

## 初期含水率が最大凍結深と熱収支に及ぼす影響について

—土壌凍結・融解過程の解析に関する基礎研究 (II)—

陳 曉飛\*・三野 徹\*・堀野治彦\*

### The effect of Initial Water Content on Maximum Frost Depth and Heat Balance

—Studies on the analysis of freezing and thawing processes of soils (II)—

Xiaofei CHEN\*, Toru MITSUNO\* and Haruhiko HORINO\*

\* Graduate School of Agricultural Science, Kyoto University

#### Abstract

Maximum frost depth is an important index for design of engineering in cold region to prevent frost damage. When boundary conditions and soil type are given, the frost depth is affected by soil water content. But it is still not clear how the maximum frost depth is affected by the soil water content. The heat balance during freezing and thawing processes of soils are strongly affected by soil water content as well. The knowledge about the effect of soil water content on the maximum frost depth and heat balance is very important for control and prediction of freezing and thawing processes. However, the elucidation of these effects is difficult to deal with only by physical experimental method. Therefore in this paper, the numerical experiments for some different initial water contents were performed to analyze the effects on maximum frost depth and heat balance. As the results of these experiments the maximum frost depth takes the smallest value nearing 0.15~0.20 ( $m^3 m^{-3}$ ) of total water content (ice + water) in frozen layer, and increases both with the increasing and decreasing of the total water content under the boundary conditions and soil used in this paper. The ratio of accumulate latent heat to the accumulate heat outflow to the air increases with initial water content increases, the same ratio of accumulate sensible heat increases with initial water content decreases, and the same ratio of the accumulate heat inflow from the lower boundary keeps increasing with the freezing-thawing process advance.

**Key words** : Initial water content, Numerical experiment, Maximum frost depth, Heat balance

#### 1. はじめに

最大凍結深は、凍害防止設計上で、重要な指標であり、土壌の種類や境界条件が一定の場合、それは含水率によって大きく変化する。しかし、その変化の傾向は必ずしも一定ではない。すなわち、初期含水率の増加につれて大きくなるか、あるいは小さくなるかについて、これまでの研究でははっきりとした答えはまだ出されていない。そこで、本研究ではすでに筆者らが報告している熱

と水の同時移動モデルによる数値実験法を利用して、初期含水率が最大凍結深に及ぼす影響の解明を試みた。

一方、土壌の凍結・融解過程に伴う熱収支各項、すなわち、潜熱、顕熱、上下境界面からの熱損失や熱補給の変化状況、及び各項の割合とその相対関係の変化状況を解明することは、凍結・融解現象をより深く理解する上で、また凍結・融解深を予測する上で不可欠である。しかし、実際の現象を対象とした実験で、これらの様々な情報を得ることは困難である。そこで本研究では、数値

\* 京都大学大学院農学研究科 〒606-8228 京都市左京区北白川追分町  
 キーワード：初期含水率、数値実験、最大凍結深、熱収支

実験によって、初期水分が熱収支へ与える影響を分析する。

## 2. 数値実験の概要

本数値実験で用いる土は間隙率が35%のシリカ粉末を想定している。したがって、飽和含水率は $0.35 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$ である。上端(地表面)及び下端(深さ1m)での境界温度の変化には、北海道深川市の畑における実測値(Fig. 1)を用い、境界面での水分フラックスは0に設定した。ここで用いる熱と水の同時移動モデルによる数値実験法、及び熱と水分パラメータ、凍結特性曲線の詳細はすでに報告した数値実験法の検討に際して利用したものと同じである。数値実験の方法、適合性については前報(陳ら, 1998)で詳しく述べているので、それを参照願いたい。

## 3. 最大凍結深について

### 3.1 数値実験とその結果

初期含水率が最大凍結深に及ぼす影響を解明するために、初期含水率を0.25, 0.15, 0.05 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )に設定して、凍結・融解深の進行曲線を求めた。また、水分移動を考慮する場合と考慮しない場合を比較するために、凍結融解に伴う水分移動を無視して、熱移動だけを考慮した凍結・融解深の進行曲線も求めた。

### 3.2 数値実験の結果

Fig. 2には各初期含水率における凍結・融解深の進行曲線を示した。図中の実線は熱と水の移動を同時に考慮した結果であり、点線は熱移動だけを考慮した(水が動かずに凍ってしまう)場合の結果である。両実験の比較、すなわち、土壌水分移動による影響として、Fig. 2から以下のようなことがわかる。

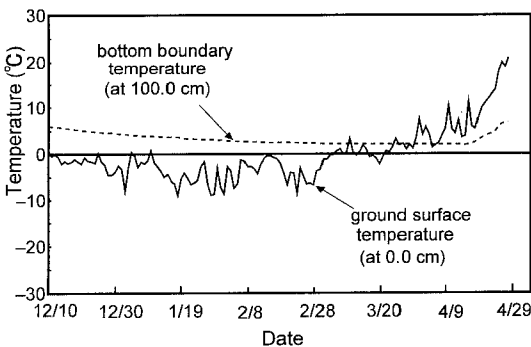


図-1 凍結・融解過程における境界温度(深川, 1994-1995)

Fig. 1 Boundary temperatures used here.

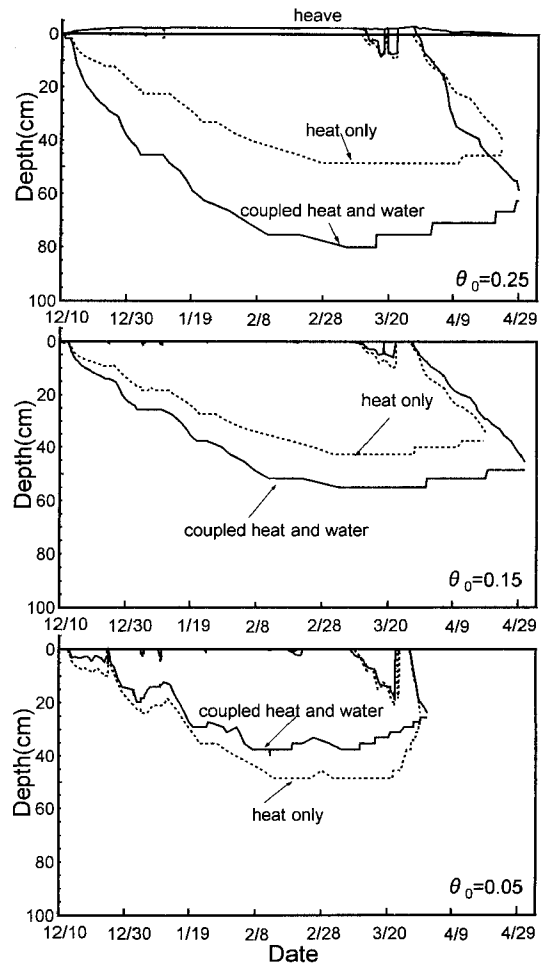


図-2 数値実験における土壌凍結・融解深の進行曲線

Fig. 2 Simulated freezing and thawing penetration by numerical experiments.

熱と水分の移動を同時に考慮した場合は、ここでの実験範囲(初期含水率が0.25, 0.15, 0.05 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ))では、初期水分の減少につれて最大凍結深が次第に浅くなるという傾向が見られた。一方、水移動を考慮せずに、熱移動だけを考慮する場合は、最大凍結深の初期含水率による変化には一定の傾向はなく、初期含水率が0.15 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )である時、最大凍結深は約40.0 cmと一番小さい値を示している。初期含水率が0.25と0.05 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )の場合は、それは約50 cmとなって、より大きい値を示した。

熱と水の同時移動を考慮するときの凍結・融解深と、熱移動だけを考慮するときの結果とは、かなり大きい違いを示した。初期含水率が0.25 ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )の場合は、向

者の差は30 cmにも達している。また、両者の相対関係を考察してみると、初期含水率が0.25と0.15 ( $m^3 m^{-3}$ )の場合において、熱と水の移動を同時に考慮するときの凍結深は大きい値を示したものの、初期含水率が0.05 ( $m^3 m^{-3}$ )の場合では逆転現象が生じており、この場合の熱だけを考慮したときの凍結深はより大きい値を示した。

以上の結果から、まず、土壌の凍結・融解に伴う水分移動は凍結・融解深にきわめて大きい影響を及ぼすことが確認できた。また、初期含水率は最大凍結深への影響はかなり大きく、かつその影響には一定の傾向はなく、逆転現象が存在することもわかった。

### 3.2 考察および分析

#### (1) 最大凍結深を規定する指標 $R$ の導入

含水率の大きい場合には、凍土層での含水率が大きくなる一方で、含気率が少なくなり、土壌の三相状態が変化して凍土の熱伝導率が大きくなる。そのために、凍結過程において、凍結前線から地表へ伝達する(損失する)熱の量が大きくなり、最終的に地表から放出される熱量が大きくなるために、凍結深の進行に有利となる。一方で、含水率が大きくなると、相変化に必要な潜熱量が増加し、土壌の熱容量も大きくなるために、凍結深の成長を抑制することになる。同じように、含水率が小さい場合には凍土層での含水率が小さくなり、空気量が多くなるため、凍土層の熱伝導率が小さくなる。含水率が大きい場合と比べて凍結前線から地表面への熱損失が小さくなるために、凍結深の進行を抑制することになる。一方で、含水率が小さいため、凍結前線での凍結潜熱量も少ないので、凍結深の進行に有利になる。

凍結に伴う上層への水分移動を考慮する場合は、水分移動を考慮しない場合よりは凍土層での含水率が大きくなり、凍結前線で消費する凍結潜熱の量も大きくなる。移流の影響は小さいので、結果として、水分移動を考慮する場合の凍結深の進行は、水分移動を考慮しない場合のより大きい初期含水率を持つときと同じになる。凍結に伴い凍土層へ移動した水分を  $\theta_{move}$ 、初期含水率を  $\theta_0$  とすると、凍土層の全含水率は  $\theta_0 + \theta_{move}$  となる。

以上の検討を整理すると、凍結深の進行は地表面から凍結フリンジへの寒さの伝達速度(凍結深の進行を促進する因子)と、そこでの相変化に必要な潜熱量(凍結深の進行を抑制する因子)の相対関係によって決まることになる。そこで、ここでは、凍結前線の進行状況を判断するために、次のような指標  $R$  を定義する。

$$R = \lambda_f / \Delta\theta \quad (7)$$

ここで、 $\lambda_f$ は凍土の熱伝導率 ( $W m^{-1} K^{-1}$ )であり、凍結面から地表面への熱損失速度を代表する量で、 $\Delta\theta$ は水

に相変化した含水率であり、水から氷への相変化で消費される潜熱量を代表するものである ( $m^3 m^{-3}$ )。

$$\Delta\theta = \theta - \theta_u \quad (8)$$

$$\theta = \theta_0 + \theta_{move} \quad (9)$$

ここに、 $\theta$ は凍土層の全含水率 ( $m^3 m^{-3}$ )、 $\theta_u$ は不凍水の含水率であり ( $m^3 m^{-3}$ )、凍結した土層ではほぼ一定値であり、ここでは0.025 ( $m^3 m^{-3}$ )としている。 $\theta_0$ は初期含水率 ( $m^3 m^{-3}$ )、 $\theta_{move}$ は凍土層に移動した水分 ( $m^3 m^{-3}$ )である。

$\lambda_f$ と $\Delta\theta$ とも凍結した土層の全含水率 $\theta$ の増加とともに増加するが、両者の増加傾向は大きく異なっている。 $\Delta\theta$ はほぼ全含水率 $\theta$ によって線形的に増加するのに対して、 $\lambda_f$ は全含水率の低いところで増加割合が小さく、全含水率が大きくなると急激に増大する傾向を示す(Fig. 3)。したがって、両者の比 $R$ は複雑に変化する(Fig. 4)。土壌の熱伝導率 $\lambda$ と含水率 $\theta$ の関係は様々な研究者によって式が提案されている。ここで、熱伝導率については、De Vries (1963)によって提案された式に基づいて含水率を考慮した式、福田(1976)の式に不凍水を加えた式、そして、木下(1982)による相乗平均式の拡張式を用いて推定した値を用いて評価した。

#### (2) $R$ と最大凍結深 $H_m$ の関係

以上の考察をもとに、先の数値実験の結果で得られた複雑な現象は、次のように説明することができる(表1を参照)。

まず、土壌水分が動かない場合には、初期含水率がそ

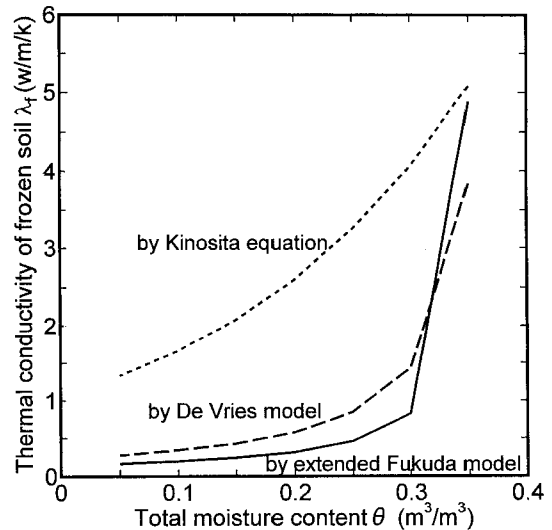


図-3 凍土の熱伝導率と全含水率の関係

Fig. 3 Relation between total moisture content and thermal conductivity of soil.

のまま凍結するので、全含水率 $\theta$ は初期含水率と等しい。先の数値実験から初期含水率が $0.15 (m^3 m^{-3})$ で最大凍結深がもっとも浅くなったのは、対応する $R$ が1.4という小さい値になっているからと説明できる。

水分移動を考慮する場合には、逆転現象がここで対象とした3つの初期含水率に対しては現れず、最大凍結深は初期含水率の増加とともに増加する傾向となった。一方、初期含水率が $0.05 (m^3 m^{-3})$ の場合の $R$ は2.6であり、初期含水率が $0.15 (m^3 m^{-3})$ の場合の2.0より大きくなった。移動水分を加えると全含水率はそれぞれ $0.075 (m^3 m^{-3})$ と $0.25 (m^3 m^{-3})$ になり、先に示した $R$ 値の最も低いところ $\theta=0.15\sim 0.20 (m^3 m^{-3})$ の両側になり、右側と違って左側の含水率はかなり小さいので、こ

こで無視した顕熱による凍結深へ与える影響が大きくなったためと考えられる。

また、初期含水率が $0.05 (m^3 m^{-3})$ の場合には、水分移動を考慮した最大凍結深は水分移動を考慮しなかった時より小さい値を得たことも同じように説明できる。すなわち、 $R$ 値は水分移動を考慮されないときの3.1から移動水分を加えてからの2.6の低い部分に移動したからと考えられる。

(3)  $R$ と凍土層の全含水率 $\theta$ の関係

Fig. 4からわかるようにいずれの式を当てはめても、凍土層の全含水率(氷+水、即ち $\theta = \theta_o + \theta_{move}$ )が $0.15\sim 0.20 (m^3 m^{-3})$ 程度のところで、 $R = \lambda_i / \Delta\theta$ が最も小さくなり、最大凍結深も最小となることがわかった。その部分から全含水率が増加しても減少しても、対応する最大凍結深が増加すると考えられる。

以上の $R$ による分析には顕熱と下層から凍結前線への熱フラックスの影響が考慮されていないために詳細な点では、一部はずれるものの、最大凍結深に与える含水率の影響を大まかにとらえることができた。このように、この分析が数値実験の結果をほぼ説明できたことは、少なくとも以下の事を示唆しているといえよう。即ち、土壌の最大凍結深は必ずしも初期含水率の増加に連れて増加或いは減少せず、ある範囲で最小値を取り、この範囲より初期含水率が増加しても、減少しても最大凍結深は共に増加する傾向が見られる。

初期含水率が最大凍結深に及ぼす影響がわかれば、現地において凍結・融解過程を制御しようとする場合に、土壌水分の制御を介する方法が考えられる。例えば、春干ばつを防ぐ対策として秋灌漑を行う地域では、秋灌漑の量によって凍結深を有利に調整することが可能となる。

4. 熱収支について

4.1 凍結・融解過程の熱収支状況

土壌の凍結・融解過程における熱収支の状況を Fig. 5に示す。4つの熱収支項の積算値、すなわち、氷と水の間

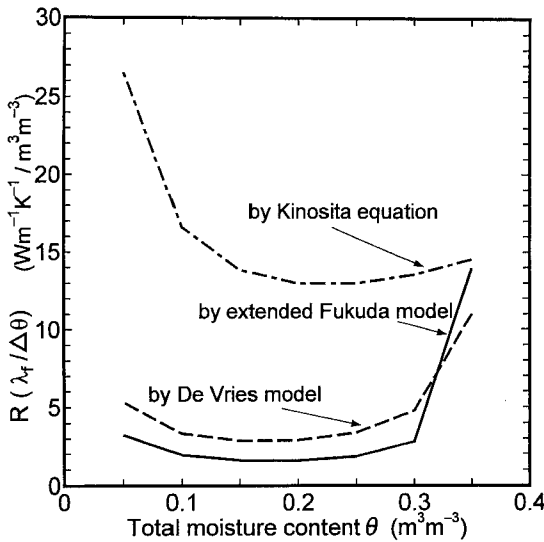


図-4 凍土の全含水率と、その熱伝導率と氷に相変化した含水率の比の関係

Fig. 4 Relation between total moisture content and the ratio of thermal conductivity of frozen water content of frozen soil.

Table 1  $R^*$ と最大凍結深  $H_m$  の関係

水分移動を考慮しない場合					水分移動を考慮する場合				
$\theta_o$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta_{move}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$R$	$H_m$ (cm)	$\theta_o$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta_{move}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$R$	$H_m$ (cm)
0.05	0.0	0.05	3.1	48.5	0.05	0.025	0.075	2.6	38
0.15	0.0	0.15	1.4	43.0	0.15	0.10	0.25	2.0	55
0.25	0.0	0.25	2.0	48.0	0.25	0.09	0.34	8.0	80

\* 熱伝導率の計算は数値実験と同様に福田 (1976) の式を用いている。

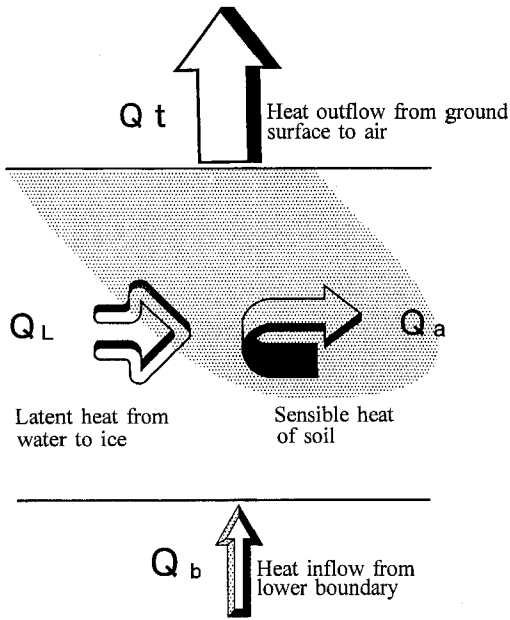


図-5 土壤凍結・融解過程における熱収支状況

Fig. 5 Sketch of heat flow balance during freezing and thawing processes of soil.

の相変化に用いられる積算潜熱量  $Q_L$  ( $MJm^{-2}$ ), 地温の変化に消費する積算顕熱量  $Q_a$  ( $MJm^{-2}$ ), 上の境界面での積算損失熱量  $Q_t$  ( $MJm^{-2}$ ), 下の境界面からの積算熱補給量  $Q_b$  ( $MJm^{-2}$ ) で整理した。これら4つの熱収支項にはエネルギーの保存則から次のような関係が成立する。

$$Q_t = Q_b + Q_L - Q_a \quad (1)$$

すなわち,

$$Q_t - Q_b = Q_L - Q_a \quad (2)$$

なお、熱収支各項の積算値を次のような式で計算した。

$$Q_t = \int_{t_0}^{t_e} K_1(t) G_1(t) dt \quad (3)$$

$$Q_b = \int_{t_0}^{t_e} K_2(t) G_2(t) dt \quad (4)$$

$$Q_L = \int_{t_0}^{t_e} \int_{z_1}^{z_2} L f(z, t) dz dt \quad (5)$$

$$Q_a = \int_{t_0}^{t_e} \int_{z_1}^{z_2} C(z, t) \tau(z, t) dz dt \quad (6)$$

ここで、 $t$  は時間 (s),  $t_0$  は凍結の開始時間,  $t_e$  は凍結・融解過程の終了時間,  $z_1$  は地表面の位置座標値 (m),  $z_2$  は下の境界面の位置座標値 (m),  $K_1(t)$  は地表面の近くにある土層の熱伝導率 ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ),  $G_1(t)$  は地表面の近くにある土層の温度勾配 ( $Km^{-1}$ , 地表面から大気に

放熱するときを“+”とする),  $K_2(t)$  は下の境界面の近くにおける土層の熱伝導率 ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ),  $G_2(t)$  は下の境界面の近くにおける土層の温度勾配 ( $Km^{-1}$ , 上方に放熱するときを“+”とする),  $L$  は単位体積の水が氷に相変化する際の潜熱 ( $MJm^{-3}$ ),  $f(z, t)$  は含水率の変化 ( $m^3 m^{-3}$ , 含水量が増加するときを“+”とする),  $C(z, t)$  は熱容量 ( $MJm^{-3}K^{-1}$ ),  $\tau(z, t)$  は温度の変化 ( $K$ ) である (温度上昇するときを“+”とする)。

#### 4.2 熱収支に関する数値実験結果及び考察

ここでは、初期含水率を 0.05, 0.15, 0.25 ( $m^3 m^{-3}$ ) に設定して、数値実験を行った。求められた凍結・融解過程における熱収支各項の積算値の変化を Fig. 6 に、各項の積算値と地表面での積算損失熱量  $Q_t$  (熱収支総量) の比率を Fig. 7 に示す。

Fig. 6 を考察すると次のようなことがわかる。すなわち、地表面から大気に奪われる熱量  $Q_t$  は初期含水率の減少につれて大幅に減少する。凍結過程 (凍結開始から地表面の融解が始まる前の部分であり、大体 12 月 10 日～3 月 20 日) では土から熱を放出し、 $Q_t$  は増加する。融解過程 (地表面からの融解が安定に開始してから凍土層が完全に消失するまで、大体 3 月 20 日～4 月 29 日) において土は地表面から熱を吸収し、 $Q_t$  は減少する。また、地表面温度の微小変化に応答して  $Q_t$  の増加や、減少の速度も変化する。例えば凍結過程において、地表面温度の低いとき  $Q_t$  は急激的に増加し、逆の場合は緩やかに増加する。その変化の割合は初期含水率の減少によって低下する。理由としては、初期含水率が小さければ小さいほど、土の熱伝導率が小さくなるためであると考えられる。

積算潜熱量  $Q_L$  も  $Q_t$  と同じように全期間にわたり初期含水率の減少とともに大幅に減少するが、その期間の変化状況を見ると、 $Q_L$  は凍結過程において含水量の増加とともに増加し、融解過程に入ってから含水量の減少とともに減少して、融解過程の終わったところで 0 に戻る。

下部の境界面からの積算熱補給量  $Q_b$  は初期含水率の減少によって減少するが、その減少の度合いは、 $Q_t$  と  $Q_L$  に比べて小さい。この項は凍結過程の開始から融解過程の終了まで継続的に増加する。その増加速度は初期含水率の減少によって若干減少するが、同一初期含水率に対してほぼ同じ勾配で増加することがわかった。

積算顕熱量  $Q_a$  も初期含水率の減少とともに減少するが、その減少幅も  $Q_b$  と同じように  $Q_t$  と  $Q_L$  に比べてかなり小さい。また、凍結過程においては土層の温度が低下し  $Q_a$  の絶対値は増加するが、融解過程では土層の温度が上昇して、 $Q_a$  の絶対値は減少する。なお、積算顕熱

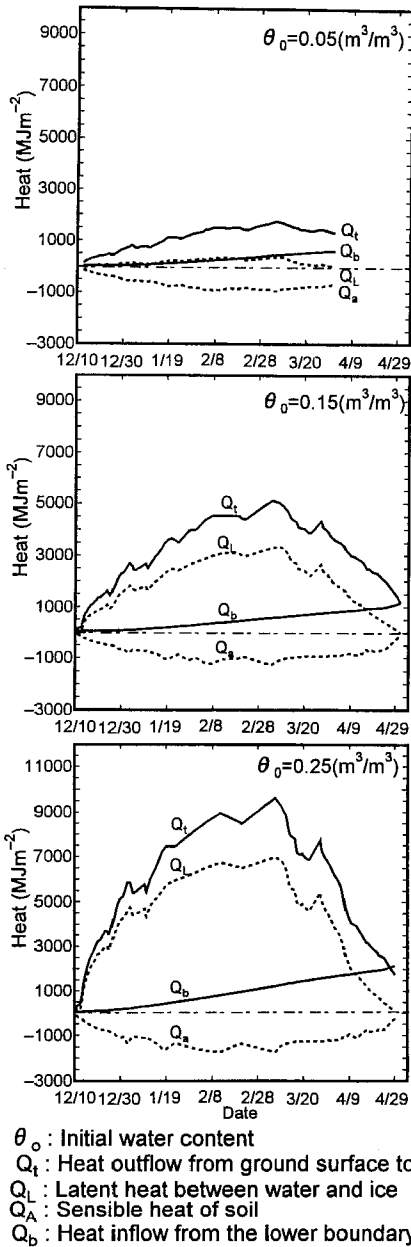


図-6 土壌凍結・融解課程における熱収支各項の変化状況

Fig. 6 Variation of each elements of heat balance during freezing and thawing processes.

量の変化も  $Q_t$  の変化と同様に地表面温度の変化によく対応している。

Fig. 7 に示す各熱収支量の積算値が熱収支総量の積算値 ( $Q_t$ ) に占める割合の数値実験の結果について、まと

めると以下ようになる。すなわち、

初期含水率が大きければ大きくなるほど、凍結・融解に伴って発生する積算潜熱の割合 ( $Q_l/Q_t$ ) が大きくなり、潜熱は凍結・融解現象を支配する要因となる。

初期含水率が小さい場合は積算顕熱の割合 ( $Q_a/Q_t$ ) は大きく、顕熱は支配的な要因となる。

また、下部の境界面からの積算熱補給量の割合 ( $Q_b/Q_t$ ) は凍結前期では小さく、融解過程に向かって増加し、融解過程の後期ではかなり大きい値になる。

以上の考察結果から、凍結・融解深を推定するために次のことを考慮しなければならない。

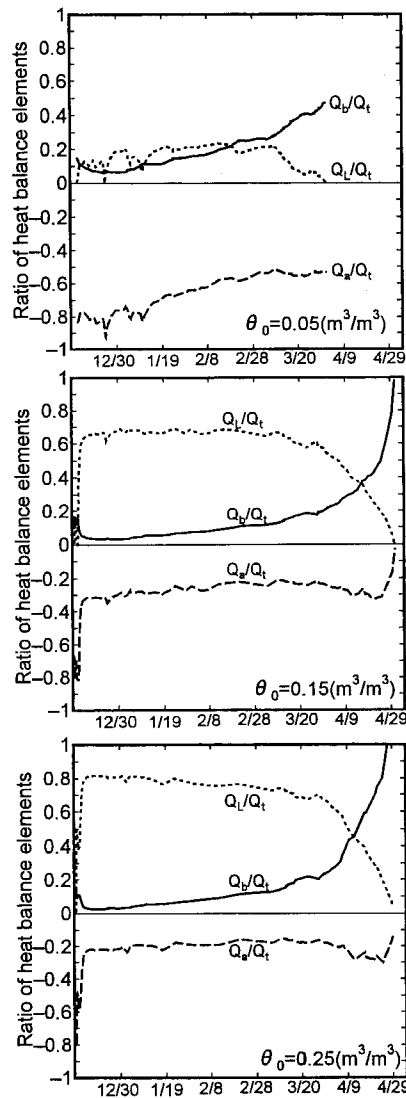
- ① 凍結過程において、初期含水率が大きければ、潜熱だけを考慮しても凍結・融解深の計算誤差は小さくなる。特に凍結初期では下部境界面からの熱補給は無視できる。
- ② 融解過程では下部の境界面からの熱補給を考慮しなければならない。
- ③ 初期含水率の小さい場合は、顕熱を考慮しなければならない。

## 5. 結 論

本研究での境界条件と土壌の種類に対して、数値実験を介して初期含水率が最大凍結深と熱収支に及ぼす影響を分析し、次のような結論が得られた。

- ① 土壌の凍結・融解に伴う水分移動は凍結・融解深の進行状態や熱収支にきわめて重要な役割を果たし、考慮しなければならない。
- ② 初期含水率の変化による最大凍結深の変化には必ずしも一定の傾向はなく、ある初期含水率の範囲では最小値をとる。本研究で用いた境界条件と土壌について、凍上層の全含水率 (氷+水) が  $0.15 \sim 0.20 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$  のあたりで凍結深は最小となり、そこから全含水率が増加しても、減少しても最大凍結深の値は増加する。
- ③ 初期含水率が大きい場合は、凍結に伴い発生する潜熱が現象の支配的な要因となる。初期含水率が小さい場合は顕熱の量が熱収支で大きな割合を占める。
- ④ 下部境界面からの熱補給は凍結初期では無視できるが、凍結後期及び融解期では無視できない。

以上の結果を踏まえ、凍結・融解深の進行に係わる諸因子の重要性を評価することができ、現象に関わる主要な因子を選別することによって凍結・融解深の進行を表す方程式を単純化し、その解を解析的に導くことが可能となる。これについては別途報告する予定である。



$\theta_0$  : Initial water content  
 $Q_L/Q_t$  : Ratio of latent heat against to heat outflow to air  
 $Q_s/Q_t$  : Ratio of sensible heat against to heat outflow to air  
 $Q_b/Q_t$  : Ratio of heat inflow from lower boundary against to heat outflow to air

図-7 土壤凍結・融解過程における熱収支各項の割合の変化状況  
 Fig. 7 Ratio of heat balance elements of the heat outflow the air.

引用文献

陳 曉飛, 堀野治彦, 三野 徹, 丸山利輔 (1998) : 熱と水の同時移動モデルによる土壤凍結・融解過程の数値実験法—土壤凍結・融解過程の解析に関する研究 (I)—, 土壤の物理性, No. 78, pp. 25~34.  
 De Vries, D.A. (1963) : Thermal Properties of soils,

Physics of Plant Environment. Edited by Van Wijk, W.R. North-Holland Pub. Co., pp. 210~235.  
 福田正己 (1976) : 非定常法による凍土の熱伝導率の測定, 低温科学物理篇, Vol. 34, pp. 249~252.  
 木下誠一 (1982) : 凍土の物理学, 森北出版, pp. 33.  
 受稿年月日: 1998年 1月 12日  
 受理年月日: 1999年 2月 12日