表面温度が周期的変化する系の凍結・融解に関する解析(続報)* (永久凍土地帯における日毎・季節変動の2重周期変化の場合)

越後 亮三^{*1}, 原 武志^{*2}, 平田 賢^{*3}

An Analysis on Frozen-Melting Behavior of Periodic Change of Surface Temperature (Continuation) (Dual Periodic Temperature Changes with Daily and Annual Cycles)

Ryozo ECHIGO^{*4}, Takeshi HARA and Masaru HIRATA

^{**} Department of Mechanical Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 108-8548 Japan

It is important to understand the frozen-melting behavior of thermal active layer in permafrost area for dual periodic temperature changes combined with daily and annual cycles. The numerical results are compared with the single cyclic change and discussed on the temperature profiles in detail. The thermal structures are revealed to be consisted of dual Stokes depths and, in consequence, the net heat fluxes at the surface are illustrated to be affected by daily cycle to a certain extent. The influences on temperature profiles due to daily cycle penetrate only in Stokes depth pertinent to its own cycle, while the entire temperature distributions are decided by the annual cycle. Additionally, a simple experiment is performed to demonstrate the validity of the findings, predicted in former paper, regarding the temperature decreases in deep underground compared with an average (or initial) surface temperature, which is essential to form the permafrost structure.

Key Words: Heat Conduction, Frozen-Melting Boundary, Dual Periodic Cycle, Permafrost Area

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では表面温度が周期的に変化する場合、凍結層が2年以上にわたって存在することを条件として永久凍土が形成されるという経験的に知られている事実^{(2)~(4)}を理論的に示し、さらに地層深部における温度は表面の年間平均温度より低くなること、また伝熱学的には表面において冬期の流出熱流束が夏期の流入熱流束を上回ること、したがって深部温度は長期間にわたって低下を続けること等を明らかにした。

前報における数値計算では、基本的な伝熱現象を把握することを優先し、表面温度が周期的に変化する単純なストークス第2問題⁽⁵⁾を対象にしたが、現実的な気候を考慮すると年変化の他に日毎の温度変化は重要であろう。このような2重周期の場合、夏期の夜間に凍

結が始まり、逆に冬期の昼間には表面の融解が起こることが考えられ、凍土全体に及ぼす影響は簡単には予測できない。

本報では年の基本周期に日毎の短周期を加えた2重周期非定常変化過程を対象とした解析を行って年周期のみの場合と比較・検討し、さらに前報で得た基本的な知見である「2年以上にわたる凍結層は拡大を続ける」こと、「深部温度は表面平均温度より低下する」ことに対する簡単な実験を実施し、これらの事象を定性的に確認できたので併せて報告する。

凍結・融解のない2重周期の単純第2ストークス問題(線形)は各周期の結果得られるストークス深さを単に重ね合わせたものであることを数値計算で確認した。一方、相変化を考慮すると年変化のみの場合には凍結・融解層は3層構造が最大であったが、日毎変化を考慮すると最大で5層構造となる場合も起きる。永久凍土を議論していく上で相変化が日毎周期で起こる期間の表面近傍の活動層内の現象は特に複雑で、これらの熱的挙動を明らかにし、現象の正確な理解が必要である。

* 原稿受付 2002年6月24日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学工学部(〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)。

^{*2} 学生員, 芝浦工業大学大学院。

^{*3} 正員, 芝浦工業大学。

E-mail: echigo@sic.shibaura-it.ac.jp

記号

[英文字]

a : 温度伝導率 m^2/s
 n : 角速度 $1/\text{s}$
 n' : 角速度 $1/\text{s}$
 y : 距離 m
 $T_M - T_0$: 年変化振幅 $^\circ\text{C}$
 t : 時間 s

[ギリシャ文字]

η : 深さ方向無次元座標 ($=y\sqrt{n/2a}$)
 θ : 無次元温度 ($=(T - T_0)/(T_M - T_0)$)
 τ : 無次元時間 ($=nt$)

2. 解析方法

2.1 日毎変化を考慮した場合の留意事項 数値解析で対象とする基礎式, 境界条件, 凍結・融解面の接合条件等の取扱い (精度と厳密性確保のため接合面と一緒に移動する不等間隔格子の採用) 等は前報と同じであるが, 2重周期の計算では時間ステップとして1日24, 1年では 24×360 としており, 日毎変化のサイクルでは1日の開始と終期に季節による差が僅かながら生じること, 年周期のみの場合凍結・融解温度を横切るのは年間で最大2回であるが, 日毎変化を考慮すると春と秋を中心に多数回起きる. その期間は年間平均温度と日毎変化の温度振幅による. 図1に年間平均気温 -2°C , 日毎変化の温度振幅は年間の半分を想定した場合の春季の表面の温度変化を示す. 1ヶ月以上にわたって毎日2回凍結・融解が繰返されるが, 800ステップを越えると表面は常に融解状態になる.

2.2 凍結・融解層深さ 本解析に先立って単純第2ストークス問題において2重サイクルの周期の比を変えて数値解を求めたが, 短周期の影響する長さは無次元距離 $\eta = y\sqrt{n/2a}$, $\eta' = y\sqrt{n'/2a}$ の中に含まれる角速度 n , n' によって決まることが確認できた.

Fig.1 Dual Periodic Temperature Changes at Surface

日毎変化と年変化の比 n'/n は $1/360$ で, η の値に直すとそれぞれ $\eta = 0.32, 6.0$ である. 温度伝導率 (凍結・融解層) a の違いによるストークス深さの取扱いについては前報で述べたが, 凍結・融解層の深さについては特別な検討はしなかった. 前報で年間平均気温が -2°C と $+4^\circ\text{C}$ の場合を比較すると凍結・融解層の深さはそれぞれ $\eta = 0.1, 0.6$ であり, 年間通じて表面が経過する凍結・融解の時間の長さに依存することが判明した. すなわち融解時間が長いほど凍結・融解層は深く浸透する. 従って日毎変化によるストークス深さの影響は, 年周期のみの融解・凍結境界面と同程度の深さに達するものと考えられ, 熱的な挙動は一層複雑な様相を呈する. 温度分布, 表面熱流束への影響も含め詳細は後述する.

3. 結果と考察

3.1 表面平均温度が 0°C 以下の場合 図2に年平均表面温度が -2°C (凍結・融解温度は無次元温度では $+0.2$ に相当) の場合の $\eta \leq 1.0$ 範囲の温度分布を示す. $\eta \geq 1.0$ の範囲では日毎変化の影響は殆ど表れない. 温度分布, 深部の温度低下も年変化のみの結果と大きな差はない. 図中には夏至と冬至の日毎変化 (無次元温度振幅を 0.5 とする) を画いてある. 日毎変化の影響が及ぶ範囲は理論的には $\eta \leq 0.32$ であるが, 夏期中は凍結・融解境界面によりさらに狭い範囲に限定されている.

図3には秋季において表面近傍に残る融解層 ($\eta = 0.12$) が完全に消滅して全域凍結する状態の温度分布の変化を示す. 日毎変化がない時の経過時間 $\tau = 3.648$ に対し本図では $\tau = 3.5954$ とやや早くなる以外には残存する位置もほぼ同じである.

Fig.2 Typical Temperature Profiles for Mean Surface Temperature -2°C with Dual Periodic Changes

Fig. 3 Detailed Temperature Profiles around Entirely Freezing

凍結・融解層の形成、消滅に関しては年周期のみの場合は冬期の全面凍結から春・夏にかけて表面融解の2層から、秋・冬には表面から順に凍結・融解・凍結(深部)の3層構造を経て、図3のように全域凍結を繰返す。日毎変化を考慮すると年平均温度、温度振幅によって異なるが、年平均表面温度が -2°C で日毎温度振幅0.5の条件下では秋期の日毎温度振幅が凍結・融解線を挟む時に表面層に凍結・融解が加わり、順に凍結・融解・凍結・融解・凍結(深部)の5層構造を確認することが出来たが、永久凍結層である深部の温度分布には日毎変化の影響はさほど大きくなく、ここではこの解析結果は省く。

3・2 表面平均温度が 0°C 以上の場合 表面の年間平均温度が 0°C 以上の場合には日毎変化の影響が 0°C 以下の場合よりむしろ強く現れる。表面層に僅かな期間でも凍結層が形成されれば深部の温度低下が起きること、また表面に近くで残っている凍結層が1周期中融解状態になると深部凍結層も極めて緩慢な速さで融解状態に向かうことは年周期のみの場合と変わらないが、全域融解が実現する限界平均温度とタイミングは変化する(限界平均温度 $3.9^{\circ}\text{C} \rightarrow 4.4^{\circ}\text{C}$, $\tau = 3.264 \rightarrow$

Fig. 4 Typical Temperature Profiles for Mean Surface Temperature $+4.4^{\circ}\text{C}$ with Dual Periodic Changes

Fig. 5 Temperature Differences between Single(Annual) and Dual (Daily-Annual) Cycles

2.950)。図4に年間表面平均温度が $+4.4^{\circ}\text{C}$ (凍結・融解温度は無次元温度では $\theta = -0.44$ に相当)の温度分布を示す。日毎変化を含む場合は年周期のみと同様冬期では凍結・融解の2層、夏期では融解・凍結・融解の3層となる。また、秋期には日毎変化の影響が加わりの5層構造が現れ、表面から順に融解・凍結・融解・凍結・融解(深部)となるが、表面平均温度が 0°C 以下の場合と同様深部にはさほど大きな影響は与えない。

日毎変化の有無による内部の温度差を表面平均温度 -2°C 、 $+5^{\circ}\text{C}$ の場合について図5に示す。詳細に調べてみると -2°C ではほとんど差はないが、 $+5^{\circ}\text{C}$ の場合には全域に大きな差が現れ、影響する深さは深部まで及ぶ。この違いの主たる理由は年間を通じて深部凍結層が残存する日数が年周期のみでは2.5日であるのに対し、日毎周期も含む場合では25日間にも及ぶためである。

3・3 表面熱流束の変化 図6に年間にわたる熱流束の変化を示す。年周期のみの場合の熱流束が時間ステップ20~30, 170, 200あたりで大きく変化しているのは順に表面融解開始、表面凍結開始、内部全域凍結への移行によるものであったが、日毎変化を考慮した2重周期の場合にも大きな変化は同じように起き、同じ現象が対応している。また比較的安定した期間Aは融解・凍結2層、Bは凍結・融解・凍結、Cでは全域凍結状態に対応している。A, B, C以外の期間で激しく変動しているのは表面平均温度が 0°C 以下と 0°C 以上の項目で考察したとおり、日毎に表面が凍結・融解を繰返していて、内部構造が2~5層と複雑に変化しているためである。年間通しての正味の熱流束に結果的には大きな差は現れていないが、季節のずれと熱流束の差が補完しているためであって、内部の熱的構造には相当な違いがあることに対しては正しく認識する必要がある。

Fig.6 Comparisons of Daily Averaged Heat Flux Distribution of Dual Cycles with Annual Cycle

3・4 深部における温度降下 前報と同じように1周期(年間)中に凍結層がわずかの期間でも形成されれば地下深部における温度降下は生じることが確認できる。図7に表面温度の年間平均値に対し深部の温度を示す。日毎変化を重ねることによる影響としては内部の凍結層(図4では $\eta = 0.68$)が完全に消滅する表面平均温度は年周期のみの場合が 4.0°C であったのが 4.5°C にシフトしたことで比較的高い表面平均温度の範囲で温度降下がやや拡大したこと程度であるが、季節による表面の加熱・冷却の差はあるものの年間では相殺されることは前節の結果と対応している。なお本計算では深部温度の収束値を求めるため $\eta \rightarrow \infty$ の条件を有限値として12, 18あるいは最大50まで行い、それに応じて反復回数を調節して確認したものである。

Fig.7 Convergent Temperature in Deep Underground

4. 実験および検討

4・1 実験目的と実験装置の概要 本研究における実験の目的は前報の解析で得られた「2年以上にわたる凍結層は拡大を続ける」こと、および「深部温度は表面平均温度より低下する」ことの2点に対して実験的に証明することにある。そのため凍結・融解温度を挟んで周期的な加熱・冷却が簡単にできるような実験装置を作製した。その概要を図8に示す。測定部は断熱性を保つため二重縦型円筒形の亚克力容器を使用し、内容器(内径21.0mm, 高さ40.0mm)に試料として蒸留水を用いた。容器上部には熱電素子冷熱プレートに密着させ、温度測定にはK型シース熱電対を5mm間隔で7点配置した。なお、周囲は断熱を施してはいるが、初期状態として系全体を一樣温度にしてから周期的な加熱冷却を行うため、初期温度として設定可能な条件が制約され、 $+1^{\circ}\text{C}$ 以下にはできなかった。

系全体の初期状態を平均温度に設定し、実験条件は平均温度として1, 3, 5, 7°C 、温度振幅は $\pm 11^{\circ}\text{C}$ としたが、表面温度を正弦波状の周期加熱・冷却を維持するのが困難であったのでステップ状となるよう入力制御した。ただし実験条件に対応するステップ状加熱・冷却の解析も追加して比較する。測定時間はそれぞれ20400秒(5時間40分)以上継続した。

- ① Thermoelectric cooling and heating plate
- ② Applicable power supply unit
- ③ Data logger
- ④ Thermocouple
- ⑤ Acrylic container
- ⑥ Insulation
- ⑦ Personal computer

Fig.8 Experimental Equipment

4・2 実験結果と考察 図9, 11に表面平均温度として1, 3℃の場合の実験結果を示す. すべての熱電対が初期温度で一致していることを確認してから表面の周期的な加熱・冷却を始めた. 加熱・冷却の1周期は1200秒(20分), 温度振幅は11℃である. 図9の場合, 凍結層が浸透する深さは1周期目で5mm, 2周期目で10mmまで達しているが, 15mm深さに至るのは6周期目である. 本実験の時間内では底部(40mm)は凍結しておらず, 表面から「融解・凍結・融解」か「凍結・融解・凍結・融解」の3層あるいは4層構造が形成されている.

図11の表面平均温度3℃の場合実験開始後3周期位までは加熱期間に全域が融解状態になることがみられるが, また深部を含め系全体の温度が平均温度より低下し続けていることはむしろ図9より鮮明に表れている. 両方の実験とも底部は凍結に向けて温度低下が続

くものと考えられる.

表面平均温度が比較的高い例として5℃, 7℃の場合の温度の経時変化について図10に示す. 10200sec以降は類似した分布が続くので省略する. 平均温度からの低下幅は3℃の場合と比べ小さくなり, 加熱時(夏季)には全域にわたって融解状態になるため, 深部に凍結層が発達することはない. 平均温度の差によって表皮層の融解の速度には差が見られるため, 加熱時(夏季)の温度分布に両者の間でかなりの違いが見られる. たとえば5mmの位置では平均温度7℃の場合冷却時(冬季)においても凍結は起きていない. また加熱時の表皮層(~15mm)の温度上昇も大きい. 解析結果を援用して理解すると両者の違いは準定常状態において深部の温度低下幅と冬季における凍結時間(夏季における融解時間)の長さの違いによるものであると解釈できる.

Fig.9 Transient Temperature Changes for Periodic Heating/Cooling at Surface(Mean Temperature 1°C)

Fig.10 Transient Temperature Changes for Periodic Heating/Cooling at Surface(Mean Temperature 5°C and 7°C)

Fig.11 Transient Temperature Changes for Periodic Heating/Cooling (Surface Mean Temperature 3°C)

Fig.12 Analytical Result of Transient Temperature for Periodic Heating/Cooling (Surface Mean Temperature 3°C)

4・3 実験結果と数値計算の整合性 前報および本論文における数値計算では表面温度として正弦波状の周期変化を採用したが、実験条件との整合性を採るためステップ状として計算を行った。図 11 と同一の加熱・冷却条件（表面平均温度 3°C、周期 1200s、振幅 11°C）で行った結果を図 12 に示す。両者は定量的には少し差はあるが、表皮層の温度の振舞い、平均温度（初期温度）からの降下、深部の温度低下等非常によく対応していることがわかる。

一方活動層への日毎変化による影響はその浸透深さから推定して両者は重なり合うため、凍結・融解の階層構造は非常に複雑な様相を呈し、表面熱流束も激しく変動することが明らかになった。

また、1 周期間中、残存する凍結層は拡大すること及び深部温度が低下することについて実験的にも確認することができた。

実験は本学卒業研究学生青山晃久(2000 年度)、高木範明(2001 年度)両君に負うところが大きく、記して謝意にかえたい。

5. 結 言

短周期を重ね日毎変化を考慮した 2 重周期加熱・冷却条件について解析を行い、永久凍土地帯における活動層内部の熱的挙動を明確に示した。永久凍土を理解するには活動層内部の理解が不可欠ではあるが、深部温度低下については長周期による影響が大きいことならびに日毎変化を考慮した場合についても大局的には 2 年以上内部に凍結層が残存し続け、凍結層が拡大していくことを示した。

文 献

- (1) 越後他 2 名, 日本機械学会論文集, 第 68 巻, 669, B 編, (2002-5), pp1531.
- (2) 福田, 極北シベリア, 岩波書店, (1996), 2.
- (3) 福田・他 2 名, 極地の科学, 北大図書刊行会, (1997), 55.
- (4) 木下, 凍土の物理学, 森北出版, (1982), 77.
- (5) Schlichting, Boundary-Layer Theory, Mcgraw-Hill, 7th(1979), 93.