

幌延地区地下水調査

(平成6年度)

報告書概要

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
T	J1393 98-015	1998.9.30

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1995年3月

応用地質株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107-8445 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8445, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

PNC TJ 1393 98-015

公開資料

幌延地区地下水調査

(平成6年度)

報告書概要

1995年3月

応用地質株式会社

幌 延 地 区 地 下 水 調 査

奥村興平* , 北岡 幸*

堀 雅明* , 原きよ子*

要 旨

本調査は、北海道天塩郡幌延町開進地区において、水文環境の現況を把握するため、地下水位及び土壌水分を継続観測するとともに、降水・表流水・地下水の水質調査を実施し、調査結果を気象データと関連させて単年度の調査結果について検討・解析を行ったものである。また、観測開始以来の観測データを総合的に取りまとめ、調査地区の地下水涵養の特徴についても検討を行ったものである。

調査結果より以下のことが判明した。地下水位は、降雨及び融雪によって変動する。尾根部では変化がゆるやかであるが、沢部では降雨及び融雪に対して明瞭に応答する。

不飽和帯の土壌水分は、一年間のほとんどの期間、上層から下層に向かって移動しており、降雨によって涵養されているが、夏期の長期無降雨時には、地表面付近の乾燥のために地下水面から表層に向かう土壌水の移動が起きることがある。冬期にも、わずかな融雪のために、土壌水が表層から下層に向かって移動し、地下水位が変動している。

当地区の降水、表流水及び地下水は、冬期の季節風の影響を反映した水質を示しており、このことは水素同位体比及び酸素同位体比の分析結果からも裏付けられた。

本報告書は、応用地質株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：062C0001

事業団担当者：環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ，三戸嘉之

*：東京事業本部 東京第一事業部 環境技術部

目 次

	頁
1. 調査概要	1
2. 調査結果及び検討・解析	4
2. 1 気象の状況	4
2. 2 地下水の状況	7
2. 3 土壌水分の状況	1 2
2. 4 水質の状況	1 9
2. 5 降水と土壌水分及び地下水との関連	2 7
2. 6 降水と地下水及び表流水との関連	3 3
2. 7 潮位と地下水との関連	4 0
3. 今後の課題	4 4

1. 調査概要

(1) 件名

幌延地区地下水調査

(2) 目的

本調査は、北海道天塩郡幌延町開進地区で実施している地下水観測を継続することに伴い、土壌水分観測並びに表層水（河川水等）の水質調査を実施することにより、降水量等の気象データと関連させて、幌延地区の水文環境の現況を把握することを目的とした。

(3) 実施範囲

調査項目及び調査数量表を表1-1に示し、調査地点位置を図1-1に示した。

(4) 調査期間

平成6年4月1日～平成7年3月31日

表1-1 調査項目及び数量表

調 査 項 目		期 間 及 び 内 容	数 量	
地下水観測	観 測	H.6.4月1日～H.7.3月31日	12ヶ月	
	データ回収及び 観測機器の保守点検	H.6.4月～H.7.3月 月1回	12回	
	データ整理	H.6.1月1日～H.6.12月31日	12ヶ月	
土壌水分観測	観 測	H.6.4月1日～H.7.3月31日	12ヶ月	
	データ回収及び 観測機器の保守点検	H.6.4月～H.7.3月 月1回	12回	
	データ整理	H.6.1月1日～H.6.12月31日	12ヶ月	
採水及び水質分析	採 水	一 般 水 質	H.6.4月,8月,11月, H.7.2月 3試料×12回	12試料
		同 位 体 比	H.6.4月～H.7.3月 月1回 3試料×12回	36試料
	分 析	一 般 水 質	・水温, pH, 電気伝導率 ・主要10成分(注) 3試料×4回	12試料
		同 位 体 比	$\delta D, \delta^{18}O$ 3試料×12回	36試料
気象データ整理	降水量 気温 蒸発量 気圧	H.6.1月1日～H.6.12月31日	12ヶ月	
検討・解析	降雨浸透状況	-	一式	
	気象と土壌水分及び 地下水との関連	-	一式	
	地下水位変動の特徴	-	一式	

(注) $Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, (NO_2^-+NO_3^-)-N, NH_4^+-N, SiO_2$



図1-1 調査地点位置図

2. 調査結果及び検討解析

2. 1 気象観測データの整理

日降水量, 日蒸発量, 日平均気温及び日平均気圧を平成2年5月から平成6('94)年までの経時変化図として図2-1-1に示した。

(1) 降水量

平成6年1月1日から平成6年12月31日までの1年間の合計降水量は1264.5mmであった。年降水量は平成4('92)年が1160.0mm、平成5('93)年が1137.5mmであったことから、平成6年度の降水量はこの3年間で比較すると約110mm~130mm多い。

平成6年は、夏に降水量が比較的多かったが、秋から冬かけても降水量が多く、1年間の季節変化はこれまでと同じ傾向が見られた。月別の降水量でみると平成6年度は1月, 8月~12月が105~236mmと多く、その他の月は42~89mm程度であった。9月の236.0mmは平成6年度の最大月間降水量であった。平成6年の最大日降水量は8月12日の72.5mmあった。

平成4年、5年には40mm以上の日降水量は記録されていないが、平成6年は4回記録されている。

(2) 蒸発量

平成6年4月30日までと平成6年10月31日以降は気温が0℃を下回るため観測されていない。

観測期間の平成6年5月~10月でみると月蒸発量は5, 6, 8月が62.7~66.3mmと比較的多く、その他の月は25.7~54.5mmであった。平成5年には7月に月蒸発量が97mmと多い月もあったが、観測されている5月~10月の合計降水量で見ると、平成6年は、平成4年より約70mm多く、平成3年, 平成5年とほぼ同値である。

(3) 気温

経時変化図で明らかなように7～8月が20℃前後と高く、11月～3月が-10～5℃と低い明瞭な季節変化を示している。平成5年5月～8月は、平成3年、4年の月平均に比べ約0～3℃低く冷夏であったのに対し、平成6年は7、8月の月平均気温が、この4年間でもっとも高かった。

平成6年の日平均最高気温は平成6年8月7日の24.6℃で、瞬時値では平成6年8月3日に最高気温30.6℃を記録している。また、日平均最低気温は平成6年1月29日の-18.0℃で、瞬時値も同日7時に-26.7℃が記録されている。

(4) 気圧

平成5年と同様に季節変化が認められ、春～夏が低く、秋～冬が高い。短期的には降雨（雪）時に気圧が低下し、無降雨時に高くなっている。また、毎年12～1月にかけて、大きな気圧の変化が認められるのが特徴である。

平成6年の日平均最高気圧は平成6年11月15日の1031.3mbで、日平均最低気圧は平成6年9月5日の950.0mbであった。

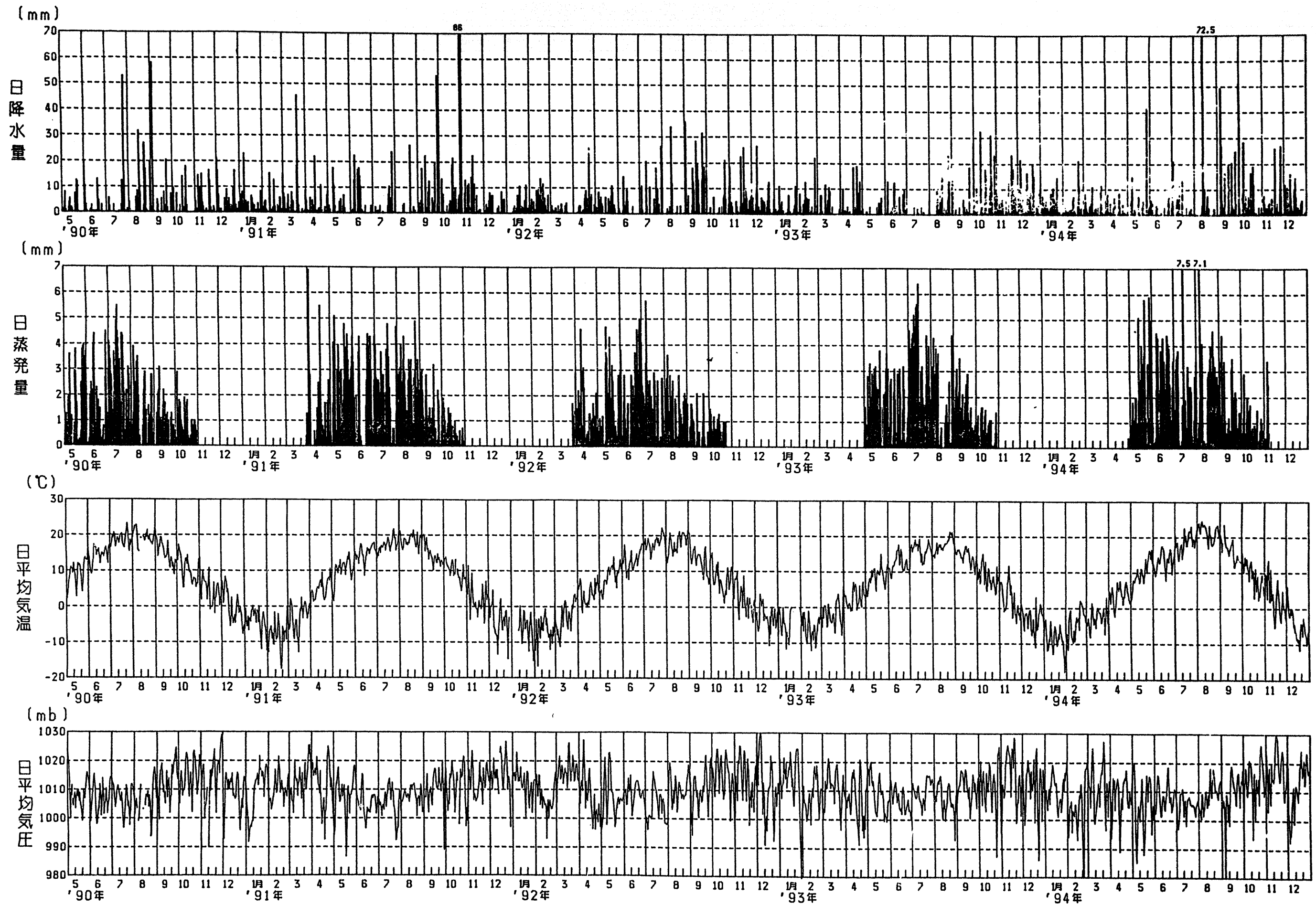


図2-1-1 降水量・蒸発量・気温・気圧経時変化図

2. 2 地下水の状況

サイト内3地点で実施した観測開始から全期間の地下水位観測結果を図2-2-1の経時変化図に示した。

B-1及びB-5の観測井はともに沢部に設置されており、B-1は平成2('90)年4月から、B-5は昭和62('87)年9月から観測されている。

B-2は、尾根部に設置された観測井でB-5と同じく昭和62('87)年9月から観測されている。

また、昭和62('87)年9月から観測しているB-2とB-5のデータ記録間隔(頻度)は観測開始から平成2('90)年4月までは1日当たり1回で、それ以降は2時間毎(1日当たり12回)の記録データである。

B-1は観測開始から2時間毎に記録している。

観測結果によると、3地点それぞれに特徴のある水位変化を示している。

B-1は地盤標高がE.L.13mで、地下水位はGL-1m前後と浅い位置にある。降雨応答が明瞭で、降雨時に鋭く立ち上がり、ピーク出現後の水位低下(回復)が早いのが特徴である。季節変化も比較的明瞭に認められ、気温が0℃を上回ることの多くなる3月中旬から下旬に融雪による水位上昇を示す。融雪が終わる4月下旬から、降雨が少なくなることに伴い、夏季渇水期の7月あるいは8月まで降雨に応答しながらも、水位は低下する。年によって異なるが、7月下旬～9月上旬に1年の最低水位が出現する。その後、降雨が多くなるため、水位はやや上昇し、気温が0℃を下回り始める11月か12月までは降雨の多少に応じて上下している。気温がほとんど0℃を下回り、降水が雪となる12月下旬から3月中旬・下旬まではわずかに小刻みな変動はみられるが、水位はほぼ一定であり、流出量と涵養量がほぼバランスしていることがわかる。

融雪による水位上昇は、平成3('91)年4月が平成2('90)年、4('92)年、5('93)年、6('94)年に比べて高いのは表2-2-1及

び表2-2-2に示すとおり、冬季（1～3月）の降雪量が多く、さらに、4月の気温が高かったことによると考えられる。

表2-2-1 1～3月の降水量

期	間	合計降水量(mm)
平成2('90)年	1～3月	158
平成3('91)年	1～3月	302
平成4('92)年	1～3月	198.5
平成5('93)年	1～3月	211
平成6('94)年	1～3月	275

表2-2-2 4月の月平均気温・地下水位

年	気温(℃)	地下水位(E.L.m.)
平成2('90)年	5.0	12.06
平成3('91)年	4.8	12.47
平成4('92)年	3.7	12.20
平成5('93)年	2.6	12.25
平成6('94)年	3.7	12.24

尾根部のB-2は地盤標高がE.L.21.0mで、地下水位は約GL-10.1～-10.5mにあり、3地点のうちで最も深い。

B-2についても明瞭な季節変化は示しているが、B-1及びB-5とは異なり、降雨時の鋭敏なピークはみられず、上昇・下降ともにゆるやかである。また、年間変動幅は、B-1とB-5が約0.7～1.0mであるのに対し、B-2は約0.3mと小さいのが特徴である。

B-2は3月中～下旬の融雪に伴い、水位が上昇し始め、以降ゆるやかに上昇し、約20日～1ヶ月後の4月中～下旬になだらかなピークを示す。その後、多量の降雨時にわずかな上昇を示すこともあるが、8月～9月まで徐々に低下する。9～11月頃の秋雨で再びわずかづつ上昇を示し、11月～12月になだらかなピークを示したあとは翌年の融雪まで低下

し続ける。

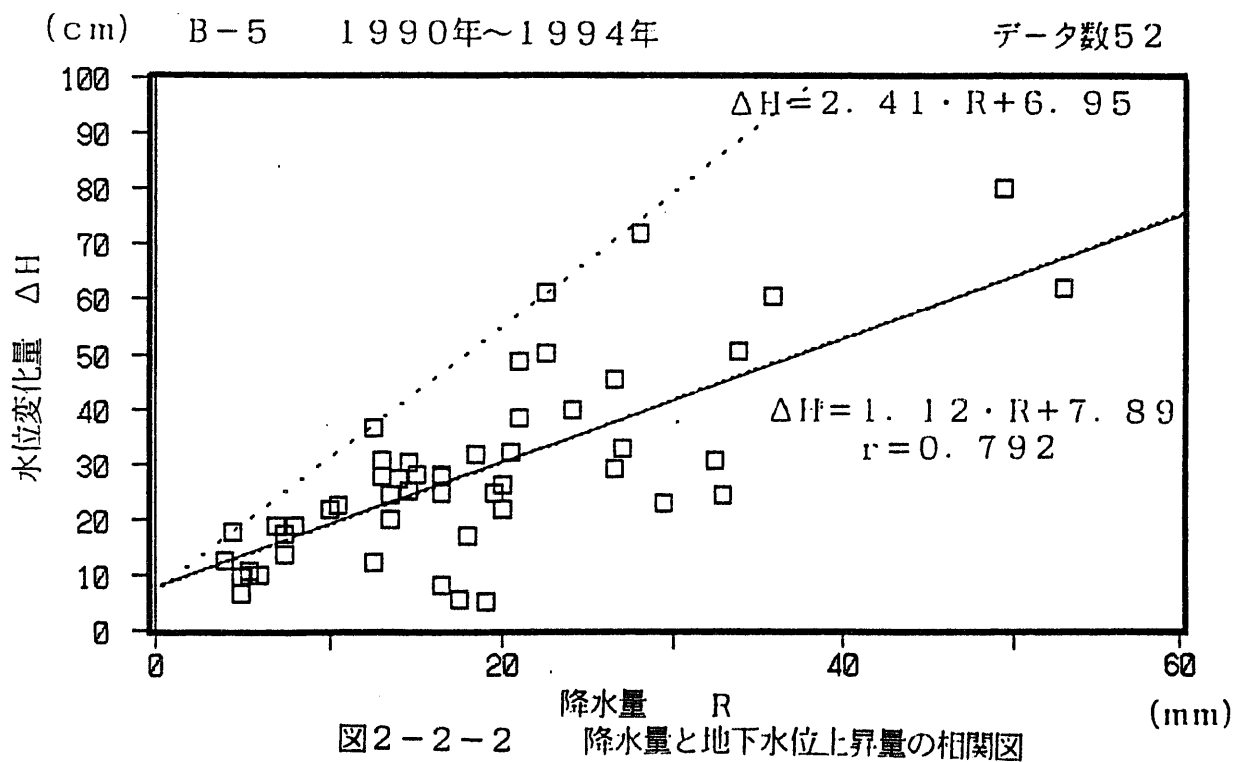
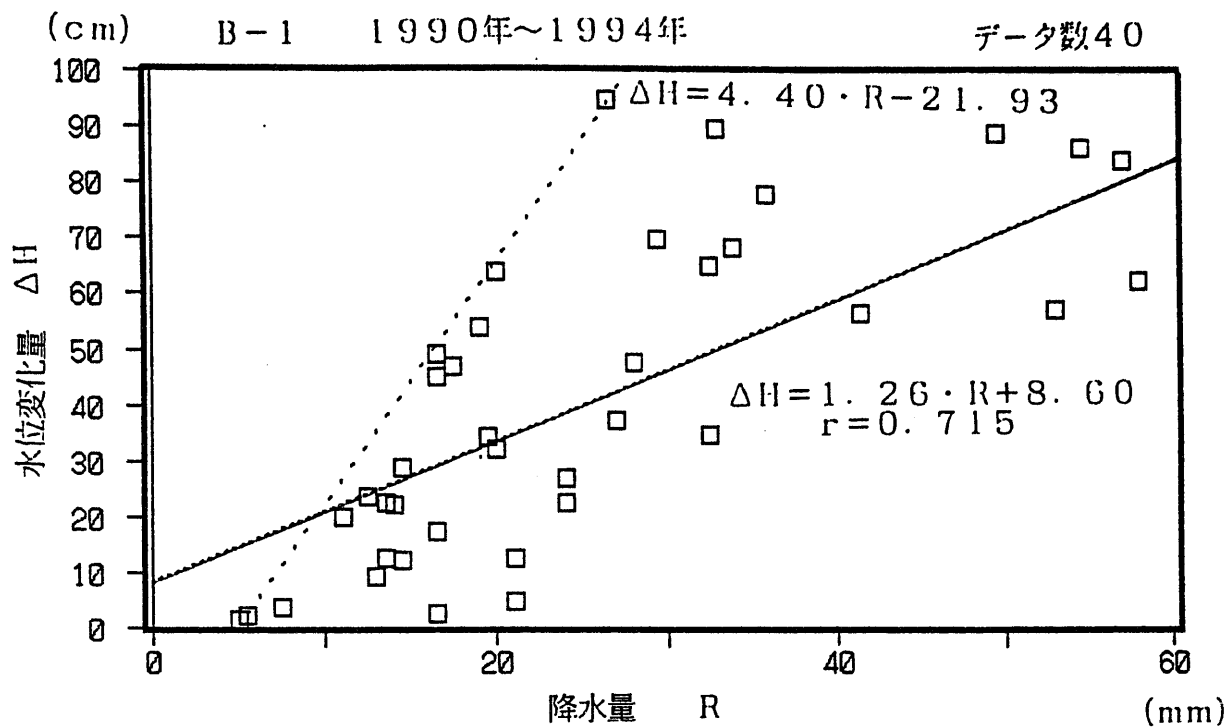
B-5は沢部河床脇の地点である。地盤標高はE.L. 25mで、水位は冬～春季にはほぼ地盤面付近にあり、夏～秋季にGLO～-1mの間で変動する。この地点は積雪のある冬季から融雪の終わる5月までは水位がほぼ地盤面にあり、ほとんど変化がない。融雪の終わる4月下旬あるいは5月からは降雨が少なくなるにつれて、B-1と同様に夏季渇水期の7～8月まで、降雨に対応しながら水位は低下している。7月下旬から9月上旬に1年の最低水位が出現する。その後、雨が多くなるにつれて変動しながら上昇し、降雪が始まる11～12月頃には再び水位は地盤面に戻る。

B-5の地下水は沢水によって涵養されていると考えられ、夏季には降雨時以外表流水が認められず、表流水があるときに水位も上昇している。

B-1、B-5における、平成2('90)年～平成6('94)年の代表的な降雨時の降雨量と地下水位の変化量の関係をプロットすると図2-2-2のようになる。図中の実線は一次回帰直線であり、回帰式と相関係数を併記しているが、明らかに相関は弱い。これは浸透途中で側方流出したり、降雨が多いために浸透せずに表面流出してしまう量があることによるものと考えられる。

図の左側の破線が過不足なく浸透する場合の直線を示しているものと考えられる。上段のB-1は降雨量5mm以上で水位が上昇し始めることを示しており、この5mmの降雨は不飽和部に保水される量であると考えられる。

また、下段のB-5の場合は、降雨量が0mmでも約7cmの水位上昇があることになるが、これは降雨のほか先に述べたように河川水からの供給があるためと考えられる。



2. 3 土壌水分の状況

測定開始（平成2年5月1日）から全期間の圧力水頭、全水頭及び体積含水率の経時変化を図2-2-1に示した。

土壌水分についても、地下水位と同様に明瞭な季節変化がみられる。まず、圧力水頭の経時変化図をみると、融雪の始まる3月下旬から、降雪の始まる12月下旬まで、降雨に対応した変化を示している。すなわち、浅い深度のGL-10cm（平成4年度までの観測）、-25cm、-50cmは、降雨時の上昇、降雨終了後の低下が明瞭で、かつ、深い深度のGL-100～-200cmに比べて大きく変化している。特に、GL-10～-50cmは、降雨が少なく気温の高い6～8月の無降雨時には著しく低下し、強い乾燥状態を示した。

ただし、平成5（'93）年についてはGL-10cmは年間を通じてほぼ一定であった。また、平成5年7月～8月上旬は過去に比べても雨量が格段に少なかったにもかかわらず、GL-10cm及びGL-25cmともに、過去の同期のような著しい圧力水頭の低下は示さなかった。

表2-3-1に平成2年～平成6年（5年間）の7・8月の月降水量、月平均気温、月平均圧力水頭を示す。この表から明らかのように、平成5年7・8月のGL-10cmと-25cmの月平均圧力水頭は他の年の7・8月に比べて高く、気温は他の年の7・8月に比べて低い。平成5年7・8月の圧力水頭が高い原因は、平成5年7・8月の気温が他の年に比べて低いため、蒸発散量が少なかったことによるものと考えられる。

GL-50cmは圧力水頭がわずかに0cm H₂O以下であるが、降雨時には0cm H₂O以上となり飽和する。GL-100～-200cmは常に圧力水頭が0cm H₂O以上で、常時飽和している。GL-100cmとGL-150cm、さらにGL-150cmとGL-200cmの圧力水頭差はそれぞれほぼ50cm H₂Oであり、GL-100cm～GL-200cmまでの地下水は静水圧分布に近いことを示している。

降雪の始まる12月下旬から、翌年の3月中旬までは、ごくわずかな圧力水頭の低下がみられる程度で降雨期に比べてその変動幅は格段に小さ

表 2 - 3 - 1 7・8月の月降水量、月平均気温、月平均圧力水頭

年	月	月降水量 (mm)	月平均気温 (℃)	月平均圧力水頭 (cmH ₂ O)	
				GL-10cm	GL-25cm
平成 2 ('90) 年	7月	77.0	18.7	-167.9	-152.5
	8月	165.5	19.3	-132.0	-88.2
平成 3 ('91) 年	7月	64.0	17.4	-364.5	-335.2
	8月	34.0	18.6	-125.2	-73.6
平成 4 ('92) 年	7月	131.0	17.8	-122.6	-236.8
	8月	54.0	17.8	-355.1	-64.1
平成 5 ('93) 年	7月	9.5	16.1	-10.3	-57.3
	8月	100.5	17.6	-8.5	-36.2
平成 6 ('94) 年	7月	73.5	18.6	-	-38.1
	8月	105.0	21.3	-	-242.1
平均	7月	71.0	17.7	-167.9	-152.5
	8月	165.5	18.9	-132.0	-88.2

い。このことは、降雨期に比べて、積雪期の土壌水分の動きが小さいことを示している。

次に、全水頭の経時変化をみると、平成 2 ('90) 年～平成 4 ('92) 年、平成 6 ('94) 年の 7 月あるいは 8 月のように圧力水頭が著しく低下した時期を除き、全水頭は表層の GL-10cm が最も高く、次いで GL-25cm、GL-50cm の順に低くなり、GL-200cm が最も低い。このことは、1 年のほとんどの期間は、土壌水分が地表面付近から地下水面に向かって移動すること、すなわち、降水が地下水を涵養していることを意味している。

また、平成 2 ('90) 年～4 ('92) 年及び平成 6 ('94) 年の 7 月、あるいは 8 月のほとんど降雨がない時期は、GL-100～-200cm の 3 深度の全水頭が最も高く、GL-50、-25、-10cm の順に（平成 6 年 8 月は GL-50、-25cm の順に）低くなっている。これは、降雨が少なく気温が高いため、地表面付近が蒸発により著しく乾燥し、地下水面から地表面に向かって土壌水分の移動が起きていることを示している。

体積含水率は GL-10cm と GL-25cm が約 10～20% で変化し、降雨時の上昇及び回復（低下）が明瞭である。また、冬季の 1～2 月は変化が小さ

い。GL-50cm はGL-10cm 及びGL-25cm に比べて高く、約40～46%で変化しており、降雨時には飽和している（一定値となっている）。

GL-100～-200cmは常に飽和しており、直線となっている。

各深度の間隙率はGL-10cm, -25cm がそれぞれ23.4%, 23.7%で、GL-50～-200cm は約46～51%である。よって、GL-50cm が降雨時に一定値を示し、GL-100～-200cmが年間を通じて一定であるのは、飽和しているため体積含水率がそれ以上大きくならないことによる。

また、圧力水頭が著しく低下した平成3（'91）年、平成4（'92）年の6月下旬～7月及び平成6（'94）年8月についてみると、GL-10～-50cmの体積含水率の変化は他の時期と大差ない。これは、圧力水頭すなわち土壌水分吸引圧が低下するとき、低い吸引圧で大きな孔隙中の土壌水分は移動するが、微細な孔隙に保持されている土壌水分は移動しづらく、体積含水率の変化としては小さく表れているためと考えられる。

図2-3-2(1)(2)には、圧力水頭が著しく低下した平成3（'91）年7月（図2-3-2(1)）と平成4（'92）年8月（図2-3-2(2)）の降雨前後、図2-3-3(1)(2)には圧力水頭がほとんど変化しない平成4（'92）年1月（図2-3-3(1)）及び平成5（'93）年1月（図2-3-3(2)）の全水頭深度変化図を降水量、気温とともに示した。図2-3-2(1)(2)は、降雨の少ない日が続いたあとにまとまった降雨があり、全水頭が大きく上昇した時の降雨前後の日平均全水頭を深度方向に結んだものである。図で直線の勾配が正（右上がり）の場合は全水頭の高い上層から、全水頭の低い下層に向かって土壌水分は移動する。逆に、勾配が負（右下がり）の場合は、土壌水分は上向きに移動する。図2-3-2(1)は、平成3（'91）年6月29日～7月21日まで降雨の少ない日が続き、7月22日に7.5mmのまとまった雨が合ったときの全水頭深度変化図を示している。7月22日の降雨前はGL-100cm以浅が負の勾配となっている。図2-3-2(2)は、平成4（'92）年8月15日～9月1日まで降雨の少ない期間が続き、9月2日に36.0mmのまとまった雨が合った時の全

水頭深度変化図を示している。9月2日の降雨前はGL-50cm以浅が負の勾配になっている。図2-3-2(1)、図2-3-2(2)ともにまとまった降雨後にはほぼ正の勾配となっている。このように、著しく乾燥した時期には、全水頭の勾配が正から負、あるいは負から正に逆転する深度が現れることがわかる。勾配が逆転する深度をゼロフラックス面という。平成3年7月の場合はゼロフラックス面がGL-100cmであり、このときは地下水面から地表に向かって土壤水分が移動していたことになる。

ゼロフラックス面は常に存在するわけではなく、無降雨日が続いた場合や降雨が少なく地表面からの蒸発散による乾燥が著しい場合に現われ、まとまった降雨によって解消する。

また、ゼロフラックス面の深度が時期によって異なるのは、ゼロフラックス面が現れるまでの降水量の多少、あるいは無降雨日数の多少、気温の違いなどによる土壤の保水量の差及び蒸発散量の大小によるものと考えられる。

図にはサクション0の勾配線も示しているが、観測値がこの勾配線より右側にある場合は飽和状態、左側にある場合は不飽和であることを示す。図をみると、降雨前では約GL-100cm以深、降雨後はGL-50cm以深は飽和し、かつ、GL-100cm以深のプロットがほぼ垂直であることから、地下水面以深ではほぼ静水圧分布を示すことがわかる。

図2-3-3(1)(2)には、圧力水頭が経時的にほとんど変化しない冬季(平成4('92)年1月、平成5('93)年1月)の全水頭深度変化図を示している。図で明らかなように、GL-50cm以浅は不飽和で、表層の全水頭がわずかに高く、土壤水分は表層から地下水面に向かって移動することがわかる。また、GL-100cm以深の地下水面下では、夏季と同様に静水圧分布に近いことを示している。

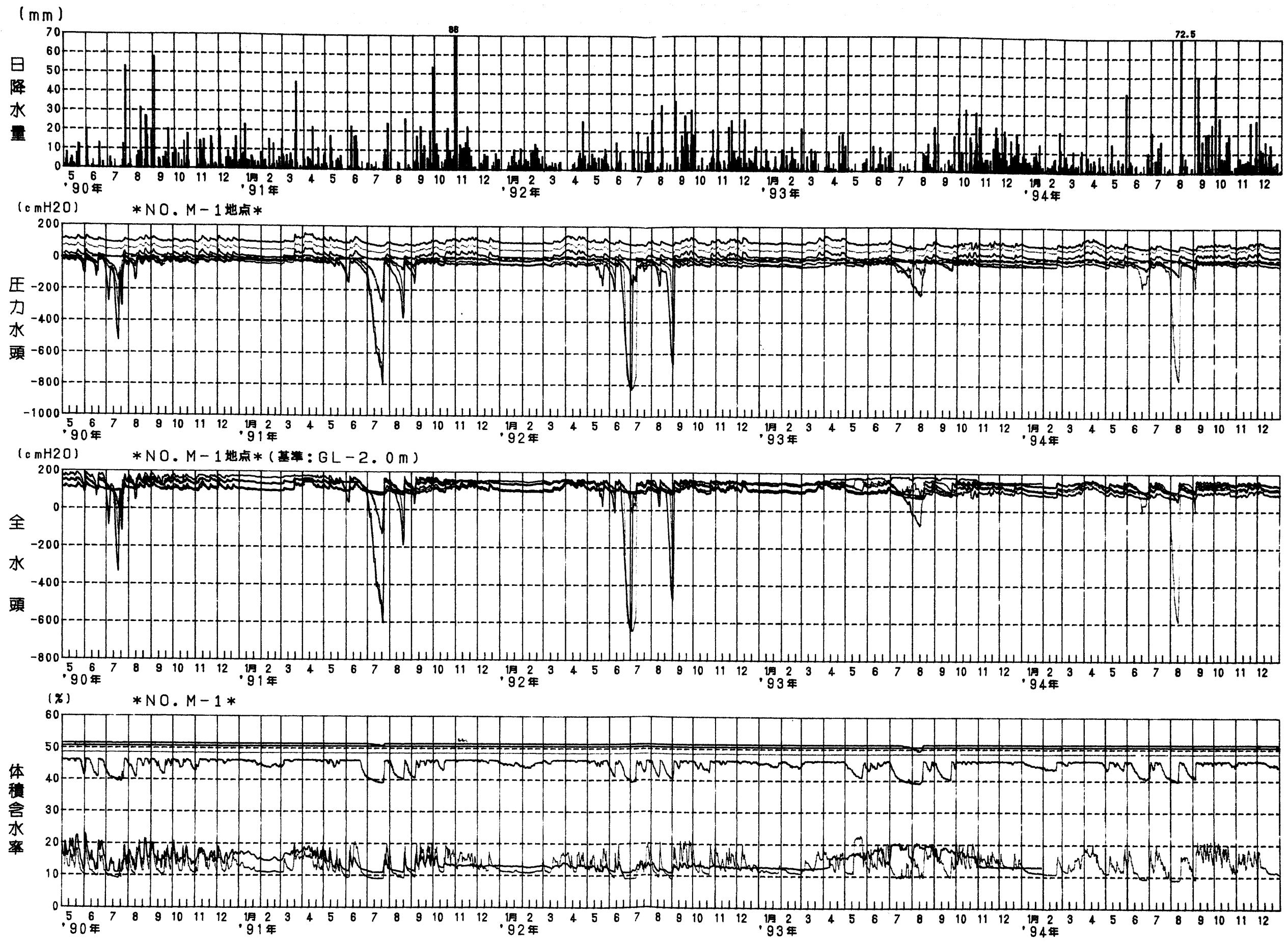


図2-3-1 土壤水分経時変化図 (観測開始から全期間)

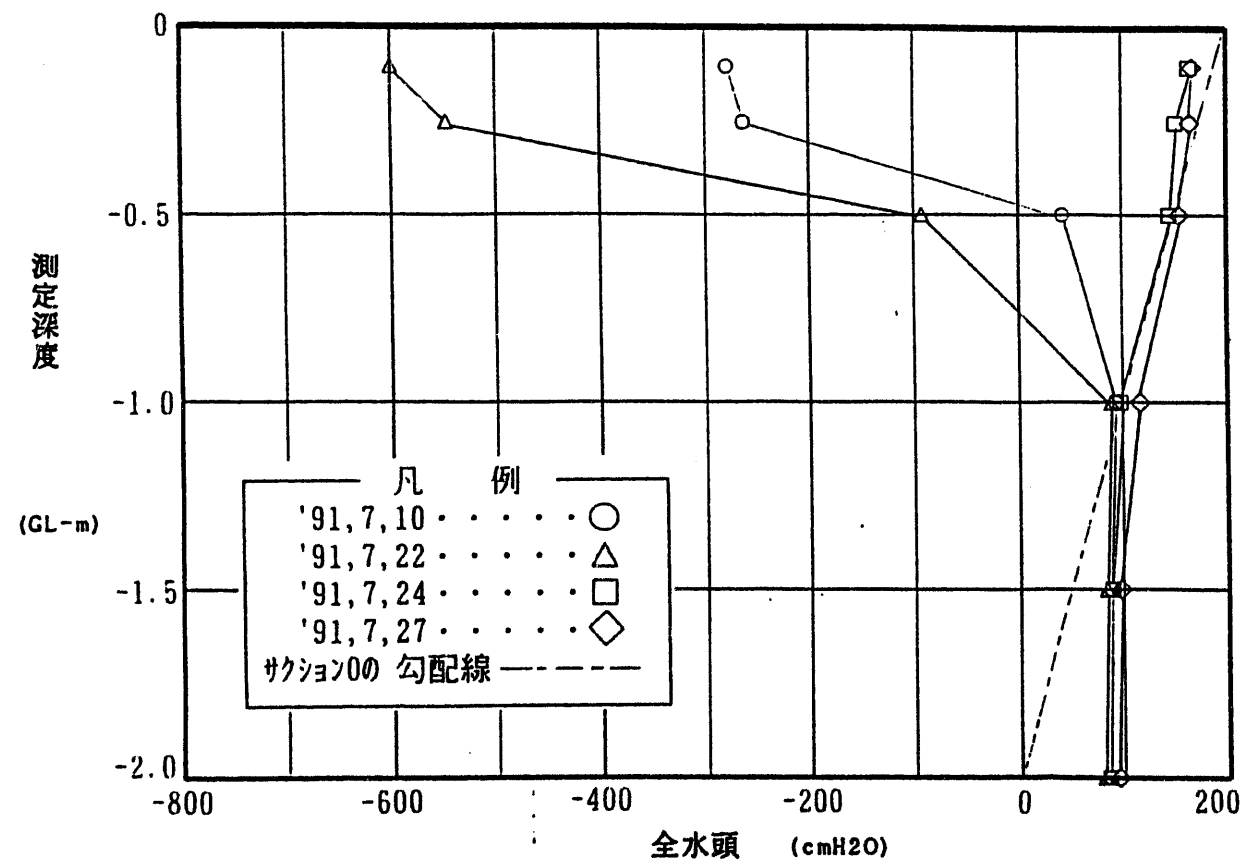
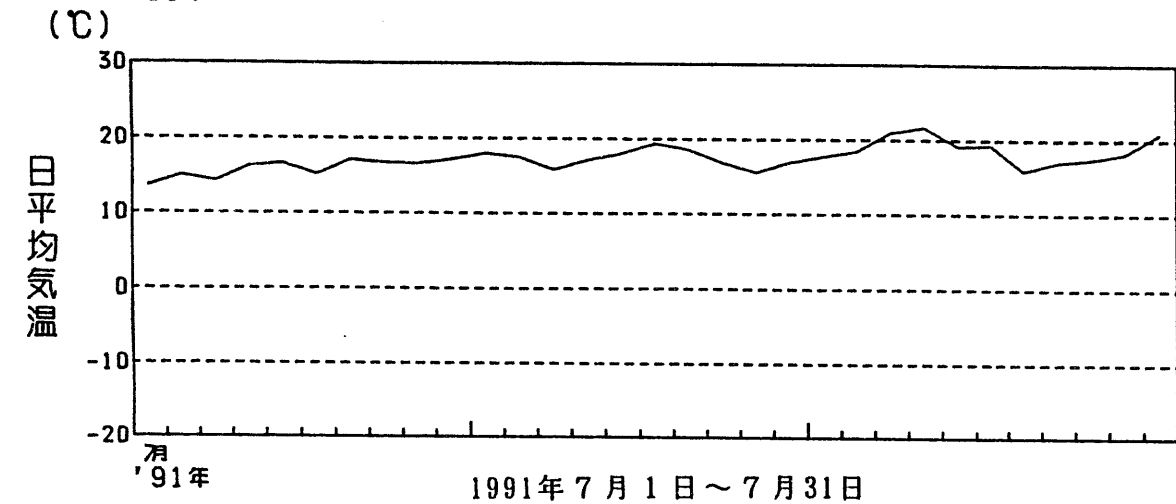
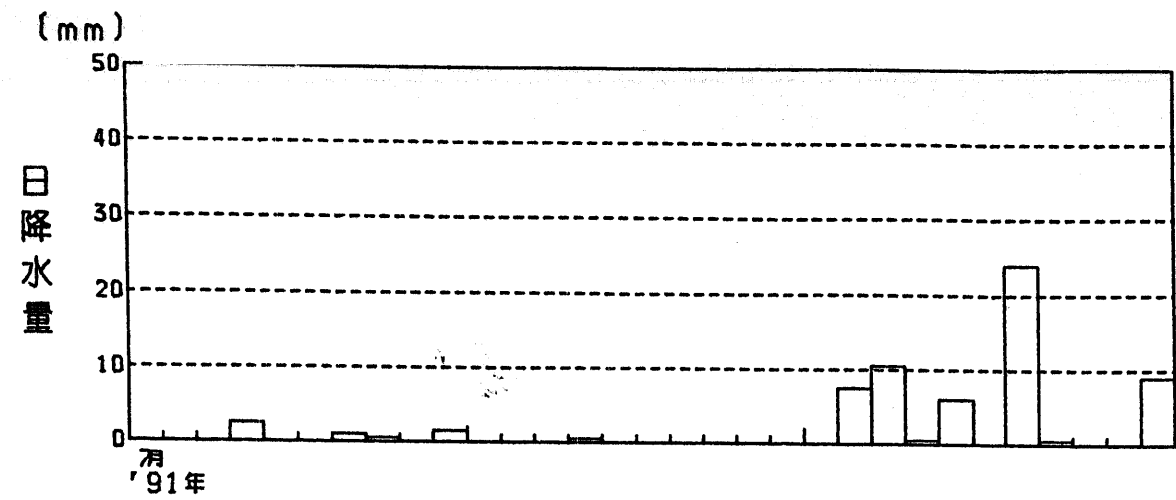


図 2-3-2 (1) 全水頭深度変化図

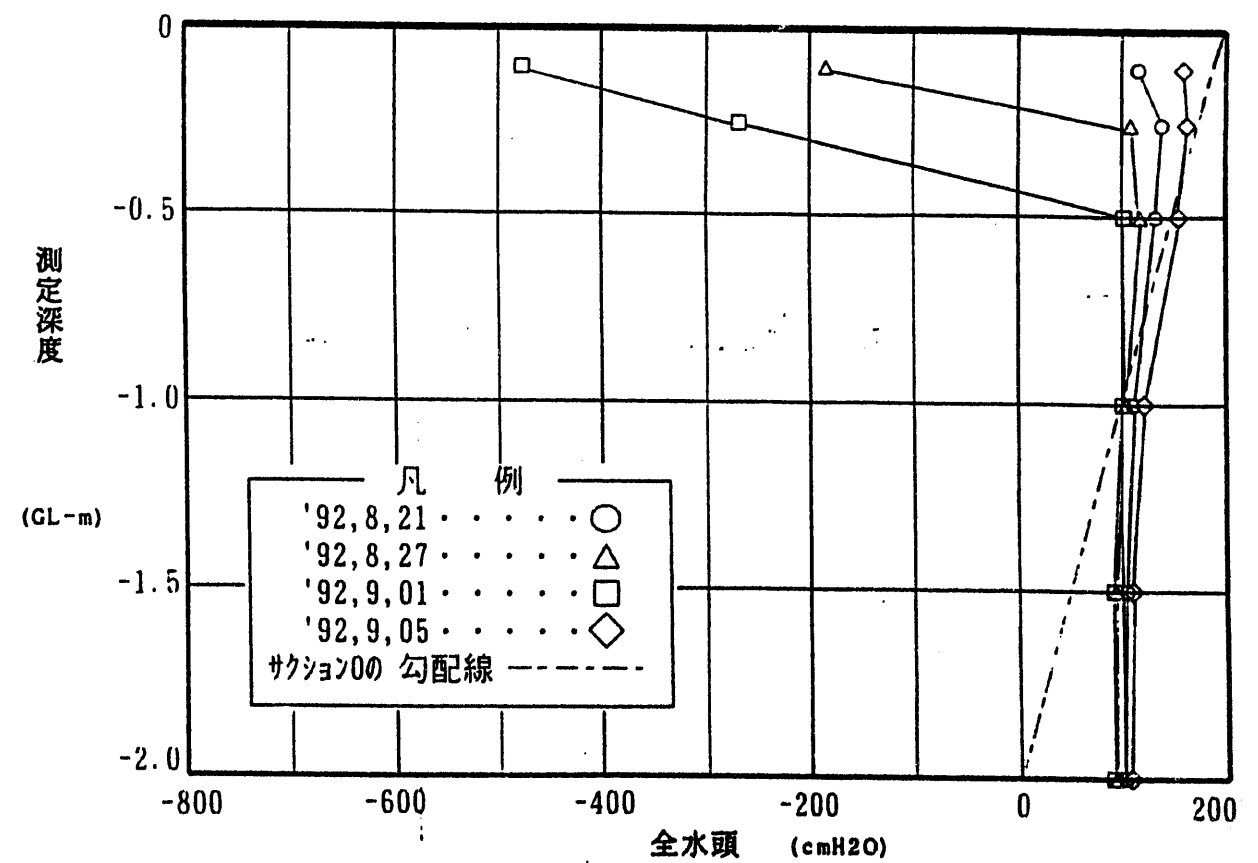
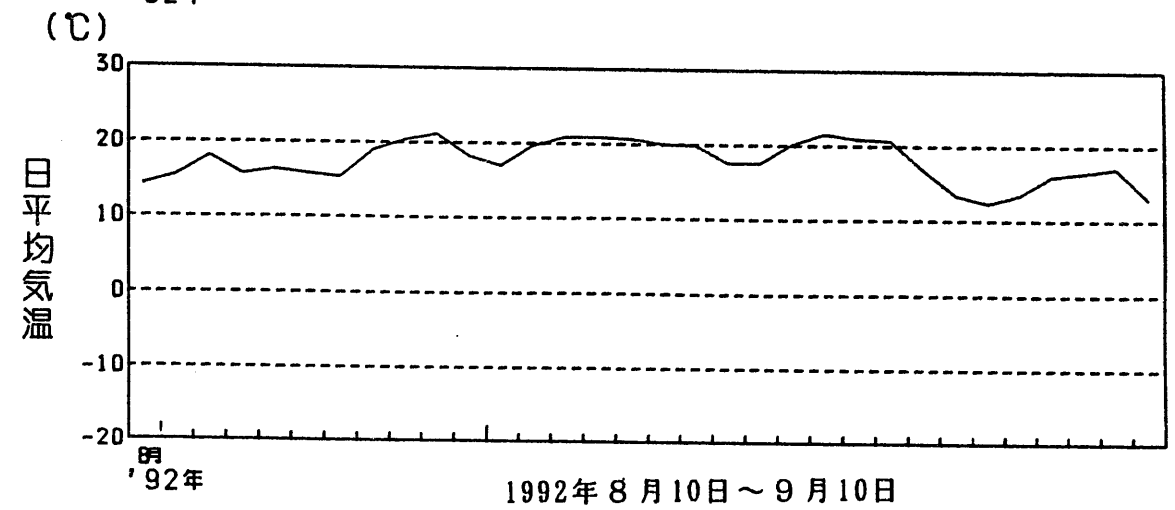
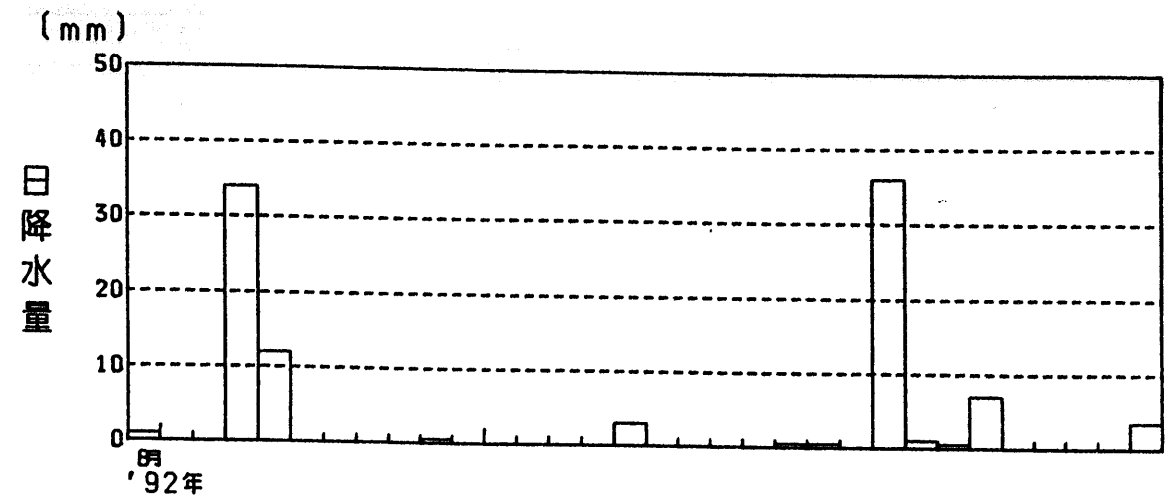


図 2-3-2 (2) 全水頭深度変化図

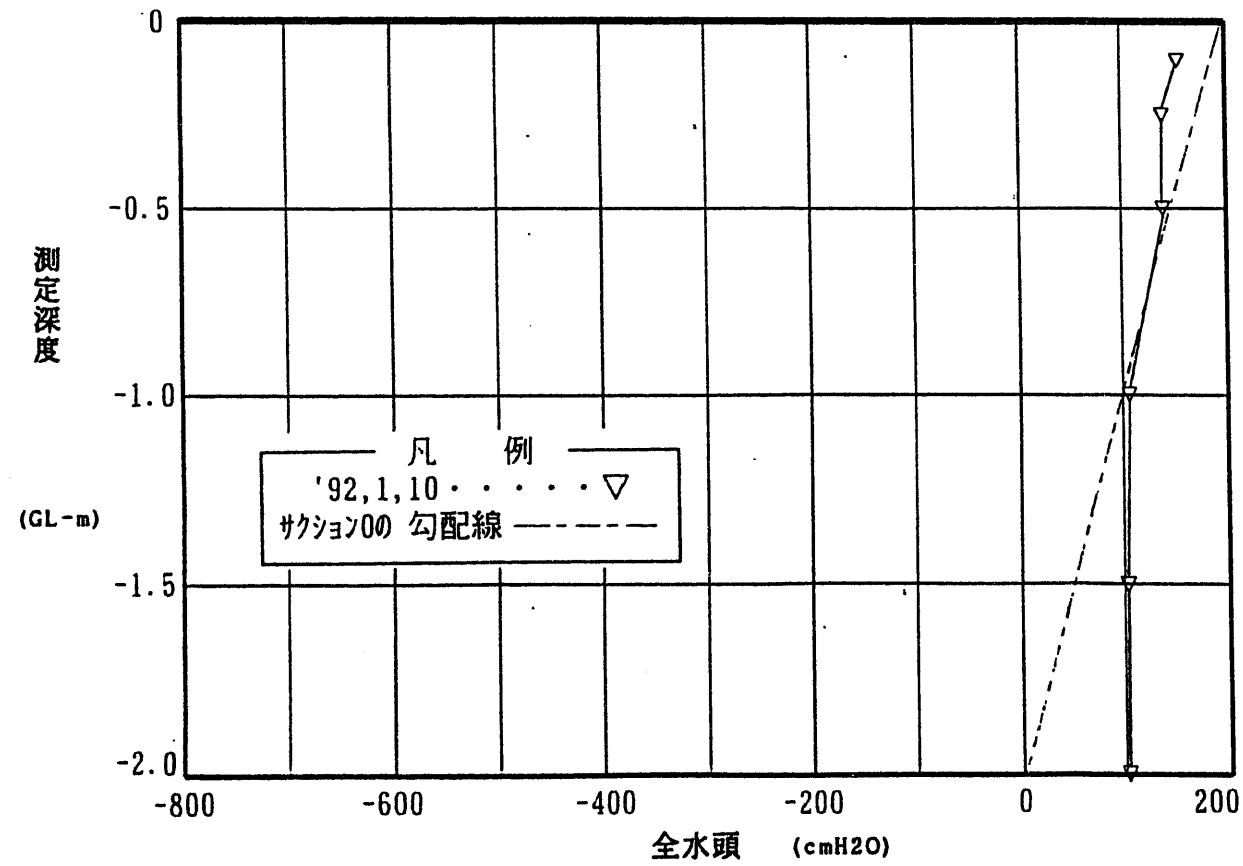
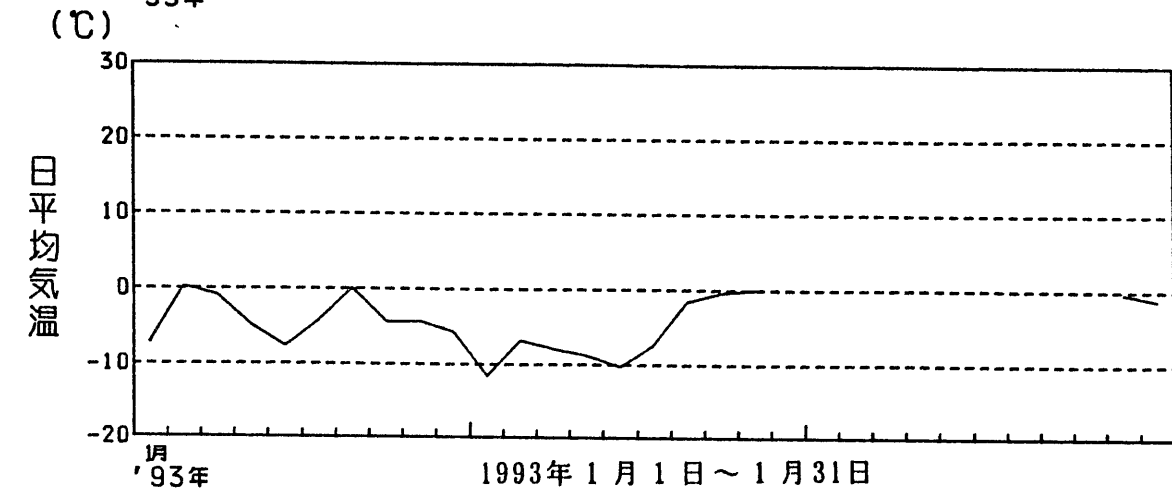
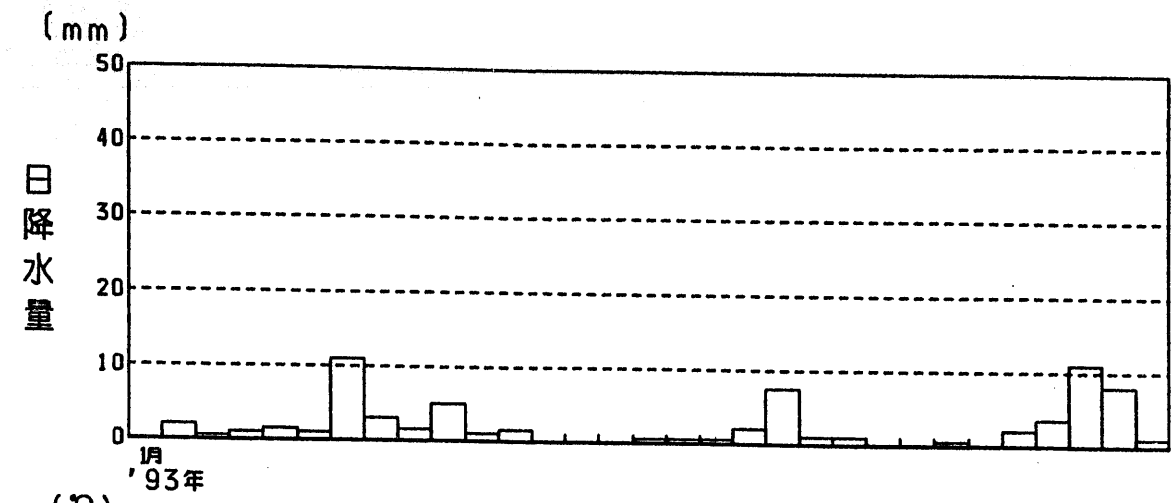
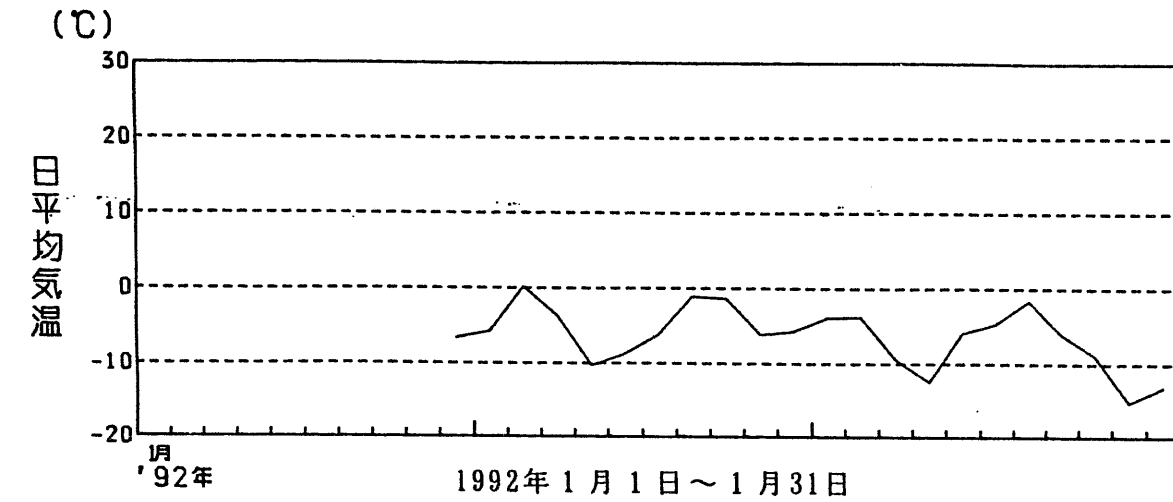
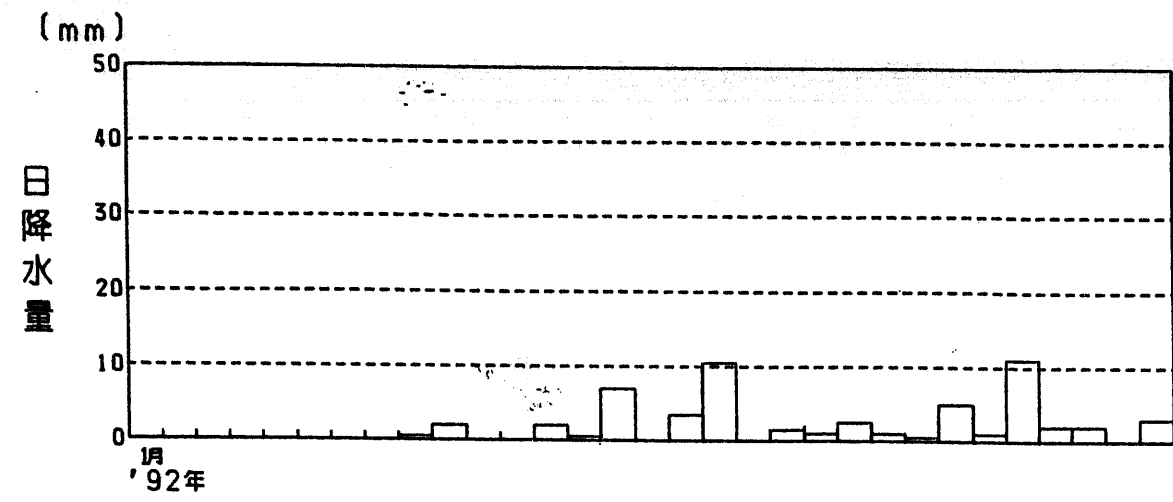


図 2 - 3 - 3 (1) 全水頭深度変化図

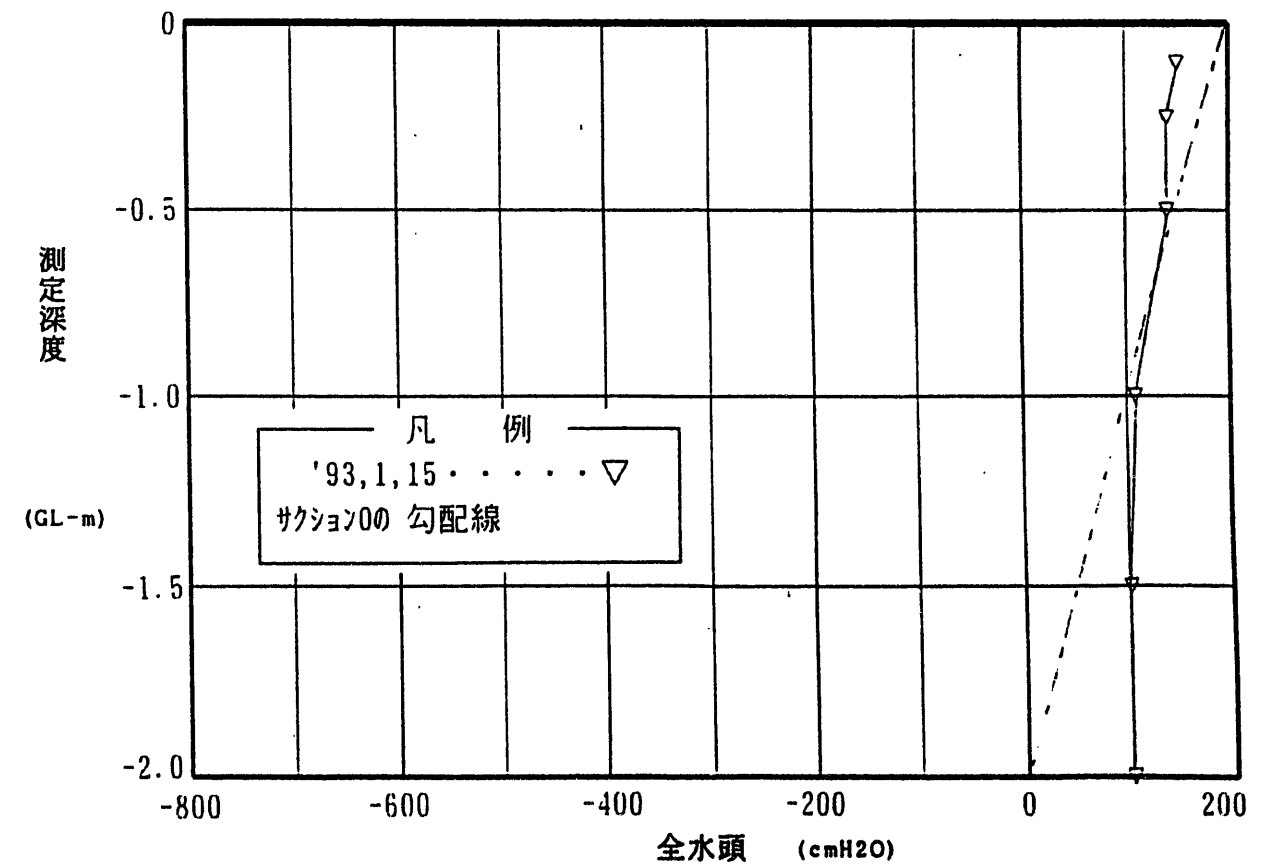


図 2 - 3 - 3 (2) 全水頭深度変化図

2. 4 水質の状況

毎月の同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) 分析用試料採取及び3ヶ月毎の一般水質分析用試料採取時に、現地で測定した水温, pH, 電気伝導率測定結果を経時変化図として、図2-4-1に示す。

それによると、降水はpH及び電気伝導率ともに夏～秋に低く、冬～春に高い季節変化を示した。冬から春にかけては大陸からの季節風が強いため、夏から秋に比べて風送塩が多く運ばれてくることによるものと考えられ、水質分析結果で Na^+ , Cl^- が多いことから裏づけられる。また、平成3('91)年7月～10月はpHが4.0～4.7と低かった(酸性雨)が、それ以降は6前後を示している。電気伝導率は7～86 $\mu\text{S}/\text{cm}$ で、ほぼ年間を通して表流水No.1及びボーリング孔内水B-1(地下水)に比べて低く、特に夏季は20～40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を示す。

表流水No.1は、冬季でも凍結せず、わずかに流水が認められた。表流水No.1の水温は気温の影響及び降雪の影響による明瞭な季節変化を示している(平成6年4月～平成7年3月0.5～17.0 $^{\circ}\text{C}$)。pHは6前後で変動しているが特に明瞭な季節変化は認められない。電気伝導率は60～90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ を示すことが多いが、平成3年('91年)8月や平成4('92)年8月、平成5('93)年7月、9月、平成6('94)年8月のように夏期の降雨の少ない時期に100～200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高い値を示しており、地下水流出が降水の浸透、流出に比べて多くなることによるものと考えられる。

ボーリング孔内水B-1(地下水)の水温についても、表流水No.1と同様の季節変化が認められた(平成6年4月～平成7年3月4.9～11.6 $^{\circ}\text{C}$)。ただし、変動幅は表流水よりも小さい。地下水についても水温の季節変化が現れているのは、測定地点(B-1)の地下水位がGL-1m前後と浅いため、無積雪期には気温の影響を受け冬季には低温の積雪の影響を受けていることによるものと考えられる。地下水のpHは、約5.6～6.0で変動し、また、電気伝導率は、降水及び表流水No.1に比べて変動幅は小さいと言えるが、平成4('92)年9月及び平成5('93)

年3月、11月及び平成6('94)年9月のように、多量の降雨あるいは融雪水の影響を強く受けたと考えられる大きな変化を示すことがある。また、電気伝導率は平成3('91)年7月から平成7('95)年3月まで徐々に高くなる傾向が認められる。

現地測定 of 電気伝導率は徐々に上昇する傾向を示しているが、室内分析による電気伝導率及びイオン組成は変化していない。室内測定 of 電気伝導率と現地測定 of 電気伝導率に差が生じているのは、現地測定時の試料水は濁りを含んでいるのに対し、室内測定時の試料水は静置後であるため、濁りをほとんど含んでいないことから、濁りすなわち、浮遊物質が電気伝導率上昇の原因となっているものと考えられる。さらに、現地測定 of 電気伝導率が上昇しているのは、ボーリング孔の孔底深度がスライムによって徐々に上昇してきていることから、濁り(浮遊物質)の質が変化していることによるものと推定される。

以上のように降水と表流水No. 1及びボーリング孔内水B-1(地下水)のpHと電気伝導率は1年中一定ではなく変化があり、また、年度によって変化の現れ方はまったく同じではないことが確認された。特に、降水は表流水No. 1及びボーリング孔内水B-1(地下水)地下水に比べて大きな変化を示すことが明らかとなった。

次に平成3('91)年8月～平成7('95)年2月の四季に実施した一般水質分析結果(主要溶存成分)をヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラムとして図2-4-2(1)～(4)に示した。ボーリング孔内水B-1(地下水)は、現地水質測定結果で得られたように、降水や融雪水の影響によるpH及び電気伝導率の若干の変化はあるが、水質はNa-HCO₃型で安定しており、組成の変化はないことがわかる。表流水No. 1は四季を通じて典型的なNa-Cl型の水質を示しており、Na-Cl型であることが多い降水の影響を強く受けていることがわかる。また、平成3('91)年～6('95)年の各年とも、8月は他の季節に比べて電気伝導率が高く、かつ、ヘキサダイアグラムの形状も異なっている(HCO₃⁻, Mg²⁺, Ca²⁺が

多い)。これは、各年度とも7月、8月は降雨が少なかったため、地下水流出の割合が多くなっているものと考えられる。

降水はボーリング孔内水B-1(地下水)及び表流水No.1に比べて電気伝導率が低く、特に、8月は各年とも格段に低い。ヘキサダイアグラムは11月及び2月に典型的なNa-Cl型を示しており、8月と5月に比べて電気伝導率も高いことから、冬季の強い季節風による風送塩の影響が現れていると考えられる。このような降水が地表面から浸透していく過程で蒸発濃縮を受け、さらに土壌との接触によって溶存成分を増加させながら、表流水として流出し、あるいは地下水となって移動すると考えられる。

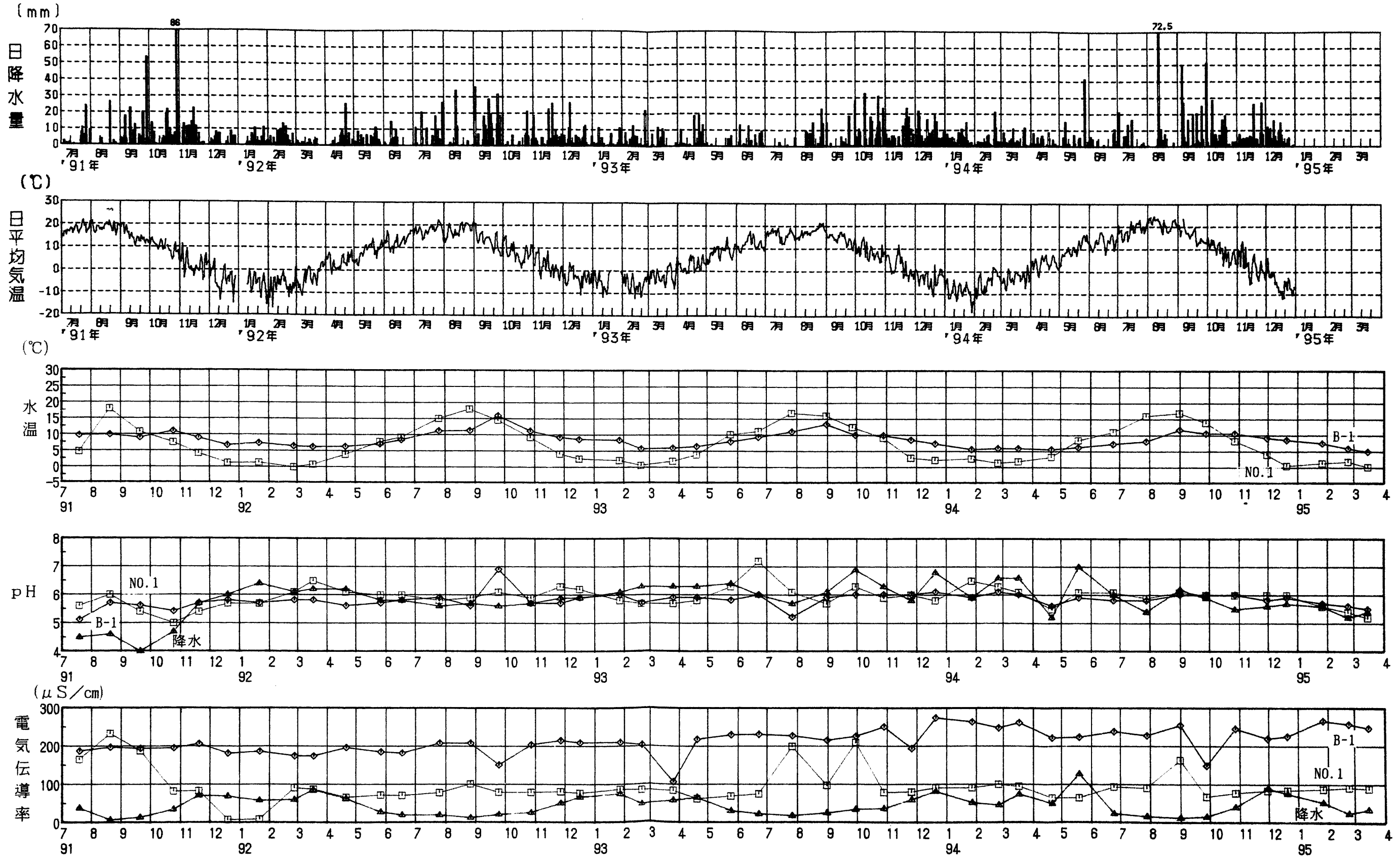
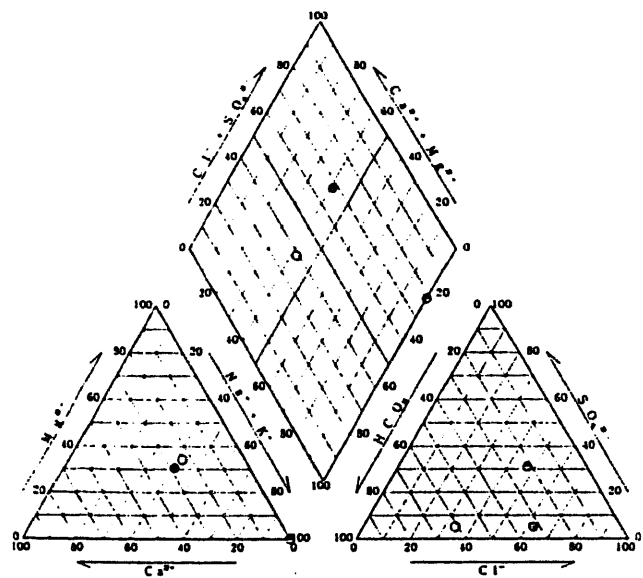
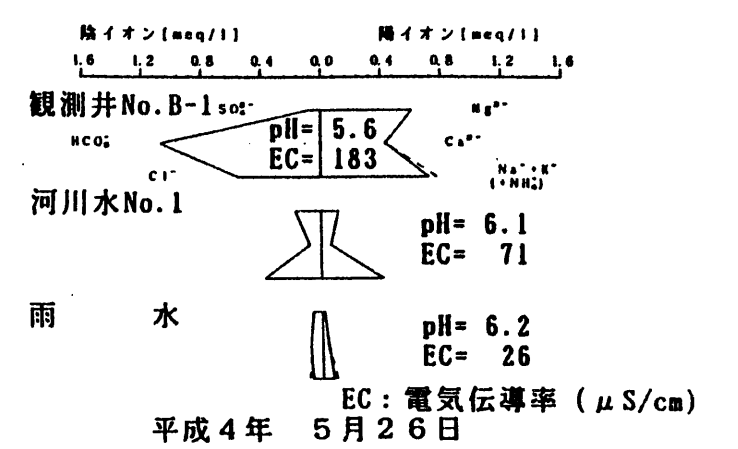
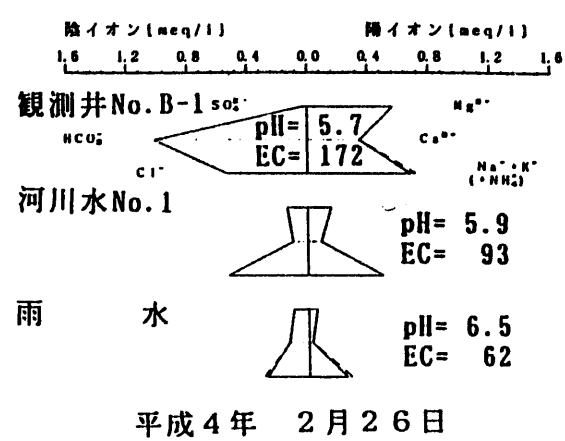
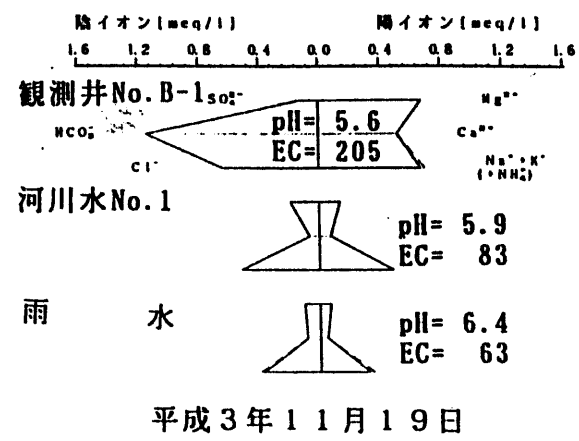
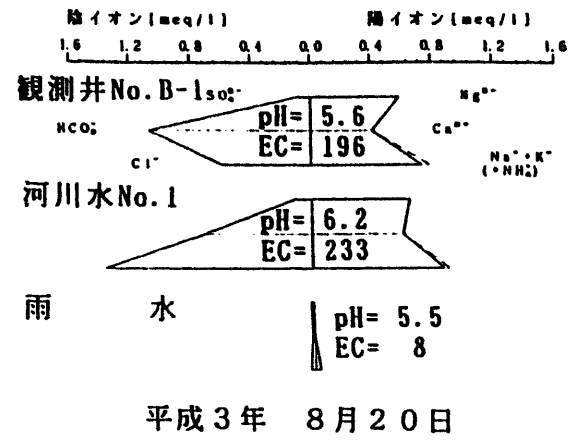
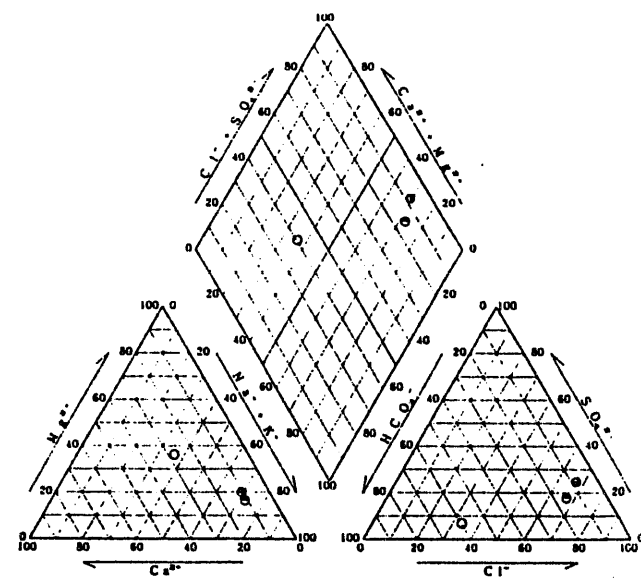


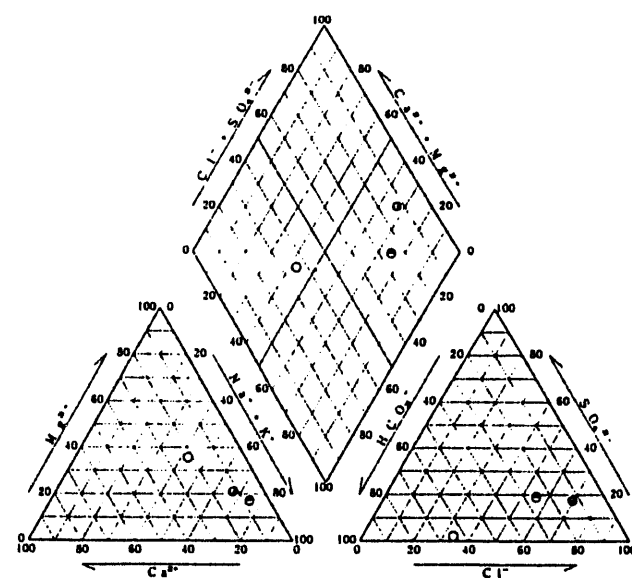
図2-4-1 現地測定pH、電気伝導率経時変化図



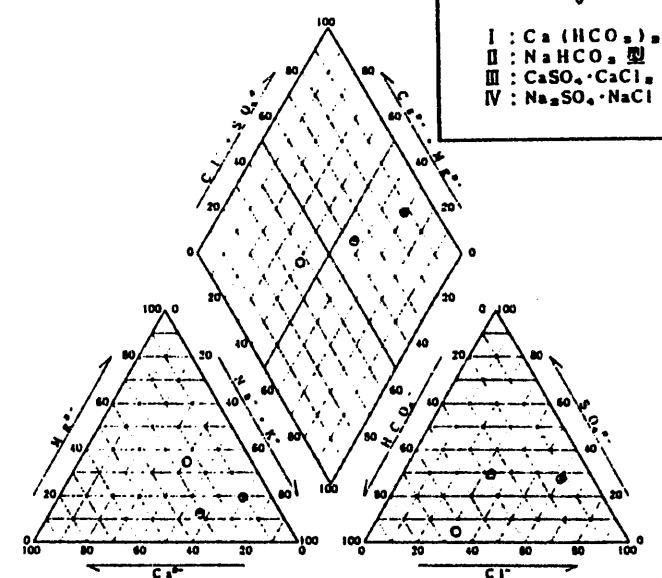
平成3年 8月20日



平成3年11月19日



平成4年 2月26日



平成4年 5月26日

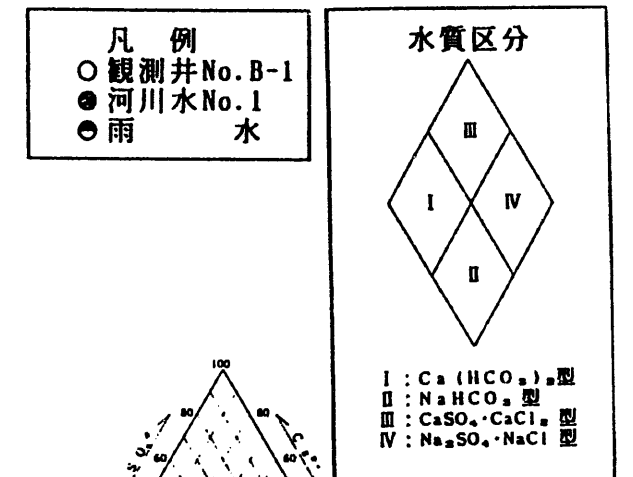
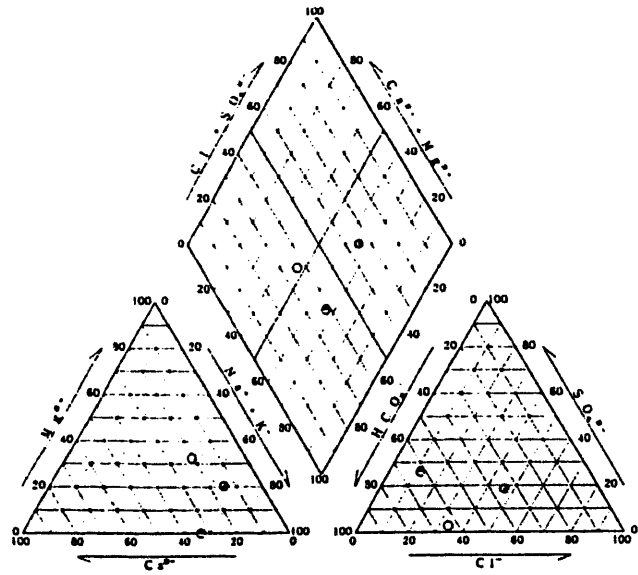
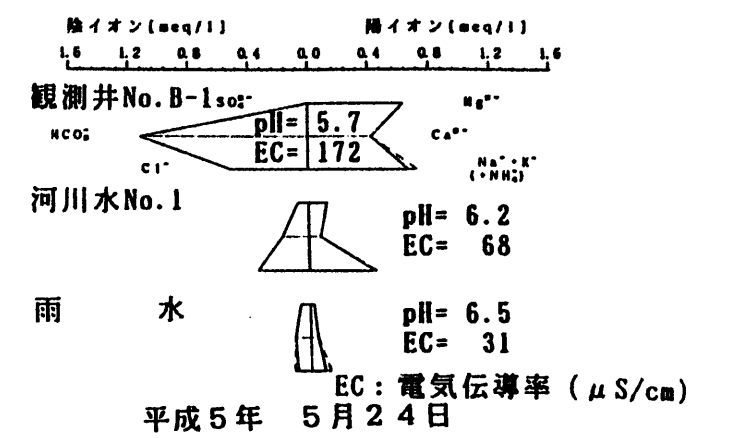
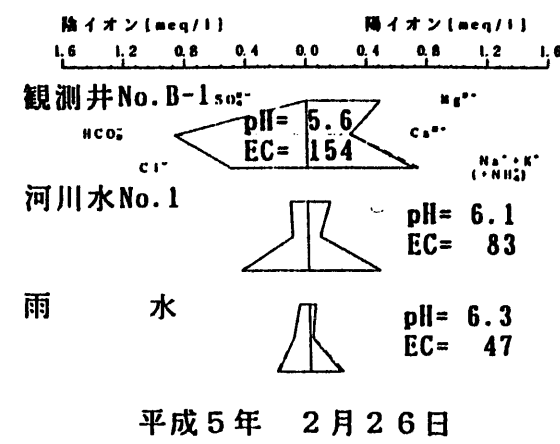
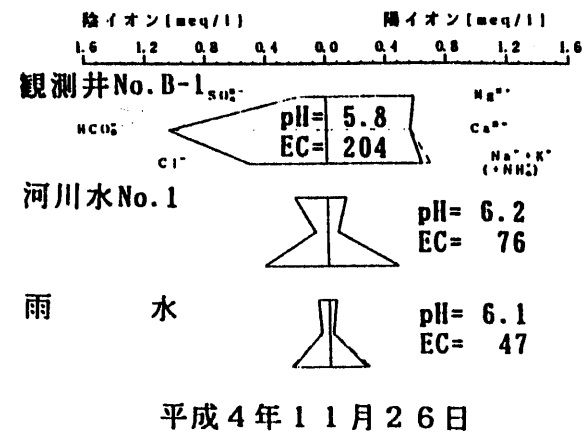
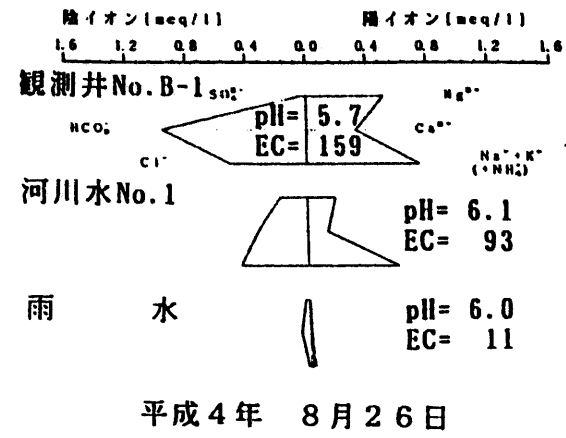
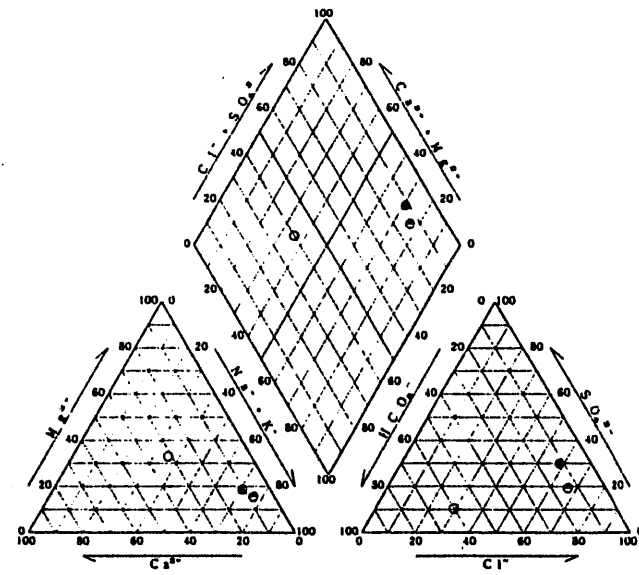


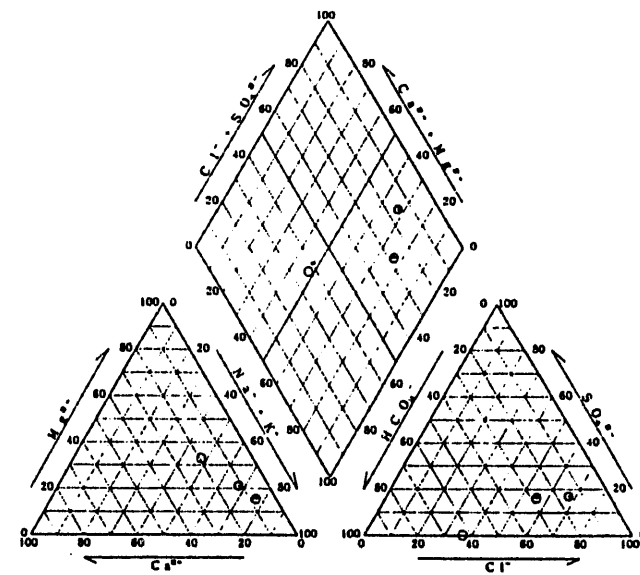
図2-4-2(1) ヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラム



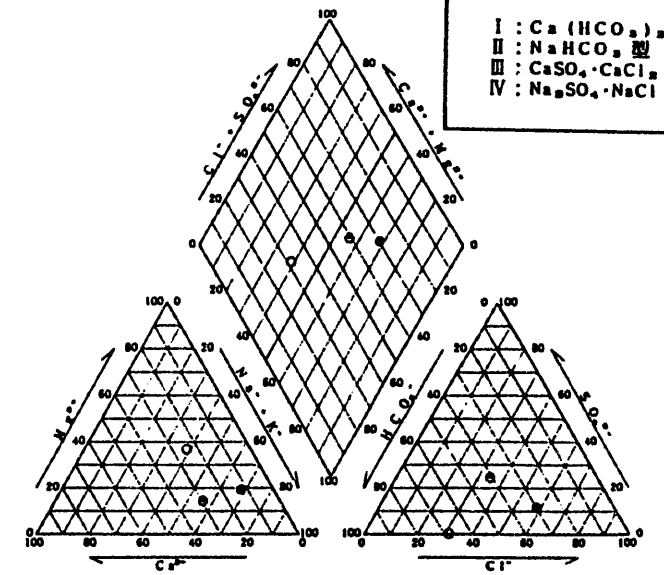
平成4年 8月26日



平成4年 11月26日



平成5年 2月26日



平成5年 5月24日

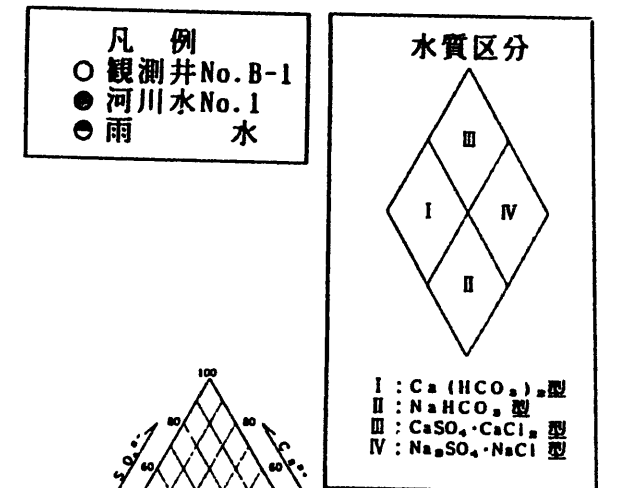
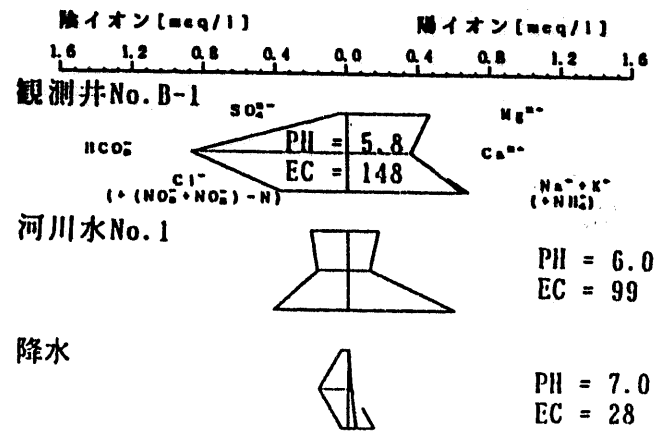
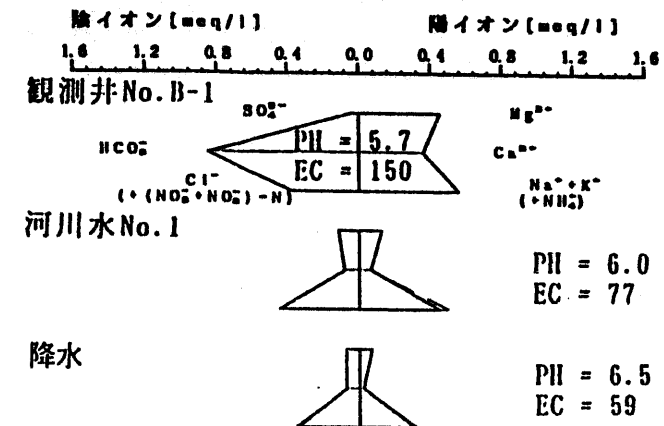


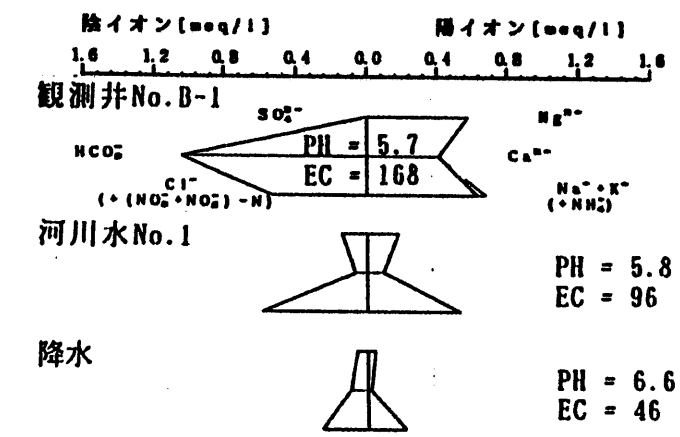
図2-4-2(2) ヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラム



平成5年8月30日



平成5年11月25日



平成6年2月24日

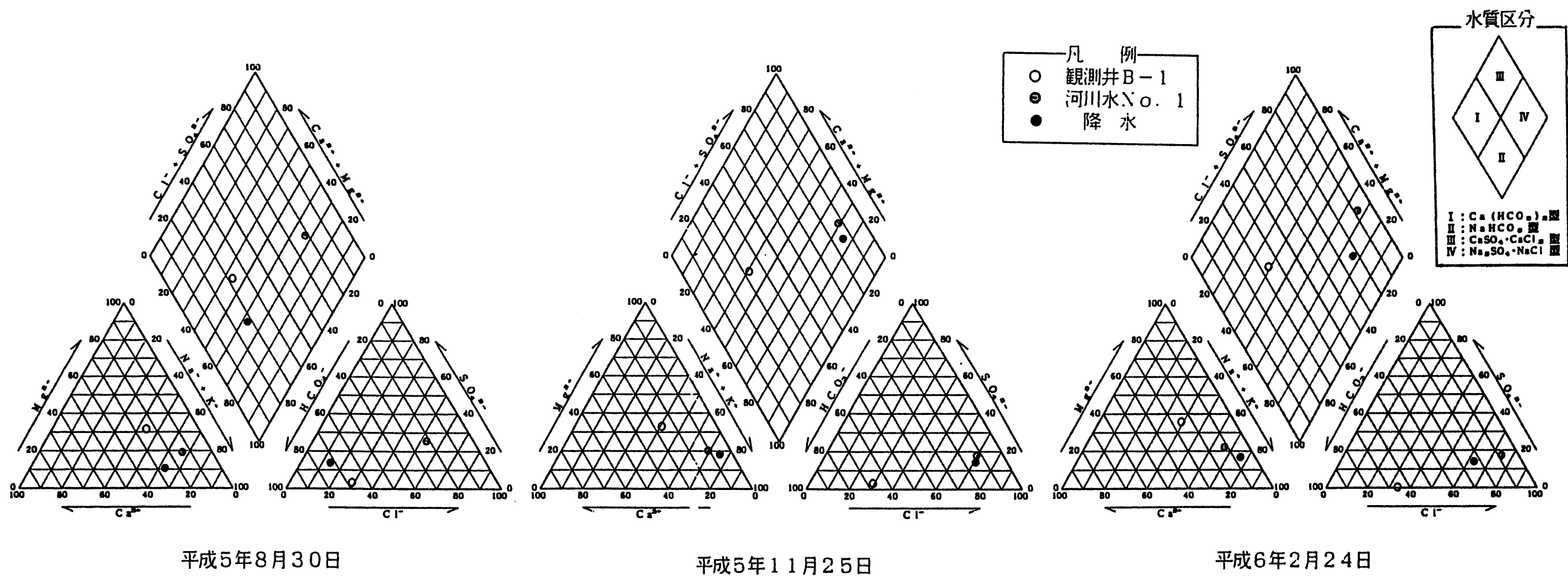
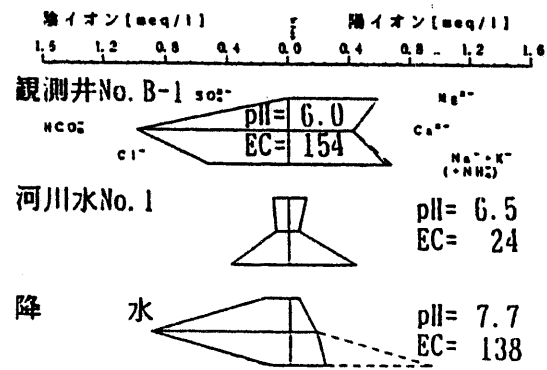
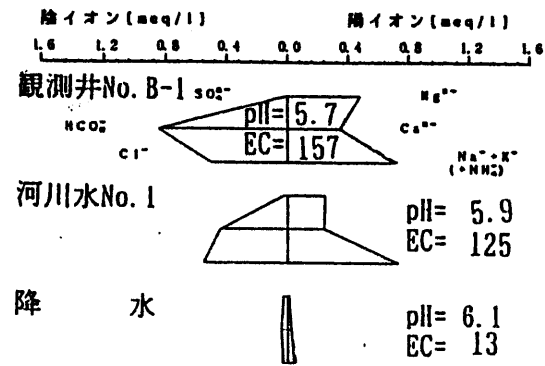


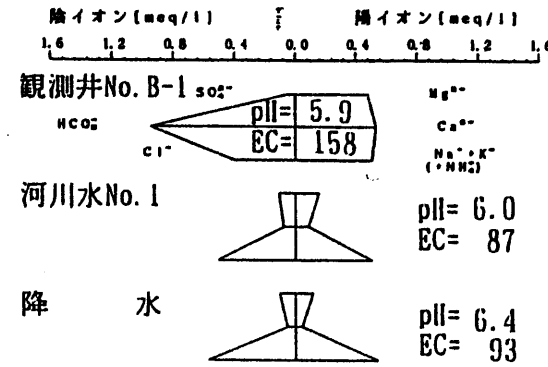
図2-4-2 (3) ヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラム



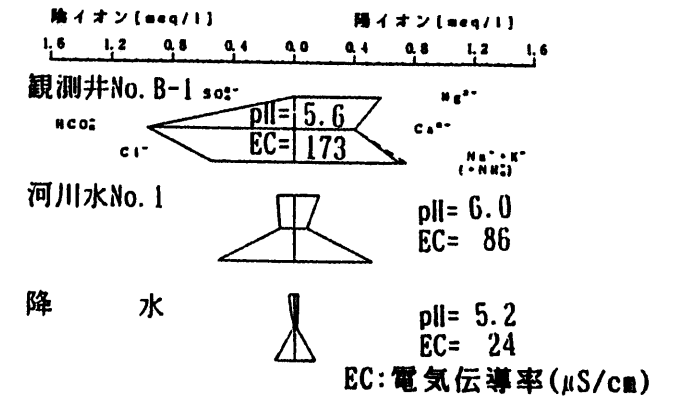
平成6年 5月 19日



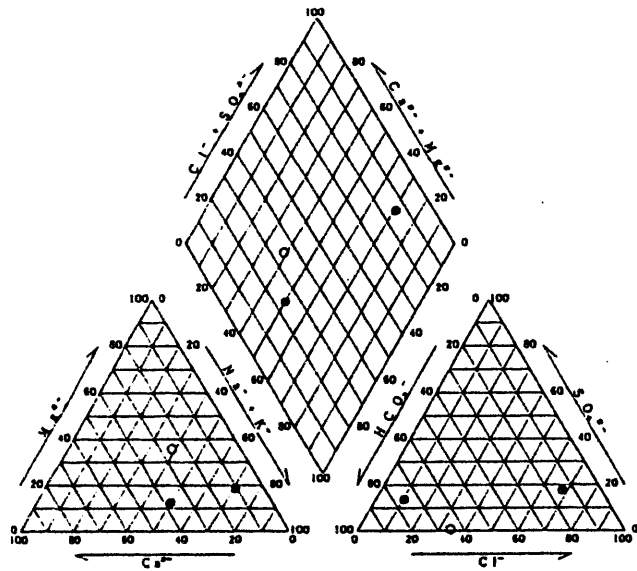
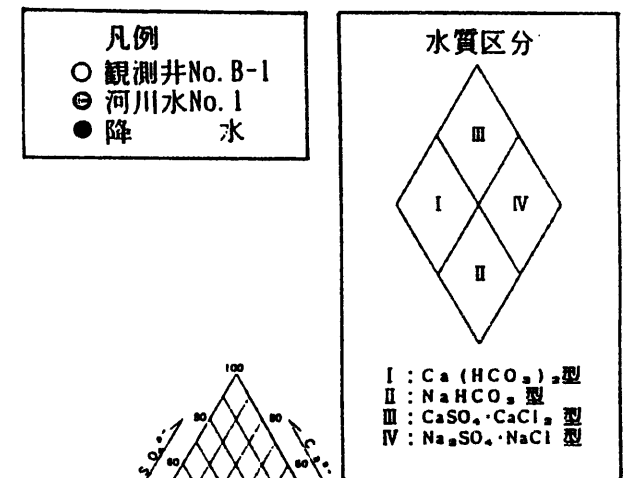
平成6年 8月 31日



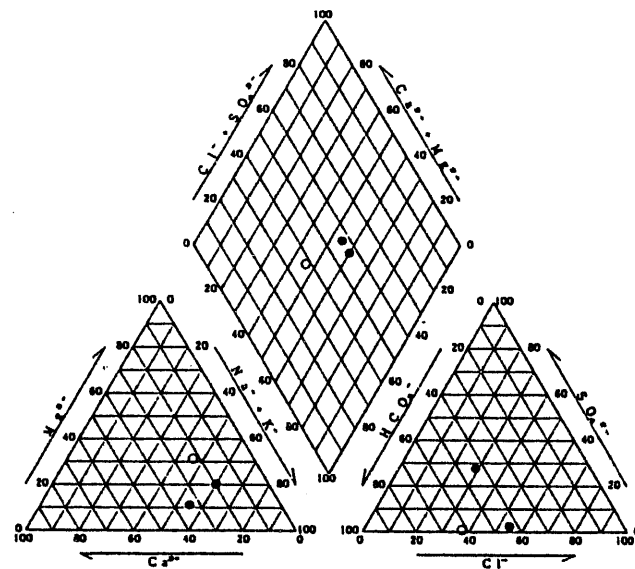
平成6年 11月 29日



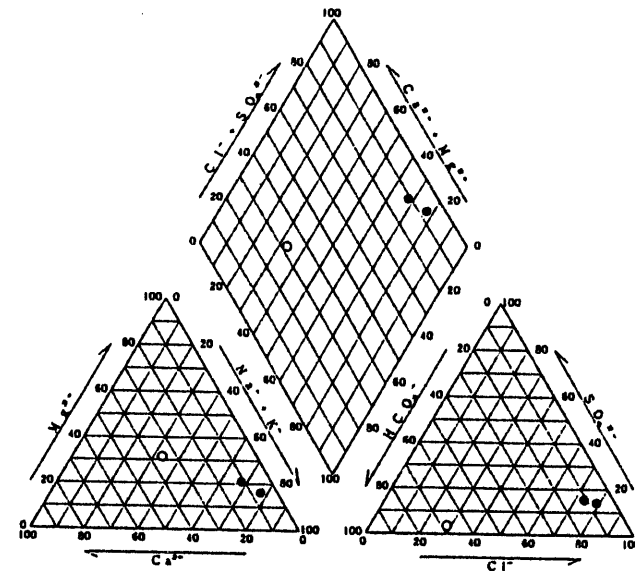
平成7年 2月 22日



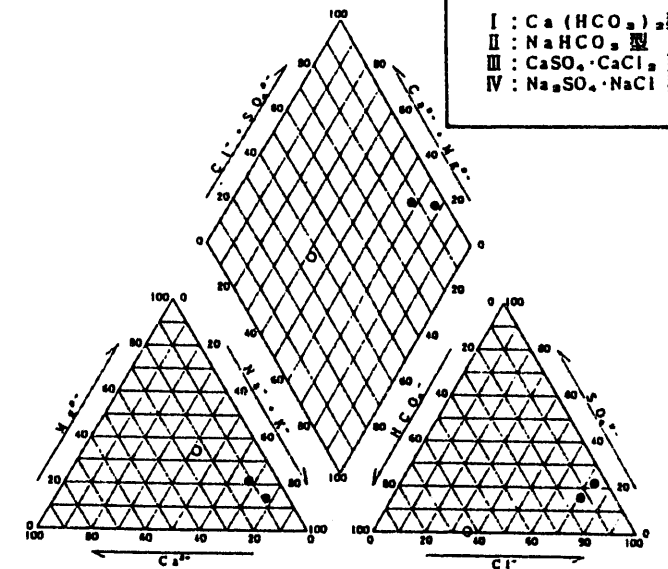
平成6年 5月 19日



平成6年 8月 31日



平成6年 11月 29日



平成7年 2月 22日

図2-4-2(4) ヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラム

2. 5 降水と土壌水分及び地下水との関連

降水と土壌水分及び地下水位の関連をみるため、図4-4-1に土壌水分観測開始以降の降水量、蒸発量、気温、全水頭及び地下水位の経時変化図を示した。

これまでも述べてきたとおり、冬季の降雪時以外は全水頭及び地下水位（B-2を除く）ともに、降雨に対する応答が明瞭である。すなわち、降雨時には全水頭及び地下水位とも上昇し、無降雨時には低下している。また、ほとんどの期間の全水頭は表層が最も高く、下層が低いことから、土壌水分は降雨によって涵養され、表層から下層に向かって移動し、地下水を涵養していることがわかる。

平成3（'91）年7月～8月の全水頭の著しく低下したときのB-1の水位との関係に着目してみると、後述するとおり、無降雨日が長く続いたことにより、表層（GL-10～-50cm）の全水頭が大きく低下し、地下水位も低下している。7月21日の水位低下は、6月15日～7月21日まで3mmを超える降雨がなく、そのうち、27日間は無効雨日であったこと、8月20日の水位低下は、8月1日～8月20日までの期間で8月12日に3.5mmの降雨を観測しただけで残りの日は全て無降雨日であったことによる。このとき、GL-100cm以深の全水頭は地下水位と同じ変化を示しているのに対し、表層は7月が著しく低下したが、8月は7月ほどは低下せず、地下水位は7月よりも8月が低い。平成4（'92）年6月～8月、平成6（'94）年8月の全水頭及びB-1の地下水位についても同様のことが言える。これらのことは、不飽和部の土壌水分は地下水位の変動の影響を受けて変化しているのではなく、降雨浸透と蒸発（散）により変化していることを示している。

降雨（降雪）と土壌水分の移動状況及び地下水位の関係をみるため、図4-4-2(1)、(2)にそれぞれに平成4年（'92年）8月1日～9月10日及び平成5年（'93）年2月1日～3月20日の全水頭等値線の経時変化図を示した。同図には地下水位と土壌水分観測によって得られた圧力水頭

0 cmH₂O (飽和) の等値線も併記している。全水頭の等値線図では上層の全水頭が高く、下層が低い場合は不飽和部及び飽和部とも土壤水分は上層から下層に移動する。特に、不飽和部においては等値線の傾きが時間の経過とともに右上りであれば、乾燥していることを示し、右下がりであれば湿潤化していることを意味する。逆に、上層の全水頭が低く、下層の全水頭が高い場合は土壤水分が下層から上層に向かって移動し、特に、不飽和部では等値線の傾きが右上りの場合湿潤化し、右下がりの場合乾燥化していることを意味する。さらに、降水時には等値線が大きく乱れている深度までその影響が及ぶことを表す。

まず、図4-4-2(1)に示した平成4('92)年の夏季の場合についてみると、8月13日の降雨前及び9月2日の降雨前の約GL-50cm以浅では地表面の乾燥により表層の全水頭が低く、下層の全水頭が高く、表層に向けて土壤水分の移動が起きていることがわかる。また、このときには、約GL-50cm以浅の等値線が時間の経過とともに右下がり徐々に乾燥が進んでいき、降雨によって急激に右上りとなり湿潤化していることがわかる。上記以外の期間及び約GL-50cm以深では上層の全水頭が高く、かつ、等値線が右上りで土壤水分は下向きに移動し不飽和部では乾燥していることを示している。また、8月13日及び9月2日の降雨で約GL-50cm～-200cmまでの等値線が急激に右下がりとなっており、これらの降雨の影響がGL-200cmまで及んだことがわかる。

ここで、注目されることが2点あり、まず第1点目は圧力水頭0cmH₂Oの等値線は8月10日の降雨で上昇し始め、8月13日の降雨直後に低下し始めているが、地下水位は遅れて上昇・下降を示している。降雨浸透が徐々に遅れながら地下水位に伝わっていくことを示しているものと考えられる。

第2点目は、圧力水頭0cmH₂Oの等値線及び地下水位以深においても上層の全水頭が下層の全水頭に比べてわずかに高いことである。このことは、飽和していても土壤水分及び地下水は下方に移動していること示し

ている。

図 2-5-2(2) に示した平成 5 ('93) 年の冬季の等値線図をみると、夏季とは異なり表層の全水頭が下層より常に高く、かつ、等値線の変化が小さい。特に、GL-50 cm 以浅及び地下水位以深の等値線の間隔が離れており、土壤水分の移動が少ないことを示している。しかし、逆にわずかではあっても等値線の変動及び地下水位の変化は認められ、土壤水分及び地下水の移動があることを意味している。等値線に変化がみられるのは同図に併記した気温が 0℃ をわずかでも上回った時と、降雪量が多い時であることがわかる。

このように、冬季であっても融雪により地中に浸透した降水は下方に浸透しているが、等値線及び地下水位は上下しながらもほぼ一定である。このことは、地中へ浸透する水分量と地下水の流出量がほぼ定常状態になっていることを示しているものと考えられる。

なお、圧力水頭 0cmH₂O (飽和) の等値線と No. B-1 の実測水位が異なることについては、以下のように考えることができる。

まず、圧力水頭 0cmH₂O の等値線は No. B-1 地点近傍の自由地下水面 (不圧地下水) であると考えられる。これに対し、No. B-1 の実測水位は、約 50~100cm 低く推移している。No. B-1 の観測孔は孔底 (約 GL-20m) まで全層ストレーナであるため、最も浅い地下水位、すなわち、土壤水分観測で得られた自由地下水面だけでなく、表層から下層までの全体の地下水位 (水頭) が互いに緩衝し、平均的な水位として現れていることによるものと考えられる。

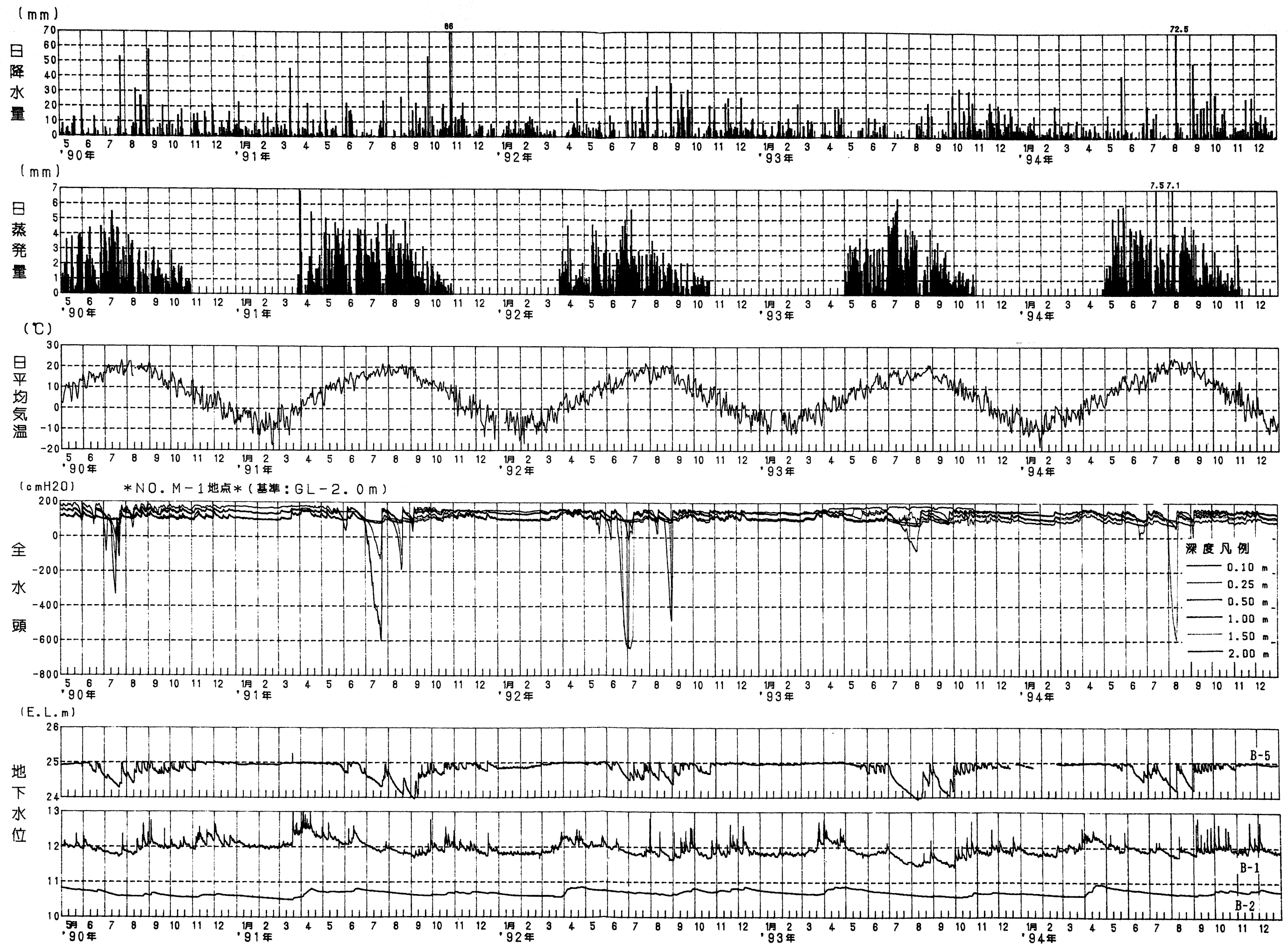


図2-5-1 降水量・蒸発量・気温・全水頭・地下水位経時変化図

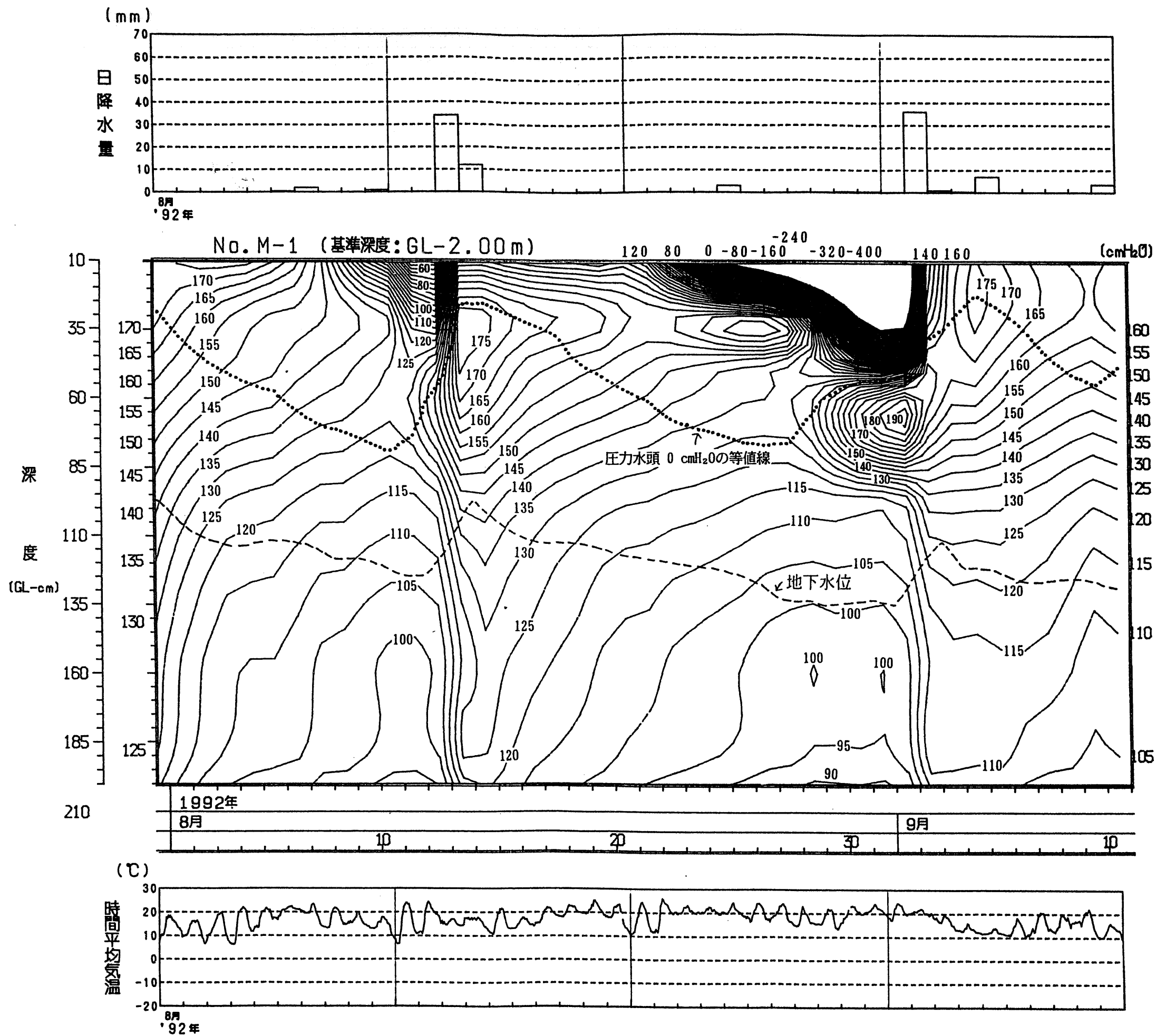


図2-5-2 (1) 全水頭等値線の経時変化図 (夏期)

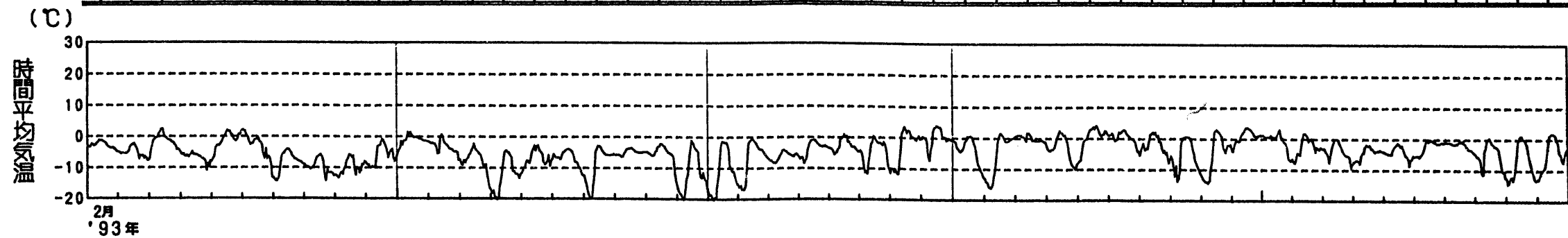
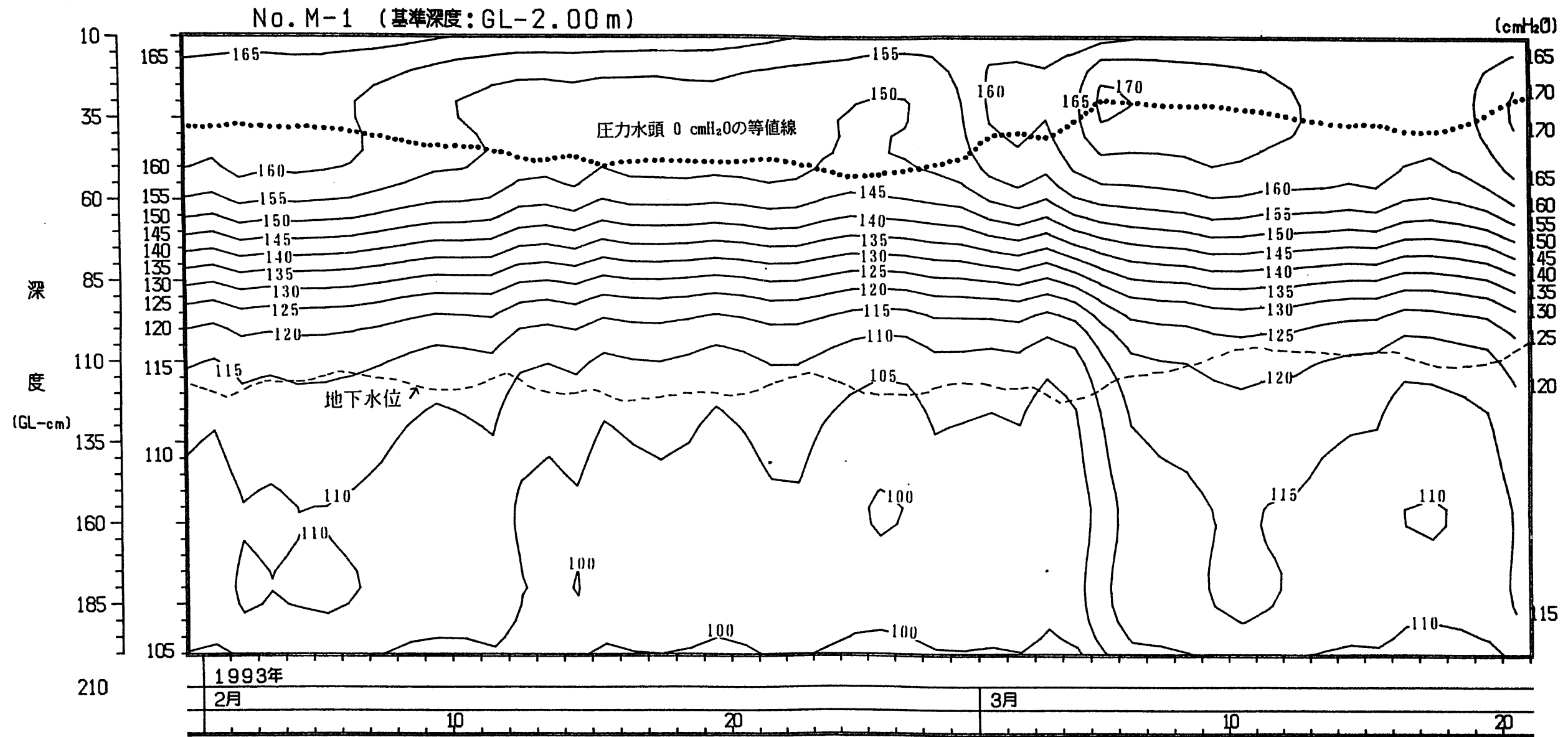
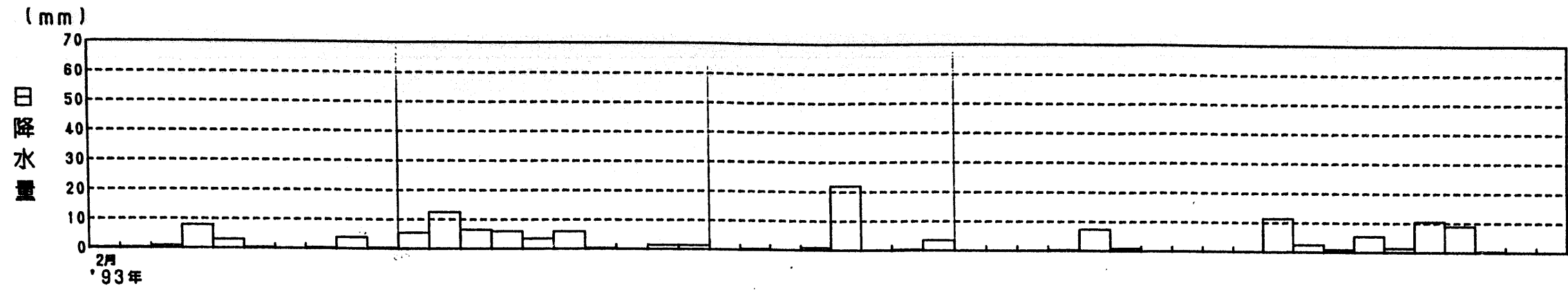


図2-5-2 (2) 全水頭等値線の経時変化図 (冬期)

2. 6 降水と地下水及び表流水との関連

降水とボーリング孔内水B-1（地下水）及び表流水No. 1の関連性を同位体比（ δD , $\delta^{18}O$ ）の分析結果から検討する。

δD と $\delta^{18}O$ の経時変化図を図2-6-1に示した。図で明らかなように、降水の同位体比は表流水No. 1及びボーリング孔内水B-1（地下水）に比べて変動が大きく、夏期以外は表流水No. 1とボーリング孔内水B-1（地下水）に比べて低いことが多い。また、降水の δD 及び $\delta^{18}O$ は夏高く、冬低い温度効果によると考えられる季節変化を示している。表流水No. 1及びボーリング孔内水B-1（地下水）についても雨水に比べて変動幅は小さいが、季節変化を示し、かつ、降水の季節変化に対してほぼ時間遅れなく追随しているといえる。また、降水、表流水No. 1及びボーリング孔内水B-1（地下水）の平成3（'91）年7月～平成6（'94）年12月の同位体比の平均値は以下のとおりである（降水は採取期間の降水量を加味した加重平均）。平均値でみると、 δD 及び $\delta^{18}O$ ともに、降水、ボーリング孔内水B-1、表流水No. 1の順にわずかずつ高くなっている。

降水 … δD 平均 = -66.2‰, $\delta^{18}O$ 平均 = -10.5‰

表流水 … δD 平均 = -63.5‰, $\delta^{18}O$ 平均 = -10.2‰

地下水 … δD 平均 = -65.0‰, $\delta^{18}O$ 平均 = -10.4‰

これらのことから、降水が地表に達した後、地下に浸透するまでに蒸発の影響で同位体組成が重くなっており（同位体比が高くなっている）、表流水が流下する間に更に蒸発の影響を受けて同位体組成が重くなっているものと考えられる。降水は地下に浸透し、同位体組成としては平均化された古い降水と混合しているが、地下水位がGL-1m前後と浅くオーラストレーナであるため、降水の季節変化が現れているものと推定される。表流水は、地下水に比べて溶存成分が少なく、地下水よりは新しい降水が浸透した後、短期間に流出してくる湧水を主体とし、よって、降水の影響が強く現れているものと推定される。

図2-6-2は平成3('91)年7月～平成6('94)年12月の δD と $\delta^{18}O$ の相関を示したものである。図中に示した $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ は天水線(Meteoric water line)と呼ばれ、Craig(1961)によって示された世界各地の淡水についての関係式である。ただし、この式の切片10は地域的に細かくみた場合は、気候条件によって変化するとされており、dパラメータと呼ばれる。dパラメータは水蒸気団の生成時に決まり、その後の降水過程では変化しないと考えられている。また、dパラメータは海水が蒸発して水蒸気になるときの蒸発速度が速いほど大きくなり、dが大きいほど非平衡下での急速な蒸発を受けていることになる。そして、蒸発速度を規定するものは海面上の相対湿度が主要な要因であり、相対湿度が低いほど蒸発速度は速くなり、dは大きくなる。これまでの研究により、冬には大陸性寒気団(シベリア気団)の出現頻度が圧倒的に多く、夏は海洋性熱帯気団(小笠原気団)の出現頻度が多いことから、中部日本、東北日本では夏季の太平洋側からの海洋性気団のdは低く、冬は日本海側からの大陸性気団のdが高いことがわかっている。図2-6-2に示したとおり、降水のdパラメーターは17.8と得られ、また、表流水No.1とボーリング孔内水B-1(地下水)のdパラメーターはほぼ等しく、それぞれ18.1、18.2と得られた。また、図2-6-3に示すように降水のプロットは夏(7～9月)は天水線にほぼ沿っているが冬(12月～2月)は天水線から上方に離れてプロットされている。また、表流水No.1とボーリング孔内水B-1(地下水)は降水で囲まれた中央部に集中してプロットされている。

これらのことは表流水No.1及びボーリング孔内水B-1(地下水)の涵養源は降水であることを示している。

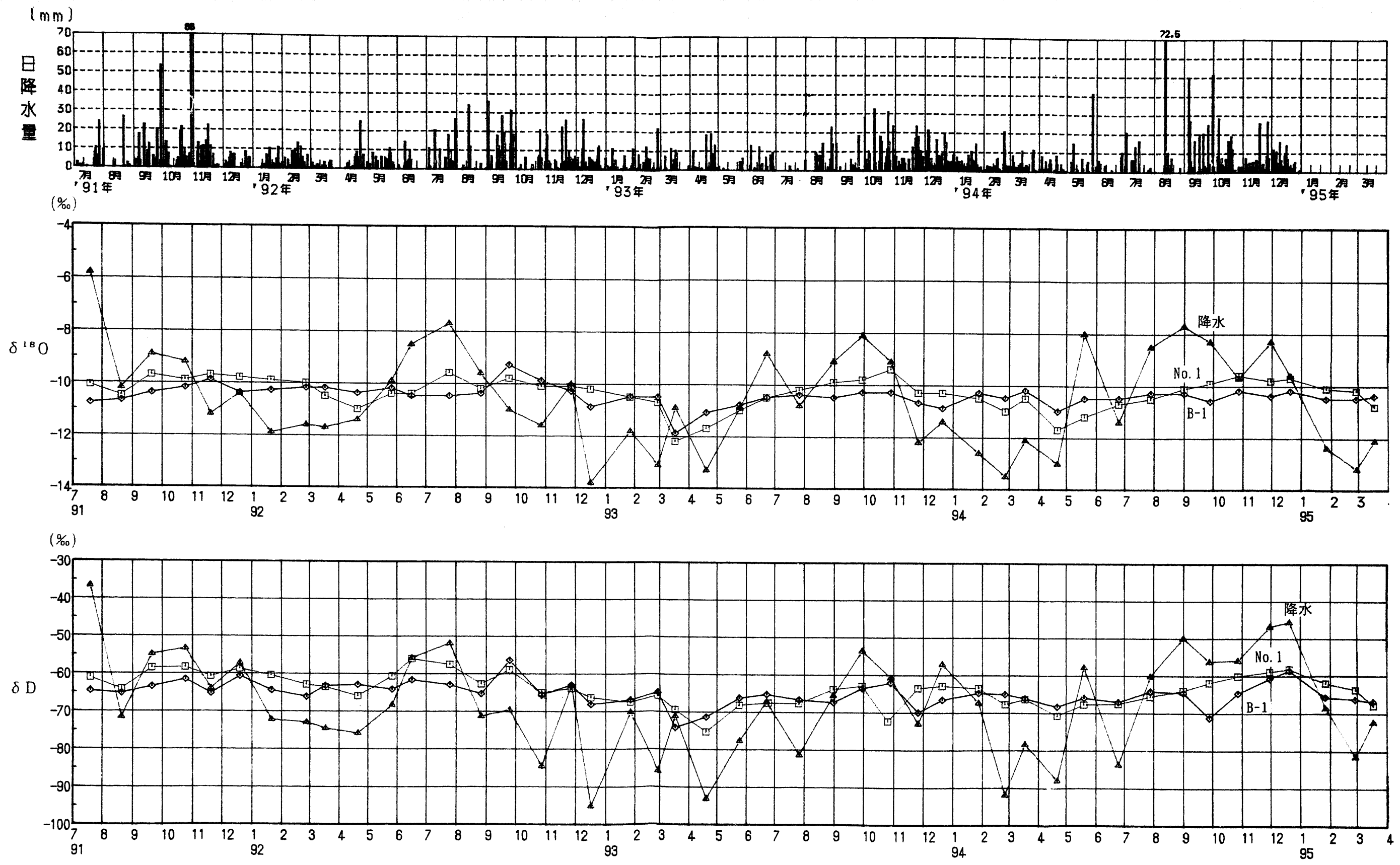


図2-6-1 酸素同位体比 (δD) と水素同位体比 ($\delta^{18}O$) 経時変化図

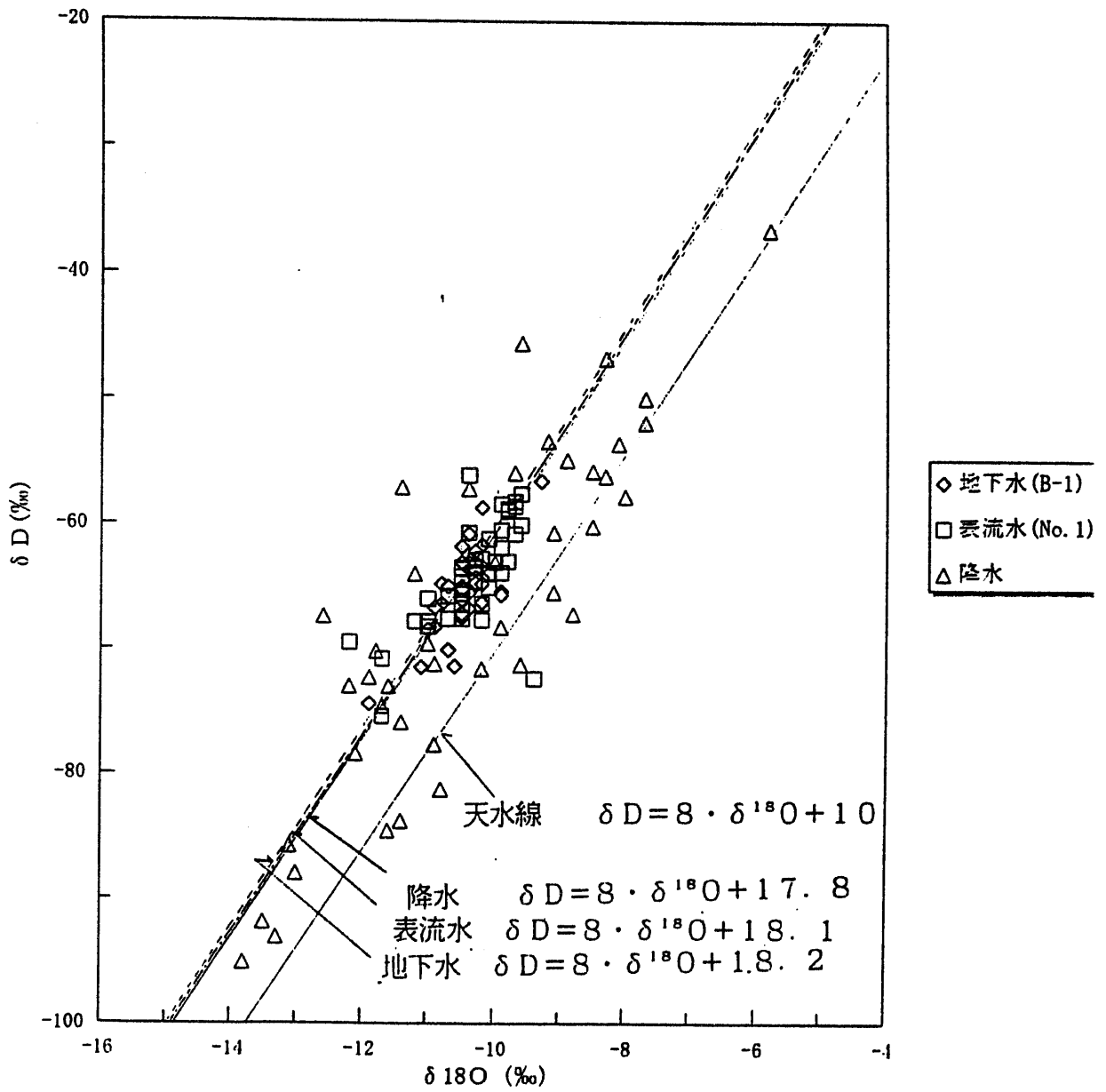


図2-6-2 水素同位体比 (δD) と酸素同位体比 ($\delta^{18}O$) の関係図
 (平成3年 ('91年) 7月~平成6年 ('94年) 12月)

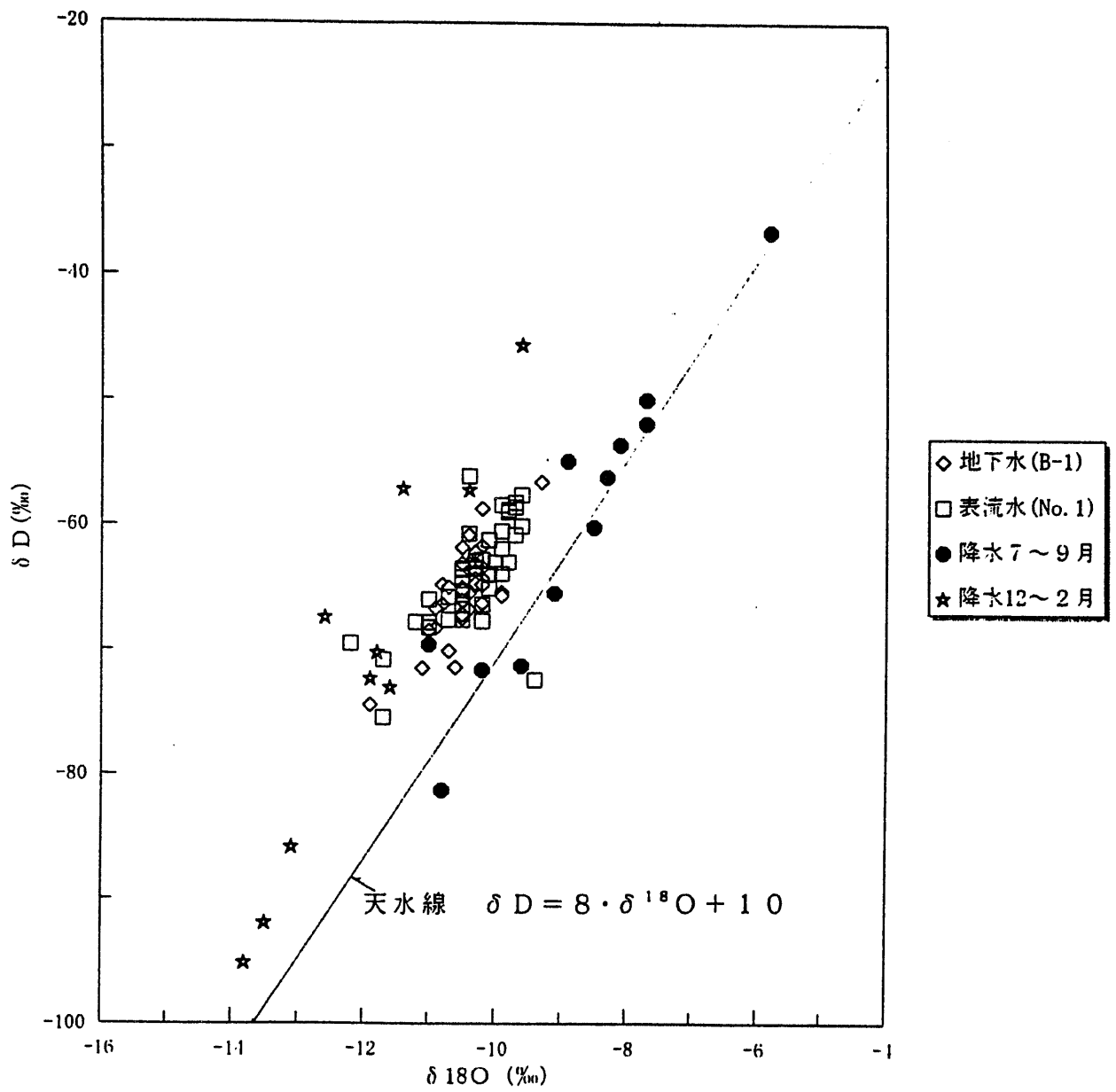


図2-6-3 水素同位体比 (δD) と酸素同位体比 ($\delta^{18}O$) の関係図
(降水夏7～9月と冬12月～2月)

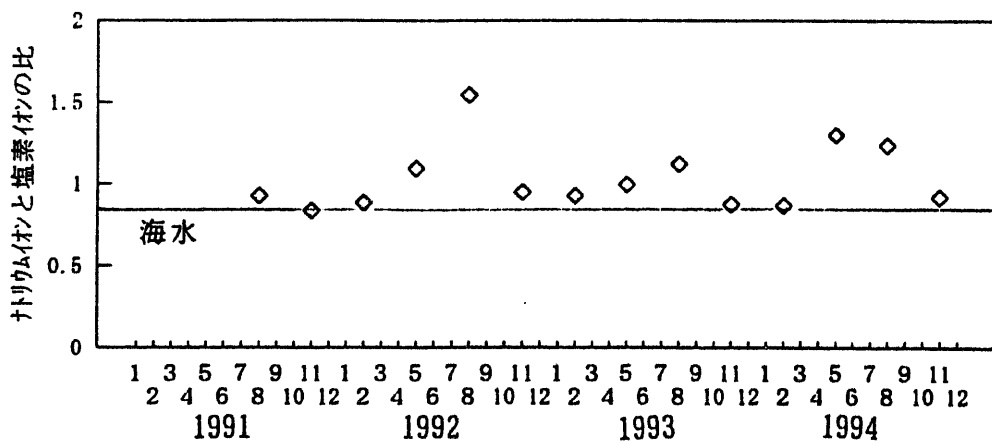
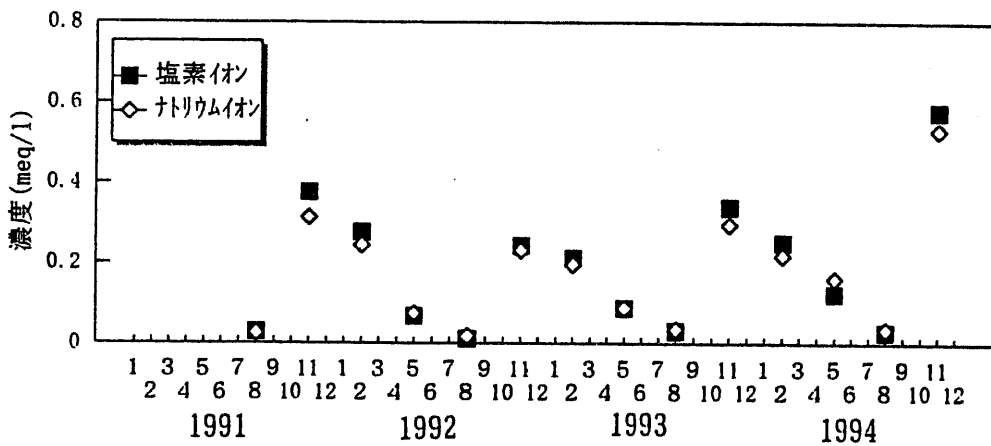
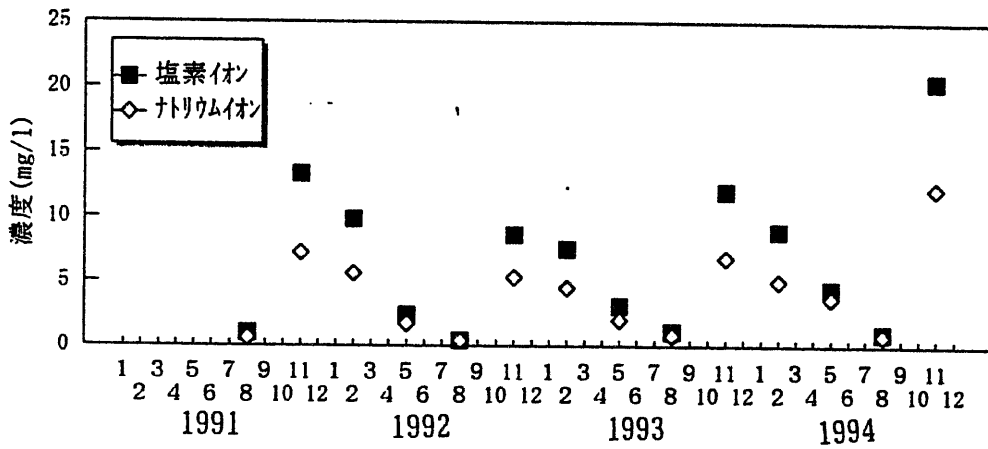
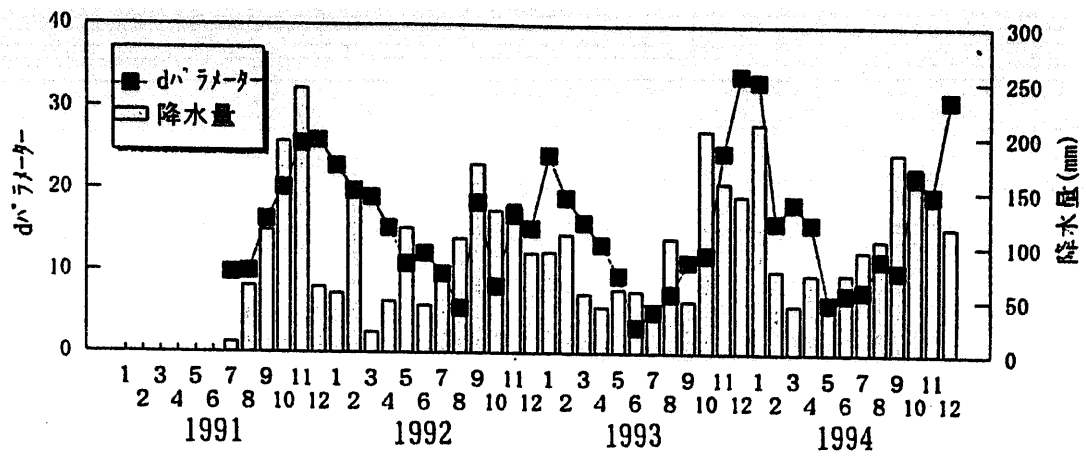


図2-6-4 dパラメーター、塩素イオン、ナトリウムイオン経時変化図

2. 7 潮位と地下水位の関連

図2-7-1に降雨期間と無降雨期間のはっきりと分かれている平成6年9月1日～15日の潮位と地下水位の経時変化図を示す。先にも述べたように、潮位は、潮差約20cmの潮汐特有の変動を示している。これに対し、地下水位（B-1孔、不圧地下水）は、9月5日、7日のように降雨応答は極めて良いものの、降雨のない期間では潮位の変動に見られるような周期的な変動は見らない。

不圧地下水の場合、海岸に観測孔がある場合には、潮汐の影響を受けて少しの地下水位の変化が見られるが、海岸から内陸に入ると急激に減少することが知られている。参考までに別府湾においては、海岸からの距離と潮差（潮汐の振幅）との関係は表4-6-1の様になる。

表2-7-1 海岸からの距離と減衰

海岸からの距離(m)	0	10	50	100
減衰(m)	1.0	0.52	0.036	0.0013

ただし、被圧地下水の場合は遠くまで影響が及ぶ。

以上のことと、B-1孔の海岸から約15kmの距離にある不圧地下水を主体とした観測孔であることからB-1孔の地下水位に潮汐の影響が及んでいるとは考えにくい。

また、降雨のない時期のB-1孔の地下水位の変動を見ると数cm程度の変動が見られる。そして、この変動と気圧変動の間には気圧が低くなると地下水位が高くなり、気圧が高くなると地下水位が低くなる傾向が見られた。

気圧変化に対する地下水位変化を気圧効果といい、気圧効果は被圧地下水位によく見られる。B-1孔においては、難透水性の粘土層や泥岩層が存在しており、地下水位は約GL-1mと浅いものの被圧地下水が存在し、地下水位の変動に気圧効果が現れているものと考えられる。

また、不圧地下水であっても、地下水位上部の不飽和層が厚く透水性

の良くない場合や難透水性薄層が存在する場合に気圧効果が現れるといわれている。

なお、最高潮位を記録した平成6年10月13日を含む、平成6年10月5日～平成6年10月20日についても経時変化図として図2-7-2に示した。10月13日については気圧の低下、降雨による水位上昇が認められるものの、潮位変動の影響は見られない。

参考文献

1. 山本荘毅新版地下水調査法、古今書院、153-163、1983

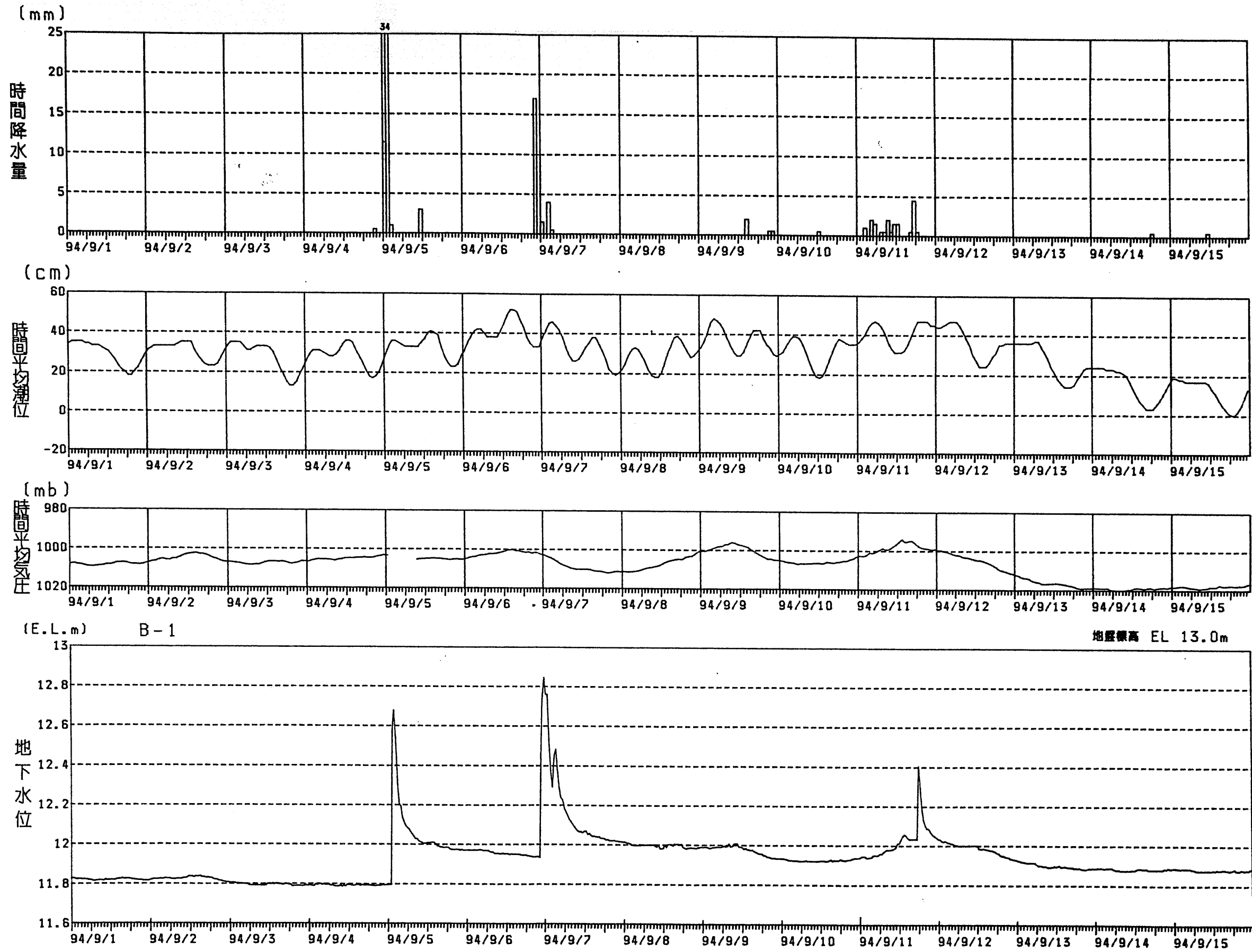


図2-7-1 降水量・潮位・気圧・地下水水位経時変化図

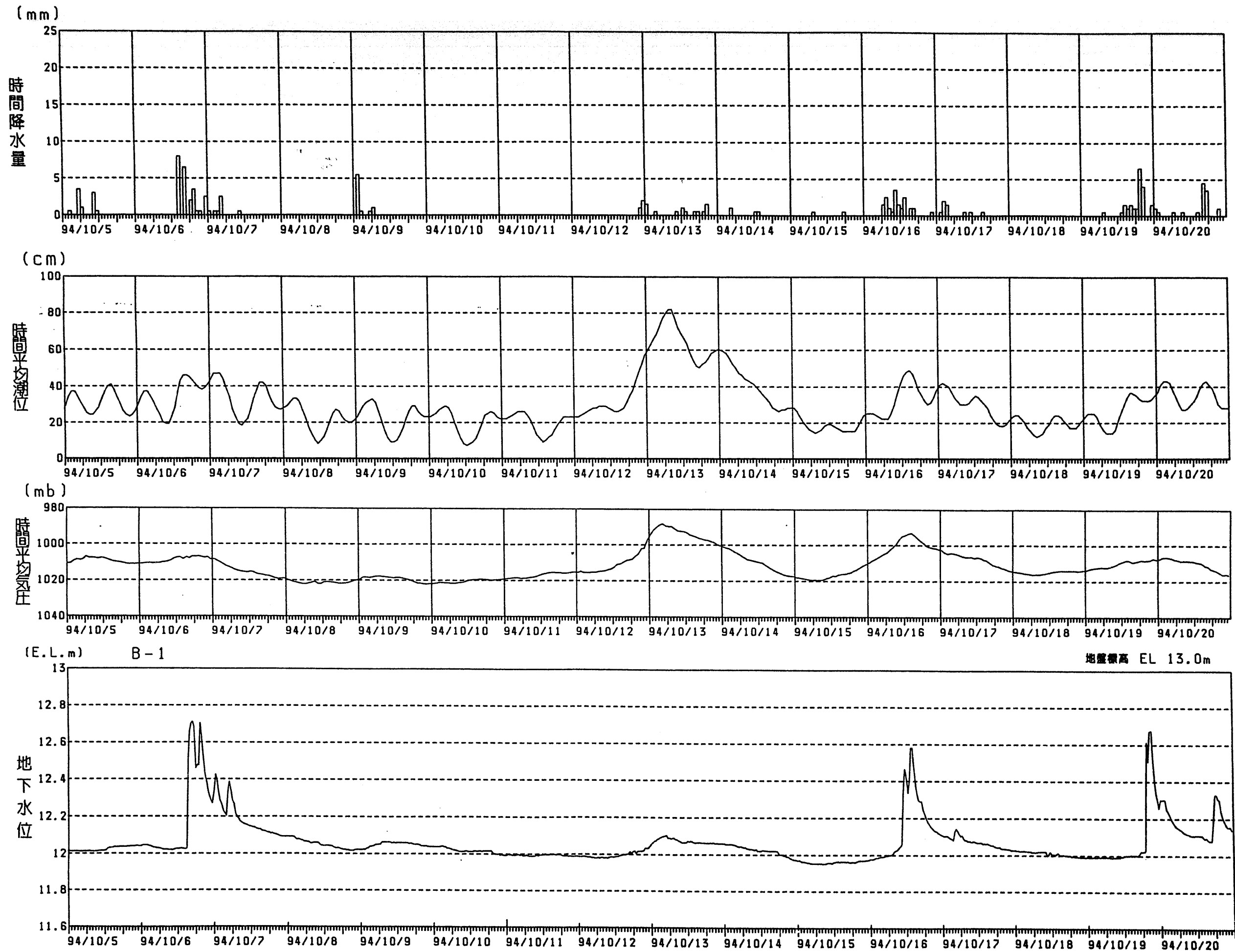


图 2 - 7 - 2 降水量、潮位、气压、地下水位経時变化图

3. 今後の課題

これまで、水文環境の現状を把握することを目的として、以下の調査を実施し、別途実施されている気象観測データと合わせて検討してきた。

表 3 - 1 既往調査項目及び調査期間等

調査項目		調査地点	調査期間	頻 度
地下水位		B - 2 B - 5	1987年～	1987～90年 1日1回 90年～ 2時間毎の測定
		B - 1	1990年～	2時間毎の連続測定
土壌水分		M - 6 (6 深度)	1990年～	2時間毎の連続測定
水 質	一般水質 (主要溶存成分)	No.1、No.2 B-1、降水	1990年～	1年に3～4回採水
	同位体 (δD 、 $\delta^{18}O$)	No.1、B-1 降水	1991年～	月1回採水
流量観測		No.1～No.13	1990～91年	冬期を除く月1回

これまでのデータの蓄積と検討により、地下水位変化の特徴、土壌水分の状況及び水質と流量の変化がそれぞれの測定地点毎には把握できているといえる。

当地域が地理的には北海道の北端部に位置し、気象面から見ると冬期の1、2月の月平均気温が約 -10°C （最低気温は昭和53年2月16日記録された -34°C ）、積雪量も150cm以上になることから特異的な場所であるといえる。さらに、深地層試験場での水理地質・地球化学特性調査の基礎資料として、これまでの調査結果に加え、継続して調査データを蓄積することは重要なことであると考えられる。

ただし、これまでに得られた結果はあくまでも点としての結果であり、開進地区という面的及び深度方向の総合的な水文環境が明らかになっていくわけではない。

問題点及び今後の課題としては、次頁の5点が挙げられる。

課題① 詳細な地質構造が明らかになっていない。

→ ボーリングによる地質調査を行ない、水理水頭モデルを作成する。

課題② 地下水の賦存状況が明らかになっていない。

→ 井戸が全くなく、湧水点もほとんどないことから、ボーリング孔を用いた各種検層・試験を行い透水層及び難透水層の区分それぞれの水理定数を求め、地下水位変動状況と併せて地下水の分布を把握する。

現在の観測井は全層ストレーナであり、どの帯水層の地下水位を測定しているかが不明であるため、帯水層毎に観測井を作成し直すことが一例として考えられる。

課題③ 土壌水分（不飽和帯）の挙動が面的に把握できていない。

→ 尾根部・沢部などの地形的な差異及び土壌層の厚さの差異などによる土壌水分の挙動の差異を明らかにする必要がある地点を増やして観測する。

課題④ 流出状況が把握できていない。

→ 降水が地中に浸透し、一部は湧水（表流水）として流出する。よって、流量計を設置して連続観測を行ない、流量変化及び流出特性を把握する。

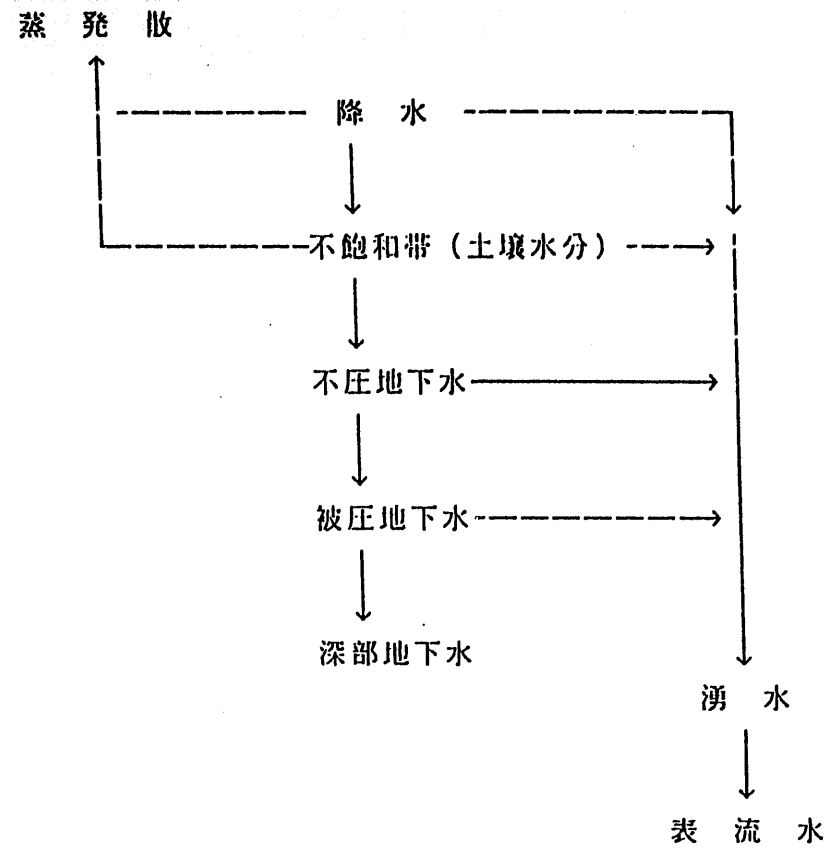
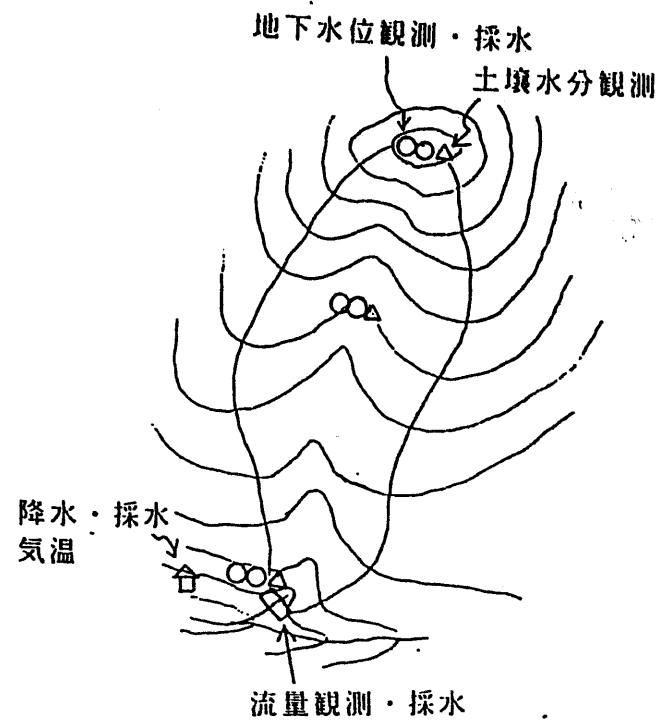
課題⑤ 降水の水質は把握できたが、表流水の地点による水質の差異及び帯水層毎の水質の差異が把握できていない。

→ 広い範囲の表流水の水質を把握する。さらに、帯水層毎の地下水の水質を把握する。

上述した考え方で広範囲な調査を行うことは、現段階では難しい面があると考えられる。一案として、代表的な流域（集水域）を選定することにより、地点数を絞って調査が実施出来れば、一つの流域の中で降水が浸透し不飽和帯を經由して地下水に到り、さらに浸透あるいは流出する課程を

それぞれの調査項目を関連させて総合的に検討・解析することができるものと考えられる。

上述した調査の観測及び検討・解析の一例を図3-1に示す。

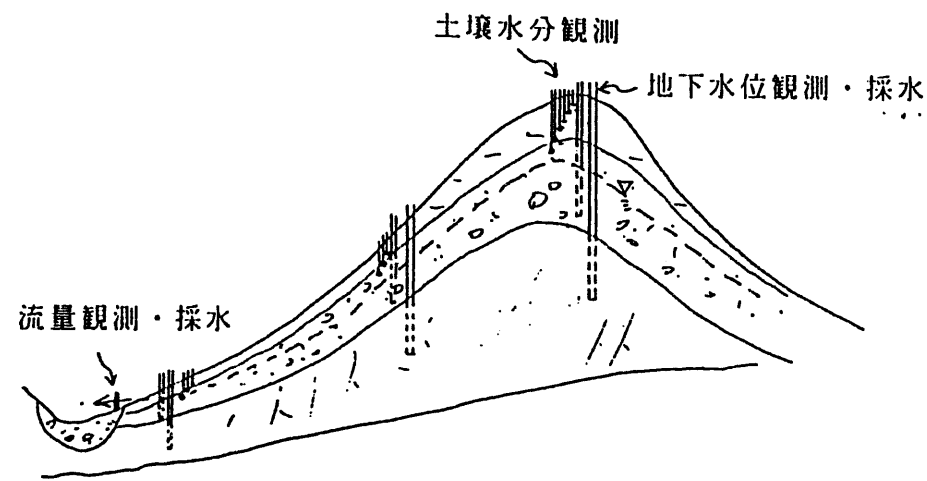


模式的な水の流れ

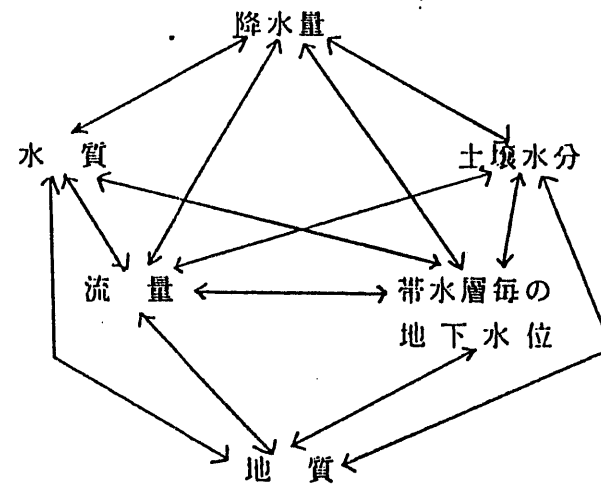
- ・地質調査
 - 地質平面図・断面図
 - 各種検層・試験結果図
 - 帯水層区分
- ・降水量観測 — 降水量経時変化図
- ・土壌水分観測
 - 圧力水頭経時変化図
 - 全水頭経時変化図
 - 体積含水率経時変化図
- ・地下水位観測
 - 地下水位経時変化図
 - 帯水層毎の地下水位等高線図
- ・流量観測
 - 流量・比流量経時変化図
 - 流出成分分離 (タンクモデル法等)
- ・水質調査
 - ヘキサ・トリリニアダイアグラム
 - 同位体経時変化図 (δD 、 $\delta^{18}O$)
 - 同位体相関図

- ・調査項目間の関連検討
- ・水収支解析
- ・土壌水分 (全水頭) と地下水位から水理水頭分布図作成

調査結果のまとめ及び検討・解析の例



観測模式図



調査項目間の関連検討

図 3 - 1

観測及び検討・解析の一例