

栃木県那須扇状地における地表水の水質分布特性ならびに 簡易水質測定方法の比較

Spatial Distribution Properties of Water Quality of Spring Water and River Water
in Nasu Fan, Tochigi, and Comparison of Simple Water Analysis Methods

岩上 翔^{*}・林 敦史^{*}・熊坂 秀人^{*}・ジェラシィ ヘンダ^{*}・山中 勤^{**}

Sho IWAGAMI^{*}, Atsushi HAYASHI^{*}, Hideto KUMASAKA^{*},
Henda JELASSI^{*} and Tsutomu YAMANAKA^{**}

Abstract

Hydrological survey was performed in Nasu Fan, Tochigi prefecture on 30th and 31st Oct, 2008, especially focusing on the region around the Sabi River. Fifteen samples were taken (3 of them were river water samples, 11 of them were spring water samples and one of them was groundwater sample), and water temperature, pH, EC, and major ions including NO_3^- were analyzed for all samples. Also, water discharge was measured at the river and springs. By comparing the water quality of river water and spring water, it is clear that Sabi River recharges surrounding groundwater. Also $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration at every site was lower than the standard value of environmental criteria and there was no obvious water pollution. Three different methods were applied for comparison with ion chromatography, and the all methods were useful to investigate the relative comparison of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in the field.

1 はじめに

那須扇状地は栃木県北部に位置する約 400 km² の広大な扇状地であり、那珂川・箒川・蛇尾川・熊川を主とする諸河川によって形成された複合扇状地である。扇頂から扇央にかけての一带では、河川が伏流し地下水面が深く、扇状地堆積物における透水性が高いため農業用水や生活用水の得にくい地域であったが、1885 年に那須疎水が開通した後、開墾が進んだ。一方その結果、地下水の

過剰揚水による地下水位の低下や、水田における過剰な施肥による地下水の硝酸性窒素汚染が問題となった。

大橋ほか(1994)では那須野原を対象に、那須疏水沿いの地域における地下水中の硝酸イオン濃度の時空間変動について明らかにしており、扇央部における春から初夏にかけての硝酸イオンの増加は動物の排泄物を起源としたものが多く、降水や灌漑水によって降下浸透した結果地下水中に現れたものであることや、扇端部の水田地帯では水

^{*} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

^{**} 筑波大学陸域環境研究センター

田における化学肥料の施肥によって硝酸イオンが増加していることを示した。

さらに詳細な地下水調査に基づく水質特性等をもとに、地下水と河川水の交流現象について議論した例として佐々木ほか（1958）や檜山・鈴木（1991）、山中ほか（2003）がある。佐々木ほか（1958）では、基盤岩形状を考慮し蛇尾川が地下水涵養に果たす役割は小さいことや、那珂川や箒川では河川水と地下水の交流は起こらないことを示唆している。それに対して檜山・鈴木（1991）、山中ほか（2003）では地下水面の形状から考えられる広域での地下水流動や、地下水中の溶存成分の空間分布をもとに河川水と地下水の交流状況について述べている。また涌井・山中（2006）では安定同位体を用いた3成分混合モデルによって地下水涵養プロセスを定量的に評価しており、蛇尾川は周辺域の地下水のおよそ60%程度を涵養していることを示している。

今回の調査では地表水の水質に注目し、扇状地における河川の伏流・再湧出現象を定量的に把握すること、扇端における湧水の分布と流量・水質を明らかにすることを目的として2008年10月に調査を行った。

一方、通常の水質分析に用いる機器（イオンクロマトグラフィーやプラズマ発光分析装置、質量分析器等）は大きな装置で野外調査時に持ち出すことは現実的ではなく、野外調査時には現場では水サンプルを採取し、持ち帰って分析することが多い。現地においては軽量で簡易な機器を用いて水温やEC、pHを測定する程度のことが多いが、亜硝酸イオンは硝酸イオンに分解されやすく採水した水サンプルはできるだけ早く分析することが望ましい等、野外調査時において有用な精度が高く、安価で扱いやすい水質分析方法が常に求められている。そこで本調査では3種類の簡易水質分析器を用いて分析を行い、それらの有用性を検討した。

II 調査対象地域概要

那須扇状地の海拔標高は560 mから120 mの範囲におよび、北北西から南南東に向けて傾斜しており、標高約360 m以上の地域が扇頂部、250～220 m以下の地域が扇端部、それらの中間が扇中部に相当するとされている（渡部・堤橋、1962）。那須扇状地の北西後背地は新第三紀の堆積岩や火成岩からなる下野山地と、それを比覆する那須火山群から成っており、那須扇状地はこれらの背後山地から南東側に流れ出る那珂川、熊川、蛇尾川、箒川の諸河川によって形成された複合扇状地である。蛇尾川と熊川の2河川は扇状地の中央部を縦断しているが下野山地から扇状地へ出てまもなく伏流しており、水無川となっている。伏流区間は時期によって変動するが、通常蛇尾川は標高220 m付近で再湧出する。扇中部と扇端部のほぼ全域と蛇尾川・熊川の扇頂部は水田として利用されており、他の扇頂部では牧場・酪農場が多く存在している。扇中部から扇端にかけての1帯ではまた、分離丘陵が分布しており、畑地や牧草地に使われている。

那須扇状地のほぼ中央に位置する大田原市における気象庁 AMeDAS データによる1978～1997年の20年間の年平均気温は12.2℃、年降水量は1365.4 mmであり、檜山・鈴木（1991）によると年可能蒸発散量はおおよそ800 mmである。より詳細な那須扇状地全域の地形、地質、気候については檜山・鈴木（1991）に述べられており、水文地質構造については山中ほか（2003）に述べられている。

III 調査方法

2008年10月30日および31日の両日にわたって現地調査を実施した。30日には蛇尾川上流部の伏流地点と扇中部の蛇尾川再湧出地点を探し出し、それぞれ流量観測と水サンプルの採水、水質

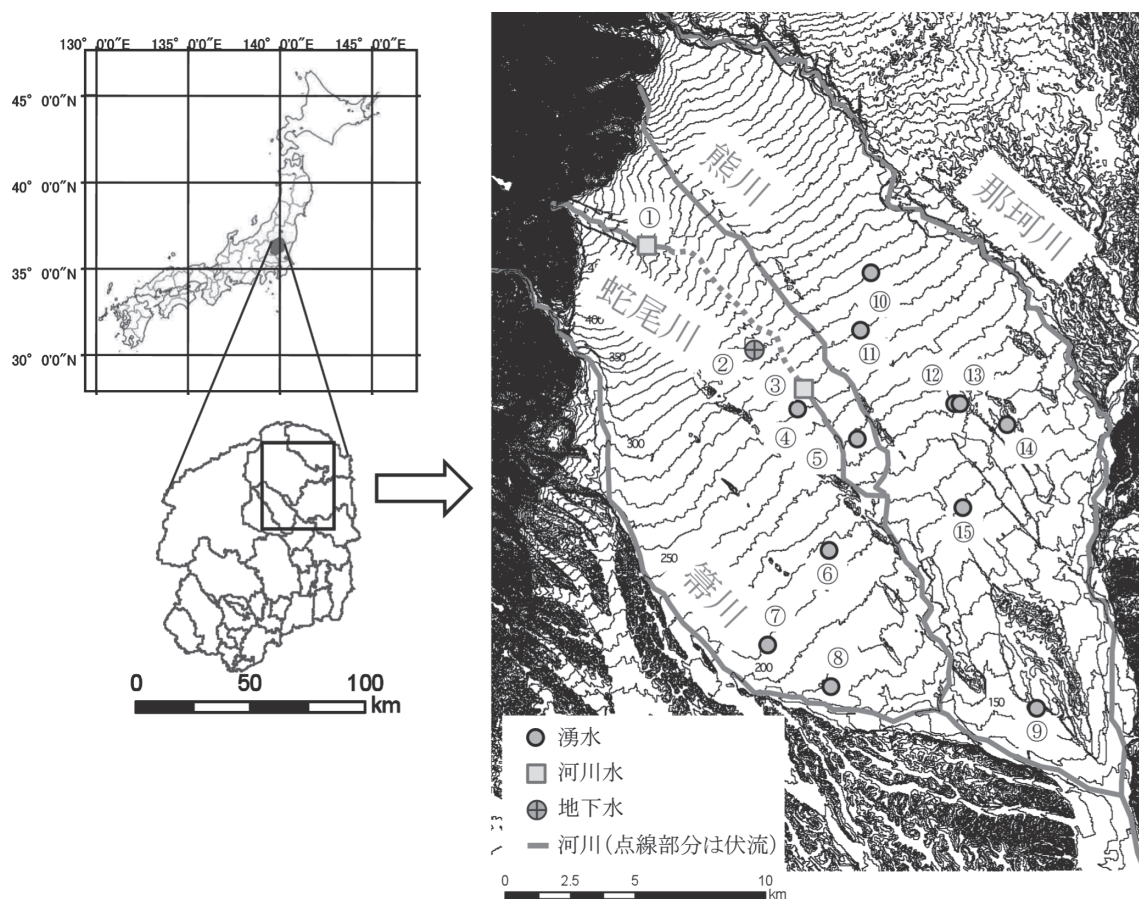
の測定を行った。湧水および牧場における井戸も1地点ずつ訪れ湧水の流出量とそれぞれの採水、水質測定を行った。31日には湧水を中心に計12地点の流出量と採水、水質測定を行った。調査地点の分布を第1図に示す。また調査・採水地点の諸元を第1表に示す。

流量観測には水深と流速に応じて2種類の流速計（YOKOGAWA CR-7 型流速計、アレック電子 河川用電磁流速計 AEM1-D）を用いた。川幅と水深を巻尺と折り尺を用いて測定し河川断面図を作成し、流量に変換した。現地での水質の測定項目は、水温・EC（電気伝導度）・pH・ NO_2^- ・ NO_3^- ・ NH_4^+ ・ PO_4^{2-} ・COD の計8項目である。水温とECは携帯型ECメーター（YOKOGAWA

SC82）、pHは携帯型pHメーター（YOKOGAWA SC81）を用いてそれぞれ測定した。その他イオン濃度はパックテスト（共立理化 WAK- NO_2^- ・ NO_3^- ・ NH_4^+ ・ PO_4^{2-} ・COD）とデジタルパックテスト（共立理化 DPM-MT）を併用し測定した。

持ち帰った水サンプルは一部調査期間中に宿舍で測定を行い、残りは筑波大学で測定を行った。測定項目は NO_3^- （Orion 9707BNWP 硝酸複合電極）、 NO_2^- ・ NO_3^- ・ NH_4^+ ・TN・ PO_4^{2-} ・TP（TOADKK ポータブル簡易全窒素全りん計 TNP-10）、 Na^+ ・ K^+ ・ Mg^{2+} ・ Ca^{2+} ・ Cl^- ・ NO_3^- ・ SO_4^{2-} （島津 イオンクロマトアナライザー-HIC-10Asuper）、 HCO_3^- （硫酸滴定）である。

なお、以上の調査は平成20年度水文学野外実



第1図 調査地点（左：日本における那須扇状地の位置，右：那須扇状地地形図および調査地点分布図）

第1表 調査・採水地点の諸元

No.	観測地点	採水	No.	観測地点	採水
①	蛇尾川 (伏流前)	河川	⑨	蛭畑	湧水
②	自由学園	井戸	⑩	那須農場北	湧水
③	蛇尾川 (伏流後)	河川	⑪	杳掛	湧水
④	出釜の湧水	湧水	⑫	長者谷	湧水
⑤	小五郎内	湧水	⑬	長者谷 (竹林)	湧水
⑥	二ツ室	湧水	⑭	羽田沼	湧水
⑦	親園	湧水	⑮	石碑	湧水
⑧	田谷川	湧水			

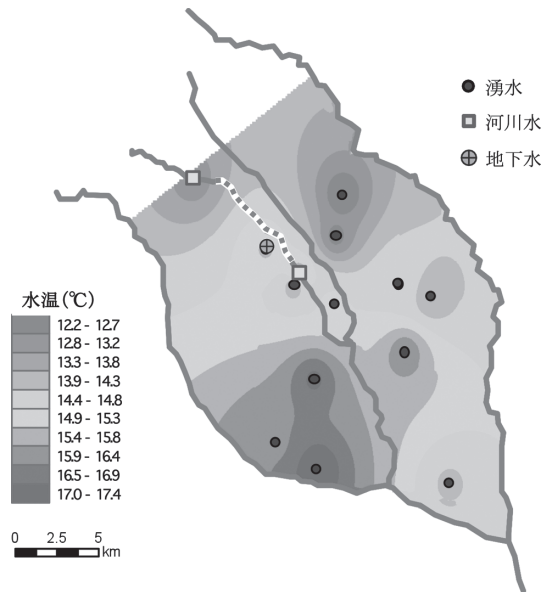
験B（筑波大学第一学群自然学類）の一環として実施された。

IV 結果と考察

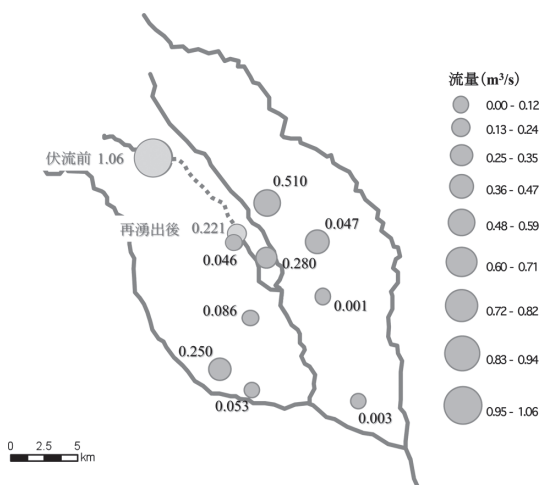
1. 水質と流出量の空間分布

流出量、水温、EC、pH、ヘキサダイアグラム、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の空間分布（イオンクロマトグラフ、硝酸複合電極、DIGITAL パックテスト、TNP-10それぞれによる測定結果）を順に第2図～第7図に示す。河川水と地下水・湧水の水質を同じ図面上に示しており、本来区別して扱うべき値を同一図面上でみていることになるが、湧水はその周辺

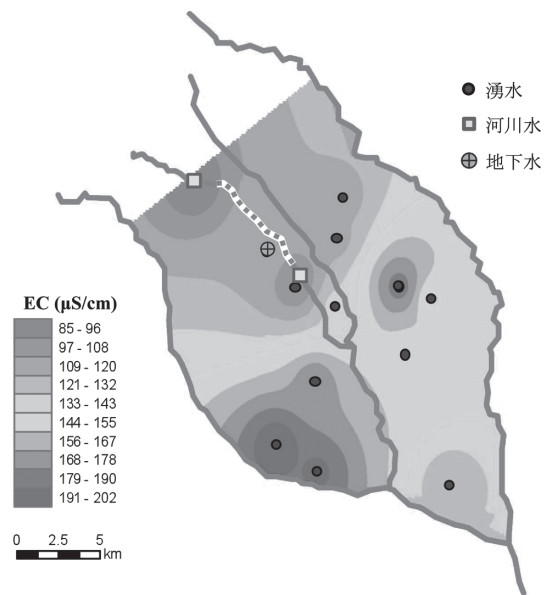
地下水を反映していることや、今回は採水地点数が少ないことから全体の空間分布を把握しやすいようにこのようにして示した。また硝酸イオン濃度（ NO_3^- ）については、硝酸汚染等について議



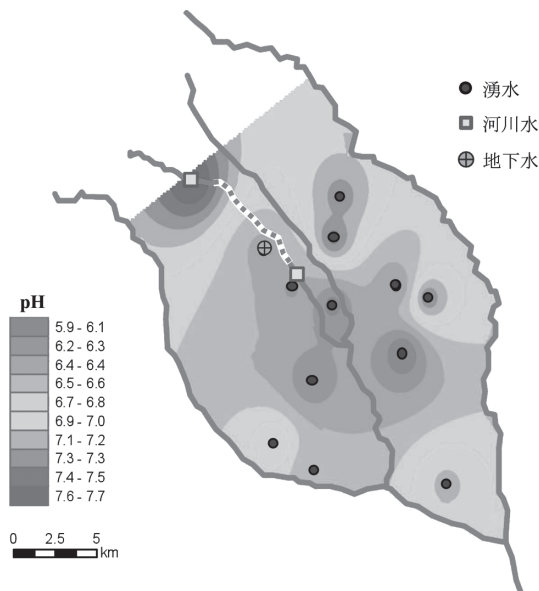
第3図 水温の空間分布



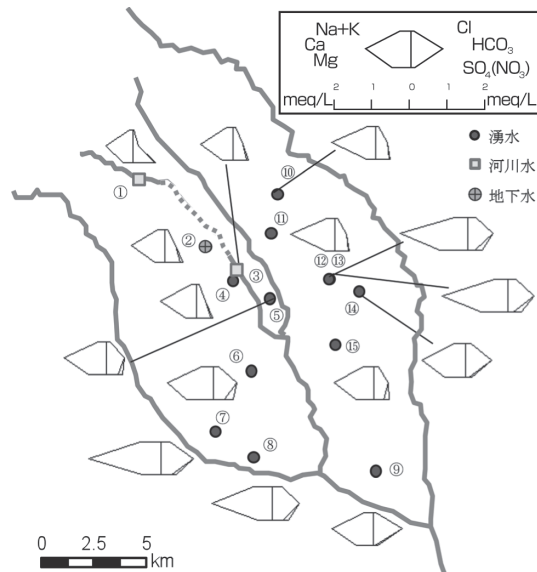
第2図 流出量の空間分布



第4図 EC（電気伝導度）の空間分布



第5図 pHの空間分布



第6図 ヘキサダイアグラムで表した水質の空間分布

論する際に硝酸イオンを窒素量で議論することも多いため、第7図では硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の濃度で示している。4種類の分析器を用いた $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の結果について第2表に示す。

調査日 (2008 年 10 月 30 日) における蛇尾川の伏流地点および再湧出地点を探し出し、それぞれ近傍で流量を測定した結果、伏流前の流量は $1.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 再湧出後の流量は $0.221 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。湧水では $0.001 \sim 0.510 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流量を示した。蛇尾川の伏流前と再湧出後は水質で見ると、再湧出後は伏流前に対して水温が 2.4°C 上昇し、pH が 1.17 下がった。また Ca_2^+ 、 NO_3^- 、 HCO_3^- が増加し SO_4^{2-} が低下している。

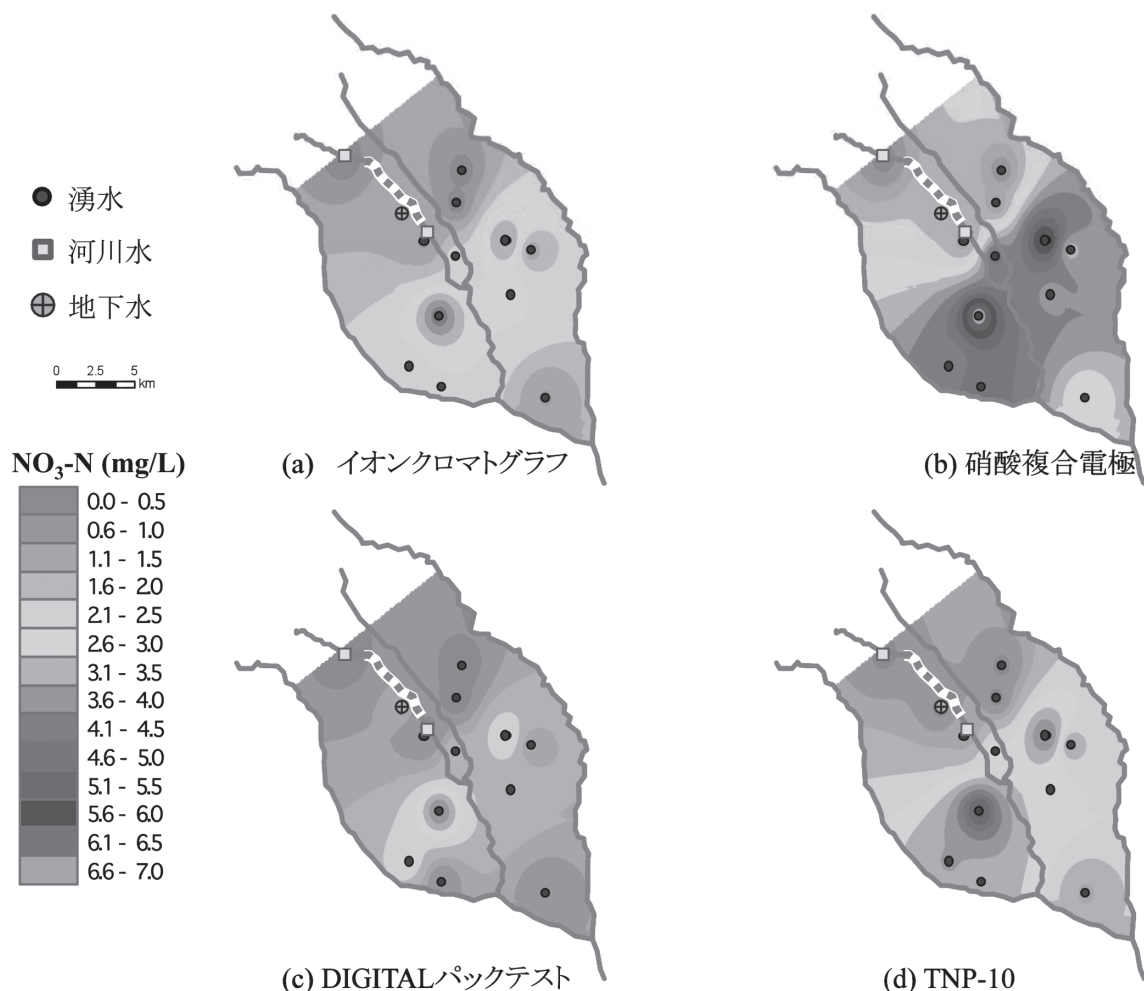
イオンクロマトグラフによる $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の分布 (第7図 a) を見ると、扇央の⑥・⑫の地点で局所的に濃度が高く、これらは pH の低い地域とも一致する。EC は $\text{NO}_3\text{-N}$ の高かった地点に加え、箒川近傍の2地点⑦・⑧が特に高い値を示し、これらの地点では Na^+ 、 Cl^- 、 Ca_2^+ 、水温が高かった。 SO_4^{2-} は扇頂から先端に向かって濃度が低下しており、 HCO_3^- は扇頂から先端に向かっ

第2表 4種類の分析器による硝酸性窒素濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) の結果

地点名	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)			
	イオンクロマト グラフ	硝酸複合 電極	DIGITAL バックテスト	TNP-10
①	0.27	0.34	0.00	0.37
②	1.40	1.67	1.37	0.30
③	1.03	1.32	0.72	1.06
④	0.90	1.31	0.61	1.32
⑤	2.15	4.72	1.89	2.83
⑥	4.27	6.77	3.95	5.65
⑦	2.29	4.05	2.28	3.49
⑧	2.45	4.99	0.53	3.30
⑨	0.97	2.45	0.53	1.39
⑩	0.24	0.62	0.00	0.34
⑪	0.24	1.11	0.00	0.29
⑫	3.56	5.77	2.42	4.06
⑬	3.56	6.23	2.53	3.75
⑭	1.20	3.27	1.05	1.47
⑮	2.73	3.80	1.72	2.63

て濃度が上昇する分布を示した。⑥地点の井戸水において $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高いのは (再湧出後の蛇尾川に対して $+0.369 \text{ mg/L}$) 牧場地であることの影響が考えられる。

HCO_3^- は直接滞留時間を示す指標ではないが、



第7図 (a) イオンクロマトグラフ (b) 硝酸複合電極 (c) DIGITALパケットテスト
(d) TNP-10 を用いて測定した硝酸性窒素濃度 NO₃-N (mg/L) の空間分布

岩石鉱物との接触時間が長いほど濃度が上昇することから HCO₃⁻濃度が高い水ほど滞留時間が長いと推定される。HCO₃⁻濃度が扇頂から先端に向かって上昇する分布を示したことから、佐々木ほか(1958)や山中ほか(2003)で報告されているように地形面の傾斜に沿って位置しているとされる地下水面の勾配にしたがって流化した地下水が、湧水として湧出していることが推測された。

水温の分布は熊川と那珂川で挟まれた北の地域(⑩・⑪)で低く、蛇尾川と箒川で挟まれた南の地域(⑥・⑧)では高かった。これも山中ほ

か(2003)で述べられている地下水の広域的な流動方向に従って上流ほど水温が低く、下流ほど水温が高くなる傾向とおおむね一致し、その値もおおむね近い値を示している。蛇尾川と箒川で挟まれた南の地域で水温が高いことに関しては、この地域では温泉がみられ地質的に地温が高いことがうかがわれる。この地域でイオン濃度が全体的に高い等、他の地点と異なった水質を示しているのは地質の違いによる影響も大きいと考えられる。NO₃⁻濃度はこのような傾向が見られなかったことからやはり牧場地などからの局所的な影響が表

れたものであると考えられた。

2. 水質と流出量から見た河川水と湧水、地下水の交流

再湧出地点近傍の井戸（②）、湧水（④・⑩・⑪）の水質は蛇尾川の水質に近い値を示しており、伏流した蛇尾川が河道に再湧出するだけではなく周辺の地下水を涵養し湧水として湧出していることが推測された。これは河川による扇状地地下水の涵養に否定的な佐々木ほか（1958）の結果に対して河川と周辺湧水の交流を示唆した檜山・鈴木（1991）や山中（2003）の結果を支持するものである。

今回の調査では2地点を除いて地下水を直接採水してはいないが、湧水は地下水の露頭といわれ湧水の水質は近傍の地下水の水質を反映していると考えられる。山中ほか（2003）の地下水の結果と今回の河川水・湧水の水質を比較してみると水温やpH、ECの空間分布の傾向は概ね一致している。

3. 最近5年間における水文環境の変化

単純に比較できるものではないが、2003年の調査において NO_3^- 濃度の最高値は20 mg/Lであった（山中ほか、2003）のに対し今回の調査では NO_3^- 濃度の一番高かった湧水の値は16.3 mg/

Lであった。いずれも環境基準値を下回るものであり、この5年間で顕著な汚染は生じていないと推測される。

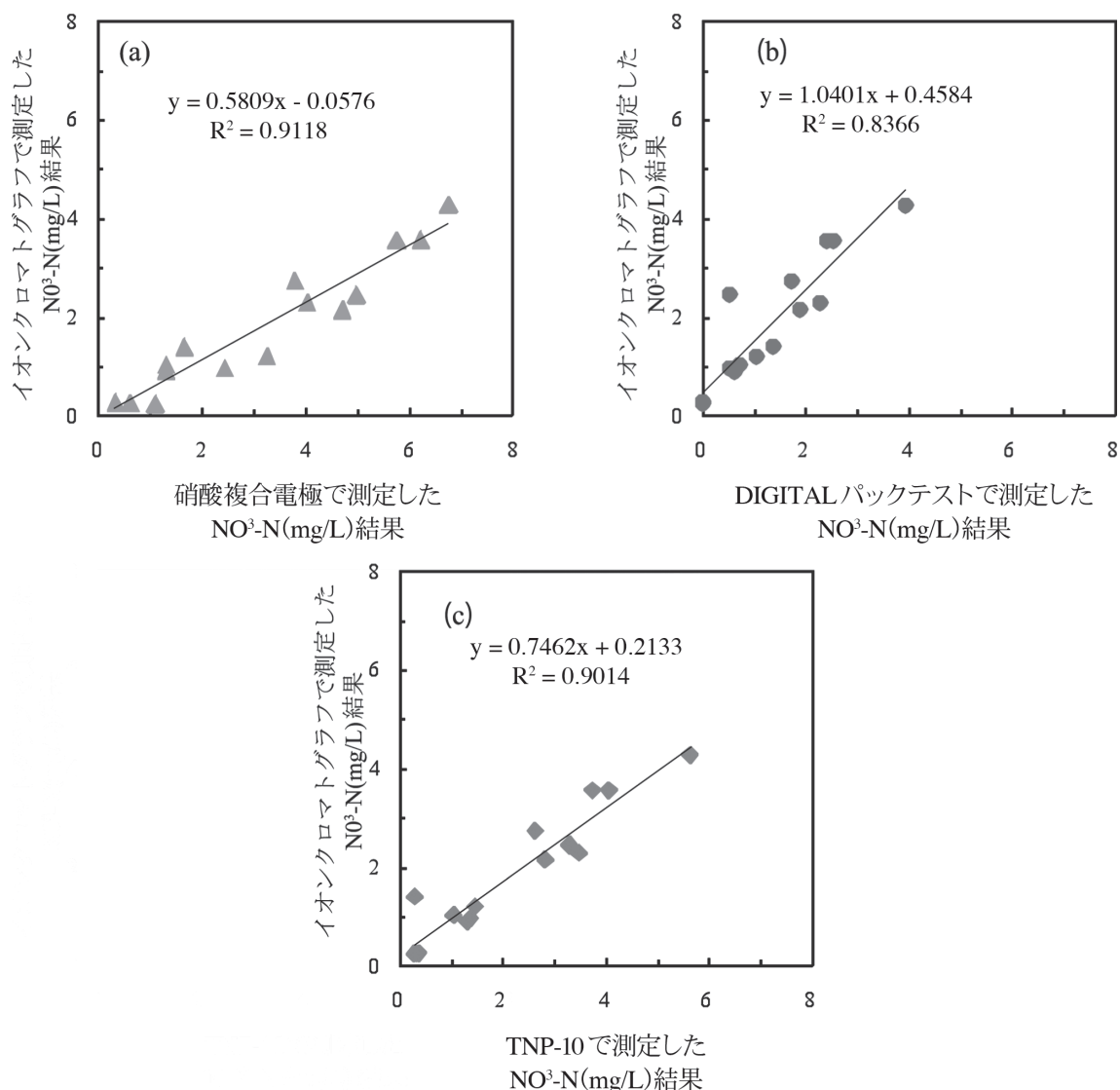
また2003年の調査時には確認されなかったもので、④の湧水（出釜の湧水）は今回訪れたときには湧水周辺が整備・保護されていた。これは農林水産省と地域のコミュニティによる田園空間整備事業の田園空間博物館の一部として行われた水文環境の保全活動の結果である。

4. 簡易水質測定方法の比較

3種類の分析器それぞれにおける硝酸性窒素濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定結果とイオンクロマトグラフを用いた硝酸性窒素濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定結果の比較を第8図（a 硝酸複合電極とイオンクロマトグラフ、b DIGITALバックテストとイオンクロマトグラフ、c TNP-10とイオンクロマトグラフ）に示す。それぞれの回帰直線の傾きは硝酸複合電極では0.58、DIGITALバックテストでは1.04、TNP-10では0.74であった。それぞれおおむねイオンクロマトグラフの結果と同じ傾向を示すが、硝酸複合電極とTNP-10では過大評価しており、DIGITALバックテストでは過少評価している。またそれぞれの測定値のばらつきを決定係数でみると硝酸複合電極では0.91、DIGITALバックテストでは0.83、TNP-10では0.90であった。

第3表 3種類の分析器の比較

測器名	測定項目	測定範囲 (mg/L)	電源	キャリブレーション	測定時間	測定精度 R^2	必要な試薬
9707BNWP 硝酸複合電極 (Orion)	NO_3^-	0.100 ~ 14000	電池/コンセント	2 h	3 min / sample	0.91	硝酸標準液・イオン強度調整剤
デジタルバックテスト (共立理化)	NO_3^- , NO_2^- , NH_4^{2+} , PO_4^{2-} , COD, 他40項目以上	0.200 ~ 5.80	電池/コンセント	なし	5 min / sample	0.83	WAK- NO_3
ポータブル簡易全窒素全りん計・TNP-10 (TOADKK)	NO_3^- , NO_2^- , NH_4^{2+} , PO_4^{2-} , TN, TP, COD	0.100 ~ 5.00	充電式バッテリー/コンセント	なし	60 min / 8 samples	0.90	硝酸用前処理試薬キット硝酸測定試薬キット



第8図 イオンクロマトグラフと3種類の分析器 (a 硝酸複合電極, b DIGITAL パックテスト, c TNP-10) それぞれにおける硝酸性窒素濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) の測定結果の比較

TNP-10 の測定結果において、値がイオンクロマトグラフの結果から大きくずれた②地点の値 (イオンクロマトグラフ : 1.40, TNP-10 : 0.297) を除くと TNP-10 の決定係数は 0.95 を示した。またそれぞれの分析器を用いた分析結果において分散を求めると、測定値誤差は硝酸複合電極では 3.55%, DIGITAL パックテストでは 1.52%, TNP-10 では 2.17% であった。

4 種類の分析器 (イオンクロマトグラフ, 硝酸複合電極, DIGITAL パックテスト, TNP-10) それぞれによる $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の空間分布を比較すると、おおむねどの測器を用いても同じような傾向が得られたことが分かる。⑦と⑧の調査地点において、硝酸複合電極を用いた場合 (第7図 b) と DIGITAL パックテストを用いた場合 (第7図 c) では濃度の大小関係が逆転しているが、イオ

ンクロマトグラフを用いた測定では⑦と⑧での $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は 0.1 mg/L 程度しか違っておらず、本来濃度の大小関係が議論とはならない部分であると考えられる。

それぞれの分析器について、水文学的な研究に用いる際に重要となる項目（測定可能な項目・測定範囲・電源の形体・キャリブレーションが必要かどうか・測定に要する時間・測定精度・必要な試薬）についてまとめ第3表に示した。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の測定結果とそれぞれの分析器の特徴から、これらの分析器の特徴は以下のようにまとめられる。

a) 硝酸複合電極

精度良く測定が行えるが、電極はその都度組み立てなければならず、2時間毎にキャリブレーションの必要がある。また硝酸態窒素しか測れず、野外向きではない。

b) DIGITAL パックテスト

他の分析器に比べて測定値のばらつきは大きく、低い濃度を検出しづらいが野外で大まかな結果を得るには適している。作業は手軽で簡単であるが、デリケートな操作も含まれており、サンプルと試薬を混ぜる際に測定者の指がサンプル水の取り込み穴に触れてしまうと結果に影響することが推測される。

c) TNP-10

精度良く多くのサンプルを測定することに適している。しかし NO_2^- を分解する際には電池では駆動しないヒータを用いるため野外では測定することができない。

V おわりに

蛇尾川を中心として那須扇状地の地表水の調査を行った結果、以下のような結果が得られた。また同時に複数の水質分析機器について野外調査における有用性を検討した結果、以下のように考えられた。

- 1) 蛇尾川再湧出地点での河川水とその周辺地下水・湧水の水質から、伏流した蛇尾川が河道に再湧出するだけではなく周辺の地下水を涵養し湧水として湧出していることが推測された。
- 2) 山中（2003）における地下水の調査結果に続いて観測された $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はいずれも環境基準値を下回るものであり、この5年間で顕著な汚染は生じていないと推測される。
- 3) 野外調査で水質測定を行うにあたって、DIGITAL パックテストは現地でおおまかな水質の結果を得るのに有効であることが考えられ、また野外には向かないが TNP-10 もサンプルを持ち帰って測定する際には扱いやすく、精度の高い結果が得られることが分かった。

謝辞

本調査の実施、水質分析等においては、ティーチングアシスタントの三木田 慎ならびに水文学野外実験 B の参加者各位の協力を得た。また自由学園の井戸から採水を行う際には調査の実施を許可して頂いた。記して謝意を表する。

文献

- 大橋真人・田瀬則雄・檜山哲哉・鈴木裕一（1994）：那須野原における地下水中の硝酸イオン濃度の時空間変動について。ハイドロロジー（日本水文学会），**24**, 221-232。
- 佐々木 実・鯉坂富夫・岡本 昭（1958）：那須野原の地質と地下水。地学雑誌，**67**, 59-73。
- 檜山哲哉・鈴木裕一（1991）：那須野原における地下水—特に水質の空間的变化と季節的变化について—。ハイドロロジー（日本水文学会），**21**, 143-154。
- 山中 勤・田中 正・浅沼 順・濱田洋平（2003）：栃木県那須扇状地における地下水と

- 河川水の交流. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 51-59.
- 涌井久司・山中 勤 (2006): 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**, 263-277.
- 渡部景隆・堤橋 昇 (1962): 那須野が原の“関東ローム” - 那須野が原の水理地質・4 -. 地質学雑誌, **68**, 451-460.
- (2009 年 6 月 26 日受付, 2009 年 10 月 14 日受理)