

GISを用いた地下水汚染ポテンシャルの広域的評価

高田 雅之 三島 啓雄* 北川 理恵 三上 英敏

要 約

硝酸性窒素による地下水汚染の現状と汚染ポテンシャルを評価し、地域の実情に応じた効果的な軽減対策に寄与することを目的として、北海道全域の平地を対象に、GIS技術を用いた解析を試みた。その結果、地下水水質データとその立地特性に関して、土地利用及び地質との関係性が示された。また、米国EPAが構築した地下水汚染ポテンシャル評価手法（DRASTIC）を応用して、地下水位、水涵養量、表層土壌、地形、不飽和層の性質に関する空間情報を作成、得点化し、広域的な地下水汚染ポテンシャルの評価を行った。その結果、地下水汚染ポテンシャルの大きさを有意に3区分でき、特に畑地でポテンシャルに比例して地下水汚染が発現しやすいことが明らかとなった。また、地下水汚染ポテンシャルに応じた最大濃度レベルを定量的に予測する可能性を示すことができた。

Key Words: 硝酸性窒素（Nitrate）、地下水汚染（Groundwater pollution）、GIS、DRASTIC

1. はじめに

硝酸性窒素は人体に入ると亜硝酸性窒素に還元され、乳幼児などにチアノーゼ症状を示す酸素欠乏症（メトヘモグロビン血症）を引き起こすほか¹⁾、近年は野生生物への影響も指摘されており²⁾、硝酸性窒素による地下水汚染は依然として重要な環境問題のひとつといえる。法的には環境基本法に基づく『地下水の水質汚濁に係る環境基準』の改定により、1999年に硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素濃度の環境基準値（10mg/L）が設定されたが、2006年度の地下水水質概況調査における環境基準超過率は、全国で4.3%³⁾、北海道で2.2%⁴⁾と他の基準項目と比べて高く、より有効な対策が急がれている。

硝酸性窒素の主な人為発生源としては、耕作地への施肥、家畜が排出する糞尿、産業排水及び家庭排水があげられる。このうち家畜舎の糞尿に関しては『家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律』（1999年公布）により規制がなされ、また産業及び家庭排水についても『水質汚濁防止法』による排水規制（2001年改正）や、下水道の整備率の上昇並びに単独処理浄化槽の新設禁止（2001年法改正）などによる対策が強められており、これらの地下水中の硝酸性窒素濃度への寄与は今後低下していくと予測される。これに対して耕作地への施肥及び家畜放牧地からの糞尿に伴う硝酸性窒素については、集水処理が困難であり、その対策が適正な管理に委ねられることから、北海道では

「硝酸性窒素汚染防止のための施肥管理の手引き」（2003年）や「家畜ふん尿処理・利用の手引き2004」（2004年）などに基づいた技術の普及指導を図ってきている。農業による安定的な経営基盤及び安全な食糧生産と両立しつつ、これらの管理対策をより効果的に展開し、耕作地及び放牧地から地下水への硝酸性窒素負荷を効率的に減少させていくためには、一律の対策ではなく地域の環境特性に応じた作付け指導や管理技術の適用が必要である。

硝酸性窒素の地下水中の流入量及び濃度は、地表および地中への窒素投入量に加え、その場所の水文環境や、表層土壌・不飽和層及び帯水層（飽和層）の性質といった水理地質条件によって規定されると考えられる。したがって対象地域の地下水は汚染されやすい性質を持つのか否かという地下水汚染ポテンシャルを踏まえた上で、地域に応じた作付け計画及び管理対策を講じていくことが有効であるといえる。広域的な視点から地下水汚染ポテンシャルを評価し把握することは、発生源の寄与を適正に評価し、対策の費用対効果を高め、さらには圏域の視点で計画的観点から現状を認識し政策に反映していく上で極めて意義深いといえる。

そこで本研究では、このような視点に立って、主として全道の農業地域を対象に、水理地質に関する空間情報及びGIS技術を用いた、硝酸性窒素による地下水汚染ポテンシャルの広域的評価を試みた。併せて農地の地目によって地下水汚染の発現に差異があるかどうかについても検討を加えた。

*北海道工業大学

2. 方 法

研究全体の流れを図1に示した。まず、地下水水質測定地点のデータをGIS化したのち、全道の土地利用及び表層地質データを用いて水質との関係を分析し、大まかな傾向を把握した。次に水理地質に関する広域的なパラメータデータを作成し、DRASTIC手法を用いて地下水汚染ポテンシャルマップを作成した。さらに、農地の地目別に硝酸性窒素濃度のレベルを評価し比較した。GISデータの処理はArcGIS9.2 (ESRI Inc. 米国) を用いた。以下、各方法を詳細に記す。



図1 研究の全体フロー

2.1 地下水水質データ整備と空間属性

地下水水質測定地点データとして、公共用水域常時監視データ及び保健所分析データをGISデータに整備した。整備したのは、1999～2007年度データのうち不圧地下水を取水していると考えられる50m以下の浅井戸データ(2,298件)である。

地下水の硝酸性窒素濃度と地表因子との関係について分析するための土地利用及び表層地質データは国土交通省の国土数値情報を用いた。各測定地点を中心に周辺500m内で最も大きな面積を占める凡例区分を抽出し、その地点の硝酸性窒素濃度との関係を分析した。

2.2 DRASTICを用いた汚染ポテンシャル評価

地下水汚染のポテンシャルを評価する手法として、米国EPA (Environmental Protection Agency) が開発し実用化されているDRASTICを用いた⁵⁾。DRASTICは水理地質に関する7つの項目について、項目間の重み(w)と、各項目内の区分に応じた得点(r)とを掛け合わせ、それらの合計値により汚染ポテンシャルの大きさを評価する手法である⁶⁾。7つの項目は下記のとおりである。

- D (Depth to Water) : 地表から地下水面までの深さ
- R (Net Recharge) : 地下水への水供給量 (涵養量)
- A (Aquifer Media) : 帯水層の性質
- S (Soil Media) : 土壌の性質

- T (Topography) : 地形 (勾配)
- I (Impact of the Vadose Zone Media) : 不飽和層の性質
- C (Hydraulic Conductivity of the Aquifer) : 帯水層の透水係数

地下水汚染ポテンシャルの大きさ ($Gwpp$) は以下のよう
に算出される。

$$Gwpp = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

ここで、 Xw は項目Xの重み、 Xr は項目Xごとの区分得点を示す。各変数の重み (1～5) はEPA⁵⁾ に従い、得点はEPAに適宜対応させて設定した。なお、このうち「A」及び「C」については、既存の深井戸データから北海道の帯水層は概ね砂礫質が優占しており、得点化に馴染まない
と判断されることから、本研究では「D」「R」「S」「T」「I」の5項目で評価を行った。

2.3 評価対象地域

地下水汚染ポテンシャル評価を行う対象地域は、北海道中央農業試験場が整備した農地土壌メッシュデータ (1 km × 1 km) のうち、土性情報の属性を有しているメッシュ地域を対象範囲とした。これは、土性情報が評価項目のひとつ「S」であるとともに、今回の評価対象が主に農地を含む平地域を想定していることによる。なお項目によって、情報が欠落しているメッシュは評価対象外とした。解析の空間精度も本メッシュデータに準じた。

2.4 各項目のパラメータ作成

(1) D : 地下水面までの深さ

地下水水質データ (50m以下の浅井戸データ : 1999～2007年度、2,298件) を用いて、井戸の位置情報と井戸深データからクリギング法により地下水面の空間内挿を行い、農地土壌メッシュの範囲を切り取った。最後にEPA⁵⁾ に準じて区分得点を設定し、0～3mで10点、30m以深で1点とした。

(2) R : 地下水涵養量

アメダスデータより作成した1 kmメッシュ気象データの気温及び日射量のデータから、Makkink式⁷⁾を用いて蒸発散量を算出し、同1 kmメッシュ降水量データ (平年値 : 1971～2000年) より蒸発散量を差し引いた値を地下水涵養量とした。区分得点について、降水量が多い地域では硝酸性窒素が地下水から流亡しやすいという、米国とは異なる日本の実情を考慮し、EPA⁵⁾ の得点順位を逆転させた。得点の設定は、涵養量の中央値および平均値 (400-420mm程度) を考慮し、0 mmで10点、900mm以上で1点とした。

(3) S：土壌の性質

北海道中央農業試験場が整備した農地土壌メッシュデータより土性情報を抽出し、EPA⁵⁾の評価テーブルに当てはめて得点化を行った。その際、データ中の鉛直層別情報（1層：1～15cm 2層：15～30cm 3層：30～60cm 4層：60～100cm）から得点を層厚で重み付けして平均し、各メッシュの代表値とした。得点は透水性が良い砂質系で高く、透水性が悪い粘土／シルト質系で低く設定した。

(4) T：地形

国土地理院の50mメッシュ標高データ（50mDEM）から、各セルにおける勾配（%）を算出し、EPA⁵⁾の区分に従って得点化を行い、2%以下の緩斜面で10点、18%以上で1点とし、1kmメッシュ内で平均値を算出した。

(5) I：不飽和層の性質

国土交通省土地・水資源局の水基本調査（地下水調査）に付随する柱状図を用いて層別データを作成したのち、各層の土質情報をEPA⁵⁾のテーブルに従って得点化した。その際、前述の農地土壌のデータと重複する深度1mまでの情報は除いた。さらに先に作成した地下水面までの深さデータと重ねて、地下水面より浅い柱状図データのみを抽出し、不飽和層の土質データとしてEPA⁵⁾の区分に基づき得点化したのち、各層の厚さによる加重平均値を対象井戸の得点値とした。そしてこれをもとに空間内挿を実施した。得点は透水性が良い火山噴出物で高く、透水性が悪い粘土／シルト質系で低く設定した。

2.5 汚染ポテンシャルの評価

前記5項目について、1kmメッシュ単位に得点と重みを乗じて合計し、地下水汚染ポテンシャルを算出するとともに、地図化して調査井戸における硝酸性窒素の濃度分布図と視覚的に比較した。次に、汚染ポテンシャル値のヒストグラムをもとに、サンプルの分散を考慮し、平均値から上下 $\sigma/2$ に閾値を設定し、汚染ポテンシャルを「高い」「中間」「低い」の3クラスに区分した。そして3クラスの汚染ポテンシャルと各クラスに属する井戸の硝酸性窒素濃度との関係を、全道及び農地の地目別（農地土壌メッシュデータの属性）に集計し、一元配置分散分析により分離性を検証した。最後に、各項目の得点と調査井戸における硝酸性窒素の濃度との関係を分析し、ポテンシャル評価の妥当性について検討を加えた。

3. 結果と考察

3.1 地下水水質データ整備と評価対象地域

図2に公共用水域常時監視データ及び保健所分析データ

を基に整備した地下水中の硝酸性窒素濃度の分布を、また図3に農地土壌メッシュデータから設定した評価対象地域を示した。対象地域の総メッシュ数は24,461メッシュとなった。

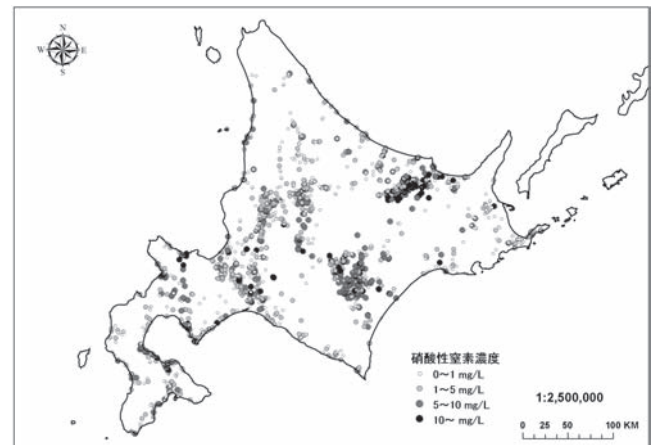


図2 地下水中の硝酸性窒素濃度の分布

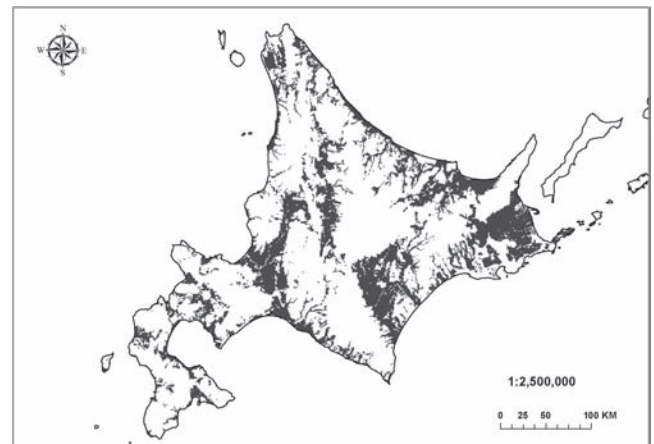


図3 評価対象地域

3.2 地下水水質と空間属性

図4～5に地下水の硝酸性窒素濃度と土地利用及び表層地質との関係を示した。その結果、水田以外の農用地で濃度が高い傾向を示した。また地質区分との関係では、第四紀火山噴出物が最も高く、次いで段丘堆積物、氾濫源堆積物等で高い傾向を示した。このことから、農地における窒素負荷との関係、及び透水性の高い地質で硝酸性窒素が地下水に到達しやすい傾向が示唆された。

3.3 DRASTICのパラメータ作成

DRASTICの7項目のうち、地下水面までの深さ「D」、地下水涵養量「R」、土壌の性質「S」、地形「T」、不飽和層の性質「I」の5項目について得点分布地図を作成した。一例として、図6に地下水涵養量を示す得点地図を示した。なお、地下水面までの深さに関して、評価に用いた井戸深の平均値は8m程度であった。

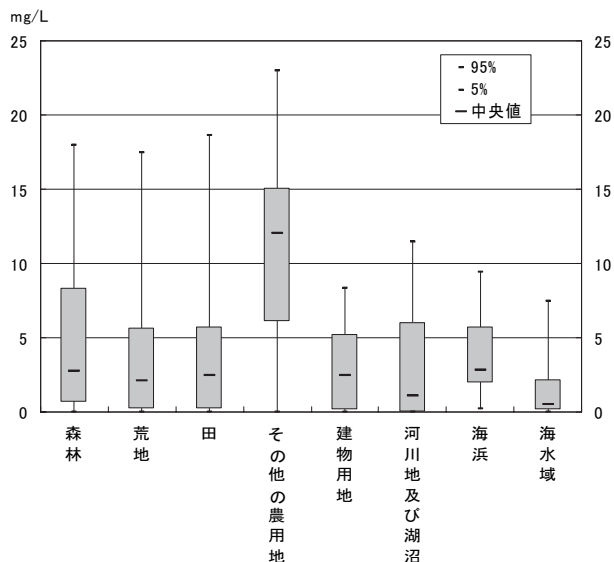


図4 硝酸性窒素濃度と土地利用との関係

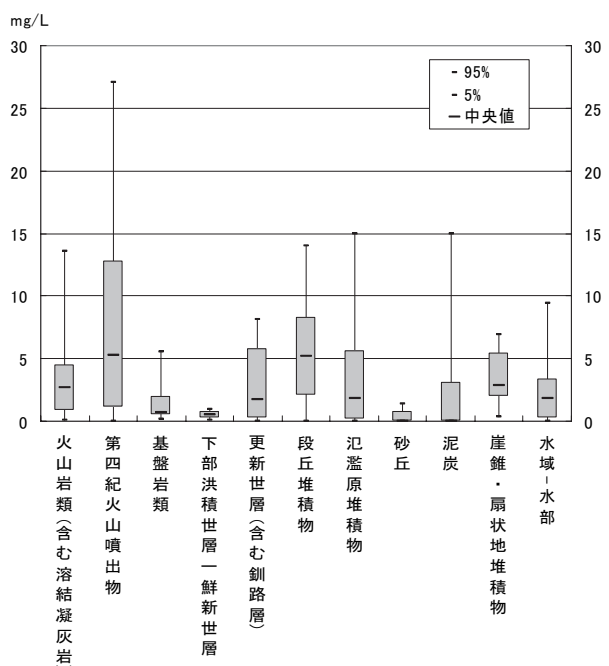


図5 硝酸性窒素濃度と表層地質との関係

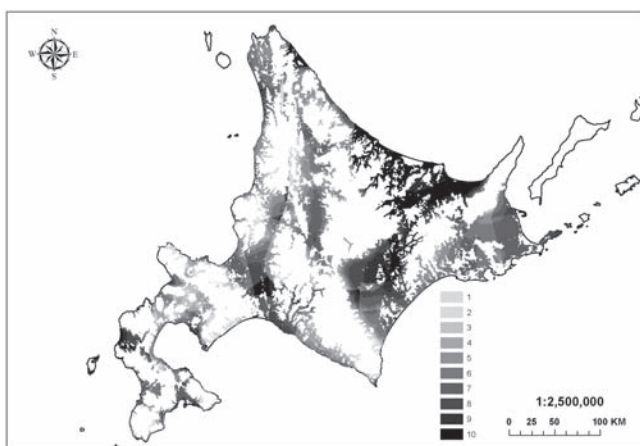


図6 地下水涵養量を示す得点地図

3.4 汚染ポテンシャルの評価

5つの項目を合計し地下水汚染ポテンシャル3クラスに区分した結果、「高い」と区分された得点は80～118、「中間」は59～80、「低い」は17～59となった。地下水汚染ポテンシャル地図(図7)と、地下水中の硝酸性窒素濃度の分布図(図2)とを視覚的に見比べると、全体的には、ポテンシャルと実測濃度とはよく対応している傾向が見られた。

次に、3つのポテンシャルクラスと硝酸性窒素の実測濃度との関係をプロットし、一元配置分散分析により分離性を評価した結果(図8)、いずれの組み合わせもp値(有意水準)が5%以下となり、有意な結果が得られた。このことは、DRASTIC手法による地下水汚染ポテンシャル評価が、北海道に適用可能であることを示唆している。それぞれのクラスにおける硝酸性窒素の実測濃度の水質基準(10mg/L)超過率は、汚染ポテンシャルが「低い」クラスで2.7%、「中間」クラスで6.4%、「高い」クラスで15.0%となり、ポテンシャルが高くなるに従って超過率も大きくなった。

これを農地の地目別(普通畑、水田、牧草地)で比較した結果を表1に示した。これを見ると、水田及び牧草地では、汚染ポテンシャルのクラスによる硝酸性窒素の実測濃度に差異が見られなかったのに対して、普通畑では有意な差が見られた。このことは、畑地においては汚染ポテンシャルの高さに応じて地下水汚染が発現しやすいことを示すものといえる。

また図9に、各項目及び合計の得点と調査井戸における硝酸性窒素の濃度との関係を示した。これより、土壌の性質「S」を除いて、得点に応じた最大濃度レベルが概ね示され、硝酸性窒素による地下水汚染ポテンシャルレベルを定量的に評価することの可能性が示唆された。土壌の性質「S」がばらついた要因は不明であるが、農地造成や改良に伴う表土攪乱が関係していることも想定される。

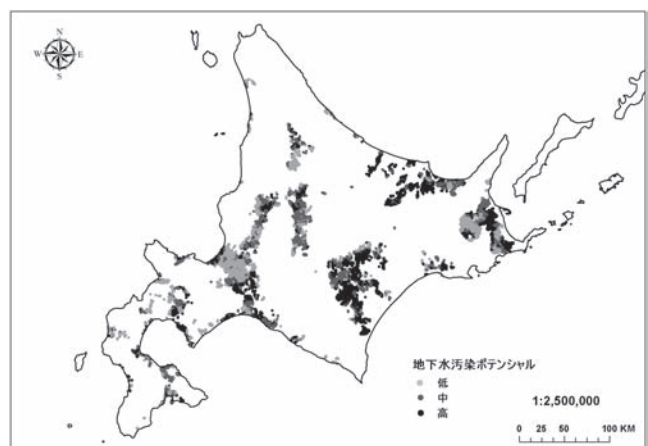


図7 地下水汚染ポテンシャル(3区分)

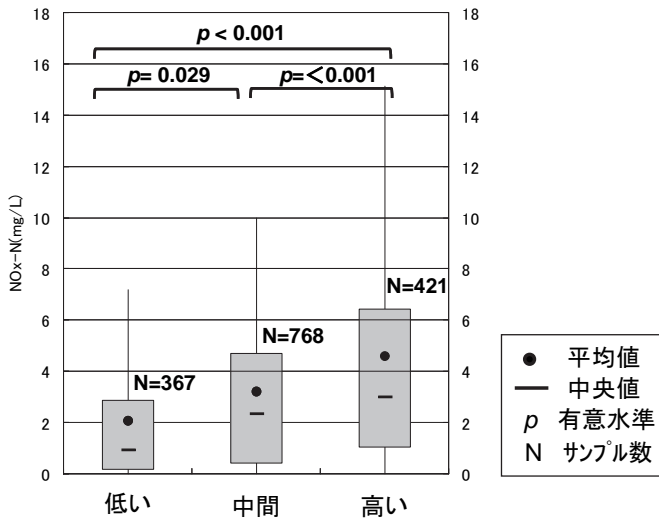


図8 分離性の評価

4. おわりに

本研究をとおして、硝酸性窒素による地下水汚染の分布特性を明らかにするとともに、GIS技術を用いた実用的な汚染ポテンシャル評価手法を提起することができた。評価を行った空間スケールは1 kmメッシュであるため圃場単位での評価にはそぐわないが、今後水理地質に関するデータ収集をさらに進め、評価精度を高めていくことにより、集落～市町村スケールで地域の特性を把握し、他地域との比較に用いることは可能であると思われる。これらの成果が、地域の環境特性に応じた営農及び管理技術の適用をとおして、安定的な食糧生産と安全な地下水資源の確保を両立させることに寄与することを期待するものである。

表1 農地の地目別の硝酸性窒素濃度

地目 ポテンシャルレベル	普通畑			水田			牧草地		
	低	中	高	低	中	高	低	中	高
地点数	158	387	307	165	304	87	41	68	20
中央値 (mg L ⁻¹)	1.3	3.3	5.1	1.8	2.3	2.3	0.2	1.3	2.6
平均値 (mg L ⁻¹)	2.6	4.5	7.0	2.7	3.0	4.0	1.0	3.0	2.8

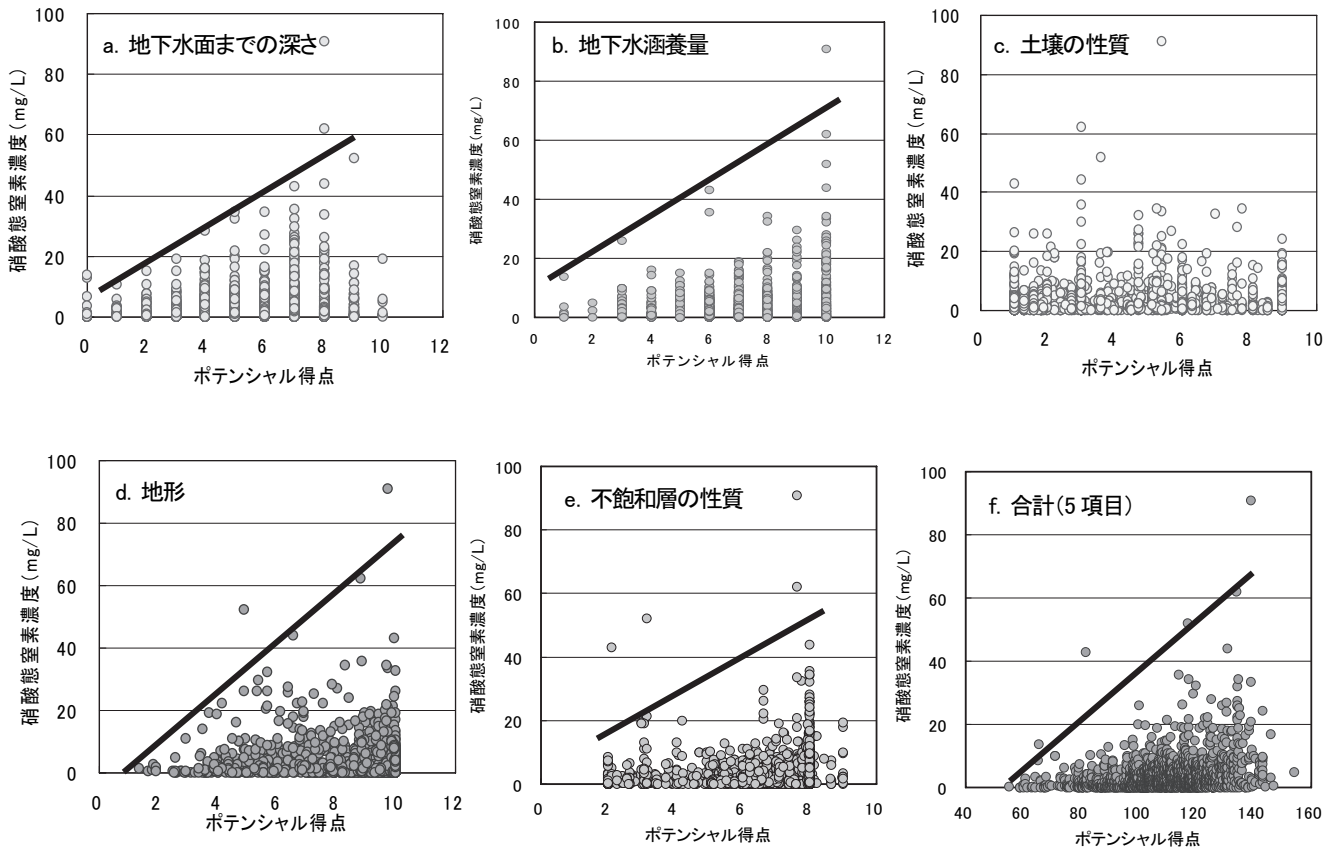


図9 項目得点と硝酸性窒素濃度との関係

謝 辞

本研究は北海道の特定政策研究「硝酸性窒素等による地下水汚染の防止・改善」の一貫として行ったものであり、関係機関及び関係者に深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 公害対策研究センター：硝酸性窒素による地下水汚染対策の手引，公害対策研究センター，2002.
- 2) 伊藤富子，川村洋司：硝酸イオンがオオエゾヨコエビ産卵数と落葉付着微生物活性に及ぼす影響実験，北海道立水産孵化場研究報告，Vol. 57, pp. 13-17, 2003.
- 3) 環境省：平成20年版環境／循環型社会白書，環境省，2008.
- 4) 北海道：北海道環境白書'08，北海道，2008.
- 5) EPA：DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, EPA/6002-87/035, 1987.
- 6) 田瀬則雄：アメリカにおける地下水汚染問題，琵琶研所報，Vol. 8, pp. 15-25, 1990.
- 7) Makkink, G. F. : Testing the Penman formula by means of lysimeters, Journal of the Institution of Water Engineers, Vol. 11, pp. 277-288, 1957.

Large scale evaluation of potential for Nitrate pollution in groundwater

Masayuki TAKADA
Yoshio MISHIMA
Rie KITAGAWA
Hidetoshi MIKAMI

Abstract

To evaluate present state and pollution potential of the ground water pollution by nitrate, large scale analysis using GIS were carried out in cultivable area in Hokkaido Island. Firstly, relationships between nitrate concentration in the ground water and geological setting were shown, also nitrate concentration and land use. Secondly, modified DRASTIC method developed by EPA was introduced to try to evaluate vulnerability of the wide area to ground water pollution using spatial data on hydrogeological parameters. It was clarified that as

the result, it could significantly divide the ground water pollution potential into 3 levels, and that the ground water pollution was apt to appear according to the potential level, especially in the upland field. Consequently, it was possible to show the possibility of quantitatively estimating the largest concentration of nitrate in proportion to pollution potential.