

上越地域の地下水の動向 (第1報)

—— 帯水層の水質解析 ——

永野多美雄・谷中 隆明・沢口 正夫

1 はじめに

新潟県上越市は環境庁の集計によれば、昭和59年度の水準測量結果で全国一の沈下量(10.1cm/年)を記録し、昭和60年度の県の水準測量結果でも前年度を下回っているものの大幅な沈下量(6.6cm/年)を記録した。これは昭和58年12月から昭和59年3月にかけてと昭和59年12月から昭和60年1月にかけて見舞われた豪雪による消雪用地下水の揚水量の増加が主な原因であった¹⁾。

このため、県は昭和60年度に上越地域地盤沈下機構解明調査を実施した。この調査の一環として同地域の地下水の水質調査も実施されたが、筆者らは、この水質調査結果を解析し、地区別帯水層の水質特性をは握することを目的として調査を行った。その結果、いくつかの知見が得られたので報告する。

2 調査方法

2.1 調査地域の概要

高田平野は新井市の市街地南部から日本海に向けて開いた三角形の平野である。南部の山麓部一帯は扇状地、北部は関川、保倉川による沖積平野が広がっている。沖積層は平均10~40m程度の層厚と考えられており、この基底部は連続した礫層が広がっている。この礫層がG1層と呼ばれている。海岸部ではG1層下部に洪積層と考えられているG2層、更にその下部には魚沼層と考えられるG3層からG5層の存在が明確である。しかし、高田付近から新井にかけては、これら礫層の区分がしだいに不明確となり、新井市街地においては、各礫層間の区分は不可能である。

2.2 調査時期と調査地点

調査時期は、地下水水位が安定している秋期と消雪用地下水を大量に使用して地下水水位が低下している冬期として、それぞれ昭和60年9月と昭和61年2月に実施した。

調査地点は高田平野一帯を1kmのメッシュに分割し、井戸集中メッシュを主に帯水層別に対象井の選定を原則とした。なお、帯水層の分類は上越地区地下水利用実態調査報告書²⁾に従って浅層、G1層、G2層、G3層、G4層及びG5層とした。また、地下水との相互関係を調べるため、同平野の主要河川の水質も同時に調査した。

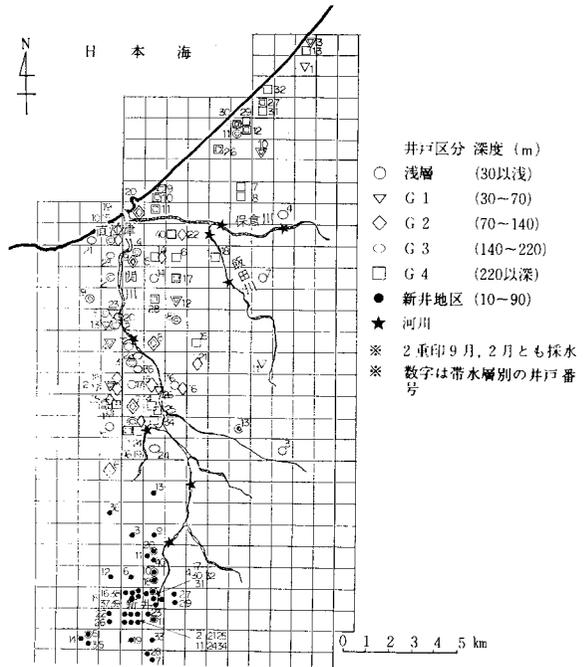


図-1 調査地点

地点数は地下水が9月77、2月80で、河川水は両時期とも12である。なお、両時期に採水した地下水数は38であった。

図-1に帯水層区分をした調査対象井の位置と、河川水の採水地点を示した。

2.3 採水方法

地下水の採水は、試料の水質を安定させるため、揚水ポンプを稼働させてから約10分後に行った。河川水については、流心部から採水した。

2.4 調査項目と測定方法

調査項目は、地下水の主要成分であるナトリウムイオン(Na^+)、カリウムイオン(K^+)、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイオン(Mg^{2+})等の陽イオンと炭酸水素イオン(HCO_3^-)、塩化物イオン(Cl^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})、等の陰イオン及び溶出ケイ酸(SiO_2)の他pH、水温、電気伝導度等20項目を行った。測定方法は表-1に示した。試料はポリエチレンびんに分析時まで保存した。なお、pH・水温・電気伝導度は採水地点で直ちに測定すると

表-1 調査項目, 測定方法

調査項目	測定方法
pH	ガラス電極法
ORP(酸化還元電位)	白金電極法
TOC	TOC計法
HCO ₃ ⁻	赤外線吸収法
CO ₃ ²⁻	〃
SO ₄ ²⁻	クロム酸バリウム吸光度法
Cl ⁻	硝酸銀滴定法, チオシアン酸銀Ⅱ法
Na ⁺	フレーム光度法
K ⁺	〃
Ca ²⁺	EDTA滴定法
Mg ²⁺	〃
蒸発残留物	重量法
SiO ₂ (溶解性)	モリブデン青吸光度法
T-Fe	原子吸光法
T-Mn	〃
NO ₃ ⁻	ナフチルアミン吸光度法
NO ₂ ⁻	銅, カドミウムカラム還元法
NH ₄ ⁺	インドフェノール法
EC(電気伝導度)	電気伝導度計法
水温	ベッテンコッヘル水温計法

もにアンモニウムイオン(NH₄⁺), 硝酸イオン(NO₃⁻), 亜硝酸イオン(NO₂⁻)測定用試料は, 採水後直ちに塩酸(1+1)を用いてpHを2に調整した。

3 調査結果と考察

3.1 水質の平均値

表-2に帯水層別の地下水, 及び河川水の水質の測定結果を示した。地下水の水質では, pH及び水温は深層ほど高い値を示した。また, 全鉄は浅層とG2層が高い値を示しており, 同地域の地質の特徴を示すものと考えられる。主要河川の水質については, 地下水と比べてHCO₃⁻とSiO₂の値が低くSO₄²⁻の値が高かった。

3.2 キーダイヤグラム

キーダイヤグラムは, 地下水の解析にはよく用いられる方法⁹⁾で, 水中の溶存成分のうち陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺)及び陰イオン(HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻)の当量濃度の和を陽イオン, 陰イオンそれぞれ100%として, Na⁺+K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺+Fe²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻+SO₄²⁻の各グループの当量濃度の百分率を図に表わしたものである。

図-2の(a)から(e)に, 帯水層別の地下水と河川水のキーダイヤグラムを示した。

キーダイヤグラムは一般に4つの型に区分される。I型は炭酸水素カルシウム型で淡水の最も一般的な型で降水や表流水及び浅層地下水は主にこの型に含まれる。II型は炭酸水素ナトリウム型でI型の地下水が深層部へ浸透したもので被圧地下水は主にこの型に含まれる。III型は硫酸カルシウム型, 塩化カルシウム型で塩水化した地下水, 温泉水, 鉱泉水, 鉱山廃水は主にこの型である。

IV型は硫酸ナトリウム型, 塩化ナトリウム型で海水, 塩水化した地下水, 温泉水は主にこの型である。

1) 浅層の地下水

図-2(a)から, 浅層の地下水の水質は, 井戸No5(秋)の地下水を除いて, ほぼI型に含まれる。また, 両時期とも調査した地下水の季節による水質の顕著な変化は, 井戸No5の地下水を除いては認められない。なお井戸No5の地下水のHCO₃⁻濃度は冬に比べて秋が非常に低い値であった。

2) G1層及びG2層の地下水

図-2(b)から, G1層及びG2層の地下水の水質は特殊な井戸を除き, 全てI型に含まれており, 浅層の地下水の水質と同様の分布を示した。特殊な井戸の地下水の水質はIII型に含まれており, 井戸No15とNo19の地下水は直江津地区沿岸部の地下水で, Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺の濃度が他の地下水と比べて非常に高く塩水化の影響を受けていると考えられる。井戸No1とNo3の地下水は柿崎町の養豚場に設置されている井戸の地下水で, NO₃⁻濃度が15mg/lと非常に高く豚舎の廃棄物の影響を受けている可能性があるが今後更に検討する必要がある。井戸No4の地下水は冬期にCl⁻濃度だけが秋期の10倍となっている。また, 井戸No23の地下水はT-FeとNH₄⁺の濃度が他の井戸の地下水に比べ高い値を示しており, 同地域の詳細な地質データ等をもとに今後は原因を解明することとした。

3) G3層及びG4層の地下水

図-2(c)から, G3層及びG4層の地下水の水質はI型からIV型までの全ての型に分布しているが, 高田・直江津地区のG3層及びG4層の地下水の水質は, ほぼI型及びII型に含まれる。III型及びIV型に含まれる特殊な地下水を調べてみると, 井戸No21の地下水は直江津地区沿岸部の地下水であり, Cl⁻濃度が8,000mg/l, Na⁺濃度が3,700mg/lと高いことから塩水化した地下水と考えられる。井戸No31, No32及びNo27の地下水は, 大潟地区の上水道用, 工業用の深層地下水であり, 他の地下水と比べCl⁻濃度が高く, SO₄²⁻濃度が低いことから同地域に存在するガス田, 油田が影響している地下水^{9) 10)}と考えられる。また, 井戸No22の地下水は, T-FeとNH₄⁺濃度が他の井戸の地下水と比べて高い値を示しており, G1層, G2層の井戸No23の地下水と同様に今後原因を解明する。井戸No28(秋)とNo35の地下水はHCO₃⁻が他の井戸と比べて非常に低い値を示した。この原因は陰イオンと陽イオンそれぞれの総当量濃度の比が0.5以下であり, 採水後にHCO₃⁻が炭酸ガスとなって除かれたものと考えられる。

4) 新井地区の地下水

図-2(d)から, 新井地区の地下水は井戸No5(冬)の地下水を除いてI型とIII型に含まれ, 浅層の地下水と同様

表-2 測定結果(帯水層別の地下水, 及び河川水の水質の平均値・最小値・最大値)

帯水層		浅 層		G 1 層		G 2 層		G 3 層	
平均値等		平均値 (最小~最大)		平均値 (最小~最大)		平均値 (最小~最大)		平均値 (最小~最大)	
項 目	時期	幾何 算術		幾何 算術		幾何 算術		幾何 算術	
pH	9月	6.8	6.8 (6.4~7.2)	6.8	6.8 (5.8~7.6)	6.9	6.9 (6.4~7.4)	7.2	7.2 (7.1~7.4)
	2月	7.0	7.0 (6.5~7.8)	7.4	7.4 (6.2~8.0)	7.3	7.3 (7.0~8.0)	7.5	7.5 (6.8~7.8)
水 温 (℃)	9月	15	15 (12~19)	15	15 (14~17)	16	16 (15~16)	18	19 (16~22)
	2月	13	13 (12~14)	13	13 (11~15)	14	14 (12~18)	14	14 (12~17)
ORP (mV)	9月	210	210 (150~390)	230	240 (150~460)	210	210 (160~300)	210	220 (180~270)
	2月	230	230 (190~370)	260	270 (170~450)	220	220 (170~410)	220	220 (180~300)
TOC (mg/l)	9月	8.8	12 (1.8~38)	8.1	14 (0.8~50)	9.1	10 (3.6~18)	3.8	4.5 (2.2~9.2)
	2月	6.2	11 (1~30)	7.7	9.2 (2.6~20)	6.4	7.7 (2.4~23)	3.4	5.1 (1~12)
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	9月	110	130 (18~260)	85	110 (14~200)	140	150 (84~230)	100	100 (79~120)
	2月	140	150 (90~240)	120	140 (38~280)	130	140 (56~230)	75	87 (20~130)
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	9月	0.023	0.034(0.001~0.16)	0.065	0.14 (0.001~0.36)	0.059	0.083(0.03~0.28)	0.086	0.10 (0.05~0.18)
	2月	0.046	0.066(0.01~0.15)	0.087	0.14 (0.02~0.40)	0.071	0.11 (0.001~0.28)	0.022	0.054(0.001~0.21)
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	9月	6.6	13 (1.6~83)	3.9	6.4 (0.9~18)	2.4	2.9 (0.8~5.2)	1.6	1.9 (0.8~3.0)
	2月	4.9	16 (0.5~90)	0.82	2.2 (0.06~8.5)	0.99	68 (0.05~910)	1.2	89 (0.05~780)
Cl ⁻ (mg/l)	9月	17	19 (4.3~33)	17	20 (9.6~43)	11	11 (9.9~16)	17	24 (10~62)
	2月	19	20 (11~36)	22	32 (11~130)	33	670 (11~9000)	28	900 (9.8~8000)
Na ⁺ (mg/l)	9月	22	23 (12~46)	22	23 (17~32)	20	21 (13~26)	19	24 (11~54)
	2月	21	22 (12~41)	22	13 (13~38)	30	130 (13~1500)	27	420 (11~3700)
K ⁺ (mg/l)	9月	4.7	5.0 (2.3~9.3)	5.5	5.8 (2.9~8.8)	5.5	5.6 (4.0~6.7)	4.6	4.8 (3.6~7.7)
	2月	4.6	5.0 (2.4~8.6)	5.2	5.6 (2.8~9.2)	5.8	9.8 (3.3~72)	5.0	11 (1.7~65)
Ca ²⁺ (mg/l)	9月	22	23 (13~34)	22	23 (16~37)	20	21 (14~31)	16	16 (14~19)
	2月	19	20 (9.9~27)	21	24 (7.6~41)	28	160 (11~2000)	20	100 (5.4~810)
Mg ²⁺ (mg/l)	9月	8.6	9.0 (4.4~15)	8.8	9.2 (5.3~13)	7.6	7.9 (5.0~10)	5.9	6.0 (5.6~6.2)
	2月	9.0	9.5 (4.9~14)	8.7	9.6 (3.5~16)	11	70 (4.8~870)	8.8	78 (2.5~660)
蒸発残留物 (mg/l)	9月	310	370 (140~1300)	410	730 (170~3400)	220	230 (170~290)	200	200 (160~280)
	2月	250	260 (170~370)	250	270 (130~430)	320	1600 (150~19000)	270	1900 (1100~16000)
SiO ₂ (mg/l)	9月	45	46 (20~64)	44	47 (21~63)	58	59 (44~68)	59	59 (54~64)
	2月	49	50 (38~61)	51	53 (25~62)	51	53 (26~64)	54	55 (33~70)
T-Fe (mg/l)	9月	13	28 (0.03~68)	1.8	18 (0.001~79)	11	15 (1.7~27)	2.7	4.5 (0.56~8.2)
	2月	11	22 (0.07~43)	3.3	8.8 (0.02~23)	8.6	64 (0.2~750)	7.9	11 (1.6~29)
T-Mn (mg/l)	9月	0.66	0.76 (0.23~2.0)	0.60	0.85 (0.05~1.9)	0.52	0.55 (0.34~0.98)	0.32	0.36 (0.14~0.49)
	2月	0.53	0.60 (0.24~1.2)	0.40	0.54 (0.04~1.0)	0.54	2.8 (0.16~34)	0.64	3.9 (0.18~32)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	9月	0.81	2.8 (0.005~13)	0.84	2.3 (0.005~5.3)	0.64	2.1 (0.005~5.6)	0.64	0.87 (0.18~1.7)
	2月	1.6	2.7 (0.16~6.7)	0.73	2.0 (0.005~4.8)	1.6	3.1 (0.22~16)	1.4	2.0 (0.62~6.9)
EC (μS/cm)	9月	310	320 (220~480)	290	290 (220~420)	240	270 (100~390)	220	230 (160~310)
	2月	250	270 (130~410)	250	270 (120~400)	340	900 (130~8200)	290	2700 (110~23000)

帯水層		G 4 層		新 井		河 川 水	
平均值等		平均值 (最小~最大)		平均值 (最小~最大)		平均值 (最小~最大)	
項 目	時期	幾何 算術		幾何 算術		幾何 算術	
pH	9月	7.5	7.5 (7.0~7.8)	6.5	6.5 (5.8~7.2)	7.5	7.5 (7.1~8.0)
	2月	7.7	7.7 (6.8~8.1)	6.9	6.9 (6.4~7.4)	6.6	6.7 (6.2~7.4)
水 温 (°C)	9月	19	19 (15~23)	15	15 (12~18)	24	24 (22~27)
	2月	19	19 (13~23)	13	13 (12~15)	-	1.5 (0~3)
ORP (mV)	9月	270	280 (180~440)	320	340 (180~530)	520	520 (490~530)
	2月	270	280 (190~510)	290	310 (200~540)	520	520 (490~560)
TOC (mg/l)	9月	4.1	6.2 (0.5~20)	2.9	3.6 (0.5~7.5)	2.2	2.5 (1.1~5.5)
	2月	3.2	3.6 (1~6.4)	3.5	4.4 (1~14)	0.8	1.8 (0.05~6.2)
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	9月	77	91 (8.4~180)	66	69 (32~110)	27	30 (9.2~70)
	2月	110	110 (75~180)	87	94 (48~210)	41	43 (22~68)
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	9月	0.16	0.25 (0.001~0.57)	0.012	0.072(0.001~0.69)	0.027	0.051(0.001~0.2)
	2月	0.33	0.39 (0.11~0.62)	0.053	0.082(0.01~0.31)	0.047	0.065(0.02~0.28)
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	9月	2.9	3.6 (0.7~12)	18	19 (6.5~32)	37	48 (9.3~110)
	2月	1.6	3.5 (0.05~12)	15	17 (2.5~35)	20	27 (2.4~41)
Cl ⁻ (mg/l)	9月	29	37 (10~75)	16	17 (7.6~31)	12	16 (4.3~60)
	2月	33	39 (10~71)	18	33 (8.0~390)	8.5	12 (3.1~54)
Na ⁺ (mg/l)	9月	27	32 (8.2~58)	11	12 (5.9~22)	12	15 (4.3~27)
	2月	27	31 (8.8~53)	15	24 (5.9~240)	12	15 (3.8~42)
K ⁺ (mg/l)	9月	5.1	5.5 (2.8~11)	3.5	3.9 (1.2~12)	2.6	2.9 (0.89~4.3)
	2月	4.9	5.2 (2.7~9.2)	3.6	3.8 (2.0~6.6)	1.8	2.2 (0.8~6.0)
Ca ²⁺ (mg/l)	9月	18	19 (9.0~32)	17	18 (11~28)	16	17 (5.6~27)
	2月	19	20 (8.7~30)	19	20 (7.6~39)	14	47 (4.5~51)
Mg ²⁺ (mg/l)	9月	5.9	6.2 (3.6~11)	5.0	5.3 (2.8~9.5)	3.6	4.0 (1.6~6.2)
	2月	6.4	6.6 (3.9~11)	6.1	6.4 (3.8~13)	2.6	2.9 (1.1~4.0)
蒸発残留物 (mg/l)	9月	220	230 (110~310)	160	160 (93~230)	180	210 (66~370)
	2月	200	210 (130~310)	180	200 (110~820)	140	160 (55~390)
SiO ₂ (mg/l)	9月	46	49 (8~65)	34	37 (18~57)	19	20 (14~30)
	2月	48	49 (37~69)	46	47 (28~60)	17	18 (13~25)
T-Fe (mg/l)	9月	0.92	7.0 (0.04~86)	0.40	2.7 (0.01~17)	0.80	1.6 (0.1~5.0)
	2月	0.74	3.4 (0.12~27)	0.37	1.5 (0.04~10)	0.99	1.3 (0.2~3.1)
T-Mn (mg/l)	9月	0.20	0.26 (0.06~1.0)	0.02	0.14 (0.001~0.6)	0.071	0.11 (0.02~0.33)
	2月	0.28	0.37 (0.1~1.1)	0.068	0.31 (0.001~1.8)	0.1	0.45 (0.03~0.48)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	9月	0.44	1.1 (0.005~5.3)	0.028	0.15 (0.005~1.1)	0.066	0.35 (0.005~2.0)
	2月	0.80	1.1 (0.15~4.5)	0.20	0.41 (0.005~1.7)	0.083	0.61 (0.005~3.7)
EC (μS/cm)	9月	270	280 (130~420)	180	190 (110~260)	160	180 (54~280)
	2月	270	280 (140~400)	190	220 (100~1100)	180	210 (55~560)

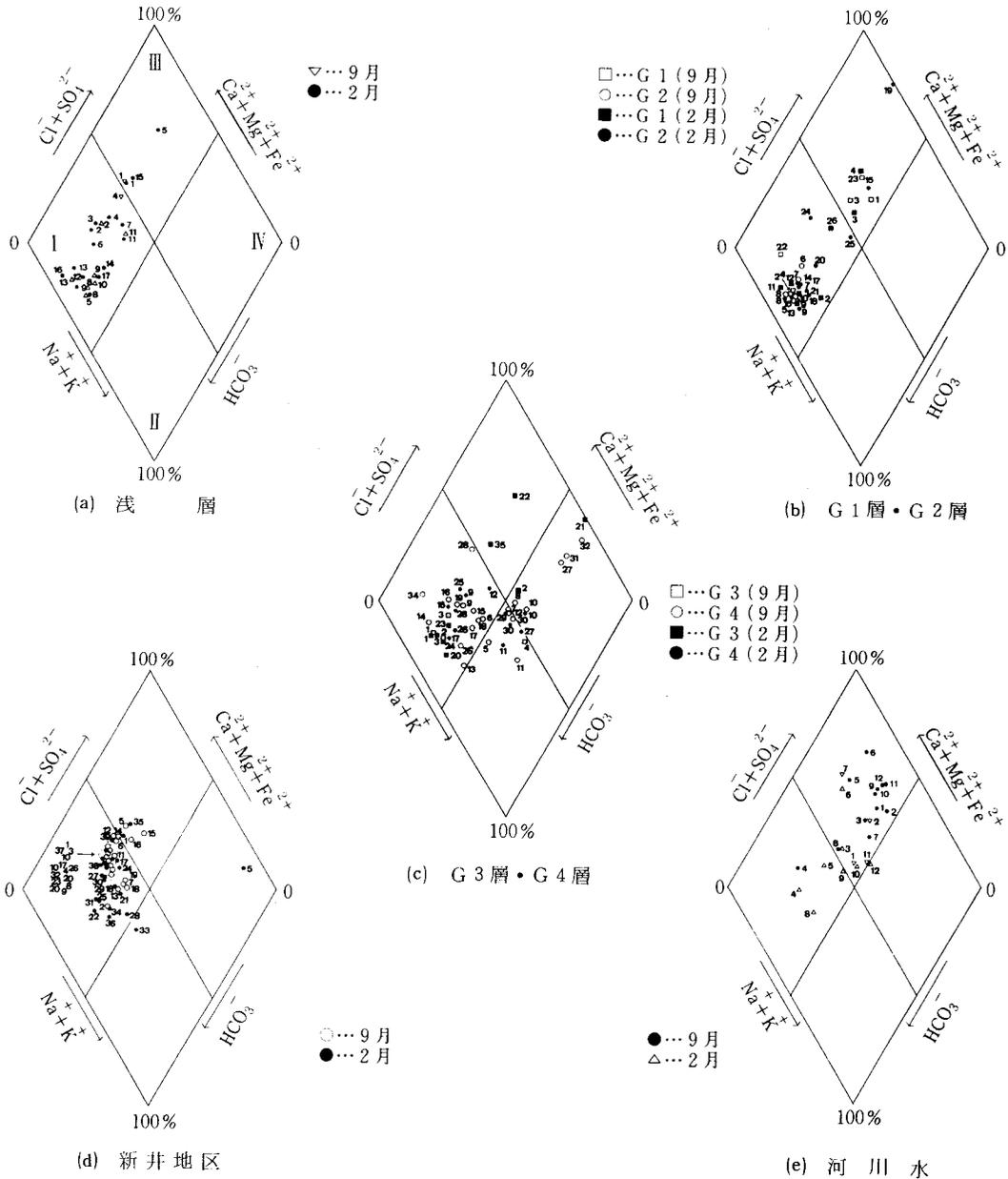


図-2 キーダイヤグラム

の分布を示す。井戸Na5(冬)の地下水は Cl^- と Na^+ の濃度が他の井戸の地下水と比べて非常に高く、同地区においては特異な地下水である。

5) 河川水

図-2(e)から、同地域の河川水は、一般的な河川水が含まれるI型よりもIII型に含まれる地点が多く、I型に含まれる地点は河川の上流部や清流河川の地点である。下流部は生活排水や工場排水等により水質が変化するためIII型に含まれる地点が多いと考えられる。

3.3 濃度相関マトリックス

各地下水の相互関係を検討するため、次の12項目(TOC , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , T-Fe, T-Mn, NH_4^+)を用いて濃度相関マトリックス法^{7) 8)}により解析を行った。

有意な相関を判定するのに用いる相関数とは、成分濃度比の比のマトリックスの中から二試料間の相関性を検討するための判定基準M(今回は1.3を使用)と M^{-1} の範囲に入る個数を同マトリックスの全体の個数で除した数値

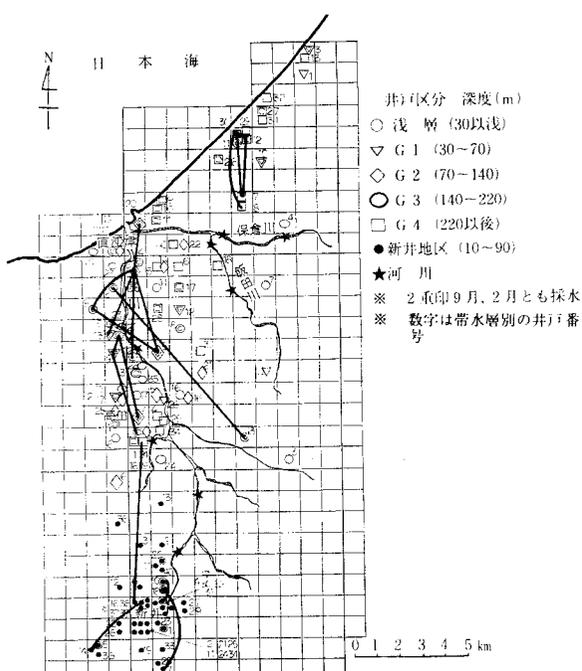


図-3 地下水水質の濃度相関マトリックス法による有意な相関を示す地点(昭和60年9月)

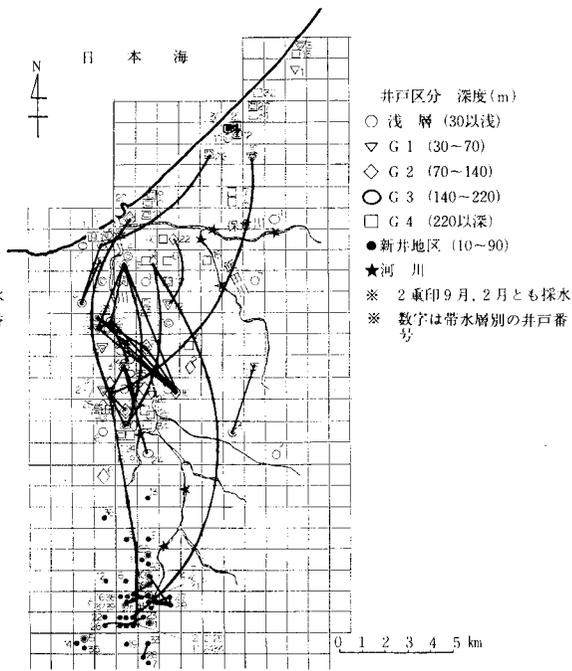


図-4 地下水水質の濃度相関マトリックス法による有意な相関を示す地点(昭和61年2月)

をいう。本調査では相関数 0.5 以上を有意な相関がある地点と判定し、それらの地点を線で結んだ図を図-3(秋)及び図-4(冬)に示した。これから、大潟地区については、G 4 層の井戸 No. 7, No. 8, No. 12, No. 29, No. 30 の地下水がよく似た水質であることがわかった。また、高田・直江津地区では、G 1 層の井戸 No. 13 と G 2 層の井戸 No. 9, No. 16 及び G 3 層の井戸 No. 20 の地下水がよく似た水質であった。G 2 層の井戸 No. 17 と G 3 層の井戸 No. 1, No. 3 の地下水もよく似た水質であることがわかった。次に新井地区については、井戸 No. 27, No. 29, No. 30, No. 32 の地下水がよく似た水質であった。これらのことより、同地域の地下水は、地区別にはほぼ区分される。また、高田・直江津地区においては、同一帯水層だけでなく、上下の帯水層の地下水ともよく似た水質を示しており、今後は、地下水位及び詳細な地質データを基にして同地域の地下水流動を解明する必要があると思われる。なお、地下水と河川水の相関数は、全て 0.2 以下であり、濃度相関マトリックス法による水質データでの両者の相互関係は判断できなかった。

4 ま と め

- 1) 上越地区の地下水は、四つの地区の地下水に分類される。
 - ① 高田・直江津地区の淡水性の地下水
 - ② 新井地区の浅層型地下水

- ③ 大潟地区の地下深部のガス田・油田の影響を受けた地下水
- ④ 直江津地区沿岸部の塩水化の影響を受けた地下水

謝 辞

水質の分析を担当した(財)上越環境科学センターの宮崎所長及び三輪研究員に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 新潟県環境保健部公害対策課：上越地区の地盤沈下，p.14, 1985.
- 2) 新潟県環境保健部公害対策課：上越地区の地盤沈下，p.15, 1986.
- 3) 新潟県企画調整部企画課：上越地域地下水利用実態調査報告書，1982.
- 4) 池田喜代治：工業用水，107，p.49-58 (1967).
- 5) 水島好夫，小林 正，三屋 彰：新潟県公害研報告，3，64 (1978).
- 6) 水島好夫，南 忠員，青柳由美子，三屋 彰：新潟県公害研報告，4，35 (1979).
- 7) 木羽敏泰，松本 健：水汚染の機構と解析(環境科学特論)，p.53 (1978).
- 8) 大沼章子他：愛知県衛生研究所報告，29，p.17-20 (1979).