

土壌圏の科学(2015.11.4)

土壌の凍結と凍土の利用

東京大学

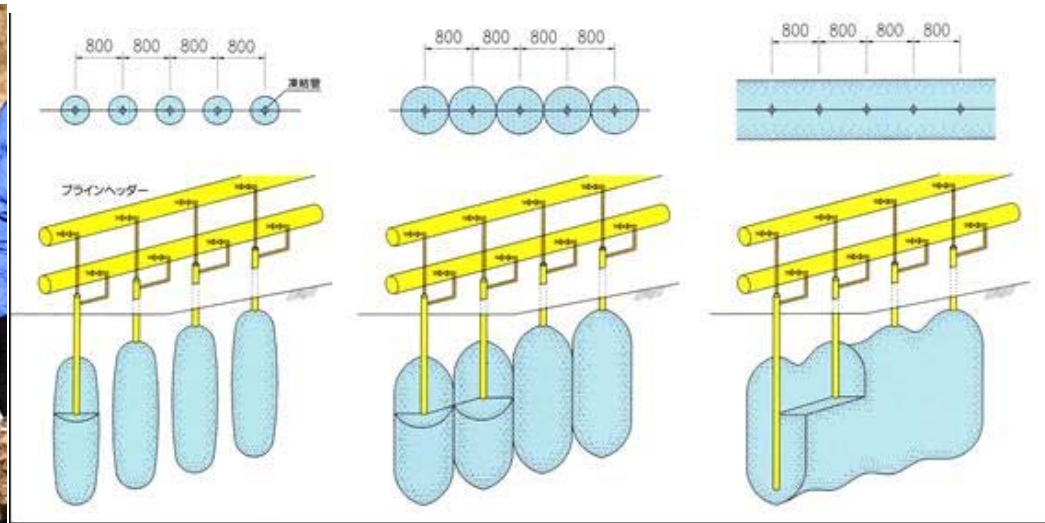
大学院農学生命科学研究科

農学国際学専攻・国際情報農学研究室

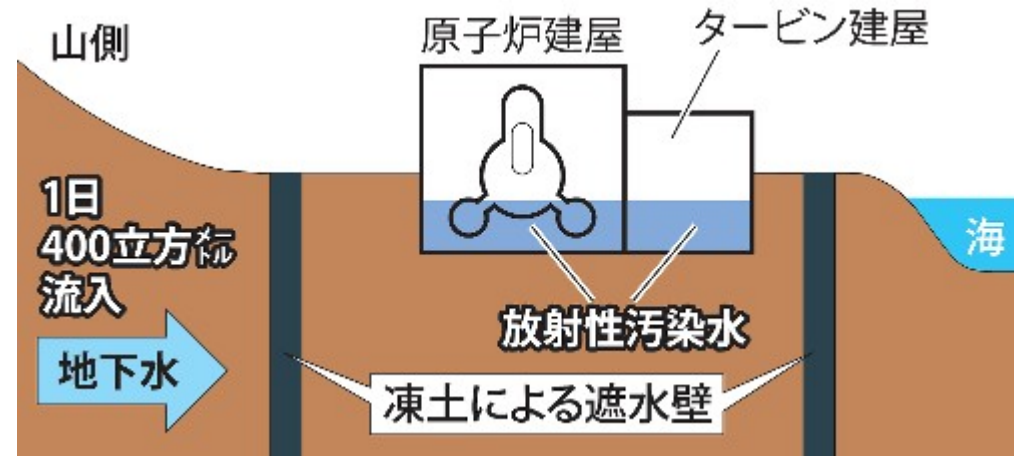
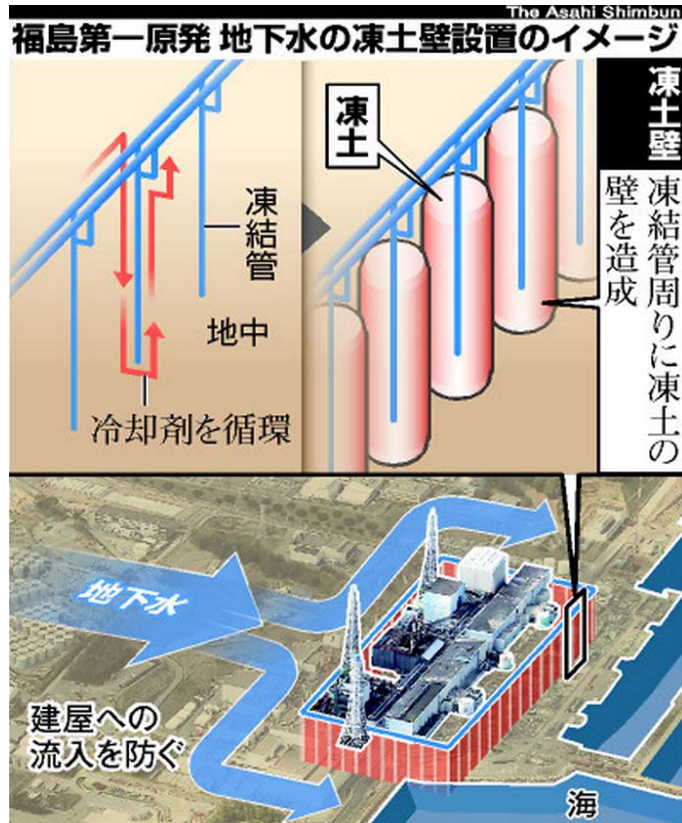
教授 溝口 勝



いま凍土が熱い！



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

- 凍土遮水壁の概要- 東京電力
- 絶対に凍らない！本当に福島原発の凍土遮水壁は必要なのか ..



い ち え ふ

これが
彼がその目で見てきた
「福島の実実」

福島第一
原子力発電所
労働記(1)

これは
「フクシマの実実」
を越く漫画
ではない

福島第一原発
作業員が描く
原発ルポ漫画

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 = $5\text{MN/m}^2 \cdots -10^\circ\text{C}$ 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

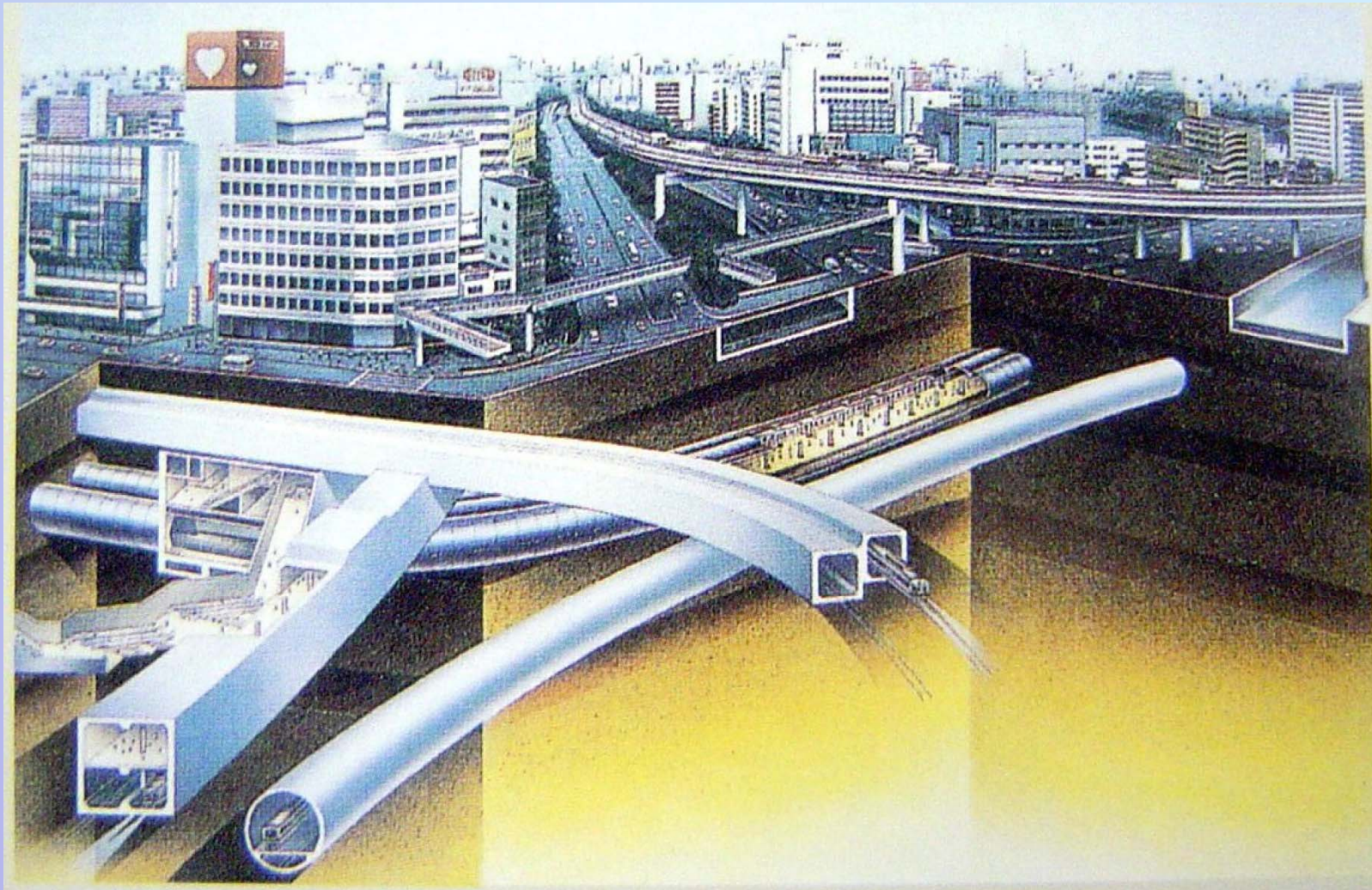
- 時間がたてば熱エネルギーが温度に高い所から低い所へ流れ、凍土壁内の温度は均一になる

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

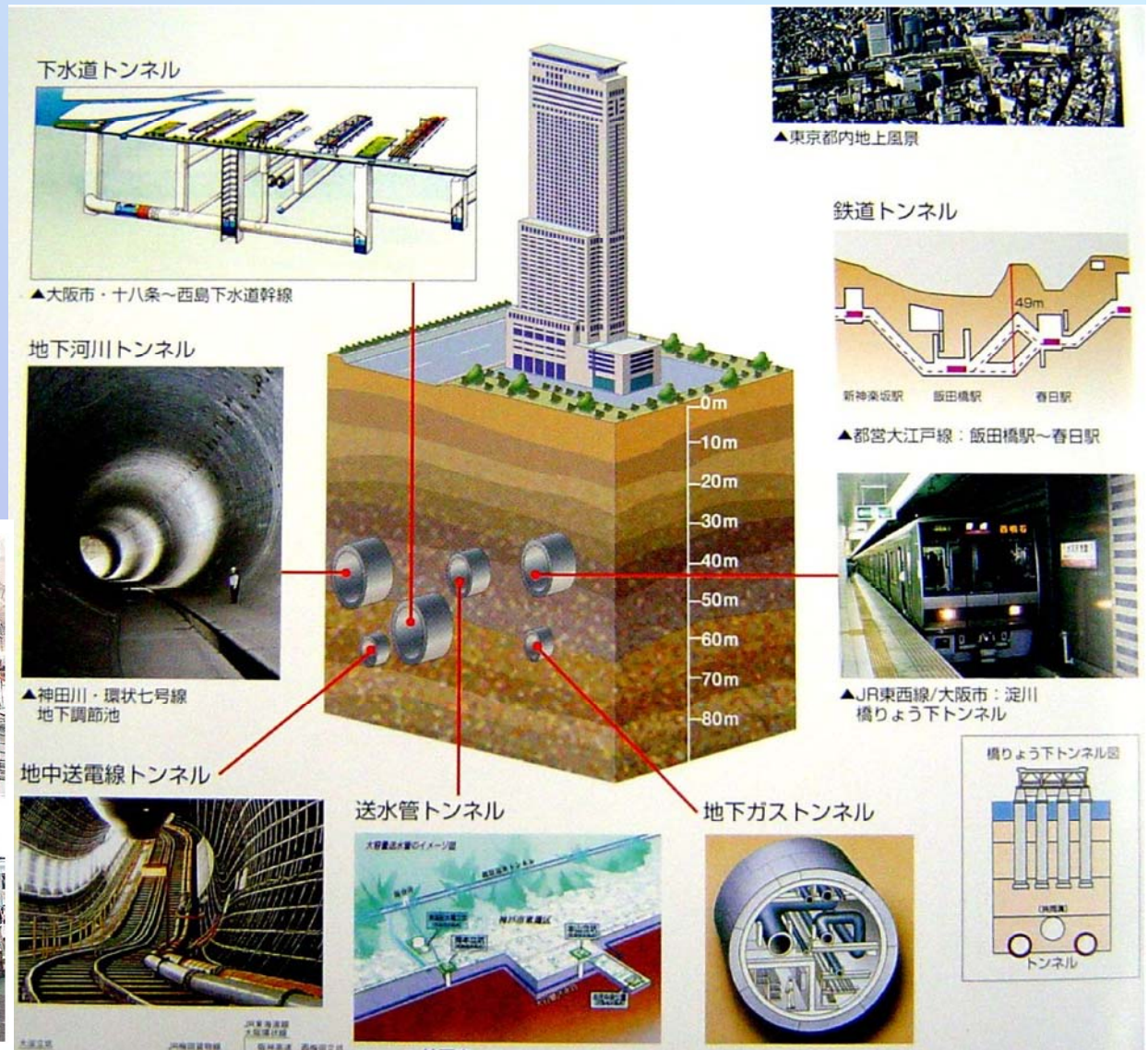
具体例ートンネル工事

- ・地下は都市に残された最後の空間である



・都市部の地下は混雑！

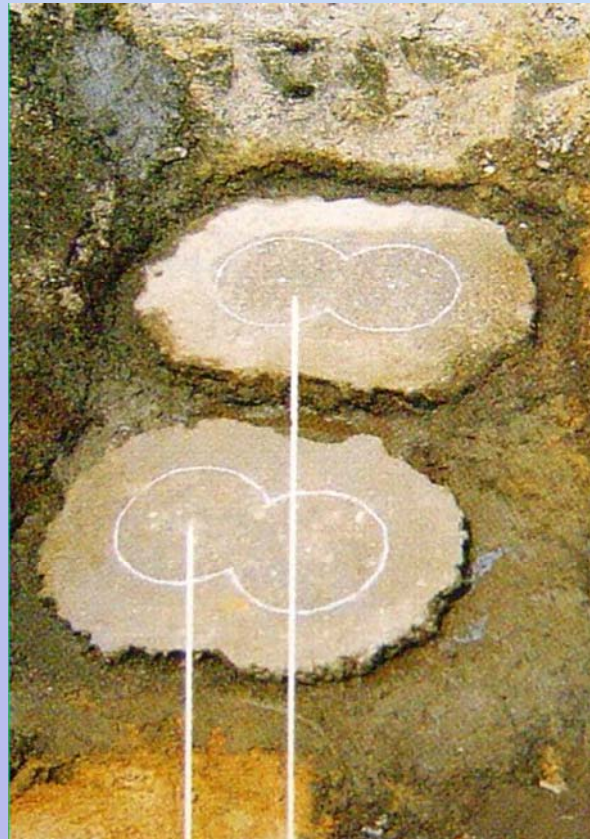
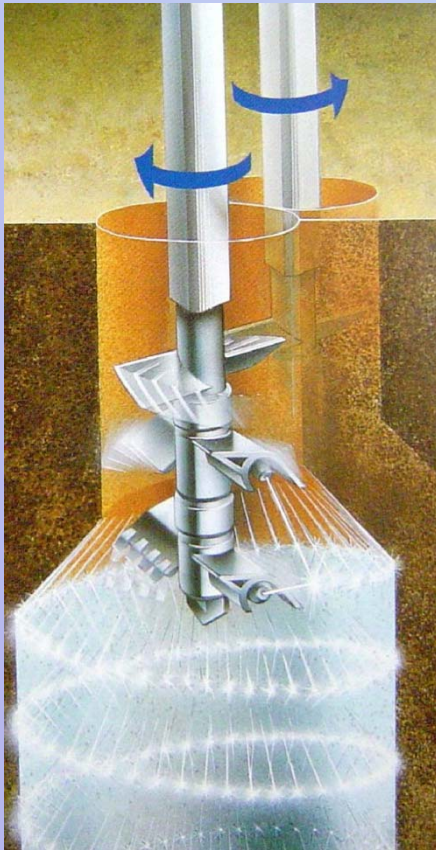
- ・新しい構造物はどんどん深く、大きくなる。
- ・また、日本の地下は水だらけなので、都市部ではシールド工法が数多く採用されている。



- ・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



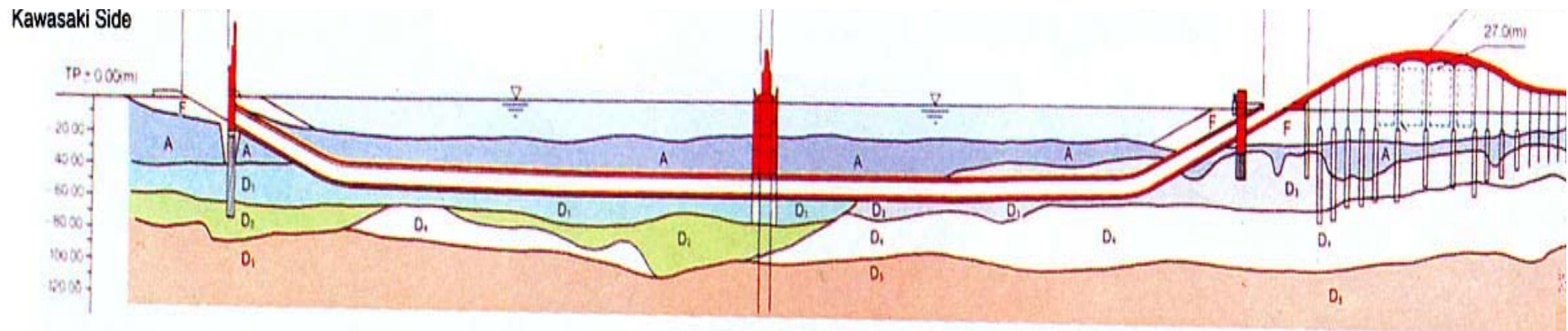
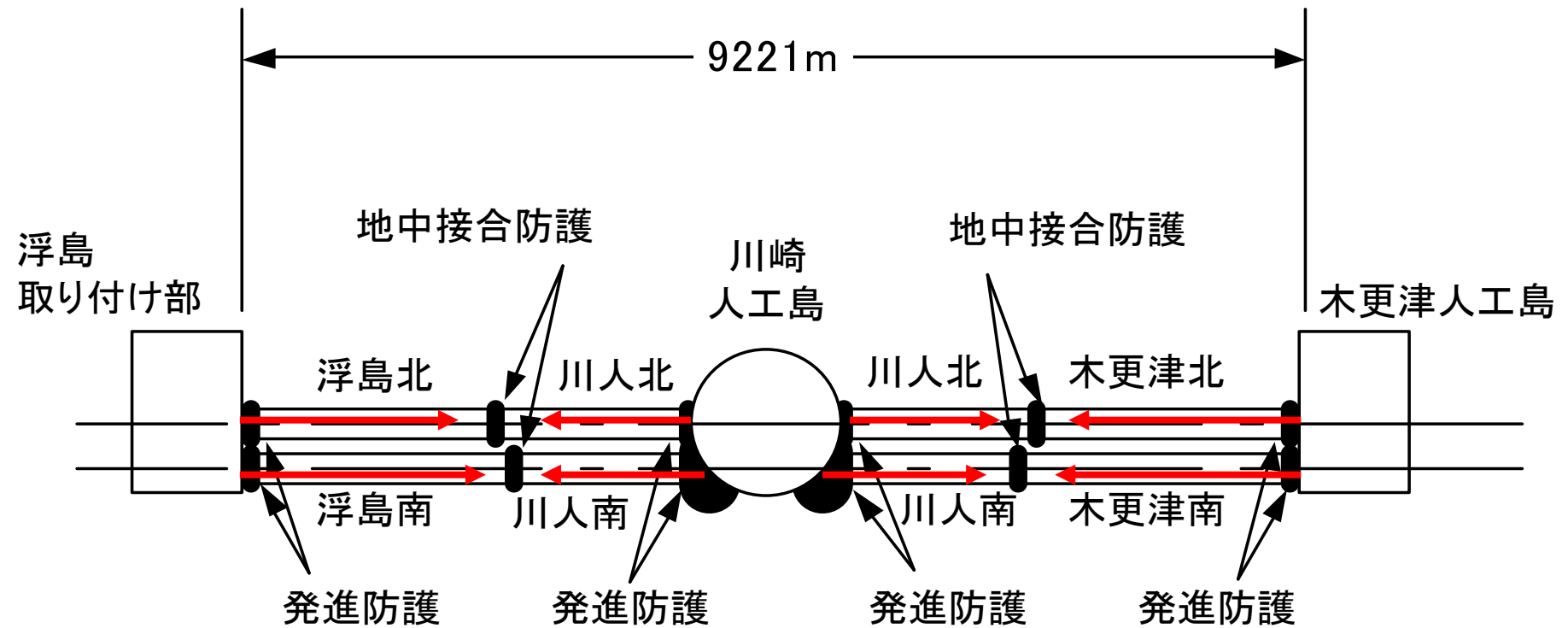
凍結工法施工例

＜東京湾横断道路（東京湾アクアライン）＞

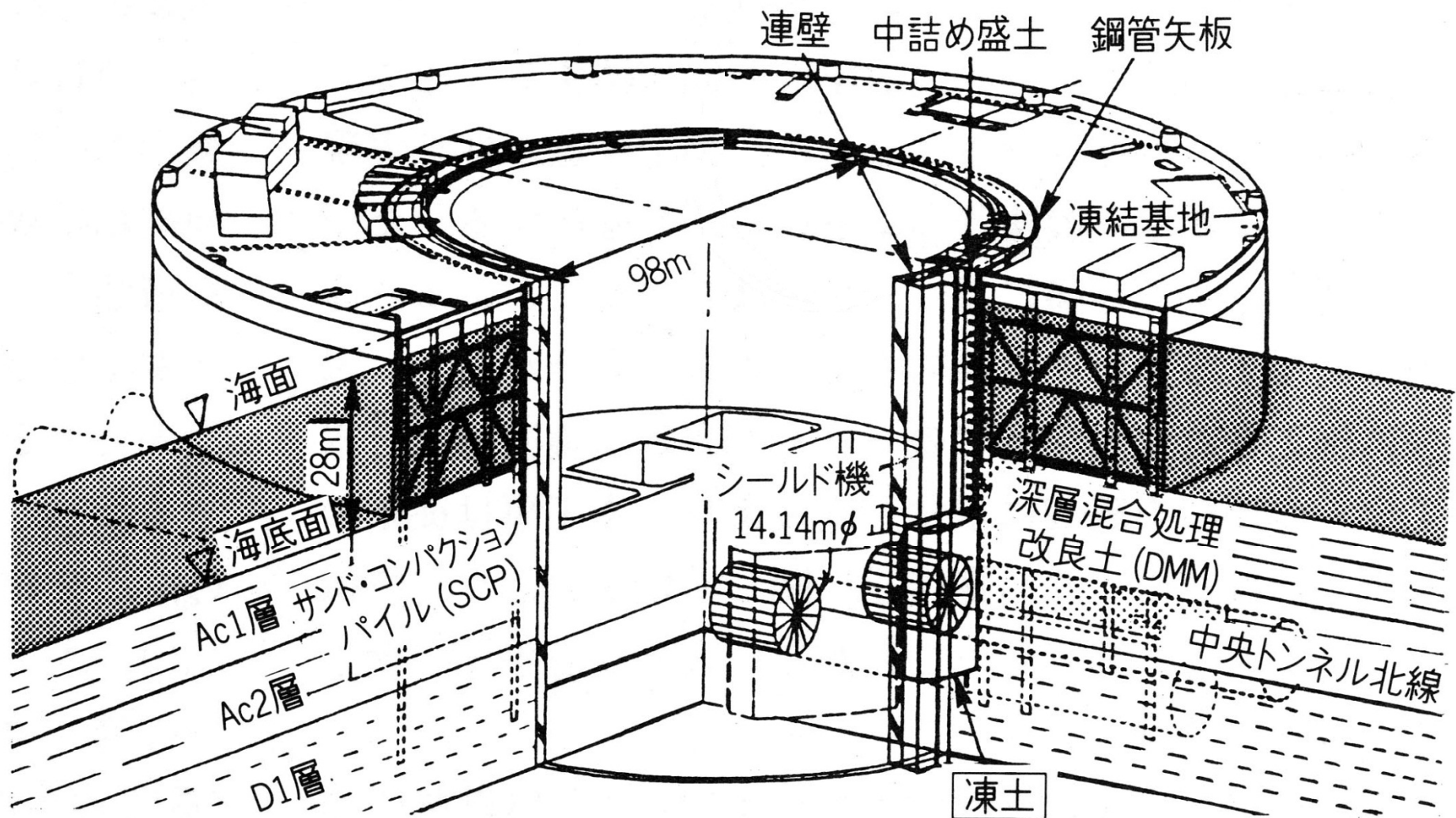
- ・ H7年～9年(1995～1997)
- ・ 前例のない大規模海底トンネル工事



・東京湾横断道路全体図と凍結工事(発進8ヶ所、接続4ヶ所)



- ・ 川崎人工島の断面および凍土壁
- ・ H6年～7年
- ・ 海面下70mの高水圧
- ・ シールド機は世界最大の断面積

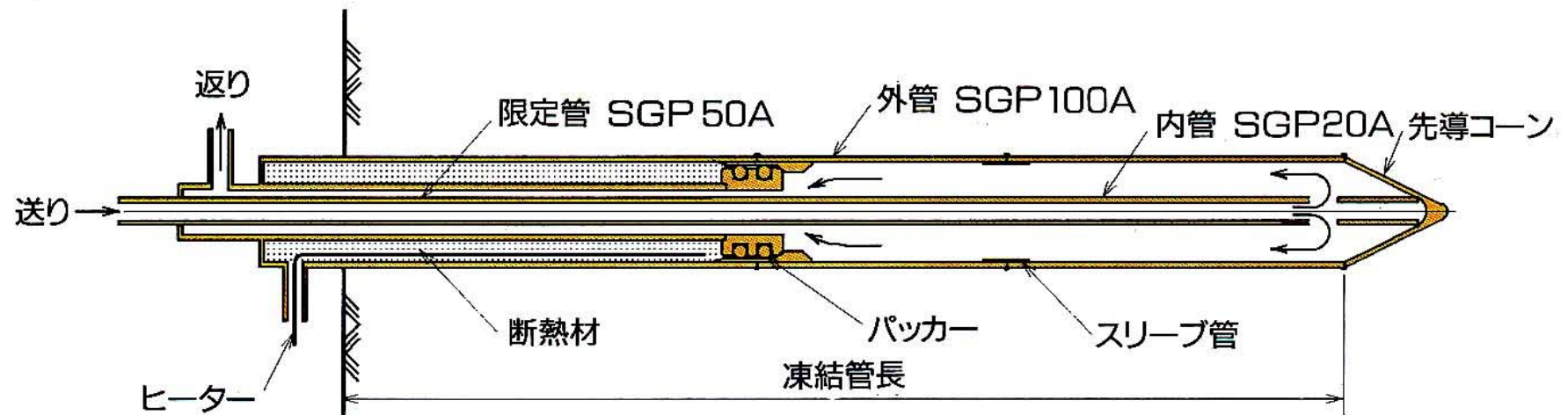






・凍結管（例：限定凍結管）

● 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

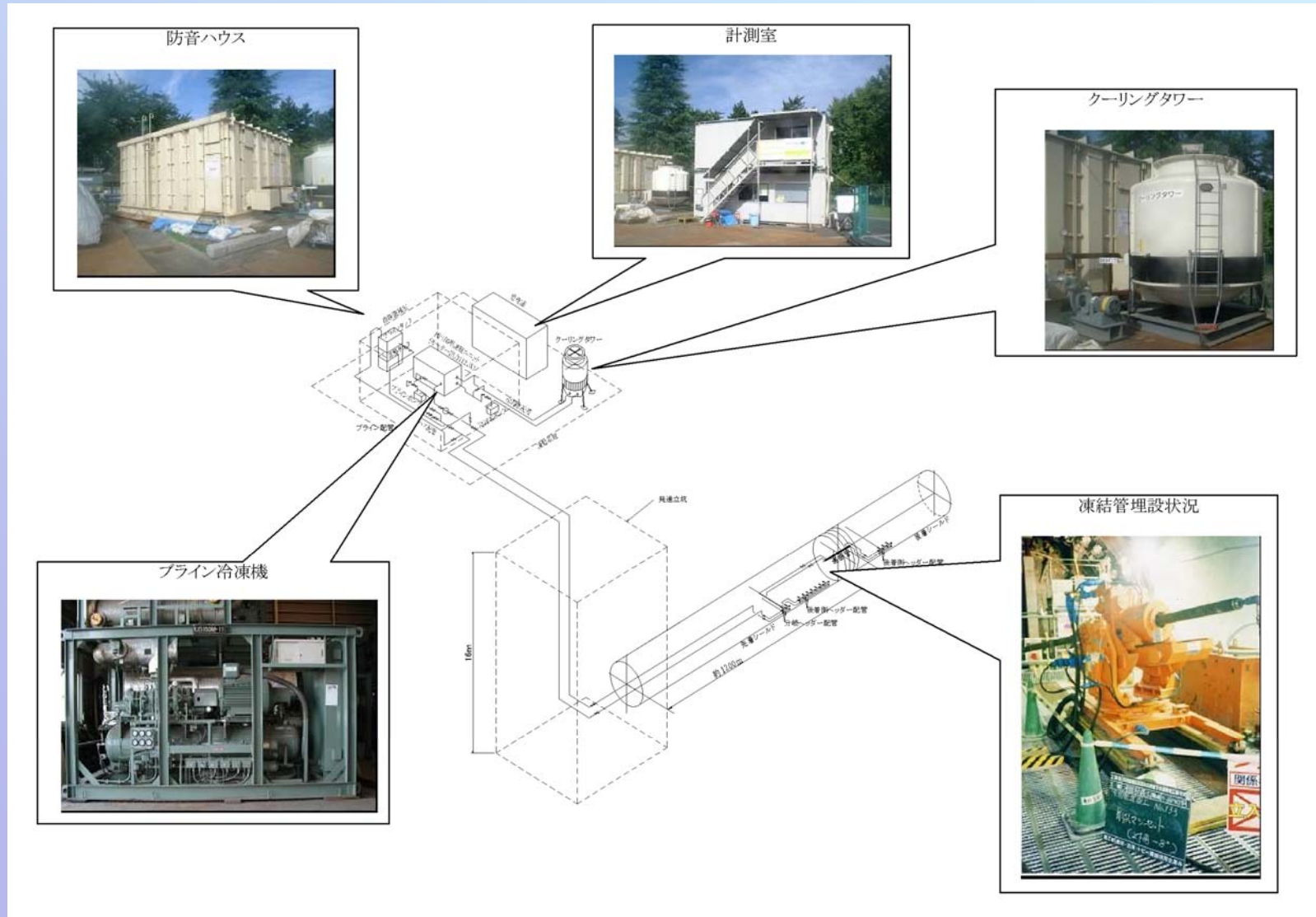


・ Vertical boring

冷凍機



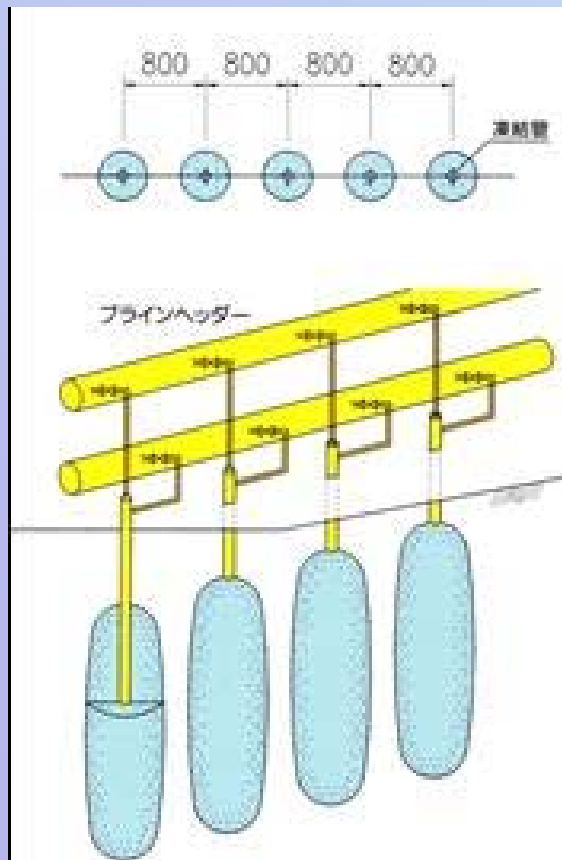
凍結基地及びブライン配管要領図



・凍土壁の形成

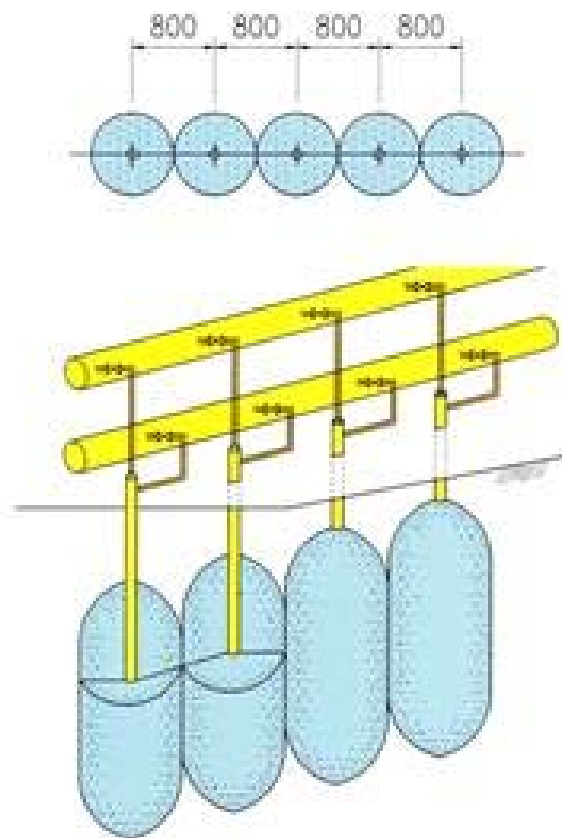
・約1週間後

凍土柱成長中



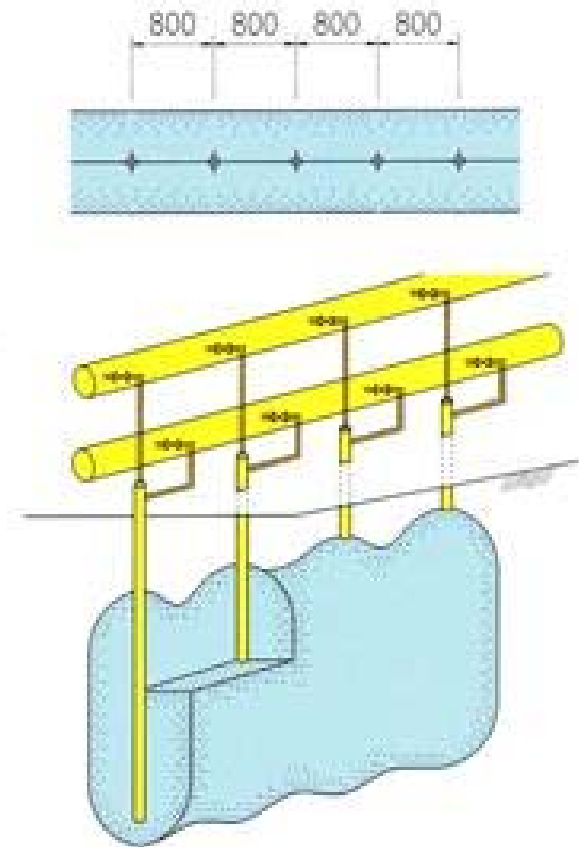
・約2週間後

凍土柱が連続し、
凍土壁になり始める

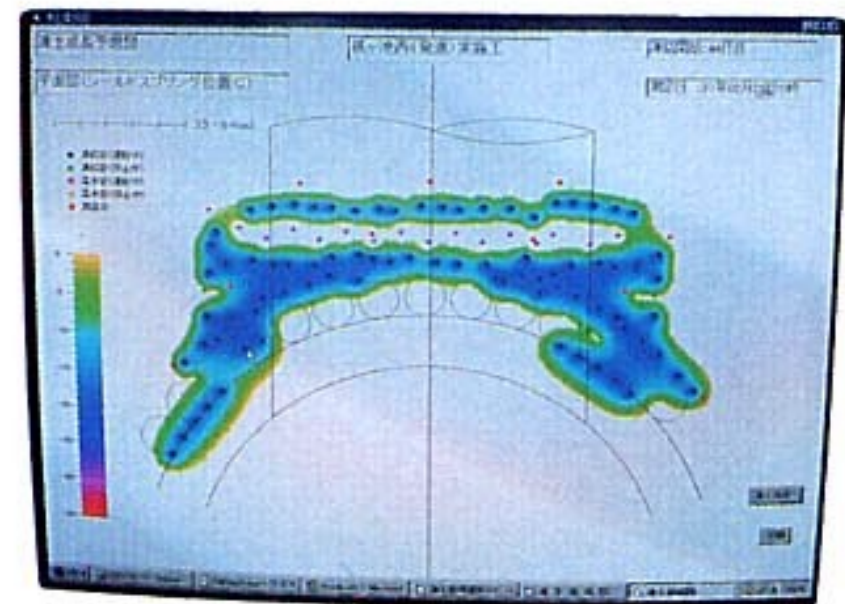


・約4週間後

十分な強度と厚みの
土留め壁が完成する



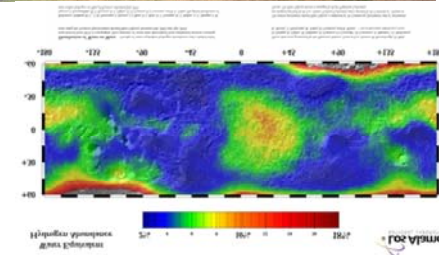
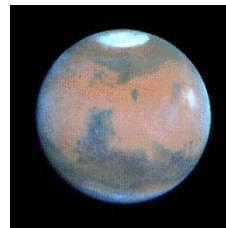
地中温度の計測



なぜ凍土研究が必要なのか？

なぜ凍土研究が必要なのか？

- 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>

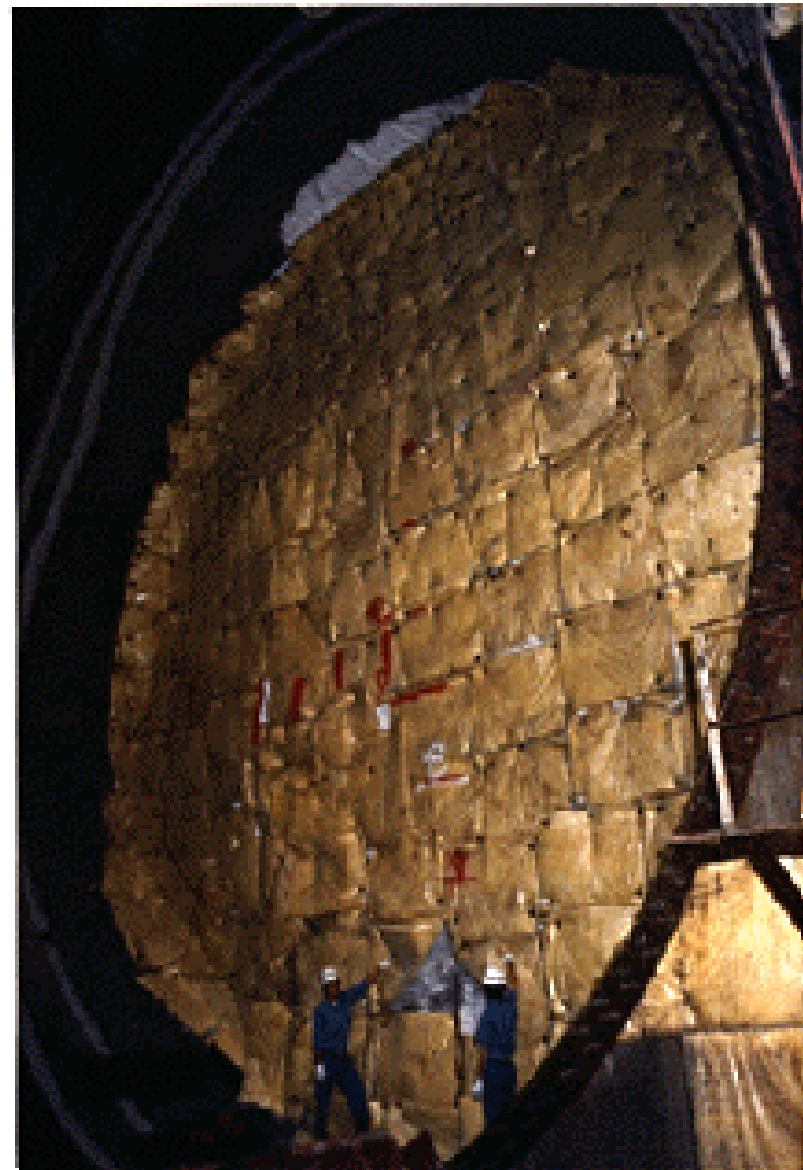
アラスカ
永久凍土地帯の住まい



アラスカ 大陸を縦断するパイプライン

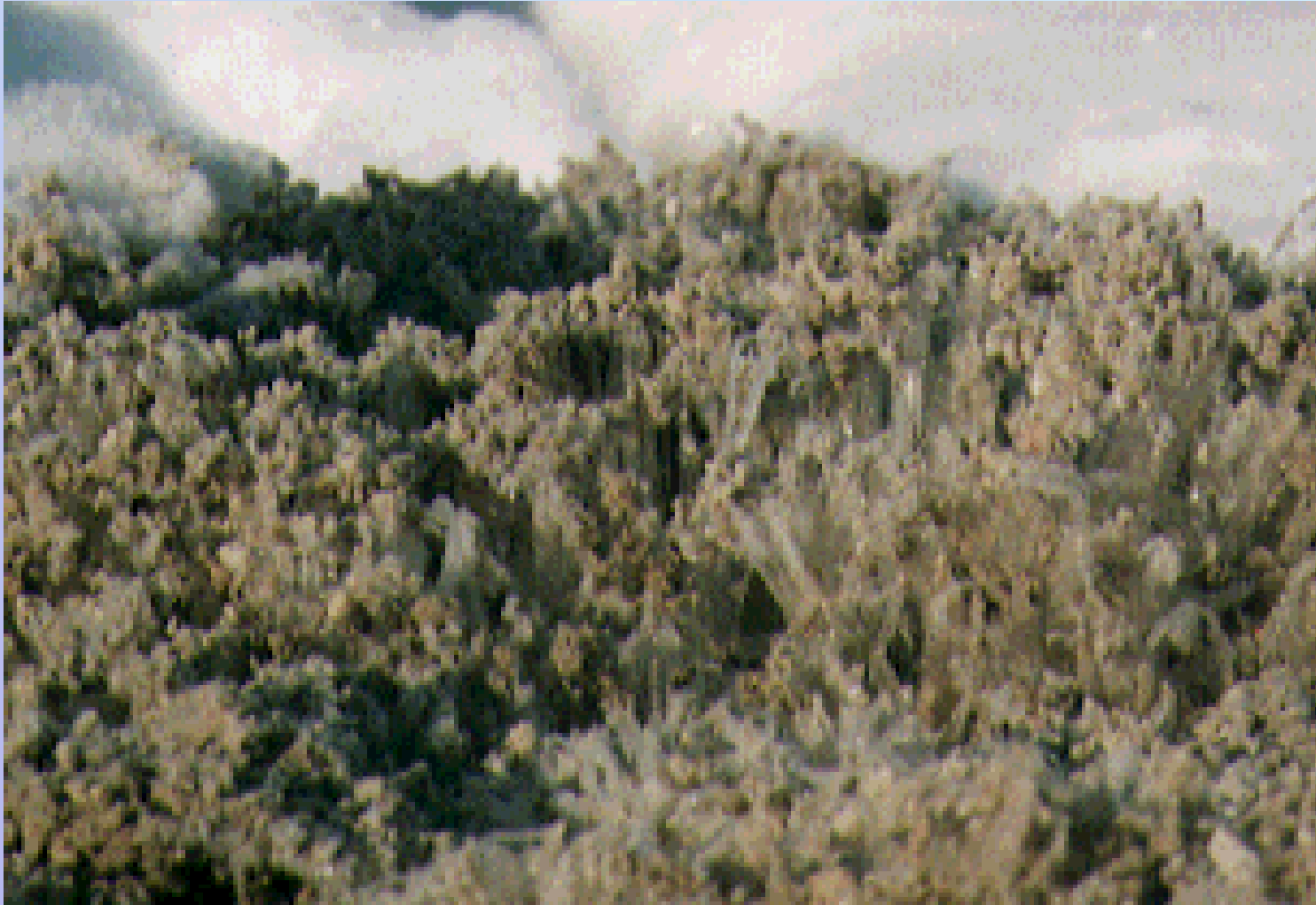


大都市部の地下を走る 洪水調整トンネルと凍結工法



土の凍結に関する土壌科学

霜柱



弥生

Yayoi

61

Fall 2023



自然現象から
魅る

山手 隆

再生農業が深く

動物農家の未来

を語る

森の生態系

森林のセーフティネット

を語る

食品研究から

アムステルダムへ

行く旅

を語る

自然現象から

魅る

山手 隆

再生農業が深く

動物農家の未来

を語る

森の生態系

森林のセーフティネット

を語る

食品研究から

アムステルダムへ

行く旅

を語る

Epiphanies

その瞬間

No.1

クリスマス イブの霜柱



東京大学農学系准教授
溝口 勝彦
Kazuhiko Mizoguchi

土 農物理学をやりたいと思ったのは、学生のころ偶然出会ったある発見がきっかけです。昔々の農家の食料店だったあたりは、いざ自然の恵めで農学部に通んだのですが、入学していろいろと農学を学んでいたら、正直「農学はこんなものなのかな」という疑問も湧いてきました。でもそんな疑問はあっても、地には足がついていないように思えたのです。

いよいよ卒業を前にしたとき、「2つは物理学に魅れるなら、いっそのこと一番興味を持っ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。土壌物理学は数学と物理学を使って論を導いていく学問で、まさに「最先端」の代表格に見えました。わたしは卒業のテーマを地盤のフールド解析に定め、地盤の温度計を自給して土の温度を測り始めました。これは地盤に最も近いのは土の温度ですが、実際に測り始めたのは十月半、データが蓄積に上り始めたのは真冬の土、そして、もう2ヶ月

クリスマスイブの朝、ある事件が起ったのです。

明け方近くには寒風が吹いて、マイナス10度あたりまで下がっていた地盤の温度が突然0度になりました。「温度計が壊れた!」、結果に「異常」の二文字が頭に浮かびました。懐中電灯を持って現場に急ぎ、地盤を掘り出し、なにが光っています。驚愕でした。それでわかったのです。この異常の温度変化は土が凍り始めた瞬間の現象だということ、それがすべての始まりでした。これをきっかけに研究テーマが土の凍結現象に定まり、いっしょにそれはなぜかという疑問と調査や論文・発表の研究への交流へとわたりを進んでいます。

かつて「最先端」に呼ばれた土壌物理学、いまではとても現実的な学問だと思っています。たしかに最先端の技術による農地の管理や防災などで活用された農地経営の発展、その応用を求めているのが土壌物理学です。その知への道を聞いてくれたのは、あの朝のあの瞬間でした。

なぜ霜柱は成長するのか？

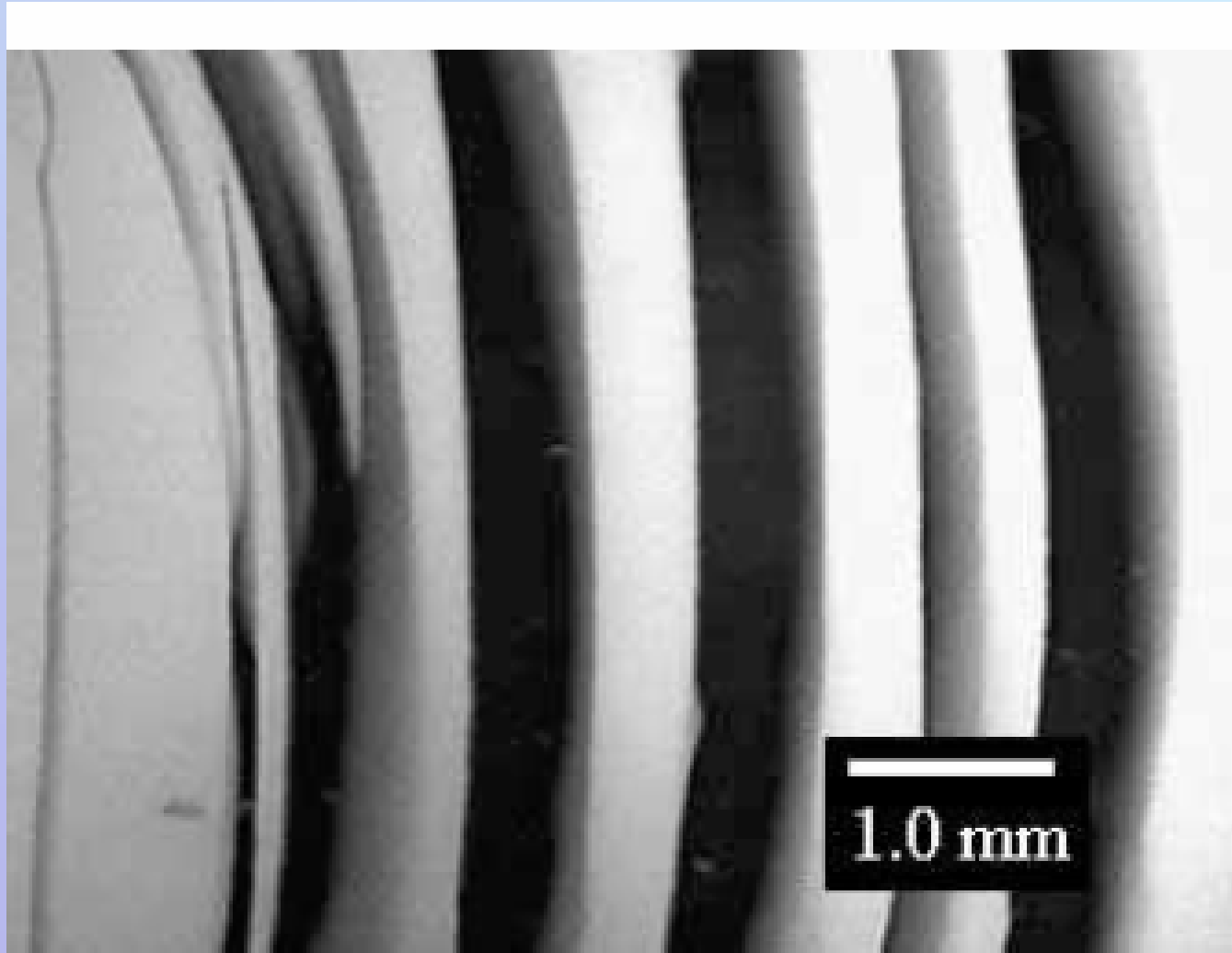
- 霜柱の上には土粒が載っている
- 2階・3階建ての霜柱もある
- 霜柱のできやすい土とは



- 土壌中の熱と水分の移動が重要

凍土中におけるアイスレンズの成長

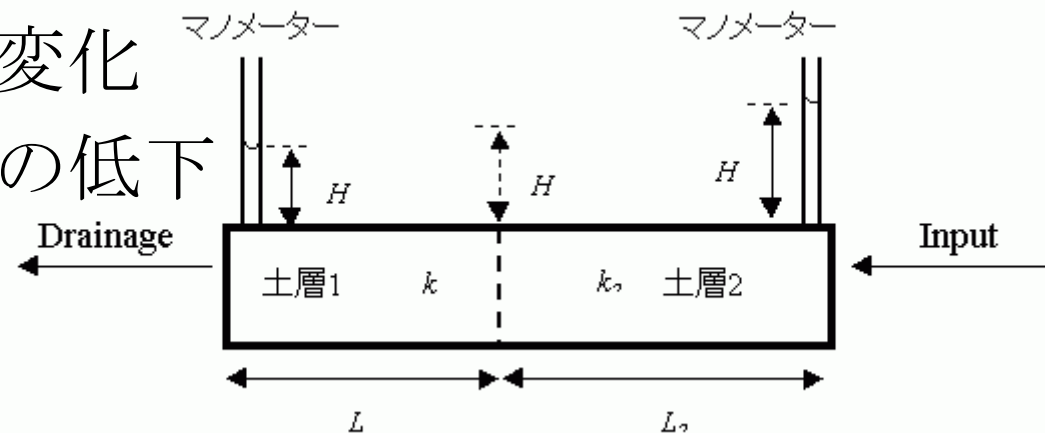
Growing Ice lenses in freezing soil



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
- 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

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



土壌水の上向き移動の駆動力 (毛管現象)



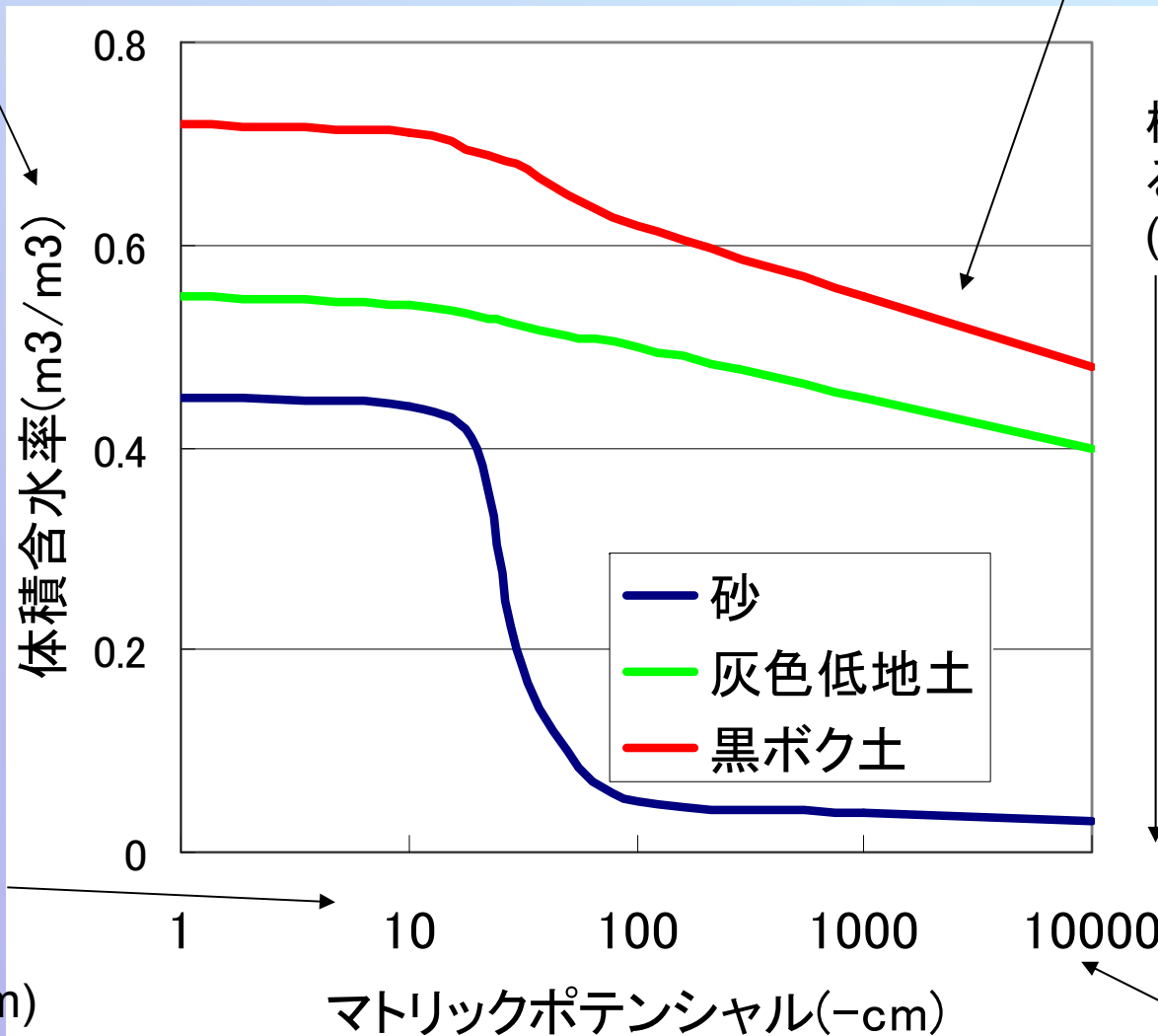
- 水は隙間を昇ってゆく
- 土はいろんな大きさの隙間で構成される
- 土の中の水は繋がっている
- 水の上昇速度は土の種類で異なる

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

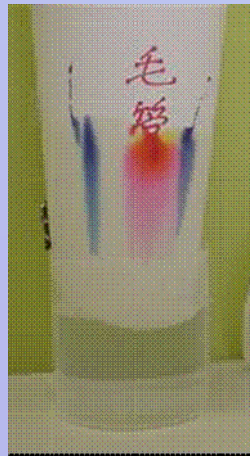
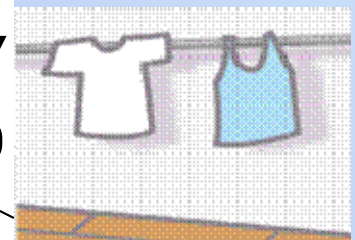
植物の成長に影響



植物が枯れる水分量
(15000)



カビも発生しやすい
湿度99.3%



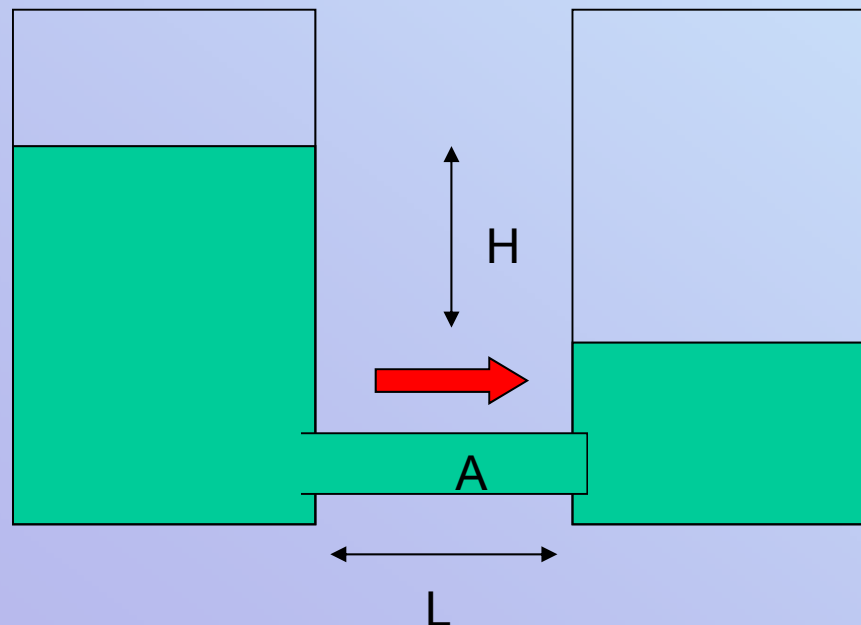
水面から高さ
10cmの水分量

$h = 0.15/r$ (cm)

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 (cm^3/s)

K : 透水係数 (cm/s)

H : 水頭差 (cm)

L : 長さ (cm)

A : 通水面積 (cm^2)

不凍水

0°C付近で急激に変化

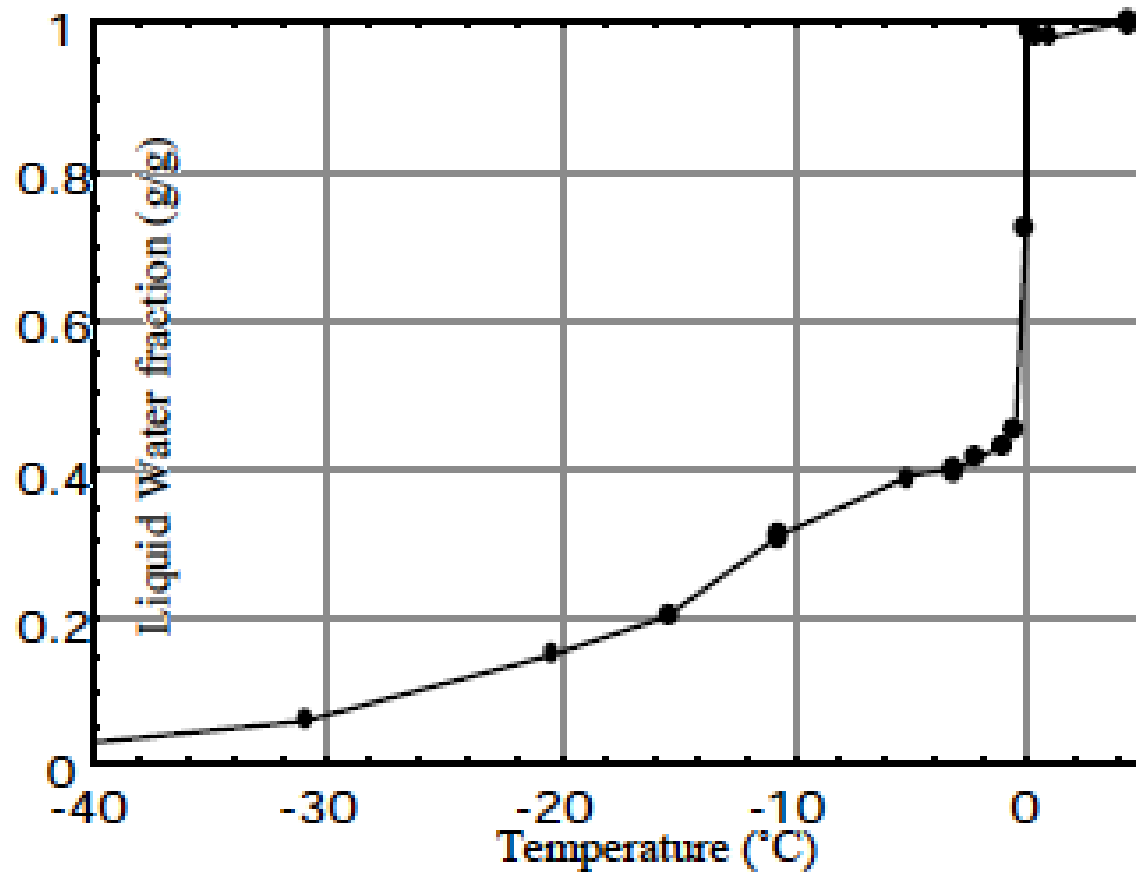


Fig. 2. Liquid water fraction in the frozen porous medium measured by NMR technique.

凍結過程の熱と水分の移動式

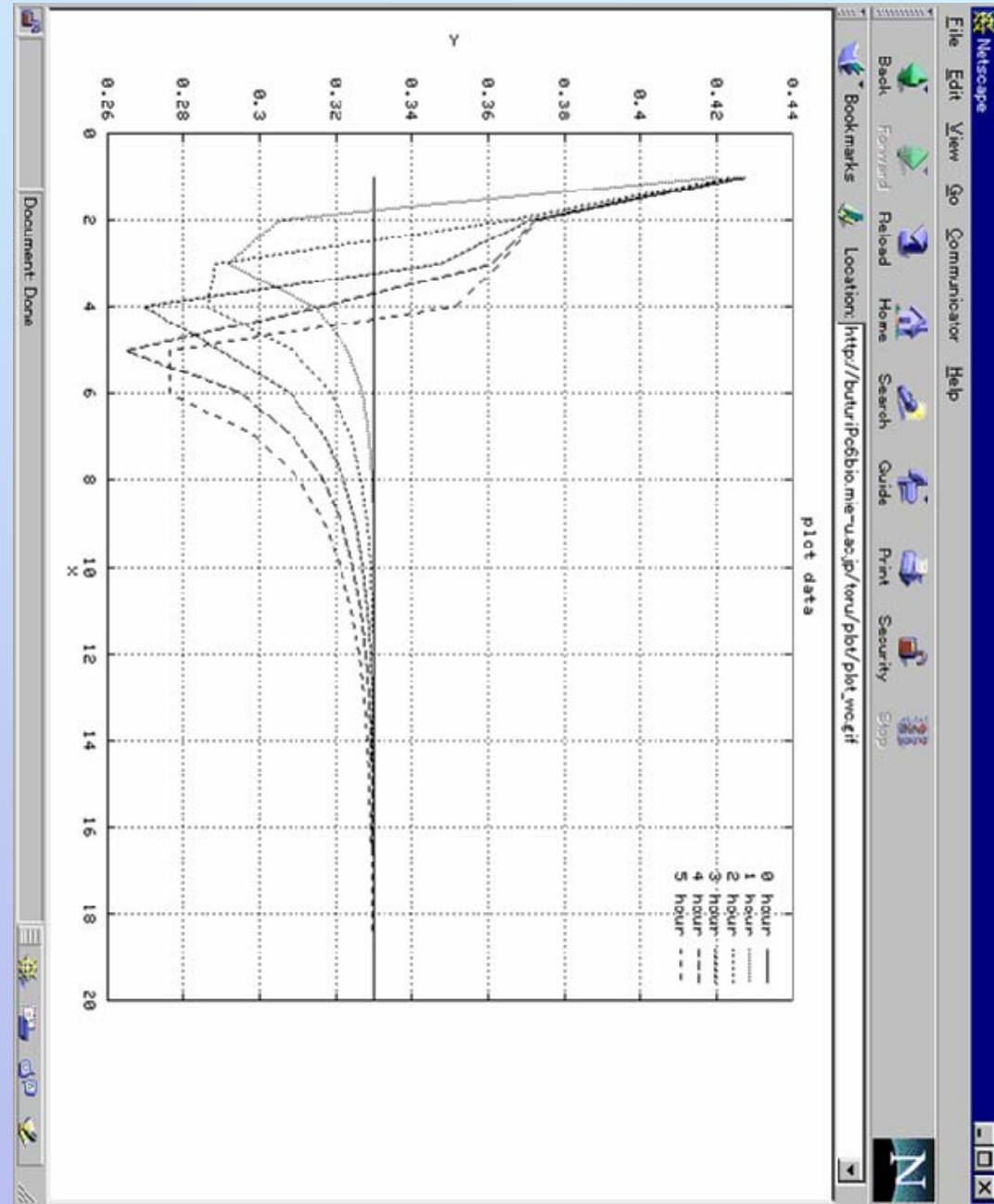
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i(T)}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{Lh}(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K_{Lh}(h) + K_{LT}(h) \frac{\partial T}{\partial z} + K_{vh}(\theta) \frac{\partial h}{\partial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

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

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

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

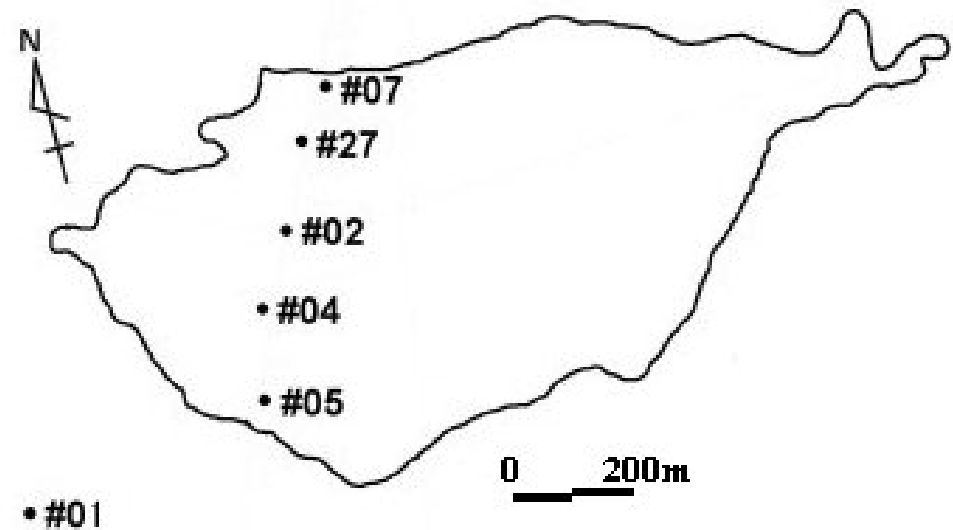


GAME-Siberia (1997-2000)



アラス調査 (2000)

- 湖や草原
— 塩類土壌



レナ川を横切る



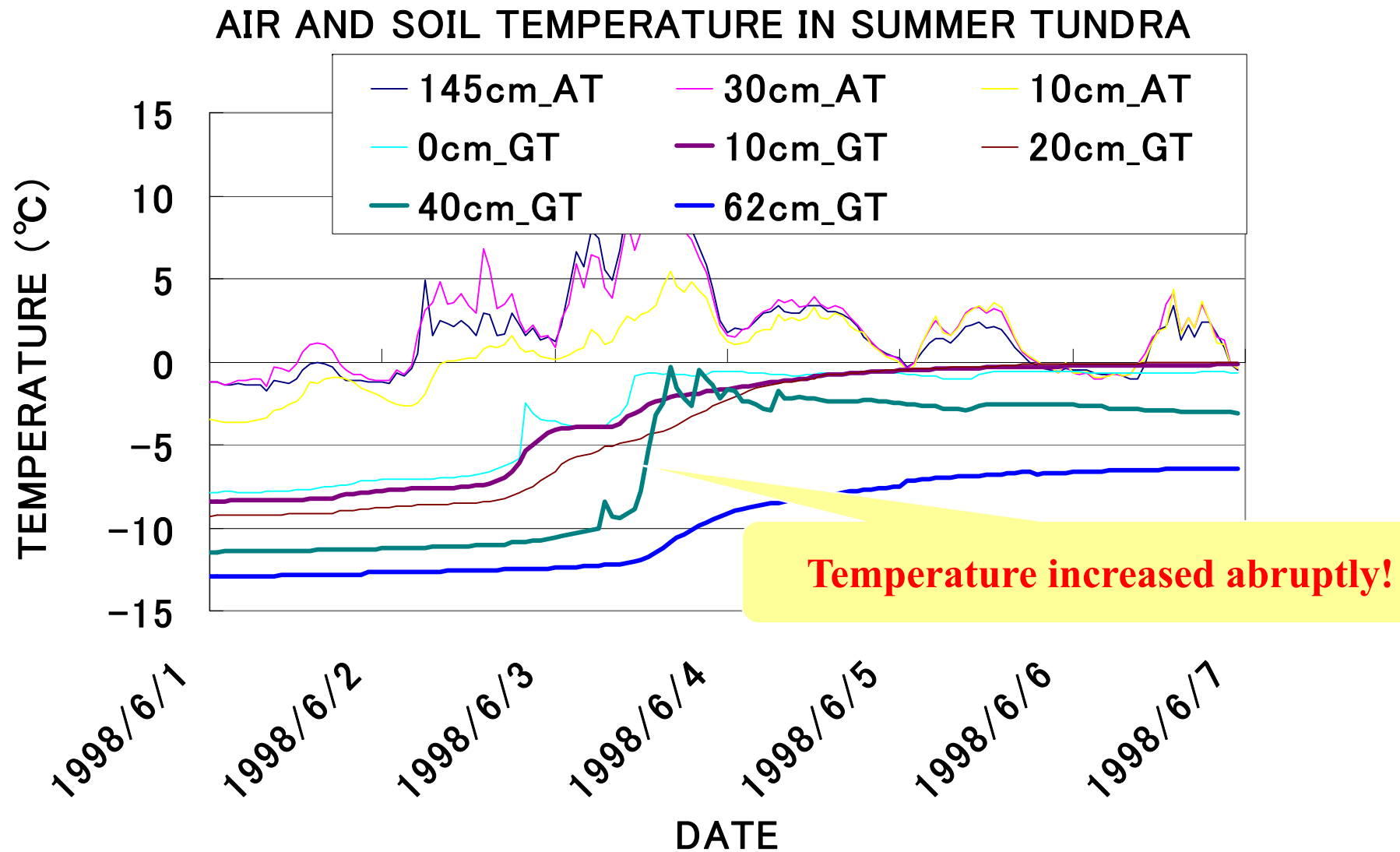
穴に埋まって、はいポーズ



アラスの土壌断面



地温上昇の謎



危險物處理班？

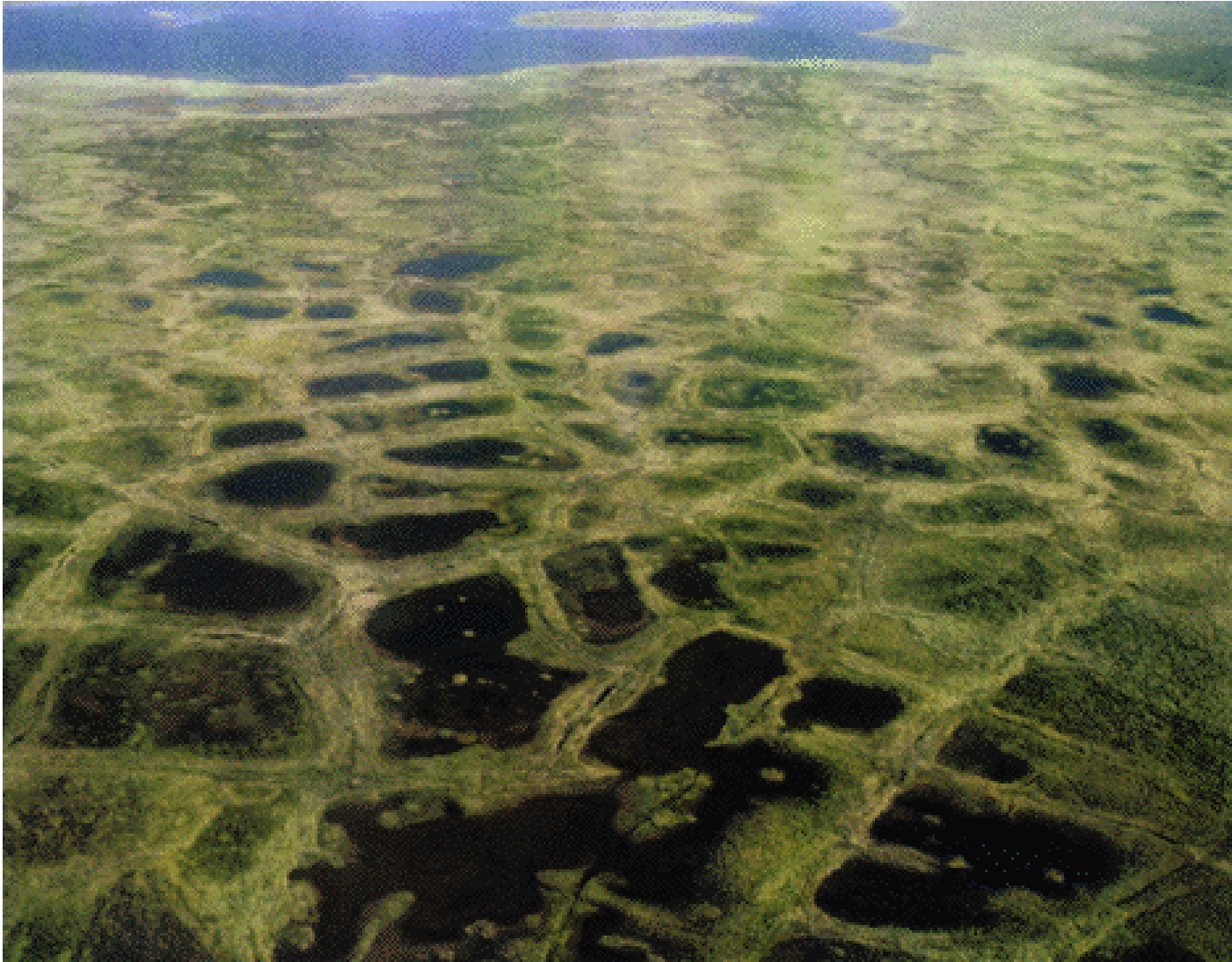


わずかなスペースを見つけて



ツンドラ構造土

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

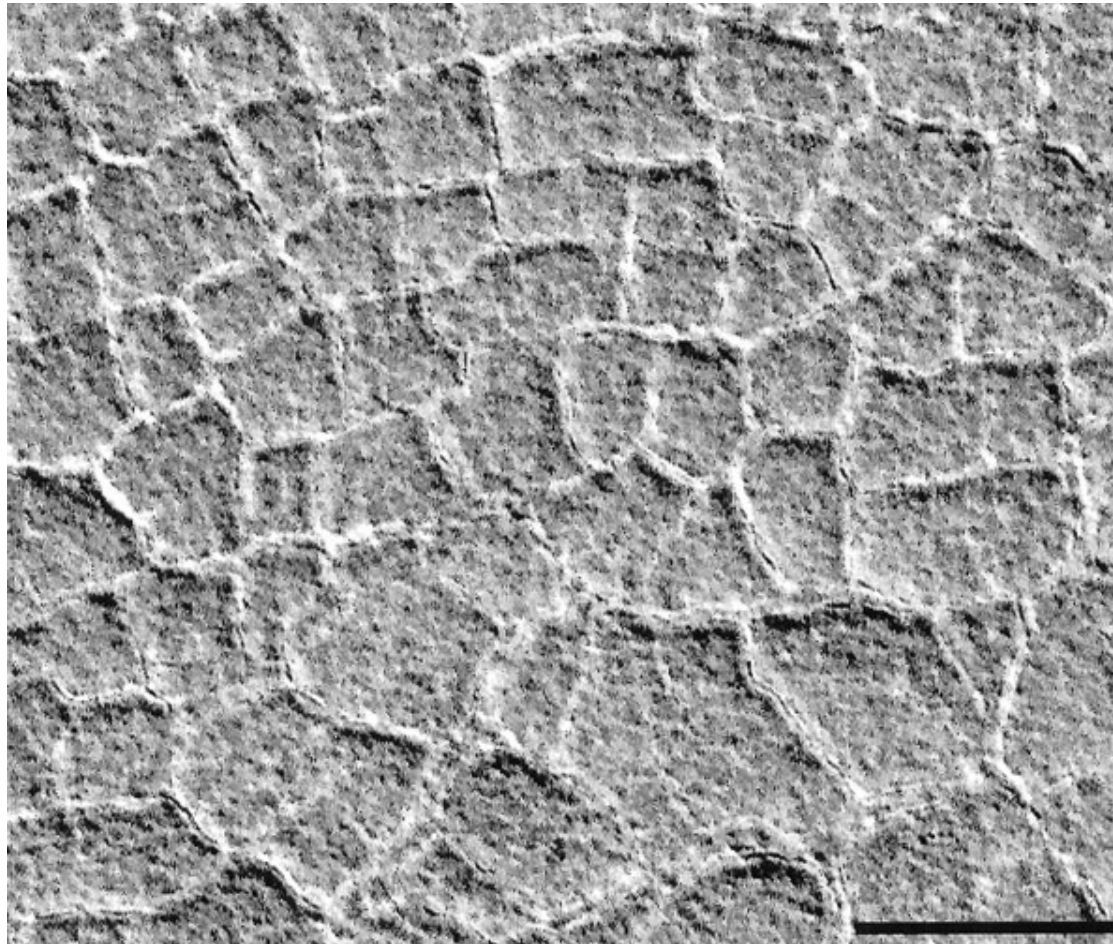


惑星の凍土

火星の高緯度地域に見られる Polygonal ground

Baker, V. R.: Water and the martian landscape, Nature,

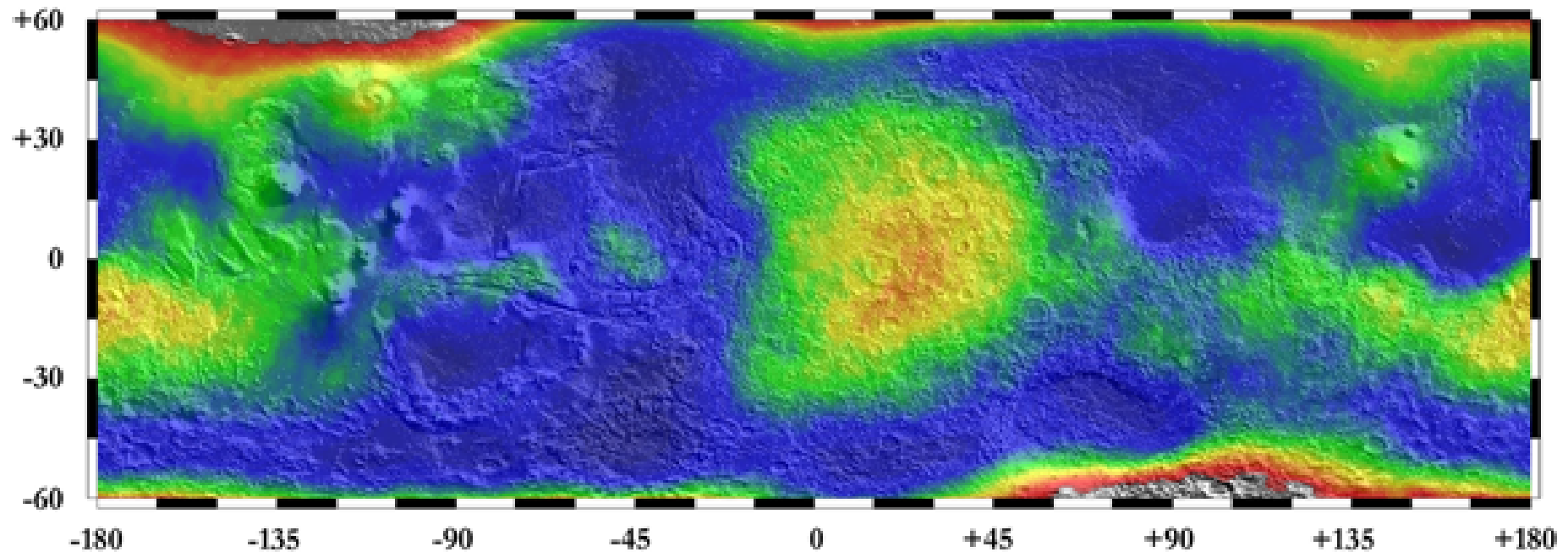
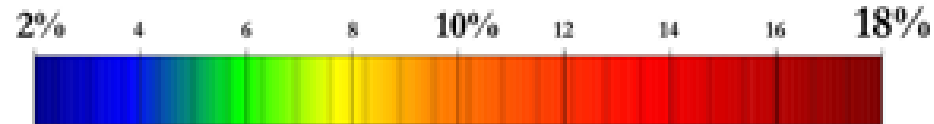
Vol. 412, pp.228-236, 2001



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 were determined from epithermal neutron counting rates using the Neutron Spectrometer aboard Mars Odyssey between Feb. 2002 and Apr. 2003.

Reference: Bellucci W. C., T. H. Prettyman, S. Maurice, J. J. Plaut, D. L. Bobb, D. T. Vaniman, M. T. Mellon, A. E. Metzger, S. W. Squyres, S. Karantoulakis, W. V. Boynton, B. C. Elphic, H. G. Farnsworth, D. J. Lawrence, and R. L. Tokar, The global distribution of near-surface hydrogen on Mars, *JGR*, in press, submitted July 2003.

These data were generated by the Planetary Science Team at Los Alamos: B. Burningham, D. Bobb, D. Elphic, R. Elphic, W. Feldman, H. Farnsworth, D. Farnsworth, D. Lawrence, S. Maurice, G. McGonigley, K. Moore, T. Prettyman, R. Tokar, D. Vaniman, and R. Warren. © 2003 by Observatories: Utah Planetary Society

The neutron spectrometer aboard Mars Odyssey is a component of the Gamma-ray Spectrometer suite of instruments, was 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.

[NASA](#)

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 印刷 検索 お気に入り 移動 リンク

アドレス http://phoenix.lpl.arizona.edu/images.php?eID=5669&cID=76

Y! 検索 ログイン ブックマーク



PHOENIX MARS MISSION




[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 19, 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



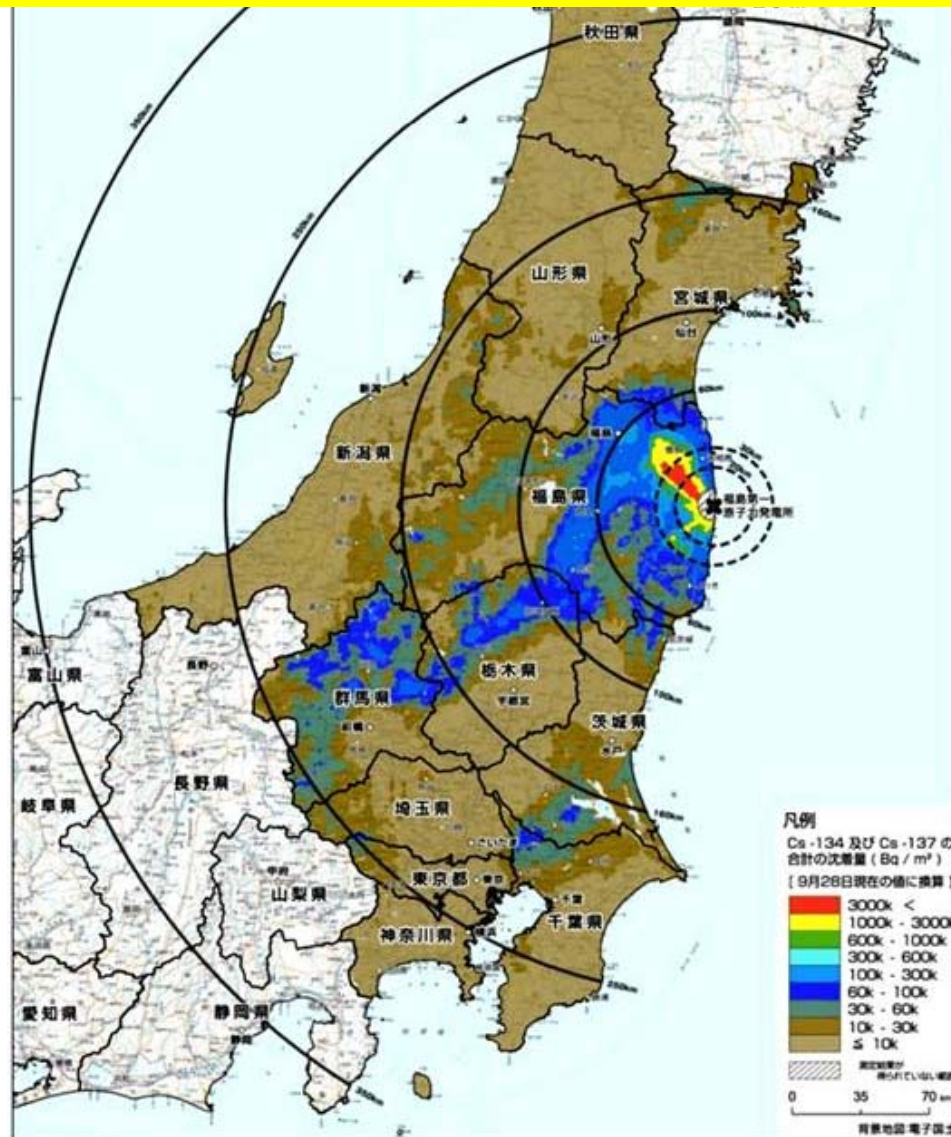
インターネット

福島における農地除染

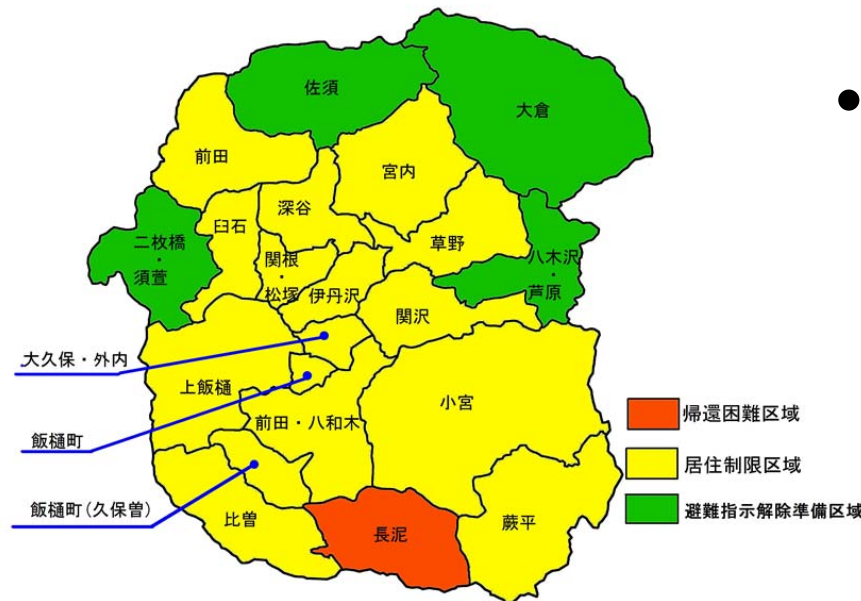
福島土壤除染技術

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

放射性セシウムの分布



飯舘村の現状



- 表土剥ぎ取り法で一律除染(飯舘村方針)
 - 取りこぼしのリスク
 - 再汚染のリスク
- 再除染の可能性大
 - 村民参加型の再除染
 - さまざまな除染法を用意しておく必要性

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

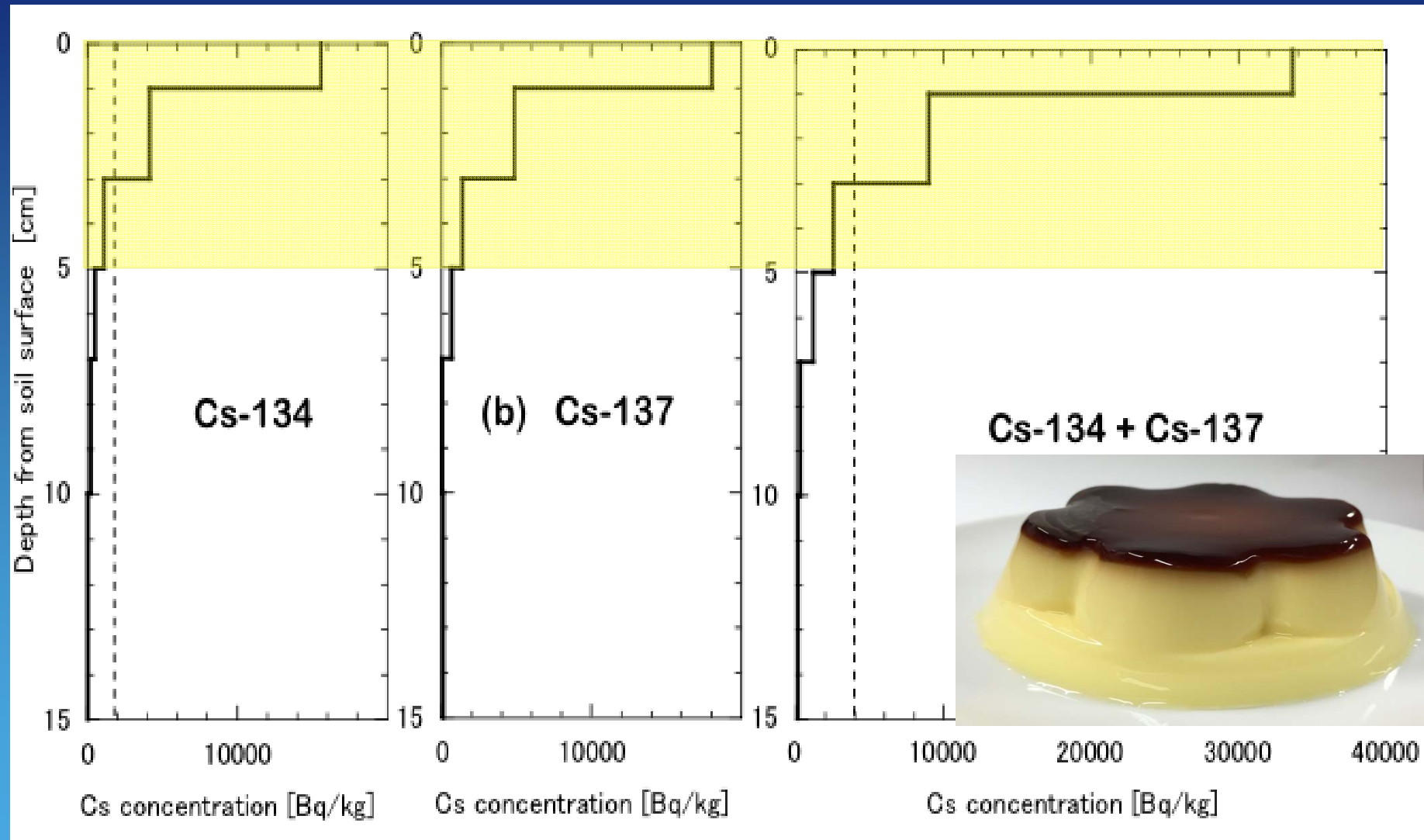


飯舘村草野地区(2012年6月24日)



飯舘村須萱地区(2013年8月17日)

Vertical distribution of Cs in soil (24/5/2011)



Shiozawa et al. (2011): Vertical concentration profiles of radioactive cesium and convective velocity in soil in a paddy field in Fukushima. *Radioisotopes* 60 : 323-328

Situation of agricultural field after 3 years from the accident

Wild boars



Heavy Weed



Disturbed agricultural field

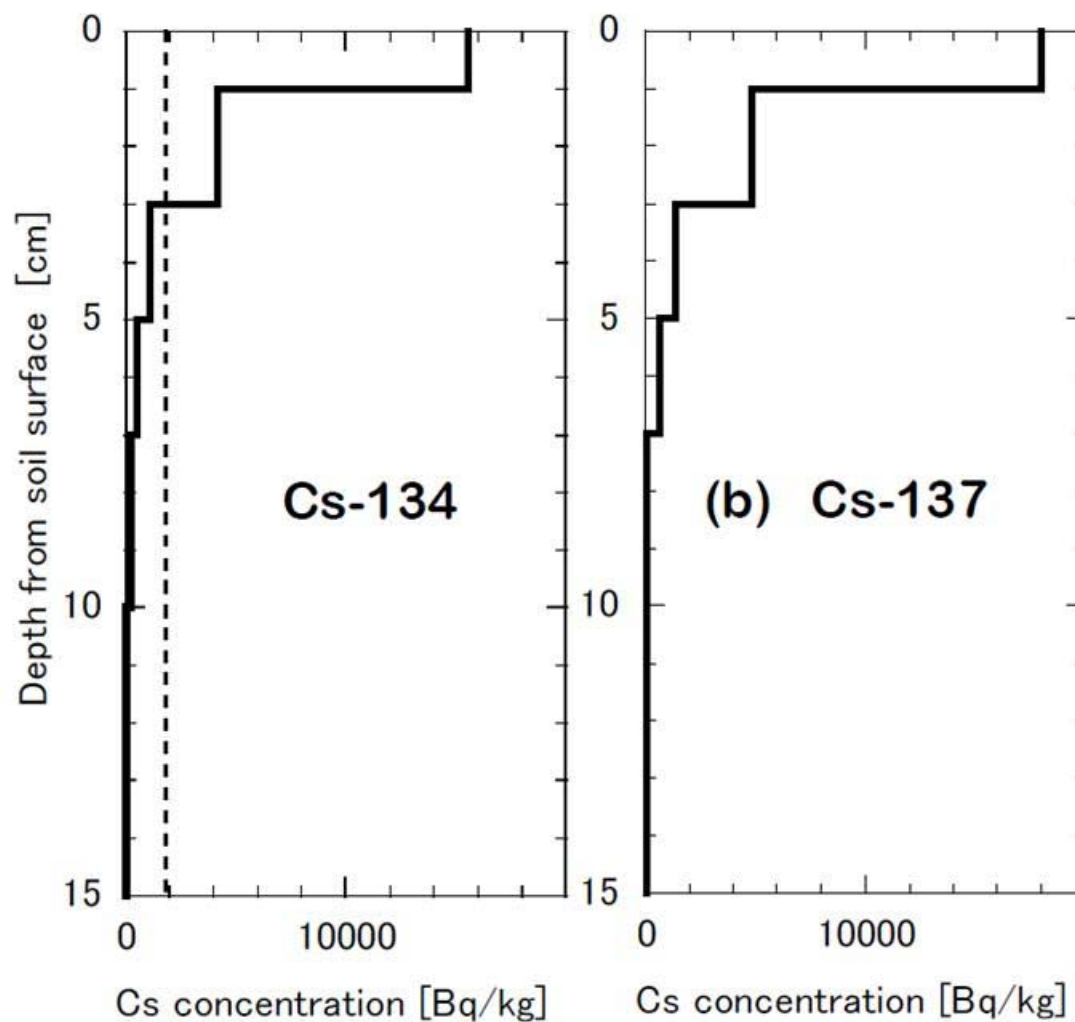


<http://www.tai.gu.a.u.-tokyo.ac.jp/mizo/edrp/fukushima/tsoil/PAWEE5131030.pdf>

Must measure vertical distribution and spatial distribution of Cs for decontamination

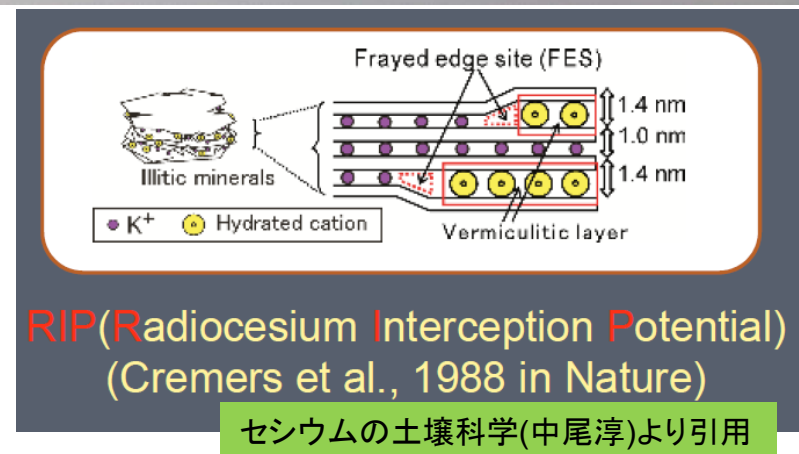
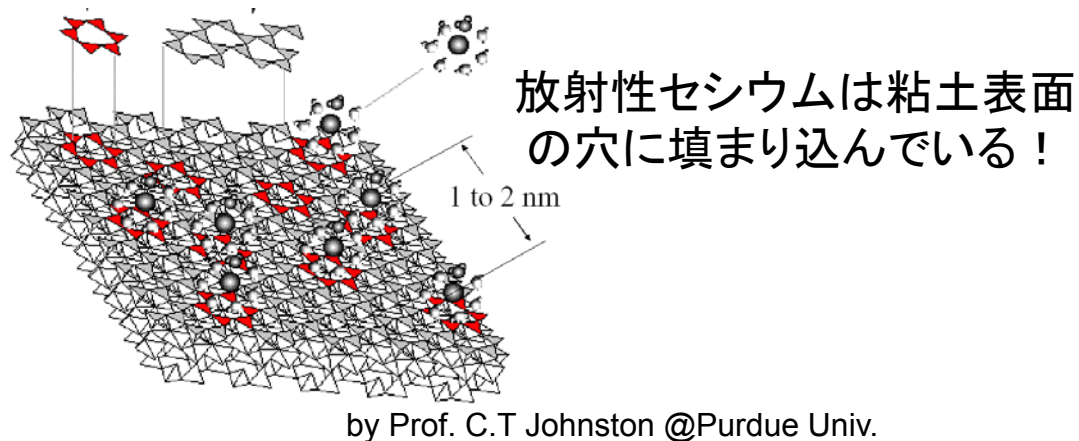
放射性セシウムの濃度(2011.5.24)

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

放射性セシウムはカリウムと入替わって 農地土壌中の粘土粒子に固定される



飯舘村役場横の斜面の放射線量測定 (2011.6.25;溝口・登尾)

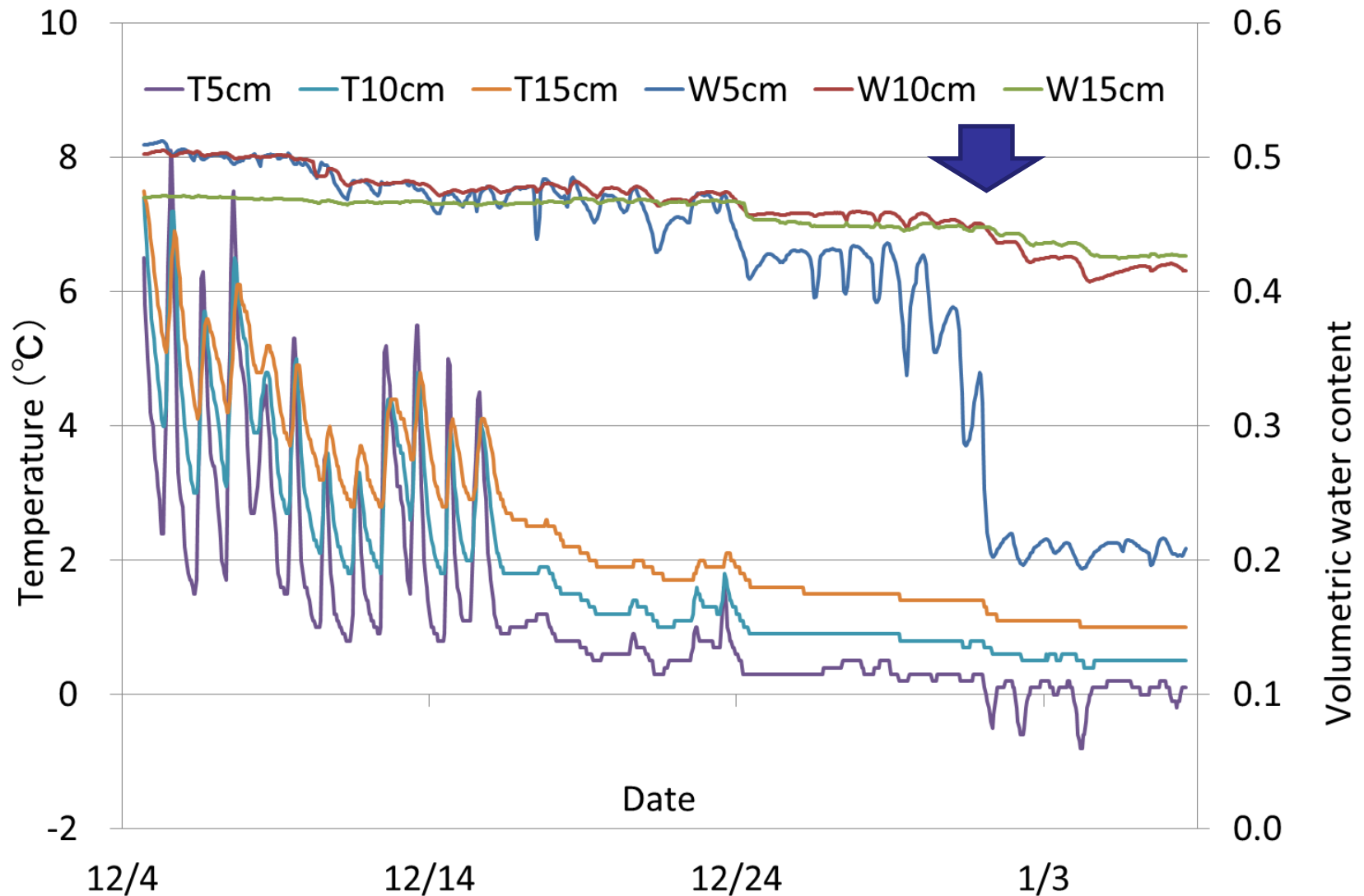


2.5 $\mu\text{Sv/h}$

3.5 $\mu\text{Sv/h}$

7.0 $\mu\text{Sv/h}$

実験水田の地温と土壌水分



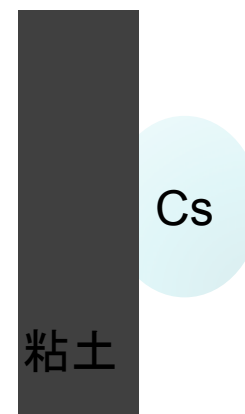
土壤凍結深計による凍結深度の測定



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



板状の塊のままで剥ぎ取られた厚さ 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)



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
 - 問題は会議室で起きているのではない！

いま科学技術が問われている

- 農学とICTで風評被害をなくせるか？

- 農学栄えて農業滅ぶ
— 横井時敬

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



「天空の城ラピュタ」から I ♥ Soil

- いま私たちは何ができるのか？

基礎学に立脚した現場主義



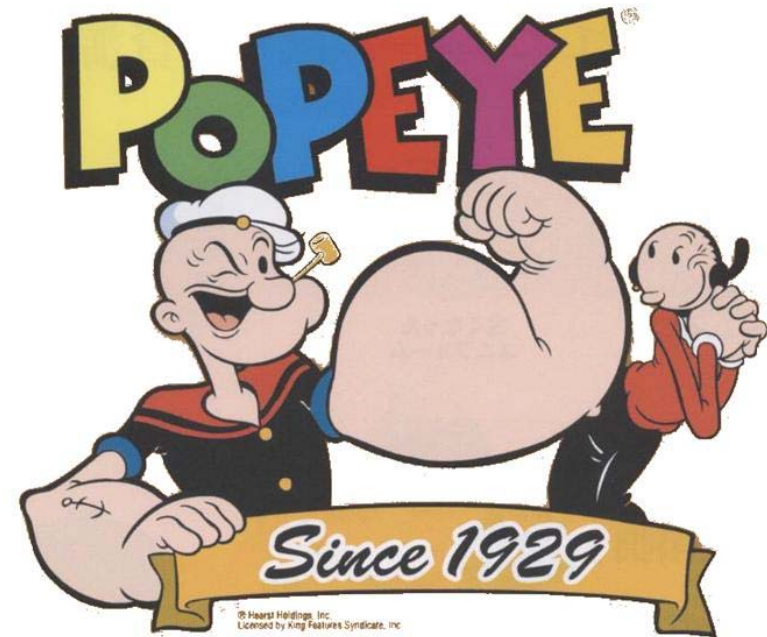
凍土剥ぎ取り法による農地除染
(2012年1月)



飯舘村の水田土壌調査
(2012年2月)

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！





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>

