

ジオテキスタイルの毛管遮断効果を使用した土の凍上抑止法の解析

(課題番号 04806033)

平成4、5年度科学研究費補助金(一般研究(C)萌)研究成果報告書

平成6年3月

研究代表者

土谷 富士夫

(帯広畜産大学畜産学部助教授)

ジオテキスタイルの毛管遮断効果を使用した土の凍上抑止法の解析

平成6年3月

土谷 富士夫

は し が き

研究組織

研究代表者 土谷 富士夫 (帯広畜産大学畜産学部助教授)

研究経費

平成4年度	1,200 千円
平成5年度	600 千円
計	1,800 千円

研究発表

(1)学会誌等

1)土谷富士夫・辻 修・三島信雄・横田聖哉:

ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制対策、土質工学会「凍害対策と寒さ利用に関するシンポジウム」発表論文集、土質工学会、pp.47-52(1992)

2)土谷富士夫・辻 修・三島信雄・横田聖哉:

ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制、農業土木学会誌、60巻12号、pp.25-28(1992)

3)土谷富士夫・三島信雄・横田聖哉:

ジオテキスタイル遮水工法による凍上抑制試験、第6回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集、寒地環境工学研究会、pp.197-196(1983)

4) F. TSUCHIYA, N. MISHIMA and S. YOKOTA;

Field experiment for frost heave reduction using geotextiles as capillary breaks, Fourth International Symposium on Cold Region Development, Finland, (1994) (投稿中)

5) F. TSUCHIYA, O. TSUJI and N. MISHIMA;

Effect of geotextiles as capillary breaks on frost heave reduction, The Seventh International Symposium on Ground Freezing, France (1994) (投稿中)

(2) 口頭発表

1) 土谷富士夫・了戒公利・伊藤 譲 :

ジオテキスタイルを使用した遮水工法による凍上抑制試験、第39回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp. 64-67(1990)

2) 土谷富士夫 :

ジオテキスタイルによる凍上抑制のための野外試験、農業土木学会大会講演会講演要旨集、pp. 200-201(1992)

3) 土谷富士夫・辻 修・三島信雄・横田聖哉 :

ジオテキスタイルの凍土における毛管遮断効果、農業土木学会大会講演会講演要旨集、pp. 84-85(1993)

4) 土谷富士夫・辻 修・中谷亮治 :

室内凍上試験によるジオテキスタイルの遮水効果、第42回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp. 68-71(1993)

目次

第1章 はじめに

1. 研究目的と意義 1
2. 萌芽的研究の理由 1
3. 独創性と着想の経緯 2
4. この研究に関する研究状況 2
5. 従来の研究経過と研究成果 3

第2章 土の凍結と凍上発生のメカニズム

1. はじめに 4
2. 輸送現象として土の凍結 4
3. 熱流と水流からみた土の凍結と乾燥 5
4. 水分エネルギー状態と水分ポテンシャル 6
5. 水晶分離と凍上 10
6. 氷の侵入モデル (ice intrusion model) 10
7. 動水力学的モデル (Hydrodynamic model) 11
8. 剛性氷モデル (rigid ice model) 14

第3章 ジオテキスタイルの特徴とその用途

1. はじめに 19
2. ジオテキスタイルの広義と狭義 21
3. ジオテキスタイルの歴史 21
4. 天然のジオテキスタイル 23
5. ジオテキスタイルの材料 23
6. 材料の加工と製法 25
7. ジオテキスタイルの主要な用途 28
8. おわりに 32

第4章 ジオテキスタイルの毛管遮断効果

1. はじめに 34
2. 土の凍上性の判定 34
3. 凍上軽減とジオテキスタイルの使用 35
4. 毛管遮断挙動に見られるジオテキスタイルの性質 36
5. 室内試験の事例 37
6. 現場野外試験の事例 39

7. 要約	40
第5章 ジオテキスタイルを使用した屋外凍上抑制試験	
1. はじめに	43
2. 試験装置と試験方法	43
2. 試験供試土と試験材料	49
3. 過去3年の試験地の気象条件	53
4. まとめ	69
第6章 ジオテキスタイルの遮水効果を検証するための室内試験	
1. はじめに	70
2. 試験装置と試験方法	70
3. 試験装置	71
4. 試験方法	78
5. 試験結果と考察	82
6. まとめ	105
要約	108

第1章 はじめに

1. 研究目的と意義

冬期寒冷で積雪の少ない北海道問え部では毎年深い土壌凍結が起こる。こうした土壌の凍結は、農道、農業建築物、用水路、擁壁、排水溝などに凍上破壊と融解沈などの悪影響を及ぼしてきた。近年、農産物の出荷流通の迅速化や地域活性化などから、寒冷地域に高速輸送道路の建設計画が開始された。これらは、高規格化道路と高速縦貫自動車道で、従来の農道と異なり有料道でもある。これら建設費は莫大であり、特に凍上対策に至っては本州の3倍以上の経費を必要としている。現在、寒冷地で用いられている凍上対策は、路盤下の路床土を非凍上性土に替える置換工法がほとんどである。しかし、道路網の整備にともなって非凍上性の自然土が不足しており、建設予定地付近に見当たらないという大問題が生じている。凍上を起こさせる大きな要因は、凍結土の下方から毛管力による水分供給である。そこで、土の強度補強、分離、排水などの目的に使用されてきたジオテキスタイルは、上部からの雨水を排水できるが、一部に下方からの毛管上昇を遮断するものがあることが分かった。この研究は、多種・多様なジオテキスタイルの中から、最も良く毛管遮断を行うジオテキスタイル物質を捜し出すことと、そのメカニズムを解析することを目的としている。現在、道路公団の試験研究所と共同で屋外凍上試験を開始しているが、詳細なメカニズムは不明であるが、ジオテキスタイルの効果は多少見られている。影響因子を固定した室内でのモデル凍上試験が必要であり、ジオテキスタイル導入による凍土中のサクシオンおよび温度の空間的・時間的变化、凍上量、凍結吸水量の時間的变化をパソコンを利用して自動計測し、ジオテキスタイルの毛管遮断効果を解明しようとするものである。

2. 萌芽的研究の理由

ジオテキスタイルとは、合成高分子材料を用いて作られた、土や岩石の補強、分離および安定化のための排水などに使用される透水性の土木用繊維製品の総称を言う。土木的には古くから経験から使用されてきたが、理論的に研究が行われるようになり、現在は世界的に認識され、国際ジオテキスタイル学会が組織されており、わが国でも既に日本支部組織が結成されており、土質工学分野の研究者らによってシンポジウムが開催されている。ジオテキスタイルを土の補強、分離、排水などの目的に使用する研究がほとんどで、世界的にも凍上の抑制や対策に使用された例はほとんどない。

寒冷地域での土の凍上対策には、置換工法、断熱工法、遮水工法、水点降下法など

があるが、経済的で長期安定な置換工法が優っている。しかし、近年置換材の不足と凍上判定法の不備などから、良質の非凍上性の土が見つからず大きな社会問題となっている。石油化学工業製品の土木繊維材が豊富なわが国において、このジオテキスタイルが凍上防止に有効となると、遮水工法が現地発生土を利用する優位性が生じる。そして、経済的援助を必要とする中国、ロシアのような広大な寒冷地域では、輸送道路の整備が緊急課題である。土地が広大なため置換工法の難しい現状では、この方法が最も有効な手段となると考える。また、北方領土の変換が起これば、第一に道路網の整備が必要であり、凍上対策が急務になると思われる。このことから、凍上防止メカニズムの解明とともに、この工法の早期開発が急がれ、世界的にも注目される可能性が大きい。

3. 独創性と着想の経緯

北海道十勝地方は、冬期寒冷で積雪が比較的少ないため、日本でも有数の土壤凍結が激しい地帯となっている。凍結、凍上が農地や農業施設に及ぼす影響やその対策について研究を行ってきた。特に、凍結による水分輸送や熱移動の結合のメカニズムは複雑であり、厄介な凍上現象となって現れる。道路、構造物、擁壁、用水路、排水溝などに凍上被害を与えるばかりか、小麦やアルファルファなどの越冬性植物にも悪影響を与えることがわかった。6年前の1987年に土の凍結と凍上の勉強のため、カナダ・アルバータ大学の土質工学研究室に留学し、ジオテキスタイルの実験を目前にすることができた。また、この研究室で永久凍土国際学会で発表された、1編の論文が得られた。それは寒冷地用のジオテキスタイルの特性で、室内凍上実験で凍上抑制効果が得られたことが記載されていた。これによると、ジオメナブランのような不透水性のシート類であると、夏期の降雨が路盤下方に浸透できず、この水分が冬期の凍上に対する給水源となるため、凍上抑制に使用できないことが判明した。従って、上方からの透水性が必要であるが、下方からの通水ができない物質が望ましい。現在、このような物質は世界的にも開発されていない。今年、この論文の著者であるオレゴン州立大学のベル教授とピンセン教授に直接会い、詳細を聞くことができた。彼らは研究資金の不足のため、この研究を継続していないが、ジオテキスタイルの毛管遮断効果は有効であることを強調している。

4. この研究に関する研究状況

ジオテキスタイルの研究は、1977年の国際会議で明らかにされて以来、この言葉とともに研究が盛んに行われ始めた。この技術は古来から使われてきており、中国では

では紀元前から砂のう、竹で作った蛇籠などの天然材を使用した土の補強が行われてきている。しかし、本格的な使用は、1966年、フランスのヴィダーレが発明したテールアルメが近年のジオテキスタイルの発達を刺激した。わが国でも、中世以降の土工事に類似したものを使用してきた。しかし、1960年代の石油化学工業製品をジオテキスタイルに応用することから、盛んになり始め、ポリエチレンシートによる軟弱地盤の補強に使用された。しかし、透水性のないものは現在、ジオメンブレンと呼ばれジオテキスタイルと区別されている。ジオネット、ジオグリッドの使用を経て、1980年代に樹脂ネットあるいはポリマーグリッドが盛土補強に使用されるようになった。ジオテキスタイルの使用目的は、排水・補強・分離が主体である。農業土木工事においても、斜面安定や土壌侵食防止に使用されており、今後も増加する傾向にある。

しかし、凍上抑制に関する研究はほとんどなく、1977年パリで開催された、第1回国際ジオテキスタイル会議で発表したロースの論文、1983年にフェアバンクスで開催された第4回永久凍土国際学会で発表のベル等の論文に過ぎない。これらは、いずれも室内実験による評価である。最近、アメリカの陸軍寒地工学研究所（CRREL）が研究を開始したという情報を得ている。わが国では、研究資料を提供してくれる日本道路公団が、1990年より土質工学会で発表があったに過ぎない。

5. 従来の研究経過と研究成果

凍上対策としてセメント、生石灰などを土に混入し、地盤を凍上しにくい材料に変える方補は、野外実験によるとあまり効果がないことが分かった。日本道路公団試験研究所の試験では、パブリックシート、防根シート、土木シートなどに凍上抑制効果が多少見られることを示した。これらのシートの前後で含水比の顕著な差が現れている。しかし、こうした効果はジオテキスタイルのいかなる性質が、重要な効果を発揮するか明確ではない。また、野外であるため実験は1年に1度しか繰返かことができず、追証できない。また、野外での冬期気象条件は毎年同じ状態とは限らず、凍結温度の変動など不確定要素の影響が加わり、遮水効果のメカニズムは判定できない。そこで、初期条件や境界条件を固定した室内凍上のモデル試験が不可欠である。特に、未凍結部分のサクシヨンの変動を時間的に測定する意義は大きい。室内凍上試験ができる低温室と一定凍結温度を作る冷却装置が既にあることから、サクシオンを連続測定できる装置購入ができると、実験が開始できる。近年、圧力センサーの小型化、性能向上により、そしてパーソナルコンピュータの発達により、マルチデータ測定器と接続することによって昼夜を問わず、一連の連続データの解析ができる。したがって、毛管遮断効果が解析でき、どの様なタイプのジオテキスタイルが凍上抑止に有効であるか発見できると思われる。

第2章 土の凍結と凍上発生のメカニズム

1. はじめに

北海道のような寒冷地域では、冬季に気温が 0°C 以下になると、表面が露出している地面は凍結し始める。その程度は、地域や年次によって著しく異なるが、毎年繰り返される。この現象は他の季節には見られない特徴的な土の物理的性質の変化を伴い、土木建設工事などの産業に多大の影響を及ぼす。このため、その影響を削減したり防止したりするために、種々の対策を検討せざるを得ないのが現状である。

土の凍結とは、地温が 0°C 以下に低下し、その中の水分が液体の水から固体の水に変化する現象であるが、一見単純そうに見えるこの相変化が、様々な物理的現象を引き起す。このとき、土層内の水分分布に変動が生じ、下層から凍結層に向かって、ゆるやかな水分の上昇移動が起る。そして、凍結線にアイスレンズと呼ばれる分離氷晶が発生し、水分の供給が十分な場合、これが成長発達して土粒子を排斥しながら、土の間隙を膨張させる。このため、土粒子のみの固相と氷層が分離した土構造の変化が生じる。アイスレンズの発達により、上層の土粒子は拘束力の小さい上部方向に押し上げられる。土層中にアイスレンズ層の厚さおよび個数が増加するにつれ、地表面は隆起する。これが凍上とよばれ、土の凍結作用のなかで最も厄介な現象である。凍上作用は、寒冷地の道路路盤や舗装部、構造物の基礎、擁壁本体、用・排水路などの破壊を生じさせる大きな原因となっている。

こうした凍結も春季に終り、融解が始まる。土が融解すると膨張した間隙内の水は融解し、過剰水分状態となり地盤土の著しい支持力低下を招く。ときには融解部分の流亡による土層内部の空洞化が起り、極度の地耐力の喪失が起る。場合によっては、融解は凍結以上に被害が大きい問題として捉えられる。それでは、この土の凍上とはどのようなメカニズムなのか以下に説明する。

2. 輸送現象としての土の凍結

土の物理的問題の多くに、土中の間隙内物質（水、イオン、石油、懸濁物質）の流れとエネルギー（熱、電気）の流れがある。なかでも、水の流れは非常に重要で、浸透、乾燥、排水、圧密など土質工学的に早くから注目されており、特に物質の透水性と通気性については多くの研究がなされてきた。近年、熱的、化学的および電氣的流れについて関心が増大してきている。特に、熱の流れは、凍結作用を解析する上で不可欠な現象であり、土の凍結地帯で構造物の建築、断熱、地下貯蔵、熱侵食、地盤の一時的安定などに関連して研究が多数なされてきている。

ところで、この物質やエネルギーの流れの法則は、ある面で類似しているので、その関係式を表1に示す。これらは、それ自身のポテンシャル勾配（記号Iで表す）によつて生じる。土の中では、これらは一つ以上が同時に起こり、連成流となつてお互いに依存しながら流れている場合が多く、複雑な輸送式を構成している。

表1の式は、単純な一次元のx方向への流れを示すものであるが、実際には伝導現象のみでなく、対流や相変化などの項も付随するため、より複雑な式になる。土の凍結の場合、熱の流れと水の流れが最も重要であり、さらに圧力変化を加えた力学的バランスの法則も考察しなければならない。

表1 土の輸送現象の類似性

項 目	液 体	熱	電 気	イオン
ポテンシャル	全水頭h	温 度T	電 圧V	濃 度C
貯蔵物質	液体質量	熱エネルギー	電 荷	分子数
伝 導 率	透水係数k	熱伝導率λ	電気伝導度σ	拡散係数D
流 れ	q_h	q_t	電流I	J_D
勾 配	I	I	I	I_0
伝 導 式	$q_h = -k \frac{\partial h}{\partial x}$	$q_t = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$	$I = -\sigma \frac{\partial V}{\partial x}$	$J_D = -D \frac{\partial C}{\partial x}$
名 称	ダルシー則	フーリエ則	オーム法則	フィック則

3. 熱流と水流からみた土の凍結と乾燥

土中の水分が凍結すると、水は氷すなわち液体から固体へと相変化が行われる。相変化は凍結ばかりでなく土の乾燥においても起り、熱を吸収して水が水蒸気に相変化を示す。相変化の生じた部分ではいずれも液体の水が減少するため、水分ポテンシャルは低下する。このため、ポテンシャル勾配が発生し、下方から重力に逆らった水の流れが生じる。図1に示すように、土の乾燥と凍結はいずれも下層から上層に水分移動が生じる点で類似している。しかし、最も異なる点は、相変化後に水が固体となるか気体となるかにある。気体である水蒸気は、土の間隙を通じて大部分は大気中に放出され、降雨になって帰還しない限り、土中に戻ることはできない。

他方、氷は固体のために原則的に移動できずに、土中に留まる。地温が0℃以上に上昇して融解しない限り水に戻ることはない。この違いが、蒸発より凍結の方がより複雑な作用を示す理由のひとつである。

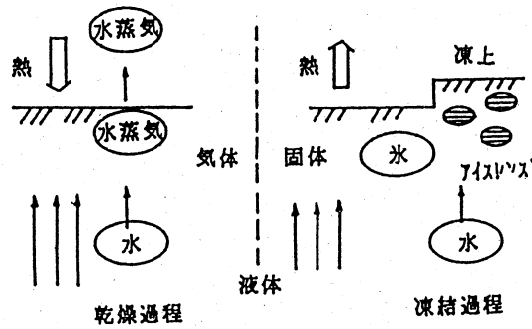


図1 土の乾燥過程と凍結過程の比較

固体になった氷は、9%の体積膨張を起すが、単に間隙内の水分がすべて凍結しても9%以内の体積膨張に過ぎず問題は少ない。しかし、このアイスレンズと呼ばれる氷層が水分供給によって成長するならば、数十倍もの体積膨張になる。このように、氷の成長を助ける水分供給を支配する要因は、温度、載荷圧と物質の透水性などである。例えば、急速な温度低下は、たとえ透水性の大きな土でも、温度低下が速すぎて供給が間に合わない。そのため、ほとんど凍上しないかあっても僅かであり、砂質土の凍結や厳寒地の粘性土の凍結などの例に見られる。他方、温度低下が緩やかであると、水分供給が間に合うため、いくらでも凍上が発生し、数十倍もの凍上を起こす場合があり、シルト質土に多く見られる。

また、上層に大きな荷重があると、凍上は抑制されることから、圧力が凍上に影響を与えることも知られている。

このように、土中のアイスレンズが凍上発生の主因であり、土の凍上メカニズムを最初に記述したのはTaberであり、「全凍上量はこのアイスレンズの厚さの合計と等しい」ことを証明した。Beskowは、土の凍上性を決定するため、土の粒度分布から「毛管現象」の考えを提案した。

4. 水分エネルギー状態と水分ポテンシャル

土の水分ポテンシャルの概念は、土壌学と水文学の分野で特に発展してきた。一般に、土に適応されるポテンシャル概念を理解することは、凍土内の水分との関係を理解する上で、前もって必要なことである。土中水には、土粒子表面の引力や浸透効果などに関連したおびただしい数の力が作用している。一般的なものには、地球の重力場と上部に載荷している質量の重さに関わる力がある。これらの影響力の和が、土の水分総ポテンシャルを構成している。高いポテンシャルから低いポテンシャルへと水分の流動が起こるのは、ポテンシャル差によるものである。

土のポテンシャル、透水性係数あるいは水分伝導率の測定は、基礎的な流れの式の応用から求まり、その式は次のダルシーの法則の形で示される。

$$q = k A \frac{\Delta \phi}{\Delta Z} \quad (1)$$

ここに、 q = 流量 (m^3s^{-1})、 k = 透水係数 (ms^{-1})、 A = 流れの断面積 (m^2)、 $\Delta \phi / \Delta Z$ = ポテンシャル勾配である。ポテンシャル ϕ の単位は、 J/kg であるが、圧力 (パスカル= N/m^2) や水柱の高さ (m) などの簡単な量で表すことがある。土の毛管現象や土粒子の表面吸着によって生じるポテンシャルは、しばしば土中水のサクシオン (圧力の単位を持つ) に関連している。

ポテンシャルの定義は、水槽から問題点まで水を輸送するに費やした仕事 (ジュール) という事である。考えられる (不飽和土において) ケースで、ポテンシャルはマイナスの符号を持つ。それは土の内部の多孔質の特有な性質の結果であり、マトリックポテンシャルとも呼ばれている。圧力計 (間隙水圧計あるいはピエゾメータ) で容易に直接測定できる。もう一つタイプのポテンシャルは、標高の違いによるもので、重力ポテンシャルとして知られている。これは、しばしば「水頭」と呼ばれ、高さとして測定される。

本質的に同じ量に対しても、異なった分野の科学や技術で、異なった用語を使う。土壌学では「サクシオン」、土質工学では「間隙水圧」、土壌物理学と水理学では「ポテンシャル」、物理化学などでは「Gibbsの自由エネルギー」と呼ばれている。

凍結土の水分移動は水分の集積を導き (凍上を与える)、地盤内のいかなる水分移動もこれらの原理に従って解析される。水の氷に対する変換あるいはその逆は水のマトリックスポテンシャルを変化させる。その方法は水分量が土の乾燥湿潤によって変化する時のポテンシャルの変化と類似している。

しかし、土の水分ポテンシャルの概念は、温度差における効果を説明するには、限界を持っている。例えば、異なる温度で水がある点から別の点へ移動する傾向があるが、式 (1) からポテンシャルに与える温度の影響力を解析することはできない。

さいわいにも、「自由エネルギー」と呼ばれる別の関数が「熱力学」の分野で発明されている。ポテンシャルの定義と測定の容易性からそれを適切なものと考え、多くの土の研究において容易に数量化できる。Gibbsの自由エネルギーは次のように定義される。

$$G = E + P V - T s \quad (2)$$

ここに、 E = 内部エネルギー、 P = 圧力、 V = 体積、 T = 温度、 s = エントロピーによって定義されるように微分表現式は、

$$\Delta G = - s \Delta T + V \Delta P \quad (3)$$

となる。

毛管現象と吸着作用はマトリックポテンシャルに依存する。実際、マトリックポテンシャルは、毛管現象と吸着作用によって生じる土中水分のGibbsの自由エネルギーの差（同温の通常の水のエネルギーと比較して）に数値的に等しい。マトリックポテンシャルは圧力 ΔP と表現され、式(3)から、もし温度変化がないならば、 $\Delta P V$ は ΔG に等しくなることは明らかである。溶解した塩による土中水分の自由エネルギーの変更は浸透ポテンシャルとして測定される。土中水分ポテンシャルと自由エネルギー間の類似性を認めることにより、経験的な方法をもたらし、物理化学や化学熱力学における関係と基礎的な研究を関連付け、水分の研究から得られた知識をもたらすことも可能である。

Schofieldは、種々の水分量における土の凍結点とサクシオン（マトリックポテンシャル）との関係を明らかにした。彼は、マトリックポテンシャルが自由エネルギーに相応することから、凍結点降下が期待されることを指摘した。さらに、凍土内の水の状態に関する直接的な証明は、凍結中に起こる圧密を証明する実験によっても与えられた。凍結土内の、例えば、 0°C 近くの温度に対して水のマトリックポテンシャルの値に相応する事実が数多く存在する。凍土内の水の移動はそのようなポテンシャル勾配に沿って期待されるべきである。 -5°C 以内の温度では、水分量決定のためのカロリメータ法は、融解の潜熱のために不確実性となるので推定が妨げられる。また、マトリックポテンシャルは同様な一般式によって支配されていることを立証されているけれども、知識的に不足している。そのような温度における水量は非常に小さく、膨張計での測定も難しい。しかし、Ticeらは最近、核磁気共振反応によつて、不凍水量はかなりの低温まで（ -15°C 以下）決定できることを示した。

乾燥土において、水と空気間に境界面が存在するが、凍結土においても水と氷の間に境界面が存在する。境界面に関係するものが、表面張力あるいは境界面エネルギーである。表面張力は圧力と、いわゆる土の水分ポテンシャルに影響を与える。また、その影響は多くの通常の状態に見られ、例えば、雲の中の水滴、薄いチューブ内および石鹼の泡の中などがそうである。水と氷に対する境界面エネルギーは約 30mNm^{-1} の値を持っているが、水と空気のと境界面エネルギーは約 72mNm^{-1} である。凍結土内の特定の水分量に対するサクシオンと不凍結（部分的に乾燥した）土の同じ水分量のサクシオンは、しばしば、30対72の比率と思われる。この理由は、凍結過程をさらに考察することによって理解される。

そして圧力は水の氷点を変える。この広く知られている事実は、一般に以下の方程式によって説明される。

$$\frac{dT}{dP} = (V_w - V_i) \frac{T_0}{L_f} \quad (4)$$

ここに、 V_w =水の比容積 ($m^3 kg^{-1}$)、 V_i =氷の比容積 ($m^3 kg^{-1}$)、 L_f =氷の融解熱 ($J kg^{-1}$)、 T =温度 (K) である。この方程式に出てくる dP は圧力変化である。 T は氷点の変化であり (マイナス $^{\circ}C$) である。そして、 T_0 は $0^{\circ}C=273.15K$ で、圧力が 1 気圧の時の通常の氷点である。これは、クラリウス・クレペイロンの方程式としてよく知られているが、その方程式を変形した特別な型で表現されている。式(4)は、水の氷点がMPa当り $0.074^{\circ}C$ 程 落下していくことを教えてくれる。もし空気が氷に溶解しているならば、1 気圧で飽和状態まで溶かされた空気に対し、 $0.0028^{\circ}C$ だけさらに氷点を低くする。圧力の増加が等しく、両方の氷相と水相に適用され、標準状態と仮定するならば、式(4)は明白となる。式(4)に対する条件は、 $\Delta P_i = \Delta P_w$ である。

クラリウス・クレペイロン式の他の形は、 P_i が P_w と等しくないという場合に導かれる。たとえば、

$$\frac{dP_w}{dT} = \frac{L_f}{T V_w} \quad (5)$$

これは、水に対する圧力が低くなる時で、また一定圧力で氷が残っている間、氷点の変化を記述している。この式はごく一般的な式である。この式は、物理化学や大気気象学における結晶作用の研究で広く知られている。

土中の水分と氷に対して、 $P_i - P_w$ (サクション) は、 $0^{\circ}C$ 以下で温度 $1^{\circ}C$ につき、ほぼ $1.2MPa$ ほど増大することを示している。もし、氷 (間隙径よりも大きい物体において) が大気圧より (たとえば載荷物質の重量によって) 高い圧力を持っているならば、状況は式(5)によって十分に記述されない。しかし、式(4)と式(5)は連続して用いられるだろう。まず第1に、この高さの圧力で起こる $0^{\circ}C$ 以下の氷点降下は、氷と水に当てられた「全」圧力あるいは「システム」圧力であると仮定され、式(4) から決定される。その時、氷点降下の構成要素をさらに大きくする、圧力差の $P_i - P_w$ の効果は、式(5)を用いて計算される。このように、水のマトリックポテンシャルは温度と載荷重の関数あるいは他の「抵抗」、また他の「拘束圧力」の関数として計算される。 $P_i - P_w$ のよって表現される、氷と水の2つの圧力が発達する概念は、特別な挙動を理解することと、その後証明されるだろうと凍土に発生する圧力を理解することに大いに役立つ。式(4)は式(5)に結合されて以下のようなになる。

$$T - T_0 = \frac{(P_w V_w - P_i V_i) T}{L_f} \quad (6)$$

この方程式で、 T_0 は通常の水の氷点 ($273.15K=0^{\circ}C$) である。圧力 P_w 、 P_i は、もし大気圧以上でプラス、以下ならマイナスの値であるとし、便宜的に、正の値で表現する。前記に示すように、土中の水は、厳密な意味において必ずしも静水圧 P_w を持っている訳ではないが、しかし、巨視的に考えると土-水システムはその様に挙動する。方程式は温度、水のポテンシャル (水圧で表現した) と氷の圧力 (後に凍土における

膨張性の力の原因となる)との間の関係を証明する。

凍上の毛管理論は、未凍結土における土壌水分の毛管モデルを類似させたことを基礎にしている。その理論は、一つに限定したのにもかかわらず、凍土における明確な氷と水の圧力の発生についての説明を与える。未凍結土の土中水の吸引力は、土壌間隙における空気と水の境界面の拘束力の影響下にある。それはの間隙の半径に反比例し、細い穴のあいたガラス管が水が上昇することで良く知られている。

5. 氷晶分離と凍上

凍上とは、土が凍結するときの圧力の増加あるいは体積の変化である。すなわち、この特異的な挙動は、土を拘束している応力に依存する。この応力が、膨張抵抗より十分に大きな場所で、大きな凍上力が発生する。しかし、変形させるべき荷重が、単純に軽いかまたは薄い上載土層の場所にあつて、凍結細粒土などでは典型的な氷の明確な層（アイスレンズ）を示し、大きく分離した構造をみせる。

土の抵抗に打ち勝つために必要なエネルギー（すなわち、凍上圧）は、 0°C 以下の温度で土に共存している氷相と水相の圧力 P_i と P_w の差に由来している。毛管モデルが凍土内の明確な氷圧と水圧を説明するための最初の試みであった。ここでは、氷の侵入モデルと呼び以下に説明する。

6. 氷の侵入モデル (ice intrusion model)

毛管モデルにおいて、圧力差 ($P_i - P_w$) が土の間隙を通過して、氷が増殖するために必要なものと考えられた。このように、凍上圧は、凍結線すなわち氷が最初に土の間隙に現れるところに、発生すると仮定された。この「氷の侵入」の概念を良く知られた不飽和土内の空気の侵入と等しいと考えれば、凍上圧は土中の最も大きな連続した間隙孔径によって決定されることが推測される。

このモデルは、未凍土における水分の毛管モデルに類似させたことにある。図2に示すように、凍土における氷と水の境界面は、空気と水との境界面と同様な挙動をすると仮定すると、A点で、水の圧力は氷の圧力よりも次の値だけ低下する。

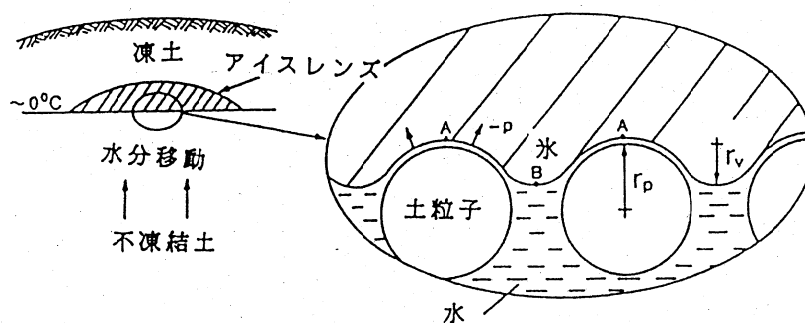


図2 毛管モデル

$$p = P_i - P_w = 2 \frac{\sigma_{iw}}{r_p} \quad (7)$$

ここに、 p は凍上圧、 σ_{iw} は氷と水の境界エネルギー（表面張力）、 r_p は氷表面がつくる曲率半径である。式(5)と式(7)を結合して、次式が得られる。

$$\Delta T_f = 2 \frac{\sigma_{iw} T V_i}{r_p L_f} \quad (8)$$

B点における氷点降下 ΔT_f は、同様に水表面の曲率半径 r_v に対しても式が得られることから、両者の和が氷点降下式となる。各既存の値を入れると、次式の凍上圧(kPa m)の公式が得られ。

$$p = 4.84 \times 10^{-4} \left[\frac{1}{r_p} + \frac{1}{r_v} \right] \quad (9)$$

しかし、1970年代の初期まで、凍上圧の実際値と比較すると、氷の侵入モデルの値が過小に評価を行っていることが明らかになった。室内実験で観測した凍上圧と単純な毛管モデルから予測した凍上圧に矛盾があることに注目が起こった。計算値は常に低過ぎた。この矛盾に対する論理的な説明は、氷と水との間の圧力差は土の間隙に最初に侵入するときより大きい位置（温度）で氷晶分離が起こるということである。凍上圧と温度との関係から、アイスレンズは凍結線背後のある距離を隔てた部分的に凍結した土中に形成されなければならないことを意味する。実験室の室内試験から、アイスレンズは凍結線背後のどこかに形成されることを推論したが、Millerは最初に、凍上モデルに凍結フリンジの概念導入した。

不凍結土において、水流の速度はポテンシャル(θ に依存)と透水係数 $k(\theta)$ に依存する。凍土では、液状の水分量は主として温度の関数であるから、温度勾配は不飽和な均質土の水分量勾配と類似している。このことは、温度勾配が低温方向に水分移動を誘発し、水流が増加しつつあるインピーダンス(土の中の抵抗)に遭遇することになる。水分が土の冷部に集積するところでは、存在可能な不凍水量が温度(すなわち、個々の土に対する不凍水量の関係)に制約されるため、凍結しなければならない。水の凍結は潜熱を発生することになり、その潜熱はそこで消失または温度上昇をさせる。このように、凍土内の水分移動は水文学的環境ばかりか、土の温度条件にも依存する。

7. 動水学的モデル (Hydrodynamic model)

Harlanによる一連の熱と水分の連成流式によって、このモデルは表現される。凍結中の土中での質量輸送に関する表現を得るため、単純に不凍結土との類似性を提案した。固体である間隙氷は本質的に移動せず、質量輸送は液状水流のみと仮定した。たとえば、アイスレンズの形成などによって、不凍水膜の連続性が切断されるならば、

「冷端部に向う水の移動は大きく影響されるであろう」ことを彼は述べている。さらに、大気圧で同温のときバルク氷としての間隙氷は、Gibbsの自由エネルギーを持つことを彼は仮定した。このように、Schofieldの式を使用することによって、湿潤内の水の氷点降下が表現され、質量の流れに対する駆動力は、温度勾配に直接比例していると仮定した。

熱流に対して、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + C_w q \frac{\partial \theta_i}{\partial z} + \rho_i L_f \frac{\partial T}{\partial t} = C_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

ここに、 λ は土の熱伝導率、 C_w は水の体積熱容量、 q は水のフラックス、 θ_i は体積水分率、 ρ_i は氷の密度、 C_s は土の体積熱容量である。左辺の第1項は温度勾配による熱伝導を算定し、第2項は水の流れに関する質量の熱輸送であり、第3項は相変化に対する熱源または熱シンクを表現している。ここでの第2項は、第1項の値の0.001~0.01倍に過ぎず、通常は無視される。

水の流れに対して、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial P_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (11)$$

ここに、 k は透水係数、 P_w は圧力水頭、 θ_u は不凍結水分率である。不凍水量と温度の関係は、土のある温度に対する不凍水の最大量を示している。式(11)の左辺は、水分の内部流（移動）の結果として生じる水分流を示し、他方、右辺の第1項はその場での不凍結水分が温度関数に従い、そのフラックスを示し、第2項は氷のそれを示している。

凍結中の土から水分を吸引することを想定すると、凍結フリンジ内の透水係数が急激に減少することに遭遇する。そのため推定される質量のフラックス（透水係数と動水勾配の積）がマイナスの発散（水の「Pile up」）を示す。すなわち、 $k_f \ll k_u$ であるから、 $q_f \ll q_u$ である。

ここに、 f と u はおのおの凍結と不凍結領域を示し、あるいは凍土内の冷端部と温端部を示す。このように、流れは凍結物質より不凍結物質のほうが急速であるから、凍結フリンジの領域で（氷として）水分が集積する。ひとつのアイスレンズの位置は、最大の流れが発散する点に相応すると仮定される。すなわち、 dk_f/dT が最大となるところである。図3から、典型的な細粒土に関しては、 -0.1 から -0.2°C の範囲にあると見なされる。このプロセス内に発生する潜熱は、熱流のプラスの発散を生じさせるので、質量と熱の連成輸送を完全なものとする。

凍結線での熱平衡は次のように表現される。

$$\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_f - \lambda_u \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_u = C_s \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_w L_f \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial P_w}{\partial z} \right) \quad (12)$$

換言すると、一方の凍結線から離される純熱伝導（右辺の第1項）と、融解の潜熱の放出にともなう内部水が輸送され、水分が凍結するもの（右辺の第2項）との間に平衡状態が観測されなければならない。右辺の第1項は、土の顕熱量も含んでいるが、ここでは0℃に近い温度であるので潜熱に比較して、無視される。もし、水流が十分な速度で凍結線に移動することができず、純熱流が右辺第2項（ $\rho_w L_f / z (k P_w / z)$ ）より大きいならば、ある内部の水分は凍結して、凍結線は土中を進行するであろう。この場合、アイスレンズは成長を止めることになる。

最初に土が凍結されるとき、凍結侵入速度は速く、内部の水分は急激に凍結する。凍結速度は大きいですが、総凍上量は比較的小さいと思われる。このことは、熱の吸収速度は大きいので、大きく連続したアイスレンズを形成するほど十分な速度で水分は移動できないため、いくつかの豊富な氷晶は、小さく、間隔の狭い毛髪のようなレンズの形となつて形成され、肉眼では視ることができない。凍結線がさらに土中に侵入し、凍結速度が遅くなると、大きな目に見えるアイスレンズが生じる。徐々に遅くなる凍結速度は、（大きな）アイスレンズが成長できる凍結線へと水分を移動させる時間を十分に持っている。しかし、レンズが成長を続けるに従って、水分流がそれを満たすのに不十分になると、下層の土に水分量の低下傾向を体験することになる。結局、この事態が熱の不均衡となり、土の冷却となり凍結線の前進することになる。そして、新しいレンズ形成が起るポイントに到達する。

時間とともに凍結線が土に侵入するにつれて、温度勾配は減少し、熱流は衰退する。しかし、凍上速度は深さとともに減少するが、ゆっくりした凍結速度は、より薄いア

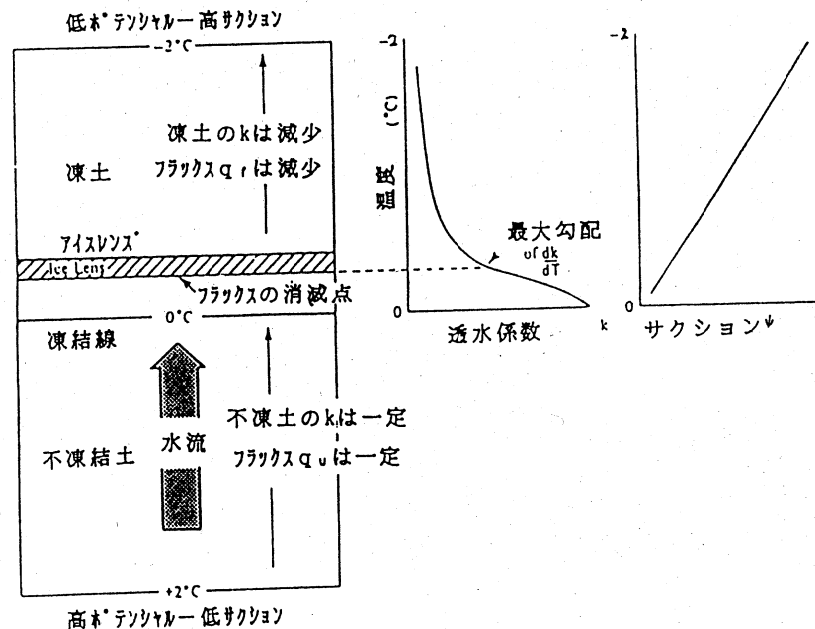


図3 動水力学モデル

アイスレンズを発達させながら、土層内の全凍上量を増大させる。周期的氷縞 (rhythmic ice banding) はしばしば自然界でも見られ、Taberが最初にそのことを詳しく記している。

結局、アイスレンズによって放出される潜熱と、そこに移動してくる水の凍結によって放出される潜熱との平衡が生じる点に達する。もちろん、これは凍結領域が徐々にアイスレンズの成長によって拡大され、温度勾配 (これによって熱流も) は減少し、ばくぜんと継続することはできない。しかし、ある特定の環境で、非常に厚い分離氷晶の塊が形成される。

Harlanは、連成流の公式をコンピュータモデルに組込んだが、実験データに対して試験することはしなかった。その代わりに、彼は凍結状態の水分再分布をシミュレートしたものの、実際の実験断面と異なっていた。Taylor & Lutinは、実験室での凍上データを解析するため、Harlanモデルの変形を使用した。予測結果との一致を得るためには、輸送係数を導入する必要がある。この係数は、たとえ動水力学的モデルが氷相の働きを記述しないけれども、土中内の氷の存在によって説明された。氷の集積は単純に液体輸送現象に受身的結果として生じ、土全体は従順なシンクと見なされた。さらに、凍上のレオロジー的含蓄を無視した。単純化された動水力学的モデルの変形はKonradらによって展開された。

液状水膜輸送の熱力学的モデルは、Millerとその共同研究者らによって批判されている。すなわち、彼らは氷相は可動性であり、質量輸送は液相のみに限定されないことを論争している。さらに、液体の輸送は、氷の動きに対して強い相互作用を持つため、水流に対するダルシーの式の使用条件は、十分に満たされず、水膜流に対する駆動力は、水分の圧力勾配のみではない。相変化は、伝導による熱の巨視的な流れ上に載せる局所的な源とシンクを造るので、熱流に対する含蓄が存在する。

8 剛性氷モデル (rigid ice model)

アイスレンズ形成に対する別な説明が、Millerによって押し進められ、凍結線背後から一定距離において、(部分的に)凍結した内部にアイスレンズが起ることを論じた。彼の剛性氷モデルによると、分離氷晶を含めた凍結土内の氷は、連続した剛性の結晶相を形成し、すなわち、格子のように眼前に浮かんで見える。温度勾配のもとで凍結フリンジ内の氷は温度によって導入される復氷 (regelation) によって、土の温暖部から寒冷部へ移動する。水圧が土粒子をばらばらに押し進めることができない限り凍結フリンジ内の土粒子は固定した状態を維持し続ける。水圧が十分に増大すると、土粒子は下部の静止した隣接物に対して、下方に圧縮されず、移動している氷によって引き離されるだろう。フリンジを横切る水流から形成される氷晶によって満たされ

ひとつのアイスレンズが発達する。このように、アイスレンズは単純に発達する氷の格子内部で土粒子のない領域に過ぎない。

このモデルによって、間隙水（復氷）のフラックスは、凍結フリンジ内の質量輸送のなかの本質的部分を形成する。不凍結の吸着水膜によって取り囲まれ、それは凍結土を通して水を輸送することができる屈曲した液相を形成している（図4）。残存している空間が間隙水によって、満杯に占有されていて、間隙水は均一な中継速度（矢印）で移動する。氷はどこかで水膜相と結合しているから、移動は土粒子内の氷/水の上流境界面で、水膜から氷晶に（図4でA、A'）、そして下流部の端で

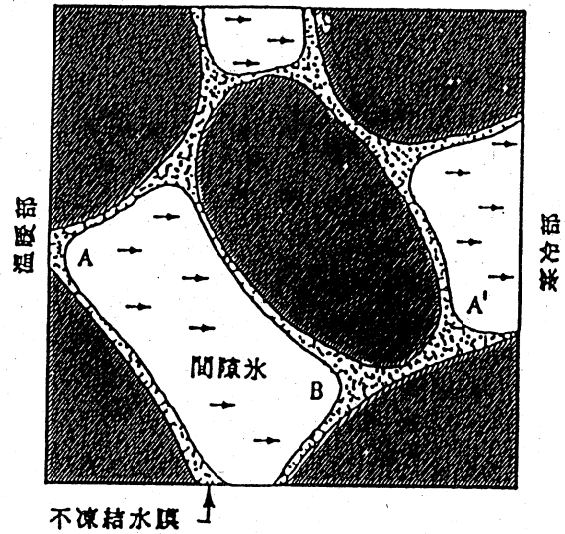


図4 凍結土の並列-直列輸送モデル

氷晶から水に（図4で、B）連結変換を伴うことができる。この動きは水膜相内の適切な水移動（BからA'へ）を意味し、もし氷が可動しないならば、水膜内で起ると思われるどんな流れにもこれが付け加えられる。このように、質量輸送は間隙の狭搾部の液体輸送と、間隙本体内の氷の移動傾向をもっている。Millerは、このプロセスを直列-並列（series-parallel）輸送と呼び、氷の動きが実際に大きな要因となって質量輸送を高めることができることを論じた。

また、彼らは水圧勾配は重大なクリープ変形を起させるほど充分大きく、凍上圧を拘束するのに重要となってくることを確認している。さらに、ほとんどあるいは全く純粋な輸送を生み出さないためには、一方向（暖かい温度に向かう）氷の移動と他方向への水の移動をおこす循環的輸送の可能性も推測した。

Millerは、非粘性土（コロイドを含まない）で、凍結フリンジ内の応力条件によってアイスレンズの発生開始を説明している。アイスレンズ形成前に、土の荷重Pは土の骨格反力（有効応力 σ' ）と間隙内容物の反力（中立応力あるいは浮力応力 σ_n ）によって、部分的に支持されている。

$$P = \sigma' + \sigma_n \quad (13)$$

不凍結土において、有効応力式は、しばしば $\sigma' = P - u$ として書き表され、uは間隙圧である。間隙水と間隙氷が連続した相であるとき、Millerは σ_n に対して次の関係式を提案した。

$$\sigma_n = P_1 - \chi(\Omega)(P_w - P_1) \quad (14)$$

ここに、 $\chi(\Omega)$ はほとんど知られていないが、不凍結水量（温度）によって変動する比例係数である。不必要な細部を無視すると単純な例を考えることによって、一般的な氷圧と水圧の変化を調べた。凍結線背後のある距離にアイスレンズが成長し、そしてフリンジ内の土の間隙は先に述べたように氷で満たされると仮定しよう。単純に温度勾配は直線と仮定する。もし、成長するレンズを供給するためには、フリンジを通る一定の水分フラックス q_w が存在しなければ、そこで P_w はフリンジを横断しながら急速に低下しなければならない。なぜなら、本質的に透水係数が距離（温度）とともに指数的に減少するためである。しかし、 P_w と P_1 は温度と関係するから（ $T - T_0 = (P_w V_w - P_1 V_1) T / L_f$ ）、 P_1 は図5に示すように、フリンジの中で変化しなければならない。(14)式から、 σ_n はフリンジ内の P に等しいところ（土の荷重）のまる点まで、フリンジ内で増加しなければならない。その点において、 σ' はゼロに低下し、土粒子はもはやともに保持されず、アイスレンズが形成される。レンズが厚みを増し続けるにつれ、下部の土は徐々に脱水されて P_w が低下し、クラリウス・クレイロンの式に応じて、 P_1 もまた低下しなければならない。 P_1 が P より小さくなった時、アイスレンズはもはや上層の土を変位できずに、その点で成長を止める。 $\sigma' = 0$ の所で、新しいアイスレンズが形成され、このプロセスは周期的方法でそれ自身が繰り返される。

多分、粘性土において P_1 は、図5に示すものよりは大きく、高い値にある必要があると思われる。なぜなら P_1 は荷重と同様に土の粘着力に打ち勝つために充分でなくてはならない。実際に、氷の存在は全ての土に粘着力を伝えるので無視できない。Gi

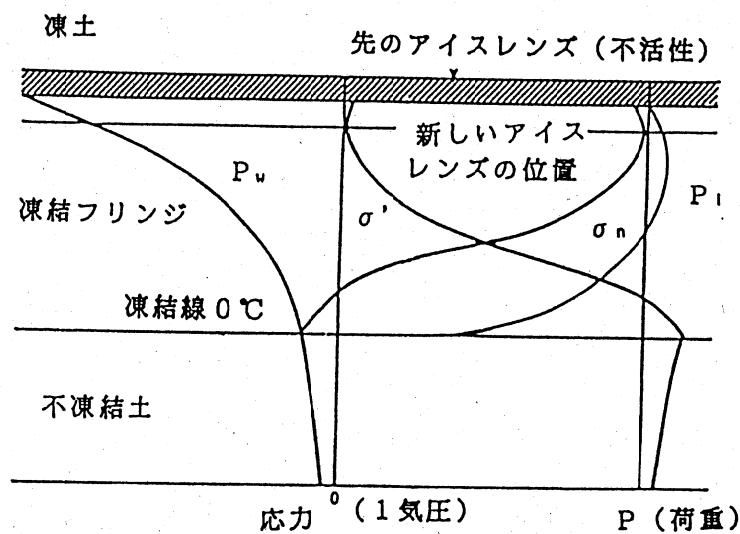


図5 凍結土内の応力と圧力分布

lipinは土粒子を分離するのに必要な圧力が氷の中にあることを述べている。Williamsらの観測によると、氷圧がかなりあることが明らかになった。

このモデルは氷の分離を説明するには非常に分かりやすいが、実際にこのプロセスをどのように上手に説明できるかが問題で、その証明法はまだ存在しない。シミュレーション（予測）に対する剛性氷モデルを試みることは、単純化あるいは過剰の数値的要求に答える必要がある。

土の物理的性質に関係したモデルに集中するけれども、熱的、水理的、機械的な凍上を説明する連続メカニズムを基本にした熱流と質量流のモデルが開発されるべきである。

結局、凍上は単純で主な1次活性のアイスレンズのみで始まるわけではなく、凍結した土自身の連続した内部変形を含む鉛直の変位に始まる。このように、土のかなりの厚さが、凍上中に水分移動と氷晶集積によって重大な影響を受ける。凍土に囲まれた氷本体の連続的な増殖は、半ば剛性土によって提供される抵抗に対して、凍土の膨張的仕事が行われることを必要とする。結果として、凍上は熱力学的状態と土のレオロジー的性質の相互作用に依存することになるだろう。そのような考えは現在凍上モデルになされていない。

引用文献

- 1) Andersland, O. B. & Anderson, D. M.: Geotechnical engineering for cold region. McGraw-Hill, New York, 1978
- 2) 土質工学会編: 土の凍結—その制御と応用—, 土質工学会, 1982
- 3) Gilpin, R. R.: A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. Water Resource Research, 16-5, 918-30, 1980
- 4) 木下誠一編: 凍土の物理学. 森北出版, 1982
- 5) Konrad, J. M. & Morgenstern, N. R. A: Mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 17-4, 473-86, 1980
- 6) Harlan, R. L.: Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. Water Resource Research, 9-5, 1314-1323, 1972
- 7) Miller, R. D.: Freezing phenomena in soils (In Applications of Soil Physics. ed. D. Hillel). Academic Press., 1980
- 8) Schofield, R. K. etc.: The measurement of pF in soil by freezing point. Agri. Science, 28, 645-653, 1933
- 9) Taylor, G. S. & Luthin, J. H.: A model for coupled heat and moisture transfer

- during soil freezing. Canadian Geotechnical Journal, 15, 548-55, 1978
- 10) Tice, A.R. etc.: Relationship between the ice and unfrozen water phases as determined by PNMR and physical desorption data. U.S. Army CREEL, Report -15, 1982
 - 11) 土谷富士夫: 農地の土壌凍結作用とその現状. 北海道の農業気象, 35, 39-46, 1983
 - 12) 土谷富士夫: 十勝地方における火山灰土壌の凍結、凍上が農地に及ぼす影響に関する研究. 北海道大学学位論文, 1985
 - 13) Williams, P.J. & Smith, M.W.: The frozen earth, Oxford: Cambridge University Press, 1991

第3章 ジオテキスタイルの特徴とその用途

1. はじめに

「ジオテキスタイル」というとあまり馴染みのない言葉と思われるが、最近、土木技術者にとっては世界的に関心が多くなつてきている言葉である。英語では「Geotextile」と表現されるが、日本語になりにくいいためか、あえて「土木繊維」、「土木用布」、「土木用繊維布」などと訳してる例がある。Geoとはラテン語で土を意味する接頭語で、Textileは織物類を意味し、この両者の合成語からなる。

鉄筋コンクリートが多く使用されているのは「コンクリートの引張り強さの不足を鉄が補強してるため」であるが、同様に「土の欠点を繊維物質が補強する」という考えであるが、ジオテキスタイルの混入は、この両者を優る働きを行うときがある。この言葉の規定は、共通したものはなく、国際的にも国内的にも定義の確立作業が進行している。

著者が初めてこの言葉を意識したのは、1986年に東京で開催された土質工学会の「第1回ジオテキスタイルシンポジウム」に参加して以来である。主催は、国際ジオテキスタイル学会日本支部であり、日本支部という名称がどことなく印象的に聞こえた。

次にジオテキスタイルとの接触は、1987年のカナダ、アルバータ大学の土質工学研究室に滞在している時であった。ブラジルから留学に来ていた女子大学院生が、修士論文のテーマとしてジオテキスタイルの物性試験を懸命に行っていた。使用しているジオテキスタイルのひとつは日本製であると教えられた。

このように、ジオテキスタイルの重要性は、世界的に認められており、わが国では1985年の土質工学会誌「土と基礎」で特集が組まれている。

カナダから帰国後、著者はヒートパイプを使用した人工永久凍土貯蔵庫のモデル実験を開始した。その時に貯蔵庫内壁の土の凍上に対抗するため、引張りに強いジオテキスタイルを使用した。また、現地土を使用し、道路の凍上を抑制するための工法として、数種のジオテキスタイルを用いた凍上抑制比較実験を始めた。6種のジオテキスタイルを使用して3冬目の試験に入っている。そして、1991年6月オレゴン州立大学で、この分野で著名なBell教授に出会う機会を得た。ジオテキスタイルの凍上抑制問題に関しての有益な意見の交換をすることができた。

このように地中あるいは地下造構に対するジオテキスタイルの利用とその発展性は驚くべきところが多い。図1は北米でのジオテキスタイル市場推移を示す。比較的マイナーから出発したが、わずか10年間で世界で100億ドル産業になったものではなく、こ

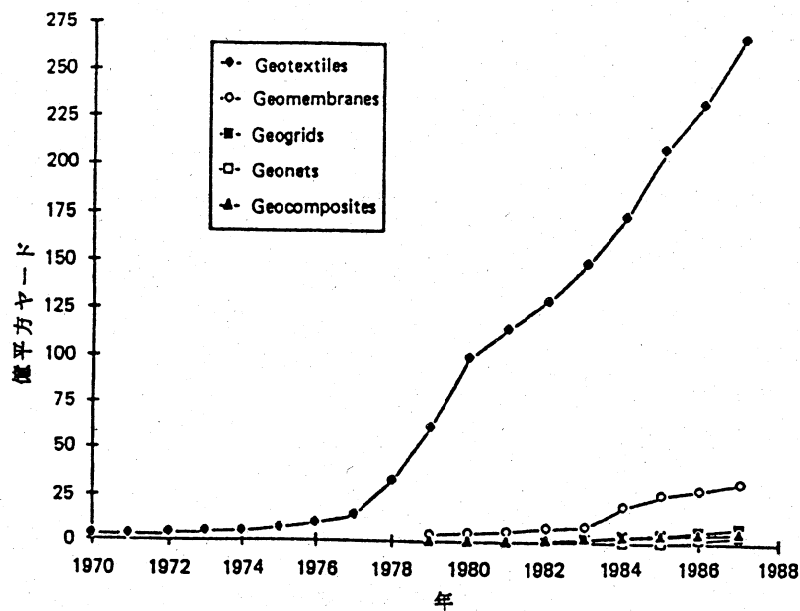


図1 北米におけるジオテキスタイル等の市場推移

のような短期間で増加した建設活動は他にないと言われてる。そして土木技術者にとって、こんな特別な用語も近年現れなかった。まさに、21世紀の新しい土木資材として大いに進展することは確かである。

何故、このように急速な発展がなされてか明確な答は得られていない。しかし、土木技術者や監督官庁は、何か別な物質で軟弱土を補強しようと考えていたためと言われている。ポリマー（重合体）と呼ばれる化学工業製品の出現から、製品の採用に時間がかかった理由は、多分土木社会の本来からの保守主義と1950年代のプラチック製品の導入時の初期性能のまずさにあるだろうと米国では通説になっている。

しかし、急速に取扱われ始めた真の理由は明確であり、ジオテキスタイルの製造業者が産業上の優秀な伝達者であり、必要性を認識し製品を開発し、市場を積極的に拡大したためである。

米国では、1970年代に濾過・排水・侵食防止用に広く使用されるようになったが、年代とともに機能が増大した。現在、ジオテキスタイルの機能は少なくとも次の明確な5つの働きのひとつまたはひとつ以上を行うものである。

- ◎ 分離 (Separation)
- ◎ 補強 (Reinforcement)
- ◎ 濾過 (Filtration)
- ◎ 排水 (Drainage)
- ◎ 水分障壁 (Moisture barrier)

2. ジオテキスタイルの広義と狭義

ジオテキスタイルの定義として「合成高分子材料を用いて作られ、土や岩石などの土質工学的材料とともに用いられる透水性を持つ土木用繊維製品と関連製品」と限定することが多い。国際的には天然素材や金属材料、ジオメンブレンとジオテキスタイルとは区別されている場合が多い。

A S T M (米国工業標準規格)の規定と別に、種々の解釈がある。ジオテキスタイルの考え方として、次の3つの分類が紹介されている。

1) 狭義の分類

最近出版されたロバート・コナーの著書によると、ジオテキスタイルは「ジオシンシテックス (Geosynthetics) に含まれるグループの一つであり、先に示した5つの機能を持ち、ジオグリッド (Geogrid)、ジオネット (Geonet)、ジオメンブレン (Geomembrane)、ジオコンポジット (Geocomposite) と区別される。図2は各種の違いを示す。

2) 中程度の分類

土の安定、強化、空気や水の透水性を目的とした繊維製品で、ネット、グリッド、透水膜を含める。

3) 広義の分類

土質工学的材料に使用するすべての製品で、中程度の分類にジオメンブレンも含める。したがって、ジオシンシテックと呼ぶ方がふさわしい。

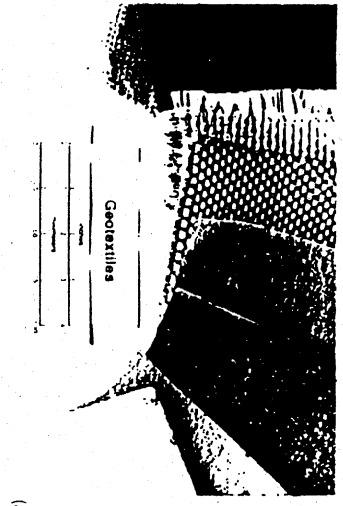
わが国では、中程度の分類で解釈される方が多い。しかし、用途に合わせた製品としては透水性材料ばかりでなく、不透水性材料との複合品もあり、将来にわたる定義は困難である。

3. ジオテキスタイルの歴史

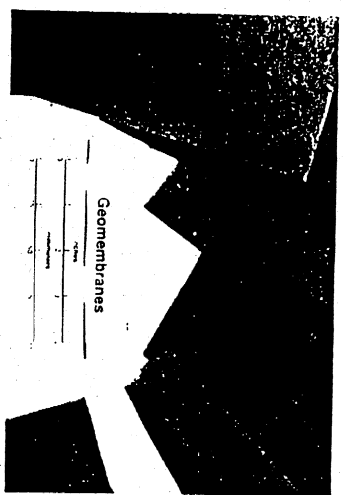
今日知られているジオテキスタイルは土壌侵食防止の応用として、顆粒土のフィルタ材の代用を意図するものであった。したがって時々、ジオテキスタイルを「フィルター用織物 (filter fabric)」と呼ばれた。

1950年代後半に、プレキャストコンクリートの防潮壁の背面、プレキャストコンクリートの侵食防止ブロックの下、そして巨大な捨石の直下などの侵食防止状態にジオテキスタイルが使用された例が記述されている。

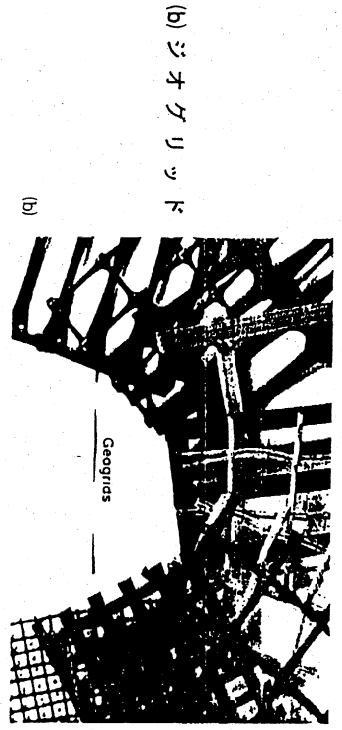
1960年代の後半、全く異なった応用のために針で穴を開けた不織布の織物をフランスの会社で生産し初めた。これらは、非舗装道の補強、鉄道の軌道バラストの直下、堰堤やダム内部にこれらを使用した。これら使用目的は分離と補強の機能を利用することであった。さらに、構造物内部で水を伝達するという全く異なる機能をもたらした。



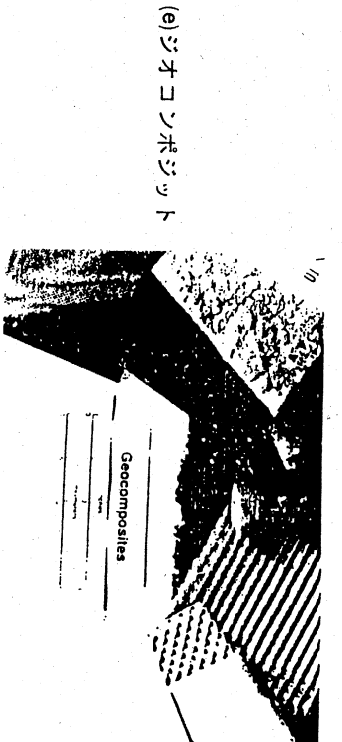
(a)ジオテキスタイル



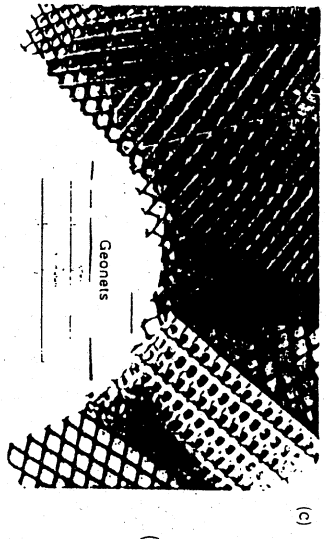
(d)ジオメンブレン



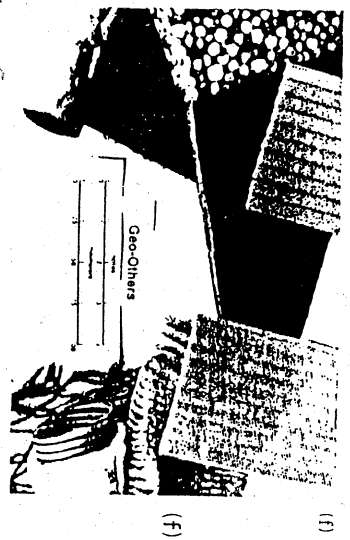
(b)ジオグリッド



(e)ジオコンポジット



(c)ジオネット



(f)その他の製品

図 2 典型的な合成繊維資材 (ジオシンシテックス) 物質

1970年代になつて、イギリスのICI繊維会社が広範囲に使用でき熱加工不織布を製造し、大きな影響力を与えた。米国で最初に使用した不織布はICI社から輸入したものであった。オーストリアのChemie Linz社や米国とヨーロッパのduPont社はこの分野の指導者であり、世界的にジオテキスタイルの紹介をすることとなった。今日、世界の製造会社はジオテキスタイルの製造、販売および普及を行っている。

ジオテキスタイルに関する会議が多数開催されている。主なものに、1977年のパリ会議に始まり、1982年のラスベガス、1986年のウィーンそして1990年のハーグと続いている。国際ジオテキスタイル学会（IGS）の創設はこの活動の反映であり、日本、英国、インド、東南アジア、北米に支部を持っている。フランス、オランダ、オーストラリアなどにその他の組織があつて活躍している。

4. 天然のジオテキスタイル

土塊の中に、引っ張り強さを持つ竹や木などの天然の材料を骨組みとしたり、わらや木片を土に混入したりして強化する技術は、中国や日本では古来から使われてきている。東洋に限らず、南米、アフリカ、ソ連などでも使用されてきていが、欧米では以外と知られていない技術であつた。

中国では紀元前から、竹を使った蛇籠（じゃかご）、砂囊（さのう）、あるいは粗朶（そだ）をよく使用し、その影響はわが国にも及んでいる。竹や木の水制や砂防に応用する技術は独自に発達し、集水機能として農地の暗渠排水などにもよく使用されてきている。しかし、天然材が不足するにつれ、あるいは高価になりはじめた1960年代から、これに代わってポリエチレン製のシートが出現してきた。以後ジオテキスタイルの発達のきっかけとなる。

5. ジオテキスタイルの材料

ジオテキスタイルの市場の成長や刺激に伴う織物業界の役割は極めて大きく、そして積極的であつた。製造に関するかぎり、ポリマーのタイプ、繊維のタイプそして織物のスタイルの3点が重要となってくる。

米国におけるジオテキスタイル繊維は次のポリマー物質から作製されている。

- ◎ ポリプロピレン (65%)
- ◎ ポリエステル (32%)
- ◎ ポリアミッド [ナイロン] (2%)
- ◎ ポリエチレン (1%)

ポリマー (Polymer) とは、重合反応によつて生成する化合物を総称して言う。合成高分子の著しい発達につれ、重合度の大きい分子量体を言うが、しばしば高分子と同じ意味で移用される事が多い。他方、プラスチックは合成樹脂からつくられたもの

の総称であり、高分子物質を主原料として人工的に有用な形状に加工された固体を言い、繊維、ゴム類は除外される。

ジオテキスタイルに使用される各ポリマーの性質を以下に説明する。

◎ ポリプロピレン (Polypropylene)

プロピレンの重合反応によって得られる高分子化合物 (PP) で、比重0.90~0.92、一般のプラスチックで最も軽い。繊維は軟化点温度が140~170℃で、強度、弾性、耐水性、耐化学薬品性が大きい。製品として、フィルム、容器類、工業部品、板、シート、びん類、繊維類がある。

◎ ポリエステル (Polyester)

主鎖中に多数のエステル結合をもち、多塩基酸と多加アルコールとの重縮合などによって得られる。不飽和ポリエステル (UP) は比重1.6、透明で機械的性質にすぐれたガラス強化用のものは非常に強じんである。ポリエチレンテレフタレート (PETP) は比重1.4で、強じん、熱処理・延伸をすれば強度は著しく向上する。製品として、型物、板、シート、パイプ、強化用品、塗料等がある。

◎ ポリアミド (Polyamide)

カルボン酸とアミノ酸の反応によつて得られるアミド結合を主鎖に多数有する高分子の総称 (PA) で、ナイロン (Nylon) とも呼ばれる。比重1.03~1.13で、耐薬品性、低温性、潤滑性に優れている。製品として、フィルム、板、シート、繊維状品、塗料、接着材等がある。

◎ ポリエチレン (Polyethylene)

エチレンの重合反応で得られる高分子化合物で、最も単純な分子構造を有する熱可塑性プラスチック (PE) である。密度によつて、比重は異なるが、0.93~0.94である。耐水性、耐薬品性、耐寒性に優れ、製品としてフィルム、容器類、板、シート、パイプ、びん類、発泡品、繊維状品等がある。

◎ ポリウレタン (Polyurethane)

分子主鎖が多数のウレタン結合よりなる高分子物質 (PUR) の総称である。比重1.2で硬質のものは断熱材に、軟質のものは弾性クッション材に使用される。製品として、型物、発泡品、繊維状品、塗料、接着材等に使用される。

◎ ポリ塩化ビニール (Polyvinyl chloride)

塩化ビニールを主体とする重合体の総称 (PVC) をいう。比重は1.23~1.45、軟質塩化ビニール (製品にフィルム、シート) と硬質塩化ビニール (製品に、型物、パイプ、びん) があり、耐気候性に優れている。

◎ ビニロン (Vinilon)

ポリビニールアルコール系合成繊維で、わが国でつけた名称である。強度が高く、薬品やバクテリアに対する抵抗が大きく、フィルム、繊維状品に使用されている。

このように、ポリプロピレンとポリエチレンのみが水より軽くなり、ポリエステルはわずかに吸湿性を持っている。素材の水分は強度に対して比較的マイナスの役割を果たす。

6. 材料の加工と製法

素材となるポリマーは、溶融してバスルームのシャワーのような原理方法で、紡ぎ口 (Spinneret) から、押しだして繊維 (Fiber) に製造される。Fiberとは、長さや形状の異なる繊維の総称をいう。このようにして製造された連続したきわめて長い繊維を長繊維 (Filament) と呼び、乾式、湿式および融式によつて硬化または固形化される。冷却によつて固形化したものは、同時またはその後に伸張され、繊維の直径が減少し規則的な様式に編成される。ときには、単独に使用される長繊維 (Monofilament) から、2本以上の連続したマルチ繊維 (Multifilament) を作るため接合される。

これらとは多少異なり、短繊維 (Staple fiber) と呼ばれ、特定の連続長繊維から短く切断した、ロープ状の束がある。この単繊維は、ステーブル・ヤーン (Staple yarn) と呼ばれるロープ状の編んだ多少長め糸に編成される。

ヤーン (Yarn) とは形状や加工の異なる糸の総称をいう。テープ状のフィルムを引き裂いて作った形の糸があり、リボン状になつていてスリット・フィルム (Slit-film) と呼ばれる。このスリット・フィルムを結合するとスリットフィルム・ヤーン (Slit-film yarn) が作られる。図3にジオテキスタイルに使用されるポリマー繊維の種類を示す。

次に、繊維またはヤーンを使って織物 (fabric) が製造される。基本的な製造は、織布、不織布、編物のいずれかを選択せざるを得ない。図4にジオテキスタイルに使用される種々の織物類の写真を示す。

編物 (Knitted fabric) は、長い繊維を組合わせて、直線部で連続したループで構成した布であるが、ジオテキスタイルにはあまり使用されない。

織布 (woven fabric) は織機を使用して平行に並べた縦糸 (warp) に横糸 (weft) を直角に交錯させて平面状にしたものである。織物の特定のパターンは、横糸をはた織機に通す一連の作業と、各充填用のピックの位置によつて決まる。おさは、横

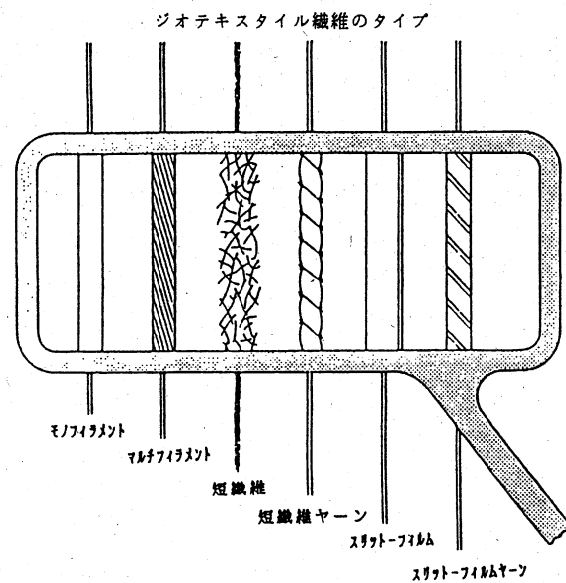


図3 ジオテキスタイルを形成する繊維の種類



(a)



(b)



(c)

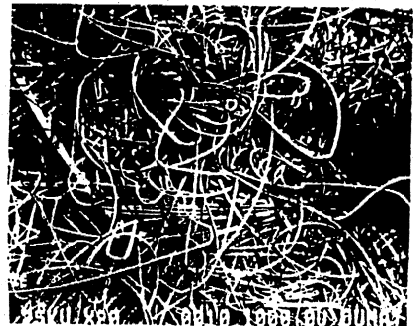
(a)モノフィラメント織布

(b)マルチフィラメント織布

(c)スリット(スプリット)フィルム織布



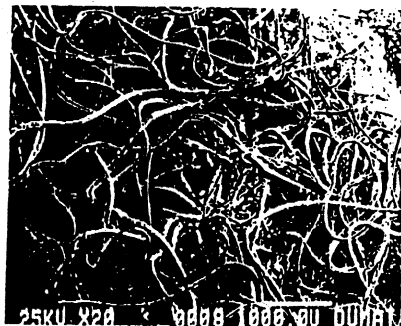
(d)



(e)

(d)溶融結合不織布

(e)ニードルパンチ不織布



(f)

(f)樹脂結合不織布

図4 ジオテキスタイルにされる種々の織物類

糸を挿入するためシャトルを準備しながら、縦糸をはじき上げる。そこで、横糸を包みながら反対側で別の横糸を使ってシャトルを戻しながら、おさが下方にはじき落ちる。そして、おさが上方に引きもどされ、このプロセスが繰返される。図5に織物機の構造を、図6におさの横糸の挿入行程を示す。ジオテキスタイルに使用される織布には、下記に示すいろいろな組織がある。

◎ 平織り (plane weave)

縦糸と横糸が1本ずつ交互に交錯して織られるもので、最も単純で通常の織り型である。

◎ 籠織り (basket weave)

縦糸と横糸が1本以上で交互に交錯して織られるもの。

◎ 綾織り (twill weave)

縦糸と横糸の浮きが2目以上にわたる部分を含み、かつ斜め方向に連続したもの。

◎ 縞子織り (satin weave)

縦糸と横糸の浮きが4目以上にわたる部分を含み、浮きとなる方の糸を密に織ることができるので、光沢に富む生地になる。ジオテキスタイルには向かない。

他方、布織布 (unwoven fabric) は織機や編み機を使用せずに、繊維集合体 (web) を化学的方法による結合または機会的な作用で結合させて布状にしたものである。製造方法には直接紡糸型 (スパンポンド法)、機械的接合法 (ニードル・パンチ法) と熔融接合法がある。

スパンポンド法は、ポリマーから最終的に不織布を製造する連続行程である (図7)。ポリマーは押し出し機から、紡ぎ口を経て繊維状に伸ばされ、冷却後に移動コンベアに載せられ、連続したウェブを形成する。紡ぎ口の回転、荷電、エアジェットの制御、コンベア速度の変化により、多様な不織布が製造される。このとき、長繊維は熱的、化学的および機械的処理で接合され、最終的に巻取り機で巻取られる。

接合法には樹脂接合があり、アクリル樹脂でウェブにスプレーまたは強制浸透させる。薄地で硬い不織布ができる。

ニードル・パンチ法は、図8に示すように長さ75mmで3~4個のトゲを持つ特別に設計された針を使用し、ウェブを突き刺す。繊維は再配列して機械的に

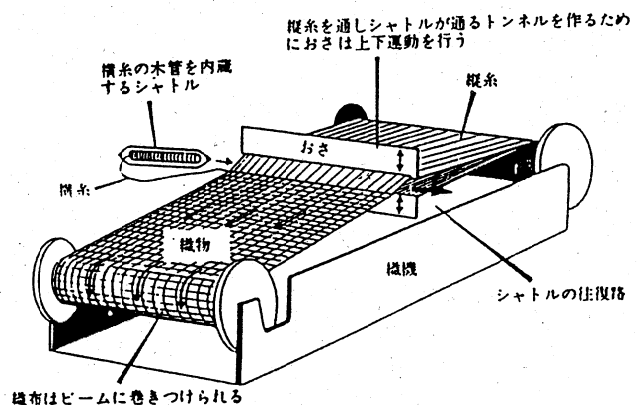


図5 織物機 (はた) の基本的構造

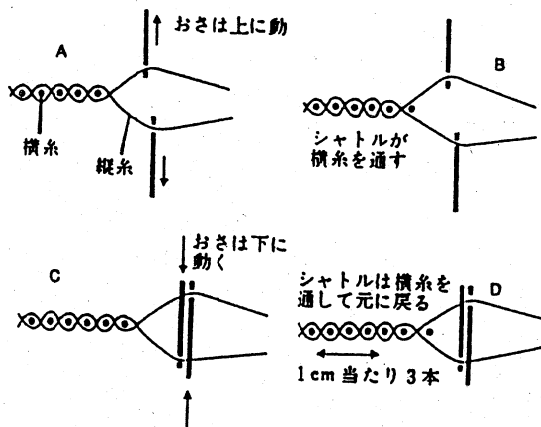


図6 横糸を挿入する際のおさの動き

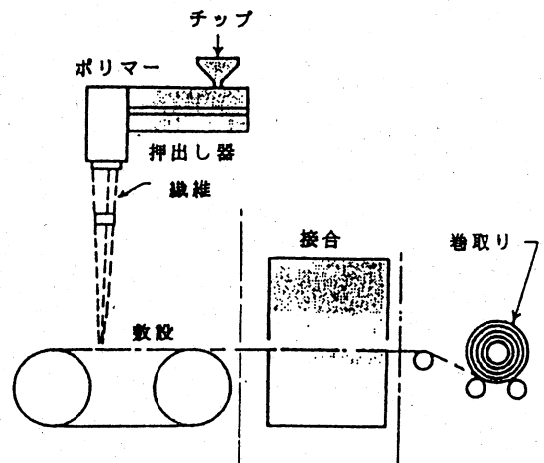


図7 スパンボンド法による製造過程の概略図

接合する。一般に高密度で厚地のものがつくられる。

7. ジオテキスタイルの主要な用途

既に述べたように、ジオテキスタイルの機能は、分離、補強、濾過、排水そして水分障壁である。これらの用途を下記に示す。

A. 異質材の分離

- 1 道路、滑走路の路盤と路床の間
- 2 鉄道の軌道バラストと路盤の間
- 3 岩石基礎と埋め立て土の間
- 4 ジオメンブランスと砂質排水層の間
- 5 載荷重に対する築堤土と基礎の間
- 6 道路盛土の築堤土と基礎の間
- 7 フィルダムの基礎と築堤材の間
- 8 カプセル化した土層と基礎の間
- 9 剛性擁壁と土基礎の間
- 10 たわみ性擁壁と土基礎の間
- 11 貯蔵パイプと土基礎の間
- 12 斜面と下流犬走りとの間
- 13 貯水用パイプと土基礎の間
- 14 歩道スラブの真下
- 15 縁石の下
- 16 駐車場の下

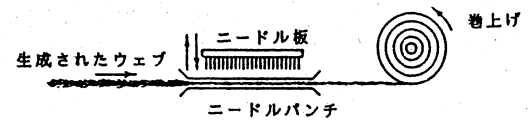


図8 ニードル・パンチ法による製造概略図

- 17 スポーツおよびアセレチック場の下
- 18 装飾ブロックとパネルの下
- 19 不良粒度フィルターブランケット下
- 20 アースダムの築堤ゾーンの間
- 21 新旧アスファルト層の間

B. 軟弱土とその他の物質の補強

- 1 非舗装道路のための軟弱土の上
- 2 滑走路のための軟弱土の上
- 3 軌道のための軟弱土の上
- 4 盛土のための軟弱土の上
- 5 スポーツ、アセレチック場の軟弱土の上
- 6 熱侵食地域の表面
- 7 締切りとしての不安定盛土の上
- 8 軌道バラストの水平封じ込めのため
- 9 カプセル化したシステムで土を包むため
- 10 織布システム補強壁を建設するため
- 11 急峻な斜面の建設を補助するため
- 12 築堤の補強のため
- 13 フィルダムの補強のため
- 14 斜面を一時的に安定するため
- 15 斜面土のクリープ停止または削減のため
- 16 接合したたわみ性舗装の補強のため
- 17 砕岩あるは接合した岩石の橋渡しのため
- 18 粒度の良い岩石濾過マットの保持のため
- 19 連結コンクリートブロックの代用品
- 20 非舗装貯蔵ヤードと足場地域の安定化
- 21 補強土壁の表面パネルのアンカーとして
- 22 小さな擁壁のブロックのアンカーとして
- 23 下層土ジオメンブランスの破裂防止
- 24 盛土や岩石路盤の非透水膜の破裂防止
- 25 高摩擦により安定斜面を造成するため
- 26 アースダム建設における軟弱土の採用
- 27 皮膜によるカプセル化した土の使用
- 28 縁石の土の圧密と現場締め固めに使用

- 29 現場締切の築堤不均等物質の橋渡し
- 30 浅い基礎の支持力の補助

C. 濾過作用（シート面に垂直な流れ）

- 1 顆粒土のフィルター材の代用
- 2 道路、滑走路の路盤骨材の下
- 3 鉄道の軌道内のバラストの下
- 4 地中ドレンを囲む碎石の周り
- 5 地中ドレンのない碎石の周り
- 6 多孔性地下排水パイプの周り
- 7 土管埋設地区の石と他孔管の周り
- 8 濾過機能を発生させる土盛りの下
- 9 水理学的盛土のフィルタ
- 10 シルトフェンス
- 11 シルトカーテン
- 12 スノーフェンス
- 13 土壌侵食防止システム内の砂、グラウトおよびコンクリートのたわみ形式
- 14 劣化したパイプを再建するたわみ形式
- 15 地下鉱山の保全のためのたわみ形式
- 16 洗屈ピアの支持力復元のたわみ形式
- 17 煙突状の排水管物質の保護
- 18 横穴排水路の物質の保護
- 19 擁壁の空隙と裏込めの間
- 20 裏込めと保塁との間
- 21 羽根型排水のモグラ暗渠の周り
- 22 細長い排水のモグラ暗渠の周り
- 23 土の侵入を防ぐジオネットに対抗して
- 24 土侵入防止ジオコンポジットに対抗して
- 25 サンドドレーン内のサンドコラムの周り
- 26 井戸のための多孔性チップの周り
- 27 ピエゾメータ用の多孔性チップの周り
- 28 捨石土台直下のフィルタ
- 29 プリキャストブロックの真下のフィルタ

D. 排水（シート内の水の流れ）

- 1 アースダム内の煙突状排水
- 2 アースダム内の横穴排水路
- 3 水平流に対する遮断排水
- 4 載荷盛土の真下の排水ブランケット
- 5 擁壁背後のドレーン
- 6 鉄道の軌道バラスト直下の排水
- 7 ジオメンブレン直下の水の排水
- 8 ジオメンブレン直下の空気の排除

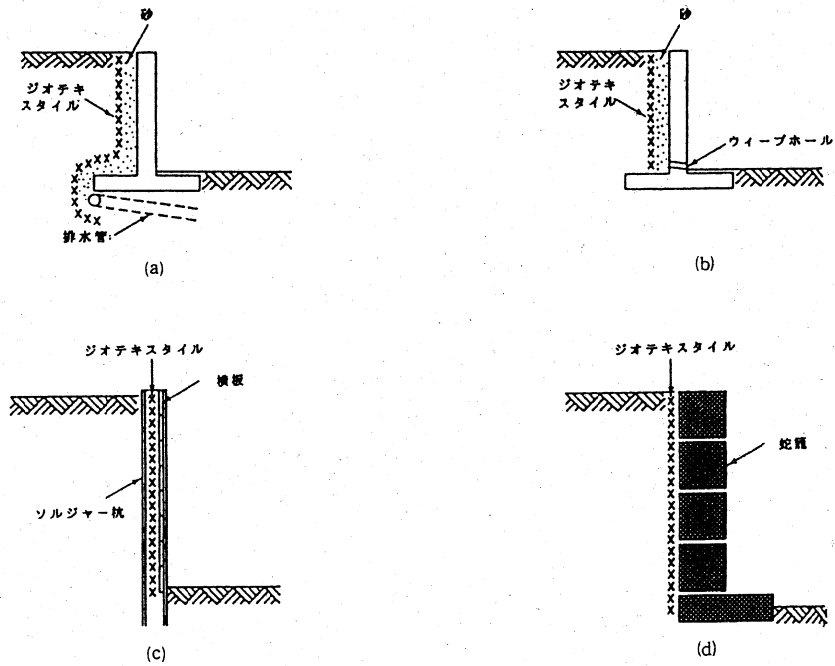


図9 ジオテキスタイルの口過機能を使用した擁壁

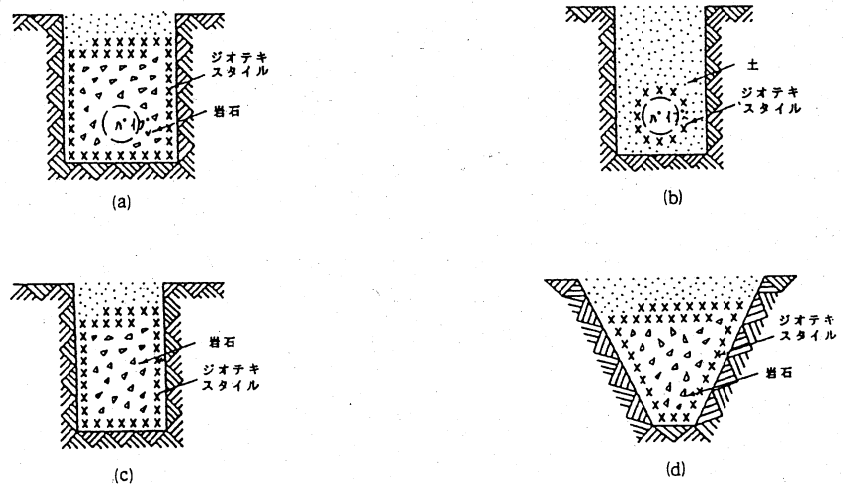


図10 ジオテキスタイルを使用した地下排水の典型

- 9 屋上ガーデンの排水
- 10 土盛り構造物の間隙水の消散
- 11 サンドドレーンとの置き換え
- 12 凍上しやすい地域の排水
- 13 乾燥地域の塩移動の毛管遮断
- 14 露出土や岩石表面の浸透水の消散

この様にジオテキスタイルは多種多様な所に使用されている。紙面の関係上、具体的な使用位置と施工、設計について記述できないが、濾過機能と排水機能の典型例をあげるとする。

図9は擁壁または土留め構造物に利用した例で、いずれも背面にジオテキスタイルが使用される。図10は、地表の過剰水を地下排水する際のジオテキスタイルの使用例を示す。舗装道路の路盤および路肩の地下排水の例を図11に示す。

さらに、アースダムの煙突状および横穴型排水路としてのジオテキスタイルの利用例を図12に示す。さらに、多量に水分を含む細粒土を盛土の荷重を利用し、内部の過剰水を側溝に排除する例を図13に示す。最近、地盤凍結による凍上抑制を目的として、毛管上昇による水分移動を妨げるためジオテキスタイルの使用がされている。図14は冷凍食品の貯蔵庫の基礎底部に用いる例である。

8. おわりに

この様に、ジオテキスタイルの土木工事への応用はますます増大するが、技術者が使用するにあたって、(1)ジオ

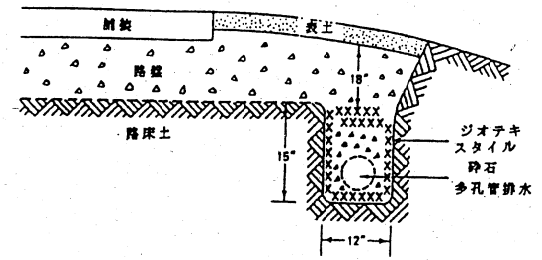


図11 ジオテキスタイルを使用した道路路盤の排水例

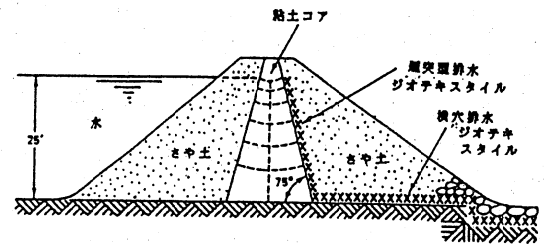


図12 ジオテキスタイルを使用したアースダムの排水

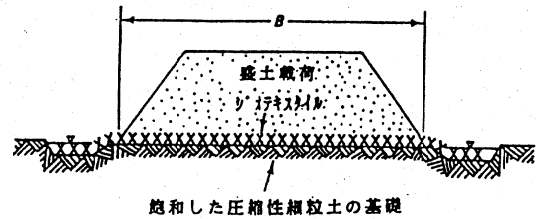


図13 盛土の荷重による強制排水例

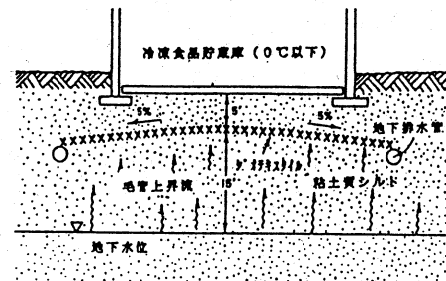


図14 地盤凍結による毛管上昇を遮断する例

テキスタイルの効果が発揮でき、施工可能であること、(2)ジオテキスタイルが容易に入手でき、作業性が実際的であること、そして(3)他の方法より経済的であることを充分検討しなければならない。また、製品の使用上の統一した規格化が急いで行われる必要がある。

ジオテキスタイルの詳細な機能メカニズム、その性質と試験方法、そして設計方法について記述できなかったのが、後の機会に行うとする。また、寒冷地域における用途を広めるため、現在凍上対策への実用化の実験の最中であり、結果はいずれ明白となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 福岡正巳: ジオテキスタイルを用いた工法の現状と今後, 土と基礎, Vol. 33, No. 5, 1985
- 2) 山内豊聡: 日本におけるジオテキスタイルの発達, 土と基礎, Vol. 33, No. 5, 1985
- 3) 岩崎高明: ジオテキスタイルの種類と物性, 土と基礎, Vol. 33, No. 5, 1985
- 4) 渡義治・高橋修三: ジオテキスタイル関連用語の解説, 土と基礎, Vol. 33, No. 5, 1985
- 5) 山岡一三・西形達明訳: 土木繊維—ジオテキスタイルの利用法— (P.R. Rankilor著), 森北出版, 1982
- 6) 田中茂・山岡一三・広田泰久訳: ジオテキスタイル設計マニュアル (T.A. Haliburt on, J. D. Lawmaker・V. C. McGuffer著), 土木工学社, 1987
- 7) R. M. Koerner: Designing with geosynthetics (second ed.), Prentice-Hall, 1990
- 8) J. R. Bell・T. Allen・T. S. Vinson: Properties of geotextiles in cold region application, 4th Inter. Conf. on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 51-56, 1983

第4章 ジオテキスタイルの毛管遮断効果

1. はじめに

凍上性の土に凍結作用が起ると、春期の融解期間には舗装断面全体を柔軟になるか、冬期間の舗装に不整凍上や湾曲が起り、道路や飛行場の舗装に重大な損害発生する。これらの影響は、舗装の亀裂やポットホールのような破壊を引き起すとともに、車両の通過に伴い亀裂を通じさせて、飽和した細粒土のポンピングを引き起すだけでなく、冬期の不整凍上は舗装を凸凹にし、走行を危険にする。

土の非凍上性を判定するためには、室内凍上実験が不可欠である。ある種のジオテキスタイルが土の凍上を軽減するかどうかその能力を査定するには室内凍上試験が要である。ジオテキスタイルは、凍結線へ向かう不飽和流を減少させ、毛管遮断としての機能を発揮するものと推測される。凍上性の土にジオテキスタイルを埋設するいわゆる毛管遮断として挙動する特性が評価されているが、土の凍上性を判定するには、数々の問題点が残されている。そこで、凍上軽減のために、ジオテキスタイル使用する室内試験や現地試験について再考を行うことにする。

2. 土の凍上性の判定

土の凍上性を判定する多くの指標試験について論評すると、土の凍上性を決定する100種類以上の方法を要約したChamberlain(1981)の報告書が最も参考になる。彼は、指標試験には異なる5つの基本があることを見つけている。1)粒径の特性、2)間隙の特性、3)土と水の相互関係、4)土と水と氷の相互関係、5)凍上量である。

土の粒度と凍上性の関係を明らかにしたCasagrande(1931)によると、自然の凍結状態で十分な水分供給が行われる場合、0.02mm以下の粒子が3%以上含まれている不均質な土と、0.02mm以下の粒子が10%以上含まれている非常に均質な土において、相当多くの氷晶分離が発生することが示された。Casagrandeは土の均質性を量的に示さなかったけれど、Riis(1948)が均等係数が5以下である土を均等と定義している。均等係数は D_{60}/D_{10} と定義し、ここで D_{60} は、標準ふるい分析において重量で通過した試料の通過百分率の60%に相当する粒径であり、 D_{10} もまた同様に定義される。Casagrandeの基準は、凍上性土の試験において最も簡単であるため幅広く使用されている

他方、合衆国陸軍工兵隊による凍結設計のための土の分類を表1に示した(Berg and Johnson 1983)。融解期間の支持力の減少に近い順序で土を表示している。すなわち

これは凍上性の一般的な指標でもあるが、F3とF4のグループの土は、おおよそ凍上する傾向にある。

表1 アメリカ合衆国陸軍工兵隊による凍結土の設計分類

凍結グループ	土の種類	0.02mm以下の重量パーセント	統一分類システムによる典型的土のタイプ
非凍上性 (NF S)	(a) 礫、碎石、削岩	0-1.5	GW, GP
	(b) 砂	0-3	SW, SP
弱凍上性 (PF S)	(a) 礫、碎石、削岩	1.5-3	GW, GP
	(b) 砂	3-10	SW, SP
低凍上性 (S1)	礫土	3-6	GW, GP, GW-GM, GP-GM
低凍上性 (S2)	砂質土	3-6	SW, SP, SW-SM, SP-SM
凍上性 (F1)	礫土	6-10	GW, GW-GM, GP-GM
凍上性 (F2)	(a) 礫土	10-20	GW, GW-GM, GP-GM
	(b) 砂質土	6-15	SM, SW-SM, SP-SM
凍上性 (F3)	(a) 礫土	>20	GM, GC
	(b) 砂土 (シルト質細砂を除く)	>15	SM, SC
強凍上性 (F4)	(c) 粘土, PI>12	----	CL, CH
	(a) シルト	----	SM
	(b) シルト質細砂	>15	ML, MH
	(c) 粘土, PI<12	----	CL, CL-ML
	(d) 粘状粘土、その他の細粒結合沈澱物	----	CLとML, CL, CHとML CL, CH, MLとSM

Chamberlainによると、室内凍上試験は凍上性の土(FS)を決定するのに最も直接方法であり、室内凍上試験では3つの基本的な種類があり、その概要を以下に示した。
1) 冷却側の温度の段階的变化と、熱平衡が確立されたときの凍上の観察を必要とすること、2) 凍結侵入の一定速度を用いること、3) 熱抽出の一定速度を用いることである。

標準CREEL凍上試験は、CREELの親組織である米国Army Arctic ConstructionとFrost Effects Laboratoryの共同により開発されてきた。アメリカ陸軍の技術者達は、土の凍上性を判定する標準的な方法として、1950年以来さまざまな修正を加えながら、それを使用してきた。

CREELの凍上試験は、非常に凍上をさせ易くする凍結条件、水分条件および荷重条件を用いている。そのため試験の結果は、現場での実際の凍上量を予測しないが、土の相対的な凍上性を示すのに使用される。

3. 凍上軽減とジオテキスタイルの使用

凍上性物質をきれいな砂や礫層で置き換えることは、凍上を減少することで知られている (Rengmark 1963、Taivenen 1963)。凍結侵入深さの下部と地下水位の上部に粗粒物質 (フィルター) を置いたとき、凍結線への水の有効性を制約し、毛管遮断することによって凍上を軽減する (たとえば、Rengmark 1963)。このように、そのを「毛管遮断 (Capillary Break)」層と呼ぶ。多くのジオテキスタイルはきれいな砂から細砂までの透水係数を持つこと (Bellら1980) から、毛管遮断としてジオテキスタイルを使用するには十分な理由がある。さらに、ジオテキスタイルが土粒子より水に対して親和性が低いので、毛管遮断として働く能力が強められると考えられている。

凍結土内の毛管遮断として、ある種のジオテキスタイルを室内試験でテストした結果、その前途有望であることが判明した (Allenら1983、Chamberlain1983)。凍上を軽減するジオテキスタイルに関する2つの野外試験による報告によると、直接、織布の毛管挙動を考慮していないが、有望であった (Hoover1981、AnderssonとFreden1977)

4. 毛管遮断挙動に見られるジオテキスタイルの性質

ジオテキスタイルの織布として、毛管遮断として働く能力の重要な性質は、(横断方向の) 透水性、目詰まり (clogging)、目隠し (blinding) への抵抗性、しきい圧 (threshold) と分離能力である。目詰まりは、織布の間隙内に土粒子が捕捉されることで、その透水性を減少させるのに対し、目隠し (blocking) は繊維表面で土粒子によって間隙の流入の阻止を行う働きを言う (Bell 1980)。

しきい圧は、繊維を最初に通過させるのに必要な圧力であり、間隙径や繊維の湿潤性と関係する性質である。この性質を測定する方法はまだ標準化されていない (Bellら1980、Allen1986)。分離は物質の混合を防ぐために、2つの隣接する物質間を区別する性質で、この繊維機能に適用される用語である (Bellら1980)。分離はジオテキスタイル利用時の濾過と異なる用語である。濾過はその位置に土を保持し、水を容易に逃すプロセスである。

ジオテキスタイルの特性は、繊維の構造と長繊維の性質によって生じる (Bellら1980)。織布と不織布と呼ばれる繊維構造からなる2種の主要タイプがある。いくつかの織布はひとつ以上の接合方法で結合して製造される。結合法を使用した織布と繊維は最も高価である。予備的な室内実験では、織布が不織布と同様な毛管遮断を持ち、有効であるとの証明はなされなかった (Allenら1983)。

不織布の長繊維は、ニードルパンチ法、熱接合法、樹脂接合およびその混合法の4つの方法のいずれかひとつで結合される。ニードルパンチ法はトゲのある針で繊維の平面に垂直にパンチ孔をあけ、繊維をもつれさせることで成立する織物である。複雑

な間隙構造が圧縮変化を与えるときに、その重さに対して織物の厚さの変化をつくり出すことになる (Bellら1980)。一般に、ニードルパンチの織物は完全に透水性である。織物が非常に高温に従属され、その長繊維が接点でいっしょになった時、熱接合 (融合) が起る。このように、比較的薄い織物が互いに付着した織物から形成される。熱接合の織物はニードルパンチの織物に比べて、低い透水性をもつ傾向にある。樹脂接合は繊維をコーティングするために樹脂を使用し、互いに接着する。織物の厚さは、接合時の圧力に依存して変化するが、繊維は薄く密なものや厚く解放的にもできる。それ故、樹脂接合の織物は、熱接合の織物やニードルパンチの織物に比べて、少ない間隙のため低い透水性のものとなる。Bellら (1980) によると、米国で製造されるジオテキスタイルの2つの最も通常なポリマーは、ポリプロピレンとポリエスレンである。ポリプロピレンはポリエスレンより水に対して低い親和性をもつ。それ故、ニードルパンチ法と熱接合のポリプロピレン物質は、毛管遮断としての候補材として選ばれる。なぜなら、その低い水の親和性からなる表面性質と比較的高い透水性による。

表面性質は使用されるポリマーのタイプと同様に、繊維仕上げプロセスに依存するので、ジオテキスタイルの長繊維の表面性質についてはほとんど知られていない。表面変化に関する情報は荷重を加えた繊維表面が、細かな土粒子を排斥または付着するなどの理由から、有効になるであろう (通常は荷電されている)。さらに、繊維のぬれの角を調べることは、物質の親和性の容易度を決定する上で重要である。

5. 室内試験の事例

室内試験で、Allenら (1983) は土の凍上を減少させるために、ジオテキスタイルの実用性を評価した。凍結した試料内にジオテキスタイルを設置して、凍上と水分量の分布が、織物を入れない試料のものと比較された。5つの異なるジオテキスタイルがこうして比較試験に使用された。表2に、試験を行ったジオテキスタイル織物の情報とその一般的な製造法を示した。これらの試験結果を表3に示す。

凍上を減少させるジオテキスタイルの多くは、疎水性と同様に厚みがあり透水性であり、すなわちFibertex300あるいはTynar3401である。ひとつのジオテキスタイルは強いに疎水性で比較的不透水性であることが分かった。実際に、ポリエステル製のStabilenka T-100のようなジオテキスタイルは、凍上を増大すると思われ、Allenら (1983) が、これを「親水性」と記述している。

Allenら (1983) は、これらの物質の表面での結果的に生じる水の挙動を観測して、使用した物質の「疎水性」を評価した。ジオテキスタイルの疎水性の標準的な評価方法はなく、この性質は長繊維の表面仕上げとその素材によって大きく変化すると思われる。

表2 Allenら (1983) による凍上調査に選定されたジオテキスタイル

ジオテキスタイル名称	繊維ポリマー	ジオテキスタイル製法	公称重量(oz/yd gm/m)	
	不織布			
Bidim C-34	ポリエステル	ニードルパッチ連続長繊維	272	8.00
Stabilenka T-100	ポリエステル	樹脂結合連続長繊維	100	2.94
Typar 3401	ポリプロピレン	熱結合連続長繊維	136	4.00
Fibretex 300	ポリプロピレン	ニードルパッチ連続長繊維	300	8.82
	織布			
Propex 2002	ポリプロピレン	編物シルトフィルム	150	4.41

表3 ジオテキスタイル層による供試土への浸透量と凍上軽減率

ジオテキスタイルのタイプ	凍上削減率	浸透量
Bidim C-34	72.9	25
Stabilenka T-100	-22.4*	3
Typar 3401	82.8	33
Fibretex 300	85.5	23
Propex 2002	52.1	18

*凍上率の増加

低い透水性を持つ強力な疎水性織布は、その水平な層の上で好ましくない湛水を生じることになる。織物の上部に捕捉された水位が、織物を通過して水流を開始させるのに必要な「しきい圧力」を生じさせる水位以下ならば、湛水が予測される。

Roth(1977)は、フィルター用織布中にカプセル化した礫層の毛管遮断効果を実験室でテストした。この実験で、フィルターは凍上性土のサンプル内に置かれた礫層を細粒と混合しないようにするための分離材として機能を持つ。底部で水分供給が十分になる状態にして、サンプルは頂部から凍結させた。フィルター織布のみを、あるいは礫のみを利用したテストが行われなかったため、織布が毛管遮断の一部になったかどうかはつきりしない。Rothの試験は、礫をカプセル化した織布が凍上を示さなかったことを顕著に示した。また、彼らは毛管遮断の最適位置は地下水位上か凍結線の直下であることが効果的であることを提案した。

もし、礫層が非常に深い位置に置かれ、凍結線がそのかなり上に置かれると、アイスレンズは礫層の上に位置する細粒土内にある水分によって形成されると思われる。(Roth 1977)。残念ながら、Rothのテストで使用したフィルター織布に関する詳細なデータは公表されていない。

ポリプロピレンジオテキスタイルをサンプルに挿入した砂質土に関するCRRELの標準凍上実験の結果を示す。使用した2種の織布は、(製造元名称) Mirafi600xとFibertex400で、工学的性質を表4のリストに示す。第3番目に使用されたジオテキスタイルFibertex200とFibertex400の違いは、単に厚さが2倍という違いである。凍上試験結果は、同じジオテキスタイル(特にFibertex)と同じ土を使用した場合、ジオテキスタイルの厚さを2倍になると凍上軽減効果は2倍になるということを示した。さらに、織布の比較的透水性のジオテキスタイルは、Fibertexのニードルパンチ法のジオテキスタイル(比較的高い透水係数を持つ)より、凍上軽減に有効ではない。このことは、Mirafiに比べてFibertexの間隙の大きさと複雑性が増加することにより、不飽和な水分移動をより困難にすることに起因していると思われる。規定のない表面性質もひとつの役割を果たすと思われる。

表4 製造元の提供によるMirafi600xとFibertex400の各工学的性質

ジオテキスタイル	製造法 材質	費用 (\$/yd ²)(\$/m)		厚さ (mils)	透水係数 (cm)(cm/s)	孔径 U.S.基準	
Mirafi600x	ホリフビ織布	0.80	0.66	15	0.381	0.01	20-145
Fibertex400	ニードルパンチホリフビ織布	1.40	1.17	30	0.076	0.3	100+

Hooverら(1981)は道路断面の建設と維持における内部土層の補強として、ジオテキスタイルの能力を試験室内と野外試験で報告した。彼らの使用したジオテキスタイルMirafil40は、ポリプロピレンとナイロンで包んだポリプロピレン繊維からなる熱結合、不織布である。不織布の平均孔径は中間の細砂のものと同じである。

彼らの室内実験は、種々のせん断と安定性のパラメータを決定する試験と同様に、供試土の凍上を測定するため、凍結-融解試験を取り入れた。凍結-融解試験で、シルト質のサンプルは頂部から凍結し、水分は供試土の底部から一定に供給された。単一層の織布はサンプル内の種々位置で挿入され、3層で締め固められた。凍結-融解の試験結果によると、最小の凍上を示したサンプルは、サンプルの3分の1の位置に挿入した、2層の織布であった。

凍上を減少する他に、織布の存在が室内での土の安定性と強度パラメータを改善した。Hooverら(1981)は、凍結-融解試験の結果はサンプルの凍上の軽減と補強作用の結合によるものとしている。

6. 現場野外試験の事例

現場部門の研究はHoover(1981)らによって行われた。彼らは、2冬通して20カ月間

その場所に入れておいた織布の補強作用の効果を観測した。ジオテキスタイルは異なる三つの形態で使用された。一つ目は凍上性のある路床と、0.15m(6in.)の砂利の表層上にある0.6m(24in.)の粗骨材との間に敷かれている。二つ目は、凍上性のある路床と砂利層の間に敷かれている。三つ目の形状は、織布が凍上しがちな路床と0.2m(8in.)のマダカム基礎と0.1m(4in.)のショックストーンの上に敷かれている。彼らは凍上量は測定せず、施工した時(1976年8月)とそれから20カ月後(1978年7月)に、さまざまな深さにおける密度、含水量、そして粒度分布を測定した。彼らはまた定期的に、乱されていない道路サンプルの原位置の物理的な実験と室内実験を行った。

現場試験の基本としてHooverらは次のような結論を下した。それは、織布が砂利表面と凍上性のある路床との間では最も補強作用として働くが、粒状やマダカム路盤との結合した織布の使用は、設置した場所に関係なく有効ではないということである。その上、凍上性のない路床への織布の使用は、十分な根拠がないと結論づけた。また、細粒部は織布を通じて移動するという注目に値する発見をした。

スウェーデンで行われた試験的な研究は、非常に凍上性のある路床上に施工した五つの舗装において、補強作用としての織布の実用性を調査することであった(Andersson と Freden 1977)。舗装部分は2.5×2.5m(8.2×8.2ft)が五つで、それぞれ1m(3.3ft)の深さから成るテストピットで凍結された。テストピットはすべての側面から隔離され、水面はたえず底から10cm(3.9in)の高さに保たれている。その部分は3~4カ月以上冷却装置で表面から下方へと凍結させた(Andersson と Freden 1977)。

AnderssonとFredenの目的は、さまざまなテスト区間での凍上と融解による軟弱化を比較することである。凍上の結果から、ジオテキスタイルを新しい舗装の上層路盤と古い砂利道路の摩耗層との間に敷いた区域では、織布なしの区域に比べて凍上が大幅に減少した。織布を埋設する目的は舗装部の強化であり、そして凍結は5日以内にこの層へ侵入していた。ジオテキスタイルの補強作用としての寿命は、ずいぶんと増加している。しかし融解期間に2倍の荷重を使えば、失敗を引き起こすことは必然である。試験区3と4は、きれいな砂利からなる典型的なフィルタ層と、同じ目的のためにジオテキスタイルを使用したフィルタ層との比較である。シルト層はこの区域において15cmほどの薄さだったけれども、砂利層は織布を用いた場合よりも凍上を抑えた。不残念ながら織布に関する明確な情報が得られなかったために、砂利層とジオテキスタイルの特性は比較できなかった。

7. 要 約

多くのジオテキスタイルは、純粋な中砂から細砂と同様な透水性をもち、そして水に対しては土よりもなじみが少なく、凍上の起る土において毛管遮断材としての候補

にあげられる。ジオテキスタイルの繊維の表面性質は、現在あまりよく規定されていないが、繊維のヌレの角に影響され、そして繊維が細かな土粒子を付着させるかどうかに関係している。使用した2つの共通したポリマ、すなわちポリプロピレンとポリエチレンのうち、ポリプロピレンは最も疎水性がある。

透水性と表面性質に加えて、毛管遮断の挙動において考慮すべきジオテキスタイルの重要な物理的性質には、目詰まりや目隠しへの抵抗性、しきい圧そして分離能力がある。

不織布を構成する共通した3つの方法のうち、ニードルパンチ法は最も透水性があり、樹脂接合法は透水性が最も低く、熱接合がその中間の透水性の織布になる。費用を含めて表面性質と透水性によると、ニードルパンチ法と熱接合をもちいたポリプロピレン織布が毛管遮断の候補としては望ましい。

室内実験は Allenら(1983)によって報告されたが、それには凍上率は、比較的疎水性の織布(ニードルパンチ法と熱接合をもちいたポリプロピレンジオテキスタイル)を使用することにより、はっきりと減少(80%以上)したことが示されていた。しかし非常に疎水性な物質を使うとき、織布上の湛水が問題となる。その他の研究では、毛管遮断は地下水面と最大凍結深さとの間にジオテキスタイルを敷設した時が、最も有効である。ジオテキスタイルによる土の補強作用は、おそらく凍上の減少に役立つだろうと思われる。

Chamberlainは、室内においてニードルパンチ法をもちいたポリプロピレン製ジオテキスタイルを毛管遮断として使用することにより、凍上率が明確に減少することを発見した。彼はまたニードルパンチ法をもちいたポリプロピレン織布は、あまり透水性のない織布よりも砂質土において凍上を減少させたことも発見した。それだけでなく、ニードルパンチ法の織布の厚さを2倍にすることは、明らかに凍上を2倍に減少させる結果を得ている。

ある現場での試験では、舗装断面を強化するため、ジオテキスタイルを古い砂利道路の摩耗層と新しい舗装との間に埋設されたとき、凍上が減少したことが示された。もう別の試験では、粒状層や非凍上性の路床材ともに織布を使うことは、その価値が認められない。

引用文献

- 1) Allen, T., J.R. Bell and T.S. Vinson(1983) Properties of geotextiles in cold regions applications. Corvallis, Oregon:Transportation Research Report, 83-86
- 2) Andersson, O. and S. Freden(1977)The influence of a plastic fabric upon the pavement at a frost break. Frost I Jord, 18:43-50
- 3) Bell et. al(1980)Evaluation of test methods and use criteria for geotechnical fabrics in highway Administration, FHWA Report 80-021
- 4) Berg, R.L. and T. Johnson(1983)Revised procedures for pavement design under seasonal frost condition. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report, 83-27.
- 5) Casagrande, A(1931)Discussion of frost heaving. Proceedings of the Highway Research Board, 11:168-172
- 6) Chamberlain, E. J. (1981)Frost susceptibility of soil:Review of index test. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, monograph 81-82
- 7) Henry, K. S. (1990):Laboratory Investigation of the use of geotextiles to mitigate frost heave, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report, 90-6
- 8) Hoover, J.M. et.al(1981)Performance of soil-aggregate-fabric systems in frost-susceptible roads, Linn County, Iowa. Transportation Research Record, no. 827, 5-17
- 9) Riis, A. (1948)Frost-damage to roads in Denmark. Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, vol. 2, 287-291
- 10) Roth, H(1977)Filter fabric for improving frost susceptible soils. Proceedings, Second International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics, Ecole Nationale Des Ponts Chaussees, Paris, vol. 1, 23-28
- 11) Taivenen, O. A. (1963)Preventative measures to reduce frost heave on highways in Finland. Highway Research Record, no. 33. 202-216

第5章 ジオテキスタイルを使用した屋外凍上抑制試験

1 はじめに

寒冷地の凍上対策におけるジオテキスタイルを用いた遮水工法は、米国寒地研究所 (CRREL) や日本道路公団試験研究所などの室内試験で、毛管上昇を減少させ凍上抑制効果のあることが確認されている。しかし、これは複雑な現地の気象条件下においても効果があるかは不明である。そこで、帯広畜産大学の構内に設置された野外試験土槽 (ライシメータ) を用いて、室内凍上試験に用いた数種のジオテキスタイルの経年変化にともなう遮水効果の変動、または安定性を実証することを目的とする。

2 試験装置と試験方法

1) 試験装置 この試験を行うに当たって以下5つの試験設備と試験装置を用いた。

(1) ライシメータ

帯広畜産大学構内の土地改良実験室南側に設置されている幅2.0m×2.0m×深さ1.5mの野外ライシメータを用いた。ライシメータとは蒸発散量などの土の水収支を精密に測定するために金属またはコンクリートで造った土槽のことである。この試験のため任意に地下水位の設定を可能にし、側壁に発砲スチロール板(厚さ0.1m)を埋め込み隣接する土槽間の熱的干渉の削減などの点が改良された。そうした中に各基ごとに所定の深さにジオテキスタイルおよび砂利層が敷設されている。

(2) 凍結深度計

凍結深さはアクリル製メチレンブルー凍結深度計を使用して計測する。図1にその概略図を示す。各深度計は濃度0.03%のメチレンブルー溶液が使用され、ガイドパイプの塩化ビニール管に挿入した。

(3) 地下水コントロール装置

図2に地下水コントロール装置の概略図を示す。ライシメータの地下水位のコントロールは電極棒によって検知され、リレー装置によって給排水電磁弁が開閉される。すなわち、蒸発あるいは凍結によって地下水位が低下するとリレーが作動して給水が開始される。逆に降雨や融解の侵入水によって地下水位が設定水位より上昇すると排水が開始される。水槽上部、及び下部に設置したバケツ (転倒マス) の転倒がマイクロスイッチを作動し、その回数が電子カウンターに表示されその数値とバケツ容量の積で給排水量が求められる。

(4) 地中温度センサ

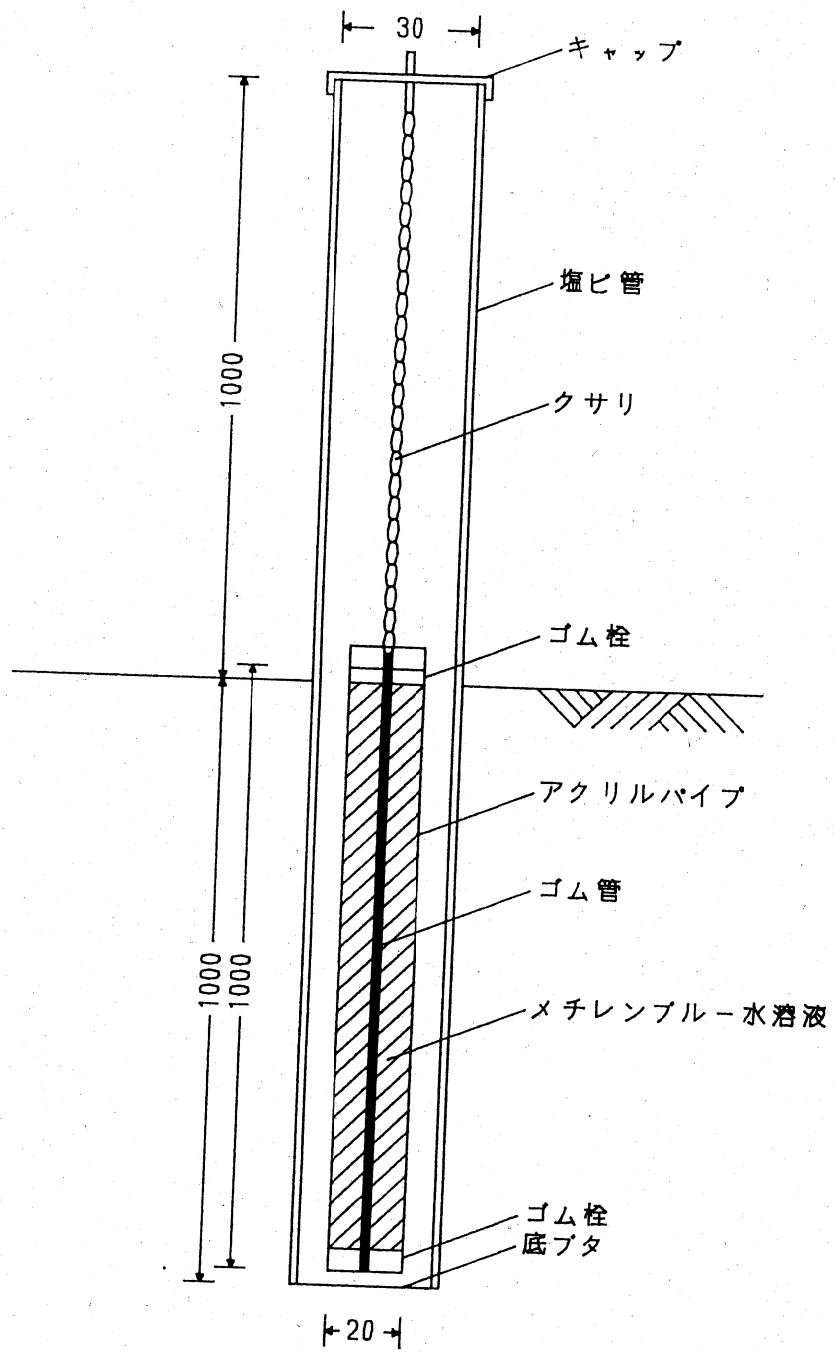


図1 凍結深度計における概略図

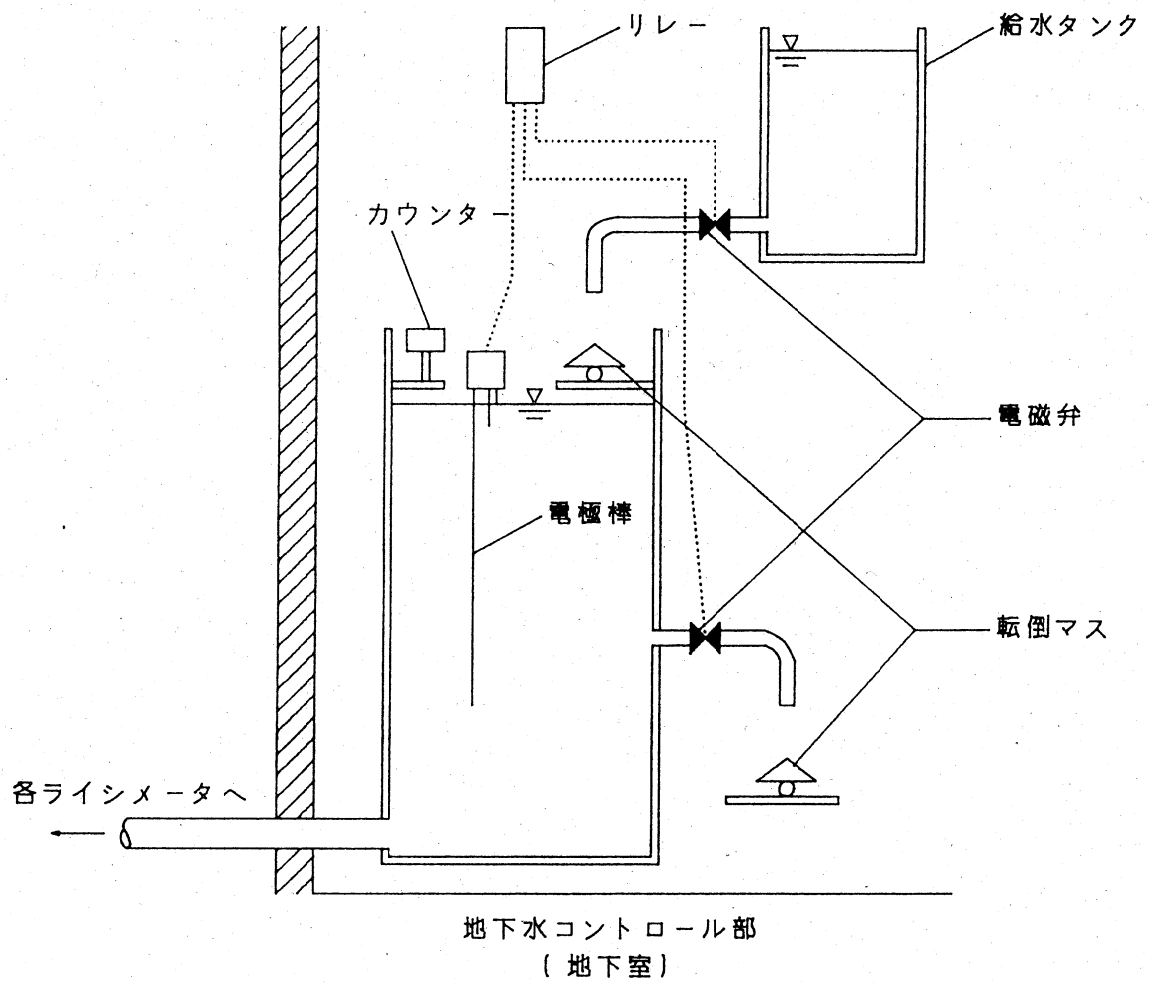


図2 地下水コントロール装置における概略図

共和電業の白金抵抗温度センサーが各ライシメータに深さ20cmごとに6個埋設してある。計測器はコーナシステムのPC-SCAN変換器を使用し、制御と記録にはPC-9801のパーソナルコンピュータを使用した。

(5) 地中変位計

図3に地中温度センサを含めたその配置、およびライシメータの寸法と構造の概略図を示す。凍上測定のためのひずみ変位計は、共和電業のUCAM-5BT小型万能デジタル測定器を使用し、制御と記録はFM-7のパーソナルコンピュータを使用した。

2) 試験条件 この凍上抑制試験条件を以下CASE 1~5に分け、おのこの比較条件要素別に説明し、表1に試験番号を示す。また、図4でその概要図を示す。

(1) ジオテキスタイルを用いない場合

1) 無処理状況

- ・ CASE 1~高地下水位(GL-60cm)
- ・ CASE 2~低地下水位(GL-120cm)

(2) ジオテキスタイルを用いた場合

2) 各種ジオテキスタイル処理状況

- ・ CASE 3~コスモレベル
- ・ CASE 4~サンドフS10G

3) 砂利層を毛管遮断に使用した状況

- ・ CASE 5~テクトン

表1 各種試験番号

試験番号	備考
A-1	高地下水位(GL-60cm)
A-2	低地下水位(GL-120cm)
A-3	コスモレベル
A-4	サンドフS10G
A-5	テクトン

これらの場合はすべて帯広土を用い、地下水位は低地下水位で一定とした。CASE 5で用いているジオテキスタイルは砂利層(フィルタ層)と試験土との分離を主目的としている。このジオテキスタイルは、テクトンであり、非常に薄く、特に凍上抑制に必要な毛管遮断力はほとんどないと思われる。またテクトンは、他に比べて安価であるために実際の現場において砂利層とともに使用に対し建設コストの点で興味深

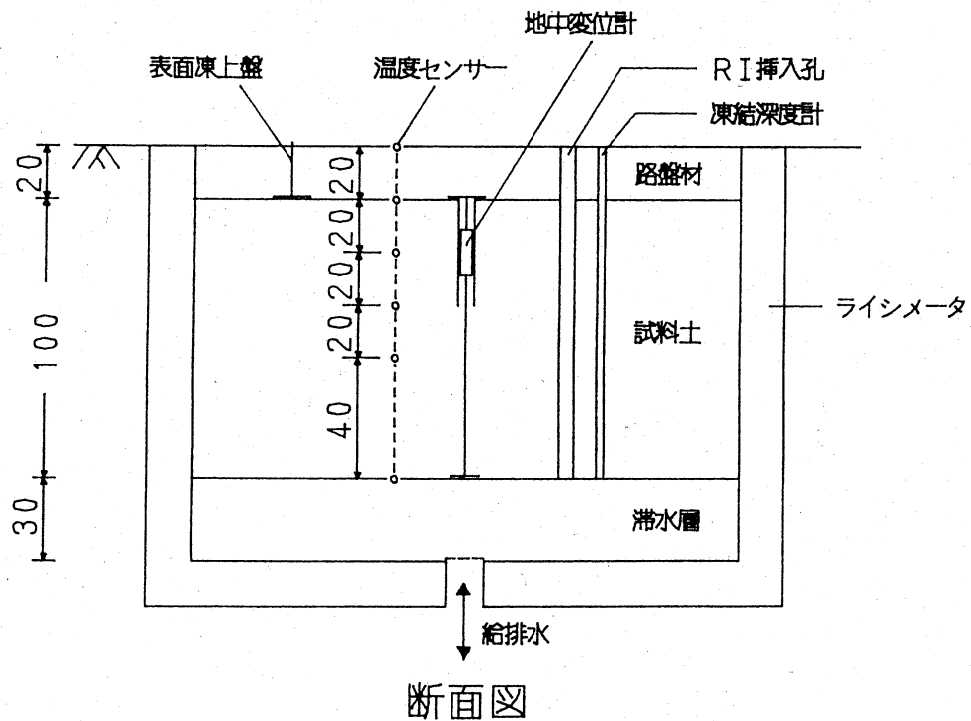
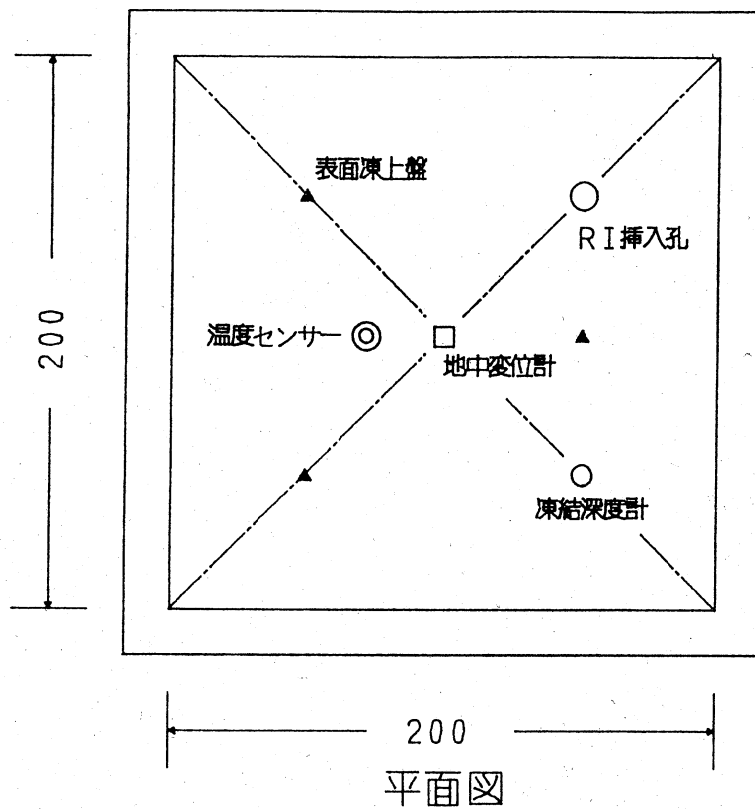


図3 地中温度センサーおよびライシメータの寸法と構造における概略図

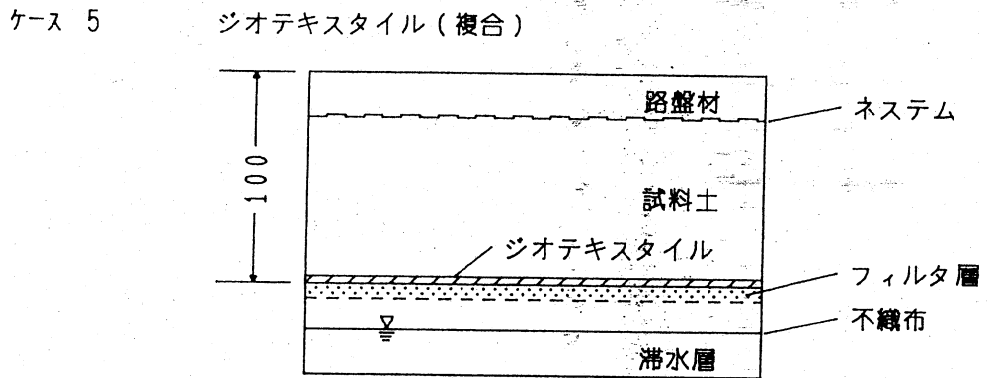
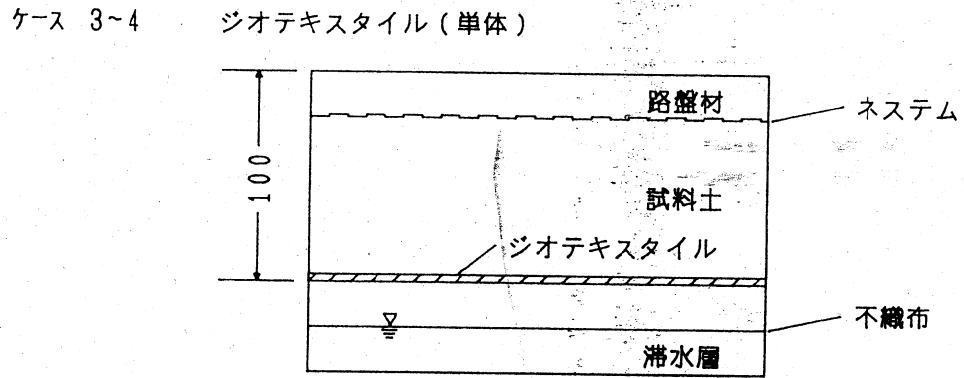
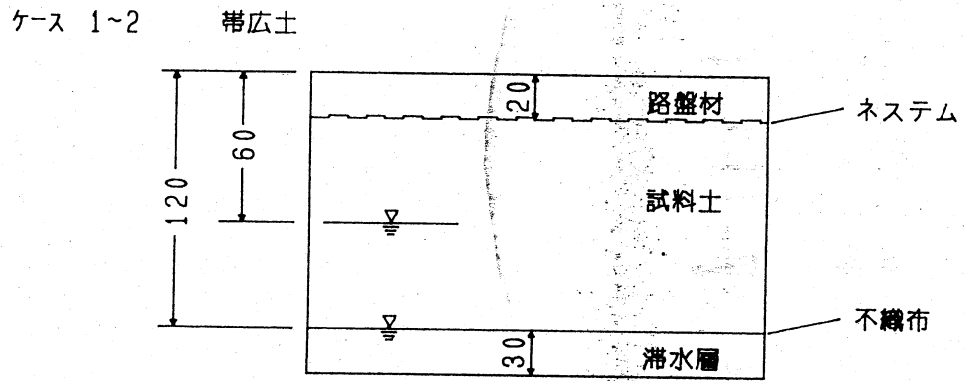


図4 凍上抑制試験条件における概略図

い。ジオテキスタイルと砂利層との複合利用効果という意味合いも兼ねて、分離目的のテクトンを使用した砂利層条件である試験を行った。

この試験は概要でも述べたが、建設予定地付近に出現する凍上性と判断された砂質土からなる「帯広土」と、最大凍結深さの下方に地下水位があることを想定した「低地下水位」を、この試験の主体においている。

3) 試験供試土と試験材料

(1) 試料土

北海道横断高速道路の帯広と池田間建設予定地域で出現する土で音更町長流枝内(おさるしない)で採取したものである。ここでは便宜上「帯広土」と呼ぶ。

この土は道路土工の排水工指針に基づく凍上試験で凍上性の土と判断された砂質土でもある。

表2に帯広土の物性値一覧を示す。また、図5に粒径加積曲線を示す。

(2) 路盤材

現地で凍上抑制材として実際に用いる基準に準用して、凍上を防ぐため74 μ 以下の細粒分は可能な限り排除したものをを用いたものである。表3に、アスファルト舗装の下層路盤相当の粒状路盤材の基準を表示する。また表4に凍上抑制層の材料品質を示す。

表2 試料物性一覧

試料名		帯 広 土
比重 G_s		2.65
液性限界 WL (%)		71.4
塑性限界 WP (%)		49.5
塑性指数 IP (%)		21.9
粒 度	粗砂 (2000 μ m以上) (%)	72.0
	細砂 (75~2000 μ m) (%)	16.5
	シルト (5 ~75 μ m) (%)	4.5
	粘土 (5 μ m以下) (%)	7.0
自然含水比 ω_n (%)	17.8	
飽和透水係数	cm/sec	4.3×10^{-4}
乾燥密度	γ_d g/cm ³	1.594

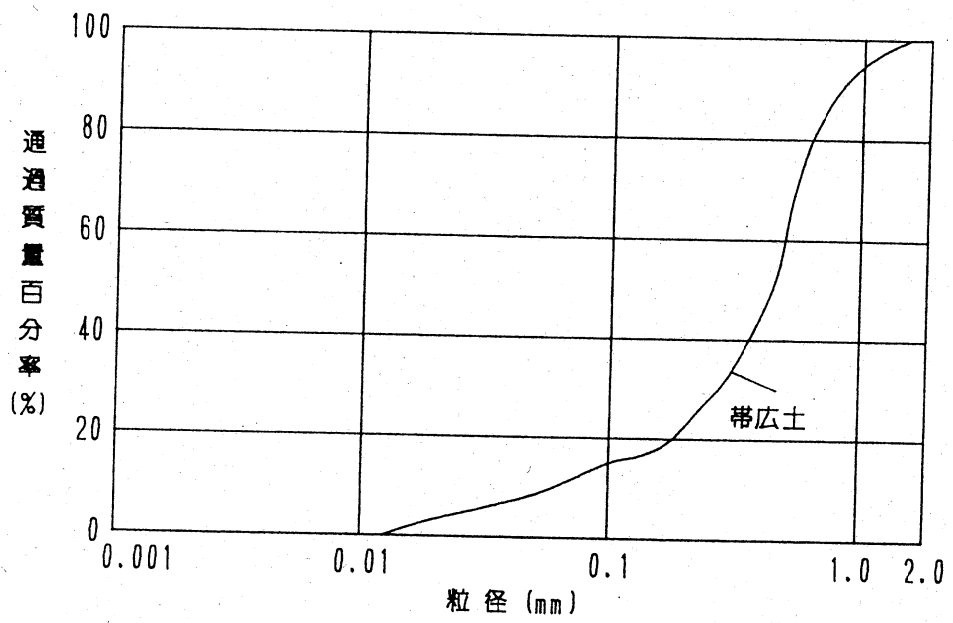


図5 帯広土における粒径加積曲線

表3 路盤材の基準

路盤用配合設計標準粒度範囲

フルイの 呼び寸法 (mm)	下層路盤 粒 状	上 層 路 盤		
		粒 状	アスファルトの安定処理	
			タイプ I	タイプ II
50	100	100	100	100
40	80~100	80~100	95~100	95~100
25	—	—	70~100	70~100
20	55~100	55~100	55~90	55~100
10	—	38~80	30~70	30~100
5	30~70	28~60	17~55	17~100
2.5	20~55	18~47	10~42	10~100
0.6	—	—	5~28	5~40
0.4	5~30	5~23	—	—
0.3	—	—	3~22	3~25
0.075	2~10	1~7	1~10	1~10

表4 凍上抑制層の材料品質

最大寸法(mm)	100	
凍結融解後のCBR	10以上	
粒	砂	75 μ m ふるい通過量が全試料の6%以下
	切込砂利	75 μ m ふるい通過量が4.75mm通過量の9%以下
	切込碎石	75 μ m ふるい通過量が4.75mm通過量の15%以下
度	火山灰質砂質土 火山礫	75 μ m ふるい通過量が全試料の20%以下で強熱減量が4%以下で、かつ風化の兆候がなく排水性が良好な物。

(3) 各種ジオテキスタイル

・コスモレベル (東洋紡製造)

ポリエステル繊維の厚みのある三層構造シートであり、比較的密な表層、裏層の中間に繊維密度が粗な空隙層を有し重さは $570\text{g}/\text{m}^2$ 、厚さは $7.5\pm 0.5\text{mm}$ で、主な用途は地下水面からの毛管水の吸い上げの遮断である。単価は約 $1200\text{円}/\text{m}^2$ である。

・サンドフS10G (前田工織製造)

サンドフは原料にポリエステル繊維を用い、樹脂で接着成層したマット構造の不織布である。重さは $400\text{g}/\text{m}^2$ 、厚さは 10.0mm で、土砂の吸い出し防止、洗掘防止、目詰まり防止が主な用途である。単価は約 $600\text{円}/\text{m}^2$ である。

・テクトン (蝶理(株)製造)

テクトンはポリプロピレンが原料の熱圧着タイプのспанボンド不織布である。重さは $100\text{g}/\text{m}^2$ 、厚さは 0.38mm で、主な用途は土層分離や法面の侵食防止である。単価は約 $240\text{円}/\text{m}^2$ である。

(4) フィルタ材

フィルタ材は、CASE 5で凍上抑制のため毛管水を遮断するために地中 100cm に敷込んだ土砂材料である。遮水効果を高めるためには、粒径の大きな単粒の碎石が有効である。しかし、このような材料では締め固めが困難であり、盛土の安定上も好ましくない。そこで一般的に用いられている凍上抑制材を想定して上記路盤材と同等の材料とした。

(5) 滞水層

ライシメータ低部に設置する分離材で、単粒碎石を十分に転圧して、上部に砂層を使用する。試料土との境界でフィルタ層を吸い出し防止のために形成する。

(6) 不整凍上防止材

土槽は均一に作成されているが路盤の転圧の際、路盤材と試料土が混合して幅 $2.0\text{m}\times 2.0\text{m}$ の土槽内で凍上量のばらつきが生ずることが予想されるので、路盤材と試料土の間にネステム(樹脂ネット)を敷設する。

4) 計測方法と比較方法

この試験において、表5に示す要素について計測を行った。なお計測期間は、1989年から1992年までの11月～4月間までとし、それぞれ表5に示す間隔で定期的に計測した。

表5 計測要素と計測間隔

計測要素	計測方法と計測間隔	
気温、風速、及び降水量	自動計測	3時間ごと
凍上量	a. 地表面変位	レベル測量 1週間に1回
	b. 地中変位	自動計測 3時間ごと
地中温度	自動計測	3時間ごと
凍上深さと吸水量	読み取り	1日1回(9:00AM)

比較方法としては、3年間の各CASE別に比較検討を行い、それをもとに無処理状況、砂利層処理状況、各種ジオテキスタイル別処理状況について相対的にどの処理状況が凍上抑制に効果を発揮するか検討する。

3 試験結果と考察

1) 過去3年の試験地の気象条件

表6～表8に過去3年の試験期間6ヶ月を通しての月別の真冬日の日数、月平均気温、月最高・最低気温とその起日、および月別積算寒度を示す。また、最近11年間の畜産大学で測定した月別積算寒度を表9に示す。積算寒度とは、0℃以下の日平均気温を加算した絶対値を量的に示したもので冬の寒さを表す。この積算寒度を比べてみると、試験初年度の1989年から1990年の冬（以下1989年度の冬と呼ぶ）が平均的な冬であり、次年度は1月が特に暖かい近年稀な暖冬であった。1991年度の冬は、平均よ

表6 月別気温状況 (1989～1990年)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	合計
真冬日	0	10	25	9	0	0	44
平均気温	3.1	-5.4	-13.4	-7.1	-1.4	5.5	—
最低気温	-6.0	-21.8	-31.8	-31.0	-17.3	-7.4	—
起日	11/25	12/20	1/27	2/01	3/25	4/19	—
最高気温	19.5	15.8	9.6	9.6	12.6	24.1	—
起日	11/04	12/04	1/09	2/23	3/31	4/12	—
積算寒度	3	123	309	226	65	0	726

表7 月別気温状況 (1990~1991年)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	合計
真冬日	0	3	10	19	4	0	36
平均気温	4.8	-1.2	-5.3	-9.0	-1.8	6.1	—
最低气温	-7.0	-20.6	-28.4	-31.0	-21.0	-8.4	—
起日	11/22	12/30	1/23	2/20	3/02	4/02	—
最高气温	19.0	13.6	5.8	5.2	12.9	23.0	—
起日	11/14	12/07	1/20	2/27	3/20	4/24	—
積算寒度	1	175	423	205	53	0	857

表8 月別気温状況 (1991~1992年)

項目	11月	12月	1月	2月	3月	4月	合計
真冬日	0	9	23	12	4	0	48
平均気温	2.7	-3.8	-10.0	-7.8	-1.0	5.4	—
最低气温	-7.8	-22.0	-27.2	-28.6	-18.6	-7.8	—
起日	11/19	12/30	1/25	2/06	3/08	4/08	—
最高气温	14.4	7.9	4.2	7.8	14.4	19.4	—
起日	11/01	12/02	1/18	2/29	3/28	4/24	—
積算寒度	1	76	169	252	78	0	576

表9 最近11年間の月別積算寒度

年/月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	合計
1981-82	61	181	361	367	100	7	1087
82-83	19	169	280	311	165	0	944
83-84	25	205	371	309	214	0	1124
84-85	53	190	413	225	147	0	1028
85-86	46	279	403	363	145	0	1236
86-87	41	220	382	270	106	0	1019
87-88	33	207	302	305	111	0	958
88-89	24	119	216	166	19	0	544
89-90	1	175	423	205	53	0	857
90-91	1	76	169	252	78	0	576
91-92	3	123	309	226	65	0	726

りも多少暖かく、年最低気温も過去2年の -31°C を越えることなく、 -28.9°C に過ぎなかった。最近、地球の温暖化が叫ばれ始めたことから、畜産大学の観測値では $1000(^{\circ}\text{C}\cdot\text{日})$ を切るようになった。

2) 凍上量と凍結深さ、および積算吸水量の変化

A-1からA-5における凍結が開始してから終了するまでの凍上量と凍結深さの経月変化を図6~図10に、および積算吸水量の経月変化を図11~図15に示す。また、表10に過去3年間の最大凍上量の比較を示し、表11に過去3年間の年間積算吸水量の比較を示す。凍結深さの変動は、過去3年間各試験区とも微少な差は見られたが、大差はなかった。また、凍結深度計の構造は最大90cmが限界なため、A-1を除いて正確な最大凍結深さの値を測定することができなかった。

図16と図17に示した、A-1、A-2の試験は、地下水位の高低が凍上量に及ぼす影響を調べるために行った。これによると凍結深さの変動はほとんど同じであるのに対し、凍上量の変化には明白な差があり、高地下水位の方が凍上量が大きかった。また、明らかに吸水量に大きな差があることが図11と図12に示されている。これはより水分供給を容易にすることができる高地下水位のA-2に大きな凍上量が観測された。なお、全般的には凍結深さと凍上量の関係は必ずしも明確ではなかった。

ジオテキスタイル処理状況について、図8と図9におけるA-3とA-4の試験、つまりコスモレベルとサンドフの凍上量の変化は、3年間を通して非常に類似した変化をしている。また、図14におけるA-4の吸水量の変化は、図13におけるA-3の吸水量に比べ、必ずしも小さいとは言えるものではなかった。それにもかかわらず、凍上量が年次的変動を示さなかったのは、目詰まりや閉塞を起すことなくその機能をいかんなく発揮したためと思われる。しかし、室内試験において吸水量は、コスモレベルよりサンドフの方が少なかったのに対し、野外試験では全くその逆の結果が現れた。このことは、試験土が室内試験と野外試験とでは別種類であることから、試験土の物性値の変化によって起ったものと考えられる。さらに、サンドフがマット構造のために水分を自信で保持する働きをしたためと考えられる。1989年冬季の吸水量の大きさは、何らかの漏水ミスが生じたため、現れたものと考えられる。しかし、2年目以降は凍上量に応じた吸水量の変化をした。

ジオテキスタイルと砂利層の複合使用について、図10におけるA-5の凍上量は設置初年度には発揮されなかったが、2年次以降は凍上抑制効果が明白に現れた。また、図15における吸水量も比較的少ない値を示した。これは、砂利層が毛管遮断の効果を発揮し、ジオテキスタイルはこれとの分離機能を示したものと考えられる。しかし、初年度と2年目の凍上量に差があるのは年間積算降水量の違い、あるいは吸水量の違

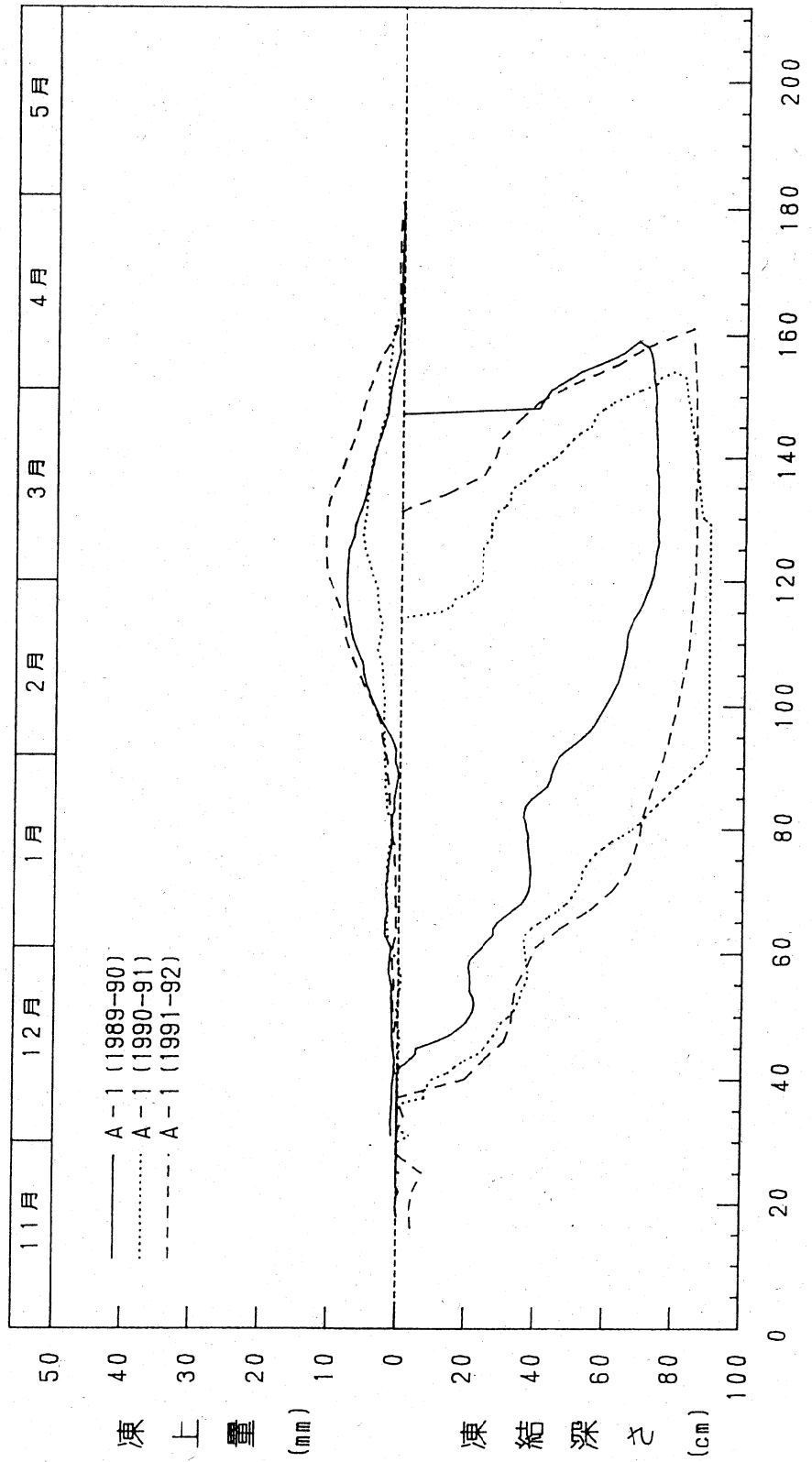


図6 A-1における凍上量と凍結深さの経月変化

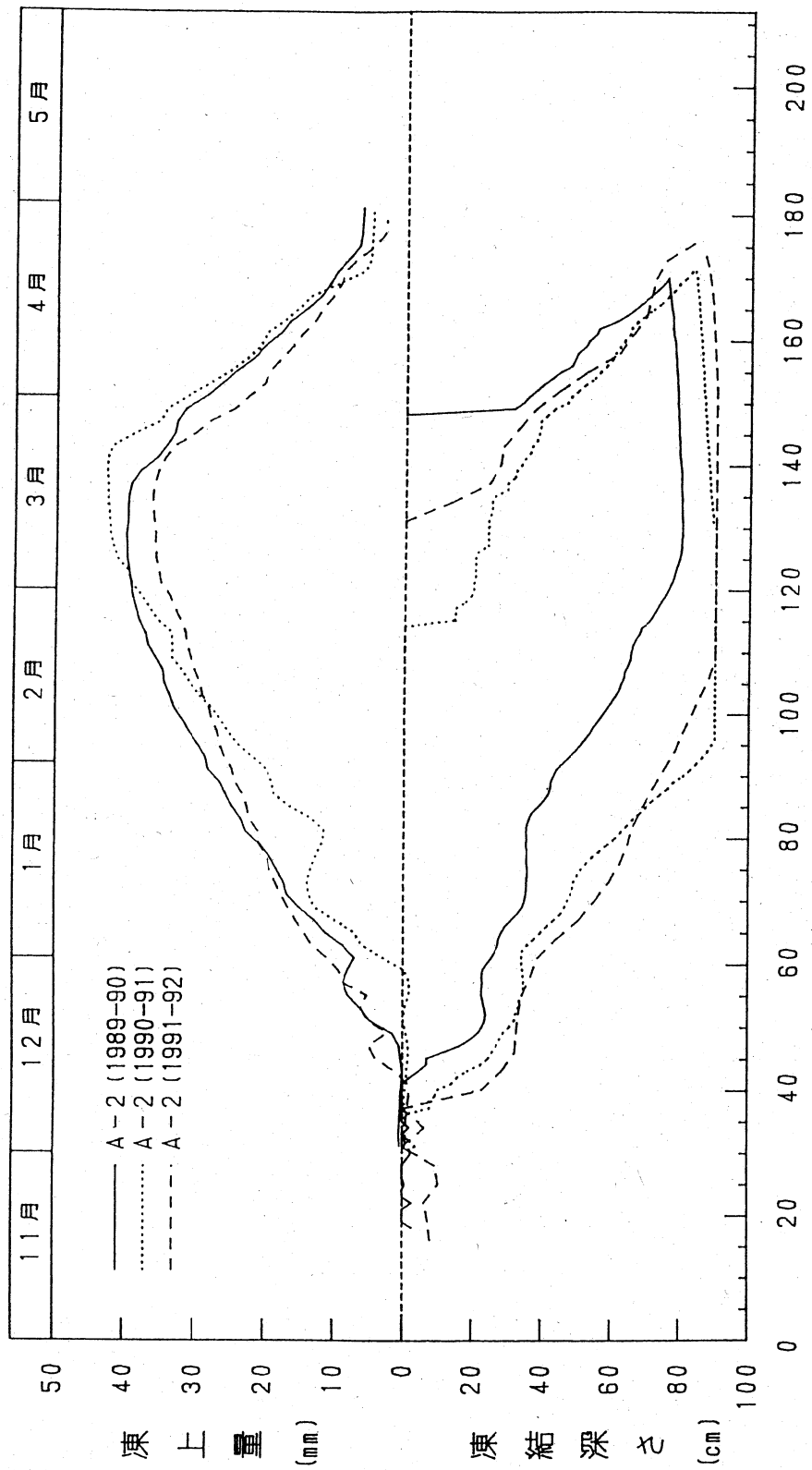


図7 A-2における凍上量と凍結深さの経月変化

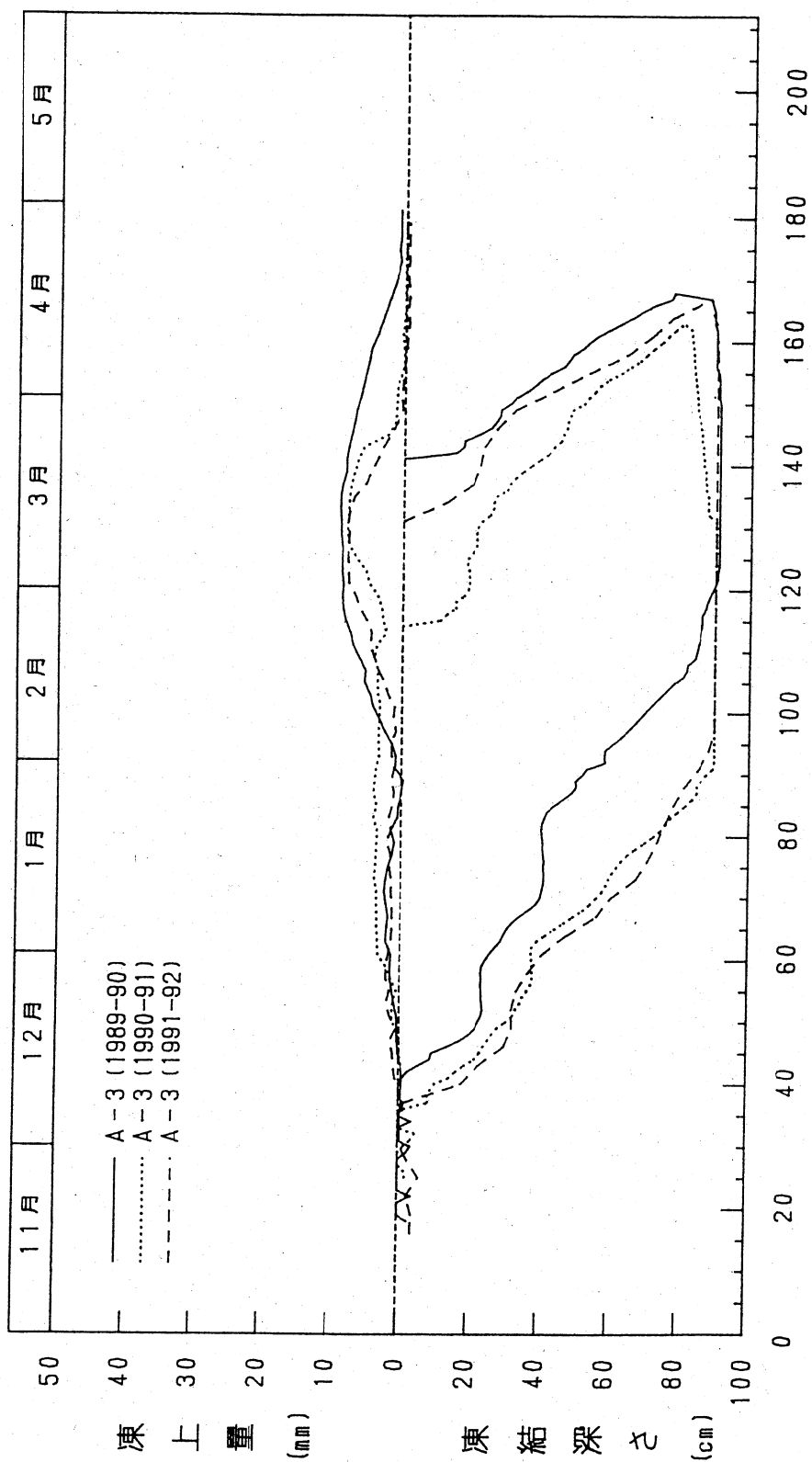


図8 A-3における凍上量と凍結深さの経月変化

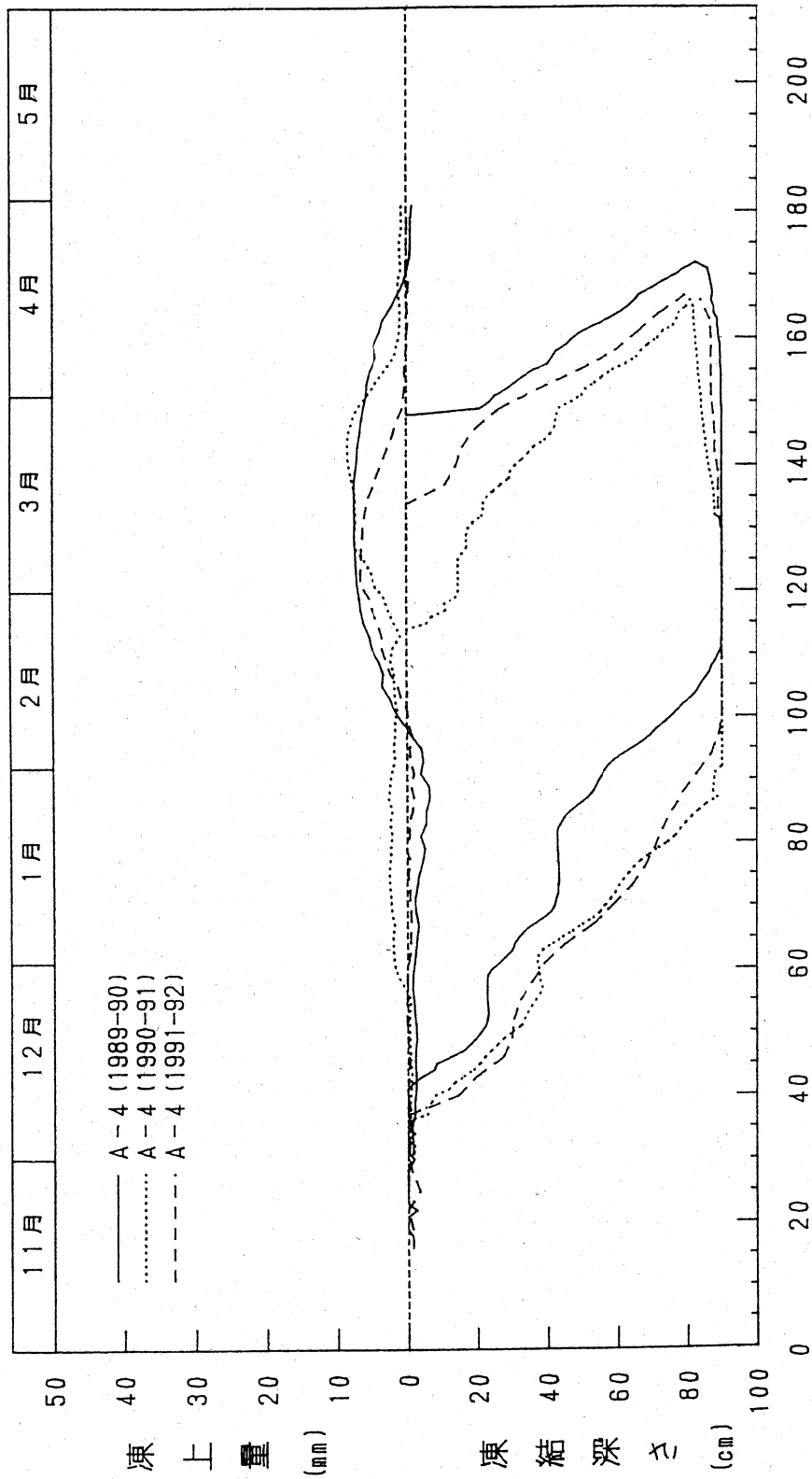


図9 A-4における凍上量と凍結深さの経月変化

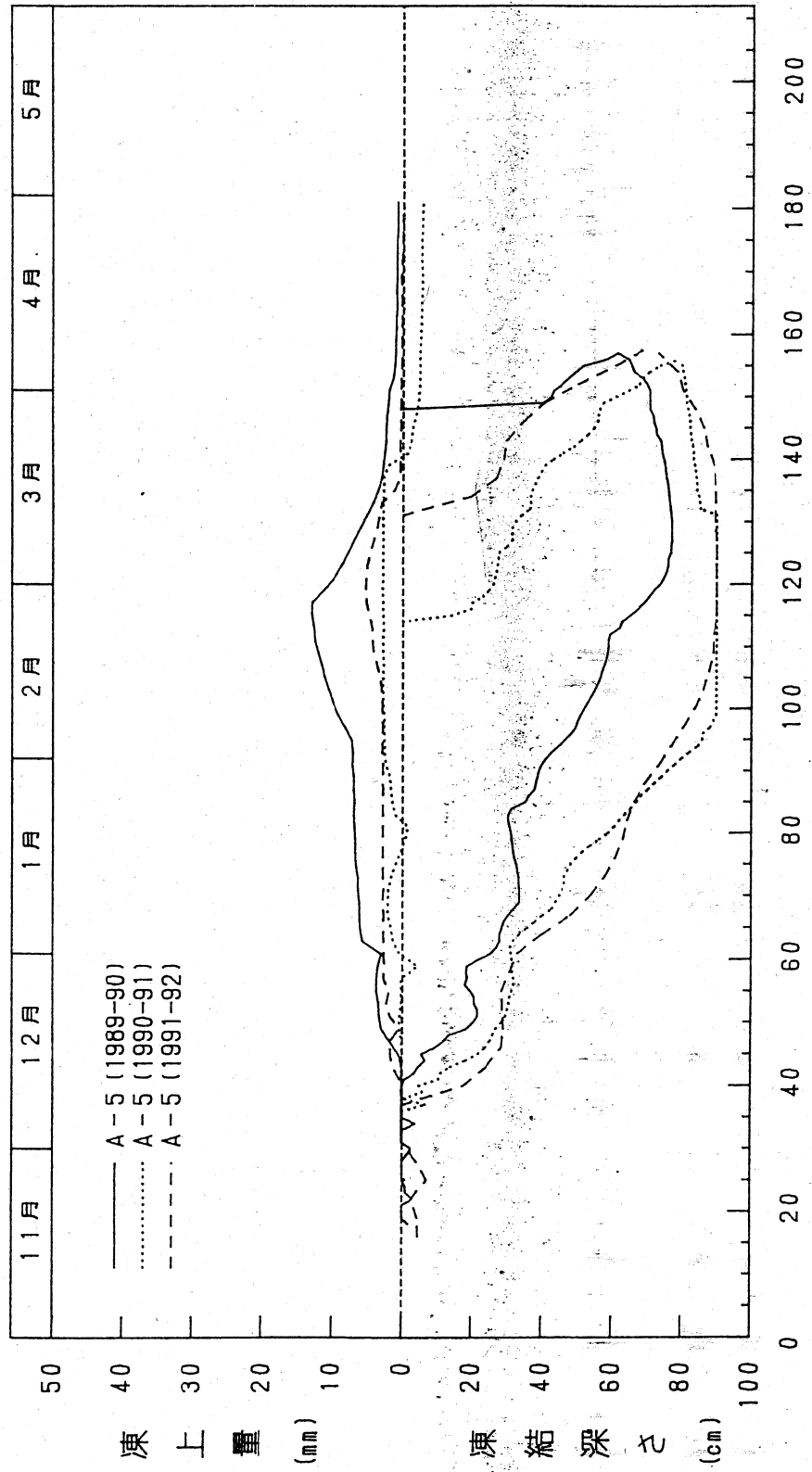


図10 A-5における凍上量と凍結深さの経月変化

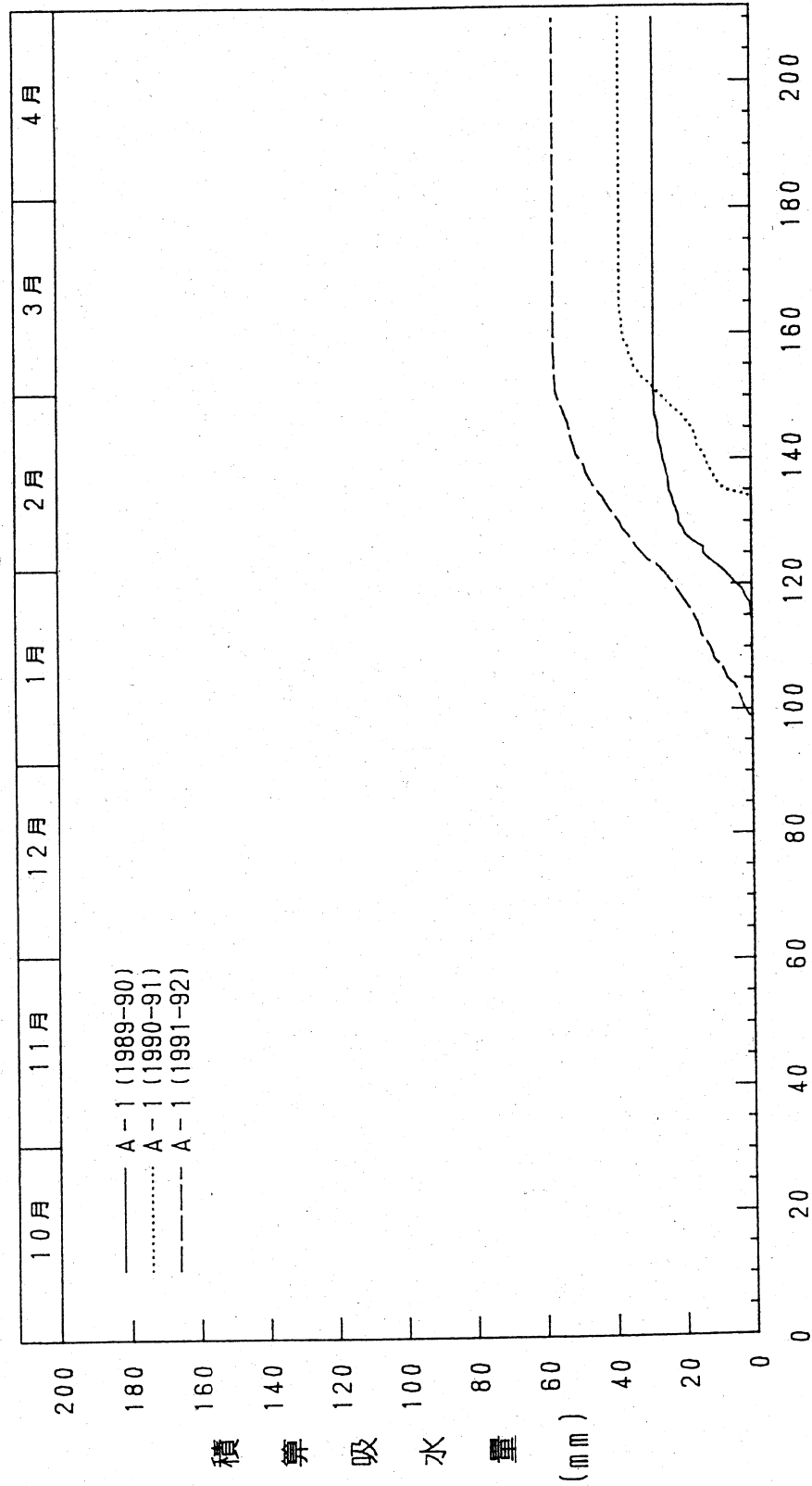


図11 A-1における積算吸水量の経月変化

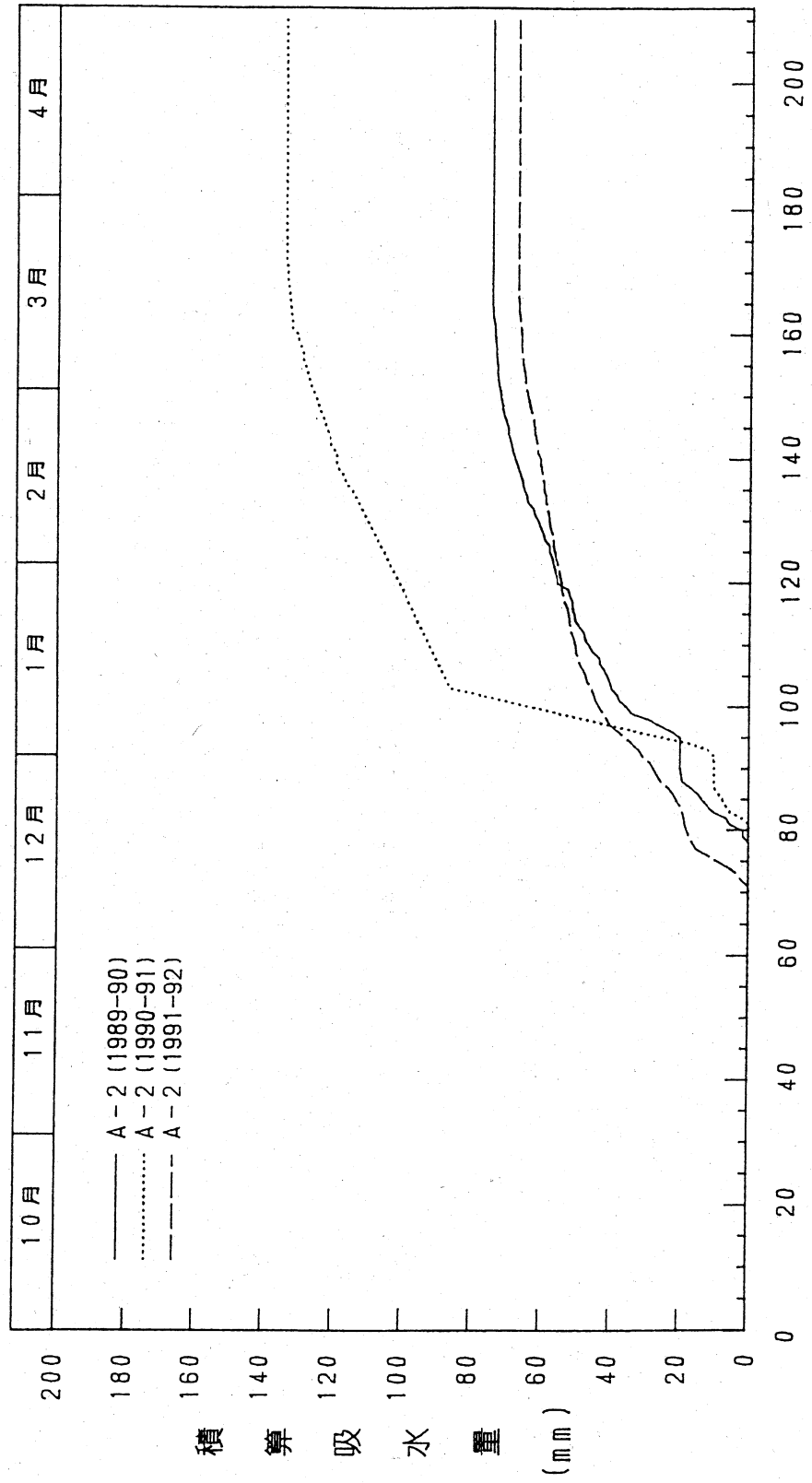


図12 A-2における積算吸水量の経月変化

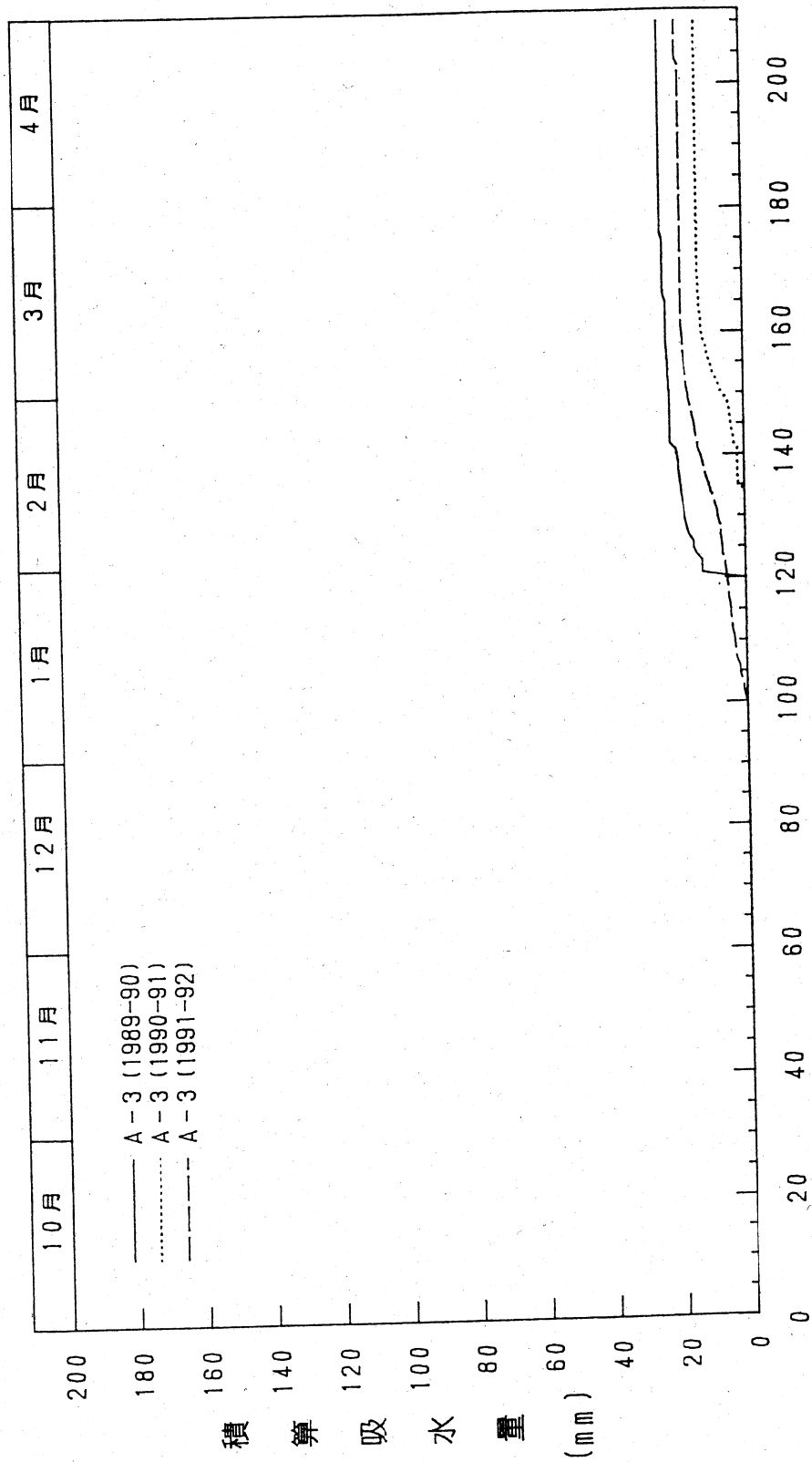


図13 A-3における積算吸水量の経月変化

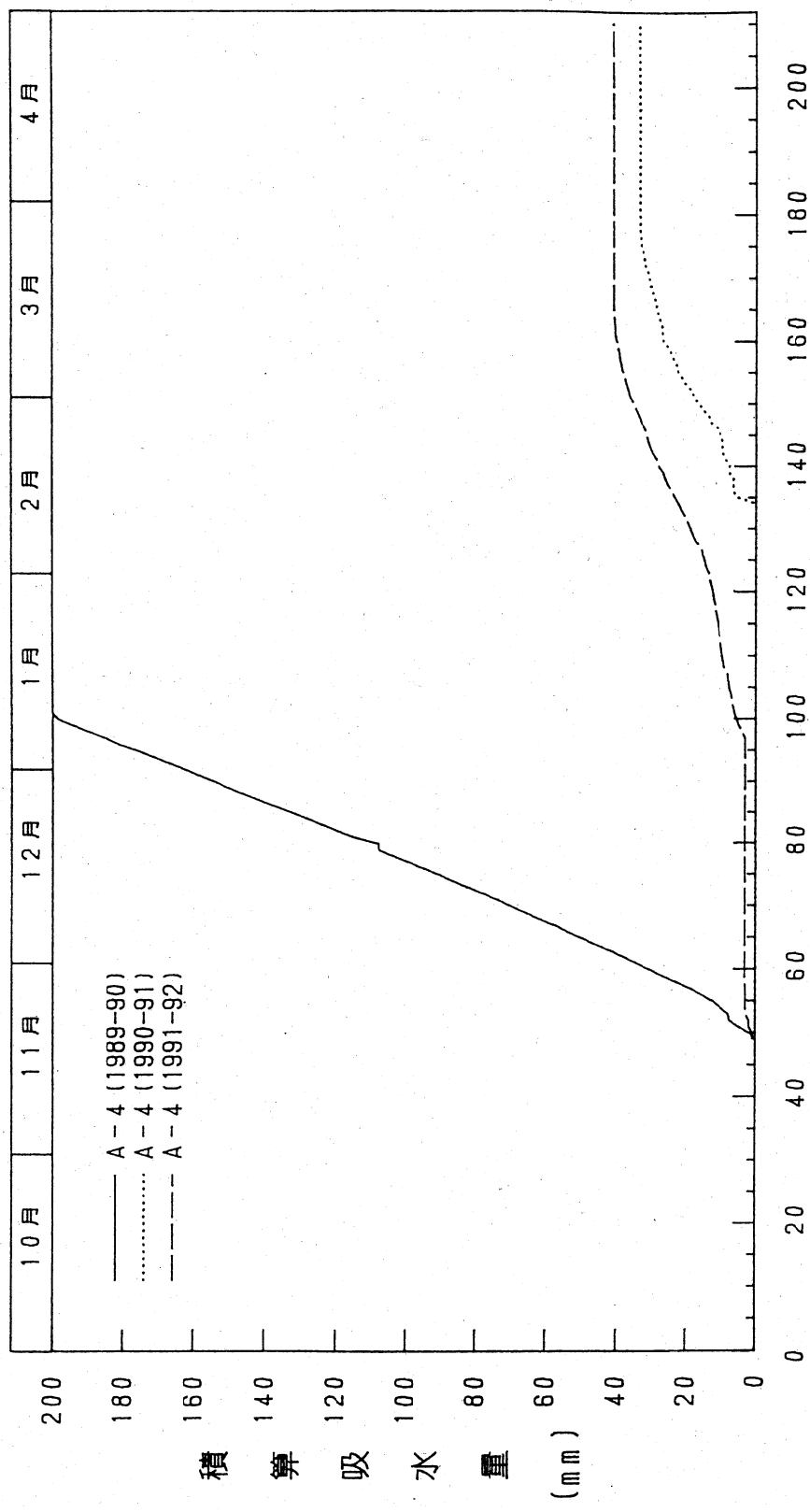


図14 A-4における積算吸水量の経月変化

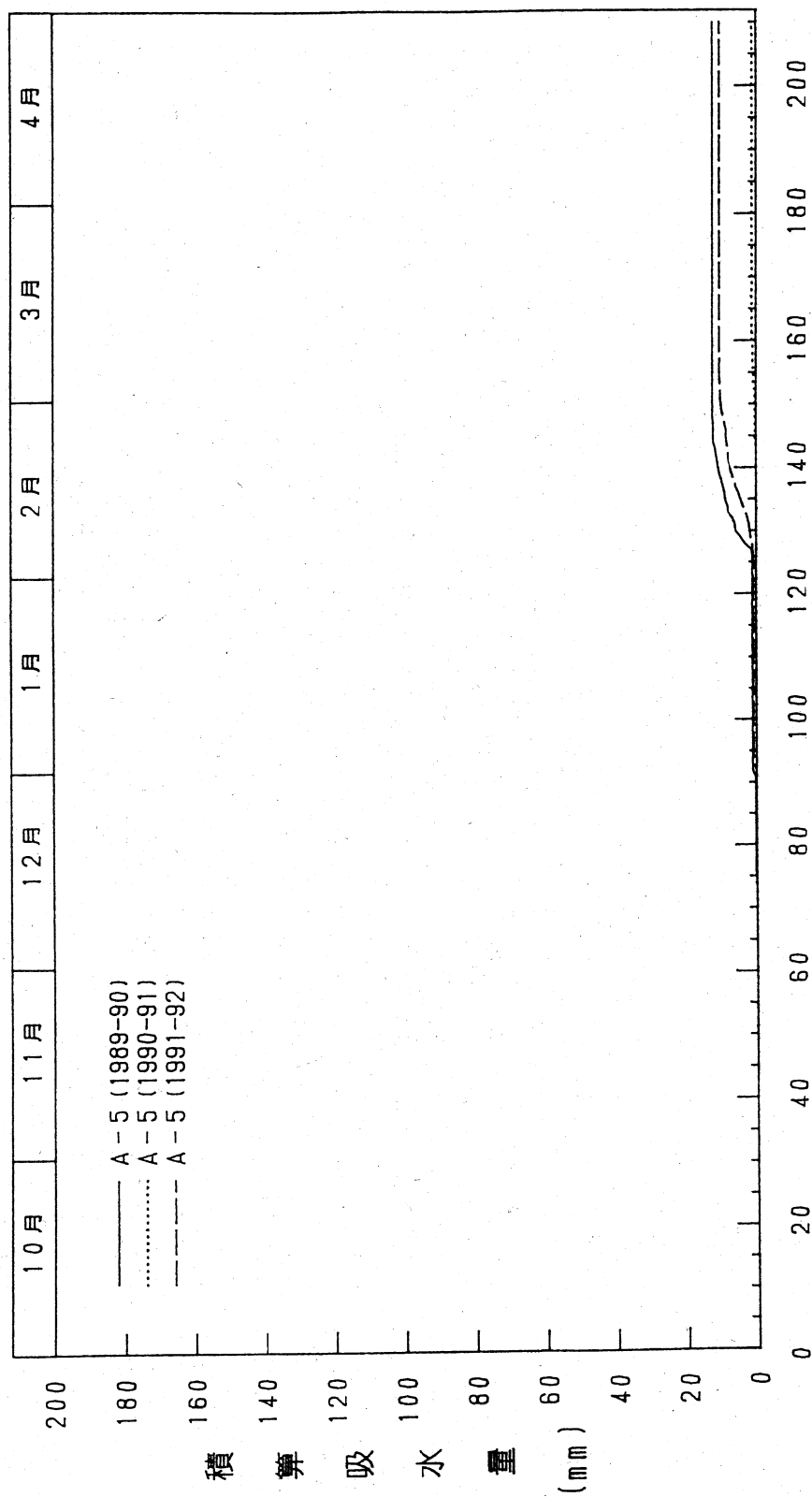


図15 A-5における積算吸水量の経月変化

いによるものであると考えられる。結果的には、ジオテキスタイル単体よりも凍上制御効果が大きくなった。この方法は、道路の路体に利用するのは経済的ではないが、排水溝などの小規模な建造物に適用できると考える。

表10 過去3年間の最大凍上量の比較 (mm)

項 目	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
1989年～1990年	7.9	40.1	9.1	7.6	13.1
1990年～1991年	5.7	43.0	8.2	8.5	2.9
1991年～1992年	11.1	36.4	8.1	6.7	5.3

表11 過去3年間の年間積算吸水量の比較 (mm)

項 目	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
1989年～1990年	28.2	77.1	24.1	546.0	13.9
1990年～1991年	38.0	134.2	13.0	33.6	1.3
1991年～1992年	56.8	57.2	19.1	40.9	10.6

3) 過去3年間の平均吸水量と平均凍上量の変化

図16～図17に過去3年間の平均積算吸水量と平均凍上量の変化を示す。一般に吸水量と凍上量の変化には密接な関係がある。しかし野外試験において、その関係は見いだせなかった。これは試験装置が比較的大きいため、装置に試験土を入れる施工時における条件の不均一性やあるいは測定器のミスカウントが生じたためと思われる。

無処理状況について高地下水位の場合、どの試験区よりも凍上量が多かった。吸水量についても同様のことがいえる。しかし、A-4の吸水量の大きさは、設置初年度における546 mmもの吸水量のために生じたものである。低地下水位の場合、ジオテキスタイルを使用した試験区とその凍上量はさほど変わらなかった。言い換えれば、特に帯広土において地下水位がある程度凍結線から離れば、凍上は制御できるためと思われる。

ジオテキスタイル処理状況について、さほど大きな違いを示していないが、特にサンドフを用いたA-4と砂利層処理のA-5が比較的凍上量が少なかった。これらは、凍上抑制効果が十分に確認できたといえる。

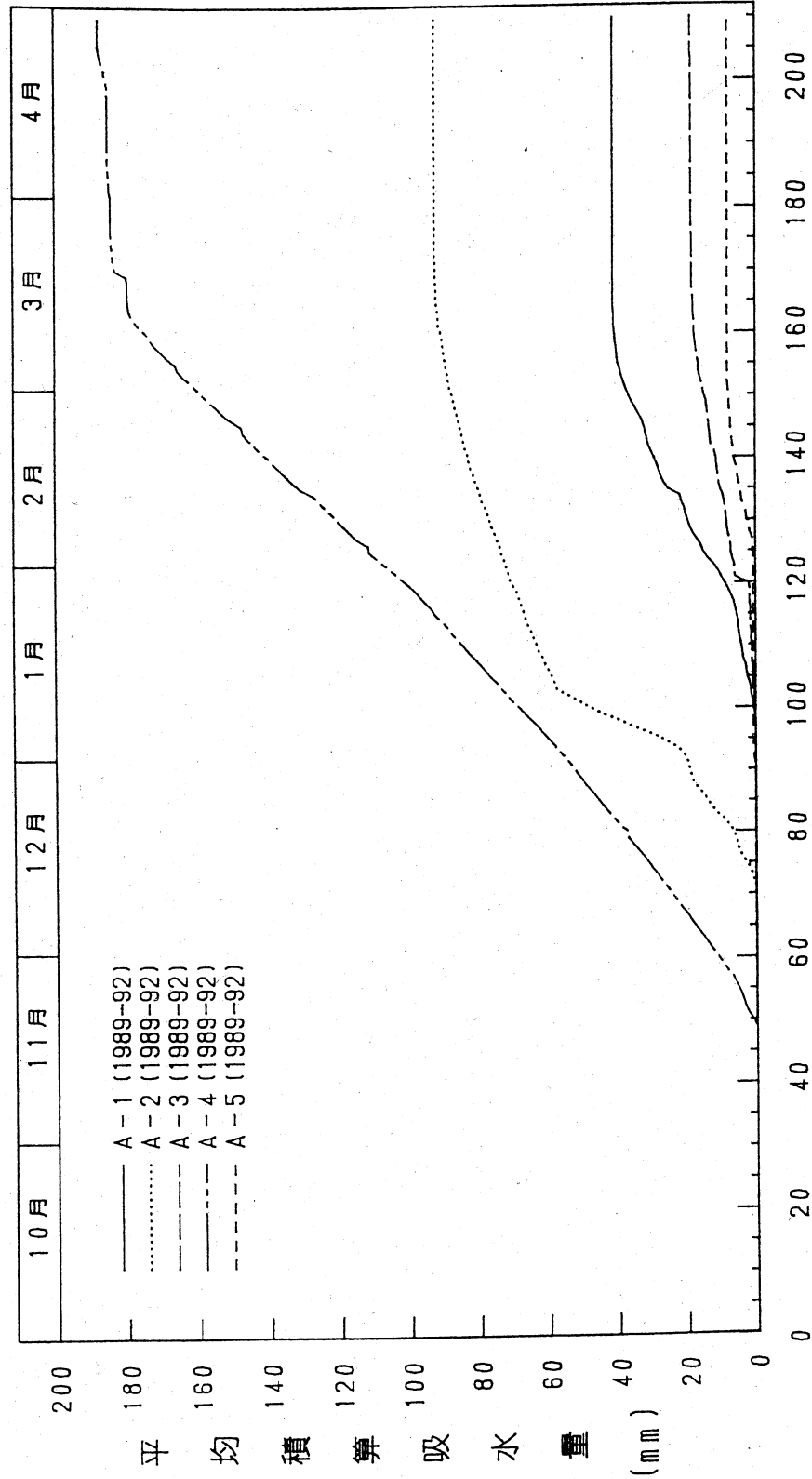


図16 平均積算吸水量の経月変化

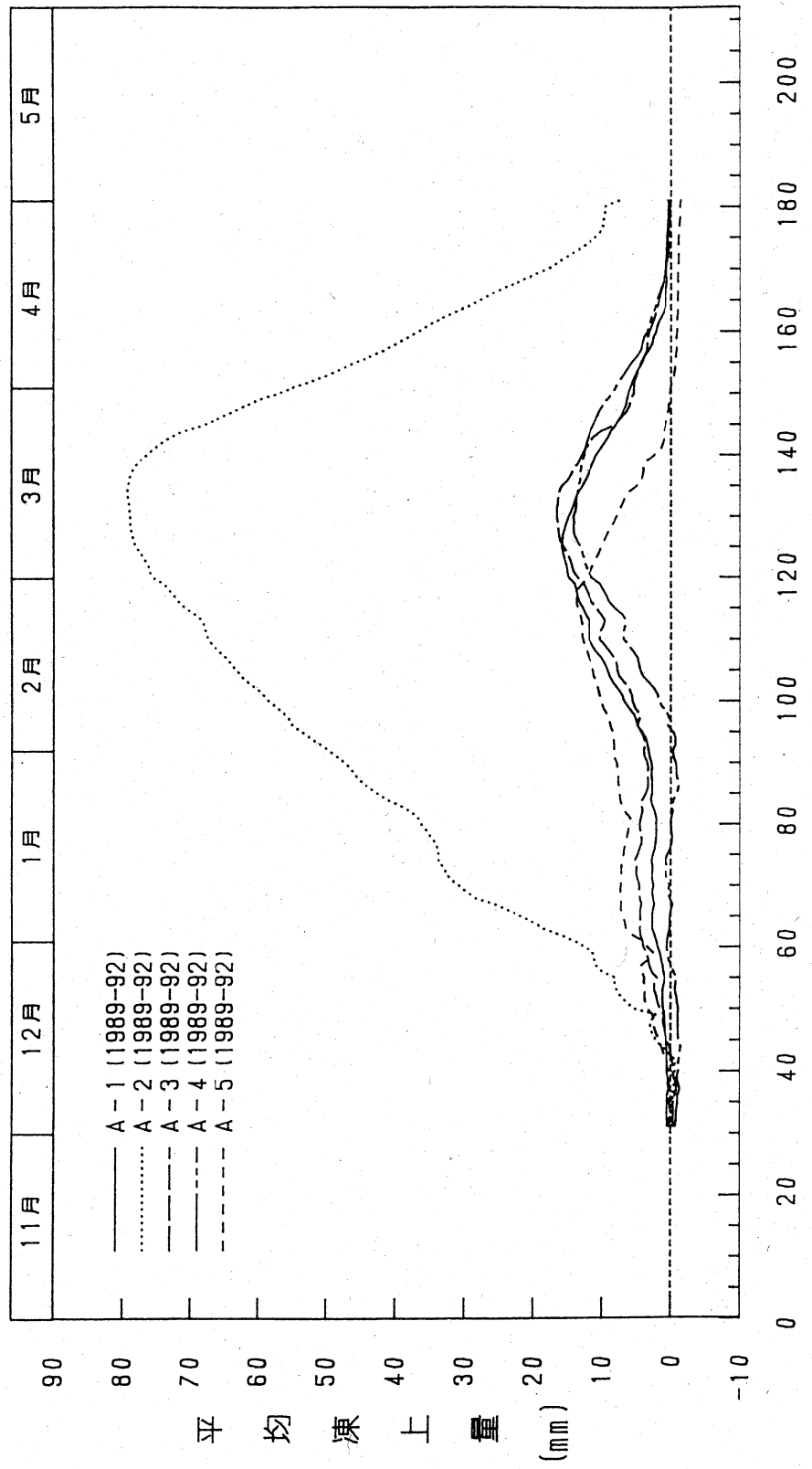


図17 平均凍上量の経月変化

4 まとめ

この試験は1989年11月から1992年4月にかけて行ったものである。凍上対策の一方法として、ジオテキスタイルを使用した場合の複雑な境界条件を持つ野外試験での凍上制御効果について得られた結果を以下に要約する。 無処理の場合、高低における地下水位を比較すると、低地下水位の方が凍上量が小さい。これにより、現地発生土である帯広土を使用した場合、地下水位を低く保ち、言い換えれば、盛土を高くすることによって凍上抑制効果は十分期待できると考える。そしてジオテキスタイルを敷設する遮水工法を行えば、より安定した長期的な凍上抑制効果が期待できると考える。

ジオテキスタイル処理状況について、A-3のコスモレベルとA-4のサンドフは3年間を通して吸水量に差があるにもかかわらず、凍上は十分に抑制され、凍上量の経年変化は少なく、良好な結果が得られた。経年変化による変動は他の処理工法にないほど安定していることも特徴であった。

砂利層処理状況については、他の処理工法にないほど毛管水の遮断に効果が認められた。断面の薄いジオテキスタイルの単体使用は凍上抑制効果がないが、砂利層と併用すると分離材としての凍上抑制効果が認められた。 この試験により、コスモレベルとサンドフの単独使用は3年間を通して十分凍上抑制が認められ、中でもサンドフがもっとも有力であることが判断される。また、この試験に使用したジオテキスタイルは現在、分離、補強、排水などの他の目的として製造されているものが多く、遮水を目的とした構造とは限らない。この点を明確にして毛管遮断効果の大きいジオテキスタイルを決定する指針を早急に明らかにする必要があると考える。

第6章 ジオテキスタイルの遮水効果を検証するための室内試験

1. はじめに

ジオテキスタイル (geotextile) は、本来は地盤の補強や排水を目的とした敷設される透水性繊維材料を意味する。多くのジオテキスタイルは、中砂から細砂の透水性と同様の透水性を持ち、水に対して土よりも密接な関係がないために、凍上を抑制するための毛管遮断効果が期待される。毛管遮断の挙動におけるジオテキスタイルの物理的性質には、透水性と繊維表面性質に加えて、目詰まりや目隠しの抵抗性、しきい圧そして分離能力が含まれる。

土の凍上現象は、重力に逆らって下方から上方に水分が毛管上昇し、凍結線にアイスレンズを形成することによって生じる。したがって、この毛管上昇を遮断することによって凍上は抑制されると考えられる。しかし、ジオテキスタイルの毛管遮断による遮水効果のメカニズムについては、まだ明らかにされていない。そこでどのような構造のジオテキスタイルが遮水効果を発揮するのか、またジオテキスタイルの遮水効果のメカニズムを明らかにするため、毛管上昇の抑制効果の試験と小型化した凍結セルを用いた凍上試験を行った。

2. 試験装置と試験方法

1) 実験試験土

ジオテキスタイルの凍上抑制を明確にするため、帯広畜産大学の圃場内の下層から採取された極めて凍上性および保水性の高い土である火山灰土を用いた。室温で行った毛管上昇試験で使用した試験試料も同じ火山灰土を用いた。ジオテキスタイルを用いた凍上抑制試験の結果から、凍上性の火山灰土を用いた方が、ジオテキスタイルの毛管遮断効果が容易に確認できると考えたからである。

また、水分張力試験では、北海道横断自動車・清水—池田線の建設工事予定地付近の音更町長流枝内（おさるしない）で採取された比較的保水性の低い砂質土を「帯広土」と呼び、採用した。これらの試験土の物理的性質を表1に示す。

表1 試験土の物理的性質

性 質	畜大火山灰土	帯広砂質土
比 重	2.633	2.590
砂 分 (%)	43.0	92.0
シルト分 (%)	45.0	6.0
粘土分 (%)	12.0	2.0
乾燥密度 (t/m ³)	1.230	1.569
間 隙 率 (%)	53.3	39.4
飽和透水係数 (cm/s)	8.8×10^{-5}	5.5×10^{-4}

2) 使用ジオテキスタイル

試験で使用したジオテキスタイルの種類と特徴を次に示す。

① テクトン (蝶理㈱製造)

テクトンは、ポリプロピレンが原料の熱圧着タイプのспанポンド不織布である。重さは100g/m²、厚さは0.38mmで、主な用途は土層分離や法面の侵食防止である。単価は約240円/m²である。

② サンドフ SIOG (前田工織製造)

サンドフは、原料にポリエステル繊維を用い、樹脂で接着成層したマット構造の不織布である。重さは400g/m²、厚さは10.0mmで、主な用途は土砂の吸い出し防止、洗掘防止および目詰まり防止である。単価は約600円/m²である。

③ コスモレベル (東洋紡製造)

コスモレベルは、ポリエステル繊維による厚みのある三重構造シートであり、比較的密な表層と裏層の中間に、繊維密度が粗い空隙層を有し、重さは570g/m²、厚さは7.5±0.5mmで、主な用途は地下水面からの毛管水の遮断である。単価は約1200円/m²である。

3. 試験装置

1) 毛管上昇試験

毛管上昇試験の試験装置を図1に示す。試験土をつめた円筒容器はアクリルパイプを使い、寸法は、内径122mm、高さ400mmであり、そのモデルも同じく1に示す。試料の流出を防ぐためと水槽から水分を吸収できるように、下部多孔性の底蓋を設けた。高温水槽は、水温を一定にするために用いた。

2) 室内凍上試験

室内凍上試験装置のモデルを図2に示す。室温を一定にする断熱低温庫を用いた。図2のように断熱低温庫には、凍結セル内に詰めた供試体とともに、冷媒槽（高温用と低温用）、凍上量測定のための変位計を設置した。断熱低温庫は外周温度変化を少なくするはめに使用したもので、一般の冷凍庫の同様の機能をもち、 $+4^{\circ}\text{C}\pm 1$ で熱の侵入を少なくする。断熱低温庫の外部には、供試体の両端の温度を一定にするための電子恒温循環装置を2台設置し、1台は高温（ $+4^{\circ}\text{C}$ ）用冷媒槽に、もう1台は低温（ -6°C ）用冷媒槽にそれぞれ接続した。そして、各冷媒槽から所定の温度の液体が供試体の上端と下端の冷媒装置に循環され、温度は一定に保たれた。凍上が発生しやすくするために給水源となるピュレットを設置した。そして、各センサーから得られる値はコンピュータによって自動的に記録した。測定項目として、温度、凍上量、および供試体下部からの給水量である。

以下に、各部の使用および特徴を詳細に示す。

A. 断熱低温庫

大型冷蔵庫を断熱低温庫として用いた。この冷蔵庫のユニットの仕様は次の通りである。圧縮機は、完全密閉式で往復動式である。また、伝動機は750Wのものを1基使用し、電源電圧は3相200Vを使用した。冷媒はR-12（ジクロロ・ジフオルタン）を用いた。冷却器はフィン・アンド・チューブ型で強制空冷式凝縮機はフィン・アンド・チューブ型で強制通風式である。

B. 電子恒温循環機

供試体上端及び下端を一定温度に保つために、小松エレクトロニクス(株)の電子恒温循環機をそれぞれの冷媒層に接続した。供試体上盤の低温部及び底盤の高温部には、それぞれ電源制御部と熱交換部が一体型の型式 CTE-42Wを使用した。その仕様は次の通りである。温度設定範囲は $-10\sim+70^{\circ}\text{C}$ 、温度制御方式はマイクロコンピュータによる P.I.D制御、放熱方式は水冷式及び自己診断機能

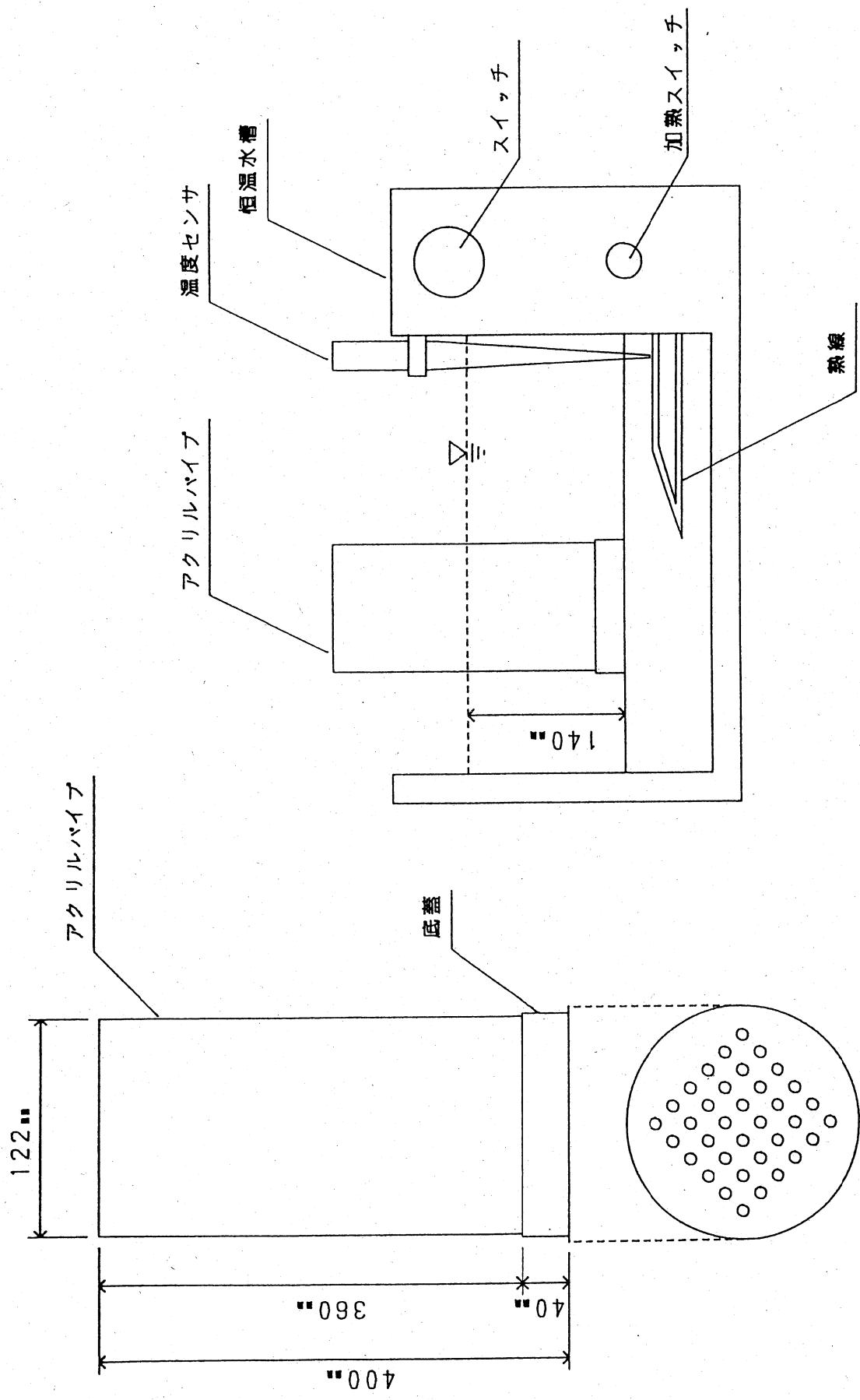
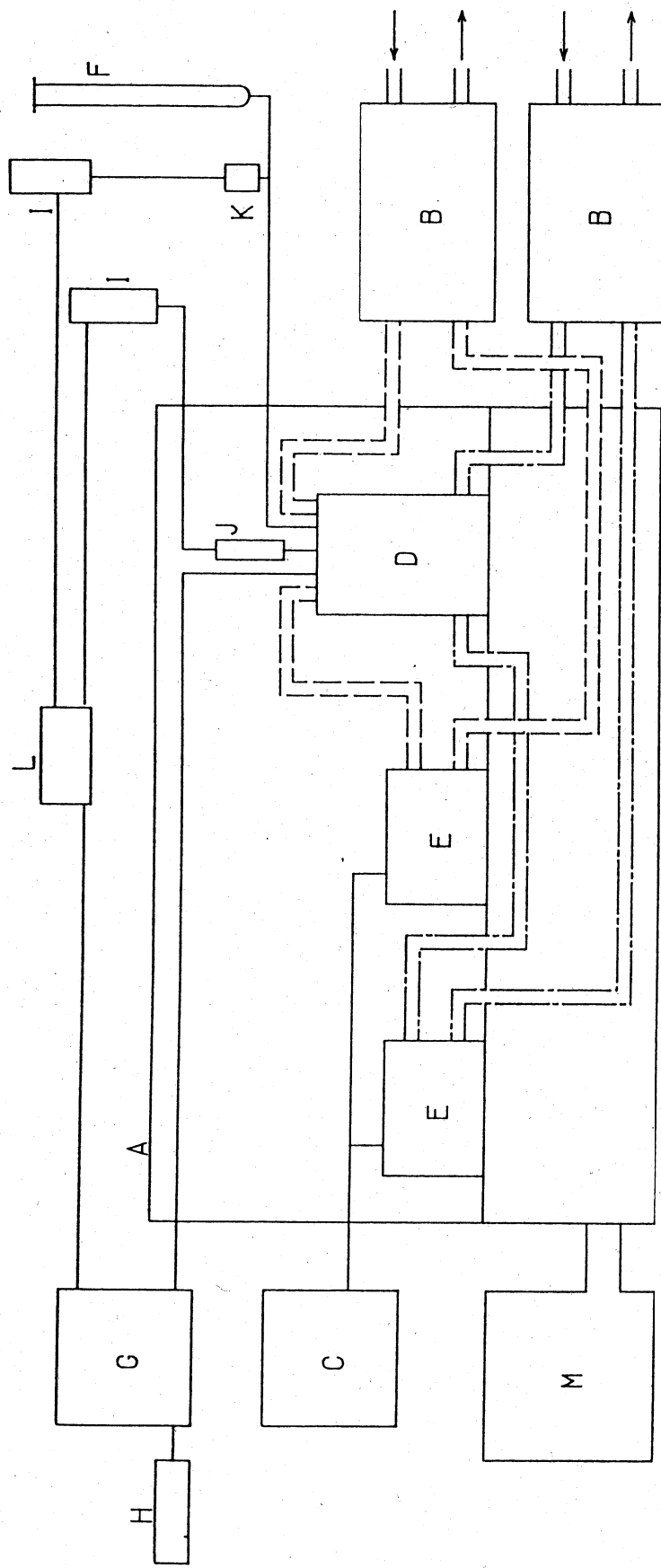


図1 毛管上昇試験における実験装置モデル図



A 断熱恒温室 B 電子恒温循環器 C 高速打点記録計 D 凍結セル E 冷媒槽 F ヒュレット
 G コンピュータ H プリンター I ひずみ測定器 J 変位計 K 小型圧力変換器
 L デジタルマルチ温度計 M 冷凍機

図2 室内凍上試験における実験装置モデル図

を備えている。冷媒の温度制御は断熱低温庫内の冷媒槽に設置した白金抵抗体からの温度情報で行われた。循環機の外形寸法は幅295mm、奥行き400mm、高さ360mmであり、重量は21.1kgである。

C. 凍結セル

凍結セル装置は、本来、融解土の圧密を研究するためにRoggensack(1977)によって設計された装置である。その後、凍上システム内の凍土を研究する目的でHill(1977)によって改良されものに、多少修正を加えている。凍結セルのモデルは図3に示す。セルは断熱効果の高い塩化ビニールであり、その内側は摩擦抵抗の低いテフロンによって供試体と接している。この試験では供試体との接触側面に、試験後の観察の容易のために白色ワセリンを均一に塗布した。セル内側のほかの部分およびロードアームには、さらに摩擦抵抗を低くするためにシリコングリースを塗布した。

D. サーミスタ

株式会社テクノ・セブンの温度センサSZL-64が使用された。使用素子はSSB型ビートサーミスタであり、株式会社テクノ・セブンによるとサーミスタ抵抗型は $T = 341 \cdot \Omega^{-0.0876} (K)$ となっているが、(K)とは絶対温度のことである。より正確な温度測定を行うために、7個のサーミスタはそれぞれが検定された。また、サーミスタ検定における正確な温度測定のために、株式会社テクノ・セブンの温度トレーサD641が使用された。分解能は1/100℃である。サーミスタの温度の温度検定結果を表2に示す。ただし、式は $T = a \cdot \Omega^{-b} + 273.15$ であり、

表2 サーミスタの温度検定結果

サーミスタNo.	変換式における係数	
	a	b
No.1	335.937	0.08310
No.2	335.528	0.08286
No.3	335.689	0.08260
No.4	335.676	0.08221
No.5	335.868	0.08267
No.6	336.060	0.08280
No.7	336.066	0.08285

Tは温度(℃)を表し、 Ω は抵抗値(Ω)を表している。

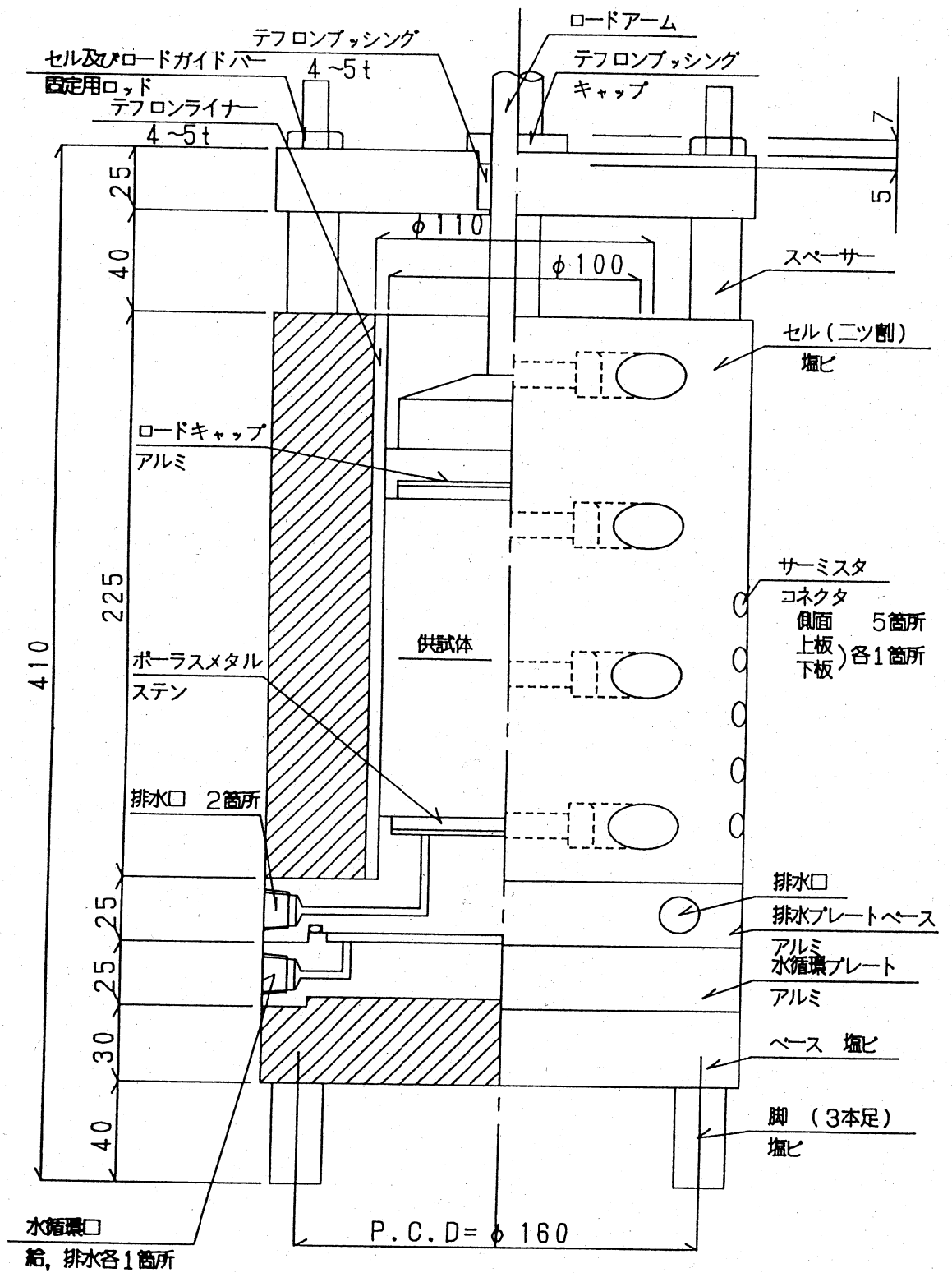


図3 凍結セル装置におけるモデル図

E. 冷媒槽

冷媒槽は、電子恒温循環器からの循環液を一時適に貯水する容器であり、いずれも高温用及び低温用の2種類を低温庫内に設置した。容器の材質は塩化ビニール製で容積が1リットルの冷媒容器である。冷媒には、エチレングリコールが使用された。

F. ビューレット

容積100mリットルのビューレットを使用した。下方を二方向に分けて、一方は凍結セルに接続した。他方は小型圧力変換器が取り付けられ、水位の変化を圧力で検知するひずみ変換をシグナルコンデンショナーと呼ばれる変換器を介して、コンピュータに吸水量をとして測定される。

G. 小型圧力変換器

圧力変換器には(株)共和電業のPGM-C型を使用した。交換素子は、はく(箔)を用いたひずみゲージであり、出力電圧感度は $1\text{ mV/V} \pm 20\%$ 以内である。

H. 変位計

新興通信工業(株)の作動トランス形式ID-3570を使用した。定格変位は $\pm 100\text{ mm}$ であり、分解能は $1/100\text{ mm}$ である。凍結セルの上盤からの変位は、ひずみ測定器を介して電子式デジタル自動記録計に凍上量として測定される。1 cm当りの電圧は 0.1 V に調整した。

I. ひずみ測定器

吸水測定側には、(株)共和電業の型式CDA-110Aを使用した。最大感度は 300×10^{-6} である。ひずみ入力において、 $5\text{ K}\Omega$ 以上の負荷で 1 V 以上、 30Ω 負荷で 8 mA 以上である。外形寸法は幅 49 mm 、奥行き 263 mm 、高さ 142 mm であり、重量は 1.7 Kg である。凍上量測定側には、ミネベア(株)新興事業部の型式DSA-603を使用した。最大感度は 100×10^{-6} ひずみ入力において、 $1\text{ K}\Omega$ 以上の負荷で 1 V 以上、 30Ω 負荷で 3 mA 以上である。外形寸法は幅 42 mm 、奥行き 162.5 mm 、高さ 176 mm であり、重量は 1.2 Kg である。

J. デジタル・マルチ温度計

株式会社アドバンテストの型式TR2114が使用された。直流電圧、抵抗及び温

度（熱電対、測温抵抗体）を測定し、それぞれの測定分解能は $1\mu\text{V}$ 、 $10\text{m}\Omega$ 、 0.1°C である。温度の測定範囲は、 $-270\sim+1820^\circ\text{C}$ である。外形寸法は幅 190mm 、奥行き 260mm 、高さ 70mm であり、重量は 2kg である。

K. コンピュータおよびプリンター

富士通のコンピュータ FM 16 β FDII を使用した。また、プリンターは富士通 MB 27410Aを使用し、CRTには富士通 MB 27331を使用した。

3) 水分張力試験

凍結セルは図4に示す。試料を入れるセルには、内径 150mm 、高さ 475mm の円筒型アクリル容器を使用した。アクリル側壁には、水分張力を測定するために設定した、テンシオカップ用の特殊挿入口が5個制作され、反対側のアクリル側壁には7個のサーミスタ挿入口を制作した。

水分張力の測定には、(株)大起理化工業のテンシオメータを使用した。そのモデルは図5に示す。多孔質の素焼きカップとアンプ内臓の圧力変換器からなるセンサーを、それぞれ5個使用した。カップの大きさは、直径 6mm 、長さ 20mm で、エアールを持つ液溜に連結され、その負圧を圧力センサーが感知する仕組みである。土中の水分が減少すると、液溜亡いの不凍液がテンシオカップを通じて土中に吸引される。このため負圧が発生して、水分張力に換算される。反対に、土中の水分が飽和に近づくと、液溜に液体の圧力がかかり、圧力センサーに正圧を生じさせる。

凍結システムは先に示した室内凍上試験と同一である。

4. 試験方法

1) 毛管上昇試験

この試験には畜大火山灰土の1種類を用い、ジオテキスタイルは、テクトン、サンドフ、コスモレベルをそれぞれ単体で用いた。使用したジオテキスタイルの種類とジオテキスタイルの厚さ、および供試体の乾燥密度を表3に示す。

供試体の寸法は、直径 120mm 、高さ 200mm とし、試料土を一定の密度で円筒容器に充填した。ジオテキスタイルは供試体の底部から 100mm の位置に敷設した。水頭高は、 140mm の位置に設定し、水槽の水温は 15°C に設定した。以下に試験手順を箇条書にする。

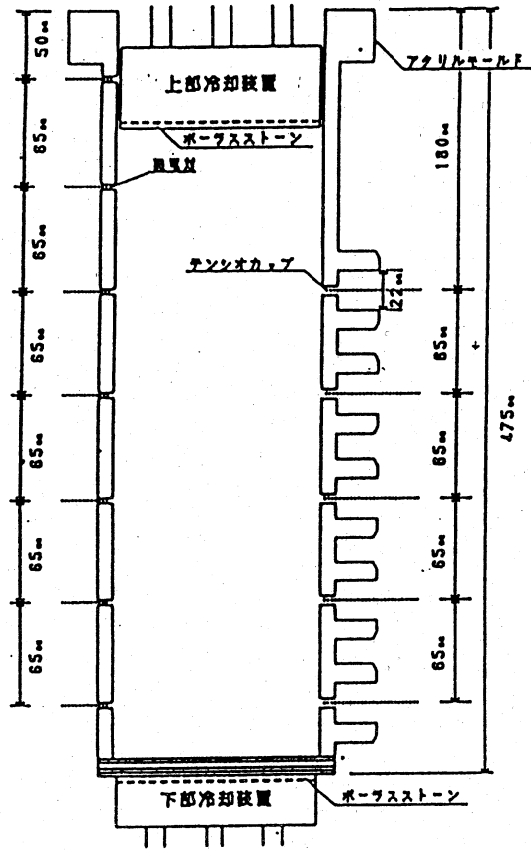


図4 アクリル製凍結セルの構造

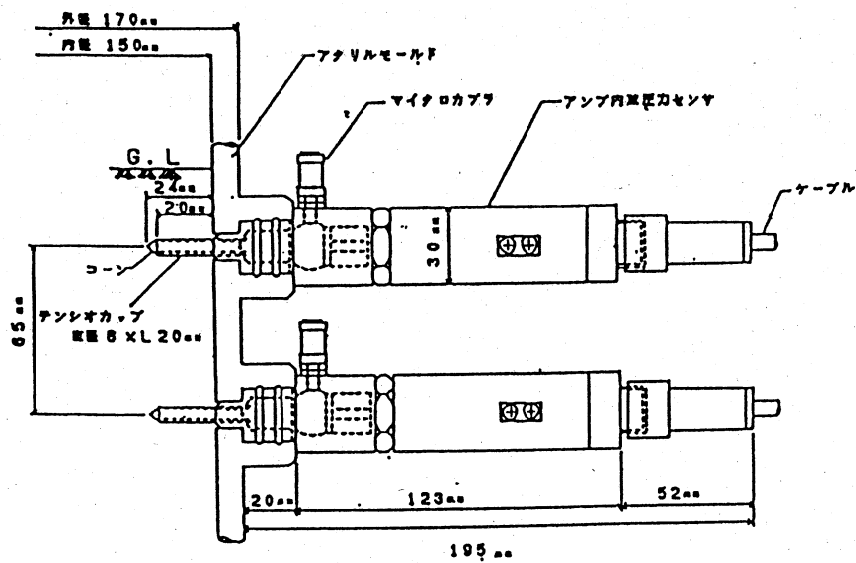


図5 水分張力計 (テンシオメータ) のモデル図

表3 ジオテキスタイル種類と供試体の乾燥密度

ジオテキスタイル	厚さ(mm)	乾燥密度(g/m ³)
ジオテキスタイルなし	-----	1.048
テクトン	0.038	1.047
サンドフ	10.00	1.044
コスモレベル	7.750	1.044

- 1) 試料を風乾燥させた後、2mmフルイを通過させ、1.05g/cm³の所定の密度で円筒容器に突き固める。
- 2) ジオテキスタイルを敷設する場合は、底部から100mmの位置にする。
- 3) 供試体の乾燥重量を測定する。
- 4) 水頭高140mm、水温15℃に設定した高温水槽に供試体を入れ、毛管上昇速度を測定する。
- 5) 水が頂部に達した時点で試験を終了し、供試体の湿潤重量を測定する。
- 6) 供試体の含水比を20mm間隔で測定する。

毛管速度の測定方法は、まず円筒容器に10mm、30mm、50mm、70mm、100mm、150mm、200mmごと各位置の円周上におのおの8つの観測点の印を付ける。そして、浸潤線の位置を毛管上昇線とする。そして、かならずしも毛管上昇面は水平になるとは限らないので、各高さでこの毛管上昇線が8つの観測点の平均値に達した時を、その上昇点の高さと考えその時点の時間を測定値とした。

(2) 室内凍上試験

凍上試験には、水を供給する開放システムと水を供給しない閉鎖システムとに分かれる。この試験では吸水量と凍上量の関係を調べる点から、前者が採用された。ジオテキスタイルは、テクトン、サンドフ、コスモレベルをそれぞれ単体で用いた。同種試料は必要個数だけ突固められた後、密度及び含水比の変化を極力避けるためにそれぞれビニール袋に入れ、断熱低温室内に保存した。そして、上端に-6℃を、下端に+4℃の一定温度に保っていた冷媒と直結し上部から凍結をさせた。これらの試験手順を以下に箇条書で示す。

- 1) 試料土を風乾燥した後、2mmフルイを通過させ、最適含水比の約28.7%に調整する。
- 2) ランマーによってモールド（内径100mm、高さ126.8mm）を3層に分けて充填する。ジオテキスタイルを用いる場合は、予想凍結線より直下の位置（1層目）にジオテキスタイルを敷設する。
- 3) 供試体を凍結セルに入れ、24時間断熱低温室で飽和および平衡水分状態、一定温度になるように下端の吸水口から水を十分、吸水する。
- 4) 吸水後、変位計を取り付け、上端部 -6°C 、下端部 $+4^{\circ}\text{C}$ の一定温度になるように冷却盤と冷媒槽をパイプで接続し、凍結を開始する。
- 5) 約90時間を目安に凍結を終了する。
- 6) 凍結時における測定値は、すべてコンピュータによって測定される。
- 7) 試験終了後供試体の凍結状況を観察および測定し、写真撮影する。
- 8) 含水比を供試体長の9等分間隔で測定する。

冷却期間中における供試体の温度状況、吸水量、凍上量の測定及び記録方法を次に示す。

A. 供試体の温度の測定

図3に示したように、凍結セルの側面に5カ所、上盤と底盤に各1カ所の合計7カ所にサーミスタを設置した。サーミスタの測定値は抵抗値のままのデジタル・マルチ温度計を介してコンピュータに入り、コンピュータ内で抵抗値は温度に変換しCRT、プリンター及びフロッピーに表示、記録した。この測定は30分毎に自動的に行う。

B. 吸水量の測定

ビューレットの水位は小型圧力変換器、ひずみ測定器、デジタル・マルチ温度計を介して、電圧値として供試体の温度と同時にコンピュータによって表示、記録した。また、デジタル・マルチ温度計から高速打点記録計によってチャート紙に常時記録した。

C. 凍上量の測定

凍結セルの上盤からの変位は、変位計、動ひずみ測定器、デジタル・マルチ温度計を介して、電圧値として供試体の温度と同時にコンピュータに表示、記

録した。また、デジタル・マルチ温度計から高速打点記録計によってチャート紙に常時記録した。

(3) 凍結水分張力試験

この実験には、帯広土のみを使用した。ジオテキスタイルは、テクトン、サンドフ、コスモレベル、パブリックドレーンをそれぞれ単体で使用し、各供試体は、乾燥密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ になるように充填した。供試土全体が下端の $+4^\circ\text{C}$ の一定温度になるまで放置し、その後上端温度 -6°C で凍結を開始した。ジオテキスタイルの挿入位置は、セル下端から 200mm の深さとし、下方からの吸水位置は、実験装置の構造上、セルの下端から 380mm の位置に設定した。

5. 試験結果と考察

1) 毛管上昇試験による遮断性

毛管上昇速度の試験結果を、図6に示す。浸潤線が土柱頂部に達する時間がジオテキスタイルを使用しない畜大火山灰土のみの場合では、約4時間であつた。そして、テクトンが約6時間、また、サンドフが約31時間、コスモレベルを使用した場合は約44時間で極めて遅かつた。このように、畜大火山灰土における毛管上昇による浸潤線速度は、ジオテキスタイルの種類によって大きな違いが見られた。

次に、畜大火山灰土の浸潤線が頂部に達した各供試体の含水比分布を、図7に示す。これによると、ジオテキスタイルの下方の含水比分布と上部の含水比分布では大きな違いが見られ、その違いはジオテキスタイルの種類による差異が顕著に見られた。特に、コスモレベルおよびサンドフは著しく上層の含水比が低下する傾向にあつた。しかし、ジオテキスタイル下層では、その差は見られなかつた。したがって、コスモレベルのようなポリエステル繊維からなる三重シート構造は、中間に空気層を持つため、遮水効果が大きいと判断される。他方、サンドフのような樹脂で接着成層したマット構造は、多孔で比較的大きな間隙を持ち、これらが遮水効果を持つということも判断される。

また、含水量という点からみると、毛管上昇速度と含水比分布には関連性が見られ、コスモレベルが最も毛管遮断がみられ、サンドフもかなりの遮水効果が期待できることが分かる。

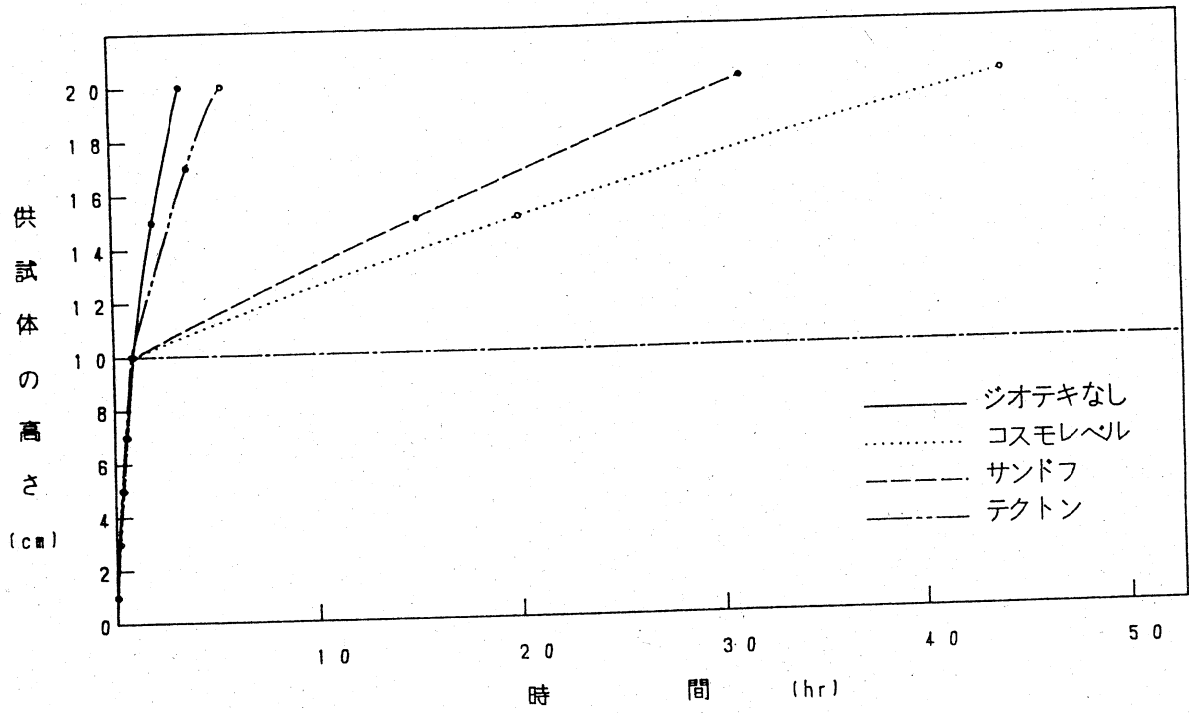


図6 各種ジオテキスタイルを挿入した供試体の毛管上昇速度

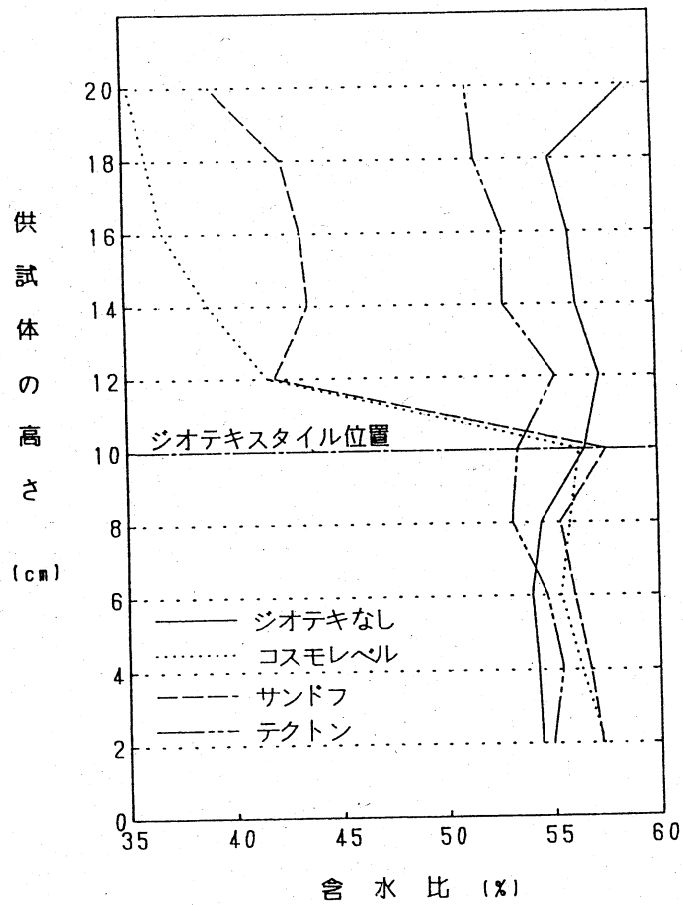


図7 各供試体の毛管上昇後の含水比分布

この試験は、ジオテキスタイル直下に地下水位がくる上限時を設定したものであり、かなり地下水位を高くしていることがわかる。よって、地下水位を高くした場合、保水性の高い凍上性の土におけるコスモレベルとサンドフに関しては、ジオテキスタイルの透水性に関する「しきい圧」がジオテキスタイルの透水性に対する水圧を上回り、遮水効果が十分発揮できると考えられる。したがって、毛管遮断効果の大きいジオテキスタイルを選択する場合、保水性が高く凍上性も高い試験土を用いると、毛管上昇試験である程度の遮水効果判別が可能と思われる。

2) 室内凍上試験

(1) 凍結セル内の温度変化

ジオテキスタイルを使用しなかった場合(図8)と各種ジオテキスタイルを使用した場合との各試験における供試体温度の経時変化を示す。図9はサンドフを用いた場合の1例である。図内の番号はサーミスタ番号であり、1は凍結セル上盤、2は凍結セル底盤から上方に向かって11.0cmの位置、3は凍結セル底盤から上方に8.8cmの位置、4は凍結セル底盤から上方に6.6cmの位置、5は凍結セル底盤から上方に4.4cmの位置、6は凍結セル底盤から上方に2.2cmの位置、7は凍結セル底盤にそれぞれ設置している。図からそれぞれ確認されるように冷却開始後、徐々に温度低下が起り、時間とともに温度変化は緩やかになった。各図において、センサー番号1の上部冷却盤の温度変化は、 $-4\sim-6^{\circ}\text{C}$ の間を保持している。この冷端温度側の温度のふらつきは、電子恒温循環器に不備によるもので、一時的に循環液の温度上昇が起きたためである。この防止対策として、あらかじめ各冷媒層を断熱材で囲み、循環液が流れるホースも断熱材で囲んだ。さらに、冷却水として使用した水道水の水圧を一定にするための装置を設置した。しかし、大きな効果は見られなかった。また、各試験の設定温度値と試験の測定温度に差が生じているのは、6カ月に渡る試験期間中に、冷却水温度の上昇が生じ、電子恒温循環器の設定不備が生じたためと考えられる。しかし、この試験はジオテキスタイルの毛管遮断を見るためのものであり、凍結線が、ジオテキスタイルを敷設した位置よりも上方にあれば問題はないと思われる。いずれの試験もこの条件は満たしている。また、初期段階での過冷却現象はテクトン3にだけ見られた。これは、試験を始める段階で、各冷媒層を上盤及び底盤のプレートに接続後、循環液が充分に行き渡ってから冷却を開

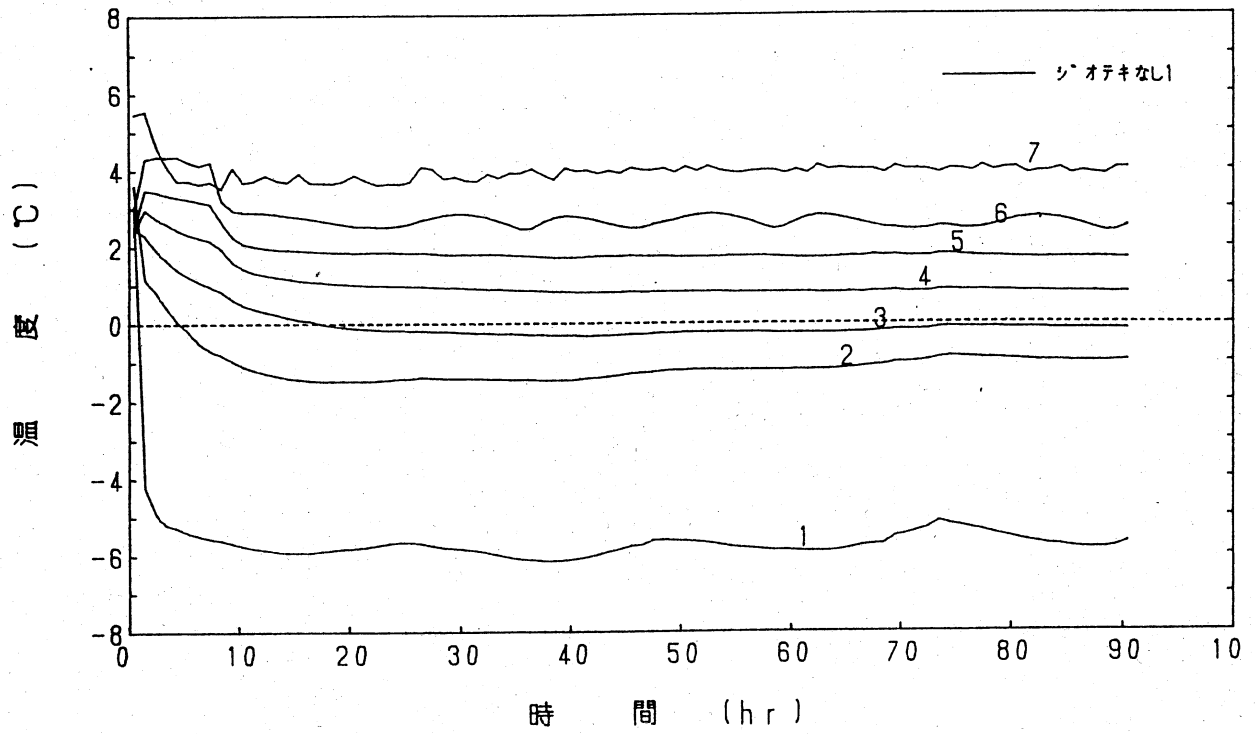


図8 ジオテキスタイルなしの場合の供試体温度の経時変化

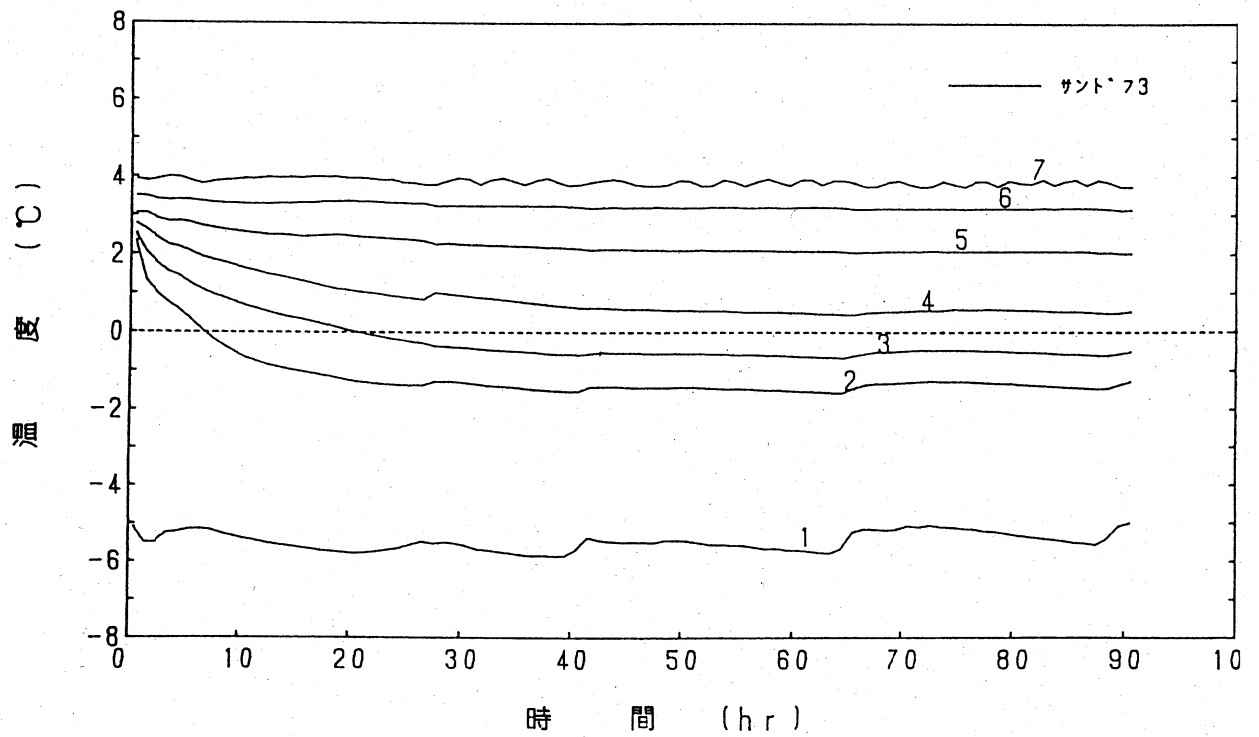


図9 サンドF3の場合の供試体温度の経時変化

始したことから、氷点降下作用が急激に現れなかったと推測されるが、明確な原因は不明である。冷却過程は、ほぼ定常状態に達するまで継続した。また、コスモレベル1の50時間における大きな温度変化は、学内停電時に測定されたものである。いずれの図からもジオテキスタイルの種類別、あるなしに関わらず、温度変化の大きな違いは見られなかった。

(2) 冷却時間と凍上量および凍結侵入深さの関係

各種ジオテキスタイルを使用した場合とジオテキスタイルを使用しなかった場合の各試験における凍上量と凍結侵入深さの経時変化の一例を図10～図11に示す。凍結侵入深さは、凍結セルの側壁および上盤、底盤に設けた7つのサーミスタで測定した温度をもとに、0℃の位置を温度勾配が直線と仮定した内挿法から求めた。凍結侵入深さは、いずれも凍結初期段階において急激な進行を示すが、その後は次第に緩やかになり、定常状態に近づいた。これは、供試体の底部から急激に冷却すると非定常熱流が始まり、流出熱と流入熱の不均衡から凍結線が進行し、時間の経過とともに平衡状態に近づいた。しかし、同種の試料での凍結深さの違いは、上部冷却盤の温度変化が、-4℃～-6℃の間を保持したためであり、結果として大きな凍結線の変化を伴うものもあった。

図10において、ジオテキスタイルを使用していない場合は、各種ジオテキスタイルを使用した場合と比較すると、凍結線の侵入と共に緩やかに凍上し始め、凍結線の侵入が定常状態になっても、凍上する傾向にあった。さらに、凍結線が深く侵入すればするほど凍上も大きくなった。これは、水分供給が十分に行われることでアイスレンズが成長し続け、毛管上昇現象が円滑に進んだということである。さらに、水源近くに凍結線が来ることによって、毛管上昇が促進したと考えられる。他方、図11における、サンドフなどのジオテキスタイルを使用した場合は、ジオテキスタイルを使用していない場合と同様に、凍結線の侵入と共に緩やかに凍上し始めた。しかし、凍結線の侵入が定常状態になると凍上の変化は緩やかになり一定になった。また、ジオテキスタイルを使用していない場合とは逆に、凍結線が深く侵入すればするほど凍上は小さくなった。他方、テクトンは、凍結線侵入時に急激な凍上の変化を示し、凍結線が定常状態に入ると凍上もほぼ一定になった。これは、凍上抑制効果が見られるコスモレベルとサンドフにおいて、凍結線侵入時に円滑に進んでいたアイスレンズの成長が、そのジオテキスタイルによって妨げられたということである。凍結線

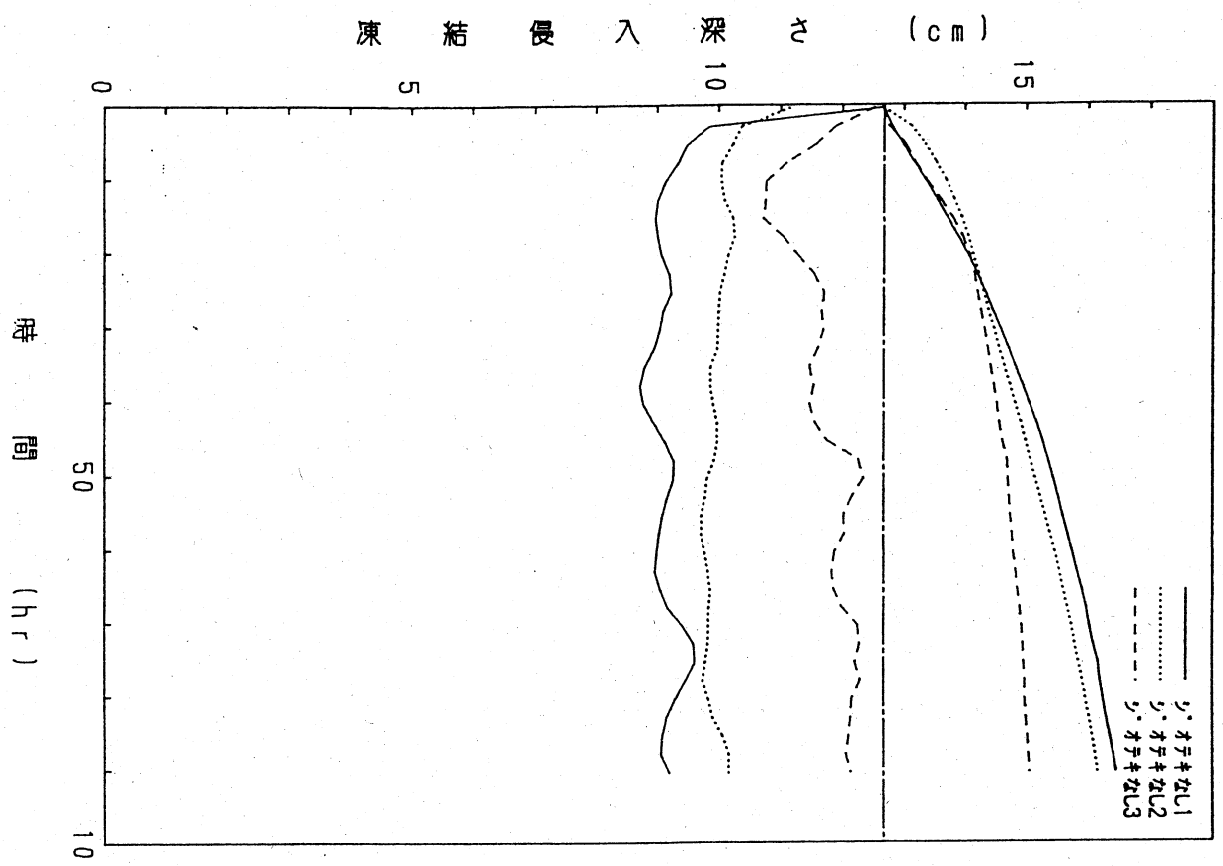


図10 ジオテキスタイルがない場合の凍上量と凍結侵入深さ

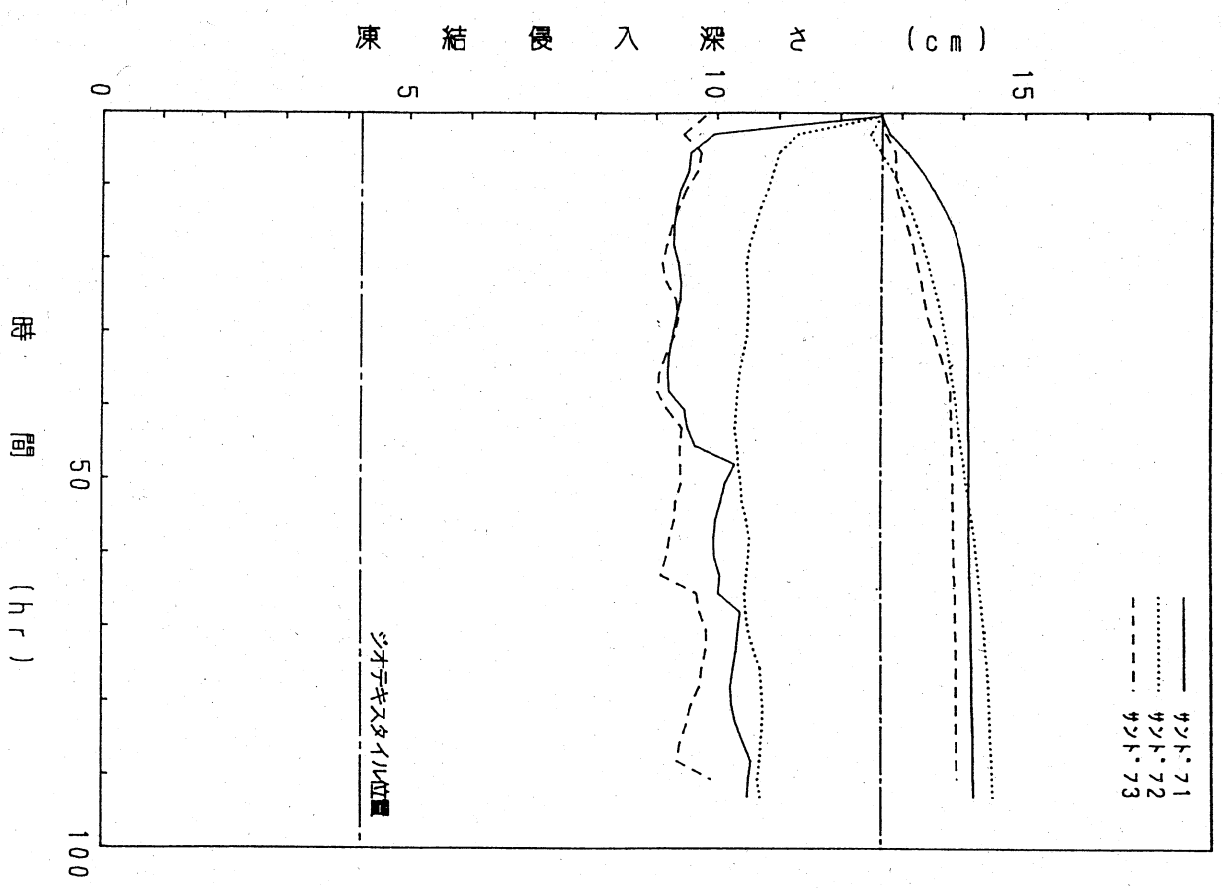


図11 サンドパンを使用した場合の凍上量と凍結侵入深さ

が深く侵入すればするほど凍上が小さくなったのは、この場合、凍結線とジオテキスタイルの間にある水分が、アイスレンズになったと考えられ、ジオテキスタイルに凍結線が近づくとつれ、アイスレンズになることのできる水分が足するということである。言い換えると、アイスレンズの成長を妨げることのできるジオテキスタイルでも、凍結線から離れば、凍上が起きることである。さらにテクトンは、他のジオテキスタイルの場合に比べ、凍結線侵入時に急激にアイスレンズが成長し、その後徐々にアイスレンズの成長が進むと考えられる。

(3)冷却時間と吸水量及び凍上量の変化

各種ジオテキスタイルを使用した場合とジオテキスタイルを使用しなかった場合の各試験における吸水量の経時変化を図12～図15に、凍上量の経時変化を図16～図19に示す。また、各供試体の最終吸水量と最大凍上量を表4に示す。

表4 コンピュータによる各供試体の最終測定結果

試験No.	吸水量 (ml)	凍上量 (cm)
ジオテキなし 1	200.00	3.79
ジオテキなし 2	222.13	3.51
ジオテキなし 3	127.13	2.47
コスモレベル 1	132.16	1.92
コスモレベル 2	116.93	2.12
コスモレベル 3	74.85	1.17
サンドフ 1	61.04	1.56
サンドフ 2	94.22	2.04
サンドフ 3	28.62	1.29
テクトン 1	154.04	2.85
テクトン 2	94.15	2.83
テクトン 3	126.37	3.02

一般に吸水量の経時変化と凍上量の経時変化は、同じような傾向を示し、!

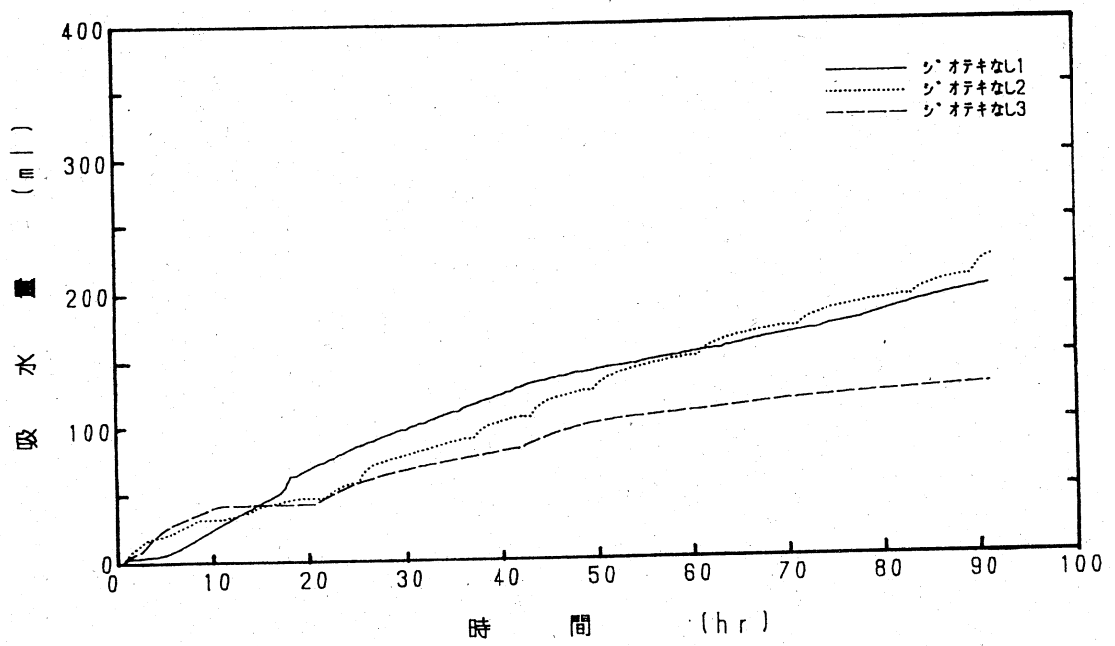


図12 ジオテキスタイルなしにおける吸水量の経時変化

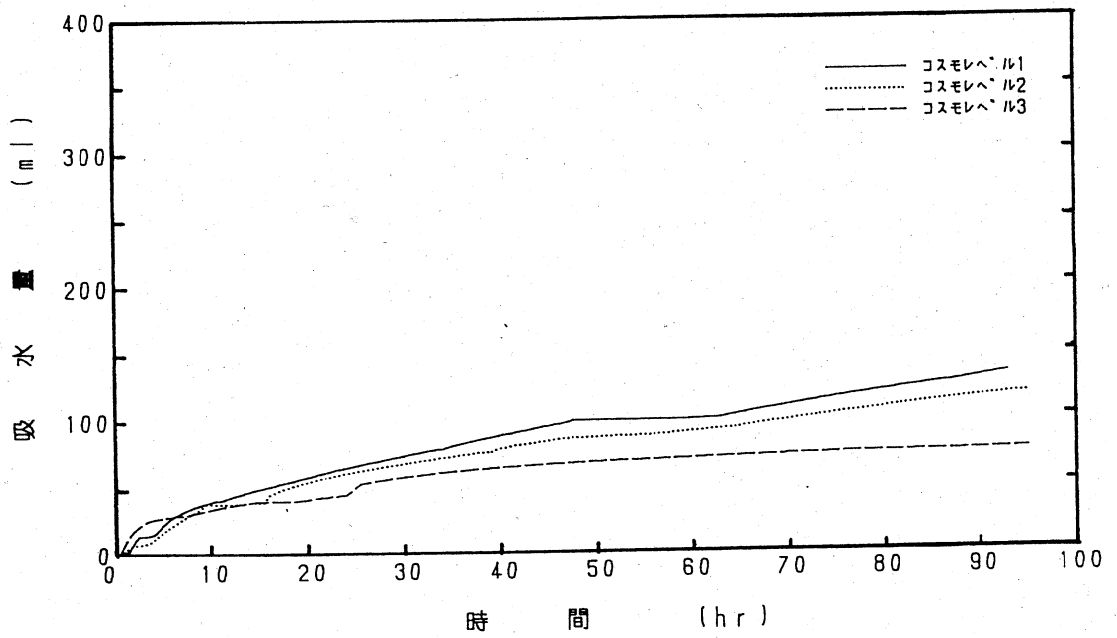


図13 コスモレベルにおける吸水量の経時変化

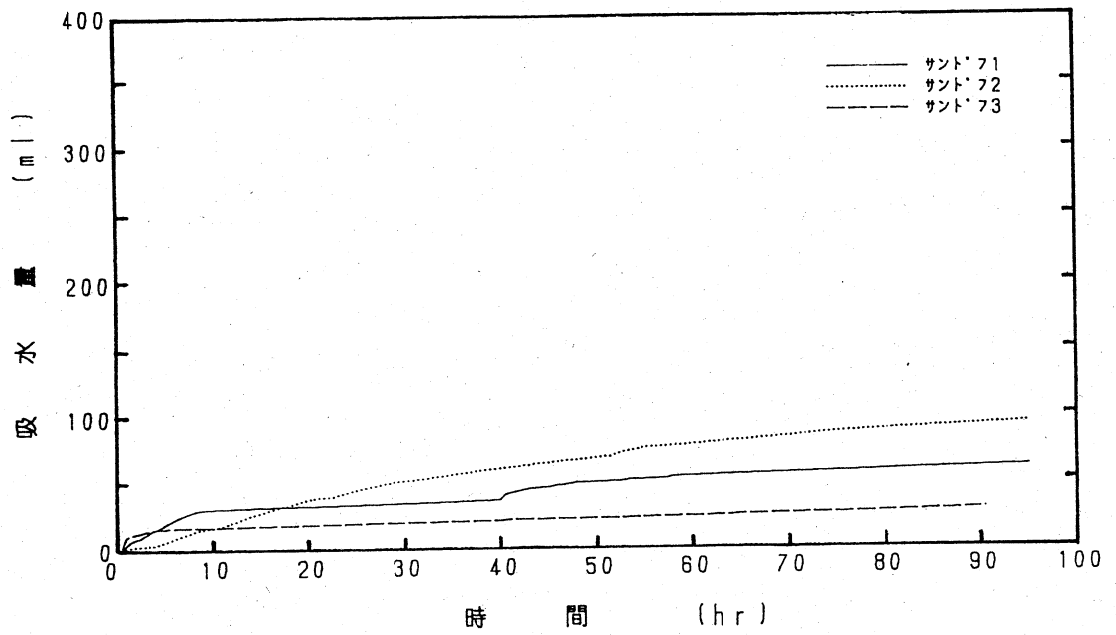


図14 サンドフにおける吸水量の経時変化

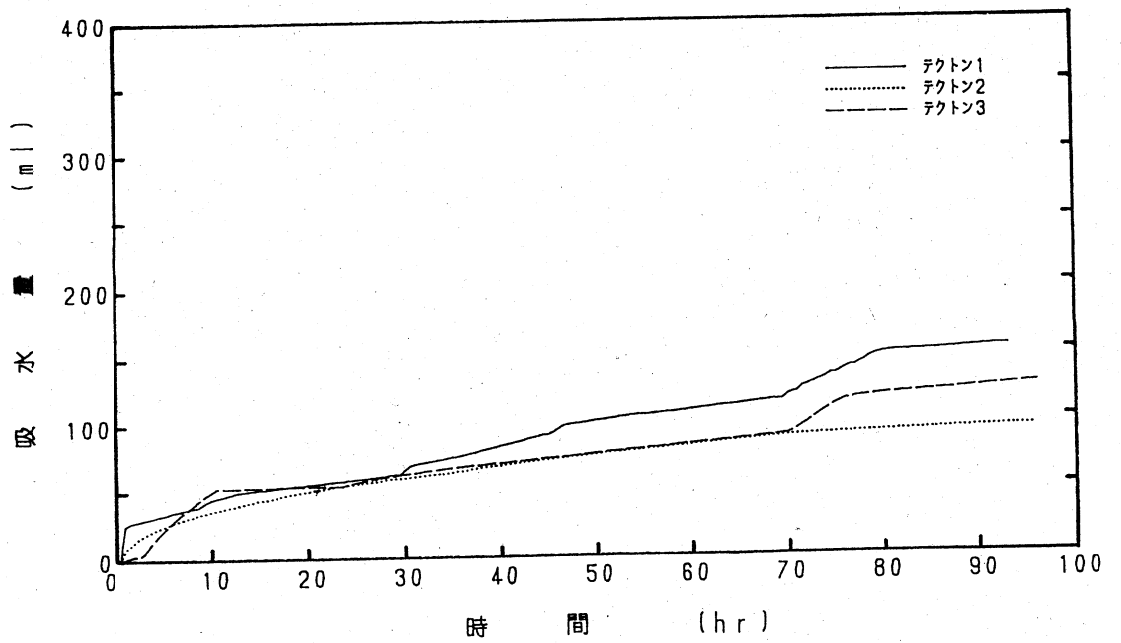


図15 テクトンにおける吸水量の経時変化

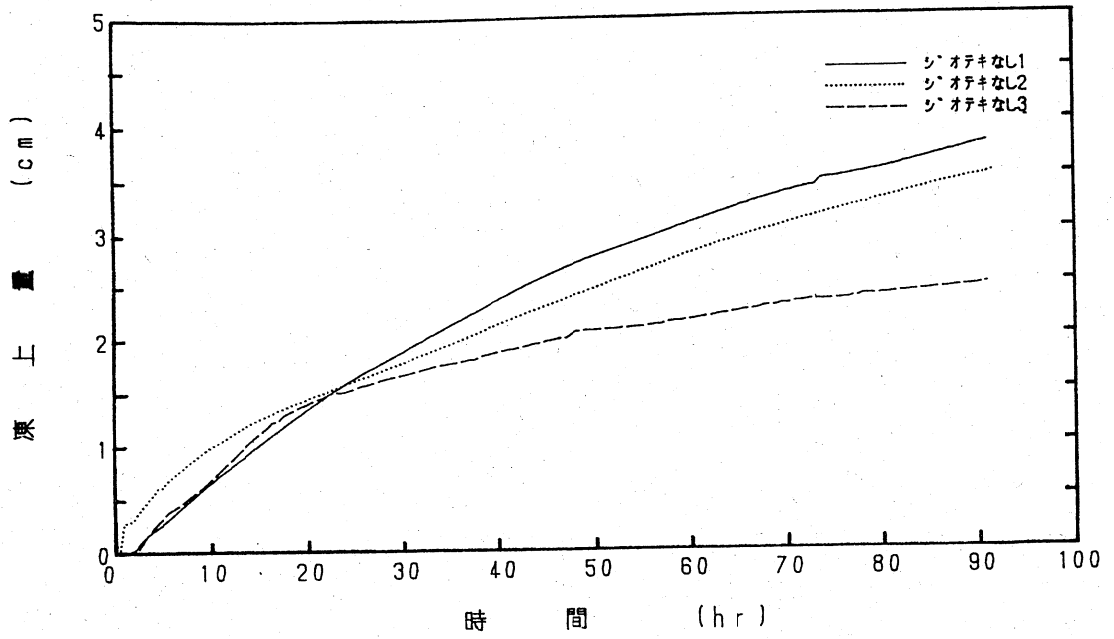


図16 ジオテキスタイルなしにおける凍上量の経時変化

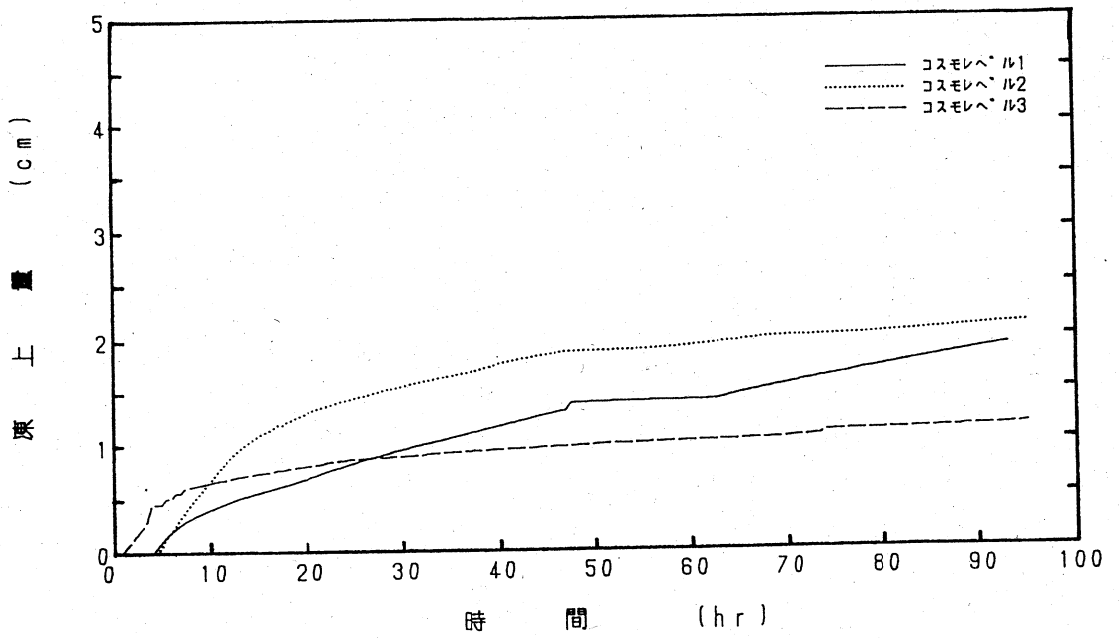


図17 コスモレベルにおける凍上量の経時変化

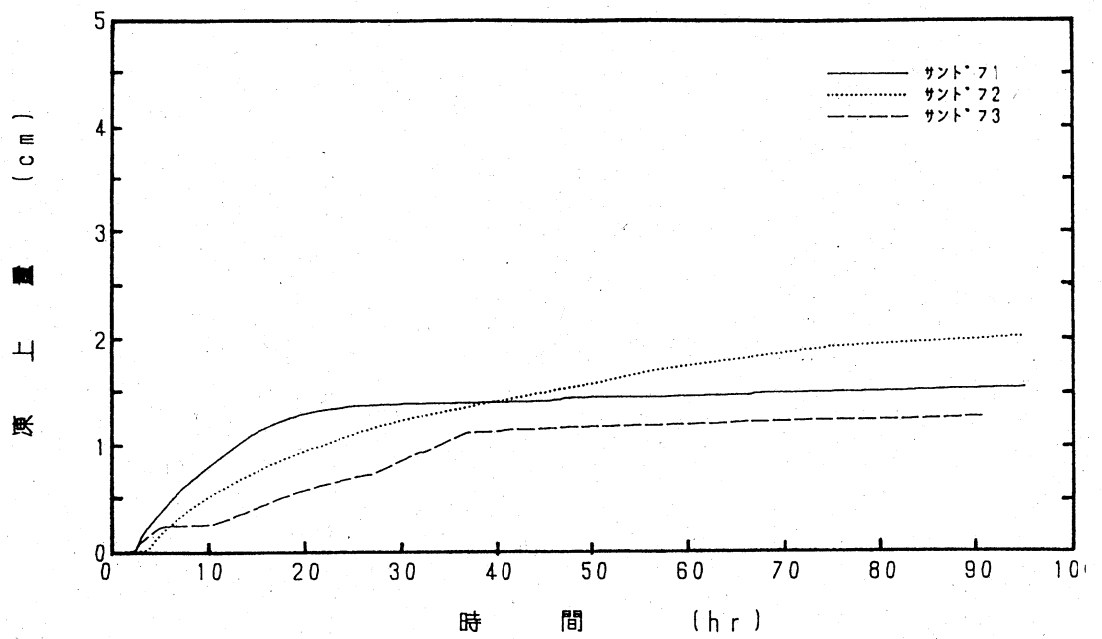


図18 サンドフにおける凍上量の経時変化

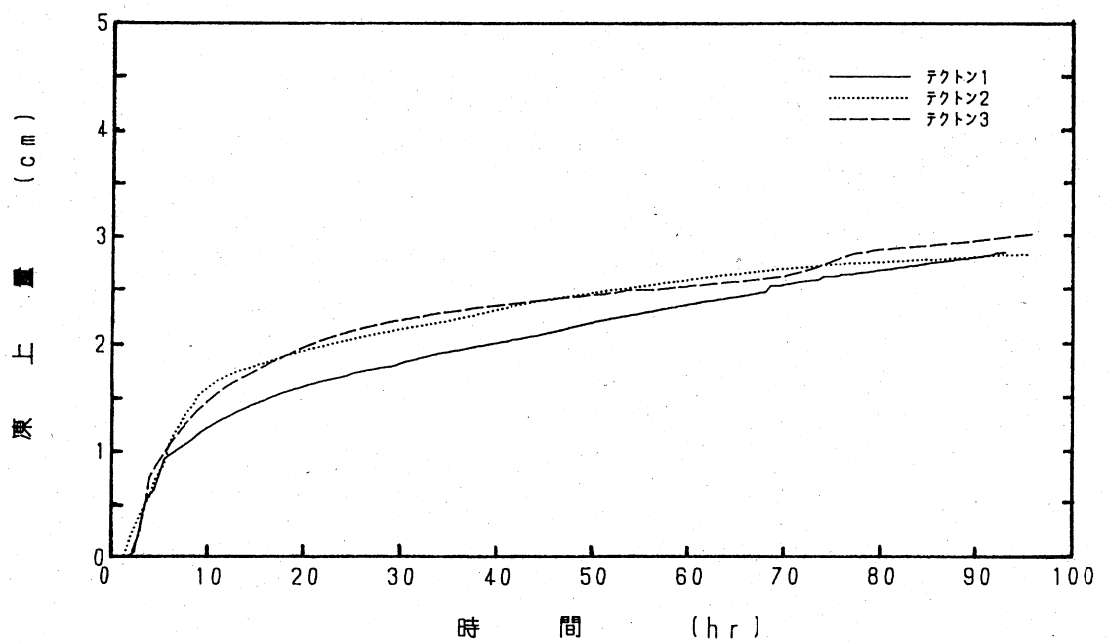


図19 テクトンにおける凍上量の経時変化

水量と凍上量は密接な関係にあることが分かっている。これは、アイスレンズ形成によって凍上が起り、その水分供給が吸水量の変化として現れたためと思われる。この試験でも同様な結果が得られた。しかし、図15テクトンについては、全くその関連性が見られなかった。これはテクトンの場合、多量の吸水量が必要となり、ピューレットに水を付加していくごとに、その水圧がテクトンの「しきい圧」を超え、余分に未凍土側に吸水されたと考えられる。

また、各種ジオテキスタイルを使用した場合とジオテキスタイルを使用しなかった場合の各試験で、3つの同一供試体を使用した時の平均を求めた平均吸水量の経時変化を図20に、平均凍上量の経時変化を図21に示す。ジオテキスタイルを使用していない場合は、各種ジオテキスタイルを使用した場合と比較して、時間と共に凍上量が一定の割合で増大し続けた。また同様に吸水量も増加し続ける傾向にあった。他方、コスモレベルとサンドフは、40時間を過ぎたころから凍上は緩やかになり、凍上速度は非常に小さくなった。しかし、凍上量はほぼ同量であるのに対し、吸水量はコスモレベルの方がサンドフよりも倍近くの差が現れた。これは、コスモレベルは凍結面に起るマトリックポテンシャルをコスモレベルの下の土に伝えることができると考えられる。しかし、これによって吸水された水は、しきい圧によってコスモレベルを通過することができないと考えられる。すなわち、毛管がジオテキスタイルによって遮断され、水分供給がスムーズにいかなかったためと考えられる。サンドフの場合は、凍結面に起こるマトリックポテンシャルをサンドフの下の土に伝えることができず、よって吸水されなかったと考えられる。凍結面に起るマトリックポテンシャルを伝えるコスモレベルと伝えないサンドフとの相違は、これらのジオテキスタイルの繊維表面性質と孔隙径が影響していると思われる。テクトンは、最初に急激な凍上を示すが、その後、一定の割合で増加し続ける傾向にあった。他のジオテキスタイルと比較して、倍近くの凍上量があったが、初期段階における急激な変化を除けば、変化の割合は一定である。しかし、吸水量はコスモレベルとあまり変化はない。これは、テクトンはコスモレベルと同様に凍結面に起るマトリックポテンシャルをコスモレベルの下の土に伝えることができるが、コスモレベルほどしきい圧は高くないと考えられる。よって吸水量はほぼ同量なのに対し、凍上量は大きく変化したと考えられる。すなわち、テクトンは他のジオテキスタイルに比べて毛管遮断する効果が少ないため、凍上を抑制する効果が小さいということがわかる。しかし、ある程度の時間が経つと他のジオテキスタイルと同様に凍上速度は小さくなると考えられる。

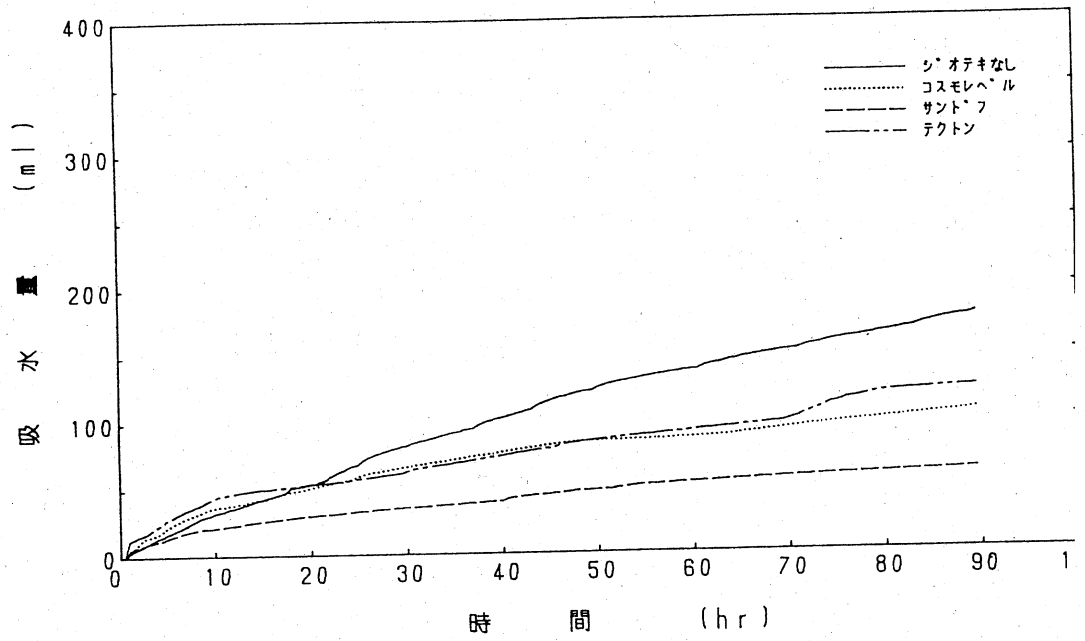


図20 平均吸水量の経時変化

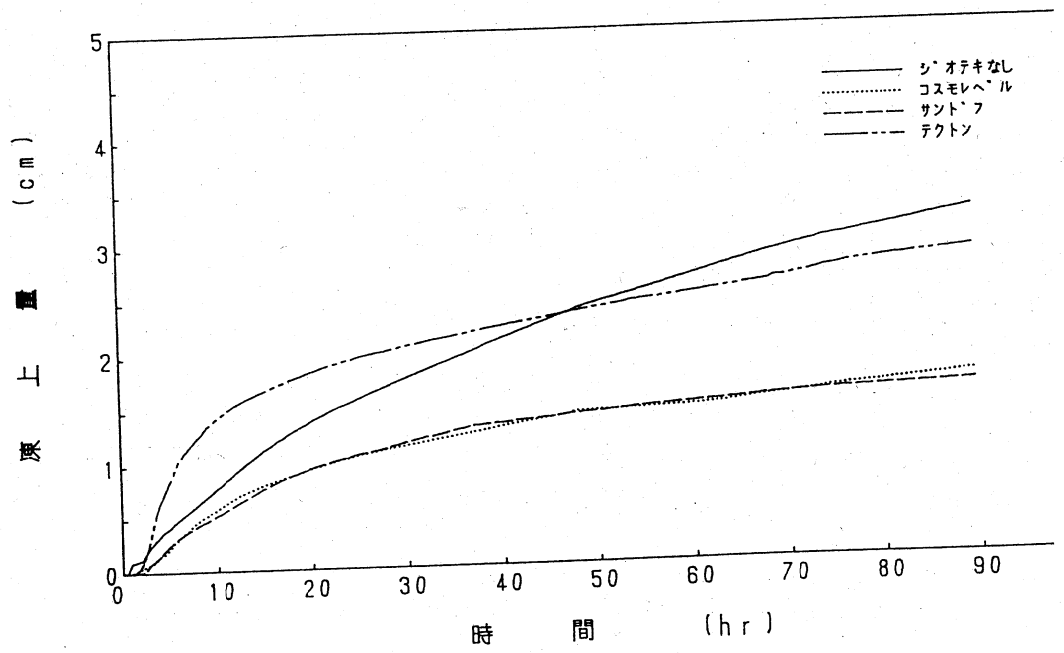


図21 平均凍上量の経時変化

各種ジオテキスタイルを使用した場合とジオテキスタイルを使用しなかった場合の各試験において、最終凍上量と最終吸水量の回帰直線を図22～図25に示す。図22、図24において、ジオテキスタイルなしとサンドフは非常に高い相関係数が得られた。また図23において、コスモレベルは、サンドフの相関係数より悪いが比較的良い相関係数が得られた。これをみるとサンドフは、凍上量が少なく吸水量も少ない。しかし、コスモレベルは凍上量は同じ程度であるが、吸水量は多い。これがコスモレベルがサンドフより相関係数が悪くなった理由と考えられる。図25テクトンにおいては、ほとんど相関がなかった。これは、非常にテクトンが凍上量が多いためである。しかし逆に言えば、いくら吸水量があってもある程度の凍上量に達すると凍上は少なくなるということである。このことは、テクトンにおけるジオテキスタイルの疎水性が、かなり関係していると思われる。つまり、テクトンは、比較的疎水性で比較的低い透水性を持ち、特に低い圧力のもとでその表面上に水が残留する可能性があるということである。しかし、「しきい圧」は低いため、ある程度のサクシオンを超えてしまうとその残留していた水はテクトンを通過し、アイスレンズ形成に貢献すると思われる。

(4)凍結終了時における含水比分布と供試体の凍結状況

各種ジオテキスタイルを使用した場合、およびジオテキスタイルを使用しなかった場合の各凍結試験が終了した時点における含水比分布を図26～図29に示す。これは凍結終了後、供試体を9等分した時の各層の含水比の変化である。図26～図29の含水比分布の値を表5に示す。この表内における含水比の測定番号は、供試体を9等分した時、供試体下部からNo.1、No.2、No.3、No.4、No.5、No.6、No.7、No.8、No.9とした。また、各試験における実測結果を表6に示す。ここで示した表6の供試体の実測結果の値は、温度変化から推定した結果と多少異なる。特に凍上量と凍結線はかなりの差がある。これは、この値は実測値であるということ、また24時間飽和において、凍結セル内の供試体が膨張または収縮し初期状態の供試体全長(12.68 cm)と著しく異なったためである。しかし、試験値全体としては、温度変化から推定した結果の傾向と実測結果の傾向は変わらない。

いずれの図も含水比が最大のところにアイスレンズが現れた。理論的には先に述べた最終凍結線の位置に最大のアイスレンズが形成されるはずである。し

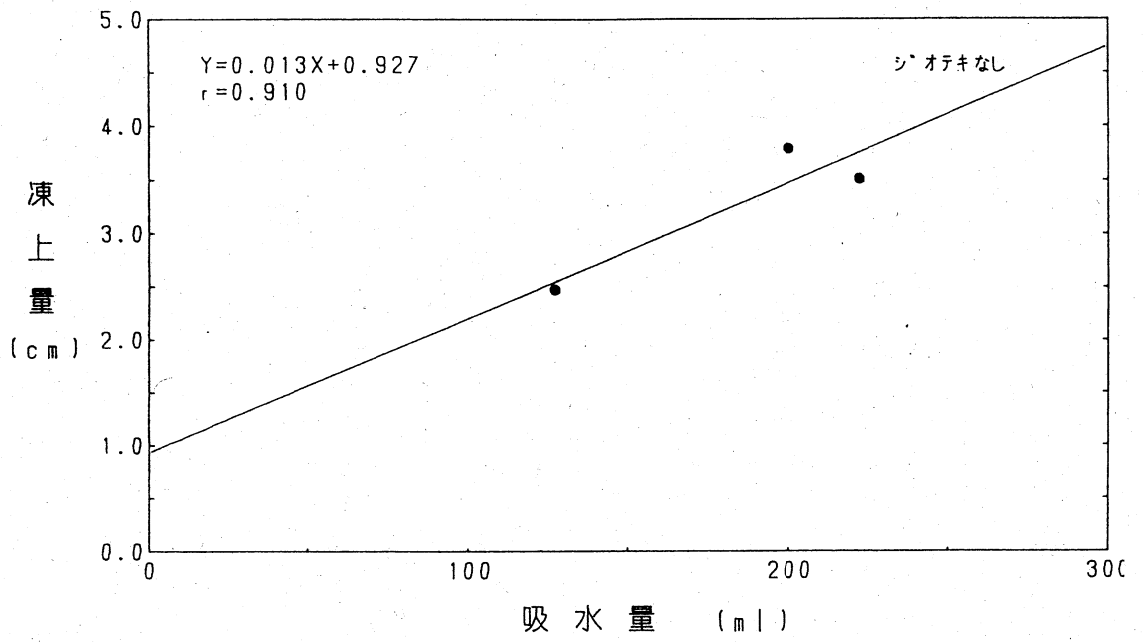


図22 ジオテキなしにおける最終凍上量と吸水量の回帰直線

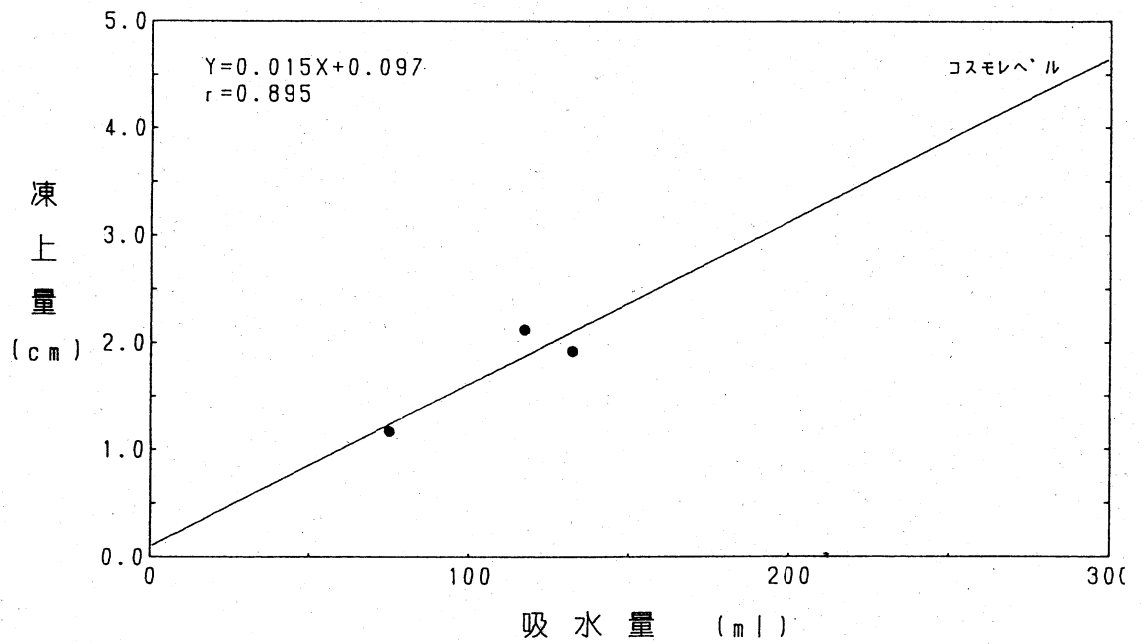


図23 コスモレベルにおける最終凍上量と吸水量の回帰直線

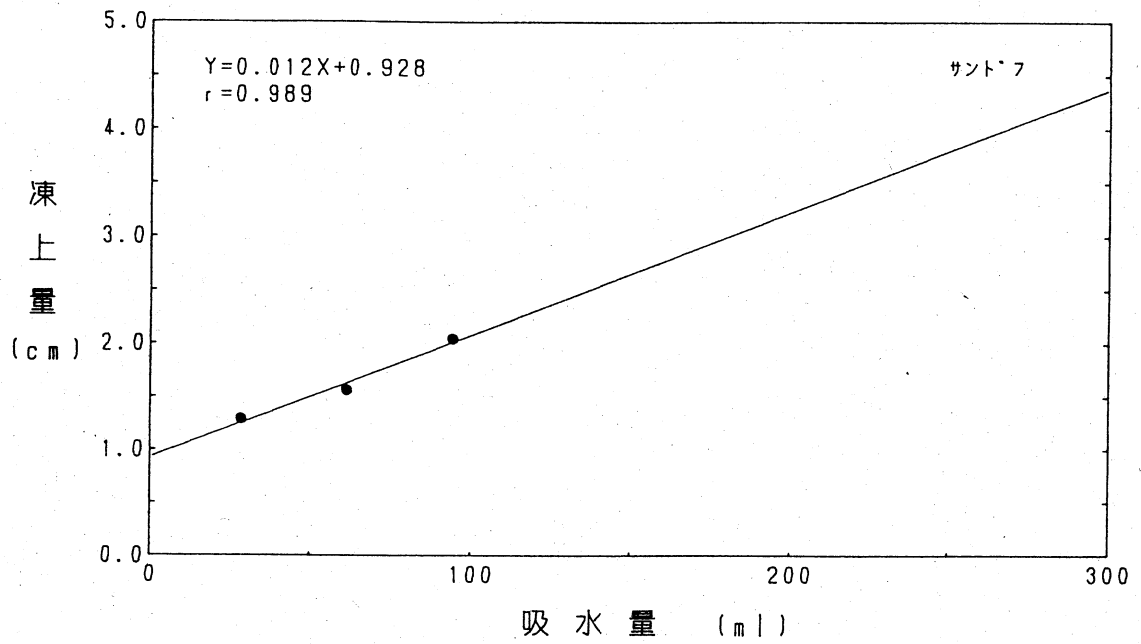


図24 サンドフにおける最終凍上量と吸水量の回帰直線

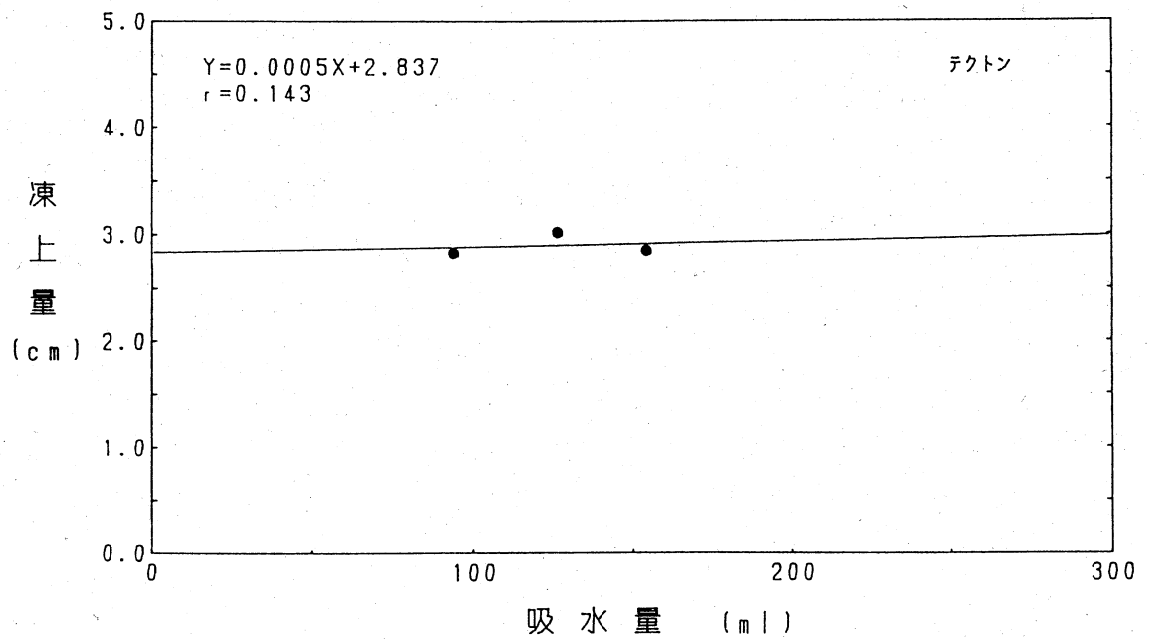


図25 テクトンにおける最終凍上量と吸水量の回帰直線

かし、実際にはかなり予想凍結線より、上部の位置にアイスレンズが形成されたものもあった。これは、供試体を9等分した時、目分量で各層をサンプリングしたこと、また凍結線のグラフが、供試体の温度分布から0℃線を直線で挿した予想凍結線であるということ、さらに凍結セル装置内部における上盤供試体本体との間にわずかなすき間があり、凍結セルの末端における断熱効の低下に起因したものと考えられる。これらのことから、試料内部に非直線温度勾配が生じたと推測される。

ジオテキスタイルを使用しなかった場合、大きなアイスレンズがそれぞれ形成されていた。このことは図26に示すとうりであり、中には、含水比が300%を超えるものもあった。また、図12の吸水量の変化にも密接な関係があった。吸水された水は、アイスレンズ形成に大きく関与し、そのアイスレンズは、大きく凍上に関与しているということである。図27においてコスモレベルの場合大きなアイスレンズは観察されず、非常に薄いアイスレンズが縞状に幾重にも見られた。しかし、コスモレベル3の試験では縞状凍結が見られなかった。図13の吸水量の変化にも密接な関係があり、いったんは未凍土側に吸水するものの、毛管がコスモレベルによって遮断されていることによって、水分供給がスムーズにいかなかったと考えられる。サンドフは、図14の吸水量の変化から見れば、他のジオテキスタイルほど吸水はしていない。従って、図28にもそれほど含水比はなく、吸水量と含水比との間に関連性が見受けられた。供試体の凍結状況は、ほとんどアイスレンズが見られなかった場合と縞状凍結の場合が観察され、図28の含水比のグラフと関連があった。しかし、サンドフ2の試験は含水比が大きく現れているところがある。これは、サンプリングの際の採取誤差と考えられ、24時間飽和したときの飽和水分状態が不完全であり、その余剰水分が出現したと思われる。サンドフの場合、毛管が完全に遮断され、凍結面に起るマトリックポテンシャルをサンドフの下方の土に伝えることができず、よって吸水されなかったと考えられる。またテクトンにおいて、図29における含水比は、あまり含水比が高くないように思われるが、供試体全体における含水比は高くなっている。また、試験後の供試体の凍結状況も縞状凍結が幾重にも観察された。しかし、図15の吸水量の変化と含水比のグラフとの間に関連性は見られなかった。テクトンの場合、吸水量が多いため、ビューレットに水が不足し、加水を行うごとに、その水圧がテクトンのしきい圧を超え、余分にテクトン直上の未凍土側に吸水されたと考えられる。

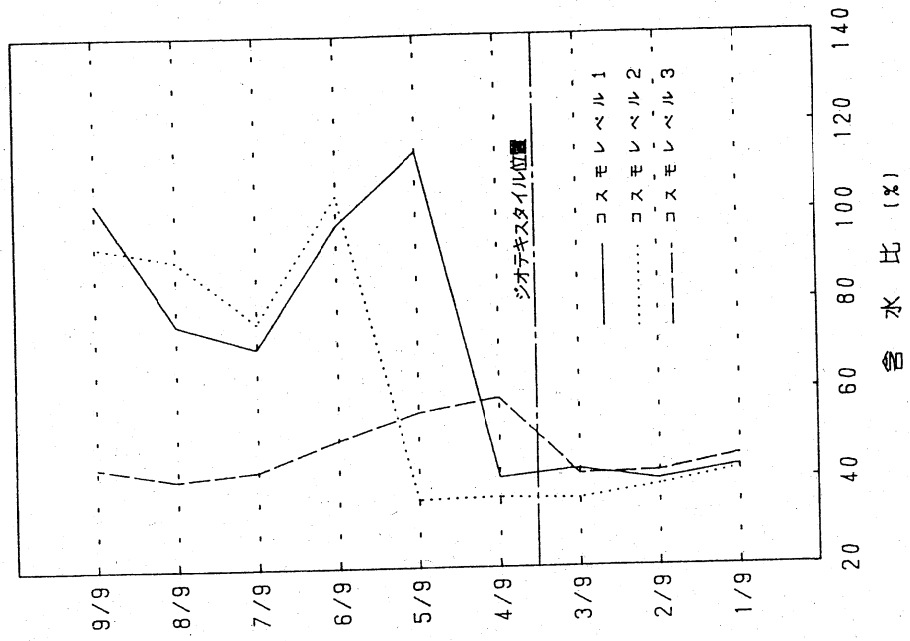


図27 実験終了時のコスモレベルの含水比分布

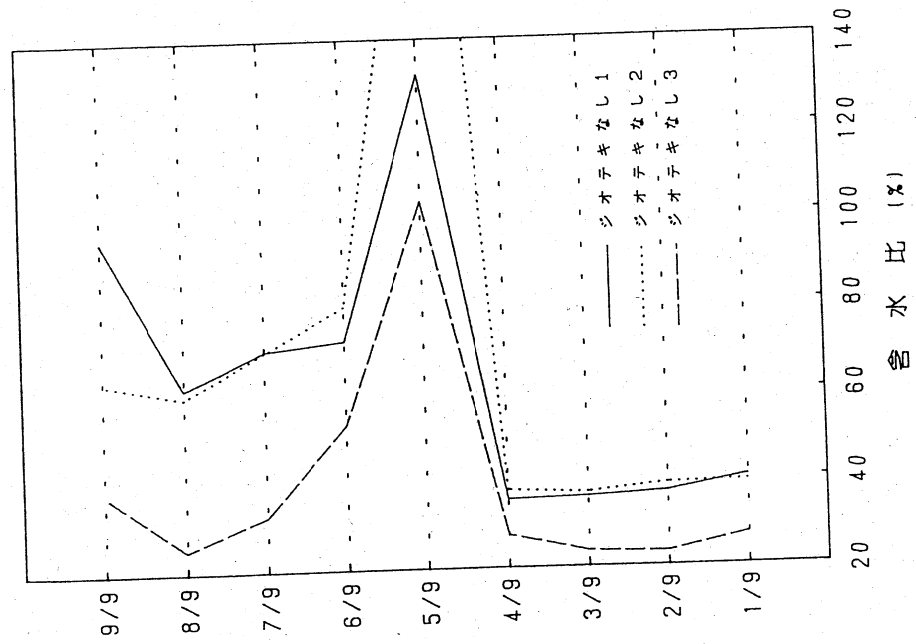


図26 実験終了時のジオテキスタイルなしの含水比分布

供試体長の割合

供試体長の割合

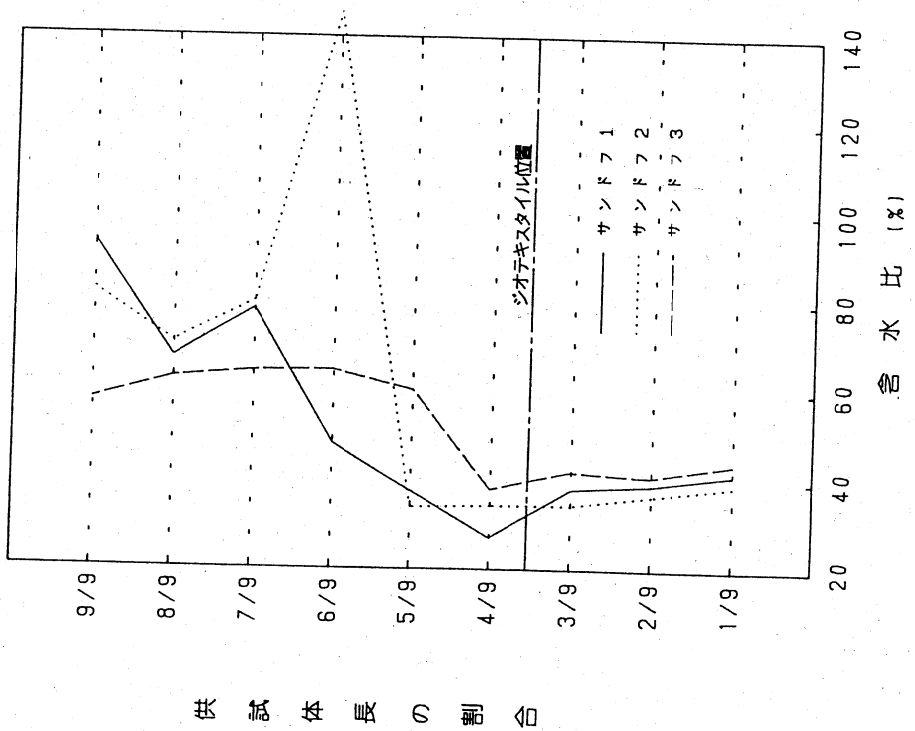


図28 実験終了時のサンドフの含水比分布

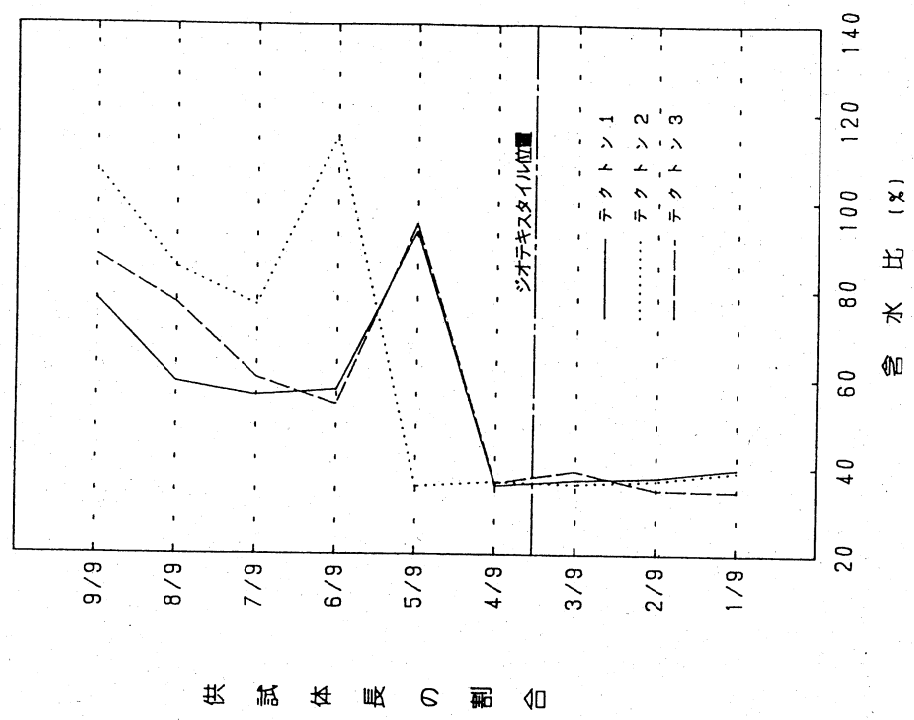


図29 実験終了時のテクトンの含水比分布

(5)凍結時の水分張力の変化

ジオテキスタイルを使用しない凍結実験における供試土の水分張力（テンション）の時間的变化を図30に示す。また、各種ジオテキスタイルを使用した凍結セル内の供試土の水分張力の変化を図31～図34に示した。水分張力の測定は凍結に伴う水分変化を間接的に比破壊で知るために行ったものである。水分張力が高い場合は水分量は少なく、張力が低い場合は水分量は多くなる。そして、土中の水分が凍結によって不足すると、凍土内に乾燥化と類似した現象が起り、水分張力が増大することが想定される。

図中に示す番号は、図4に示したテンシオカップ挿入口の位置を示す。すなわち、番号1は凍結セルの手威武から35mmの位置、番号2は底部から100mm、番号3は165mm、番号4は230mmそして番号5は295mmの各位置を示す。

いずれの実験においても、最上部の5番の水分張力は上昇増加することがわかる。図30に示すように、ジオテキスタイルを使用しない場合、水分張力は約40時間後に30kPaまで急速な上昇増加が出現し、50時間後からは緩やかな増加傾向に変わり、最終的に50kPaに達した。

各種ジオテキスタイルを使用した場合、水分張力は急速な上昇増加ではないがね張力増加が同様に発生する。コスモレベルやパブリックドレーンを使用した場合は、他に比べて早期にしかも緩やかな増加が生じる傾向にあった。他方、サンドフとテクトンは使用しない場合ほどでもないが、大きな勾配で張力増加が見られた。

ジオテキスタイルがない場合、約40時間後に供試体底部から265mm（番号4）のテンシオカップ付近の水分張力が急速に増加した。したがって、上部の凍結部と同様に周辺の水分不足が始まったと考えられる。一般に、閉鎖システムにおける凍結線直下で水分が凍結部に吸収され乾いた状態になることが知られている。試料の温度計測から、第4カップのすぐ上方に凍結線があること推測されることから、第5カップに引き続き水分張力の増加が始まったと思われる。

各種のジオテキスタイルを使用した場合の第5カップの水分張力の上昇勾配より、テクトンやサンドフを使用した場合の上昇勾配が多少大きいので遮水効果が小さいと判断される。他方、コスモレベルやパブリックドレーンでは上昇勾配が小さいことと比較的早期に張力増加が始まることから、遮水効果が十分に行われていると判断される。

次に、第4カップはジオテキスタイル直上にあることから、水分張力はサン

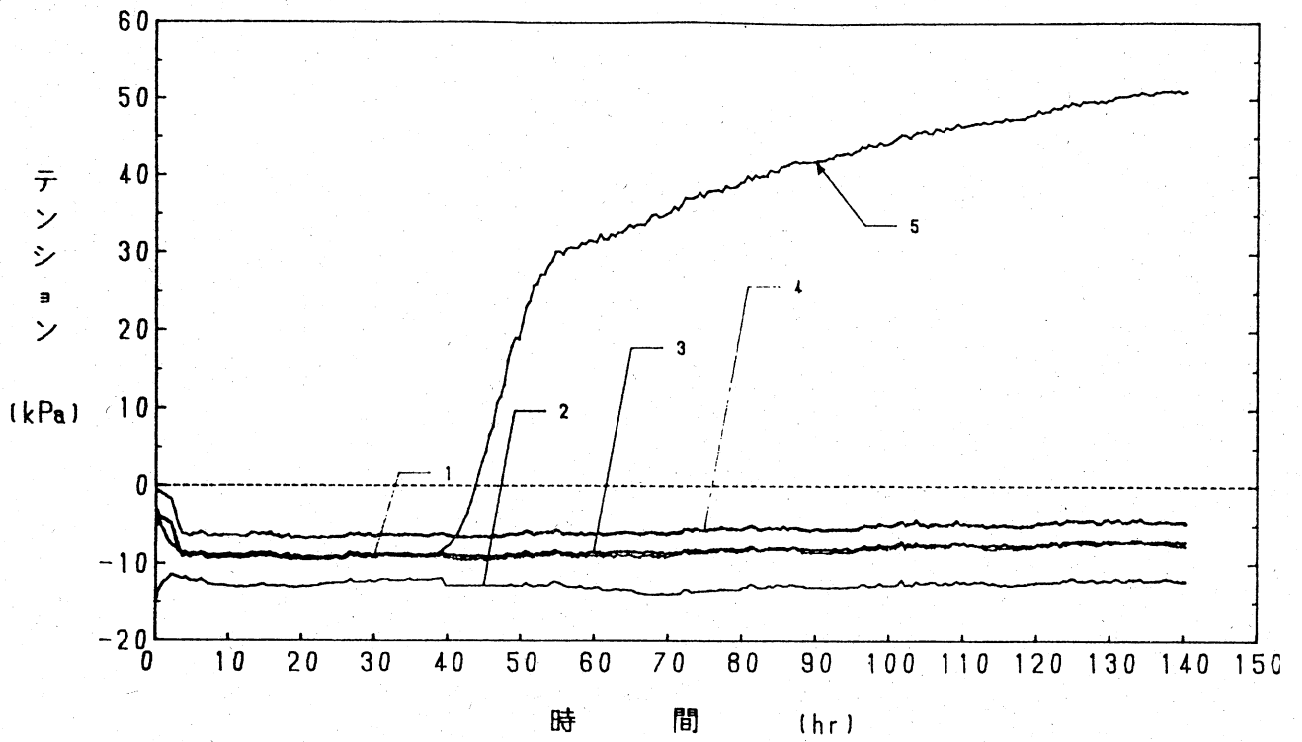


図30 ジオテキなしの水分張力の経時変化

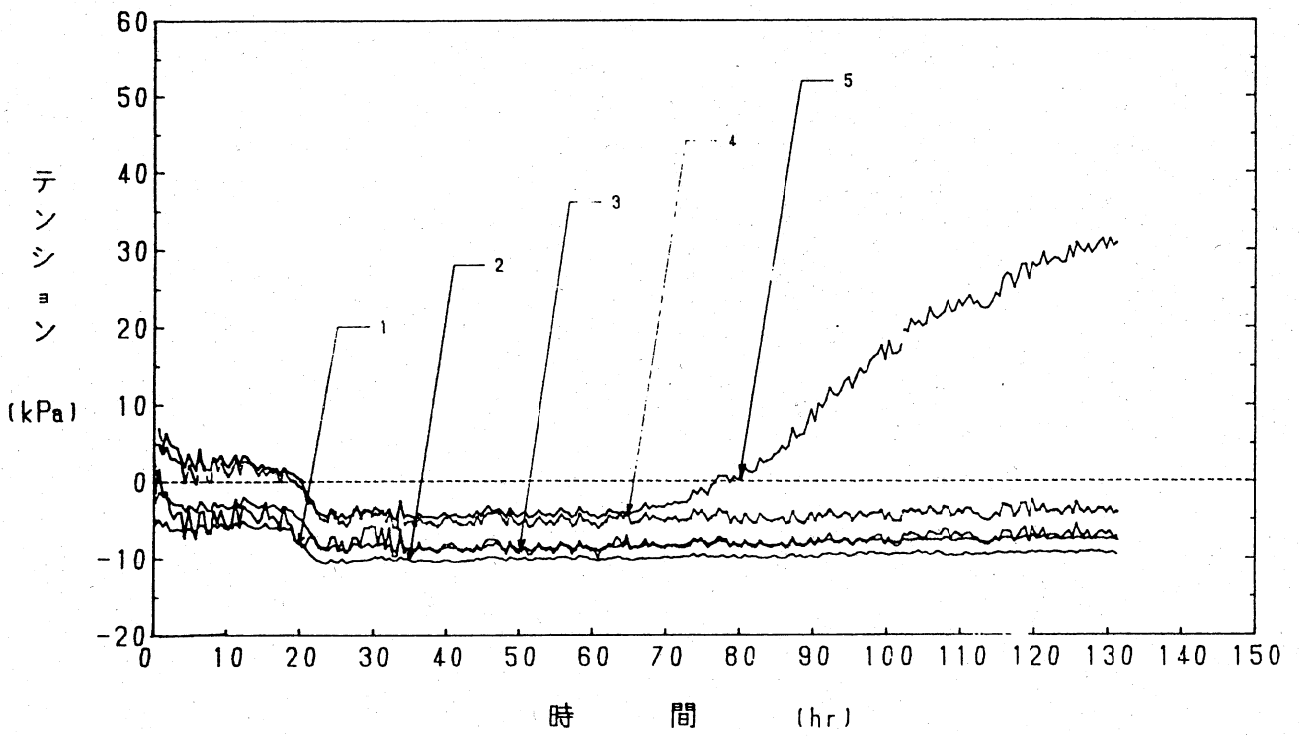


図31 テクトンの水分張力の経時変化

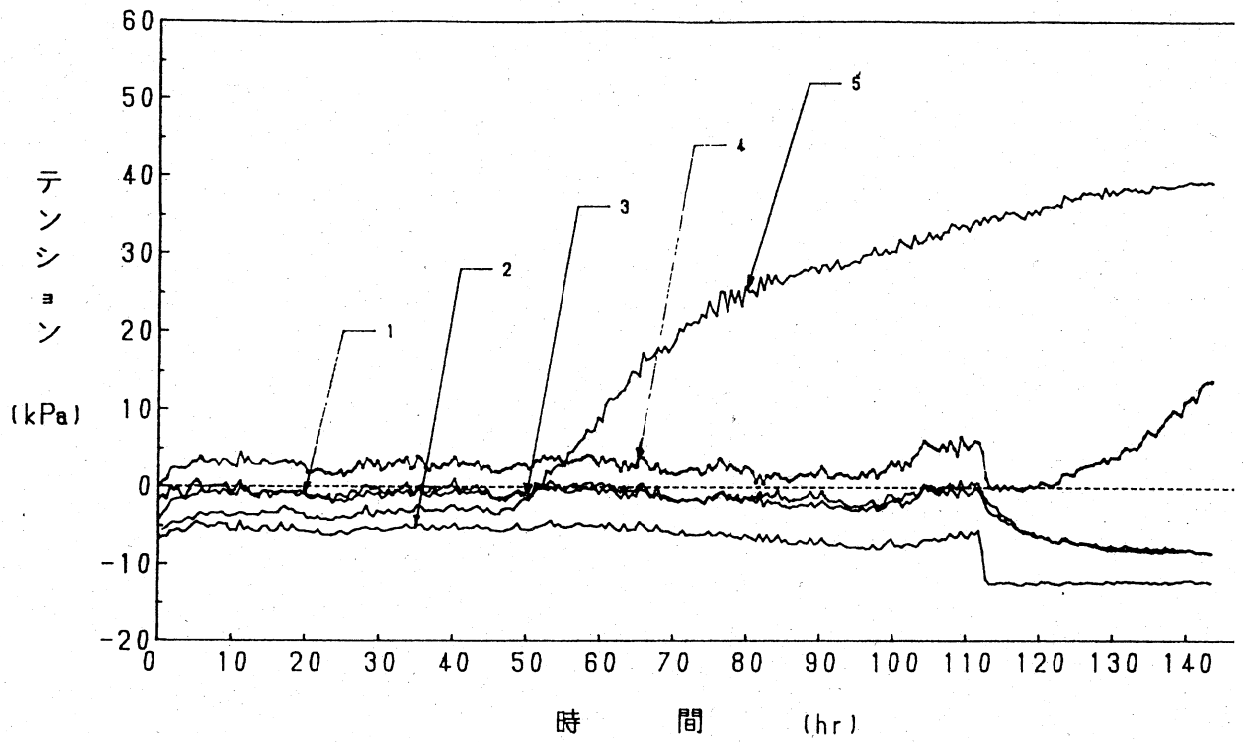


図32 サンドフの水分張力の経時変化

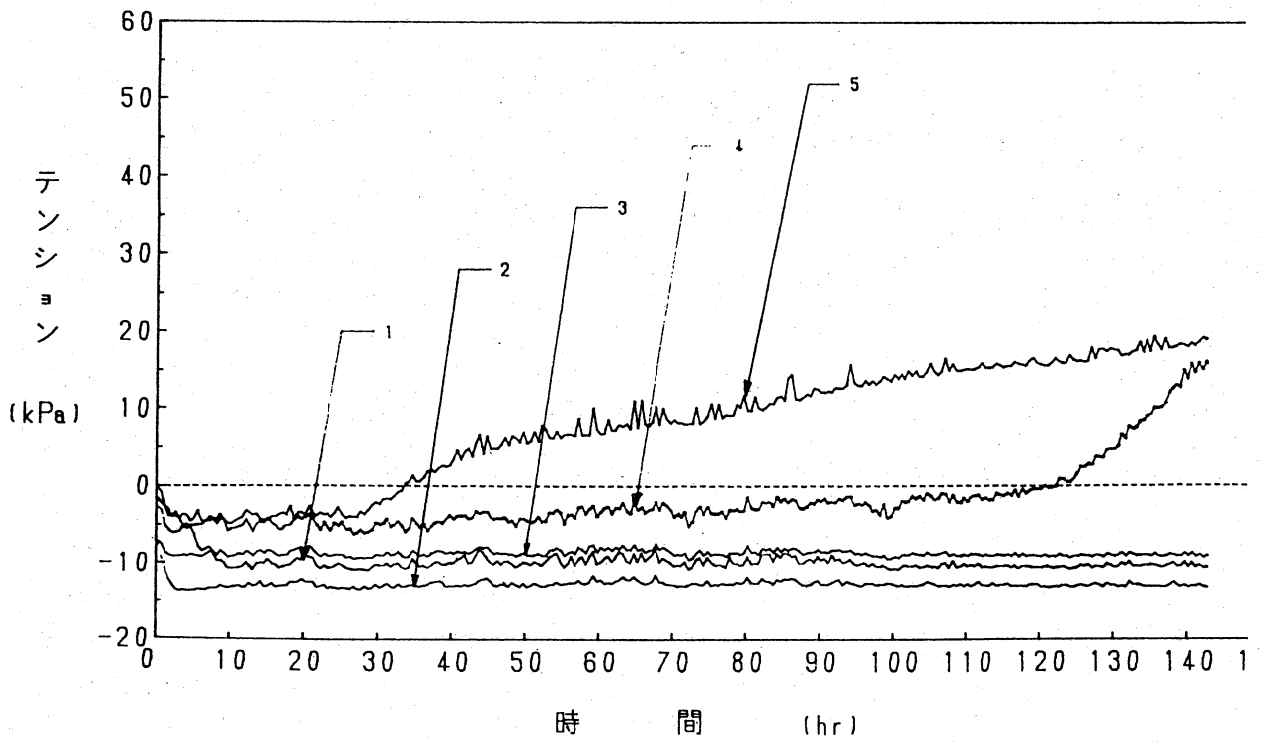


図33 コスモレベルの水分張力の経時変化

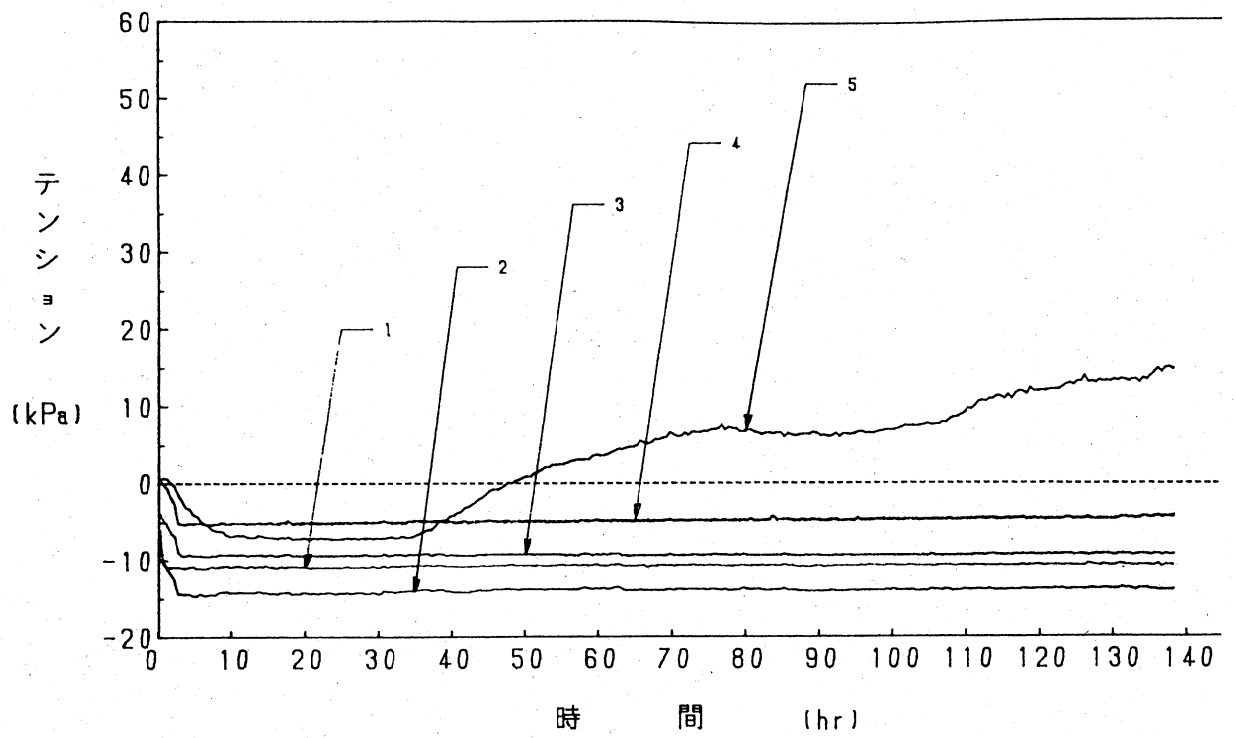


図34 パブリックドレーンの水分張力の経時変化

ドフとコスモレベルを使用した時、約120時間後に増加が見られた。これは、下方からの毛管上昇が少ないため急激な水分不足が生じていると思われる。

ジオテキスタイル以下に設置してあるテンシヨカップの水分張力をみると、ほぼ一定であることから、底部からの水分供給が十分に行われたと判断される。

以上の結果から、テンシヨカップによる水分張力の変化を調べると、この測定によって凍結時の土中の水分移動の状況が明らかに説明できると考えられる。しかし、この実験では水分張力の値と含水比との関係を求めていないことから、凍結時の含水比分布を詳細に解析できなかった。これは、今後の検討課題である。

各種ジオテキスタイルを使用した場合の吸水量の時間的变化を図35に示す。ジオテキスタイルを使用しない場合は、時間とともに吸水量が増加していく傾向にあるが、50時間を過ぎると急速に増加し、140時間後には706リットルにも達した。テクトンを使用すると他に比べ総吸水量は最も多く、凍結開始後20時間の間で著しく吸水が行われた。吸水量から判断すると、凍結時においてサンドフ、パブリックドレーンおよびコスモレベルの遮水効果が期待でき、なかでもコスモレベルが最も大きな遮水効果があると思われる。

各種ジオテキスタイルを使用した場合の凍上量の時間的变化を図36に示す。最も凍上量が大きかったのはテクトンを使用した場合で、1.5mmを記録した。他方、ジオテキスタイルを使用しなかった場合の凍上量は1.0mmであった。その他はほとんど凍上せずに、1mm以下であった。凍上量と吸水量と良好な関係は得られなかったのは、帯広土の凍上性が比較的小さいことと、凍結セルが長過ぎて、正確な密度で充填できないためと判断される。凍結セルの側壁と上盤との摩擦の問題もあり、何らかの打開策が必要と考えられる。

6. まとめ

土中に敷設したジオテキスタイルが、下方からの毛管水を遮断するという効果のメカニズムを調べるために、数種のジオテキスタイルを使用し、室温での毛管上昇試験と室内凍上試験を行った。これらの結果より、次の結論が得られた。

室温での毛管上昇試験では、毛管上昇速度と含水比分布に関連性が見られ、コスモレベルが最も毛管遮断効果があり、次にサンドフもかなりの遮水効果が期待できることがわかった。

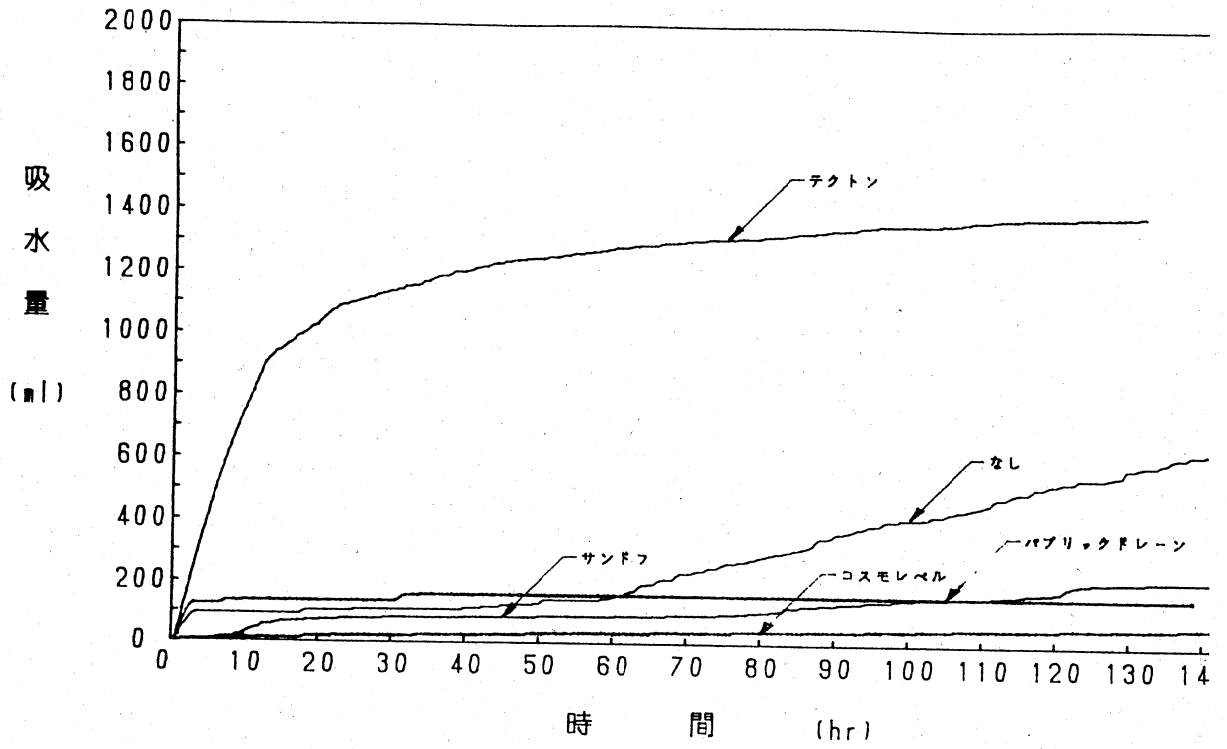


図35 各種ジオテキスタイルの吸水量の経時変化

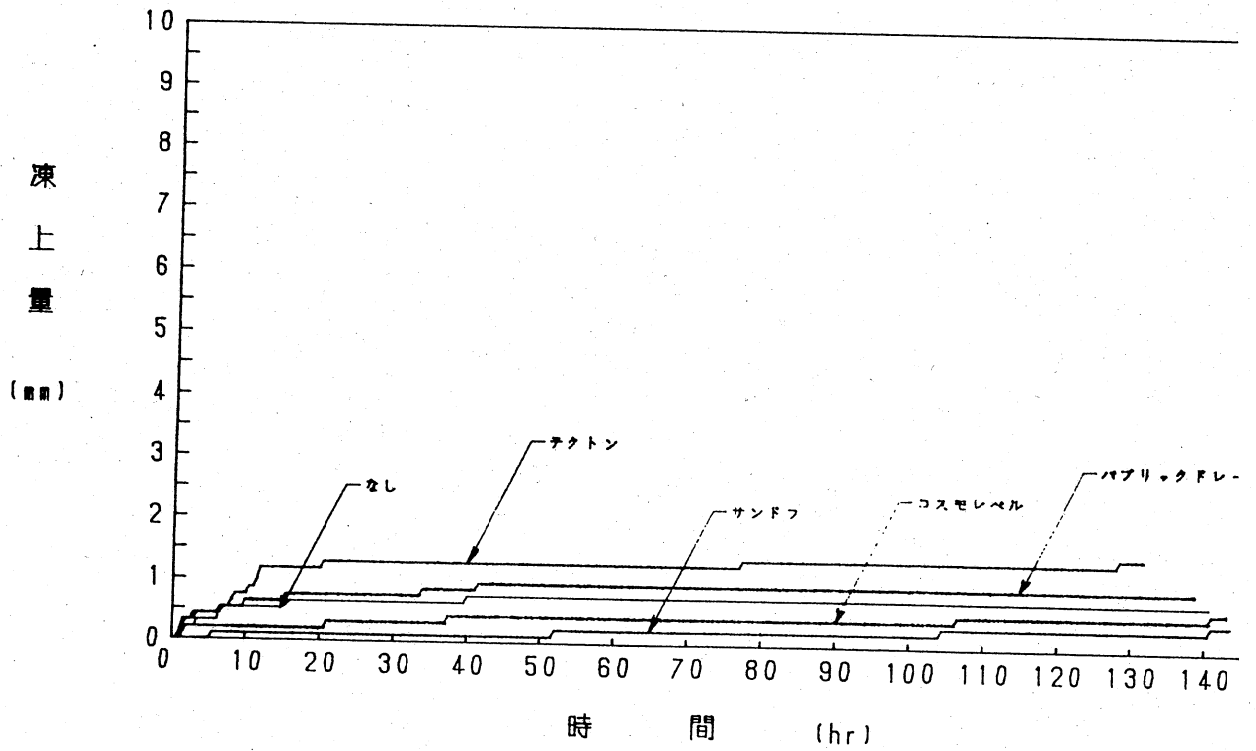


図36 各種ジオテキスタイルの凍上量の経時変化

他方、室内凍上試験では、凍上量と凍結侵入深さの関係から、ジオテキスタイルを土中に敷設する場合、予想凍結線にできるだけ近づけた方がより大きな遮水効果が得られ、そして凍上を抑制できる。凍上量、吸水量の変化より、サンドフ、コスモレベルの遮水効果は期待できるため、凍結時においても凍上量を抑制することができた。また、吸水量と含水比分布に関連性が見られ、サンドフ、コスモレベルには大きなアイスレンズが出現しなかった。

アクリル凍結セルを用いた室内凍上試験によると、テクトンやサンドフを使用した場合、水分張力の上昇増加の勾配が大きいことから遮水効果はあまり期待できなかつた。他方、コスモレベルやパブリックドレーンを使用した場合、上昇勾配が小さいことから比較的早期に増加が始まることから、遮水効果が十分に行われていると考えられる。吸水量の変化より、凍結時におけるサンドフ、パブリックドレーン及びコスモレベルの遮水効果が期待できる。

以上の結果、供試体用の凍結セルの大きさによつて多少結果が異なるが、サンドフ、コスモレベルのような比較的断面の厚い三重構造やマット構造のジオテキスタイルは、下層からの水分供給の割合を減少させ、これによって凍結線上部のアイスレンズの増加を少なくする。また、これらのジオテキスタイルの繊維表面性質と孔隙径も毛管挙動に影響を与えると思われる。

以上三つの試験より、毛管上昇試験で遮水効果の現れたジオテキスタイルは、凍結時においても遮水効果が期待でき、凍上を減少させると考える。すなわち、毛管遮断効果の大きいジオテキスタイルを選択する場合、保水性が高く凍上性の高い試験土を用いると、毛管上昇試験である程度はその凍結時における遮水効果が判別できると考える。この試験で用いたジオテキスタイルの中では、コスモレベル、サンドフ、パブリックドレーンに遮水効果、凍上抑制効果があることが確認できた。

今後は、多くの種類のジオテキスタイルについて、詳細なデータを集積し、凍上軽減に役立つ「しきい圧」と繊維表面性質および孔隙径、織物の厚さの役割を定量化するため、多くの試験法が望まれる。

要 約

寒冷地における高速道路建設が延びるにしたがい、その工事費における凍上対策の占める割合は増加してきている。道路の凍上被害を防止するために、経済的で長期的な安定な方法として、路床土を非凍上性の物質に置き換える方法が、ほとんどを占める。しかし、非凍上性の物質が現地周辺で不足し、捨土用地の確保が困難な問題となっている。このようなことからより経済的な凍上対策工法が必要になってくる。最近、アメリカや日本において、ジオテキスタイルを用いることによって毛管遮断され、凍上抑制される試験結果が報告された。そこで、数種のジオテキスタイルを用いて、3年間を通じた野外試験と毛管遮断のメカニズムを明らかにするために室内試験を行った。

室内試験では、毛管上昇試験と室内凍上試験から、使用したジオテキスタイルの毛管遮断挙動についての評価を行った。毛管上昇試験は、試験土を一定の密度で充填した円筒容器を水槽に入れ、水を底部から吸水させた。ジオテキスタイルは供試体の中間に敷設し、水頭はその位置に設定した。室内凍上試験は、試験土を一定の密度で充填した供試体を凍結セルに入れて、上端 -6°C 、下端 $+4^{\circ}\text{C}$ の一定温度で冷却した。ジオテキスタイルは、予想凍結線の真下に位置するように敷設した。室内試験に用いた各試験土は、帯広畜産大学圃場内から採取された火山灰土が使用された。この試験土は極めて凍上性で保水性の高い土である。

屋外試験では、1989年から1992年の冬季に行われた。試験期間中、水位を一定に保ち、火山灰性砂質土を挿入した数個のライシメータと称する野外土層を使用した。この試験土は、十勝地方の高速道路建設地の近くから採取された凍上性の土である。各ライシメータは、コンクリート性土層の幅 $2.0\text{m}\times 2.0\text{m}\times$ 深さ 1.5m の寸法であり、一定水位が表面から下の 120cm の所に維持された。ジオテキスタイルは、地下水位と土の最大凍結侵入深さの間に敷設された。また、薄いジオテキスタイルによって分離された砂利層も挿入した試験も行った。

結果として、室内試験から2種類の厚いジオテキスタイルは、毛管上昇移動水を遮断する効果を発揮し、凍上を半分以下に抑制した。それらは、厚さが 7.5mm から 10.0mm であり、ポリエステル繊維の三重構造シート（コスモレベル）と樹脂で接着したポリエステル繊維のマット構造（サンドフ）である。しかし、薄いタイプのジオテキスタイル（テクトン）は、凍上抑制効果が認められなかった。また野外試験から、コスモレベルとサンドフは、3年間を通して安定した凍上抑制効果を発揮した。テクトンは、単独使用では凍上抑制効果がないが、砂利層と併用することによってコスモレベルとサンドフと同じように凍上を抑制した。以上から、凍上対策におけるジオテキス

タイル遮水工法は、有力な工法であり、現在のところサンドフがその経済性から、最も有効であると判断される。

最後に、この研究を行うに当たり、日本道路公団試験研究所の土工試験研究室、三島信雄室長、伊藤譲および横田聖哉両研究員に多大の協力と助言を得ましたことに深く感謝致します。

また、当土地資源利用学講座（旧名 開発土木工学研究室）の大学院生、中谷亮治君、矢島謙治君、そして卒業生角岡茂久君（北海道庁農政部勤務）、川崎健史君（日本道路公団勤務）および鈴木義章君（日本道路公団勤務）等を始めとし、多くの学生諸君の協力と助力に感謝いたします。