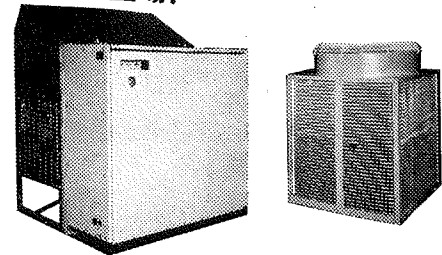


三菱電機 冷蔵・冷凍 クーリングユニット

エアコンなみの手軽さ。
いままでのセントラル方式にかわる
各室パッケージ方式です。

- 大がかりな機械室はいりません
- 収容量は、50・20,000トンまで可能です
- 電源・水配管・ダクトの接続だけでただちに冷却できます
- 既存設備の更新、増強も簡単です
- 密閉形の圧縮機の使用で、静かさはパッケージエアコンなみです
- 寒冷地に最適な空冷タイプも取り揃えました。

空冷式新登場!



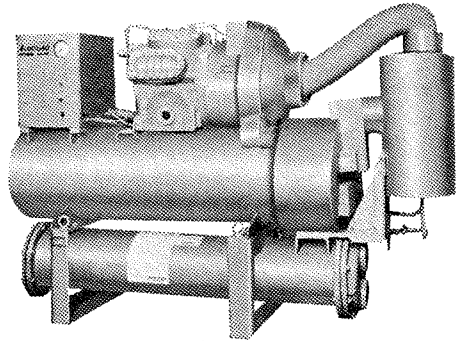
室内ユニット 室外ユニット

空冷式 AFL形<C級冷蔵庫用>3.75~25.4kWまでの8機種
 水冷式 ACL形<C級冷蔵庫用>3.75~25.4kWまでの8機種
 ACR形<C級冷蔵庫用>11.2~22.5kWまでの4機種
 ACS形<F級冷蔵庫用>5.5~78kWまでの9機種

三菱電機 フラインクウーラ

多室冷蔵庫に最適!
見なおされた間接冷却方式です。

- 現地組立てによる直膨方式では困難であった全自動運転が可能になりました。
- 装置の信頼性が向上しました。
- より小さなユニットで蓄熱運転ができます。
- 温度の異なる多数の冷蔵庫も1台のユニットでコントロールできます。
- 最少の機械台数ですむので、ムダが少なく経済的です。



BCL形<+5~-20℃>15~180kWまでの8機種
 BCR形<-15~-30℃>15~180kWまでの8機種
 BCS形<-20~-60℃>19~120kWまでの6機種

特長

- **全自動運転**
ボタンひとつの全自動運転方式。運転資格はいりません。
- **高経済性**
省力化により人件費を、また蓄熱運転(フラインクウーラ)により電気代を削減できます。
- **低公害**
低騒音しかも悪臭をなくしました。市街地での運転も安心です。

生鮮食品から加工食品まで、すべての食物を新鮮に保つこと。それが冷蔵・冷凍設備の最も重要な役割です。
三菱電機の低温機器は、新鮮さを保つための安定性のある低温運転はもちろん、全自動運転・高経済性・低公害など、省力化と高信頼性を実現。市場の要求にお応えしています。

三菱電機 低温機器シリーズ

カタログ請求券
低温機器 冷蔵
7802
あなたの電話番号
をご記入ください。



● 詳しい資料のご請求は請求券をハガキに貼って、〒100 東京都千代田区丸の内2-2-3 三菱電機(株)冷蔵調査部 業務グループへどうぞ ● お問い合わせはお電話でお近くの三菱電機営業所へどうぞ 東京(03)218-2961/大阪(06)347-2377/名古屋(052)565-3233/九州(092)721-2184/札幌(011)212-3731/東北(0222)64-5642/北陸(0764)31-8211/中国(0822)48-5409/四国(0878)51-0001/新潟(0252)41-7224 静岡(0542)81-6281/長崎(0956)81-6101代表

7802-173-51-15R

研究論文

CaCl₂ ブラインによる凍土の侵食に関する基礎的研究*

Studies on the thawing of Frozen Soil by CaCl₂ Brine

高 志 勤**
Tutomu Takashi
生 頼 孝 博**
Takahiro Ohrai
山 本 英 夫**
Hideo Yamamoto
野 木 明**
Akira Nogi

Summary

The erosion that frozen soil thaws CaCl₂ solution (brine) as a refrigerant in the freezing method is examined theoretically and experimentally. If solute transportation is owing to the diffusion of CaCl₂ brine, the erosion length is obtained as follows by solving the diffusion equation as the uni-directional unsteady boundary problem,

$$X = \alpha \sqrt{t}$$

Where X is the erosion length, t is the elapsed time and α is the eroding front penetration coefficient determined from frozen soil temperature, the diffusion coefficient and the concentration of the brine.

When frozen soil temperature is lower than -10°C , this exact solution agrees well with the uni-directional approximate solution assuming that the concentration distribution of brine is steady in the eroded region, and then the approximate solution extended to the two-dimensional (cylinder) and the three-dimensional (sphere) erosion of frozen soil are convenient practically.

Experiments were performed upon ice, frozen sand and frozen clay. Because of the natural convection caused by the instability of solute concentration, the downward erosion advanced faster than the upward one. As for frozen clay, there were no difference between upward and downward eroding rate. The eroding rate of three samples are nearly equal to each other in the upward erosion and in good agreement with the exact solution. The weaker CaCl₂ brine concentration, the smaller the eroding rate is. Water content of clay gave little influence to the eroding rate.

CMC (Na-Carboxy Methyl Cellulose) increases viscosity of pore water and decreases permeability of brine. Therefore as for frozen sand, it was found that adding CMC to the pore water before freezing restrains the erosion caused by the convection.

1. 緒言

人工的に地盤を凍結して土木工事を行う凍結工法^{1)~4)}では、凍土の耐力性及び遮水性が大きいことを利用するのであるが、近年、土木工事の複雑化と相俟ってこの工法が適用される機会が多くなってきた。地盤の凍結方式は低温ブライン循環方式(冷凍機方式)

と液体窒素方式があり、前者は地盤中に埋設した凍結管に低温のブラインを循環させ、後者は液体窒素(LN₂)を直接送り込んで地盤を凍結する。凍結規模が増大し、凍結期間が長期化すると、経済性及び安定

* 日本冷凍学会学術講演会(昭和52年11月16日)にて一部を発表
** 株式会社 精研
原稿受付 昭和52年12月3日

性の面からブライン循環方式が採用される。従って、現在では大部分の凍結工法ではブライン循環方式であると云うことができる。このとき循環冷媒として、安価であり熱的性質に優れている CaCl₂ 溶液 (CaCl₂ ブライン) が用いられる。

地中に埋設された凍結管は、熱応力及び凍結の進行に伴って発生する凍上力によって管の継ぎ目の溶接部分で折損することが時々ある。現在では、凍結管の接続方法が改善され凍結管の折損は少なくなり、又、折損した場合でもその発見及び対策が確立してはいるもののある程度の CaCl₂ ブラインの流出は避けられない。この場合、流出した CaCl₂ ブラインは凍土を融解し侵食するであろう。侵食によって凍土の損傷が大きくなると特に遮水性の面から危険な状態になる。大量に漏洩したブラインの処置については、非常に煩雑な方法と、それに要する長期の準備期間が必要であったと云うカナダの報告がある⁵⁾⁶⁾。このように凍土の侵食は重要な問題ではあるが、これまでほとんど研究されていない。

CaCl₂ ブラインによる凍土の侵食を支配する影響因子は、

- i) ブライン及び凍土の温度
- ii) ブラインの濃度
- iii) 凍土の種類 (砂, シルト, 粘土など)
- iv) 凍土の物理的性質 (空隙率, 含水比, 飽和度等)
- v) 侵食の方向
- vi) 地下水流等の地盤の状態

などが挙げられる。侵食面への溶質の移動は拡散及び対流によって生じるものと考えられる。一般に、多孔性媒質内の溶質の移動は複雑な問題で未知部分が多いが、本研究では、侵食の原動力が拡散現象によるものとし、拡散方程式に従う非定常の移動境界値問題として理論解析を行った。又一方、上述の影響因子について侵食実験を行い、CaCl₂ ブラインによる凍土の侵食を全体的に把握することを試みた。得られた結果を考察するとブラインの濃度差による自然対流が生じないときは理論と実験はよく一致することがわかった。又、自然対流が生じるときは土の間隙水の粘性を予め増加しておくことによって侵食を抑制しうるということがわかった。

2. 理論解析

凍土と CaCl₂ ブラインが接しているとき、系全体が 0°C 以下であっても凍土中の水は徐々に融解し侵食が進行する。このとき生じた侵食領域内ではブライ

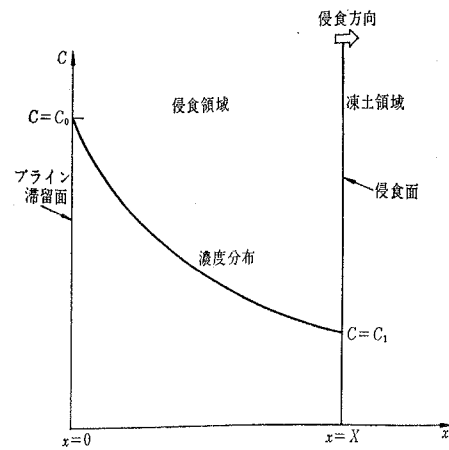


図1 一次元の計算モデル

ンの濃度勾配が生じる。この勾配に対応する密度の分布が重力に対して安定な場合には、溶質は濃度勾配に比例して移動し拡散方程式に従うであろう。従って、ここでは溶質の移動が拡散だけで生じるものとして理論解析する。

解析に用いた仮定は次の7つである。

- 仮定-1 凍土は水で飽和している。
- 仮定-2 水に対する CaCl₂ の拡散係数は濃度に依存せず一定である。
- 仮定-3 侵食解凍に伴う潜熱の吸収を無視する。
- 仮定-4 凍土と CaCl₂ ブラインの温度は常に等しい。
- 仮定-5 凍土の融解に伴う体積減少は無視する。
- 仮定-6 解凍した飽和土内では拡散方程式が成立する。
- 仮定-7 侵食の原動力は CaCl₂ の拡散移動のみによるものとし、重力による対流は生じないものとする。侵食領域内では上述のようにブラインの濃度勾配があり小さい濃度の溶液の上に大きい濃度の溶液がくるような場合には重力平衡に対して不安定となり、土のような多孔性媒質内でも対流が生じ、これによる溶質分子の輸送を無視することができない。これについては実験の項で吟味する。

2.1 一次元の侵食

1) 計算モデル及び微分方程式

図1に一次元の計算モデルを示す。半無限に広がる凍土が x=0 で定温の CaCl₂ ブラインと接している (この面をブライン滞留面と呼ぶことにする) ここではブラインの濃度は常に一定に保たれるとする。このとき侵食面におけるブライン濃度はその温度に対応す

る水点濃度になっていなければならない。侵食面後方の侵食領域内では溶質は拡散によって移動し次の拡散方程式に従う (脚註)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、C は CaCl₂ 濃度 (単位体積中の溶質重量)、t は時間、x はブライン滞留面よりの距離、D は拡散係数である。

2) 初期条件

$$t=0 \text{ で } X=0 \dots\dots\dots (2.2)$$

X はブライン滞留面から侵食面までの距離 (侵食長) である。

3) 境界条件

ブライン滞留面ではブラインの濃度は一定に保たれるから、

$$x=0 \text{ で } C=C_0 \dots\dots\dots (2.3)$$

侵食面では

$$x=X \text{ で } C=C_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

この他に侵食面上で満足されなければならないもう一つの条件がある。x=X で dt 時間に単位面積の侵食面に拡散してくる溶質の量は

$$-nD \frac{dC}{dx} \Big|_{x=X} dt$$

である。次に dt 時間に dX だけ侵食が進行して濃度 C₁ の侵食土になる為には単位面積の侵食面当り

$$nC_1 dX$$

の溶質が必要になり、両者は等しくならなければならないから、

$$nC_1 dX = -nD \frac{dC}{dx} \Big|_{x=X} dt$$

$$\therefore C_1 \frac{dX}{dt} = -D \frac{dC}{dx} \Big|_{x=X} \dots\dots\dots (2.5)$$

を得る。(2.5) 式は時間とともに移動する侵食面 x=X で満足されなければならない境界条件である。

さて、これまでの所論より分るように、微分方程式 (2.1) 式を初めとして初期条件 (2.2)、境界条件 (2.3)、(2.4)、(2.5) 式は土又は多孔性媒質内であることをあらかずパラメーターを含んでいない。このことは凍土の侵食も純水の侵食も侵食領域内で重力対流が生じ

(脚註 (2.1) 式は厳密に云うと土粒子を含まない溶液に対して成立する方程式である。空隙率 n の飽和土内では

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = nD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

となるべきであるが両辺の n は消去されて (2.1) 式を得る。)

ない限りは同じ微分方程式、初期条件、境界条件に従うことを示している。従って、これを解いて得られる侵食の速度は土でも純水でも同じであると云う興味ある事実が解を得る前にわかる。

4) 解

解の導出過程を省略して結果だけを示すと、侵食領域内の濃度分布は次のようにならわされる。

$$C = C_0 - (C_0 - C_1) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{D}}\right)} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに、erf(y) は確率積分で

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\lambda^2} d\lambda \dots\dots\dots (2.7)$$

として定義されるものである。

α は次の超越方程式を満足する根として与えられる。

$$\frac{\alpha}{2\sqrt{D}} = \frac{C_0 - C_1}{2C_1} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4D}} \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{D}}\right) \dots\dots\dots (2.8)$$

さて、ある時間 t に於ける侵食面 X の位置は (2.4) の境界条件と (2.6) 式から

$$X = \alpha \sqrt{t} \dots\dots\dots (2.9)$$

として与えられる。

5) 解の吟味及び計算例

CaCl₂ は結晶水を含みしかも潮解性が大きく、その溶液は濃度 C で調節することがむずかしく、普通比重 γ で調節し表現される。図2は CaCl₂ ブラインの状態図を示したものである。凍結工法で用いられる CaCl₂ ブラインの比重は γ=1.27 (C=36.09%)、場合によっては共晶点比重 γ=1.286 (C=38.48%) も用いられることがあるが、この値を超えると図2より明

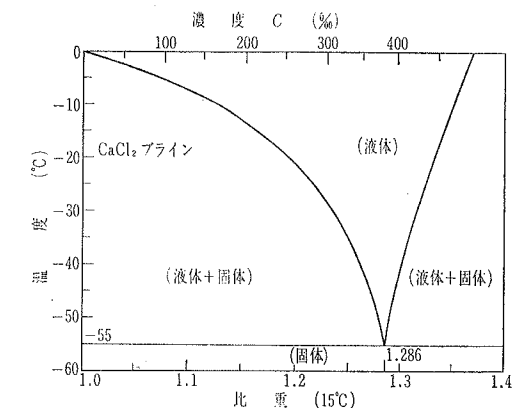


図2 CaCl₂ ブラインの状態図

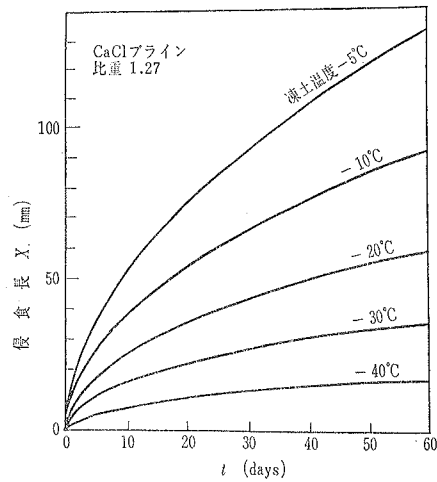


図3 侵食の経時変化

らかなように、氷点は急上昇するので用いられない。
さて、ブライン比重 $\gamma=1.27$ について凍土温度をパラメーターとした場合の凍土の侵食の経時変化を(2.8)(2.9)式によって計算した結果を図3に示す。この比重におけるブラインの氷点は -43.6°C であるから、凍土がこの温度の場合侵食は進行しないが、 -40°C になると60日で14.0mm侵食し、凍土温度が高くなると侵食は速くなる。従って、凍結工事においてブラインの流出による侵食の被害を小さくするためには凍土の温度を上げないようにしなければならない。尚、理論解では凍土温度が 0°C になると α が無限大になるがこれは侵食融解に伴う潜熱の吸収を無視(仮定-3)した為であり実際には解凍によって温度が下り侵食は抑制されることになる。

次に凍土温度が -10°C 及び -20°C における α とブラインの比重の関係を図4に示す。系の温度に対応する融点比重 γ_1 は -10°C では $\gamma_1=1.13$, -20°C では $\gamma_1=1.195$ である。ブライン比重がこの値のとき $\alpha=0$ となり、この値より増加するに従い α が大きくなり侵食速度が速くなるのがわかる。従って工事に用いるブラインの比重はブラインが氷結しない範囲でできるだけ小さくすることが望ましい。

拡散係数は温度に依存し、極く僅かではあるが温度にも依存することが知られている。計算に用いた CaCl_2 の拡散係数は 20°C において $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ (0.3 mol/l 溶液) の値を $D/T=\text{const.}$ として温度についてのみ補正したものである。Tはケルビン温度である。即ち低温における拡散係数は

$$D = \frac{T}{273+20} \times 1.1 \times 10^{-5} = 3.75 \times 10^{-8} \times T$$

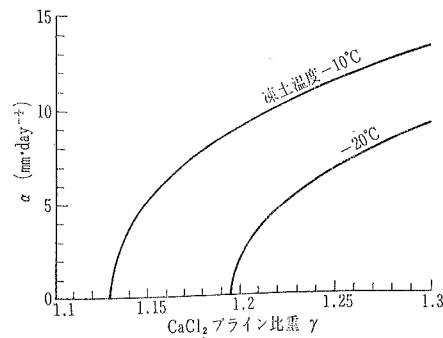


図4 α とブライン比重の関係

$$(\text{cm}^2/\text{sec}) \dots\dots\dots (2.10)$$

である。しかしながら、Eyring等⁷⁾は理論と実験の両方から $D\mu/T=\text{const.}$ になることを示した。ここに、 μ は溶媒の粘度である。従って、高濃度溶液の常温 T_0 における拡散係数 D_0 及び粘度 μ_0 がわかれば低温におけるDは

$$D = \frac{D_0 \mu_0}{\mu} \frac{T}{T_0} \dots\dots\dots (2.11)$$

として計算する方がより正確であろう。しかしながら、 0°C 以下の μ は測定されておらず上式による温度補正は不可能である。いずれにしても、実用に際しては実測によって得られたDを用いることが望ましい。

2.2 一次元の近似解

前節までは凍土侵食の一次元の厳密解について述べた。本節では近似解について述べ近似解と厳密解との差がどの程度になるかを比較してみる。両者の結果が実用の範囲内で一致するならば、二次元、三次元への拡張も容易にできる可能性がでてくることになる。

さて、ここでは侵食領域内の濃度分布が定常状態のそれに等しくなっていると仮定する。即ち、一次元の場合には侵食領域内の濃度勾配を直線として計算するわけである。このとき侵食面の境界条件(2.5)式は

$$C_1 \frac{dX}{dt} = D \frac{C_0 - C_1}{X} \dots\dots\dots (2.12)$$

となり、これが侵食長 X を決定する微分方程式となる。

侵食長 X は
$$X = \alpha' \sqrt{t} \dots\dots\dots (2.13)$$

ここに α' は
$$\alpha' = \sqrt{2D \frac{C_0 - C_1}{C_1}} \dots\dots\dots (2.14)$$

となり形の上では厳密解の(2.9)式と一致する。ブライン比重 $\gamma=1.27$ の場合の α, α' と凍土温度の関係を図5に示す。

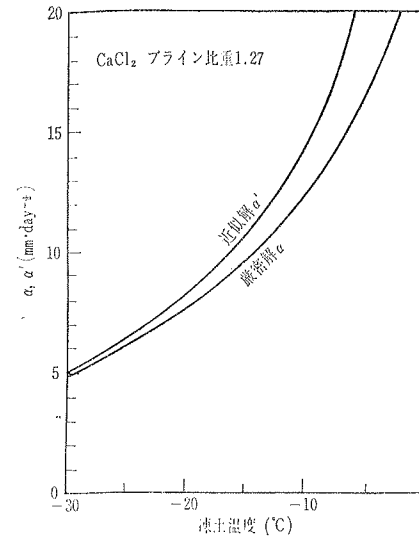


図5 α, α' と凍土温度の関係

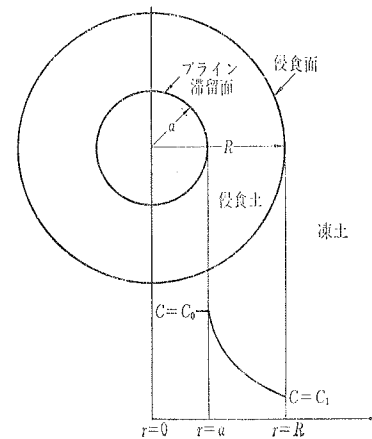


図6 二次元の計算モデル

図より明らかなように、凍土温度が高くなる程、厳密解と近似解の差が大きくなる。これは凍土温度が高くなる程、侵食された土の中の濃度勾配が大きくなり非定常性が強くあらわれることによる。しかしながら凍土温度が -10°C 以下では実用の範囲内で近似解と厳密解はよく一致すると考えることができる。

従って、二次元、三次元問題に拡張して侵食の問題を検討してみよう。

2.3 二次元(円柱)の近似解

ここでは一次元の近似解を求めたと同じ方法で二次元の場合の近似解を導出する。即ち、侵食領域内の濃度勾配は定常になっているとすると、次の二次元の拡散方程式を満足しなければならない。図6に示すように半径 a のブライン滞留面があり、侵食面を R とす

ると

$$D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) = 0 \dots\dots\dots (2.15)$$

境界条件は

$$r=a \text{ で } C=C_0 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$r=R \text{ で } C=C_1 \dots\dots\dots (2.17)$$

解の導出過程を省略して結果だけ示すと、侵食領域内の濃度分布は

$$C = \frac{C_0 \log R - C_1 \log a}{\log \frac{R}{a}} - \frac{C_0 - C_1}{\log \frac{R}{a}} \log r \dots\dots\dots (2.18)$$

となる。

侵食面では一次元と同様に次の境界条件を満足しなければならない。

$$C_1 \frac{dR}{dt} = -D \frac{dC}{dr} \Big|_{r=R} \dots\dots\dots (2.19)$$

そこで侵食半径は(2.18), (2.19)式より

$$\frac{1}{2} \frac{R^2}{a^2} \log \frac{R}{a} - \frac{1}{4} \left(\frac{R^2}{a^2} - 1 \right) = D \frac{C_0 - C_1}{C_1 a^2} t \dots\dots\dots (2.20)$$

を満足しなければならないからこの方程式を R について解くことによって得られる。

2.4 三次元(球面)の近似解

前節と同じ考え方で侵食領域内の濃度分布は次の微分方程式を満足しなければならない。

$$D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) = 0 \dots\dots\dots (2.21)$$

境界条件は二次元と同じである。

解の導出過程を省略して結果だけを示すと、侵食領域内の濃度分布は

$$C = \frac{C_0 a - C_1 R}{a - R} + \frac{aR(C_0 - C_1)}{R - a} \frac{1}{r} \dots\dots\dots (2.22)$$

となる。

侵食面では(2.19)式と同じ境界条件を満足しなければならない。侵食半径 R は

$$\frac{1}{3} R^3 - \frac{1}{2} a R^2 + \frac{1}{6} a^3 = Da \frac{C_0 - C_1}{C_1} t \dots\dots\dots (2.23)$$

を満足しなければならないから、この方程式を R について解くことによって得られる。

2.5 計算例

凍結工法に用いられる凍結管は普通直径 $3\frac{1}{2}$ B (外半径 5.08 cm) のSGP管である。従って、ここでは $3\frac{1}{2}$ B の円筒及び球について侵食面進行の時間的変化を計算し、一次元の厳密解及び近似解と比較する。図7はブライン比重 $\gamma=1.27$, 凍土温度 -20°C の場合

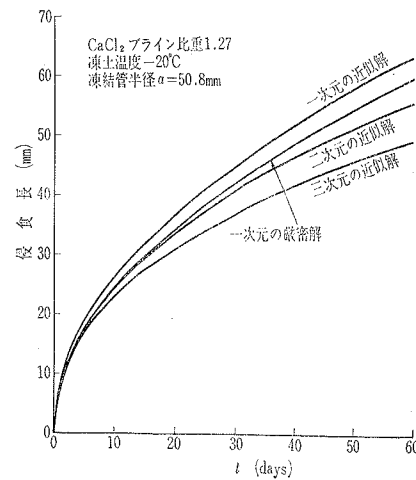


図7 それぞれの解における侵食の経時変化

のそれぞれの解についての計算結果を示したものである。当然のことながら一次元の近似解が最大となり三次元で最小になるが大きな差ではない。凍結管の折損によるブラインの流出は三次元としてモデル化して計算できるが、安全性を考えると一次元の問題として計算した方がよいと考えられる。例えば2年もの間人工的に地盤を凍結するとき、凍結管の折損に対して何等対策されず、折損部に常に新しいブラインが供給された場合を一次元の厳密解を用いて計算してみると、 $\gamma=1.27$ 、凍土温度を -20°C とすると、侵食長は 20.9 cm となる。これは造成される凍土壁が数 m であることを考えるとほとんど問題にならないことがわかる。

3. 凍土及び純水のブラインによる侵食実験

3.1 実験の概要

既に述べたように、純水も凍土も解凍領域内に対流が生じない限りは同じ侵食速度を示す筈である。従って、実験では、先づ純水について予備実験を行い、続いて砂、粘土の順に実験を行った。

これ等三種類の試料について普通凍結工法に用いられる CaCl_2 ブライン 比重 $\gamma=1.27$ を中心にして CaCl_2 ブライン濃度の影響を調べた。

侵食領域内の濃度分布は侵食面で最小、ブライン滞留面で最大となる。従って、侵食が上方に進む場合（上方侵食）は重力に対して安定、下方に進む場合（下方侵食）は不安定な分布になり、後者は重力対流が生じ侵食が加速されるものと考えられる。そこで、上記三種類の試料及びブライン濃度について上下2方向の侵食を調べ理論と比較検討した。

表1 試料土の物理的性質

	粒度特性 (%)		土粒子重 Gs	含水比 W (%)	乾燥密度 (γ_d) (g/cm^3)	空隙率 n
	シルト	砂				
豊浦標準砂	0.44	99.56	2.645	25.5	1.375	0.48
組橋粘土	41.50	5.85	2.64	81.8 54.9	0.858 1.173	0.675 0.556

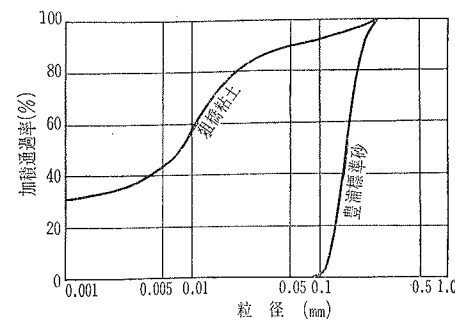


図8 試料土の粒度分布

3.2 試料及び供試体の製作

試料は蒸溜水、豊浦標準砂及び東京都九段下で採取された洪積世の上部東京累層に位置する組橋粘土を凍結したものである。豊浦標準砂及び組橋粘土の物理的性質を表1に、粒度分析結果を図8に示す。

純水の作成は、煮沸することによって脱気された蒸溜水を直径 30 mm、長さ 120 mm（上向侵食用）と 220 mm（下向侵食用）の底蓋が取り付けられた塩ビ製シリンダー及び侵食面の観察ができるように透明アクリライトシリンダーに満たし、低温室で急速凍結し凍結完了後、実験用冷蔵庫内で一昼夜放置し所定の実験温度になるようにした。

豊浦標準砂凍土の作成は、純水同様脱気した蒸溜水を上記シリンダーに満たし、振動を加えながら砂を徐々に沈降させて沈下がおさまったことを確認した後急速凍結し実験温度にした。でき上がった凍土を観察すると一様なコンクリート状であった。

組橋粘土のように細粒成分を多く含む土が凍結するとき、凍結面では吸水を伴ない、熱流方向に直角に ice lens を形成して含水比がもとより大きくなる所謂凍上現象が見られ、凍結した凍土はもはや一様性を失ってしまう。この凍上は、土の有効応力 σ 及び凍結速度 U に依存し⁹⁾、 U が大きくなれば凍上は小さくなり ice lens も少なく小さくなる。このように一様性を失った凍土が CaCl_2 ブラインによって侵食するとき、その状態は非常に複雑になるであろう。この様な理由から、組橋粘土では次の様にして凍結を行った。まず試料を 420μ ふるいを通過するまで乳ばち

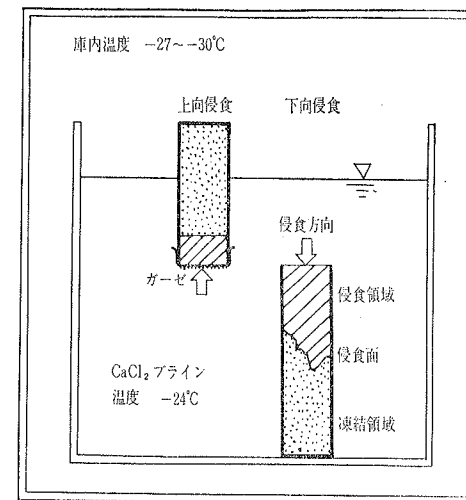


図9 実験装置概略図

でときほぐした後蒸溜水を加えて含水比がほぼ50%及び80%の二種類にした。この様に準備した試料をアクリライト・シリンダーにつめ凍結速度 10 mm/h で一次元的に凍結を行った。凍結完了後凍土を観察すると ice lens は見られず予想通りほぼ一様なコンクリート状であった。

3.3 実験装置及び方法

図9に実験装置の概略を示す。容積 20 l のブラインバスに 15 l の CaCl_2 ブラインを入れ、庫内温度が $-27 \sim -30^\circ\text{C}$ である冷蔵庫内に収納した。得られるブライン温度はほぼ -24°C である。

侵食実験は図9に示したように凍結された試料をブライン中に沈めて行った。水では、測定時に侵食領域内の濃度分布をみだす為1回の測定につき試料を1本とした。従って、1濃度1方向の実験で合計15本（塩ビ製12本アクリル製シリンダー3本）とし約20日間に分割して測定を行った。

侵食長はノギスで上向侵食の場合4点、下向侵食の場合は最大値と最小値を測定しそれぞれ平均値を用いた。

組橋粘土では、予備実験を行い、侵食面がアクリライトシリンダーの外側から視察できるため同じ試料を繰返し測定を行っても侵食の進行に影響を与えないことを確認した後1シリーズで3本を継続して20日間測定し、その3本の平均値を侵食長とした。

砂及び粘土の上向侵食の場合、侵食土が底になりそのままでは落下するのでガーゼを取り付けてこれを防止した。

ブライン濃度は比重 γ で調節を行った。 γ は実験中

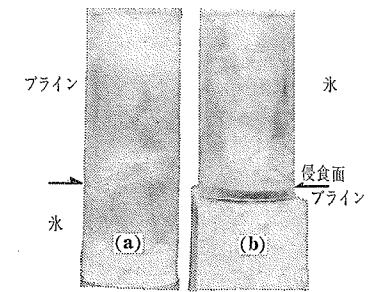


図10.1 純水

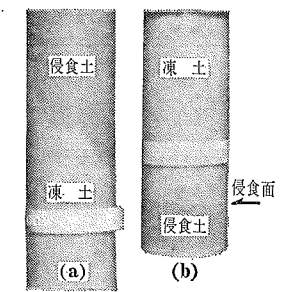


図10.2 砂

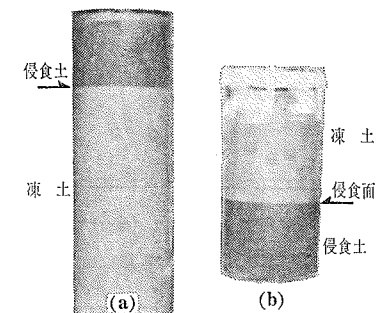


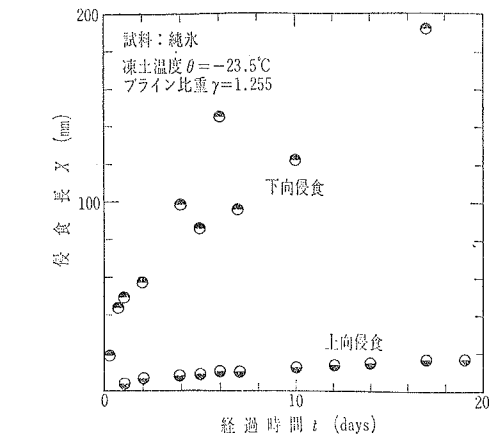
図10.3 粘土
図10 水、砂および粘土の侵食面

わずかに薄くなるので実験前後の値を平均したもので表示した。

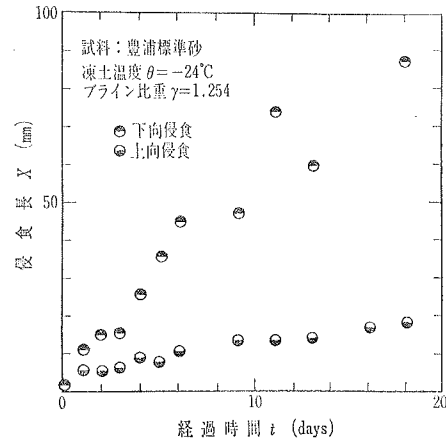
4. 実験結果及び考察

4.1 侵食方向が異なる場合の侵食面の形態

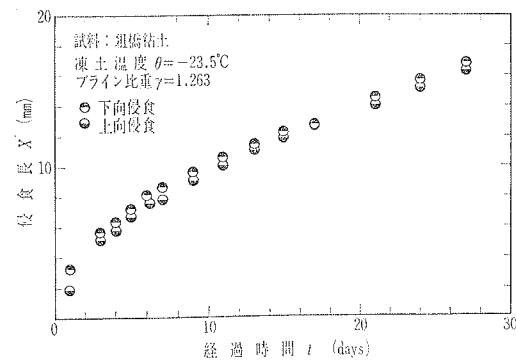
水、豊浦標準砂及び組橋粘土における上下の侵食方向が異なる場合の侵食面の形態を各々図10.1、図10.2、図10.3に示す。写真中それぞれ (a) は下向侵食、(b) は上向侵食を示す。写真より明らかなように、上向侵食の場合はいずれもブライン液面（シリンダー先端＝ブライン滞留面）に平行で平坦な鏡面を呈している。これに反して下向侵食の場合、水と砂では侵食面は凹凸状を呈し、その山の部分は比較的鋭い edge になっている。しかしながら、粘土では、上向侵食と



(a) 純水



(b) 豊浦標準砂



(c) 組橋粘土

図11 侵食方向が異なる場合

同様に下向侵食も侵食面は水平であり鏡面を呈している。このことは拡散現象による侵食は一様に生じ、一方、対流が生じた場合の侵食面は水流に対応して凹凸状を呈すると考察できる。しかも、1つの谷と山は自然対流の cell dimension を示すと考えられ、氷で数

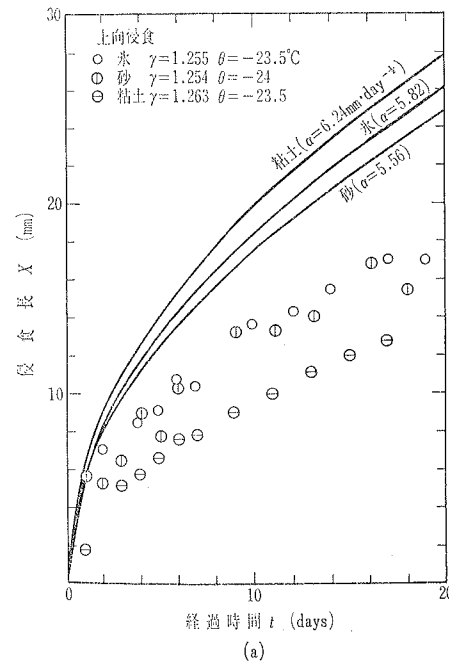
mm、砂では数 cm の order であった。粘土では対流の影響が非常に小さいもしくは全く生じなかったものと考えられる。

4.2 侵食方向が異なる場合の侵食速度

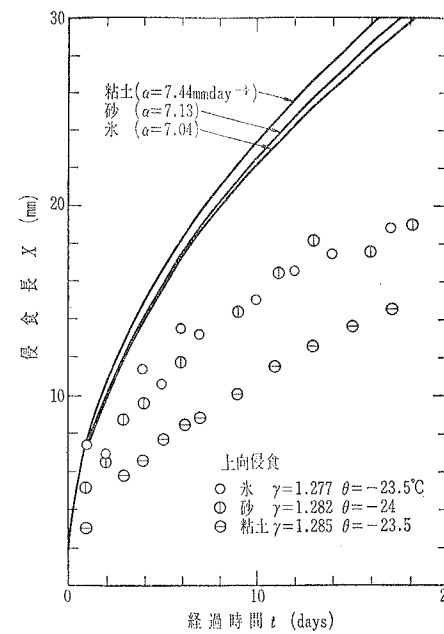
侵食方向が異なる場合の侵食の経時変化を図11(a)に純水、図11(b)に砂、図11(c)に粘土を示す。

侵食速度は上向侵食よりも下向侵食の方が大きくなり、この傾向は粘土、砂、氷の順に顕著になり前節の侵食面の形態に対応している。

図12(a)及び図12(b)は上向侵食の場合の氷、砂、粘土のブライン濃度がほぼ同じものを集めて比較して示したものである。氷と砂はほぼ一致しているが粘土ではいずれも小さくなる。この場合溶質は拡散によって移動するが、砂の様に平均動水通路径が大きい場合には氷の侵食の様に均一媒質内での拡散と同様に扱えるが、粘土のように空隙率が大きくても平均動水通路径が小さい場合には土粒子の存在は拡散に影響を与えるものと考えられる。図中実線はそれぞれの実験におけるブライン濃度及び凍土温度を用いて α を計算し理論曲線を描いたものである。実験データは理論より小さくなるが傾向的に一致している。この傾向をもう少し詳しく検討する為に、横軸に \sqrt{t} をとってデータを整理したものが図13(a)、図13(b)である。両図とも実験結果は \sqrt{t} に対して直線的に増加していることがわかる。氷と砂及び粘土について近似直線



(a)



(b)

図12 理論と実験の比較(上向侵食)

を描くと粘土では原点を通らない。この理由は、粘土は含水比が大きく熱伝導率が小さい為に侵食初期では侵食速度が大きく融解に伴う潜熱の吸収によって凍土温度が降下し侵食速度が遅くなったと考えられる。これ等の直線から実験による侵食面進行係数 α_{emp} を求め図13(a)、(b)中に $\alpha_{emp} \sqrt{t}$ を実線で示す。得られた α_{emp} を用いて (2.8) 式から逆に拡散係数 D_{emp} を求め D_{emp}/T' を計算したものを表2に示す。粘土の D_{emp} は砂の約1/2まで小さくなっていることがわかる。氷、砂、粘土の D_{emp}/T' は実験の範囲内の濃度ではほぼ一定であり、任意の凍土温度 T における拡散係数は $D = D_{emp} T/T'$ で計算することができる。

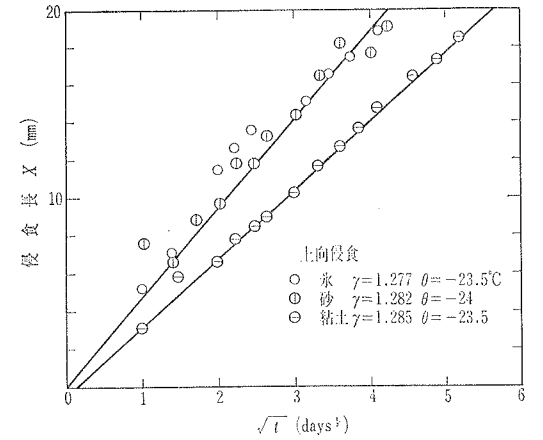
図14は下向侵食の場合の氷、凍結砂及び凍結粘土の経時変化を示したものである。土中における対流は土の含水比や空隙率に対する依存性は小さく、透水係数

表2 α, D の理論値および実験値

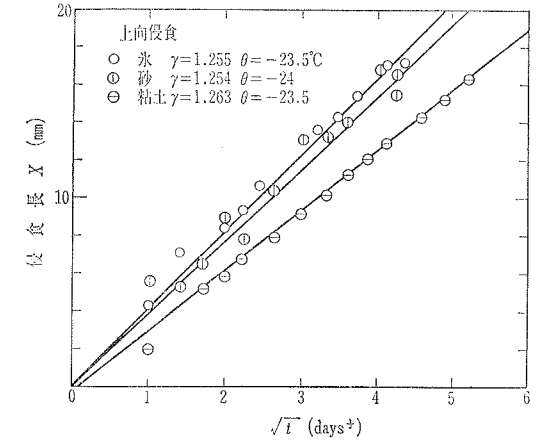
	ブライン比重 γ	凍土温度 θ (°C)	α (mm day ^{1/2})		D (cm ² /sec)		D_{emp}/T' (cm ² /sec°C)
			計算値	実験値	計算値	実験値	
氷	1.255	-23.5	5.82	4.10	9.37×10^{-6}	4.65×10^{-6}	1.865×10^{-8}
	1.277	-23.5	7.04	4.90	9.37	4.55	1.824
	1.282	-24.0	7.13	4.90	9.35	4.39	1.763
砂	1.254	-24.0	5.56	3.85	9.35	4.53	1.818
	1.282	-24.0	7.13	4.90	9.35	4.39	1.763
粘土	1.263	-23.5	6.24	3.0	9.37	2.08	0.832
	1.285	-23.5	7.44	3.65	9.37	2.16	0.867

4.3 ブライン濃度の影響

CaCl₂ ブラインの濃度が異なる場合の凍結砂の上向侵食を図15(a)、下向侵食を図15(b)に示す。いずれの場合にも濃度が小さくなると侵食は小さくなる。前節で得られた拡散係数を用いた理論曲線を図15(a)に示す。比較的低温の場合にも両者は良好な一致を示している。



(a)



(b)

図13 Xとsqrt(t)の関係

k に大きく依存する。 k が小さくなると対流は抑えられ拡散係数よりも小さくなると拡散現象が卓越してきて侵食速度は上向の場合に近づくと考えられる。粘土中の CaCl₂ ブラインの透水係数は低温において $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec、砂では 10^{-3} cm/sec のオーダーである。図より明らかなように粘土の侵食は極端に小さくなりほぼ上向侵食に近づいていることがわかる。

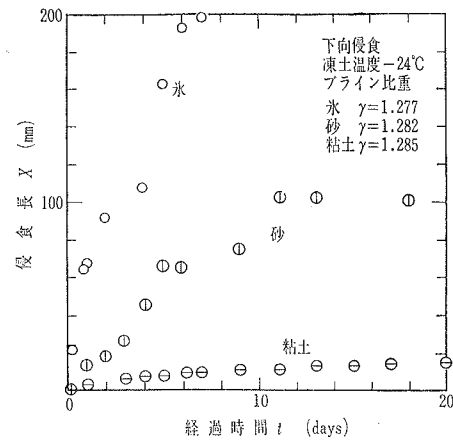


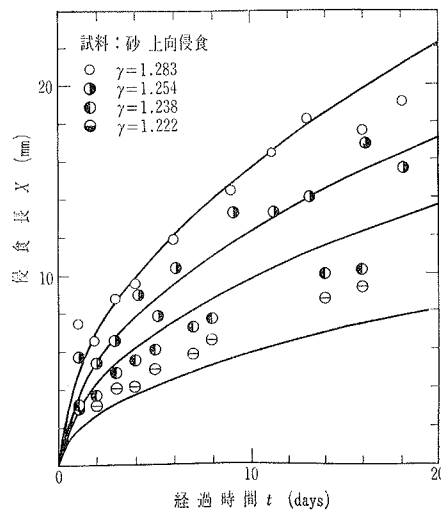
図14 試料が異なる場合(下向侵食)

4.4 含水比が侵食速度に及ぼす影響

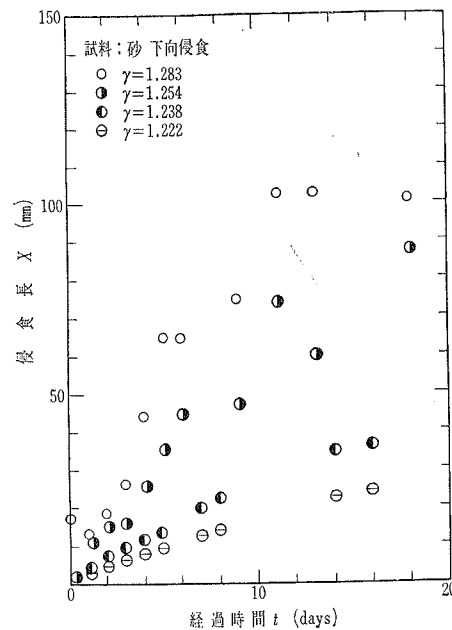
粗礫粘土について含水比が異なる場合の上向侵食を図16(a), 下向侵食を図16(b)に示す。両図ともに含水比が異なっても侵食速度はほとんど同じである。土の物理的性質には相関関係があり含水比が小さくなると、空隙率や透水係数も小さくなるが4.2節で示したように粘土で下向侵食の場合対流作用は僅小となり、主として拡散現象によって溶質が移動するため、これ等物理定数にはほとんど影響されないものと考えられる。

5. 侵食を抑える一方法

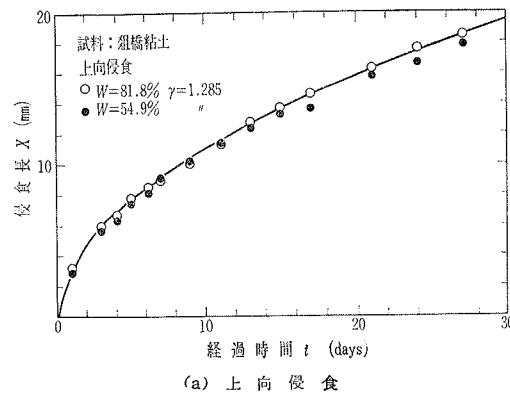
凍結工法が対象となる地盤は、粘土やシルトからなる軟弱な粘性土がほとんどであるが、砂質地盤に採用されることも少なくはない。粘性土における侵食は前



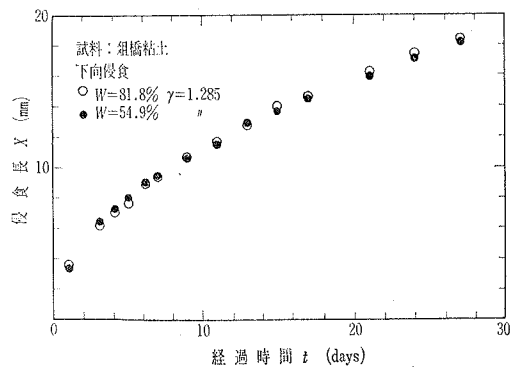
(a) 上向侵食



(b) 下向侵食
図15 プライン濃度の影響
(実線は実測されたDを用いて計算された理論線を示す)



(a) 上向侵食



(b) 下向侵食
図16 含水比の影響
(実線は実測されたDを用いて計算された理論線を示す)

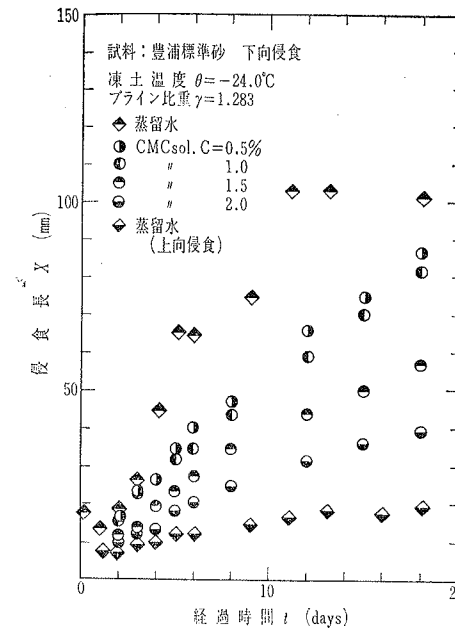


図17 砂の侵食抑制実験結果

節で得られた結果から方向性がほとんどなく、拡散方程式に従い、侵食速度は非常に小さく、現地盤での侵食はほとんど問題にならないが、砂質土のように透水係数が大きくなると侵食速度に方向性があり、対流が生じた場合には侵食は大きくなることがわかった。このことから、砂質土の透水係数を小さくしてやれば対流が抑えられ侵食速度が小さくなると考えられる。

砂質地盤の透水係数を物理的に小さくすることは困難であるが、間隙水の粘度μの増加によって同様の効果が得られる。そこで、砂の間隙水の粘度を増加させて凍結し解凍後はもとの粘性液にもどるような添加物を用いて侵食実験を行い侵食抑制効果を調べた。

用いた添加物はCMC(セニ素グリコール酸ナトリウム)である。

図17は間隙水のCMC濃度0.5%(26.0 cps), 1.0%(76.5 cps), 1.5%(233 cps), 2.0%(670 cps)の場合の実験結果を間隙水が水の場合のものと比較して示したものである。図より明らかなように凍結前の間隙水の粘度が増加することによって侵食は抑えられ上向侵食に近づいていることがわかる。

ここで用いたCMCは小量で高粘度が得られる為、凍結前に砂質地盤の間隙水の粘度を高めておくことによってPLAINによる凍土の侵食を抑制する方法として有効であると考えられる。

6. 結論

CaCl₂ プラインによる凍土の侵食について、理論解析及び実験結果から得られた結果を列挙すると次の通りである。

- (1) 理論解析の結果は侵食領域内に重力による対流が生じない限りは純水と飽和凍土との侵食速度は等しくなるがこれは実験によっても確かめられた。
- (2) 侵食領域内の溶質の移動が拡散方程式に従う場合、侵食の時間的変化は $X = \alpha \sqrt{t}$ として与えられ、この結果は実験とよく一致する。
- (3) 理論解析の結果、侵食速度は非常に小さく、このことは実験的にも支持されるので適当な処理さえすればPLAIN漏洩による危険は容易に防止しうることがわかった。
- (4) 一次元の厳密解と近似解は凍土温度が比較的低い範囲では一致している。従って、二次元及び三次元の近似解も適用が可能である。
- (5) 実験より、侵食には方向性があり、上向侵食の場合、土の様な多孔性媒質内においても均質な媒質内と同様に拡散現象で取扱うことができ、理論とほぼ一致する。下向侵食の場合、純水及び砂では対流が生じ侵食速度は大きくなる。粘土では方向性が見られず、拡散係数は水や砂のものに較べれば約1/2となり其の結果侵食速度も小さくなる。
- (6) 下向侵食の場合、透水係数kが小さくなると侵食速度は小さくなる。
- (7) 土の含水比が小さくなっても侵食速度は変わらない。
- (8) CaCl₂ プライン濃度が大きくなれば侵食は大きくなる。
- (9) 透水係数kが大きい砂質土において、下向侵食の場合、凍結前の土の間隙水の粘度を増加させることによって侵食を抑制する効果があることがわかった。

引用文献

- 1) Khakimov, Kh. R. : Artificial Freezing of Soils, Theory and Practice, 1957 Translated into English by Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1966.
- 2) 高志勤, 和田正八郎: 土壤凍結工法について (I), 冷凍36巻408号 (1961)
- 3) 高志勤, 松浦一三, 谷口晴美: 土壤凍結工法について (II), 冷凍36巻410号 (1961)
- 4) Jumikis, A. R. : Thermal Soil Mechanics,

Rutgers, (1966)
 5) Scott, S. A. : Shaft Sinking through Blairmore Sands and Paleozoic Water-Bearing Limestone. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin for February, (1963)
 6) Walli, J. R. O. : The Application of European Shaft-Sinking Techniques to the

Blairmore Formation. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin for February (1964)
 7) 佐藤一雄：物性定数推算法, 丸善
 8) 高志勤, 益田稔, 山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究, 雪氷, 第36巻2号 (1974)

改訂

冷凍空調技術講習会テキスト (53.1版)

<B5> 164 ページ 定価 1,500円 (会員価 1,400円) 送料 160円

- 1. 圧縮機の特性と冷凍サイクル (宝谷幸男)
 - 2. 圧力容器の強度と安全装置 (樋口金次郎)
 - 3. 冷凍装置における伝熱 (源生一太郎)
 - 4. 冷凍装置の制御 (橋爪源一郎)
 - 5. 冷媒配管の考え方 (福富法一)
 - 6. 冷凍装置の保守管理 (河野泰通)*
 - 7. 湿り空気線図と空調方式 (小笠原祥五)*
- (* 印新組みです)

冷凍技士会編集

冷蔵倉庫



<B5>199ページ 昭和52年10月改訂版

定価 1,800円 (会員特価 1,700円) 送料 160円

目次:

1. 食品冷蔵の理論：低温と微生物・冷蔵保管物の品質保持
2. 冷蔵倉庫の設計：冷蔵倉庫計画の基本問題について・冷蔵倉庫の伝熱, 防湿, 防熱, 負荷計算・冷凍機器の選択
3. 冷蔵倉庫の運営:
4. 冷蔵倉庫の実際：営業用, 業務用小形, 農産物用, 醸造用, 畜肉, 乳業用, 船舶, 全天候実験用
5. 荷役機械：冷蔵倉庫のエレベータ及びその他のマテ・ハン機器, 冷蔵庫型フォークリフト
6. 冷蔵輸送:
7. 統計:

(ゴチック字 昭和52年10月改訂箇所)

〒160 東京都新宿区三栄町8

社団法人 日本冷凍協会 03(359) 5231 振替 東京3-73841番

記録

シンポジウム

工場規模における解凍の諸問題*

近年食品工業においては, 近代化・合理化が急速に進んでおり, 著しい発展をとりつつある。食品工業界で使用される原料は, このような背景から, 量的, 質的な安定供給が求められ, 冷凍原料への依存度が高まりつつある。そのような現状から近年食品工業界では, 冷凍原料の解凍に寄せる関心が非常に強くなっている。しかしながら, 解凍に関する本格的な研究は, 1950年代に漸やく開始されたといっても過言ではなく, 比較的歴史の浅い分野である。そこで今回は, 解凍に関する現状および問題点を整理する目的で, 本シンポジウムを企画した次第である。解凍の目的は, 家庭用, 給食用や加工原料としての工場用など非常に広範囲であるので, 食品工業界における加工原料としての解凍に関する問題をのみ今回は取り上げるという意味から, 工場規模における解凍に限定した。 (企画・司会: 小嶋秩夫)



1. 解凍における最近の動向

田中武夫**

一口に解凍といっても, 解凍する側の規模によって次のように3通りに分類できる。

	対象
工場用解凍 (大規模)	食品工場など
業務用解凍 (中規模)	レストラン, ホテル, 病院, スーパーなど
家庭用解凍 (小規模)	一般家庭

ここでは, このうちの工場用解凍を中心に述べる。上の3解凍とも本質的には, よい解凍——解凍した時に解凍前のよき状態にできるだけ近く戻るような解凍, を目標にしていることに変わりはないが, 工場用解凍では業務用の場合も含め, さらに大量にそして安価にといった営業的要求が強い特色がある。

1. 工場用解凍で対象となる食品

工場で原料とする冷凍品の内訳と数量をしらべた結果は表1.1の通りである。表の数量は業務用も含まれているが, 大部分が工場向けと考えてよい。冷凍水産物が圧倒的に多いのが特徴で, 次いで畜産物, 農産物の順となる。冷凍畜産物, 農産物は輸入品が中心であ

表 1.1 冷凍品目別生産数量 (昭和50年 単位: 1000 t)

水産物	畜産物	農産物	
合計	2981	約 490	33
イワシ類	314	羊肉 131	野菜 25
サバ	299	馬肉 43	果実 8
サンマ	184	牛肉 18	
イカ類	231	豚肉 124	cf. 国内産 (冷食) 60
カレイ・ヒラメ類	148	ニワトリ 21	コーン 15 ポテト 14 カボチャ 7 ミカン 5
イカナゴ	219	国内産	
すり身	388	豚肉・ニワトリ 約 150	
カツオ	145		
マグロ類	192		
cf. 輸入 (冷凍)	538		
エビ	114		
イカ・タコ	133		
カツオ・マグロ類	91		

注) 畜産物, 農産物は輸入品が主力

* 昭和52年11月15日(火) 土木学会講堂にて開催
 ** 水産庁東海区水産研究所