

栃木県那須扇状地における地下水と河川水の交流

Interaction between Groundwater and River Water in the Nasu Fan, Tochigi

山中 勤*・田中 正*・浅沼 順*・濱田 洋平**

Tsutomu YAMANAKA*, Tadashi TANAKA*, Jun ASANUMA* and Yohei HAMADA**

Abstract

Water levels were measured for 34 wells in the Nasu Fan, Tochigi prefecture, in the end of October, 2002. Water quality of groundwater (34 samples), river water (6 samples) and spring water (3 samples) were also analyzed. Local relief of groundwater table is considerably low, and the typical value of its gradient is approximately 1/100. At an elevation between 220 m and 250 m, groundwater table approaches to the ground surface. Revival of interrupted stream of the Sabi River can be found near around this elevation as well as several major springs forming creeks. Comparison of water quality between groundwater and river water suggests that the Sabi River and the Houki River can recharge groundwater. These facts indicate that there is active interaction between groundwater and surface streams. Groundwater level fell over most part of the fan in recent 10 years. The maximum reduction of the groundwater level exceeds 3 m. Increase in electric conductivity of groundwater was detected in some areas including urban areas.

はじめに

那須野原，あるいは那須野ヶ原ともよばれる那須扇状地は，栃木県北部に位置する面積およそ 400 km² の広大な扇状地であり，那珂川・箒川・蛇尾川・熊川などの諸河川によって形成された複合扇状地である．典型的な扇状地の例に漏れず，この地域においても扇頂から扇中央にかけての帯では地下水面が深く，河川は伏流する．このような水利用の困難さゆえに，那須扇状地は江戸時代後期まで開発の対象とは成りえなかったが，明治 18 年（1885 年）に国の直轄事業として那須疎水が開通し

た後，一転して開墾が進み，現在では扇頂部を除く大部分の地域が水田として利用されている．

那須扇状地の地下水は，那須疎水の開通以後も農業あるいは工業用水として利用されてきたが，戦後の過剰揚水により地下水位はかなり低下したと言われ，また昭和 40 ~ 60 年代に行われた那須疎水のライニング（コンクリート化）が地下水位の低下に拍車をかけたとも言われている（西那須野町史編さん委員会，1991）．このことは，那須疎水からの浸漏水が地下水涵養において重要な役割を担っていたことを暗示しており，また同様に，水田の水が透水性の高い扇状地礫層に浸透して地下

* 筑波大学陸域環境研究センター

** 筑波大学地球科学系（現：長寿科学振興財団）

調査対象地域概要

水を涵養しているということも容易に想像できる。最近では、高濃度の窒素肥料を溶かし込んだ水田水の浸透により、地下水の硝酸イオン濃度が上昇するという、いわゆる硝酸性窒素汚染が問題視されている（例えば、檜山・鈴木、1991；大橋ほか、1994；宗村ほか、2002）。

このように、那須扇状地における水循環は人間の活動範囲を規定する重要な自然要因の一つであったが、明治以降は逆に人間活動の影響を受けて質・量ともに変貌しつつある。さらに最近では首都移転先の有力候補として那須地区が注目されており、もし実現されればその変容の加速は必至であろうと思われる。したがって、本地域の社会的変容に伴う水循環の応答を継続的にモニターすることは極めて意義深いと考えられる。幸い、本地域においては1950年代以降幾つかの地下水調査事例があり（例えば、佐々木ほか、1958；山本・寺田、1980；檜山・鈴木、1991）、過去の状態との比較は容易に行える。しかしながら、扇状地の特性とも言える河川の伏流や再湧出など、地下水と河川水の間ダイナミックな交流現象については、従来の研究調査の間で見解に差異がある。例えば、佐々木ほか（1958）は基盤形状などを根拠として、蛇尾川が地下水涵養に果たす役割は僅少であること、また那珂川・箒川と那須扇状地地下水の交流はほとんどありえないことを推論した。一方、檜山・鈴木（1991）は、地下水表面形状や地下水溶存成分の空間分布パターンをもとに、蛇尾川・熊川のみならず箒川からも地下水涵養がなされている可能性を指摘している。しかしながら、地下水と河川水の水質の直接的な比較は示されていない。

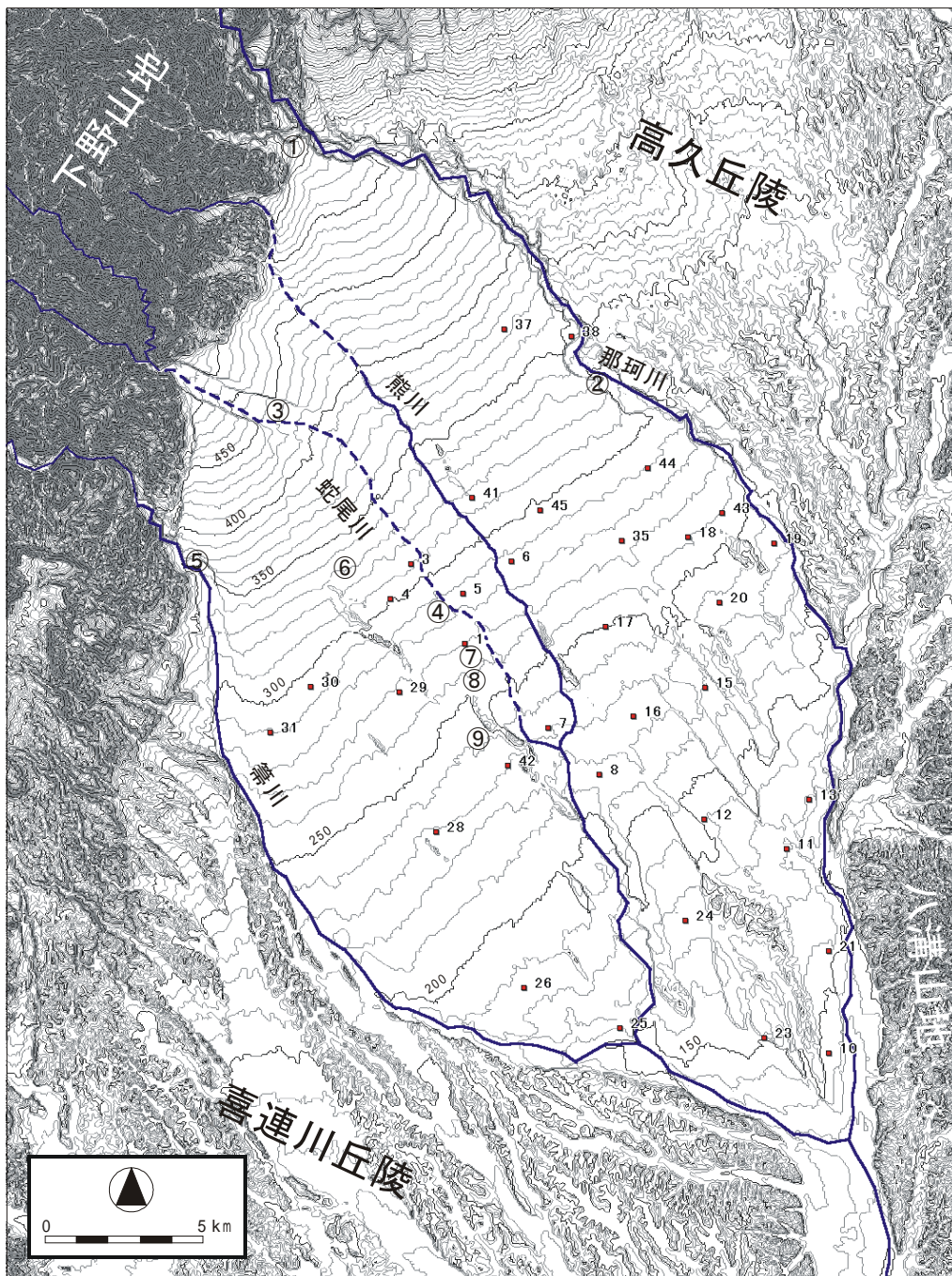
以上のような背景から、筆者らは2002年10月末に那須扇状地における水循環の現状を再確認するための調査を実施した。本報では特に、地下水と河川水の間交流現象に焦点をあててその結果を報告する。また、従来の調査結果との比較により、近年における水循環の様相の変化についても論じる。

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いる（第1図）。渡部・提橋（1962）の区分にしたがえば、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央部に相当する。北西縁は下野山地（帝釈山地）に接し、その境界に関谷構造線が走る。北東縁と東縁には北方の那須火山に源を発する那珂川が南流しており、それぞれ高久丘陵（白河丘陵）と八溝山地に境を接している。なお、いわゆる“那須高原”という呼び名は高久丘陵を指す。一方、西縁および南西縁は喜連川丘陵（塩那丘陵）と接し、その境界を西方の高原火山に源流をもつ箒川が流れ、扇状地南東端において那珂川と合流する。このため扇状地全体の形状は扇頂を要とする単純な扇形ではなく、扇端で閉じる紡錘形あるいは砲弾型に近い形状をもつ。那珂川・箒川に準ずる規模を持つ蛇尾川・熊川の二河川が扇状地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、水無川となっている。伏流区間は先行降雨の多寡によって変動するが、通常、蛇尾川は扇中央と扇端の境界にあたる標高220 m付近で再湧出する。また、この付近から扇端にかけてはかなりの数の湧水が認められ、イトヨや国指定天然記念物のミヤコタナゴの生息地となっている。扇中央から扇端にかけての一帯ではまた、諸河川による開析を受けて形成された分離丘陵が残存する。

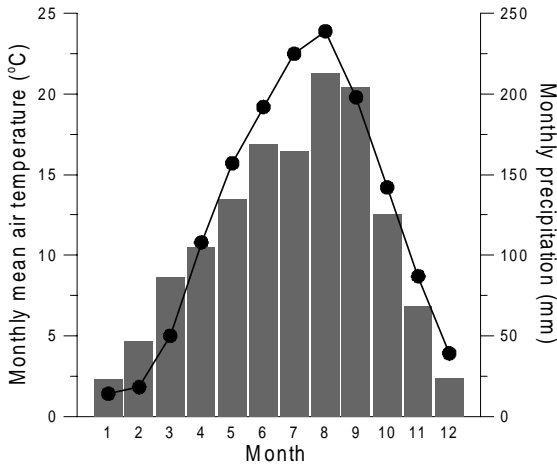
気象庁 AMeDAS データによる1978年～1997年の20年間の平年値によれば、那須扇状地のほぼ中央に位置する大田原市における年平均気温は12.2℃、年降水量は1365.4 mmである。また、最暖月（8月）の月平均気温は23.9℃、最寒月（1月）の月平均気温は1.4℃である。降水量の季節変化傾向は気温とほぼ同様であり、夏季に大きく、冬季に小さい（第2図）（檜山・鈴木（1991）の Thornthwaite

法を用いた試算によれば，この地域の年可能蒸発散量はおよそ 800 mm 程度である．

那須扇状地の形成過程と水文地質構造については，青野・尾留川（1968）や下野地学会（1979）を参考に，以下のようにまとめられる．



第1図 調査対象地域（□は観測井戸、丸付き数字は河川水・湧水の水質測定地点）

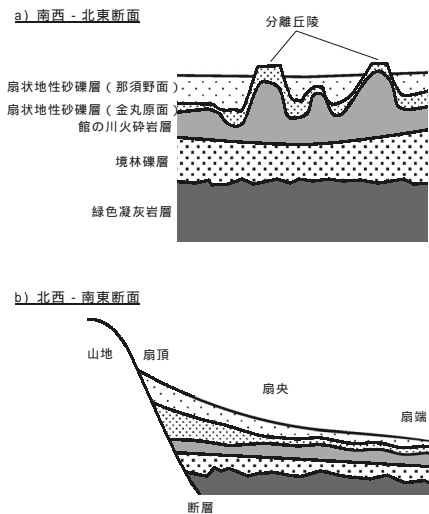


第2図 大田原における月平均気温（折れ線グラフ）と月降水量（棒グラフ）（気象庁 AMeDAS データによる 1978 年～ 1997 年の 20 年間平均）

- (1) 古第三紀漸新世 (3600 万年前～ 2500 万年前): 大規模な地殻変動により, 那須野原を含む栃木県の大部分が海面下に沈降する.
- (2) 新第三紀中新世 (2500 万年前～ 1300 万年前): 活発化した火山活動とともに火砕岩屑が海底に堆積し, 緑色凝灰岩が広範囲に形成される. これが那須扇状地の基盤をなす.
- (3) 新第三紀鮮新世 (1300 万年前～ 170 万年前): 隆起運動によって陸化する. 緑色凝灰岩は侵食され, 河谷が形成される.
- (4) 第四紀更新世中期 (100 ～ 10 万年前頃): 間氷期の海進により関東平野南部に古東京湾が形成. この時, 栃木県北部は海面下でないが, 広範囲にわたり湖水域が形成され, 境林礫層 (柳林礫層), 続いてその上位に館の川火砕岩層 (高原累層) が堆積する (両層を合わせて川崎層群と呼ぶが, 年代的には南関東の成田層群に相当する). 那須扇状地の分離丘陵 (権現山面) や南隣の喜連川丘陵はこの火砕岩層からなる. 湖水域が縮小, あるいは消滅した時期には河谷が刻まれた.

- (5) 第四紀更新世後期 (10 万年前頃): 関谷構造線における断層運動により那須野原一帯が陥没. 上流域を中心に砂礫層が厚く堆積し, 古期扇状地が形成される. この際の堆積物 (金丸原面) は分離丘陵上にわずかに残存しているが, 侵食力が強化された時期に一度削り取られる.
- (6) 第四紀更新世終期 (1 ～ 2 万年前頃): 最終氷期にふたたび堆積が促進され, 現扇状地面の大半を占める那須野面が形成される. 那須野面は金丸原面よりも新しいが, 一度切り込んだ後に再堆積したものであるため, より低位にある.
- (7) 第四紀更新世末期および完新世 (最近 1 万年以内): 扇頂部において熊川・蛇尾川などによる小規模な扇状地が形成される. このため, 扇頂部付近は傾斜がやや急で, 複合扇状地の様相を呈す.

以上のように, 那須扇状地の地下には館の川火砕岩層と緑色凝灰岩層の二つの難透水層がある (第 3 図). 館の川火砕岩層の上位には数層の扇状地性砂礫層が堆積しており, ここに浅層地下水が存在する. また, 館の川火砕岩層の下位, 緑色凝灰岩層との間にある境林礫層に深層地下水 (被圧地下水) が存在する. 本研究ではこのうち浅層地下水のみを調査対象とする.



第 3 図 那須扇状地の地層断面の模式図

調査方法

2002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、調査地域を理解する上で重要となる幾つかの地点（岩盤河床、断層崖、湧水など）を視察しながら河川水と湧水の簡易水質測定を行った。31日には計34軒の民家を訪問してまわり、井戸の測水調査と簡易水質測定を行った。調査対象とした井戸は檜山・鈴木（1991）によって対象とされた井戸と同一であり、扇中央部から扇端部にかけての広い領域をカバーしているが、扇頂部には適当な井戸が存在しない（第1図）。河川水と湧水の水質測定は第1表に示す9地点で実施し、その位置は第1図に示すとおりである。

測水調査は水面計と折尺を用いて行った。地面から井戸枠の天端までの高さ、ならびに天端から地下水面までの深さを測定し、檜山・鈴木（1991）によって得られている地盤標高をもとに地下水面標高を算出した。水質の測定項目は、水温・電気伝導度・pH・RpH・硝酸イオン濃度の計5項目で

第1表 河川水・湧水の水質測定地点と測定結果

No.	場所	水温 ()	EC (μ S/cm)	pH
	木ノ俣川	8.1	70.9	6.59
	那珂川 (鳥野目河川公園)	12.4	109.7	6.57
	蛇尾川 (伏流直前)	11.0	125.7	6.35
	蛇尾川 (再湧出直後)	13.8	91.4	6.90
	箒川(堰場橋上流)	11.6	186.5	7.33
	那須疎水	11.6	90.2	7.46
	出釜湧水	16.2	99.1	6.30
	津室川湧水	14.0	118.6	6.24
	乃木清水	15.5	126.8	6.24

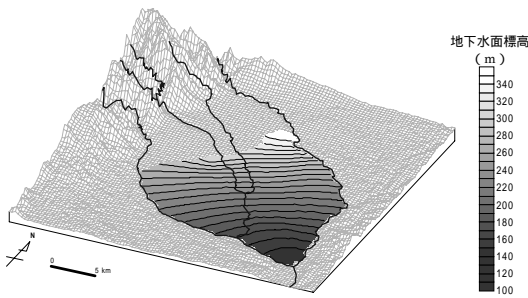
あり、全て現地で測定した（ただし、硝酸イオン濃度は地下水のみ）。水温と電気伝導度は携帯型ECメーター（Yokogawa SC82）、pHとRpHは携帯型pHメーター（Yokogawa PH81）を用いてそれぞれ測定した。硝酸イオン濃度はパックテスト（共立ZAK-NO₃）により測定した。この際、亜硝酸イオンの含有量は少ないと考え前処理剤は使用していない。このため、亜硝酸イオンが多く含まれるような場合には測定値が過大評価されている可能性があるが、硝酸性・亜硝酸性窒素濃度の空間的差異を定性的に議論する際にはそのような測定値も有意であると考えた。

なお、以上の調査は平成14年度水文学野外実験A（筑波大学自然学類）の一環として実施された。

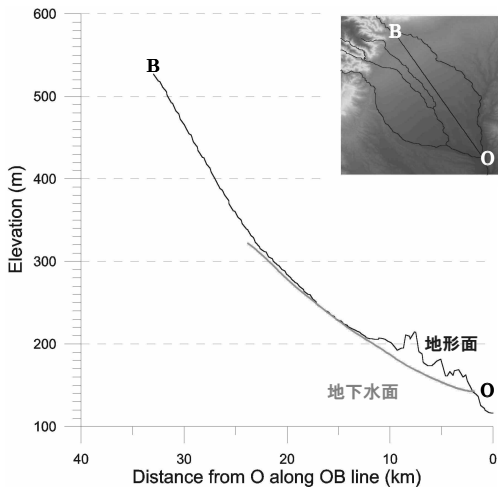
結果と考察

(1) 地下水面形状からみた地下水流動と河川・湧水との関係

第4図に地下水面図（地下水面標高の等高線図）を示す。図から読み取れる地下水の水平流動方向は地形面の広域的な最大傾斜方向とほぼ一致する（ただし、分離丘陵ならびにその周辺部では不明）。傾斜の大きさは扇端部に向かうにつれ小さくなるが、地下水面標高200～300mの範囲の平均勾配はおおよそ1/100であり、佐々木ほか（1958）によって報告された値（1/101）とほぼ完全に等しい。佐々木らにしたがい、帯水層の透水係数を0.0044 m/s、有効間隙率を0.25と仮定すれば、地下水の平均間隙流速（実移動速度）は15.2 m/dayと算定される。地下水面形状の起伏の小ささは観測井戸の分布密度が小さかったことに起因するものとも考えられるが、扇中央部においてより高密度な測水を行った山本・寺田（1980）の調査でも同様の結果が得られている。したがって、このようになだらかな地下水面の形状は、扇状地面自体が起伏に乏しいことと帯水層の透水性が高いことに起因するものと思われる。



第4図 地下水面図



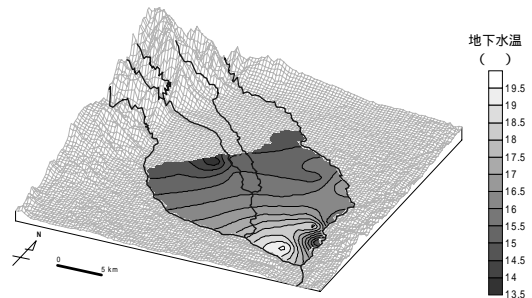
第5図 測線OBに沿った地形面および地下水面の断面図(右上オフセットは測線OBの位置を示す)

第5図は測線OBに沿った鉛直断面図であるが、これを見ると、標高220～250mの地域で地下水面と地表面が接近している。この標高帯は蛇尾川の再湧出地点や幾つかの代表的な湧水(出釜湧水・津室川湧水・乃木清水など)の標高とも近い。このことから、蛇尾川の再湧出や他の湧水群は第4図に示された広域的な地下水流動と密接に結びついたものであることが分かる。

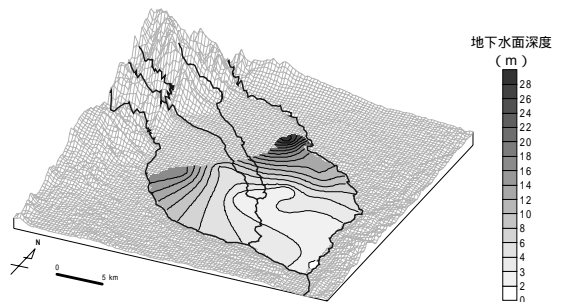
(2) 地下水温からみた地下水流動

第6図に地下水温の等値線図を示す。一般に、地下水の温度は同深度の地温とほぼ等しく、地温の深度分布は地表面からの熱伝導に支配される。それゆえ、浅層地下水の水温は地表面から地下水面までの深さに大きく規定される。しかしながら今

回の調査結果では、一部の地点を除いて、地下水面深度分布図(第7図)よりもむしろ地下水面図(第3図)との類似性が高く、地下水温の等値線は地下水面等高線とほぼ平行に走っている。この時期の表流水の水温(第1表)は平均気温と同様に10前後を示していたので、高温域の地下水はより温暖な時期に涵養され、低温域は比較的新しく涵養されたとの解釈も成り立ちうるが、先に示したように本地域における浅層地下水の水平流動速度は15 m/day(年間5.5 km)程度と推定されるので、そのような可能性は少ない。注目すべきは扇端部の地下水温が年平均気温をはるかに上回っている点である。このことは、地下の熱源からの直接的な熱伝導、もしくは深部を流動した地下水の混合などを考慮に入れる必要があることを示唆するが、深井戸に関する調査は行っていないので本報ではこれ以上の議論は避ける。



第6図 地下水温の空間分布



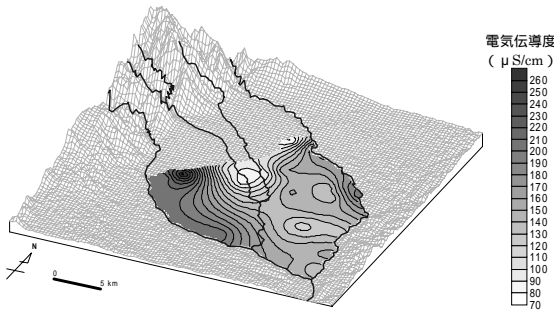
第7図 地下水面深度(地表面から地下水面までの深さ)の空間分布

(3) 水質から見た地下水と河川水の交流

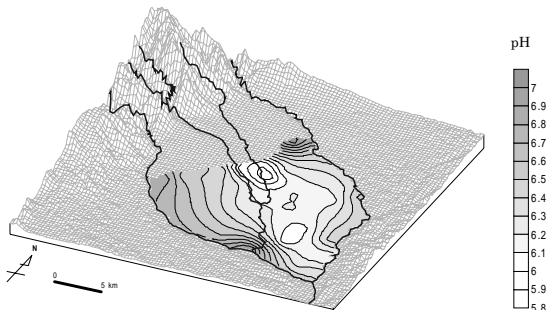
電気伝導度(第8図)・pH(第9図)・RpH(第10図)の3項目は極めて類似の空間分布傾向を示した。すなわち、蛇尾川・熊川合流地点のやや上流寄りでは低い値を示し、篤川沿いに高い値を示すという傾向である。蛇尾川の水質はEC・pHともに低い値を示し、篤川の水質はEC・pHともに高い値を示していることから(第1表)、これらの河川による

地下水涵養の影響が水質の空間分布に反映されていると考えられる。前述したように、佐々木ほか(1958)はこれらの河川による扇状地地下水の涵養に対して否定的であるが、今回の水質測定結果は、檜山・鈴木(1991)同様、河川による地下水涵養の可能性を積極的に支持する。しかしながら、対象とした水質項目は地下水流動過程での保存性が悪く、水田水の混入などの影響も明確にはできない。この点、水の安定同位体トレーサーは地下水流動における保存性が高く、水田水の混入の識別にも利用できるため、より確かな証拠を得るにはそれらのトレーサーを利用する必要がある。

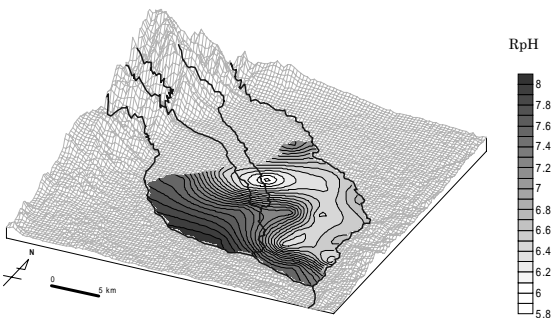
なお、硝酸イオン濃度は上記3項目の分布とは異なる分布パターンを示している(第11図)。これは、硝酸イオン濃度分布が広域的な地下水流動系よりも局所的な負荷源の影響を受けやすいことを示している。しかしながら、硝酸イオン濃度の値そのものは最高で20 mg/lであり、硝酸性窒素濃度($\text{NO}_3^- \text{-N}$)に換算すると4.6 mg/lでしかない。したがって、環境基準値(10 mg/l)を上回るレベルではなく、少なくとも今回調査対象とした地下水に関しては汚染が心配されるほどのものではない。



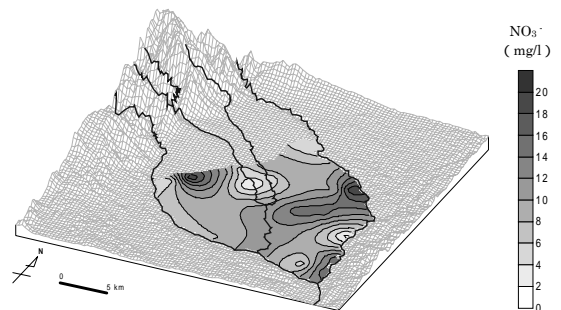
第8図 地下水の電気伝導度の空間分布



第9図 地下水のpHの空間分布



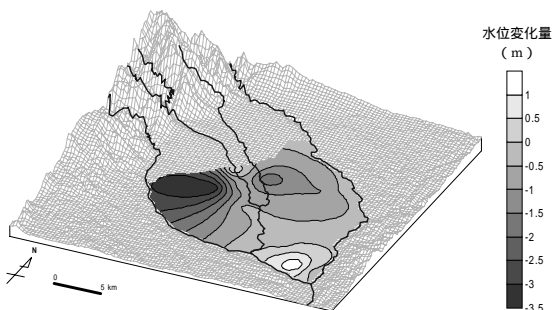
第10図 地下水のRpHの空間分布



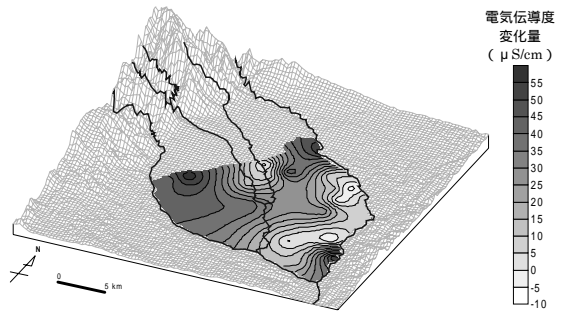
第11図 地下水の硝酸イオン濃度の空間分布

(4) 最近 10 年間における地下水環境の変化

次に、1989 年 10 月末に実施された檜山・鈴木 (1991) の調査結果と今回の調査結果との比較を試みる。調査時期は本研究と同じく 10 月末なので季節変化の影響は無視することができる。無論、先行降雨状況が全く同一であるとは考えられないが、両者の差異は主に 10 年余の長期的変化を反映していると考えられる。第 12 図は地下水位変化量 (2002 年の地下水面標高の値から 1989 年の値を差し引いた値) の空間分布を示している。この図から、蛇尾川再湧出地点付近と扇端部を除けば、地下水位は広い範囲にわたり低下しており、その傾向は特に蛇尾川と箒川の間で顕著であることが読み取れる。一方、電気伝導度について見てみると、一部の地域を除き、広域的に増加傾向を示している (第 13 図)。特に蛇尾川と箒川の間で増加量が大きい。蛇尾川と箒川に挟まれたこの地域では、那須疏水による大規模な水田灌漑が行われていると同時に、多数の工場が立地している。そのような人間活動と地下水位・水質との間の因果関係は現時点では特定できないが、今後詳細に調査する必要があるだろう。また、黒磯・大田原・西那須野・湯津上などの市街地では総じて電気伝導度が増加していることも特筆に値するだろう。



第 12 図 地下水位変化量 (2002 年 10 月の測定値 - 1989 年 10 月の測定値) の空間分布



第 13 図 地下水の電気伝導度変化量 (2002 年 10 月の測定値 - 1989 年 10 月の測定値) の空間分布

おわりに

那須扇状地の水循環に関する調査を行い、その結果を報告した。調査項目は限られているため確証が得られない部分も多いが、従来の調査結果との比較を含め、本研究によって明らかになった点を要約すると以下のようである。

- 1) 地下水面はきわめてなだらかな形状をしており、その平均的な勾配は 1/100 程度である。この値はおよそ半世紀前に行われた調査結果と比較してほとんど変化がないが、蛇尾川と箒川の間で最近 10 年間に地下水位が最大で 3 m 以上低下している。
- 2) 透水係数を 0.0044 m/s、有効間隙率を 0.25 と仮定すると、地下水の移動速度は概ね 15 m/day (= 5.5 km/yr) 程度と見積もられる。
- 3) 標高 220 ~ 250 m の地域では地下水面と地表面が接近しており、蛇尾川の再湧出地点や湧水群もその近辺に認められる。すなわち、伏流河川の再湧出や幾多の湧水は広域的な地下水流動と密接に結びついている。
- 4) 地下水と河川水の水質の類似性やその地理的分布パターンから見て、蛇尾川 (そしておそらく熊川) や箒川による地下水涵養が顕著な地域が存在する。

5) 市街地ならびに蛇尾川と碯川の間の地域では、最近 10 年間の電気伝導度の上昇が著しく、人為的な汚染の影響が疑われる。しかし、今回対象とした地下水については硝酸性窒素汚染は認められない。

謝辞

測水調査の実施にあたっては、ティーチングアシスタントの橋本大輔・杉原修子の両氏、ならびに水文学野外実験 A の参加者各位の協力を得た。名古屋大学・檜山哲哉助教授には井戸リストならびに 1989 年の調査結果を提供して頂いた。井戸の所有者の方々には調査の実施を快く許可して頂いた。記して謝意を表す。なお、作図用の標高データとして国土地理院の数値地図 50 m メッシュを利用した。

文献

青野壽郎・尾留川正平(1968): 日本地誌 第 5 卷 関東地方総論・茨城県・栃木県。二宮書店, 455-461。
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(日本水文科学会), 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。

下野地学会(1979): 『栃木の地質をめぐって(日曜の地学 - 9)』 築地書館 pp 2-13 pp 28-32。
西那須野町史編さん委員会(1991): 西那須野町の自然(西那須野町史双書 1)。西那須野町, 25-83。

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(日本水文科学会), 21, 143-154。

宗村広昭・増田未生・後藤 章・水谷正一(2002): 那須野ヶ原における地下水窒素汚染の実態と汚濁機構の解明。農業土木学会論文集, No. 219, 71-79。

山本莊毅・寺田 稔(1980): 那須扇状地の地下水について。立正大学文学部論叢, 67, 17-36。

渡部景隆・提橋 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。

(2003 年 5 月 20 日受付, 2003 年 7 月 7 日受理)