

第42回試錐研究会

講演資料集

期 間：平成16年3月9日(火)

会 場：ホテル札幌サンプラザ(2F 金枝の間)
(札幌市北区北24条西5丁目)

第42回 試 錐 研 究 会

プ ロ グ ラ ム

主 催 北海道立地質研究所

協 賛 北海道地質調査業協会
(社)全国鑿井協会北海道支部

日 時 平成16年3月9日(火)
10時 ~ 17時

場 所 ホテル札幌サンプラザ 2F 「金枝の間」
(札幌市北区北24条西5丁目 Tel.011 - 758 - 3111)

あいさつ

北海道立地質研究所長 寺島 克之

特別講演

“北海道の地域産業創出に向けた自然エネルギーの役割と展望”

(株)北海道自然エネルギー研究センター
センター長 大友 詔雄

昼 食 (12 : 00 ~ 13 : 00)

講 演

(地中熱利用と計測技術)

1. 孔内流動を利用した地中採熱システムの研究開発

(株)有賀さく泉工業 肥田 博行

2. ヒートポンプ用地熱井の掘削技術とヒートポンプ採熱管の検証

(株)オリエントジオサービス 磯井 敏文

3. 「地下水の動きを見る」

ーボーリング孔内で地下水流動をどこまで計れるか？ー

飛島建設(株) 小林 薫

(株)レアックス 金内 昌直

(地質研究所 研究トピックス)

4. 北海道における地下水資源の役割と課題

北海道立地質研究所 広田 知保

5. 2003年十勝沖地震・台風10号豪雨による地盤災害

北海道立地質研究所 石丸 聡

6. 2003年十勝沖地震に伴う温泉変動

北海道立地質研究所 秋田 藤夫

あいさつ

北海道地質調査業協会 理事長 中川 勝之

懇親会 (17:30 ~ 19:30)
会場 ホテル札幌サンプラザ
(2F 高砂の間)

特別講演

北海道の地域産業創出に向けた
自然エネルギーの役割と展望

(株) 北海道自然エネルギー研究センター

大友 詔雄

北海道の地域産業創出に向けた自然エネルギーの役割と展望

(株) 北海道自然エネルギー研究センター
センター長 大友 詔 雄

1. はじめに

二十一世紀社会は、①全人类的課題（環境・エネルギー・食料・人口・核兵器）、②緊急不可避の課題（大規模自然災害・新たな疫病の蔓延）、③地域社会と地域産業再構築の課題（過疎・高齢化・食糧生産の場である地方の活力の低下）、といった大きくそして困難な課題に直面している。

これらは（とりわけ③の課題は）、北海道の地域経済の活性化の課題として、北海道の最大・緊急の課題になっている。地域経済の活性化即ち地域社会と地域産業再構築を推し量る基準は、地域産業の創出・振興、即ち雇用の確保・拡大である。

加えて北海道は、豊かな大自然に恵まれ、食糧生産を中心とした一次産業を成立させているが、この自然がいろいろな意味で問題を抱えている。かけがえのない自然を破壊から守り、存続させ、一次産業の持続・発展に結びつけ、地域社会と地域産業の再構築を図ることが、先ず持って私たちに課せられた責務となっている。

だがそれだけでは不十分である。自然条件を活かし、自然に負荷を与えない産業の存在、換言すれば、自然と一体化した、自然との共存を前提とした産業を構築するとともに、そこに暮らす人々が、生まれ育った郷土への愛着と誇りをもち、希望をもって健やかに日々の生活を送り、生産活動に勤しむことが出来る地域社会を構築することも同時に追求されなければならない。

2. 自然エネルギーとは

自然の構成要素と自然エネルギー 自然エネルギーとは、「自然と一体化したエネルギー」と定義される。その自然には、太陽の存在の下で、水・土・空気が存在があって、それらと密接不可分の関連をもって生命体の存在がある。生命体の存在を自然の不可欠要素とすることが重要である。この自然の構成要素それぞれにエネルギーの存在があり、これが自然エネルギーである。

自然エネルギーの特質として、①クリーンであること、②自然に調和すること、③無尽蔵・普遍に存在し、無料であること、④ローカルエネルギーであること、⑤信頼性が高い（技術的脆弱性が無い）こと、⑥今直ぐに使い、使いながら改良・改善ができること、⑦多元的・分散的であること、などが挙げられる。

自然エネルギーの特質 今日最も重要なものは、クリーンである（環境破壊的でない）ことにあるが、この本質的根拠は、エネルギー資源をエネルギー化する原理・メカニズムにある。化石

燃料は、燃焼（酸化という化学反応）過程で二酸化炭素やダイオキシンなどの環境ホルモンを作り出し、原子力エネルギーは、莫大な量の放射能（核分裂生成物＝死の灰）を作り出す。それ故にこれらのエネルギーは、エネルギー発生原理・メカニズム上有害物質の発生を不可避とし、本質的にクリーンではない。一方、多くの自然エネルギーは、雪氷熱のような自然そのもの、もしくは、「水が上から下に落下する」、「風が吹いて風車を回す」などの物理過程で生み出され、有害物質を作り出すことは無く、この点で本質的にクリーンである。

「資源的普遍性」（誰でも使える、一部の者に独占されない）という特質も重要である。これは、地域住民によるエネルギー生産手段の公平な所有を促し、従ってエネルギー生産技術の担い手は、地域住民にならざるを得ない必然性をもっている。これは、自然エネルギーによる地域産業の自立を進め、地域経済を活性化する上で決定的意義をもつ。

自然観・「加工された自然」と「原始自然」 自然の構成要素である生命体は単独では生存できず、自然の中で、相互に「食う・食われる」関係にある（食物連鎖）。自然には、食物連鎖の鎖を構成する生物群が多様な形で存在しなければならない。食物連鎖の頂点に立つ人間の役割は、食料を得る場として人間が作り上げた田園や前浜、里山としての自然（この人間が作り上げた自然を「加工された自然」と呼ぶ）に、多様な生物群が生育し得る条件を作り上げることである。自然エネルギーは、この「加工された自然」と調和するが故に、食料生産と本質的に調和する。エネルギー生産は工業、食料生産は農業として、この二つが相反する次元のものと考えられた時代は終り、今やこの二つは調和的にとらえなければならなくなっている。

他方、ヒマラヤの奥地、極地、ツンドラ地帯、深海、熱帯雨林等々、身近な例では、山岳地帯、河川、湿原等々、の人間が手を加えてはいけぬ自然もある（こうした自然を「原始自然」と呼ぶ）。この「原始自然」は、食料生産の場である田園や前浜のような「加工された自然」を、「多様な生き物が共生できる自然」として成立させる保証となっている。一次産業を保証している根本的条件はまさに豊かに存在する「原始自然」にある。

弛まない人間労働の投入の必要性 この三十年ほどの間に、多くの生き物を育ててきた食料生産の場である田畑や前浜から、生き物たちが姿を消してしまった。こうした自然を元に戻す、あるいは自然を健全な状態に保つには、自然を放置するのではなく、人間が日々手を加え続けることが必要である。自然への弛まない「人間労働」の投入無くして、人間と自然との共生の条件を作り上げることも維持することもできない。豊かな田園や前浜の存続には人間労働の持続的投入が不可欠である。

持続的労働を可能にするには、そこに暮らす人々が、生まれ育った地への愛着と誇りをもち、希望をもって健やかに日々の生活を送り、生産活動（労働）に勤しむことが出来なければならない。自然条件を活かし、自然に負荷を与えない産業、換言すれば、自然と一体化した、自然との共存を前提とした産業の構築が必要とされる。

3. 自然エネルギーによる産業構築の可能性

自然との共存を前提とした産業社会—里山文化— 自然との共存を前提とした産業社会の具体的なイメージは、かつての日本の農山漁村に共通に見られた、所謂里山文化として存在していたものである（と思う）。今日の社会発展と生産規模の到達水準からみて、かつての里山を単純に

イメージすれば良いということではないが、山深く広がる天然林を背景に、手入れの行き届いた人工林で林業が営まれ、そのすそ野に広がる丘陵地帯や平野部で農業・畜産業が営まれ、河川や海では水産業が営まれ、要所要所で関連する多様な産業が営まれるといった、ごくごく当たり前の世界である。

こういう世界を今日の水準で再構築するためには、健全な水・空気・土地の存在が前提条件として必要であるが、そこに暮らす人々の、即ち地域社会の、安定的・持続的・継続的存在がなければならない。このためには地域産業の確立がなければならない。またそれを支える基盤としてエネルギーの確保が不可欠である。自然と共存し得る社会生活・産業の根底を支えるエネルギーの存在をしっかりと意識して行かなければならない。

以下自然と共存し、地域社会の生活と産業の根底を支えるエネルギーとしての自然エネルギーの技術的到達水準と課題を概括し、今後の北海道における地域産業構築の力となる方向性・可能性を指摘したい。

バイオマス資源活用の可能性 この3年間で大きくその可能性を鮮明にしているのはバイオマスである。北海道の最大の可能性はバイオマス資源の利用にあると言っても過言ではない。バイオマスとは、間伐材や林地残材などの森林（林産業）系資源、稲わら・刎から・野菜残渣などの農業系資源、家畜のふん尿などの畜産系資源、漁滓やウロなどの水産廃棄物としての水産系資源、生ゴミなどの生活系資源、食品残渣などの事業系資源と多くのものが含まれ、その多くはこれまではやっかいなものとして捨てられるだけであった。しかし今、これらは地域産業再構築の資源となっている。

森林は全国の1/4が北海道にあり、乳牛の半分は北海道に集中している、食料王国として一次産業が中心である等など、元々北海道のバイオマスの潜在量は極めて大きい。国が「バイオマスニッポン総合戦略」を推進し、バイオマスのエネルギー利用を軸にCO₂削減の具体化を図ろうとしている現在、北海道のバイオマスが果たすべき役割は大きい。北海道においては、自然エネルギーは一次産業への利活用を全面的に展開するべきである。木質バイオマスの利用は、森林造成、林業の振興を促し、かつてあった雇用を復活させ、農山村の活性化に貢献すると期待される。またバイオマス産業は、労働集約型産業構造を必須とし、地域に仕事を作り出す効果をもつ。

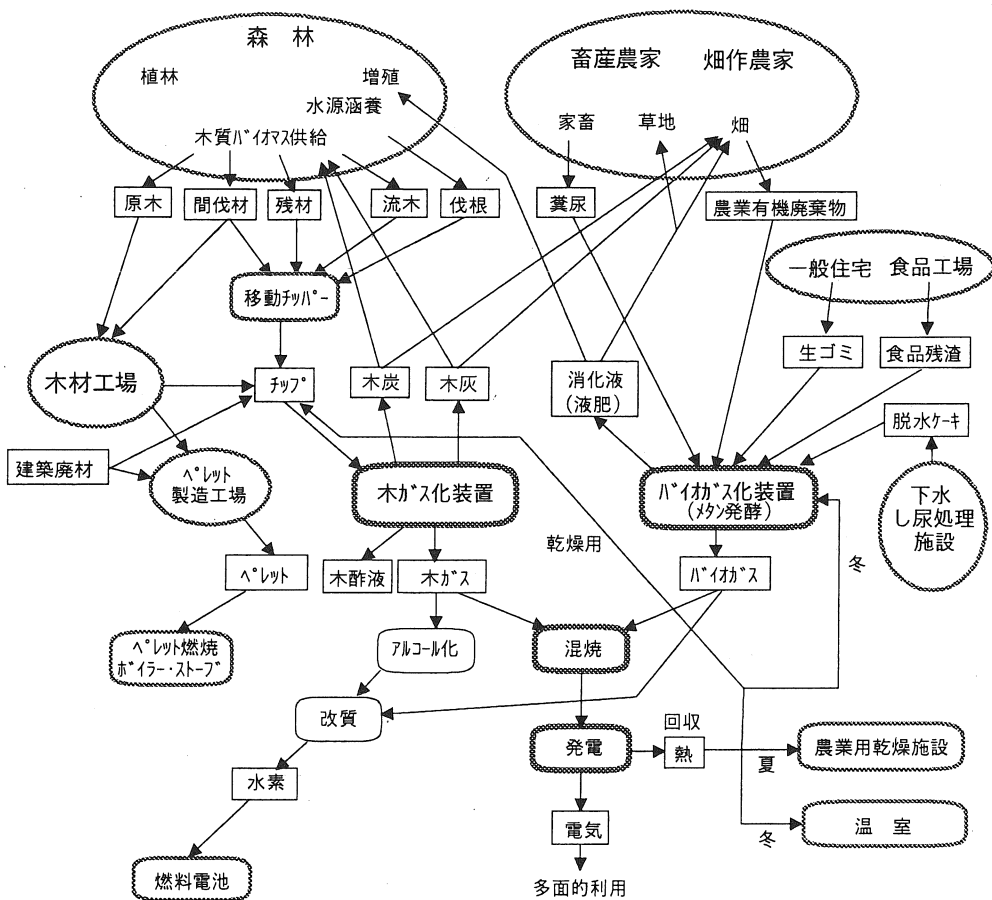
食料自給への活用 またエネルギーと食料の自給を果たす上でも、自然エネルギーの活用が大切である。むしろ、自然エネルギーは、食料の自給率を高めるためにこそ活用すべきである。エネルギーや食料・飼料などの一次生産物を外国に頼る経済・社会の構造をそのままにして、「クリーンな循環社会を」と言っても、これは不可能である。エネルギーと食料を自給する、地域社会で使用する分をその地域社会で生産する、使い終わったらその地域社会の中で処理・処分できるということ（分散型且つ循環型）でなければならない。自然エネルギーの活用とそれに基づく食料の自給体制の確立が二十一世紀の日本にとって、最も重要なテーマになる。

そこで留意すべきは、バイオマスのエネルギー密度の低さである。バイオマスは、地域に賦存する潜在量としては莫大なものがあるが、薄く広く分散するために、収集する技術的対応とそれを支える社会的仕組みの構築がどうしても必要である。

その恒例として、フィンランドの木質バイオマスの最近の目覚ましい状況がある。フィンランドでは現在、8ヶ所にバイオマス発電所があり、大量の木質バイオマスの需要がある。この需要

を満たすために、世界に先駆けて林地に散乱する末木枝条を丸太状に結束しエネルギー工場へ搬出する仕組みを作り上げている。この結果、一次エネルギーの1/4をバイオマスで賄うまでになっている。

またバイオマス産業は、多くの側面を持ち、社会全体の仕組み作りを先行させなければならない。例えば図に示すような、足寄町で描かれたバイオマスを総合的に組み合わせる考え方が大事である。このことは、労働集約型産業構造を必須とし、地域に仕事を作り出す効果をもつ。



また表に、スウェーデンにおける木質バイオマスによって生み出される雇用状況を示した。今日スウェーデンでは、3万人の雇用があると報告されている。この雇用数は北海道に合わせると2万人もの数になる。もう一つ重要なことは、環境税・エネルギー税といった制度的対応である。これもスウェーデンの例(表)であるが、環境への負荷に対して課税する税制度によって、バイオマスの燃料コストを最も低くして市場競争力をつけている。

表 エネルギー別にみた年間の直接雇用創出の比較

エネルギーの種類	燃料生産 人/100万 toe	発電 人/TWh
天然ガス	428	250
石油	396	260
重油	450	265
石炭	925	370
原子力	100	75
木質バイオマス	4,500	1,000

資料出所: Survey of Energy Resources, 1998, WEC.

表 木質バイオマスエネルギー利用による雇用創出

(スウェーデンの例)

バイオマスエネルギー	伐採	チップ化	集材	運材	エネルギープラント	管理部門	計
林地残材		13	8	5	1	4	31
燃料用木材収穫(チェーンソー)	38	20	5	5	1	4	73
燃料用木材収穫(機械作業)	5	15	5	5	1	4	35
家庭用燃料木材	38	20	5				63
雑木林-ヤナギ萌芽(チェーンソー)	15	8	23	25	37	4	112
雑木林-ヤナギ萌芽(機械作業)	9	2	2	6	1	4	24
製材工場				5	1	2	8
計	105	78	48	51	42	22	346
比較:石炭							8

資料出所: The Role of Wood Energy in Europe and OECD, FAO, 1997

表 3 燃料価格と税金(1991年:地域暖房用)

(単位: SEK/kWh, SEK:スウェーデンクローナ)

	燃料価格	硫黄税	CO2税	エネルギー税	合計金額
石炭	0.043	0.025	0.100	0.032	0.200
重油	0.075	0.014	0.083	0.051	0.223
LPG	0.116	0.000	0.074	0.007	0.197
天然ガス	0.120	0.000	0.062	0.017	0.199
ヒート	0.110	0.015	0.000	0.000	0.125
木質燃料	0.110	0.000	0.000	0.000	0.110

バイオマス以外の自然エネルギー 自然エネルギーを考える場合、今一度太陽の存在を意識し、太陽の恵みを積極的に活かすことが重要である。自然エネルギーは、再生可能エネルギーとして、太陽エネルギーを電気や熱として直接使用するものから、風力、水力、海洋エネルギー等々の他、バイオマスもその源は太陽エネルギーによるものである。雪氷熱や温度差エネルギーも太陽エネルギーの介在による部分が多い。供給サイドに限定すれば、太陽エネルギーに直接関係しないものは、地熱や廃棄物エネルギーぐらいである。以下これらの自然エネルギーの技術的トピックスを紹介し、今後の北海道における展開の方向性・可能性を指摘したい。

利用可能領域の極めて広い太陽光発電については、自然変動電源である制約を克服するバッテリーの性能向上が進むことが尚必要であるが、従来の半導体セルの発電効率のアップや球状セルのような全く新しい技術開発も進んでおり、今後一層の普及が見込まれるものと推測される。一方太陽熱利用については、200℃を超える高温を取り出す方式も登場し、従来型の熱利用に加えて、太陽熱発電が期待されている。特にスターリングエンジンの発達とそれと組み合わせた方式は注目に値する。

普及率からは全国の約半分が北海道で占められている風力発電は、より日本の風況や気象状況に対応した技術進歩が要求されるが、今後とも北海道を代表する自然エネルギーとして期待される。電力系統への連結を前提とした利用形態から、大型バッテリーを組み合わせた、自然変動性を克服する方式が実用化されるようになれば、普及は更に加速される。

雪氷熱利用は、寒冷地北海道でこそ有効性が最大発揮できるエネルギーである。雪利用については、膨大なエネルギーと経費を費やして毎年行われる除雪・排雪の雪山の本格的利用に期待がかかる。氷利用については、降雪量が少ない、一次産業の盛んな地域での積極的活用が望まれる。さらに冷熱は、温度差発電の有力なエネルギー源として可能性を広げている。

自然が豊かな地域における自然エネルギーのあり方 人口が少なく、自然が豊かな地域の場合、地域に存在する自然エネルギーを活用することで、地域社会の生活の向上と一次産業（食料生産）の展開を支えることが可能である。地域に固有に賦存する自然エネルギーは、先ずもってそこに住む人々がその直接的恩恵を享受するものでなければならないこと、更には先述したように、産業の発展、特に北海道にあっては一次産業の振興にこそ活用すべきであること、こうしたことを考えれば、これは正に望ましいことである。

人口が多くエネルギー使用量も多い地域のあり方 ところが都市部のように人口が多くエネルギー使用量も多い地域では、このことはいささか難しい。しかし資源が全く無い訳ではない。例えば、廃棄物発電・熱利用は好例である。廃棄物は資源の宝庫であり、リサイクル資源の供給源であるとともに、可燃性廃棄物はエネルギー資源として、都市部の有力な電気・熱エネルギーとなる。このことと産業創出・雇用確保が結びつく例として、ドイツのルール地方の事例が興味深い。

ドイツのルール地方はかつて炭鉱で栄えた地域であり、閉山による雇用確保・新産業創出が大きな課題になった。この点は北海道と良く似ているが、その後の展開は全く違っている。ルール地方の州政府は、60年代後半、100ha、高さ140mもの巨大なズリ山を根こそぎ削りオランダの干拓に運び、平地となった跡地に廃棄物を運び込み、以来30余年を経過して、周辺にリサイクル産業と廃棄物発電・熱利用産業を創出させ、地域雇用を確保したという。歴史も文化

も違うからルールと北海道で違いが出るのは当然としても、ルールの事例は検討するだけの価値はある。

マイクロパワーと水素利用社会 都市部のエネルギー問題は、供給サイドだけでは解決し得ない。先ず何よりもエネルギー使用量を少なくすること、即ち省エネルギーを徹底することから始めるべきである。省エネルギーは勿論都市固有の方策ではなく、エネルギー使用量の少ない地域でも有効である。ここで省エネルギーというのは、家庭生活や自動車等のエネルギー消費量を削減しようとする最終エネルギー消費量削減としての省エネルギーの他に、産業部門の設備・機器の合理化や電力などのエネルギー変化効率・送電効率の高効率化等によって一次エネルギーそのものを削減しようとする省エネルギーの2面があることを理解し、この両面についてきめ細かく実施することが必要である。

後者については、ガスコージェネレーションや燃料電池等々の所謂マイクロパワーを利用することが効果的であって、米国を先頭に先進国で技術開発が精力的に進められている。都市部の大量エネルギー消費を賄うために大規模集中型エネルギー生産施設を準備するという考え方は、ますます成り立たなくなっていくと思われる。一方小型・分散エネルギー生産設備としてのマイクロパワーは、自然エネルギーを利用するにふさわしいものであって、21世紀の中心エネルギーになっていくものと考えられる。特に広大な送電網を維持しなければならない北海道にあって、自然エネルギーが豊かに存在する地域に分散するマイクロパワーのメリットは大きく、設備・装置や利用形態の多様性から中小企業のニッチ産業としての展開も期待できる。これは、中小企業が多数を占める日本経済の自立を、エネルギー面から推し進めることになる。

4. まとめとして

新しい画期の到来 マイクロパワーのようなエネルギー装置に見られるように、新しい画期が到来している。資本主義社会の高度な発展を支えた動力手段は、内燃機関で且つ蒸気機関であるが、今蒸気によらない動力が登場しつつある。外燃機関であるスターリングエンジンや直接発電方式の風力発電や太陽電池、燃料電池などは、これまでの動力手段であった内燃機関とは違っている。この新しい動力手段の主役は水素エネルギーである。水素利用の燃料電池は新しい時代のエネルギーとしての技術的画期となる可能性がある。21世紀の水素利用社会では、バイオマス資源を基礎に、水素生産・貯蔵・利用を実現する労働手段の全面開花が期待される。

新しいエネルギー選択の基準・「人間尊重」 私たちは、エネルギーは、個人が自由に選択できるかのように思っているが、エネルギーは個人が選択できるものではなく、社会が選択するものである。社会生活や産業活動で使えるものは、自由には選べない。エネルギーの選択は、それぞれの社会の歴史的発展過程を基盤にして、社会の到達水準に応じて選択される。

私たち日本は、石油・原子力を選択しているが、それは、石油や原子力は、有害物質を作り出し、生態的に極めて危険であるということにもかかわらず、そうしたエネルギーを選択するという社会の発展段階だからである。そうした社会の選択の基準は「効率と利潤」である。「効率が良く、利潤も大きいければ、危険なものでも使う」ということが社会の選択の基準になっている。だから、危険な原発であっても、「効率が良く、利潤も大きい」ということで、選択される。そういう社会を認めていると、いつまでも原子力を使い続けることになる。

エネルギー問題とは、地域社会の再生・再構築を問うと同時に、人々の価値観・生き方を問う問題である。自然エネルギーを積極的に活用し始めたドイツやデンマークなどの北欧諸国の社会は、「危険なものは使わない、使えない」という、全く当たり前のことが成り立つ社会である。そうした社会の判断基準は、「人間尊重」ということにあるように思える。その結果、人間および生命体に有害なエネルギーは使わないで、クリーンな自然エネルギーを選択するということになる。自然エネルギーを選択するには、それを選択できる社会の実現を同時に追求しなければならない。

講演

孔内流動を利用した地中採熱システムの開発研究

(株) 有賀さく泉工業

肥田 博行

孔内流動を利用した地中採熱システムの研究開発

株式会社 有賀さく泉工業 肥田 博行

1. はじめに

近年、地球温暖化防止を初めとする地球環境に対する意識が高まりを見せ、環境に調和する自然エネルギーの導入が促進されている。

地中熱は普遍的に存在する低品位エネルギーであり欧米では普及が進んでいるが、わが国では狭小な用地と高額な地下設備費のため実用化は遅れている。

欧米では地盤の熱伝導を利用する『地中熱交換方式』が一般的であるが、採熱効率が低く多数の採熱孔を必要とするため地下設備費を高騰させている。一方、北海道においては20年ほど前から主として地下水をヒートポンプに直接導入する『地下水利用方式』が種々の施設で利用されている。地下水は、流動の過程で地盤と熱交換した自然の熱抽出運搬媒体であり、最も効率の高い地中熱利用方法は地下水をヒートポンプに直接導入することである。

本研究開発は経済産業省の補助を受け財団法人十勝圏振興機構を主管とし、帯広畜産大学・北海道教育大学・北海道立工業試験場・北海道立地質研究所・株式会社有賀さく泉工業・アクア冷熱株式会社で構成される研究共同体によって「平成15年度・平成16年度コンソーシアム研究開発事業」として実施された。

ここではこの研究開発事業のうち、採熱効率を向上させ地下設備費の低廉化をはかることを目的とした『孔内流動方式採熱孔』の研究開発について述べる。

2. 孔内流動方式採熱孔研究開発の主旨

近年日本地熱学会において、周囲に地下水流動のある採熱孔では高い採熱量を示し、また非充填(地下水導入)採熱孔がグラウト採熱孔より高効率である例が報告されている。これらの事実は、採熱が熱伝導のみではなく熱移流によって大きく影響されていることを示唆している。

熱移流を最大限に利用する熱交換器としてヒートポンプの蒸発器・凝縮器があり、これは熱源水の流動、高熱伝導素材(銅)の使用・比表面積の増大によって高効率の採熱を実現している。

孔内流動方式採熱孔はこれらの要素をできる限り地中採熱孔に適用し、採熱効率の向上をはかることを主旨としている。

3. 孔内強制流動システム

『孔内流動方式採熱孔』には自然状態の孔内流動を利用するものと人工的に流動を起こして利用するものがある。前者は主として帯水層の水頭差によるが、採熱効率を大幅に向上させ得るだけの自然流動を生じる例はまれであり、普遍的に効果を期待することは難しい。従って、以下の項では後者の「孔内強制流動システム」について述べる。

孔内強制流動システムは、地下水導入採熱孔内を2室に分割・遮水し、一方の帯水層から揚水し他方の帯水層に注水する仕組みで、その過程で生じる孔内流動(熱移流)を利用して高熱伝導素材・大比表面積の地中熱交換器に採熱するものである。

地中熱交換器は、採熱孔内で熱媒を上下に往復させ採熱延長を増大させる「往復型地中熱交換器」と、熱媒を細管に分けて流し比表面積を増大させる「分流型地中熱交換器」の2種を製作し採熱性能試験に供した。

4. 採熱性能試験地

孔内強制流動システムの採熱性能試験を音更と大楽毛の2試験地で実施した。尚、自然流動状態のサーマルレスポンステストはこのほか、地質研究所・長沼・帯広川西・標茶町阿歴内・北海道教育大学釧路校の各試験地で行っている。

音更試験地の試験採熱孔深度は49.5mで、上部は段丘堆積物、下部は池田層群最上部または渋山層のともに砂礫層から構成される。周辺の地下水流動は優勢で、上下ストレーナー間で平均流速2.6m/minの孔内流動(上昇流)が生じている。

大楽毛試験地の試験採熱孔深度は66.0mで沖積層の細砂が主体を占めるが深部には粗砂が分布する。細砂中では含水するが地下水の流動性は乏しい。地下水位面以浅から孔内へ平均流速0.9m/minの地下水流入がみられ深度25m付近から孔外へ流出している

5. サーマルレスポンステスト

5.1 試験方法

サーマルレスポンステストは、採熱孔内に設置した採熱管に一定の熱量を継続的に加ながら熱媒を循環させ、そのときの熱媒の経時的な温度変化を測定・記録し、地層の熱伝導率および採熱管の熱抵抗を求めるものである。

採熱(放熱)が熱伝導のみによる場合は、加熱循環時間(対数)に対する熱媒温度変化は

直線に近似される。この近似直線の傾きから地層の熱伝導率が算出される。熱抵抗は熱媒と地層の間の介在物の熱の通しやすさを示す値である。

音更試験地・大楽毛試験地とも分流型地中熱交換器に熱媒管としてライニング鋼管を連結した孔内装置で試験を行った。

5.2 試験結果と解析

孔内流動量 60L/min 時には音更試験地では加熱循環開始後 14 分で、大楽毛試験地では 23 分で熱媒還り温度が定常状態となり、初期温度からの上昇温度はともに 1°C 強の値を示した。

孔内流動量を段階的に減少させていくと熱媒還り温度は上昇しながらも定常状態に達する。音更試験地においては 10L/min 流動時に初めて熱伝導の影響が現れ、定常状態に達せず僅かながら温度上昇を続ける。大楽毛試験地では 10L/min 流動時にも定常状態に達し温度上昇は止まる。流動を停止させた状態では熱媒還り温度は熱伝導を反映して一定温度勾配で上昇を続ける。流動停止状態終期の上昇温度は音更試験地では 60L/min 流動時の 6.6 倍、大楽毛試験地では 13 倍程度に達する。

音更試験地と大楽毛試験地の熱媒還り温度変化は、10L/min 以上の孔内流動量ではほぼ同様の挙動を示すと言えるが、流動停止時の上昇温度は前者が 7°C、後者が 16°C 程度と大きな差異を示し上昇温度勾配も後者が著しく大きい。これは、音更試験地においては採熱孔の周囲を流動する地下水が孔内を冷却し、見掛け上の地盤の熱伝導率を上昇させているためと推察される。

熱媒往路の許容限界温度を 0°C とした場合の最大採熱量を試験結果から算出した。

60L/min 流動時の音更試験地の最大採熱量は 11.7kw、大楽毛は 10.7kw であるが、この差異は周囲の地盤の熱伝導率の差によるものではなく熱媒流量に起因するものである。孔内流動量の減少とともに最大採熱量も漸減するが、特に大楽毛試験地では流動停止時の最大採熱量の減少が著しく 1.9kw を下回る値となっている。

地盤の熱伝導を利用する地中熱交換方式の採熱孔延長を決定する際には、一般に設計基準値として 40w/m の採熱率が用いられるが、比較のため試験孔の最大採熱率を算出してみると、孔内流動停止状態において音更試験地で 99w/m 未満、大楽毛試験地で 39w/m 未満という値になる。また、60L/min 流動時には音更試験地では設計基準値の 7 倍以上、大楽毛試験地では 5 倍以上の採熱率が得られていると計算される。

6. 継続採熱量試験

6.1 試験方法

継続採熱量試験は音更試験地のみで行い、電動機定格出力 3.9kw のヒートポンプを用いて、平成 15 年 10 月 11 日～平成 16 年 1 月 30 日の 112 日間に亘って継続的に孔内強制流動システムによる地中採熱を実施した。

サーマルレスポンステストの結果から、最大採熱量の向上には熱媒流量を増加させる必要があること、熱媒管も採熱に関与していること、分流型より往復型地中熱交換器の熱抵抗が低いことが判明したため、継続採熱量試験には改良を加えた往復型地中熱交換器および熱媒管として白ガス管を用いた。

採熱時間は、ヒートポンプの仕様限界の 15 時間連続運転－9 時間停止のサイクルとした。また、ヒートポンプの成績評価にかかわる諸温度・流量などの他、孔内流動水温などのデータを 1 分ごとの自記記録で測定した。

6.2 試験結果と解析

試験の終期に孔内流動量を変化させ採熱性能への影響を調べた。尚、それ以外の期間には 86～88L/min の孔内流動量で継続稼働させていた。

孔内流動量の減少につれ熱源側入温度(熱媒還路温度)と熱源側出温度(熱媒往路温度)が順次低下していき、ヒートポンプの採熱能力も低下するために負荷側出温度(温水)の低下を生じている。

測定期間を通した採熱量(86～88L/min 孔内流動)は温水温度 50℃－35℃で 10.6－11.3kw、出力は 15.2－14.7kw、成績係数(COP)は 3.0－3.8 で安定的に稼働した。

サーマルレスポンステストと同様に最大採熱量を求めると 60L/min 流動時で 17.8kw となり、地中熱交換器の改良と熱媒管の交換によって大幅に採熱性能が向上したことが確認された。また、最大採熱率は熱伝導による基準採熱率の 11 倍強と試算された。

7. 孔内流動方式採熱孔のまとめ

- ①厳冬期を含む 112 日間に亘って過負荷状態でヒートポンプによる継続採熱を実施した。その結果、期間を通して採熱量 11kw、出力 15kw、成績係数 3～3.8 で安定的に稼働した。
- ②採熱期間中、クロスフローによる孔内流動水温の低下は認められなかった。

- ③採熱孔への熱媒往路温度が0℃となる最大採熱量は60L/min流動時で約18kwと算出された。試験採熱孔システムでは、流動の効果は20L/minの流動量で明瞭となり、60L/min以上で採熱性能の上昇は頭打ちとなった。
- ④地下水利用方式に比べ60L/min流動時で1.7℃の熱媒温度低下が生じた。
- ⑤地中熱交換方式の基準採熱率を40w/mとした場合、0.45kwの水中ポンプ電力の付加で採熱率が10倍程度向上し、最大採熱量は16kw増大した。
- ⑥熱移流を主とするため、採熱孔周囲の熱伝導率の影響は軽微であり、地層を問わずほぼ同様な採熱量が期待される。

参考文献

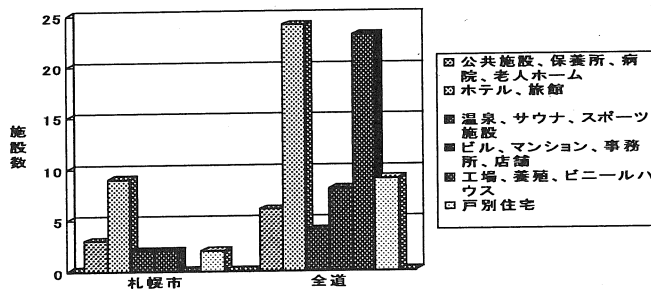
- 1) 藤井光(2001)：地下水流れのある地中熱利用ヒートポンプシステムにおける熱交換井仕上げおよび配置の最適化、日本地熱学会平成13年学術講演会講演要旨集、B31
- 2) 岩田宜己・他3(2001)：地下水熱が期待される場所における地中熱利用ヒートポンプの実証試験、日本地熱学会平成13年学術講演会講演要旨集、B23
- 3) 岩田宜己・他4(2002)：地下水を考慮した地中熱利用ヒートポンプシステムの実証試験(その1. 冬季・夏期強制負荷試験)、日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集、A24
- 4) 岩田宜己(2003)：地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプシステム試験とCFD、日本地熱学会、平成15年度学術講演会講演要旨集、52
- 5) 清野克也・他3(2002)：グラウト材の違いによる地中熱交換能力の定量的評価(その1)、日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集、A11
- 6) 新堀雄一・他2(2001)：坑井を用いた地中熱利用のHPの設計と地下水流動との関係についての予察、日本地熱学会平成13年学術講演会講演要旨集、B30
- 7) 新堀雄一・岩田宜己・森不可止・深谷法三郎(2002)：坑井を用いた地中熱利用HPの設計と地下水流動の関係についての一考察、日本地熱学会誌、vol.24, 339-348.
- 8) 新堀雄一・他3(2002)：地中熱利用HPの設計支援ツールについてー地下水流動を伴う場合、日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集、A25
- 9) 館野正之・他5(2001)：地中熱利用ヒートポンプシステムの空調への適用についてー岩手県における試験結果ー、日本地熱学会平成13年学術講演会講演要旨集、B28

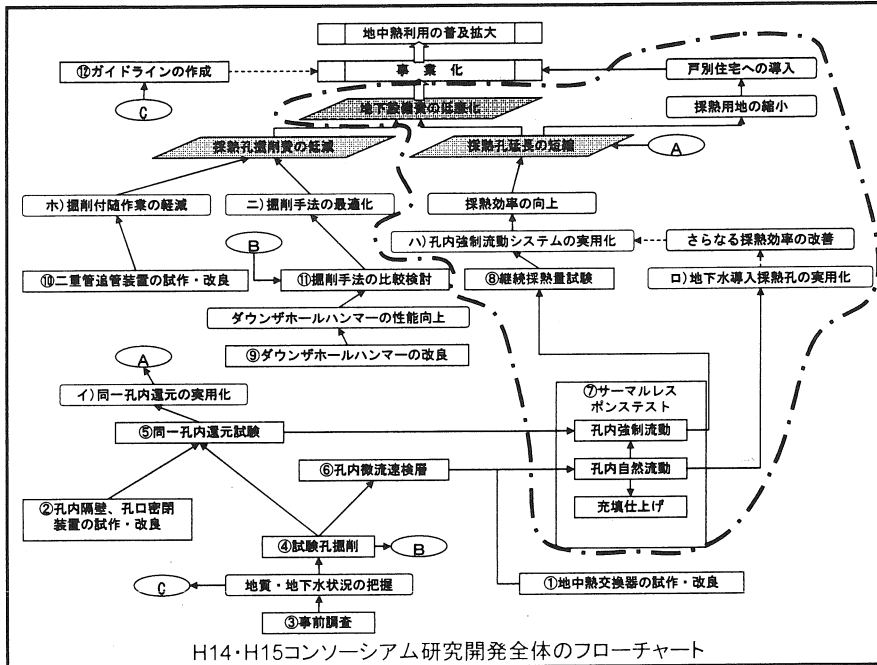
孔内流動を利用した地中採熱システムの研究開発

『平成14・15年度地域新生コンソーシアム研究開発事業』内 採熱性能試験結果について

地中熱利用ヒートポンプシステムの現状

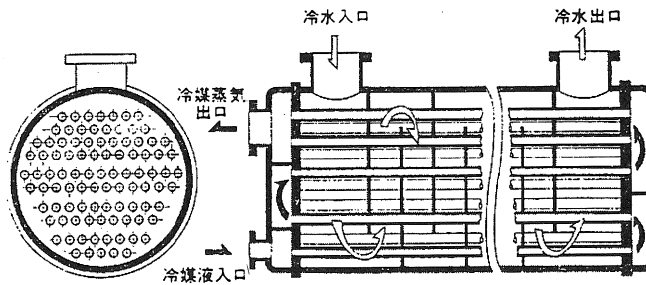
- 『わが国では、実用化は遅れており、現在稼働中の暖冷房施設は十数件程度である。その主な理由は、本システムが省エネルギー性と環境保全性からみて優れた暖冷房システムであることがよく知られていないこと、掘削とヒートポンプなどに要する費用が欧米に比べて数倍高いことなどが挙げられる。』（落藤、2001）
- 北海道では現在80施設以上で地中熱を利用したヒートポンプシステムが導入されており、その大半は地下水利用方式である。（アクア冷熱(株)納入施工実績表）





孔内流動方式採熱孔研究開発の主旨と経緯

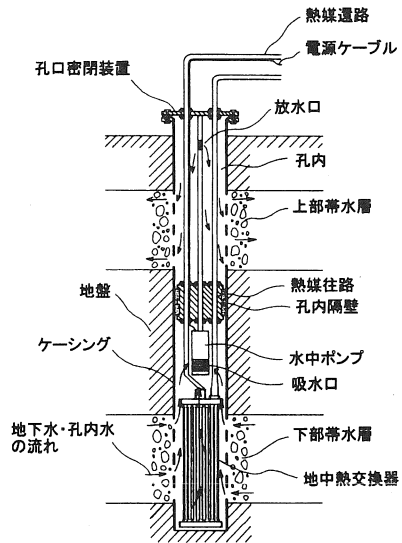
- 近年、周囲に地下水流動のある採熱孔では高い採熱量を示し、非充填(地下水導入)採熱孔がグラウト採熱孔より勝る例が報告されている。
 - ⇒ 採熱が熱移流に大きく影響されている。
 - ⇒ 熱源水の流動、地中熱交換器の高熱伝導素材の使用・比表面積の増大によって地下水導入採熱孔の採熱性能向上を図る。



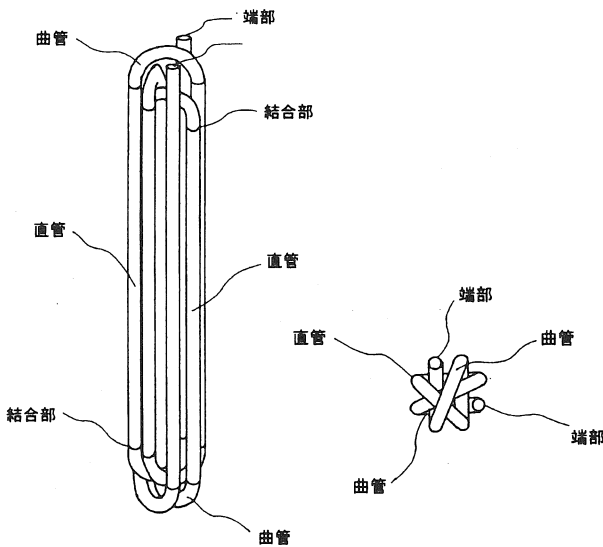
シエルチューブ式水冷却器構造図

孔内強制流動システムの概念

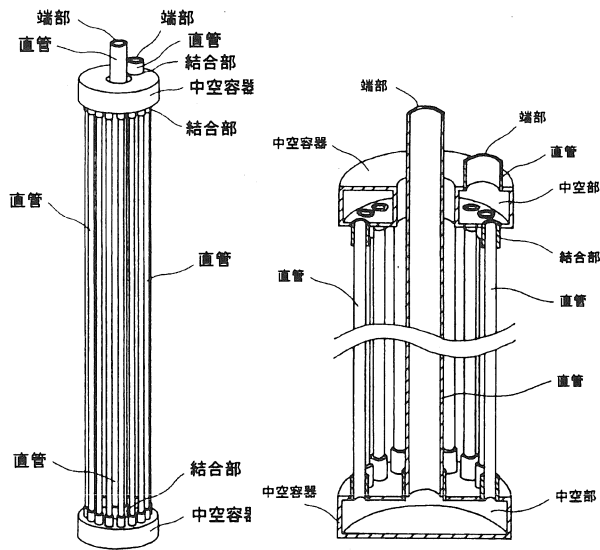
- ①地下水導入採熱孔内を2室に分割・遮水し、一方の帯水層から揚水し、他方の帯水層に注水する。
- ②その過程で生じる孔内流動(熱移流)を利用して、高熱伝導素材・大比表面積の地中熱交換器に採熱する。



往復型地中熱交換器

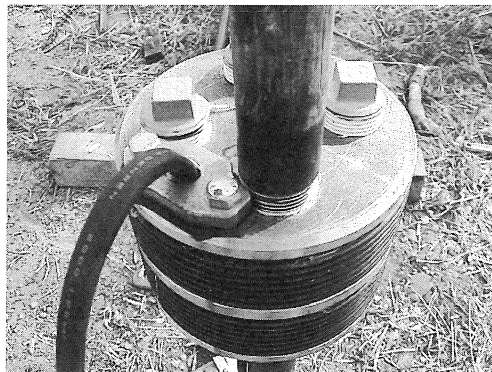


分流型地中熱交換器



孔 内 隔 壁

- 仕様
 - 材料: 鉄
 - 長さ: 110m/m
 - 外径: 150m/m
 - 41m/m幅の遮水材取り付け用凹部×2層
 - 揚水管・注水管・熱媒往路・熱媒復路の管が連通する仕組み
 - 水中ポンプの電源ケーブルの通る穴
 - 遮水材: 膨張性ゴム、幅40m/m・厚さ5m/m

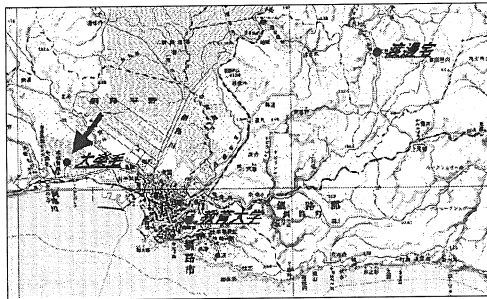


試験地の位置図



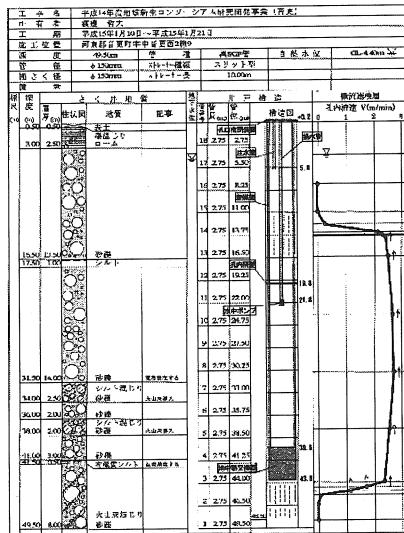
音更試験地

- ・音更試験地：河東郡音更町字中音更西2線9
- ・大楽毛試験地：釧路市大楽毛4番794

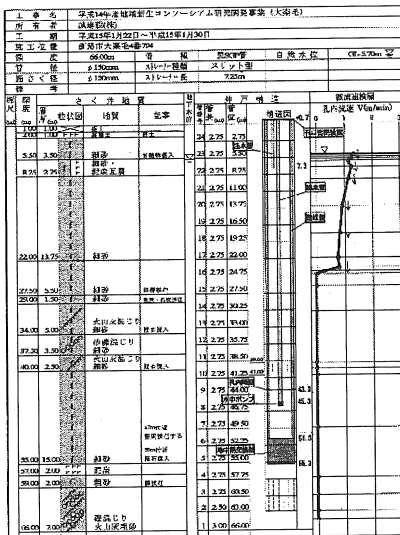


大楽毛試験地

試験採熱孔状況



音更試験地



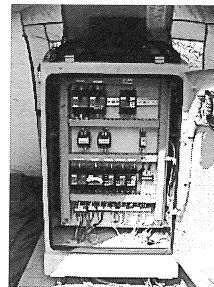
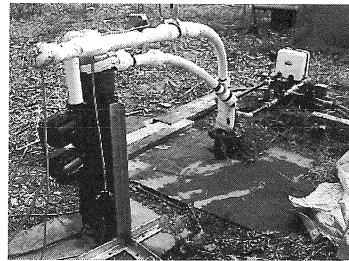
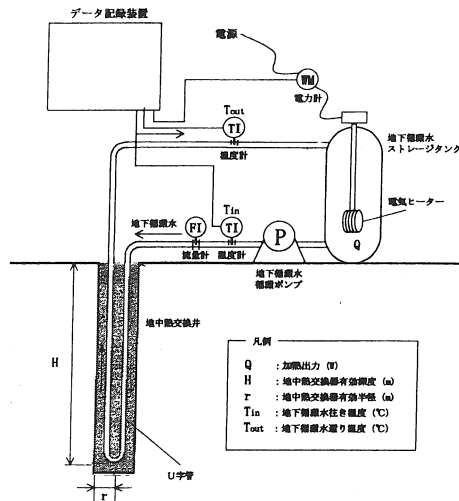
大楽毛試験地

試験採熱孔の水理地質的評価

地域	試験地名	採熱孔深度 (m)	ストレーナー区間深度 (m)	層 準	帯水層水頭 (GL-m)	孔内自然流動	地形・地質・水理的評価	文 献
十勝	音更	49.5	11.0~16.5	段丘堆積物砂礫	4.17	上下ストレーナー間で最大流速 2.7m/min、平均流速 2.6m/min の上昇流。	上部帯水層はいずれも内陸堆積盆地の河川または扇状地環境の堆積物であり、現在は然別火山南側山麓の一画である。表層地下水で準自由地下水か(地形面の傾斜に従って流下)?	岡(1999)：十勝平野北部地域地質図有賀さく泉工業水井戸資料
			44.0~48.5	池田層群最上部または洗山層砂礫	1.57			
釧路	大楽毛	66.0	39.0~41.0	沖積層	5.14	上部ストレーナーのさらに上方で流動。ストレーナー間では流動していない。地下水は位置で浅から流入し、深度 24.75m のケーシングの継ぎ目付近から流出。最大流速 1.3m/min、平均流速 0.9m/min。	沖積低地(海岸平野)で沖積層が 50m±と厚い。工業用地下水の主な揚水対象層は沖積層下の中～下部更新統であり、過剰揚水で塩水化などの障害が起きることもある。しかし、沖積層は表層の水系からの直接の補給があり資源量豊富。	広田他(2000)：塩水化論文
			57.75~63.0	沖積層	5.75			

岡(2004)：コンソーシアム検討資料に一部加筆

サーマルレスポンステスト測定方法

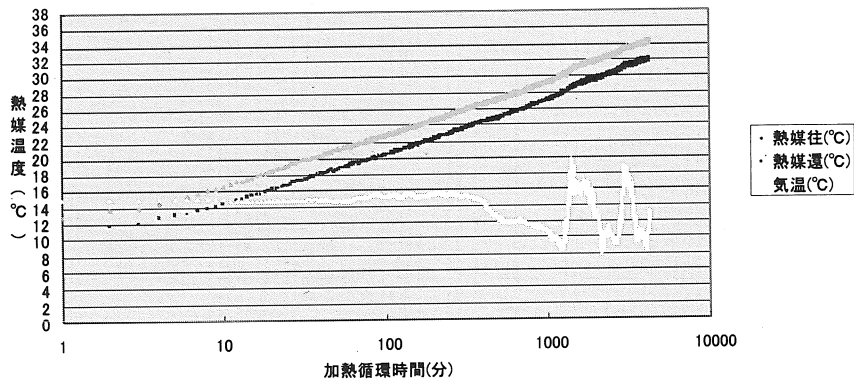


サーマルレスポンステスト模式図

サーマルレスポンステスト解析方法

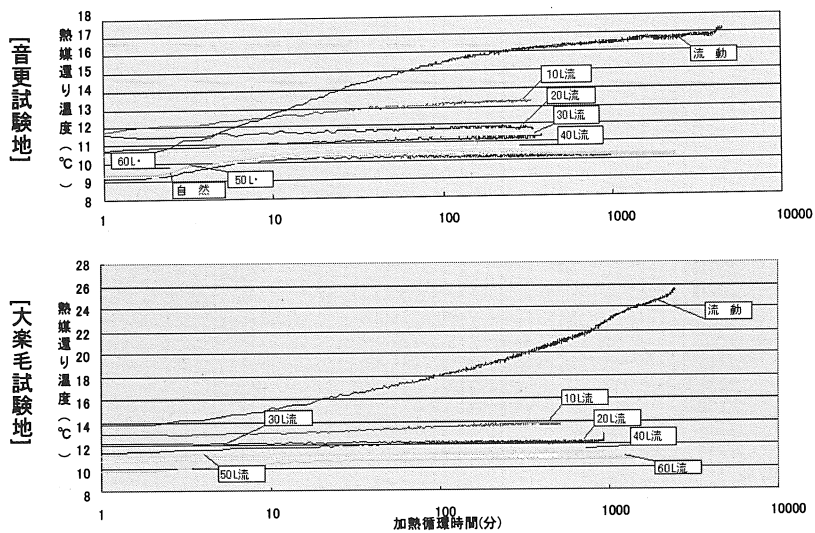
- 熱伝導による場合
 - 線源理論を用いて解析し、地層の熱伝導率、熱交換器の熱抵抗を求める。

熱媒温度変化グラフ(北海道教育大学釧路校)



サーマルレスポンステスト結果

熱媒還り温度変化グラフ



サーマルレスポンステスト解析結果

〔音更試験地〕

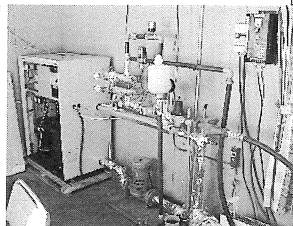
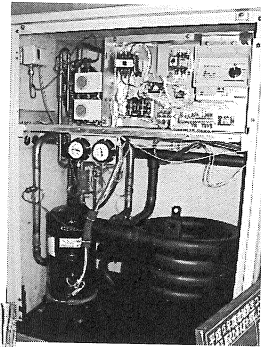
試験条件	孔内流量						
	流動なし	10L/min	20L/min	30L/min	40L/min	50L/min	60L/min
地中熱交換器有効深度 (m)	39.4	(39.5)	(39.6)	39.7	39.7	39.8	39.9
平均熱媒流量 (L/分)	32.8	32.0	32.0	31.5	31.5	31.9	31.6
加熱量 (kw)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
初期温度 t_1 (°C)	10.3	11.7(9.2)	11.2(9.2)	10.7(9.2)	10.3(9.2)	9.2	9.2
平衡温度 t_2 (°C)	(16.9+)	(≒13.2)	11.7	11.2	10.7	10.3	10.2
上昇温度 Δt (°C)	(6.6+)	(≒4.0)	2.5	2.0	1.5	1.1	1.0
平衡到達時間 (分)	—	—	—	—	—	15	14
回復時間 (分)	—	—	—	—	—	—	13
最大熱媒量 (kg)	(<3.91)	(≒5.16)	7.18	8.20	9.63	11.27	11.69
最大環熱率 (w/m)	(<99)	(≒131)	181	207	243	283	293

〔大森毛試験地〕

試験条件	孔内流量						
	流動なし	10L/min	20L/min	30L/min	40L/min	50L/min	60L/min
地中熱交換器有効深度 (m)	49.6	(50.6)	(51.6)	52.7	53.3	54.4	56.0
平均熱媒流量 (L/分)	30.1	29.8	29.7	29.6	29.5	29.4	29.5
加熱量 (kw)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
初期温度 t_1 (°C)	13.8(11.3)	12.2(9.5)	12.1(9.5)	11.3(9.5)	10.7(9.5)	10.7(9.5)	9.5
平衡温度 t_2 (°C)	(25.6+)	13.8	12.2	12.1	11.3	10.9	10.7
上昇温度 Δt (°C)	(16.1+)	4.3	2.7	2.6	1.8	1.4	1.2
平衡到達時間 (分)	—	—	—	—	—	—	23
最大熱媒量 (kg)	(<1.93)	4.96	6.87	7.03	8.75	9.96	10.72
最大環熱率 (w/m)	(<39)	98	133	133	164	183	191

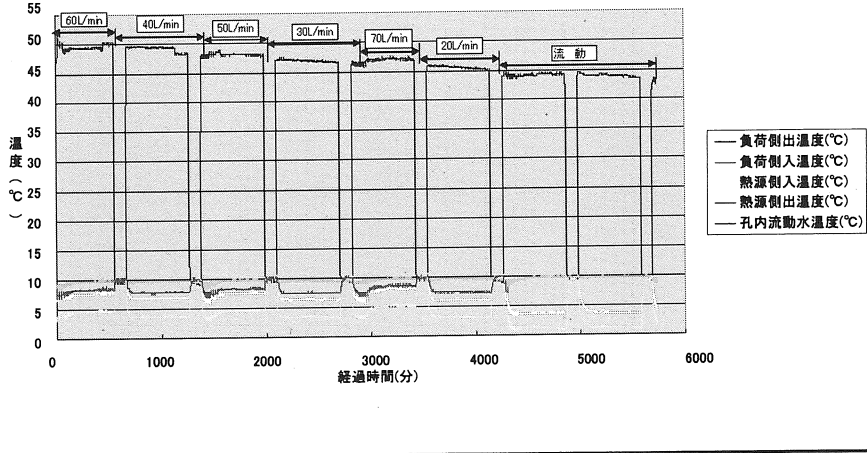
継続採熱量試験方法

- ヒートポンプ(アクア冷熱(株)社製、AQ-5B型、電動機定格出力3.9kw)を用いて継続的に採熱。
 - 測定期間：平成15年10月11日～平成16年1月30日
 - 採熱時間：8:00～23:00の15時間連続運転
23:00～翌8:00の9時間停止の繰り返し
 - 測定項目：熱源側入温度、熱源側出温度、負荷側入温度、負荷側出温度、孔内流動水温度、気温、室温、熱源側流量、負荷側流量、積算電力(以上1分ごと自記記録)、ヒートポンプ高圧側圧力・温度、ヒートポンプ低圧側圧力・温度、孔内流動水量、注水圧(随時)
 - 実施場所：音更試験地のみ



継続採熱量試験結果

継続採熱温度変化グラフ(孔内流動量変化)



継続採熱量試験解析結果

ヒートポンプ運転成績一覧表

項目	水 温 (°C)																	
	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
成績係数 (COP)	3.80	3.73	3.55	3.54	3.48	3.50	3.41	3.39	—	3.27	3.23	—	—	3.09	3.02	2.99	2.93	2.90
出力 (kw)	14.67	14.70	14.30	14.60	14.99	15.00	15.20	15.32	—	15.30	15.50	—	—	15.50	15.30	15.20	15.11	15.06
採熱量 (kw)	11.27	11.18	11.00	11.03	11.23	11.50	11.30	11.15	—	11.10	11.20	—	—	10.80	10.50	10.64	10.57	10.10
消費電力 (kw)	3.95	3.94	4.03	4.13	4.31	4.29	4.46	4.52	—	4.70	4.80	—	—	5.04	5.10	5.11	5.17	5.22

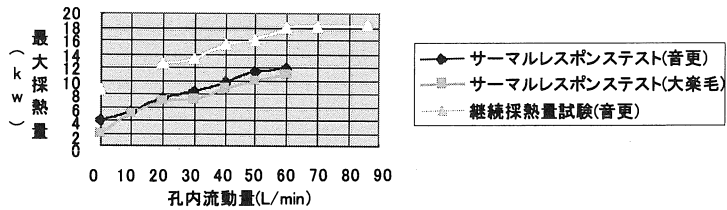
孔内流動量と採熱性能一覧表

試験条件	孔内流動量							
	流動無し	20L/min	30L/min	40L/min	50L/min	60L/min	70L/min	86L/min
地中熱交換器有効深度 (m)	39.4	(39.6)	39.7	39.7	39.8	39.9	(40.0)	(40.1)
熱媒流量 (L/分)	40.3	40.8	41.0	41.1	40.5	40.5	40.6	41.2
採熱量 (kw)	7.62	8.46	8.76	9.36	8.58	9.18	8.46	10.14
孔内流動水温度 (°C)	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
孔内流動水温度(採熱時) t_1 (°C)	—	7.3	7.5	7.9	8.3	8.4	8.6	8.6
熱媒往路温度 t_2 (°C)	0.9	3.0	3.2	3.7	4.5	4.6	5.2	4.3
熱媒復路温度 t_3 (°C)	3.6	6.0	6.3	7.0	7.5	7.9	8.1	7.8
熱媒復路低下温度 $t_2 - t_3$ (°C)	6.0	3.6	3.3	2.6	2.1	1.7	1.5	1.8
最大採熱量 (kw)	8.40	12.36	13.22	15.32	16.04	17.81	18.10	18.27
最大採熱率 (w/m)	213	312	333	386	403	446	453	456

孔内流動方式採熱孔のまとめ

- ① 厳冬期を含む112日間に亘って過負荷状態でヒートポンプによる継続採熱を実施した。その結果、期間を通して採熱量11kw、出力15kw、成績係数3~3.8で安定的に稼働した。
- ② 採熱期間中、クロスフローによる孔内流動水温の低下は認められなかった。
- ③ 採熱孔への熱媒往路温度が0°Cとなる最大採熱量は60L/min流動時で約18kwと算出される。試験採熱孔システムでは、流動の効果は20L/minの流動量で明瞭となり、60L/min以上で採熱性能の上昇は頭打ちとなる。
- ④ 地下水利用方式に比べ60L/min流動時で1.7°Cの熱媒温度低下が生じた。
- ⑤ 地中熱交換方式の基準採熱率を40w/mとした場合、0.45kwの水中ポンプ電力の付加で採熱率が10倍程度向上し、最大採熱量は16kw増大した。
- ⑥ 熱移流を主とするため、採熱孔周囲の熱伝導率の影響は軽微であり、地層を問わずほぼ同様な採熱量が期待される。

孔内流動量－最大採熱量グラフ



講演

ヒートポンプ用地熱井の掘削技術と
ヒートポンプ採熱管の検証

(株) オリエントジオサービス

磯井 敏文

ヒートポンプ用地熱井の掘削技術 と ヒートポンプ採熱管 の検証

株式会社 オリエント ジオサービス

磯井 敏文

天野 達郎

《 はじめに 》

化石燃料の枯渇や地球温暖化など、エネルギーや環境に関する危機的状況が予測され、気候変動枠組条約をはじめとして国際的にさまざまな取組みがされている。

わが国でも政府・民間で環境保全のため法令・税制の導入や新エネルギー・省エネルギー技術の開発と普及、さらに環境問題に関する教育・啓発活動などが進められている。

弊社では、地中熱を利用したヒートポンプの普及による省エネルギーの促進を目指し、ヒートポンプのための地熱井掘削技術の開発や、その採熱管の性能評価などに取り組んでいる。

《 ヒートポンプ用地熱井の掘削技術 》

これまでも、様々な掘削方法が開発・検証され、また地熱ヒートポンプの装置・採熱方式についても、道内外の研究機関や企業で検討されている。

この度弊社では、札幌市内伏古地区の地熱ヒートポンプ施工現場において、3種類の掘削工法を用いて隣接するヒートポンプ孔を掘削するという機会に恵まれた。

同一の地質条件で同じ時期に複数の工法を試す機会を活かすため、地質状況の記録はもとより、掘削および附帯時間についても詳細に記録し、各工法の比較資料を作成した。

伏古地区では各工法で数本ずつ、合計 10 本の地熱井を掘削したが、震動工法は掘削が最も速く、また採熱管挿入・設置時間も数時間程度と少なかった。

トップドライブ工法と従来のロータリー式掘削は掘削時間が多いだけでなく、伏古地区のような崩壊性の強い現場では、掘削後に孔壁の崩壊などのため、採熱管の挿入に 1 日から長い時で 2 日を要したこともあった。

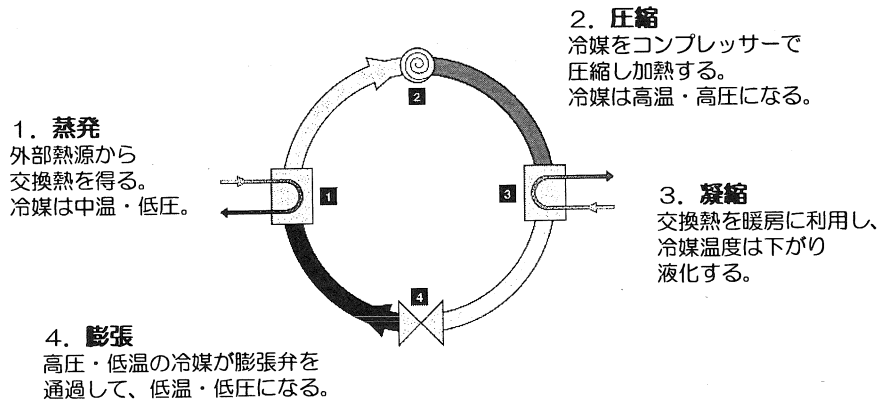
今後も多くの現場の掘削事例から掘進率・施工時間の検討を続けていかなければならないが、今回の結果としては高周波震動工法の長所が際立った。

《 ヒートポンプ採熱管 》

採熱管の形態についても、同一現場で U 字管型と同軸型を比較する機会を得たので、現在データを収集中であるが、その状況について簡単に紹介する。

ヒートポンプとは

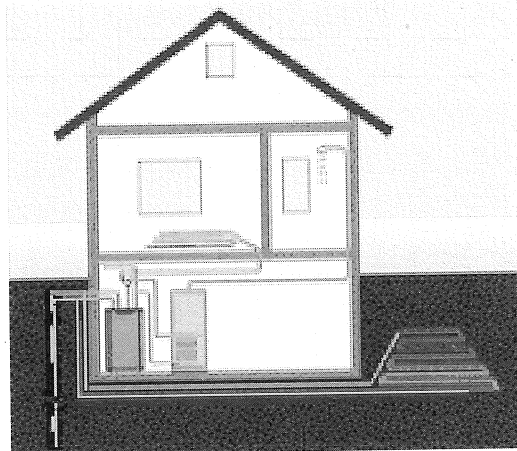
大気・地熱・地下水・河川水など、比較的低温の熱源から熱を汲み上げて冷暖房に利用するシステム。



資料：スイス Satag社

地熱ヒートポンプ GeoHP

1. 地中に埋設された採熱管に不凍液を循環させ、地中で暖める。
2. 暖められた不凍液の熱で、HP内部の冷媒の温度を上げる。
3. コンプレッサーでさらに冷媒温度を上げる。
4. 高温の冷媒からの交換熱を暖房に利用する。
5. 熱を奪われ低温になった不凍液は地中でまた暖められる。



採熱方法：垂直・水平管埋設、ポリパイU字管型、鉄管・ポリパイ同軸型、不凍液循環・地下水直接利用、ほか。

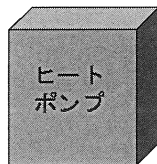
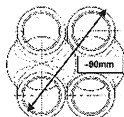
資料：スイス Satag社

採熱管

(地中に埋設される熱交換器)

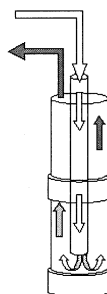
U字型ポリパイ

- ・ダブルUチューブ
- ・シングルUチューブ



同軸タイプ
(DCHE)

鉄管とポリパイの
同軸構造



必要なHP孔の口径
100~120mm以上

HP孔の深度：床面積などから建物の熱負荷を算出し、必要深度を決定する。
地質、地温、含水率などによるが、一般住宅では100m孔1本程度。

写真：スイス HAKA社

ヒートポンプ用地熱井の掘削工法

1. ロータリー式ボーリング工法
2. トラック搭載型トップドライブ工法
3. 高周波バイプロ工法

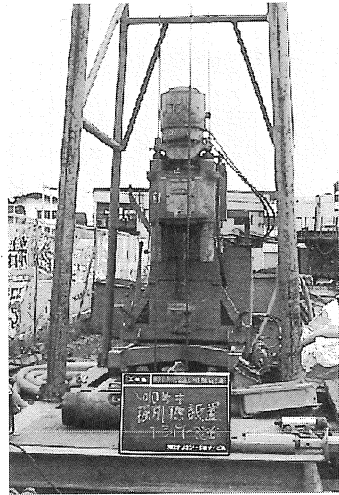
その他の工法

- ・パーカッション工法
 - ・エアロータリー工法
 - ・エアロータリーパーカッション (エアハンマー) 工法
- ほか

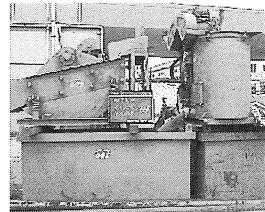
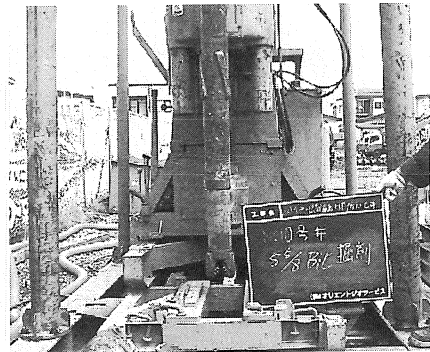
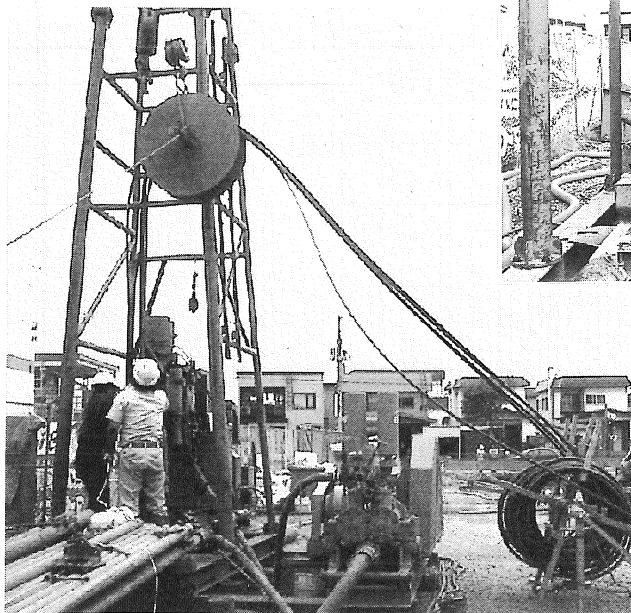
ヒートポンプの普及が進む欧州、スイスなどに比べて、日本の地質は崩壊性の強い砂礫層が多く、地下水も多いので、これに適した掘削工法を選定する必要がある。

ロータリー式ボーリング工法

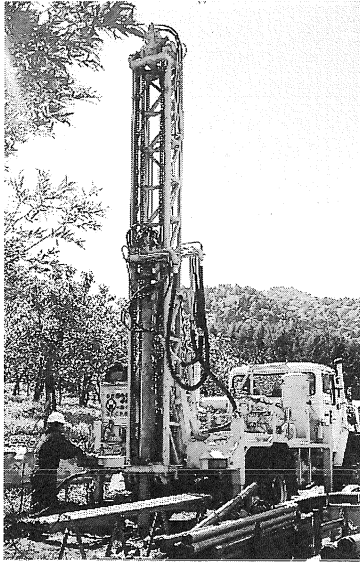
主要機材	ボーリングマシン・檣
付帯機材	泥水ポンプ、マッドスクリーン、タンク、ミキサー、ほか。
設置	トラックで搬入し、クレーンで設置・レベル出し
掘削	・トリコンビットの回転とカラーのビット荷重。 ・チャックの切り替えでロッドを少しづつ降下。
ロッド	ボーリングマシンのウィンチで引上げ、パイプレンチなどで、締め付け・接続する。
泥水	・ポンプで泥水を循環し、スライムを排出。 ・回収した泥水はスクリーンでザクを分離、排出。 ・泥水の循環でビットを冷却。 ・泥水により孔壁生成、保護。
口元	崩壊防止のため口元管を挿入。



ロータリー式ボーリング工法 (写真)

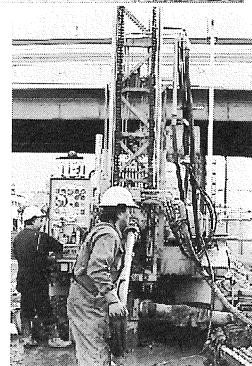
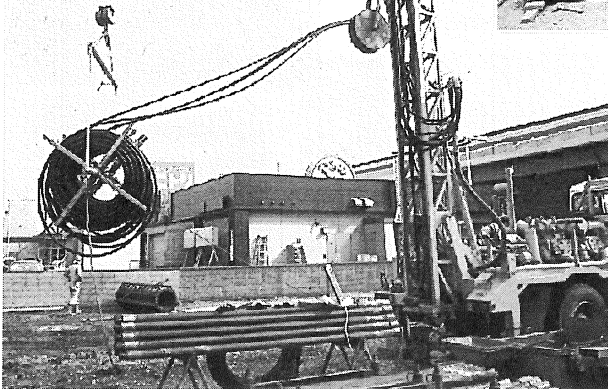
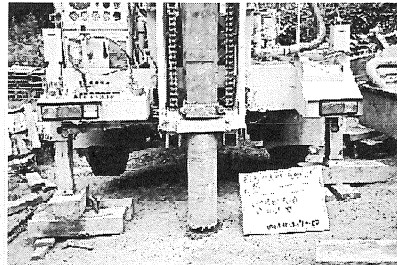


トラック搭載型トップドライブ工法



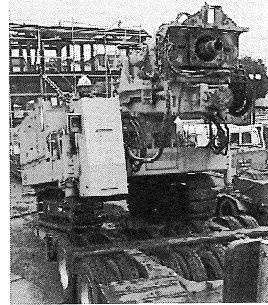
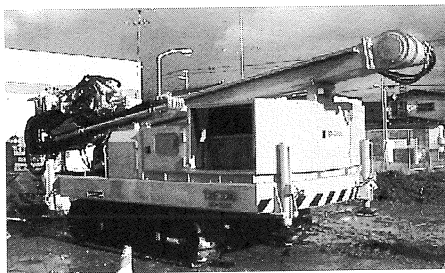
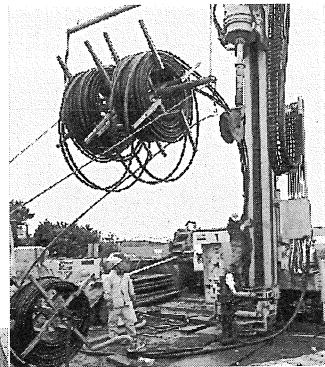
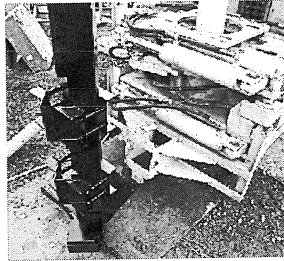
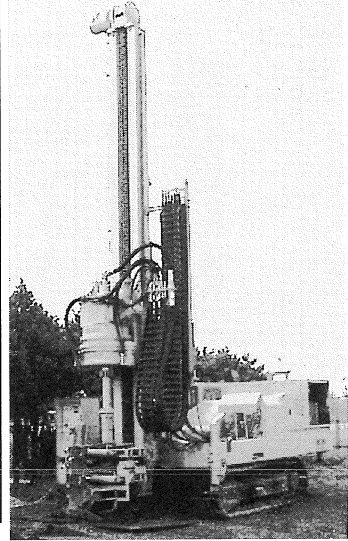
掘削機本体	トラック搭載掘削マシン（ポンプも搭載）
付帯機材	マッドスクリーン、タンク、ミキサー、ほか。
設置	自走搬入、アウトリガーでレベル出し
掘削	・トリコンビットの回転とカラーのビット荷重。 ・トップドライブでロッド長分を一気に掘削。
ロッド	・ヘッドを油圧でチルトさせ、ロッドを追管。 （3mロッドは1人でも追管可能。） ・油圧トンクとトップドライブで締め付ける。
泥水	ロータリー式と同様
口元	崩壊防止のため口元管を挿入。

トラック搭載型トップドライブ工法（写真）



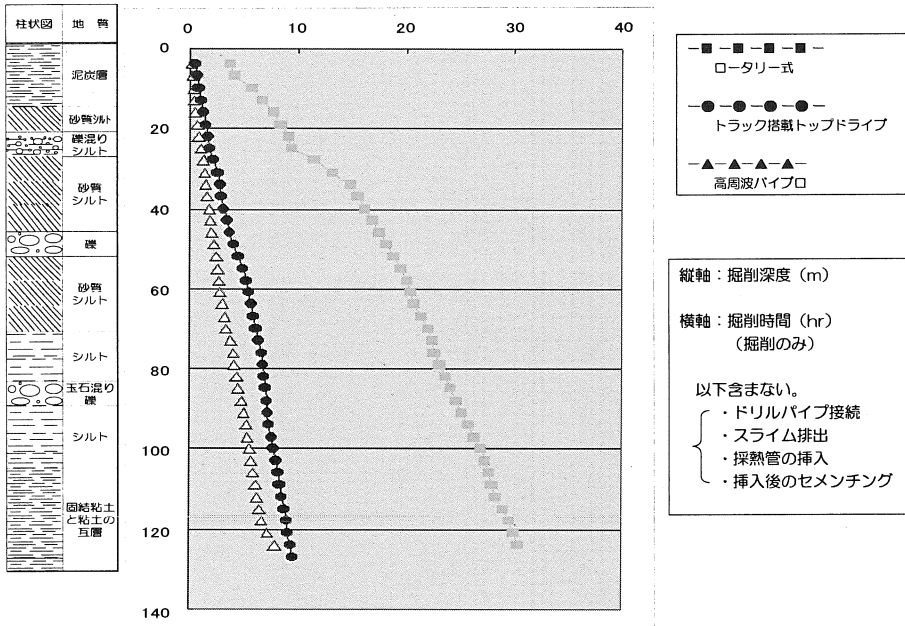
高周波バイブロ工法

掘削機本体	クローラ搭載掘削マシン
付帯機材	マッドスクリーン、タンク、ミキサー、ほか。
設置	<ul style="list-style-type: none"> ・低床トレーラーで搬入後、クローラー自走。 ・アウトリガー、および油圧によるマストのスイングとスライドでレベル出し。
掘削	<ul style="list-style-type: none"> ・リングピットの回転と荷重を加えた高周波バイブロによる掘削。 ・トップドライブでロッド長分を一気に掘削。
ロッド	<ul style="list-style-type: none"> ・ヘッドを油圧でチルトさせ、ロッドを追管。 ・油圧トンクとパワーヘッドで締め付ける。 ・ロッド自体がケーシングの代わりになり、孔壁を保護する。
泥水	<p>ロータリー式・トラック搭載式と同様。</p> <p>※ロッドがケーシングとして働くので、通常の地質状況では、泥水の代わりに清水が使用可能。</p>
口元	<p>通常は口元管は不要。</p> <p>著しい逸水・崩壊層では必要となることもある。</p>



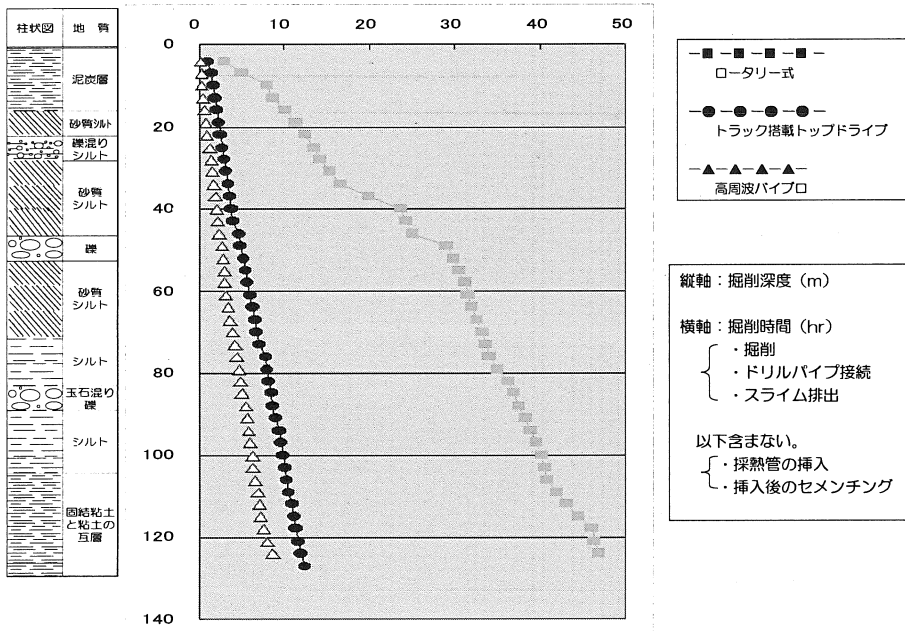
掘進率比較 実掘削時間

(札幌市内の同一現場125m掘削の場合)

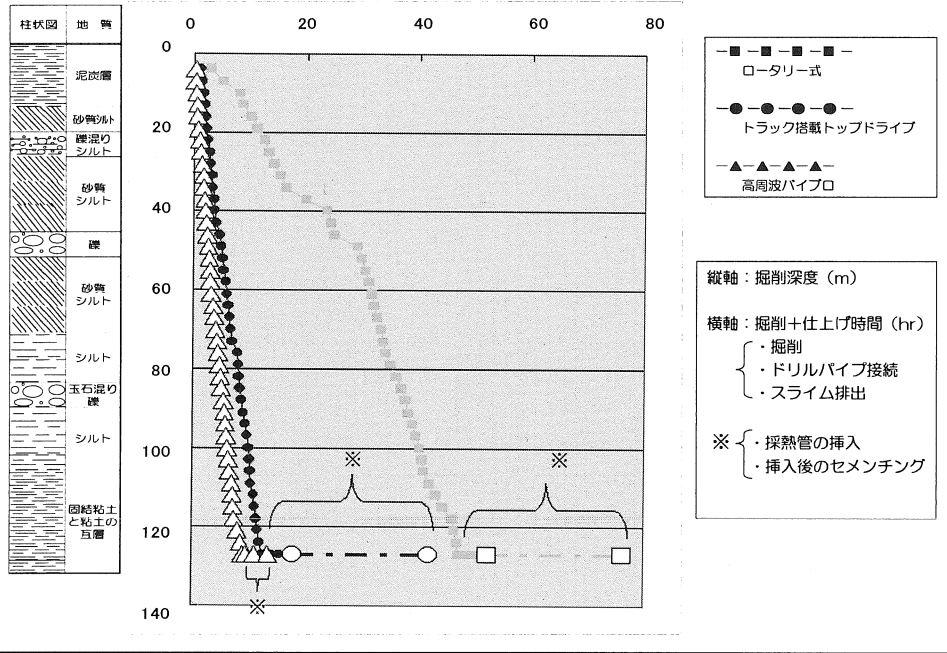


掘進率比較 掘削+附帯時間

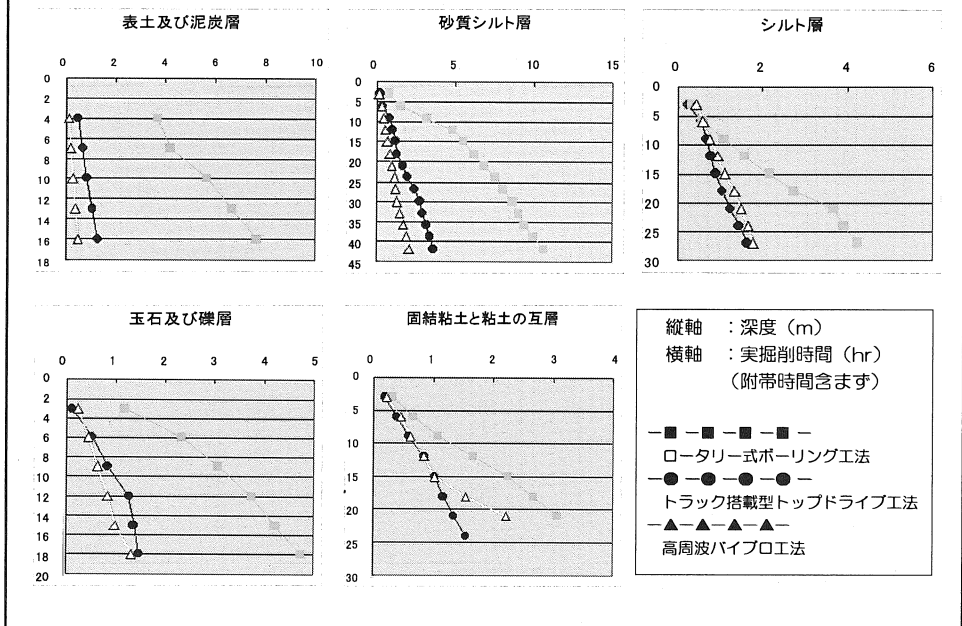
(札幌市内の同一現場125m掘削の場合)



掘進率比較 掘削～仕上げ時間 (札幌市内の同一現場125m掘削の場合)



地質状況ごとの掘進率



各工法・掘削時間の比較

	高周波 バイブロ	トラック搭載 トップドライブ	ロータリー式
機材	マシン搭載クローラー。 トレーラ搬入だが、設置の自由度大。	自走トラック。マシン・ポンプ搭載。 設置は比較的簡単。	設置に時間を要する。
掘削	トップドライブで掘削や追管が高速。 高周波振動でジャミングのリスク小。	トップドライブで掘削や追管が高速。 ロッドは軽量で追管容易。	チャック切り替えや追管に時間を要する。
泥水・崩壊	ロッドがケーシングとして働くので、崩壊に強い。 通常は清水掘り可能。	泥水必要。 ロ元ケーシング必要。	⇔ 左と同じ。
採熱管の挿入	ロッド引上げ前に、管内に採熱管を挿入可能。 清水掘りの場合、採熱管に働く浮力が小さく、挿入がさらに容易。	ロッド引上げ後に挿入。 孔壁が悪かったり、崩壊があると挿入困難。 直前に抜く必要あり。 泥水の浮力で挿入困難。	⇔ 左と同じ。

掘進・附帯時間の比較

長所	非常に速い。採熱管の挿入容易。	比較的速い。	
短所	地層により、粘性の高いコアがロッド内に残留し破碎・排出が遅い。 (リングピットの改良必要)	表層で荷重不足。 通常ロ元管必要。 採熱管の挿入に長時間要する場合あり。	表層で荷重不足。 短ストローク。 ロ元管必要。 採熱管の挿入に長時間要する場合あり。

実掘削時間 / 合計時間

時間	8:42 / 13:12	12:30 / 17:30 ++	46:50 / 52:20 ++
----	--------------	------------------	------------------

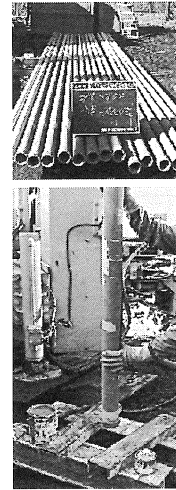
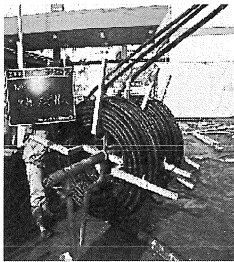
参考

各掘削機の仕様

	高周波バイブロ工法	トラック搭載型トップドライブ工法	ロータリー式ボーリング工法
機種名	ソニックドリル	トラック搭載型トップドライブマシン	ロータリー式ボーリングマシン
型式	SD-250A	P3002	TBM-88
タイプ	クローラ搭載型	トラック搭載型	定置式
ベースマシン	PC100-6E (0.45m ³)	二輪トラック(160-23ANW)	-
原動機	CAT C9-JE2-TAA (ディーゼル)	燃料 (軽油)	30 kWモーター
排気量	8800 cc	12670 cc	-
最高出力	250 ps	195 ps	30 kW、30~40 ps
形式	全油圧式トップドライブ 及び高周波バイブロ	全油圧式トップドライブ	油圧フィード 及び変速装置付きギヤ回転
昇降装置	オイルモーターチェーンフィード方式	油圧式チェーン駆動方式	変速装置のついたウィンチ方式
引揚げ能力	約 14 t (137.2 kN)	最大約 10 t	約 9 t
給進力	約 10 t (98 kN)	最大約 10 t	約 7 t
フィードストローク	4.85 m	約 5 m (引揚げ高さ約 6 m)	0.5 m
パワースイベル回転トルク	右回転: 約 653 kg-m (6400 N-m) 左回転: 約 796 kg-m (7800 N-m)	2モーター: 約 306 kg-m (3000 N-m) 3モーター: 約 500 kg-m (4880 N-m)	回転数 30 rpm時: 約 597 kg-m
機 パワースイベル回転スピード	0~100 rpm	2モーター: 160 rpm 3モーター: 90 rpm	30, 60, 100, 145 rpm (4段変速)
パワースイベルヘッドチルト	0~90°	0~90°	-
ガイドシエリリーダースイング	左右±α	-	-
ガイドシエリリーダースライド	ストローク 1000mm	-	-
重量	16.5 t	12.24 t (トラックのみ)	2.25 t (原動機、油圧チャック除く)
搬送時寸法 (長×幅×高 m)	7.96×2.70×3.15	7.71×2.49×3.67 (トラック寸法)	2.29×1.10×2.18
掘削時寸法 (長×幅×高 m)	6.12×2.70×8.015	-	-
送水ポンプ	NP-700T または NP-400T	ピストンポンプ 450 L/min フューガルポンプ 1500 L/min	NP-700T
その他機材	タンク 3 m ³ ~9 m ³ マッドスクリーン TM-10B サンドポンプ 4" セメント注入ポンプ MG-15 ミキサー 500 L/min セメントミルク用タンク 3 m ³ 発電機 75 kVA~90 kVA	1 m ³ ~3 m ³ タンク内設置のスクリーン - MG-15 500 L/min 3 m ³ -	3 m ³ ~9 m ³ TM-10B 4" MG-15 500 L/min 3 m ³ 90 kVA

地熱ヒートポンプ用採熱管 - 役割と必要条件

1. 地中の熱を管内の不凍液に伝える。
⇒ 熱伝導性が良いこと。
2. 一度地中に埋設した採熱管は交換が困難、または不可能。
⇒ 掘削した坑井の内部に容易に挿入でき、破損し難いこと。
3. 冬は熱を奪われた低温の不凍液が地中に送られ、夏の冷房運転時や、中間期の日中には建物の余剰熱を奪った高温の不凍液が管内を通る。
⇒ 季節ごと、または、日内の温度変化に対しても破損・漏れなどの問題が起きないこと。



4. エチレングリコールやプロピレングリコールを使用。
⇒ 腐蝕や不凍液の劣化が起きない材質。耐久性が高いこと。
5. 掘削コスト同様、普及のためには生産コストが低く、設置工事も容易であること。

採熱管の熱性能評価

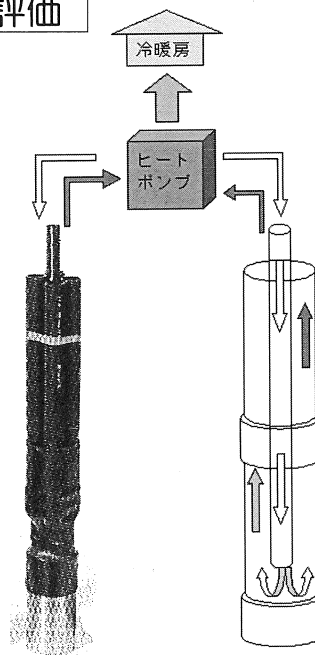
1. 採熱管の下部（120m）、中間（50m）、浅部（5m）に温度センサーを取り付けて、ヒートポンプの使用に伴う採熱管周辺の地温変化を計測。

2. ヒートポンプの消費電力と消費熱量を記録し、COPを算出。

U字管タイプ
・PE管ダブルUチューブ

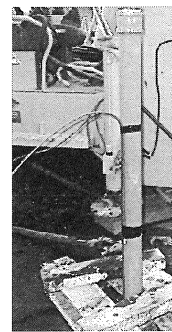


採熱管写真：スイス HAKA社



3. 長期間、地温の変化をモニターして、地温の低下状況とヒートポンプによる熱の汲み上げ状態から採熱管の熱性能を評価する。

同軸タイプ (DCHE)
・80-100mmの白ガス管
・内径29mmのPE管を挿入



「COP」ヒートポンプの成績係数

(coefficient of performance)

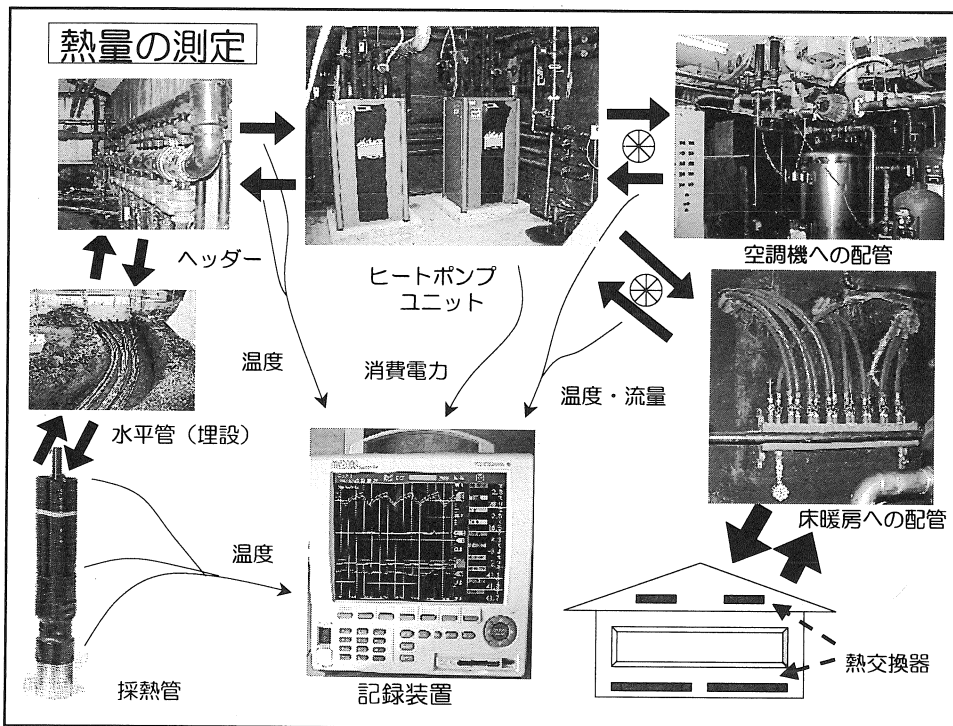
ヒートポンプが供給するエネルギーと使用するエネルギーの割合。

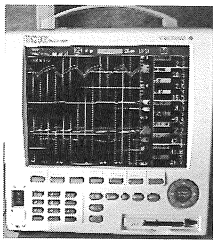
- * 供給エネルギー = 冷暖房能力
(= 投入エネルギー + 地熱エネルギー)
- * 使用エネルギー = 消費電力 (一般的な電動ヒートポンプの場合)

$$\text{COP} = \frac{\text{冷暖房能力 (kW)}}{\text{消費電力 (kW)}}$$

COPが大きいほど、地中からのエネルギーが加わったことになり、システムの効率が良いことになる。
COPを3以上にすることが一般的な目安になっている。

※ 国連の気候変動枠組条約 (UNFCCC) の 締約国会議も「COP」 (Conference of the Party) と呼ばれ、京都議定書が出された第3回京都会議はCOP3と呼ばれているが、ヒートポンプとは無関係。





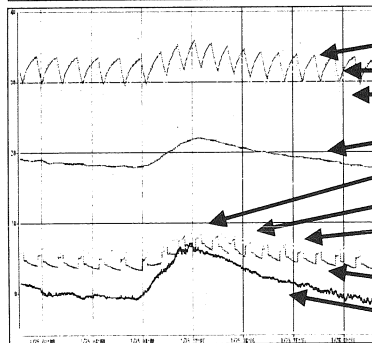
熱量・COPの計算

- ヒートポンプが供給する熱量 $Q1$ = 不凍液の行き・帰り温度差 × 流量 × 時間

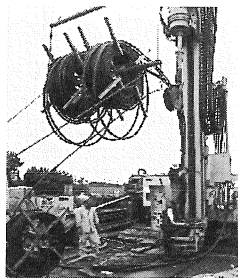
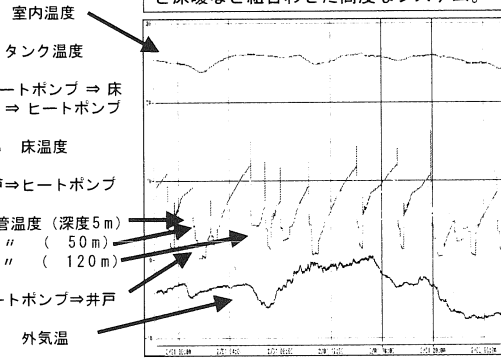
$$= (t_1 - t_2) \times q \times hr$$
 - ヒートポンプが使う熱量 $Q2$ = ヒートポンプの消費電力量
- $\Rightarrow COP = Q2 \div Q1$

ヒートポンプは冷媒の蒸発・凝縮を利用して熱を交換するため、地熱側不凍液の供給温度と利用温度との差が小さいほど、効率が良くなり、COPの値は大きくなる。

タンク温度を35°Cに設定したシンプルな制御のシステム。温度は規則的に変化。



複数の地熱井と複数のHPユニット、空調と床暖など組合わせた高度なシステム。



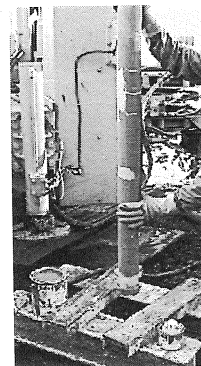
採熱管の評価

- ・ これまでも、地熱ヒートポンプおよびその採熱方法について、道内の研究所や企業でも様々な研究がされてきた。
- ・ ヒートポンプ本体にも色々な種類があり、国内外で開発が進められているが、採熱方法にもU字管型、同軸型、水平（パネル）型、地下水利用型、など多くの方式がある。

(同軸型が高性能という事例・研究発表がある。)



- ・ 熱源である大地の側には採熱に関して、土壌の熱伝導率、密度や含水率、透水性などの要素がある。
- ・ ヒートポンプを効率的に運用するためには、熱の利用形態（冷暖房・床暖・給湯・融雪など）とそれに適した装置、そして地質条件に合った採熱方式を検討する必要がある。
- ・ この度、同一の現場でダブルU字管型と同軸型採熱管を地中に埋設する機会を得たので、熱消費量と地中の温度変化を計測し、性能を比較することとした。
- ・ 長期に渡りヒートポンプを利用する場合、主に夏の間の地中への蓄熱も年間を通じた熱の有効利用の重要な要素となるので、これら地温の経年変化も併せて、現在計測中であり、総合的な比較・検討をする予定である。



おわりに

- エネルギー問題の対策として、地熱ヒートポンプの普及は大きな可能性をもっている。
- 装置や冷暖房システムの開発、建物の断熱性などの改良も必要であるが、掘削コストの低減や採熱方法の改善は大きな課題である。
- 高周波バイプロ掘削工法は、HP用地熱井掘削において、従来のロータリー式やトップドライブ式泥水掘削に比べて掘進率が高い。附帯時間も短く、採熱管の設置の面でもメリットがあり、掘削コストの低減に貢献できるものと考えられる。
- 採熱効率の改善については、U字管型と同軸型について、現在収集中のデータをもとに評価・比較を進める予定である。

参考資料・文献・写真等の出展

- NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）
地熱開発室「地球熱利用システム」、ホームページ
- 地中熱利用促進懇談会ホームページ
- Satag社、Haka社パンフレット・ホームページ（スイス）
- アクア冷熱株式会社（札幌）
ほか

講演

「地下水の動きを見る」

ーボーリング孔内で地下水流動をどこまで計れるかー

飛島建設（株）

小林 薫

（株）レアックス

金内 昌直

地下水の動きをみる

— ボーリング孔内で地下水流動をどこまで計れるか —

飛島建設(株)技術研究所地盤研究室
室長 小林 薫
kaoru_kobayashi@tobishima.co.jp

1. はじめに

地盤環境問題に関心が集まる中, これまでの地盤沈下だけではなく, 建設工事に伴う地下水の流動阻害 (図-1), 周辺植生への影響や土壌・地下水汚染 (図-2) 等, 地下水に関する問題が注目されている.

地下水の流動阻害に対する各種対策工 (例えば, スルーパス工法¹⁾) については, 効果確認のために地下水モニタリングが必要である. また, 近年問題になってきている土壌・地下水汚染問題においては, 汚染物質の地下水流動による移行範囲を予測・評価することが重要であり, 地下水流動の流向流速測定は環境保全・環境修復の分野においては透水試験より重要視されている²⁾. 特に, 地下水に溶出している状態の水溶性流体は, 遅延効果が小さく汚染物質が地下水流動とともに移動するため, 帯水層中の地下水流動を正確に把握することが重要である³⁾. また, 地下水流動の流向・流速は, 地下水汚染問題における維持・管理上の中・長期的なモニタリング計画において把握しておかなければならない重要な要因の1つとされている⁴⁾.

一方, 原位置における地下水流動の流向流速測定は, 経済的で測定時間が比較的短く, 測定精度も向上している単孔式による測定方法が多用されている. しかし, 表-1に示す現状の単孔式測定方法^{5) 6)}は, 技術的に水平流の流向流速測定しかできないため²⁾, 原位置における複雑な3次元的挙動を示す地下水流動を正確に測定することは困難である. このことから, 地下水に関わる各種問題を解決しようとする場合, これまでに発達してきた調査法 (流向流速測定法) で十分満足するものが得られているのであろうか? という疑問がある.

こうした背景に対して, 地下水に関わる諸現象を正確に把握し, 最も適切な対策工を実施するためには, 原位置における地下水流動の流向・流速を正確に把握する測定方法が必要である. 本報文では, 原位

置において単孔式で3次元的な地下水流動の流向・流速を的確に測定するための、写真測量を応用した Self Calibration 法（以下、SC法と記す）を用いた重複画像標定問題の解析方法とともに、CCDカメラとプリズムを組み合わせて開発した光学式流向流速計の適用性について検討した結果について述べる。

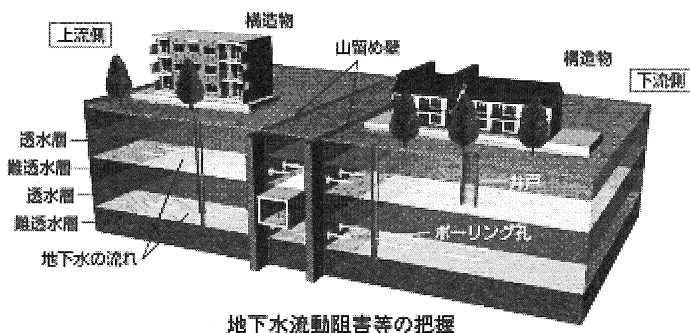


図-1 地下水流動阻害の概要図

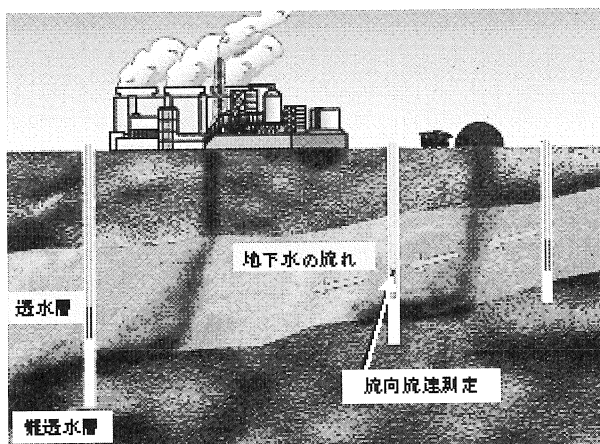


図-2 土壌・地下水汚染の概要図

表-1 現状の単孔式による流向流速測定方法の概要⁶⁾

測定方法(単孔式)	概要	備考(測定範囲)
テレビ(CCDカメラ)法	テレビ(CCDカメラ)を用いて浮遊粒子の軌跡を追跡する最も直接的な方法で、浮遊物追跡法とも呼ばれる	$1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-1} \text{cm/s}$
レーザー法	レーザー光によって、干渉縞を発生させ、この干渉縞を回転させて、粒子の干渉縞を横切る周期から求める方法	$5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-0} \text{cm/s}$
中性子検出法	ホウ素をトレーサとし、指向性(8方向)を持たせた中性子検出器で各方向のホウ素濃度の希釈状況の変化より求める方法	$3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$
電位差法	地下水と比抵抗の異なる溶液をトレーサとし、電極間の電気抵抗(周期12本)を測定することで、トレーサの希釈状況の変化より求める方法	$3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
熱量法	ヒーターによって加熱された地下水をトレーサとし、温度センサー(8個)を用いてその移動を検出して求める方法	$1 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$

2. Self Calibration 法を用いた重複画像標定問題の解析方法

単孔式により 3 次元的な地下水流動の流向・流速を測定する方法は、ステレオビジョンを応用したもので、撮影した視差の異なるステレオ画像を処理することにより、対象とする液体中を移動する固体トレーサの 3 次元座標を求め、地下水流の流向と流速を同時に算定するものである。

以下に、画像処理に用いた理論 (Self Calibration 法⁷⁾) の概要を簡単に示す。

図-3 は、ステレオペアな写真画像を撮影した場合の被写体 (P_M) とカメラ (O_i) と取得画像 (P_{ci}) の位置関係を示したものである。座標が (X_j, Y_j, Z_j) であるような点 j の写真 i における写真座標 (x_{ij}, y_{ij}) は、共線条件式(1), 式(2)で表される。

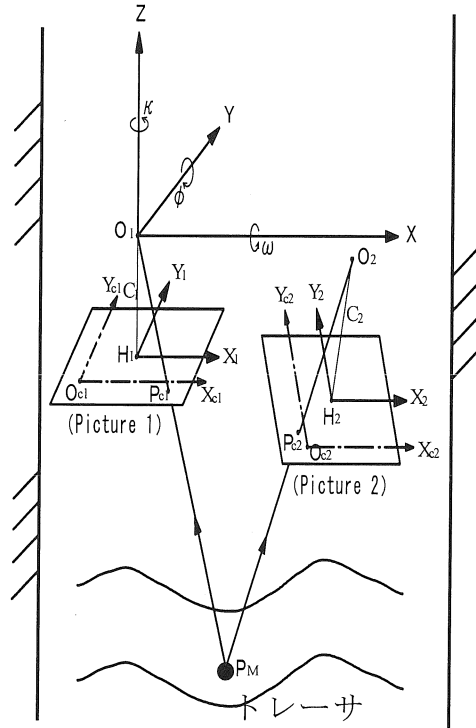


図-3 撮影対象物と撮影カメラの位置関係図

$$x_{ij} = -c_i \frac{a_{11i}(X_j - X_{0i}) + a_{12i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{13i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \quad \dots\dots(1)$$

$$y_{ij} = -c_i \frac{a_{21i}(X_j - X_{0i}) + a_{22i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{23i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & a_{13i} \\ a_{21i} & a_{22i} & a_{23i} \\ a_{31i} & a_{32i} & a_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa_i & \sin\kappa_i & 0 \\ -\sin\kappa_i & \cos\kappa_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_i & \sin\omega_i \\ 0 & -\sin\omega_i & \cos\omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_i & 0 & -\sin\phi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_i & 0 & \cos\phi_i \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、写真 i は外部標定要素 (X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i} :カメラ投影中心の座標, ω_i , ϕ_i , κ_i :カメラの傾き) を有するものであり、また、正しい写真座標 (x_{ij} , y_{ij}) は、画像処理などによって測定された写真座標を (x_{cij} , y_{cij}) とすると、式(4)~(8)のように表される。

$$x_{ij} = x_{cij} - x_{hi} - \Delta x_{ij} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$y_{ij} = y_{cij} - y_{hi} - \Delta y_{ij} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\Delta x_{ij} = x_{ij} \left(k_{1i} r_{ij}^2 + k_{2i} r_{ij}^4 + k_{3i} r_{ij}^6 \right) + p_{1i} \left(r_{ij}^2 + 2x_{ij}^2 \right) + 2p_{2i} x_{ij} y_{ij} \quad \dots\dots(6)$$

$$\Delta y_{ij} = y_{ij} \left(k_{1i} r_{ij}^2 + k_{2i} r_{ij}^4 + k_{3i} r_{ij}^6 \right) + 2p_{1i} x_{ij} y_{ij} + p_{2i} \left(r_{ij}^2 + 2y_{ij}^2 \right) \quad \dots\dots(7)$$

$$r_{ij}^2 = x_{ij}^2 + y_{ij}^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

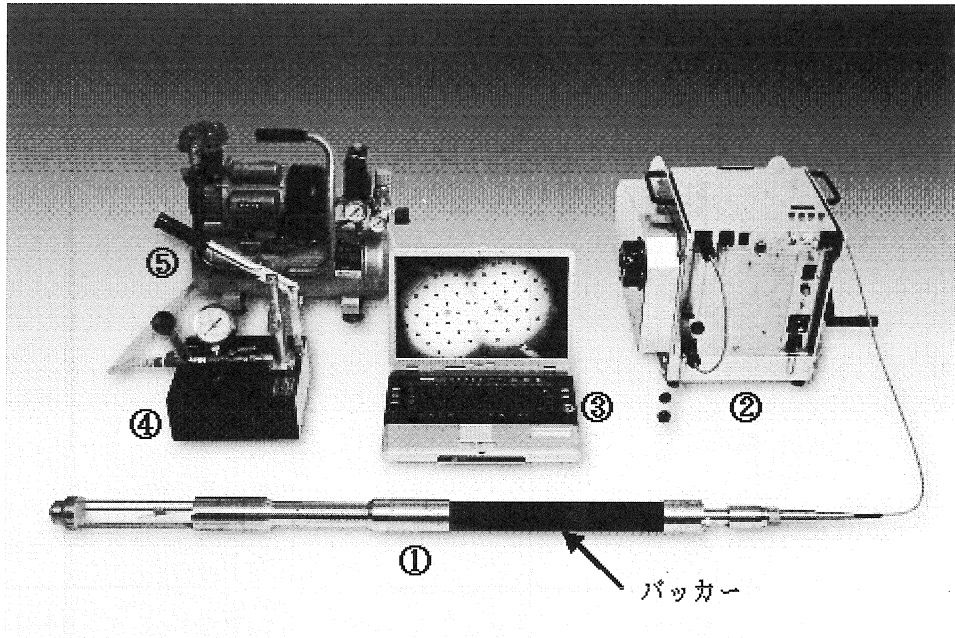
ここで、 c_i は写真 i の焦点距離, x_{hi} , y_{hi} は主点の位置のずれ, k_{1i} , k_{2i} , k_{3i} , p_{1i} , p_{2i} はカメラレンズの歪曲収差の係数

Self Calibration 法では、1 台の CCD カメラのみを用いて焦点距離を変えずに撮影を行うため、それぞれの写真がすべての写真に共通した内部標定要素をもつものとみなすことができるので、複数の写真について同時に単写真標定を行う。この方法では、外部標定要素 (X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i} , ω_i , ϕ_i , κ_i) は写真ごとに異なるが、他の 8 個の内部標定要素 (c_i , x_{hi} , y_{hi} , k_{1i} , k_{2i} , k_{3i} , p_{1i} , p_{2i}) はすべての写真で同一であるとして解析を行う。式(1)~(8)で表される共線条件式は、未知数について非線形である。したがって、解析では、未知数を近似値と微小補正量とに分解して考えて非線形方程式を線形化し、繰り返し計算によって解を求めている。

3. 光学式流向流速測定システム

3.1 光学式流向流速測定システムの概要

写真-1に示したように、開発した光学式流向流速測定システム⁸⁾は、以下の5つの装置から成っている。



写真－１ 光学式流向流速測定システムの外観

- ① CCDカメラとプリズムを組み合わせた方位計内蔵の光学式流向流速計本体部
- ② 本体部の上げ下げを機械的に行うケーブル巻き取り装置
- ③ 画像表示および取得画像保存装置(画像処理ソフト内蔵)
- ④ 微量押し出し調整機能付き清水用の固体トレーサ注入装置
- ⑤ 本体部を所定深度に固定するパッカー用の加圧装置

このうち光学式流向流速計は、図－４に示したように検知部、地下水通過部、照明部およびそれを孔内に固定するためのパッカーから成っている。また、取得画像は、画像伝送用ケーブルと連結されている地上部の画像表示および取得画像保存装置に順次保存する。取得画像処理は、同装置に内蔵している画像処理ソフトを用いてその場で解析・評価を行うことができるため、即座に測定結果の信頼性を判断した上で追加測定などの判断が可能になる。

3.2 測定手順

測定手順は、図－５に示すようにボーリング孔に本体部を挿入し、固定用パッカーで所定深度に固定する。そして、必要に応じて密度

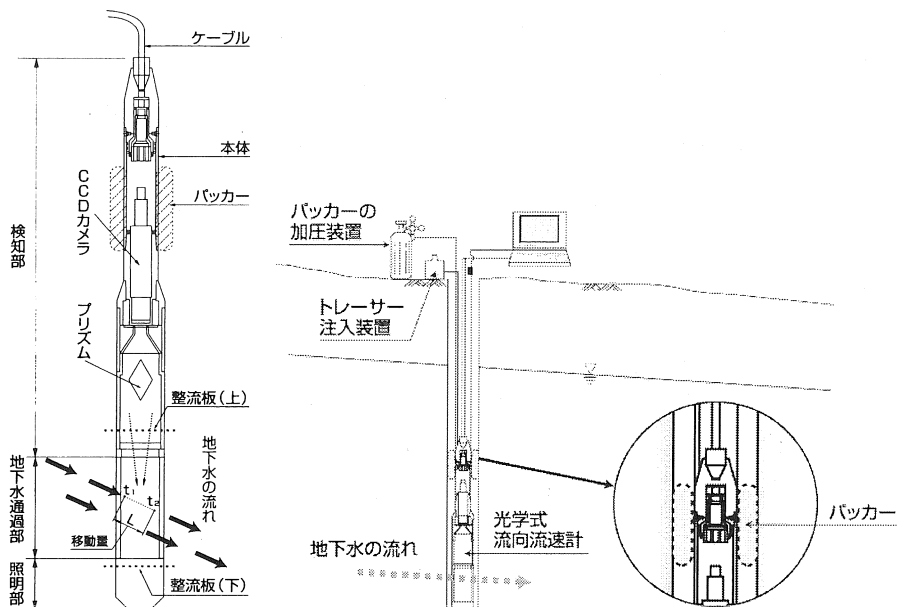


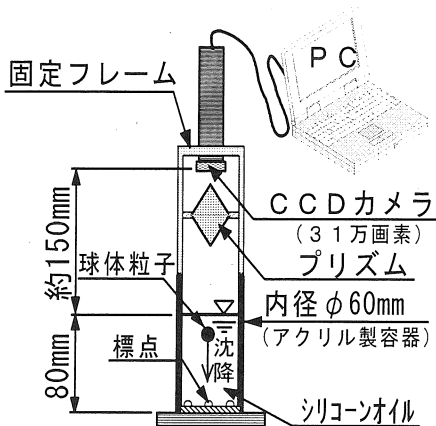
図-4 光学式流向流速計

図-5 光学式流向流速計の設置概要図

調整した固体トレーサを投入し、地下水流動が定常状態になった後、初期画像を取得する。静置状態のまま任意時間後に順次画像を取得する。取得した各ステレオ画像を SC 法で画像処理することにより、初期 t_1 と任意時間後 t_2 (移動後) の固体トレーサの各 3 次元座標を算出し、その座標差から任意時間における移動量とその移動方向を求め、地下水流動の 3 次元的な流速と流向を同時に算出する。なお、必要に応じて本体部を順次上下方向に移動させ、前記手順で測定を行うことになる。

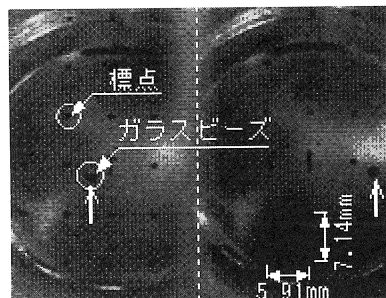
4. 室内実験による測定精度の検証⁹⁾

従来の流向流速計では、鉛直方向成分の地下水流動を測定できなかったため、ここでは液体中を沈降する球体粒子の沈降速度を測定し、理論値と比較することにより鉛直方向成分の測定精度の検証を行った。液体中の球体粒子の沈降速度測定は、室温一定 (20℃) の部屋で図-6 に示すように底面に標点群を配置した容器内にシリコンオイルを入れ、その上部にプリズムと CCD カメラを設置する。その後、球体粒子をシリコンオイル上部より静かに投入し沈降させる。この球体

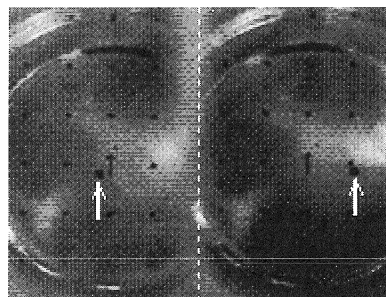


図一六 沈降速度測定のための室内実験概略図

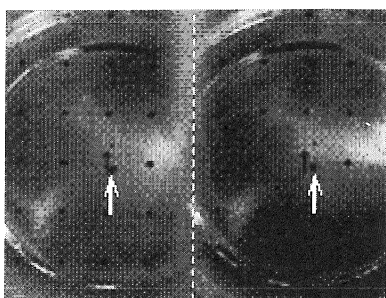
粒子（写真一2の↑印）の沈降状況は、時刻（経過時間）とともにプリズムを通した視差の異なる2方向からの画像として同時に撮影し、CCDカメラに接続したパソコンに順次取り込み保存する（写真一2）。取り込んだ画像を用いて前述した条件の基で画像処理解析を行い、球体粒子の沈降量と経過時間の関係から沈降速度（＝沈降量／経過時間）を算出する。解析により得られた沈降速度は、Stokes（ストークス）が理論的に導いた式（9）～（11）（土木学会水理公式集¹⁰⁾）より求まる沈降速度と比較検討し測定精度の検証を行った。



(a) 実験開始から16秒後



(b) 実験開始から34秒後



(c) 実験開始から100秒後

写真一2 取得画像例(1)

$$v_t = \left(\frac{4gd(\rho' - \rho)}{3\rho C_D} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

$$Re = \frac{v_t d \rho}{\mu} \dots\dots\dots(10)$$

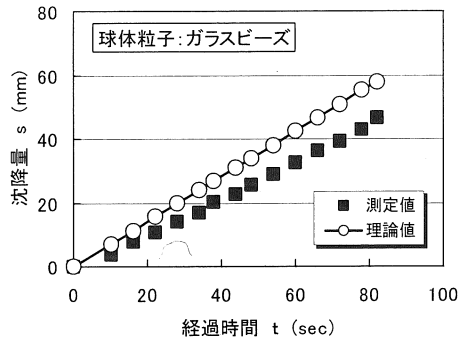
$$C_D = 24 / Re \quad (Re < 1) \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 v_t : 粒子の沈降速度、 ρ' : 粒子の密度、 ρ : 液体の密度、 g : 重力の加速度、 μ : 流体の粘性係数、 C_D : 粒子の抵抗係数、 d : 粒子の直径、 Re : Reynolds (レイノルズ) 数

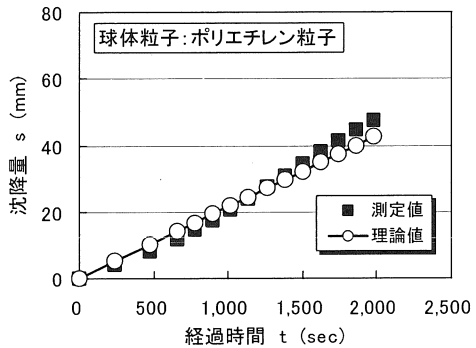
画像処理を行う際の解析時に用いた標点数は、左右の両画像に撮影されている 21 点 (球体粒子 1 点含む) を用いた。ここで、解析では基準点は 3 点、長さ情報は 2 個与えた。また、各標点間の相対座標値はすべて既知である。室内実験に用いた球体粒子は、直径と密度の異なるガラスビーズ (直径 $d = 1.02\text{mm}$ 、密度 $\rho' \doteq 2.4\text{t/m}^3$) とポリスチレン粒子 (直径 $d = 0.88\text{mm}$ 、密度 $\rho' \doteq 1.03\text{t/m}^3$) の 2 種類を用いた。また、実験に使用

した液体は、パソコンへ取り込む画像取得時間を考慮し、球体粒子の沈降速度の調整が図りやすいシリコンオイル (粘性係数 $\mu = 1.1\text{Pa}\cdot\text{s}(20^\circ\text{C})$ 、密度 $\rho = 0.974\text{t/m}^3(20^\circ\text{C})$) を用いた。本測定方法を用いて得られたシリコンオイル中を沈降する各球体粒子の経過時間と沈降量の関係を図-7に、沈降速度の比較を表-2に示す。沈降速度の速いガラスビーズは、画像取得時のタイムラグ等により Stokes の理論式から求まる沈降量、沈降速度に比較していくぶん小さい傾向にあるものの、両者とも良く一致していることがわかる。

以上より、CCDカメラとプリズムを組み合わせた測定システムの開発で、これまで困難であった鉛直方向成分の地下水流動の流向と流速を実用的な精度で測定可能であることを確認した。



(a) ガラスビーズ



(b) ポリスチレン粒子

図-7 経過時間と沈降量の関係

表-2 測定結果と理論値の比較

球体粒子	沈 降 速 度 (cm/sec)	
	①測定値 (平均)	②理 論 値
ガラスビーズ	5.9×10^{-2}	7.0×10^{-2}
ポリスチレン粒子	2.4×10^{-3}	2.2×10^{-3}

5. 原位置調査への適用

5.1 地質および地下水位概要

図-8に代表的な土質柱状図を示す。本地点の地質構成は、埋土の直下より第四紀完新世の沖積層（上位より、腐植土 Apt, 砂層 As1, レキ混じり粗砂 As2, 砂レキ Ag およびレキ混じり粗砂 As3）と GL-16.5m（TP-20.0m）以深の更新世の洪積層（砂層・中砂 Ds および砂レキ Dg）が分布している。また、地下水位は、GL-2.1m で腐植土層中に存在している自由水（水温 17℃）である。

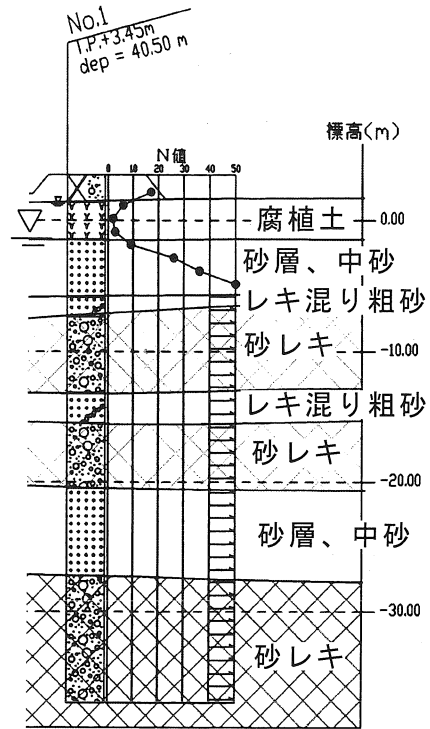


図-8 代表的な柱状図

5.2 測定概要

測定は、地下水流動の比較的大きいと予想される GL-11.0m 付近の砂レキ層を対象に、光学式流向流速計による流向・流速とポイント・ダイリューション法による流速測定を実施した（写真-3）。

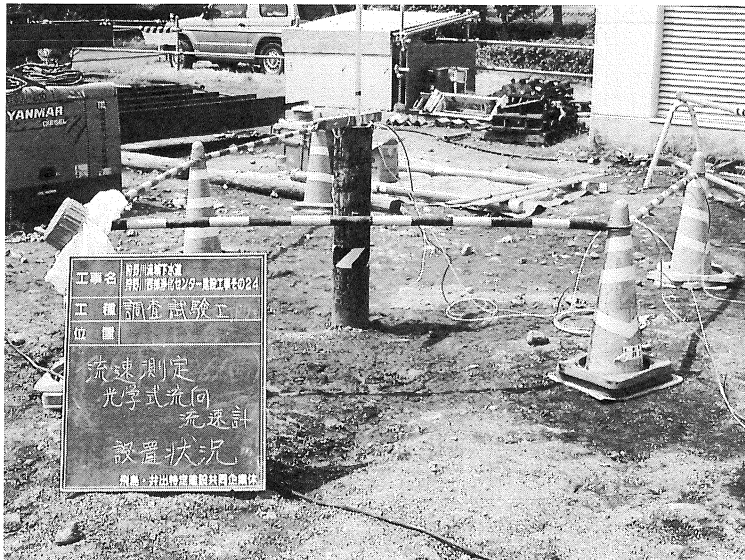


写真-3 現場での光学式流向流速計の設置状況

なお、地下水流向流速測定は、原位置の地盤内に3次元的な地下水流動を揚水により生じさせた。流向流速測定に用いたスクリーンは、測定対象の砂レキ層に開口率30%以上¹¹⁾の水平連続Vスロット型スクリーンを設置した。

写真-4は、光学式流向流速計を用いて(プリズムを通して)、視差の異なる左右2方向から撮影した画像例を示す。左右の画像で微妙に固体トレーサ位置が異なるように見えるのは、視差の違いによるものである。画像上に示す軌跡は、固体トレーサが11分26秒間で移動した距離を示す。ここで、画像処理をしなければ取得画像から鉛直方向成分の移動量などは測定不可能である。

写真-4には、時間経過とともに地下水を移動する固体トレーサ(○印内)と照明部上面に配置した解析時に必要となる標点群(□印内:各標点間の相対距離は既知)を示す。また、ボーリング孔を過ぎる地下水流は図-9の模式図に示すような複雑な挙動を示す¹²⁾。

したがって、画像解析時には出来る限りボーリング孔の中心付近を通過している固体トレーサを用いて処理を実施した。

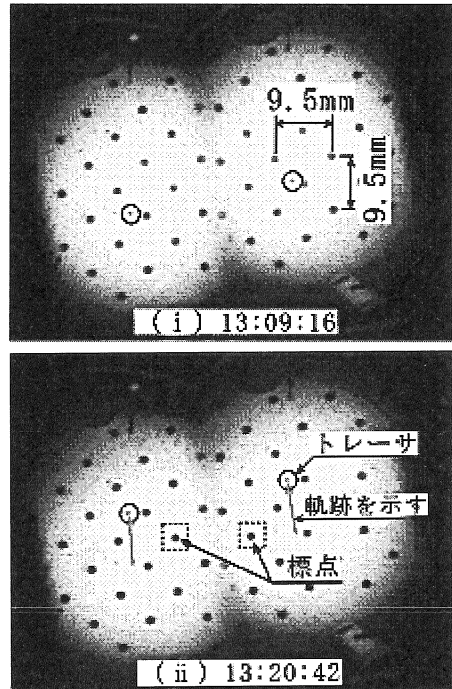


写真-4 取得画像例(2)

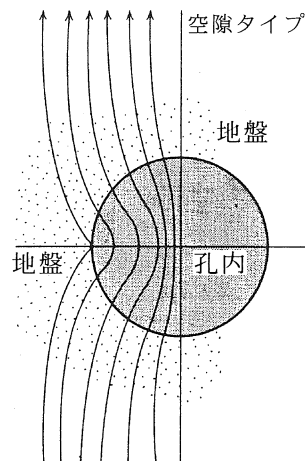


図-9 孔内の地下水の流線¹²⁾

表-3 原位置における流向流速測定結果

測定ケース	トレーサの移動量 (mm)			水平流とした 平均流速 (cm/s)	3次元流の 平均流速 (cm/s)	流向 (°)	備考
	X方向	Y方向	Z方向				
CASE 1	-1.03	9.83	3.29	1.44×10^{-4}	1.51×10^{-4}	264	
CASE 2	0.13	9.79	3.00	3.76×10^{-3}	3.94×10^{-3}	271	
CASE 3	-16.65	14.20	10.00	7.15×10^{-4}	7.86×10^{-4}	220	
CASE 4	-4.21	6.82	1.60	1.60×10^{-3}	1.64×10^{-3}	238	
CASE 5	-5.85	12.05	-1.63	4.19×10^{-3}	4.22×10^{-3}	244	
平均流速=				2.08×10^{-3}	2.15×10^{-3}	247	
地盤内の実流速=				6.94×10^{-4}	7.16×10^{-4}		

注1) Z方向は、-が沈降方向を示す。また、流向については、270°が西方向を示す。
 注2) 地盤内の実流速(=V)は、秋林らの研究より 1/3×平均流速とした。

5.3 原位置測定結果と考察

光学式流向流速計およびポイント・ダイリジョン法による現場測定結果について以下に示す。

表-3には、光学式流向流速計で取得した画像を用いて前述したSC法により解析を行い固体トレーサの3次元座標を求め、任意時間における固体トレーサの移動量とその方向から流速と流向を算出した結果を示す。

地下水流速の測定結果は、従来の水平流として評価した地下

水流速と3次元流速を示す。現場の作業工程などから流向流速測定ケースは少ないが、地下水流速の測定結果に多少ばらつきはあるものの鉛直方向成分の流れが生じており、3次元評価を行うことにより、今回の流速測定結果では水平流としての評価結果に比較して、10%程度

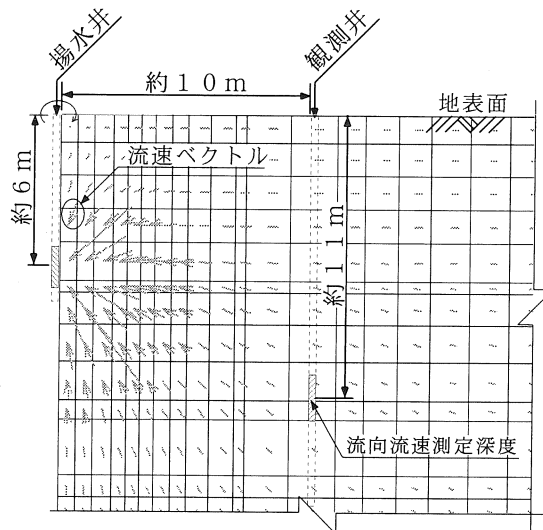


図-10 シミュレーション結果¹⁴⁾

表-4 鉛直方向成分の地下水流向の比較

	流向流速計による 鉛直方向成分の流向	浸透流解析による 鉛直方向成分の流向	備考 (角度)
CASE 1	18.4°	27.5°	
CASE 2	17.0°		
CASE 3	24.6°		
CASE 4	11.3°		
CASE 5	-6.9°		

大きく評価されることがわかる(CASE3). 今回の測定結果より, 従来の水平流として評価した場合, 地下水汚染の影響予測や評価において, 過小評価することになり危険側に評価する可能性があることを示唆している. なお, 秋林ら¹³⁾の研究を基に換算した地盤内の地下水流速の平均値 ($V=7\times 10^{-4}$ cm/sec) は, 塩水を用いたポイント・ダイリューション法による地下水流速測定結果 ($V_p=6.0\times 10^{-4}$ cm/sec) と良く一致しており, 光学式流向流速計によりボーリング孔内の3次元的な地下水流速を正確に測定可能と考えられる.

また, 地下水流向については, 水平面に関しては表-3に示すように全体的には西南西方向(平均流向= 247°)への地下水の動きをとらえており, 揚水井と観測井(流向流速の測定井)の平面的な位置関係にはほぼ一致していた. また, 鉛直方向成分の地下水流向は図-10に示す浸透流解析¹²⁾によるシミュレーション結果(流速ベクトル)を基に, 測定位置付近の流速ベクトルと現場計測結果を比較した(表-4参照). その結果, 固体トレーサの品質のバラツキと考えられるCASE5の測定結果を除いた他の地下水流向は, 解析結果に比較して小さいものの浸透流解析による上向き方向の流速ベクトルと同様な地下水の動きをとらえていることがわかる.

以上の原位置調査へ適用した結果, 開発した光学式流向流速計で, これまで困難であった単孔式による地下水流動の3次元的な流向・流速を実用的な精度で十分測定可能であることを確認した.

6. おわりに

地下水の動きを知ることは, 地球環境問題を考えることであると言っても過言ではない. 地下水の動きを把握する原位置調査技術は, 今後もその重要性を失うことはないものと考えられる. 本報文で述べた光学式流向流速測定システムは, 従来の流向流速計では測定できなかった鉛直方向成分の地下水流動を測定可能とした. 今後は本システムの完成度を高めた上で, 処分施設から漏出する汚染物質の地下水流動に伴う移行範囲の予測・評価などの土壌・地下水汚染問題や土構造物・基礎・護岸等の構造物の各種地下水調査など, 安全性・供用性の維持管理等のために早期活用を図って行きたいと考えている. また, 調査

にあたっては、同一帯水層であってもある部分に集中して地下水が流動していることもある。このため、地下水流動の流向・流速を測定する深度をどの様に決めるかが問題になるため、水みちを把握するためのフローメーター検層やボアホールカメラなどと組み合わせて効果的な調査を行うことが重要である。最後に、本報文が原位置調査における地下水流向流速測定を行う際の一助になれば幸いである。

謝辞：本報をまとめるに際して、現場実験にご支援ご協力頂いた飛島建設(株) 花室 稔氏，光学式流向流速計の開発にご協力頂きました(株)レアックス 金内昌直氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) http://www.tobishima.co.jp/technology/environment/chika/chika_index.
- 2) 張銘・遠藤秀典・高橋学：原位置浸透流測定法について(その2)，応用地質，Vol. 42, No. 1, pp. 52-59, 2001.
- 3) 菱谷智幸：予測技術，土木技術，Vol. 58, No. 10, pp. 69-76, 2003.
- 4) 平山光信：調査・予測・モニタリング技術総論，土木技術，Vol. 58, No. 10, pp. 59-68, 2003.
- 5) 地盤工学会：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策，報光社，pp. 39-41, 2002.
- 6) 小林薫・松元和伸・熊谷幸樹：CCDカメラを用いた単孔式による3次元流向流速測定の試み，地下水技術，第45巻第11号，pp. 3-10, 2003.
- 7) A.Okamoto：The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition，Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，Vol. 50, No. 6, pp. 705-711, 1984.
- 8) <http://www.tobi-tech.com/tech/chikasui-R.htm>
- 9) 小林薫・近久博志・松元和伸・熊谷幸樹：CCDカメラを利用した単孔法による3次元流向流速測定に関する基礎的研究，地下水学会誌，Vol. 45, No. 1, pp. 41-48, 2003.
- 10) 土木学会：水理公式集　— 昭和60年版 —，pp. 76-77，pp. 416-417, 1985.
- 11) 地盤工学会：地盤調査法　— 地下水流速流向測定 —，pp. 334-337, 1995.
- 12) 小松田清吉：流速・流向の測り方，地質と調査，pp. 21-27, 1990.
- 13) 秋林智・金森禎文・魏青：ボーリング孔を過ぎる地下水の流れに関する数値解析，地下水学会誌，Vol. 36, No. 4, pp. 439-450, 1994.
- 14) 赤井浩一・大西有三・西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析，土木学会論文集，第264号，pp. 87-96, 1977.

(原稿受理：2004. 2. 9)

講演

北海道における地下水資源の役割と課題

北海道立地質研究所

広田 知保

北海道における地下水資源の役割と課題

北海道立地質研究所 環境地質部

広田 知保

はじめに

地球を巡る水循環の一形態をなす地下水は、地表水に比較してその循環速度は非常に小さいが、淡水の最大の源となっている。水資源の一つとして、古来から湧水や井戸水の形で人間生活に利用されてきた。河川水などに比べると、地下水は、一般的に水質が良好、年間を通してほぼ定温、既得水利権との競合がないため必要な場所で短期間のうちに利用可能、そして大規模な取水・貯水・給水施設を要せず、利用規模に見合った安価な開発が可能であるなど、非常に大きな利点を持っている。

1. 地下水資源の存在意義と役割

北海道は、水資源賦存量（降水量から蒸発散量を差引いた量）を人口で除した値が、約 $8,800\text{m}^3/\text{年人}$ で全国平均よりも約3倍大きい。さらに、冬季の降雪と融雪の遅れが巨大な貯水ダムの役割を果しており、全体として水資源量の不足を懸念する必要は当面ない。しかし、地域毎にみると水が過不足なく使えるように人口や産業が配置されているわけではなく、また表流水に対する水利権の存在によって、需給の調整が困難な場合が少なくない。このように「存在するが使えない水」の問題を解決してきたのが地下水である。地質条件などによる制約はあるが、土地に附随する地下水は「使える水」として北海道においても極めて貴重な資源である。

以下では、利用量が多い水道用水、営農用水、工業用水、および水産用水などにおいて地下水が果している役割をみる。

1.1. 水道用水としての地下水

水道水は、河川水・湖沼水・地下水などの水源から取水されて、上水道・簡易水道・専用水道・飲料水供給施設などによって供給されている。北海道の水道普及率は約97%と高いが、まだ約3%、163,500人余りの道民が水道水の供給を受けていない。上水道と簡易水道の取水量は、水源別に統計がとられている（北海道環境生活部、2003）。専用水道と飲料水供給施設による取水量の統計数値はないが、1人1日平均給水量 0.36m^3 、および水源別の施設数などから推定できる。

これらの取水量を、全取水量と地下水取水量に区分して第1表にまとめた。道内の飲料水の94.4%、日量で約 197万m^3 は、上水道と簡易水道によって供給されている。これに専用水道・飲料水供給施設と未普及人口の部分の部分を推定して加えた全取水量は、日量約

209 万 m³、年間で約 7.6 億 m³である。このうち、地下水(伏流水・湧水・浅井戸・深井戸)は日量約 34.4 万 m³であり、全取水量に対して占める割合は 16.4%と見積もられる。

第 1 表 水道水の水量統計

水道の区分		上水道	簡易水道	専用水道	飲供施設	未普及(2.9%)	合計
給水人口	人	5,036,000	405,000	50,500	12,000	163,500	5,667,000
全取水量	m ³ /d	1,780,700	193,200	53,800	* 4,300	* 58,900	2,090,900
地下水取水量	m ³ /d	189,600	74,500	29,100	** 3,500	** 47,100	343,800
地下水/全	%	10.6	38.6	54.1	81.4	80.0	16.4

・地下水の水源は伏流水・湧水・浅井戸・深井戸。

* 1人1日平均給水量は 0.36m³とする。

** 地下水は全取水量の 80%とする。

この地下水依存率は、全国平均の約 26%、および古くから地下水利用が進んでいる関東内陸・北陸地方の 50%前後に比較するとかなり低い。しかし、地下水以外に水源がない自治体にとって、水利権を得るためのダム建設には多額の経費が必要で、かつ利用できるまでに長期間を要する河川水開発は事実上不可能であり、地下水に頼るしかない。

水道施設と水源の内容を第 2 表にまとめた。まず、水道施設については、上水道 108、簡易水道 347、専用水道 109、飲料水供給施設は 222 で、合計では 786 施設ある。上水道・簡易水道と専用水道を合わせた 564 施設のうち、少なくとも一つの水源を地下水と

第 2 表 水道施設と水源

施設数		上水道	簡易水道	専用水道	小計	飲供施設	合計	未普及
水道施設区分								
市	(34)	34	33	56	123	24	147	
町	(154)	74	275	53	402	186	588	
村	(24)	0	39	0	39	12	51	
合計 (212)		108	347	109	564	222	786	163,500 人
内 訳	表流水・受水のみ	69	175	50	291	
	1～全水源が地下水	39	172	59	273	
	うち全水源が地下水	20	152	59	229	* 178	* 407	?
	うち浅・深井戸のみ	5	85	40	129	* 111	* 240	?
水源数								
合計		157	387	109	653	222	875	163,500 人
内 訳	地表水	84	182	33	299			
	受水	24	15	17	56			
	伏流水	14	14	2	30			
	湧水	12	60	17	89			
	浅井戸	11	43	7	61			?
	深井戸	12	73	33	118			?
地下水		49	190	59	298	* 178	* 476	?
浅井戸・深井戸		23	116	40	179	* 111	* 290	?
地下水/水源 (%)		31.2	49.1	54.1	45.6	* 80.2	* 54.4	
井戸/水源 (%)		14.6	30.0	36.7	27.4	* 50.0	* 33.1	

*飲料水供給施設については、全施設の 80%が地下水(伏流水・湧水・浅井戸・深井戸)を、50%が浅井戸・深井戸を水源にしていると仮定した。

する施設は273存在する。そのうち地下水だけを水源とする施設は229である。さらに、浅井戸または深井戸だけを水源とする施設は129存在する。

次に水源の数をみる。ここで、飲料水供給施設（1施設あたり平均給水人口約54人）は、小規模な施設なので1施設1水源と仮定し、また全施設の80%が地下水を取水し、50%が浅井戸と深井戸であると仮定する。この仮定の下では、上水道・簡易水道・専用水道・飲料水供給施設が持っている全水源875のうち、地下水の水源は476、このうち浅井戸・深井戸から成る水源は290存在すると推定される。井戸が全水源に対して占める割合は、約33%と見積もられる。そして、各水源は大部分が2井以上の複数井を持っていると推察される。この他に、水道が未普及の163,500人に対応する多数の水源が加わるが、それらの大部分は地下水を採取する浅井戸と深井戸であると考えられる。

1.2. 営農用水としての地下水

食糧自給率が低下する中、北海道は国内の食糧生産基地として大きな地位を占める。生産基盤である農地のうち、台地や火山山麓に分布する畑作・畜産地帯の多くは、地形・地質上の問題と水利権という大きな制約もあって地表水の利用が困難であり、畑地灌漑・防除・畜産などに必要な営農用水を十分に確保できない状態におかれている。その上、水道の給水区域から遠いため、飲料水にも事欠く地域が少なくない。このような地域で利用できる水源としては深層地下水しかないが、その調査には多額の経費と高度の技術を要し、リスクが高い。このため、1972年度から農水省の補助事業として、道農政部によって「畑作振興深層地下水調査事業」が地質研究所の協力のもとに開始された。

この事業では、調査方針の決定、水理地質調査、採水層の決定、および全体の取りまとめは当所の担当であるが、電気探査・試掘・電気検層・揚水試験・水質分析を民間業者に委託し、全体を単年度で完結させる。年間4~5地区が採択され、今年度までの32年間に計139地区を調査して同数の調査井を掘削した。これまで採水対象となった地質は、更新統が50%と最多で、鮮新統と中新統が各20%、残りが先中新統と完新統となっている。調査井の深度は、初期には200m程度の深い井戸もあったが、近年は予算の関係で30~40m程度の比較的浅い井戸も掘削されるようになっている。

この調査で対象となった139地区は、根室支庁を除く全道の畑作地帯に分散しているため（第3表）、道内の広範囲の容水地盤に関する地質調査、および試掘井に関する詳細な解析を実施することができた。このため、本調査事業は道内の容水地盤の性質・能力と水質を解明する上で、非常に大きな役割を果たした。また、掘削された試掘井のうち半数程度は、営農用水や飲料水の水源として現在も各地区で利用されている。

第3表 畑作振興深層地下水調査の支庁別実施件数

石狩	渡島	檜山	後志	空知	上川	留萌	宗谷	網走	胆振	日高	十勝	釧路	根室	合計
6	14	8	12	3	23	8	3	25	9	2	19	7	0	139

さらに、これらの調査の結果は、農業関係においては畑地帯総合改良事業や用水整備事業の実施段階で活用され、営農用水の水源として多数の井戸の掘削に結びついている。

ただ、営農用水のうち飲雑用水としての利用量は、簡易水道の取水量として把握されているが、その他の用途を含めた利用総量は不明である。

1.3. 工業用水としての地下水

地下水は、工業用水の水源としても極めて大きな位置を占める。大規模な2~3の工業基地を除けば、道内の各自治体が設置した約150の工業団地の殆どが、地下水を利用できることを前提として造成されている。個々の団地は大量の用水を必要としないから、多額の経費を要するダム建設に頼らず、最初から開発費用が安価な地下水を充てにして計画される。しかし、地下水の利用可能水量や水質などは全く考慮しないまま、行政の都合で団地の位置が先に決定される。このため計画が具体的になった段階で、地下水に関する資料が殆どないことを認識し、企業誘致活動の障害になるケースが多かった。

特に、1980年代の前半には道央南部（石狩低地帯の南半部地域）の殆どの自治体が、企業誘致活動を活発化しようとした段階で、地下水に関する情報の重要性を認め、調査井の掘削を含む地下水調査を実施した。これらの調査により工業用水としての揚水可能量と水質が明らかになり、企業誘致活動に大きな力となった。

現在、道内の工業団地における地下水の取水量は、石狩湾新港地域や釧白工業団地など一部の地区を除き、統計がとられていないので明らかでないが、相当大きな水量になっていると推定される。小規模団地では、たとえ少ない水量であっても、水なくして生産活動は不可能であり、地域経済を支える上で地下水の果している役割は非常に大きい。

1.4. 水産用水としての地下水

地下水は、鮭鱒の孵化事業や淡水魚の生産に大量に利用されており、水産業の振興に貢献している。

道内には、国・道および漁業組合などが設置した多数の鮭鱒孵化場が河川近傍に存在する。孵化場では溶存酸素を多く含む良質な、しかも定温（5~10℃）の水が必要である。そして、使用水量は、孵化卵の数にもよるが、毎分5~10m³（日量7,000~15,000m³）以上と多量である。この水量は、一つの都市の飲料水に相当する程の量である。大規模な湧水がこの条件を満たすが、殆ど開発済みであるし、水利権の制約がある。

従って、孵化用水を確保するために、粗粒の堆積物が厚く発達する河川下流部における浅層地下水の開発が計画される。この堆積物中に直径数m、深さ10m以内の浅井戸を造ることにより、水位降下量を大きくすることなく大量の用水を取水することが可能となる。循環性の良い浅層地下水が対象なので、多くの場合水質も必要な条件を満たす。

1.5. その他の用途に利用される地下水

これまで述べた用途の他に、地下水は建築物用として冷房用水・冷却用水・ボイラー用水、融雪・消雪用水、消防用水、あるいは修景（環境）用水など様々な用途に利用されている。また、最近では地震後の生活用水を確保するための非常災害用水や、ヒートポンプ等の熱源としての役割も、地下水に期待されるようになってきている。ただし、これらの用途の利用実態や利用量を、詳細に把握することは現時点では難しい。

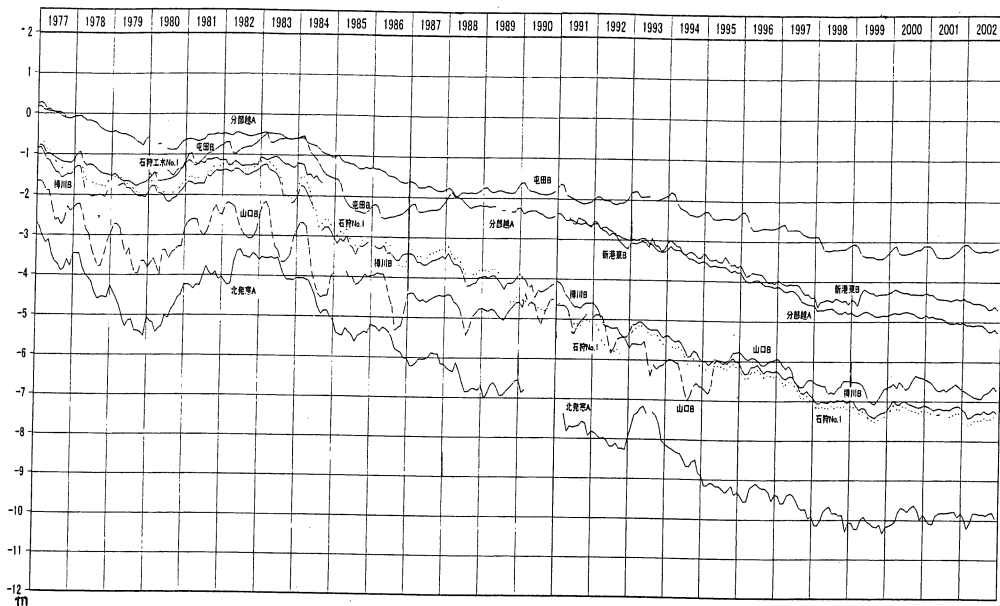
2. 地下水資源の課題

地下水は、井戸という比較的簡単な施設によって必要な場所で利用が可能となるため、多様な用途に使用され、道民の生活や産業を支えている。しかし、涵養量を超えて過剰に揚水された場合には様々の地下水障害を引き起こすこととなるし、また近年になって水質汚染の状況が明らかとなり、地下水にとって脅威となる事態がみられるようになってきた。本節では、これら地下水に関わる最近の幾つかの課題を取り上げ検討する。

2.1. 地下水盆の管理

札幌市の北側に位置する石狩湾新港地域の開発は、1970(S45)年に「第三期北海道総合開発計画」の一環として計画された。この地域で使用する工業用水は、計画段階では苫東大規模工業基地と同様にダムによる供給が計画されていた。しかし、当然のことながら開発当初は水の需要量が少ない上に、膨大な投資が必要なダム建設では時間的にも間に合わないため、暫定的に地下水を水源とする工業用水道で乗り切ることとなった。

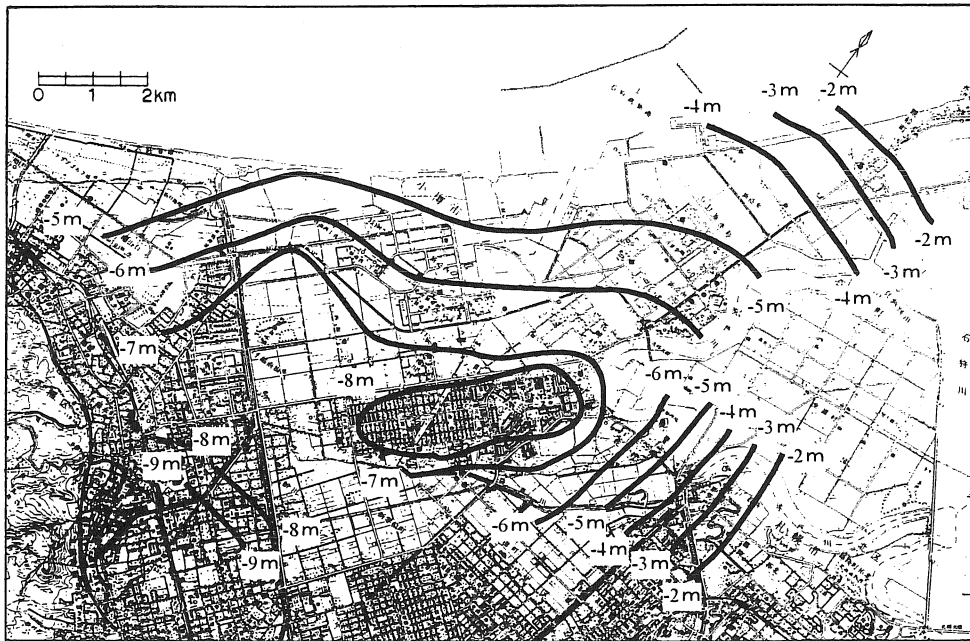
この暫定工業用水道の計画にあたっては、当所が地下水の専門研究機関として大きな役割を果たした。当時は、様々な局面での「公害」が大きな社会的課題となっていた時期であり、本州地方では戦前から経験済みの「地盤沈下」を起さずに地下水利用は可能かという課題に応えなければならなかった。これに対しては、本地域で60年代後半から実施していた調査研究の成果を反映したモデルによる地下水シミュレーションによって、地下環境に大きな負荷を与えずに開発可能な水量を明らかにした。揚水計画としては、深部帯水層群を取水対象として1井あたりの取水量を日量1,000m³未満、総取水量を日量5,000m³未満、揚水井間隔を1km程度とした。そして、地下環境保全のために、



第1図 深部帯水層群の水位経年変化（道立地質研，2003）

取水を個別企業に任せない一元的な揚水管理，地下環境の変化を把握するためのモニタリング，および異常が発生した場合の揚水規制を提案した。

この方針に基づいて，地下水位・地盤沈下の観測所を設置するとともに，一斉測水・水質分析・水準測量を実施する地下環境モニタリングシステムを構築した。このような条件下，84年(S59)12月から自家用工業用水利用組合による暫定工業用水道事業が発足した。給水開始から数年を経過した頃，需要増に対応して揚水量を増加する必要に迫られた。この時，環境アセスメントの項目のうち，当地域が海岸に面していることから地下水の塩水化が大きな問題になった。当所では地下構造等を検討した結果，暫定期間内の計画揚水量であれば塩水化は起らないと考えたが，海岸の直近に水質も常時観測できる新港東観測所を設置した。



第2図 深部帯水層群の水位等深線図，2001年11月

第1図と第2図に，71(S46)年から新港地域とその周辺，および札幌市西部地域で実施している地下水モニタリング結果の一部を示した。揚水に伴い深部帯水層群の水位は30年間で最大12m前後低下した(第1図)が，顕著な地盤沈下は起っていない。しかし，石狩市花川団地と札幌市西部地域を中心として，明瞭な水位低下域が出現した(第2図)。現在の水位は最も低い部分では海水準-9m以下となっている。これらの水位低下の要因は，石狩市の水道用水と発寒工業団地の工業用水の揚水と考えられる。新港地域でも工業用水の揚水が継続され，海岸付近の水位は-5m程度まで低下しているが，現在に至るも現海水の浸入による塩水化の徴候は全く見られない。

当地域のように，当初から地下環境のモニタリングを行ないながら，地下水を有効に

利用できている例は稀であろう。本州等における地下水や地盤沈下に関する研究成果に学び、地下水が地域の発展に大きく貢献している重要な具体例といえよう。

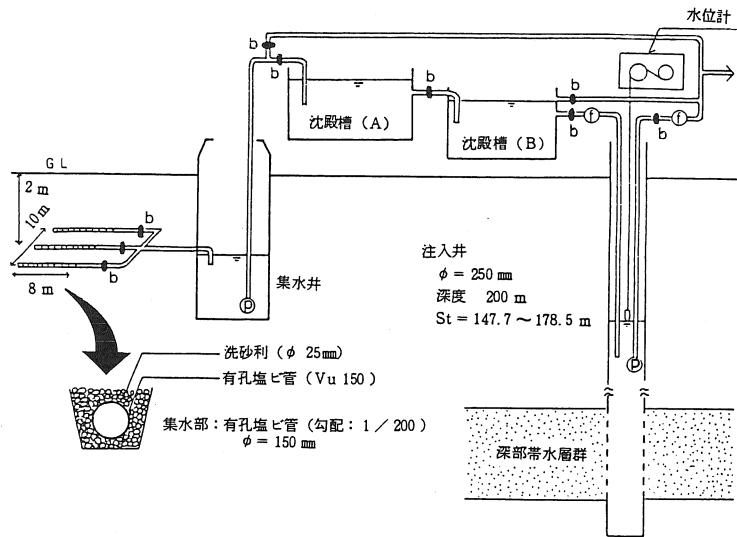
2.2. 人工涵養による地下水資源の増強

道内では水位低下による地下水障害が一部の地域で見られるが、それはまだ問題とされる程大きくはない。しかし、近年の都市化による地下水涵養条件の悪化は明らかであり、都市域の今後の発展に対応した水需要の増大を考えると、雨水や融雪水を水源とする地下水の人工涵養に関する研究は重要な課題である。

北海道の降水の20～50%、平均30%強は雪として降り、春まで積雪として地表に留まる。都市域の雪は河川敷や海岸等に運搬・投棄され、融雪期には短期間のうちに解けて流出してしまう。このような雪を適当な地域に集積して徐々に地下浸透させたり、融雪水そのものを地下水涵養の水源とすることが考えられる。

まず、融雪水の利用方法の研究として、石狩湾新港地域で実施した事例を挙げる（深見，1987）。気象資料によれば、同地域の降雪の70%（200～300mm）は融雪期に浅部帯水層を涵養し、その後流出する。この量は1km²あたり20～30万m³に相当する。同地域の浅層地下水の水位は、融雪期の直前には地表下1～2mにある。融雪により水位は上昇し、降雪量が多い場合には融雪終了後に水位が地表に達することもある。

長さ8mの集水管3本を地表下2mに設置することにより（第3図）、1mの水位降下で日量300m³程度の水質良好な融雪水を集水できた。この融雪水を深部帯水層群にスクリーンを持つ試験井に注入したところ、1mの水位上昇により日量200～300m³の融雪水を涵養することができた。注入後の水質分析によれば、注入水の試験井の周辺に長期間留まっておき、深部帯水層群が地下ダムの役割を果たしていることが分かった。今後は、浅層地下水の水質管理、深部帯水層群の長期的な水質変化、および井戸の目詰まりによる注入効率の低下などに関して検討する必要がある。



第3図 融雪水涵養試験施設（深見，1987）

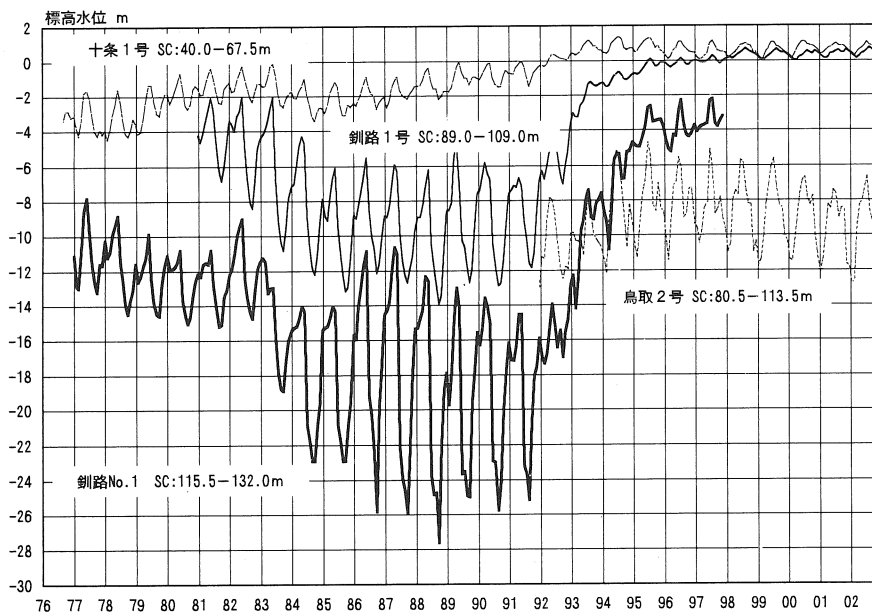
次に、雨水の地下浸透に関する調査事例について述べる（深見，1995）。これは全国鑿井協会北海道支部からの協力要請で当所が担当した事業である。1992～94(H4～6)年

にかけて、札幌市内の小学校において、校舎屋上とアスファルト舗装部分の雨水を浅部帯水層に浸透させる試験を行なった。その結果、透水性の高い材質で造った浸透升やマンホールを通して、雨水の大部分が浸透することを確認した。降水量や面積を考慮して施設のサイズや構造を適切に設計することにより、雨水を帯水層に涵養することができ、水資源量の増大および下水道負荷量の軽減に寄与できると考えられる。

2.3. 地下水の塩水化

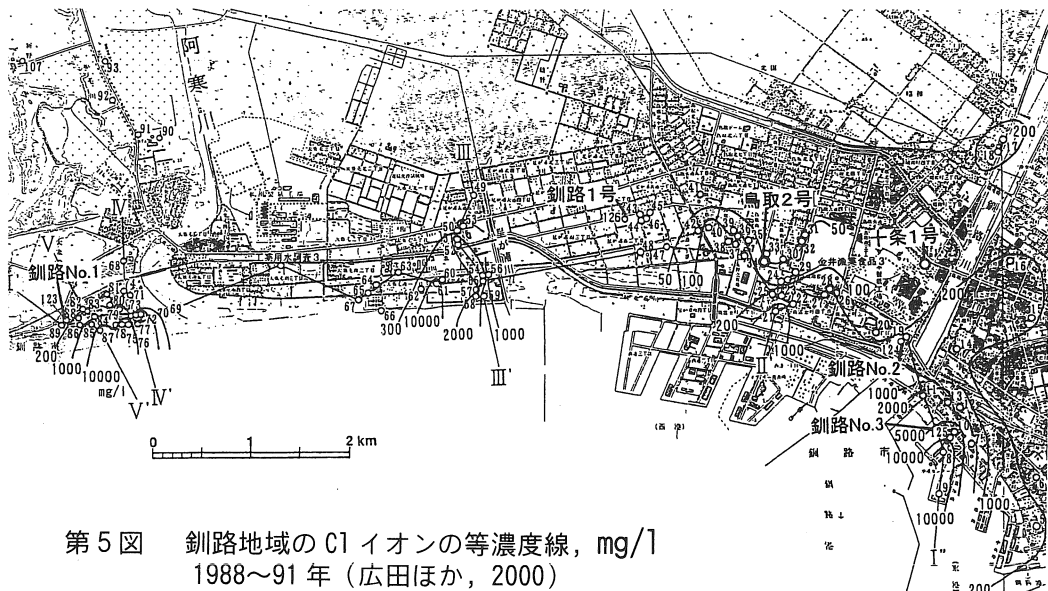
釧路地域では、水産業が基幹産業の一つとなっており、海岸地帯には水産加工場が集中している。水産物の加工過程では多量の水を必要とするが、工業用水道が敷設されていないので主に地下水が利用されている。本地域中心部の地下には、硬く固結した古第三系の上に、砂礫層などから成る前期更新世の釧路層群が西に向かって厚く堆積しており（阿寒川の西側では500m以上）、この地層が主要な容水地盤となっている。

本地域の地下水位は1977(S52)年から観測されているが、80年代前半まではその季節変化や経年低下の割合はあまり大きくなかった（第4図）。しかし、83(S58)年頃からイワシの漁獲量が急増し、これをフィッシュミールに加工するために、夏期に地下水が大量に揚水されるようになった。このため水位の季節変動量が増大するとともに、経年的



第4図 釧路地域の地下水位経年変化（広田ほか，2000）

な低下も顕著になった。海岸地帯では水位が海面よりも相当低くなり、海水の内陸への浸入が起った。イワシの年取扱高が過去最多の84.6万トンを達成した87(S62)年には、海水の浸入も非常に激しくなった。最も強く塩水化した井戸では、塩素イオン濃度が12,000 mg/lを超え（第5図）、このような状況が91(H3)年まで続いた。

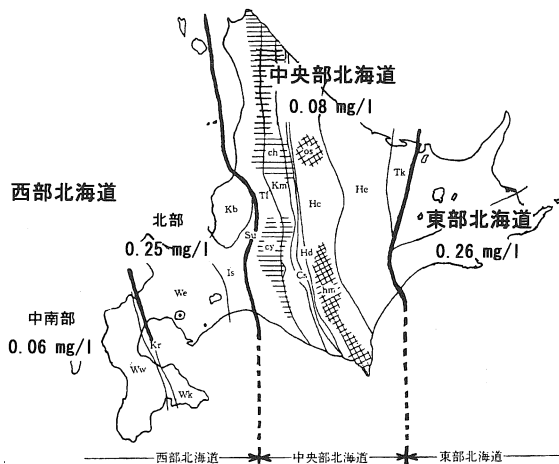


第5図 釧路地域のClイオンの等濃度線, mg/l
1988~91年 (広田ほか, 2000)

ところが、イワシの漁獲量が92(H4)年から急減し、93(H5)年からはほぼゼロになった。これに伴って地下水の揚水量は急減し、その年の秋から水位は急上昇した。水位は95(H7)年頃まで上昇を続けたが、これは揚水量が84(S59)年の20%程度まで減少した結果を反映している。最近の地下水位は77(S52)年の連続観測開始時よりも既に高くなっており、60年代とほぼ同じレベルまで回復していると推定される。これに伴い、塩素イオン濃度の低下がみられるようになった(釧路市役所の調査による)。塩水化した地下水を淡水に戻すためには、揚水量を減らして水位を上昇させ、水位の勾配を陸から海に傾く自然状態に戻す必要がある。これを実現するためには、代替水源と長期の時間が必要である。93(H5)年以降、イワシの漁獲量がほぼゼロになったことによって水位は回復したが、水質のさらなる回復にはまだ長い時間を要すると考えられる。

2.4. 砒素を含む地下水

地下水質の常時監視によれば、1992(H4)年以降これまでに、道東部の標津・足寄・浦幌、中央部の旭川・名寄・深川・妹背牛、および西部の札幌・石狩・赤井川・洞爺・八雲で、砒素が0.011~0.81 mg/lと環境基準を越える



第6図 全道の温泉水の砒素濃度 (参考)

地下水がみつめられた。札幌市内でも豊平川や茨戸川は、定山溪温泉や流域に分布する鉱床の影響を受けており、河川底質・地下水で砒素の問題が時々起る。

北海道の東部と西部は、新第三紀から第四紀にかけて火山活動が活発だった地域であり、各種の鉱床が形成されている。これらの鉱床に由来する砒素や、第四紀以降の地熱活動(火山ガス・温泉)からもたらされた砒素が地層中に蓄積され、地下水に溶出したことが考えられる。また、新第三紀～第四紀の有機質堆積物(亜炭・泥炭等)に鉄とともに沈着した砒素が起源となっている可能性もある。第6図には、参考のために、道内各地域の地質的背景・構成を反映している温泉水の砒素濃度の平均値を示した。

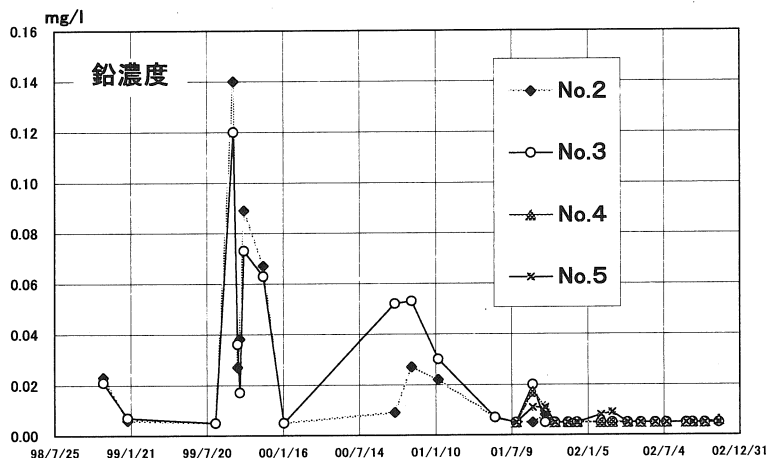
上述した地域の砒素は、地質状況や関連物質の使用履歴の観点などから、人為的汚染によるものではなく、自然的要因によると考えられる。しかし、93(H5)年から水道水の水質基準のうち砒素が0.05→0.01 mg/lと厳しくなり、原水の砒素濃度が問題になってきた。砒素は、除去設備の費用の問題もあり、水道事業者の大きな課題となっている。

2.5. 地下水の人為的汚染

環境庁が1982～84(S57～59)年に実施した地下水汚染実態調査により、北海道を含む全国で揮発性有機化合物(VOCs)や硝酸性窒素(NO₃-N)等による地下水の汚染が判明した。その結果、89(H1)年に水質汚濁防止法が改正され、地下水質測定計画に基づく水質監視が始まった。これを契機に道内でも有害物質による地下水汚染の拡がりが見られるようになった。最近6年間(97～02)の概況調査によれば、全道1,048井のうち有害物質検出井は696井(66.4%)と多かった。このうち環境基準を超過したのは53井(5.1%)で、主な成分はテトラクロロエチレン(PCE)、トリクロロエチレン(TCE)、NO₃-N等、および砒素(As)であった。北海道は、本州地方などに比較して環境条件はまだ良好と考えられているが、実は多岐にわたる地質汚染が発生している。

2.5.1. 廃棄物処分場の地下水汚染

道東地域で、1991～93(H3～5)年に造成された産業廃棄物安定型最終処分場で、地下水の鉛濃度が環境基準0.01 mg/lを超える事例がある。処分場に作成された深度12～22 mの4本の観測井における過去5年間の鉛濃度は、最高が99(H11)年9月の0.14 mg/l(第7図)で、降水量の多い秋期に高い傾向がみられる。周辺の農家などの浅井戸・



第7図 安定型最終処分場における地下水の鉛濃度の変化

深井戸・湧水の鉛濃度は、全て 0.005 mg/l 以下である。また、ボーリング地質試料の鉛含有量は 1.0~4.5 mg/kg で、土壌の一般的鉛含有量(2~200 mg/kg)に比較して小さい。即ち、この地域の自然条件として土壌・地下水中の鉛バックグラウンド値は小さい。

一方、建設廃材などは、97(H9)年まで中間処理不要で安定型処分場に持込むことができ、家電製品などを含んでも重量測定だけで受け入れる状況にあった。関戸ほか(2001)によれば、家庭系粗大ゴミは約 2,000 mg/kg の鉛を含んでおり、その 90%が TV ブラウン管の鉛ガラスに由来する。これらの状況から、本処分場が受け入れた廃棄物中に鉛が含まれていた可能性は高いと考えられる。

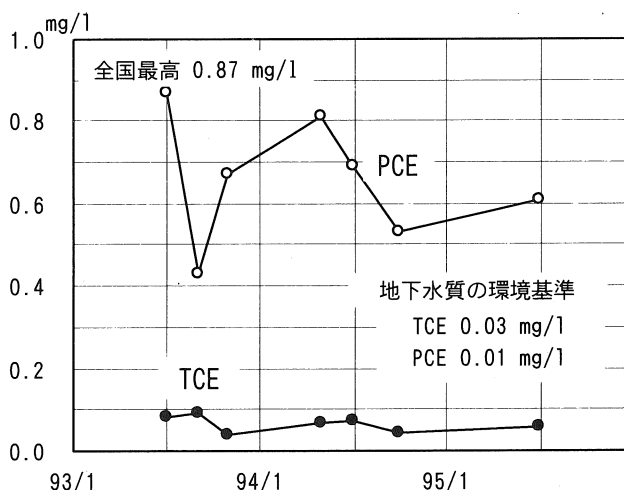
以上のことから、本処分場観測井で検出された鉛は廃棄物から溶出した可能性が高いが、最近では徐々に濃度が低下してほぼ環境基準以下になっている。今後の対応としては、融雪期・湧水期・多雨期に実施する 3 回の水質分析の結果に基づいて、閉鎖届の受理について判断することになっている。

2.5.2. 揮発性有機化合物による土壌・地下水汚染と浄化

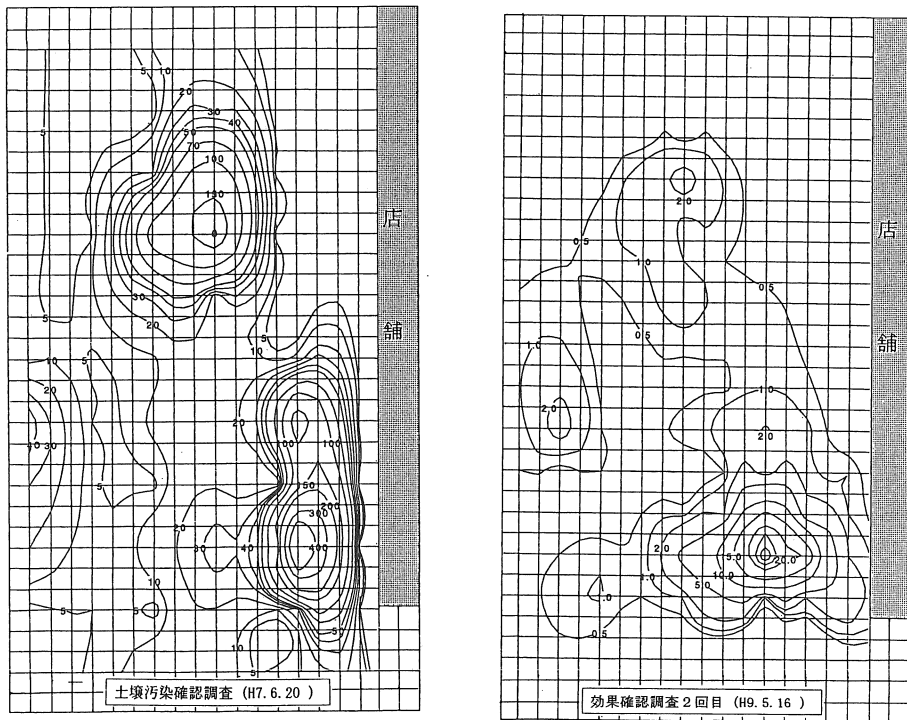
地下水質の常時監視の結果、VOCs が基準を超過する地域の拡がりが見られるようになってきた。また、1994(H6)年 2 月に土壌の環境基準に VOCs が追加されたことに伴い、道は土壌汚染確認調査を実施してきた。その結果、かなりの地域で基準を越える汚染が判明した。汚染土壌の処理にあたり小規模事業者が負担する対策費用を軽減するため、道が簡易な処理方法を確立して事業者を支援することとなった。そのための実証試験を、当麻町のクリーニング店で 96~97(H8~9)年に地質研究所などが行なった。

試験区域は 6m×6m で、地下水の PCE 濃度は最高 0.87 mg/l (第 8 図)、土壌ガスの最高濃度は 700 ppm であった (第 9 図)。汚染の中心点付近に深度 5m のガス吸引井(地質は主に粘土混り砂礫)を作成し、ブロワーでガスを吸引して活性炭に PCE を吸着させるシステムを設置した。運転開始時には、活性炭に入る前の濃度は 6 ppm、通過後は ND であった。この吸引を 50 日間継続した結果、活性炭通過前の濃度が 0.2 ppm と低くなったので、試験を中断した。

効果確認のため、6 カ月後の翌 97(H9)年 5 月に土壌ガス調査を実施した(第 9 図)が、全 25 点のうち 14 点(56%)で再び濃度が高くなっていることが判明した(最高は 4.3→35.0 ppm)。このことは、浄化が不完全



第 8 図 PCE と TCE の濃度変化



第 9 図 PCE ガス濃度の浄化前後の比較

で PCE が或る濃度以上に残留している場合には、再び高濃度になることを示す。

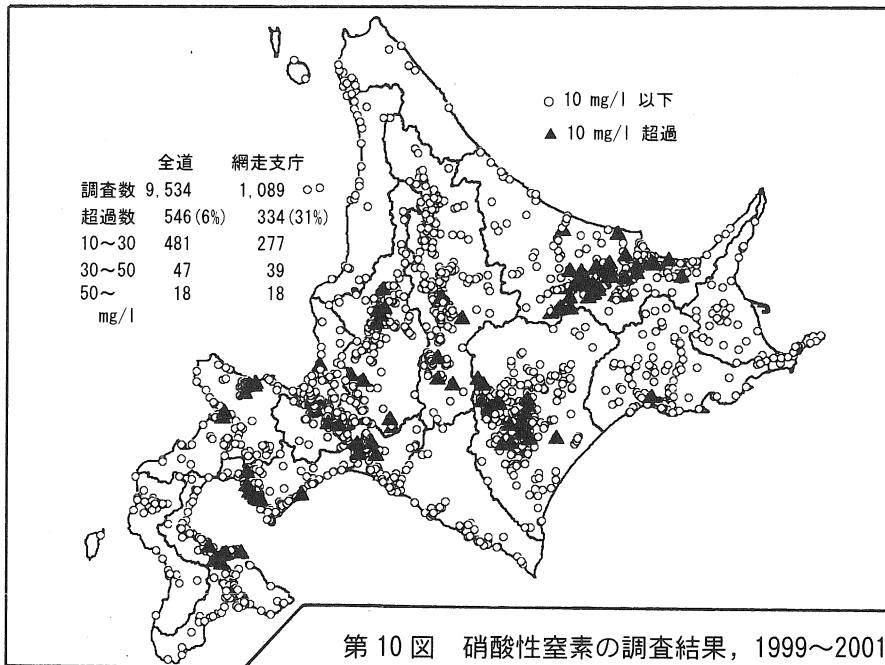
この方式の他に、やや深部の汚染地下水を揚水して浄化した後、これを浅部帯水層に戻す単孔式地下水浄化法がある。協同組合地盤環境技術研究センターが開発した方法で、札幌市内でクリーニング店の地下水浄化に適用された。揚水浄化により PCE の濃度低下は確認されたが、透水性の低い地質条件のため揚水量を多くできなかったこともあり、約 2 年間の揚水にも拘わらず十分な浄化ができていない。

以上の試験結果から、現場の水理地質条件を詳細に検討した上で、土壌と地下水の両者の浄化を同時に行なう手法を開発すれば、汚染土壌を除去しなくても、短期間で土壌と地下水を浄化することは可能であると考えられる。

2.5.3. 農用地における地下水の窒素汚染

1999(H11)年には、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素が地下水の環境基準に追加された。99～01(H11～13)年に 128 市町村で 9,534 井を調査した結果、網走・十勝・空知・胆振・渡島管内を中心に 16 市町村で基準値 10 mg/l を超過する 546 (6%) の井戸が確認された。特に、網走・十勝管内の 7 町の畑作地帯で高濃度に汚染された地下水が多く (第 10 図)、最高濃度は端野町の 93 mg/l であった。

汚染要因を解明するために、00～01(H12～13)年に上湧別町で実施した浅層地下水調査によれば、硝酸性窒素の最高値は 26 mg/l であった。窒素供給源としては生活排水、家畜排泄物、および畑地施肥が考えられる。調査地区の一部は市街地であるが、生活排水は全て浄化槽で処理されている。畜産農家は殆どなく大部分は畑地である。このような土地利用状況から、畑地に施用される肥料成分による影響が最大と考えられる。



第 10 図 硝酸性窒素の調査結果，1999～2001 年度

地下水質の回復のためには、窒素成分を供給しないことが最も効果的である。しかし、食糧生産を行なう農業活動は重要であり、地下水環境の保全と両立できる窒素抑制のための具体策が必要となっている。国においては、01(H13)年度に環境省が「硝酸性窒素等に係る水質対策マニュアル」を、環境省・農水省が「硝酸性窒素等に係る土壌管理指針」を作成している。また、道においては、02(H14)年度から農政部が「農用地環境保全緊急対策事業」を実施し、試験場・農業団体の協力によって窒素負荷量低減技術の確立に努めている。さらに、今年度中に「硝酸・亜硝酸性窒素に係る健全な水循環の確保のための基本方針」を策定することになっている。その内容としては、過剰施肥に対する施肥管理の手引き、家畜排泄物法に基づく施設の適正な管理と利用、および生活排水の処理率の向上などが盛り込まれることになっている。

2.6. 井戸の仕上と廃止に関する課題

まず、以前から指摘されている地下水井に関する重要な課題は、多層採水井および仕上げ不備の井戸に起因する水質混合の問題である。帯水層による水質の違いを考慮すれば、水量確保を優先して水質の異なる帯水層の水を混合する結果となる多層採水井を作成することは、極力避けなければならない。また、前述したように地下水の水質汚染の問題を考慮すれば、或る帯水層が人為的に汚染された場合、水質良好な別の帯水層に汚染が拡大する可能性がある。さらに、バッカーによる遮水が不完全な井戸によって、水質の異なる帯水層が繋がってしまう危険性もある。このような井戸の存在を通して、近隣の井戸のみならず、別の帯水層にまで影響が拡大して行くことが懸念される。

もう一つの課題は、井戸の廃止に関するものである。役割の終了した井戸はそのまま

放置せず、廃止・閉塞する必要がある。特に、上述した多層採水井やパッカー不良井を放置した場合には、水質の混合が起り得る。また、単層採水井であっても仕上げが不完全なまま放置された場合、水位・水質などの地下環境が変化した時には、別の帯水層に影響を与える可能性がある。これらの井戸は適切な方法により廃井にするべきである。

おわりに

地下水資源は、水の需給関係に余裕のある北海道においても極めて貴重な資源である。特に、表流水の水利権を持たない自治体にとって地下水は唯一の水道水源であるし、工業用水・営農用水も地下水に依存せざるを得ない地域が多数存在する。このように重要な地下水資源が、廃棄物や化学物質の直接浸入、および土壌汚染などを通じて、人為的な汚染の危機に晒される状況になっている。

飲料水の大部分を地下水に依存する欧米で水質汚染が問題になってから、既にかかなり長い時間が経過している。日本国内でも 1970 年代から大きな問題になり、本州地方では深刻な状況に陥っている地域もある。道内でも汚染の報告は増加しつつあるが、危機的な状態になっているという認識は一般には未だなく、個々のケースへの対応に止まっている。地下水関係者にあっても、これまでは大きな危機感を持っていなかったと考えられる。しかし、89(H1)年からの地下水の常時監視により、道内でも地下水の汚染が相当広範囲に拡大しつつあることが判明した。汚染した地下水の飲用・利用を単に規制するだけでは、地下水が持っている資源としての他にない特性を無視することになる。

今後、地下水環境をモニタリングする機会をさらに増やし、水位と水質などに関する客観的な観測事実に基づいて、地質環境の現況把握に努めなければならない。そして、適切な対応を取ることによって地下水資源を保全し、良好な状態で後世に渡すことは現代に生きる我々の責務である。

文 献

- 深見浩司 (1987) : 雪解け水活用の試み。水, 昭和 62 年 7 月号, 67-71。
深見浩司 (1995) : 雨水浸透調査報告(3)。全国鑿井協会北海道支部, 12P。
広田知保・横山英二・和田信彦・深見浩司 (2000) : 北海道釧路地域における帯水層の塩水化。北海道立地質研究所調査研究報告, 第 30 号, 37P。
北海道環境生活部 (2003) : 平成 13 年度/北海道の水道, 151P。
北海道立地質研究所 (2003) : 地下水位・地盤沈下/観測記録 XXIV (平成 14 年度), 65P。
関戸知雄・田中信寿・松藤敏彦・松尾孝之 (2001) : 家庭系粗大ゴミ中に含まれる鉛量の推定。土木学会論文集, No. 671/VII-18, 49-58。

講演

2003年十勝沖地震・台風10号豪雨による地盤災害

北海道立地質研究所

石丸 聡

2003 年台風 10 号豪雨・十勝沖地震による地盤災害

北海道立地質研究所台風 10 号豪雨・十勝沖地震災害調査班*

1. はじめに

2003 年の夏から秋にかけて、北海道に立て続けに地盤災害が発生した。8 月 9 日～10 日の台風 10 号接近にともなう豪雨災害と、9 月 26 日の十勝沖地震災害である。両者とも道内の広範囲で、斜面、河川、道路、住宅等に被害を与えた。今回の報告では、北海道立地質研究所災害調査班でおこなった調査結果の概要を述べる。本報告は、石丸ほか(2003)、田近ほか(2003a)、田近ほか(2003b)、石丸ほか(2004)、廣瀬ほか(2004)をもとに、取りまとめたものである。

2. 台風 10 号による地盤災害

2. 1. 降水状況と被害概況

2003 年 8 月 9 日から 10 日未明にかけて、台風 10 号の接近により停滞していた前線が活発化し、北海道地方は大雨となった。特に日高地方西部の内陸地域では、時間降水量が 50mm に達し、一部では総降水量が 400mm を越える記録的な豪雨となった。この地方の年間降水量は 1,100mm 程度であり、今回の豪雨により多くの観測地点で過去数十年間の最大降水量を上回った。

この豪雨により北海道各地の河川が氾濫し、死者 10 名、行方不明 1 名、31 棟の家屋が全半壊した。一方、山間部では斜面崩壊が多数発生し、その結果、大量の土砂や流木が、平地や河川、海に流れこんだ。被害範囲は、降水量が特に多かった日高支庁管内をはじめ、十勝、胆振、釧路支庁など 9 支庁管内におよび、道内の総被害額は 819 億円を越える（北海道防災消防課 2003 年 9 月 25 日まとめ）。

今回我々は、被害が特に集中して発生した北海道日高地方西部を中心に、8/18-20、9/3-5 および 10/14-17 に調査をおこなった（第 1 図）。

2. 2. 洪水による被害

河川氾濫による被害が大きかったのは、厚別川とその支流のリピラ川、比宇川、および沙流川支流の額平川、貫気別川、さらに厚別川・沙流川両水系に挟まれる日高門別川、慶能舞川、波恵川、賀張川などである。

厚別川流域の洪水による被害は、特に大きなものとなった。厚別川本流上流域の三和、あるいはその支流リピラ川上流域の里平から河口までの約 30km 区間で、河川沿いの沖積低地のほとんどが冠水した。前述したとおり、厚別川水系は沙流川水系などの一級河川に比べ、河床からの比高の小さい沖積低地が広い面積を占める。そのため、沙流川水系に比べると、洪水による被害面積が大きくなった。

厚別川は上流域で多くの支流を集め、中流でやや谷幅が狭くなる。このため、比宇川と厚別川の合流点付近では湛水位は高く、建物の冠水跡の観察から道路の路面よりも 3m も上であったと

*石丸 聡, 田近 淳, 大津 直, 廣瀬 亘, 高見雅三, 田村 慎, 清水水康博, 岡 孝雄

みられる（写真1）。

比宇川合流点の1km下流地点では、洪水流により道路のアスファルトが引き剥がされ、下流方向に引きずられた（写真2）。狭い谷幅が急に広がるブケマ橋付近では、洪水流により土台部分を洗掘された家屋が倒壊した（写真3）。ここでは道路を横切り溝のように地面がえぐられており、流速が特に大きかったことを示す。

下流域では、旧河道跡や氾濫原を中心に洪水の流路となり（写真4）、かつての河道にあたる水田では稲の身の丈ほどまで泥に埋る状況となった。赤無橋付近では、ワゴン車が流され3名が死亡した。ここでは、赤無橋の上流から河川水が溢流し、橋の下流部で洪水流が激しく曲流していたことが植物の倒れ方から確認できる（写真5）。

2. 3. 支沢出口の沖積錐上の土砂堆積

河川流域および海岸沿いに堆積した多くの土砂、流木の供給源は、主に山地斜面の崩壊によるものと考えられている。それを裏付けるように、支沢出口の段丘面、沖積錐上には土砂や流木が扇状に堆積する箇所が多数見られた。特に厚別川上流域では、支沢出口のほとんどで土砂が堆積した。このことは、この地域の背後の山地で多数の斜面崩壊が発生していることを意味する。

比宇川の厚別川合流点2km上流の住宅は、隣接する比宇川の氾濫と背後の沢からの土砂流との双方向から被害を受けた（写真6）。この住宅は沢の出口から正面200m、沖積錐の前面に位置しており、沢からの土砂流にさらされた。堆積した土砂の層厚は20cm以下と薄いものではなかったが、流木が大量に流れ込み住宅を直撃した。

厚別川上流域の道道平取一静内線の三和では、沖積錐を切り土両切りした道路上に厚さ8mの土砂が堆積し、道をふさいだ（写真7）。堆積域は切り土の形態に規制され、奥行き70m、幅120mと側方にひろがる。

糠平川流域の芽生では支沢出口に土砂が広がり、牧場の車庫や小屋に土砂が流入した（写真8）。土砂が堆積した場所は沢の出口に広がる沖積錐上で、特に沢の正面方向には層厚1m以下の土砂が330m先まで流走した。

各地で見られた沢出口の土砂堆積の状況から、防災的観点から以下のことを指摘しておきたい。沢の出口に発達する沖積錐は段丘面上に広がり、水を確保しやすいことから、しばしば住居や施設が選択的に建つ。しかし、沖積錐の多くは、豪雨により沢上流で発生した崩壊土砂が沢沿いに流下し厚く堆積する場であり、危険な場所である。土砂の流れは直進性が高いため、沢の出口正面には住居や施設を設けることは極力避けるべきである。特に、切り土等の土地改変を行う場合には、この点に留意する必要がある。

2. 4. 斜面崩壊

前述写真6の土砂流背後の沢に入ると、谷壁斜面に浅い表層崩壊が多数発生していた（写真9）。この沢に分布する地質は元神部層の砂岩あるいは礫岩である。崩壊面が植生を含む土層と岩盤との境界にあたるため、地質構造の影響は受けず、両側の谷壁で崩壊頻度の差は見られない。また、崩壊物質のほとんどが表層の土層および樹木等の植生であり、岩石をあまり含まない。前述の沢出口に堆積した土砂の層厚が薄く、流木が多いのは、こうした理由によるものと考えられる。今回の豪雨による斜面崩壊の多くは、このような浅い斜面崩壊であった。

一方、岩盤内が破壊面となるものは、斜面傾斜と平行に近い流れ盤箇所が多い。さらに岩盤内

に深い破壊面を持つ崩壊は、もともと岩盤がクリープしていたり、深い亀裂が発達しているなどの特徴を持つものが多い。

新冠川流域の古岸では、地すべり性の崩壊が発生し、住宅や小屋に土塊が押し寄せた（写真 10）。この地点の地質は段丘堆積物をのせた元神部層砂岩で、砂岩は流れ盤構造である。土塊の移動方向は地層の傾斜方向と一致しており、岩盤層すべりの形態を示す。頭部には幅 8m のグラベンが形成されており、分離崖の比高は 5m である。頭部の分離崖には垂直亀裂が入っている（写真 11）。現地住民の証言では、1968 年の十勝沖地震により、この崩壊の背後の畑に亀裂が入ったとのことである。また、雨が激しくなった 9 日 21 時半～22 時に、斜面崩壊の音を聞いたと証言している。

厚別川新和の対岸において、頭部滑落崖の比高が約 20m という、すべり面の比較的深い崩壊が発生した（写真 12）。隣接する牧場関係者の話によれば、雨が降りやんだ 10 日 4 時半頃に斜面崩壊の音を聞いたということである。崩壊源右側の岩盤には、砂岩を挟む成層した泥岩層が露出する。この泥岩層は急立しており、滑落崖下部が座屈するようなクリープ構造となっていることを確認した（写真 13）。また、さらに右側の滑落崖には旧地表面下 7m に流水痕の残る長径約 20cm のパイピングホールを確認した（写真 14）。

リビラ川右岸では、崩壊が集中し、ほぼ全ての沢から土砂が流出した。この地区はニセウ層泥岩地域で、斜面上部に白色の火成岩が貫入する。この地区の沢の上流部左岸で、幅 80m、深さ 25m の崩壊が発生した。崩壊源上部は白色火成岩からなり、地震起源を想像させる垂直亀裂が入る。崩壊のタイプは斜面上部で岩石すべり、下部で岩屑すべりとなり、そのまま土石流→土砂流へと形態を変えながら沢を流下し、沢出口の放牧地に厚く土砂を堆積させた。

額平川上流右岸の豊糠において、高さ 35m の滑落崖を持つ深い崩壊が発生した。この崩壊は頭部から堆積物末端までの距離が約 400m、比高が約 150m、今回の豪雨による斜面崩壊の中で最大級の規模となった（写真 15）。崩壊源は白亜系中部蝦夷層群の泥岩で、急立した流れ盤構造となっている。崩壊源に見られる岩盤は亀裂が発達しており、崩壊した岩盤は岩屑化しやすいものと考えられる。この崩壊で注目されるのは沢の出口から 2 方向に延びる土砂の、厚さ約 3m の“ロープ地形”である。写真 15 左側のロープは右側のロープを覆うことから、右側のロープが先に崩壊、堆積したことがわかる。写真 15 右側のロープは主に岩屑からなる小さなロープ地形が集まっており（写真 16）、移動体の変形しながら流下したような形態となっている。これに対し、左側ロープには土層が最上部にのるブロックが前方へ転倒し、一部で波状の表面形態となる（写真 17）。

2. 5. 崩壊分布

崩壊多発地域の地層は、調査地域内において岩盤強度の高い、ニセウ層頁岩、受乞層礫岩・砂岩、元神部層礫岩・砂岩などである。これに対し、岩盤強度の低い中新統泥岩のフラヌイ層や白亜系上部蝦夷層群の泥岩では元々地すべりが多く、地すべりの再活動や地すべり末端部の崩壊は見られるものの、崩壊密度はそれほど高くない。硬い岩盤よりも軟らかい岩盤のほうが崩壊しやすいように思われがちだが、硬い岩盤のほうが地形は急傾斜となるため、斜面表層部は不安定となり崩壊が多発するようである。

3. 十勝沖地震による地盤災害

3. 1. 震度分布と概況

2003年9月26日の4時50分頃に、北緯41度47分、東経144度05分、深さ42kmを震源とするマグニチュード8.0の十勝沖地震が発生した。また、その1時間後の6時8分頃に、北緯41度42分、東経143度42分、深さ21kmを震源とするマグニチュード7.1の強い余震が発生した（いずれも気象庁発表による）。本震による揺れは、十勝・日高・釧路地方の太平洋沿岸を中心に震度6弱を記録し、震度4以上の地域は道東地方から東北地方北部にかけての広範囲にわたった（第2図）。また、1時間後の最大余震でも、浦河町の震度6弱を最大とし、震度4以上の地域は道央から東北地方北部にかけては本震とほぼ同じ範囲に広がった。

この地震により、北海道内で津波によるとみられる行方不明者2名、負傷者847名、住宅被害は全壊104棟を含む2010棟に達し、被害額は道内だけで273億円を超える（北海道防災消防課2003年12月10日まとめ）。

災害調査班では、9月26日～29日に十勝、日高、釧路各支庁および札幌市内の調査をおこない、その後若干の補足調査をおこなった。

3. 2. 地盤の違いによる災害の特徴

今回の地震動の特徴として、振動継続時間が長いこと、東西成分が卓越していたことなどがあげられる。また、今回の地震はプレート境界型であり、プレート内部破壊型の1993年釧路沖地震、1994年北海道東方沖地震にくらべ、長周期の振動が卓越した（地盤工学会2003）。このため、長周期の揺れに反応しやすい軟弱地盤の被害が広範囲にわたった反面、岩石崩壊、落石などの岩盤や砂丘上の地盤での被害は比較的少なかった。被害は後背湿地や埋積谷など沖積層の厚い地域を中心にひろがり、なかでも被害が大きかったのは十勝川河口の沖積低地を中心とする豊頃町とその周辺である。札幌市内や北見市近郊では谷埋め造成地で液状化とそれに伴う地表変動による被害が発生していた。

3. 3. 堤防・道路

十勝川堤防の池田市街地より下流側では、多くの地点で堤体が崩壊した。この地帯は軟弱な地盤が厚く堆積することが知られている。堤体の崩壊は十勝川河口右岸側の天津地区で特に被害が集中し規模が大きく、崩土の末端にはしばしば液状化による噴砂が認められた。写真18の崩壊では、堤防を形成する盛土が側方流動した。崩壊頭部は幅の広い馬蹄形で、上部の亀裂内に液状化し、噴出・堆積したとみられる細粒砂を確認した（写真19）。

浦幌町の下頃辺川にかかる愛牛橋では、とりつけ道路が崩壊した。盛土が側方流動し道路中央部に開口幅数十cm、深さ2mの亀裂が生じた（写真20）。橋に残った痕跡から、取り付け道路の天端は約30cm沈下したことが読み取れる。盛土のり面は膨らむような形状となっているが、のり尻の変位は小さい。

道道静内浦河線の浦河町瑞穂において、丘陵尾根部を縦走する盛土で崩壊が発生した（写真21）。盛土頂部の道路アスファルトは斜面方向に従わず、震源方向にアスファルトが重なることから、盛土頂部が地震による振動に大きく揺さぶられ、その結果、盛土肩周辺が斜面方向に変形したとみられる。ここでも盛土上部は斜面方向に崩壊するが、のり尻の変形は小さい。

3. 4. 宅地

宅地での地盤変形で目立ったのは、締りの悪い埋土、盛土の不等沈下および側方流動による変形と、それに対し沈下を免れた基礎のしっかりとした建設物の相対的な抜け上がりである。

札幌市内では、清田区のみしが丘、清田、里塚等で住宅地の盛土・埋土変形が発生した。この地域は支笏火砕流堆積物からなる台地が分布しており、被害が発生したのは、いずれも、火砕流台地を埋土・盛土した箇所である。みしが丘では低いひな壇盛土上に立つ家がのり斜面に対して後方回転した（写真 22）。住宅と地盤の境界部および隣接する空き地では噴砂が生じた（写真 22,23）。

豊頃町駅前では下水管の埋め戻し土が約 30cm 沈下した（写真 24）。マンホール周囲からは黄褐色の細粒砂～極細粒砂からなる噴砂が生じている（写真 25）。同様の配管埋土の沈下は新冠町北星町などでも見られた。

新冠町役場では正面玄関周辺の地盤が沈下し、相対的に役場が抜け上がるような形となった（写真 26）。車道、歩道境界のコンクリート杭も沈下し傾いた。学校や公共施設など、基礎のしっかりとした建設物の相対的抜け上がりは、泥炭地等の地盤の弱いところではしばしば見られた。

3. 5. 港湾・臨海埋立地

港湾・臨海埋立地は地下水位が高く地盤の締め固まりも悪いため、地震により液状化が発生しやすい。今回の地震においても、造成の新しい地区を中心に噴砂や側方流動などが多数見られた。

十勝港は造成の古い順に第 1～第 4 埠頭まで並ぶ。第 1、第 2 埠頭では噴砂はほとんど見られなかったが、第 3 埠頭では広範囲に噴砂が見られ、第 4 埠頭ではさらに噴砂の頻度が増す。これは、新しい埋め立て造成地ほど地盤が締め固まっていなかったためと考える。第 3 埠頭の更地では、比高 15cm 以下の段差が約 100m にわたり続き、段差の亀裂から噴砂が生じた（写真 27）。その段差は海側に落ち、岸壁に向かって開いた弧を描いていることから、海へ向かう側方移動の頭部崖とみなすことができる。

浦河港に隣接する臨海埋立地内、浦河町役場西側の更地において、約 80m にわたり亀裂に沿った噴砂列が生じた（写真 28）。噴砂列は約 50m 離れた海岸線とほぼ平行に、緩い S 字型に伸びる。噴砂列が生じた範囲の海岸線がはらみ出していることから、噴砂列を頭部とした側方流動が発生したとみられる。

釧路西港においても、造成間もない第 4 埠頭でもっとも被害が大きかった（写真 29）。この第 4 埠頭は 1993 年釧路沖地震、1994 年北海道東方沖地震後に造成されており、今回始めて大きな地震に見舞われた地盤である。ここでは、特に歩道と車道の境界や電柱の周辺など構造物の隙間から噴砂が生じた。

3. 6. 岩石斜面

岩石斜面の崩壊は比較的少なかったが、地震の振動方向による影響を受けやすい斜面方向や岩盤の背後に亀裂が入っている箇所で崩壊が発生した。

国道 336 号線広尾―庶野の通称黄金道路のほぼ覆道上で海食崖の崩壊が発生した（写真 30）。崩壊土砂は、一部ほぼ覆道を乗り越え海に達した。地質は亀裂の多いホルンフェルスからなる。海食崖の傾斜は約 70 度、覆道天端からの高さは約 90m で、その上部から崩壊した。崩壊土砂は幅 50m、奥行き 15m、厚さ 8m の体積約 3,000 m³に達した。海食崖は東向きで、この地域で卓越した振動方向と一致する。

様似町塩釜岬でもノッチの発達した海食崖の中～下部（高さ 27m以下）が崩壊し、波蝕台上に土砂が堆積した（写真 31）。海食崖の斜面方向は南向きである。岩石破壊面の平面形態から、西側のブロックが最初に崩壊したことを確認した。西側ブロックは東西方向の振動に反応しやすい南へ突出した地形である。西側ブロック崩壊後、支えを失った中央から東側のブロックが崩壊し斜面前方から左側（東側）にかけて岩塊が広がった。崩壊土砂の幅は 25m、奥行き 20m、厚さ 4mで、土砂の体積は 1,200 m³に達する。

樽前山の支笏湖側の谷壁では 500m の区間に 3 箇所崩壊が発生した。崩壊した斜面の方向はいずれも震源方向の南東向きである。そのうち 1 箇所は谷壁に平行なシーティング節理が入ったオーバーハング斜面で、この節理の開口幅の変位を 1 年前から計測していた（写真 32）。この計測によれば、本震により節理が 3.1cm 開き、1 時間後の最大余震で前方転倒した。

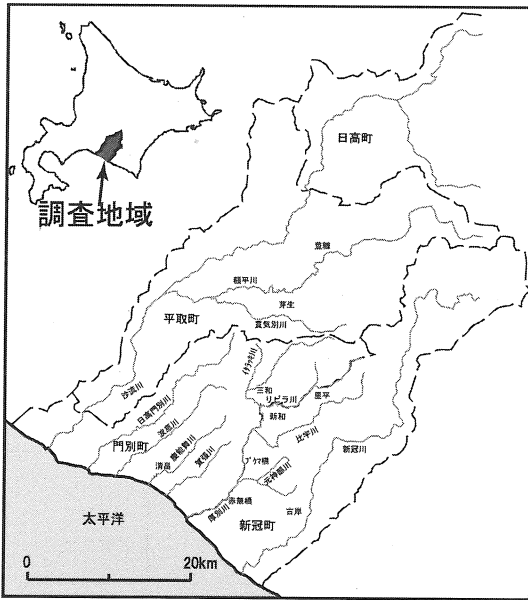
十勝沖地震の 5 日後となる 10 月 1 日 9 時半ごろ、静内町の静内川水系静内ダム 1km 上流の右岸で岩石崩壊が発生した（写真 33）。崩壊規模は比高約 200m、幅約 50m で、下半部約 100m が崩壊土砂の堆積域となる。崩壊した斜面は東向き（震源方向）で、白色の花崗岩類なる。花崗岩類は顕著な化学的風化を受けてはいないが、節理が卓越する。崩壊源は尾根斜面直下の遷急線を頭部とする浅く平滑な斜面で、急立している。崩壊域上部は 1-2m 間隔の開口節理に沿って、角礫化している。崩壊域中～下部にはクラックが卓越する部分とマッシュ部分とモザイク状に分布する。おそらく十勝沖地震にともない、頂部で節理が開きその後の降雨等を誘因としてすべり、崩壊が発生したものと見られる。

謝 辞

北海道水産林務部治山課には防災ヘリコプターに同乗させていただき、多くの写真も貸していただいた。(株)シン技術コンサルには、多くの情報や写真を提供していただいた。以上の関係者に深く感謝いたします。

文 献

- 廣瀬 亘・田近 淳・岡 孝雄・高見雅三・大津 直・石丸 聡・田村 慎・高清水康博(2004)：平成 15 年（2003 年）十勝沖地震による地質災害（速報）北海道立地質研究所報告，75。
- 石丸 聡・田近 淳・大津 直・高見雅三(2003)：2003 年台風 10 号豪雨による北海道日高地方の斜面災害。日本地すべり学会誌，40，81-82。
- 石丸 聡・田近 淳・大津 直・高見雅三(2004)：日高地方における 2003 年台風 10 号による豪雨災害。北海道立地質研究所報告，75。
- 地盤工学会 2003 年十勝沖地震緊急地盤災害調査団(2003)：9 月 26 日発生の 2003 年十勝沖地震緊急災害調査速報。土と基礎，51(12)，77-81。
- 田近 淳・岡 孝雄・高見雅三・大津 直・廣瀬 亘・石丸 聡・田村 慎・高清水康博(2003a)：2003 年十勝沖地震による地質災害（速報）。日本地質学会ニュース，6，3-8。
- 田近 淳・石丸 聡・廣瀬 亘・伊藤陽司・志村一夫(2003b)：2003 年十勝沖地震により発生したランドスライド。日本地すべり学会誌，40，79-81。



第1図 調査位置図



写真1 建物の壁に残る高さ3mの冠水痕跡



写真2 アスファルトが剥ぎ取られ
左手前へ流される



写真3 洗掘による家屋の倒壊

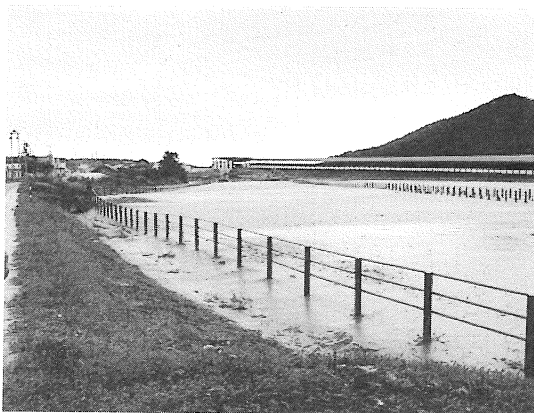


写真4 洪水により旧河道の牧草地に泥水が溜まる



写真5 赤無橋付近の洪水流の流れ
矢印は洪水流の方向を示す。



写真6 比宇川の洪水(手前)と背後の沢(左奥)からの土砂流による被害



写真7 道道上に厚く堆積した土砂

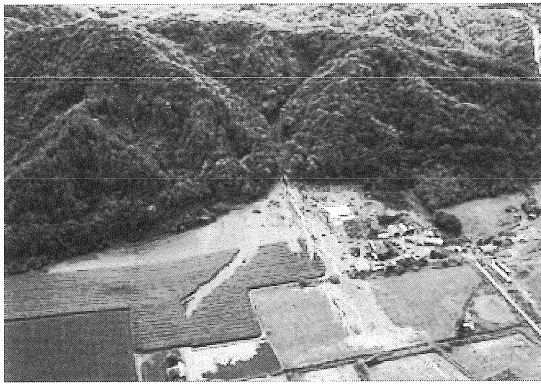


写真8 平取町芽生の沖積錐上に堆積した土砂
(株シン技術コンサル撮影)



写真9 比宇川支沢の斜面表層崩壊



写真10 新冠町古岸の地すべり性崩壊
家屋に土塊が押し寄せる。



写真11 垂直亀裂が卓越する崩壊頭部

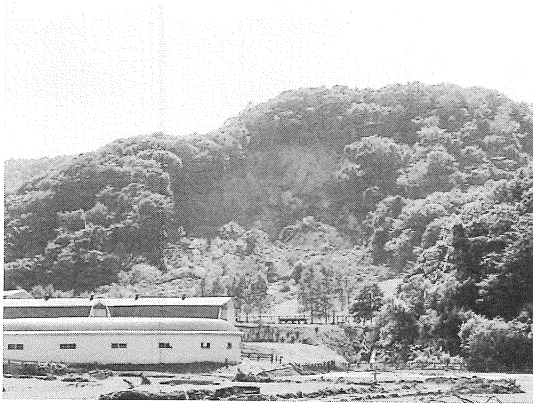


写真12 新和对岸に発生した深層斜面崩壊
写真手前は洪水被害.



写真13 新和对岸崩壊の側壁に露出した
クリープ構造



写真14 新和对岸崩壊の側壁に現れた
パイピングホール

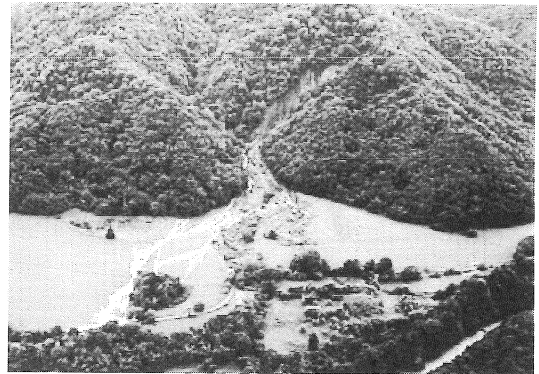


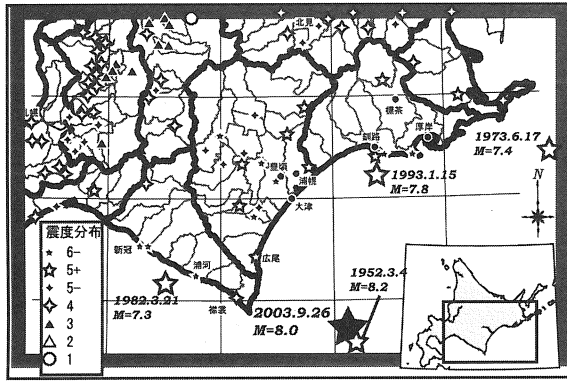
写真15 豊糠の深層崩壊と流走した土砂
(株シン技術コンサル撮影)



写真16 写真15右側のローブ状に堆積した土砂



写真17 写真15左側の波状に堆積した土砂
ブロックが前方(写真右側)へ転倒.



第2図 2003年十勝沖地震の震度分布(気象庁発表)
大きな黒星印はこの地震の震央.



写真19 頭部亀裂から噴き出した細粒砂

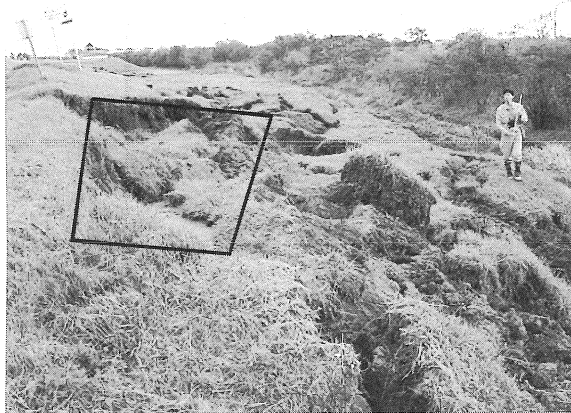


写真18 十勝川右岸の堤防堤体の崩壊
堤防を形成する盛土が側方流動した。
黒枠は写真19の範囲



写真20 愛牛橋取り付け道路の路盤崩壊



写真21 丘陵尾根部に盛土された道路の崩壊 写真左部のアスファルトが乗り上げた方向が
震源方向とほぼ一致する.



写真22 札幌市清田区美しが丘の住宅(右)が傾動
手前の空き地では大量の噴砂が生じる。



写真23 写真22の住宅基礎部分から噴砂が発生



写真24 埋め戻し土が沈下する。マンホールの周囲
からは細粒砂が噴出(豊頃駅前)



写真25 埋め戻し土の沈下によりマンホール
が相対的に30cm抜け上がった



写真26 新冠町役場では周辺の地盤が沈下し、
建物が相対的に抜け上がる。



写真27 十勝港第3埠頭で段差の亀裂から噴砂が
生じる。右側岸壁へ側方流動する。



写真28 浦河の臨海埋立地での亀裂に沿った噴砂列
地盤は海側(写真右)に側方移動した



写真29 釧路西港第4埠頭で開口亀裂が生じる
地盤は海側(写真右)に側方移動した



写真30 黄金道路ほしば覆道上の岩石崩壊
風化したホルンフェルスからなる。



写真31 様似町塩釜岬のノッチの発達する海食崖の
岩石崩壊。写真左側の岩塊が最初に落下。

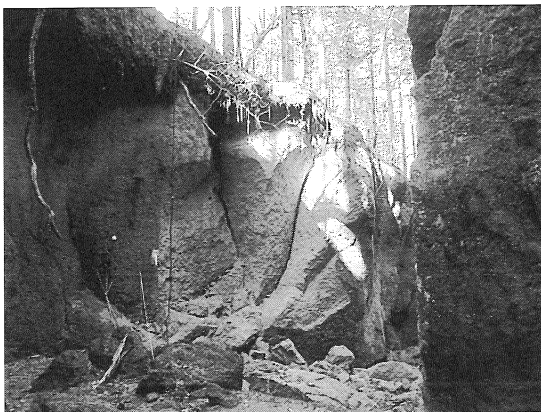


写真32 背後亀裂の発達したブロックが前方
転倒する。最大余震時に崩壊。

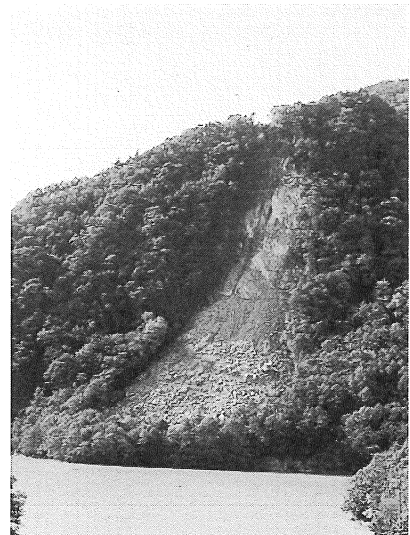


写真33 地震5日後に崩壊発生。崩壊
前日には激しい降水があった。

講演

2003年十勝沖地震に伴う温泉変動

北海道立地質研究所

秋田 藤夫

平成 15 年十勝沖地震に伴う温泉変動

北海道立地質研究所

秋田藤夫

§ 1. はじめに

平成 15 年 9 月 26 日 4 時 50 分頃、十勝沖を震源とする M8.0 の巨大地震が発生した。この地震に伴い北海道内の多くの温泉井では明瞭な温泉湧出状況の変化が観測された。

本報告では、平成 15 年十勝沖地震に伴い観測された温泉水位や自噴量、及び泉温の変化等について述べる。特に、地震直後の水位や自噴量の変化が GPS 観測結果から推定される地殻歪みの変化でほぼ矛盾なく説明できることを示す。

§ 2 平成 15 年十勝沖地震

平成 15 年十勝沖地震の震央および各地の震度を第 1 図（気象庁，2003）に示す。第 2 図は国土地理院（2003）による GPS 観測結果とその結果に基づき推定された震源断層モデルである。この地震の 1 時間 18 分後の午前 6 時 08 分には、北緯 41 度 42 分，東経 143 度 42 分で深さ約 21Km を震源とする M7.1 の最大余震が発生した。

§ 3. 観測点及び観測結果

第 3 図には、地震に伴うコサイスマックな水位や自噴量、及び泉温の変化が認められた観測点の位置を示した。各観測点は、主として深さ 70～1500m の温泉井で被圧帯水層が測定対象であり、北海道東部と北海道南部を中心として、ほぼ東西に広く分布する。第 4 図 a, b, c, d には、地震前後に観測された水位や自噴量、泉温変化の観測事例を示した。なお、それぞれのデータには気圧・潮汐などの補正は行っていない。

第 5 図には、ステップ状の水位変化を示した観測点について、その変化量を示した。また、明瞭な自噴量の増加が観測された測点についても、その変化量を示した。

水位上昇や自噴量の増加が観測された地域は、北海道東部の十勝平野南部の忠類村から釧路市に至る太平洋沿岸と根釧原野から斜里平野にかけての地域である。

震央から約 109Km 離れた忠類村（CR）では、約 80～100 ㍈/分ではほぼ安定していた自噴量が地震後約 225 ㍈/分に増加した。釧路市（KY）では、動水位が約 4m 上昇した。釧路市の太平洋岸の海底に位置する炭鉱内（KC）では、坑内水の排水量が約 2,400 ㍈/分から約 3,900 ㍈/分に増加した。根釧原野の堆積盆のほぼ中軸部周辺に位置する鶴居村（TR）、標茶町（SB）、中標津町（NK）では、それぞれ約 1.5m, 1.2m, 2.5m の動水位の上昇を示した。

オホーツク海側の斜里平野では、清里町(KR)で約1mの動水位の上昇、小清水町(KS2, KS3)でも明瞭な自噴量の増加が認められた。

これらの地域以外では、函館市及び帯広市の一部の井戸で地震直後の水位上昇が観測されたほかは広域的に水位低下が観測された。阿寒温泉では2カ所(AK1, AK2)で4cmと7cmの水位低下が観測された。帯広市内(OB1~OB6)では5カ所で65cm~170cmの水位低下、1カ所で430cmの水位上昇が観測された。札幌市では3カ所(SP1~SP3)で6cm~40cm、白老町では2カ所(SR1, SR2)で13cmと22cm、伊達市(NW)と虻田町(AB)では55cmと59cmの水位低下が、それぞれ観測された。道南の大沼周辺(KT, JS)では5cmと22cmの水位低下、函館市内では1カ所(YN)で30cmの水位低下、2カ所(YC, SK)で10cmと27cmの水位上昇が観測された。

震源から約404Km離れた道北の幌延町(HR)では、地震発生直後の短時間に水位の振動現象が観測されたがステップ状の水位変化は認められなかった。

泉温は函館市(NA)、忠類村(CR)、小清水町(KS2, KS3)で上昇したが、阿寒温泉(AK1)や温根湯温泉(ON)では低下を示した。

§ 4. 地殻歪みの変化と水位変化の関係

地殻歪みの変化をもたらす自然界の要因としては、潮汐、気圧、地震、断層クリープ、マグマ活動などが考えられる。このような地殻歪みの変化と地下水の関係についての研究は、地下の間隙率の変化を直接反映する地下水位(水圧)や湧出量(自噴量)を用いて行われてきた。

被圧地下水の水位や自噴量は、地球潮汐による微少な地殻歪みの変化に対応して変動することが良く知られている(Melchior, 1983)。地殻の体積歪み変化に対する被圧地下水の応答モデルとして一般的なのが、多孔質媒体の弾性変形モデルである。このモデルは、被圧帯水層が水で飽和した弾性的な多孔質媒体であると考え、それが歪んだ時の水位変化を観測井における水位変化として捕らえるものである。

非排水状態(水が媒質の外に逃げない状態)を満たす多孔質の弾性体において、体積歪 ϵ と間隙水圧 p との関係は

$$p = - \left(\left(\frac{2GB}{3} \right) \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \epsilon \quad \dots (1)$$

(Roeloffs, 1996)、ここで、 G は体積弾性率、 ν は非排水状態におけるポアソン比、 B はスケンプトンの係数で、下記の式で定義される。

$$p = - \frac{B\sigma}{3} \quad \dots (2)$$

ここで、 σ は x, y, z の3軸からの軸方向の応力を示す。すなわち、 B は多孔質媒体への外からの軸方向応力が、どれだけ媒体内の間隙水圧に反映するか、という係数であり、 $0 \sim$

1の値を取る。

(1)式右辺の係数部分 $\left(\left(\frac{2GB}{3}\right)\frac{1+\nu}{1-2\nu}\right)$ の典型的な値は $5\sim 50\text{GPa}$ とされる (Roeloffs,1996)。仮に、この係数を 10GPa とし、体積歪を 10^{-6} (たとえば媒質の体積が 1m^3 の部分について 1cm^3 増減した状態) とすると、間隙水圧 P は 0.01MPa 変化することになる。この場合の間隙水圧の変化は地下水位に換算すると 1m の変化に相当する。

(1)式から帯水層は圧縮歪を受ければ水位は上昇し、引張り歪では低下する。しかし、上式では地下水の移動の効果を考慮していないので、歪み変化と水位変化には位相差を生じないし、周波数依存性もない。

一方、不圧帯水層の場合の体積歪み変化に対する水位変化は、被圧帯水層の $1/100$ 程度であることから観測により、これを検出することは極めて難しいと考えられる。

Roeloffs (1996) によると、世界中の十数本の被圧地下水井戸において、地球潮汐の M_2 分潮 (周期 12.4 時間、体積歪の振幅が $10^{-8}\sim 10^{-7}$) に対する水位の応答は $0.4\sim 8\text{cm}$ とされている。この場合、概算すると体積歪 10^{-6} あたり、水位が $0.04\sim 8\text{m}$ 変化することを示しており、上で述べた理論値とそれほど矛盾しない。したがって、非排水条件を満たす被圧帯水層の地下水位は、おおよそ目安として、体積歪 10^{-6} あたり 1m 程度変化すると考えて良いだろう。

以上のように、揚水などの人工的なノイズや降雨の影響などが小さい条件下で近似的に非排水条件を満たす被圧帯水層の地下水位または自噴量の変化は、高感度の歪計と同様の性能を発揮することが期待される。最近の水位計の分解能 (1mm) から見れば、 10^{-9}strain オーダーの地殻歪みの変化を水位変化として捕らえることも充分可能であろう。

§ 5. 平成 15 年十勝沖地震に伴う体積歪み分布と地震直後の水位及び自噴量変化

国土地理院 (2003) による震源断層モデルに基づき計算した体積歪み分布と各観測点における水位変化と自噴量変化を第 6 図に示した。ここで、理論体積歪みの計算には MICAP-G (内藤・吉田, 1999) を用いた。

体積歪み分布は、北海道東部の斜里平野から屈斜路湖付近を通り、太平洋岸の音別町・浦幌町・更別村を経て、様似町に至るラインの太平洋側で広域的に圧縮場が広がっている。この中で釧路市の太平洋岸から浦幌町・忠類村を経て日高山脈南端に至る陸域では、最大 10^{-6}strain オーダーの圧縮場となっている。忠類村や釧路市では自噴量の大幅な増加や約 4m に達する水位上昇が観測された。根釧原野から斜里平野にかけても圧縮場に対応するように $4\text{cm}\sim 2.5\text{m}$ の水位上昇や自噴量が増加した観測点が分布する。

それ以外の道内の陸域では北東方向に広がる伸張場を形成している。この中で十勝平野から日高山脈を経て日高西部の太平洋沿岸に至る地域は、最大 10^{-6}strain オーダーの伸張場となっている。伸張場の中心付近に位置する帯広市では、最大 170cm の水位低下が観測さ

れた。この伸張場に位置する観測点では、帯広市と函館市の計 3 カ所で水位上昇した以外は、水位低下を示した。

以上のように、水位上昇や自噴量が増加した観測点と圧縮場の分布および水位低下した観測点と伸張場の分布が良く一致した。

§ 6. 理論体積歪みと地震直後の水位変化との関係

秋田・松本 (2001) は、1993 年から 1994 年にかけて北海道周辺で発生した M7.5 以上の 4 回の巨大地震に伴って発生した地震直後の水位変化と震源断層モデルから計算された理論体積歪みとの比較を行った。そして、道内の多くの水位観測井で地震直後の水位変化の極性や大きさが震源断層モデルに基づき計算された体積歪みの変化でほぼ矛盾無く説明できることを示した。

今回の十勝沖地震でも秋田・松本 (2001) により報告された観測点と同一地点でデータが得られた。第 8 図には、今回の地震を含めて 3 回以上のデータが存在する OB1, SP1, SP2, SR1, SR2, YN の 6 ケ所での地震に伴う理論体積歪み変化と地震直後の水位変化との関係を示した。図中には、最小二乗法で求めた水位と歪との関係を示した。6 ケ所の観測点において、地震直後の水位変化と地震による理論体積歪量とは概ね直線関係を示している。

これら 6 ケ所の観測点の地震に伴う歪に対する水位の応答感度は、 $1.5 \sim 17.9 \text{mm}/10^{-8} \text{strain}$ を示しており、Roeloffs (1988) が示した世界各地の 17 の坑井における地球潮汐による応答感度 $2 \sim 40 \text{mm}/10^{-8} \text{strain}$ の範囲にほぼ入っている。したがって、これらの観測点では、地震による歪変化に適度に応答した水位変化を捕らえていると結論できる。

§ 7. 昭和 27 年と平成 15 年の十勝沖地震に伴う水位変化及び理論体積歪み変化の比較

昭和 27 年 3 月 4 に発生した十勝沖地震 (十勝沖地震調査委員会, 1954) では、道内各地で地下水や温泉に変化があったと報告されているが、当時はまだ水位計などによる定量的な観測が実施されていなかったため定性的なものとなっている。第 8 図は昭和 27 年十勝沖地震の震源断層モデル (笠原, 1975) に基づき計算した理論体積歪分布と水位変化の極性を示したものである。この地震では、道東の一部に圧縮場が現れる以外は、北海道全域が伸張場になっている。歪分布と地下水位が上昇した観測点及び低下した観測点の分布を比較すると、一部に歪分布と矛盾するデータもあるが、大局的には歪分布を反映した結果と言える。

第 6 図に示した平成 15 年十勝沖地震の理論体積歪み分布を第 8 図の結果と比較すると、北海道の内陸部では、歪みの極性や大きさがほぼ同様な分布を示している。水位変化も昭和 27 年の観測結果には、観測精度などの問題は残るものの、大局的には平成 15 年の結果と類似したものとなっている。

§ 8. おわりに

平成 15 年十勝沖地震に伴って観測された地震直後の水位変化は、断層運動の結果生じた広域的な地殻歪みでほぼ矛盾無く説明できる。これらの地震前後に発生する地下水位の変化が、相似性や反復性のある自然現象ならば、地下水位データは、今後発生するであろう北海道の太平洋岸における海溝型の巨大地震の前兆（プレスリップ）を捕らえるうえで極めて貴重な情報を提供することが期待される。

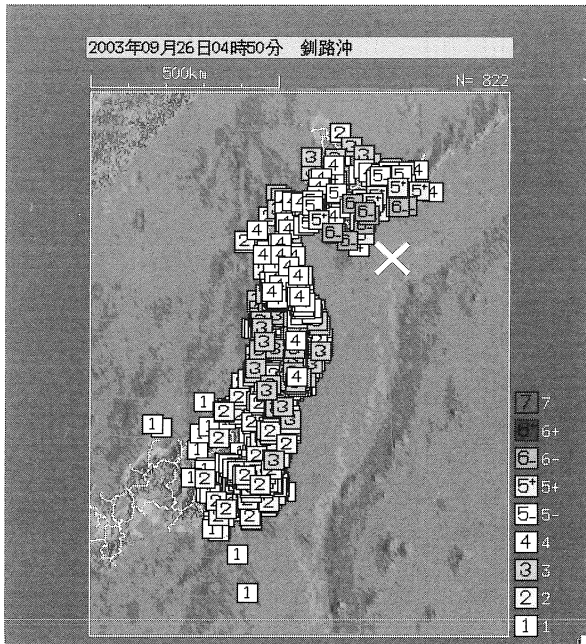
地下水位の変化には、地殻変動に伴う帯水層の歪み以外に弾性定数や透水係数等の物性値変化などの影響が含まれるため、ポアホール型歪み計に比較して観測量と現実の物理現象との対応関係に曖昧さが残る。しかし、帯水層の広がりによっては、広い範囲における平均的な歪みや物性値の変化を検出できるという利点を持つ。また、地下水位は、ポアホール型歪み計等では高精度な観測の難しい場所や歪み計の設置ができない環境下での観測も可能である。このようなことから、水位観測井は非常に安定したポアホール型高感度歪み計に匹敵し、相補的、かつ極めて安価で取り扱いが容易な歪み観測機器としての位置付けができる。

今後は、地下水位観測が地震発生モデルの構築に要求される地殻変動の検出精度を持ちうるか、その条件を満たすための問題点はどのような点にあるのかを理論的に検証することが重要な課題と考える。そのためには、既存の未利用井を活用するとともに、必要ならば新たな観測井を掘削し、地下水位観測網を構築することにより、地下水位から検知される地殻変動の空間的な広がり の把握と地殻変動監視システムとしての評価を行う必要がある。

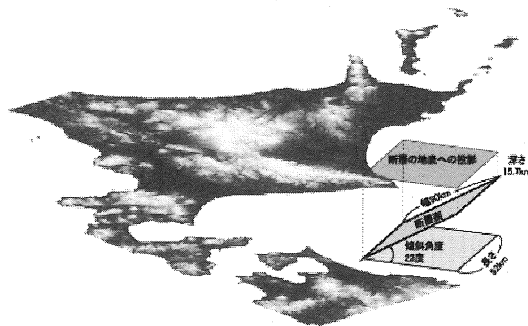
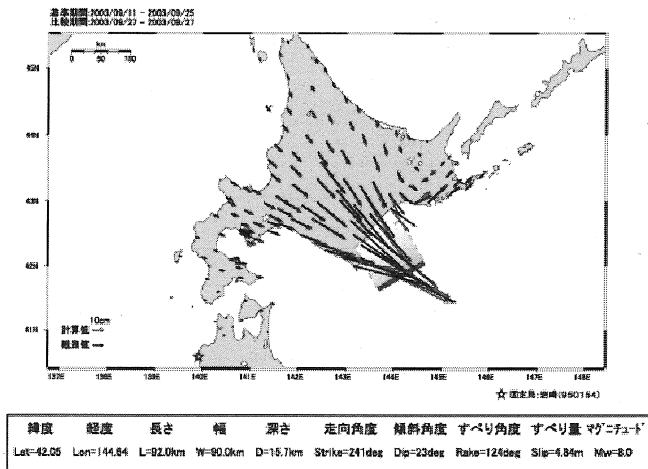
参考文献

- 秋田藤夫・松本則夫, 2001, 北海道内温泉井における 4 回の M7.5 以上の地震直後の地下水位変化, 地震 2, 53, 193-204.
- 秋田藤夫, 2002, 北海道周辺の巨大地震に伴う地下水位変化, 昭和 27 年十勝沖地震から 50 年・地震防災講演会講演要旨集.
- 地質調査所・北海道立地下資源調査所, 1997, 帯広市の深井戸における地下水位の大地震前の変化, 地震予知連絡会報, 58, 26-29.
- 北海道立地質研究所・産業技術総合研究所, 2003, 平成 15 年十勝沖地震に伴う北海道における地下水位変化 (速報), 地震予知連絡会会報 (印刷中)
- 笠原 稔, 1975, 1952 年十勝沖地震の断層モデル, 地震学会講演予稿集, No.2,90.
- 松本則夫, 秋田藤夫, 1997, 帯広市の深井戸における地下水位の大地震前の変化, 地震予知連絡会会報, 58, 26-29.
- Melchior, P., 1983, The tide of the planet earth (2nd ed.), Pergamon Press, Oxford, 641p.
- 内藤宏人・吉田澄夫, 1999, 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 地震 2, 52, 101-103.
- OKADA, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a

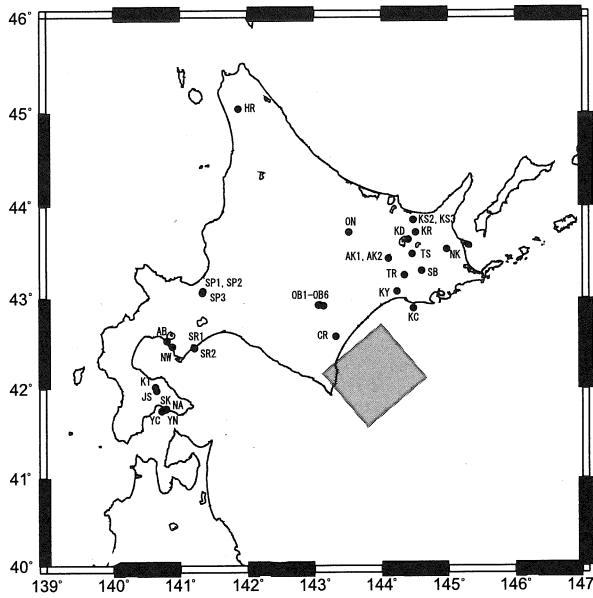
- half-spase, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- ROELOFFS, E. A., 1988, Hydrologic precursors to earthquakes: A review, Pure Appl. Geophys., 126, 177 -209.
- TAMURA, Y., T. SATO, M. OOE, and M. ISHIGURO, 1991, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, Geophys. J. Int., 104, 507 -516.
- 十勝沖地震調査委員会, 1954, 十勝沖地震調査報告, 十勝沖地震調査委員会, 1018p.
- 宇佐見龍夫, 1975, 資料日本被害地震総覧, 東大出版会, 335p.



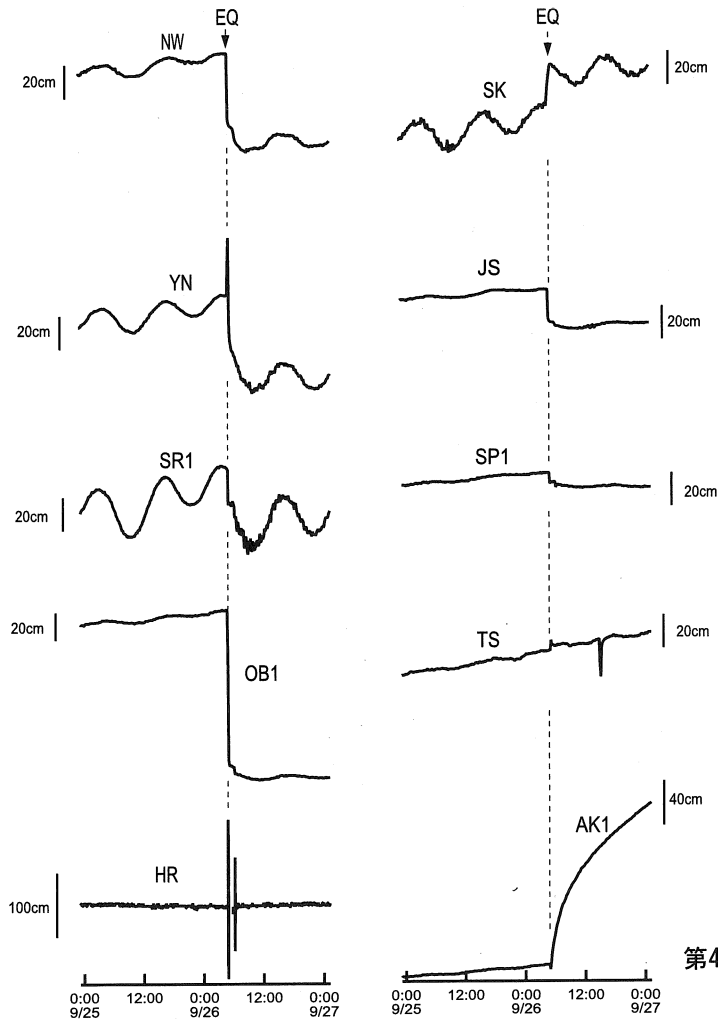
第1図 平成15年十勝沖地震の震央及び各地の震度（気象庁，2003）



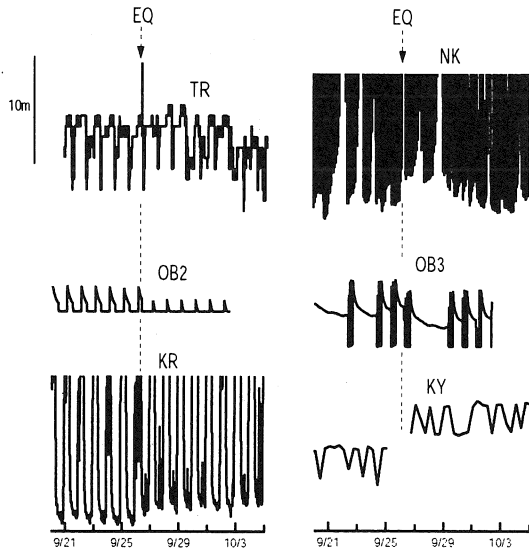
第2図 平成15年十勝沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル（国土地理院，2003）



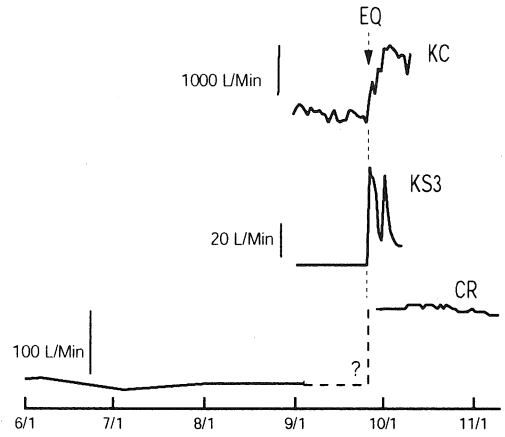
第3図 観測点位置図



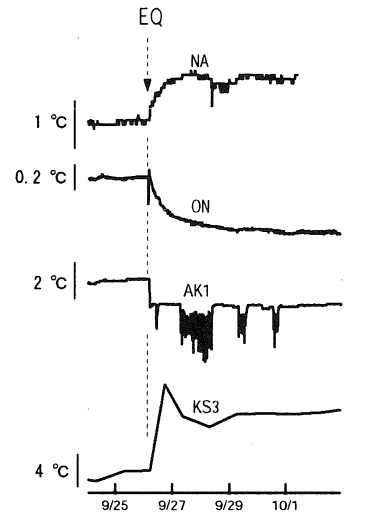
第4図a 地震前後の静水位変化



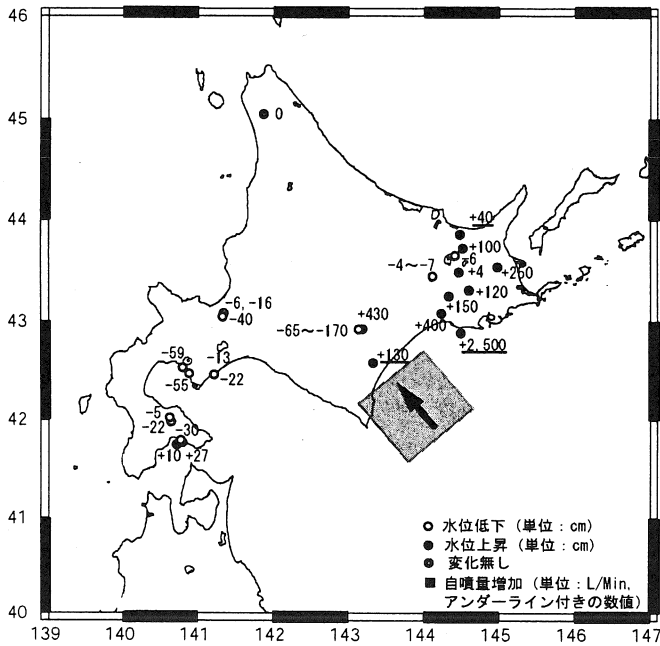
第4図b 地震前後の動水位変化



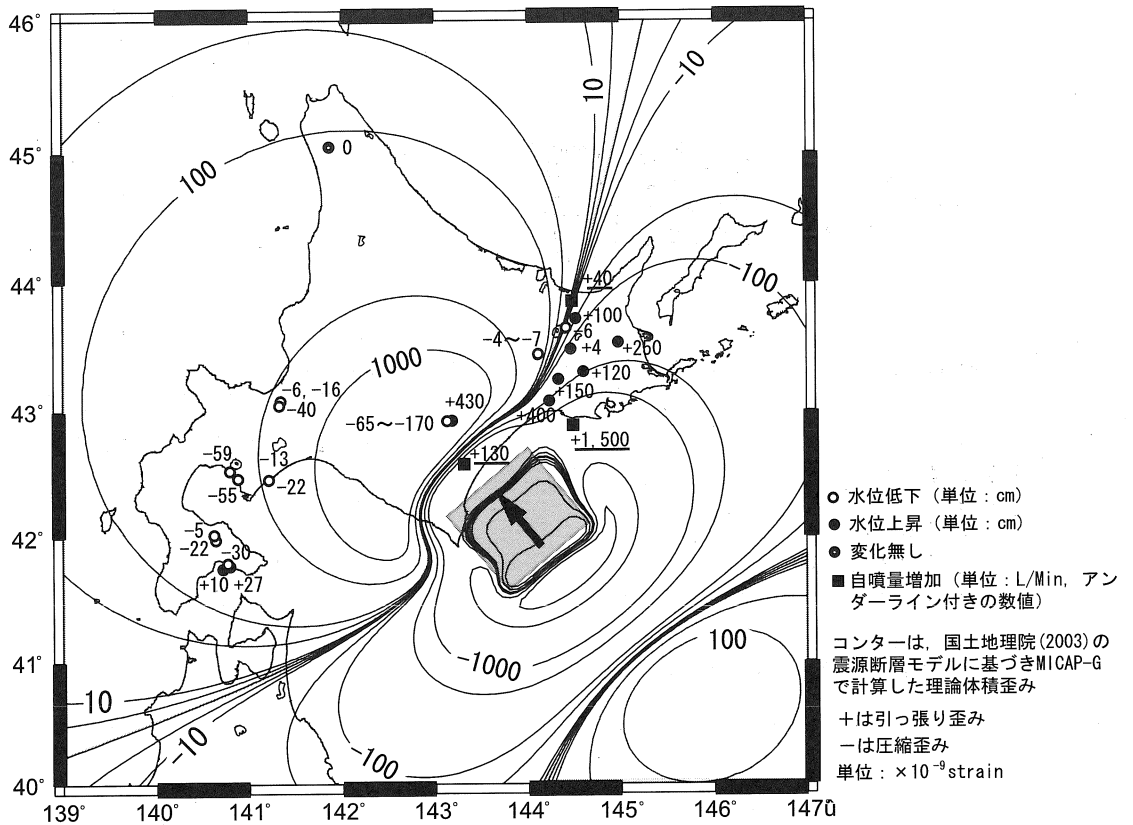
第4図c 地震前後の自噴量変化



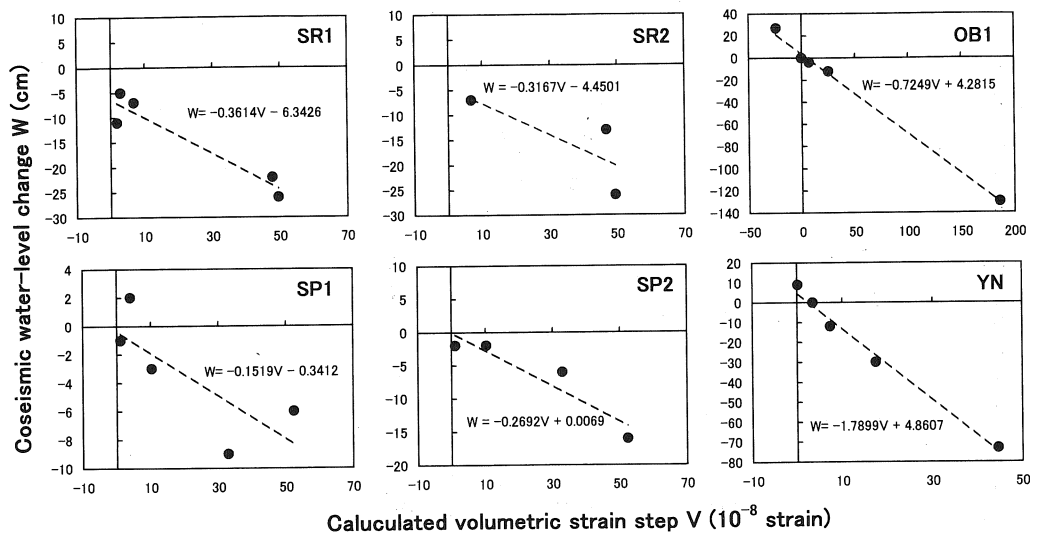
第4図d 地震前後の泉温変化



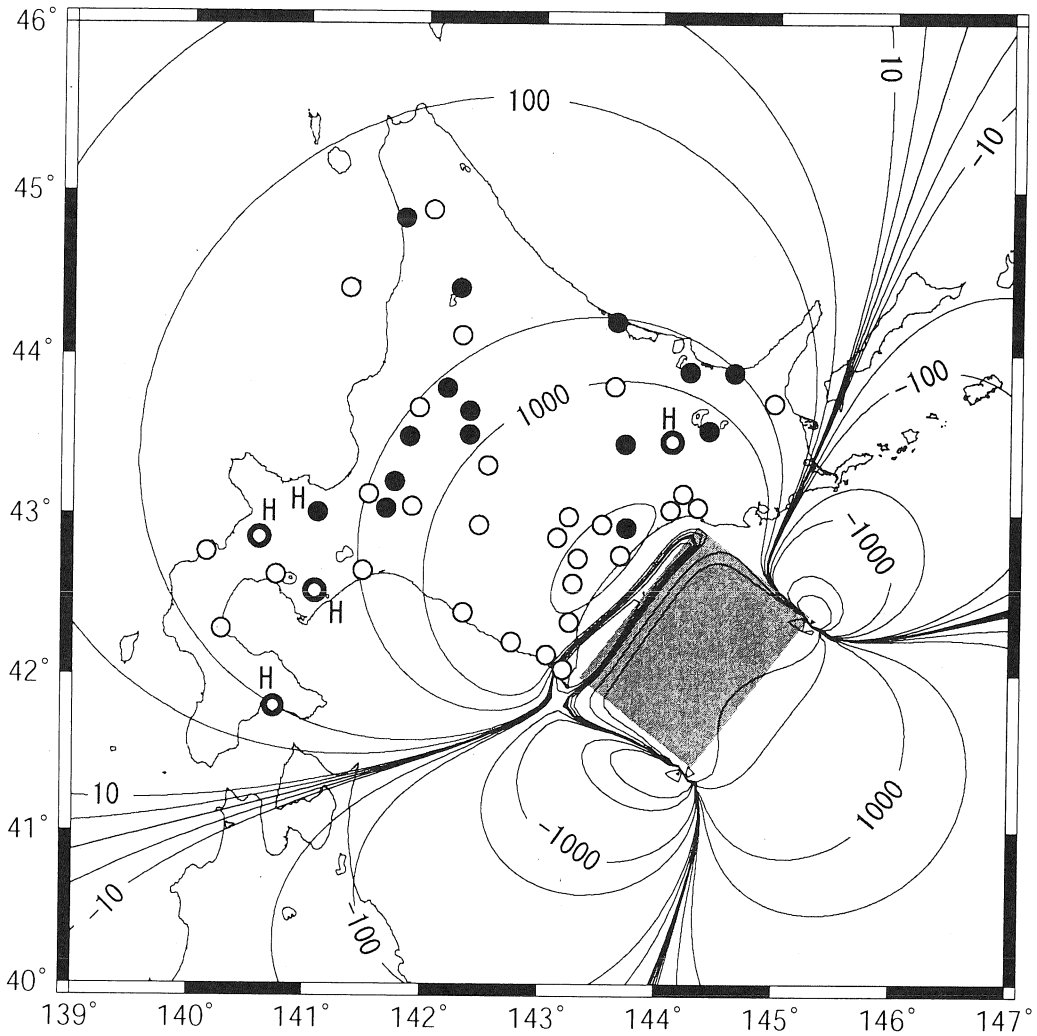
第5図 平成15年十勝沖地震直後に観測された水位および自噴量変化



第6図 平成15年十勝沖地震の震源断層モデルに基づき計算した理論体積歪み分布と地震直後の水位および自噴量変化



第7図 地震に伴う理論体積歪み変化と地震直後の水位変化



● 水位上昇 ○ 水位低下 ⊙ 水位低下後上昇? H 温泉地 歪みの単位: $\times 10^{-9}$ strain

第8図 昭和27年十勝沖地震の震源断層モデル(笠原, 1975)に基づき計算した体積歪み分布と水位変化の分布

第 42 回 試錐研究会講演資料集

発 行 平成 16 年 3 月 9 日

編 集 試錐研究会

出 版 北海道立地質研究所

〒060-0819 札幌市北区北19条西12丁目

☎ 011(747)2420(代)

Fax. 011(737)9071

URL <http://www.gsh.pref.hokkaido.jp>
