

新潟市西部砂丘地の地下水の水質化学

佐藤 修*・竹内 秀秋**・坂田 利一**

Hydrochemical observation of groundwater in the west Niigata dune

by

Osamu SATO, Hideaki TAKEUCHI, Toshikazu SAKATA

(Abstract)

We determined the chemical compositions and tritium concentration of precipitations sampled from the rooftop of our institute building and the groundwater collected from four wells in the Niigata University campus and irrigation wells in the dune area in west Niigata city.

The precipitations were classified into two types on the basis of chemical compositions: the low electrolyte type collected in the "baiu" season and the high electrolyte type sampled in the snow fall season. The high electrolyte water was rich in sea salt and sulfate ion. The sea salt must be carried from the Japan sea by strong NNW winds. The excess sulfate ions carried by the winter-monsoon are concluded to be of continental origin taking into account the direction of winds and the geographical situation of Niigata city.

The sulfate and nitrate ions concentration of the irrigation water were higher than the expected values from the chloride ion concentrations of precipitation samples. These anions must be condensed by the percolation process caused by irrigation in farmlands.

The mean tritium concentration of precipitations was 27.7 pCi/l (1987). The groundwater from observation wells in Niigata University can be separated into two layers, the upper layer having low T and low electrolyte concentrations and the lower layer having high T and high electrolyte concentrations. Many groundwater samples showed a low T-concentration corresponding to that of recent precipitation but some samples had a higher T-concentration than 40 pCi/l and three samples contained quite low tritium (less than 20pCi/l). A model of the groundwater having more than two layers is necessary to explain the behavior of the chemical composition and T-concentration of groundwaters in the dune.

Key words: dune, groundwater, precipitation, water quality, tritium

キーワード: 地下水, 降水, 水質, トリチウム

はじめに

新潟砂丘の上に位置する新潟大学の構内に設けられた観測井戸で、1971年から地下水位の観測を行ってきた。水位の年間の変動の様子は複雑である。また水位計の調整時に行った電気伝導度・水温等の観測でも、地下水の水質が一定せず、地下水の流動は必ずしも恒常的ではないことが分かっている。

* 新潟大学積雪地域災害研究センター ** 新潟大学農学部

新潟市砂丘地の畑地の灌漑は久しく降水のみに頼っていたが、スプリンクラーによる地下水の散水が普及して畑作が発展してきた。しかし近年は、一部では農地の宅地化が急速に進行し、冬季には融雪のための地下水が利用される傾向もみられ、地下水への人間の役割も変わりつつある。過大な揚水による地下水位の低下や、灌漑揚水の悪化も報道されるようになった。地下水に与える人間活動の影響が強くなってきている。

砂丘地土壌は浸透性、排水性は良好であるが、保水性に乏しく、塩基保持容量も極端に小さい、言い換えれば土壌の緩衝力が小さい。それゆえ、降水や散水された地下水の化学成分が砂丘地土壌、さらに地下水に直接大きな影響を与える。したがって、降水や灌漑に使用する地下水の水質の変動には十分な注意を払う必要がある。最近降水の酸性化が問題にされ、雨の成分の地下水の水質への影響も注意しなければならない。

砂丘の地下水利用が増大する傾向にあり、しかも、地下水の涵養の環境が変化しつつあるにもかかわらず、まとまった地下水の調査が行われていない。この報告は、現在の新潟の降水、砂丘地の地下水の水質を調査し、今後の新潟砂丘地の地下水の流動と水質問題を考える基礎資料を得ることを目的とした予備的調査の結果である。

II 調査場所、試料採取法および分析方法

1. 調査場所と試料採取法

降水の採取：調査期間は1986年5月から12月と1987年4月から1987年12月までである。新潟大学積雪地域災害研究センターの屋上に採水器を設置して試料をみつめた。5lのポリエチレン製のタンクに直径25cmのポリエチレン製の漏斗をつけて採水器とした。出来る限り一降雨毎に試料を集めたが、試料の量が分析に充分でない場合などもあり、完全に全ての試料を集めることは出来なかった。積雪は融解させて試料とした。

観測井戸の地下水：新潟大学構内の砂丘の頂上に位置する観測井戸No.1、砂丘の麓に位置する観測井戸No.2および新潟大学理学部生物学科の生物培養用の井戸を利用した(図-7)。砂丘頂上の観測井戸は自然科学研究科の建物建築のため使用不可能となるため、井戸の位置を約45cm南東にうつした観測井戸No.3を予め準備し両者の変化を追跡して、砂丘頂上の地下水の変化の観測値の連続性を確保するよう努めた。

観測井戸から井戸採水器SY-1K-B(吉野計器製作所)を用いて、観測井戸No.1とNo.3では上層(表面水)と下層(井戸最深部)、観測井戸No.2は上層のみから毎月一度採水した。

井戸の仕様の概略を表-1に示した。

砂丘地の地下水：新潟市の西部の砂丘地帯の地下水として、砂丘地で広く行われているスプリンクラーによる畑地灌漑用の水をみつめた。試料採集は主に1987年7月23~24日におこなった。採水地点を図-9に示した。

砂丘地土壌と松葉：新潟大学周辺(図-3)の土壌(●)を地表から約30cmの深さから採取した(1987年5月8日)。未風乾土50gと脱塩水250mlをポリビンに入れ10分間浸とう後、浸出液をろ過し、分析に使用した。分析結果は別に求めた水分から、土壌水の濃度に換算した。

風送塩の付着状況を見るために松林の松葉を12月24日に地上約2mのところから採取した(図-3の□)。松葉10gと脱塩水100mlをポリビンに入れ10分間浸漬したのち、ろ液を分析に用いた。分析結果は、100ml水の濃度として表した。

表-1 新潟大学構内の観測井戸の仕様

Table 1 Specifications of observation wells in Niigata university campus

井戸名	新潟大学構内 所在地	井戸深さ m	ストレーナ位置 m	標高
観測井 No 1	新潟大学災害研西30m	34.14	30~34	24.23
観測井 No 2	新潟大学グラウンド	13.00	6.5~13	8.49
観測井 No 3	新潟大学災害研南5m	40.00		
理学部生物学科井戸	理学部	40.00	28.5~34.5	未測定

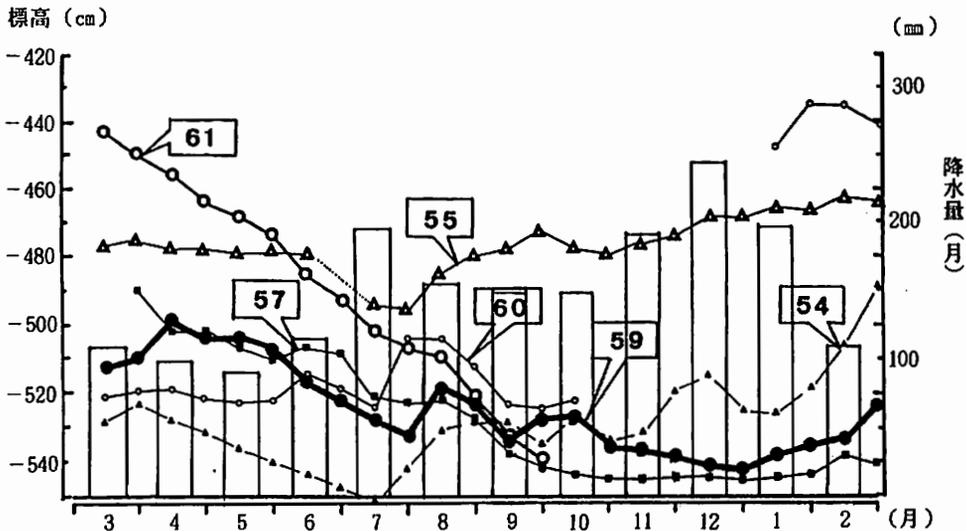


図-1 観測井No.2の地下水位変動(線グラフ)と平均月降水量(棒グラフ)
(鈴木幸治原図から改変)

Fig. 1 Variations of groundwater level at observation well No. 2 (line graph) and monthly mean precipitation in Niigata (bar graph)
(Modified from K. Suzuki unpublished figure).

2. 試料の調整

採水時に水温と電気伝導度を携帯用電気伝導度計(横河北辰電機SC-51)で測定し、25°C換算の電気伝導度を求めた。また、pHはガラス電極法によって実験室で測定した。

試料水は採水後直ちに、孔径0.45 μmのニトロセルロースフィルターを使用して分析用試料とした。イオンクロマトグラフ分析用の試料はさらに孔径0.20 μmのフィルターでろ過した。

トリチウム測定用試料水は原水を直接蒸留した。蒸留の際には有機物除去の目的で過酸化ナトリウムと過マンガン酸カリウムをそれぞれ試料水の0.1%添加し(科学技術庁, 1977)、異臭のするものについてはさらに活性炭を少量加えた。蒸留器は硬質ガラス製フラスコに冷却器およびマントルヒーターを組み合わせたものを使用し、蒸留用のフラスコが完全に乾燥するまで蒸留をおこなった。

3. 分析方法

水質分析: 陽イオンは島津原子吸光/フレイム分光光度計AA-640-12を使用して、原子吸光法で

分析した（日本分析化学会北海道支部編，1971）。なお，カルシウムイオン，マグネシウムイオンの分析をおこなう場合，ケイ酸やアルミニウムなどの干渉を抑えるために，1%塩化ランタン溶液を試料水の10%添加した。

塩化物イオン，硫酸イオン，硝酸イオン，亜硝酸イオンの分析には，島津イオンクロマトグラフHIC-6 Aに陰イオン交換カラムShim-pack IC-A 1を装着し，2.4mMトリスアミノメタンと2.5mMフタル酸の混合液を移動相として，イオンクロマトグラフ法によって分析した。

ブロム・クレゾール・パープルを指示薬とするアルカリ度を測定した。表では，アルカリ度の主因である炭酸水素イオンとして表示した。

トリチウム濃度の測定：蒸留した試料水45mlと液体シンチレーターPICO-Fluor LLT（Packard）55mlを100mlテフロン製バイアルに取り，均一になるまで振盪，攪拌し測定試料とした。化学ルミネッセンスの影響を除くため約12℃の冷蔵庫内で24時間程放置後，低バックグラウンド液体シンチレーション計数器（Aloka LSC-LB1）を用い，既報の方法に従い測定した（仲川ほか，1986，1987）。バックグラウンド水には，蒸留精製した新潟平野の天然ガス付随水を使用した。

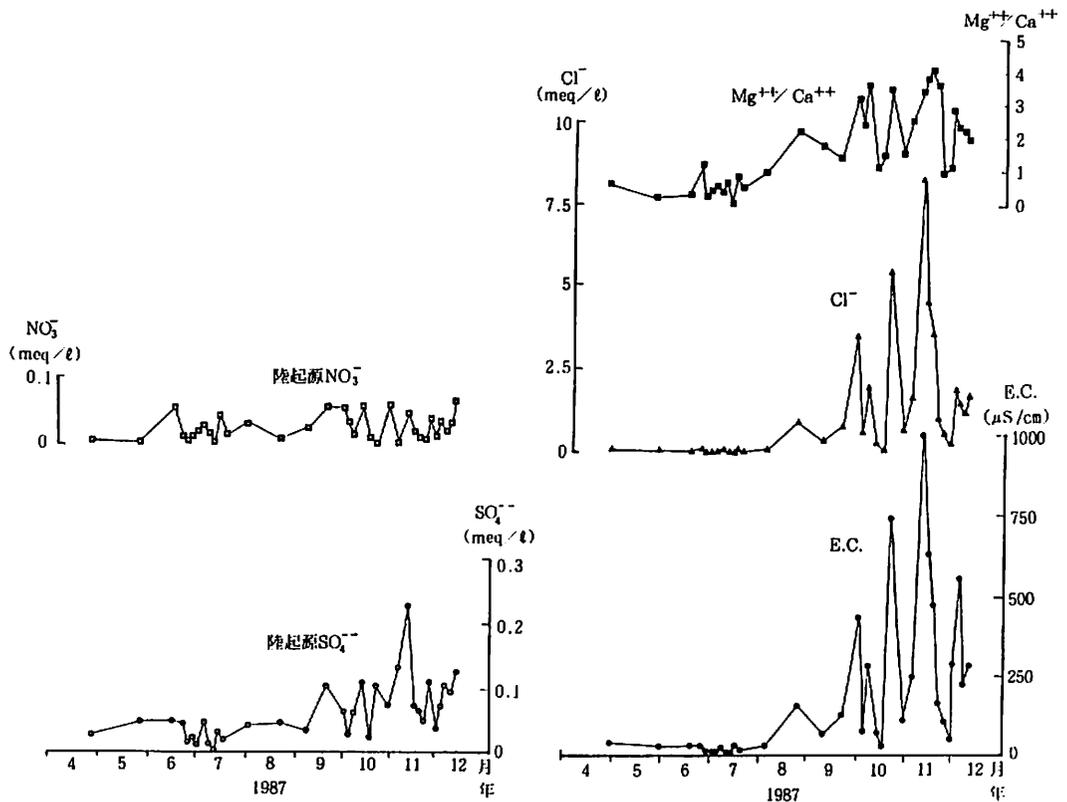


図-2 降水の電気伝導度，塩化物イオン濃度， Mg^{2+}/Ca^{2+} ，陸起源の硫酸イオン濃度，硝酸イオン濃度

Fig. 2 Electrical conductivity, chloride ion concentration, Mg^{2+}/Ca^{2+} , sulfate ion concentration originated from land and nitrate ion concentration in precipitation.

Ⅲ 雨水の性質と土壌の塩類等

新潟大学構内と新潟気象台の降水量を比較すると冬季に新潟大学の降水量が低い値を示す傾向がある。新潟大学構内は海岸に近く、冬季に特に風が強いため、普通の雨量計では雪を十分に捕らえ切れていない可能性があり、降水量のデータとしては、新潟気象月報の値を採用した。

多年平均月別降水量(図-1)からうかがえるように、新潟市の月別降水量には二つのピークがある。梅雨後期の7月を中心とする時期と、秋霖から降雪期に続く11月～2月である。これらの降水機構は違っており、当然風向きも異なる。新潟地方気象台の最多風向から概括すると、冬季には海からの北北西風が、春季、初夏は南南西風、梅雨期には陸風の北東風、秋霖は南の風が卓越する。

降水量、降水の化学成分、トリチウム濃度の分析結果等はまとめて、表-2に示した。1987年のデータから電気伝導度、塩化物イオン、 Mg^{2+}/Ca^{2+} 、陸起源の硫酸イオン、硝酸イオンの各試料毎の値を比較できるように図示した(図-2)。電解質の濃度を電気伝導度で代表させると、明らかに海からの風が強くなる11月から電解質濃度が高くなる。電解質濃度の高い降水は塩化物イオンが多く、明らかに海塩の影響を示している。二価の陽イオンについては、陸風の時期の降水にはカルシウムイオンが多く、海からの風によってもたらされた降水にはマグネシウムイオンが多いため、 Mg^{2+}/Ca^{2+} は雨がどのような経路を通った気団に由来するかを判定する指標となる。 Mg^{2+}/Ca^{2+} の変動は塩化物イオンの変動と似た傾向を示し、やはり、高電解質濃度の降水には海塩の影響が大きい。特に、1987年の12月の雨の Mg^{2+}/Ca^{2+} は海水の比5.26に近付いており、陸起源の物質の割合は極めて小さい。

近年、降水に人間活動の影響が強くなり、その一つとして酸性雨が世界各地で災害を引き起こしている(ブラウンら、1986、ハワードら、1986)。酸性雨の影響が強くなるのは、土壌の緩衝力の小さいポドゾル土壌等の地域である。砂丘は電解質が洗脱したポドゾルとは違うが、やはり緩衝力が小さい(塩基置換容量3～4 me/100g土壌、塩基飽和度数% (新潟県農業試験場、1962))ので、酸性雨の影響を受けやすく、地下水にも影響が早く現れると予想される。

酸性雨との関連から、硝酸イオンと硫酸イオンの濃度が注目される。各々の試料の塩化物イオン濃度

から海水に由来する硫酸イオンを求め、降水の硫酸イオンから差し引いて陸起源の硫酸イオンを求めた。海水中の硝酸イオン濃度は塩化物イオン濃度に比べれば無視できる程小さいので、降水中の硝酸イオンは陸水に由来するとした。塩化物イオンと硝酸イオンは降水量の分布が違っており、硝酸イオンが海に由来するのではなく、大気に由来することを示唆している。塩化物イオンと硫酸イオンは似た分布をするが、この値は海水由来の硫酸イオンを引いた値であるから、このパターンの類似性を海塩の混入によって説明することは

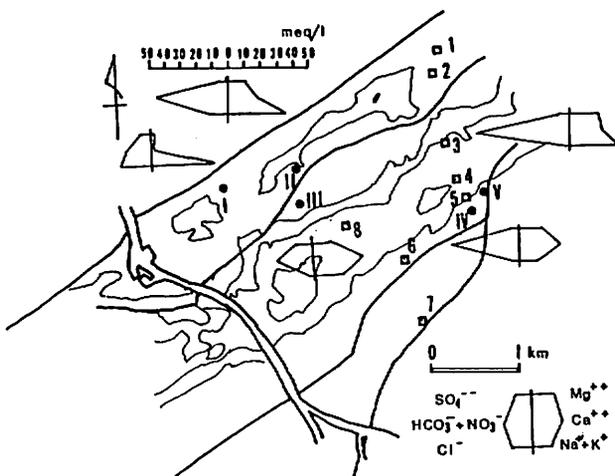


図-3 土壌および松葉の採集地点と土壌水の主成分のヘキサダイアグラム

Fig. 3 Sampling locations of soils and pine leaves and pattern diagram for major ions in soil water.

出来ない。硫酸イオンの多い季節でも海水由来の硫酸イオンのみでは説明できず、大気の影響があることになる。北北西の風とともに硫酸イオンが高くなることは、大陸で消費された化石燃料由来の硫酸イオンが雪とともに新潟に降っていることを暗示している。しかし、冬季日本海側で降水中に硫酸イオンが多い原因として角皆(1977)は、Pb-210の濃度の測定結果を考慮して、上部対流圏や成層圏に存在する硫酸イオンが、強い風の吹き出しによる上下層の混合がおり、それにより、硫酸イオンが増加したと推定している。硫酸イオンの起源については、今後さらに検討を続ける必要がある。

表-2 降水の化学分析結果
Table 2 Analytical results of precipitation.

月 日	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	PH	EC (μS/cm)	トリチウム (pCi/l)	気象台 雨量 (mm)
5.6	0.024	0.006	0.068	0.020	0.052		0.052	0.013	5.9	10.3	40.6 ± 12.5	12.5
5.11	0.511	0.040	0.185	0.102	0.515	0.363	0.355	0.298	4.8	85.4		2.5
5.14-15	0.038	0.010	0.065	0.020	0.047	0.042	0.030	0.013	5.5	15.8	31.6 ± 11.5	19.5
5.20	0.077	0.009	0.063	0.026	0.095	0.022	0.047		5.2	20.2	36.0 ± 12.0	10.5
5.24	0.154	0.013	0.125	0.084	0.401	0.028	0.109	0.013	6.1	32.7	153.0 ± 12.6	6.5
5.29-6.25	0.154	0.004	0.039	0.012	0.048	0.056	0.023	0.149	5.4	14.7	27.4 ± 8.9	98.5
6.25-7.3	0.034	0.007	0.044	0.018	0.048	0.013	0.037		5.0	22.6		52.0
7.5-28	0.031	0.006	0.032	0.011	0.035	0.006	0.034		4.9	13.8	57.7 ± 11.8	150.5
8.4-6	0.053	0.007	0.062	0.021	0.053		0.021	0.038	6.4	30.4	16.0 ± 11.3	45.5
8.17	0.059	0.013	0.095	0.020	0.050	0.028	0.085	0.013	5.4	14.7	30.9 ± 11.2	13.5
9.3	0.098	0.013	0.155	0.049	0.128	0.067	0.040	0.109	6.2	42.2	10.9 ± 10.9	30.0
9.10	0.609	0.031	0.318	0.072	0.638		0.167	0.041	6.4	137	39.0 ± 11.2	8.5
9.14-15	0.039	0.005	0.045	0.013	0.048	0.007	0.027	0.013	5.4	22.4	51.8 ± 10.4	21.5
9.18-19	0.026	0.002	0.030	0.012	0.036		0.022	0.013	6.1	14.4	11.2 ± 10.0	3.0
10.1-3	0.531	0.034	0.147	0.122	0.643		0.161	0.030	5.6	98.0	57.6 ± 9.5	16.0
10.10-21	0.077	0.008	0.050	0.023	0.091	0.009	0.048		5.2	23.0	30.0 ± 9.2	136.0
10.21-11.10	0.289	0.017	0.047	0.061	0.319		0.088		4.8	48.0	11.1 ± 9.0	87.0
11.10-20	6.32	0.143	0.379	0.678	7.41	2.24	0.092	0.114	4.6	410	21.3 ± 9.1	15.5
11.20-30	1.66	0.053	0.131	0.361	1.93	0.023	0.285		4.6	113	25.0 ± 11.2	47.0
11.30-12.7	1.85	0.056	0.139	0.395	2.08	0.019	0.308		4.4	235	23.7 ± 9.6	26.5
12.12-15	1.86	0.066	0.160	0.396	2.10	0.038	0.358		4.6	236	35.5 ± 9.2	8.0

月 日	Na ⁺ (meq/ℓ)	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	PH	EC (μS/cm)	トリチウム (pCi/ℓ)	気象台 雨量 (mm)	大 学 降水量 (mm)
4.29-5.29	0.171	0.023	0.043	0.029	0.186		0.045		5.2	34.7	17.8 ± 5.7	145.0	
5.29-6.25	0.065	0.008	0.052	0.013	0.085		0.051		5.1	22.5	47.4 ± 9.6	52.0	
6.29-7.9	0.055	0.020	0.029	0.029	0.053	0.054	0.059		4.6	27.0	46.3 ± 11.5	12.5	
7.9-13	0.081	0.009	0.013	0.017	0.096	0.010	0.055		4.3	24.8	31.9 ± 11.3	85.5	84
7.13-14	0.026	0.005	0.010	0.003	0.027	0.005	0.018		4.9	8.47	46.0 ± 10.3	11.0	14
7.14-15	0.017	0.006	0.005	0.002	0.014	0.007	0.024		4.5	8.89	38.7 ± 11.4	8.0	16
7.17-18	0.022	0.008	0.008	0.004	0.033	0.017	0.015		5.5	9.50	39.4 ± 9.5	28.5	11
7.24-25	0.050	0.012	0.020	0.009	0.049	0.022	0.053		4.7	18.7	17.3 ± 11.2	24.0	18
7.25-27	0.029	0.008	0.006	0.004	0.031	0.013	0.015		4.8	9.47	37.2 ± 11.4	20.5	7
7.27-28	0.007	0.002	0.001	+	0.010		+		5.1	4.13	16.6 ± 11.2	37.5	57
7.31	0.075	0.012	0.017	0.015	0.072	0.042	0.037		4.6	27.4	25.6 ± 11.3	7.5	6
8.4-6	0.029	0.005	0.011	0.006	0.035	0.012	0.020		5.1	12.2	26.9 ± 10.0	68.5	45
8.6-31	0.104	0.008	0.023	0.024	0.118	0.027	0.052		4.6	29.1	28.3 ± 10.0	97.0	68
8.31-9.17	0.848	0.041	0.081	0.184	0.911	0.007	0.162	0.030	6.2	151	25.9 ± 9.8	27.5	15
9.17-10.1	0.341	0.016	0.041	0.074	0.370	0.023	0.072		5.3	64.4	39.1 ± 9.9	32.5	30
10.1-16	0.705	0.052	0.097	0.142	0.781	0.054	0.184		4.5	130	37.8 ± 11.4	9.0	19
10.16-19	2.93	0.098	0.198	0.647	3.54	0.054	0.416	0.013	5.5	432	32.6 ± 11.3	20.5	7
10.19-20	0.500	0.018	0.046	0.111	0.601	0.032	0.083		5.6	73.0	41.1 ± 11.5	34.0	33
10.20-23	1.72	0.059	0.103	0.375	1.98	0.011	0.260		4.7	287	11.8 ± 9.6	12.0	10
10.23-31	0.261	0.019	0.056	0.066	0.307	0.056	0.144		4.1	69.7	42.4 ± 11.3	17.0	11
11.2-4	0.080	0.008	0.013	0.020	0.101	0.007	0.032		4.8	23.1	17.9 ± 11.6	53.5	52
11.4-10	4.74	0.167	0.281	0.995	5.44		0.650		5.3	731	29.8 ± 10.6	13.5	8
11.10-17	0.557	0.049	0.086	0.130	0.691	0.057	0.143		4.9	112	28.8 ± 10.6	16.0	10
11.17-24	1.35	0.020	0.122	0.313	1.78	+	0.21		5.1	251	21.7 ± 10.9	24.5	28
11.24-30	6.13	0.182	0.380	0.32	7.30	0.044	0.960		4.5	997	31.5 ± 10.6	15.5	5
11.30-12.2	3.69	0.124	0.214	0.819	4.51	0.018	0.527		4.8	632	22.5 ± 10.0	7.5	9
12.2-3	2.86	0.085	0.157	0.633	3.55	0.009	0.423		4.8	477	27.1 ± 10.9	15.0	7
12.3-5	0.891	0.031	0.052	0.188	1.07	0.008	0.154		4.3	169	18.1 ± 11.0	30.0	19
12.5-14	0.465	0.021	0.122	0.114	0.592	0.034	0.171		4.9	108	30.7 ± 11.2	14.0	16
12.14-15	0.203	0.008	0.041	0.048	0.256	0.012	0.061		4.9	49.0	13.9 ± 11.0	22.5	17
12.15-17	1.63	0.052	0.126	0.359	1.91	0.031	0.262		4.3	299	29.8 ± 11.1	30.5	26
12.17-22*	4.65	0.115	0.113	0.317	1.52	0.021	0.256	3.11	8.9	559	25.3 ± 11.1	53.0	24
12.22-23	1.23	0.061	0.108	0.246	1.27	0.031	0.223	0.051	6.2	220	15.2 ± 11.0	8.0	10
12.23-27	1.52	0.080	0.198	0.388	1.69	0.065	0.294		4.6	286	19.8 ± 11.0	9.0	7

* この雨水中にNO₂⁻が0.013meq/ℓ検出された。

調査した降水の水素イオン濃度は、pH 4～5 程度の酸性を示す試料が比較的多いが、硫酸イオン、硝酸イオン量から期待されるほどpHは低くはない。硫酸イオンが多い水では同時に海塩も多く、アルカリ性の海水成分により酸は中和されたのである。

陸起源の硫酸イオンが増加しつつ有るかどうかは、短期間の調査からは分からないが、1972年の北海道、1966年の石川県の陸起源の硫酸量は最高が0.46meq/l（角皆ら、1977）でその他は多くても0.1meq/lであり、図-2の値と大きな違いはない。

日本の塩化物イオンの降下量は年間200万トン（5.3g/m²）である（半谷ら、1985）のに対し、新潟大学構内で採水した降水（ドライフォールアウトを含む）では観測した233日間（4月29日より12月27日まで）に27.7g/m²に達し、冬季に多いことを考えれば、さらに多くなる。砂丘地の地下水は、内陸の沖積平野の地下水に比べ、塩化物イオン濃度が5倍以上高い可能性がある。

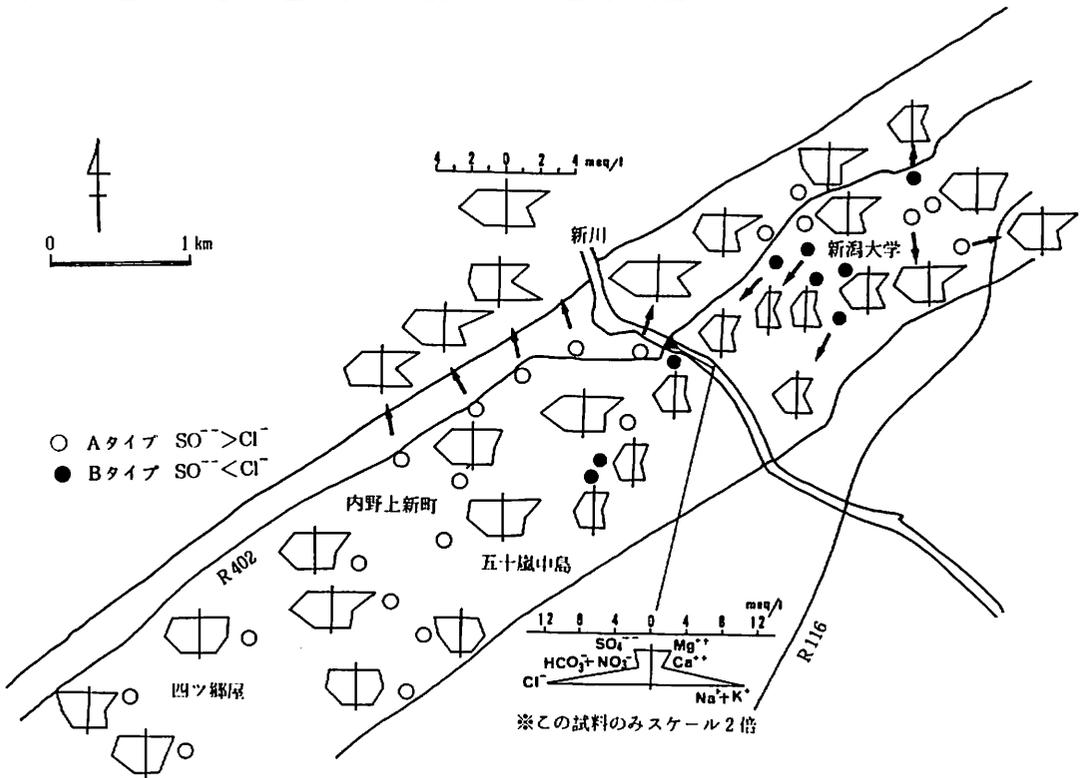


図-4 地下水主成分のヘキサダイアグラム
 Fig. 4 Pattern diagram for major ions in groundwater.

地下水に加わる塩類は、雨によるほか、風によって運ばれる物と、施肥など人間活動によるものがある。この寄与を見るためには別に定量的研究を必要とするが、ここでは、土壤に集積している水溶性の塩類の濃度のみを調査した。

陽イオンについては、海岸に近い場所ではナトリウムイオンの寄与が大きいですが、海岸から離れるとアルカリ土類の割合が高くなる（表-3、図-3）。一方陰イオンでは、塩化物イオン濃度は海岸近くで最も高く、内陸に向かって低くなる。硝酸イオン濃度は内陸で高い。硫酸イオンが陰イオンに占める割合も他の2イオンに比べると小さく、濃度の変化も顕著ではない。

土の水溶性イオンの組成が海水と違っているのは、植物や人間の影響である。

風に運ばれ松の葉に付いた塩類は海水由来の成分が多い。松葉に付いている塩類の量の違いは、土壤の塩化物イオンほど明確ではない。

これらの結果から、砂丘の表層から浸透する水は、強い風によって多くの海塩を含むようになった降水に、風によって運ばれた多量の高塩成分が加わり、さらに、土壤で肥料成分などに由来するイオンが付加されて、地下水になることがわかる。

表-3 土壤水の化学組成
Table 3 Chemical compositions of soil water.

番号	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	水分 (%)
I	37.2	1.94	1.09	1.70	20.5	14.3	6.51	1.57	4.15
II	32.3	4.37	19.4	11.4	11.5	44.4	6.10	1.32	4.96
III	10.8	7.01	30.1	10.2	3.23	23.8	10.3		4.53
IV	7.98	3.21	26.1	13.7	4.64	43.6	5.00		4.23
V	17.8	13.4	20.7	18.7	4.74	60.4	6.12		6.95

IV 新潟市西部砂丘の地下水の水質

井戸水の水質を議論するにあたっては、後に述べる様に、井戸の深さによって水質が異なる場合があるから、井戸のストレーナの位置を正確に知る必要がある。しかしながら、砂丘地の沢山あるスプリングラー用の井戸の深さは、聞き取りによっても不明である。井戸を掘削する業者によれば、経済的な理由から比較的浅い層の水を利用するのが一般的である。したがって、ここに取り扱う試料は一般に浅い層の水として考察を進める。

砂丘地の地下水の主成分の分析結果をヘキサダイアグラムにして各採水点に図示し(図-4)、ヘキサダイアグラムを作成するにあたって、硝酸イオンの寄与が大きい水が多いので、炭酸水素イオンに硝酸イオンを加えて炭酸水素イオンとして図示した。

電気伝導度(25℃)の変化の範囲は252~631 μS/cmであり、浅い地下水としては電解質濃度が高い水が多い。新潟西部砂丘地の地下水の特徴を記載するにあたって、比較すべき砂丘地地下水の標準となる値は見当たらないので、我が国の代表的天然水である平均的河川水(小林, 1971)と比較する。

砂丘地の地下水の塩化物イオン濃度は高い(0.5~1.7epm)。河川水の塩化物イオン濃度は0.147epm(5.2mg/l)であり、河川水により涵養される沖積層の地下水の塩化物イオン濃度は、汚染の無い場合は、0.2epmを越えることはないと予想される。砂丘地では地下水は降水により涵養されるが、菅原らの雨水の化学組成によれば、塩化物イオンは0.03epm程であり、平均的な雨水によって砂丘の地下水が涵養されることもありえない。砂丘地の地下水の塩化物イオン濃度が高いのは、既に雨の性質において述べたように砂丘が海に近いことに関係している。

硫酸イオン、硝酸イオンの存在は、この地域の地下水が酸化的環境にあることを示唆している。硫酸イオンと、硝酸イオンの濃度は0.29~1.7epm, 0.16~2.0epmで河川水と比較して極めて濃度が高い。硝酸イオンの分布から図-5、畑作の中心地で特に硝酸イオン濃度が高いことがわかる。塩化物イオンに

対する硝酸、硫酸イオンとの比は地下水では雨より明らかに大きく、施肥などの人間活動の影響が認められる。ポット試験によれば、砂丘地に尿素を施肥した場合、窒素の27%（浸透水の平均濃度0.36atm-N）が溶脱した結果も報告されており（馬場，1966），農業に由来する肥料の成分である硫酸イオン、硝酸イオンが地下に付加される量はきわめて大きいと推定できる。

ナトリウムイオンは塩化物イオン濃度と海水の Na^+/Cl^- から推定される濃度より高い試料がおおい。カルシウムイオンとマグネシウムイオンもナトリウムイオンと同じかもっと多い成分であるが、マグネシウムイオンとカルシウムイオンの量は一般の陸水は $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ であるのに対して、 $\text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$ である点がこの地域の地下水の特徴である。海水の $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ は5.26であるから、砂丘地の地下水の $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ が高いのは海塩の影響によるものである。

各々の水質をヘキサダイアグラムにした図-4の各々の水を、電解質濃度が比較的低く、硫酸イオンの寄与が小さい水（●）と、電解質濃度が高く硫酸イオンの寄与の大きい水（○）に区別して表示した。それぞれが群をなしており、砂丘地の地下水も均一な帯水層ではなく、水塊をなしていることが予想出来る。この点については、大学内の観測井の層位別の水質の連続観測結果と、トリチウム濃度の測定結果をあわせて、後に再度検討する。

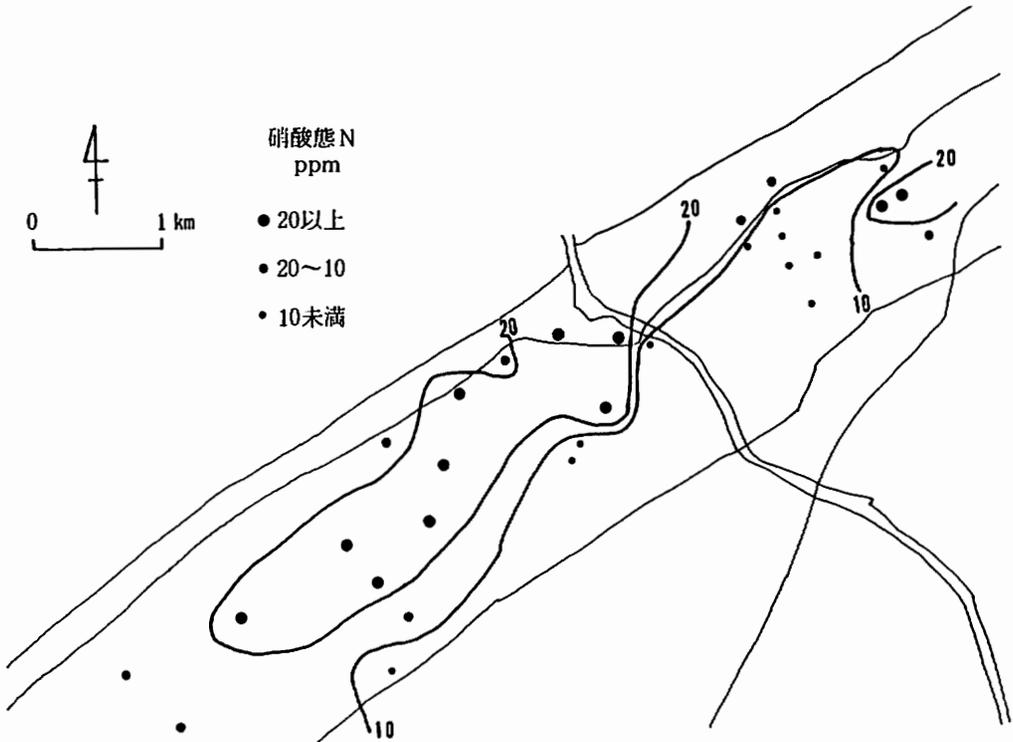


図-5 砂丘地下水の硝酸イオンの分布
Fig. 5 Nitrate distribution of groundwater in dune.

V 地下水の水質とトリチウム濃度の変動

砂丘の頂上付近に設けた観測井No.1は1977年に一度道路工事に伴い移設し、さらに、1987年に移設することになり（これを観測井No.3とする）、それぞれは距離的には近い位置であるが、後に述べるように、水質に違いがある等の問題点があり、水位の継続的变化を見るのには適していない。

観測井No.2は同一地点で観測が継続しているのので、地下水位の変化については、この井戸について考察する。観測井No.2について過去の水位変動を整理すると、図-1のように（鈴木、未発表）、近年は水位が春から初夏に高く、冬季に最高水位に達する例もあった。図の多年平均月別降水量（東京天文台、1987）の変化のパターンは最近の水位の変化とは一致していない。しかしながら、降水量そのものが水位に与える変化の他、夏季に降水量が小さい場合灌漑用水が多量に消費されること、冬季に積雪が多いと雪消のために多くの地下水が利用されるなど、間接的に気象条件が地下水位に影響をあたえることもあって、短期間の観測から地下水位の変動のパターンが変わったと断定はできない。

観測井No.2の上層と下層の電気伝導度にはほとんど差がないので、表層の水についてのみ分析を行った。1986年5月から1987年8月までは化学組成にほとんど変化がなかった。その組成は、後にのべるNo.1の上層と下層の水の中間的性質を示した（図-6）。1987年9月から電気伝導度が上昇し、塩化物イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオン、炭酸水素イオンの量は増加したが、硝酸イオン、硫酸イオンは減少し、硝酸イオンでは検出限界以下になった。電解質濃度の増加にもかかわらず、マグネシウムイオンはやや減少するか、ほとんど変わらなかった。従って、 Mg^{2+}/Ca^{2+} は著しく小さくなった。これらの変化は海水の侵入によるものではなく、還元的な環境の地下水の影響によるものである。9月以降の変化は建設工事により多量の地下水を揚水したことの影響が疑われる。

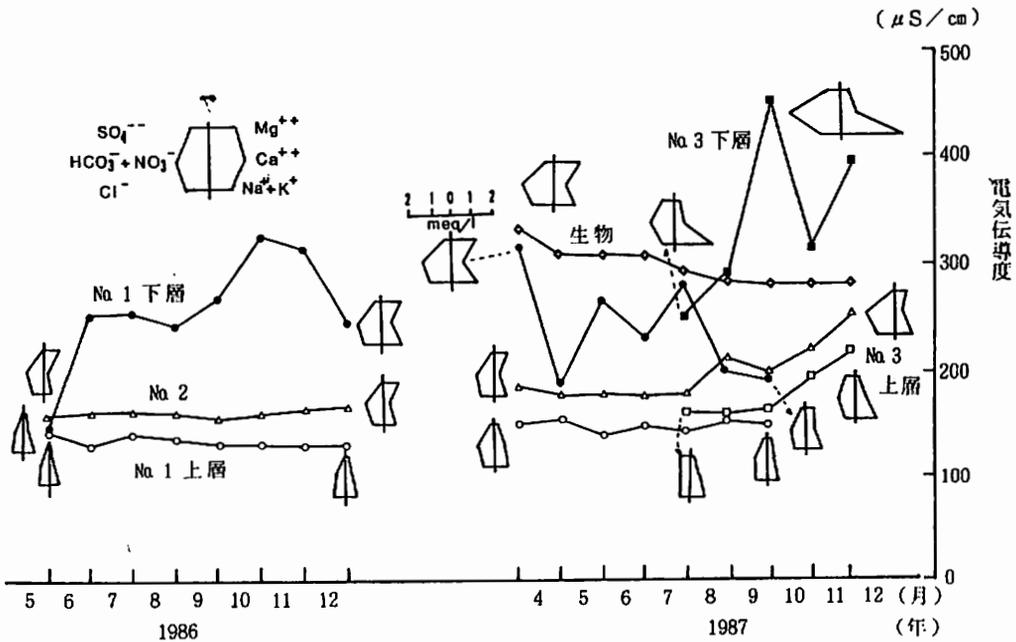


図-6 新潟大学構内の観測井の地下水の電気伝導度と代表的試料のヘキサダイアグラム
 Fig. 6 Electronic conductivity and representative pattern diagram of groundwater from wells in Niigata university.

観測井No.1の表面の水の電気伝導度は大きな変化はしない。化学組成もほとんど変化しないといっ
 よい(図-6)。ところが、同じ観測井の底にあたる下層の水は電気伝導度が表層より高く、時により
 変化をする。電気伝導度変化につれ 電解質の組成にも変化が認められる。

上層の水は海塩の影響がつよく、塩化ナトリウムの占める割合が高い。下層では電気伝導度が高い試
 料ほど炭酸水素イオンとマグネシウムイオンの寄与が大きくなっている。この型の水は、先に述べた新
 潟砂丘の地下水に最も普通にみられる水である。

観測井No.1のストレーナ位置は地表から30~34mであり、水位は地表から21mである。井戸位置の標
 高24.23mである(表-1)から、水位は海水準より常に数m上に有ることになる。ストレーナの位置
 は明らかに、海水準より数m低い(図-7)。井戸の中の水質はストレーナ位置の水質を反映している
 はずであるから、上層と下層の水の水質が季節により異なるのは、上層と下層の水の境界がストレーナ
 位置にあり、水位変動に従ってこの境界が上下し、下層として採取した水がある時は上層に近かったり、
 下層特有の水質を示したりしたのである。

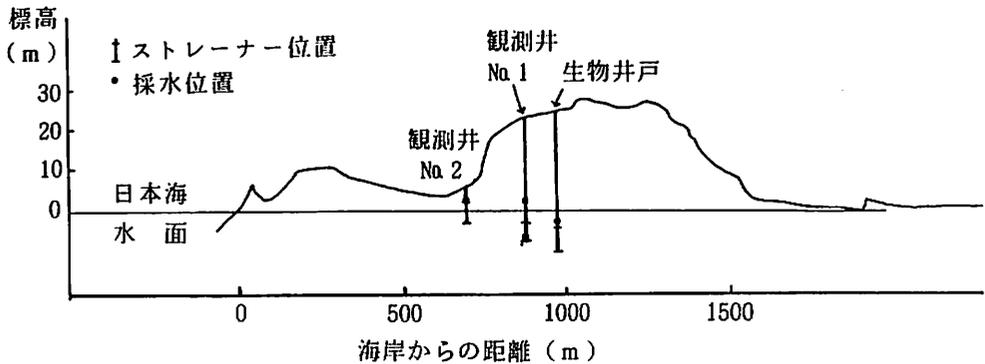


図-7 砂丘の断面と観測井戸の配置

Fig. 7 Cross section of dune and distribution of observation wells

表-4 松葉からの可溶性塩類の化学組成

Table 4 Chemical compositions of soluble salts from pine leaves.

番号	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
1	0.557	0.031	0.045	0.110	0.670	0.007	0.106	
2	0.325	0.024	0.036	0.059	0.410	0.010	0.060	
3	0.145	0.016	0.034	0.032	0.179	0.008	0.040	0.015
4	0.218	0.023	0.045	0.041	0.228	0.009	0.050	
5	0.694	0.045	0.080	0.122	0.710	0.022	0.128	
6	0.444	0.041	0.101	0.084	0.471	0.015	0.115	
7	0.394	0.036	0.070	0.086	0.436	0.015	0.085	
8	0.524	0.047	0.075	0.129	0.638	0.028	0.098	0.015

観測井No.3は観測井No.1が使用不能になるため、代替処置として設けられた井戸である。設置時に水道水で井戸の洗浄がおこなわれたため、水質の調査結果が観測井No.1と同じになった後、No.1の井戸の代替井戸とする予定であったが、深い層の水質はNo.1とは違っており、水質的にはNo.1の代替井戸とはなり得ないことが明らかとなった。観測井No.1の下層の水ではカルシウムイオン、マグネシウムイオンが多く、かつ $Mg^{2+} > Ca^{2+}$ であるのに対し、新たに設けたNo.3は $Mg^{2+} < Ca^{2+}$ であり両者の水質は明らかに異なる。水道水の分析データとは8月の上層、下層の水とも違っており、洗浄時に注入した水が急速に地下水により置換されたことがわかる。後に述べるトリチウム濃度の分析結果等をあわせて考えるとすくなくとも下層部の水はほぼ完全に地下水によって置換されたと考えてよい。

生物化学科の井戸は観測井No.3の西約80mに位置するが、水質はNo.1の下層の水に近い。ストレーナの位置は28.5~34.5mである。井戸の標高は測量されていないが、No.1とほぼ同じであり、ストレーナの位置もほぼ同じである。揚水を行っている井戸では、下層の水が出ている。水質の変化はNo.1の下層ほど大きくはない。

各井戸の月間変動には統一的な法則性は認められない。No.1とNo.3の井戸の水質から、上層に電解質濃度が相対的に低い水があり、下層に電解質濃度の高い水が分布し、水位変動に伴い、両者の混合比が変化することにより水質変化が生じていると予想している。この点については、さらにトリチウム濃度の変化を併せて後に議論する。

VI 降水と地下水のトリチウム濃度

降水のトリチウム濃度：新潟大学構内の雨の月別トリチウム濃度の一部は、別に（橋本ら，1984）報告している。この調査では、出来る限り、一降雨のトリチウム濃度を測定することに努めた。図-8に1986，1987年の5月から12月のデータが示してある。何れの年も5~7月にトリチウム濃度が高い傾向がある。北半球では、一般に春にトリチウム濃度が高い傾向があり、スプリングピークとして知られている現象である。理由は分かっていない。

1986年5月24日に150pCi/lを越えるトリチウム濃度が観測された。とくに高いトリチウム濃度が検出された理由は判らないが、1986年4月26日にソ連におけるチェルノブイリの原子炉事故との関係については注意する必要がある。この時期の日本および世界各地のデータが公表された後、問題の解明が期待される。現状では単に異常値として記録するにとどめる。

地下水のトリチウム濃度を検討するためには、涵養水としての雨のトリチウム濃度の年平均の値が問題となる。1987年の単純平均値は27.7pCi/lで最近の日本各地で報告されている値20~40pCi/lと一致する。1986年は特異的に高い値が影響して、単純平均値は33.4pCi/lであった。新潟に近い金沢市、富山市等の値（Momoshima, 1983, 坂上, 1987）をも参考にして、現在のトリチウム濃度は20~40pCi/lとした。

観測井のトリチウム濃度変化：観測井No.1の上層と下層のトリチウム濃度を比較すると（図-9）、1986年10月1987年4月、建設工事が地下水に影響している9，10月を除いて、下層のトリチウム濃度が高い傾向がある。しかしながら、現在のトリチウム濃度測定法ではトリチウムの測定に基づく誤差が大きく、確実に下層のトリチウム濃度が上層より大きいといえるのは、1986年9月と1987年の7月である。観測井No.1の代替井戸として新設された観測井No.3についてもNo.1と平行して、上層と下層のトリチウム濃度の観測を行った。8，9，10月はほとんど差がなかったが、11月から上層のトリチウム濃度が小

さくなり、12月には誤差を考慮しても下層のトリチウム濃度が上層より高いことが明らかとなった。これらの結果から、上層には現在のトリチウム濃度に近い水が、下層には50pCi/l程の水があり、水質の変化で議論したように、両者の混合が起こっているとみられる。その上、上層と下層のトリチウム濃度が明確に違うといえる水では、上層のナトリウムイオンの濃度がきわだって高い特徴がある。この水が下層と混合のない表層の水である。1986年の6月の上層、1987年の4月の上下層の水のトリチウム濃度が極めて低い点は今後さらに検討する必要があるが、混合が起こったときにトリチウム濃度が高くなることから、上層からの水の供給が小さい時は、下層の水が上がってくるのが分かる。

砂丘地地下水のトリチウム濃度：スプリンクラーから得た水のトリチウム濃度を原水爆実験が盛んに行われた1960年代以前の値20pCi/l未満、現在の雨の値である20～40pCi/lと1960年代の原水爆の実験当時トリチウム濃度の高い値については40～60pCi/lと60～80pCi/lにわけて示した（図-10）。

新潟大学周辺の電解質濃度の低い水のトリチウム濃度は現在の値より高く、観測井No.1の下層の水のトリチウム濃度に近い古い水である。大学の北東部はトリチウム濃度が最も低い水、さらに古い水が分布している。新潟大学の周辺には古い地下水が分布しているらしい。

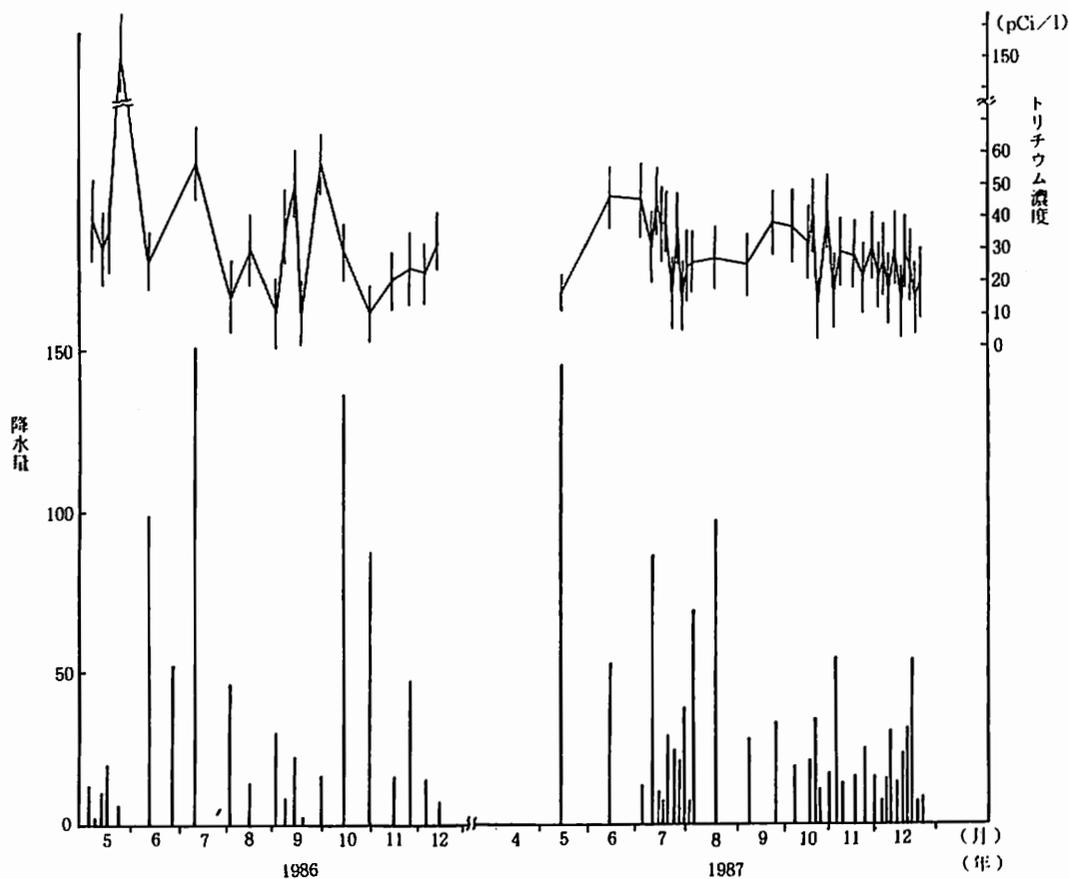


図-8 降水中のトリチウム濃度
Fig. 8 Tritium concentration in precipitation.

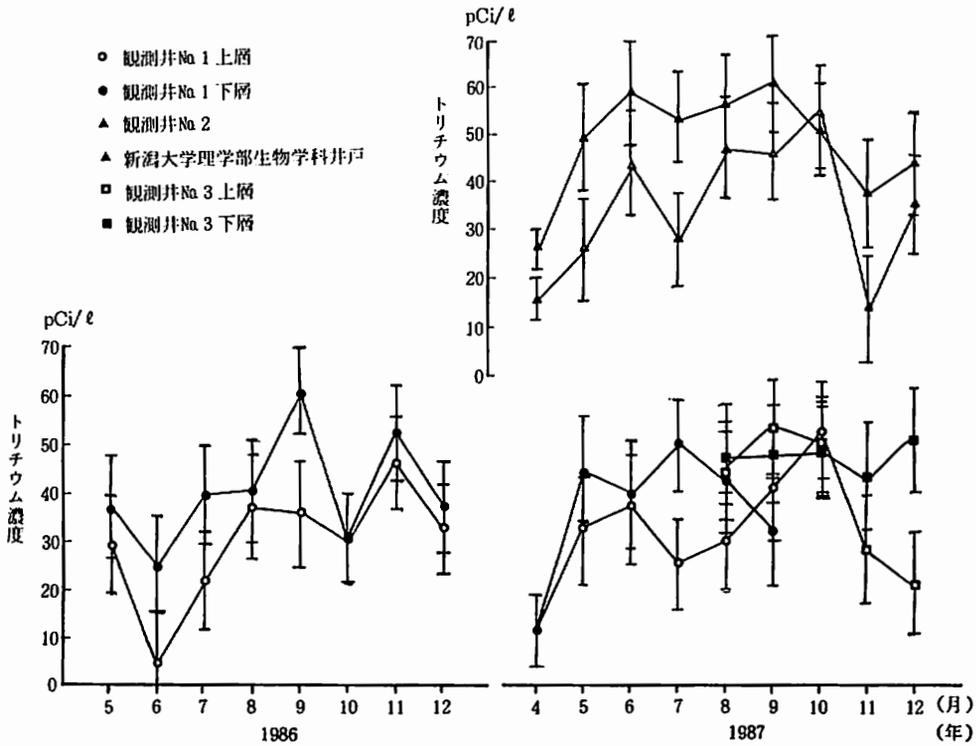


図-9 新潟大学構内の観測井から月毎に採集した地下水のトリチウム濃度
 Fig. 9 Tritium concentration of groundwater sampled monthly from observation wells in Niigata university campus.

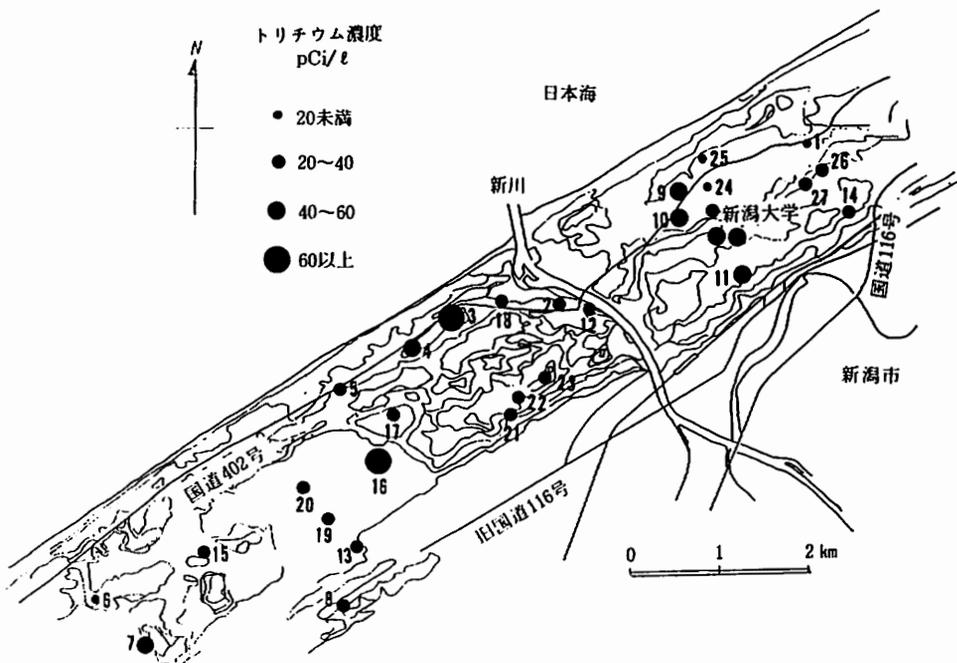


図-10 地下水採取点と新潟市西部砂丘の地下水のトリチウム濃度
 Fig. 10 Sampling sites for groundwater and Tritium distribution in groundwater in the dune in west Niigata city. The contour lines of 0, 10, 20 and 30m above the sea level are shown.

新川の西側は雨のトリチウム濃度と同じ程度の水が多いが、調査した水のなかでもっともトリチウム濃度の高い(72.4, 66.8pCi/l)値が記録された。調査地の西端に位置する四ツ郷屋に46.4と19.5 pCi/lの水がみられ、この周辺にも古い地下水が浅い層に分布している可能性がある。新川の西部のトリチウム濃度の高い水は、分布にまとまりがなく、一帯に古い水が分布すると考えるよりは、観測井No 1の測定結果から推定すると、井戸の深度が深いか、揚水量が多く深い水が上昇してきた可能性がある。しかしながら、井戸についてのデータを欠いている現状では、トリチウム濃度の違う水の分布を規定している因子については推定の域をでない。今後のトリチウム濃度の変化を追跡する必要がある。

Ⅶ ま と め

海岸に近い砂丘地帯には、冬季の強い北北西の風によって運ばれる塩類が多いため、地下水の化学成分に海塩の影響がでる。しかし、これは今日の気象状態が続いている限り、不変の要素であり、地下水の水質の今後の変化には、特別の影響はない。外部から地下水に影響を与える因子としては、降水中の硫酸イオン、硝酸イオンおよび今回測定しなかったが、アンモニウムイオン等と肥料として使われ、土壌水中に高濃度で含まれる窒素化合物、硫酸イオン、カルシウムイオン等が重要である。

雨の観測期間の平均トリチウム濃度は1986年、1987年それぞれ33, 27pCi/lであった。

新潟市西部の砂丘地の地下水の水質は、大きく2種類に大別できる。電解質濃度が低く、陰イオンでは特に硫酸イオンの寄与の小さい水と、電解質濃度が高く硝酸、硫酸、炭酸水素、塩化物の各イオンとも多い水である。電解質濃度の小さい水は一つの水塊をなしている。農地の分布等からみて、地下水をスプリンクラー散水に利用していない地帯である。

トリチウム濃度の測定から、1960年前半の大気中での核爆発の実験時、あるいはそれ以前の降水によって涵養された水が、現在灌漑用水として使われている部分があることを確認した。トリチウム濃度についても、水塊が認められるが、化学成分との関係は複雑で、トリチウム濃度との間に強い相関のある成分は確認できなかった。

砂丘の頂部の観測井の上層と下層の水の水質、トリチウム濃度の観測から、海水準から6~10m程下のところに、上層の電気伝導度の低い、トリチウム濃度が最近の降水の値を示す水と、電気伝導度が高い、トリチウム濃度が40pCi/l以上の古い水との境界があることが明らかになった。この井戸でも、トリチウム濃度が大きい水ではナトリウムイオン濃度がきわめて高いことを除けば、水質とトリチウム濃度との関係は明瞭ではない。

以上の予備的調査結果に基づき、地下水の保全を考える上で今後早急に調査すべき以下の問題点がある。

1. 砂丘地の地下水頭の分布図を作成する必要がある。
2. 新潟大学の観測井で見られるように、地下水の水質の垂直方向の変化はかなり急であり、水質の垂直変化を調査する必要がある。
3. 農業が地下水に与える影響を定量的に検討する必要がある。
4. 風の強い降雪期の降水試料採取法を工夫し、年間の降下物の量を求める必要がある。

謝 辞

この調査を纏めるにあたり、新潟大学積雪地域災害研究センターの吉田昭治教授に貴重なご意見を賜りましたことに深く感謝いたします。スプリンクラー散水中に試料採取のため便宜を図って下さった農家の方々に感謝いたします。

文 献

- 馬場 昂 (1966) : 砂丘地作物の水分と栄養問題. 砂丘研究13(1), 1 - 13.
- ブラウン・レスター, R. (1986) : 地球白書. 本田幸雄監訳 福武書店.
- 橋本哲夫・樋口 靖・佐藤 修・青木 滋・殿内重政・外林 武 (1984) : 液体シンチレーション法による大気中および降水中のトリチウム濃度測定. 新潟大災害研年報, 第6号, 73~82.
- 半谷高久・小倉紀雄 (1985) : 水質調査法. 丸善.
- ハワード, ロス・マイケル, パーレイ (1986) : 酸性雨. 田村明監訳, 新曜社.
- 科学技術庁 (1977) : トリチウム分析法.
- 小林 純 (1971) : 水の健康診断. 岩波書店.
- Momoshima, N, Nakamura, Y, Kaji, T, Takashima, Y. (1983) : RECENT ENVIRONMENTAL TRI-
TIUM LEVELS IN JAPAN. RADIO. RADIONAL. LETTERS, 58/1, 1 - 8 .
- 仲川隆夫・橋本哲夫・青木 滋・佐藤 修 (1986) : 液体シンチレーターPICO-Fluor LLTの性能について. 新潟大災害研年報, 第8号, 121-126.
- 仲川隆夫・佐藤 修・橋本哲夫 (1986) : 低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターによる環境トリチウム測定の基礎研究. 新潟大災害研年報, 第8号, 81-89.
- 新潟県農業試験場 (1962) : 昭和35・36年地力保全基本調査成績書.
- 新潟地方気象台 (1986, 1987) : 新潟県気象月報. 新潟気象協会新潟センター.
- 日本分析化学会北海道支部編 (1971) : 新版水の分析. 化学同人.
- 阪上正信 (1985) : トリチウムの環境動態. 核融合研究, 第54巻, 第5号, 66-79.
- 東京天文台編 (1987) : 理科年表. 丸善.
- 角皆静男・品川高儀 (1977) : 冬季モンスーンによって輸送される化学成分. 地球化学, 11, 1 - 8 .