

土壌圏の科学(2018.12.20)

@東大農学部化2講義室

土壌の凍結

東京大学

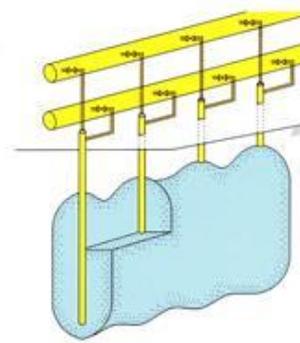
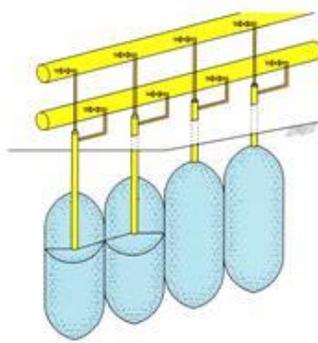
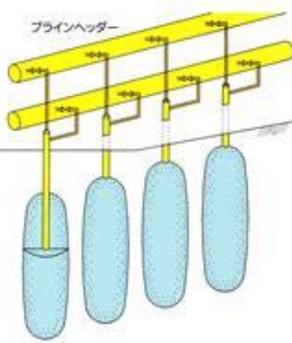
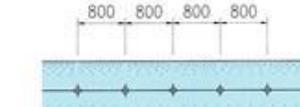
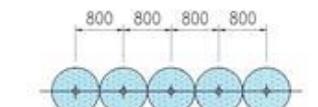
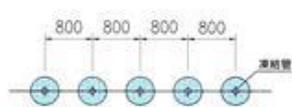
大学院農学生命科学研究科

農学国際学専攻・国際情報農学研究室

教授 溝口 勝



世間的には冷めてきたけれど...
個人的にはいまだに
凍土が熱い！





えふいち

福島第一
原子力発電所
労働記(1)

これが
彼がその目で見てきた
「福島の実況」。

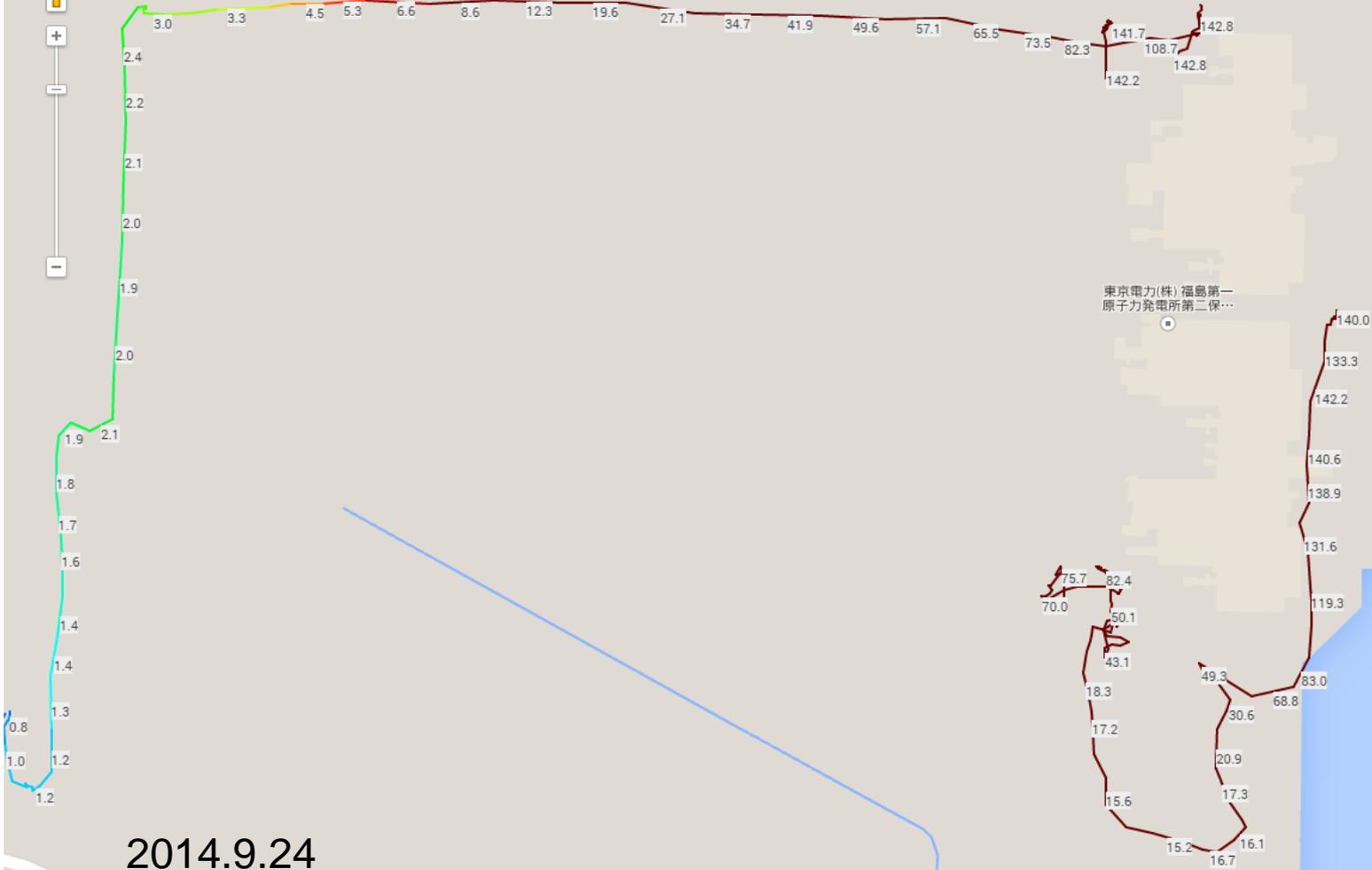
これは
「フクシマの実況」
を基く漫画
ではない。

福島第一原発
作業員が描く
原発ルポ漫画。

数值表示

地図

航空写真

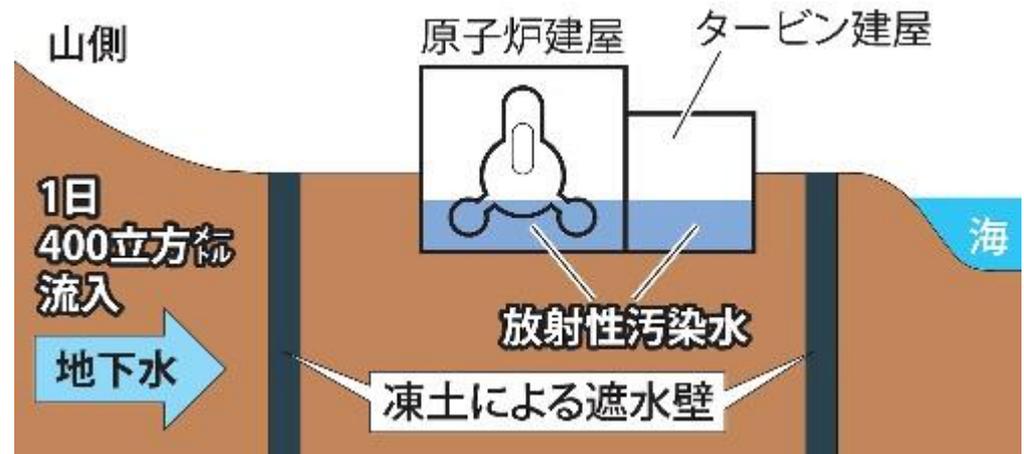
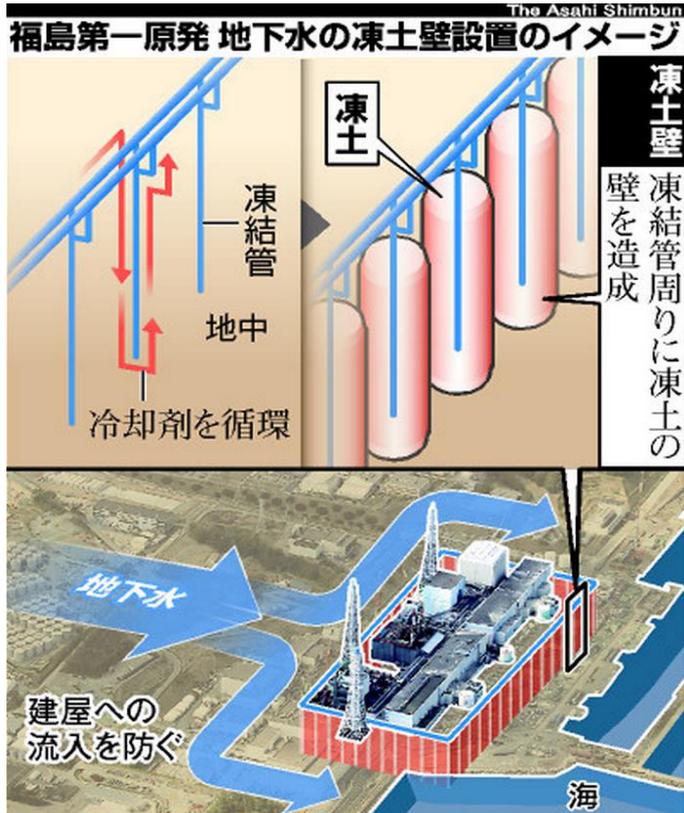


東京電力(株) 福島第一
原子力発電所第二保...

2014.9.24



人工凍土の遮水壁



毎日.jp

福島第1原発:汚染水抑制、凍土で遮水壁設置へ
2013年05月30日



朝日新聞デジタル
福島第一原発周囲に「凍土の壁」案 経産相が東電に指示
2013年5月31日13時54分

凍土遮水壁

- 凍土方式による陸側遮水壁
- 福島原発：凍土壁 遮水効果はつきりせず - 毎日新聞
- 「未来のために」凍土方式 陸側遮水壁工事 | 技術とサービス | 鹿島建設

地盤凍結工法における 凍土の利用

(株)精研 資料より引用

<http://www.seikenn.co.jp/pages/section002/index.html>

凍結工法とは？

水が凍ると？

..... **硬くなる。**

..... **氷は水を通さない。**

凍土 = 土の粒子の間の水が凍った物体



凍結工法のあゆみ

日本で発展させた技術

- ヨーロッパ生まれ、日本育ち
- 初施工：1862年イギリス（採鉱用立坑）
- その後、ヨーロッパ、旧ソ連、アメリカ・・・
- 日本での独自の研究と施行によって
- 日本初施工：大阪守口市1962年
- これまでの施工件数：約500件

凍結工法の特徴

①優れた強度

- 一軸圧縮強度 = 5MN/m^2 …… -10°C 粘土凍土
- 一般的なコンクリート = 21MN/m^2

②完全な遮水性

- 透水係数 $K < 10^{-12} \text{ cm/s}$
- 砂 $\sim 10^{-3}$ 、畑の土 $\sim 10^{-5}$ 、粘土 $\sim 10^{-8} \text{ cm/s}$
- (1 m/day)、(1 cm/day)、(3 mm/year)

③均質性

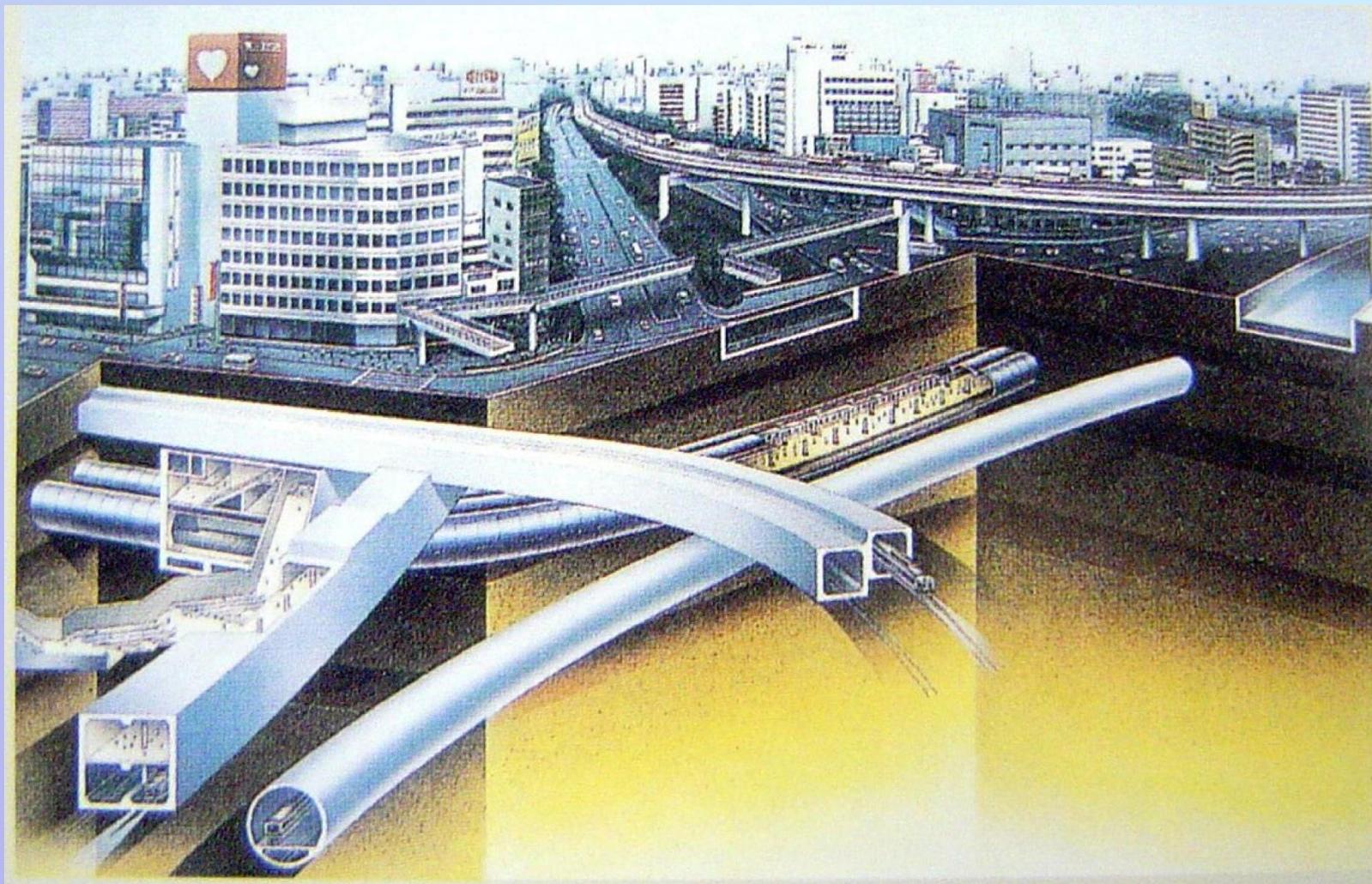
- 時間がたてば熱エネルギーが温度に高い所から低い所へ流れ、凍土壁内の温度は均一になる

④環境負荷が少ない

- 地下水汚染がない
- 解凍すると自然地盤に戻り、地下水流は工事前に戻る

具体例ートンネル工事

- ・ 地下は都市に残された最後の空間であ

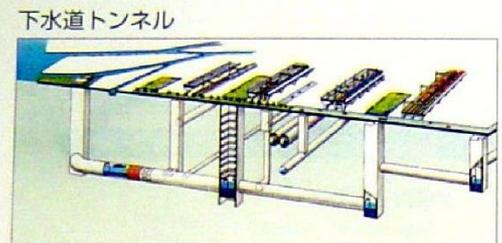


・都市部の地下は混雑！

- 新しい構造物はどんどん深く、大きくなる。
- また、日本の地下は水だらけなので、都市部ではシールド工法が数多く採用されている。



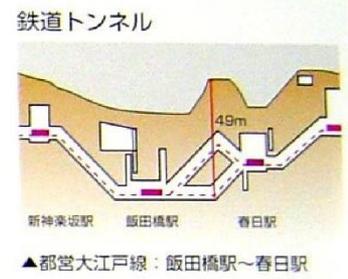
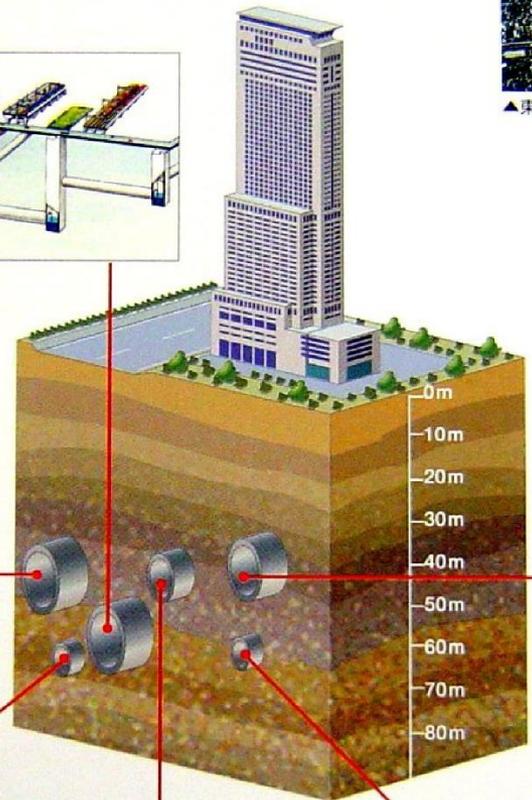
▲東京都内地上風景



下水道トンネル
▲大阪市・十八条～西島下水道幹線



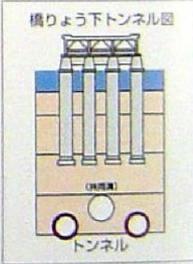
地下河川トンネル
▲神田川・環状七号線地下調節池



鉄道トンネル
▲都営大江戸線：飯田橋駅～春日駅



▲JR東西線/大阪市：淀川橋りょう下トンネル



橋りょう下トンネル図



地中送電線トンネル



送水管トンネル



地下ガストンネル

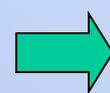
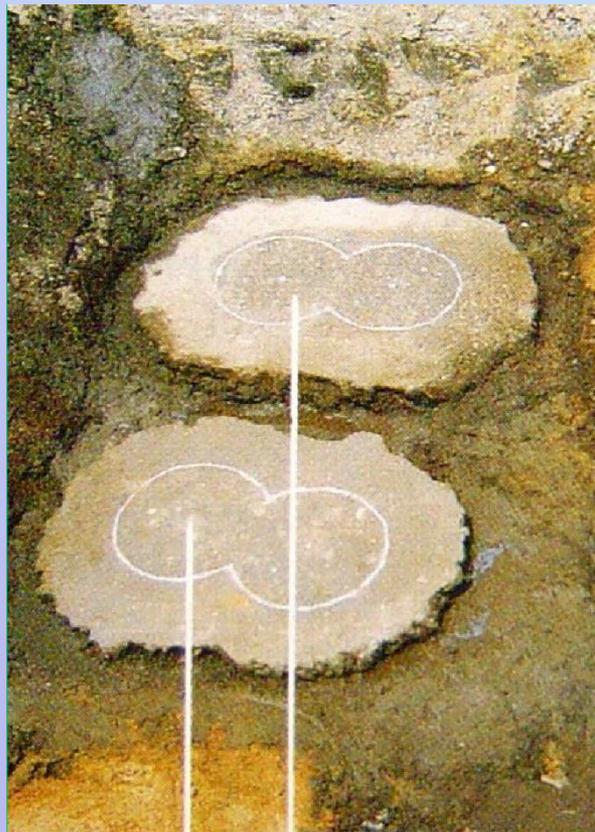


三菱重工業株式会社

・シールド発進部や接続部では立坑壁を撤去したり地山を掘削する必要。ただし、そのままでは地下水・土砂が流入

……**地盤を改良する必要がある！**

・ところが・・・ 大深度や大口径では薬液注入やセメント混合による地盤改良では不安が残る。



・凍土壁の利用



凍結工法施工例

＜東京湾横断道路（東京湾アクアライン）＞

- ・ H7年～9年(1995～1997)
- ・ 前例のない大規模海底トンネル工事

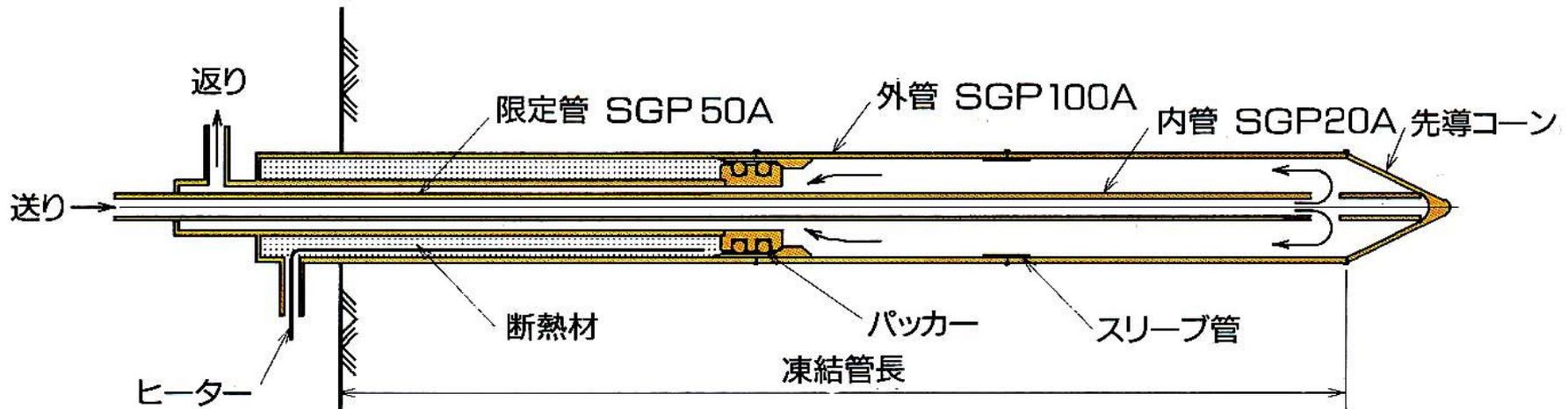






凍結管（例：限定凍結管）

● 限定式凍結管（鉛直限定凍結管に使用）



・ 凍結管埋設のためのボーリング削孔



・ Vertical boring

冷凍機



凍土壁の形成

・約1週間後

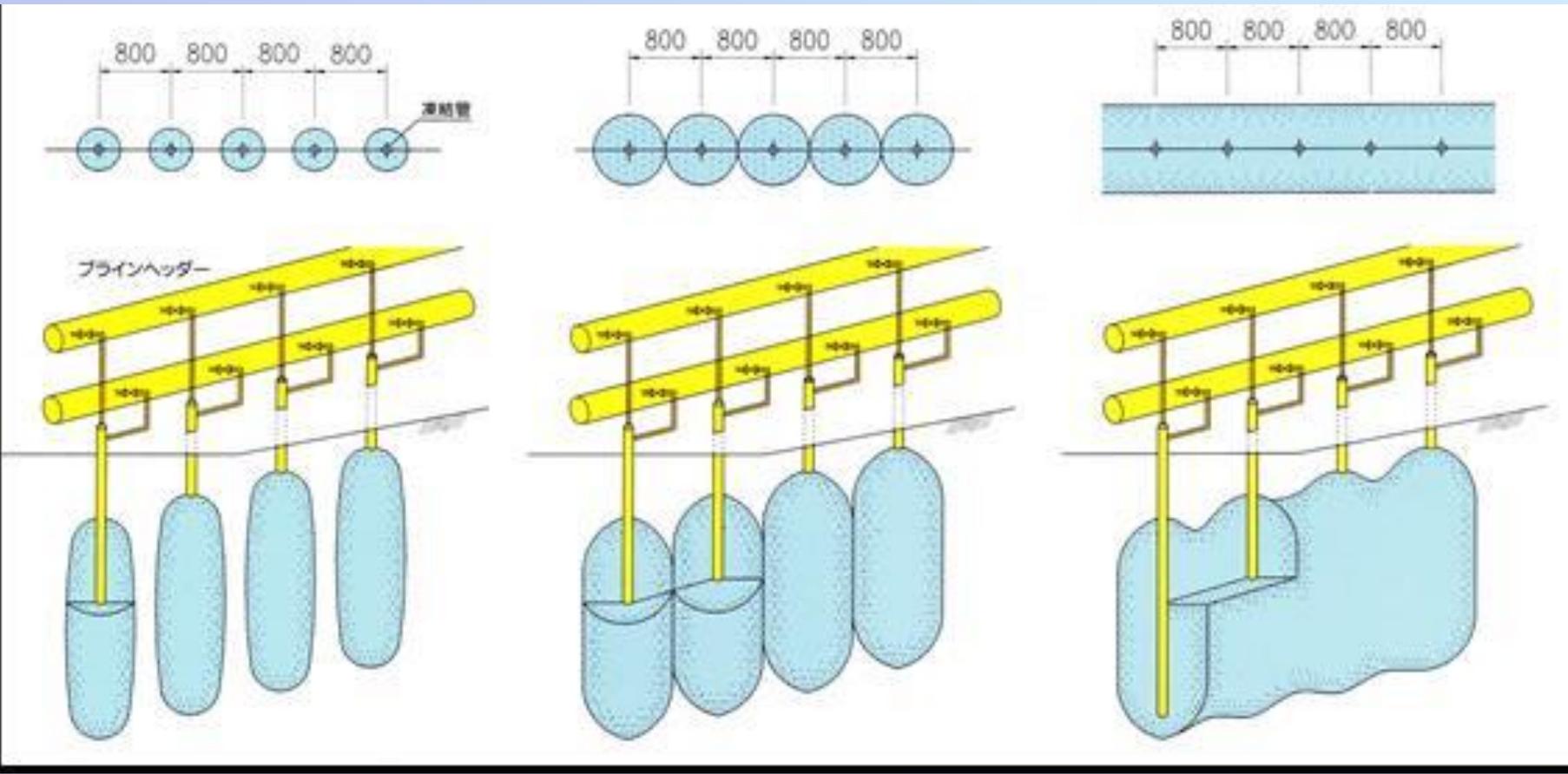
凍土柱成長中

・約2週間後

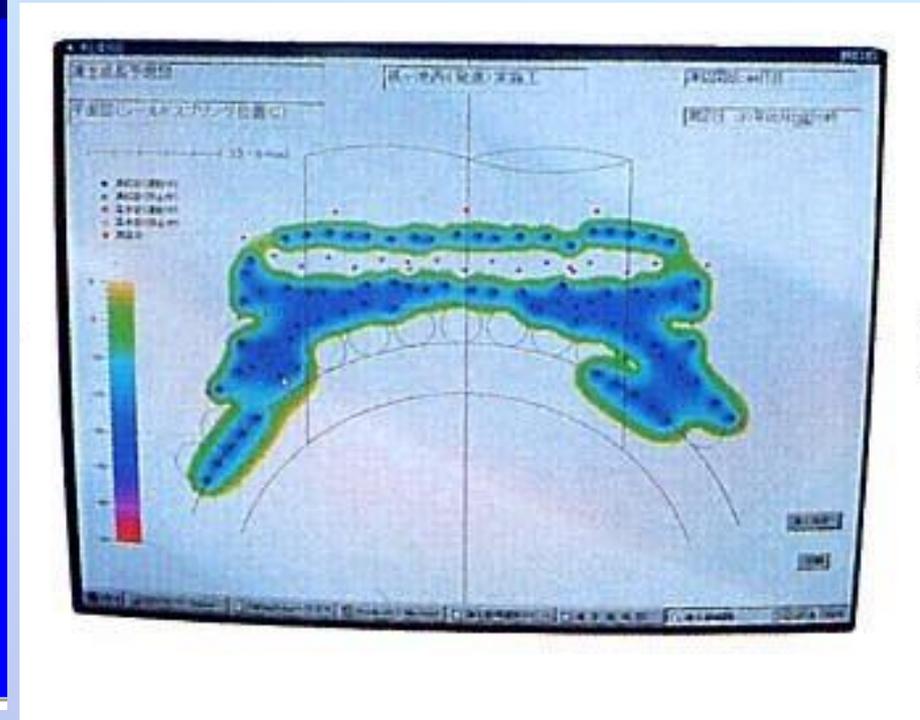
凍土柱が連続し、
凍土壁になり始める

・約4週間後

十分な強度と厚みの
土留め壁が完成する



・ 地中温度の計測



農学部なのに
なぜ凍土研究を始めたのか？

弥生

Vol.1

61

Fall 2013

魅惑 目下集

再生医療が驚く動物医療の未来
鳥の夢

森林のソングブックどこへ?

食品研究の
アムステルダムへ行く

鳥の夢
鳥の夢
鳥の夢

鳥の夢

鳥の夢

Epiphanies

その瞬間

No.1

クリスマス イブの霜柱



鳥の夢 鳥の夢
溝口 野矢
Mizuguchi Noya

土 鳥物理学をやりはじめたのは、学生のころ偶然出会ったある発見がきっかけです。越冬の鳥達の食見だだったとしたら、いかに自然の摂食で鳥達に運んだのですが、入学していろいろと課題が降りて来ると、「鳥学はこんなものなのか」という疑問が湧いてきました。それらも理解が進む中で、他に足がつかないよう思えたのです。

いよいよ卒業を前にしたとき、「どうせ理解論に終るとなると、そのこと一番実証したものをやってみよう」と思い立ち、土壌物理学の研究室に飛び込みました。土壌物理学は鳥学と物理学を使って論を進めていく学問で、まさに「実証鳥学」の代表格に見えました。めたくは卒業のテーマを鳥達の体温解析に定め、野鳥の温度計を自作して土の温度を測るに決めます。これは経験にも通じているのは夏なのですが、実際に測り始めたのは十月末、テーマが執筆に上るのはじめたのは真冬でした。そして、もう12月

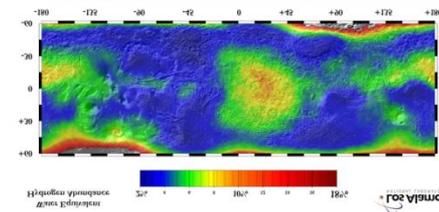
クリスマスイブの朝、ある事件が起ったのです。

明け方近くには雪が降り、朝は、マイナスに落ちたまま下がりつづいていた地表面の温度が突然上がりました。「温度計が壊れた!」原因は「雪かき」の二文字が頭に浮かびました。雪かき機を持って現場に赴き、地温を測ると、なんとかが光っています。驚愕でした。それでわかったのです。この実際の温度変化は土が凍りにはめったに起きないというのですが、それがすべてのはかりでした。これをきっかけに研究テーマが土の凍結現象に定め、いつしかそれはソングブックの鳥学と鳥学や水文学・気象学の研究家との交流へとわたる準備ができています。

かつて「実証鳥学」に傾いた土壌物理学、いまではとても現実的な学問だと思っています。たしかに鳥学後の生涯には鳥の生態や保護活動で活動された鳥物理学の発展、そのほか鳥学を示しているのが土壌物理学です。そのほかの鳥学についてお話しは、あの朝のあの朝でした。

なぜ凍土研究が必要だったのか？

- 凍上害の克服
 - 道路・農地
- 凍土の利用
 - 遮水壁
 - 人工地盤凍結工法
 - 農地除染
- 地球温暖化
 - 永久凍土の融解
- 惑星
 - 水の存在



凍上害



青森県下北郡佐井村国道338号(国土交通省HP)

http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200101_06/010511/010511-2.html



牧草の断根(農研機構HP)

<http://www.naro.affrc.go.jp/org/harc/alfalfa/winter.html>

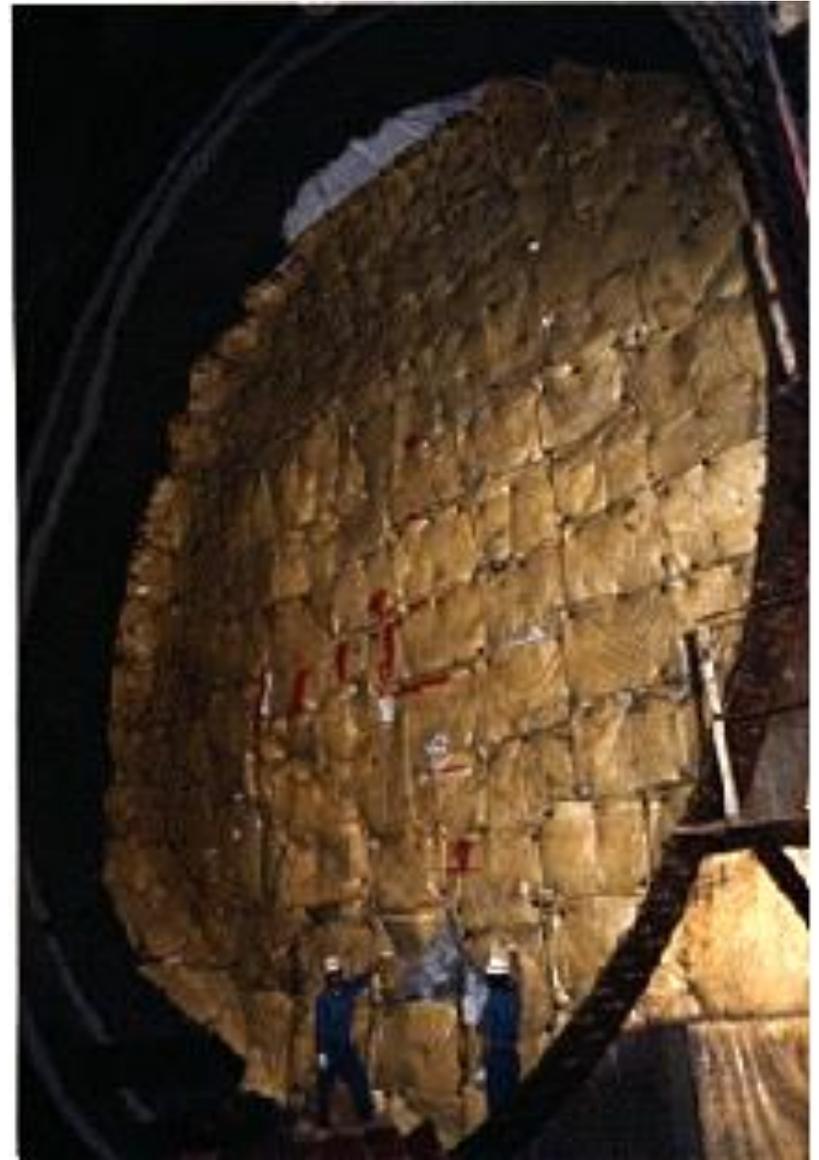
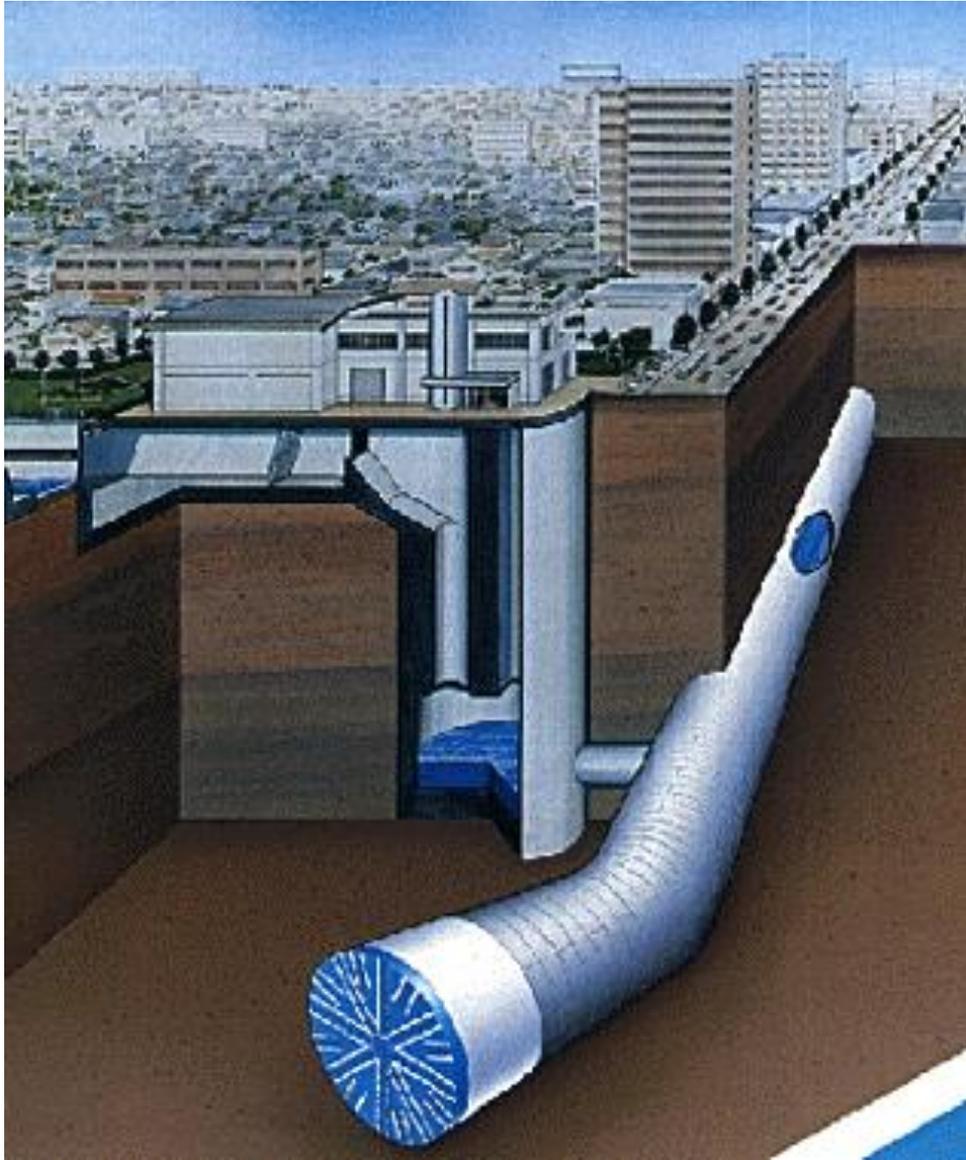
アラスカ
永久凍土地帯の住まい



アラスカ 大陸を縦断するパイプライン



大都市部の地下を走る 洪水調整トンネルと凍結工法



土の凍結に関する土壌科学

霜柱



なぜ霜柱は成長するのか？

- 霜柱の上には土粒が載っている
- 2階・3階建ての霜柱もある
- 霜柱のできやすい土とは



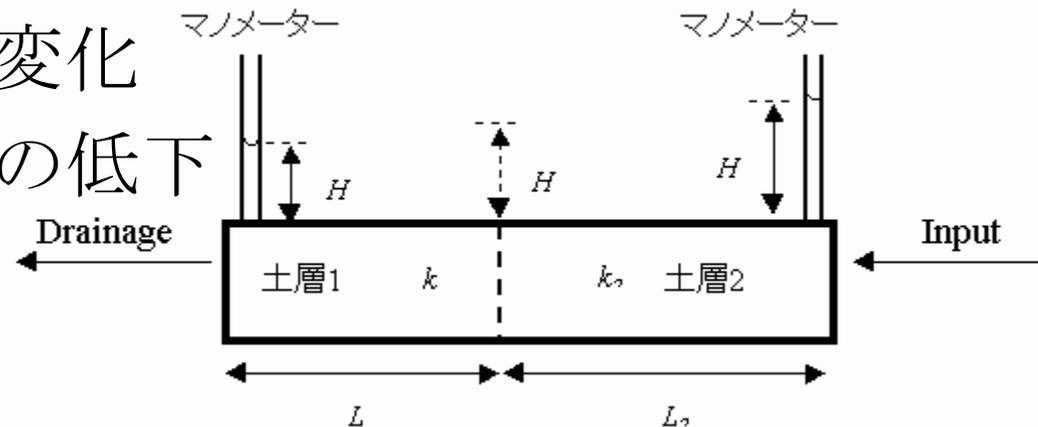
- 土壌中の熱と水分の移動が重要

凍結と蒸発を伴う水分移動

- 乾燥過程の水分移動
 - 液状水が水蒸気に相変化
 - 水ポテンシャルの低下

$$q = -k \frac{\Delta H}{\Delta x}$$

- 凍結過程の水分移動
 - 液状水が氷に相変化
 - 水ポテンシャルの低下



土壌水の上向き移動の駆動力 (毛管現象)



- 水は隙間を昇ってゆく
- 土はいろんな大きさの隙間で構成される
- 土の中の水は繋がっている
- 水の上昇速度は土の種類で異なる

写真： 濾紙に浸み込んで上昇する水

土壌水の熱力学

- 毛管現象

$$h = 2\sigma/\rho gr \doteq 0.15/r \text{ (cm)}$$

σ : 表面張力 ρ : 水の密度

g : 重力加速度 r : ガラス管の半径

- サクシオン(水ポテンシャル)

$$h = (RT/Mg)\ln(P_s/P_0) \doteq 3 \times 10^6 \log(P_s/P_0) \text{ (cm)}$$

$$pF = \log |h|$$

R : ガス定数 T : 絶対温度 M : 水の分子量

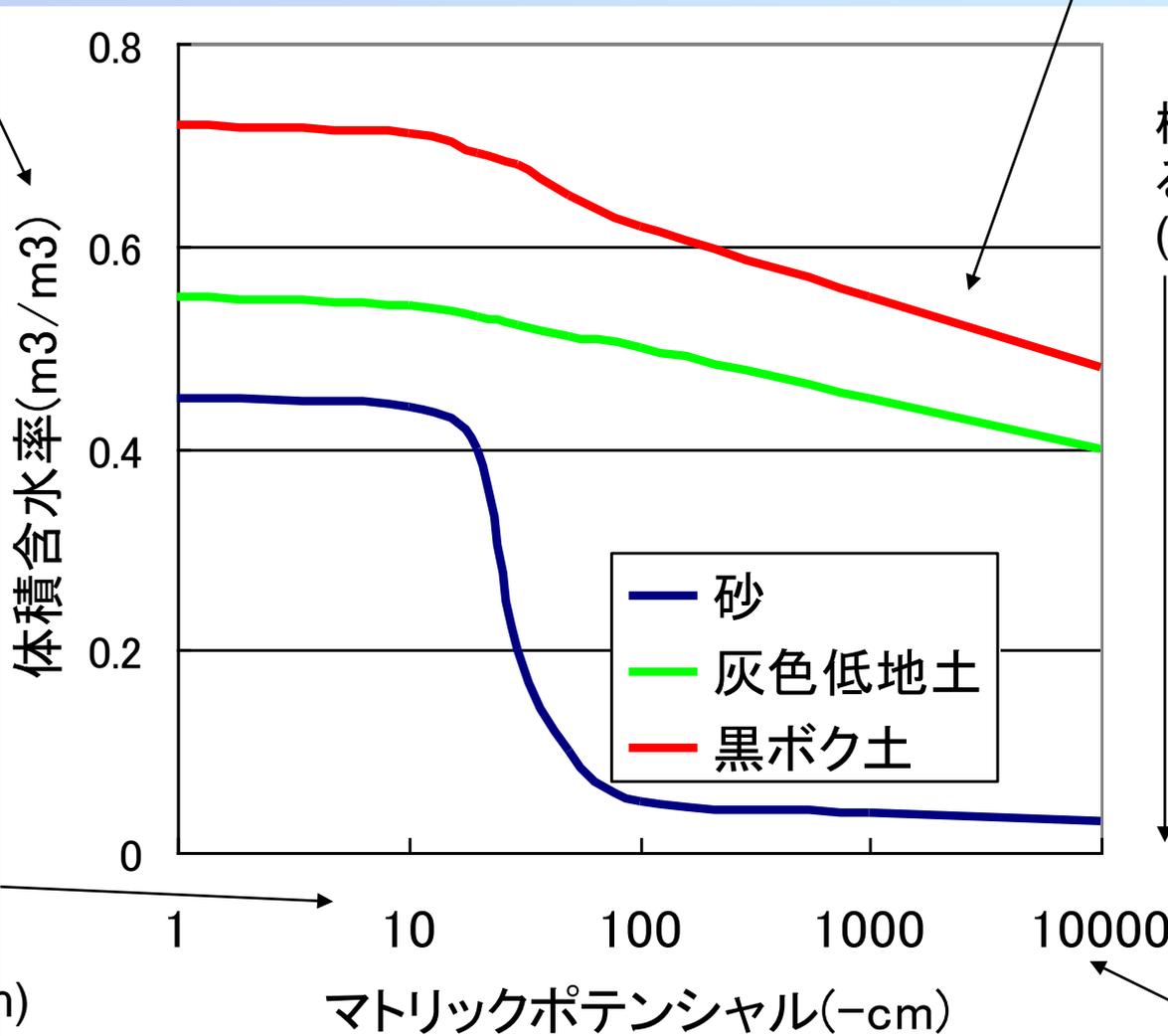
P_s/P_0 : 相対湿度

– 相対湿度80%, 20°Cでは、 $pF=5.5$

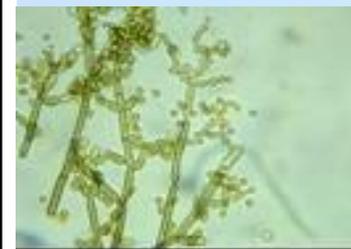
土の保水性 (水分特性曲線)

土の塊に含まれる水の体積

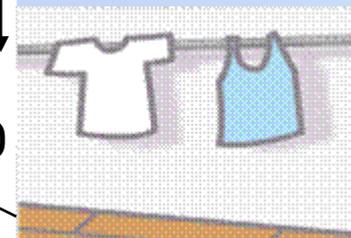
植物の成長に影響



植物が枯れる水分量 (15000)



カビも発生しやすい
湿度99.3%

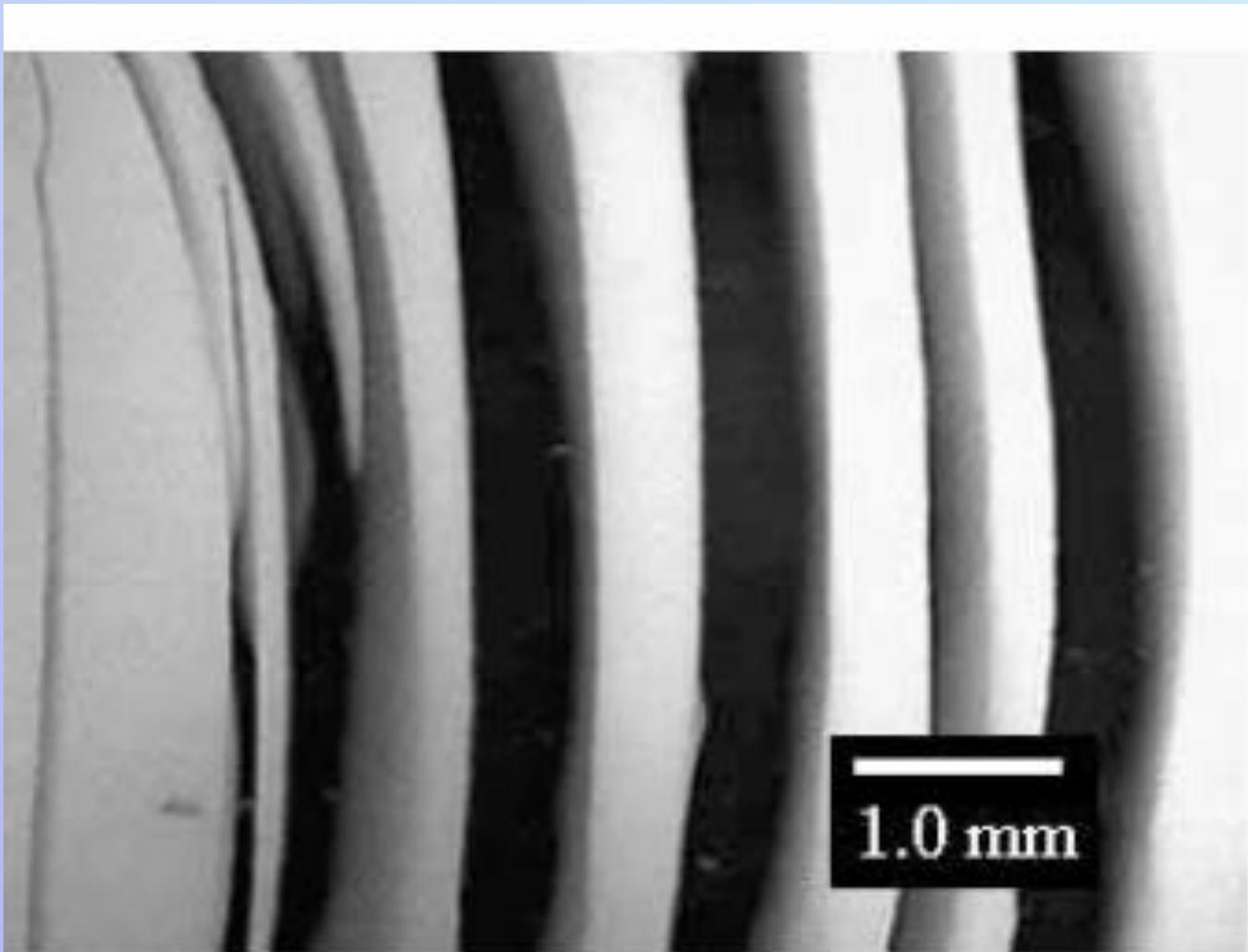


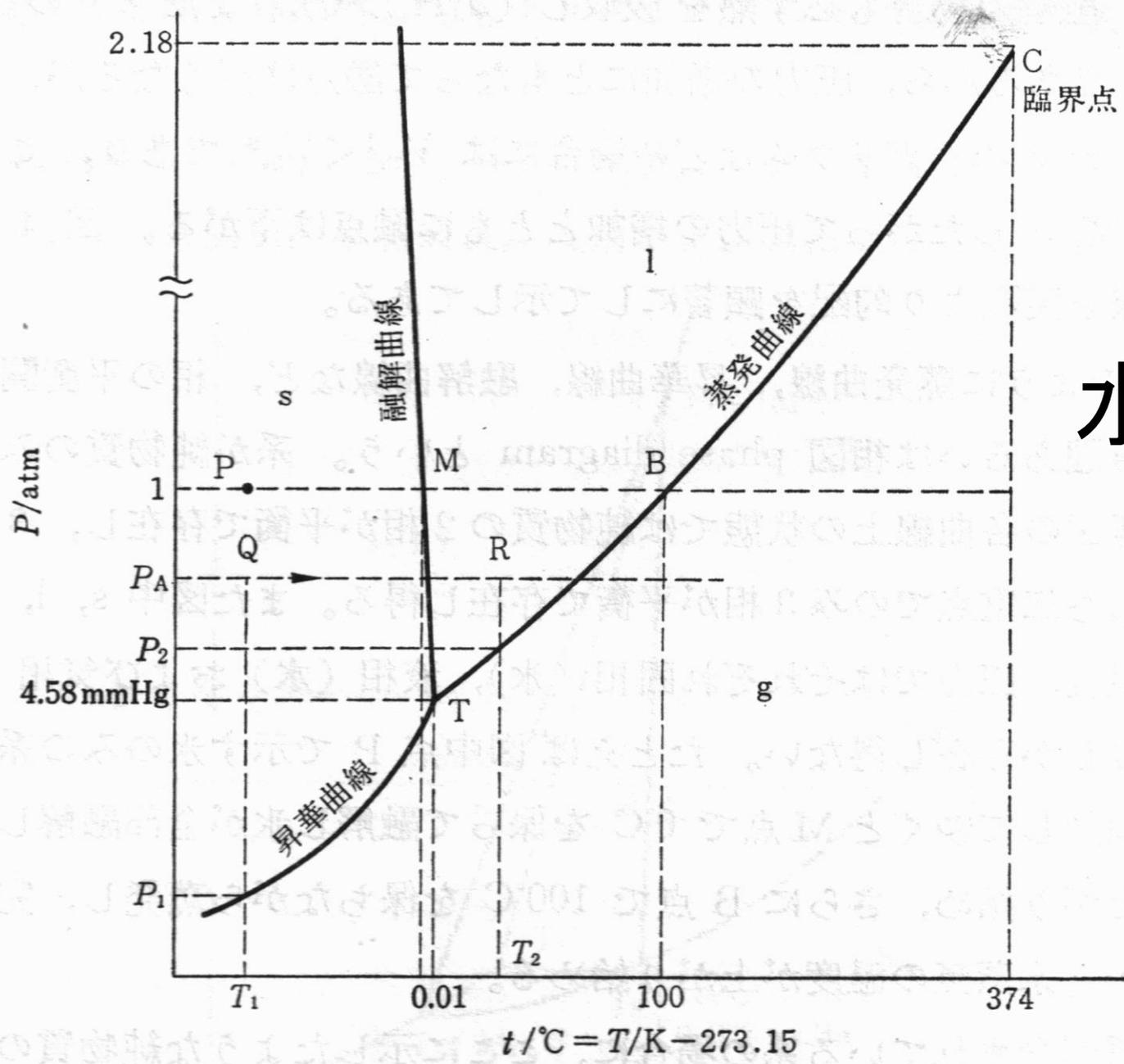
水面から高さ10cmの水分量

$$h = 0.15/r \text{ (cm)}$$

凍土中におけるアイスレンズの成長

Growing Ice lenses in freezing soil





水の状態図

火星

-63°C

6 hPa(4.5mmHg)

図 4.4 水の状態図の略図

化学ポテンシャル

熱力学第1法則

$$dU = dQ + dW \dots \textcircled{1}$$

体積仕事だけの場合

$$dW = -PdV \dots \textcircled{2}$$

熱力学第2法則

$$dQ = TdS \dots \textcircled{3}$$

①②③より

$$dU = TdS - PdV \dots \textcircled{4}$$

ギブスの自由エネルギー

$$G = U + PV - TS \dots \textcircled{5}$$

$$dG = VdP - SdT \dots \textcircled{6}$$

化学ポテンシャル

= 1モルあたりの自由エネルギー

$$G/n \equiv \mu \dots \textcircled{7}$$

$$d\mu = v dP - s dT \dots \textcircled{8}$$

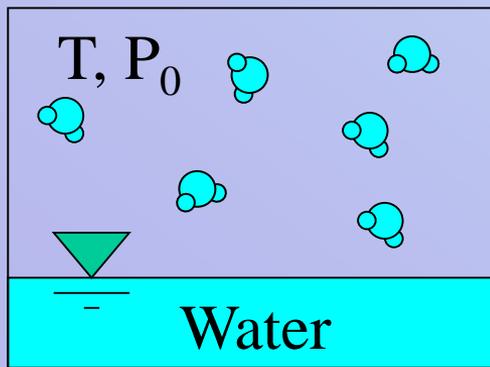
吸着水と水蒸気の平衡 (温度一定)

水蒸気Aと水蒸気B(C)の化学ポテンシャル差 = P_s を P_0 にするために必要な仕事量

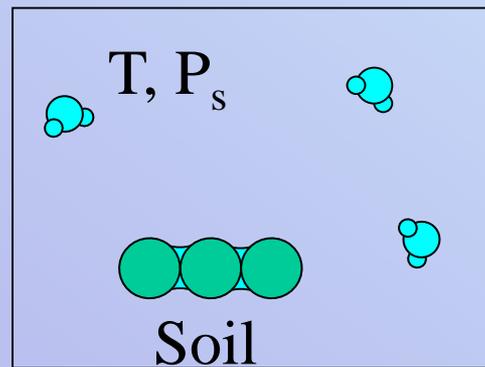
$$\mu_0 - \mu_s = \int_{P_s}^{P_0} v dP = \int_{P_s}^{P_0} \frac{RT}{P} dP = -RT \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) > 0$$

$$PV = nRT \quad v = \frac{V}{n} = \frac{RT}{P}$$

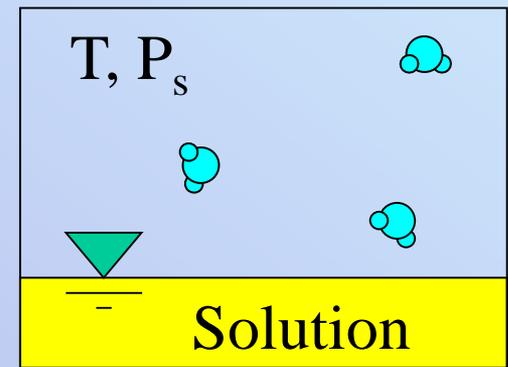
P : 水蒸気圧 v : 体積 (比容積)
 R : ガス定数 T : 絶対温度
 P_s/P_0 : 相対湿度



(A) 水蒸気—純水



(B) 水蒸気—土壤水



(C) 水蒸気—溶液

吸着水の化学ポテンシャル (単位エネルギー)

① モルあたり J/mol $\Delta\mu_s(T) = \mu_s(T) - \mu_0(T) = RT \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) < 0$

② 質量あたり J/kg $\Delta\mu_s(T) = \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$

③ 体積あたり J/m³ = Pa: 圧力 $\Delta\mu_s(T) = \frac{\rho RT}{M} \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$

④ 重量あたり J/gw = m: 水柱高 $\Delta\mu_s(T) = \frac{RT}{gM} \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$

$R=8.314$ (J/mol/K), $T=293.15$ K (20°C), $\rho=10^3$ (kg/m³), $M=18 \times 10^{-3}$ (kg/mol),
 $g=9.8$ (N/kg), $\ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) = 2.3 \times \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$

③ $\Delta\mu_s(T) = \frac{10^3 \times 8.314 \times 293.15}{18 \times 10^{-3}} \times 2.3 \times \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right) = 3.11 \times 10^8 \times \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right)$ [Pa]

相対湿度と吸着水のポテンシャル

相対湿度	水ポテンシャル (20°C)			
P_s/P_0	J/kg	③ Pa	④ cmH ₂ O	⑤ pF
1	0	0	0	∞
0.99999	-1	-1000	-10.2	1
0.99993	-10	-10000	-102	2
0.99926	-100	-100000	-1020	3
0.99264	-1000	-1000000	-10200	4
0.92877	-10000	-10000000	-102000	5
0.8	-30214	-30214000	-308185	5.5

$$\textcircled{4} \quad \Delta\mu_s(T) = \frac{8.314 \times (273.15 + 20)}{9.8 \times 18 \times 10^{-3}} \times 2.3 \times \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right) = 3.18 \times 10^6 \times \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \quad [\text{cm}]$$

$$\textcircled{5} \quad pF = \log |cmH_2O|$$

風乾土の吸着水の化学ポテンシャル

例題1. 相対湿度80%, 20°Cの水蒸気と平衡する土壌の吸着水のpFを求めよ。

解答: ④より $\Delta\mu_s(T) = 3.18 \times 10^6 \times \log(0.8) = 3.18 \times 10^6 \times (-0.0969) = -3.08 \times 10^5$ [cm]

⑤より $pF = \log|-3.08 \times 10^5| \approx 0.5 + 5 = 5.5$

解説: 相対湿度80%は日本の大部分の地域の年平均値である。土を自然に乾燥させた「風乾土」のpFは5.5くらいと記憶しておくが良い。

炉乾土の吸着水の化学ポテンシャル

例題2. 相対湿度80%, 20°Cの実験室にある105°Cの乾燥炉で乾燥した土壤の吸着水のpFを求めよ。

解答: 20°Cにおける飽和水蒸気圧=23.39 [hPa]

乾燥炉に供給される水蒸気圧=23.39×0.8=18.7[hPa]

105°Cで液状水と平衡する飽和水蒸気圧=1209[hPa]

乾燥炉内の相対湿度=18.7/1209=0.01546 (約1.5%)

④より

$$\Delta\mu_s(105) = \frac{8.314 \times (273.15 + 105)}{9.8 \times 18 \times 10^{-3}} \times 2.3 \times \log(0.015) = 17820 \times 2.3 \times (-1.82) = -7.46 \times 10^6 \text{ [cm]}$$

$$pF = \log \left| -7.46 \times 10^6 \right| \approx 0.87 + 6 = 6.9$$

解説: 105°Cの電気炉で乾燥させた土壤にも計算上はわずかに水分が残っていることになる。

不凍水

0°C付近で急激に変化

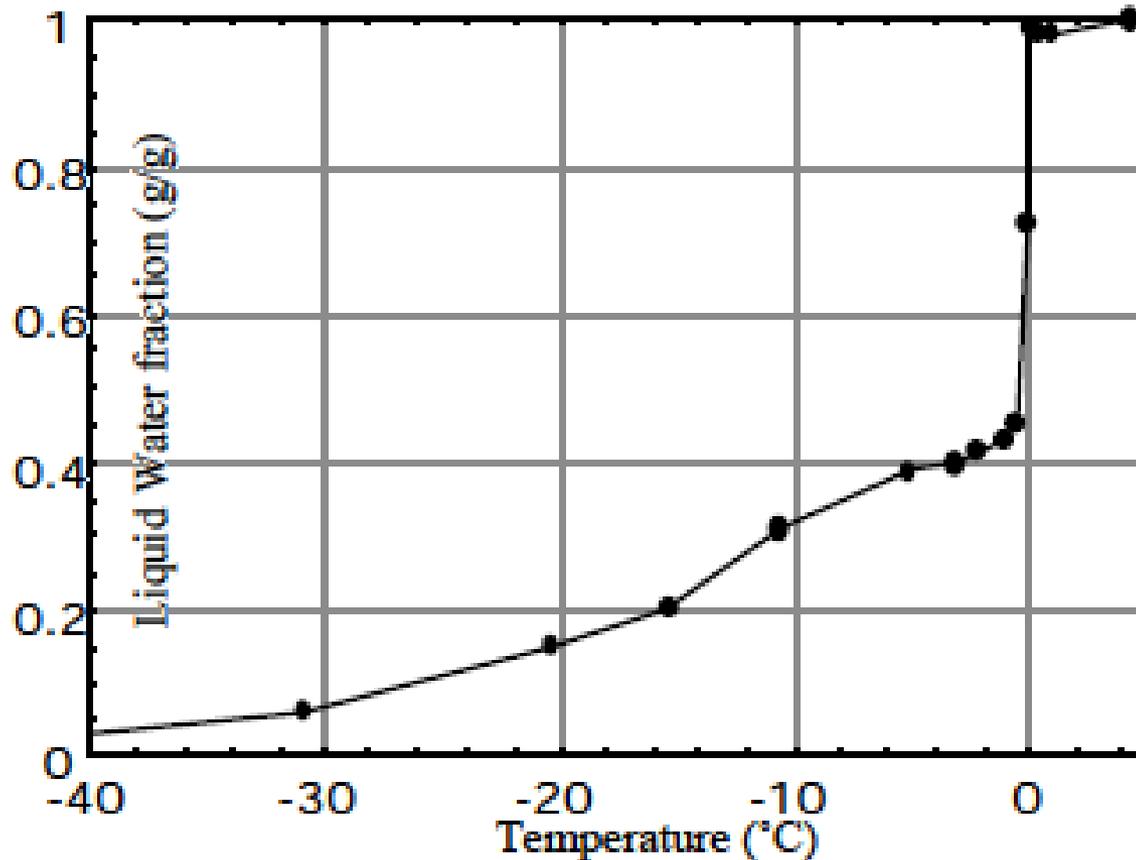
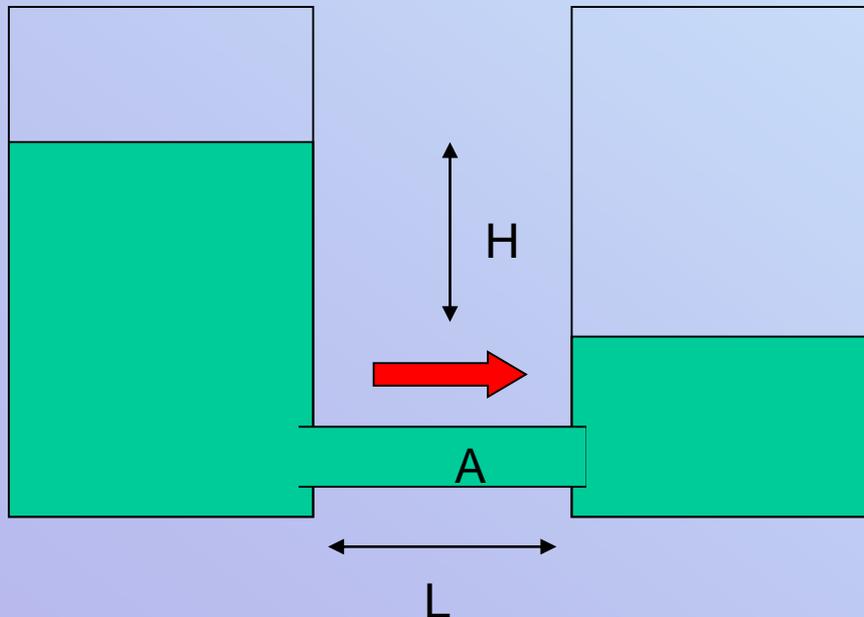


Fig. 2. Liquid water fraction in the frozen porous medium measured by NMR technique.

土の透水性

ダルシーの法則: $Q = -K (H/L)A$

- ・ 水は(ポテンシャルの)高いところから低いところへ流れる
- ・ Kは土によって異なる



Q: 流量 (cm³/s)
K: 透水係数 (cm/s)
H: 水頭差 (cm)
L: 長さ (cm)
A: 通水面積 (cm²)

凍結過程の熱と水分の移動式

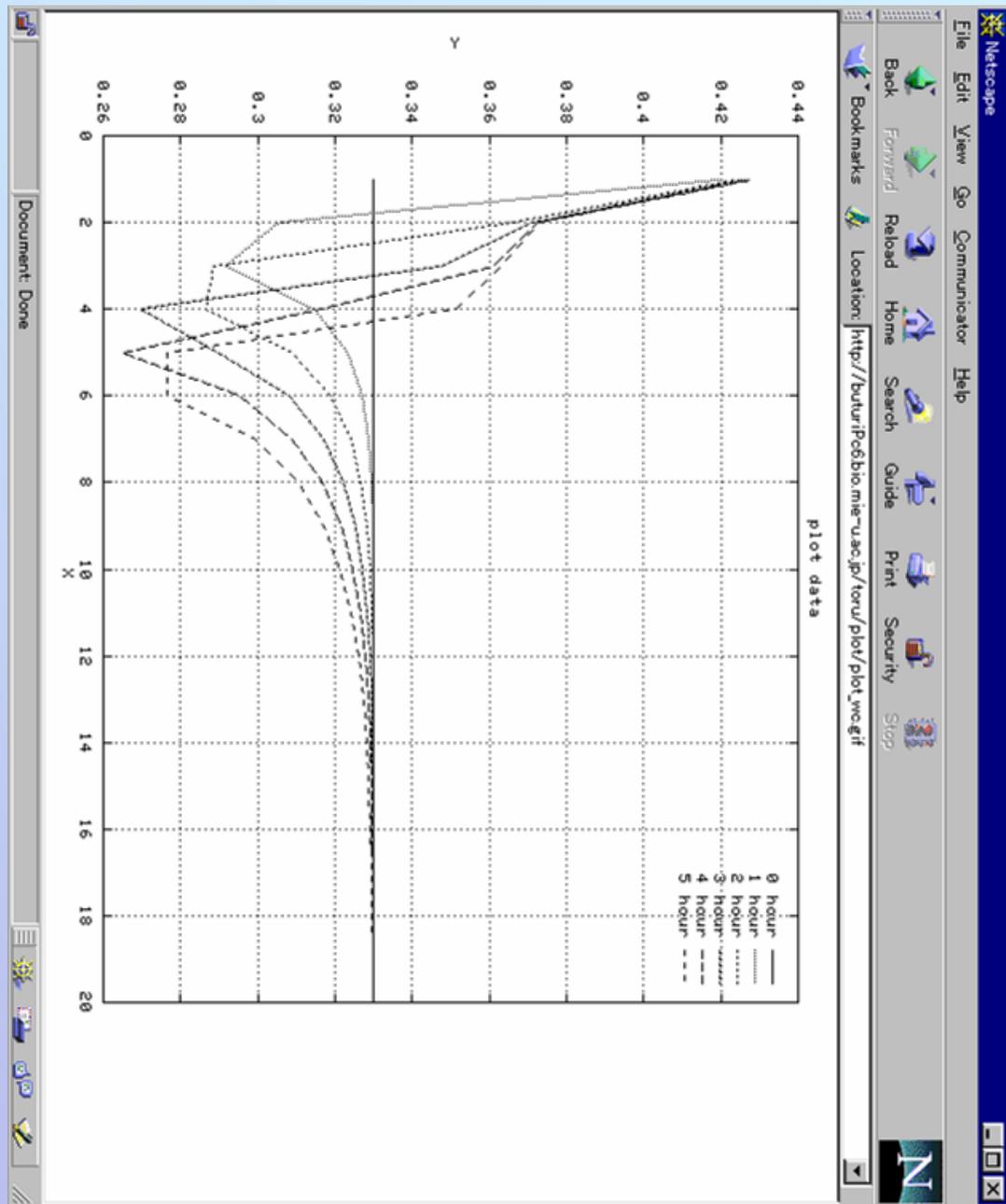
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i(T)}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{Lh}(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K_{Lh}(h) + K_{LT}(h) \frac{\partial T}{\partial z} + K_{vh}(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + K_{vT}(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - S \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_p T}{\partial t} - L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial C_p T}{\partial t} - L_f \rho_i \frac{d\theta_i}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left(C_p - L_f \rho_i \frac{d\theta_i}{dT} \right) T}{\partial t} = \frac{\partial C_a T}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L_f}{V_w T} \quad (15)$$

凍結過程の 土壌水分移動 (1984-1990)

- 凍結前線に土壌水が集まる
- 凍土中の液状水（不凍水）が減少



地球温暖化と永久凍土

優れた地球環境センサー

シベリア調査

- ツンドラ (N72°)
– 1997年・1998年夏



- タイガ (N62°)
- アラス (N62°)
– 2000年夏



シベリア地域の全体図



Tundra basin near Tiksi (全景)



Tundra basin near Tiksi, Russia, surveyed in August, 1998

穴を掘るのも一苦労

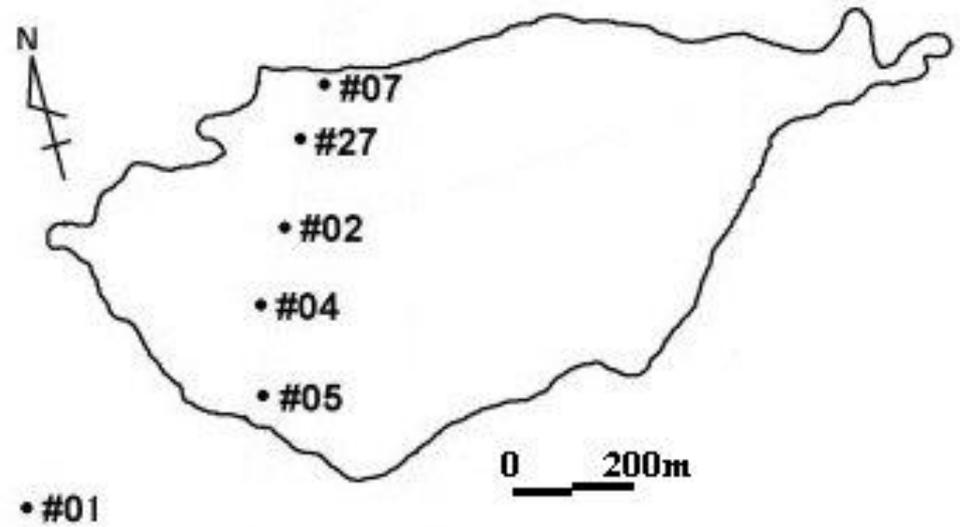


GAME-Siberia (1997-2000)



アラス調査 (2000)

- 湖や草原
– 塩類土壌



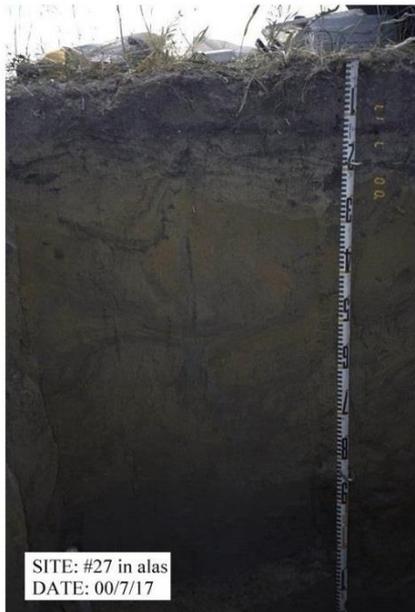
レナ川を横切る



穴に埋まって、はいポーズ

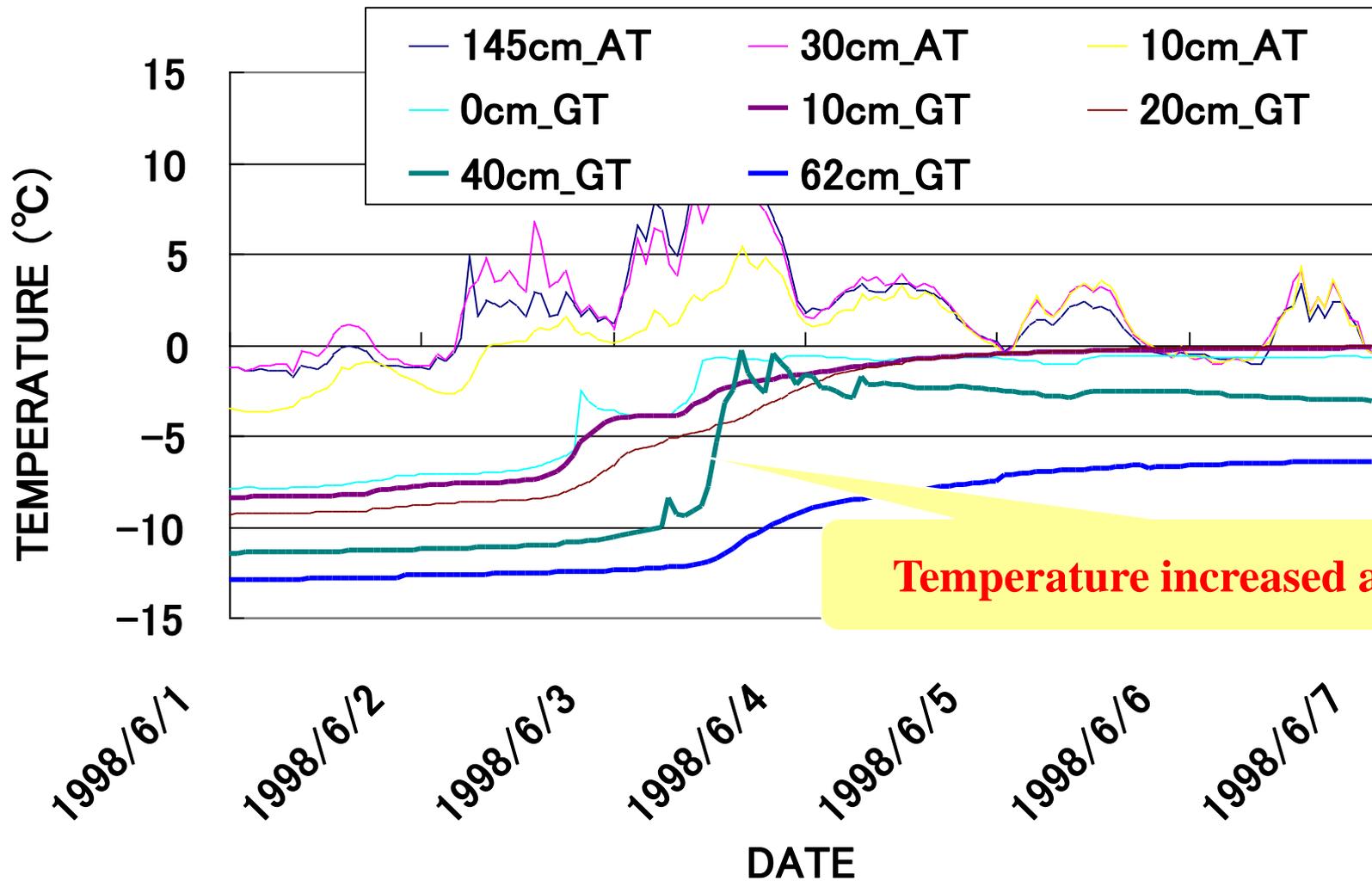


アラスの土壤断面



地温上昇の謎

AIR AND SOIL TEMPERATURE IN SUMMER TUNDRA



危險物處理班？



わずかなスペースを見つけて



ツンドラ構造土

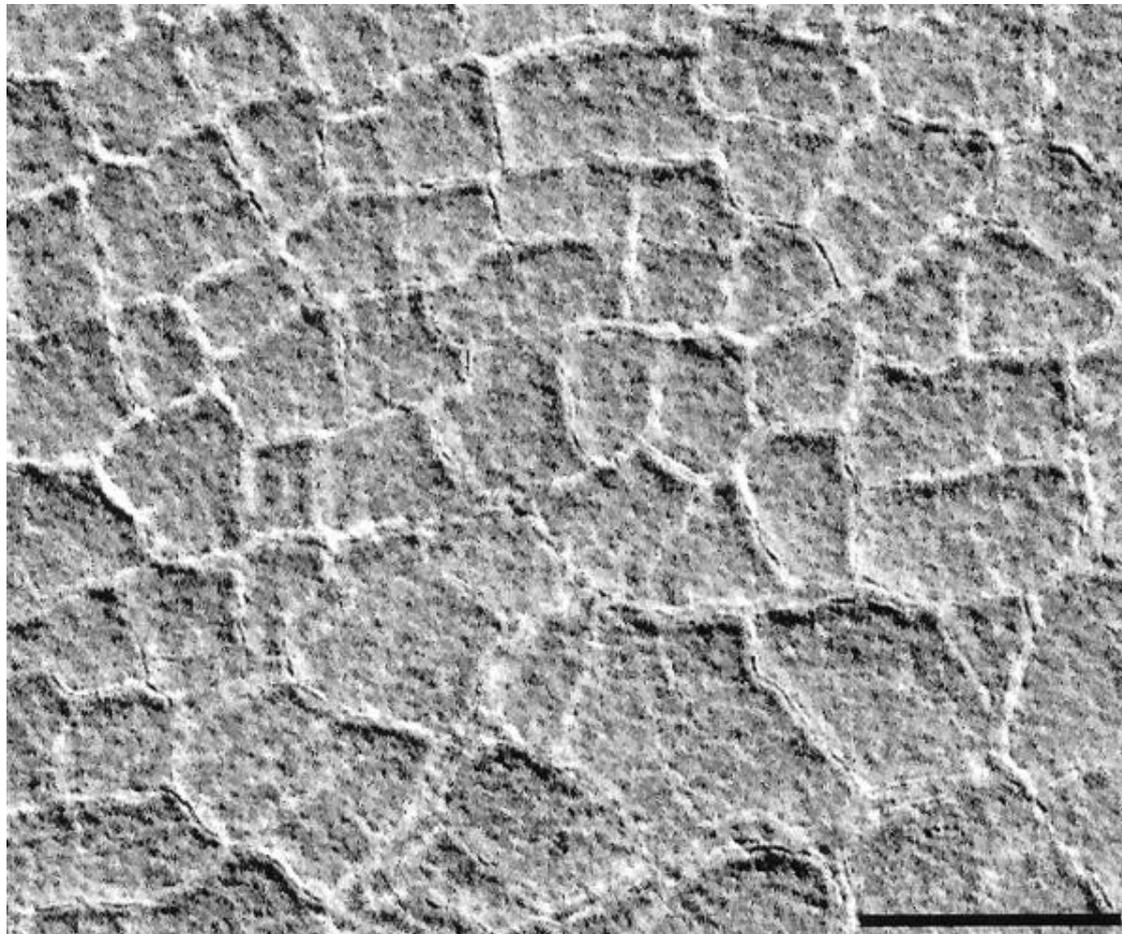
http://socyo.high.hokudai.ac.jp/North/M.F_4.html より



惑星の凍土

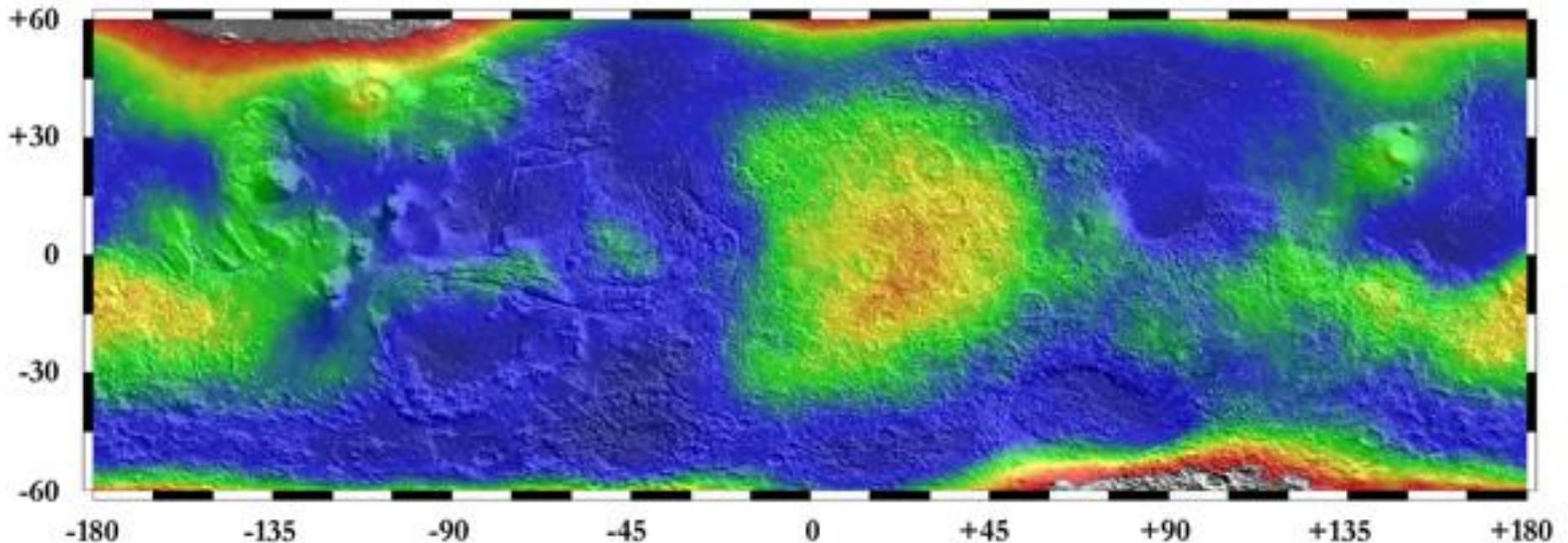
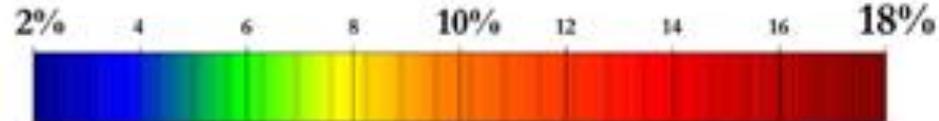
火星の高緯度地域に見られる Polygonal ground

Baker, V. R.: Water and the martian landscape, Nature,
Vol. 412, pp.228-236, 2001



http://www.lanl.gov/worldview/news/photos/equator_water_lanl.jpg

Water Equivalent
Hydrogen Abundance



Distribution of Water on Mars: Overlay of water equivalent hydrogen abundance and a shaded relief map derived from MOLA topography. Mass percent of water was determined from epithermal neutron counting data using the Neutron Spectrometer aboard Mars Odyssey between Feb. 2002 and Apr. 2003.

Reference: Tikhonov B. C., T. H. Partridge, E. Mazarin, J. J. Plot, D. A. Rab, D. Y. Vasilius, M. Y. Medved, A. E. Mäkelä, E. W. Squyres, I. Karamfilova, W. V. Boynton, B. C. D'Elia, H. G. Fawcett, D. J. Lawrence, and B. E. Teke, The global distribution of near-surface hydrogen on Mars, *JGR Planets*, submitted July 2003.

These data were generated by the Planetary Science Team at Los Alamos: B. Burningham, D. Rab, D. Delapp, B. D'Elia, W. Fulkerson, H. Fawcett, G. Gerasimchuk, D. Lawrence, S. Mazerin, G. McKinney, K. Moore, T. Partridge, B. Teke, D. Vasilius, and B. Wozniak. - See also the associated web pages from:

The neutron spectrometers aboard Mars Odyssey are a component of the Gamma-Ray Spectrometer suite of instruments, were designed and built by the Los Alamos National Laboratory and is operated by the University of Arizona in Tucson. The Mars Odyssey mission is managed by the Jet Propulsion Laboratory.

Phoenix Mars Mission - Gallery - Images - Microsoft Internet Explorer

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)

戻る - 進む - 検索 - お気に入り - 移動 - リンク >>

アドレス(D) http://phoenix.lpl.arizona.edu/images.php?gID=56696cID=76

Y! - 検索 - ログイン - ブックマーク - >>



MISSION EDUCATION BLOGS NEWS **GALLERY** Keyword Search: GO



**"Dodo-Goldilocks" Trench
Dug by Phoenix**
Photo credit: NASA/JPL-
Caltech/University of
Arizona/Texas A&M University
Date: 2008-06-16
Sol: Sol 22

This color image was acquired by NASA's Phoenix Mars Lander's Surface Stereo Imager on the 20th day of the mission, or Sol 19 (June 13, 2008), after the May 25, 2008, landing. This image shows one trench informally called "Dodo-Goldilocks" after two digs (dug on Sol 18, or June 12, 2008) by Phoenix's Robotic Arm. The trench is 22 centimeters (8.7 inches) wide and 35 centimeters (13.8 inches) long. At its deepest point, the trench is 7 to 8 centimeters (2.7 to 3 inches) deep.

White material, possibly ice, is located only at the upper portion of the trench, indicating that it is not continuous throughout the excavated site. According to scientists, the trench might be exposing a ledge, or only a portion of a slab, of the white material.

The Phoenix Mission is led by the University of Arizona, Tucson, on behalf of NASA. Project management of the mission is by NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif.

Download Image
[Small](#) - 31kb
[Medium](#) - 113kb
[Large](#) - 455kb

インターネット

2019年5月28日

JpGU2019 @幕張メッセ

減圧蒸発過程における 砂中の水分移動

溝口勝

東京大学大学院農学生命科学研究科

本発表の背景

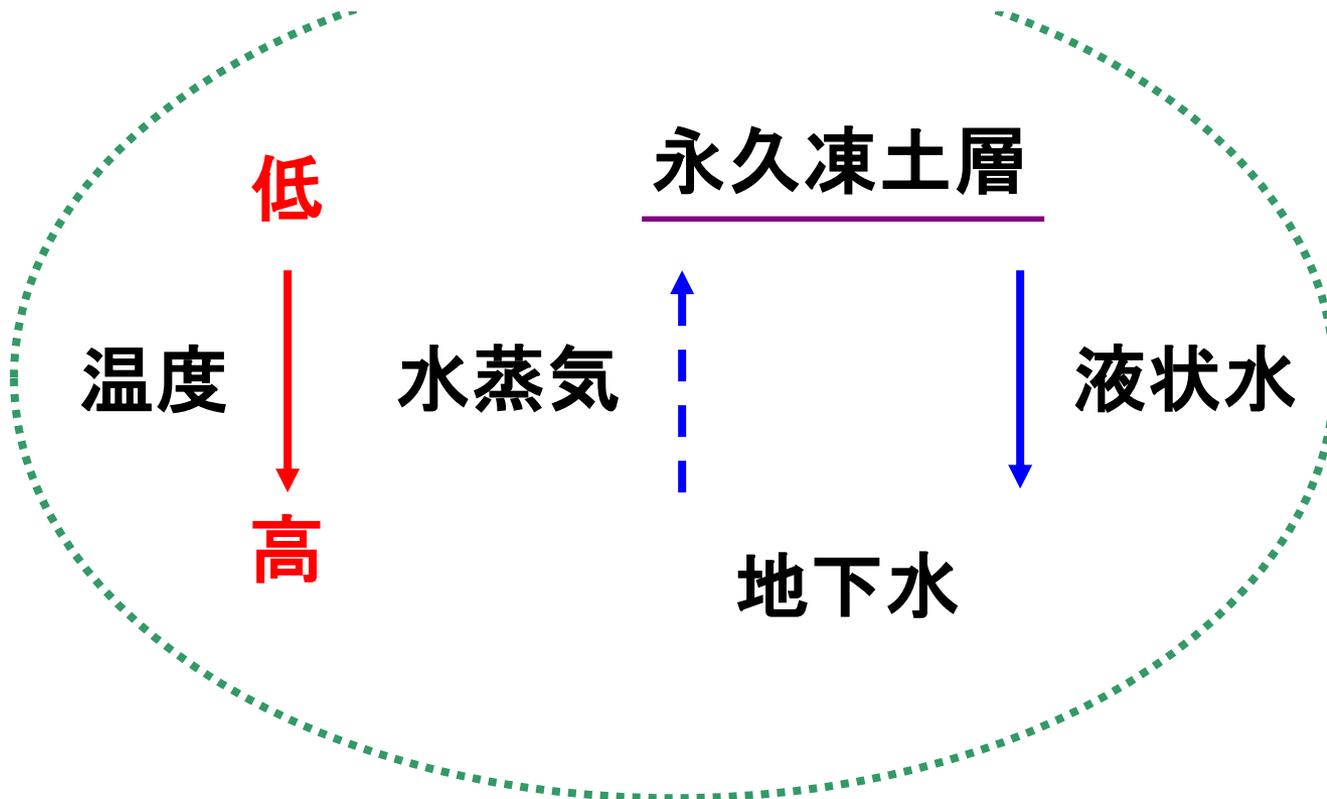
- 2001~2003年
 - 火星の土壌の研究を始めた
- 2003-2004年
 - 役人生活により研究を停止
- 2005年以降
 - 登尾先生にお任せ状態
- 最近、次々に新事実が明らかに！
 - 過去に実験した事実を思い出してみる
 - 自分の研究レビュー

したかった

検証したい現象

Stephen M. Clifford (1991)

…火星地下における水循環の研究



2001年1月16日

第17回宇宙利用シンポジウム

低温・低圧・微重力条件下の 多孔質体中における水の移動現象

溝口 勝（東京大学大学院農学生命科学研究科）

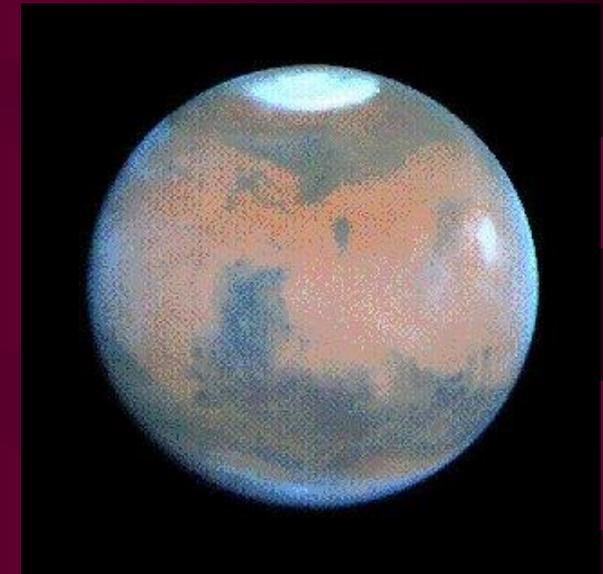
登尾浩助（岩手大学農学部）

土壌の物理性, vol.74, pp.33(1996)

火星に生命体！？

<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/~mizo/essay/kasei.html>

- なぜ地球だけに生命が？
- 火星で農業を！（学部3年）
 - 火星の地下凍土(M1)
- 土壌の研究
 - 現実の条件下でありのままに
 - 極端な条件下で物理法則の普遍性の確認
 - 水蒸気移動
 - 夢のある研究



この研究を始めた理由

Opportunities in Basic Soil Science Research

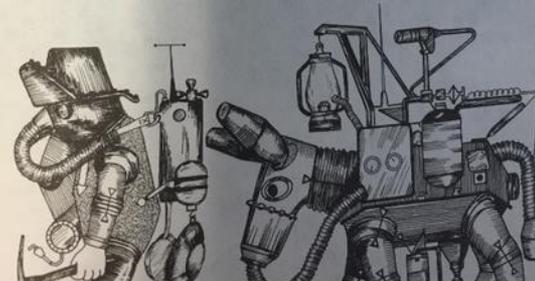


EXTRATERRESTRIAL PEDOLOGY

23

We humans (at least the more adventuresome among us!) often have dreamed about visiting and even living on the Moon, Mars, and other planetary bodies. Now we are entering an era where such dreams can become reality. The National Aeronautics and Space Administration (NASA) is considering several planetary missions as a part of the human exploration of the inner solar system. These missions include expeditions to establish the first human presence on another planet (Mars), establishment of lunar outposts to conduct extraterrestrial science, and evolutionary expansion to establish a self-sufficient human presence beyond our planet. Evolutionary expansion will be a step-by-step program. The first step probably will be the establishment of a lunar outpost that will lead to a self-sufficient human colony. The lunar outpost then will serve to prepare us for the human exploration of Mars. Prior to human exploration, a number of robotic missions will occur on Mars to conduct basic science (e.g., the Mars Rover/Sample Return [MRSR] Mission).

These extraterrestrial missions will probably take place in the first two decades of the 21st century, so planning for them has to start now. A vast amount of science and technology is necessary to ensure their safety and success, and soil scientists will play an important role. Their research will include the development of extraterrestrial "soils" for plant growth, the study of soil formation on planetary surfaces, and the study of past aqueous weathering on planetary bodies.



Opportunities in Basic Soil Science Research

by Garrison Sposito and Robert J. Reginato | Mar 1, 1992

研究の目的

- 減圧条件下での現象観察
 - 砂中の温度変化（今日の話）←2001年時点
- (次年度以降)
 - 水分量変化
 - 昇華と水蒸気移動の解析
 - 低温＋減圧条件下での現象観察

実験方法

- 試料
 - 豊浦砂
- 装置(道具)
 - 減圧チャンバー
 - デシケータ
 - 保温水筒
 - ONSETデータロガー
 - 深さ1cm, 6cm, 11cm, 16cm



実験方法(2)

- 初期条件
 - 含水比 (水分質量/砂質量) x 100
 - (0.5%, 6%, 10%, 20%)
 - 温度一定 (約18°C)
- 境界条件
 - 蒸発可@カラム上面
 - 断熱@上面以外
- 減圧時間
 - 10~20時間

何が起きたか？

砂が凍った！

- 湿った試料
 - 内部まで凍結
 - 所々に空隙
- 乾いた試料
 - 凍結なし



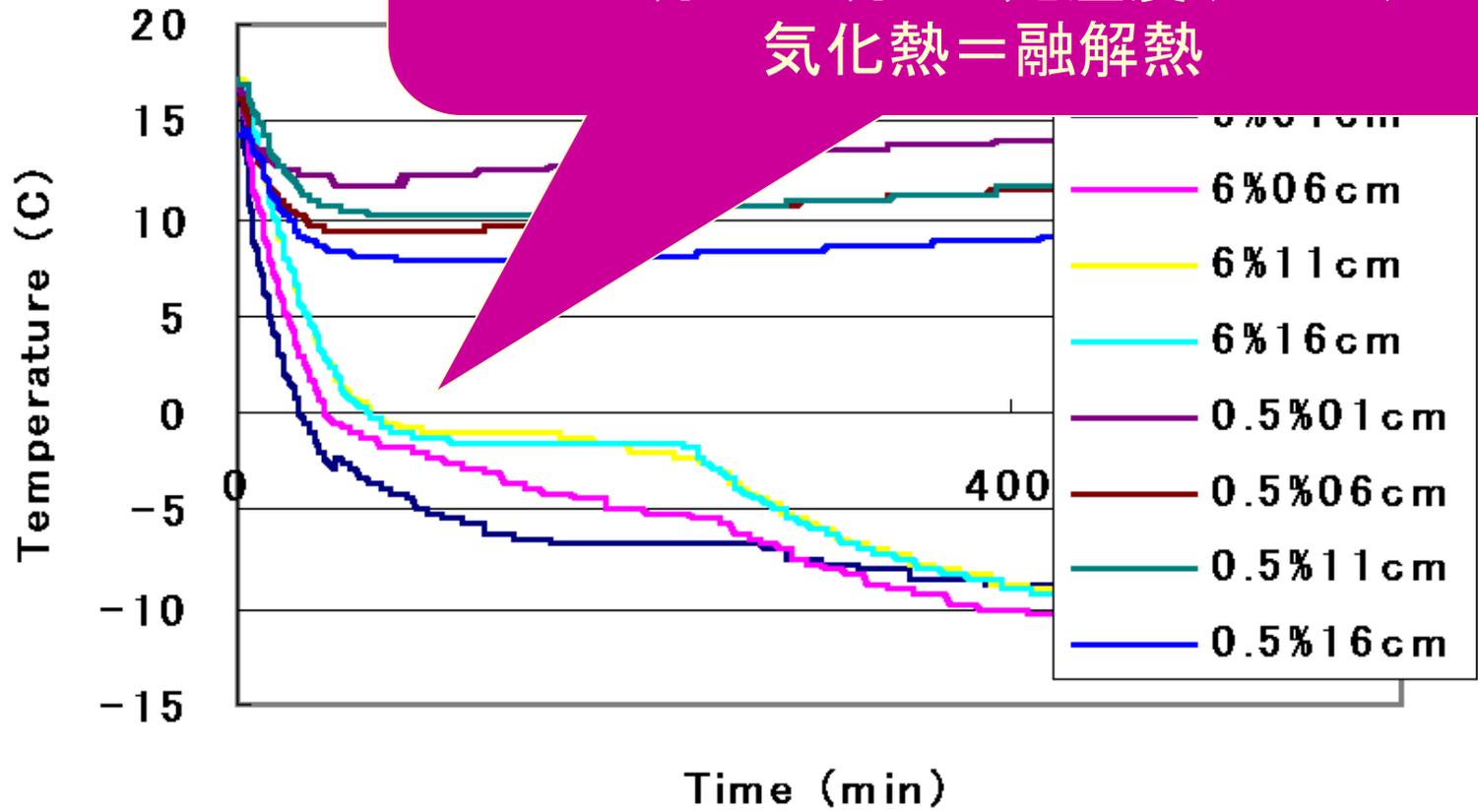
温度変化

Fig. T

50分: -3°C から -2.3°C に瞬間上昇
過冷却

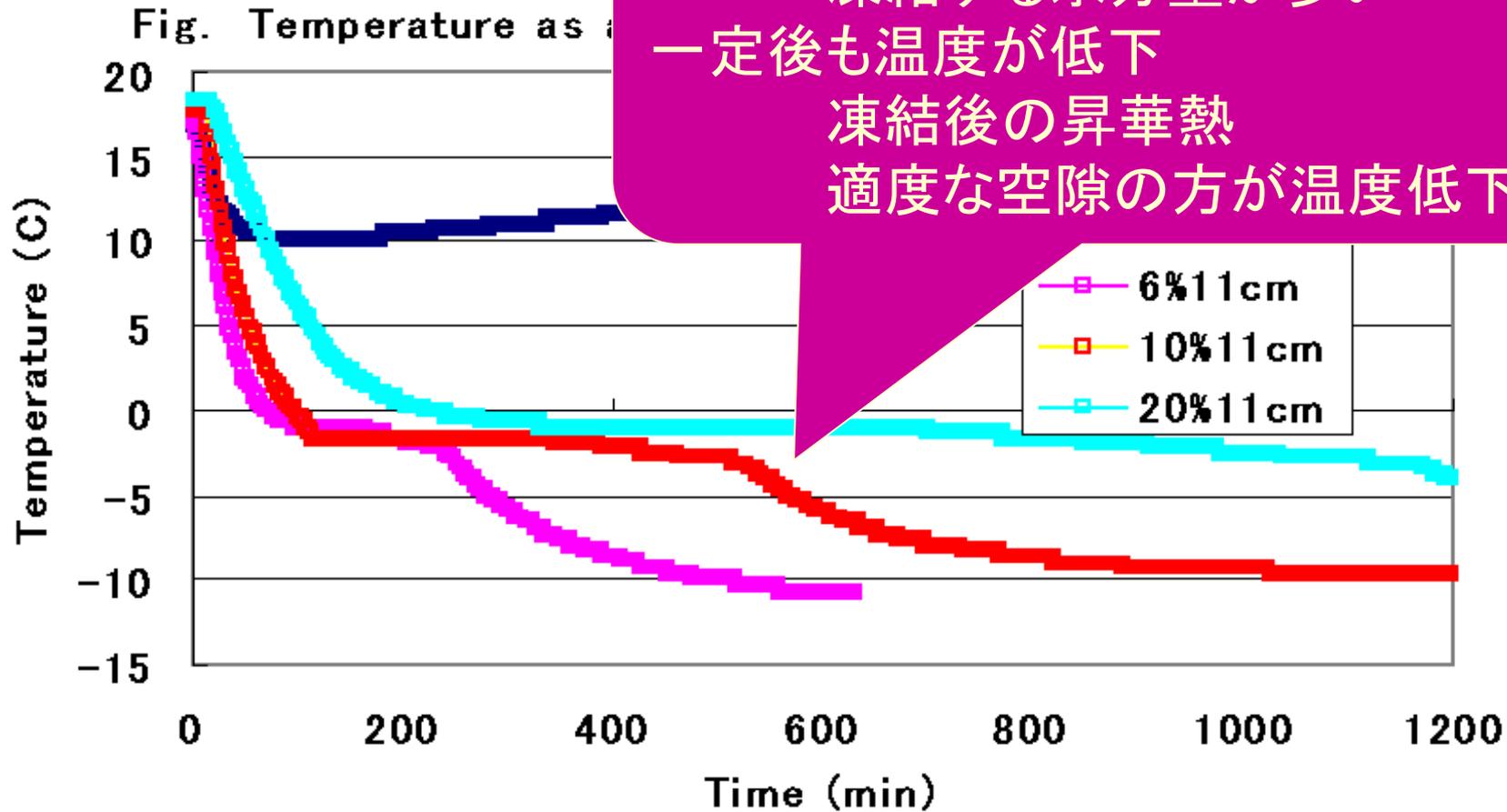
170分~260分: 一定温度 (-7°C)

気化熱 = 融解熱



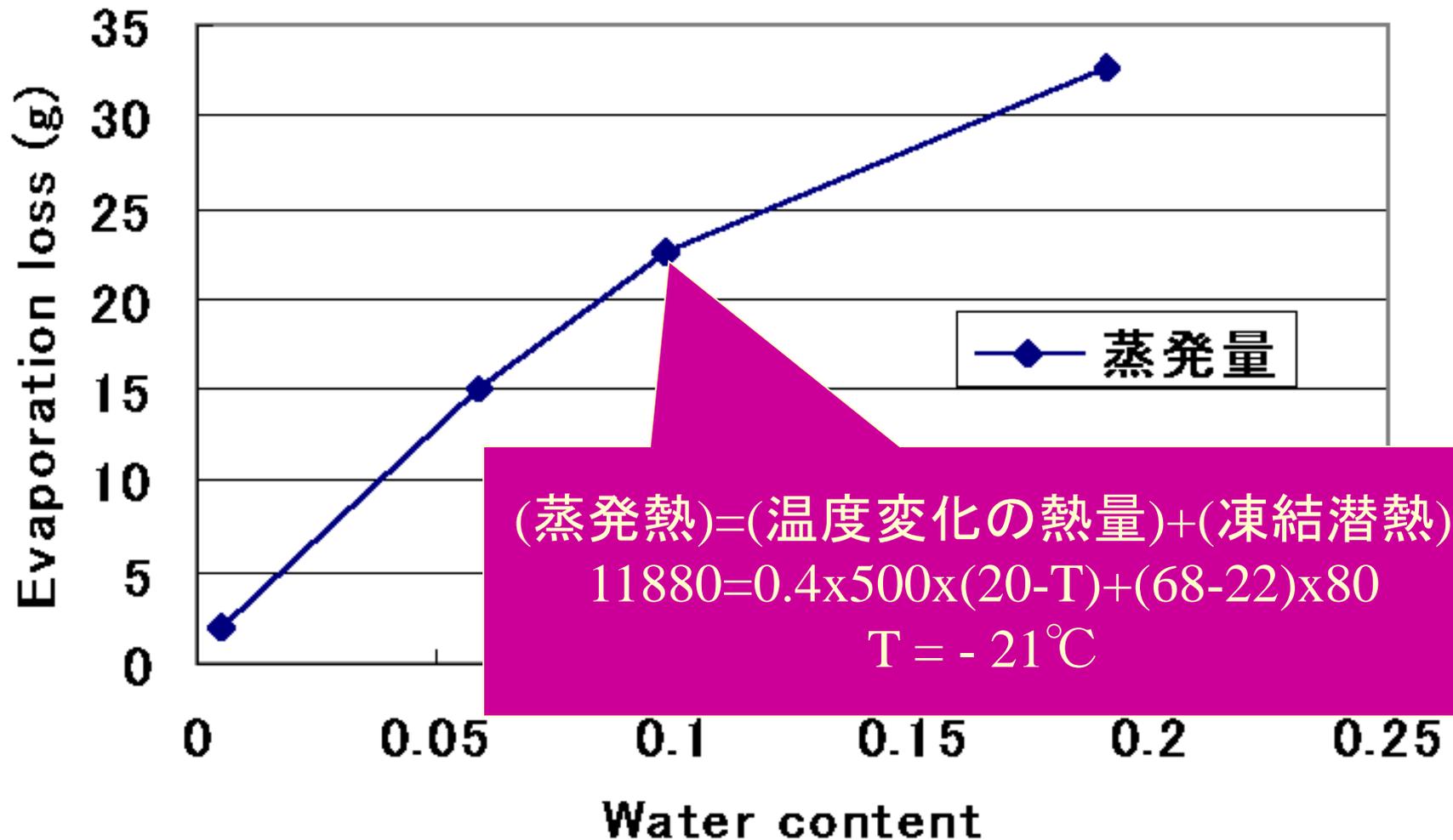
初期含水比の影響

一定温度時間: 含水比が高い方が長い
凍結する水分量が多い
一定後も温度が低下
凍結後の昇華熱
適度な空隙の方が温度低下が大?



蒸発量と初期含水比の関係

Fig. Evaporation loss vs. water content



2002年1月11日

第18回宇宙利用シンポジウム

@宇宙科学研究所

減圧条件下における 砂中の熱と水分の移動

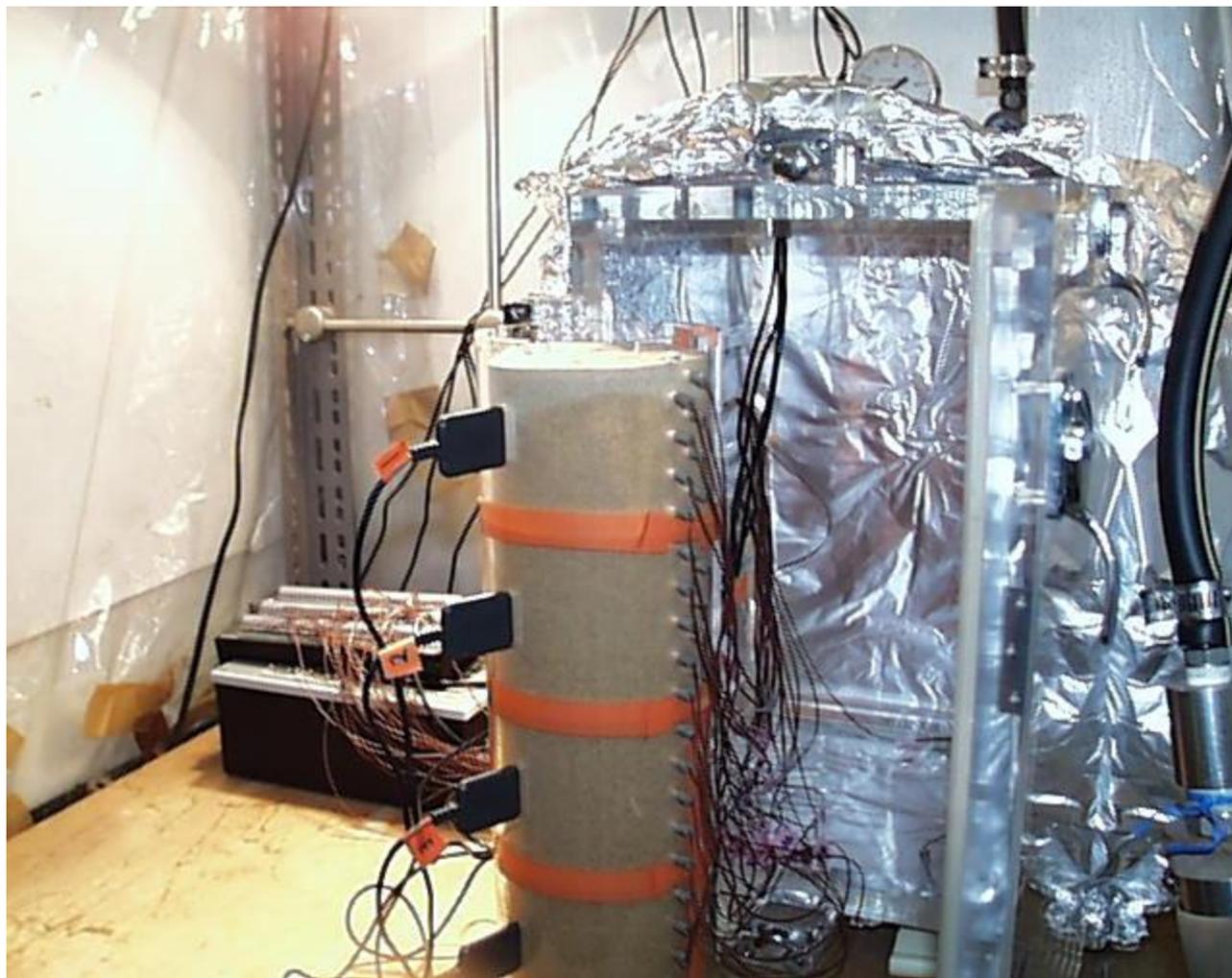
溝口勝*・登尾浩助**・関勝寿*・井本博美*・宮崎毅*

* 東京大・院・農 ** 岩手大・農

土壤水分計

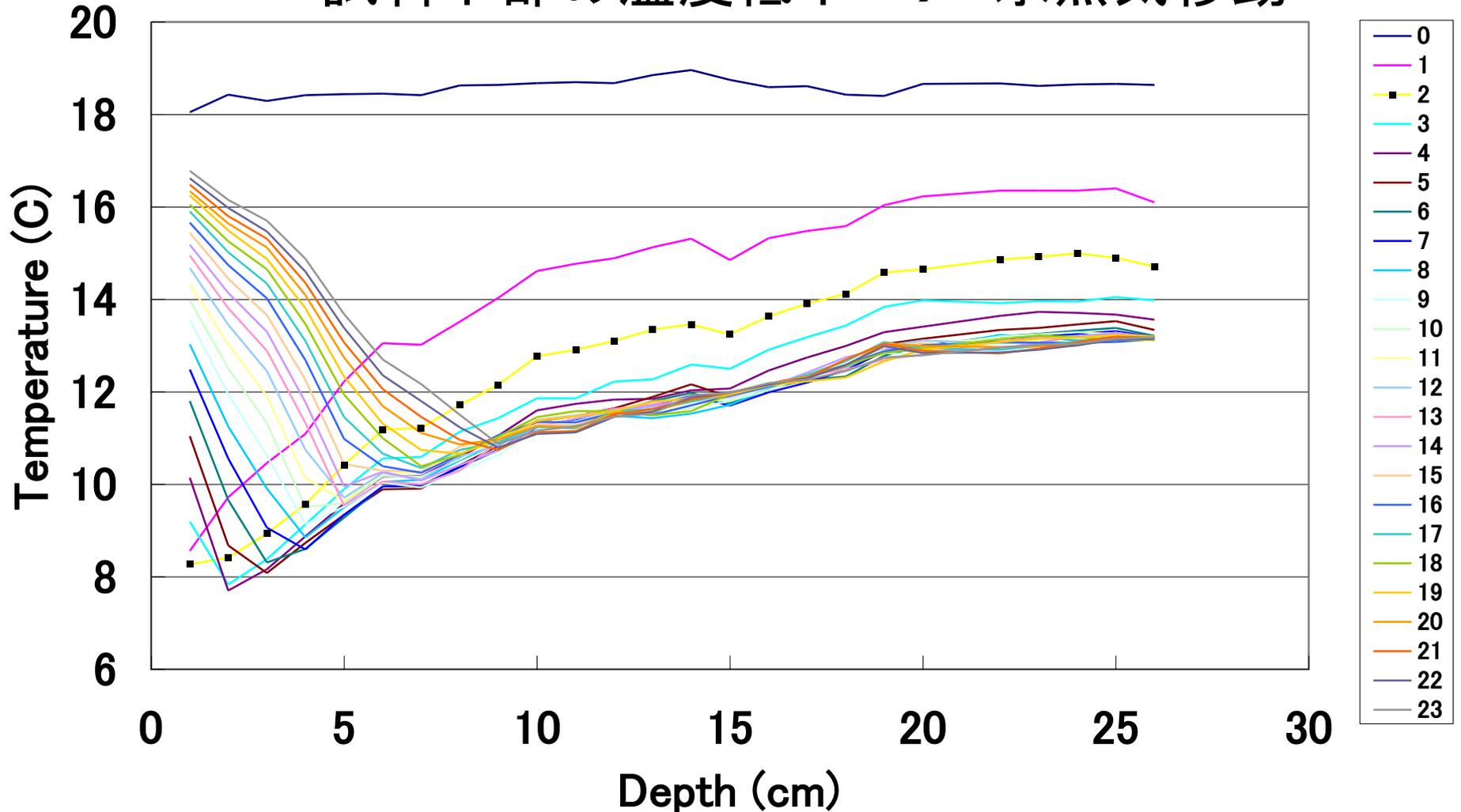


実験装置



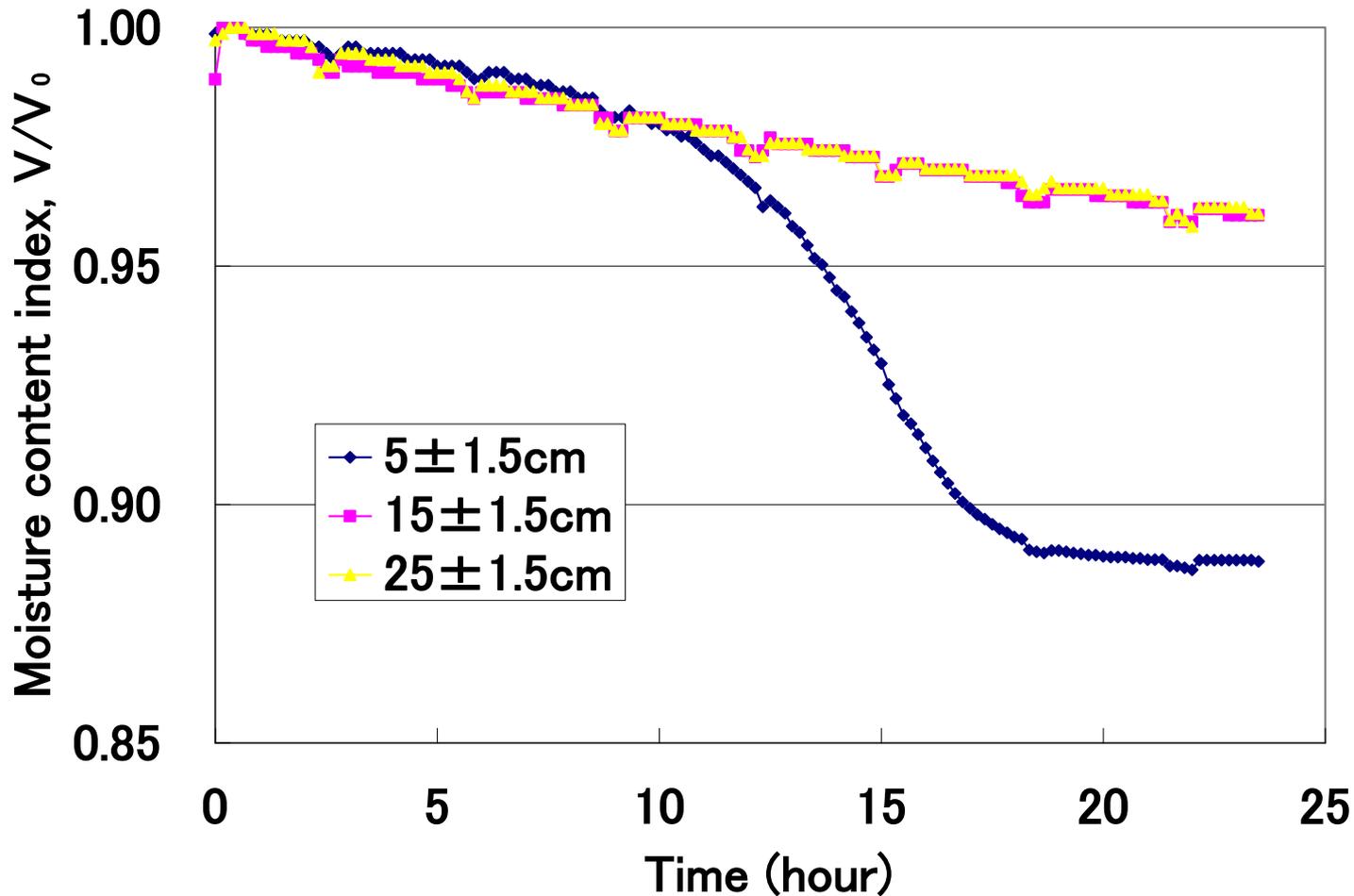
温度分布の変化

- V字形 → 蒸発面の移動
- 試料下部の温度低下 → 水蒸気移動



水分量の時間変化

- 10-15時間の低下@5cm → 蒸発面の通過
- 直線的低下@15cm&25cm → 水蒸気移動



2002年

現時点での結論

- 減圧過程（初期含水比5%）で
 - 蒸発面が砂中を移動する
 - 砂中深部からも水分が失われる
 - 水蒸気移動が重要
- 異なる初期含水比での実験結果待ち
 - 間隙量と水蒸気移動速度

2003年1月20日

第19回宇宙利用シンポジウム

@宇宙科学研究所

減圧蒸発過程における塩含有砂中 の熱と水分の移動

溝口勝・末継 淳・井本博美・宮崎毅

*東京大学大学院農学生命科学研究科

実験目的

減圧蒸発過程における

- 砂中の水分・熱の移動現象の把握
 - 初期水分量の影響 (2000-2001)
 - 塩分の影響 (2002)

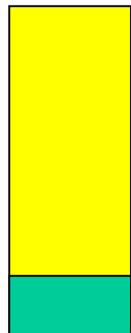
実験方法

- 初期条件
 - 含水比:10%, 15%
 - NaCl濃度:0, 0.2, 1, 2, 10, 20%
- 境界条件
 - 蒸発可@カラム上面
 - 断熱@上面以外 (熱損失率 $77 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$)
- 減圧時間
 - 168時間(1週間)
- 減圧後、試料採取
 - 含水比測定
 - 塩分量(1:5EC)測定

観察事項

- 表層は完全に**乾燥**
- 0% 17-20cmに**凍結層**
- 1% 5-6cmと18-20cmの二ヶ所に凍結層
- 5% 8-9cmが凍結、9cm以下は**未凍結**
- 20% 0-4cmまで**塩クラスト化**(乾燥)、
4cm以下は未凍結

0 %



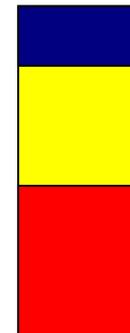
1 %



5 %

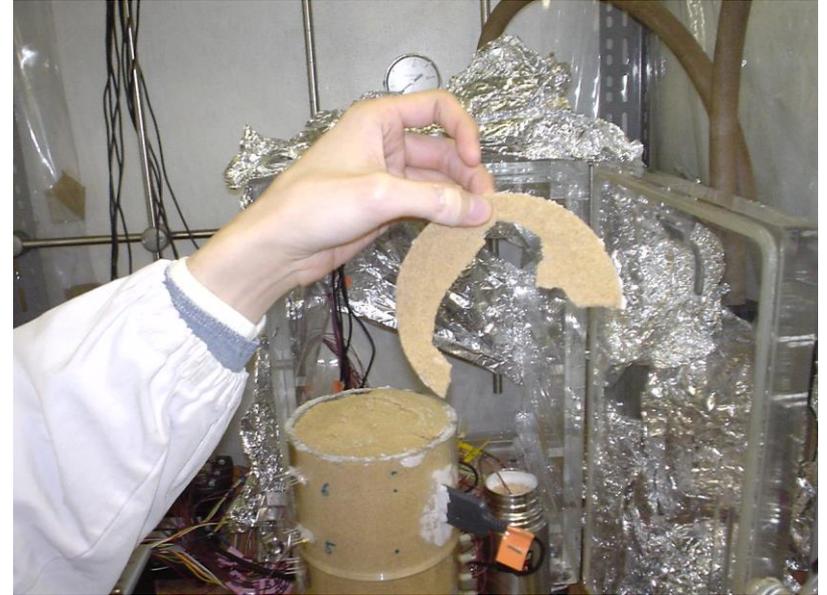


20 %



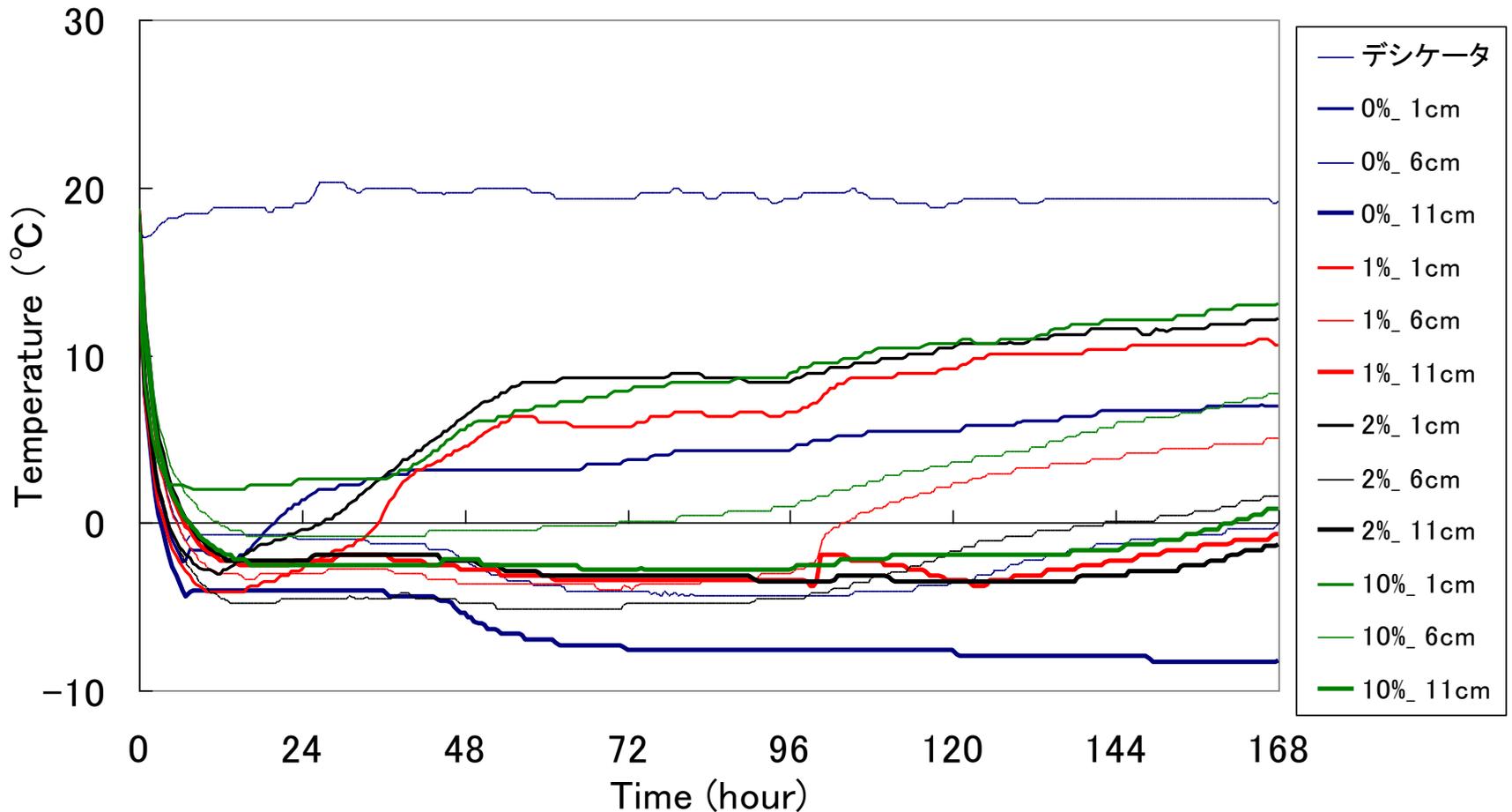
塩クラスト

表層の塩クラスト



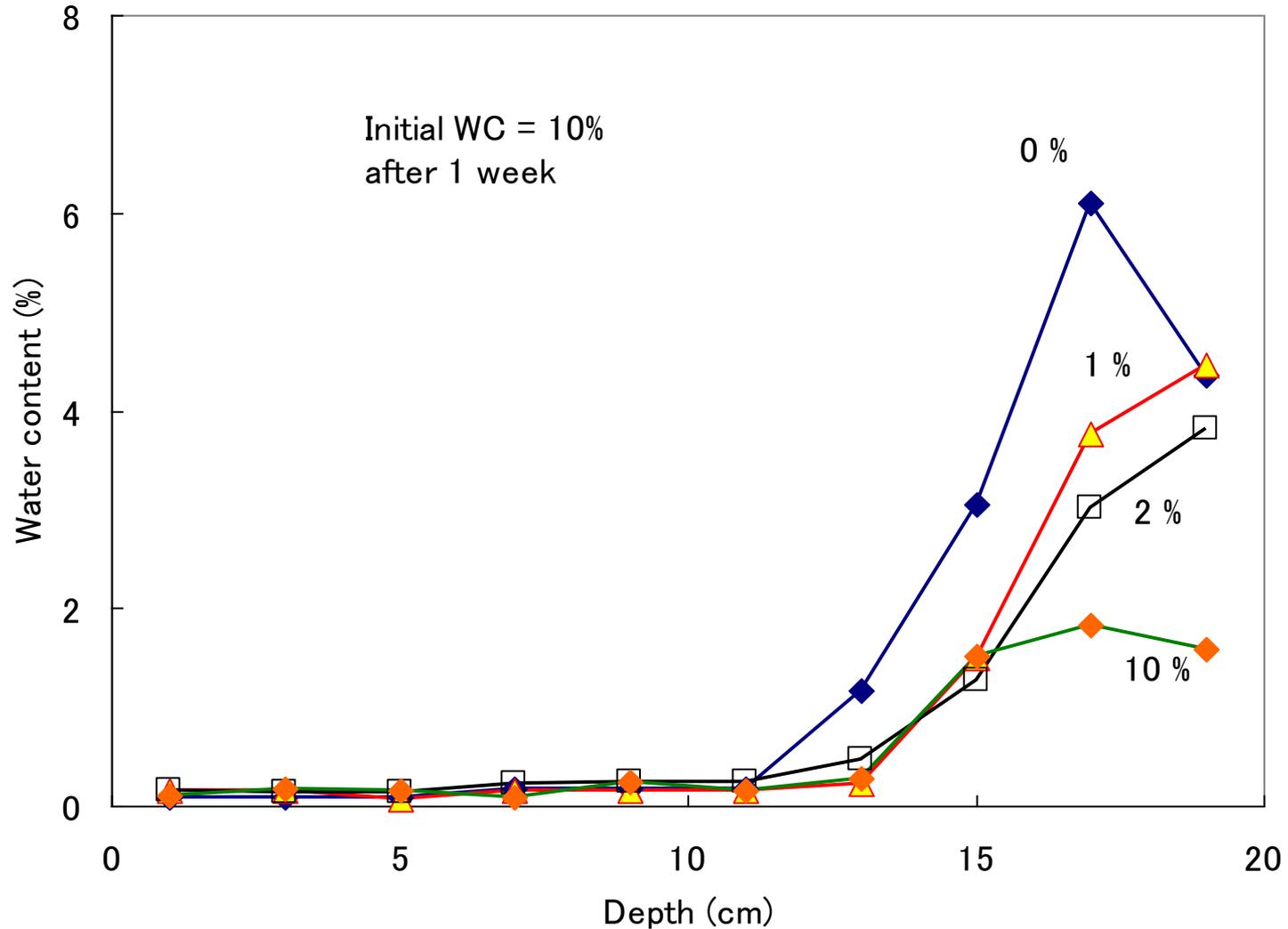
温度変化

- 表層温度は低下した後、24時間で上昇
- 10%の表層温度は 0°C 以下にならない
 - 氷点降下
- 塩分濃度が低いほど、下層の温度が低下
 - 蒸発熱による凍結(蒸発しやすい)



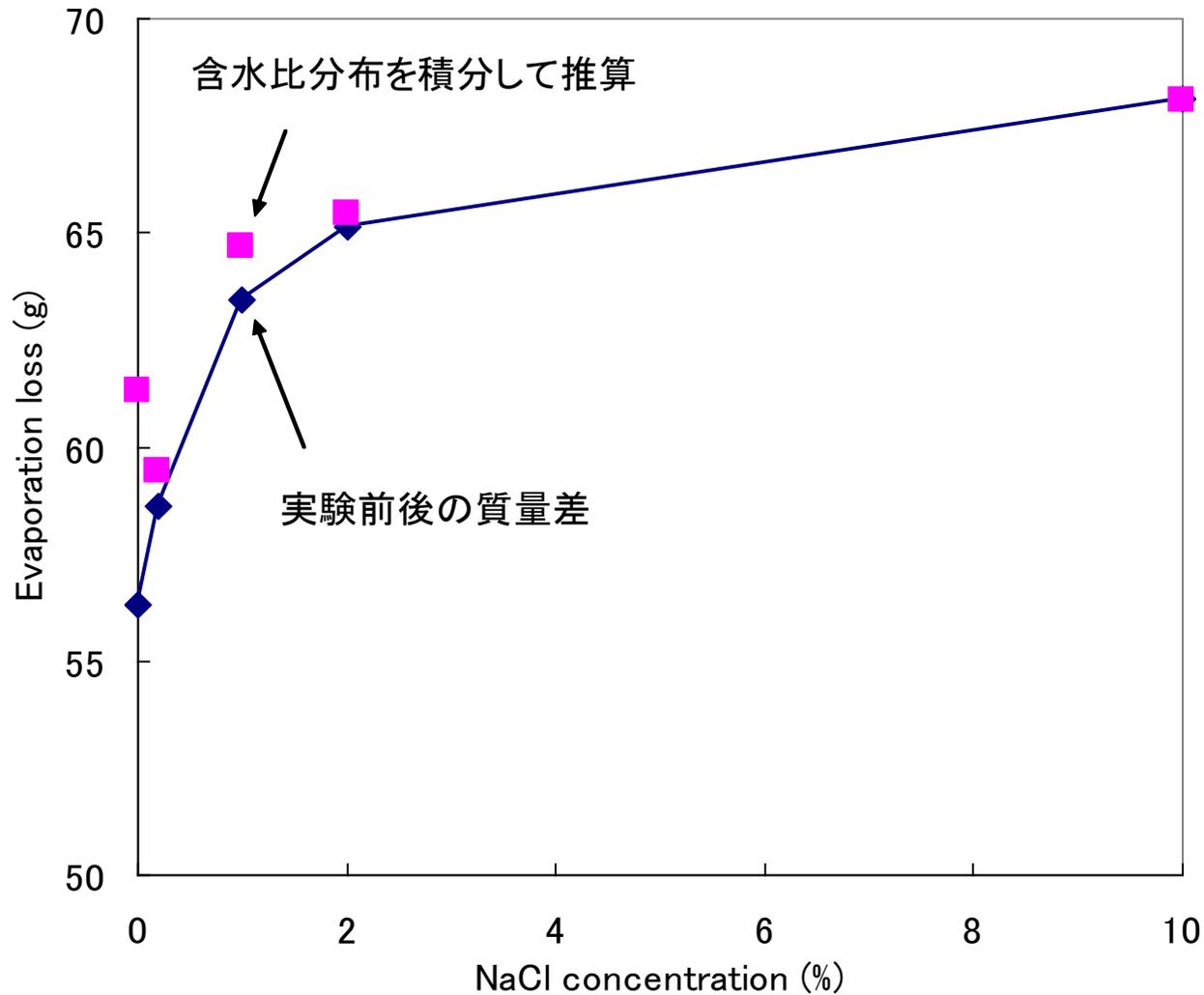
含水比分布

- 表層11cm付近まで、極限的に乾燥
- 塩分濃度が高いほど、下層の水分が減少
 - 毛管作用により液状で水が移動



積算蒸発量

- 濃度が高いほど積算蒸発量が大
 - 高濃度ほど液状で水が移動する傾向が大



2003年時点でのまとめ

減圧蒸発過程で

- 高濃度では試料が凍結しない
 - 低濃度では試料が凍結する
- 塩分が表層に移動する
 - 毛管作用による液状水移動が生じる
- 塩分濃度が高い方が蒸発量が多い
 - 高濃度ほど氷点降下により液状で水が移動しやすい
 - 高濃度過ぎると、表層に塩クラストが形成される

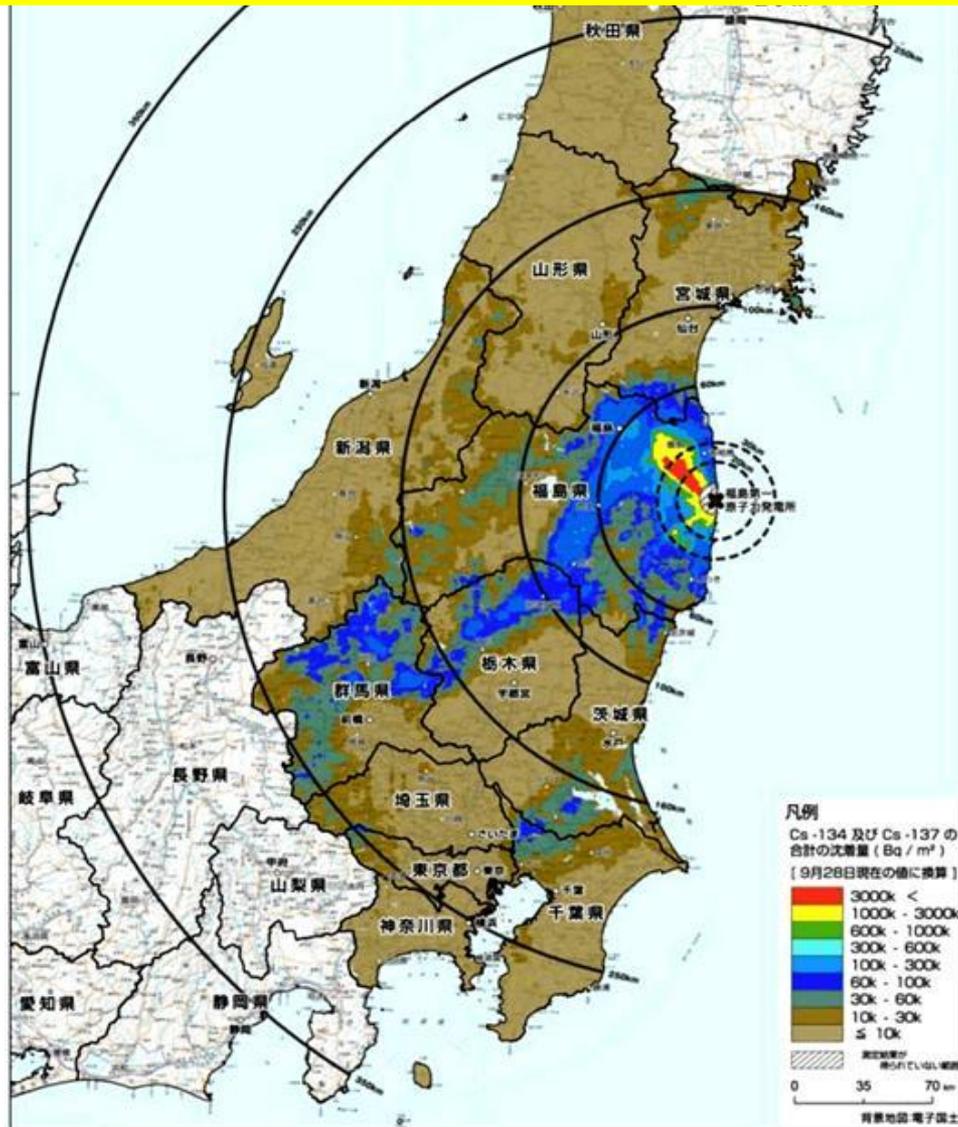
さて、今後どのような展開になるのだろうか？
楽しみ！

福島における農地除染

福島土壤除染技術

<http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/edrp/fukushima/fsoil/>

放射性セシウムの分布



農地の標準除染法

農林水産省 農地除染対策の技術書概要 【調査・設計編、施工編】

平成24年8月



表土削り取り



水による土壌攪拌・除去



反転耕

行先はどこ？ 汚染土の入ったフレコンバック



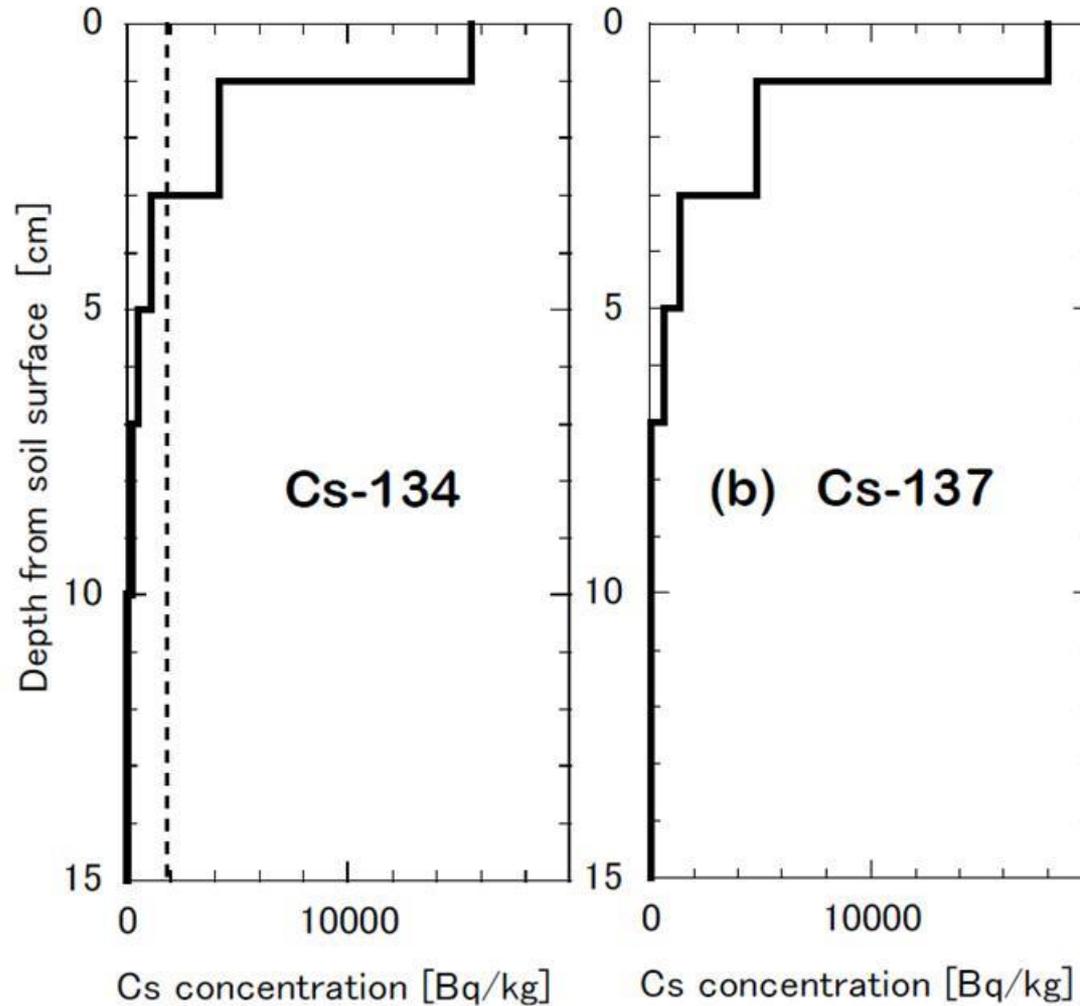
飯舘村草野地区 (2012年6月24日)



飯舘村須萱地区 (2013年8月17日)

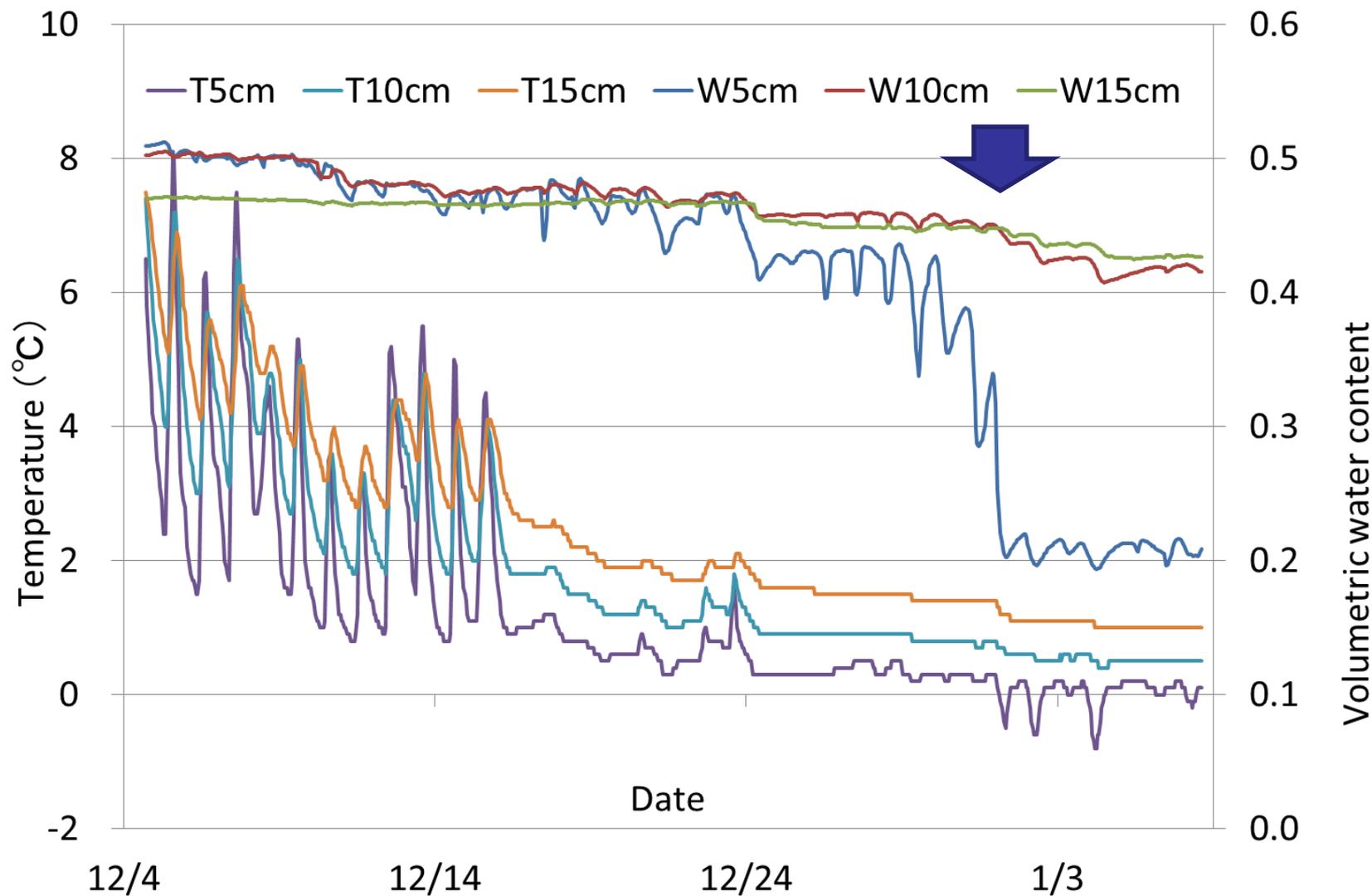
放射性セシウムの濃度(2011.5.24)

実線:不耕起水田, 破線:耕起水田



塩沢ら:福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度,
RADIOISOTOPES誌, 8月号, 2011より引用

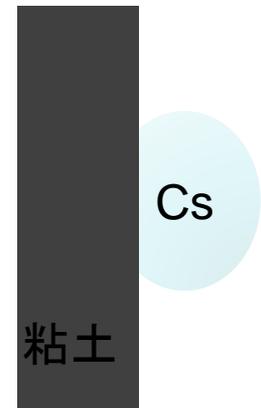
実験水田の地温と土壌水分



放射性セシウムを理解するポイント

有機物に弱く吸着しているセシウムは別として

- 粘土粒子と一体化して考える
- 粘土の移動に注意する
- 粘土の除去を考える



板状の塊のまま剥ぎ取られた厚さ 5cmの凍土

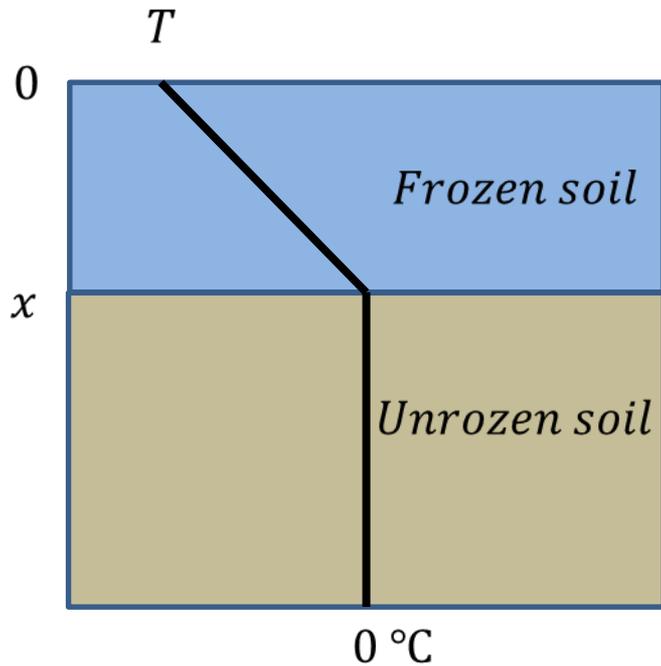


地表面からの放射線量(コリメータ付)が1.28 μ Sv/hから0.16 μ Sv/hに低下

飯舘村佐須の水田における 凍土剥ぎ取り実証実験(2012年1月8日)



Stripping method of natural frozen soil



x : Frozen depth t : time
 T : surface temperature
 k : Thermal conductivity of soil
 θ : Volumetric water content of soil
 L : Latent heat

$$k \frac{T}{x} = \theta L \frac{dx}{dt}$$

$$x = \sqrt{\frac{2k}{\theta L} \int T dt}$$

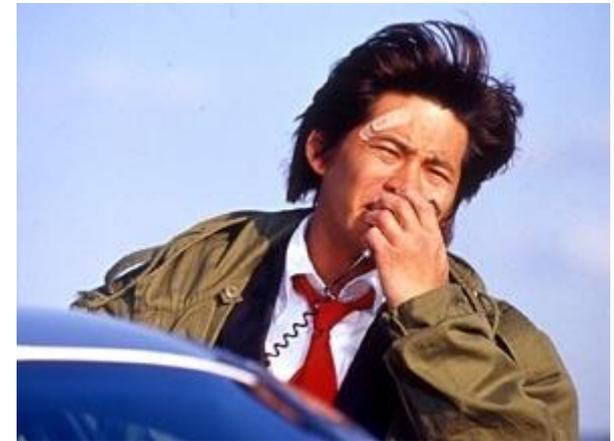
$$F = \int T dt$$

$$x = \sqrt{\frac{2k}{\theta L} F}$$

$$x = \alpha \sqrt{F}$$

議論—私のスタンス

- 大学の研究とは何だろう？
 - 誰のための研究なのか？
 - 研究は生かされてこそ意味がある
- 農学部としての責任
 - 土壌 : 土をどう教えるか
 - 食料問題
 - ローテクの組み合わせ
 - 持続可能な農業
- 徹底した現場主義
 - 問題は研究室で起こっているのではない！
現場で起きているんだ！！



踊る大調査線

いま科学技術が問われている

- 農学と情報科学で風評被害をなくせるか？

- 農学栄えて農業滅ぶ

– 横井時敬(1860-1927)

土に立つ者は倒れず、
土に生きる者は飢えず、
土を護る者は滅びず

どんなに恐ろしい
武器を持っていても
たくさんのかわいそ
うなロボットをあや
つっていても
土からはなれては
生きていけないのよ！



「天空の城ラピュタ」
シータの名セリフ
(宮崎駿, 1986)

- いま農学部は何をすべきか？

- 稲のことは稲に聞け、農業のことは農民に聞け

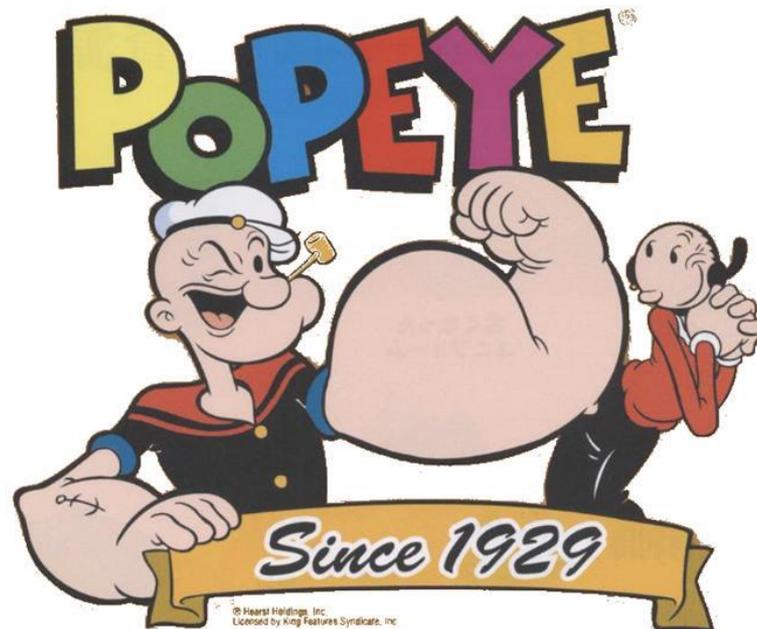
まとめ

- 駒場農学校・横井時敬先生(1860-1927)の名言
 - 農学栄えて農業滅ぶ
 - 土に立つ者は倒れず、土に生きる者は飢えず、土を護る者は滅びず
 - 稲のことは稲に聞け、農業のことは農民に聞け
- いま東大農学部は何をすべきか？
 - 現場から課題を自ら発見し、解決する学習の強化
 - FPBL(Field and Project-Based Learning)



タフな東大生諸君！ こんな学生なってね！

- 1に体力
- 2に食欲
- 3・4はなくて
- 5にジョーク！



ちょっとだけ研究室の宣伝(これは選択)
土壌物理学、情報通信技術

- とにかく心身ともに健康に！



Google

みぞらぼ



Search

About 2,490,000 results (0.24 seconds)

[Advanced search](#)

講義

<http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/lecture/leclist.html>

溝口研究室



Mizo lab.