

地下水の硝酸汚染防止のための窒素環境容量

中辻敏朗¹

Maximum permissible nitrogen input into agricultural land to prevent nitrate pollution in groundwater

Toshiro NAKATSUJI¹

1. はじめに

硝酸性窒素は自然界で普通にみられる窒素の存在形態のひとつである。植物の生育にとって必須の養分であるが、水に溶けて移動しやすい特性をもつため、まれに地下水に高濃度で含まれることがある。このような水の人（特に乳幼児）が飲むと健康被害を受ける恐れがあることから、国は1999年、環境基本法に基づく水質環境基準健康項目に硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素（以降は、硝酸性窒素と記述）の基準値 10mg L^{-1} を新たに設定した。後述するように、硝酸性窒素による地下水汚染は北海道においても畑作地域を中心に広範囲で認められている。汚染原因としては、生活排水の他、農耕地への過剰な施肥や家畜排泄物の不適切な処理などが指摘されており、対策の推進が強く求められている。

このため、北海道では、農耕地の窒素収支を単純化し、「作物による窒素持出量」と「環境基準値と等しい濃度の浸透水に含まれる硝酸性窒素量」の合計量を「窒素環境容量」と定義して、農業分野における地下水の硝酸汚染防止のためのリスク評価指標としている。本稿では、この窒素環境容量の概念を解説するとともに、その有効性を論ずる。

2. 北海道における地下水の硝酸汚染実態

北海道が公表した1999～2001年度の地下水の常時監視と各地域の保健所による井戸水水質調査によれば、硝酸性窒素による地下水汚染（基準値 10mg L^{-1} を超過）は、網走、十勝、空知、胆振、渡島地域などを中心に道内の広い範囲で認められている（北海道、2001）。基準値の超過率（超過井戸数／調査井戸数）は全道では5.7%であるが、地域別では網走地域が30.7%と特に高い。この調査結果のなかから、地下水位が深さ20m未満の比較的浅い井戸水について硝酸性窒素濃度の市町村別平均値を求め、その値と市町村の主要な農地利用形態との関係を解析したところ、畑地が 6.5mg L^{-1} と最も高く、次

いで草地が 2.5mg L^{-1} 、水田が 2.4mg L^{-1} となり、農地の利用形態が地下水汚染と密接に関連することが指摘されている（松本・唐、2006）。

一方、農地利用形態が同一の地域内においても、地下水の硝酸性窒素濃度は季節によって変動する。河川沿いの低地に広がる畑作地域（約1000ha）において、3つの井戸の地下水の硝酸性窒素濃度を6年間にわたって観測した例（丸谷ら、2009）を以下に述べる。本地域は年間降水量が800mm程度と少なく、水理地質的にも地下水汚染が生じやすい地域で、地下水位は地表面から1～5mと比較的浅い位置にある。地下水の硝酸性窒素濃度は、いずれの年次においても融雪水が浸透する4～5月頃に上昇して環境基準を超えることが多く、その後低下するパターンを繰り返した（Fig. 1）。春の濃度上昇は本地域での畑地への施肥前から生じているので、この濃度の上昇は前年秋の土壤に残存していた窒素が融雪水に溶けて地中へ浸透し、この浸透水が地下水へ達することで生じていると考えられた。また、この調査事例では、地下水の硝酸性窒素濃度は季節によって変化するだけでなく地域内でも変動があり、年間を通して地域の北側での濃度が南側よりも高い傾向を示した。この原因を探るため、本地域内に18ha程度の区画を設定して地下水の動態（水・窒素収支）を詳しく調査したところ、地下水が上流域（南）から下流域（北）へ流下する間に、農耕地から硝酸性窒素濃度として 20mg L^{-1} 程度の高濃度の浸透水が地下水に供給されていることが判明した。

以上の様に、地下水の水質は地点や季節によってダイナミックな変化を示すことがあるので、それぞれの地域の汚染現状の把握には、適切な調査箇所・時期の選定が必要となる。

水質汚濁防止法に基づく直近の地下水水質調査によれば、2004年度以降の超過率は漸減傾向にあるが、過去に汚染が認められた地域では、畑作地域を中心に未だに環境基準を満たさない井戸が多く存在している（北海道、2010）。このように、いったん生じた地下水汚染の回復は容易でないことから、汚染を未然に防止することが極めて重要となる。

3. 窒素環境容量とは

3.1 概念

農地へ施用された窒素が地下水に移行するまでにはあ

¹Central Agricultural Experiment Station, Agricultural Research Department, Hokkaido Research Organization
Naganuma, Hokkaido, 069-1395, Japan.

Corresponding author: 中辻敏朗, 北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場

2011年12月26日受稿, 2012年1月23日受理
土壌の物理性 120号, 23-28 (2012)

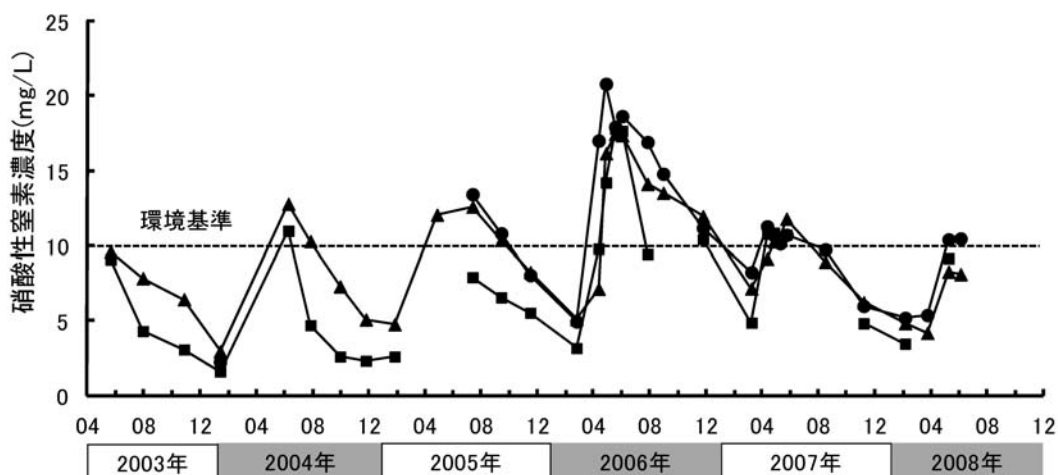


Fig. 1 地下水の硝酸性窒素濃度の季節的推移 (丸谷ら, 2009)
 低地に広がる畑作地域 (約 1000ha) での 3つの井戸によるデータ。本地域は年間降水量が約 800mm と少なく、
 水理地質的に地下水の硝酸汚染リスクは高い。地下水水位は地表面下 1～5m 程度。横軸の年次の上の数値は月を
 示す。

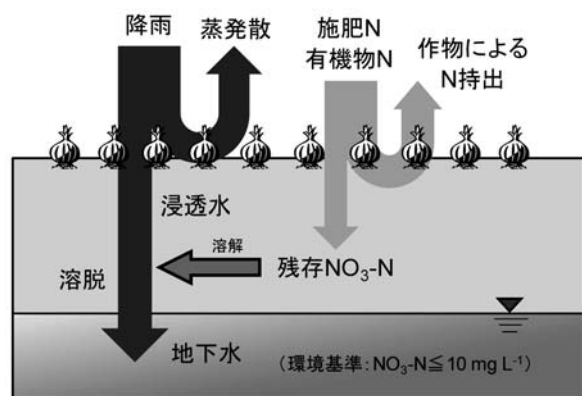


Fig. 2 農耕地 (畑地と草地) における窒素・水収支の模式図

る程度の期間を要するため、地下水の硝酸性窒素濃度を直接の指標として各種の汚染対策を講じることには限界がある。そこで、他の簡易な地下水汚染リスク評価指標を設定する必要がある。

北海道では、畑地と草地を主な対象として、農耕地における窒素・水収支を単純化し (Fig. 2)、次式で定義される窒素環境容量 (三木ら, 2000) をリスク評価指標として用いるとともに、これを地下水の硝酸性窒素濃度を環境基準内としながら農業生産を行うための窒素投入量の上限值としている。

「窒素環境容量」= 「作物による窒素持出量」+ 「硝酸性窒素残存許容量」(式1) (単位はいずれも kg ha^{-1})

ここで、「作物による窒素持出量」は、収穫物として圃場外に搬出される窒素量で、圃場にすき込み還元される作物残渣中の窒素は含まない。また、「硝酸性窒素残存許容量」とは、土壌に残存した硝酸性窒素がすべて浸透水で流出した場合に浸透水の年平均硝酸性窒素濃度が 10mg L^{-1} となる量である。これは年間浸透水量 (降水量 - 蒸発散量) に環境基準濃度 (10mg L^{-1}) を乗ずることで求められるので、年間浸透水量に比例した値である (た

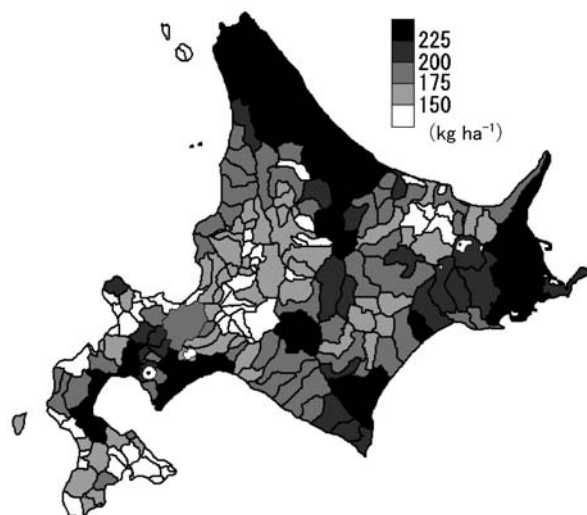


Fig. 3 北海道における市町村別の窒素環境容量推定値 (松本・唐, 2006 を改変)

窒素環境容量 = 作物による窒素持出量 + 硝酸性窒素残存許容量。
 右辺第1項は統計年報による作物別収穫量と総作付面積および日本食品標準成分表より求めた作物別窒素含有率とから、また第2項は三木ら (2000) の方法で算出。

例えば、年間浸透水量が 500mm の場合は 50kg ha^{-1} 。

式1で定義される窒素環境容量は、土壌の窒素プールの増減を考慮していないので、単年度ではなく、数年以上の平均的な収支を対象とする。一方、土壌浸透水の硝酸性窒素濃度は、浸透過程での希釈や深層土壌での脱窒 (江口, 2008) などにより低下する場合も想定される。したがって、浸透水の硝酸性窒素濃度として 10mg L^{-1} までを許容している窒素環境容量は、実際の地下水汚染リスクに対し、ある程度の安全を見込んだ指標と言える。

3.2 市町村別の窒素環境容量

窒素環境容量の適用対象スケールとしては、一筆圃場程度から市町村単位の広域レベルなど多様な段階が想定される。ここでは土地利用との関連をみるため、市町村

単位で推定した例（松本・唐, 2006）を紹介する。彼らは、式1の右辺のうち、作物による窒素持出量を統計年報による作物別収穫量と総作付面積および日本食品標準成分表より求めた作物別窒素含有率とから、また硝酸性窒素残存許容量を三木ら（2000）の方法で算出している。

窒素環境容量は市町村によって顕著に異なり、最小は94kg ha⁻¹、最大は308kg ha⁻¹で、全道平均値は183kg ha⁻¹であった。地域的にみると、宗谷、釧路、根室地域で大きく、網走、十勝、石狩、空知、上川地域では小さい傾向にある（Fig. 3）。北海道の主要な畑作地域の一つである網走地域では150kg ha⁻¹未満の地域があるなど窒素環境容量は概して小さい。畑作では高い生産性が求められるため多肥となりがちであるが、地下水汚染リスクの観点からは窒素の多投入は望ましくないことがわかる。

窒素環境容量とその構成要素（作物による窒素持出量、硝酸性窒素残存許容量）の平均値を農地の利用形態別にみると、作物による窒素持ち出し量は、水田が81kg ha⁻¹と最も少なく、次いで畑地100kg ha⁻¹、草地146kg ha⁻¹の順であった（Table 1）。硝酸性窒素残存許容量の農地利用形態による違いは小さく、69～76kg ha⁻¹の範囲にあった。ただし、地域別に見ると、留萌、宗谷、胆振地域で100kg ha⁻¹を超える市町村があるのに対し、網走地域の一部では40kg ha⁻¹未満の市町村も存在するなど全般に道東で少ない傾向にあり、主に年間降水量や浸透水量の地域間差を反映した分布を示した。両者の合計である窒素環境容量は、主に窒素持出量の違いに依存し、草地が218kg ha⁻¹と最も大きく、次いで畑地が169kg ha⁻¹、水田が157kg ha⁻¹であった。なお、水田は脱窒による窒素浄化能を有する（西尾, 1994）ため、式1の概念に基づく水田の窒素環境容量は過小評価されている可能性があり、畑地や草地との単純な比較には馴染まないことに留意が必要である。

4. 窒素環境容量の妥当性

窒素環境容量が地下水の硝酸汚染リスク評価指標とし

て妥当であることを検証するため、土壌の種類、栽培作物や気象条件が異なる16の連輪作事例について、窒素投入量と浸透水中の年平均硝酸性窒素濃度との関係を、窒素環境容量に対する超過窒素量（窒素投入量－窒素環境容量）との関連で検討した（中辻, 2009）。その結果、超過窒素量がプラス、つまり窒素環境容量以上の窒素を投入した事例の多くで浸透水の年平均硝酸性窒素濃度が10mg L⁻¹を超えたのに対し、マイナスの場合はこれを下回ることが多かった（Fig. 4）。また、窒素環境容量が全般に小さい網走地域での圃場試験からは、秋まきコムギ、テンサイ、バレイショなどによる標準的な畑作体系において浸透水の年平均硝酸性窒素濃度を10mg L⁻¹以下とするには、年間窒素投入量を150kg ha⁻¹以下とする必要がある（鈴木・志賀, 2004）ことが指摘されている。この窒素投入量上限値は網走地域の窒素環境容量と概ね合致（Fig. 3）しており、この点からも窒素環境容量の妥当性が裏付けられている。

以上は一筆圃場を対象としたものであるが、市町村単位のスケールにおいても同様の結論が得られている。すなわち、各種統計資料等を用いて推定した市町村単位の超過窒素量は、深さ20m未満の井戸水の市町村別硝酸性窒素濃度平均値と1%水準で有意な相関を示す（松本・唐, 2006）ことが明らかにされている。

これらのことは、窒素環境容量が圃場スケールだけでなく、より広域な市町村スケールでの地下水汚染リスクの評価指標としても有効なこと、また地下水の硝酸性窒素濃度を環境基準内に維持するための農耕地への窒素投入量上限値が窒素環境容量で概ね評価できることを意味している。

5. 窒素環境容量の活用

すでに述べた通り、窒素環境容量に対する超過窒素量（窒素投入量－窒素環境容量）は地下水の硝酸汚染リスク評価指標として有効で、この値がプラスのとキリスクは高く、マイナスで低いと判定できる（Fig. 4）。したがっ

Table 1 農地利用形態別の窒素環境容量とその構成要素
（平均値±標準偏差で表示、松本・唐, 2006）

農地 利用形態 ¹⁾	市町村数 ¹⁾	窒素持出量 ²⁾ (kg ha ⁻¹)	硝酸性窒素 残存許容量 ²⁾ (kg ha ⁻¹)	窒素環境容量 ²⁾ (kg ha ⁻¹)
水田	63	81 ± 14	76 ± 16	157 ± 19
草地	76	146 ± 33	72 ± 22	218 ± 39
畑地	70	100 ± 29	69 ± 26	169 ± 30
全道	209	111 ± 39	72 ± 22	183 ± 41

1) 統計年報から各市町村の地目別面積割合（水田、草地、畑地）を集計し、最も高い地目を当該市町村の農地利用形態とした。統計に不備のあった3市町村は除外。

2) 算出方法はFig. 3を参照。

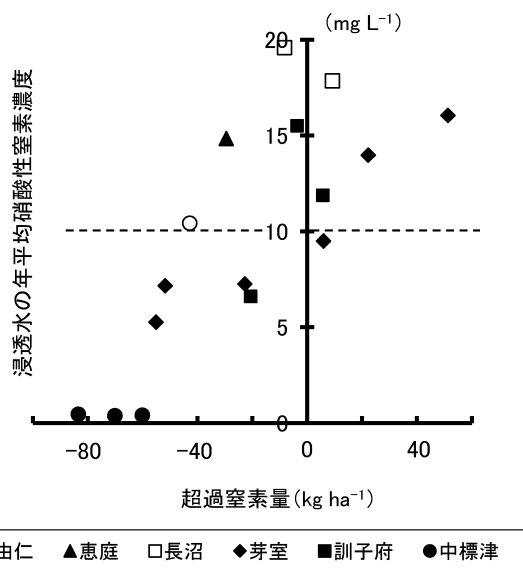


Fig. 4 多様な連輪作事例における超過窒素量と浸透水の年平均硝酸性窒素濃度との関係 (中辻, 2009)

超過窒素量 = 窒素投入量 - 窒素環境容量. 各地点の土壌の種類, 調査年次および栽培作物は以下の通り. 由仁: 普通褐色低地土 (1997 ~ 2001年, タマネギ→秋まきコムギ→タマネギ3年連作), 恵庭: 普通黒ボク土 (1997 ~ 2001年, ニンジン→ダイコン→キャベツ→アズキ→パレイシヨ), 長沼: 普通褐色低地土 (1999 ~ 2001年, タマネギ4年連作), 芽室: 淡色黒ボク土 (2002 ~ 2004年, テンサイ→アズキ→春まきコムギ), 訓子府: 多湿黒ボク土 (2000 ~ 2002年, 秋まきコムギ→テンサイ→パレイシヨ), 中標津: 普通黒ボク土 (2001 ~ 2003年, チモシー草地). 各地点の調査年次期間の平均値をプロット.

て, ある地域において想定される各種汚染軽減技術導入前後の超過窒素量を比較することで, 地下水の硝酸汚染リスク軽減に対する技術の導入効果を事前に評価することができる.

例えば, 水理地質や営農実態からみて地下水の硝酸汚染リスクが高いある畑作地域 (約700ha) を対象に, 各種汚染軽減シナリオの導入効果を検討した報告 (中辻ら, 2009) では, 汚染リスクの軽減には土壌診断に基づく窒素投入量の適正化 (減肥) が最も効果的であったが, これに土壌改良による作物生産性の向上や後作緑肥などのクリーニングクロップの導入などを組み合わせ, 総合的な改善策を導入すると, 軽減効果がさらに高まると推定された. このような評価手法は任意の地域に適用可能なので, 現状の汚染リスクを踏まえながら地域の実情に応じた各種対策技術の導入優先順位を決定する際などに利用できる.

なお, 窒素投入量と収量等の生産物情報から各種条件での窒素環境容量を簡易に算出できるソフト「NiPRAS (Nitrate Pollution Risk Assessment System)」が開発されているので, 汚染防止に配慮した窒素投入量の具体的な算定にあたっては, これを利用すると良い (唐ら, 2007).

6. 「北海道施肥ガイド2010」と窒素環境容量

北海道では, 環境に優しいクリーン農業のための具体

的な施肥指針として, 「施肥標準」, 「土壌診断に基づく施肥対応」, 「有機物施用に伴う施肥対応」を策定し, この3つを一冊の「北海道施肥ガイド2010」としてまとめている (北海道農政部, 2010). 施肥ガイドに示された施肥指針は窒素環境容量の視点, すなわち地下水の硝酸汚染防止の観点から妥当だろうか?

結論から言うと, 畑作に関しては, 施肥ガイドの遵守 (施肥標準の遵守, 両施肥対応の励行) は地下水の硝酸汚染防止に直結している. たとえば, テンサイ, アズキ, 春まきコムギの3年輪作体系では, 窒素投入量を施肥標準量程度とすれば, 多量の残渣由来窒素がすき込まれるテンサイの後作に窒素回収能の低いアズキを作付けても3ヵ年平均の浸透水の硝酸性窒素濃度は環境基準を超えることはない (北海道農政部, 2005). また, 先述したように, 網走地域の標準的な輪作体系では, 浸透水の年平均硝酸性窒素濃度を 10mg L^{-1} 以下とするための年間窒素投入限界量は 150kg ha^{-1} と見積もられている (鈴木・志賀, 2004) が, 施肥ガイドに基づいた管理では年平均窒素投入量は最大 140kg ha^{-1} 程度となり, 限界量を超えることはない. このように, 普通畑については, 先に述べた窒素環境容量の概念を特に意識しなくても, 北海道施肥ガイドに則った肥培管理を行う限り, 地下水の硝酸汚染リスクは小さいと言える.

これに対し, 露地野菜畑では, 施肥ガイドに準拠した施肥管理を行っても超過窒素量がプラスとなる品目が散見される (唐ら, 2007). すなわち, 露地野菜畑が地下水を汚染するリスクは普通畑に比べ高い. その理由は, 露地野菜には収量や品質を維持するために窒素環境容量を上回る施肥を必要とするものがあり, 収穫後の土壌に硝酸性窒素が残存しやすいからである. この対策としては, 作付体系への深根性作物 (秋まきコムギなど) の導入 (唐ら, 2007) やクリーニングクロップとしての後作緑肥の活用 (小野寺・唐, 2009) などが有効である.

7. 自然要因に基づく潜在的汚染リスク評価との比較

窒素環境容量の概念は農業での利用を前提としているため, 作物による窒素持出量を窒素環境容量の重要な構成要素の一つとしている. 一方, 環境学の分野では, 土壌の性質や降水量の多少などの自然要因に基づいて地下水の硝酸汚染リスクを評価する試みも行われている.

例えば, 米国環境保護庁の「DRASTIC」手法を応用して, 北海道の農耕地における硝酸性窒素による地下水の潜在的汚染リスクを, 地下水位, 地下水涵養量, 土壌の透水性, 傾斜などから評価した (Fig. 5) と, 地下水の硝酸性窒素濃度の実測値分布と対応するケースが多く, この方法によるリスク評価は概ね妥当と考えられた (高田ら, 2009). しかし, 汚染リスク区分と地下水の硝酸性窒素濃度実測値との関係を農地の利用形態別に検討すると, 畑地ではリスク区分が高いほど実測値も明瞭に高まる傾向があるのに対し, 脱窒による窒素浄化能を持つ水田や全般に窒素投入量が少なく持出量が多い草地で

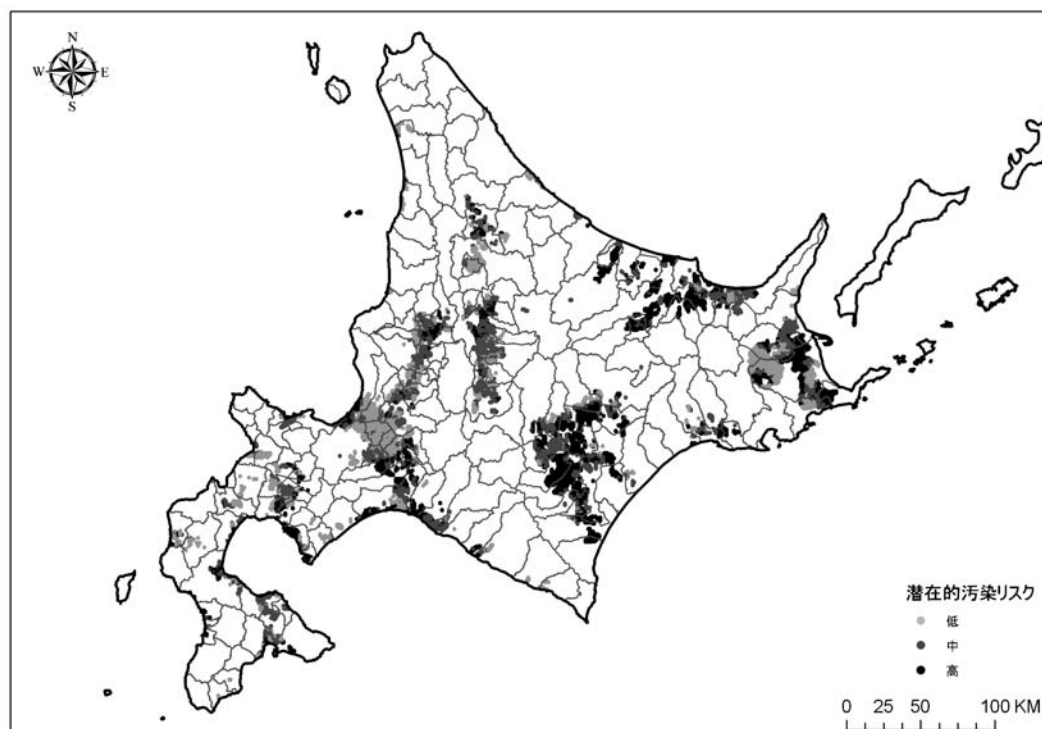


Fig. 5 自然要因による地下水の潜在的汚染リスク区分 (高田ら, 2009)
米国環境保護庁のDRASTIC手法を応用し, 地下水位, 地下水涵養量, 表層土壌, 地形, 不飽和層の性質から評価。リスク高, 中, 低の3区分。色が濃いほどリスク高。

は、両者の関係は普通畑ほど明確ではなかった。

このことは、Fig. 5はあくまでも自然要因のみによる潜在的汚染リスク評価と位置付け、多様な土地利用形態がある農業を対象とする場合は、窒素環境容量のように作物側の要因（窒素持出量など）を考慮する必要があることを意味している。ただし、少なくとも畑地については、自然要因による汚染リスクに応じて地下水汚染が生じやすいことから、水田や草地に比べ、より一層適正な窒素肥培管理が必要なことは指摘できよう。

8. 窒素環境容量と土壌物理性

式1で定義される窒素環境容量の長所は、地下水汚染の防止に配慮した具体的な窒素投入量を簡易に算出できる点にある。一方、窒素収支に対する各種の土壌要因（有効土層深、土壌の種類、土性、陰イオン交換能、バイパス流の有無など）の影響は、作物による窒素持出量に反映されていると考えられる。例えば、有効土層深は深く、土性は細かく、バイパス流は生じない方が作物の窒素利用効率が高まり窒素持出量も増えるため、窒素環境容量は増大する方向に向かうと推察される。しかし、このような影響が明示的に扱われていないことから、土壌改良による窒素収支の改善という発想に結びつきにくい難点がある。

この点で、窒素環境容量は土壌物理的根拠に乏しいように見えるかもしれない。しかし、旧道立農試による硝酸性窒素の土層内移動モニタリング連絡試験（三木, 2002）の結果に基づき、「作物生産に必要な量を超えて

土壌へ投入した窒素（余剰窒素）はいずれ系外に溶脱する」という物質収支の考え方を土壌に対して適用した方法論そのものが、土壌物理的な発想に基づいているとも言える。土壌物理学の知見は窒素環境容量の概念を根幹で支えている。

引用文献

- 江口定夫 (2008) : モデルによる土壌、農耕地、流域における窒素動態の理解 3. 地形連鎖系スケールの窒素動態 - 調査技法とモデル化手法 -。土肥誌, 79 : 213-227.
- 北海道 (2001) : 硝酸性・亜硝酸性窒素による地下水の汚染について。 <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/ksk/khz/contents/mizukankyo/suisituhosen/syou/syou.htm> (2011年12月)。
- 北海道 (2010) : 平成21年度地下水の水質測定結果。 <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/ksk/g-khz/01/chika0gaiyo.pdf> (2011年12月)。
- 北海道農政部 (2005) : 平成17年普及奨励ならびに指導参考事項。 pp.106-108.
- 北海道農政部 (2010) : 北海道施肥ガイド2010。 http://www.agri.hro.or.jp/chuo/fukyu/sehiguide2010_index.html (2011年12月)。
- 松本武彦・唐星児 (2006) : 北海道の市町村を単位とした窒素環境容量に基づく地下水の硝酸汚染リスクの評価。土肥誌, 77 : 17-24.
- 丸谷薫・清水水康博・高橋良 (2009) : 地下水中の硝酸性窒素濃度の季節・経年変動。北海道立農業試験場資料, 38 :

- 25-28.
- 三木直倫・安積大治・橋本均 (2000) : 北海道農耕地土壌における硝酸態窒素残存許容量と流れ易さの区分. 土肥誌, 71 : 396-399.
- 三木直倫 (2002) : 硝酸態窒素の土層内動態をモニタリングする. 長谷川 周一・波多野隆介・岡崎正規編 環境負荷を予測する. pp.37-56, 博友社, 東京.
- 中辻敏朗 (2009) : 多様な作付体系における NiPRAS の有効性の検証. 北海道立農業試験場資料, 38 : 73-75.
- 中辻敏朗・高田雅之・三島啓雄 (2009) : 小流域における各種軽減対策の導入効果. 北海道立農業試験場資料, 38 : 76-78.
- 西尾隆 (1994) : 耕地土壌の脱窒過程. 土肥誌, 65 : 463-471.
- 小野寺政行・唐星児 (2009) : 後作緑肥の活用による汚染軽減対策. 北海道立農業試験場資料, 38 : 40-51.
- 鈴木慶次郎・志賀弘行 (2004) : 浸透水の硝酸性窒素濃度から見た網走地域の黒ボク土畑における投入窒素限界量. 土肥誌, 75 : 45-52.
- 高田雅之・三島啓雄・北川理恵・三上英敏 (2009) : GIS を用いた地下水汚染ポテンシャルの広域的評価. 北海道環境科学研究センター所報, 35 : 21-26.
- 唐星児・志賀弘行・中本洋・日笠裕治 (2007) : 肥培管理情報を利用した地下水の硝酸性窒素汚染リスク評価ソフト「NiPRAS」. 土肥誌, 78 : 607-610.

要 旨

北海道では、農耕地の窒素収支を単純化し、「作物による窒素持出量」と「環境基準値と等しい濃度の浸透水に含まれる硝酸性窒素量」の合計量を窒素環境容量と定義して、農業分野における地下水の硝酸汚染防止のためのリスク評価指標としている。農耕地への窒素投入量を窒素環境容量の範囲内とすれば、浸透水の年平均硝酸性窒素濃度は概ね地下水の環境基準 (10mg L^{-1}) 未満となり、地下水汚染を引き起こすリスクは小さい。道内市町村別に推定した窒素環境容量の平均値は 183kg ha^{-1} であったが、 $94\sim 308\text{kg ha}^{-1}$ の幅が認められた。農地利用形態別では、草地在 218kg ha^{-1} と最も大きく、次いで畑地在 169kg ha^{-1} 、水田が 157kg ha^{-1} であった。

キーワード：環境基準，硝酸汚染，地下水，窒素環境容量，農耕地