

# 寒冷地における凍結融解と土壌侵食

— 土壌構造の変化が雨滴による侵食過程に与える影響 —

Freezing-Melting and Soil Erosion in Cold Region

— Effect of Soil Structural Changes on Raindrop Erosion Processes —

三原真智人・中川 英・安富六郎\*・成岡 市・穴瀬 真

Machito MIHARA・Ei NAKAGAWA・Rokuro YASUTOMI\*・

Hajime NARIOKA and Makoto ANASE

Tokyo University of Agriculture,\* Yamazaki Research Institute

## Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of soil structural changes on raindrop erosion processes. Disturbed and undisturbed soils are sampled in embanked slope of Memanbetu, Hokkaido.

According to the results of raindrop erosion test, splash ratio decreased after the repetition of freezing-melting process. Soil saturated hydraulic conductivity increased after the repetition. It was concluded that percolation mechanism is important to understand the raindrop erosion processes.

Percolation volume was simulated on the bases of rheological properties of percolated suspension and pF-moisture distribution curves. Results of the simulation represented observed changes in permeability due to the repetition of freezing-melting process in this study.

**Key words** : Soil structure, Soil erosion, Raindrop, Freezing-melting, Permeability

## 1. はじめに

大規模畑地の造成において、大量の土砂の移動を伴う改良山成畑工が主流となっている。改良山成畑工では、斜面長の長い法面が形成される場合が多く、造成後の法面における侵食防止は農地保全上、重要な課題となっている。また積雪寒冷地においては、夏期の降雨による侵食に加えて、融雪侵食や凍結融解による土壌構造の変化を考慮する必要がある。

これまでも凍結融解が土壌の侵食過程に及ぼす影響について報告がある（長沢ら（1981）、Burney・Edwards（1993））。メディナら（1995）は凍結融解による団粒構造の変化を調べた。凍結融解の繰り返しによる浸透性や排水性の変化についてはBenoit・Bornstein（1970）、Hinman・Bisal（1973）、Benoit（1973）らの報告がある。

しかし浸透性や排水性が変化する機構については深く追求されていない。またカルシウム塩添加による保全対策について研究がなされているが（饗庭ら（1995））、造成直後の保全対策については検討すべき点が多く残されている。

本研究では人工的に雨滴を発生させ、凍結融解による飛散比の変化を調べた。また融雪期には表面流のみならず浸透流も泥寧化することが明らかとなったので、凍結融解による間隙構造の変化に加えて、懸濁状態の浸透水における流動性の変化についても検討した。さらに毛管モデルによって懸濁状態の浸透流量をシミュレーションし、透水性の実験結果と比較した。これらの結果を踏まえて、凍結融解に伴う土壌構造の変化が雨滴による侵食過程に与える影響を考察した。

2. 供試土

調査対象に北海道網走郡女満別における造成畑地の盛土斜面を選定し、表層から5cm深さまでの土壌を採取した。土壌の理工学的特性を表-1に示した。粒度分析の結果から、粘土百分率は7.1%、シルト百分率は11.6%に過ぎず、土性は砂壤土(SL)であることがわかった。分散率は74.9%で水に分散しやすく、pHは6.8であった。

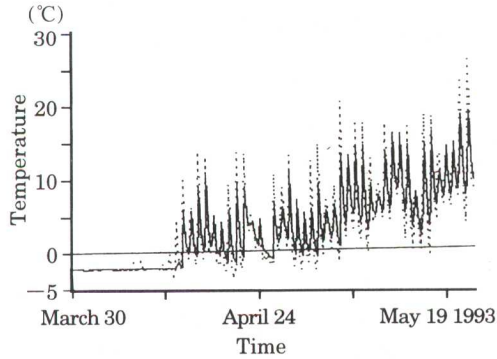


図-1 土壌表面及び5cm深さにおける温度変動  
Temperature changes in the depth of 5 cm and soil surface with time  
—5 cm deep .....surface

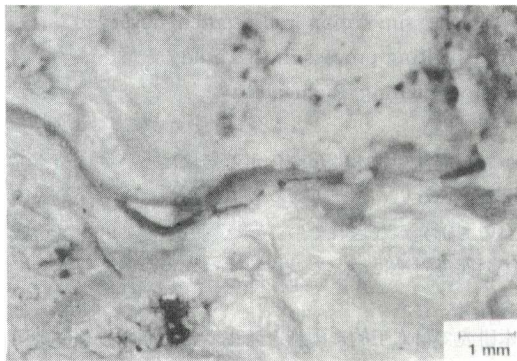


写真-1 土壌間隙に付着した粘土粒子  
Clay particle deposition in soil pores

た。また盛土斜面の乾燥密度は1.1g/cm<sup>3</sup>であった。

盛土斜面の土壌表面および5cm深さにおける温度変動を調べた。積雪期に比べ融雪期の温度変動が大きく、図-1に示したように、5cm深さでは融雪期に15回前後の凍結融解を繰り返すことが明らかとなった。

また写真-1は土壌間隙中に付着したペースト状の懸濁物を実体顕微鏡で撮影したものである。これから明らかのように、融雪期には浸透水が泥寧化して流れると考えられる。

3. 実験方法

実験室内で人工的に雨滴を発生させるため、図-2に示した簡単な実験装置を作成し、67cm高さから雨滴を落下させた。マリョット瓶で針先に作用する水圧を調整したため、気泡の位置によってわずかな水圧の変動が見られ、落下頻度にばらつきが生じた。しかし、各供試体において100滴以上の雨滴を与えたため、実験結果に及ぼす水圧変動の影響は無視して差し支えないと判断した。

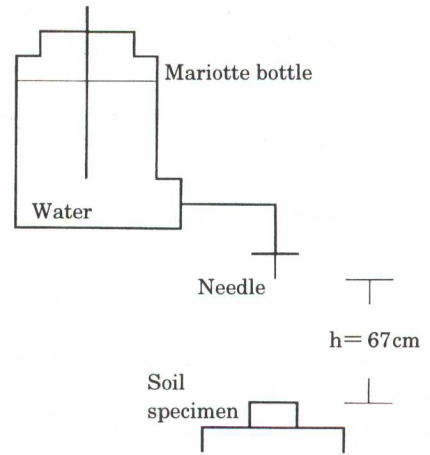


図-2 雨滴発生装置  
Raindrop simulator

表-1 供試土における土壌の理工学的特性  
Physical and chemical properties of soil sample

Depth (cm)	Specific gravity	Particle size distribution (%)				Dispersion ratio (%)	EC (μS/cm)	pH	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
		Coarse sand	Fine sand	Silt	Clay				
0-5	2.55	52.7	28.6	11.6	7.1	74.9	42.4	6.8	1.1

実験にあたり攪乱土を乾燥密度 1.0 から 1.6g/cm<sup>3</sup> の範囲内で 50 cm<sup>3</sup> サンプラー缶に締固めた供試体と、さらに -18±2°C および 20±2°C で凍結融解を与えた供試体を作成した。1 回の凍結と融解に費やした時間は各々 12 時間である。融雪期の現場における凍結融解の繰り返し回数を考慮して、室内実験においても 15 回の凍結融解を与えた。また比較のために、盛土斜面より採取した不攪乱の供試体を用いた。雨滴を供試体中央に 1 滴づつ落下させて、雨滴による飛散比を求めた。ここでは単位体積当りの雨滴によって飛散される土壌粒子の質量を飛散比と定義した。写真撮影により算出した雨滴の落下速度と雨滴径からエネルギーを求めた (表-2)。

凍結融解の繰り返しに伴う土壌間隙の構造変化を明らかにするため、水頭型吸引法で水分特性曲線を求めた。ここで用いた供試体の乾燥密度は 1.1g/cm<sup>3</sup> である。さらに間隙分布特性を調べるため、水分特性曲線に基づいて水分分布曲線を求めた。また、融雪期には表面流のみならず浸透流も泥壅化する。凍結融解に伴う懸濁流の変化を調べるため、MacMichael 回転粘度計を用いて流動性試験を行った。流動性試験においては、200 mesh 篩を通過した細粒分を集めて土壌懸濁液を作成し供試土とした。

さらにこれらの実験結果に基づき、毛管モデルによって懸濁状態の浸透流量をシミュレーションし、飽和透水係数の実測値と比較した。

4. 実験結果と考察

1) 雨滴侵食における飛散比の変化

凍結融解前と 15 回の凍結融解を与えた後の供試体において、雨滴侵食による飛散比を比較した。図-3 に示したように、凍結融解前の供試体では乾燥密度 1.2 から 1.3 g/cm<sup>3</sup> の範囲内で最も飛散比が高く、乾燥密度の上昇に伴い飛散比は低下する傾向が見られた。しかし凍結融解後の供試体では乾燥密度による飛散比の変化はほとんど見られず、飛散比は 0.3g/cm<sup>3</sup> 以下で低い値を示した。

さらに 1992 年 11 月 25 日に採取した不攪乱土と 1993 年 7 月 1 日に採取した不攪乱土における飛散比の比較を行った。その結果、不攪乱土における飛散比は採土年月による差は見られず、凍結融解後の供試体における飛散比と同じ傾向であった。この結果から現地より採取した

不攪乱土は既に凍結融解の履歴を受けており、実験室内で凍結融解した供試体と同様の傾向を示したと考えた。以上の結果により、凍結融解を繰り返すと雨滴侵食による飛散比が減少すると判断できた。

2) 凍結融解による間隙構造の変化

凍結融解の繰り返し間隙特性に与える影響を調べる

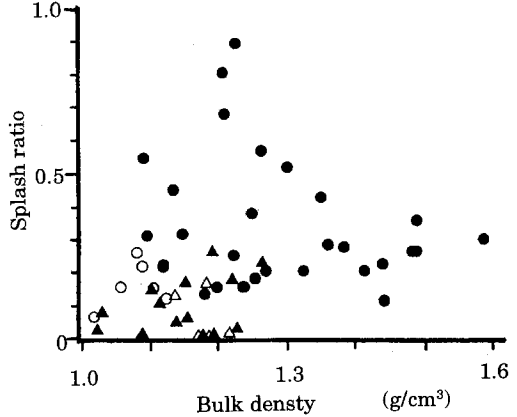


図-3 凍結融解による飛散比の変化  
Changes in splash ratio due to repetition of freezing-melting process  
●, ▲: Before and after repetition of freezing-melting process, respectively  
○: Undisturbed soil sampled at Nov. 25 1992  
△: Undisturbed soil sampled at July 1 1993

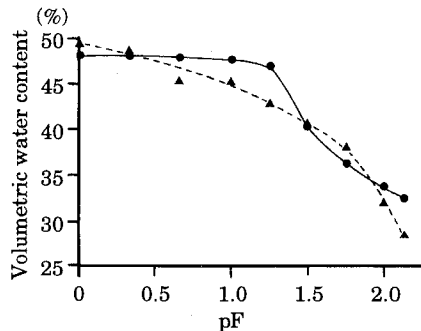


図-4 凍結融解前後における水分特性曲線  
Soil moisture characteristic curves before and after repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition

表-2 雨滴の落下速度とエネルギー  
Raindrop velocity and energy

Diameter	Frequency	Velocity	Energy
2.86 mm	108 drops/min	4.4 m/s	1.19×10 <sup>-4</sup> J

ため、水分特性曲線を求めた(図-4)。ここで用いた凍結融解前後の供試体の乾燥密度はともに  $1.1 \text{ g/cm}^3$  である。図-5に示したように、水分特性曲線を差分して水分分布曲線を求めた。その結果、凍結融解後の供試体における単位 pF 当りの体積含水率は、pF 0.5 前後で凍結融解前を大きく上回った。これは土壤が凍結することによ

り、土壤間隙中の水分が氷結して体積を増し、間隙を拡大したためと推定した。さらに pF 1.5 前後では凍結融解後の供試体における単位 pF 当りの体積含水率は凍結融解前を下回り、再び pF 2.0 前後で凍結融解前を上回る傾向を示した。

凍結融解による飽和透水係数の変化を図-6に示した。凍結融解前の供試体では、乾燥密度の上昇に伴って飽和透水係数は低下した。一方、凍結融解後の供試体にお

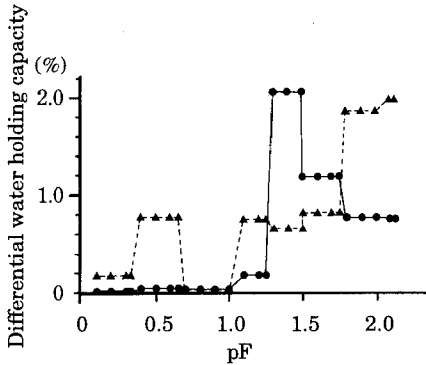


図-5 凍結融解前後における水分分布曲線  
pF-moisture distribution curves before and after repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition

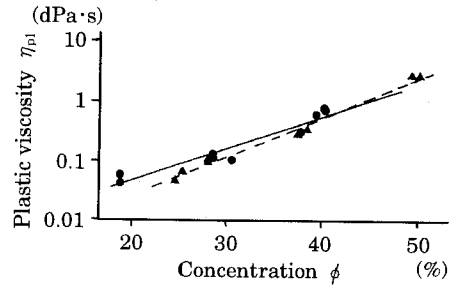


図-7 凍結融解による可塑粘性の変化  
Changes in plastic viscosity due to repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition  
——  $\eta_{pl} = \exp(0.1204\phi - 5.456)$  ( $r=0.96$ )  
……  $\eta_{pl} = \exp(0.1505\phi - 6.763)$  ( $r=0.99$ )

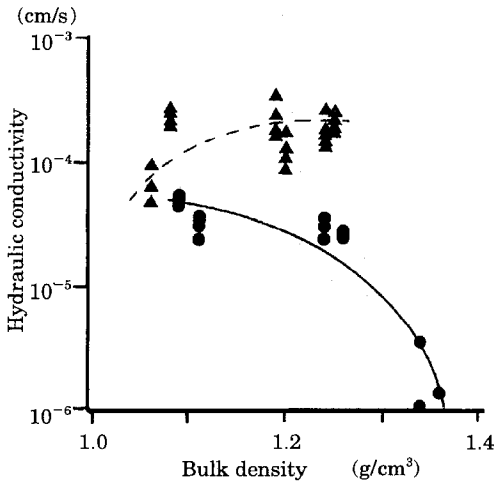


図-6 凍結融解による飽和透水係数の変化  
Changes in saturated hydraulic conductivity due to repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition

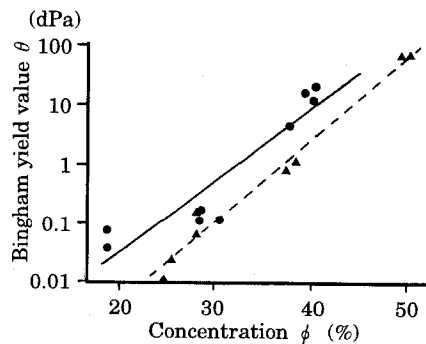


図-8 凍結融解による降伏値の変化  
Changes in Bingham yield value due to repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition  
——  $\theta = \exp(0.2767\phi - 9.017)$  ( $r=0.93$ )  
……  $\theta = \exp(0.3166\phi - 11.747)$  ( $r=0.99$ )

る飽和透水係数では乾燥密度による変化はほとんど見られず、凍結融解前を上回る傾向が見られた。

3) 凍結融解による土壌流動性の変化

凍結融解前後の供試土から 200 mesh 篩を通過した細粒分を集めて、土壌懸濁液を作成した。土壌懸濁液における流動性の測定結果を図-7, 8 に示した。

凍結融解前後の可塑性において、差はほとんど見られなかったが、凍結融解後のビンガム降伏値は凍結融解前を大きく下回った。この結果から凍結融解後の土壌懸濁液においては弾性的挙動が減少し、粘性の性質が強まったと判断した。

4) シミュレーションによる浸透流量の比較

毛管モデルに基づき、懸濁状態で流れる浸透流量のシミュレーションを試みた。ここでのモデルは三原ら(1992)が多孔体中を流れる土壌懸濁液の浸透流量と閉塞現象をシミュレーションするのに用いたモデルであるが、本研究では凍結融解の影響を調べるため実際の土壌にこのモデルを適用した。

水分分布曲線から毛管モデルを仮定して、図-9 に示したように各 pF 値における積算空隙本数を求めた。毛管モデルでは空隙半径  $R_j$  ( $R_1, R_2, R_3, \dots, R_j, \dots, R_m$  ( $R_{j-1} < R_j$ )) に対応して、空隙本数  $N_j$  ( $N_1, N_2, N_3, \dots, N_j, \dots, N_m$ ) が供試体の上端から下端まで各々平行に長さ  $L$  で存在すると仮定する。空隙を流れる土壌懸濁液の栓流半径は、懸濁液に作用する圧力差  $\Delta P$ 、懸濁液のビンガム降伏値  $\theta$ 、空隙長さ  $L$  の関係から(1)式で示され、栓流半径  $r_{oi}$  が空隙半径  $R_j$  を上回れば閉塞を生じると考える。

$$r_{oi} = 2L\theta_i / \Delta P \text{ で、} \dots\dots\dots(1)$$

$$R_j \leq r_{oi} \text{ の時 } q_{ij} = 0 \text{ (閉塞する)}$$

$$R_j > r_{oi} \text{ の時 } q_{ij} > 0 \text{ (閉塞しない)}$$

栓流半径  $r_{oi}$  は重量濃度 ( $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_i, \dots, \phi_n$ ) の変化に従って、 $r_{o1}, r_{o2}, r_{o3}, \dots, r_{oi}, \dots, r_{on}$  と変化する。但し、ここでは表層 10 cm までが飽和状態と仮定し、圧力差  $\Delta P$  には 9800 dPa を与えた。

各濃度に対応する浸透流量  $q(\phi_i)$  は(2)式で表される。

$$q(\phi_i) = \sum_{j=1}^m q_{ij} N_j - \sum_{j=1}^c q_{ij} N_j = \sum_{j=c+1}^m q_{ij} N_j \dots\dots(2)$$

第 1 項は全空隙の浸透流量、第 2 項は閉塞した空隙の浸透流量を示している。また  $q_{ij}$  は空隙 1 本当たりの浸透流量で Buckingham-Reiner 方程式から(3)式となる。 $\eta_{pi}$  は土壌懸濁液の可塑性である。

$$q_{ij} = \frac{\pi R_j^4 \Delta P}{8L\eta_{pi}} \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{2L\theta_i}{R_j \Delta P} + \frac{1}{3} \left( \frac{2L\theta_i}{R_j \Delta P} \right)^4 \right] \dots(3)$$

これらの(2), (3)式に基づいて、凍結融解前と凍結融解後における浸透流量を求めた。空隙中を流れる懸濁液の濃度によって浸透流量が変動するため、図-10 に示したように、凍結融解前の 10% 濃度における浸透流量で各値を除して無次元化した。その結果、低濃度において凍結融解後の無次元浸透流量は凍結融解前を大きく上回る傾向を示した。

透水性実験において、供試体下端より流出した懸濁液の濃度は 12% 前後であった。また乾燥密度 1.1 g/cm<sup>3</sup> 付

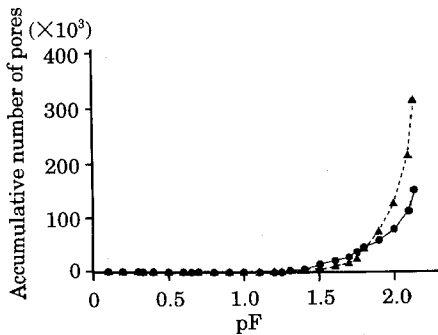


図-9 凍結融解前後における積算空隙本数  
Changes in accumulative number of pores due to repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition

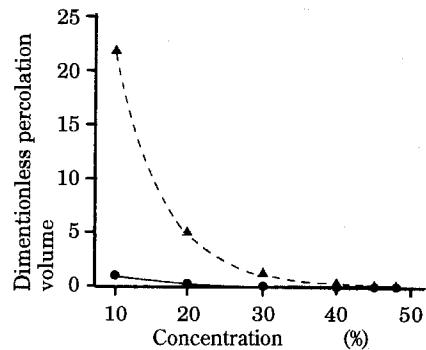


図-10 凍結融解前後のシミュレーションによる浸透流量  
Changes in simulated percolation volume per unit time due to repetition of freezing-melting process  
●——: before ▲……: after repetition

近における凍結融解後の飽和透水係数は凍結融解前のほぼ6倍であった。一方、シミュレーション結果に基づくと、重量濃度12%付近における凍結融解後の浸透流量は凍結融解前のほぼ20倍であった。シミュレーション結果に基づく凍結融解前後の差が実験結果による差を上回ったのは、実際の土壌間隙は毛管モデルと異なり、屈曲や不連続の部分が影響したためと考察した。

これらの結果から、土壌中の間隙構造と懸濁液の流動性を考慮することで、凍結融解に伴う透水性の変化をシミュレーションによってほぼ表現できることが明らかとなった。

#### 5) 凍結融解に伴う土壌構造の変化と雨滴侵食

これまでの結果より、凍結融解の繰り返しによってpF 0.5前後の土壌間隙が増大し、土壌懸濁液も流動しやすくなることが明らかとなった。土壌透水性の実験結果と同じく、シミュレーションにおいても凍結融解によって透水性が高くなることが明らかとなった。また雨滴による侵食特性を調べた結果、凍結融解前の供試体における飛散比は凍結融解後を大きく上回った。

これらの結果から、凍結融解前の供試体では表層に降った雨滴の浸透が容易に進まず、飽和度が上昇し、浮力の発生や凝集力の低下が生じて、同じ雨滴エネルギーによっても凍結融解後の供試体に比べてより多くの土壌粒子が飛散されたと考察した。

### 5. ま と め

本研究では北海道女満別における造成畑地の盛土斜面を調査対象とし、凍結融解による土壌構造の変化が雨滴による侵食過程に与える影響を検討した。

凍結融解前の供試体では乾燥密度1.2から1.3 g/cm<sup>3</sup>の範囲内で最も飛散比が高く、乾燥密度の上昇に伴い飛散比は低下する傾向が見られた。しかし凍結融解後の供試体では乾燥密度による飛散比の変化はほとんど見られず、飛散比は0.3 g/cm<sup>3</sup>以下で低い値を示した(図-3)。

水分特性曲線を差分して水分分布曲線を求めた結果、凍結融解後の供試体における単位pF当りの体積含水率は、pF 0.5前後で凍結融解前を大きく上回った(図-5)。また凍結融解前の供試体では、乾燥密度の上昇に伴って飽和透水係数は低下したが、凍結融解後の供試体における飽和透水係数では乾燥密度による変化はほとんど見られず、凍結融解前を上回る傾向が見られた(図-6)。

土壌懸濁液の流動性を測定した結果、凍結融解前後の可塑性の差はほとんど見られなかったが、凍結融解後のビンガム降伏値は凍結融解前を大きく下回った(図-7, 8)。

毛管モデルによる浸透流量のシミュレーションを行って、凍結融解が浸透流量に与える影響について検討した。モデルにおいて凍結融解に伴う間隙構造の変化と懸濁液における流動性の変化を考慮した。その結果、凍結融解による透水係数の実測値の変化をシミュレーションによってほぼ表現できることが明らかとなった。

これらの結果を踏まえると、凍結融解前の供試体では表層に降った雨滴の浸透が容易に進まず、飽和度が上昇し、浮力の発生や凝集力の低下が生じたと考えられる。そのため同じ雨滴エネルギーによっても、凍結融解前の供試体では凍結融解後に比べて、より多くの土壌粒子が飛散されたと考察した。

### 引用文献

- 饗庭直樹・三原真智人・成岡 市・安富六郎・穴瀬 真 (1995): 寒冷地における凍結融解と土壌侵食, スレーキング特性に与えるカルシウム添加の影響, 土壌の物理性, 71: 11~15.
- Benoit, G.R. and J. Bornstein (1970): Freezing and Thawing Effects on Drainage, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34: 551~557.
- Benoit, G.R. (1973): Effect of Freeze-Thaw Cycles on Aggregate Stability and Hydraulic Conductivity of Three Soil Aggregate Sizes, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37: 3~5.
- Burney, J.R. and L.M. Edwards (1993): Size Distribution of Sediment in Rill Runoff in Response to Variations in Ground Cover, Freezing, Slope and Compaction of a Fine Sandy Loam, J. Agric. Engng Res., 56: 99~109.
- Hinman, W.C. and F. Bisal (1973): Percolation Rate as Affected by the Interaction of Freezing and Drying Processes of Soils, Soil Science, 115(2): 102~106.
- メディナ, S.M.・成岡 市・三原真智人・穴瀬 真・安富六郎 (1995): 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と土壌団粒の配列構造に及ぼす影響, 土壌の物理性, 71: 5~9.
- 三原真智人・安富六郎 (1992): 土壌透水性の経時的変動と間隙閉塞機構, 農土論集, 162: 67~75.
- 長沢徹明・梅田安治 (1981): 土の耐水食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.

(受稿年月日 1995年 8月 14日)  
(受理年月日 1995年 10月 4日)