

報 文

寒冷地における凍結融解と土壌侵食

— 凍結融解の繰り返しが土壌団粒の配列構造に及ぼす影響 —

S.M. メディナ\*・成岡 市\*\*・三原真智人\*\*・  
穴瀬 真\*\*・安富 六郎\*\*\*

Freezing-melting and Soil Erosion in Cold Region  
— Soil Aggregate Structure as Affected by Repetitive Freezing-melting Processes —

S.M. Medina\*・H. Narioka\*\*・M. Mihara\*\*・M. Anase\*\* and R. Yasutomi\*\*\*

- \* College of Agriculture, University of the Philippines at Los Banos, College, Laguna 4031, Philippines  
\*\* Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture, 1-1-1 Sakuragaoka, Setagaya-ku, Tokyo 156, Japan  
\*\*\* Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183, Japan

Summary

In this paper, soil dispersion and structure of particles or aggregates as affected by repetitive freezing-melting processes were examined at a banked slope of a reclaimed field at Abashiri district, Hokkaido. The soil examined was sampled at the volcanic ash subsoil which had a natural structure and almost no history of freezing-melting. The soil was sieved, then packed in plastic containers to an almost homogeneous condition of  $\rho_d: 1\text{g/cm}^3$  and moisture:  $\omega_n$ . Then freezing-melting cycle was done by freezing the samples at  $-21^\circ\text{C}$  for 17h and melting at  $+27 \pm 5^\circ\text{C}$  for 7 h. This is considered as one cycle. After every cycle, dispersion ratio was obtained based on the Middleton method ( $D_r 1/50$ ). Also, soil consistency, measuring liquid limit and plastic limit was done in addition to the soft X-ray image method to determine any change in soil structure with increasing number of cycles.

Results of the investigations show that dispersion ratio increases up to the earlier cycles, after which an equilibrium condition was attained. It was found that dry strength and shear strength decreased gradually after repetitive freezing-melting. It was understood that the clay activity went down during the earlier cycle of freezing-melting and at later stage, the water holding capacity of soil was also reduced. Soft X-ray images through the image process revealed that soil aggregate structure became weak after repetitive freezing-melting and the volume of coarse pores outside the aggregates increased.

Key words: Freezing and melting, Dispersion ratio, Consistency Limit, Soft X-ray image method, Aggregate structure

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 71, 5-9, 1995)

1. はじめに

農地保全の目的を達成させるためには、農地からの土壌流亡を制御し、土壌流亡を的確に予測することによって、合理的な保全方法や営農方法が確立され、農地造成などの面工事が計画できる。USLE式の侵食因子については、従来融雪時における流出の影響が著しい地域で降

雨係数が考慮され、土壌の凍結・凍上については降雨係数と土壌係数が考慮されている。しかし、いずれも地域特性が強い要素であり、その評価は非常に難しい。

わが国において近年多く行われている改良山成畑工などの大規模農地造成では、盛土整形した急勾配かつ斜面長の長い法面が造られることが多く、この法面からの侵

所 属 機 関 \* フィリピン大学ロスバニオス校, Los Banos, College, Laguna 4031, Philippines

\*\* 東京農業大学農学部, 東京都世田谷区桜丘1-1-1

\*\*\* 東京農工大学農学部, 東京都府中市幸町3-5-8

キーワード 凍結融解、分散率、コンシステンシー限界、軟X線映像法、団粒構造

食が問題となっている。とくに、北海道東部のような寒冷地では、土壌の凍結によって、農地に限らず農道や水路等農業用施設に被害を受ける事例が多く（土壌保全セミナー(1989)）、また融雪水による侵食や土壌構造の変化によって生じる耐食性の低下も重要な問題となっている。これらはまた、北海道の農牧適地の多くが凍上性の大きい火山灰土で覆われていることが一因でもある（前田ら(1986)）。そして、長沢ら(1981,1986)は、凍結融解の1サイクルによって大間隙が形成され、保水性が変化し、流亡土量が減少することを報告しており、凍結融解土の物理的特性にさまざまな事例があることを示唆している。

これらの問題に注目した筆者らは、寒冷・強風・少降水量地域としての北海道女満別地区改良山成造成畑を調査対象地として選び、侵食形態と侵食量ならびに地温変化などの追跡を行い（安富ら(1992)、穴瀬ら(1992)）、現地での侵食現象を把握する方法論を検討し、冬期から融雪期にかけての無人観測システムの設置方法を工夫した。この現地調査の結果から、長沢らが注目した凍結融解のサイクルが土壌物理性に影響を与えている現象について再確認し、凍結融解のたび重なる繰り返しが土壌構造に及ぼす影響について種々の検討を行った（安富ら(1993,1994)、メディナら(1994)）。

本報は、これまでの検討結果をふまえて、調査地盛土法面から採取した土壌について、凍結融解を実験室内で再現し、その繰り返しが土粒子や団粒の分散性、団粒の構造変化に及ぼす影響などについて検討したものである。

## 2. 供試土と実験方法

供試土壌を、網走郡女満別町バナクシュベツ農地造成地区(E144°13'27"、N43°52'16")の畑地から採取した。この地域では、大陸性気候の激しい温度差があり、土壌凍結がみられる。本地区の年降水量は平均600~700mmであり、最大でも900mm程度である。月降水量は夏期(7~10月)に多く、冬期(2月)に最少となる。根雪の初日と終日は年により20日程度の前後はあるが、12月上旬頃から始まり4月中旬までに消雪する(図-1)。融雪期における積雪深の減少速度の記録から、融雪水として地表に供給される水量は最大時におよそ90mm/dayと推定される。また融雪が少ない日でも5~10mm/day程度の融雪水が地表に供給されていると推定できる(安富ら(1992))。

供試土壌は、盛土法面の造成に使われたものと同様のもの、秋から冬にかけて数回の試掘調査を行った結果から判断してアイスレンズ形成層より下方の層(軽しゅう黒色火山性土、地山心土)から採取した。この未風乾攪乱土壌を、酢酸ビニール製円筒( $\phi 28 \times 49\text{mm}$ )および軟X線が透過し易いポリスチレン製角型コンテナ(11.6 $\times$ 6.4 $\times$ 4.2mm)に均一充填して(2mm篩通過、 $\rho_s: 1\text{g/cm}^3$ 、水分: $\omega_s \cong \text{LL}$ )、凍結融解(-21 $^{\circ}\text{C}$ , 17h; 冷凍庫内、+27 $\pm$ 5 $^{\circ}\text{C}$ , 7h; 実験室内)を再現させた。なお、凍結温度は長沢ら(1986)の方法に準拠した。これらの小型プラスチック容器は密封して水分蒸発が生じないようにし、供試体の全方向から温度の影響を受けるようにした。そして、凍結融解の各サイクルごとに、円筒の供

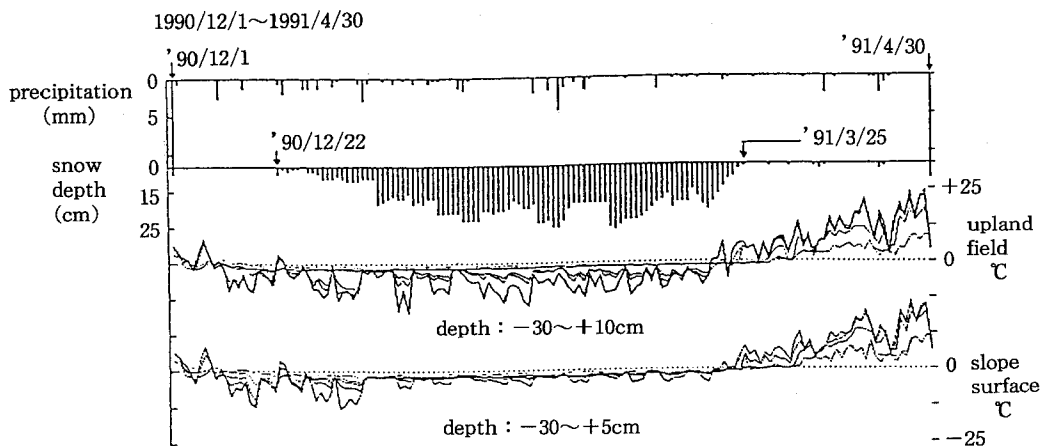


図-1 凍結融解期における積雪深・地温の変化

Fig.1 Relationship between precipitation, snow depth and ground temperature at upland field and slope surface during snow formation and melting periods(1990)

試土壌から分散率（ミドルトン法、対象粒径0.02mm以下）およびコンシステンシー限界（LL、PL）、角型コンテナの供試土壌から軟X線映像（成岡ら(1991)の方法）をそれぞれ求め、土粒子・団粒の分散性や団粒構造の変化を追跡した。

### 3. 結果と考察

#### 1) 供試土壌の基本的物理性

攪乱採取した供試土壌の測定結果を表-1に示す。なお、粘土分は約16%、CECは約17me/100g、腐植含量は3.4%である（北海道開発局(1989)）。

#### 2) 凍結融解の繰り返しによる分散率の増加

円筒に入れた供試体を多数作り、凍結融解のサイクルごとに3個ずつを抽出して分散実験に供した結果を図-2に示す。

初期には分散率の増加と減少の大きな変動が生じたが、2～5サイクルの間では滑らかな増加傾向がみられ、8サイクル目ではほぼ平衡状態になった。途中で増加速度が最大となり、後に増加速度が鈍化して極限值（98.8%）に近づくこのような傾向は、ゴンベルツ曲線に近似した。ここでは、供試土壌の分散性の程度とその傾向を確かめることを第一義にしたため、凍結融解にかかる温度やインターバル時間等の実験条件は現場圃場の自然現象に必ずしも一致させていないが、凍結融解サイクルの少ない段階ですでに分散率が極限值になることがわかった。

#### 3) 凍結融解の繰り返しによるコンシステンシー限界の変化

凍結融解の繰り返し8サイクルまでの間に分散率が増加する過程（前出図-2）について、液性限界（LL）、塑性限界（PL）および塑性指数（ $I_p$ ）を測定し、図-3に示すような結果を得た。

同図によると、微妙な変移ではあるが、図-2で分散率が滑らかな増加傾向を示し始めた3サイクルあたりから、LLの減少傾向とPLの増加傾向が連動し、 $I_p$ の減少

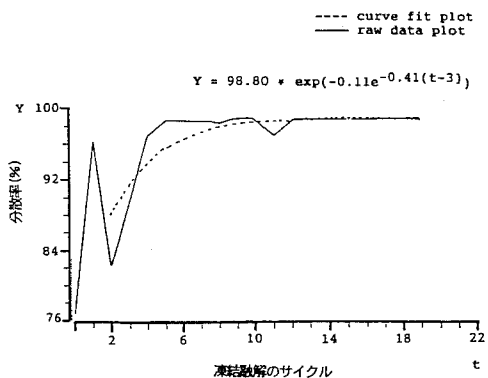


図-2 凍結融解の繰り返しと分散率の増加

Fig.2 Curve fitting analysis of dispersion ratio and freezing-melting cycles

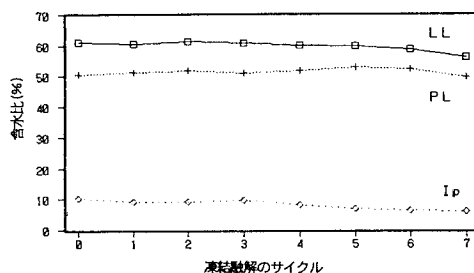


図-3 凍結融解の繰り返しとコンシステンシー限界

Fig.3 Freezing-melting cycles and consistency limit

表-1 供試土壌の基本的物理性

Table 1 Physical characteristics of experimental soil

| Texture | $\omega_n$<br>(%) | $G_s$ | PL<br>(%) | LL<br>(%) | $\rho_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | n<br>(%) | $K_s$<br>(cm/s)       | Color    | Hardness<br>(Yamanaka, mm) |
|---------|-------------------|-------|-----------|-----------|----------------------------------|----------|-----------------------|----------|----------------------------|
| LiC     | 59.0              | 2.46  | 51.0      | 61.0      | 0.957                            | 61.08    | $3.18 \times 10^{-5}$ | 10YR 3/4 | 28.6                       |

土壌分類：軽しろう黒色火山性土。台地に分布し、表層は腐植を含む新期火山灰に覆われ、下層に洪積世堆積物の斜里ローム層が累積する。

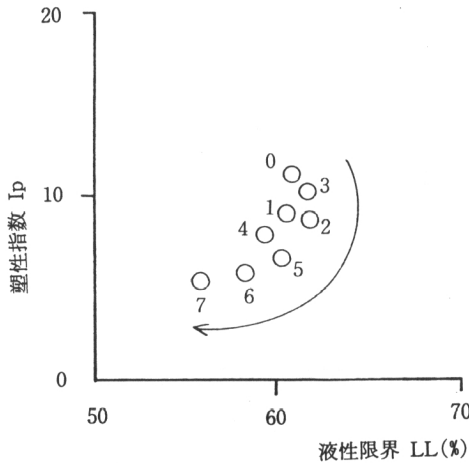


図-4 凍結融解の繰り返しと液性限界・塑性指数の低下

Fig. 4 Plasticity chart, soil consistency analysis of soil subjected to freezing-melting cycles

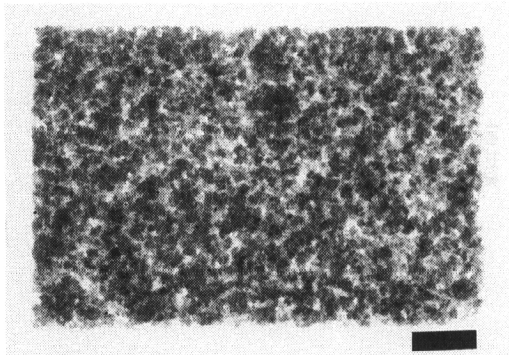


図-5 角型コンテナ内供試土の軟X線透過影像(凍結融解実験前)

Fig. 5 Developed soft X-ray radiograph of untreated soil in plastic container. Scale: 10mm Thickness = 11.6mm,  $\rho_s = 1.0\text{g/cm}^3$ , FFD = 500mm, Conditions = 30sec. 3mA, 60kV, Film = FR (FUJI)

率がわずかに上がっている。また図-2で分散率が平衡状態に入る6サイクルあたりからLLとPL双方とも減少傾向に移っていることがわかった。

この過程をさらに図-4の塑性図にまとめて表わしたところ、凍結融解サイクルの増加に伴い、下に凸型の低下傾向がみられた。これは変化領域がいずれもA線下方とB線右方の領域にあり、凍結融解の繰り返し初期に $I_p$ が低下し、続いてLLが低下する現象である。

以上の結果から、凍結融解の繰り返しに伴う分散率の増加過程には、①凍結融解初期に粘土活性の低下 ( $I_p$ の

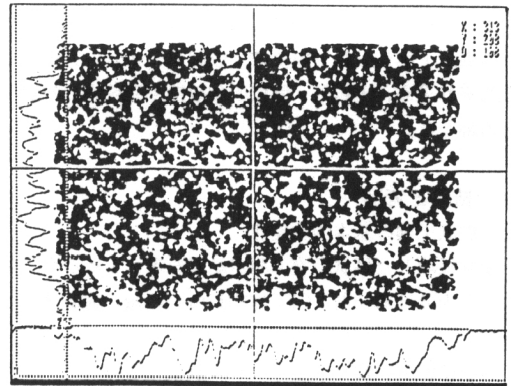


図-6 画像解析による軟X線映像の256階調波形の抽出(図-5と同一試料)

Fig. 6 Soft X-ray image of untreated soil (see Fig. 5)

Black area : soil aggregate/particles, White area : soil pores, Vertical & Horizontal lines : standard points of reference during X-ray scanning, Wavelength indicates : degree of X-ray transmission, absorption, spatial structure, relative bulk density, aggregate size, High peaks : low density area

低下: Skemptonの定義に基づく)が発生し、②次に土粒子の水分保持能が低下する(LLの低下)というメカニズムが内在していると理解することができる。

#### 4) 軟X線映像による団粒構造の変化の追跡

これまでの論議は、いずれも供試土の団粒構造の変化を攪乱状態で測定・追跡していたため、現実的に圃場レベルで生起する凍結融解を再現しているとはいえない。そこで、一つの供試土に対して不攪乱かつ連続的に追跡するために軟X線映像法(成岡ら(1991))を用いた。

角型コンテナ内に平坦・均一に詰めた供試体の上方から軟X線を照射すると、その透過影像は図-5に示すような白黒濃淡で出現する。この影像を画像解析にかけて、画像上の任意線(走査線)の濃淡分布を256階調の波形で表し、その波高、ピーク数、波長等から土粒子・団粒の構造を読みとる(図-6)。走査線は各サイクルごとに画像の同じ位置に設定した。分散率が増加し団粒構造が粗になると、波形のピーク数は増加し波長が短くなった。今後、詳細の波形解析が必要と考えているが、本法によって、相対的な団粒構造の変化を追跡することができ、従来の湿式篩別による団粒分析法では困難であった同一試料の連続測定が可能となった。

この測定結果を表-2に整理して示した。凍結融解サ

表-2 軟X線の画像階調波形分析結果  
Table 2 Wavelength analysis of soil at various freezing-melting test cycles

| Cycle | Mean Peak Number | Mean Wavelength (mm) |
|-------|------------------|----------------------|
| 0     | 10               | 5.2                  |
| 1     | 11               | 4.9                  |
| 5     | 12               | 4.7                  |
| 10    | 13               | 4.2                  |

イクルの増加につれて波長が減少したことがわかる。これまでの論議を加えて考察すると、この結果は凍結融解が団粒内の膠着力を低下させ、団粒構造の流動と再配列が発生する過程と考えることができ、分散率の急減と $I_p$ の減少がみられる5サイクルまでに団粒径の約10%が減少したことがわかる。

前述の分散率およびコンシステンシーに関する論議では団粒構造の幾何学的変化を直接説明できなかつたが、軟X線映像法の結果を重ね合わせることで団粒構造の質的变化(粘土活性、水分保持能など)と幾何学的変化(配列構造)の双方を解析することができる。

長沢と梅田(1981, 1986)によると、凍結融解によって間隙率が增大するのは飽和透水係数を増加させる質的な変化であるとしている。本論では、間隙率の増加について「凍結融解の繰り返しにつれて団粒周辺部分が崩れ、核となる部分が残存した結果、団粒間隙が増加した」と解釈することができる。しかし、飽和透水係数の増加に関しては、透水経路としての間隙構造についてより詳細な検討が必要と思われる。

#### 4. おわりに

供試土壌の室内実験から、凍結融解の繰り返しに伴い分散率は増加し、まもなく極限值に近づくことが判った。その過程において、塑性指数の低下とそれに続く液性限界の低下が生じていたことがわかった。また、凍結融解により団粒構造が脆弱化し、団粒間隙が増加していく過程を軟X線映像とその画像解析から確認した。

今後の問題として、本調査地の他に多くの事例を経験し、凍結融解が土粒子または団粒の膠着力に及ぼす影響について、できる限り一般論に近づけるよう詳細の検討が必要であり、これは土壌侵食の土壌物理的メカニズムを解明する上で重要な課題であると思われる。

なお、本研究を遂行するにあたり、北海道開発局網走開発建設部、北海道農業土木コンサルタント(株)、岩手大学農学部大塚嘉一郎前教授、東京農工大学饗庭直樹氏(現：滋賀県庁)および青木泰政氏(現：国際航業(株))の方々から貴重なご協力およびご援助をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

#### 引用文献

- 穴瀬 真・成岡 市・S.M.メディナ・安富六郎・三原真智人・青木泰政(1992):寒冷地における融雪と土壌侵食, 2. 寒冷地における土壌侵食, 農業土木学会大会講演要旨:420—421.
- 北海道開発局農業水産部農業計画課編(1989):網走地域の土壌, 農牧地および農牧適地
- 前田 隆・相馬尅之・矢沢正士・藤原彦彦(1986):火山灰土の凍上性および粗粒火山灰土の凍上抑制材としての適正判定に関する研究, 文部省科研費報告(一般研究B, 59460188).
- 長沢徹明・梅田安治(1981):土の耐水性に及ぼす凍結融解作用の影響, 凍結・融解土の特性に関する研究(V), 農土論集, 94:48—54.
- 長沢徹明・梅田安治(1986):土の初期条件による凍結融解土の構造への影響, 凍結・融解土の特性に関する研究(VIII), 農土論集, 123:57—64.
- 成岡市・本間秀明(1991):土壌構造と軟X線, 農土誌, 59(2): 1—6
- S.M.メディナ・成岡 市・穴瀬 真・三原真智人・安富六郎・饗庭 直樹(1994):寒冷地における融雪と土壌侵食, 5.凍結融解の繰り返しと土壌団粒の配列構造に及ぼす影響:農業土木学会大会講演要旨:196—197.
- 土壌保全セミナー編(1989):北海道における農地造成と保全.
- 安富六郎・饗庭直樹・三原真智人・青木泰政・穴瀬 真・成岡市・S.M.メディナ(1993):寒冷地における融雪と土壌侵食, 3.凍結融解が土壌構造に及ぼす影響, 農業土木学会大会講演要旨:184—185.
- 安富六郎・穴瀬 真・成岡 市・三原真智人・S.M.メディナ・饗庭直樹(1994):寒冷地における融雪と土壌侵食, 4.  $Ca^{2+}$ 添加による土壌受食性の低減, 農業土木学会大会講演要旨:194—195.
- 安富六郎・青木泰政・三原真智人・穴瀬 真・成岡 市・S.M.メディナ(1992):寒冷地における融雪と土壌侵食, 1. 試験地区選定と調査方法, 農業土木学会大会講演要旨:418—419.

(受稿年月日 1994年5月10日)