

宮古島地下水流域レベルの硝酸態窒素溶脱量の推定

藤家里江*・中川陽子*・島 武男**・塩野隆弘*・凌 祥之*

目 次	
I 緒言	127
II 対象地概要	128
1 宮古島概要	128
2 宮古島砂川地下水流域概要	128
III 硝酸態窒素溶脱量の推定方法	128
1 土地利用状況の把握	128
(1) 圃場の区画	128
(2) 作付け状況の把握	129
2 DNDCモデルを用いた推定	129
(1) DNDCモデルの概要	129
(2) 営農方法の把握	129
(3) 入力データの決定	129
IV 結果	131
1 作付け状況	131
2 硝酸態窒素溶脱量の推定結果	131
V 考察	134
1 作付け状況	134
2 作物及び営農方法別の硝酸態窒素溶脱量	134
3 流域全体での硝酸態窒素溶脱量	134
4 推定手法を用いた試算例	135
VI 結言	136
参考文献	137
Summary	138

I 緒 言

沖縄県の宮古島は、平坦な地形で主要な河川がなく、飲料水を含むほとんどの用水を地下水に依存している。宮古島の主な水道原水となっている地下水の硝酸態窒素濃度は1960年代末には $2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であったが、1975年～1985年にかけて上昇を続け、1980年代の後半には約4倍にも達し、その後1987年～1989年をピークに徐々に減少し、1993年以降はほぼ横ばいの状態となっている（宮古島地下水水質保全対策協議会，2002）。しかし、1960年代と比較して、現在の硝酸態窒素濃度は依然として高く、水質保全への関心は高いものとなっている。

宮古島の地下水に含まれる窒素の起源としては、降雨や土壌の分解等の自然的要因と生活排水や農業等の人為的要因が挙げられる（中西ら，2000）。宮古島での地下水へ負荷された窒素の寄与率は、1998年度時点で化学肥料35.6%、家畜ふん尿31.4%、生活排水16.4%、自然循環窒素16.6%と推定されており（宮古島地下水水質保全対策協議会，2002）、農業活動は地下水への窒素負荷に大きな影響を与えている。

農地に投入された化学肥料や家畜ふん尿に含まれる窒素は、作物が生育する過程で吸収され収穫とともに農

地外へ持ち出されるものや作物残渣として農地に残るもの、土壌中で分解され窒素ガスとして大気中に放出されるもの、降雨とともに地下へ溶脱していくもの等と多様な移動経路をとる。これらの中で、農地の作土層から地下方向へ溶脱した窒素のうち、地下水面に到達したものが地下水水質に影響を与えている。農地に投入された窒素は、前述のとおり様々なプロセスを経るため、農地における栽培作物の違いや営農方法の違いは硝酸態窒素の溶脱量に大きな影響を与えと考えられる。

田淵（1998，2005）は湖沼の水質保全計画においては負荷原因を正確に把握した上で、流域管理を行うことが有効であるとしている。宮古島の地下水は、主に断層により仕切られ、約22の集水域に細分されており、それぞれの集水域を独立性の高い地下水流域とみなせる。田代ら（2001）や石田ら（2005）は宮古島における肥料販売量と地下水水質に関連性があることを明らかにしている。

現在、南西諸島を対象に実施されている地域活性化バイオマスプロジェクト研究では、地域の活性化や循環型社会の形成を目的として、農村で発生するバイオマスを土壌改良材や肥料として利用する研究が行われている。この研究プロジェクトで検討されるバイオマス資源の利用方法について、農地における硝酸態窒素溶脱量の変化を事前に推定することができれば、宮古島における有益な農業活動や水質保全を考慮したバイオマスの利活用方法の選定に役立つ。

そこで本稿では、有益な農業活動と地下水保全を考

*農地・水資源部 農地工学研究室

**農地・水資源部 土地資源研究室

平成 20 年 1 月 17 日受理

キーワード：地下水 GIS DNDCモデル 硝酸態窒素

慮したバイオマス資源の利活用方法の検討に資するために、流域レベルでの農地からの硝酸態窒素溶脱量推定手法の開発を目的とした。本研究では、宮古島の砂川地下水流域を対象に各農地の作付け状況や営農方法を把握し、DNDCモデル (Denitrification and Decomposition model) (Li et al., 1992) を用いて流域における農地からの硝酸態窒素溶脱量を推定した。流域単位で作付けや施肥量等の詳細なデータを収集し、それらをGISデータベース化して硝酸態窒素溶脱量の解析を行うことにより、地下水の保全を目的とした作付け作物や営農方法の影響を事前に評価でき、流域管理のツールとしての活用が期待される。

本研究のデータ収集にあたり、内閣府沖縄総合事務局土地改良総合事務所、宮古島市役所経済部宮國範夫畜産振興係長、宮古土地改良区、与那原和牛生産部会、日本たばこ産業株式会社沖縄原料本部、沖縄県農業研究センター宮古島支所平良正彦主任研究員から多大な協力を頂きました。また、本研究推進において宮古島市役所経済部平良研三氏、農村工学研究所今泉眞之農村環境部長にはご支援いただきました。ここに謝意を表します。

II 対象地概要

1 宮古島概要

宮古島は沖縄本島から南西約300kmに位置し、面積約160km²ほどの宮古本島と、池間島と来間島及び大神島からなる。年平均気温は23.3℃、年降水量は2019mmで、海洋性亜熱帯気候に属する。

起伏の少ない平坦な島であり、主要な河川がない。大部分の地質構造が透水係数の高い琉球石灰岩に被われており、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ている。島内全体に、主に

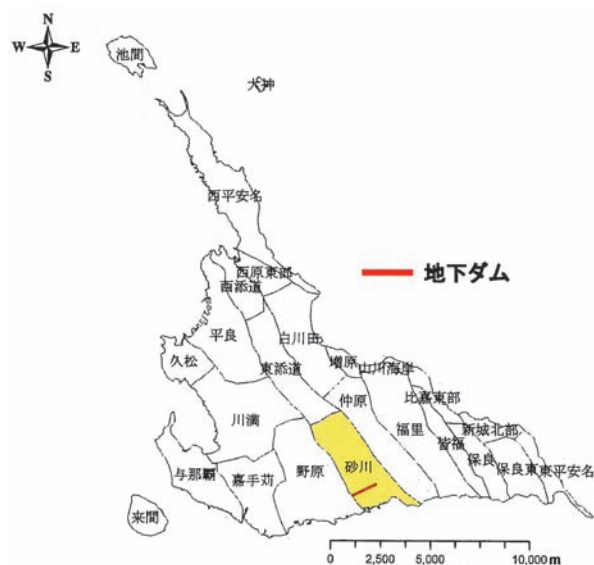


Fig.1 宮古島地下水流域図
The ground water basin in Miyako Island

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)。

宮古島の水源は地下水に頼っており、この地下水を灌漑用水源として有効に活用するために、1979年に実験地下ダムとして皆福地下ダムが完成し、その成功を受け1993年に砂川地下ダム、1996年に福里地下ダムが建設された。

農業は宮古島の基幹産業で、主にサトウキビ栽培と肉牛繁殖が盛んである。その他、葉たばこ、かぼちゃ、ニガウリ、マンゴー等の栽培が行われている。宮古島の総面積の54%が耕地で、森林率は約16%である。

2 砂川地下水流域概要

対象流域は宮古島の南部に位置する砂川地下水流域とした (Fig.1)。流域面積は11km²である。この流域内には製糖工場が1箇所あるが、基幹産業は農業であり、宮古島にみられる一般的な農業主体の流域といえる。また、流域内には砂川地下ダムがある。

本流域では、サトウキビ栽培と肉牛繁殖の複合経営を中心に葉たばこ、野菜類の栽培を行っている。流域南部を中心に農業農村整備事業が行われ、流域面積の約6割において圃場区画と灌漑施設が整備された。地下ダムから汲み上げられた地下水は、流域内外で灌漑用水として使用されており、地下ダムからの水利用が始まったのは1994年である。現在、水利用開始から10年以上経過しており、灌漑農業の進展によってマンゴーやニガウリ等の商品作物の栽培が増加している。

III 硝酸態窒素溶脱量の推定方法

宮古島の砂川地下水流域の農地を対象に、各圃場の作付け状況を把握し、GISを用いて可視化した。また、各圃場から溶脱する硝酸態窒素量はDNDCモデルによって推定し、それらを各圃場のGISデータベースに組み込み、硝酸態窒素溶脱量の可視化を行った。

硝酸態窒素溶脱量の推定を実施した対象年は、圃場整備や灌漑施設整備が行われていない1977年、圃場整備事業が行われて砂川地下ダムからの水利用が始まった1994年、及び灌漑事業開始から10年が経過して灌漑農業が進展していると考えられる2005年である。

各圃場の土地利用状況は、一筆調査や空中写真の目視判読によって把握し、GISを用いてデータベースを構築し、整理した。更に、DNDCモデルのパラメータを決定するためにアンケート調査と聞き取り調査によって現地営農状況を把握した。各圃場からの硝酸態窒素溶脱量の推定にはDNDCモデルを使用した。

1 土地利用状況の把握

(1) 圃場の区画

各対象年における流域の圃場区画データは国土基本図をベースに空中写真のオルソ画像 (写真のひずみを補正

した空中写真の画像）と地籍図，及び整備圃場の区画図を参照して作成した。作成された圃場区画のポリゴン数は1977年が2961，1994年は3133，2005年は3354である。

(2) 作付け状況の把握

1977年と1995年の作付け状況は，空中写真を目視によって判読し，把握した。ただし，1977年における葉たばこ栽培は盛んに行われていたと考えられる（宮古支庁宮古農政・農業改良普及センター，2006）が，空中写真（1977年11月撮影）の目視判読では現地での葉たばこの栽培圃場が確認出来ず，葉たばこ圃場を特定することができなかった。

2005年における各圃場の作付け状況は，一筆調査や沖縄総合事務局土地改良総合事務所が行った調査によって把握した。一筆調査はサトウキビの夏植えを行っている2006年9月4日～9月8日，野菜の作付けを行っている2006年11月5日～11月10日，葉タバコの収穫を行っている2007年5月6日～5月12日に行った。

作付け状況はGIS上に構築した各圃場ポリゴンの属性データとして入力した。また，土壌属性は土壌図（城辺町土地分類調査報告書，2003）を参照に各ポリゴンへ入力した。

2 DNDCモデルを用いた推定

(1) DNDCモデルの概要

DNDCモデルは土壌における炭素と窒素の動態を扱うプロセスモデルで，土壌からの温室効果ガスの発生や硝酸態窒素の溶脱を予測するために開発された（Li et al., 1992）。モデルは下記ウェブサイトから無償でダウンロードすることができる（URL：<http://www.dndc.sr.unh.edu/>）。

Fig.2にDNDCモデルの概要図を示す。モデルは土壌気

象，作物生育，有機物分解，硝化，脱窒，発酵の6つのサブモデルで構成され，土壌中の窒素及び炭素の生化学的及び地球科学的な反応をシミュレートする（Li et al., 1992）。モデルへの入力データは，土地利用，営農方法（播種日，収穫日，耕起を行った日及び深さ，施肥日及び量等），対象地域の気象情報，土壌の理化学性等である。モデル出力は，硝酸態窒素溶脱量，各温室効果ガスの発生量，作物による窒素及び炭素の吸収量等である。

Nakagawa et al. (2008) は硝酸態窒素の溶脱予測について，宮古島でのモデルの適用の妥当性を確認している。今回の計算はこの宮古島に適用されたモデルを使用した。

(2) 営農方法の把握

砂川流域における各作物の営農方法を把握し，DNDCモデルの入力データを決定するためにアンケート調査と聞き取り調査を行った。耕種農家へのアンケート調査は，2006年8月に流域内耕作者456名を対象に郵送で行った（有効回答100件，22%）。調査項目は，栽培作物，栽培面積，栽培を行っている圃場の地番，植え付け・収穫時期，施肥時期・量・種類，堆肥の利用状況である。畜産農家へのアンケート調査は，2006年9月に流域内畜産農家130軒を対象に手渡しで配布，回収を行った（有効回答60件，46%）。調査項目は，飼養の種類・頭数，飼料作物の種類・面積，ふん尿処理方法・処理場所・還元場所，敷料使用の有無・種類である。

(3) 入力データの決定

モデルに入力するデータのうち，気象情報は，宮古島におけるアメダス（気象庁提供資料）の日データ（降雨量，最高気温，最低気温）を使用した。1977年の計算には1968年～1978年，1994年の計算には1988年～1995年，

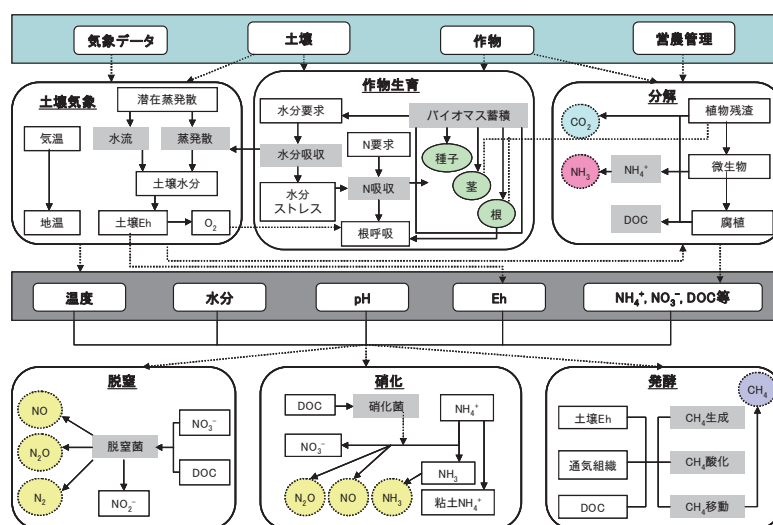


Fig.2 DNDCモデル概要

Schematic diagram of DNDC model

2005年の計算には2001年～2006年のデータを使用した。

土壌の入力データは、流域内に存在する土壌（摩文仁統、多良間統、北区統）の理化学性データを用いた。土壌の理化学性を**Table 1**に示す。また、1994年と2005年の流域における土壌図を**Fig.3**に示す。全炭素量はNCアナライザー（SUMIGRAFH社、NC220F）、粘土率は粒度分析によって求めた。その他のパラメータは沖縄県城辺町（2003）から引用した。1977年は流域内の圃場区画整備実施前のため、摩文仁2の圃場は摩文仁1、多良間2の圃場は多良間1として計算を行った。

土地利用のパラメータは、上述した作付け状況の把握結果として得られたサトウキビ（株出し、夏植え）、牧草、葉たばことした。野菜類は栽培面積が狭く、種類が多様なため、計算を行わなかった。

1975年におけるサトウキビ栽培面積は、株出し栽培と春植え栽培面積が50%、夏植え栽培面積が50%であった（宮古支庁農林水産振興課、2005）。株出し栽培とは、サトウキビ収穫後（1～3月）に圃場に残った株からそのまま芽を出して栽培する方法で、栽培期間は約1年である。春植え栽培とは、春（3～4月）に植え付けを行い、翌

年の1～3月に収穫を行う方法で、栽培期間は約1年である。夏植え栽培とは、夏（7～9月）に植え付けを行い、翌年の1～3月に収穫を行う方法で、栽培期間は約1年半である。そこで1977年は、目視判読を行った空中写真の撮影時（1977年11月）に収穫予定のサトウキビ圃場を全て株出し栽培とし、それ以外の圃場（翌年に収穫する予定の圃場）を夏植え栽培として計算を行った。1994年や2005年は、夏植え栽培が宮古島本島で90%以上を占めている（宮古支庁宮古農政・農業改良普及センター、2006）ため、全て夏植えとして計算を行った。

また、牧草栽培は、アンケート調査結果より、72%の農家がローズグラスを栽培していたため、全てローズグラスとして計算を行った。

各作物の栽培方法に関するパラメータは、各作物の栽培指針やアンケート調査、聞き取り調査等を参照して決定した（**Table 2**～**Table 4**）。ただし、堆肥の利用方法については、アンケート調査結果に基づいて決定した。

堆肥利用方法についてのアンケート調査結果によれば、牧草とサトウキビ圃場に堆肥を投入している農家が74%であった。特に、飼養頭数が10頭以上の農家では、堆肥を牧草地に投入する傾向が高かった。しかし、堆肥の具体的な投入量を把握することが出来なかったため、流域内で使用する堆肥の総量は、流域内で飼育されている牛が排泄するふんを原料にして作られるとみなした。

牛ふん尿の量から堆肥の量への換算方法は、東理・凌（2006）の方法で行った。流域内の肉用牛飼養頭数は、1975年、1995年、2000年の農林センサス（農林水産省統計情報部が作成、2000）を使用し、成牛と子牛に按分した。ふん尿発生原単位を成牛 $10.4\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$ 、子牛 $3.6\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$ （農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」、2006）、乾物分解率、堆肥の含水比を考慮して流域において発生する全てのふん尿を堆肥に換算した。

堆肥の利用方法は、まず牧草圃場に5年に1回投入するものとし、その後余ったものをサトウキビ圃場に投入するものとした。また、牧草圃場に堆肥を投入する年は各圃場によって異なるため、毎年流域内の牧草圃場面積の20%が堆肥を投入するものとした。よって堆肥投入量は、堆肥換算量から牧草の栽培指針（沖縄県畜産試験場、1999）の値（ $75\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ）と各対象年牧草面積の20%の積を定量として差し引き、残りをサトウキビ圃場に均等に投入するものとした。

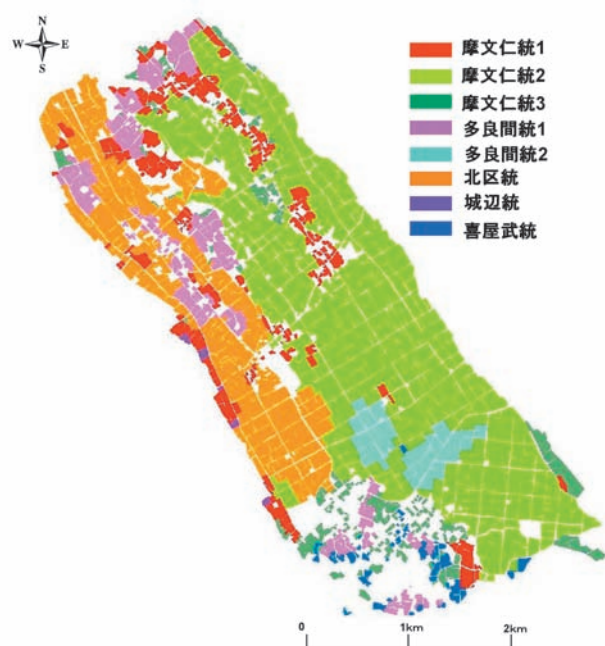


Fig.3 1994年と2005年の土壌図
Soil classification map (1994, 2005)

Table 1 土壌の理化学性 Soil physical and chemical properties

土 壌 統	全炭素量 (%)	粘土率 (%)	乾燥密度	間隙率 (%)	圃場容水量 (WFPS)	シオレ点 (WFPS)	透水係数 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
摩 文 仁 統 1	1.15	58	0.95	66	0.48	0.30	0.86
摩 文 仁 統 2	1.79	24	0.85	71	0.46	0.27	2.28
多 良 間 統 1	1.5	52	1.07	62	0.53	0.38	1.49
多 良 間 統 2	3.09	40	0.93	68	0.48	0.32	2.01
北 区 統	2.35	49	1.18	54	0.61	0.51	0.68

Table 2 サトウキビ営農方法 Farming management of sugarcane

1977年株出し			1977年夏植え			1994年夏植え			2005年夏植え		
	日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)		日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)		日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)		日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)
植え付け	3月15日		植え付け	8月1日		植え付け	8月1日		植え付け	8月1日	
収 穫	翌年2月15日		収 穫	翌年12月31日		収 穫	翌年12月31日		収 穫	翌年12月31日	
耕 起	2月15日		耕 起	7月1日		耕 起	7月1日		耕 起	7月1日	
た い 肥	2月15日	50.74	た い 肥	7月1日	50.74	た い 肥	7月1日	55.9	た い 肥	7月1日	75.68
基 肥	2月15日	75	基 肥	7月1日	90	基 肥	7月1日	72	基 肥	7月1日	72
追 肥 1	4月15日	75	追 肥 1	8月20日	60	追 肥 1	10月15日	48	追 肥 1	10月15日	48
追 肥 2	7月15日	100	追 肥 2	10月20日	80	追 肥 2	翌年2月1日	120	追 肥 2	翌年2月1日	120
追 肥 3	なし	なし	追 肥 3	翌年2月20日	80						
化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム			化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム			化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム			化学肥料の種類： リン酸アンモニウム		

※日付、化学肥料の量、種類は栽培指針に基づく

Table 3 葉たばこ営農方法
Farming management of tobacco

1994年			2005年		
	日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)		日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)
植え付け	2月15日		植え付け	2月15日	
収 穫	6月30日		収 穫	6月30日	
耕 起 1	11月15日		耕 起 1	11月15日	
耕 起 2	12月25日		耕 起 2	12月25日	
基 肥	12月25日	120	基 肥	12月25日	84
追 肥	なし	なし	追 肥	なし	なし
化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム			化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム		

※日付、化学肥料の量、種類は栽培指針に基づく

Table 4 牧草営農方法
Farming management of grass

1977年～2005年			
	日 付	施肥量 (kgN・ha ⁻¹)	備 考
植 え 付 け	3月1日		
収 穫	2月28日		
耕 起 1	3月1日		
基 肥 (化 肥)	3月1日	42	5年に1回
基 肥 (堆 肥)	3月1日	645	5年に1回
追 肥		82	刈り取り毎
化学肥料の種類： 硫酸アンモニウム			

※化学肥料の量は聞き取り調査に基づく

IV 結 果

1 作付け状況

砂川流域における各対象年の作付け状況をFig.4～Fig.6に示す。また、各対象年の作付け面積割合をFig.7に示す。ただし、ここでの野菜類にはハウス栽培と果樹類が含まれている。

1977年は流域全体で主にサトウキビ栽培が行われ、牧草と野菜類の作付け面積は非常に小さい。作付け面積割合はサトウキビが85%、牧草が2%、野菜類が4%となった。

1994年はサトウキビ栽培が流域のほとんどで行われている。牧草は流域北部の集落近辺で多く栽培されていた。作付け面積割合はサトウキビが65%、牧草8%、葉タバコ11%、野菜類3%となっている。作付け面積は、1977年を100%とした場合、サトウキビ面積が88%と減少しており、牧草は362%、野菜類は107%とそれぞれ増加している。

2005年は、1994年と同様、流域のほとんどでサトウキビ栽培が行われており、牧草の栽培は流域北部の集落近

辺で多く行われている。作付け面積割合は、サトウキビが60%、牧草11%、葉タバコ11%、野菜類7%となっている。作付け面積は1977年を100%とした場合、サトウキビ面積は81%と減少しており、牧草は528%、野菜類は238%増加している。1994年を100%とすると、サトウキビ面積は92%減少しており、葉たばこはほぼ横ばい、牧草は146%、野菜類は222%増加している。

流域全体の作付け面積は、1977年は562ha、1994年は636ha、2005年は644haとなり、1977年に比べ1994年は10%程度増加し、1994年と2005年はほぼ横ばい状態となった。

2 硝酸態窒素溶脱量の推定結果

流域における単位面積あたりの硝酸態窒素溶脱量をFig.8～Fig.10に示す。なお、牧草は5年に1回堆肥を投入する施肥方法のため、硝酸態窒素溶脱量は対象年を含む5年間の平均値とした。

単位面積あたりの溶脱量の平均値は、サトウキビ圃場の場合、1977年は123kgN・ha⁻¹、1994年は34kgN・ha⁻¹、

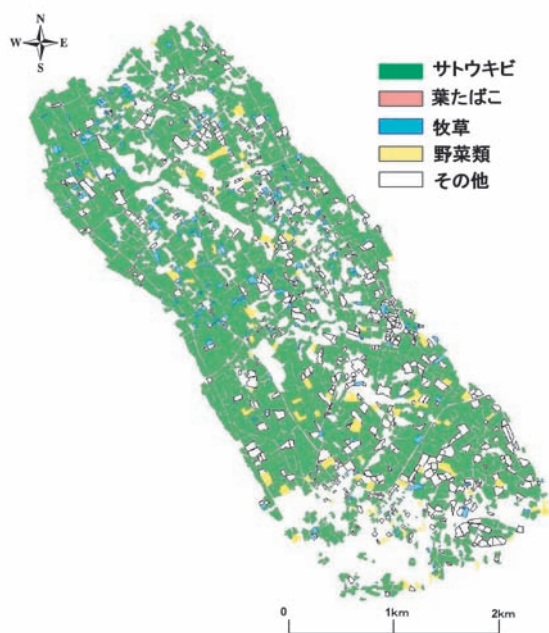


Fig.4 1977年作付け状況
Crop situation in 1977



Fig.5 1994年作付け状況
Crop situation in 1994

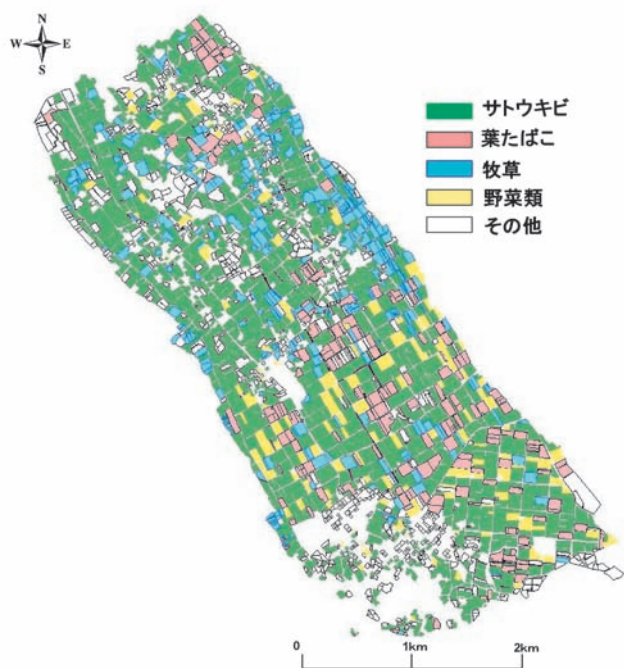


Fig.6 2005年作付け状況
Crop situation in 2005

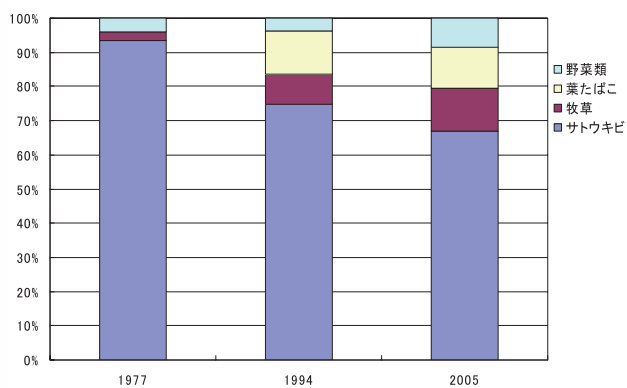


Fig.7 作付け面積割合
Crop area ratio

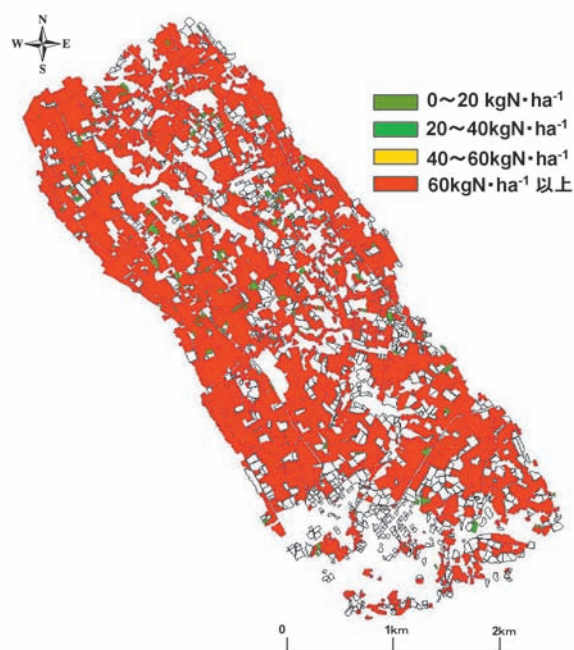


Fig.8 1977年単位面積当たりのNO₃-N溶脱量
The amounts of leached nitrate-N for unit area in 1977

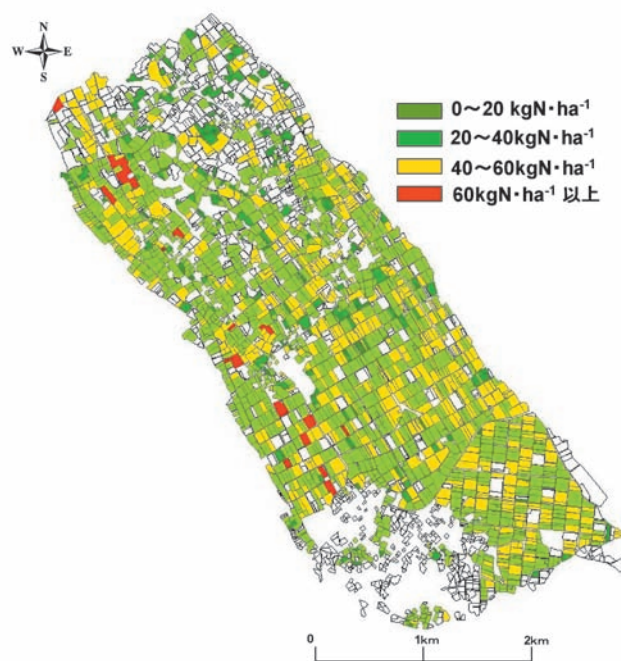


Fig.9 1994年単位面積当たりのNO₃-N溶脱量
The amounts of leached nitrate-N for unit area in 1994

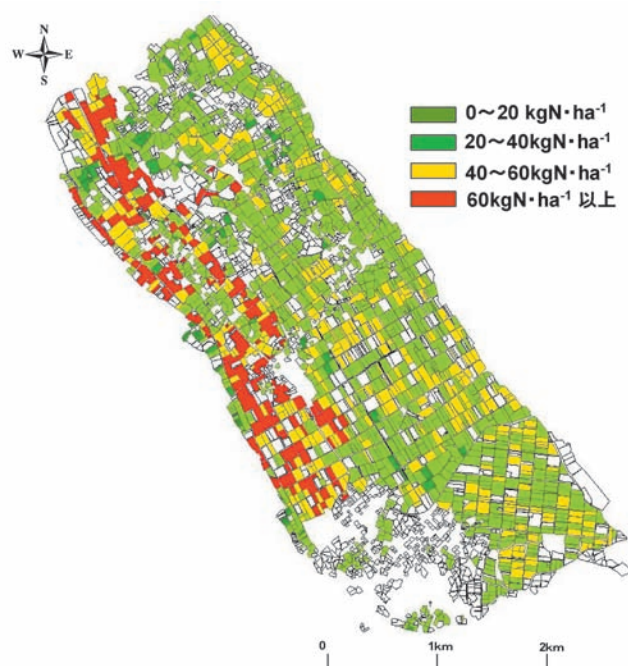


Fig.10 2005年単位面積当たりのNO₃-N溶脱量
The amounts of leached nitrate-N for unit area in 2005

2005年は38kgN・ha⁻¹となり、主に株だし栽培を行っている1977年の溶脱量は主に夏植え栽培を行っている1994年と2005年の溶脱量に比べ高い値となった。牧草では、1977年は7kgN・ha⁻¹、1994年は9kgN・ha⁻¹、2005年は18kgN・ha⁻¹となった。1977年、1994年に比べ、2005年の溶脱量は高いが、サトウキビ圃場での溶脱量に比べると少ない値であった。葉タバコの平均溶脱量は、1994年が56kgN・ha⁻¹、2005年が42kgN・ha⁻¹となり、ほぼ同量程度の溶脱であった。

2005年における単位面積あたりの硝酸態窒素溶脱量は、北区統で79kgN・ha⁻¹と高い値となった。これはTable 1の土壌の属性に関与していると考えられるが、明確なメカニズムは解明できなかった。

流域全体での農地への窒素投入量と硝酸態窒素溶脱量をTable 5に示す。各圃場からの溶脱量に関しては、

Table 5 流域全体の窒素投入量と硝酸態窒素溶脱量

Total amounts of input and leached nitrogen in groundwater basin

	入力		出力
	堆肥 (tN)	化学肥料 (tN)	溶脱量(tN)
1977年	27	129	67
1994年	14	77	20
2005年	16	82	23

1977年では40kgN以上溶脱している圃場の面積が流域面積の約26%を占め、流域全体での溶脱量は約67tNとなった。1994年と2005年では、40kgN以上溶脱している圃場の面積はそれぞれ流域面積の3%となり、流域全体の溶脱量は各々20tN、23tNとなった。

V 考 察

1 作付け状況

1977年と1994年の作付け状況を目視判読した結果の妥当性を検討するため、判読結果と農業センサス集落カードのデータとを比較した。ただし、サトウキビについては作付け面積ではなく、対象年の収穫面積を求めてセンサスの統計値と比較した。他の作物については、空中写真の目視判読で得られた作付け面積を収穫面積とみなした。比較結果をTable 6に示す。センサスと今回の目視結果を比較すると、1977年は、1975年のセンサス面積を1とした場合、工芸作物（サトウキビと葉たばこ）が0.79、野菜類が0.63、飼料作物が0.94、全体では0.79となった。1994年は、1995年のセンサス面積を1とした場合工芸作物が1.11、野菜類が3.12、飼料作物が0.94、全体で1.13となった。農業センサスは農家への聞き取りによって各作物の収穫面積を把握しているが、今回の作付け状況の把握は空中写真の目視によって行っているため、写真撮影の時期等によって多少のズレが生じると考えられる。1977年は目視判読の際、葉たばこ圃場を特定できなかった為、あまり良い整合性が得られなかったと考えられる。野菜類は、1977年、1994年共に良い整合性を得られなかったが、野菜類の面積は作付け面積全体に対して5%程度となっている為、今回の推定には影響を与えないものと考えられる。以上のことから、各対象年における作付け状況を概ね捉えることができたと考えられる。

2 作物及び営農方法別の硝酸態窒素溶脱量

DNDCモデルによる推定結果では、1977年に比べ1994年、2005年の流域全体の硝酸態窒素の溶脱量が大幅に減少した。これらの要因としては、農地に投入する施肥量の変化と作付け状況の変化が挙げられる。

施肥量の変化では、1977年に主に株出し栽培だったサトウキビ栽培が、1994年と2005年では夏植え栽培と

なっている。そのため、農地に投入される肥料が、栽培指針によると化学肥料で年間250kgNから2年で240kgN（年平均120kgN）へ減少している。また、宮古島における単位面積当たりの肥料投与額は、1980年が約13万円・ha⁻¹だったのに対し、1995年と2006年は7万円・ha⁻¹と約半分となっている（宮古島地下水水質保全対策協議会、2007）。このことから圃場への施肥量がほぼ半減したことが裏付けられる。

作付け状況の変化では、1977年と1994年及び2005年ではサトウキビ面積が減少し、牧草面積が増加した。今回の試算ではサトウキビの溶脱量が34～123kgN・ha⁻¹だったのに対し、牧草は7～18kgN・ha⁻¹であった。牧草地での溶脱は、堆肥や化学肥料の誤った投入を行うと大きな水質負荷源となると言われているが、堆肥を投入した分、化学肥料の量を調整して栽培を行うと溶脱量も少なく、また収量も増えるとされている。聞き取り調査の結果によると、流域での牧草地への投入量は、刈り取りごとに82kgN・ha⁻¹と牧草の栽培指針よりも少ない値となっており、溶脱量が少ない結果となった。このため、牧草面積の増加が流域全体の硝酸態窒素溶脱量の減少に寄与したと考えられる。

3 流域全体での硝酸態窒素溶脱量

農地からの硝酸態窒素溶脱量の推定結果によれば、流域内の農地全体の硝酸態窒素溶脱量は、1977年が67tN、1994年が20tN、2005年が23tNであった。流域内の農地全体の硝酸態窒素溶脱量は、1977年に比べ1994年は硝酸態窒素溶脱量が大幅に減少し、1994年と2005年ではほぼ横ばいの結果となった。1977年に対して、1994年と2005年は、作付け状況や農地に投入する施肥量といった各要因が硝酸態窒素溶脱量の減少傾向にあるため、流域内の農地全体での溶脱量が大幅に減少したと考えられる。

更に、各対象年の流域全体における地下浸透水の窒素濃度の試算を行った。この濃度の試算にあたって、窒素負荷源は農業活動と生活排水、自然循環とした。農業活動由来の窒素負荷量は上述の流域内の農地全体の硝酸態窒素溶脱量の推定結果を用いた。生活排水由来と自然循環由来の窒素負荷量は、沖縄県城辺町（2003）と同様に行った。

生活排水由来の窒素負荷量は、流域内の人口と生活

Table 6 収穫面積の比較 Comparison of harvested area

	1977年－①	面積割合	1975年 センサス－②	①／②	1994年－③	面積割合	1995年 センサス－④	③／④
工芸作物 (ha)	443	0.92	559	0.79	386	0.82	347	1.11
野菜・ハウス (ha)	23	0.05	37	0.63	25	0.05	8	3.12
飼料作物 (ha)	16	0.03	17	0.94	57	0.12	61	0.94
合計 (ha)	482	1.00	612	0.79	468	1.00	415	1.13

Table 7 浸透水の窒素濃度試算結果
Calculation result of nitrogen concentration in reached water

	流域面積 (ha)	浸透域面積 (ha)	年間降水量 (mm)	流域全体からの浸透水量 (年間降水量の40%) (t)	化学肥料・家畜ふん尿	生活排水		自然循環 (自然土壌由来の硝酸態窒素濃度 $1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		地下へ浸透する窒素負荷量 (tN)	浸透水の窒素濃度 (年平均値) ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
					農地からの硝酸態窒素溶脱量 (tN)	流域人口 (人)	生活排水からの窒素負荷量 (tN)	浸透域からの浸透水量 (年間降水量の40%) (t)	自然循環からの窒素負荷量 (tN)		
1977年	1,069	833.9	1,836	7,848,598	67	2,372	11.26	6,122,494	8.57	86.83	11.06
1994年	1,069	833.9	1,660	7,096,022	20	1,983	9.41	5,535,428	7.75	37.16	5.24
2005年	1,069	833.9	2,094	8,953,944	23	1,694	8.04	6,984,746	9.78	40.82	4.56

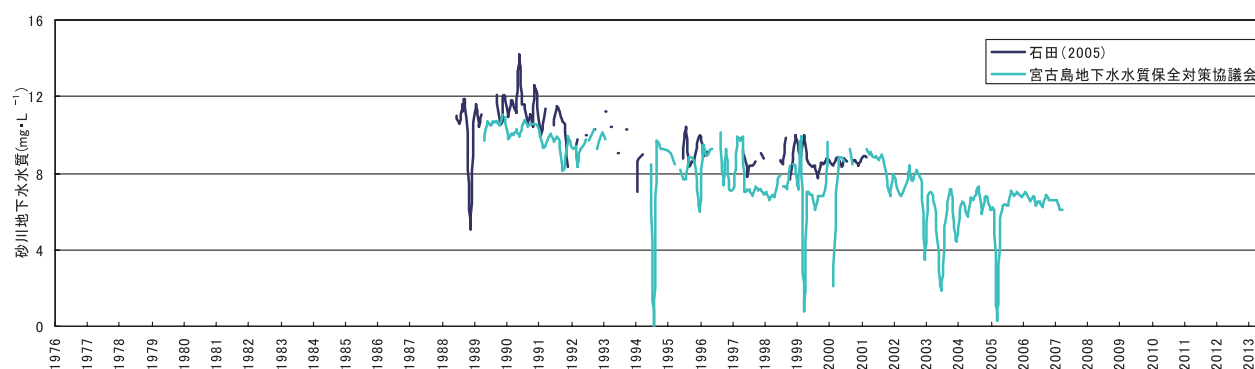


Fig.11 砂川地下水流域における硝酸態窒素濃度
The concentration of nitrate-N in groundwater basin

排水の未処理人口原単位 ($4.75\text{kgN} \cdot \text{y}^{-1}$) の積で求めた。流域内の人口は、字別人口 (下里添, 砂川, 友利) を加算して求めた。ただし、友利は、流域外に集落が存在するため、字別人口を面積割合で按分したものを加算した。自然循環由来の窒素負荷量は、浸透域 (農用地, 森林, 空き地, 公園, 採石場等) における降雨浸透水量 (降雨量の40%) と自然土壌由来の硝酸態窒素濃度 ($1.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) の積で求めた。試算結果を**Table 7**に示す。試算した結果、1977年は $11.06\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、1994年は $5.24\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、2005年は $4.56\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ となった。

一方、石田ら (2005) と宮古島地下水水質保全対策協議会 (2007) は、砂川地下水流域における地下水の硝酸態窒素濃度の測定値を報告している。**Fig.11**に示す通り、硝酸態窒素濃度は1989年から2001年にかけて約 $12\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ から約 $7\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ へ低下し、その後 $6\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 程度で推移している。宮古島の地下水流域は、各々独立性が高いものとみなされており、地上部に負荷された窒素のうち余剰となった窒素は、硝酸性窒素となって降雨によりほぼ鉛直浸透して地下水に混入すると推察されている (石田ら, 2005)。また、地上部に投入された窒素が地下水に到達して水質に影響を与えるには約6~7年のタイムラグがあると報告されている (石田ら, 2005, 田代ら, 2001)。

これらのことを考慮すると、浸透水の窒素濃度の変化は、一定期間を経た後に地下水水質に影響を与えると考えられる。よって、**Table 7**に示した浸透水の窒素濃度試算値の変化は、**Fig.11**に示した砂川地下水流域における硝酸態窒素濃度の変動を定性的に説明できると考えられる。

宮古島地下水水質保全対策協議会 (2002) によれば、宮古島での地下水へ負荷された窒素の寄与率は、化学肥料と家畜ふん尿からの寄与率が67%と報告されている。また今回の試算における対象流域地下水への窒素負荷量に対する農地からの硝酸態窒素溶脱量の占める割合は、1977年が77%、1994年は54%、2005年は56%となった。これらの結果から、農業活動由来の窒素負荷量が、対象流域の地下水の水質に大きな影響を与えていることが示唆される。

4 推定手法を用いた試算例

バイオマス資源の有効活用を目的とした営農技術の導入に伴う硝酸態窒素溶脱量の変化の試算事例として、サトウキビ夏植え栽培での施肥方法を変えた場合の硝酸態窒素溶脱量の試算を行った。

施肥方法は、まず基肥に肉牛堆肥 $45\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($379\text{kgN} \cdot$

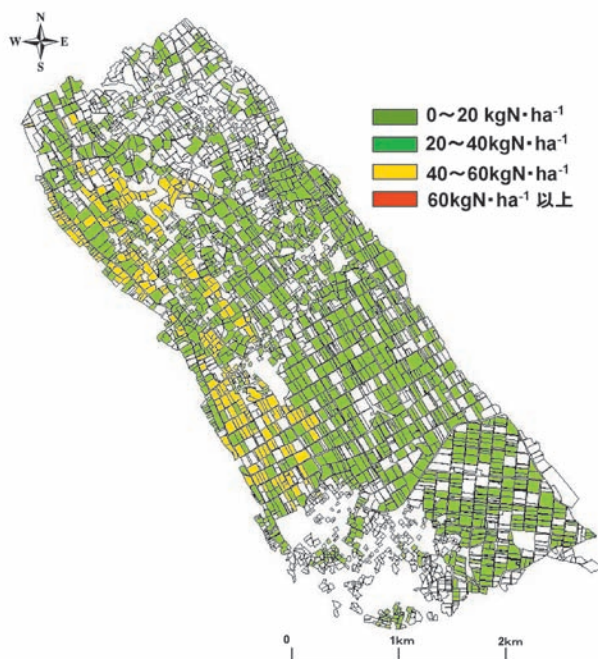


Fig.12 単位面積当たりの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量 (1994年)
The amounts of leached nitrate-N for unit area (1994)

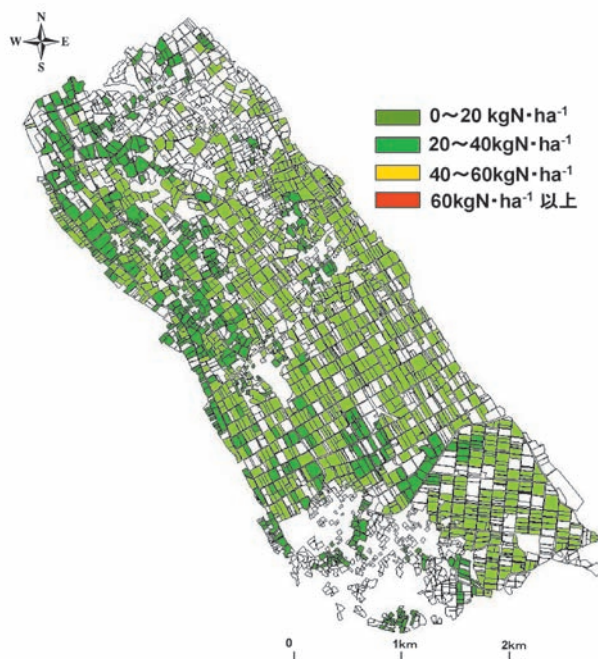


Fig.13 単位面積当たりの $\text{NO}_3\text{-N}$ 溶脱量 (堆肥)
The amounts of leached nitrate-N for unit area (Cattle manure)

ha^{-1}) 投入し、堆肥の肥効率を30%として圃場に投入する全窒素量 $240\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ から $114\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ を差し引いた量を化学肥料で投入するものとした。この方法による化学肥料投入量は、圃場に投入する窒素量の52%となっており、基肥や追肥の各時期に化学肥料を投入する量は、48%削減した量を投入するものとした。

この施肥方法と1994年の施肥方法を1989年から2000年まで行うという条件で、硝酸態窒素溶脱量の試算を行った。作付け状況は1994年のものを使用した。その結果を**Fig.12**と**Fig.13**に示す。堆肥を $45\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 施用した場合、流域全体(サトウキビ栽培のみ)での硝酸態窒素溶脱量は 11tN 、1994年の施肥方法での流域全体(サトウキビ栽培のみ)での硝酸態窒素溶脱量は 17tN となった。この結果、サトウキビ栽培における流域全体での硝酸態窒素溶脱量を33%削減できる可能性があると試算された。このように、様々な肥料やパターンでの試算を行うことで、流域における水質保全を考慮し、かつ効率的な営農方法を提案することができると考える。

今回の推定のように、流域における作付け状況と営農方法を把握し、GISを用いて流域の作付け状況や土壌属性をデータベース化し、DNDCモデルの計算結果を組み込んで、流域における農地の硝酸態窒素溶脱量を推定する方法は、今後の作付け状況の変化や営農方法の変化による硝酸態窒素溶脱量推定を行うツールとして活用出来

ると考えられる。現在実施されている地域活性バイオマスプロジェクト研究(凌・亀山, 2007)では、サトウキビの絞りかすを炭にしたバガス炭やメタン発酵消化液、堆肥等のバイオマス資材を農地に施用するための実用化研究を行っている。本報に示した手法を活用することにより、このプロジェクトで提案される方法が硝酸態窒素溶脱量へ与える影響を評価出来ると考えられ、地下水水質への影響についての検討に有益な情報を与えるであろうと考えられる。

VI 結 言

宮古島の砂川地下水流域を対象に、作付け状況や営農方法を把握し、GISを用いてデータベース化した。また、DNDCモデルによって、各作物や土壌条件における農地での硝酸態窒素溶脱量を推定し、それをデータベースに反映させて流域全体における硝酸態窒素溶脱量推定を行った。その結果、対象年における作付け状況をGISを用いてデータベース化し、作付け状況の変化を捉えることができた。硝酸態窒素溶脱量推定結果は、土地利用状況の変化や営農方法の変化に伴う硝酸態窒素溶脱量の変化を示した。また、この結果を用いて浸透水の窒素濃度の試算を行ったところ、試算結果は地下水水質の変動を定性的に説明できると考えられた。

今後、様々な作付けや営農方法による硝酸態窒素溶脱量の試算を行い、水質保全を考慮した農業活動を行う上での流域管理手法としての活用が望まれる。

参考文献

- 1) 石田聡・阿部栄一・土原健雄・今泉眞之 (2005) : 沖縄県宮古島の地下ダムにおける地下水中の硝酸態窒素濃度の変化について, 農工研技報, 203, p.111-119
- 2) 東理裕・凌祥之 (2006) : 宮古島における肉牛ふん尿の農地施用の実態把握, 農工研技報, 204, p.203-210
- 3) Li, C., Frolking, S., and Frolking, T.A. (1992) : A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97 : 9777-9783.
- 4) 宮古広域圏事務組合・宮古島地下水水質保全対策協議会 (2006) : 宮古島地下水水質保全調査報告書
- 5) 宮古支庁宮古農政・農業改良普及センター (2006) : 宮古の農業 平成18年12月
- 6) 宮古支庁農林水産振興課 (2005) : 宮古の農林水産業 平成17年12月
- 7) NAKAGAWA Y, SHIONO T, MIYAMOTO T, KAMEYAMA K, CHIN Y, and SHINOGI Y (2008) : Evaluating the validity and sensitivity of the DNDC model for Shimajiri dark red soil, *JARQ*, (accepted)
- 8) 中西康博編著 (2002) : サンゴの島の地下水保全－「水危機の世紀」を迎えて
- 9) 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, 土肥誌, 72 (3), p.365-371
- 10) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」 (2006) : 「バイオマス資源循環利用診断モデル」利用マニュアルVer.2.0, 170
- 11) 沖縄県城辺町 (2003) : 土地分類調査 (細部調査) 報告書 平成15年3月
- 12) 沖縄県農林水産部 (1977) : 主要作物の栽培指針
- 13) 沖縄県農林水産部 (1997) : さとうきび栽培指針
- 14) 沖縄県農林水産部 (2006) : さとうきび栽培指針
- 15) 沖縄県畜産試験場 (1999) : 牧草・飼料作物栽培の手引き
- 16) 凌祥之・亀山幸司 (2007) 宮古島における持続循環型農業農村開発事例研究, 農土誌, 75 (7), p.603-607
- 17) 田渕俊雄 (1998) : 湖沼水質保全計画と流域管理, 農土誌, 66 (6), p.61-66
- 18) 田渕俊雄 (2005) : 湖の水質保全を考える－霞ヶ浦からの発信－, 技報堂出版
- 19) 田代豊・高平兼司 (2001) : 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, 水環境学会誌, 24 (11), p.773-738

Estimation of leached nitrate-nitrogen in groundwater basin, Miyako Island.

FUJIE Rie, NAKAGAWA Yoko, SHIMA Takeo, SHIONO Takahiro and SHINOBI Yoshiyuki

Summary

Groundwater is the only water source, including drinking water, in Miyako Island, and contamination of groundwater by nitrate-N has become a serious problem in recent years. Agriculture is the island's key industry and agricultural activities are believed to have contributed to an increase in the concentration of nitrate-N of groundwater. For this reason, the development of the method for estimating the amounts of leached nitrate-N caused from agricultural activities is useful for proposing appropriate farming managements and the conservation of groundwater quality. In this study, the amounts of leached nitrate-N were estimated by the DNDC model using the cultivation data of each field within the same groundwater basin. The estimated the amounts of leached nitrate-N related to agricultural activities were visualized by GIS over the entire groundwater basin. Compared to year 1977, the amounts of leached nitrate-N in the groundwater basin significantly decreased in year 1994 and 2005, due to changes in the amounts of applied fertilizer and the types of crops. The concentration of nitrate-N of groundwater in the same groundwater basin also decreased as the amounts of leached nitrate-N decreased. Our results indicated that the estimation method shown here was able to capture the changes in the amounts of leached nitrate-N, at least for these 3 years, attributed to the changes in farming managements. The estimation method might, therefore, help to establish appropriate farming managements that contribute to the conservation of groundwater quality in the island.

Keywords : groundwater, GIS, DNDC model, nitrate-N