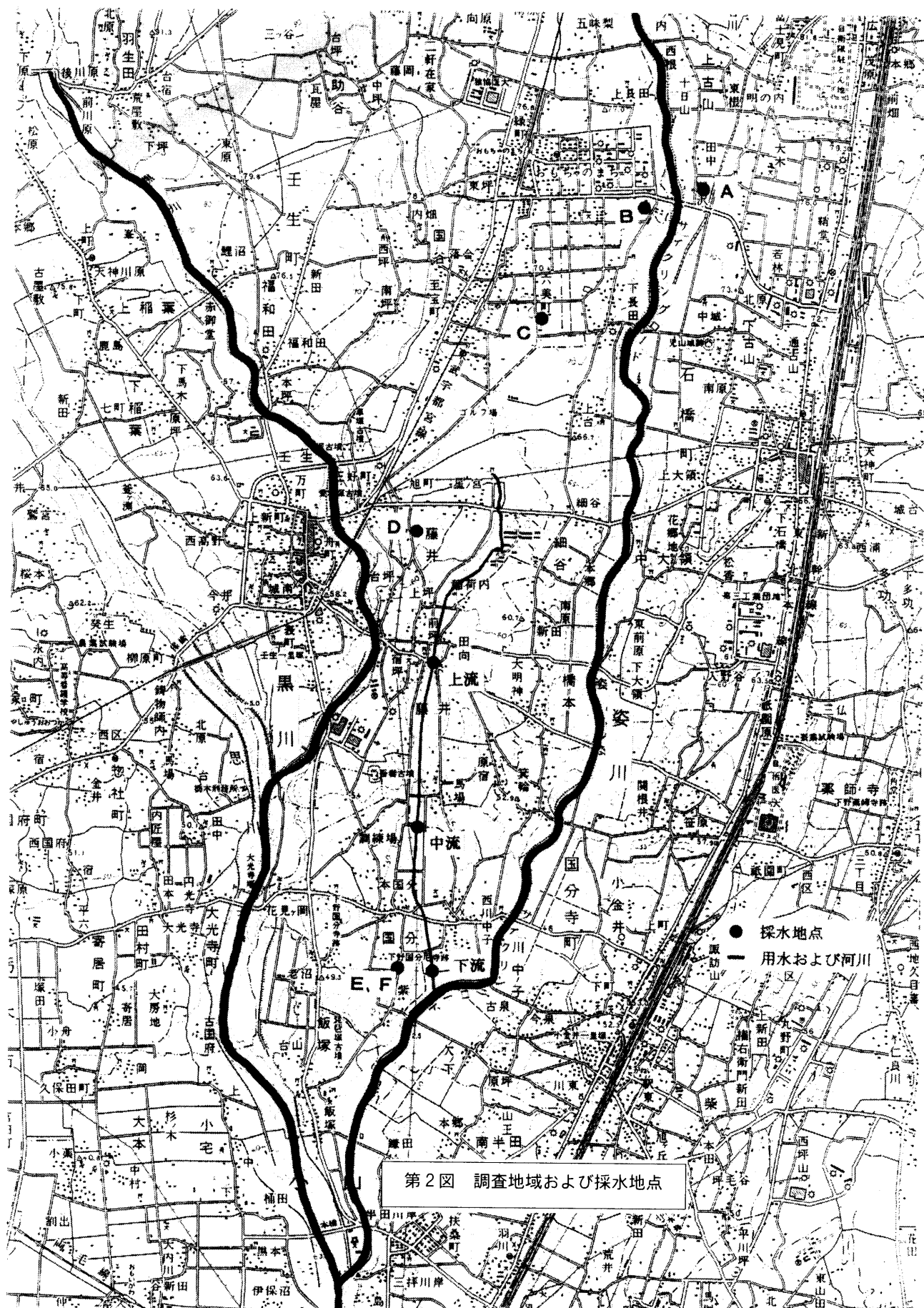
採水地点およびその概要は第1表および第2図に示した。地下水が6箇所、地表水が3箇所である。地下水は、すべて水田かんがい用で、ポンプにより揚水したものを採取した。地表水は、厳島神社を水源とし姿川まで全長約6km、幅2mのコンクリート製U字溝で、採水器を用いて流水中心部から採水した。農業用排水路として利用されており、かんがい期にのみ水流がある。なお、地点Aは、姿川の東側に位置し、調査地域との比較のため設置した。



第1図 壬生町藤井の地質柱状図

第1表 採水地点の概要

地点名	周辺の土地利用状況	採水井戸の深さ
A	施設野菜、水田、住宅が混在する	20m
B	水田、野菜畑、住宅が混在する	36m
C	果樹園、野菜畑、水田、住宅が混在する。堆肥が野積みされている	40m
D	水田、野菜畑、住宅が混在する	25m
E	水田、野菜畑、住宅が混在し、牛舎がある	40m
F	水田、野菜畑、住宅が混在し、牛舎がある	50m
用水下流	水田 姿川との合流地点の0.2km上流に位置する	
用水中流	水田 用水下流の1.7km上流に位置する	
用水上流	水田 用水中流の1.8km上流に位置する	



採水は、かんがい期に月2回行った。調査年次および回数は、地点Aが1995年と1996年、計17回、地点B、地点C、地点Dが1995年～1999年、計35回、地点Eが1995年～1997年、計15回、地点Fが1998年と1999年、計12回、用水上流、中流が1995年と1996年、計16回、用水下流が1995年～1999年、計35回であった。

2) 分析方法

pHはガラス電極法、ECは導電率計法、T-Nは紫外線吸光光度法、アンモニウム (NH_4) はインドフェノール法、 NO_3 、 SO_4 、Clはイオンクロマト法、K、Ca、Mg、Naは原子吸光法¹⁶⁾、 SiO_2 はモリブデン黄法¹⁸⁾、 $\delta^{15}\text{N}$ は東京農業大学に委託し朴らの方法¹⁾で測定した。なお、 $\delta^{15}\text{N}$ は1995～1998年の一部試料のみ測定した。

2. ユウガオ栽培試験

栃木県農業試験場畑ほ場で、ユウガオを1997年から3年間栽培した。土壌は表層多腐植質黒ボク土、試験規模は1区60㎡で2反復、うね幅6m株間2mで行った。ほ場の断面形態を第3図に、また、作土の主な化学性を第2表に示した。

処理区の内容を第3表に示した。化学肥料および家畜ふん堆肥を施肥基準²¹⁾どおり施用した標準区を対照とし、化学肥料および家畜ふん堆肥をともに施肥基準の2倍量施用した区を多肥区とした。化学肥料は有機入り複合肥料で窒素8% (有機態窒素2.8%、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 3.4%、尿素1.8%)、りん酸12%、加里8%、家畜ふん堆肥は水分38.8%、窒素1.82%、りん酸3.4%、加里3.6%含むもの (3年平均値、窒素、りん酸および加里は乾物あたりの値) を用いた。堆肥は4月上旬、化学肥料は基肥として5月上旬、追肥として6月上旬に施用した。ユウガオは4月中旬は種、5月上旬定植、7月上旬より収穫を開始し9月上旬まで栽培した。なお、1998年から無肥料区を設置したが、ユウガオは栽培しなかった。

ユウガオは適期に収穫を行い生果重を測定した。製品重は生果重の3.5%として算出^{14), 15)}した。

各処理区に、表層から10, 30, 50, 75および100cmの位置にボーラスカップ (吸引型土壌溶液採取器) を4箇所埋設し、4月～9月は2週間ごとに、10月～翌年3月は4週間ごとに土壌溶液を採取した。ただし、100cmの採水は1998年3月から開始した。採取した土壌溶液はpH、 $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ を測定した。pHはガラス電極法、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はイオンクロマト法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ はインドフェノール法¹⁶⁾を用いた。

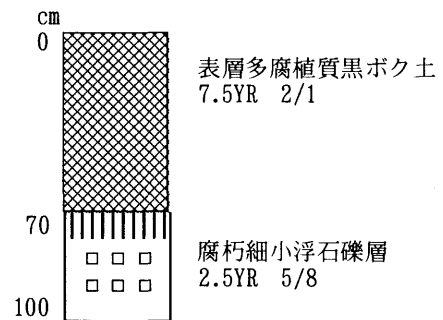
降水量は栃木県農業試験場本館屋上に雨量計を設置し観測した。

地表面および作物葉面からの水分蒸発散量は、次式により日平均気温および日射量から可能蒸発散量を推定⁹⁾した。日平均気温および日射量は宇都宮地方気象台観測値を用いた。

$$Et = 0.0075 (1.8 Tm + 32) (Rs / 4.186 l)$$

ただし、 Et は蒸発散量 (cm)、 Tm は日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 Rs は日射量 (J cm^{-2})、 l は蒸発の潜熱で $l = 597 - 0.6 Tm$ である。

経済性を評価するために、製品かんぴょうの販売額と肥料および家畜ふん堆肥の購入費の差を収益評価値として、標準栽培と多肥栽培の比較を行った。



第3図 試験ほ場の土壌断面形態

第2表 ほ場作土の化学性

pH	T-C	T-N	C/N	CEC	交換性塩基		
					Ca	Mg	K
	g kg^{-1}	g kg^{-1}		$\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$	$\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$	$\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$	$\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$
6.2	85.5	6.7	12.8	34.6	17.0	5.2	0.7

第3表 試験区

区名	基肥窒素		追肥窒素	合計
	化学肥料	家畜ふん堆肥	化学肥料	
	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}
標準区	0.12(1.5)	0.22(20)	0.18(2.25)	0.52
多肥区	0.24(3.0)	0.44(40)	0.36(4.50)	1.04

注. () は現物重Mg

Ⅲ 結 果

1. 地下水および地表水水質実態調査

1) 地下水水質

地下水の水質を第4表に示した。

pHの平均値は6.5～7.0で、すべて農業用水水質基準値(6.0～7.5)内であった。ECの平均値は212～343×10⁻⁴Sm⁻¹であり、地点Aで基準値300×10⁻⁴Sm⁻¹を超え、また、地点Dでも超えた値が測定された。

T-Nの平均値は3.17～7.48mgL⁻¹であり、大部分はNO₃-Nとして存在していたが、NH₄-Nも低濃度ながら全地点で検出された。NO₃-Nの平均値は2.89～6.93mgL⁻¹であり、県内平均値¹¹⁾に比較して高い値であった。特に、地点Cでは9mgL⁻¹、地点Fでは8mgL⁻¹を超えることがあり、両地点は調査期間を通してNO₃-Nが高い傾向にあった。地点Eは変動係数が59.1と他地点に比べて大きかった。

δ¹⁵N値の平均値は4.4～6.3‰と地点による違いは少なかった。Kの平均値は地点Cで2.7mgL⁻¹と他地点の1.5～2.1mgL⁻¹に比べてやや高かった。SO₄-Sの平均値は地点C 3.7mgL⁻¹、地点D 12.3mgL⁻¹、他地点7.5～10.9mgL⁻¹と地点間でのばらつきが大きかった。Clの平均値は15.3～19.1mgL⁻¹であった。Caの平均値は地点Aがやや高く37.5mgL⁻¹、他地点が18.1～25.2mgL⁻¹であった。Mgの平均値は地点Aがやや高く11.7mgL⁻¹、他地点が6.9～

10.1mgL⁻¹であった。Naの平均値は8.2～10.4mgL⁻¹であった。SiO₂の平均値は27.2～35.1mgL⁻¹であった。水温は地点Dがやや高く18.9℃、他地点が16.7～17.6℃であった。

地点A、B、D、Fの水質は、いずれの項目とも、地点Cの水質は、K以外の項目で変動が少なく、地点ごとに特有の成分組成を示していた。また、年次変動はなかった。

2) 地表水水質

地表水の水質を第5表に示した。pHはいずれの地点とも7程度であったが、下流において基準値7.5を越えるときがあった。ECは141～384×10⁻⁴Sm⁻¹とやや高い値で推移しており、いずれの地点でも基準値300×10⁻⁴Sm⁻¹を超えたことがあった。CODは1.9～11.7mgL⁻¹であり、上中下流とも何度か基準値6mgL⁻¹を越えた。T-Nは1.41～7.24mgL⁻¹とすべての地点、時期において基準値1mgL⁻¹を越えていた。NH₄-Nは0.04～1.00mgL⁻¹であった。NO₃-Nは0.93～6.52mgL⁻¹と高い値で推移した。SSはすべての地点で基準値100mgL⁻¹以下であった。上流から下流にかけて、特定成分の濃度が上昇するという傾向は認められなかった。流量が少なかったため、降雨等の影響を強く受け、水質の変動は大きかった。特に1996年は渇水によりその傾向が強かった。

県内主要農業用水104地点の平均値¹¹⁾と比較して、EC、T-N、NO₃-N、Cl、Ca、Mgが高かったが、他の項目は同程度であった。

第4表 地下水の水質

地 点	項 目	pH	EC 10 ⁻⁴ Sm ⁻¹	T-N mgL ⁻¹	NH ₄ -N mgL ⁻¹	NO ₃ -N mgL ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰	K mgL ⁻¹	SO ₄ -S mgL ⁻¹	Cl mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	Na mgL ⁻¹	SiO ₂ mgL ⁻¹	水温 ℃
A	平均	7.0	343	6.39	0.15	5.77	5.9	2.1	8.4	17.7	37.5	11.7	10.3	33.0	—
	最小値	6.8	291	5.56	0.03	4.50	5.4	1.4	3.2	15.6	18.6	7.2	7.9	27.8	—
	最大値	7.3	425	7.87	0.28	7.64	6.2	2.5	10.9	20.9	45.3	14.4	11.3	38.9	—
	変動係数	2.1	11.3	10.7	44.4	16.9	4.5	10.0	20.8	9.6	20.7	14.5	7.0	9.0	—
B	平均	6.6	225	3.40	0.13	3.02	5.2	1.5	9.4	15.3	21.0	7.4	8.7	27.2	17.6
	最小値	6.4	137	2.51	0.06	1.95	3.6	1.3	5.6	13.1	11.1	6.9	8.3	24.8	17.0
	最大値	7.3	254	4.90	0.23	4.35	6.0	1.8	11.4	21.1	23.5	7.9	9.2	32.6	18.0
	変動係数	2.7	8.2	17.8	35.9	20.3	9.6	8.1	18.9	11.2	12.6	3.6	3.0	8.5	2.2
C	平均	6.6	212	7.48	0.15	6.93	6.3	2.7	3.7	17.1	18.1	6.9	8.2	27.7	16.7
	最小値	6.4	130	6.00	0.03	5.10	4.4	1.2	2.9	14.5	16.9	6.4	7.8	25.2	16.0
	最大値	7.3	247	9.87	0.63	9.28	7.6	6.6	5.1	27.0	19.8	7.4	9.0	31.1	18.0
	変動係数	2.4	10.7	14.2	63.5	15.4	10.3	57.3	14.3	12.9	4.6	3.6	4.3	5.5	3.3
D	平均	6.5	273	5.91	0.13	5.44	4.4	1.7	12.3	18.8	25.2	10.1	10.4	27.8	18.9
	最小値	6.3	229	4.70	0.02	4.32	3.8	1.4	10.7	14.9	22.5	9.2	9.9	25.6	18.0
	最大値	7.3	322	8.64	0.27	7.51	6.2	2.2	23.6	27.7	28.3	11.2	11.8	29.7	20.0
	変動係数	2.8	6.8	16.3	44.0	14.1	11.7	9.7	16.8	12.2	6.9	4.4	3.8	4.3	2.1
E	平均	6.9	248	3.17	0.16	2.89	5.2	1.8	10.9	19.1	22.4	8.2	8.9	35.1	17.3
	最小値	6.5	220	0.21	0.08	0.16	4.2	1.4	4.8	15.0	19.7	6.8	8.0	30.6	17.0
	最大値	7.2	293	5.72	0.27	5.53	6.3	2.4	31.1	23.0	26.6	9.9	9.6	45.8	17.5
	変動係数	2.8	6.6	56.5	30.4	59.1	10.8	16.8	50.1	9.7	7.5	12.0	5.6	14.1	1.4
F	平均	6.7	258	7.29	0.14	6.64	5.4	1.8	7.5	17.5	—	—	—	—	16.9
	最小値	6.6	201	6.55	0.04	5.68	5.1	1.6	5.9	14.1	—	—	—	—	16.5
	最大値	6.8	281	8.66	0.25	8.35	5.5	2.2	9.4	19.4	—	—	—	—	17.0
	変動係数	0.9	7.8	8.9	41.7	12.0	2.7	7.6	12.9	6.8	—	—	—	—	1.1

注．—は未測定

第5表 地表水の水質

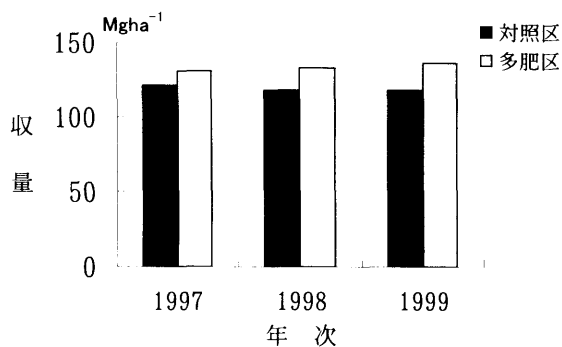
採水地点	項目	pH	EC 10 ⁻⁴ Sm ⁻¹	COD mgOL ⁻¹	T-N mgL ⁻¹	NH ₄ -N mgL ⁻¹	NO ₃ -N mgL ⁻¹	SS mgL ⁻¹	T-P mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹	SO ₄ -S mgL ⁻¹	Cl mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	Na mgL ⁻¹	SiO ₂ mgL ⁻¹
用水上流	平均	7.1	256	4.3	4.56	0.26	3.87	5	0.08	2.3	7.0	19.7	23.4	7.9	11.1	26.8
	最小値	6.9	141	2.0	3.01	0.09	2.48	1	0.01	1.7	3.4	11.0	14.7	5.0	6.6	15.8
	最大値	7.4	328	11.7	6.58	0.57	5.61	23	0.20	4.6	11.3	26.6	30.2	10.3	16.6	31.3
	変動係数	1.8	18.6	55.2	23.7	59.9	25.4	124	72.7	30.4	32.2	18.3	19.2	20.4	19.3	18.1
用水中流	平均	7.1	303	3.8	4.01	0.22	3.32	7	0.06	2.4	12.0	21.7	30.9	9.2	11.7	28.6
	最小値	6.7	204	2.2	1.41	0.11	0.93	2	0.01	2.1	5.1	15.8	21.3	6.2	8.7	16.3
	最大値	8.0	384	6.3	6.22	0.36	5.52	20	0.16	3.3	36.1	27.7	43.9	11.7	13.8	31.7
	変動係数	4.0	15.8	35.3	32.0	32.7	37.6	70	74.7	13.1	59.2	13.0	22.5	17.9	10.2	16.9
用水下流	平均	7.4	294	4.2	4.68	0.34	3.91	6	0.10	3.4	11.9	22.4	29.8	8.9	12.6	23.5
	最小値	7.0	153	1.9	2.29	0.04	1.85	0	0.01	2.7	4.7	10.5	12.3	4.2	8.2	14.3
	最大値	10.0	368	8.1	7.24	1.00	6.52	51	0.52	5.5	41.3	30.9	45.0	11.8	17.9	38.
	変動係数	7.5	16.7	36.2	24.9	71.5	27.6	145	86.2	17.7	48.4	16.8	24.6	21.2	16.0	25.6
県内農業用水 104地点の平均 1991-1993		7.2	177	4.5	2.15	0.48	1.21	10	0.14	2.4	7.2	11.8	13.2	3.3	—	16.8

注. —は未測定

 第6表 地表水のNO₃-Nおよびδ¹⁵N

時 期	1996					1997		1998	
	上流		中流		下流	下流		下流	
	NO ₃ -N mgL ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰	NO ₃ -N mgL ⁻¹	NO ₃ -N mgL ⁻¹		NO ₃ -N mgL ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰	NO ₃ -N mgL ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰
5月上旬	—	—	—	3.21	—	—	—	—	—
5月下旬	—	—	2.75	1.91	6.5	—	—	—	—
6月上旬	5.61	5.4	3.20	4.19	6.7	5.43	6.7	4.67	7.5
6月下旬	4.14	4.8	3.93	6.52	4.8	4.40	7.9	4.20	7.9
7月上旬	2.48	—	2.76	2.36	—	1.85	—	4.13	7.4
7月下旬	4.16	7.0	3.63	3.39	8.2	4.01	8.2	4.29	8.4
8月上旬	2.57	—	3.72	2.89	—	3.49	8.3	3.94	8.6
8月下旬	5.51	6.8	0.93	2.63	8.9	3.59	8.2	3.65	8.7
9月上旬	3.42	—	2.24	2.19	—	—	—	—	—
平 均	3.98	6.0	2.90	3.25	7.2	3.80	7.9	4.15	8.1

注. —は未測定



第4図 ユウガオ生果実の収量

地表水のNO₃-N濃度およびδ¹⁵N値を第6表に示した。1996年のδ¹⁵N値は、6月下旬に上流、下流とも4.8‰と最小値を示し、7月下旬以降、ともに増大したが、その値は上流に比べ下流が高かった。NO₃-Nは7月以降、上流

に比べ下流が低い傾向にあった。1997年および1998年の下流のδ¹⁵N値は8‰程度で推移した。1997年7月中旬の増水時を除き、6月上旬から8月下旬にNO₃-N濃度は減少傾向にあり、δ¹⁵N値は増加傾向にあった。

2. ユウガオ栽培試験

1) 生育および収量

ユウガオ生果実の収量を第4図に示した。ユウガオの生育は、窒素を標準の2倍量施用しても良好で濃度障害はなく、草勢は標準栽培に優った。しかし、果実の収量は標準栽培の1.1倍にしかならなかった。製品収量は、標準栽培が3850kgha⁻¹、多肥栽培が4330kgha⁻¹であり、標準栽培でも目標値2800kgha⁻¹を満たしていた。

2) 収益性

かんぴょうの販売価格は、1996年2500円kg⁻¹、1998年1100円kg⁻¹と変動が大きいため、1989年から1998年の平

均価格1635円を用い試算すると、多肥栽培による増収分は784800円 ha^{-1} であった。

肥料購入費は、化学肥料77.5円 kg^{-1} 、家畜ふん堆肥22円 kg^{-1} （各種家畜ふん堆肥の平均価格）であり、多肥栽培により税込みで767200円 ha^{-1} 負担が増加した。

多肥栽培による増収分は、肥料購入費の増加分とほぼ同じであり、経済的メリットはなかった（第7表）。

3) 土壌溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移

土壌溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移を第5図に、降水量を第6図に示した。ただし、1997年11月の10、30cmおよび1999年8月の10、30、50cmは、寡雨により採水不能であった。土壌溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、作土では家畜ふん堆肥施用後の4月上旬及び基肥施用後の5月上旬に徐々に、また、追肥施用後の6月上旬には急激に増加した。その後、

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度のピークは、降水の影響を受けて下方に移動し、ユウガオ収穫終了時の9月には100cm以下に達した。降水量の少ない冬季には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の動きはほとんどなかった。標準栽培、多肥栽培ともに同様の動きを示したが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は標準栽培に比べ多肥栽培で高かった。

窒素無施用のユウガオ無栽培地では、地下100cmまでの土壌溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、夏季にやや高まる傾向にあったが、概ね 1mgL^{-1} 以下の低い値で推移した。

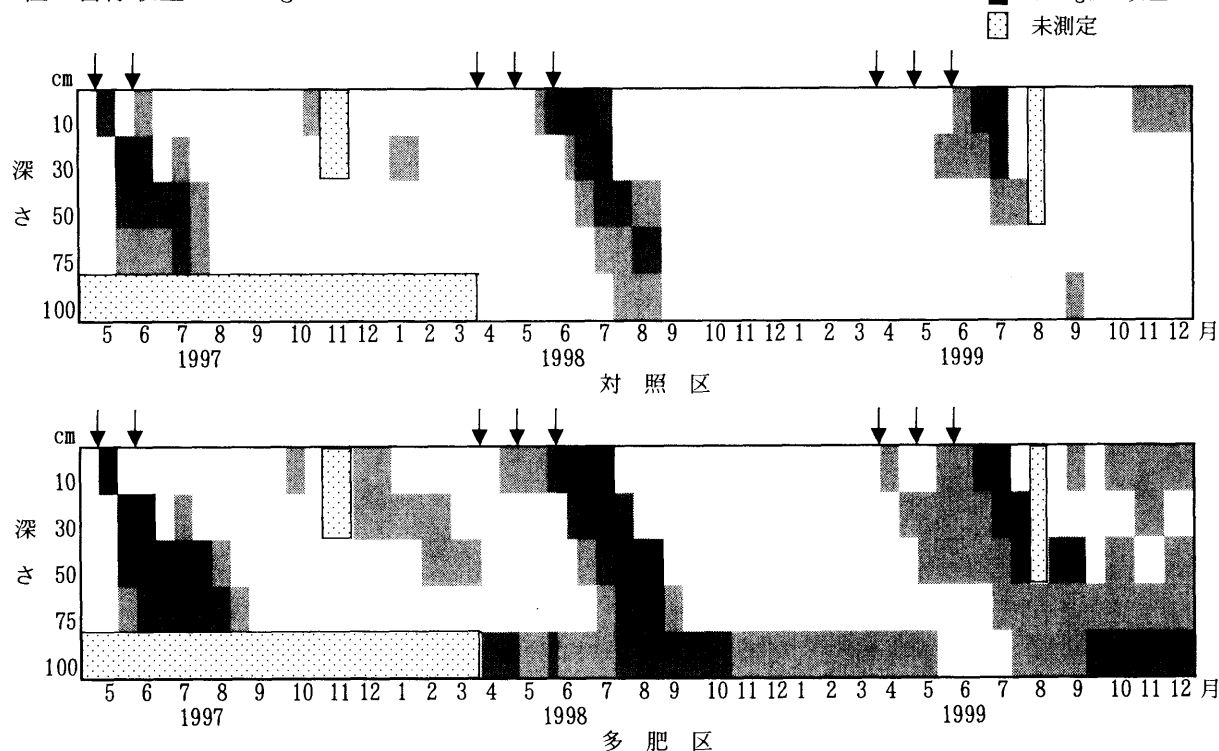
$\text{NH}_4\text{-N}$ は、いずれの層の土壌溶液からもほとんど検出されなかった。

pHの平均は、標準区、多肥区とも10cmが6.5、30cmおよび50cmが6.1、75cmが6.4、100cmが6.5、無肥区は10cmおよび30cmが6.3、50cmが6.4、75cmおよび100cmが6.6であり、時期による変動はなかった。

第7表 経済性(haあたり)

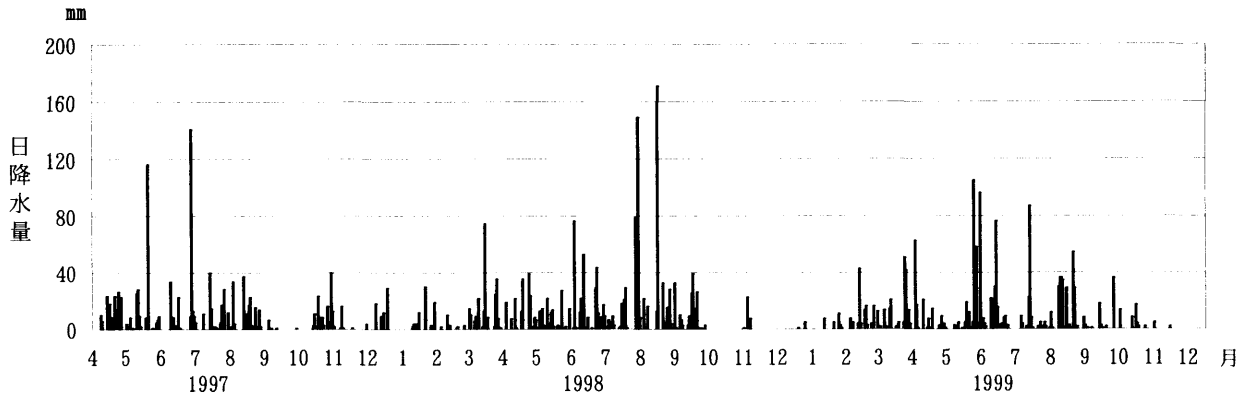
項 目	標準栽培 数量 kg	多肥栽培 数量 kg	単価 円 kg^{-1}	(多肥栽培) — (標準栽培) 円
収入				
かんびょう	3850	4330	1635	784800
合計				784800
支出				
化学肥料	3750	7500	77.5	290600
家畜ふん堆肥	20000	40000	22	440000
税金				36500
合計				767200

注．目標収量は $2800\text{kg}\text{ha}^{-1}$



第5図 土壌溶液中硝酸態窒素濃度の推移

注) 1998年3月以前は100cmの採水をしていない。1997年11月の10、30cmおよび1999年8月の10、30、50cmは採水不能。
↓ は施肥時期



第6図 試験期間中の降水量

IV 考 察

1. 壬生町藤井地区地下水および地表水水質について

1) $\text{NO}_3\text{-N}$ の起源について

一般に地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、施肥や土壌からの無機化など様々な起源に由来している。施肥等の人為的管理の影響を明らかにするため、起源別の寄与を推定しなければならない。そこで、中西の方法¹³⁾より $\delta^{15}\text{N}$ 値から、地下水の硝酸態窒素源を化学肥料、動物（家畜排泄物、し尿、生活排水）、土壌由来のものだけとして、起源構成比を推測した。すなわち、

W：地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})

X：化学肥料由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})

Y：動物性窒素由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})

Z：土壌窒素由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ (mgL^{-1})

a：地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (%)

b：化学肥料 $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (%)

c：動物性窒素由来 $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (%)

d：土壌窒素由来 $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (%)

とすると、近似的に

$$W = X + Y + Z$$

$$aW = bX + cY + dZ$$

となる。

ここで、中西と同様に $b=0$, $c=15$, $d=7$ と仮置きする¹³⁾。

土壌窒素由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ の値 (Z) については、この地域を代表する数値はない。そこで、国内の山地林地および台地斜面林地の地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は大部分が 2.0mgL^{-1} 以下である²⁾ことを参考に数値を設定した。つまり、Zを0.5, 1.0, 1.5および 2.0mgL^{-1} の場合に分けて、地点ごとに $\text{NO}_3\text{-N}$ 起源別構成比の推定値を算出した。

地点E以外は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 $\delta^{15}\text{N}$ 値とも変動が小さかったので $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定したときのそれぞれの平均値

を用いた。地点Eでは $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 3mgL^{-1} 以上の場合をE-高、 3mgL^{-1} 未満の場合をE-低として分けて、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定したときのそれぞれの平均値を用いた。

地点ごとに $\text{NO}_3\text{-N}$ 起源別構成比の推定結果を第8表に示した。

化学肥料由来窒素の寄与率は、Zの値によって変化するが地点Aでは40~56%、地点Bでは28~56%、地点Cでは42~54%、地点Dでは51~66%、地点Eで $\text{NO}_3\text{-N}$ が高い場合は37~57%、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が低い場合は22~45%、地点Fでは47~60%であった。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低い地点B、Eでは、Zの値により化学肥料窒素由来の比率が大きく変化した。

E-低では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 1.2mgL^{-1} であり、Zが1.5, 2.0mgL^{-1} といた場合、算出不能となる。また、Zが 1.0mgL^{-1} のとき動物性窒素の寄与率が-3と算出される。

地点Cの動物由来窒素の寄与率は29~39%と他地点より高く、これは近くに野積みされた家畜ふん堆肥の影響を受けたためと考えられる。

地点EおよびFの近くには牛舎があったが、動物由来窒素の寄与率は20%程度であり、家畜排泄物の影響は少なく、適切な管理がされているものと考えられる。

地点Dの化学肥料窒素の寄与率ならびに $\text{SO}_4\text{-S}$ 、CaおよびMg濃度が他地点よりやや高かったが、地表に施用した肥料によるものか地質によるものかは判断できなかった。

地域外の地点Aと地域内各地点との化学肥料窒素の寄与率に差はなかった。地点AではCa、Mgがやや高く、周辺での施設野菜の土壌管理状況から苦土石灰の影響によるものと推測する。

生活排水や家畜排泄物の影響を受けるとCl、Naの濃度が増加し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ との相関が高くなるとされる。熊澤ら¹⁰⁾は、CaとClとの当量濃度比から水質への生活排水や家畜排泄物の影響を推定したが、調査地点でのCaと

第8表 $\delta^{15}\text{N}$ 値利用法による地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ の起源別構成比の推定

地点名	NO ₃ -N mgL ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰	NO ₃ -N の構成比											
			Z = 2.0の場合			Z = 1.5の場合			Z = 1.0の場合			Z = 0.5の場合		
			肥料 %	動物 %	土壌 %	肥料 %	動物 %	土壌 %	肥料 %	動物 %	土壌 %	肥料 %	動物 %	土壌 %
A	5.13	5.85	40	21	39	45	26	29	51	30	19	56	34	10
B	2.83	5.19	28	1	71	37	10	53	48	20	32	56	26	18
C	6.82	6.35	42	29	29	46	32	22	51	36	13	54	39	7
D	5.41	4.43	51	12	37	56	16	28	61	22	17	66	25	9
E-高	3.98	5.45	37	13	50	43	19	38	51	26	23	57	30	13
E-低	1.20	4.87	-22	-45	167	1	-24	125	28	-3	75	45	13	42
F	6.29	5.38	47	21	32	51	25	24	57	29	14	60	32	8

Clの当量濃度比は、地下水A 3.75、地下水B 2.50、地下水C 2.00、地下水D 2.47、地下水E-高2.18、E-低2.08（第9表）であり、水質への生活排水や家畜排泄物の影響は、いずれの地点も大きな違いはない。しかし、地点Cでの値がやや低く、上述の $\delta^{15}\text{N}$ 値からの推測と同様に、やはり、近くに野積みされていた家畜ふん堆肥の影響を受けているものと考えられる。

2) 地域のは場管理との関係について

露地野菜畑（表層腐植質黒ボク土）での3m、6mの浅井戸および暗きょ排水では、 $\delta^{15}\text{N}$ 値より化成肥料や堆肥中易分解性の窒素の影響は施肥直後に一時的に高まると報告¹⁾されている。

これに対し、本調査の地点A,B,C,D,Fでは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度および $\delta^{15}\text{N}$ 値の変動が小さかった。原因としては、この地域が火山灰台地であり調査井戸が20～50mと深く、地表に供給された堆肥由来や化学肥料由来の窒素が、降水や灌水に伴い長い時間をかけて地下水中に移動することおよび長期間にわたりほぼ均一な施肥など土壌管理がなされていることから地下水に同質の $\text{NO}_3\text{-N}$ が絶え

ず供給されているものと考えられる。

一方、地点Eでは $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度および $\delta^{15}\text{N}$ 値の変動が激しいものの、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 3mgL^{-1} 以上の測定値に限定すると、それらの変動は小さく、また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の起源別構成比の推定値も他の地点と同じ傾向を示した。これらのことから、地点Eでは通常 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 3mgL^{-1} 以上の水質が供給されており、不定期的に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低い水が混入していると推察できる。

以上から、調査地域全体の $\text{NO}_3\text{-N}$ の起源は、化学肥料が50～60%、動物が20～30%、土壌が10～20%と推測できる。

地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と他の測定項目との相関係数を第10表に示した。ただし、地点Eは $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 3mgL^{-1} 以上の場合の値を用いた。

$\text{NO}_3\text{-N}$ とKとの間に正の相関がある以外は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と高い相関を示す項目はなかった。Kは堆肥にも含まれることから堆肥や加里質肥料の施用による影響を受けているものと推察する。

岐阜県各務原台地の $\text{NO}_3\text{-N}$ による地下水汚染の場合、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とCa、Mg、 $\text{SO}_4\text{-S}$ との間に高い相関があり、畑地に施用された苦土石灰や硫酸の影響が大きく現れたと推論²⁰⁾されている。各務原台地では、ニンジン畑がまとまって存在し、施肥を含めたは場管理が単一であり、また、地質的に地下水水質が地上での影響を受けやすい。これらのことにより、地下水水質の特徴が明確に現れ、また $\text{NO}_3\text{-N}$ が最大で 25mgL^{-1} と高濃度に検出されたものと考えられる。

熊本県の地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い地域では、 $\delta^{15}\text{N}$ 値から化学肥料により汚染されたと考えられる場合でも、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{SO}_4\text{-S}$ との相関は小さく、この原因に硫酸以外

第9表 CaとClとの当量濃度比

地点名	Ca と Cl との当量濃度比
A	3.75
B	2.50
C	2.00
D	2.47
E-高	2.18
E-低	2.08
F	—

注. —は未測定

 第10表 地点別の $\text{NO}_3\text{-N}$ と各項目との相関係数 (n=6)

pH	EC	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\delta^{15}\text{N}$	K	$\text{SO}_4\text{-S}$	Cl	Ca	Mg	Na
0.017	0.178	0.420	0.420	0.757*	-0.480	0.436	0.146	0.241	0.051

注. * 5%水準で有意

の窒素質肥料の利用が多いことと土壤に SO_4 が吸着することをあげている³⁾。

本地域では、地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ への化学肥料の寄与率が50～60%であり、施用される窒素質肥料が硫酸ばかりでないこと、土地利用状況が複雑であり窒素質肥料と同時に苦土石灰が施用される畑ばかりではないことから、地下水水質に各務原台地のような特徴が現れなかったものと考えられる。

期間を通じすべての地下水から $\text{NH}_4\text{-N}$ が微量ながらも検出された。藤井ら²⁾は、調査地下水を窒素成分により $\text{NO}_3\text{-N}$ 型、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 型および中間型に類別することを試みており、地下水中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が含まれることはまれではない。糟谷⁶⁾は、脱窒が深さ50m程度の地下水でも起きており、有機物や脱窒菌の存在を報告している。本調査でも、T-Nと $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ との差から有機態窒素の存在も示されている。これらのことから、20～50mの深層に還元部位が存在し、アンモニア化に加えて脱窒が生じている可能性も示した。

3) 地表水水質

1996年6月下旬の $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下は、この地域の田植えの時期と一致することから化学肥料由来窒素の流入があったと考える。しかし、1997年および1998年の下流は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値から化学肥料由来窒素の影響は少ないようである。

微生物による脱窒過程において ^{14}N がわずかながら ^{15}N より優先的に脱窒され、結果として $\text{NO}_3\text{-N}$ の低下と $\delta^{15}\text{N}$ 値の増加が起こる⁸⁾。1996年は7月下旬以降、下流は上流に比べ $\delta^{15}\text{N}$ 値が増大し、同時に $\text{NO}_3\text{-N}$ が低下した。この時期は、流量が減少し、気温が高かったことから、脱窒が進み水質の浄化が行われたと推測される。また、1997年および1998年は6月上旬から8月下旬に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は減少傾向にあり、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は増加傾向にあった。原因としては、6月には化学肥料由来窒素の影響が少しあったが8月にはその影響が減少したことで脱窒作用があったことの両方が考えられる。

以上から、コンクリート製の用水路においても、底面の堆積物内などで脱窒による水質浄化があるものと推察された。

2. ユウガオ栽培試験

1) $\text{NO}_3\text{-N}$ 浸透速度

作土に施肥した窒素の鉛直浸透速度を推定する。施肥は家畜ふん堆肥、化学肥料の基肥および追肥と時期を分けて行われており、また、いずれの資材も有機態窒素を多く含むため、土壤溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度ピークの移動から $\text{NO}_3\text{-N}$ 浸透速度を求めることは難しい。そこで、最初に

施用された堆肥由来 $\text{NO}_3\text{-N}$ の動きについて考える。

堆肥を施用したのは、1998年、1999年とも4月8日であった。堆肥に含まれていた $\text{NO}_3\text{-N}$ および施用直後に堆肥から生成した $\text{NO}_3\text{-N}$ が降水に伴う浸透水によって下方に移動し、深さ100cmに $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の高まりが現れたのは、1998年は堆肥施用112日後の7月29日、1999年は堆肥施用104日後の7月21日であった。その間に1998年は降水量が833mmあり、蒸発散量が321mmと試算された。浸透水量＝降水量－蒸発散量－表面流去－土壤水分変化量である。表面流去は、試験ほ場に傾斜はなく透水性に優れているので0とし、土壤水分含量は、この時期定期的な降水があるため変動が少ないと考え0とすると、地下への年間浸透水量は833mm－321mm＝512mmとなる。同様に、1999年は、降水量861mm、蒸発散量331mmから浸透水量530mmとなる。施肥位置の平均が深さ10cmであるとした場合、両年の結果から520mm程度の浸透水量によって $\text{NO}_3\text{-N}$ は地中を90cm下方に移動したことになる。

年間降水量が平年値に近い1999年の値を用いて年間浸透水量を試算すると621mmとなった。この値は、亀和田¹⁾の3か年平均から求めた年間浸透水量値629mmに近かった。そこで、年間浸透水量値を621mmとすると、作土に施用した窒素分が、硝酸態窒素として地下に浸透する速度は年間107cmとなる。

2) $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量

浸透水の動きが明確な1998年4月の堆肥施用から一年間の値を利用して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の下方への溶脱量を浸透水量と各処理区の深さ100cmの平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度から以下のように推定を試みた。

1998年4月8日から一年間の降水量は1963mm、蒸発散量は765mmと試算され、この一年間の地下への浸透水量は1198mmとなる。各処理区の深さ100cmの土壤溶液中平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、1998年4月8日の堆肥施用の影響が現れ始めた1998年7月29日から一年間の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度測定値と測定間隔から求め、標準区が 9.8mgL^{-1} 、多肥区が 35.6mgL^{-1} 、無肥区が 1.29mgL^{-1} であった。

年間浸透水量に各処理区の深さ100cmの土壤溶液中平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を乗じて求めた $\text{NO}_3\text{-N}$ の年間溶脱量の推定値は、標準区が 117kg ha^{-1} 、多肥区が 427kg ha^{-1} 、無肥区が 15kg ha^{-1} であった。この推定値は、施肥窒素に対して標準区が22.5%、多肥区が41.1%に相当した。また、無肥区の値は、降水によって供給される無機態窒素量 10kg ha^{-1} ²³⁾と同等であり、土壤中での窒素収支がおおよそ0であることを示している。

これらのことから、地表での窒素肥料の過剰施用が、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の地下への溶脱量を増大させ、地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃

度の上昇につながると考えられる。

ユウガオは、濃度障害をおこしにくい作物で多肥栽培されることがあるが、必ずしも収量の増加にはつながらず、第7表で示したように経済的なメリットはほとんどない。また、過剰な施肥は、資源を無駄にするだけでなく、環境への負荷を増大させる。

本調査では、地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は環境基準値 10mgL^{-1} を超える地点はなかった。しかし、この地域は、県内他地域に比べ $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い値であり、また $\delta^{15}\text{N}$ 値から化学肥料由来窒素の影響を50~60%受けていると推察される。

本調査地域を含め県内で地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ による汚染は問題となっていないが、過剰施肥を続けることにより、地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が環境基準値を超えることも起こりうる。

地下水水質は直上だけでなく、広い範囲の土壌管理の影響を受けているため、地下水水質を保全するには、地域全体の肥培管理を適切に行わなければならない。また、地上での施肥が地下水に影響を及ぼすまでには長い時間を要するため、長期間を視野に入れた施肥管理が重要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり東京農業大学熊澤喜久雄氏には試料水中 $\delta^{15}\text{N}$ を測定していただいた。ここに記して厚く感謝の意を表す。

引用文献

1. 朴光来・山本洋司・日高伸・加藤茂・熊澤喜久雄(1995)埼玉県における露地野菜畑土壌からの浸透水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値。土肥誌66:146-154。
2. 藤井國博・岡本玲子・山口武則・大嶋秀雄・大政謙次・柴野和夫(1997)農村地域における地下水の水質に関する調査データ。農環研資料20:1-329。
3. 廣畑昌章・小笹康人・松崎達哉・藤田一城・松岡良三・渡辺征紀(1999)熊本県U町の硝酸性窒素による地下水汚染機構。地下水誌41:291-306。
4. 亀和田國彦(1995)黒ボク土露地畑での硝酸イオンの周年的垂直移動。栃木農試研究報告43:19-34。
5. 環境庁(2000)平成12年版環境白書:425-429。
6. 糟谷真宏ほか(1994)愛知県の農耕地および農村集落における地下水中硝酸イオン濃度とその支配因子。水環境誌17:578-586。
7. 加藤秀正・星野幸一・藤沢徹(1989)栃木県下の畑土

壌の養分の動向 かんびょう畑の調査とその問題点。宇大農学部学術報告14:71-78。

8. 川西琢也・木方展治・尾崎保夫・米山忠克(1991)カラムによる脱窒過程 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 分別係数の測定。土肥誌62:424-426。
9. 清野裕(1990)気候的植物生産力モデルと土壌物理性。土壌の物理性61:11-18。
10. 熊澤喜久雄・中西康博・山本洋司・朴光来・田村幸美(1998) $\delta^{15}\text{N}$ 法による地下水の硝酸態窒素汚染源の推定法についてー沖縄県宮古島の地下水調査からー。農大総研紀要9:1-19。
11. 宮崎成生(1994)栃木県における農業用水の水質実態。栃木農試研報42:35-44。
12. 宮崎成生(1996)農業用地下水の水質実態調査。栃木農試成果集15:81-82。
13. 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。土肥誌66:544-551。
14. 中山保(1962)かんびょうについての研究。栃木農試南河内分場特別研報2。
15. 中山保・斎藤武衛(1960)かんびょうの栽培法に関する研究(第1報)。栃木農試研報3:59-65。
16. 日本規格協会(1998)工業排水試験方法。
17. 農林水産省構造改善局計画部資源課農村環境保全室(1991)農業用地下水の水質調査結果の概要。
18. 農林水産省農蚕園芸局農産課編(1979)土壌、水質及び作物体分析法:140-141。
19. 農林統計協会(1995)農業センサス農業集落カード
20. 寺尾宏(1996)畑作地帯の硝酸性窒素による地下水汚染と軽減対策。水環境誌19:956-960。
21. 栃木県(1996)農作物施肥基準
22. 栃木県(1984)土地分類基本調査 壬生。15-24。
23. 栃木県生活環境部環境管理課(1999)平成10年度栃木県大気汚染常時監視測定結果報告書:172-175。