

R-127-'90

新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下性状

Land Subsidence Caused by Pumping for Snow Melting
in Muika-machi, Niigata Prefecture

岩田 敏・陶野郁雄

S. IWATA and I. TOHNO

NIES

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所

新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下性状

Land Subsidence Caused by Pumping for Snow Melting
in Muika-machi, Niigata Prefecture

岩田 敏・陶野郁雄

S. IWATA and I. TOHNO

水質土壌環境部

Water and Soil Environment Division

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

序

消雪のため地下水を揚水し、散水融雪している地域は、北は北海道から南は島根県に至っているが、全国で設置されている消雪パイプの総延長距離の過半数が新潟県となっている。地下水利用の散水融雪は主に地下水の熱エネルギー源としての性質を利用したものであり、昭和38年に長岡市で初めて実用化し、それ以後増加の一途をたどっている。また、消雪用の地下水の揚水は幹線道路あるいは鉄道といった公共輸送機関を中心に行われていたが、個人の住宅の屋根や駐車場などの消雪に用いられるにおよび地下水の使用量は急激に増加してきた。特に、消雪用の地下水揚水のため、昭和59年の豪雪の際、上越地域と南魚沼地域では、上越市西城町で101mm、南魚沼郡六日町余川で92mmの年間沈下量を記録し、全国1、2位の地盤沈下地域となった。

六日町は、数多くの中小河川が魚野川に注ぎ、河川水に恵まれており、昭和30年代まではほとんど地下水を利用していなかった地域である。しかしながら、昭和40年代以降、道路融雪対策などに地下水の利用が急激に増加し、このため、地下水位の低下、地盤沈下などの現象が生じ、様々な施設に支障をきたすようになった。

本報告は、冬期間にきわめて多量の地下水を揚水し、しかもそのほとんどを消雪用に利用し、その結果として著しい地盤沈下が生じている新潟県南魚沼郡六日町を対象として、消雪用揚水に伴う地盤沈下の実態把握と、機構解明を目指したものである。これらの研究は、昭和56～60年度までの経常研究「地層の圧縮特性に関する研究」及び昭和59～63年度までの経常研究「堆積環境を考慮した粘性土の圧密・圧縮特性に関する研究」の成果を踏まえたものである。

本報告は平成元年12月19日に逝去された地盤沈下研究室故岩田敏研究員が生前にほとんどまとめたものであり、同研究員の絶筆となった。ここに報告書の印刷を完了するに当たり、国立公害研究所所員一同、改めて岩田敏氏の業績を忍び、新たな感動に胸迫る思いである。

平成2年3月

国立公害研究所

所長 不破 敬一郎

目 次

| | |
|-------------------------|----|
| Abstract | 1 |
| 概 要 | 2 |
| 1 まえがき | 3 |
| 1.1 研究成果一覧 | 4 |
| 2 消雪の概要 | 6 |
| 2.1 消雪とは | 6 |
| 2.2 地下水利用の散水融雪 | 9 |
| 3 六日町の自然と環境 | 13 |
| 3.1 六日町の概要 | 13 |
| 3.2 六日町の地形・地質 | 14 |
| 3.3 ボーリング調査 | 16 |
| 3.4 六日町の地盤 | 17 |
| 3.5 六日町の気候 | 22 |
| 4 地下水利用と地盤沈下 | 27 |
| 4.1 地下水利用の現状 | 27 |
| 4.2 地下水位の観測 | 28 |
| 4.3 地盤沈下の現状 | 33 |
| 4.4 地盤沈下被害 | 35 |
| 4.5 地盤沈下対策と監視体制 | 37 |
| 5 地盤の圧密性状 | 41 |
| 5.1 圧密の基礎理論 | 41 |
| 5.2 圧密試験法 | 45 |
| 5.3 圧密試験装置 | 49 |
| 5.4 供試体の作製 | 52 |
| 5.5 圧密試験の結果と考察 | 53 |
| 5.6 繰返し圧密試験の結果と考察 | 63 |

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 6 | 地下水位の変動と地盤沈下 | 73 |
| 6.1 | 繰返し圧密現象 | 73 |
| 6.2 | 地盤沈下解析の手法 | 78 |
| 6.3 | 地盤沈下解析の結果と考察 | 79 |
| 7 | まとめ | 84 |

付 図

CONTENTS

| | |
|---|----|
| Abstract | 1 |
| Summary | 2 |
| 1 Introduction | 3 |
| 1.1 Lists of Relevant Publications and Presentations | 4 |
| 2 Summary for Treatment of Snow | 6 |
| 2.1 Treatment of Snow | 6 |
| 2.2 Melting Snow by Sprinkling with Groundwater | 9 |
| 3 Nature and Environment at Muika-machi Area | 13 |
| 3.1 Summary at Muika-machi Area | 13 |
| 3.2 Topographical and Geological Properties at Muika-machi Area | 14 |
| 3.3 Drilling Investigations | 16 |
| 3.4 Ground Conditions at Muika-machi Area | 17 |
| 3.5 Climate at Muika-machi Area | 22 |
| 4 Relationship between Utilization of Groundwater and Land Subsidence | 27 |
| 4.1 Present Conditions for Utilization of Groundwater | 27 |
| 4.2 Observations of Groundwater Level | 28 |
| 4.3 Present Conditions of Land Subsidence | 33 |
| 4.4 Damage by Land Subsidence | 35 |
| 4.5 Countermeasure of Land Subsidence and Observation System | 37 |
| 5 Consolidation Characteristics of Ground | 41 |
| 5.1 Basic Theory of Consolidation | 41 |
| 5.2 Method for Consolidation Test | 45 |
| 5.3 Consolidation Test Apparatus | 49 |
| 5.4 Making of Samples | 52 |
| 5.5 Results and Considerations of Normal Consolidation Tests | 53 |
| 5.6 Results and Considerations of Repeated Consolidation Tests | 63 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6 | Relationship between Variation of Groundwater Level and Land Subsidence | 73 |
| 6.1 | Repeated Consolidation Phenomenon | 73 |
| 6.2 | Methods of Land Subsidence Analysis | 78 |
| 6.3 | Results and Considerations of Land Subsidence Analysis | 79 |
| 7 | Conclusion | 84 |

Appendix

Abstract

Serious land subsidence is occurring at Muika-machi in Niigata Prefecture, Central Japan, where the groundwater level is annually lowered due to excess pumping of groundwater to melt heavy snow. In order to investigate the mechanism of the land subsidence caused by the annual change of groundwater level, three sites at Muika-machi were drilled to get undisturbed samples from Quaternary cohesive soils by means of thin walled tube and core sampler. In a laboratory, repeated consolidation tests, together with standard ones, were performed on the saturated samples. Based on past findings, it is believed that the settlement due to repeated loading (unloading and reloading) is more severe than normal loading in the consolidation tests on saturated samples of cohesive soil. Simulation of land subsidence at Muika-machi was carried out using the results of repeated and normal consolidation tests on samples taken from underground clay layers at the site. This simulation was onedimensional consolidation analysis using finite element method and the good agreement between the numerical calculation and the experiment result was obtained.

概 要

近年、大量の地下水を消雪用として揚水するケースが日本海側の豪雪地域を中心として急増している。特に従来、幹線道路あるいは鉄道といった公共輸送機関を中心に用いられてきたものが、個人の住宅の屋根や駐車場などの消雪に用いられるにおよび地下水の使用量は桁違いに増加している。これらの地域では、冬期に地下水位が大幅に低下し、夏期に回復するという一年周期の水位変動を示している場合が多い。このような周期的な地下水位変動が与えられると、それに伴って地盤に繰返し応力が生じ、これにより地盤を構成する粘性土層が圧密され、その結果、著しい地盤沈下が観測されることになる。ここでは、このような繰返し応力を受ける地盤の圧密沈下挙動を解明することを目的として、代表的な消雪用地下水利用地域である新潟県六日町を対象とする一連の研究成果について報告する。

第1章では、この研究の目的、経緯等について述べている。

第2章では、消雪の実態についての概要を述べている。特に地盤沈下と密接なかかわりのある、地下水を利用した散水融雪については、詳しく記述している。

第3章では、調査対象地域である、新潟県南魚沼郡六日町の地形・地質・気象条件について概略をまとめている。地質に関しては、国立公害研究所が六日町内3か所で実施した調査ボーリングの成果が含まれている。

第4章では、新潟県で行った地盤沈下観測結果・地下水利用状況調査の結果等をもとに、六日町地域の地盤沈下の現状・地下水利用の現状を述べている。

第5章は、地盤沈下の原因となる圧密現象の基礎理論とその試験法について述べる。また、六日町内の3か所の地点において実施したボーリング調査の際に採取した乱さない粘性土試料について、標準圧密試験及び繰返し圧密試験を行った結果について、詳述している。

第6章では、人工試料を用いた繰返し圧密試験に基づく繰返し圧密現象の定式化を行っている。また、これにあわせて、沈下解析の手法と実際の解析例についても報告している。

1 まえがき

地盤沈下は、いわゆる典型七公害の一つであり、一度地盤沈下が発生するとその回復がほとんど不可能であること、沈下の進行が緩慢で発見が遅れやすいことといった特徴を持ち、国民の生活環境や生産活動に多大の損失をもたらす現象である。その原因は、地下水の過剰採取に伴う地下水水位の低下により、主として粘土層が圧密されることにより生じる。地下水は、一般に良質・恒温の水であること、近代的な深井戸さく井技術の向上により、深層地下水を安価に大量に採取可能になったこと、生活水準の向上・各種産業の発展等により水需要が増大したことなどにより、地下水の過剰採取が行われてきている。

地盤沈下現象は、大正の初期に近代的なさく井技術による深井戸の出現とともに見られるようになった。その時期に、東京都江東区で、昭和の初期からは、大阪市の西部でも注目された。その後の急速な地盤沈下の進行につれ、建造物の損壊や高潮などの被害が生じ、大きな社会問題となった。昭和20年前後には、戦災による社会活動の停滞により地下水の需要が激減したため、地盤沈下の進行も停止していたが、昭和25年頃から、経済の復興とともに地下水使用量が激増し、それにつれ沈下が激しくなり、地盤沈下地域も拡大した。

これに対して、各種の地下水採取規制などの対策がとられたため、最近における地盤沈下の状況は全国的には、一時に比べて鈍化の傾向にあるものの、地域によってはなお著しい沈下の続いているところもみられる。これらの地域の地下水利用状況を見ると、

- ・埼玉県関東平野のように都市用水としての利用が多い地域
- ・佐賀県白石平野のように大部分が農業用である地域
- ・三重県長良川河口域のように水産養殖用が多い地域
- ・新潟県高田平野・南魚沼地区のように冬期の消雪用が多い地域
- ・千葉県九十九里平野のようにほとんどが水溶性天然ガス溶存地下水である地域

などである。

本報告は、これらの現在でも地盤沈下現象が著しい地域の内、ほとんど消雪用に地下水を用いている、新潟県南魚沼郡の六日町を対象として、消雪用揚水に伴う地盤沈下の機構解明を目指したものである。これらの研究は昭和56～60年度までの経常研究「地層の圧縮特性に関する研究」及び昭和59～63年度までの経常研究「堆積環境を考慮した粘性土の圧密・圧縮特性に関する研究」において行われた。「地層の圧縮特性に関する研究」においては、六日町内に3本の調査ボーリングを行って、地質を把握するとともに同時に採取した乱さない試料を用いて、圧密試験を実施し、土質工学的特性を把握した。「堆積環境を考慮した粘性土の圧密・圧縮特性に関する研究」では、既存の各種資料を収集・分析することにより、対象地域の地盤構成を把握した。また、人工試料を用いた繰返し圧密試験を行うことにより、乱さない試料を用いて行った繰返し圧密試験の結果の解釈の一助とした。

1.1 研究成果一覧

印刷発表

- (1) 陶野郁雄・桑原文夫・田中 実 (1983)：季節的に変動する地下水位の地盤沈下に及ぼす影響. 環境保全と地盤工学に関するシンポジウム発表論文集, 東京, 37-44.
- (2) 田中 実・陶野郁雄・桑原文夫 (1984)：地下水位の周期的な変動による地盤沈下. 日本工業大学研究報告, **14** (3), 33-42.
- (3) 陶野郁雄 (1985)：地盤沈下. 土質工学会東北支部設立三十周年記念誌, 土質工学会東北支部編, 土質工学会東北支部, 123-132.
- (4) 岩田 敏・陶野郁雄・桑原文夫(1986)：新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下とその解析. 土質工学会誌 土と基礎, **34** (11), 73-78.
- (5) 陶野郁雄・岩田 敏・桑原文夫・社本康広(1986)：繰返し応力履歴を受けた粘性土の圧縮性状. 土質工学シンポジウム論文集, **31**, 85-90.
- (6) 陶野郁雄 (1987)：消雪用揚水による地盤沈下. 地質と調査, **31**, 22-27.
- (7) 陶野郁雄・岩田 敏 (1988)：誌面講座 地盤沈下 (3) 新潟県南魚沼郡六日町の地盤沈下の現状. 地下水学会誌, **30** (2), 95-101.

口頭発表

- (1) 陶野郁雄・桑原文夫 (1983)：繰返し圧密試験における応力増分比と時間の及ぼす影響. 第18回土質工学研究発表会, 郡山, 201-202.
- (2) 桑原文夫・陶野郁雄 (1983)：繰返し応力下における粘性土の圧密沈下解析. 第18回土質工学研究発表会, 郡山, 203-204.
- (3) 陶野郁雄 (1983)：地下水の変動と地盤沈下. 1983年日本第四紀学会大会, 静岡, 88-89.
- (4) 桑原文夫・陶野郁雄 (1984)：消雪用に地下水を利用する地域の地盤沈下解析 —新潟県六日町の場合—. 第19回土質工学研究発表会, 松山, 255-256.
- (5) 陶野郁雄・桑原文夫 (1984)：繰返し応力下における粘性土の圧密特性 —新潟県六日町の場合—. 第19回土質工学研究発表会, 松山, 257-258.
- (6) 桑原文夫・田中 実・陶野郁雄(1984)：地下水位が周期的に変動する地域の地盤沈下解析. 日本建築学会昭和59年度大会 (構造系), 横浜, 2473-2474.
- (7) 岩田 敏・陶野郁雄・桑原文夫・栗原市雄 (1985)：新潟県六日町の地盤構成と地盤沈下挙動. 第20回土質工学研究発表会, 名古屋, 13-14.
- (8) 田中 実・桑原文夫・陶野郁雄 (1985)：繰返し荷重を受ける粘性土の圧密挙動. 第20回土質工学研究発表会, 名古屋, 241-242.
- (9) 陶野郁雄 (1986)：新潟県六日町の地盤沈下と地質, 日本地質学会第93年学術大会, 山形, 494.

- (10) 陶野郁雄 (1986) : わが国の地盤沈下の現状, 第3回地下水問題研究会, 東京, 27-34.
- (11) 岩田 敏・陶野郁雄・桑原文夫・社本康広 (1987) : 粘性土の一次圧密終了後の繰返し圧密特性. 第22回土質工学研究発表会, 新潟, 253-254.
- (12) 桑原文夫・陶野郁雄・岩田 敏 (1987) : 新潟県六日町の地盤性状と沈下予測. 第22回土質工学研究発表会, 新潟, 267-268.

2 消雪の概要*

2.1 消雪とは

消雪とは文字通り雪を消すことである。これには積雪後雪を除去する除雪と、降雪と同時に雪をとかず融雪とがある。

2.1.1 消雪方法

消雪の方法は、機械による除雪、施設による除雪及び施設による融雪とに大別される。機械による除雪は完全に消雪するということは困難であるが、いろいろな場所で適宜除雪ができる利点がある。一方、施設による除雪や融雪は消雪という目的を達することはできるが、施設の設置場所のみに限定され、自由度がなく、しかも広範囲に消雪を行うには経済的でないなどの難点がある。除雪施設には、流雪溝やスノーメルターがある。融雪施設には、散水融雪、温水パイプ融雪、電熱融雪及び薬剤融雪がある。これらの中で地盤沈下問題が生じるのは、地下水を利用する散水融雪のみである。

散水融雪は主に道路に設置されており、路面を完全に露出できる利点がある。これは路面などに埋設された配管から水を噴出、流下させ、降雪と同時に雪を溶かす方法であり、その水源のほとんどは地下水であるが、河川水、海水、温泉水及び工場などの温排水を利用することもある。

ここでは、地下水利用の散水融雪以外の主な消雪施設について述べることにする。

2.1.2 流雪溝

消雪に流雪溝が有効であることが認識されたのは昭和初期である。流雪溝は主に道路の側溝として設置されており、流水を利用して運搬、排雪を兼ねた施設であり、人力除雪の補助施設として発展してきた。昭和40年代になると、他の消雪施設の発展に伴って一時すたれた感があったが、最近幅員の狭い市街地道路や屋根の雪処理も含めた除雪した雪の処理を行うため、再び見直されるようになってきた。

写真2.1は新潟県の妙高高原町と上越市の間にある新井市市街地における昭和60(1985)年2月の積雪状況を示したものである。写真2.2は流雪溝を利用して雪処理を行っている新井市市街地の状況を示したものである。なお、写真2.2は写真2.1のすぐ近くで、ほぼ同じ時間に撮影したものである。

流雪溝を設置するための条件として、近くに必要水量を得られる河川などの水源が確保されていること、適当な流速が必要なため、ある程度のこう配が確保できること(平地でも流雪溝底面のこう配を確保すればよい)、流末処理に河川や放水路などが利用できることなどが挙げられる。

*この章は主として、印刷発表(6)を基として記述した。



写真 2.1 昭和60年2月の新井市市街地の積雪状況



写真 2.2 新井市市街地における流雪溝を利用した雪処理の状況

流雪溝は、維持管理費が少ないこと、運搬排雪のための機械や雪捨場が不要となること、側溝として路面排水に利用できること、地元民の協力によって容易に除雪を行うことができることなど多くの利点を有している。

しかしその反面、通常流雪溝にはふたを設けてあるが、転落事故の恐れがないとはいえないこと、排雪を行うときに投入の仕方を誤ると、溢水して民家や道路を浸水させる恐れがあること、完全な機械化が困難なために人力の確保が必要となることなどの欠点もある。

このように、流雪溝は欠点に比べ、利点が大きく、最近では上越市の高田市街地や新潟市の中心部など、ほとんど傾斜のない都市の中心部でも設置されるようになってきており、設置箇所が増加する傾向にある。

2.1.3 河川水利用の散水融雪

河川水利用の散水融雪は、水温がかなり低温にならない限り、完全な消雪が可能である。しかも、連続散水によって路面の凍結を防止できる利点を有している。

ただ、河川水は地下水に比べ、水温が低いので(冬期の水温は2～4℃程度)散水量が多くなる傾向にあるが、実際には自動車の走行によるかく乱効果が大きいので、散水量は地下水に比べ、それほど多くはならない。しかし、水温が0℃近くになると融雪効率が悪くなるので、積雪が未融解状態になり、そのため路面が湛水したり、民家が浸水することになる。その他、水とスパイクタイヤやタイヤチェーンとの相乗作用により路面、路盤の損傷が大きいこと、歩行者や家屋などに融雪水が飛散すること、路面の凍結によって交通障害が生じることなどの欠点もある。さらに、河川水に含まれるじんかいによるポンプやノズルの目詰まりの問題や水温・交通量・融雪処理能力の相互関係の解明など技術的に解決しなければならない問題も残されている。

河川水利用の散水融雪は、地下水利用のそれと比べて大差がないので、地盤沈下を起こさないという点からも、問題点を解決させ、水源を地下水から河川水へと変えていく努力が必要となる。

2.1.4 海水利用の散水融雪

海水利用の散水融雪は、昭和43年に青森県で試験区間を設けたのが最初である。

海水はほぼ無限に存在すること、塩分が含まれているため氷点が低いので水温が低くても消雪効果があること、低水温のため霧が発生しないことなどの利点がある。さらに、散水区間以外でも自動車のタイヤの引きずり効果によってかなりの区間に圧雪の発生が見られないなどの利点もある。

しかし、自動車や鋼構造物のさび付きをはじめとした塩公害が発生すること、海水を送るためのポンプや配水管などの防蝕をはかる必要があること、海水に含まれるじんかいによって目詰まりが生じることなどの欠点を有している。

このように、利点もあるが、つねに塩分による公害問題が付きまとうので、あまり望ましい方

法とはいえない。

2.2 地下水利用の散水融雪

地下水利用の散水融雪は主に地下水の熱エネルギー源としての性質を利用したものであり、昭和38年に長岡市で初めて実用化された。

2.2.1 地下水利用の散水融雪の得失

地下水利用の散水融雪は、完全消雪が可能であり、残雪があってもシャーベット状になり、自動車の走行によるかく乱効果によって融雪が促進され、圧雪となって残ることがないことや、連続散水することによって路面凍結を防止できることなどの利点を有している。

しかし、地下水を多量に揚水するため、地下水位が低下し、地盤沈下が生じる。しかも後述のように、地盤沈下が止りにくく、累積沈下量も極めて大きくなる。その結果、単なる公害にとどまらず、将来災害が発生する可能性も高くなる。

また、地下水位の低下が著しいため、既設井戸の水源が枯れること、積雪が多い時は未融解の積雪のため路面が湛水したり、民家が浸水すること、水とスパイクタイヤやタイヤチェーンとの相乗作用により路面、路盤の損傷が大きいこと、路面にわだち掘れが生じると歩行者や家屋などに融雪水が飛散すること、揚水量が不足したり停電のときには消雪できないことなどの欠点がある。その上、気温が低下しているとき、散水を停止すると、路面の水が凍結する可能性が高いこと、散水施設の境界付近で路面状態が急に変わるため、路面が凍結しやすいこと、気温が極端に低い場合、散水によって霧が発生することなどにより、交通事故が多発する恐れもある。

このように、比較的手軽に消雪ができ便利であるという利点もあるが、多くの欠点を有してお



写真 2.3 小千谷市内の病院駐車場における消雪パイプによる散水融雪状況

り、しかも将来にわたって大きな代償を支払わなければならなくなるので、決して望ましい方法とはいえない。

また最近では、その手軽さから建物の屋根や駐車場(写真2.3参照)の消雪にも地下水が利用されるようになり、揚水量も急増しており、ますます地盤沈下を助長する結果となっている。

2.2.2 散水融雪の状況

消雪のため地下水を揚水し、散水融雪している地域は、北は北海道から南は島根県に至っており、そのほとんどは日本海沿岸地域である。特に、豪雪地域である新潟県では、県内の大半の市街地や部落の中心部で消雪用施設が設置されている。

昭和36年に長岡市で初めて消雪パイプが設置された。それ以後、新潟県では増加の一途をたどっており、現在道路用の消雪パイプの総延長距離が1,400km、井戸の総数が5,000本といわれるまでに普及している。現在全国で設置されている消雪パイプの総延長距離の過半数が新潟県となっている。

1 m²当たりの道路の消雪に要する地下水量は、気象条件や自動車の通行量によって異なり、また地域差もあると思われるが、おおむね0.2l/min(0.3m³/d)程度必要である。

さらに、地下水利用の散水融雪が、幹線道路あるいは鉄道といった公共輸送機関を中心に用いられてきたものが、個人の住宅の屋根や駐車場などの消雪に用いられるにおよび地下水の使用量は桁違いに増加している。新潟県の場合、これら消雪に要する地下水の揚水量は1日当たり、新潟市を中心とした新潟地域や長岡市を中心とした長岡地域で100万 m³以上、上越市を中心とした上越地域や六日町を中心とした南魚沼地域で50万 m³に達しているものと思われる。

写真2.3は小千谷市内の病院の駐車場における消雪パイプによる散水融雪状況を示したもので

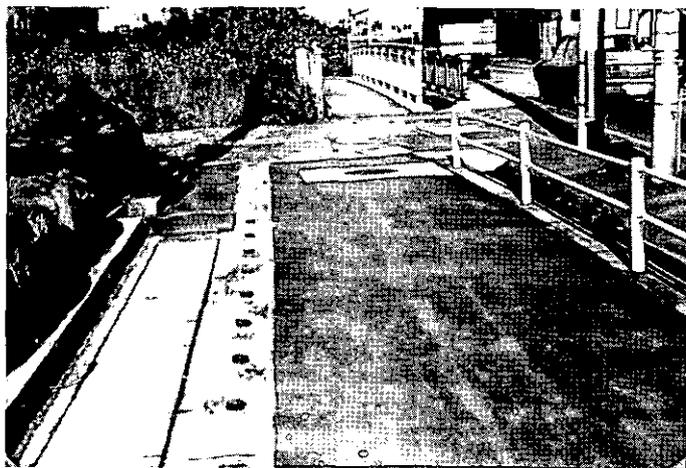


写真 2.4 新潟県六日町北辰小学校付近の消雪パイプ設置状況

ある。写真 2.4 は六日町北辰小学校付近の舗道を消雪するために設置されている消雪パイプのノズルを示したものである。前方に見える鋼鉄製のふたの下に井戸がある。

消雪用の地下水揚水のため、昭和59年の豪雪の際、上越地域と南魚沼地域では、上越市西城町で101mm、南魚沼郡六日町余川で92mmの年間沈下量を記録し、全国1、2位の地盤沈下地域となった¹⁾。

2.2.3 消雪用地下水量原単位

散水融雪における単位面積当たりの地下水の必要水量は、気象条件、散水水温、交通条件などによって左右される。その算定式は、次式が広く用いられている²⁾。

$$q = \frac{w \cdot (80 + 0.5 |t_s| + t_2)}{6 \cdot \eta \cdot (t_1 - t_2)} \quad (2.1)$$

ここに、

q : 単位面積当たり必要散水量 ($l/m^2 \cdot \text{min}$)

w : 計画対象降雪強度 ($g/cm^2 \cdot h$)

$$w = 0.425 \cdot \rho \cdot Hm^{0.7}$$

Hm : 平均日降雪深 (cm/d)

ρ : 降雪の密度 (g/cm^3)

t_1 : 噴水するときの水温 (散水温, $^{\circ}C$)

t_2 : 側溝に流れ落ちるとき水温 (末端水温, $^{\circ}C$)

t_s : 降雪の温度 ($^{\circ}C$)

η : 融解の効率

例えば、平均日降雪深 (Hm) を $20cm/d$ 、降雪の密度 (ρ) を $0.1g/cm^3$ 、噴水するときの水温 (t_1) を $13^{\circ}C$ 、側溝に流れ落ちるとき水温 (t_2) を $5^{\circ}C$ 、降雪の温度 (t_s) を $-1^{\circ}C$ 、融解の効率 (η) を 0.7 とすると、単位面積当たり必要散水量 (q) は、次のようになる。

$$w = 0.425 \cdot 0.1 \cdot 20^{0.7} = 0.346 g/cm^2 \cdot h$$

$$q = \frac{0.346 \cdot (80 + 0.5 + 5)}{6 \cdot 0.7 \cdot (13 - 5)} = 0.880 l/m^2 \cdot \text{min}$$

また、散水によって消雪する平均幅員を $6m$ とすると、道路 $1km$ に要する地下水の量 (Q) は、次のようになる。

$$\begin{aligned} Q &= 0.880 \text{ (l/m}^2 \cdot \text{min)} \cdot 6 \text{ (m)} \cdot 1000 \text{ (m)} \\ &= 5280 \text{ (l/min)} \\ &= 7600 \text{ (m}^3\text{/d)} \end{aligned}$$

したがって、道路1 kmに1日20cm降った雪を溶かすためには、約7,600m³の地下水が必要となる。

引用文献

- 1) 環境庁水質保全局(1987): 全国の地盤沈下地域の状況(昭和60年度), 123 p.
- 2) 日本建設機械化協会(1977): 新防雪工学ハンドブック. 森北出版, 東京, 317 p.

3 六日町の自然と環境

3.1 六日町の概要

六日町は図3.1に示したように、新潟県の南東部に位置し、その東境で群馬県に接している。六日町は古くから越後と関東を結ぶ街道筋に位置し、上杉謙信の関東出兵の拠点となった町である。徳川時代は参勤交代の宿場町として栄えた町であった。また、六日町市街地の東部、魚野川の対岸にある坂戸地区は越後新田氏及び上田長尾氏が居城した坂戸城の城下町として栄えた。現在でも町内には、上越新幹線、関越自動車道、上越線、国道17号などの幹線が集中し、ほぼ南北に走っている交通の要衝であり、特にスキーの基地としてにぎわっている。

六日町では、昭和32年に水溶性天然ガスを採取するための試掘中に温泉が湧きだした。この温泉は新第三紀中新世の地層中に賦存されており、泉温は48～53℃で、泉質は食塩泉である。現在は源泉が4か所あり、その内坂戸地区と西山地区で温泉街を形成し、約20軒の旅館がある。温泉水は、気温に比べてその温度が高いことと、塩分を含んでいることにより、浴用に使用した後の温泉水もほとんど消雪用には使われていない。

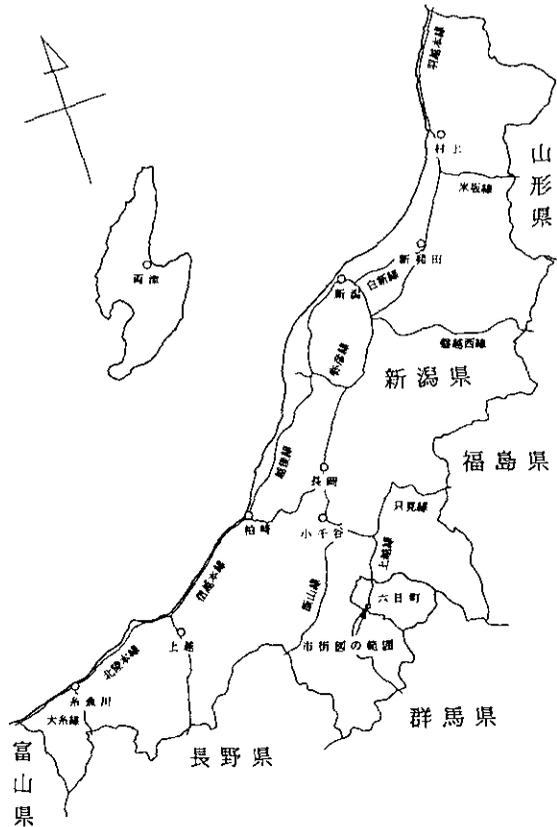


図 3.1 新潟県略図

3.2 六日町の地形・地質

六日町の町域の大部分は山地であり、東と南は三国山脈を構成する越後山地に、西は北北東～南南西に伸びる魚沼丘陵に含まれる。六日町の中心部は、信濃川水系の魚野川沿いに発達した六日町盆地と呼ばれる構造的な盆地上に位置しており、その地盤は主として魚野川が運搬してきた堆積物により構成されている。このように、六日町は、その地形学的特徴から、越後山地地域、魚沼丘陵地域、及び六日町盆地地域の3地域に分けることができる。

越後山地地域は、中生代から新生代新第三紀中新世にかけて生成された岩石からなっている。主たる構成層は、中新統のグリーンタフといわれている凝灰岩類からなる地層である。

魚沼丘陵地域は、新第三紀中新世後期から第四紀更新世前期にかけて生成された地層によって構成されている。新第三紀中新世後期から鮮新世にかけての時代は、貝化石を含む海成層である。第四紀更新世前期の地層は魚沼層と呼ばれている。この時代は、越後山地が急速に隆起した時代でもあり、礫層が発達しており、特に魚沼層の最下部の礫層の層厚は200mにも達している。

六日町盆地は、新第三系による基盤の向斜構造上に形成されており、北北東～南南西方向に延びる、最大幅約5km(塩沢町付近及び六日町北部)、最小幅約2kmの狭長な盆地であり、盆地の中央部には、魚野川が北流する。図3.2に六日町盆地の地形図を示す。六日町盆地の地形は著しい扇状地の発達によって特徴付けられており、魚野川に沿ったはん蓋原に左右両岸から流入する小河川の扇状地が並ぶ。概して段丘の発達は貧弱である。右岸側には、標高2,000m前後の急峻な三国山脈に源を發し、20km弱を流下する登川、三国川及び宇田沢川が、上流から順に魚野川に流入し、登川は単独で、三国川と宇田沢川は複合して扇状地を形成している。それぞれの扇状地は、六日町盆地の規模からすると広大で傾斜が比較的緩いという特徴を有している。左岸側からは、標高700m前後のなだらかな魚沼丘陵東面を4kmほど流下した鎌倉沢川、庄之又川、四十日川、押堀川及び名木沢川が、上流から魚野川に流入している。各河川の形成する扇状地は、右岸のそれに比べ、小規模ながら傾斜は急であり、明りょうな扇状地地形を呈する。これらの扇状地はほとんど開析されておらず、現在まで活発にその形成活動が進行してきている。わずかに魚野川左岸の四十日川以北の扇状地の扇端部が、魚野川に浸食され、あたかも段丘のような様相を呈している。

一般的にいて、六日町盆地内では第四紀において堆積作用が一方向的に進行している。魚野川は、本流でありはるかに流量の多い信濃川よりも緩やかなこう配となっている。各支流が運びだしてくる砂礫は、魚野川本流に入ると急に流速が遅くなるため、運搬されなくなり、堆積するようになる。この結果として、魚野川と支流である鎌倉沢川、庄之又川、登川などとの合流付近に扇状地が形成され、魚野川の流路はこれらの扇状地に押しやられる形で蛇行している。このこう配をみると、支流との合流点より上流側で緩やかになり、下流側で急になっている。このため、支流が運びだす砂礫が本流をせき止める形になり、その後背地に沼沢地を形成した。

六日町の市街地は、この盆地の中心にあり、鎌倉沢川と庄之又川の両扇状地の間に位置してい

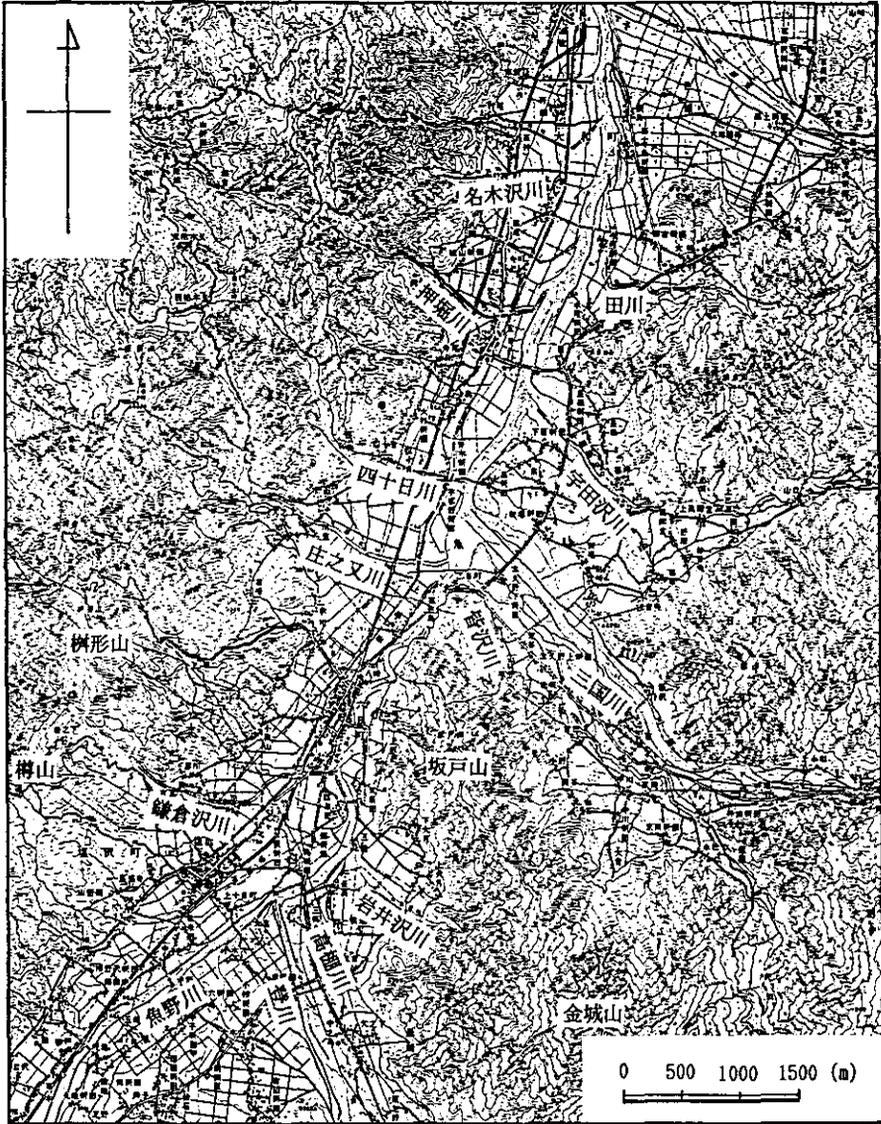


図 3.2 六日町盆地の地形図

る。この地区は六日町盆地の中で最も広い平たん地である。この平たん地は、市街地中心部に向かってわずかにくぼんだ地形である(図3.5参照)。このことは、この地区が北端を新第三紀以前に形成された三国山脈の末端の坂戸山や金城山と、第四紀に形成された庄之又川・鎌倉沢川・登川の各扇状地で囲われた魚野川による湿地あるいは沼沢地であったことを示唆している。これは、後述する六日町盆地の軟弱な地層の分布からも裏付けられる。

3.3 ボーリング調査

昭和58年10月からボーリング調査を3か所で実施した。その位置は図3.3を参照されたい。

第1地点：六日町役場

六日町大字六日町180，調査深度 55m

ボーリング柱状図を付図1に示す。

第2地点：旧六日町町立六日町中学校

六日町大字六日町865，調査深度 40m

ボーリング柱状図を付図2に示す。

第3地点：六日町町立北辰小学校

六日町大字余川，調査深度 200m

ボーリング柱状図を付図3に示す。

ボーリングは、ロータリー式ボーリング機械を用いて実施した。掘進は、循環泥水掘削で行った。標準貫入試験は、JIS・A・1219に基づきトンビ法によって行った。また、乱さない土試料の

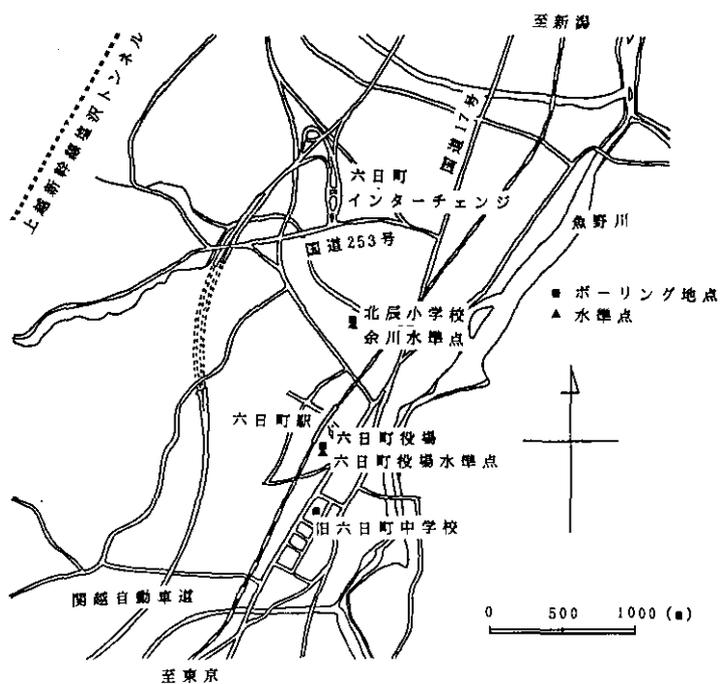


図 3.3 六日町中心部概略図

採取は、固定ピストン式シンウォールサンプラー又はトリプルチューブサンプラーを用いて行った。

3.4 六日町の地盤

本研究で作成した地層断面図は六日町市街地の東西方向について3断面、南北方向について1断面の計4断面である。これらの地層断面作成上必要であった図面を図3.4, 3.5に示す。東西方向の地層断面図は図3.6~3.8に、南北方向は図3.9に示す。

図3.4は、六日町町内において収集した既存のボーリング資料及び今回国立公害研究所におい

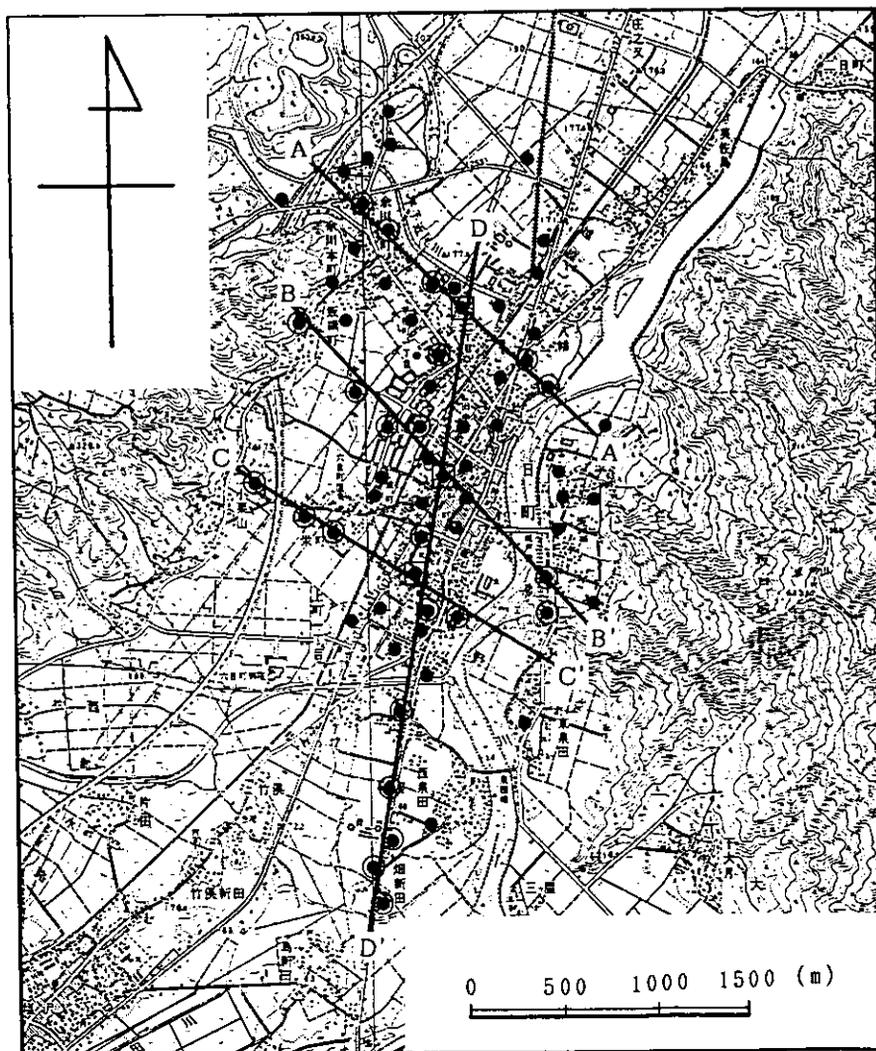


図 3.4 既存ボーリング地点位置図及び地層断面図作成位置図

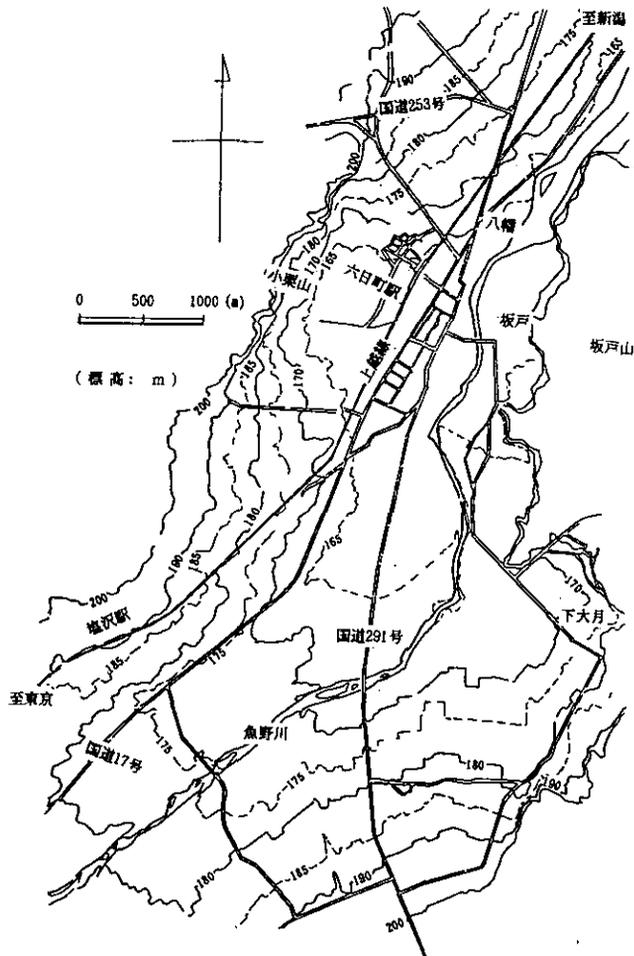


図 3.5 六日町中心部の等高線図

て実施したボーリング調査の位置をプロットした図である。さらに、上述の4つの地層断面図の位置も図中に示した。

図3.5は、六日町における標高を5m間隔の等高線で示した図である。

図3.6は、六日町駅より北のA-A'断面線についての地層断面図である。六日町駅の北側では完新世及び更新世末期に堆積したN値0~1の軟弱な粘性土層が深度約30mまで達している。また、N値は標準貫入試験によって得られる値であり、この値の大小によって地盤の硬軟などの判定に用いられる。東側の魚野川付近では軟弱な粘性土層が欠け、河成の砂礫層が分布している。A層の基底礫層（AG 2層）の基底部は、六日町駅の北側では標高約130m付近にあるが、それから東に向かうと、しだいに浅くなり、六日町女子高等学校では標高約160mとなっている。

A層の下位に更新世に堆積したN値50以上の礫層を主体としたB層が分布している。B層に

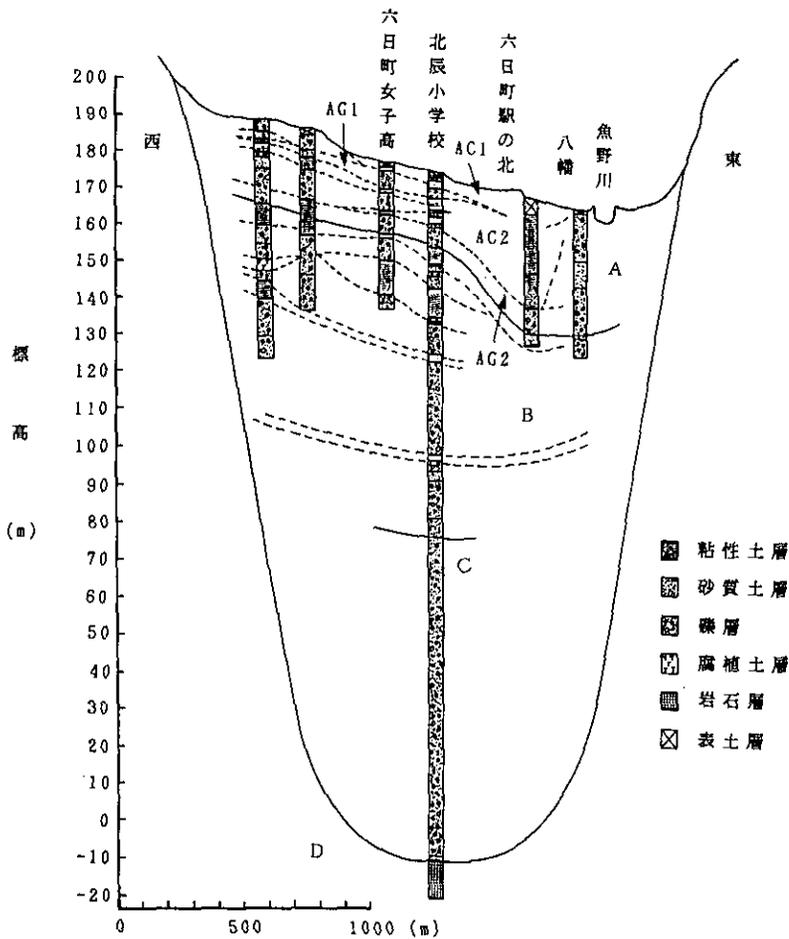


図 3.6 地層断面図 (A-A'断面)

は粘性土層が数枚認められ、その最大層厚は15mとなっている。B層の下位にC層が認められる。C層は、ほとんど礫層からなっており、更新世前期に堆積した魚沼層と思われる。余川水準点付近の北辰小学校で行ったボーリング調査で、深度185mまで砂礫層が続いていることを確認している。

図3.7は、六日町市街地ほぼ中央部(断面線B-B')についての地層断面図である。六日町内中央部では、駅以北(A-A'断面線)よりも地層が単純になっており、A層とB層の境界はほぼ深度40m(標高130m)に位置している。最大層厚30mの軟弱な粘性土層は、レンズ状に挟む礫層(AG1層)によって、AC1層とAC2層の上下2枚に分けることができる。B層は礫層を主体としており、B層中に含まれる粘性土層はA-A'断面線とは違って1層(層厚15m)しか認められない。

図3.8は、図3.7の六日町市街地中央部の断面線より約600m南に位置するC-C'断面線である。

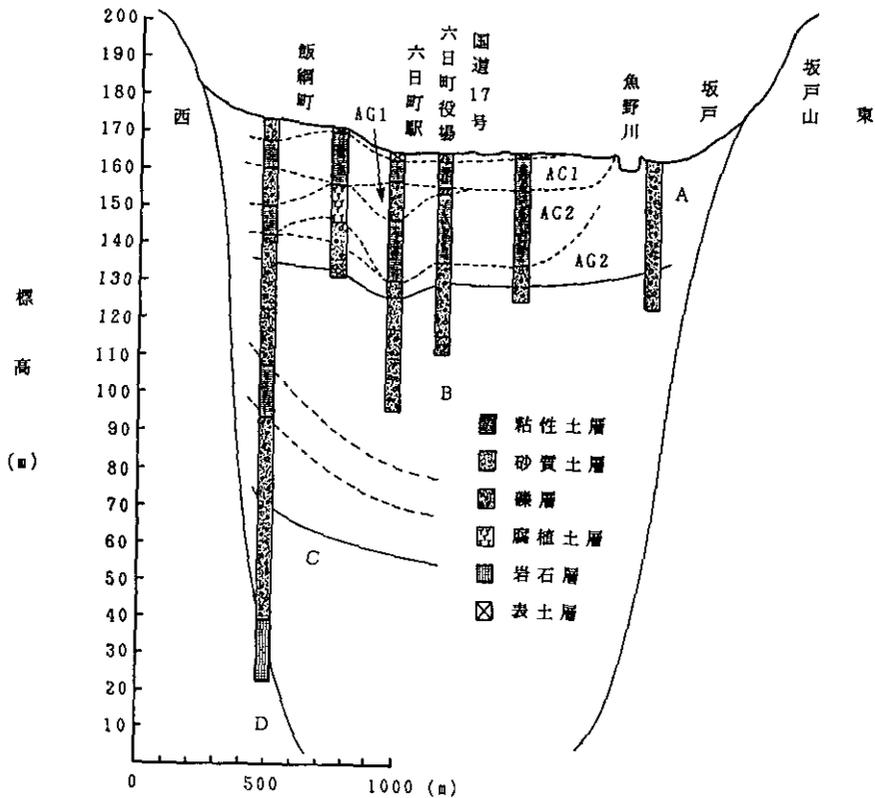


図 3.7 地層断面図 (B-B'断面)

この図を見ると、魚野川以西では、図3.7と同様に、地表面から約40mの深さまで、N値0～1の軟弱な粘性土層が存在し、その間に挟む最大層厚8mのレンズ状の礫層 (AG1層) によって、上下2枚に分けることができる。

図3.9は六日町内を南北方向に断面線を取り地層断面図を描いたものである。この断面図を見ると、六日町市街地は、北部から中央部にかけて軟弱な粘性土層が徐々に厚くなり、中央部から南部にかけて反対に急激に薄くなり、西泉田より南では軟弱な粘性土層が欠けていることが分る。

また、六日町を東西方向に切ったA-A', B-B', C-C'断面図 (図3.6～3.8) を見ると、すべての断面図の西側に腐植土層が分布している。このことは、魚野川西側の後背低地に沼沢地が形成され、そこにヨシ・アシなどが繁茂していたものと考えられる。

図3.10に六日町市街地におけるA層中の粘性土層の層厚の分布図を示す。この図は、図3.4に示したボーリング資料から各地点のA層中の粘性土層 (AC1層とAC2層) の全層厚を調べ、等厚線として示したものである。この層厚分布図を見ると、六日町駅周辺において層厚が20～30mとなり、六日町駅より西側では、層厚が30m以上と厚くなり、六日町温泉付近で約40mと

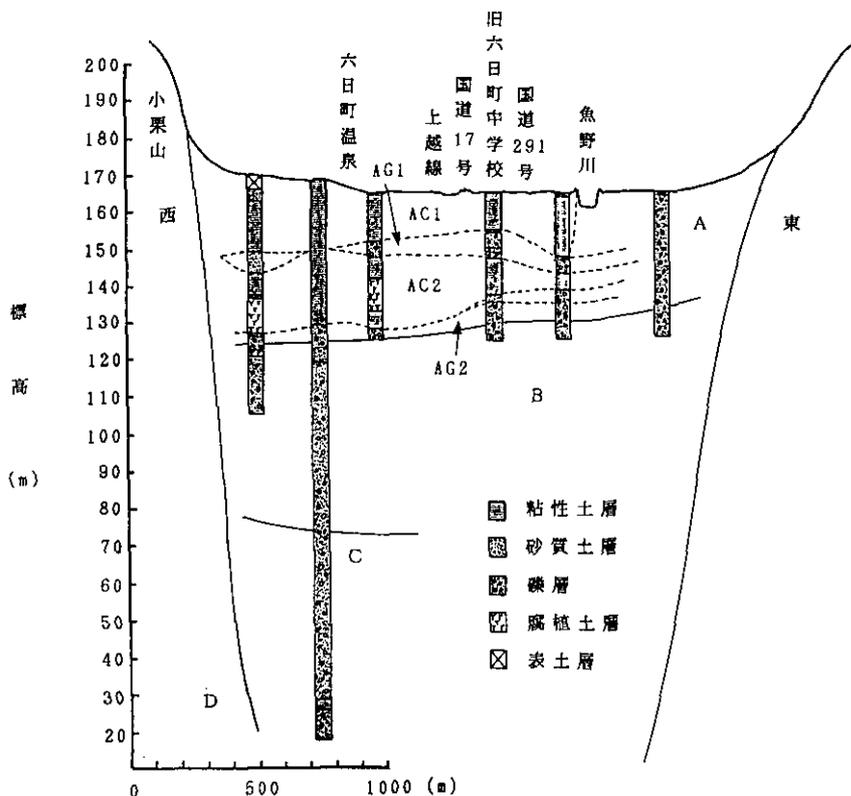


図 3.8 地層断面図 (C-C断面)

最も厚くなっている。また、六日町駅より東側では魚野川付近までに急こう配で層厚が薄くなり、魚野川から東方に位置する坂戸山付近では粘性土層がほとんど存在していないことが分かる。

六日町温泉・六日町ニュー越後荘におけるボーリングで、AC 2層の下部層に相当する深度 28.5~34.0mの腐植土(泥炭)層中から採取された土試料の¹⁴C法による絶対年代は、ほぼ 15,000~17,000 BC という値を示していた¹⁾。したがって、AC 2層は、東京都の七号地層に代表される沖積層の下部層とほぼ同じ時代に堆積したことになる。

以上をまとめると、第四紀層の全層厚は約 200m と思われるが、そのほとんどが砂礫層からなっている。B層は、更新世に堆積した地層と考えられ、その主体は礫層であるが、粘性土層を数枚挟んでいる。A層の堆積年代は、海岸平野に広く発達しているいわゆる沖積層のそれにほぼ匹敵しているものと考えられる。A層の基底礫層であるAG 2層は、沖積層の基底礫層(BG層)にほぼ匹敵し、AC 2層は、更新世末期に堆積した沖積層下部層の七号地層にほぼ相当している。また、AG 1層は有楽町層の基底礫層(HBG層)に、AC 1層は完新世に堆積した沖積層上部層の有楽町層にほぼ相当するものと考えられる。軟弱な粘性土層は、市街地の中心部で厚くなる傾向に

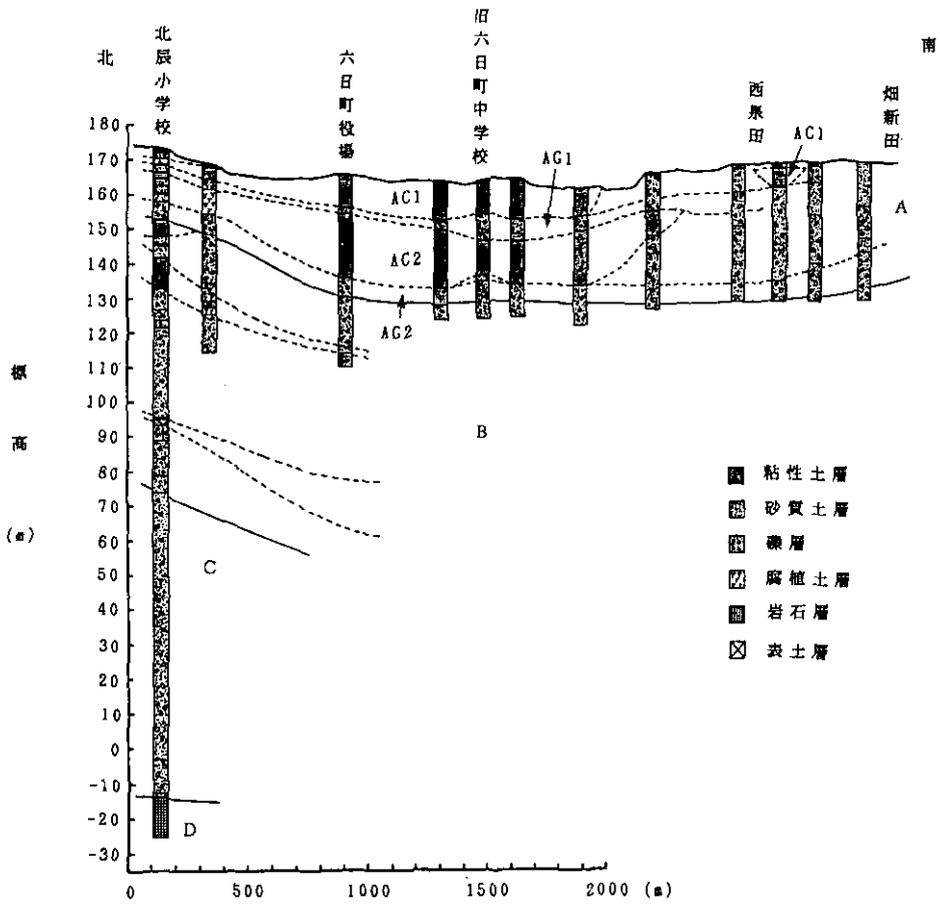


図 3.9 地層断面図 (C-D断面)

ある。特に、深度40m以浅に層厚が10~20mの粘性土層が2層存在しており、井戸のほとんどが深度40~60mであることを考えると、両層が地盤沈下の主体となっているようである。なお、この2枚の粘性土層は、魚野川支流の扇状地間に形成された湖沼性堆積物と考えられる。

3.5 六日町の気候

六日町盆地は日本海側の内陸に位置して、典型的な日本海式気候区に属し、気候的な特徴としては冬の豪雪と、夏期のフェーン現象による高温状態があげられる。冬期は月平均日照時間が100時間程度と少なくなり、湿度は80%以上と高湿になる。背後に2,000m級の上越国境山脈をひかえる六日町盆地は特に降雪量が多い。

また、内陸盆地であるために寒暖の差が大きく、年平均気温は11.7℃であるが、夏期の8月の平均気温は25.2℃に達する。一方、冬期の1~2月の平均気温は、0℃を下回り、かつて-20℃

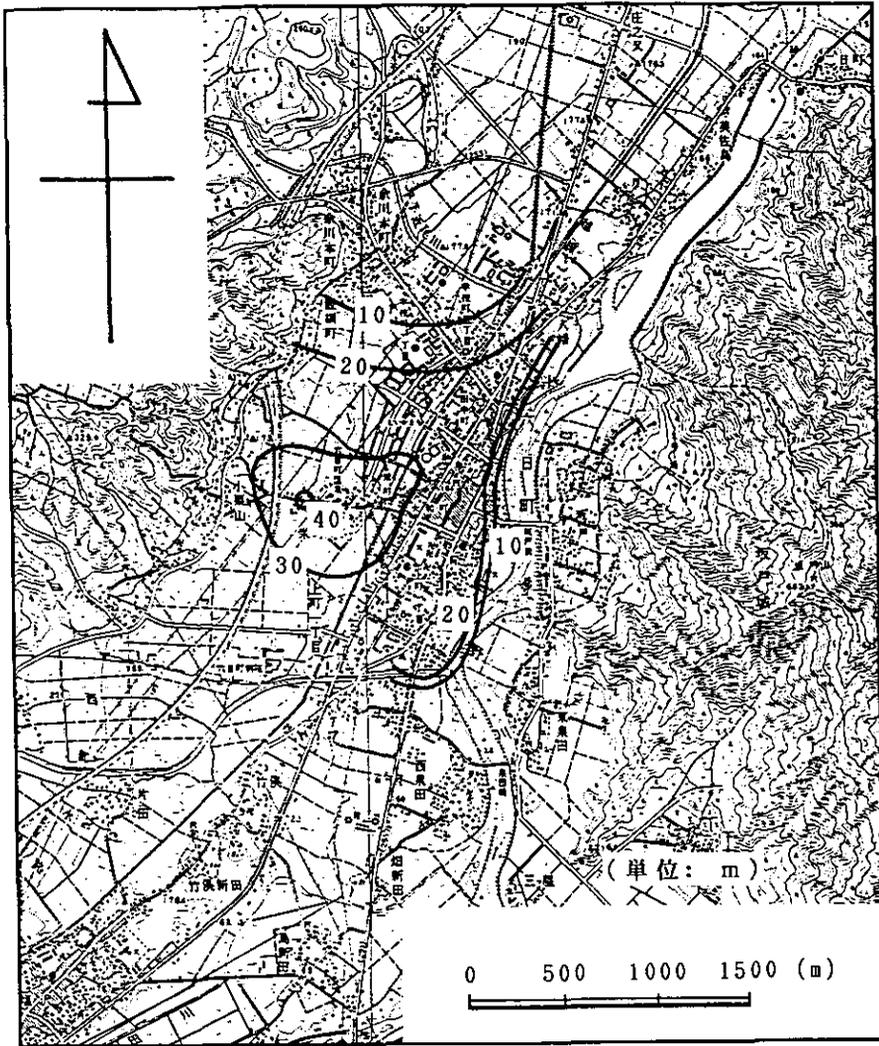


図 3.10 粘性土層の層厚分布図

以下の最低気温を記録したこともある。

図 3.11 に過去10年間の六日町の年間降水量と降雪深の変動を示す。この内降雪深については、歴年ではなく、前年の降雪の始まりから当該年の降雪の終わりまでの合計値である。図 3.12 及び図 3.13 には、同期間の六日町の月別降水量と降雪深を示す。これらは、六日町市街地の北東約 6 km にある六日町大字上原の城内中学校 (37°02'56"N, 138°56'06"E, 海拔 182m) において測定したものである²⁾。この期間の年間平均降水量は、2,638mm であり、日本の年間平均降水量 (約 1,800mm といわれている) を大きく上回っている。年間降水量の変動は、昭和 62 年の 1,840mm を除くとあまりみられず、毎年一定量の降水が観測されている。月別の降水量を見て

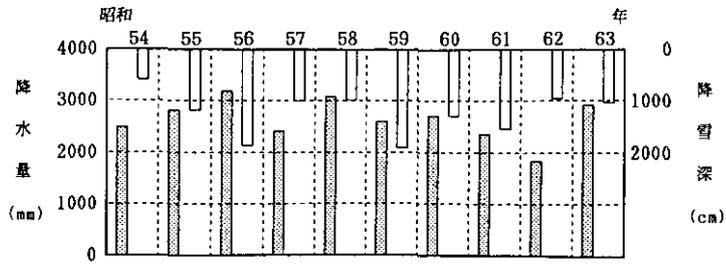


図 3.11 過去10年間の六日町の年間降水量と降雪深の変動
(文献²⁾のデータに基づく)

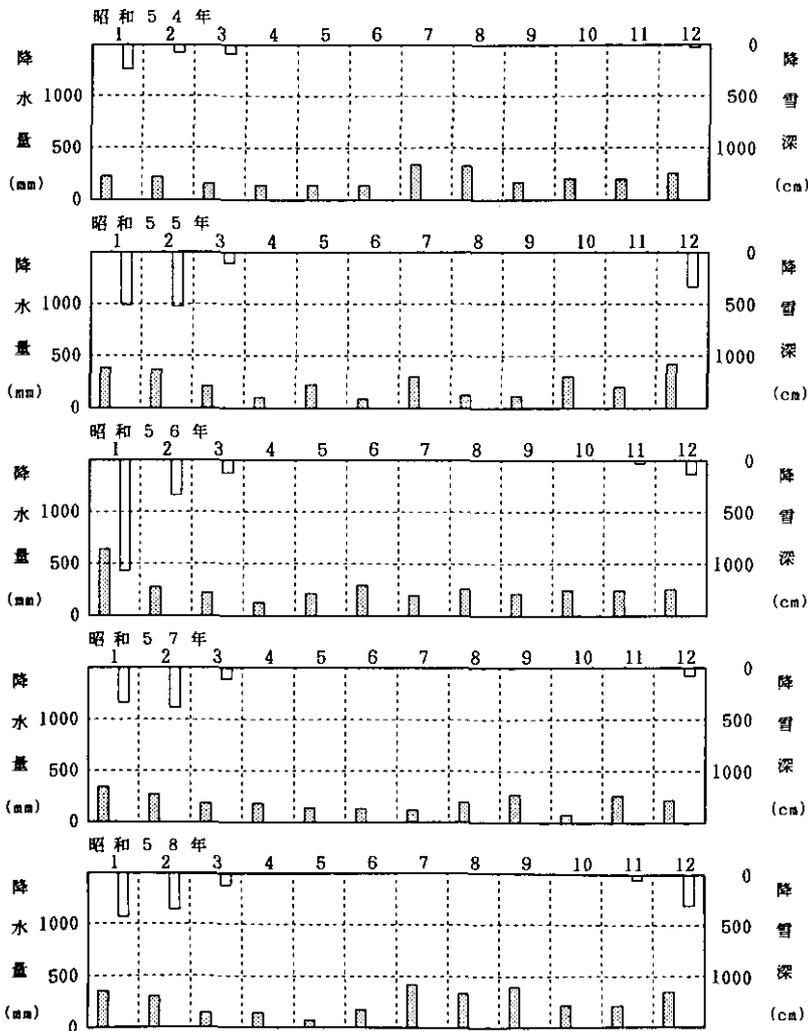


図 3.12 六日町の月別降水量と降雪深(昭和54~58年)
(文献²⁾のデータに基づく)

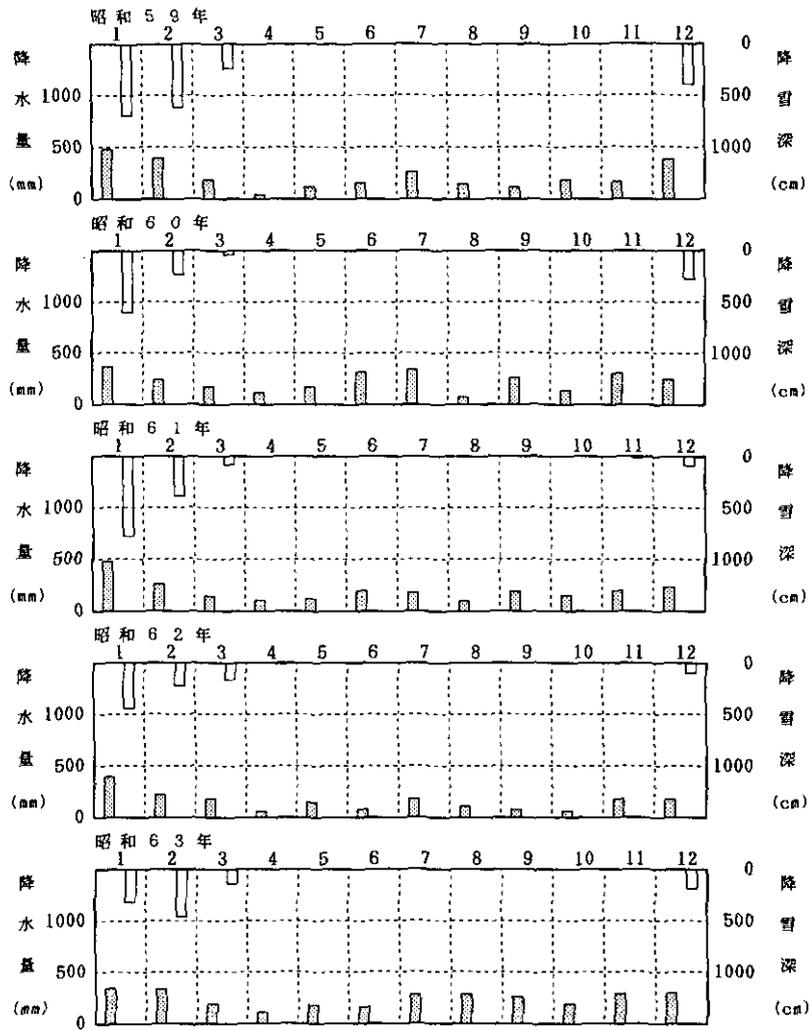


図 3.13 六日町の月別降水量と降雪深 (昭和59~63年)
(文献²⁾のデータに基づく)

も夏期の7~9月と、冬期の12~2月に安定した降水が見られる。昭和62年は一年を通じて降水量が少ない年であったが、特に夏期に降水量が少なかった。

しかし、降雪深は変動が大きく、最小値が昭和54年の594cm、最大値が昭和59年の1.910cmであり、3倍以上の開きがある。月別で見ても昭和56年1月には、1,071cmもの降雪を記録しており、この地域では、雪の多い年と少ない年の降雪量の差が大きく、豪雪年には、集中的に降雪が起きることがうかがわれる。

引用文献

- 1) 堀川幸夫(1981):六日町に産出した泥炭の絶対年代について.六日町西山の自然,六日町役場環境課, 67-68.
- 2) 新潟県環境保健部公害対策課(1989):南魚沼地区の地盤沈下(13). 新潟県, 22p.

4 地下水利用と地盤沈下

4.1 地下水利用の現状

六日町は、三国山脈を刻む谷をはじめとした数多くの中小河川が魚野川に注いでいる。このため、河川水に恵まれており、昭和30年代まではほとんど地下水を利用していなかった。

豊野¹⁾によると、「昭和40年の国道17号線開通に伴って、産業の発達、交通機関の急増、生活水準の向上による上水道、豪雪地における道路融雪対策に地下水の利用が急激に増加してきている。このため、地下水位の低下、地盤沈下などの現象が生じ、さらに上越新幹線のトンネル工事による影響で西山扇状地をはしる小規模河川の流水が減少して農業用水にも大きく支障をきたしている。」

新潟県では、昭和53年12月に六日町町内のすべての井戸の諸元を記載した井戸台帳を整備し、その後新設された井戸についてもすべて届出により諸元を把握している。

さらに、県ではこの井戸台帳をもとに昭和62年7月に町内の全井戸を対象にした、アンケート調査を実施し、六日町の地下水利用状況を明らかにしている。図4.1～4.3は、この調査結果²⁾をもとに作成したものである。

図4.1は、昭和55～61年までの六日町町内の全井戸数と、その内消雪用に用いられる井戸の数の変動を示したものである。この図から明らかなように他の用途の井戸はほとんど増加していないのに対し、消雪用の井戸の増加は目覚しくこの期間内に7割近い増加を示している。

六日町市街地(約5 km²)の昭和60年度の地下水揚水量は、約1,150万 m³であり、このうち12～3月までの冬期間の揚水量は、約880万 m³となっている。冬期間の地下水揚水量の約80%が消雪用とされている。

図4.2は、昭和60年4月～61年3月までの六日町町内の地下水全揚水量の月別の変動を示したものである。4～11月の非降雪期には、揚水量が100万 m³程度で一定しているのに対し、降雪

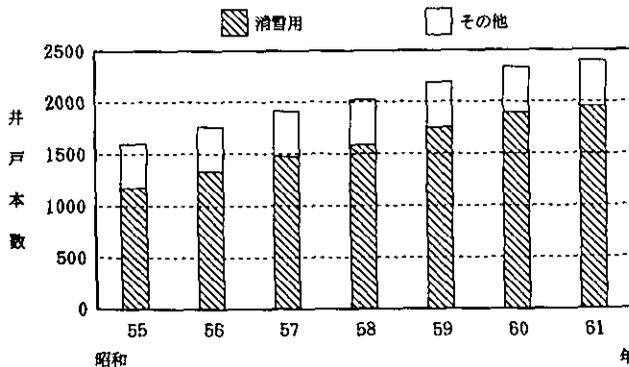


図 4.1 六日町内の全井戸数と消雪用井戸数の変動(昭和55～61年)
(文献²⁾のデータに基づく)

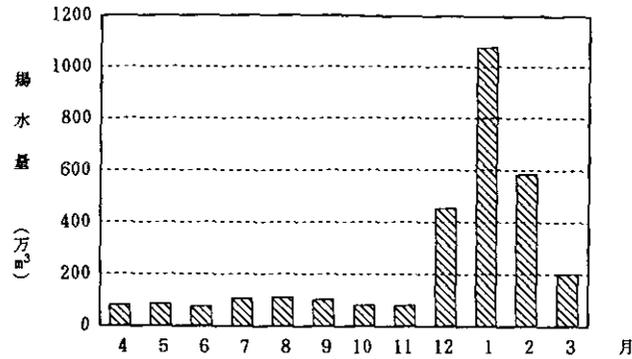


図 4.2 六日町内の地下水揚水量の月別変動(昭和60年度)
(文献²⁾のデータに基づく)



【全揚水量 2,300万m³】

図 4.3 降雪期(昭和60年12月~61年3月)の消雪用地下水の割合
(文献²⁾のデータに基づく)

期である12月~3月には揚水量が著しく増加し、この4か月の総揚水量は2,300万m³に達している。

図4.3は、降雪期の全揚水量の内、消雪用の占める割合を図示したものであり、消雪用の割合が82%に達する。この内、公共道路の消雪に使用するもの(道路用)が23.3%、事業所・官庁・学校などの個人住宅以外の敷地及び屋根の消雪に使用するもの(事業所用)37.1%、個人住宅の敷地及び屋根の消雪に使用するもの(家庭用)21.3%である。

以上のことから、六日町の地下水利用は消雪用が大半を占めており、これが地盤沈下の主たる原因となっているといっても過言ではない。

なお、六日町には温泉が湧出するので、浴用などに使用した後の温泉水を散水融雪するための水源として利用することも考えられる。しかし、温泉水は、十分冷まさないで、散水することによって霧が発生するので、かえって交通障害になりかねないことと、泉質が食塩泉なので、塩公害が発生する恐れがあることなどの欠点を有している。このため、使用後の温泉水をほとんど消雪用には利用していない。

4.2 地下水位の観測

六日町では、昭和48年に市街地の一部で井戸の抜け上がりが続出するようになり、その後地盤

沈下の徴候が見られるようになった。しかも、あまりにも急激な地下水位の低下が生じたため、かなりの消雪用の井戸では、ストレーナーを通して砂や細礫が地下水と一緒に吸い出される現象も見られるようになった。

現在、地下水位観測井は、六日町役場、旧六日町中学校など、4井設置されている。

図4.4～4.11³⁾は、六日町役場に設置された地下水位観測井の昭和55年11月～56年4月にかけての観測記録の一部をそのまま示したものである。

図4.4は、11月27日～12月2日までの6日間の記録である。この時期は、まだ降雪がなく消雪用に地下水を揚水していないため地下水位の低下はみられず、標高162m前後で安定した日周期の変動を繰り返している。変動パターンを詳細に見ると、朝と夕方に水位が、161.5m程度に低下し、午後には20～30cm程度上昇し、夜間になると162.5m程度までに回復している。これは、生活用水の利用に伴ってよく見られる変動パターンである。六日町役場の近傍には、上越線六日

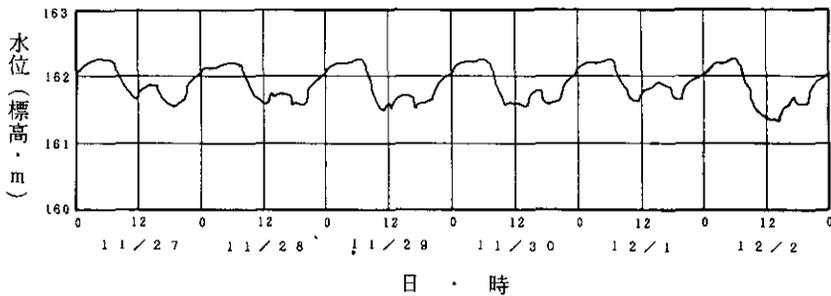


図 4.4 六日町役場地下水位観測井の観測記録(昭和55年11月27日～12月2日)
(文献³⁾を改描)

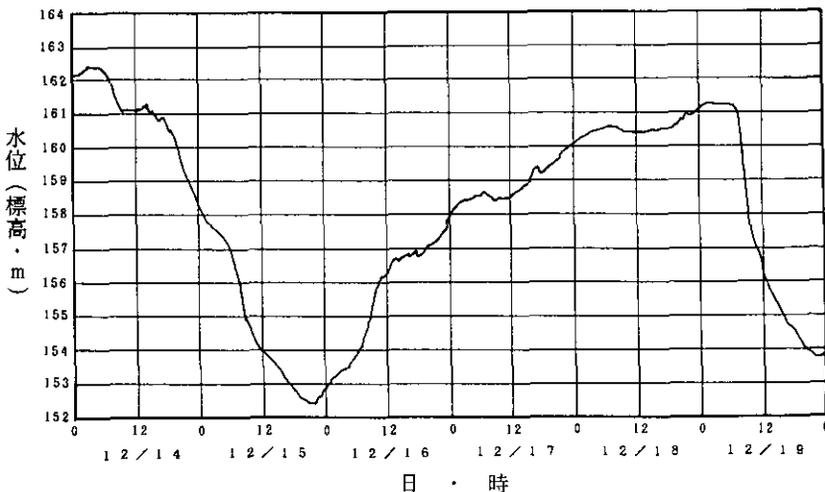


図 4.5 六日町役場地下水位観測井の観測記録(昭和55年12月14～19日)
(文献³⁾を改描)

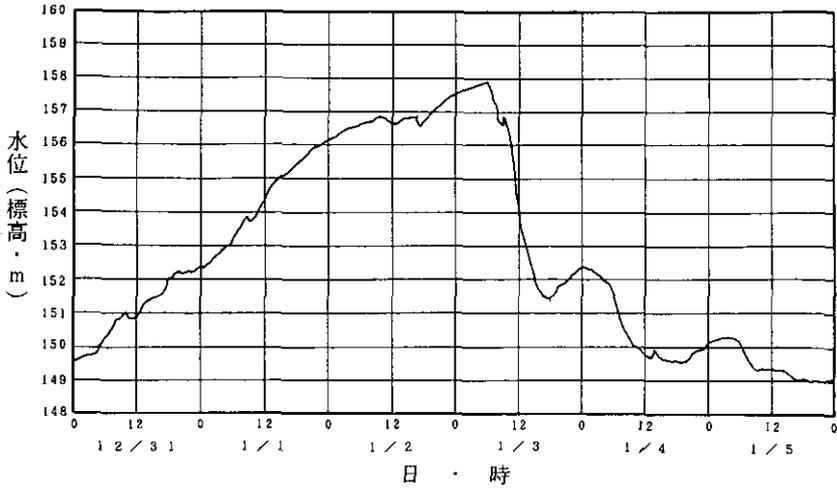


図 4.6 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和55年12月31日～56年1月5日)
(文献³)を改描)

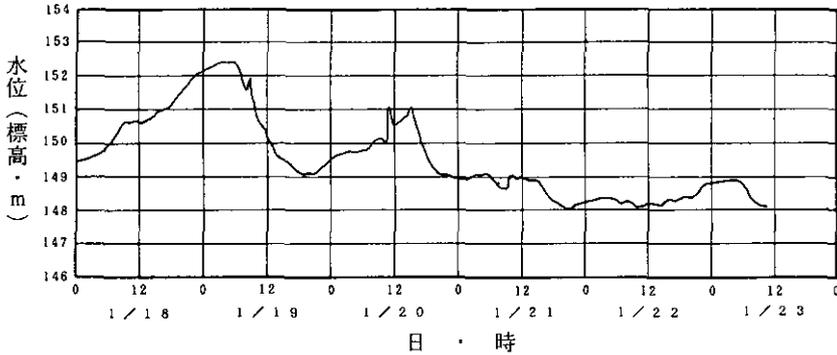


図 4.7 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和56年1月18～23日)
(文献³)を改描)

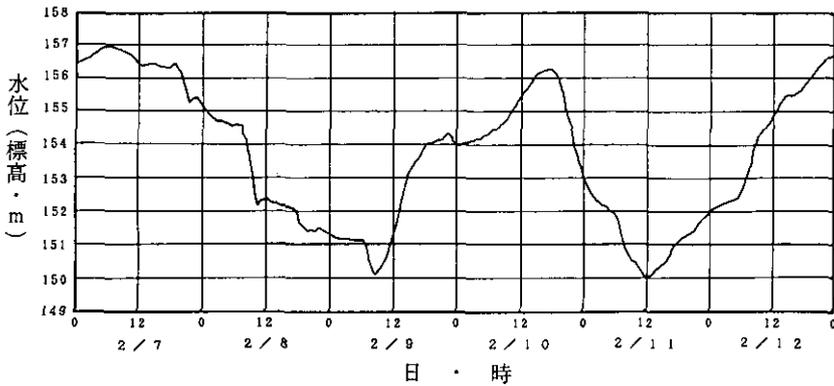


図 4.8 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和56年2月7～12日)
(文献³)を改描)

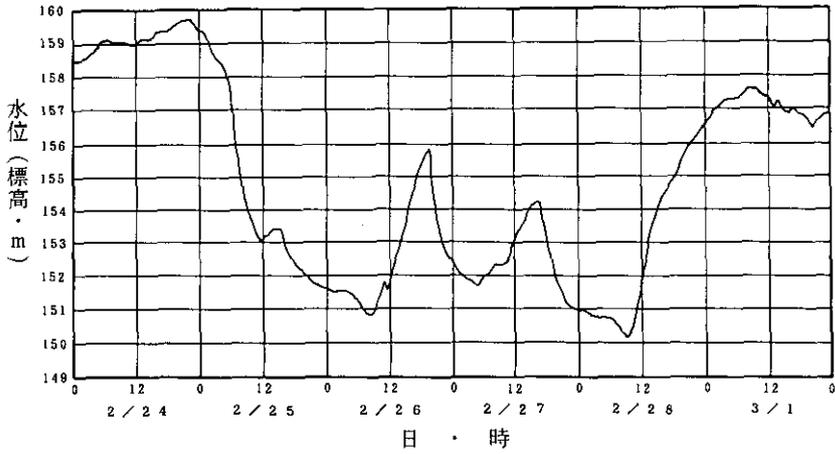


図 4.9 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和56年2月24日～3月1日)
(文献³⁾を改描)

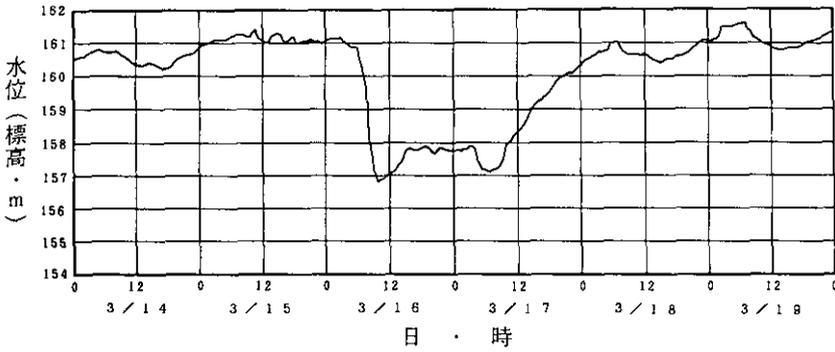


図 4.10 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和56年3月14～19日)
(文献³⁾を改描)

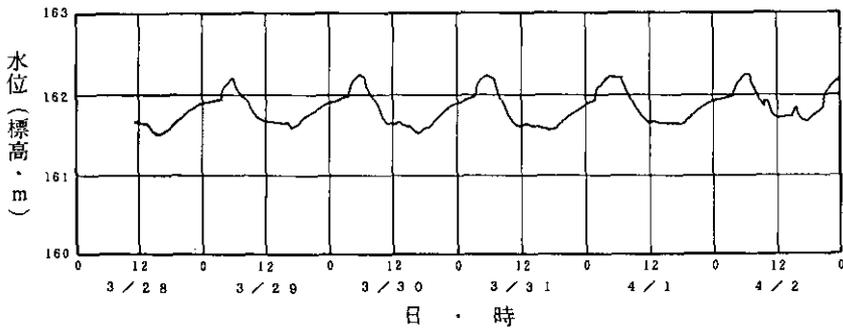


図 4.11 六日町役場地下水位観測井の観測記録 (昭和56年3月28日～4月2日)
(文献³⁾を改描)

町駅をはさんで反対側に上水用に地下水を採取している浄水場があり、この見方を裏付けている。この観測井の非降雪期の観測記録は、おおむねこのパターンを繰返している。

図4.5は、12月14～19日までの6日間の記録である。14日には、この冬初めての本格的な降雪があり、消雪用の地下水の利用が激増したため、地下水位が15日の21時には、152.4mとなり、わずか1日半の間に約10m低下している。しかし、雪が降りやむのに伴い地下水位も回復し、19日の2時には161.2mとほぼ非降雪期の平均値に近いところまで回復しているが、7時にはまた降雪があり、著しい地下水位の低下が観測された。

図4.6は、12月31日～1月5日までの6日間の記録である。この時期になると最低水位は、150mを下回るようになる(12月31日の0～5時、1月4日の10～23時、5日の7時以降)。一方、回復した場合も158mには届かず(3日の7時、157.8m)この期間の平均的な地下水位は消雪用の揚水に伴い大きく低下してきている。

図4.7は、1月18～23日までの6日間の記録である。この時期になると、半分以上の間は、地下水位が150mを下回っている。21日の21時に記録した148mが、この冬の六日町役場観測井で記録した最低水位であった。一方、回復した場合も11日5時の152.4mにすぎずこの期間の平均的な水位はより一層低下している。

図4.8は、2月7～12日までの6日間の記録である。この時期になると、最低水位が、150m以下になることはない(9日8時の150.1m、11日12時の150m)。最高水位も7日の7時に156.9mを記録し、この冬の降雪も峠を越えたことがうかがわれる。

図4.9は、2月24日～3月1日までの6日間の記録である。この時期160m近くまで水位の回復が見られる(24日22時の159.6m)ものの、最低水位も150m近くまで低下しており(26日8時の150.8m、28日9時の150.2m)、いぜんとして降雪に伴う大きな地下水位の変動が見られる。

図4.10は、3月14～19日までの6日間の記録である。この時期になると地下水位は161m前後まで回復してきているが、16日6時～17日にかけて最大で4m程度の消雪用の揚水による地下水位の低下が見られる。

図4.11は、3月28日～4月2日までの6日間の記録である。この時期にはもはや、消雪用の揚水による水位低下は見られず図4.4に示したのと同様の生活用水利用による日周期の変動パターンを示している。しかし、図4.4と比較すると明らかなように、朝と夕方に低下した地下水位の上昇が緩慢である。これは、六日町役場が六日町盆地の中央部に位置するために周辺部よりも標高が低く、地下水位も周辺部より低いためと考えられる。このため、降雪期の終了とともに、役場周辺では、地下水位が回復したものの、周辺部では回復が遅れ、すみやかな水位上昇がみられず、役場周辺のわずかな地下水位の低下に対しても十分な量の涵養が行えなかったためと考えられる。

4.3 地盤沈下の現状

日本海側の豪雪地帯を中心として、大量の地下水を消雪用として揚水することによって、地盤沈下が進行している。

近年、大量の地下水を消雪用として揚水するケースが日本海側の豪雪地域を中心として急増している。特に従来、幹線道路あるいは鉄道といった公共輸送機関を中心に用いられてきたものが、個人の住宅の屋根や駐車場などの消雪に用いられるに及び地下水の使用量は極端に増加してきている。

特に、昭和59年12月下旬の降雪時に、上越地域において公共機関の消雪用地下水の揚水が準備不足のため行われていなかったにもかかわらず、城北中学校内に設置されている高田G2観測井の地下水位が6.4m低下し、地層収縮量が25mmにも達した²⁾。このことは、実態把握が難しい民間の消雪用地下水揚水量が如何に多いかを如実に物語っている。一般家庭や小規模の商店などが掘る比較的浅い井戸について認可制度を設けている市町村は1つもないこともあり、消雪用に利用される井戸の位置、深度、揚水量はもとより、その本数さえも完全には把握できていないのが現状である。なお、六日町では1所帯平均1本の井戸があるものと推定される。

六日町では、昭和50年から水準測量を実施するようになり、地盤沈下の観測が始まった。現在、地下水位観測井は4井設置されており、このうち昭和62年度に移転した旧六日町中学校内にある1井で、地下水位と地層収縮量を併せて観測を行っている。

図4.12⁵⁾は旧六日町中学校に設置されている深度60mの地盤沈下観測井(図3.9のAC1層及びAC2層の総収縮量を観測する。またストレナー位置は、28.87~45.45mで、AG2層及びB層の礫層に位置している。)の地盤収縮量と地下水位変動の観測記録、及び六日町役場に設置されている深度80mの地下水位観測井(ストレナー位置は、52.00~66.00mで、図3.9のB層の礫層に位置している。)の昭和51年からの観測記録である。また、六日町役場及び余川水準点の水準測量結果と六日町町内の城内中学校で観測された降雪量の記録も合わせて示している。この期間の累積沈下量が、余川で355mm、旧六日町中学校で250mm、六日町役場で165mmに達していたことが分かる。余川の記録を見ると、暖冬の昭和58年度の沈下量が16mmであるのに対し、豪雪の昭和59年度は92mmと急増し、全国2位の年間沈下量を示した。

図3.6~3.9で明らかのように、深度40m以深は、ほとんど礫層である。この礫層は、六日町盆地形成後の魚野川によって運搬された堆積物からなっているものと考えられる。地盤沈下の主体となる粘性土層は、40m以浅にあり、魚野川支流の扇状地間に形成された湖沼において堆積したものと推定される(AC1層及びAC2層)。その層厚の合計は20~40m程度とそれほど厚いとはいえないが、図4.12に示すように大きな沈下量を示している。地下水頭は冬期に低下し、春から秋の間は毎年ほぼ地表面付近まで回復している。地下水頭の回復が著しいのは、この地点が構造的な盆地上に位置しているため、周囲の山地に積った大量の雪が、春の訪れと共に融けだして地下に浸透し、六日町中心部の地下水をかん養していることと、次節で述べるように、夏期に

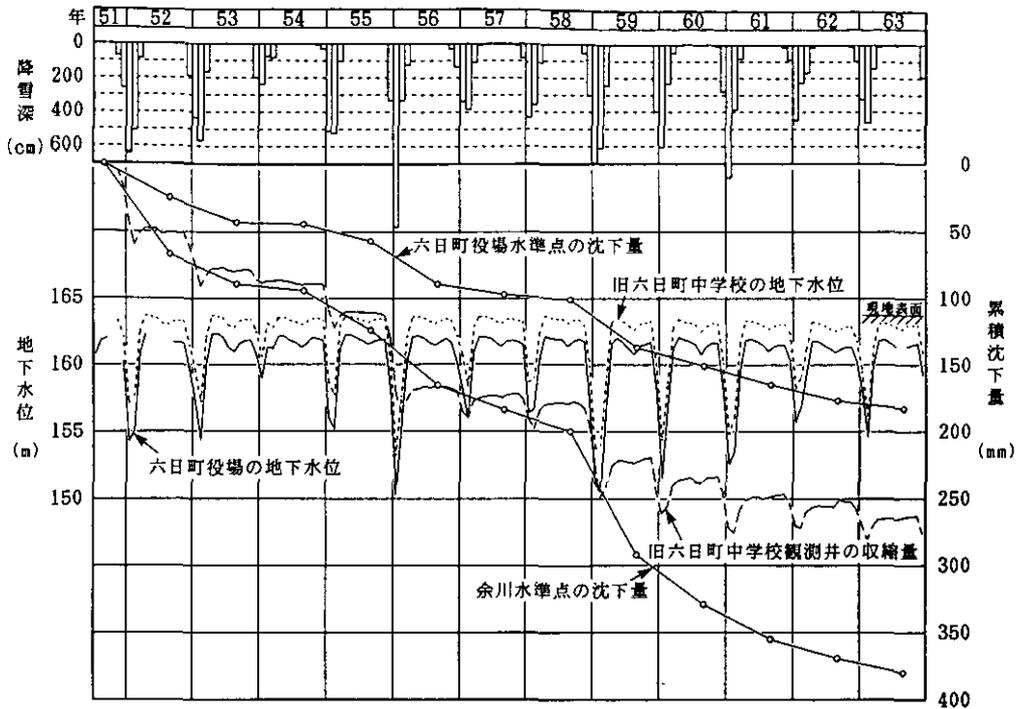


図 4.12 地盤沈下観測記録(文献⁵⁾のデータに基づいて改描)

はほとんど地下水を利用していないためと考えられる。夏期の地下水頭の回復が著しいことは、一方では、冬期に大量の地下水を消雪用に利用できることにつながる。地盤の収縮は地下水位低下時に急激に起こり、水位の上昇に伴って一部膨張するが、元の状態にまでは回復していない。また、昭和56年と59年の豪雪時には、大量に地下水を揚水したため、地下水位の低下が著しく、それに伴い地盤の収縮量も大きくなっている。

昭和60年の水位低下もかなり大きいですが、昭和59年ほどではなかったため六日町中学校井と六日町役場水準点で観測された収縮量はそれほど大きくはないが、余川水準点で観測された地盤の収縮量はかなり大きい。これは、旧六日町中学校と役場が、六日町の中心部の中でも古くから開発の進んだ所であり、本格的な地盤沈下観測が開始される以前から地盤沈下が進行しており、累積沈下量も相当大きく、昭和61,62年程度の水位低下に対しての平均圧密度が比較的高くなっているためと思われる。これに対し、余川水準点の近傍では、本格的な地盤沈下観測が開始された後に工場、住宅団地、小学校などが建設され、地下水利用による消雪パイプが設置されるなどの開発が進められた。この地点には地下水位観測井もなく、揚水用の井戸も各施設が独自に管理しているため揚水量のデータもないが、地下水を揚水する井戸がほとんどなかったところに、多くの井戸が設置されたことにより、地下水が多量に揚水されるようになったため、地盤沈下が進行しはじめたものと考えられる。図4.13は新潟県が行った実際的水準測量による広域観測結果⁵⁾を

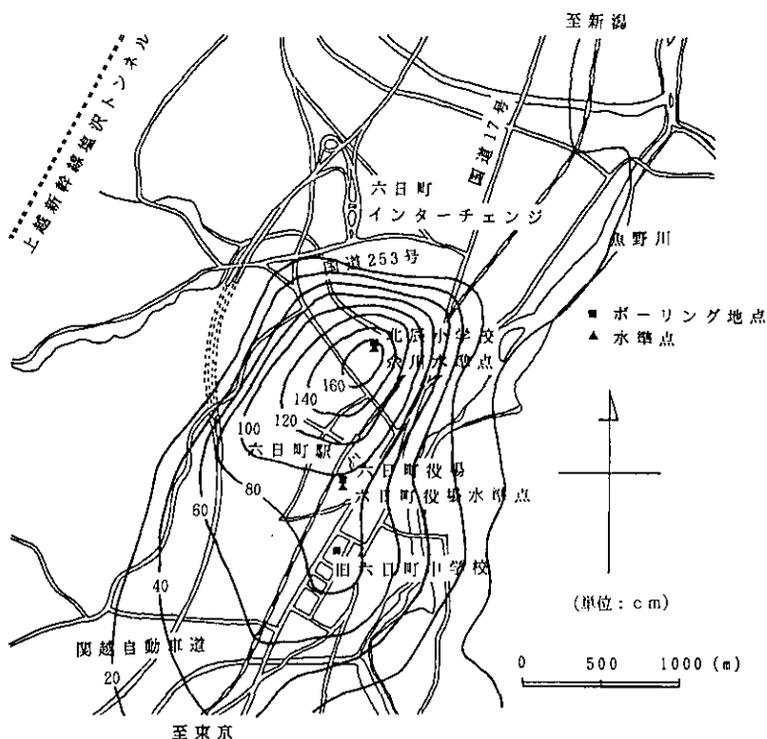


図 4.13 地盤沈下等量線図(昭和58年9月1日~63年9月1日)
(文献⁵⁾に基づいて改描)

基として作成した六日町の最近5年間の等地盤沈下量線図である。この図を見ると、余川水準点付近が最も地盤沈下量が大きく(160mm)、ほぼ南北方向に地盤沈下地域が広がっていることが分かる。

4.4 地盤沈下被害

地盤沈下は通常、長時間にわたってゆっくりと生じる。このため構造物に若干の被害を与えても、適宜対策工事を行うことができるので、災害に至らないことが多い。また、災害は他の災害事象(地震、豪雨など)と複合的に生じることが普通である。このため、平時はその脅威に気が付かないことが多い。しかし、時として大災害に変身することがある。特に、大地震が発生した場合、メキシコ地震や宮城県沖地震の場合でも明らかなように、地盤沈下が生じていた地域とそうでない地域とでは建設構造物の倒壊数に極端な違いがみられる。1989年10月にサンフランシスコ市やオークランド市を襲ったマグニチュード7.1の地震でも、地盤沈下が生じていたところとそうでないところの被害状況に極端な違いがあったようである。

平野の縁辺部や狭小な盆地などでは、かつて佐賀平野で起こったように、単なる圧密現象による沈下だけでなく、陥没を伴った亀裂が生じることもある。これは、基盤が傾斜しているため、

地下水が低下すると軟弱地盤層にせん断力が働くためである。六日町盆地においても今後発生する可能性がある。

その他、地盤沈下によって、バランスのよくない建物や大きな建造物などが傾いたり、水道管などの地下埋設物が破損する。さらに、用・排水施設や防災施設などが機能低下し、障害をきたすこともある。

六日町では、昭和48年(1973)に市街地の一部で井戸の抜け上がりが続出するようになり、その後地盤沈下の徴候がみられるようになった。地盤沈下に起因すると思われる被害も顕在化しており、建物の抜け上がりやひび割れなどが生じている[写真4.1~4.4参照]。写真4.1は、六日町駅の南西にある浄水場を写したものである。上水道用に地下水を汲み上げているポンプ場は基礎が完全に抜け上がっており、上部構造にも多数のひび割れが認められる。写真4.2と写真4.3は、六日町役場の本庁舎の北側にある庁舎の基礎の抜け上がりに伴う被害状況を示したものである。写真4.4は、六日町保健所の基礎が数10cm抜け上がった状況を示したものである。

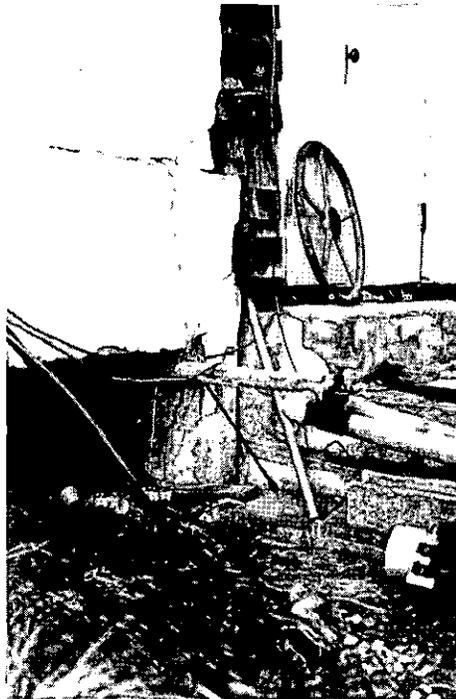


写真 4.1 六日町浄水場の基礎の破壊状況

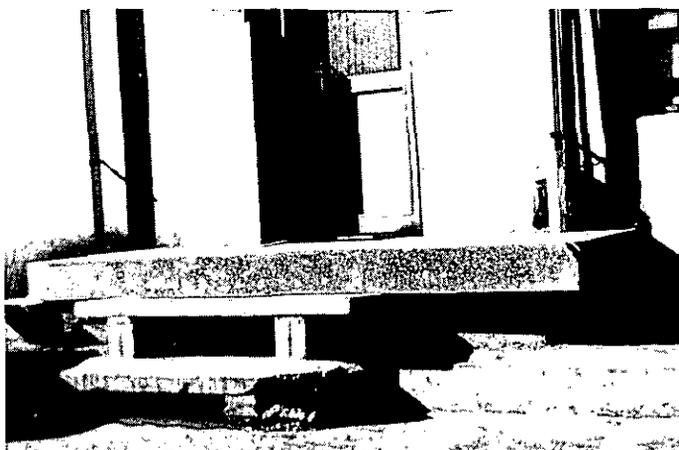


写真 4.2 六日町役場の基礎の抜け上がりによる被害状況



写真 4.3 六日町役場の基礎の抜け上がりによる被害状況

4.5 地盤沈下対策と監視体制

地盤沈下の現状を監視、把握するため、前述のように六日町では、水準測量調査と地盤沈下観測井による方法を用いている。

水準測量調査による方法とは、ある基準水準点を不動点とし、各水準点の標高を測量し、前回との差から変動量を算定し、地盤沈下の状況を把握する方法である。

地盤沈下観測井による方法とは、地層の収縮による井戸管の抜け上がり量を測定記録し、この量を井戸管基底部から地表面までの収縮量と見なす方法である。また、同時に地下水位も測定記録するのが普通である。なお、地下水位のみを観測する井戸もある。



写真 4.4 六日町保健所の抜け上がり状況

地盤沈下量は地下水位の低下と密接な関係があり、しかも地下水位の変動を少なくすることが沈下量を少なくすることにつながることを利用して、豪雪によって昭和59年に全国1の年間沈下量を記録した上越市では、直ちに(昭和59年12月から)地盤沈下緊急時対策を実施した。これは、地下水位の12月1日からの低下量によって、注意報や警報を発令しようというものである。さらにこれに付随して、地盤沈下監視電話応答装置の設置、及び地元紙の協力で毎日、地下水位変動量と地層収縮量の掲載を行い、市民へのPRと節水協力の一石二鳥を期待している。地盤沈下監視電話応答装置は、一種のテレホンサービスであり、0255(22)1040にダイヤルを回すと、1分刻みで高田G2観測井の現在の地下水位と12月1日を基準とした地下水位変動量・地層収縮量が分かる。このような効果が、昭和59年に101mmの沈下量を記録した上越市西城町の水準点で、豪雪年である昭和60年に62mm、昭和61年に33mm⁴⁾と沈下量が減少したことにある程度現われていると思われる。

地盤沈下は、一旦発生すればほとんど回復が不可能な公害であるという特殊性を有し、これによって引き起こされる河川のはん濫などの災害による社会的損失はばく大なものとなることから、すでに進行している地盤沈下を終息させるべき努力をすることはいうまでもないことであるが、また将来その可能性のある地域についても沈下を未然に防止することが必要となる。

地盤沈下防止対策には、現在生じている地盤沈下を防止する対策と地盤沈下が既に生じた地域に対する災害の脅威から守るための対策に分けることができる。

地盤沈下を防止するため、行政府は地盤沈下量・地下水位の監視測定、地下水揚水量の実態調査、シミュレーションを用いた沈下予測や適正揚水量の調査結果などを行うと共に、これらの結果をもとに地下水揚水規制、表流水への水源転換のための代替水の確保・供給事業、地下水の合理的使用のための融資・指導などを行っている。

六日町では、昭和48年に市街地の一部で井戸の抜け上がりが続出するようになり、その後地盤沈下の徴候がみられるようになった。そこで、六日町では、昭和48年に六日町地下水採取の規制に関する条例を制定した。その後、昭和53年に条例を全面改正し、7月から施行した。さらに、昭和62年12月から六日町地域消雪用地下水揚水量削減対策要項を定め、消雪用の揚水設備に対して削減対策実施基準を決めるとともに、地下水位の低下量により地盤沈下の注意報や警報を発令し、消雪用地下水の削減を要請するようになった。

地盤沈下対策としては、地下水採取の規制のほか、地盤沈下の監視測定などの調査及び各種の対策事業が行われている。環境庁においては、地下水採取の規制地域における地盤沈下の監視測定に必要な水準測量、地下水位の観測及び地質調査に対して総合的な地盤沈下の監視測定に必要な経費について地方公共団体に対する補助を実施するとともに、地盤沈下又はその恐れのある地域における地下水採取の規制などについて検討するための地下水揚水量等実態調査、広域的な地盤沈下地域及び大規模な開発計画地域を対象とした総合的な対策を推進するための地盤沈下広域対策調査、地盤沈下防止のための地下水位などの目標値を設定する手法に関する調査研究を実施している。また、関係省庁においても各種の調査を実施している。一方、地下水採取量を抑制するため各種揚水について代替水の確保・供給事業及び水使用の合理化が進められている。

地盤沈下に起因する災害防止対策としては、水害及び内水はん濫対策などがあり、堤防のかさ上げ、内水排除施設整備、土地改良などの事業が実施されている。その上、地震対策も必要な場合もある。また、既に著しい地盤沈下が進行している地域については、建築物、治水施設、農業用施設などの被害を復旧する事業が実施されている。

地盤沈下及び地盤沈下による生活環境にかかわる被害を防止するためには、これらの調査及び対策をなお一層拡充強化することが必要である。

地盤沈下は地下水そのものの過剰な採取が原因であることから、地盤沈下を防止するためには各種の用途に供する地下水の採取を総合的に規制してはじめて所期の目的を達し得るものである。現在の法制のもとで規制の対象とされるのは、工業用に供する地下水と冷暖房用などの建築物用に供する地下水に限定されており、それ以外の用途に供する地下水の採取は規制できないこと、規制地域が既に地盤沈下が進んでいる地域や異常に地下水位が低下している地域などに限定されていることなどの問題がある。

消雪用地下水揚水による地盤沈下現象が顕著なことが分かってきたこともあり、最近節水合理化対策がなされるようになってきた。節水合理化対策として、第2章「消雪の概要」で述べたような他の消雪施設に変える考え、河川水を代替水源とする考え、及び直接節水を行う考えなどがある。

代替施設としては現在のところ、条件的に可能であれば、流雪溝が最善であると考えている。節水方法としては、降雪検知機を設けて節水をはかる方法、1本の井戸で交互に散水する方法、あるいは降雪状況に応じて散水量を自動的に制御する方法などが考えられている。その他、地下

水を散水しない還元システムも考案されている。これは取水井戸と還元井戸の2本の井戸を利用して、揚水した地下水を熱交換器に通して他の水源の水を温め、これを散水し、地下水は再び地下に還元させる方法である。今のところ経済性で難点があり、若干の地盤沈下は生じるが、地下水は全量還元されるという利点は大きい。

地下水利用による散水融雪は利点も多いが、地盤沈下に起因した災害危険度の増大を始めとした欠点も多く、その代償は我々の世代だけでなく子孫にまで残すことになる。

引用文献

- 1) 豊野拓児(1980):南魚沼の地下水について. 南魚沼地区水資源対策協議会会誌, 昭和54年度, 7-9.
- 2) 新潟県衛生公害研究所(1988):南魚沼地域地盤沈下機構解明調査報告書. 新潟県, 95p.
- 3) 六日町環境課(1981):私信.
- 4) 新潟県環境保健部公害対策課(1988):上越地区の地盤沈下(16),新潟県,30p.
- 5) 新潟県環境保健部公害対策課(1989):南魚沼地区の地盤沈下(13), 新潟県, 22p.

5 地盤の圧密性状

5.1 圧密の基礎理論

5.1.1 圧縮と圧密

土質力学的には、土が外力を受けて体積が縮む方向に変化することを圧縮といい、外力を受けた際、必ずしも体積が減少せずに形状が変化した場合をせん断変形という。また、せん断応力による体積変化のことをダイレイタンスーという。

土は固相・液相・気相の3相からなっていることが多い。気相の圧縮率は固相(土粒子)や液相(水)のそれに比較して圧倒的に高い。それゆえ、この場合は土の圧縮ということは、気相とそれに伴う土の骨格の圧縮といっても過言でない。

気相が存在しない土を、飽和土という。飽和土が圧縮して起こる体積変化のほとんどは、間隙水が移動することによって生じる。この体積変化は、骨格構造の単純な圧縮だけではなく、土粒子自体が移動することによっても生じる。このような圧縮のことを圧密という。つまり、圧密現象とは、難透水性の飽和粘土が外力を受けて間隙水を少しずつ絞りだしながら長い時間をかけて体積を減らしていく現象のことである。

図5.1は圧密の過程を模式的に示したものである¹⁾。水の入った容器にスプリングが取り付けられ、容器の上部には上下方向のみ移動可能な小さな穴があいているふたがある。そしてスプリングの力と圧縮量(沈下量)との間に一定な関係があるとす。今、この容器のふたの上におも

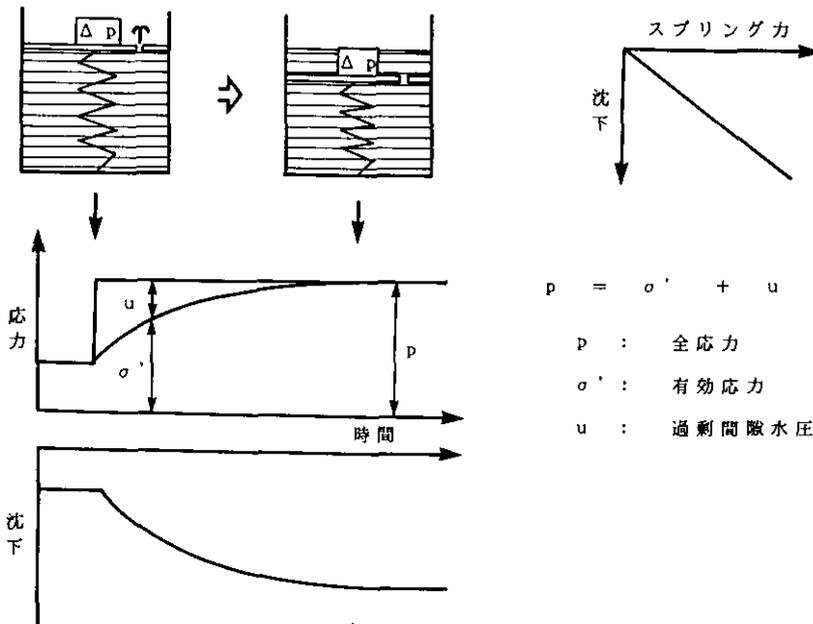


図 5.1 圧密のモデル(文献¹⁾を改描)

りをのせたとする。おもりがのった瞬間、容器の中にある水に過剰水圧が生じるが、ふたの穴が小さいため、なかなか水は外に出られないので、体積はわずかつつ減少していくに過ぎず、水が外へ出なくなるには長時間を要する。水が外へでなくなると、荷重とスプリングの反力とが釣り合う状態になる。このように、飽和粘土が時間とともにその含水量を減少していく過程をテルツァーギ (Terzaghi) が圧密過程と命名した²⁾。

この圧密過程でテルツァーギの圧密理論に従う部分を一次圧密という。間隙水圧がほぼ消散したと考えられる圧密の終りになると、圧密理論から逸脱するようになる。このような、圧密理論で説明できない部分を二次圧密という。二次圧密は粘土の骨格の圧縮クリープ現象であると一般に考えられている。多くの粘性土は、二次圧密による沈下が時間の対数に対して直線的になることから、この直線のこう配を二次圧密係数と呼んでいる。

圧密理論における時間と圧縮量との関係は図 5.2³⁾の理論曲線のようにになるが、実際には実験曲線のように進行するのが普通である。なお、理論曲線は図 5.4 と同じである。また、圧密による時間と圧縮量との関係は全圧縮量の約 60% まで時間の平方根に比例する (図 5.7 参照)。

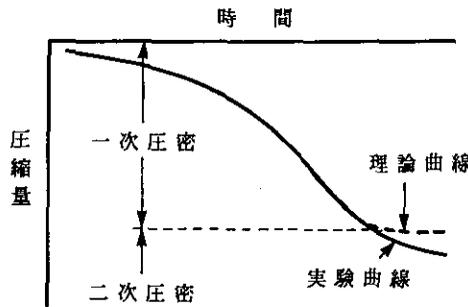


図 5.2 圧密過程における時間と圧縮量との関係 (文献³⁾を改描)

5.1.2 圧密理論

圧密理論は前述のように、テルツァーギ^{2,4)}によって最初に提案された。図 5.1 のようなモデルを考え、このモデルにおけるスプリングの応力が粘性土の有効応力に、容器内の水の圧力が粘性土の間隙水圧に相当し、ふたの沈下は粘性土の体積減少に相当する。ふたに載せるおもりは、全応力の増分 Δp に相当し、これは有効応力の変化分 $\Delta \sigma'$ と間隙水圧の変化分 Δu の和で表され、次式で表される。

$$\Delta p = \Delta \sigma' + \Delta u \quad (5.1)$$

おもりを載せた直後は、容器内の水が排出されずスプリングにひずみが生じないため、 $\Delta \sigma' = 0$ となり、 $\Delta u = \Delta p$ となる。この過剰間隙水圧のために、間隙水が流出し圧縮が進行する。圧縮の進行に伴いスプリングの応力が増大し、 $\Delta \sigma' = \Delta p$ となったときに終了する。

粘性土地盤の表面に荷重を加えるとき、その載荷範囲が粘性土の層厚に比べてはるかに大きければ、間隙水の流れも圧縮も鉛直方向のみ生ずる。このような圧密を一次元圧密という。このときの、間隙水圧の変化を表したのが次式であり、過剰間隙水圧に関する熱伝導型の偏微分方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5.2)$$

ただし、 u : 過剰間隙水圧
 t : 時間
 z : 深さ
 k : 透水係数
 m_v : 体積圧縮係数
 γ_w : 間隙水の単位体積重量
 c_v : 圧密係数

テルツァーギの圧密理論においては、圧密過程を通して、 k 、 m_v 、 c_v ＝一定と仮定している。 $z=0$ 及び $z=2H$ において $u=0$ 、 $t=0$ において $u=u_0$ の境界条件を与えて圧密度 U 、平均圧密度 U を求める。なお、 H は粘土層の最大排水距離（両面透水境界の場合は粘土層の厚さの半分）、 u_0 は初期間隙水圧である。

圧密度とは、ある時点での圧密量（圧密による圧縮量）と最終圧密量との比のことであり、時間係数の関数として与えられる。時間係数（ T ）は次式で表される。

$$T = c_v \cdot t / H^2 \quad (5.3)$$

図5.3は圧密度と深さの関係、図5.4は平均圧密度と時間係数の関係を示したものである。また、平均圧密度が60%以下の範囲では近似的に次式のような関係がある⁵⁾（図5.4参照）。

$$U = 1.128 \sqrt{T} \quad (5.4)$$

(5.2)式で与えられるテルツァーギの圧密理論では、 m_v ＝一定、 k ＝一定、 c_v ＝一定と仮定しているため、応力に関する圧密度はひずみに関する圧密度とも等しくなる。しかし、実際の圧密過程においては、ひずみの進行に比べ、間隙水圧の消散が遅れることが多く、このような仮定が成立しないことが多い。

三笠は、間隙水圧 u のかわりに圧縮ひずみ ϵ を用いて次式を誘導した⁶⁾。

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \quad (5.5)$$

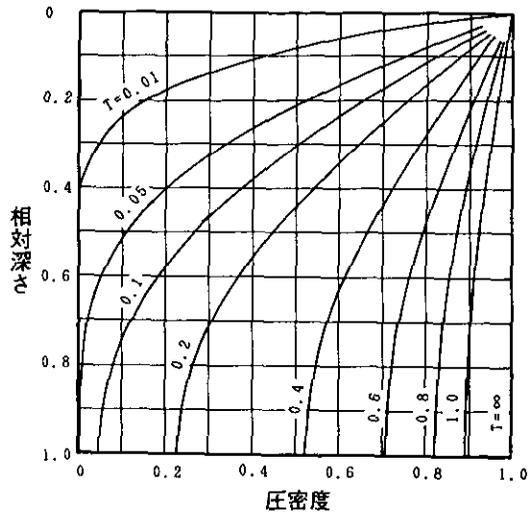


図 5.3 圧密度と深さの関係

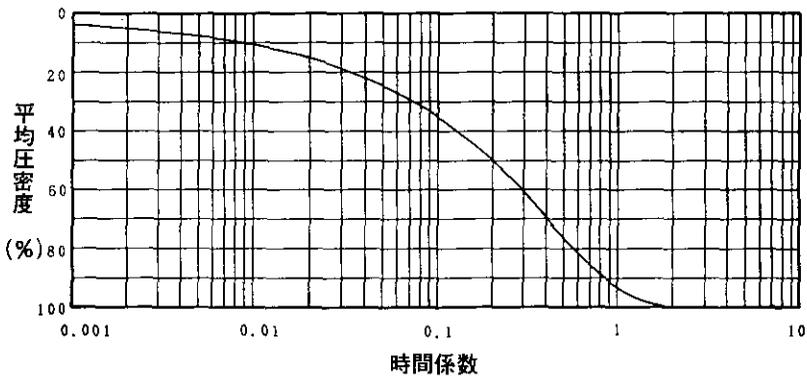


図 5.4 平均圧密度と時間係数との関係

ただし、 ϵ : 圧縮ひずみ

t : 時間

z : 深さ

c_v : 圧密係数

(5.5)式で与えられる三笠の圧密理論では、 c_v は一定であるが、 m_v 及び k は一定でなく、しかも圧密中の荷重が時間に対して一定である必要がない。したがって、三笠の理論の方がテルツァーギの理論よりも適用範囲が広く、実際の現象ともより符合している。しかしながら、テルツァーギの圧密論の方が、その解が図5.3、5.4などの図表で示されていることや、実際に粘土層の間隙水圧を測定することがほとんどなく、普通沈下量のみを測定していることもあり、地盤沈下量

の予測計算を行うには便利である。

粘土層の上部が砂層で下部が水を通さない堅い岩盤のような条件で圧密が行われる場合を片面排水といい、粘土層の上下層が砂層のような条件で圧密が行われるような場合を両面排水という(図5.5⁷⁾参照)。実際には堅い岩盤の上に直接柔らかい粘土層が存在することはほとんどないので、自然の地盤では片面排水条件に相当することはまずなく、両面排水条件として扱って差し支えない。

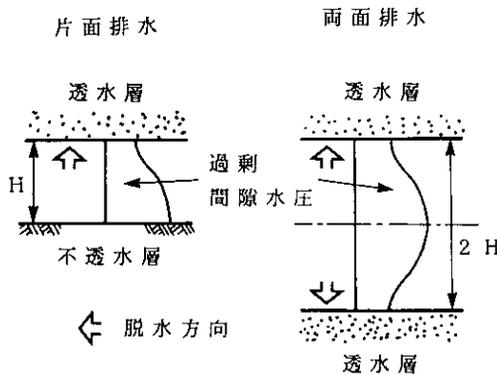


図 5.5 片面排水と両面排水 (文献⁷⁾に基づいて改描)

このような圧密論はもともと埋立地のように広範囲に盛土して、土かぶり圧(荷重)が増加する場合など全応力が増加することを想定して構築されたものである。すなわち、(5.1)式の Δp が正の場合である。しかし、地下水位低下に伴う地盤地下問題の場合は、 Δp は0であり、 Δu が負になっている。結果としては、 $\Delta \sigma'$ が増加することには変わりはないが、盛土などでは土かぶり圧が変化することは一般に考えられないが、地盤沈下を考える時には地下水の採取状況などにより地下水位が変動するため、 Δu も変動する。このため、いままで述べてきた圧密論を単純に適用することはできない。本報告では、地下水位が周期的に変動する場合について圧密理論をいかに適用するかについて第6章で記述している。

5.2 圧密試験法

土の圧密現象について考える際、三次元的現象として取り扱うべきであるが、地盤沈下問題では粘土層の厚さに比べ、2オーダー以上の広い範囲にわたって生じるので、鉛直方向にのみ沈下が生じると考えて差し支えない。したがって、このような土の圧縮性を調べるには、一軸的圧縮を起こさせる試験、すなわち圧密試験を実施するのが普通である。圧密試験は沈下-時間関係に関する諸定数(圧密降伏応力、圧縮指数、体積圧縮係数、圧密係数など)を求めるために行う試験であり、その方法はJISで規定されている。なお、試験の詳細は文献³⁾を参照されたい。

圧密試験機は、載荷装置と図5.6³⁾に示す圧密箱とからなる。供試体の大きさは直径60mm・

厚さ 20mm の円筒形であり， 荷重方法は荷重制御方式である。 JIS で規格化されている標準圧密試験では， 荷重を 2 倍づつ（荷重増加率 $\Delta p/p = 1$ ）段階的に加え， 各荷重段階とも 24 時間荷重し， 決められた時間間隔で圧密量を測定する。

圧密試験で各荷重段階ごとに測定した時間と圧密量との関係は， \sqrt{t} 法あるいは曲線定規法のいずれかの方法を用いて求める。

\sqrt{t} 法の求め方： 図 5.7 に示したように， 縦軸に圧密量 d ， 横軸に時間 t の平方根をとり， 測定結果をプロットし， 滑らかな曲線で結ぶ。 荷重直後に現われる直線部分の延長線が縦軸 ($t=0$) と交わる点の値を初期補正值 d_0 とする。 d_0 を通るこの直線の 1.15 倍の傾きをもつ直線が滑らかに描いた $d-\sqrt{t}$ 線と交わる点を圧密度 90% の点とし， その圧密量を d_{90} ， 時間を t_{90} とする。

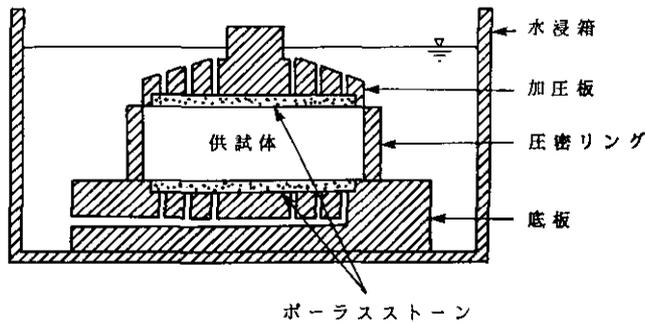


図 5.6 圧密箱（文献³）を改描

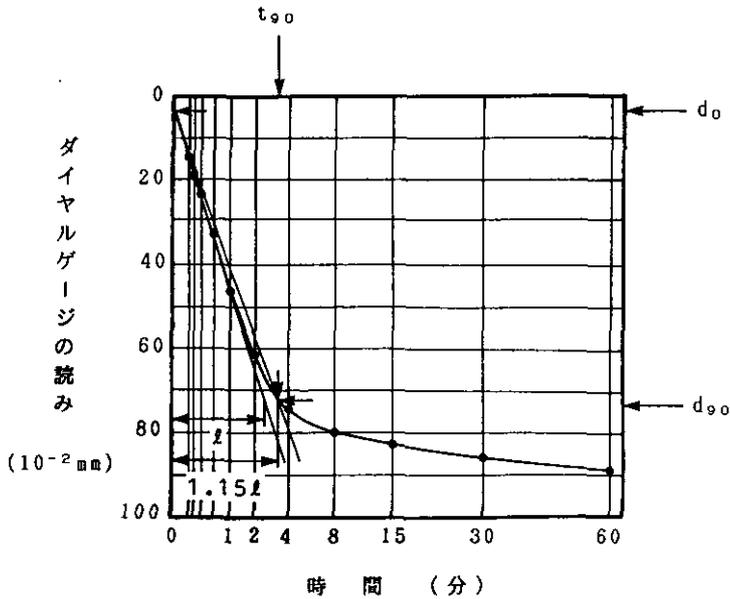


図 5.7 d_{90} ， t_{90} の求め方

また一次圧密度 $\Delta d'$ は次式から求める。

$$\Delta d' = (d_{90} - d_0) \cdot 10/9 \quad (5.6)$$

曲線定規法の求め方：縦軸に圧密度 d ，横軸に時間 t の対数を取り，測定結果をプロットし，滑らかな曲線で結ぶ。この d - $\log t$ 曲線と曲線定規 (図 5.8³⁾ 参照) とを重ね，上下左右に平行移動させて，曲線の初期から後半にかけて最も長い範囲で一致する曲線を選ぶ。曲線定規の $U=0$ に当たる圧密度を初期補正值 d_0 とし，最終値 $U=1$ に当たる圧密度を d_{100} とし，さらに曲線定規の t_{50} の線に当たる短圧密度 50% の点とし，その時間を t_{50} とする。また，一次圧密度は次式から求める。

$$\Delta d' = d_{100} - d_0 \quad (5.7)$$

圧密試験で得られた圧密圧力 (載荷重) p と供試体の間隙比 e との関係を示す縦軸に e ，横軸に対数 $\log p$ をとって描いた曲線を e - $\log p$ 曲線という (図 5.9³⁾ 参照)。

圧密降伏応力 (p_c) は弾性的な挙動から塑性的な挙動へと移行する境界の応力である。圧密降伏応力は図 5.9 に示したように e - $\log p$ 曲線 (又は f - $\log p$ 曲線) から求める。すなわち， e - $\log p$ 曲線の最大曲率点 (図中の O) を求め，この点から接線及び水平線を引き，これらの 2 つのなす角の二等分線と e - $\log p$ 曲線の最急傾斜の直線部分の延長線上との交点の応力を圧密降伏応力とする。なお，弾性的な挙動を示す圧密降伏応力より小さい応力域を過圧密領域，塑性的な挙動を示す圧密降伏応力より大きい応力域を正規圧密領域という。

圧縮指数 (C_c) は，図 5.9 で圧密降伏応力以上で直線に近い形状を示した領域のこう配をいう。

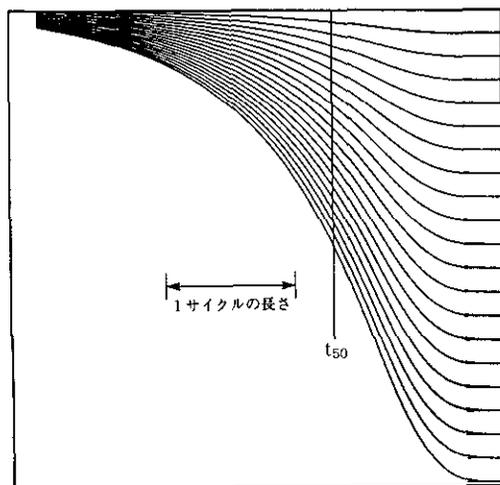


図 5.8 曲線定規 (曲線定規は，縦軸に圧密度，横軸に時間係数の対数を取り圧密度のスケールを変えてトレーシングペーパーに描いた圧密理論曲線群である。)

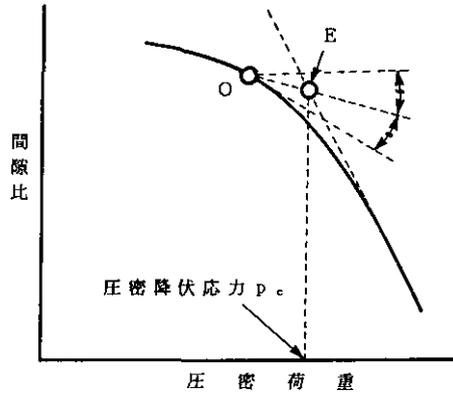


図 5.9 圧密降伏応力の求め方 (文献³⁾を改描)

すなわち、 e - $\log p$ 曲線の最急傾斜の直線部分の延長線上の任意の 2 点 a 、 b の座標を読み次式から求める。

$$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log_{10} (p_b / p_a)} \quad (5.8)$$

体積圧縮係数 (m_v) は、土の圧縮性を表す係数であり、圧縮ひずみ (ϵ) と圧密圧力 (p) の増分比であり、下式で表される。

$$m_v = \Delta \epsilon / \Delta p \quad (5.9)$$

m_v は過圧密領域ではほぼ一定の値をとるが、正規圧密領域になると急激に増大する。このため、 m_v は各荷重段階ごとに求める必要がある。

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon_n}{\Delta p_n} = \frac{\Delta d_n}{\bar{h}_n} \cdot \frac{1}{\Delta p_n} \quad (5.10)$$

ただし、 m_v : n 番目の荷重段階における体積圧縮係数 (cm^2/kgf , m^2/kN)

$\Delta \epsilon_n$: n 番目の荷重段階における圧縮ひずみ

Δd_n : n 番目の荷重段階における全圧密量 (cm)

\bar{h}_n : n 番目の荷重段階における供試体の平均高さ (cm)

Δp_n : n 番目の荷重段階における圧力増分 (kgf/cm^2 , kN/m^2)

圧密係数 (c_v) は圧密速度を支配する土質定数であり、次式で表される。なお、 k は透水係数である。

$$c_v = k / m_v \gamma_w \quad (5.11)$$

通常 c_v は、 \sqrt{t} 法か曲線定規法によって各荷重段階の値を求める。

\sqrt{t} 法による場合、

$$c_v = \frac{0.848 (\bar{h} / 2)^2 \cdot 1440}{t_{90}} \quad (5.12)$$

ただし、 c_v : n 番目の荷重段階における圧密係数 (cm^2/d)
 t_{90} : n 番目の荷重段階における90%圧密終了時間 (min)

曲線定規法による場合、

$$c_v = \frac{0.197 (\bar{h} / 2)^2 \cdot 1440}{t_{50}} \quad (5.13)$$

ただし、 t_{50} : n 番目の荷重段階における50%圧密終了時間 (min)

ある深さから採取した粘土の圧密降伏応力とその有効土かぶり圧とが一致した場合、その粘土を正規圧密粘土といい、圧密降伏応力が有効土かぶり圧以上ある場合、その粘土を過圧密粘土という。また、圧密降伏応力と有効土かぶり圧の比を過圧密比という。

過圧密粘土となるには次の4つの成因が考えられる。

- ①過去に現在よりも大きな有効土かぶり圧を受けていた。(上部層の中か、上部層との境界に不整合が存在することが多い。)
- ②水面下に堆積した地層が過去に地下水面上になったことがあり、乾燥収縮を起こしていた。
- ③こう結作用や二次圧密などの時間効果(広義の圧密作用)をはじめとした続成作用を受けた。(更新世中期以降に堆積した地層では無視できる。)
- ④かつて地下水を過剰に揚水し、地下水位が低下していた。

なお、ある深さのところだけ圧密降伏応力が非常に高い場合は、②のことが多い。

5.3 圧密試験装置

今回、圧密試験に用いたのは、空圧式の全自動圧密試験装置であり、繰返し圧密試験用に開発したものであるが、標準圧密試験を行うことも可能である。図5.10に本試験装置の模式系統図を示す。

直径60mm、高さ20mmの供試体を圧密容器内に設置し、試験制御装置に載荷時間、載荷荷重、

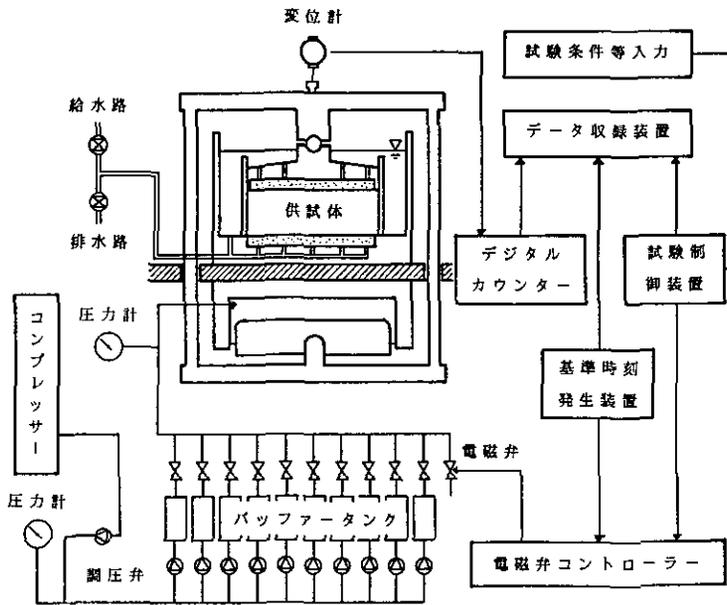


図 5.10 全自動圧密試験装置の模式系統図

その対象となる供試体番号など、所定の試験条件を入力すれば、試験開始から終了まで載荷時間、載荷荷重を自動的に制御し、データを収録する。

載荷は、空気圧で行っている。このため、任意の上載圧を設定することが可能である。コンプレッサーから供給している約 10 kgf/cm^2 の空気圧を、一次と二次の調圧弁で減圧し、10個のバッファータンク内に、それぞれ所定の圧力を貯蔵する。基準時刻発生装置によって示された時刻が所定の時間になったとき、電磁弁コントローラーが所定の圧力を封じている電磁弁を開く。電磁弁が開かれると、バッファータンクからペロフラムシリンダー内に圧力が導かれ、供試体が載荷される。

変位計から送られた変位量は、デジタル・カウンターを通してデータ収録装置に1秒ごとに送られ、時刻とともに記録される。

以下にこの装置の詳細を示す。

5.3.1 圧密容器

圧密容器の詳細図を図5.11に示す。試料高2cm、直径6cm用の圧密リングは固定リング式のステンレス合金製で、上部は試料を挿入するのに便利のように刃状になっている。また、加圧板挿入時に圧密リング上端と加圧板上端を一致させれば試料高が2cmになるようになっている。加圧板は、真ちゅう製である。圧密リングの内側と加圧板の側面は、載荷時における相互の摩擦を少なくするため、アラシダム(仕上げ磨き用のパウダー)を用いて常時磨いている。さらに、

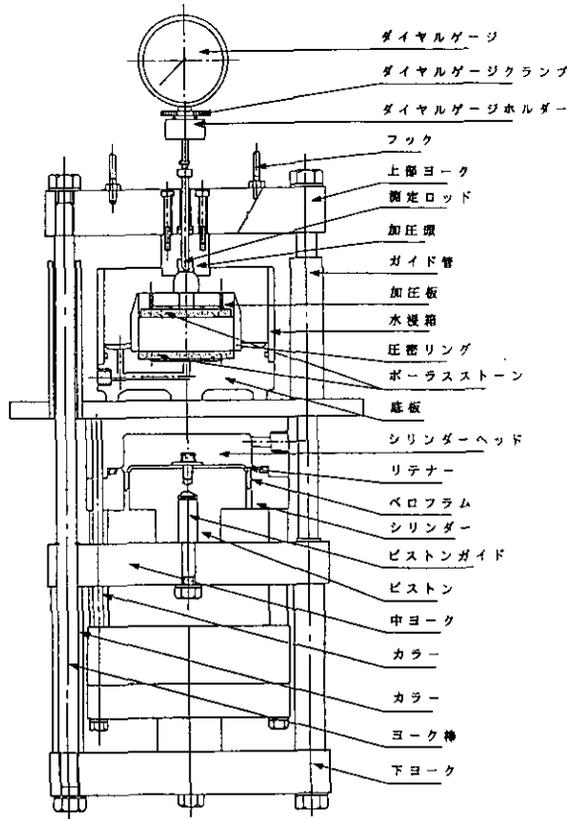


図 5.11 圧密容器及び载荷部の詳細図

実際に供試体をセットする時には、シリコン・オイルを薄く塗布している。

排水条件は両面排水であり、加圧板と圧密容器底部のポーラスストーンから水浸箱内に排水される。水浸箱の側面は透明なアクリル樹脂製で、満たした水の減り具合を側面から見る事ができるようになっている。

5.3.2 载荷装置

図5.11に示したベロフラム・シリンダーの詳細は図5.12のように二段になっており、空気圧が、シリンダー内に送り込まれるとピストンを押し、その力がフレームを伝わり供試体に载荷される。

このシリンダーは、上下二段に分れているので、一方のシリンダーに常時一定圧力を供給し、もう一方のシリンダーの圧力を変化(供給, 排気)させることにより、繰返し载荷が簡単に行えるようになっている。

二次調圧弁は、バッファータンクの数(10個)だけあり、バッファータンク内の圧力を指定し

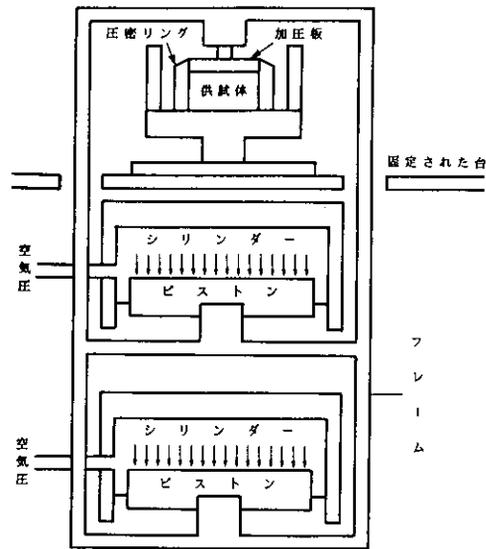


図 5.12 ベロフラム・シリンダーの概念図

た圧力に調整している。

圧力計は、バッファータンク内の圧力を示す10個の小径の圧力計と、大径の高精度の圧力計がある。高精度の圧力計は、高圧用(最大目盛 5.0 kgf/cm^2)、低圧用(最大目盛 1.0 kgf/cm^2)の2個である。

なお、上述のピストンの有効断面積が 45.4 cm^2 であるのに対し、試料の断面積が 28.27 cm^2 であるので、圧力計の指示する圧力と圧密応力の関係は次のようになる。

$$p_g = p_s \times 28.27 / 45.4 \quad (5.14)$$

ここで、 p_g : 圧力計の指示する圧力

p_s : 試料のうける圧密応力

なお、本試験装置で載荷できる圧密圧力の上限は 25.6 kgf/cm^2 である。

5.4 供試体の作製

旧六日町中学校地点及び六日町役場地点では、昭和58年10月に、余川水準点地点では昭和59年10月にそれぞれ乱さない土試料の採取を行った(付図1～3のボーリング柱状図参照)。旧六日町中学校の地盤沈下観測井、六日町役場の地下水位観測井、余川水準点からそれぞれ数m程度の、観測井や水準点に影響を及ぼさない、なるべく近い位置を選んでボーリング調査を実施し、シン

ウォール・チューブあるいはコア・チューブによって乱さない試料を採取した。採取した乱さない試料は、振動・乾燥等から防護するために、塩化ビニール管（塩ビ管）に入れ、パラフィンで厳重に密閉して国立公害研究所に搬入した。

表5.1～5.3は、試験に用いた供試体の一覧表である。旧六日町中学校地点は表5.1に、六日町役場地点は表5.2に、余川水準点地点は表5.3に示した。旧六日町中学校地点では、静的な標準圧密試験を18供試体、繰返し圧密試験を11供試体の計29供試体について、六日町役場地点では、静的な標準圧密試験を14供試体、繰返し圧密試験を16供試体の計30供試体について、余川水準点地点では、静的な標準圧密試験を18供試体、繰返し圧密試験を6供試体の計24供試体についてそれぞれ試験を行った。各表の採取深度は、塩ビ管から取り出した乱さない試料の上端からの相対距離から算出した。記号は、試料を封じていた塩ビ管に付けられた記号である。土質名及び記事は、供試体成形時の観察記録に基づくものである。その他、各供試体の初期の状態（湿潤密度・乾燥密度・初期含水比・比重・初期間隙比・飽和度）及びどちらの試験に用いたのかも示している。

供試体の成形は図5.13に示したように行った。すなわち、図5.13(a)で、高さ約3cm、直径約6.2cmに切出した円柱形試料に圧密リングを傾かないように挿入する。図5.13(b)で、加圧板を圧密リングの下部から1/2程度挿入し、はみでた試料をワイヤー・ソーで切り取る。図5.13(c)で、加圧板を圧密リングの上部から、圧密リングの上端と加圧板の上端が一致するまで挿入し、はみでた試料をワイヤー・ソーで切り取る。なお、供試体の成形に先立ち、供試体のかわりに厚さ20mmの基準板をセットして圧密容器を組み立て、デジタル・カウンターの値を0にしておいた。そして、供試体をセットしたときのデジタル・カウンターの値との差から供試体の厳密な初期高さを求めた。

5.5 圧密試験の結果と考察*

5.5.1 載荷条件

静的な標準圧密試験は、JISに規定されている標準圧密試験方法を準用して行った。荷重増加率は1であり、1回の載荷の継続時間は24時間とした。最大圧密荷重は試料の状態に対応して変化させており、採取深度が浅い試料については 6.4 kgf/cm^2 、採取深度が深い試料については 25.6 kgf/cm^2 まで載荷した。

5.5.2 標準圧密試験の結果

表5.4は、旧六日町中学校地点、表5.5は、六日町役場地点、そして表5.6は余川水準点地点における静的な標準圧密試験結果を示したものである。

*この節は、印刷発表(4)、(7)に一部発表している。

表 5.1 供試体の一覧表(旧六日町中学校地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 記号 | 土質名 事記 | 湿潤密度 g/cm ³ | 乾燥密度 g/cm ³ | 初期含水比 % | 比重 | 初期間隙比 | 飽和度 % | 試験法 |
|-----------|-------------|--------|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-------|-------|----------|-----|
| 1 | 2.52~2.55 | U-1 | シルト 腐植物少量混入 | 1.448 | 0.764 | 89.39 | 2.612 | 2.417 | 96.6 | 繰返し |
| 2 | 2.57~2.60 | U-1 | シルト 腐植物少量混入 | 1.436 | 0.757 | 89.67 | 2.622 | 2.464 | 95.4 | 静的 |
| 3 | 3.19~3.22 | U-2 | シルト 腐植物少量混入 | 1.594 | 0.969 | 64.47 | 2.252 | 1.324 | 109.7 | 静的 |
| 4 | 3.20~3.23 | U-2 | シルト 腐植物少量混入 | 1.544 | 0.923 | 67.19 | 2.624 | 1.841 | 95.7 | 繰返し |
| 5 | 5.37~5.40 | U-3 | シルト 腐植物・細砂少量混入 | 1.600 | 0.994 | 61.00 | 2.662 | 1.679 | 96.7 | 静的 |
| 6 | 5.81~5.85 | U-3 | シルト 腐植物・細砂少量混入 | 1.588 | 0.837 | 89.66 | 2.633 | 2.144 | 110.1 | 繰返し |
| 7 | 6.38~6.42 | U-4 | シルト 腐植物混入 | 1.575 | 0.957 | 64.61 | 2.676 | 1.797 | 96.2 | 静的 |
| 8 | 6.42~6.45 | U-4 | シルト 腐植物混入 | 1.588 | 0.989 | 60.63 | 2.648 | 1.678 | 95.7 | 繰返し |
| 9 | 8.53~8.56 | U-5, 6 | 粘土 腐植物少量混入 | 1.604 | 1.001 | 60.23 | 2.638 | 1.635 | 97.1 | 静的 |
| 10 | 8.62~8.66 | U-5, 6 | 粘土 腐植物少量混入 | 1.471 | 0.890 | 65.19 | 2.624 | 1.947 | 87.8 | 静的 |
| 11 | 8.66~8.69 | U-5, 6 | 粘土 腐植物少量混入 | 1.534 | 0.986 | 55.52 | 2.629 | 1.666 | 87.6 | 繰返し |
| 12 | 19.13~19.16 | U-8 | 粘土 腐植物・シルト混入 | 1.683 | 1.146 | 46.87 | 2.636 | 1.300 | 95.0 | 静的 |
| 13 | 19.16~19.19 | U-8 | シルト質粘土 腐植物混入 | 1.634 | 1.045 | 56.32 | 2.656 | 1.541 | 97.1 | 繰返し |
| 14 | 19.24~19.27 | U-8 | シルト 腐植物混入 | 1.622 | 1.043 | 55.52 | 2.615 | 1.508 | 96.3 | 静的 |
| 15 | 19.60~19.63 | U-8 | 砂質土 腐植物混入 | 1.715 | 1.209 | 41.81 | 2.694 | 1.228 | 91.7 | 静的 |
| 16 | 19.63~19.66 | U-8 | 砂質土 腐植物混入 | 1.623 | 1.076 | 50.83 | 2.591 | 1.408 | 93.6 | 繰返し |
| 17 | 19.69~19.72 | U-8 | 砂 腐植物混入 | 1.676 | 1.137 | 47.37 | 2.654 | 1.334 | 94.3 | 静的 |
| 18 | 22.05~22.08 | U-9 | 腐植土 珪化木入り | 1.188 | 0.469 | 153.45 | 2.057 | 3.390 | 93.1 | 静的 |
| 19 | 22.11~22.14 | U-9 | 腐植土 珪化木入り | 0.974 | 0.381 | 156.04 | 1.956 | 4.140 | 73.7 | 繰返し |
| 20 | 22.14~22.17 | U-9 | 腐植土 粘土少量混入 | 1.095 | 0.383 | 185.94 | 1.960 | 4.120 | 88.5 | 静的 |
| 21 | 22.47~22.50 | U-9 | 腐植物混り粘土 良く混合している | 1.429 | 0.757 | 88.73 | 2.454 | 2.242 | 97.1 | 静的 |
| 22 | 22.50~22.53 | U-9 | 腐植質シルト | 1.438 | 0.794 | 81.04 | 2.617 | 2.294 | 92.4 | 繰返し |
| 23 | 22.59~22.62 | U-9 | 粘土 腐植物少量混入 | 1.462 | 0.809 | 80.66 | 2.512 | 2.105 | 96.3 | 静的 |
| 24 | 25.07~25.10 | U-10 | 腐植土 珪化木入り | 1.074 | 0.337 | 218.90 | 1.682 | 3.996 | 92.1 | 静的 |
| 25 | 25.10~25.13 | U-10 | 腐植土 珪化木入り | 0.925 | 0.284 | 225.34 | 1.572 | 4.528 | 78.2 | 繰返し |
| 26 | 25.19~25.22 | U-10 | 腐植土 腐植土100% | 1.101 | 0.312 | 252.61 | 1.578 | 4.056 | 98.3 | 静的 |
| 27 | 25.67~25.70 | U-10 | 腐植土 茶褐色と黒色 | 1.145 | 0.318 | 259.72 | 1.623 | 4.101 | 102.8 | 静的 |
| 28 | 25.70~25.73 | U-10 | 腐植土 珪化木入り | 1.141 | 0.363 | 214.39 | 1.721 | 3.741 | 98.6 | 繰返し |
| 29 | 25.78~25.82 | U-10 | 腐植土 珪化木入り | 1.212 | 0.429 | 182.16 | 1.918 | 3.467 | 100.8 | 静的 |

表 5.2 供試体の一覧表(六日町役場地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 記号 | 土質名 事 | 湿潤密度 g/cm ³ | 乾燥密度 g/cm ³ | 初期含水比 % | 比重 | 初期間隙比 | 飽和度 % | 試験法 |
|-----------|-------------|-----|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-------|-------|----------|-----|
| 1 | 3.22~3.25 | U-1 | 粘土 アシ類・シルト混入 | 1.505 | 0.797 | 88.70 | 2.492 | 2.125 | 104.0 | 静的 |
| 2 | 3.37~3.40 | U-1 | 粘土 腐植物少量混入 | 1.567 | 0.912 | 71.81 | 2.553 | 1.799 | 101.9 | 静的 |
| 3 | 3.46~3.49 | U-1 | 粘土 アシの根少量混入 | 1.620 | 0.976 | 65.96 | 2.649 | 1.713 | 102.0 | 繰返し |
| 4 | 3.49~3.52 | U-1 | シルト アシ類点在 | 1.660 | 1.001 | 65.80 | 2.661 | 1.658 | 105.6 | 繰返し |
| 5 | 3.64~3.67 | U-1 | シルト アシ類の根混入 | 1.635 | 0.994 | 64.49 | 2.620 | 1.636 | 103.3 | 繰返し |
| 6 | 5.16~5.19 | U-2 | 粘土質シルト アシ・木片・砂混入 | 1.683 | 1.111 | 51.41 | 2.682 | 1.413 | 97.6 | 静的 |
| 7 | 5.31~5.34 | U-2 | 粘土質シルト 白色の腐植物混入 | 1.720 | 1.159 | 48.39 | 2.647 | 1.283 | 99.8 | 静的 |
| 8 | 5.43~5.46 | U-2 | シルト アシ類点在 | 1.769 | 1.213 | 45.80 | 2.653 | 1.187 | 102.4 | 繰返し |
| 9 | 5.55~5.58 | U-2 | シルト アシの根少量混入 | 1.764 | 1.198 | 47.24 | 2.685 | 1.241 | 102.2 | 繰返し |
| 10 | 5.58~5.61 | U-2 | シルト アシ類少量混入 | 1.756 | 1.198 | 46.50 | 2.659 | 1.219 | 101.5 | 繰返し |
| 11 | 7.16~7.19 | U-3 | シルト 粘土・木の根混入 | 1.715 | 1.164 | 47.31 | 2.644 | 1.271 | 98.4 | 静的 |
| 12 | 7.28~7.31 | U-3 | シルト 腐植物混じる | 1.734 | 1.180 | 46.96 | 2.690 | 1.280 | 98.7 | 繰返し |
| 13 | 7.31~7.34 | U-3 | シルト 粘土少量混入 | 1.689 | 1.111 | 52.09 | 2.628 | 1.366 | 100.2 | 静的 |
| 14 | 7.43~7.46 | U-3 | シルト 非常に良い | 1.690 | 1.097 | 54.09 | 2.668 | 1.432 | 100.8 | 繰返し |
| 15 | 7.58~7.61 | U-3 | シルト 非常に良い | 1.641 | 1.002 | 63.80 | 2.713 | 1.708 | 101.3 | 繰返し |
| 16 | 7.73~7.76 | U-3 | シルト | 1.654 | 1.058 | 56.38 | 2.697 | 1.550 | 98.1 | 繰返し |
| 17 | 9.13~9.16 | U-4 | シルト 暗灰色・腐植物点在 | 1.656 | 1.077 | 53.75 | 2.656 | 1.466 | 97.4 | 繰返し |
| 18 | 9.16~9.19 | U-4 | 粘土混りシルト 腐植物・バミス混入 | 1.575 | 0.994 | 58.41 | 2.590 | 1.606 | 94.2 | 静的 |
| 19 | 9.28~9.31 | U-4 | シルト 腐植物少量混入 | 1.625 | 1.006 | 61.53 | 2.619 | 1.604 | 100.5 | 繰返し |
| 20 | 9.31~9.34 | U-4 | シルト 腐植物少量混入 | 1.607 | 0.985 | 63.10 | 2.676 | 1.716 | 98.4 | 静的 |
| 21 | 12.16~12.19 | U-5 | 粘土質シルト 暗灰褐色と青灰色混 | 1.809 | 1.303 | 38.80 | 2.649 | 1.033 | 99.5 | 静的 |
| 22 | 12.43~12.46 | U-5 | 粘土 青灰色シルト混入 | 1.769 | 1.229 | 44.02 | 2.732 | 1.224 | 98.3 | 繰返し |
| 23 | 12.46~12.49 | U-5 | 粘土 一部茶色に変色 | 1.733 | 1.184 | 46.41 | 2.726 | 1.303 | 97.1 | 静的 |
| 24 | 15.25~15.28 | U-6 | 粘土質シルト 一部茶色に変色 | 1.734 | 1.183 | 46.59 | 2.631 | 1.224 | 100.1 | 静的 |
| 25 | 15.39~15.42 | U-6 | 粘土 酸化した鉄分あり | 1.717 | 1.181 | 45.37 | 2.669 | 1.260 | 96.1 | 繰返し |
| 26 | 17.34~17.37 | U-7 | 粘土 酸化した鉄分あり | 1.748 | 1.202 | 45.45 | 2.673 | 1.224 | 99.3 | 繰返し |
| 27 | 17.42~17.45 | U-7 | 粘土 均一である | 1.766 | 1.234 | 43.20 | 2.630 | 1.132 | 100.4 | 静的 |
| 28 | 19.24~19.27 | U-8 | 粘土 良質 | 1.682 | 1.099 | 53.08 | 2.671 | 1.430 | 99.1 | 繰返し |
| 29 | 19.37~19.40 | U-8 | 粘土 木片混入 | 1.696 | 1.130 | 50.10 | 2.596 | 1.298 | 100.2 | 静的 |
| 30 | 21.27~21.30 | U-9 | 粘土 腐植物・木片混入 | 1.528 | 0.873 | 75.01 | 2.472 | 1.831 | 101.3 | 静的 |

表 5.3 供試体の一覧表 (余川水準点地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 記号 | 土質名 記号 | 湿潤密度 g/cm ³ | 乾燥密度 g/cm ³ | 初期含水比 % | 比重 | 初期間隙比 | 飽和度 % | 試験法 |
|-----------|-------------|-------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-------|-------|----------|-----|
| 1 | 8.80~8.83 | U-1 | 腐植土 木片多数混入 | 1.086 | 0.326 | 233.68 | 1.650 | 4.067 | 94.8 | 静的 |
| 2 | 8.99~9.02 | U-1 | 腐植土 木片混入・こげ茶色 | 1.271 | 0.581 | 118.72 | 2.253 | 2.876 | 93.0 | 繰返し |
| 3 | 9.02~9.05 | U-1 | 腐植土 木片混入 | 1.186 | 0.483 | 145.68 | 2.045 | 3.237 | 92.0 | 静的 |
| 4 | 9.11~9.14 | U-1 | シルト質細砂 腐植物多量混入 | 1.435 | 0.858 | 67.30 | 2.540 | 1.961 | 87.1 | 静的 |
| 5 | 9.17~9.20 | U-1 | シルト質細砂 腐植物多量混入 | 1.557 | 0.981 | 58.81 | 2.543 | 1.593 | 93.9 | 静的 |
| 6 | 12.84~12.87 | U-3 | シルト質細砂 分級が悪い | 1.865 | 1.466 | 27.20 | 2.687 | 0.833 | 87.7 | 静的 |
| 7 | 13.22~13.25 | U-3 | シルト質細砂 | 1.879 | 1.415 | 32.80 | 2.678 | 0.893 | 98.3 | 静的 |
| 8 | 13.25~13.28 | U-3 | 細砂混り粘土 暗青緑色 | 1.717 | 1.145 | 49.89 | 2.751 | 1.402 | 97.9 | 繰返し |
| 9 | 13.34~13.37 | U-3 | シルト質細砂 | 1.756 | 1.283 | 36.90 | 2.672 | 1.083 | 91.0 | 静的 |
| 10 | 13.37~13.40 | U-3 | シルト質細砂 下部に粘土・礫混入 | 1.643 | 1.098 | 49.59 | 2.753 | 1.506 | 90.6 | 静的 |
| 11 | 23.24~23.27 | U-4 | 腐植物混り粘土 粘土と腐植物の互層 | 1.373 | 0.696 | 97.32 | 2.500 | 2.594 | 93.8 | 静的 |
| 12 | 23.27~23.30 | U-4 | 腐植物混り粘土 粘土と腐植物の互層 | 1.519 | 0.897 | 69.30 | 2.493 | 1.779 | 97.1 | 静的 |
| 13 | 23.39~23.42 | U-4 | 腐植質シルト 細砂・木片混入 | 1.654 | 1.041 | 58.79 | 2.630 | 1.525 | 101.4 | 繰返し |
| 14 | 23.42~23.45 | U-4 | 腐植質シルト 砂・腐植物混入 | 1.752 | 1.244 | 40.81 | 2.662 | 1.140 | 95.3 | 静的 |
| 15 | 23.45~23.48 | U-4 | 腐植質シルト 木片・砂・バミス混入 | 1.515 | 0.871 | 73.91 | 2.580 | 1.963 | 97.2 | 静的 |
| 16 | 24.92~24.95 | U-5,① | 粘土質シルト 腐植物混入 | 1.662 | 1.099 | 51.19 | 2.617 | 1.380 | 97.1 | 静的 |
| 17 | 25.04~25.07 | U-5,① | 腐植質シルト 木片・下部に細砂 | 1.668 | 1.160 | 43.69 | 2.683 | 1.312 | 89.4 | 繰返し |
| 18 | 25.07~25.10 | U-5,① | 腐植質シルト バミス・木片混入 | 1.514 | 0.889 | 70.42 | 2.580 | 1.904 | 95.4 | 静的 |
| 19 | 32.80~32.83 | U-6 | 腐植物混り粘土 下部に木片混入 | 1.541 | 0.911 | 69.19 | 2.432 | 1.671 | 100.7 | 静的 |
| 20 | 32.89~32.92 | U-6 | 粘土質シルト 木片混入 | 1.448 | 0.787 | 84.00 | 2.483 | 2.156 | 96.8 | 繰返し |
| 21 | 32.92~32.95 | U-6 | 粘土質シルト 腐植物混入 | 1.556 | 0.937 | 66.10 | 2.560 | 1.733 | 97.6 | 静的 |
| 22 | 38.09~38.12 | U-8 | 腐植土 木片・バミス混入 | 1.382 | 0.742 | 86.10 | 2.285 | 2.078 | 94.7 | 静的 |
| 23 | 38.62~38.65 | U-8 | 粘土質シルト 粘土混り・木片混入 | 1.506 | 0.906 | 66.19 | 2.430 | 1.682 | 95.6 | 繰返し |
| 24 | 38.80~38.83 | U-8 | 粘土質シルト 腐植物・下部に細砂 | 1.631 | 1.066 | 53.10 | 2.585 | 1.426 | 96.3 | 静的 |

図 5.14 は、旧六日町中学校地点、図 5.15 は、六日町役場地点、そして図 5.16 は余川水準点地点におけるボーリング調査結果並びに静的な標準圧密試験結果を図示したものである。

図 5.17 ~ 5.20 には、圧密係数 c_v 及び体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 p の関係を代表的な試料について図示したものである。図 5.17 は、旧六日町中学校地点の供試体番号 15 の砂質土の試

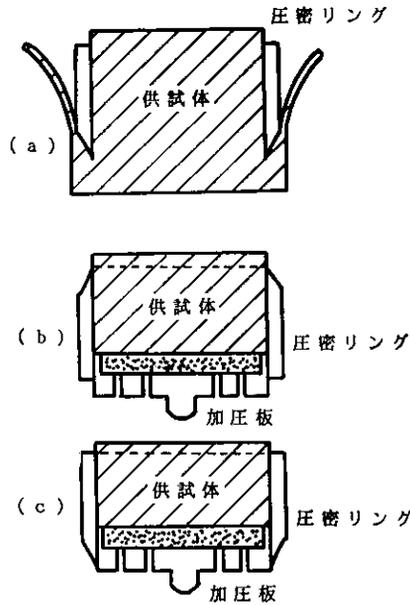


図 5.13 試料の成形方法

料, 図 5.18 は, 旧六日町中学校地点の供試体番号 27 の腐植土の試料, 図 5.19 は, 六日町役場地点の供試体番号 29 の粘土の試料, 図 5.20 は, 余川水準点地点の供試体番号 21 の粘土質シルトの試料の結果である。

5.5.3 標準圧密試験の考察

図 3.9 でも明らかなように旧六日町中学校及び六日町役場周辺においては, 深度 40m 以浅に層厚が 10~20m の粘性土層が 2 層存在している。両地点は, 六日町市街地の中心部に位置しているが, この付近では深度 40~60m の間で消雪用に地下水を採取しており, 地盤沈下はこの 2 層が主体となっている。上部層である AC 1 層は標準貫入試験の N 値がほぼ 0 であり, 非常に軟弱な地層である。また, 下部層の AC 2 層は腐植物やけい(珪)化木を多く含んだ圧縮性の高い地層である。ともに過圧密されており, 過圧密比は, AC 1 層ではほぼ 2, AC 2 層でも上下両端部では 2 であるが, 層の中央部では低く, 特に六日町役場の深度 20m 付近は過圧密比が 1 とほとんど圧密が進んでいない状態にある。このことは, 明らかに地下水変動に伴う過去の繰返し圧密現象によるものといえる。

一方, 余川水準点地点においては, 旧六日町中学校や役場周辺の深度 40m 以浅に存在した A 層の粘性土層の全層厚が数 m と薄くなっている。上部の AC 1 層は, 薄くその全層厚は 2 m である。下部の AC 2 層は, 間に砂礫層を挟み, 多量の腐植物を含んでいる。粘性土の全層厚は約 4 m であり, その基底は深度 15m 以浅まで上がってきている。深度 40m 付近まである B 層の粘

表 5.4 標準圧密試験の結果 (旧六日町中学校地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 降伏応力 kgf/cm ² | 圧縮指数 | t ₅₀ sec | 圧密係数 cm ² /d | 体積圧縮係数 cm ² /kgf | 透水係数 cm/d | 試験番号 |
|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|------------|-----------------------------|------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|---------|
| | | | | | | | | | | (×10 ⁻²) | (×10 ⁻³) | |
| 2 | 2.57~2.60 | シルト | 83.70 | 44.13 | 2.0630 | 0.25 | 0.89 | 126.2 | 115.8 | 19.948 | 23.11 | MUSB D4 |
| 3 | 3.19~3.22 | シルト | 93.32 | 56.74 | 2.0719 | 0.57 | 0.49 | 68.2 | 213.7 | 8.396 | 17.94 | MUSC D9 |
| 5 | 5.37~5.40 | シルト | 93.32 | 57.96 | 2.0640 | 0.60 | 0.55 | 17.9 | 730.1 | 4.561 | 33.30 | MUSB D5 |
| 7 | 6.38~6.42 | シルト | 89.20 | 54.19 | 2.0044 | 0.55 | 0.68 | 71.3 | 187.5 | 10.38 | 19.47 | MUSA D0 |
| 9 | 8.53~8.56 | 粘土 | 93.92 | 58.62 | 2.0723 | 0.84 | 0.57 | 27.4 | 499.8 | 4.690 | 23.44 | MUSA D1 |
| 10 | 8.62~8.66 | 粘土 | 86.39 | 52.30 | 2.0787 | 0.82 | 0.68 | 38.1 | 310.2 | 5.445 | 16.89 | MUSC D8 |
| 12 | 19.13~19.16 | 粘土 | 95.93 | 65.32 | 2.0172 | 2.70 | 0.43 | 7.8 | 1754 | 1.577 | 27.66 | MLSE D5 |
| 14 | 19.24~19.27 | シルト | 93.05 | 59.83 | 2.0301 | 1.80 | 0.54 | 42.3 | 313.2 | 2.308 | 7.227 | MLSB D4 |
| 15 | 19.60~19.63 | 砂質土 | 98.87 | 69.72 | 2.0402 | 1.80 | 0.24 | 7.5 | 1761 | 0.583 | 10.26 | MLSD D1 |
| 17 | 19.69~19.72 | 砂 | 94.39 | 64.05 | 1.9930 | 1.60 | 0.34 | 10.9 | 1167 | 1.573 | 18.35 | MLSA D0 |
| 18 | 22.05~22.08 | 腐植土 | 64.86 | 25.59 | 1.9325 | 2.30 | 1.88 | 759.5 | 9.4 | 5.639 | 0.531 | MLSF D9 |
| 20 | 22.14~22.17 | 腐植土 | 64.42 | 22.53 | 2.0827 | 1.60 | 2.13 | 81.7 | 124.2 | 5.265 | 6.541 | MLSC D8 |
| 21 | 22.47~22.50 | 腐植物混粘土 | 82.53 | 43.73 | 2.0441 | 2.80 | 1.66 | 37.7 | 400.8 | 3.605 | 14.45 | MLSE D4 |
| 23 | 22.59~22.62 | 粘土 | 84.58 | 46.82 | 2.0476 | 2.30 | 1.12 | 51.4 | 244.2 | 4.027 | 9.833 | MLSA D1 |
| 24 | 25.07~25.10 | 腐植土 | 59.99 | 18.81 | 1.9772 | 3.60 | 2.81 | 480.9 | 16.7 | 7.146 | 1.196 | MLSF D8 |
| 26 | 25.19~25.22 | 腐植土 | 63.15 | 17.91 | 2.0305 | 2.80 | 2.58 | 140.7 | 90.7 | 5.628 | 5.105 | MLSB D5 |
| 27 | 25.67~25.70 | 腐植土 | 64.43 | 17.91 | 1.9918 | 3.00 | 2.62 | 83.5 | 146.1 | 5.694 | 8.318 | MLSD D0 |
| 29 | 25.78~25.82 | 腐植土 | 68.45 | 24.26 | 1.9992 | 3.00 | 3.32 | 77.3 | 157.3 | 5.361 | 8.433 | MUSC D9 |

表 5.5 標準圧密試験の結果(六日町役場地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 降伏応力 kgf/cm ² | 圧縮指数 | t ₅₀ sec | 圧密係数 cm ² /d | 体積圧縮係数 cm ² /kgf | 透水係数 cm/d | 試験番号 |
|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|------------|-----------------------------|------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|---------|
| | | | | | | | | | | (×10 ⁻²) | (×10 ⁻³) | |
| 1 | 3.22~3.25 | 粘土 | 83.65 | 44.33 | 1.9674 | 0.80 | 0.82 | 133.2 | 92.2 | 9.799 | 9.038 | MYNA D0 |
| 2 | 3.37~3.40 | 粘土 | 88.31 | 51.40 | 1.9939 | 0.71 | 0.55 | 28.9 | 406.5 | 4.401 | 17.89 | MYNA D1 |
| 6 | 5.16~5.19 | 粘土質シルト | 95.51 | 63.08 | 2.0085 | 1.20 | 0.46 | 10.8 | 1159 | 2.103 | 24.37 | MYNB D4 |
| 7 | 5.31~5.34 | 粘土質シルト | 99.32 | 66.93 | 2.0431 | 1.00 | 0.38 | 16.1 | 795.0 | 1.854 | 14.74 | MYNB D5 |
| 11 | 7.16~7.19 | シルト | 96.90 | 65.78 | 1.9994 | 0.96 | 0.40 | 18.1 | 755.1 | 3.547 | 26.78 | MYNC D8 |
| 13 | 7.31~7.34 | シルト | 96.58 | 63.50 | 2.0232 | 0.85 | 0.43 | 29.4 | 462.8 | 3.775 | 17.47 | MYNC D9 |
| 18 | 9.16~9.19 | 粘土混シルト | 91.29 | 57.63 | 2.0516 | 1.40 | 0.61 | 32.4 | 354.3 | 2.749 | 9.741 | MYNJ D0 |
| 20 | 9.31~9.34 | シルト | 91.55 | 56.13 | 2.0156 | 1.20 | 0.57 | 38.3 | 359.1 | 4.415 | 15.85 | MYNM D0 |
| 21 | 12.16~12.19 | 粘土質シルト | 101.64 | 73.23 | 1.9884 | 1.90 | 0.24 | 5.4 | 2559 | 1.221 | 31.24 | MYNJ D1 |
| 23 | 12.46~12.49 | 粘土 | 96.79 | 66.11 | 1.9760 | 1.40 | 0.41 | 23.1 | 609.2 | 2.956 | 18.01 | MYNM D1 |
| 24 | 15.25~15.28 | 粘土質シルト | 96.94 | 66.13 | 1.9785 | 1.60 | 0.40 | 18.2 | 528.0 | 0.560 | 2.959 | MYNK D4 |
| 27 | 17.42~17.45 | 粘土 | 100.40 | 70.11 | 2.0112 | 1.60 | 0.37 | 24.7 | 410.3 | 0.530 | 2.175 | MYNK D5 |
| 29 | 19.37~19.40 | 粘土 | 93.81 | 62.50 | 1.9578 | 1.40 | 0.46 | 108.4 | 122.5 | 3.711 | 4.546 | MYNL D8 |
| 30 | 21.27~21.30 | 粘土 | 87.77 | 50.15 | 2.0323 | 2.20 | 0.81 | 50.6 | 299.1 | 3.592 | 10.75 | MYNL D9 |

表 5.6 標準圧密試験の結果(余川水準地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 降伏応力 kgf/cm ² | 圧縮指数 | t ₅₀ sec | 圧密係数 cm ² /d | 体積圧縮係数 cm ² /kgf | 透水係数 cm/d | 試験番号 |
|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|------------|-----------------------------|------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|---------|
| | | | | | | | | | | (×10 ⁻²) | (×10 ⁻³) | |
| 1 | 8.80~8.83 | 腐植土 | 61.73 | 18.50 | 2.0105 | 2.00 | 2.50 | 21.0 | 646.1 | 6.304 | 40.73 | MHSG D0 |
| 3 | 9.02~9.05 | 腐植土 | 66.90 | 27.23 | 1.9964 | 2.00 | 1.68 | 10.3 | 1012 | 4.759 | 48.15 | MHSD D0 |
| 4 | 9.11~9.14 | シルト質細砂 | 81.34 | 48.62 | 2.0059 | 1.10 | 0.79 | 11.2 | 971.6 | 3.162 | 30.72 | MHSA D1 |
| 5 | 9.17~9.20 | シルト質細砂 | 89.63 | 56.44 | 2.0367 | 0.71 | 0.51 | 14.9 | 770.9 | 2.294 | 17.68 | MHSA D0 |
| 6 | 12.84~12.87 | シルト質細砂 | 113.32 | 89.09 | 2.1504 | 1.20 | 0.14 | 9.6 | 1612 | 0.316 | 5.099 | MHSD D1 |
| 7 | 13.22~13.25 | シルト質細砂 | 117.06 | 88.15 | 2.2050 | 1.60 | 0.20 | 2.1 | 8688 | 0.685 | 59.53 | MHSG D1 |
| 9 | 13.34~13.37 | シルト質細砂 | 100.98 | 73.76 | 2.0347 | 0.68 | 0.24 | 7.0 | 2085 | 1.910 | 39.83 | MHSB D5 |
| 10 | 13.37~13.40 | シルト質細砂 | 93.48 | 62.49 | 2.0130 | 0.70 | 0.41 | 10.9 | 1081 | 1.853 | 20.04 | MHSB D4 |
| 11 | 23.24~23.27 | 腐植物混粘土 | 77.17 | 39.11 | 1.9895 | 2.70 | 1.35 | 536.2 | 22.1 | 3.282 | 0.725 | MHSC D9 |
| 12 | 23.27~23.30 | 腐植物混粘土 | 86.65 | 51.18 | 2.0185 | 3.20 | 0.85 | 87.6 | 126.8 | 1.796 | 2.277 | MHSC D8 |
| 14 | 23.42~23.45 | 腐植質シルト | 102.76 | 72.98 | 2.0759 | 4.00 | 0.41 | 7.0 | 1713 | 0.562 | 9.63 | MHSH D4 |
| 15 | 23.45~23.48 | 腐植質シルト | 84.94 | 48.84 | 1.9845 | 2.40 | 0.88 | 99.3 | 123.3 | 2.918 | 3.599 | MHSE D4 |
| 16 | 24.92~24.95 | 粘土質シルト | 97.17 | 64.27 | 2.0685 | 5.10 | 0.56 | 10.9 | 1232 | 1.108 | 13.64 | MHSH D5 |
| 18 | 25.07~25.10 | 腐植物シルト | 81.17 | 47.63 | 1.8969 | 3.50 | 0.84 | 16.0 | 633.1 | 1.682 | 10.65 | MHSE D5 |
| 19 | 32.80~32.83 | 腐植物混粘土 | 86.20 | 50.95 | 1.9799 | 2.70 | 0.74 | 46.6 | 260.4 | 2.581 | 6.723 | MHSF D8 |
| 21 | 32.92~32.95 | 粘土質シルト | 91.92 | 55.34 | 2.0907 | 2.30 | 0.80 | 309.6 | 38.0 | 1.732 | 0.659 | MHSI D8 |
| 22 | 38.09~38.12 | 腐植土 | 76.43 | 41.07 | 1.9574 | 5.20 | 1.16 | 25.9 | 424.1 | 2.163 | 9.173 | SF D9 |
| 24 | 38.80~38.83 | 粘土質シルト | 97.34 | 63.58 | 2.1115 | 4.40 | 0.60 | 119.5 | 96.8 | 0.747 | 0.723 | MHSI D9 |

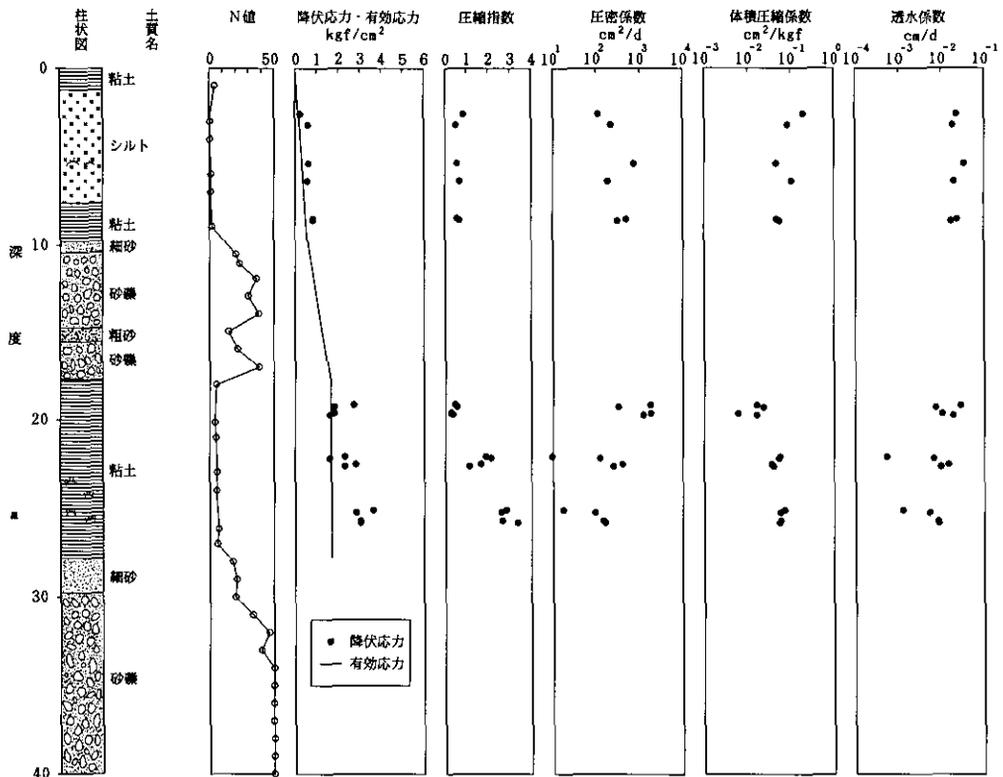


図 5.14 標準圧密試験の結果(旧六日町中学校地点)

性土層を合わせても粘性土層の全層厚は 20m 程度である。深度約 17m 以深の B 層では、粘性土層が深度 40m までに 2 枚あり、上部の粘性土層の層厚は約 5 m で、下部の粘性土層の層厚は約 10m である。深度 20～30m の間の B 層上部の粘性土層は、結果がばらついているものの平均すると、過圧密比は 1.5 程度であり六日町中心部と比べると、大きな値とはいえない。さらに、深度 33m 付近では過圧密比が 1 であり、まったく圧密が進行していない状態にある。深度 31m 以深の下部粘性土層は、多量の腐植物を含んでいるが、全体的にはシルト分が多く、N 値も比較的大きい。この層は局部的には高い過圧密比を示すものの、全体としてはあまり圧密が進行しているとはいえない。

以上の結果から、この地点ではまだ圧密の進行する余地があり、地盤沈下が進行し続ける可能性が高いといえる。このことは、図 4.12 に示した地盤の沈下量の観測記録からも裏付けられる。

圧縮指数をみると、旧六日町中学校の深度 20m 以深の腐植土層と、余川水準地点の深度 9m 前後の腐植土層で高い圧縮性を示している。しかし、余川地点の深度 30m 以深のような例もあり、必ずしも腐植土層が高い圧縮性を示すわけではない。

体積圧縮係数 m_v の対数と平均圧密圧力 \bar{p} の対数との関係を模式的に示したのが、図 5.21³⁾ であ

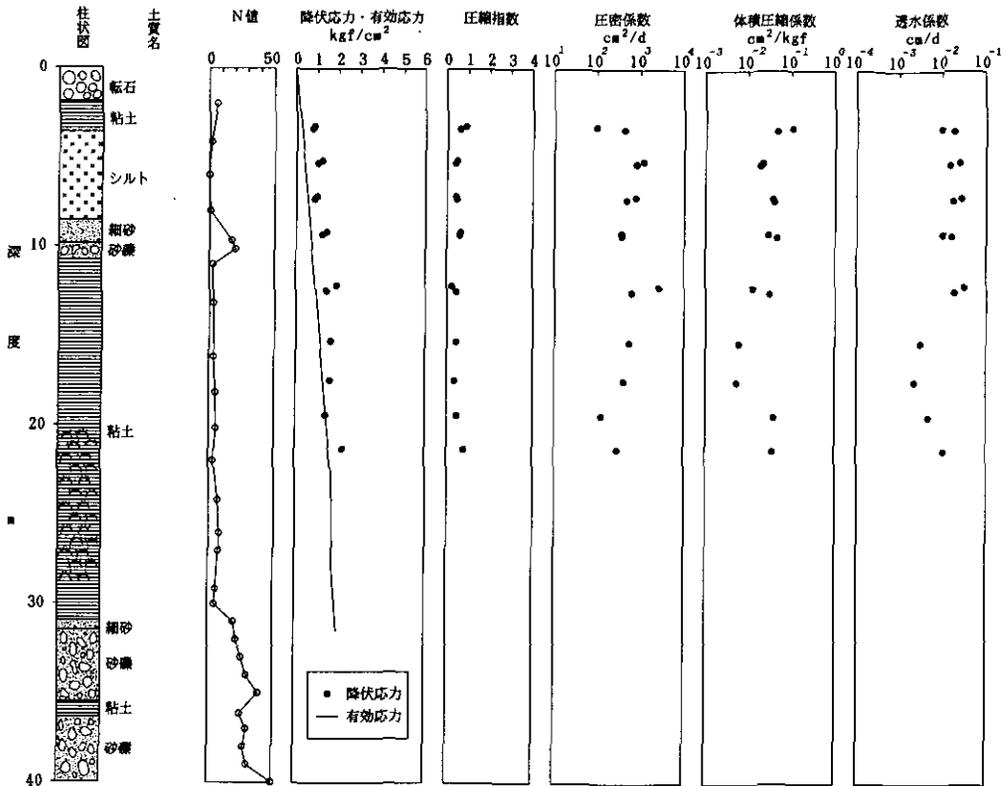


図 5.15 標準圧密試験の結果(六日町役場地点)

り、体積圧縮係数は、平均圧密圧力が圧密降伏応力 p_c 以下では変動は小さいが、圧密降伏応力を越えると平均圧密圧力の対数に逆比例して減少する。図 5.18~5.20 はこの模式図とおりの結果を示しているが、図 5.17 の砂質土の試料については、圧密降伏応力以下の範囲でも平均圧密圧力の対数に逆比例しているように思える。

圧密係数 c_v の対数と平均圧密圧力 p の対数との関係を模式的に示したのが、図 5.22³⁾ であり、正規圧密及び過圧密の領域によって、圧密係数の値がかなり異なるのが普通である。図 5.18~5.20 は正規圧密・過圧密のそれぞれの領域内での変動はあるもののだいたいこの模式図とおりの結果を示しているが、図 5.17 の砂質土の試料については、どちらの領域でもほぼ等しい値を示している。

砂質土は、透水係数が大きいため、本来は圧密現象が起きないか、あるいは起きていても瞬時に終了するといわれている。図 5.17 に示された結果はこれを裏付けているといえる。

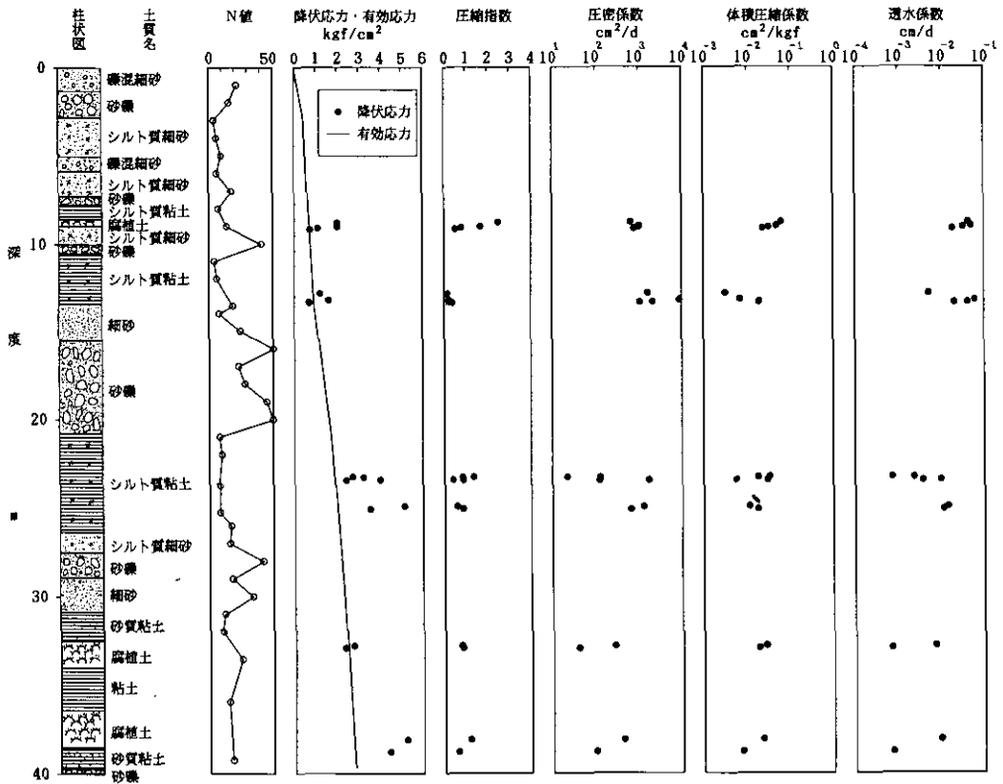


図 5.16 標準圧密試験の結果(余川水準地点)

5.6 繰返し圧密試験の結果と考察*

5.6.1 載荷条件

繰返し圧密試験は、繰返し設定圧力までは標準圧密試験の場合と同様に行い、その後荷重増加率1で繰返すように行った。採取深度が繰返し試験に用いた試料近傍の試料を用いて行った静的な標準圧密試験から得られた圧密降伏応力を越えるように繰返し圧力を設定した。これにより、繰返し載荷が正規圧密領域で行われるようになる。

1回の載荷時間、除荷時間は次式により算定した。

$$\begin{aligned}
 T_v &= C_v \cdot t / H^2 \\
 C_v \cdot t_1 / H_1^2 &= C_v \cdot t_2 / H_2^2 \\
 \therefore t_2 &= t_1 \times H_1^2 / H_2^2
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

*この節は、印刷発表(4)、(7)に一部発表している。

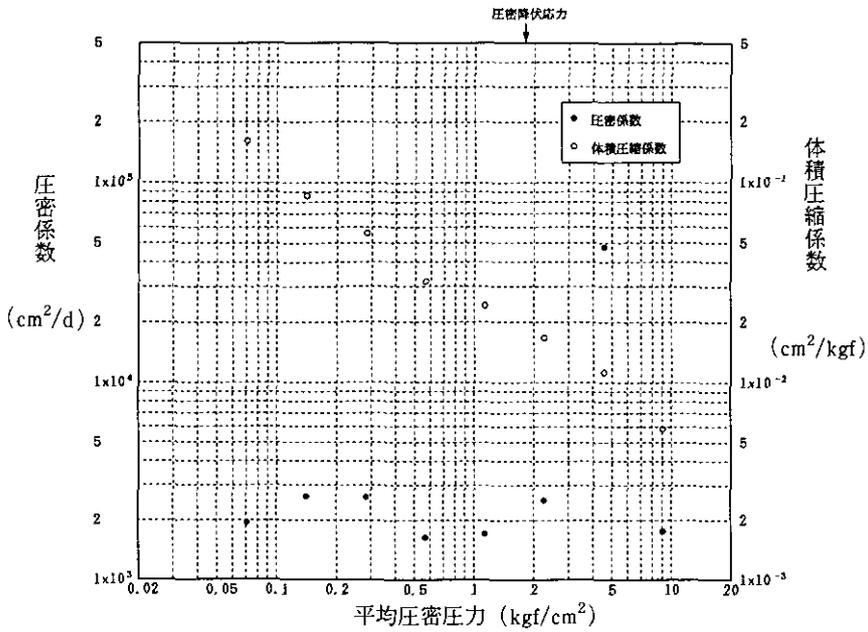


図 5.17 体積圧縮係数及び圧密係数と平均圧密圧力の関係
(旧六日町中学校地点：供試番号15)

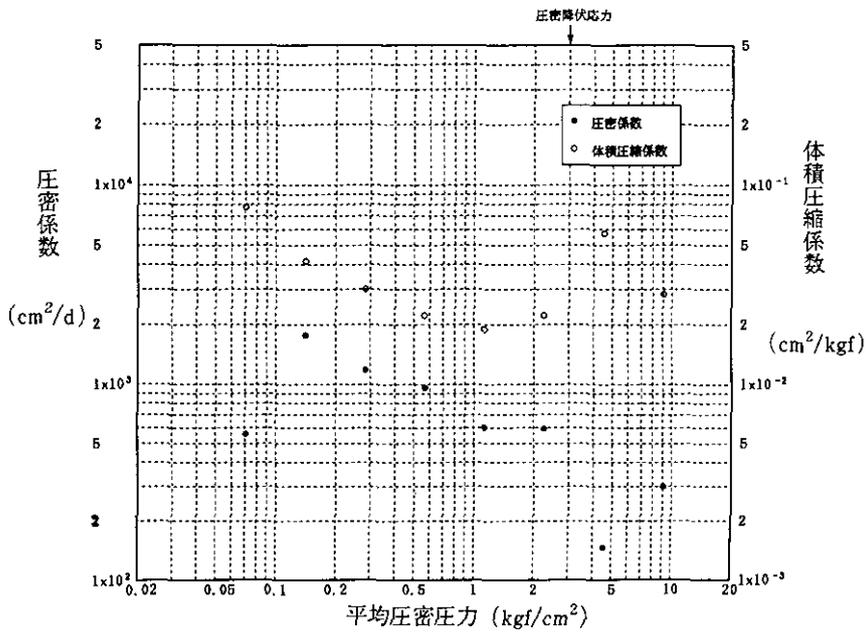


図 5.18 体積圧縮係数及び圧密係数と平均圧密圧力の関係
(旧六日町中学校地点：供試番号27)

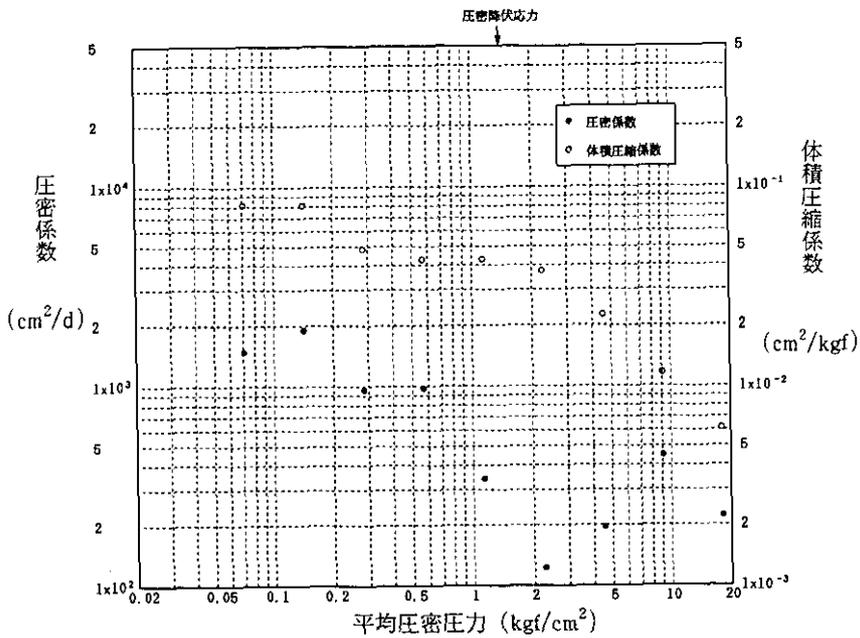


図 5.19 体積圧縮係数及び圧密係数と平均圧密圧力の関係
(六日町役場地点：供試体番号29)

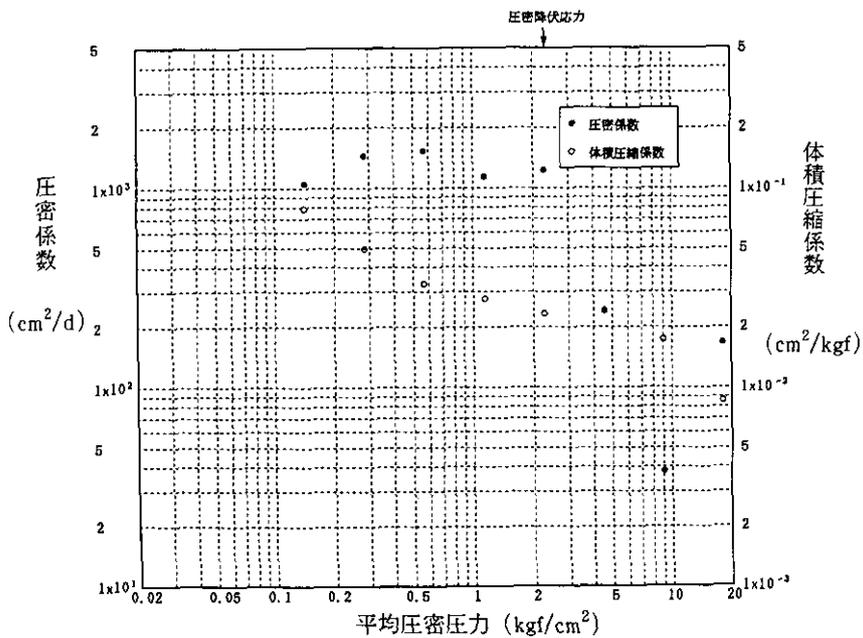


図 5.20 体積圧縮係数及び圧密係数と平均圧密圧力の関係
(余川水準点地点：供試体番号21)

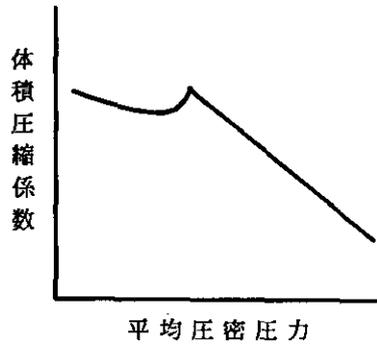


図 5.21 体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係 (模式図) (文献³⁾を改描)

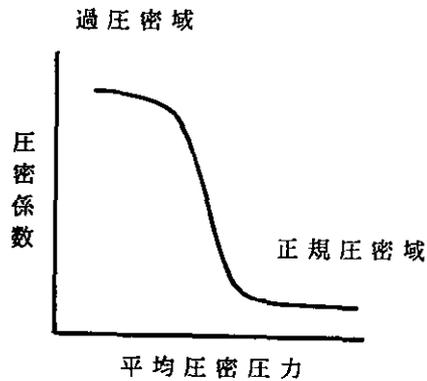


図 5.22 圧密係数と平均圧密圧力の関係 (模式図) (文献³⁾を改描)

ただし, T_v : 時間係数 (一定)

C_v : 圧密係数 (一定)

t : 時間

t_1 : 実際の地盤の水位低下期間

t_2 : 実際の地盤の水位低下期間に相当する高さ 2 cm の試料の載荷時間

H : 層厚の 1/2 (両面排水)

H_1 : 実際の地盤の層厚

H_2 : 室内実験試料の厚さの 1/2 (ほぼ 1 cm)

なお, 繰返しの波形は矩形であり, 図 5.23 に示すようになる。

5.6.2 繰返し圧密試験の結果

表 5.7~5.9 に, 繰返し圧密試験を行った供試体の初期状態, 及び載荷荷重などを示す。表

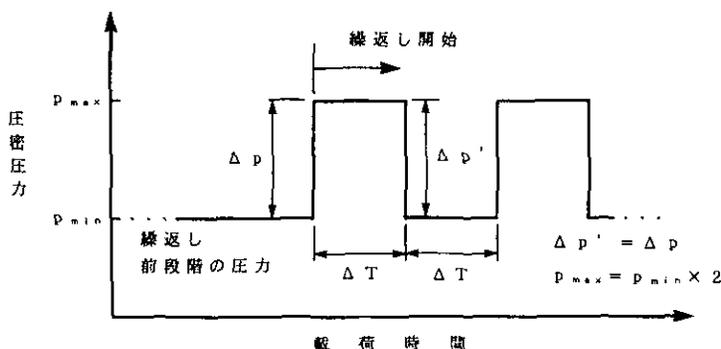


図 5.23 繰返し載荷パターン

5.7 は、旧六日町中学校地点、表 5.8 は、六日町役場地点、そして表 5.9 は余川水準点地点に対応する。

図 5.24 は、余川水準点地点で採取した B 層の下部粘性土層の試料（供試体番号 23：採取深度 38.62～38.65m の粘土質シルト質）の繰返し圧密試験結果である。この層の層厚が約 10m であるので、式 (5.15) に基づいて繰返し圧密試験の載荷周期を、実地盤の 1 年に相当する一周期 120 秒とした。繰返し設定圧力は、12.8～6.4 kgf/cm² である。図中の破線は同じく供試体番号 24（採取深度 38.80～38.83 m のシルト質粘土）の標準圧密試験の結果の内、荷重段階が 12.8 kgf/cm² の場合の沈下曲線である。

図 5.25 は、図 5.24 に示した繰返し圧密試験の各繰返し段階について、載荷時の沈下量と除荷時の膨張量を図示したものである。縦軸は沈下量を正としているので、膨張量は負で表される。

図 5.26 は、同じ試験について 1 サイクルごとの沈下量を示したものである。

5.6.3 繰返し圧密試験の考察

供試体番号 23 と 24 の試料は、採取深度が、約 20cm 異なるだけで、土質の面からも、応力履歴の面からもほとんど同一の試料とみなせる。したがって、この 2 つの試料の試験結果を比較するということは、同一試料に対する、静的な圧密試験と繰返し圧密試験の結果を比較することとなる。図 5.24 によると、繰返し圧密試験の場合の沈下量は、28 サイクル目で静的に載荷し続けたときと同じになり、それ以降は静的載荷の場合よりも大きくなった。これは、何もこのケースに限った場合の現象ではなく、著者らが、今まで行ってきた同一、あるいは同一と思われる試料に対する、静的・繰返し圧密試験で、何サイクル目で繰返し圧密試験の沈下量がより大きくなるかを別にすれば、常にみられる現象である。このことから、静的な圧密試験を、一年中揚水し地下水位が低下し続けている場合に、繰返し圧密試験を、周期的に地下水位が変動する場合に対応させて考えれば、最終的には周期的に地下水位が変動する方がより大きな累積沈下量を示すことが分かる。したがって、季節的に地下水位が大きく変動する地域では、地下水位の変動によって

表 5.7 繰返し圧密試験の一覧表 (旧六日町中学校地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 繰返し荷重 kgf/cm ² | 載荷時間 sec | 繰返し回数 | 試験番号 |
|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|------------|------------------------------|-------------|-------|---------|
| 1 | 2.52~2.55 | シルト | 81.91 | 43.25 | 2.0021 | 1.60~3.20 | 100 | 407 | MUSF D8 |
| 4 | 3.20~3.23 | シルト | 90.80 | 54.31 | 2.0814 | 1.60~3.20 | 100 | 407 | MUSF D9 |
| 6 | 5.81~5.85 | シルト | 95.38 | 50.29 | 2.1250 | 1.60~3.20 | 100 | 407 | MUSE D4 |
| 8 | 6.42~6.45 | シルト | 92.33 | 57.48 | 2.0571 | 1.60~3.20 | 100 | 407 | MUSD D1 |
| 11 | 8.66~8.69 | 粘土 | 89.02 | 57.24 | 2.0535 | 1.60~3.20 | 100 | 407 | MUSE D5 |
| 13 | 19.16~19.19 | シルト質粘土 | 90.46 | 57.87 | 1.9587 | 3.20~6.40 | 100 | 354 | MLSG D1 |
| 16 | 19.63~19.66 | 砂質土 | 88.57 | 58.72 | 1.9306 | 3.20~6.40 | 100 | 354 | MLSG D0 |
| 19 | 22.11~22.14 | 腐植土 | 57.25 | 22.36 | 2.0793 | 3.20~6.40 | 100 | 354 | MLSH D4 |
| 22 | 22.50~22.53 | 腐植質シルト | 94.41 | 52.15 | 2.3233 | 3.20~6.40 | 100 | 354 | MLSH D5 |
| 25 | 25.10~25.13 | 腐植土 | 63.93 | 19.65 | 2.4446 | 6.40~12.80 | 100 | 354 | MLSI D8 |
| 28 | 25.70~25.73 | 腐植土 | 66.21 | 21.06 | 2.0528 | 6.40~12.80 | 100 | 354 | MLSI D9 |

表 5.8 繰返し圧密試験の一覧表 (六日町役場地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 繰返し荷重 kgf/cm ² | 載荷時間 sec | 繰返し回数 | 試験番号 |
|-----------|-------------|-----|-----------|-----------|------------|------------------------------|-------------|-------|---------|
| 3 | 3.46~3.49 | 粘土 | 88.84 | 53.53 | 1.9401 | 1.60~3.20 | 180 | 480 | MYNQ D0 |
| 4 | 3.49~3.52 | シルト | 92.30 | 55.67 | 1.9680 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNG D0 |
| 5 | 3.64~3.67 | シルト | 90.52 | 55.03 | 1.9589 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNG D1 |
| 8 | 5.43~5.46 | シルト | 98.91 | 67.84 | 1.9785 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNH D4 |
| 9 | 5.55~5.58 | シルト | 97.56 | 66.26 | 1.9568 | 1.60~3.20 | 180 | 480 | MYNQ D1 |
| 10 | 5.58~5.61 | シルト | 99.62 | 68.00 | 2.0077 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNH D5 |
| 12 | 7.28~7.31 | シルト | 96.35 | 65.56 | 1.9667 | 1.60~3.20 | 180 | 480 | MYNR D4 |
| 14 | 7.43~7.46 | シルト | 94.92 | 61.60 | 1.9872 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNI D8 |
| 15 | 7.58~7.61 | シルト | 92.86 | 56.69 | 2.0025 | 1.60~3.20 | 180 | 240 | MYNI D9 |
| 16 | 7.73~7.76 | シルト | 93.36 | 59.70 | 1.9976 | 1.60~3.20 | 180 | 480 | MYNR D5 |
| 17 | 9.13~9.16 | シルト | 93.91 | 61.08 | 2.0066 | 3.20~6.40 | 180 | 240 | MYNN D0 |
| 19 | 9.28~9.31 | シルト | 92.64 | 57.35 | 2.0176 | 3.20~6.40 | 180 | 240 | MYNN D1 |
| 22 | 12.43~12.46 | 粘土 | 99.39 | 69.01 | 1.9877 | 3.20~6.40 | 20 | 720 | MYNO D4 |
| 25 | 15.39~15.42 | 粘土 | 96.79 | 66.58 | 1.9949 | 3.20~6.40 | 20 | 720 | MYNO D5 |
| 26 | 17.34~17.37 | 粘土 | 97.93 | 67.33 | 1.9822 | 3.20~6.40 | 20 | 720 | MYNP D8 |
| 28 | 19.24~19.27 | 粘土 | 92.95 | 60.72 | 1.9550 | 3.20~6.40 | 20 | 720 | MYNP D9 |

表 5.9 繰返し圧密試験の一覧表 (余川水準点地点)

| 供試体 番号 | 採取深度 m | 土質名 | 湿潤重量 g | 乾燥重量 g | 初期高さ cm | 繰返し荷重 kgf/cm ² | 載荷時間 sec | 繰返し回数 | 試験番号 |
|-----------|-------------|--------|-----------|-----------|------------|------------------------------|-------------|-------|---------|
| 2 | 8.99~9.02 | 腐植土 | 73.01 | 33.38 | 2.0321 | 3.20~6.40 | 240 | 623 | MHSJ D0 |
| 8 | 13.25~13.28 | 細砂混り粘土 | 95.72 | 63.86 | 1.9731 | 3.20~6.40 | 240 | 623 | MHSJ D1 |
| 13 | 23.39~23.42 | 腐植質シルト | 91.45 | 57.59 | 1.9567 | 6.40~12.80 | 240 | 623 | MHSK D4 |
| 17 | 25.04~25.07 | 腐植質シルト | 94.35 | 65.66 | 2.0021 | 6.40~12.80 | 240 | 623 | MHSK D5 |
| 20 | 32.89~32.92 | 粘土質シルト | 82.78 | 44.99 | 2.0232 | 6.40~12.80 | 120 | 600 | MHSL D8 |
| 23 | 38.62~38.65 | 粘土質シルト | 83.61 | 50.31 | 1.9650 | 6.40~12.80 | 120 | 600 | MHSL D9 |

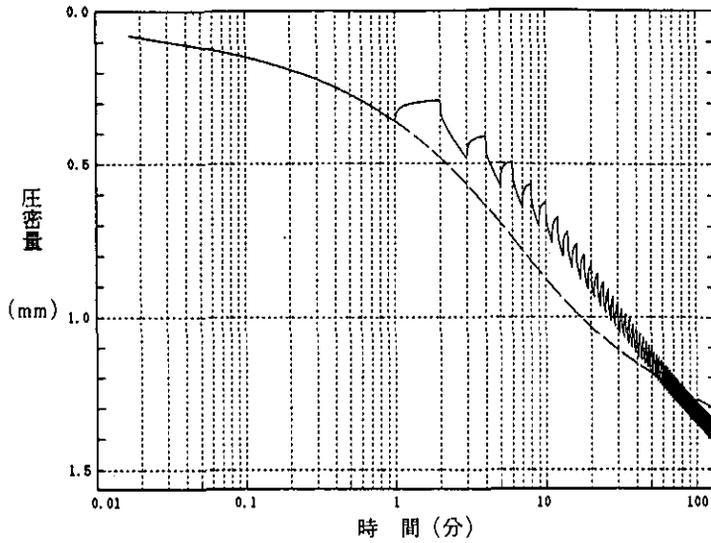


図 5.24 繰返し圧密試験結果の一例 (実線：余川水準点地点供試体番号23の繰返し圧密試験結果，破線：余川水準点地点供試体番号24の標準圧密試験結果)

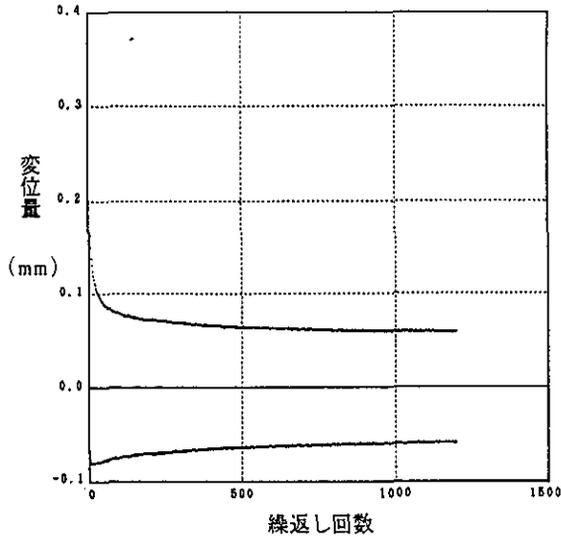


図 5.25 各繰返しサイクルにおける沈下量と膨張量の変動 (余川水準点地点供試体番号23の繰返し圧密試験について)

地盤に加わる応力の繰返し効果で，一年中地下水を揚水し続ける場合よりも，大きな累積沈下量を示す可能性が高いので，できる限り地下水位の変動量を少なくする必要がある。

図 5.25 によれば，除荷時の膨張量は，繰返し回数にかかわらずほぼ一定であるのに対し，載荷時の沈下量は繰返しを行うたびに小さくなり，最終的には沈下量と膨張量が等しくなってくる。

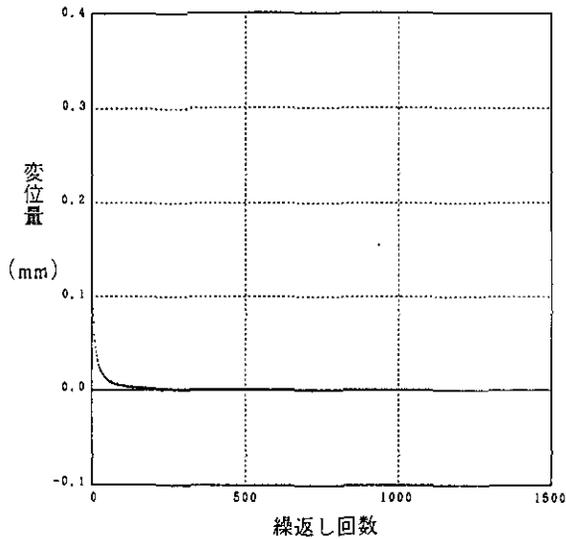


図 5.26 各繰返しサイクルの総沈下量の変動(余川水準地点供試体番号23の繰返し圧密試験について)

このことは、載荷時と除荷時に分けたのではなく、1サイクルごとの沈下量を示した図5.26によりはっきりと表れる。これは、繰返しの回数にかかわらず、除荷時の膨張量はほぼ一定であるが、載荷時の沈下量は繰返しの回数の増加に伴って減少することを示している。

図5.25に示した、載荷時の沈下量と繰返し回数の関係を次式で近似する。

$$S = a / (N + b)^c + d \quad (5.16)$$

ただし、S：載荷時の沈下量

N：繰返し回数

a：S軸方向の倍率

b：S軸に平行する漸近線

c：双曲線の曲率

d：N軸に平行する漸近線

なお、パラメーター a, c, d は正の値をとる。図5.27にこの式の各パラメーターのもつ意味を図示する。パラメーター a が大きくなるということは、一回の繰返しでの沈下量が大きくなるということである。パラメーター c が大きくなるということは、繰返し回数の増加に伴う一回当たりの沈下量の減少が、小さくなるということである。パラメーター d は、無限回繰返した後の一回当たりの沈下量であり、弾性的な変形量と考えられる。パラメーター b は、フィッティングに必要な値であるが、沈下量との関係はない。図5.28は、今回繰返し圧密を行った33供試体のす

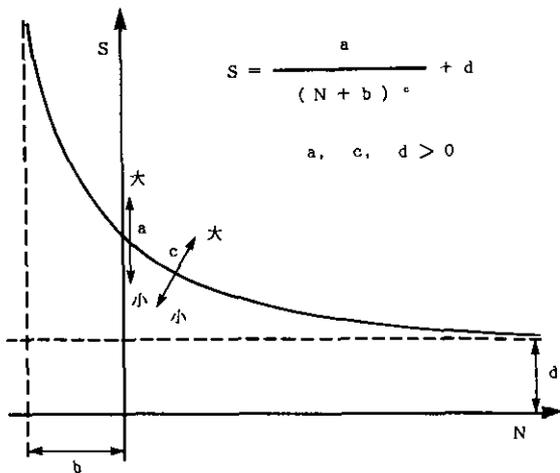


図 5.27 双曲線近似における各パラメーターの数学的な意義

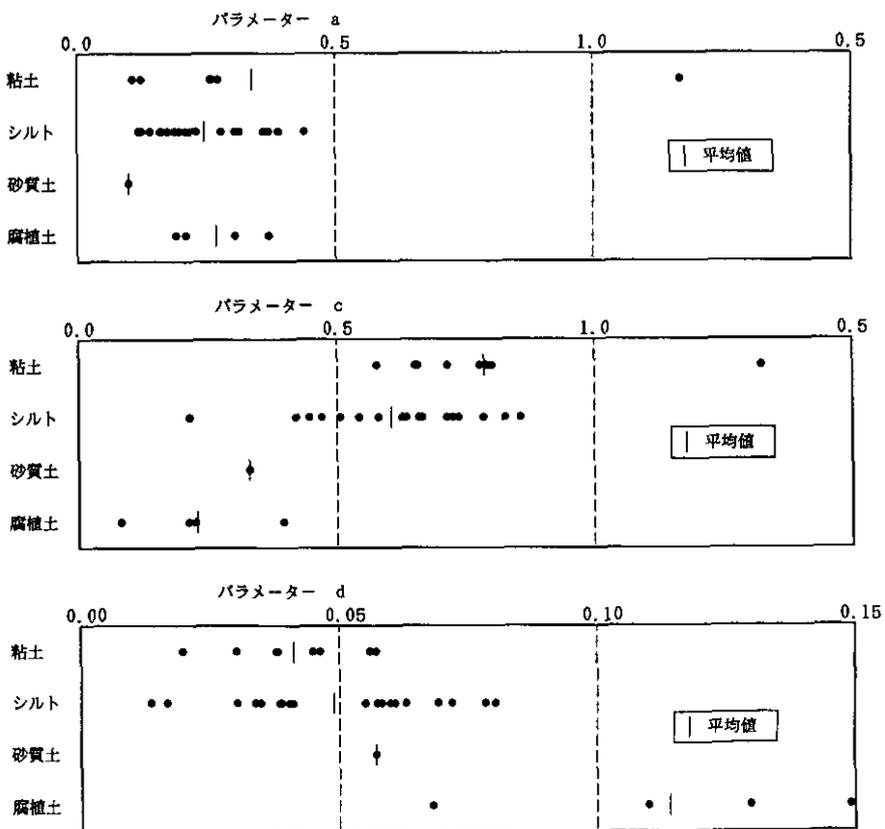


図 5.28 双曲線近似の結果

べてについて、最小二乗法によりこの近似を行い、土質別に(粘土・シルト・砂質土・腐植土の4分類とした)図示したものである。なお、パラメーターbについては、沈下量とは関係しないので示していない。各パラメーターの値は大きくばらついているものの、平均値をとってみると定性的な評価が可能である。すなわち、粘土は沈下量が大きく(パラメーターaが大きい)、各繰返しサイクルの沈下量が膨張量と等しくなるのに時間がかかり(パラメーターcが大きい)、繰返しが進行した後の弾性的な変形量が小さい(パラメーターdが小さい)。一方、砂質土は、粘土とはまったく逆の傾向を示し、シルトは、粘土と砂質土の中間的な性質を示す。腐植土は沈下量が粘土と同様に大きい(パラメーターaが大きい)が、各繰返しサイクルの沈下量が膨張量と等しくなるのが早く(パラメーターcが最も小さい)、繰返しが進行した後の弾性的な変形量が大きい(パラメーターdが最も大きい)。これらは、それぞれの土質が示す性質から、容易に類推されることであり、妥当な結果であるといえる。

式(5.16)を用いることによって、繰返し圧密時の各繰返しサイクルごとの沈下量の予測が容易になると思われる。しかし、今回の繰返し圧密試験はすべて荷重増分比1で行ったが、現実の地盤では、5.5節に示したように深度方向で有効応力が一様ではないため、一定の地下水位の低下に対する荷重増分比が一定にはならない。したがって、現実に沈下量予測を行う場合には、異なる荷重増分比で、繰返し圧密試験を行うことが不可欠であろう。

引用文献

- 1) 陶野郁雄(1971): 家を建てるための地質学. 地学の散歩道, (原口九萬教授退官記念論集), 53-76.
- 2) Terzaghi, K.(1925): *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke, Wien, 212p.
- 3) 土質工学会(1979): 土質試験法. 第2回改訂版. 土質工学会, 東京, 757p.
- 4) Terzaghi, K and Peck R.B.(1948): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 566p.
- 5) 吉見吉昭(1967): 土質力学. 建築構造学体系3, 彰国社, 東京, 246p.
- 6) 三笠正人(1963): 軟弱粘土の圧密—新理論とその応用. 鹿島研究所出版会, 東京, 137p.
- 7) 山口柏樹(1975): 土質力学. 改訂増補版, 技報堂, 東京, 389p.

6 地下水位の変動と地盤沈下*

6.1 繰返し圧密現象

6.1.1 人工試料による繰返し圧密試験

六日町で採取した乱さない試料を対象とした繰返し圧密試験では、実地盤の現象に対応させ、一次圧密終了前に繰返し荷重を与えた。このため、静的な載荷に比べ、圧縮量を増加させる因子を明確に分離することができなかった。

このようなことから、繰返し圧密現象を明確に把握するため、ベントナイトとカオリンを混合した人工試料を用いた繰返し圧密試験を行った。この際、一次圧密が終了してから、繰返し圧密試験を実施し、これらの因子を分離すると共に、繰返し周期の影響、ベントナイトとカオリンの混合比の違いによる繰返し圧密現象に対する影響の検討を行った。

試験に用いた試料は、カオリンとベントナイトの混合比を変えた4種類の人工粘土である。試験は、初期拘束圧 0.2 kgf/cm^2 で予備圧密した後、荷重増分比1で鉛直応力 $\sigma_v = 3.2 \text{ kgf/cm}^2$ まで段階的に荷重を増加させた。その後、 $\sigma_v = 3.2 \text{ kgf/cm}^2$ に載荷、 $\sigma_v = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ に除荷と、これを繰返すことで繰返し載荷を行った。最初の載荷は、一次圧密終了後7倍以上の時間を経過させ、その後除荷した。また、各々の繰返し周期も一次圧密終了時間の4倍以上とり、試験結果に一次圧密による時間遅れの影響がでないように配慮した。試料の物理的性質と載荷条件の詳細は表6.1に示すとおりである。なお、一次圧密終了時間は、 $U = 0.95$ に相当する時間とした。

6.1.2 繰返し圧密における繰返し効果

カオリン9、ベントナイト1の割合で混合させた試料の繰返し圧密試験結果を図6.1に示す。この図から明らかなように、繰返し圧密によって通常の二次圧密より大きな沈下が生じており、繰返しによって単調載荷の場合とは異なる体積変化が生じていることが分かる。図6.2は、図

表 6.1 ベントナイトとカオリンの混合試料の物理的性質と載荷条件

| | KB11D | KB21D | KB41D | KB91M | KB91H | KB91D |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| カオリンとベントナイトの混合比 | 1 : 1 | 2 : 1 | 4 : 1 | 9 : 1 | 9 : 1 | 9 : 1 |
| 初期含水比 (%) | 120 | 100 | 97 | 60 | 60 | 60 |
| 初期間隙比 | 3.11 | 2.66 | 2.56 | 1.59 | 1.59 | 1.59 |
| 飽和度 (%) | 101.8 | 99.4 | 101.8 | 99.6 | 99.6 | 99.6 |
| 除荷時の圧密圧力 (kgf/cm^2) | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| 載荷時の圧密圧力 (kgf/cm^2) | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| 繰返し周期 | 2日 | 2日 | 2日 | 30分 | 2時間 | 2日 |
| 繰返し回数 | 5 | 5 | 5 | 76 | 18 | 3 |

*この節は、印刷発表(5)を基として記述した。

6.1に示した試験より得られた繰返しサイクルごとの圧密時の圧縮指数 C_{cn} 及び除荷時の圧縮指数 C_{cr} の値を示したものである。この図から、除荷時の圧縮指数は繰返し回数が増加してもあまり大きくは変化せず、ほぼ一定な値を示しており、弾性的な変化とみなせる。一方、載荷時の圧縮指数は、繰返し回数の増加に伴って、徐々に減少していくことが分かる。したがって、繰返し圧密による塑性変形は、載荷時に生じていると考えられる。

図6.3は、繰返し周期が30分、2時間、2日で行った試験結果の、各繰返しの体積ひずみ増分 $\Delta \epsilon_v$ と繰返し回数 N との関係を示したものである。図から明らかなように、各繰返しサイクルの沈下量は、繰返し周期にあまり影響されない。

図6.4は、カオリンとベントナイトとの混合比を1:1、1:2、1:4、1:9と変化させた場合の体

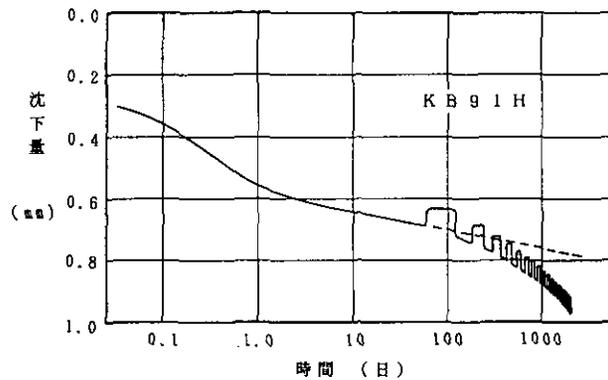


図 6.1 ベントナイト9：カオリン1の混合試料の試験結果

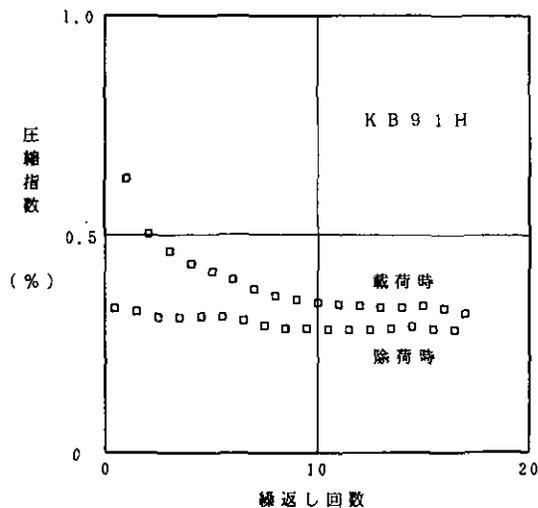


図 6.2 載荷時と除荷時の圧縮指数

積ひずみ増分と繰返し回数との関係を示したものである。この図が示すように、カオリンとベントナイトの混合比を変えても両者の関係はあまり変化しておらず、ほぼ一定であるとみなせる。

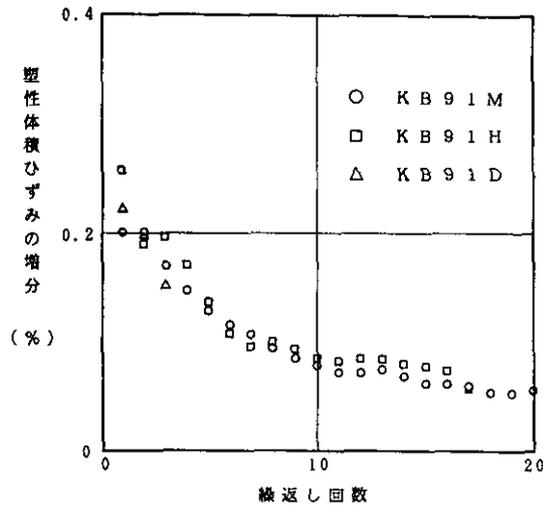


図 6.3 繰返し周期を変化させた場合の塑性体積ひずみと繰返し回数の関係

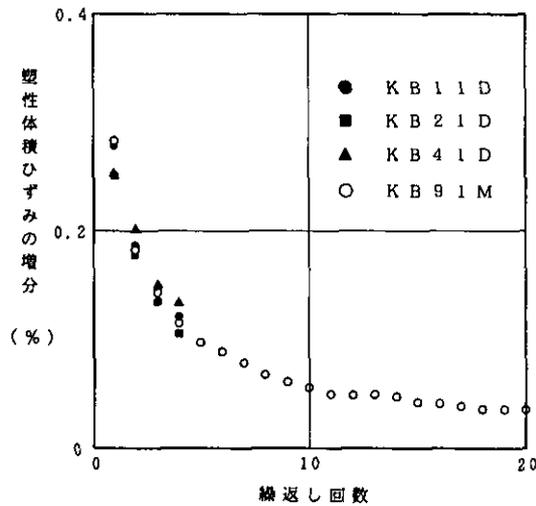


図 6.4 ベントナイトとカオリンの混合比を変化させた場合の塑性体積ひずみと繰返し回数の関係

6.1.3 繰返し圧密効果の定式化

繰返し圧密による塑性体積ひずみの変化と上載圧との関係を模式的に表現すると、図 6.5 のよ

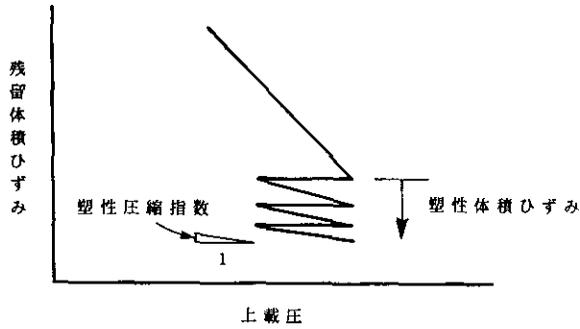


図 6.5 塑性体積ひずみと上載圧との関係の模式図

うになる。図 6.3, 6.4 に示したように除荷時には塑性ひずみが生じず、載荷時の塑性圧縮指数 C_{np} は、体積ひずみの進行に伴って、徐々に小さくなっていく。

繰返し圧密による塑性ひずみは、一次圧密による成分とせん断に伴って生じる成分があると考えられる。図 6.5 に示した塑性体積ひずみはせん断に伴う成分と考えられる。したがって、一次元の圧密現象においても、上載圧 $\Delta\sigma_v$ が加わると水平応力は $K_0 \times \Delta\sigma_v$ となるため、次式のようなせん断力 τ が加わる。

$$\tau = (1 - K_0) / 2 \times \Delta\sigma_v \quad (6.1)$$

非排水条件下では、上載圧 $\Delta\sigma_v$ が加わっても、(6.1) 式で示されるようにせん断応力は生ずるが、平均有効主応力 σ'_v は変化しない。そこでこのような状態でのせん断による体積ひずみ ϵ_{vs} は、次式のように表せる。

$$d\epsilon_{vs} = a \times (\tau / \sigma'_v) \quad (6.2)$$

正規圧密終了後繰返し圧密で生じた体積ひずみを、残留体積ひずみ ϵ_{vr} とし、この残留体積ひずみと塑性圧縮指数の関係を示したものが図 6.6 である。供試体の残留体積ひずみが減少するにつれ、各繰返し載荷時の塑性圧縮指数も減少していくことが分かる。図中に繰返し周期の異なった試料を合わせて示す。繰返し周期は塑性圧縮指数の値にあまり大きな影響を与えない。

図 6.7 は、ベントナイトとカオリンの混合比を図 6.4 の場合と同様に変化させた試料に関して、図 6.6 と同様の整理をしたものである。図 6.6 の結果と同様に、混合比を変えた供試体においても残留体積ひずみと塑性圧縮指数の関係はあまり大きな違いがなく不変性が高い。図中の曲線は、両者の関係を近似する関係式で、次式のように表せる。

$$C_{np} = \alpha / (\epsilon_{vro} + \epsilon_{vr})^2 \quad (6.3)$$

ただし、

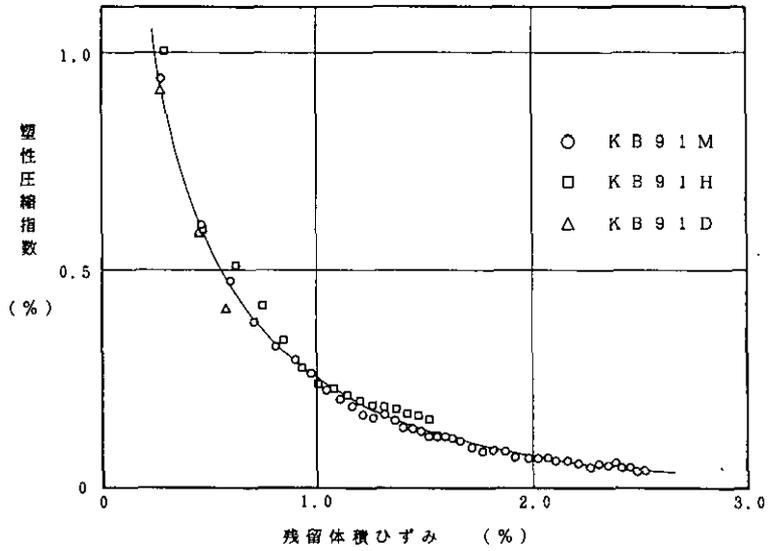


図 6.6 繰返し周期を変化させた場合の塑性体積ひずみと残留体積ひずみの関係

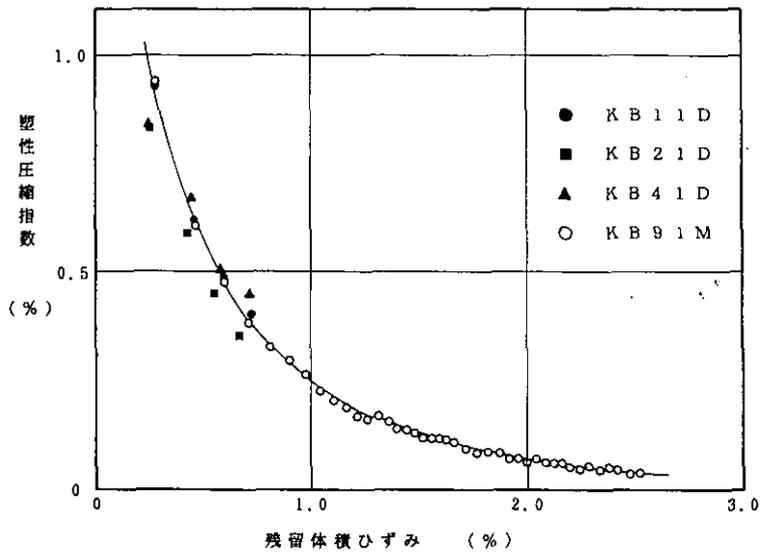


図 6.7 ベントナイトとカオリンの混合比を変化させた場合の塑性体積ひずみと残留体積ひずみの関係

α : 定数

$\epsilon_{v_{r0}}$: 残留体積ひずみの初期値

以上のことから、繰返し圧密時の供試体の繰返し圧密によって生ずる塑性体積ひずみは、次式で表すことができる。

$$d\epsilon_v = d\epsilon_{vc} + d\epsilon_{vs} \text{ (载荷時)} \quad (6.4)$$

$$d\epsilon_v = -d\epsilon_{vr} \text{ (除荷時)}$$

$$d\epsilon_{vc} = 0.4343 \times C_c \times (d\sigma_v' / \sigma_v')$$

$$d\epsilon_{vr} = 0.4343 \times C_r \times (d\sigma_v' / \sigma_v')$$

$$d\epsilon_{vs} = 0.4343 \times C_{np}(\epsilon_{vr}) \times (d\sigma_v / \sigma_v')$$

ただし、 σ_v' : 有効上載圧
 $d\sigma_v$: 全上載圧の増分
 $d\sigma_v'$: 有効上載圧の増分
 C_r : 繰返し除荷時の圧縮指数
 C_c : 繰返し载荷時の圧縮指数

以上、式(6.4)によって繰返し圧密時の全応力の増分に伴うせん断応力による、体積ひずみ増分が表現される。

6.2 地盤沈下解析の手法

地盤沈下の解析の最終的な目標は、地盤沈下量の将来予測にあるといつてよい。そのためには、次の3ステップに分かれる。

- (1) 地下水揚水量の予測を行う。
- (2) (1)の揚水量の予測を前提として、地下水流動解析を行う。これにより地下水位の将来変動予測が可能である。
- (3) (2)に基づいて沈下解析を行う。

(1)は、地盤沈下解析の際には、

- 1) 現状の揚水量を維持する。
- 2) 過去の揚水量の変化を外挿して求める。
- 3) 何らかの規制を前提として求める。(たとえば、揚水量を半減する。あるいは、揚水を全

面的に禁止する。)

上記の(1)の1)~3)の3点くらいが通常用いられている。3)は、規制を行った場合の効果
を明らかにする上で有効であるが、1)や2)は、あまり根拠のある仮定とはいえない。本来な
らば、解析対象となる地域の将来の水需要を、社会学的、経済学的に予測し、その中で地下水の
揚水量を明らかにすることが望ましいが、そこまで行った地盤沈下解析例はないし、地盤沈下解
析全体をながめてみた場合、工学的にみてさほど重要であるともいえない。

(2)において行う地下水流動解析は、地盤沈下解析のみでなく建設工学的にみても有用であ
り、さまざまな手法が提案されている。詳細は、文献¹⁾に適切にまとめられているので参照され
たい。地盤沈下解析に主として用いられる流動モデルは、

- 1) 平面二次元地下水流動モデル
- 2) 断面二次元地下水流動モデル
- 3) 準三次元地下水流動モデル
- 4) 三次元地下水流動モデル

などである。

また、実際に解析を行う際には、貯留係数・透水係数といった各種の地盤定数が必要となる。

(3)の沈下解析は、圧密試験の結果を利用した通常の圧密沈下解析を準用する場合もあるが、
通常の圧密沈下解析は盛土を行った場合のように荷重が変動しない場合を想定している。しかし、
地盤沈下解析においては、地下水位が激しく変動するケースが多く、このような方法では適切な解
析が行えるとはいえない。このため、沈下解析においては、差分法・有限要素法・境界要素法と
いったコンピュータ・シミュレーションの手法を用いることが適切である。これらの手法は、や
はり建設工学において、圧密解析を精密に行うために発展してきており^{1,2)}そのまま準用するこ
とができる。また、地盤沈下現象は、圧密を起こす粘土層の厚さに比べ、2桁以上の広い範囲に
わたって生じるため、鉛直一次元モデルとして扱って差し支えない。

6.3 地盤沈下解析の結果と考察*

6.3.1 沈下解析

静的な圧密試験結果及び繰返し圧密試験結果から、有限要素法による一次元圧密沈下解析法を
用いて、余川水準地点の場合について沈下量の予測を行った。解析に用いたプログラムは、テ
ルツァーギの一次元圧密理論を基本としたものであるが、透水係数と体積圧縮係数が有効応力に
反比例する関係を導入したものである。このことにより、ひずみに関しては圧密係数を一定とし
た三笠の圧密理論と同じ解が得られることが確かめられている。繰返し載荷状態を解析するとき
に用いられる膨張時の圧密係数 c_{vs} と膨張指数 C_r は任意に設定することが可能である。

*この節は、印刷発表(4)の基づいて記述した。

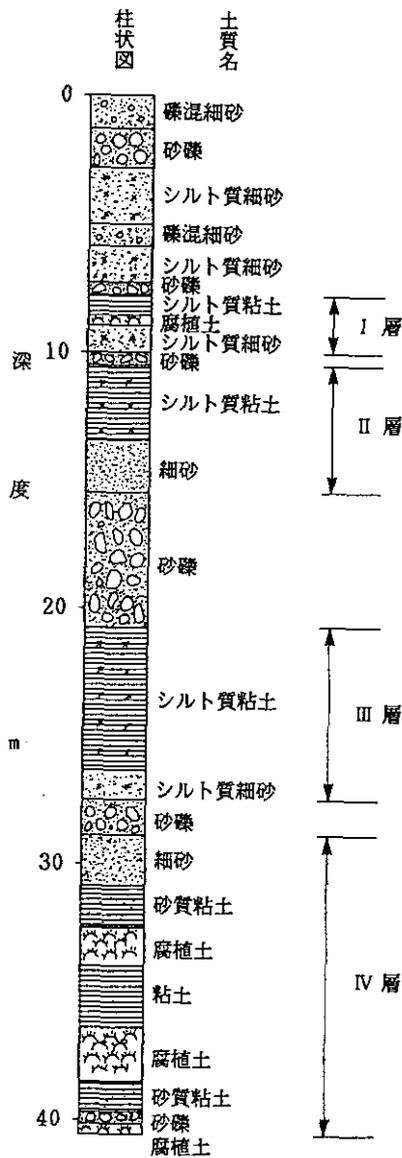


図 6.8 解析対象層

図6.8に示したような4つの解析対象層を定め、上からI層、II層、III層そしてIV層とした。各解析対象層の諸元を表6.2に示す。各層をそれぞれ3要素、5要素、6要素、5要素に分割し、各要素内の水圧は直線分布とした。各要素は実際の層厚約1mに対し1要素としたが、IV層については、計算時間の制約から1要素約2mとした。なお、この解析においては砂礫層の圧縮、及び粘性土層の二次圧密は考慮していない。

外力として与えられる地下水水位変動条件は、余川水準点周辺に水位観測井がないため、六日町

表 6.2 解析条件

| | 層厚 m | 深度 m | 有効上載圧 kgf/cm ² |
|-----|---------|-------------|------------------------------|
| I | 2.25 | 7.75~10.00 | 0.670 |
| II | 5.00 | 10.50~15.50 | 0.740 |
| III | 6.75 | 20.75~27.50 | 1.577 |
| IV | 11.70 | 28.90~40.60 | 2.200 |

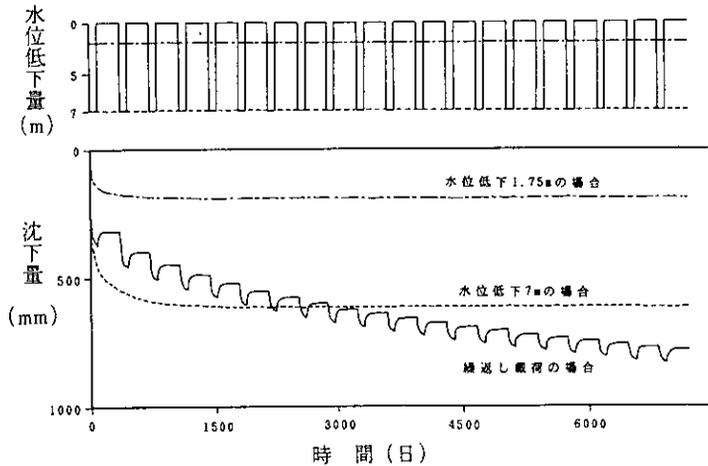


図 6.9 有限要素法による解析結果

中学校と六日町役場の観測記録を基に水位低下 7 m が 90 日，水位低下 0 m が 270 日を一周期とする繰返し載荷の場合と，水位低下 7 m が継続する静的載荷の場合，及び繰返し載荷時の外力を平均化した水位低下 1.75 m が継続する静的載荷の場合の 3 とおりを設定した。水位の変動パターンを図 6.9 に示す。実線が繰返し載荷の場合，破線が水位低下 7 m の場合，一点鎖線が水位低下 1.75 m の場合である。解析に用いた時間間隔は 10 日であり，7,200 日まで計算を行った。これは，繰返し載荷の場合では 20 周期に相当する。

解析に用いた，圧密係数と圧縮指数は，静的載荷の場合は，静的圧密試験の結果をそのまま用いた。繰返し載荷の場合は，繰返し圧密試験結果から，各繰返し段階の載荷時の圧密係数と圧縮指数，さらに除荷時の膨張時の圧密係数と膨張指数を求め，対応する繰返し載荷の各段階で用いた。実験結果より得られた圧密定数を用いることにより，各繰返し段階での圧密定数の変化にも対応できる。

6.3.2 沈下解析結果の考察

図 6.9, 6.10 に計算結果を示す。図 6.9 によれば，静的載荷の場合，水位低下 1.75 m では 3 年

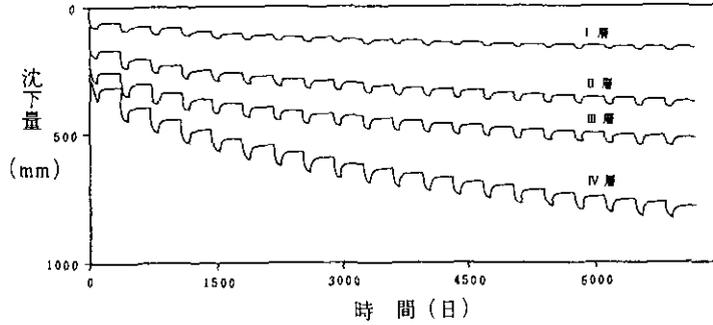


図 6.10 繰返し載荷時の層別沈下量(各曲線は、上からⅠ層、Ⅰ層+Ⅱ層、Ⅰ層+Ⅱ層Ⅲ層及びⅠ層+Ⅱ層+Ⅲ層+Ⅳ層の沈下量を示す)

程度で沈下がほぼ終息し、最終沈下量は190mmとなる。水位低下7mでは終息するまで5年程度必要であり、最終沈下量は615mmとなる。繰返し載荷の場合は、平均水位低下量である1.75mを静的に載荷した場合に比べると1サイクル目でも2倍、20サイクル目では4倍とはるかに大きい沈下を示しているし、7mの水位低下を継続した場合と比べても、載荷時の沈下量では7年目で、除荷時の沈下量でも9年目でより大きい値を示すようになる。20年目の除荷時の沈下量は780mmに達し、なお年間10数mmの沈下が見込める。このことは載荷と除荷を繰返す繰返し圧密試験の方が、載荷し続ける静的圧密試験より、最終的に大きい沈下量を示すという5.6節に示した結果と定性的によく一致している。また、詳細な観測データはないが、余川水準点の過去12年間の測量結果からは400mm近くの沈下を示している(図4.12参照)。井戸や建築物の基礎の抜け上がり状況などから、測量開始以前も含めた累積沈下量はこれ以上になるものと見込まれ、この点からも計算結果が妥当なものであるといえる。図6.10に繰返し載荷による各層別の沈下量を示す。この図によれば、沈下の度合いが大きいのは、Ⅱ層とⅣ層であるが、層厚を考慮した場合Ⅰ層の沈下量が最も大きいといえる。実際に、Ⅰ層は腐植物が大量に混入した非常に圧縮性の高い層であり、妥当な結果である。Ⅲ層とⅣ層は、Ⅰ、Ⅱ層と比べると沈下量が小さいといえるが、もともと有効上載圧が大きいので、同じ水位低下に対しても荷重増加率が小さくなるため、当然ともいえる。ただ、Ⅲ層とⅣ層を比べた場合、層厚と荷重増加率を考慮してもⅢ層の方が沈下量が少ないようである。ボーリング調査結果によれば、Ⅳ層には圧縮性の高い腐植物が大量に観察されており、この層の方が沈下量が大きくても不思議ではない。また、Ⅳ層は沈下の時間遅れが大きく、繰返し載荷当初の沈下量は小さいが、20サイクル目では、総沈下量の半分近くがこの層の収縮によるとの結果が得られた。

今回解析に用いたプログラムは、基本的にテルツァーギの一次元圧密理論に従うものであり、静的載荷の場合に適用することには問題はないが、繰返し載荷の場合には単純に適用できない。なぜなら、繰返し載荷の場合、繰返しが進行したときの沈下は一次圧密によるものとは考えられないからである。しかし、実際の繰返し圧密試験より得られた圧密係数と圧縮指数を用いて解析

することにより、妥当な結果が得られたと考えている。また、この手法では、今回解析したような同じ荷重が周期的に繰返す場合には適用可能であるが、図4.12に示したような、実際にみられるランダムともいえる水位変動に対して適用することは困難である。より精度の高い沈下予測を行うため、2次圧密の効果や繰返しによる圧密定数の変化を考慮した圧密モデルの提案を行う必要があると考えている。

引用文献

- 1) 国立公害研究所(1989):大深度地下空間利用における地盤環境保全の評価手法に関する調査報告書. 国立公害研究所研究資料, F-13-'89/NIES, 102p.
- 2) 山上拓男・田村 武(1989):講座 有限要素法による数値解析入門 5. 地盤の圧密解析(その1). 土と基礎, 37(1), 81-89.

7 まとめ

消雪用に、大量に地下水を消費することにより地下水位が一年周期で変動する地域の地盤沈下特性を解明するため、新潟県南魚沼郡六日町を対象として、現地でのボーリング調査並びに乱さない粘性土試料の採取を行い、静的な標準圧密試験及び繰返し圧密試験を行った。

地下水利用の散水融雪は、主に地下水の熱エネルギー源としての性質を利用したものである。しかし、地下水を多量に揚水するため、著しく地下水位が低下し、地盤沈下が生じる。しかも繰返し圧密試験結果からも分かるように、地盤沈下が止りにくく、一年中揚水し、地下水位が低下し続けている場合よりも大きな累積沈下量を示すようになることが予想される。

六日町では、井戸のほとんどが深度60m以浅にあり、揚水量のほとんどが消雪用に使用されている。このため、冬期に地下水位が大幅に低下し、夏期に回復するという一年周期の水位変動を示し、地盤沈下量は冬期の地下水位の低下量に比例している。過去10年間の累積沈下量は、余川で355mm、旧六日町中学校で250mm、六日町役場で165mmに達している。

六日町の粘性土層は、市街地の中心部で厚くなっている。深度40m以浅に層厚が10~20mの粘性土層が2層存在しており、この2層が地盤沈下の主体となっているようである。圧密試験結果によると、この2層はともに過圧密状態となっている。

余川の地下水の開発は比較的新しく、深度20m以深の更新世に堆積した下部2層は過圧密状態にあるといえるが、過圧密比は1.5程度であり、市街地の中心部に比べると、まだ圧密が進行する余地があるといえる。

また、この試験結果から得られた土質定数を用いて沈下量の予測をするために、有限要素法による一次元圧密沈下解析を行い良好な結果を得た。

このようなことから、季節的に地下水位が大きく変動する地域では、地下水位の変動によって地盤に加わる応力の繰返し効果で、一年中地下水を揚水し続ける場合よりも、大きな累積沈下量を示す可能性があるため、できる限り地下水位の変動量を少なくする必要がある。

謝 辞

繰返し圧密試験データの、最小二乗法による近似計算プログラムは、国立公害研究所水質土壌環境部海洋環境研究室主任研究員の木幡邦男博士に、有限要素法による一次元圧密解析プログラムは、国立公害研究所客員研究員(当時)で日本工業大学工学部建築学科助教授の桑原文夫博士にそれぞれ提供して頂いたものである。

本研究を行うに当たり、当時、日本工業大学学生であった田中 実、小池浩次、鬼塚孝幸、野口 豊、栗原市雄、圓城寺利弘、太田康史諸君の協力を得た。以上の方々に、深く感謝する次第である。

また、観測データを提供して頂いた新潟県環境保健部、六日町環境課及びボーリング調査に協力して頂いた六日町役場、六日町中学校、北辰小学校の関係各位に謝意を表すものである。

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第1号 陸水域の富栄養化に関する総合研究—霞ヶ浦を対象域として—昭和51年度.(1977)
第2号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51/52年度 研究報告.(1978)

(改称)

国立公害研究所研究報告

- ※第3号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
第4号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和52年度 中間報告.(1978)
第5号 芳香族炭化水素-窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究—昭和51, 52年度 研究報告.(1978)
第6号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)—霞ヶ浦を中心として—昭和53年度.(1979)
※第7号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae(Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
※第8号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和52, 53年度 研究報告.(1979)
第9号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和53年度 中間報告.(1979)
第10号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51~53年度 特別研究報告.(1979)
※第11号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
第12号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
第13号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
—第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係
—第2報 その一支流に見出された Chironominae亜科の20種について)
第14号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究—昭和53, 54年度 特別研究報告.(1980)
※第15号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和54年度 特別研究報告.(1980)
第16号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測.(1980)
※第17号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果—臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究—昭和53, 54年度 特別研究報告.(1980)
第18号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
(環境標準試料「リョウブ」の調整, 分析および保証値)
※第19号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ)—霞ヶ浦(西浦)の湖流—昭和53, 54年度(1981)
※第20号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ)—霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響—昭和53, 54年度.(1981)
第21号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ)—霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価—昭和53, 54年度.(1981)
第22号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ)—霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量—昭和53, 54年度.(1981)
第23号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ)—湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究—昭和53, 54年度.(1981)
第24号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅷ)—富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究—昭和53, 54年度.(1981)
第25号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅸ)—*Microcystis* (藍藻類)の増殖特性—昭和53, 54年度.(1981)

- 第26号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X)――藻類培養試験法によるAGPの測定――昭和53, 54年度.(1981)
- 第27号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI)――研究総括――昭和53, 54年度.(1981)
- 第28号 複合大気汚染の植物影響に関する研究――昭和54, 55年度 特別研究報告.(1981)
- ※第29号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
――第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科Orthoclaadiinae 各種の記載と、その分布の下水汚染度との関係について
――第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載)
- ※第30号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究――昭和54, 55年度 特別研究報告.(1982)
- ※第31号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究――昭和55年度 特別研究報告.(1981)
- 第32号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究――環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)――昭和54年度 特別研究中間報告.(1982)
- 第33号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究――大気運動と大気拡散過程のシミュレーション――昭和55年度 特別研究報告.(1982)
- ※第34号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究――昭和55年度 特別研究報告.(1982)
- 第35号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究.(1982)
- ※第36号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究――昭和55, 56年度 特別研究報告.(1982)
- ※第37号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究.(1982)
- 第38号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.(1982)
(環境標準試料「池底質」の調整, 分析及び保証値)
- ※第39号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究――昭和56年度 特別研究報告.(1982)
- 第40号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究――昭和56年度 特別研究報告.(1983)
- ※第41号 土壌環境の計測と評価に関する統計学的研究.(1983)
- ※第42号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究.(1983)
- ※第43号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1983)
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
――第5報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する6月の調査成績とユスリカ亜科に属する15新種等の記録
――第6報 多摩本流より6月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について
――第7報 多摩本流より3月に採集されたユスリカ科の各種について)
- 第44号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究――環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)――昭和54年度 特別研究中間報告.(1983)
- 第45号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究――昭和53~55年度 特別研究総合報告.(1983)
- ※第46号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究――昭和54, 55年度 特別研究報告 第1分冊.(1983)
- ※第47号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究――昭和54, 55年度 特別研究報告 第2分冊.(1983)
- ※第48号 水質観測点の適正配置に関するシステム解析.(1983)
- 第49号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究――昭和57年度 特別研究報告.(1984)
- ※第50号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(I)――霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価――昭和55~57年度 特別研究報告.(1984)

- ※第51号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅱ)―霞ヶ浦の物質循環とそれを支配する因子―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第52号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅲ)―霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- 第53号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅳ)―霞ヶ浦の魚類及び甲かく類現存量の季節変化と富栄養化―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第54号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅴ)―霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- 第55号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅵ)―富栄養化防止対策―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- 第56号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅶ)―湯ノ湖における富栄養化とその防止対策―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第57号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅷ)―総括報告―昭和55～57年度 特別研究報告。(1984)
- 第58号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究―昭和55～57年度 特別研究総合報告。(1984)
- 第59号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究―光化学スモッグチャンパーによるオゾン生成機構の研究―大気中における有機化合物の光酸化反応機構の研究―昭和55～57年度 特別研究報告(第1分冊)。(1984)
- 第60号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究―光化学エアロゾル生成機構の研究―昭和55～57年度 特別研究報告(第2分冊)。(1984)
- 第61号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究―環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)―昭和55～57年度 特別研究報告(第3分冊)。(1984)
- 第62号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究―昭和56～58年度 特別研究中間報告。(1984)
- ※第63号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究―昭和56年度 特別研究報告。(1984)
- ※第64号 複合大気汚染の植物影響に関する研究―昭和54～56年度 特別研究総合報告。(1984)
- ※第65号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants―Part 1.(1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響―第1分冊)
- ※第66号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants―Part 2.(1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響―第2分冊)
- ※第67号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究―昭和54～56年度 特別研究総合報告。(1984)
- ※第68号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究―昭和56～57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第69号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究。(1984)
- ※第70号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park.(1984)
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究
―第1部 日光国立公園の湖のユスリカの生態学的研究
―第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的、生態学的研究)
- ※第71号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析。(1984)
- 第72号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究―環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)―昭和55～57年度 特別研究報告(第4分冊)。(1985)
- ※第73号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究―昭和55～57年度 特別研究総合報告。(1985)
- ※第74号 都市域及びその周辺の自然環境に係る環境指標の開発に関する研究。環境指標―その考え方と作成方法―昭和59年度 特別研究報告。(1984)
- 第75号 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa.(1985)
(琵琶湖底泥中の元素に関する陸水学及び環境化学的研究)
- 第76号 A study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere.(1985)
(大気中モノテルペンの挙動に関する研究)
- 第77号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究―昭和58年度 特別研究報告。(1985)
- 第78号 生活環境保全に果たす生活者の役割の解明。(1985)
- 第79号 Studies on the method for long term environmental monitoring―Research report in 1980-1982.(1985)
(環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究)
- ※第80号 海域における赤潮発生のモデル化に関する研究―昭和57/58年度 特別研究報告。(1985)

- ※第81号 環境影響評価制度の政策効果に関する研究—地方公共団体の制度運用を中心として。(1985)
- ※第82号 植物の大気環境浄化機能に関する研究—昭和57~58年度 特別研究報告。(1985)
- 第83号 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)
(日本の湖沼のユスリカの研究)
- ※第84号 重金属環境汚染による健康影響評価手法の開発に関する研究—昭和57~59年度 特別研究総合報告。(1985)
- 第85号 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters. (1985)
(フリーラジカルの反応速度と分光学的及び熱力学的パラメーターに関する研究)
- 第86号 GC/MS スペクトルの検索システムに関する研究。(1986)
- 第87号 光化学二次汚染物質の分析とその細胞毒性に関する研究—昭和53~58年度 総合報告。(1986)
- ※第88号 都市域及びその周辺の自然環境等に係る環境指標の開発に関する研究Ⅱ。環境指標—応用例とシステム—昭和59年度 特別研究報告。(1986)
- 第89号 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing. (1986)
(LANDSATリモートセンシングによる霞ヶ浦の水質計測)
- 第90号 ナショナルトラスト運動にみる自然保護にむけての住民意識と行動—知床国立公園内100平方メートル運動と天神崎市民地主運動への参加者の分析を中心として。(1986)
- 第91号 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions. (1986)
(人間による環境資源利用の経済分析—水環境と国立公園地域を対象にして)
- 第92号 アオコの増殖及び分解に関する研究。(1986)
- ※第93号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(I)—昭和58~59年度 特別研究総合報告第1分冊。(1986)
- ※第94号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(II)—昭和58~59年度 特別研究総合報告第2分冊。(1986)
- ※第95号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(I)—汚濁負荷の発生と流出・流達—昭和58~59年度 特別研究報告。(1986)
- ※第96号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(II)—水草帯・河口域・池沼の生態系構造と機能—昭和58~59年度 特別研究報告。(1986)
- ※第97号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(III)—水路及び土壌による水質の浄化—昭和58~59年度 特別研究報告。(1986)
- 第98号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(IV)—自然浄化機能を活用した処理技術の開発と応用—昭和58~59年度 特別研究報告。(1986)
- 第99号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究—昭和56~59年度 特別研究総合報告。(1986)
- 第100号 バックグラウンド地域における環境汚染物質の長期モニタリング手法の研究—特定汚染選択的検出法及び高感度分析技術の開発—昭和58~60年度 特別研究報告。(1986)
- 第101号 複合ガス状大気汚染物質の生体影響に関する実験的研究—昭和57~60年度 特別研究報告。(1986)
- 第102号 地球規模大気質変動に関する予備的研究。(1986)
- 第103号 環境調和型技術としての電気自動車の評価に関する基礎的研究。(1987)
- 第104号 Studies on chironomid midges in lakes of the Akan National Park. (1987)
(北海道阿寒国立公園の湖におけるユスリカ相の研究)
- 第105号 畑地土壌における水分と諸元素の動態。(1987)
- ※第106号 筑波研究学園都市における景観評価と景観体験に関する研究。(1987)
- 第107号 遠隔計測による環境動態の評価手法の開発に関する研究—昭和59~60年度 特別研究報告。(1987)
- 第108号 植物の大気環境浄化機能に関する研究—昭和57~60年度 特別研究総合報告。(1987)
- 第109号 地域環境評価のための環境情報システムに関する研究。(1987)
- 第110号 海域における赤潮発生のモデル化に関する研究—昭和59~60年度 特別研究総合報告。(1987)
- ※第111号 Application of X-ray photoelectron spectroscopy to the study of silicate minerals. (1987)
(ケイ酸塩鉱物研究へのX線光電子分光法の応用)
- 第112号 光化学汚染大気中における有機エアロゾルに関する研究—有機エアロゾルの生成と挙動に関する研究—昭和58~61年度 特別研究報告。(1988)
- 第113号 光化学汚染大気中における有機エアロゾルに関する研究—昭和58~61年度 特別研究総合報告。(1988)
- 第114号 水界生態系に及ぼす有害汚染物質の影響評価に関する研究—昭和60~61年度 特別研究報告。(1988)

- 第115号 複合ガス状大気汚染物質の生体影響に関する実験的研究――昭和57～61年度 特別研究総合報告。(1988)
- ※第116号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(V)――汚濁負荷の発生と流出・流達――昭和58～61年度 特別研究報告。(1988)
- ※第117号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(VI)――湖沼の生態系構造と自然浄化――昭和60～61年度 特別研究報告。(1988)
- 第118号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(VII)――自然浄化機能を活用した水路・土壌による浄化と処理技術の開発――昭和60～61年度 特別研究報告。(1988)
- ※第119号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(VIII)――自然浄化システムの評価方法――昭和60～61年度 特別研究報告。(1988)
- 第120号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(IX) 昭和58～61年度 特別総合研究報告(1988)
- 第121号 Studies on the chironomid midges of lakes in Southren Hokkaido. (1988)
(北海道南部の湖におけるユスリカ相の研究)
- 第122号 擬似ランダム変調CWライターの開発とフィールド観測への応用。(1989)
- 第123号 バックグラウンド地域における環境汚染物質の長期モニタリング手法の研究(II)――離島及び山岳地における大気汚染成分濃度とその変動――昭和58～62年度 特別研究報告。(1989)
- 第124号 環境科学研究用に開発したニホンウズラの遺伝学的及び微生物学的特性。(1989)
- 第125号 Chironomidae of Japan: checklist of species recorded, key to males and taxonomic notes. (1989)
(日本及び東アジア産ユスリカ科のカatalogと雄成虫の検索表)
- 第126号 バックグラウンド地域における環境汚染物質の長期モニタリング手法の研究(III)――摩周湖における水試料の代表性と底質中の汚染記録――昭和58～62年度 特別研究報告。(1989)
- 第127号 新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下性状。(1990)

※ 残部なし

Report of Special Research Project of the National Institute for Environmental Studies:

- No. 1* Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1976. (1977)
- No. 2* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1977. (1978)

Research Report from the National Institute for Environmental Studies*:

- ※No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1977. (1978)
- No. 5* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on cultured cells—Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6* Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1977-1978. (1979)
- ※No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- ※No. 8* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1978. (1979)
- No. 10* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1978. (1979)
- ※No. 11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No. 12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No. 13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No. 14* Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem—Progress report in 1978-1979. (1980)
- ※No. 15* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1979. (1980)
- No. 16* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- ※No. 17* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes—Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Progress report in 1978-1979. (1980)
- No. 18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- ※No. 19* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Lake current of Kasumigaura (Nishiura)—1978-1979. (1981)
- ※No. 20* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment—1978-1979. (1981)
- No. 21* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura—1978-1979. (1981)
- No. 22* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura—1978-1979. (1981)
- No. 23* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Applicability of trophic state indices for lakes—1978-1979. (1981)
- No. 24* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources—1978-1979. (1981)
- No. 25* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis*—1978-1979. (1981)

* Starting with Report No. 3, the series title was changed.

- No. 26* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—*Determination of argal growth potential by algal assay procedure*—1978-1979. (1981)
- No. 27* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—*Summary of researches*—1978-1979. (1981)
- No. 28* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—*Progress report in 1979-1980.* (1981)
- ※No. 29 *Studies on chironomid midges of the Tama River.* (1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthocladiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- ※No. 30* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment — *Progress report in 1979-1980.* (1982)
- ※No. 31* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—*Research report in 1980.* (1981)
- No. 32* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—*Progress report in 1979—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1).* (1982)
- No. 33* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—*Simulation of atmospheric motions and diffusion processes — Progress report in 1980.* (1982)
- ※No. 34* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—*Research report in 1980.* (1982)
- No. 35* *Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic.* (1982)
- ※No. 36* Studies on the method for long term environmental monitoring—*Progress report in 1980-1981.* (1982)
- ※No. 37* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy — *The Evaluation Laboratory of Man-Environment Systems.* (1982)
- No. 38 *Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.* (1982)
- ※No. 39* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—*Research report in 1981.* (1983)
- No. 40* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—*Research report in 1981.* (1983)
- ※No. 41* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil—with special reference to heavy metals—. (1983)
- ※No. 42* Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation. (1983)
- ※No. 43 *Studies on chironomid midges of the Tama River.* (1983)
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June, with description of 15 new species.
Part 6. Description of species of the subfamily Orthocladiinae recovered from the main stream in the June survey.
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
- No. 44* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—*Progress report in 1979—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere(Part 2).* (1983)
- No. 45* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—*Outlines of special research project—1978-1980.* (1983)
- ※No. 46* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—*Research report in 1979-1980, Part 1.* (1983)
- ※No. 47* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—*Research report in 1979-1980, Part 2.* (1983)
- ※No. 48* Study on optimal allocation of water quality monitoring points. (1983)
- No. 49* The development and evaluation of remote measurement method for environmental pollution—*Research report in 1982.* (1984)
- ※No. 50* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—*Estimation of input loading of Lake Kasumigaura—1980-1982.* (1984)
- ※No. 51* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—*The function of the ecosystem and significance of sediment in nutrient cycle in Lake Kasumigaura—1980-1982.* (1984)
- ※No. 52* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—*Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura—1980-*

1982. (1984)
- No. 53* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Seasonal changes of the biomass of fishes and crustacia in Lake Kasumigaura—1980-1982. (1984)
- ※No. 54* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura—1980-1982. (1984)
- No. 55* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Measures for eutrophication control—1980-1982. (1984)
- No. 56* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Eutrophication in Lake Yunoko—1980-1982. (1984)
- ※No. 57* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Summary of researches—1980-1982. (1984)
- No. 58* Studies on the method for long term environmental monitoring — Outlines of special research project in 1980-1982. (1984)
- No. 59* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system — Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber—Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds — Research report in 1980-1982, Part 1. (1984)
- No. 60* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Formation mechanisms of photochemical aerosol—Research report in 1980-1982, Part 2. (1984)
- No. 61* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system — Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere(Part 1) — Research report in 1980-1982, Part 3. (1984)
- No. 62* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems — Progress report in 1980-1983. (1984)
- ※No. 63* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment — Progress report in 1981. (1984)
- ※No. 64* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Final report in 1979-1981. (1984)
- ※No. 65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1. (1984)
- ※No. 66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2. (1984)
- ※No. 67* Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques—Project research report in 1979-1981. (1984)
- ※No. 68* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil—Research report in 1981-1983. (1984)
- ※No. 69 Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji — Basic research report. (1984)
- ※No. 70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. (1984)
- ※No. 71* Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing. (1984)
- No. 72* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere — Research report in 1980-1982, Part 4. (1985)
- ※No. 73* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Final report in 1980-1982. (1985)
- ※No. 74* A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality—Environmental indices—Basic notion and formation. (1984)
- No. 75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
- No. 76 A study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
- No. 77* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1983. (1985)
- No. 78* Study on residents' role in conserving the living environment. (1985)
- No. 79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report in 1980-1982. (1985)

- ※No. 80* Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report in 1982-1983. (1985)
- ※No. 81* A studies on effects of implementing environmental impact assessment procedure —With particular reference to implementation by local governments. (1985)
- ※No. 82* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants—Research report in 1982-1983. (1985)
- No. 83 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)
- ※No. 84* A comprehensive study on the development of assessment techniques for health effects due to environmental heavy metal exposure—Final report in 1982-1984. (1985)
- No. 85 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters. (1985)
- No. 86* A novel retrieval system for identifications of unknown mass spectra. (1986)
- No. 87* Analysis of the photochemical secondary pollutants and their toxicity on cultured cells—Research report in 1978-1983. (1986)
- ※No. 88* A comprehensive study on the development of indices systems for urban and suburban environmental quality II —Environmental indices—Applications and systems. (1986)
- No. 89 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing. (1986)
- No. 90* National trust movement in Japanese nature conservation — Trustworthy or illusion? (1986)
- No. 91 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions. (1986)
- No. 92* Studies on the growth and decomposition of water-bloom of Microcystis. (1986)
- ※No. 93* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(I)—Research report and papers(Part 1) in 1983-1984. (1986)
- ※No. 94* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(II)—Research report and papers(Part 2) in 1983-1984. (1986)
- ※No. 95* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(I)—Drainage and flowing down of pollutant load— Research report in 1983-1984. (1986)
- ※No. 96* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(II)— Structure and function of the ecosystems of littoral zone — Research report in 1983-1984. (1986)
- ※No. 97* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(III)—Self-purification in stream and soil—Research report in 1983-1984. (1986)
- No. 98* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(IV)—Development and application of wastewater treatment technologies utilizing self-purification ability—Research report in 1983-1984. (1986)
- No. 99* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems—Final report in 1981-1984. (1986)
- No.100* Studies on the methods for long-term monitoring of environmental pollutants in the background regions—Development of highly sensitive and selective analytical methods for measurement of pollutants in the background regions—Progress report in 1983-1985. (1986)
- No.101* Experimental studies on the effects of gaseous air pollutants in combination on animals. (1986)
- No.102* A review on studies of the global scale air quality perturbation. (1986)
- No.103* Technological assessment of electric vehicle from the environmental protection viewpoint. (1987)
- No.104 Studies on chironomid midges in lakes of the Akan National Park. (1987)
Part I. Distribution of chironomid larvae in Lake Akan, Lake Panke and Lake Kussyaro.
Part II. Chironomid midges collected on the shore of lakes in the Akan National Park, Hokkaido(Diptera, Chironomidae)
- No.105* Formulation of the dynamic behavior of water and solutes leaching through the field soil. (1987)
- ※No.106* Appraised landscape and thier environmental value in Tsukuba Science City. (1987)
- No.107* Studies on remote sensing for spatial and temporal analysis of environment—Research report in 1984-1985. (1987)

- No. 108* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants--Final report in 1982-1985. (1987)
- No. 109* Studies on environmental information system for regional environmental evaluation. (1987)
- No. 110* Modeling of red tide blooms in the coastal sea - Final report in 1984-1985. (1987)
- ※No. 111 Application of X-ray photoelectron spectroscopy to the study of silicate minerals. (1987)
- No. 112* Study on the organic aerosols in the photochemically polluted air - Studies on formation and behavior of organic aerosols - Research report in 1983-1986. (1988)
- No. 113* Study on the organic aerosols in the photochemically Polluted air - Final report in 1983-1986. (1988)
- No. 114* Studies on the assessment of the hazard of chemical substances to aquatic ecosystems - progress report in 1985-1986. (1988)
- No. 115* Experimental studies on the effects of gaseous air pollutants in combination on animals - Final report in 1982-1986. (1988)
- ※No. 116* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(V)-Drainage and flowing down of pollutant load- Rersearch report in 1983-1986. (1988)
- ※No. 117* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(VI)-Lake restoration and ecosystems- Research report in 1983-1986. (1988)
- No. 118* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(VII)-Use of self-purification in soil and stream, and development of biological waste water treatment technology- Research report in 1985-1986 (1988)
- ※No. 119* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(VIII)-Evaluation methods of self-purification water treatment system - Research report in 1985-1986. (1988)
- No. 120* Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(IX)-Final report in 1983-1986. (1988)
- No. 121 Studies on the chironomid midges of lakes in Southren Hokkaido. (1988)
- No. 122* Development of pseudo-random modulation CW lidar and its application to field measurements. (1989)
- No. 123* Studies on the methods for long-term monitoring of environmental pollutants in the background regions (II) - Atmospheric pollutants on the remote island and mountains: concentrations and variations- Research report for FY 1983-1987. (1989)
- No. 124* Studies on the genetic and microbiological characteristics of the Japanese quail exploited for the research of environmental science. (1989)
- No. 125 Chironomidae of Japan: checklist of species recorded, key to males and taxonomic notes. (1989)
- No. 126* Studies on the methods for long-term monitoring of environmental pollutants in the background regions (III) - Representativeness of water samples and historical change of pollutants in sediment of Lake Mashu- Research report for FY 1983-1987. (1990)
- No. 127 Land subsidence caused by pumping for melting snow in Muika-machi, Niigata Prefecture. (1990)

* in Japanese

※ out of stock

編集委員会

| | | | |
|------|--------|-----|-------|
| 委員長 | 後藤典弘 | 委員 | 笹野泰弘 |
| 副委員長 | 相馬光之 | 〃 | 高松武次郎 |
| 〃 | 海老瀬潜一 | 〃 | 彼谷邦光 |
| 委員 | 竹内正 | 〃 | 兜真徳 |
| 〃 | 宇都宮陽二郎 | 〃 | 古川昭雄 |
| 〃 | 田村正行 | 〃 | 上原清 |
| 〃 | 藤井敏博 | 事務局 | 古田早苗 |

【平成元年10月27日編集委員会受付】

【平成元年11月30日編集委員会受理】

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

No. 127

国立公害研究所研究報告 第127号
(R-127-'90)

平成2年3月23日発行

発行 環境庁 国立公害研究所

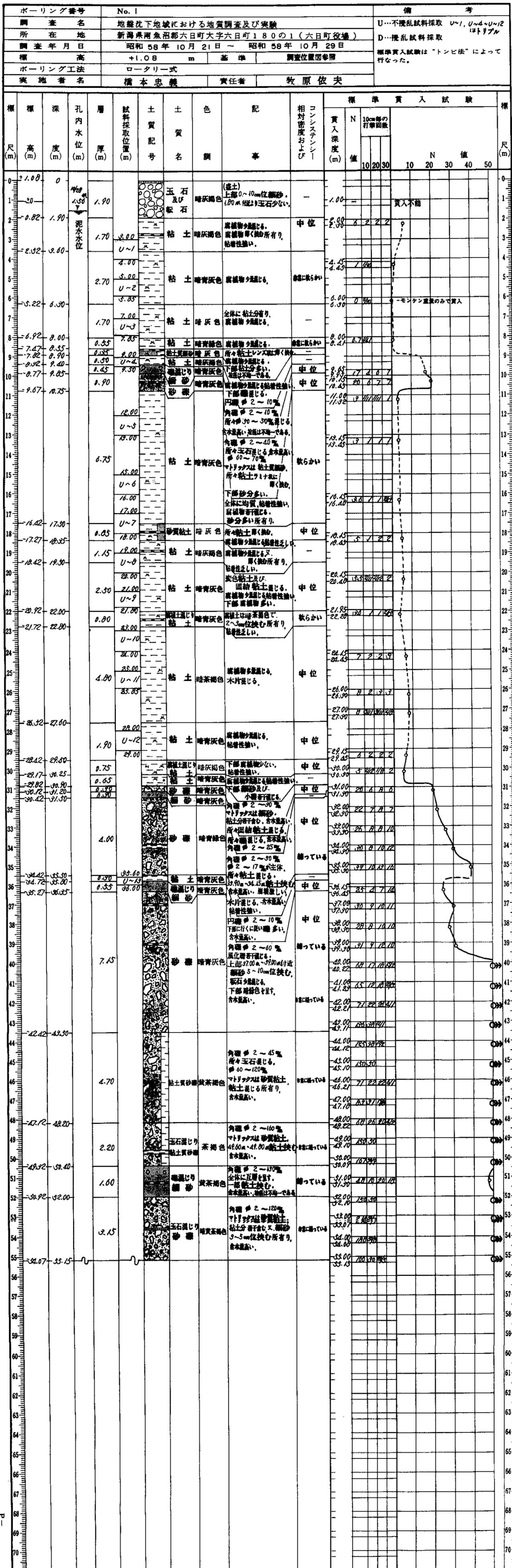
〒305 茨城県つくば市小野川16番2

印刷 株式会社 イセブ

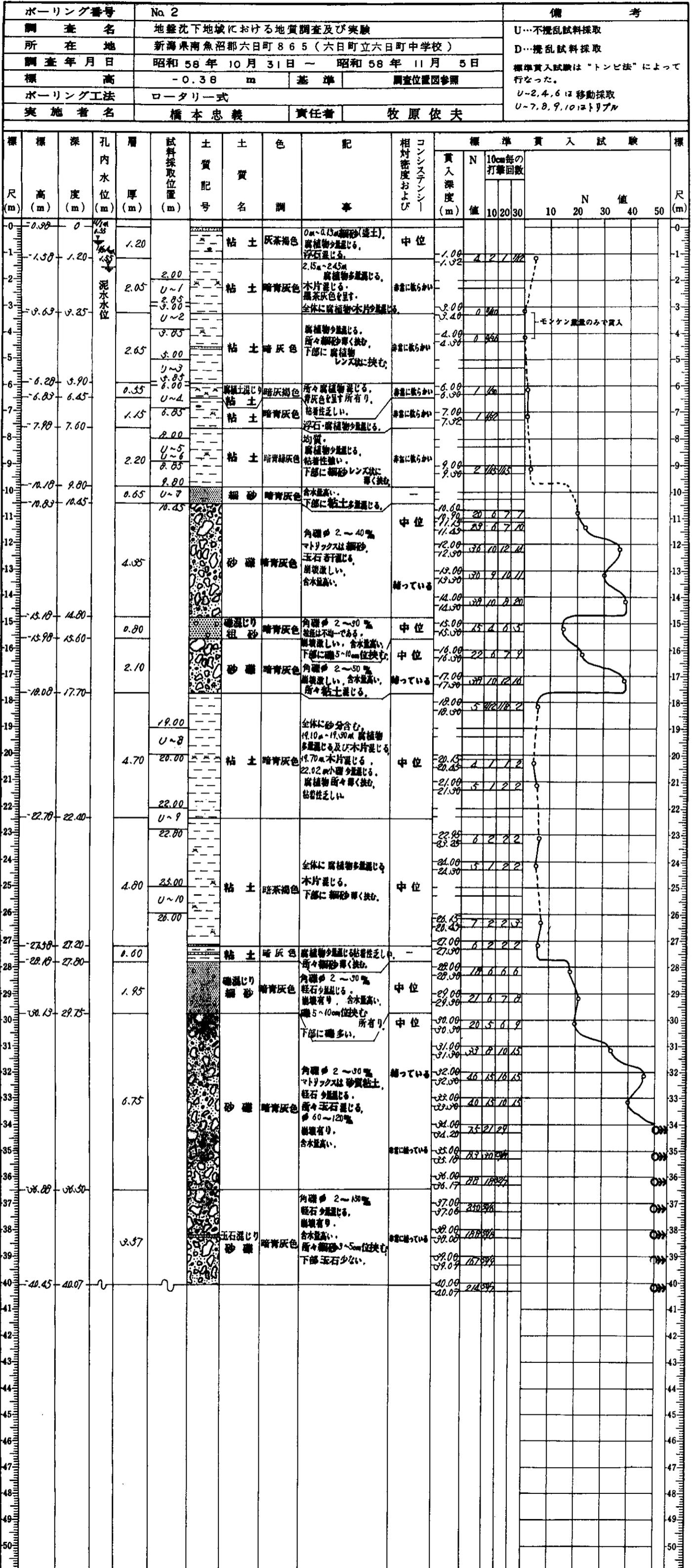
〒305 茨城県つくば市天久保2-11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies
Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan
March 1990

付図1 ボーリング柱状図 (六日町役場地点)



付図2 ボーリング柱状図 (旧六日町中学校地点)



付図3 ボーリング柱状図(北辰小学校地点)

