



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## 凍土造成用の交流部を持つ開放型二重管サーモサイ フォンの開発 その1 製氷過程の非定常熱伝導解 析の1 : 凍結面を移動させる解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 北海道開発技術センター 公開日: 2012-09-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 媚山, 政良 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1636">http://hdl.handle.net/10258/1636</a>

CTC07-II-003

凍土造成用の交流部を持つ開放型二重管サーモサイ  
フォンの開発その1 製氷過程の非定常熱伝導解析の1：凍結面  
を移動させる解析媚山政良\*  
\*室蘭工業大学Development of the thermo-syphon with a cross flow section [Part 1 : analy-  
sis of the unsteady freezing process of water ; 1st Analytical method with  
Moving interface]

Masayochi KOBAYAMA\*

\*Murooran Institute of Technology

COLD  
REGION  
TECHNOLOGY  
CONFERENCE 2007

## 1. はじめに

雪の貯蔵と利用に関する技術開発を続けている<sup>1)</sup>が、冬季間の自然冷熱エネルギーを貯蔵する媒体としては、天然の氷もあり、また、地中の水分が凍った凍土もある。日本の雪国では特別な自然条件が整い豊かな雪を得ることは容易であるが、世界の寒冷地と言われる地域の多くでは、雪よりもむしろ氷、凍土が冬季間の冷熱エネルギーの蓄熱媒体としては一般的でさえある。

氷、凍土を夏季まで保存し冷熱源などとして利用場合にも、雪の利用を意図し開発を行ってきた氷室あるいは雪冷冷房のシステム<sup>1)</sup>を転用できることから、さらに自然冷熱エネルギーの利用を拡大する上では、安価、簡便で確実な人工雪や天然の氷の製造方法あるいは凍土の造成方法を開発しておく必要がある。

いわゆるスノーガンを用いた人工降雪はそれほど経費のかさむ手法ではなく、海外で利用されている例もあり<sup>2)</sup>、日本での利用が議論されないのは雪が豊かに賦存することによる。湖沼の水面を利用した天然の氷の製造には氷の採取、運搬に優れた方法が川本らにより提案されており<sup>3)</sup>、実際に利用される日も遠くはないように思う。

凍土を利用した食品の貯蔵施設をウランホール郊外において実際に見聞した経験があり、冬季間地下の空間に寒冷外気を導入し、含水土壌を凍結させる風管とでも呼ぶ方式が採られており、たとえば、肉や穀類のように氷点以下の環境でも保存が可能な品目の貯蔵に利用されている。また、帯広畜産大学の構内には凍土を利用した一般の野菜を貯蔵できる施設が土谷らにより建設されている<sup>4)</sup>。この施設では、凍土の造成にヒートパイプ

(密閉型のサーモサイフォン)が使用されている。このヒートパイプは熱伝達速度に優れるものの必ずしも安価な熱伝達素子ではなく、また、耐久性、施工性に優れているとは言い難いものである。これに代わる熱伝達素子としては、作動液を不凍液(アルコールも可)とし一般構造用炭素鋼鋼管を用いた開放型のサーモサイフォンが考えられる。凍土の造成において律速は凍土側の凍結速度にあり、また、特に急速な凍結を必要としないことからヒートパイプ程の優れた熱伝達速度を必要としない背景もある。

とは言え熱伝達速度の高い方が望ましく交流部を持つ開放型二重管サーモサイフォンの開発を行っている<sup>5)</sup>。

このサーモサイフォンを用い凍土を造成し夏季での冷熱源として使用する場合、たとえば、サーモサイフォンの配置(サーモサイフォン間のピッチ)を決める必要があるが、できれば理論的な解析に基づき決定することが望ましく、また、夏季での外気あるいは貯蔵庫の内部熱負荷により凍土がどのように融解して行くかを知っておく必要がある。したがって、本報告ではサーモサイフォンなど熱伝達素子による凍土層の造成速度を調べる前段階として、静止した水の凍結問題についての解析手法について検討を行う。なお、水を凍土に置き換えた場合の物性値の不均一性などを考慮しなければならない場合あるいは円筒座標系での解析においては、数値解析が不可欠である。

冷却面温度(たとえば $-15^{\circ}\text{C}$ )、凍結温度(たとえば $0^{\circ}\text{C}$ )と、凍結が進んでいない水側の無限遠方の水温を初期水温と等しく与え(たとえば $4^{\circ}\text{C}$ )氷の生成速度を計算する Neumann の解析的な解法があり解が与えられている<sup>6)</sup>。

しかし、水の凍結問題など液体の凝固の操作は工業分野で広く扱われているにも係らず、数値解析に関する報告は調べた範囲では少ない。たとえば、松永による数値解析手法(ここでは、要素凍結法と呼ぶ)<sup>7)</sup>は、着目する凍結要素内での潜熱の蓄積量を積算し、要素全体の凍結に必要な潜熱量に達したときその要素の全域が凍結するとした方法であるが、要素内での凍結面が確定されていないため、氷と水の熱伝導率の変化を考慮はしているものの、温度分布が不連続となる欠点を有している(後述の図8参照)。また越後ら<sup>8)</sup>は凍結要素ないにさらに微小要素を設け、いずれかの要素の境界面が凍結面と重なる方法を用い解析を行っている論文では記載はあるものの詳細は不明であり、検証結果は明らかとはされていない。

したがって、本報告では、既に報告されている手法ではあると思われるが、凍結要素内での蓄積された潜熱量にあわせ(IPF (Ice Packaged Factor) に比例)凍結面を移動させる方法(「要素内 IPF 法」と呼ぶ)を紹介する。

2. 水の凍結問題における基礎方程式と解法

2.1 基礎方程式

直交1次元座標系を採る。また、水は静止しているものとする。図1に座標系を示す。

凍結部および未凍結の水の温度変化は次の非定常熱伝導方程式により表される。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \dots(1)$$

ここで  $x$  [m]は軸方向距離、 $T$ [°C]は温度、 $\tau$  [h]は時間であり、 $a$ [m<sup>2</sup>/h]は次式により表される温度伝導率である。

$$a = \frac{\lambda}{c \rho} \quad \dots(2)$$

ここで、 $\lambda$  [kcal/mh°C]は熱伝導率、 $c$ [kcal/kg°C]は比熱、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]は比重である。

凍結面  $x=X$  においては潜熱移動に伴う次の熱平衡式が得られる。

$$\lambda_l \left( \frac{\partial T_l}{\partial x} \right)_{x=X} - \lambda_w \left( \frac{\partial T_w}{\partial x} \right)_{x=X} = L \rho_l \frac{dX}{d\tau} \quad \dots(3)$$

ここで、 $L$ [kcal/kg]は水の凍結潜熱であり、下添字  $l$  は氷、 $w$  は水を示す。

境界条件および初期条件は次の通りである。

$$\begin{aligned} x=0 & : T = T_s \\ x=\infty & : T = T_\infty \\ \tau=0 & : X=0 : T = T_\infty \end{aligned} \quad \dots(4)$$

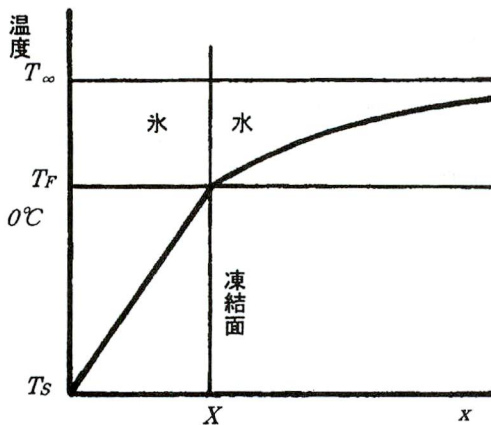


図1 座標系

2.2 Neumann による解析解

Neumann により次の解析解が得られている。水の温度分布

$$T_l = \frac{(T_F - T_s)}{\text{erf}(g)} \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_l \tau}}\right) + T_s \quad \dots(5)$$

水の温度分布

$$T_w = T_\infty - \frac{(T_\infty - T_F)}{\text{erfc}\left(g\sqrt{a_l/a_w}\right)} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_w \tau}}\right) \quad \dots(6)$$

凍結面の位置

$$X = 2g\sqrt{a_l \tau} \quad \dots(7)$$

ここで、誤差関数  $\text{erf}(z)$  は次式により定義されている。

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad \dots(8)$$

$$\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z) \quad \dots(9)$$

また、 $g$  は次式の根である。

$$\begin{aligned} \frac{\exp(-g^2)}{\text{erf}(g)} - \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \sqrt{\frac{a_l}{a_w}} \frac{(T_\infty - T_F)}{(T_F - T_s)} \frac{\exp(-a_l g^2/a_w)}{\text{erfc}(g\sqrt{a_l/a_w})} \\ = \frac{gL\sqrt{\pi}}{c_l(T_F - T_s)} \end{aligned} \quad \dots(10)$$

この N88basic によるプログラムと結果の例を図2に示す。なお、誤差関数の値と式(10)の根  $g$  の値は既に報告されている値<sup>6,9)</sup>と良い一致を示している。

2.3 松永らによる数値解析

時間の増分を  $\Delta\tau$  [h]とし、図3に示す要素  $i$  に対し不等間隔の  $x$  の増分  $\Delta x$  ( $\Delta x_M$  と  $\Delta x_p$ ) を与えると式(1)は次の差分式と表される。

$$\frac{T'_i - T_i}{\Delta\tau} = \frac{a}{\Delta x} \left( \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_p} - \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x_M} \right) \quad \dots(11)$$

ここで、 $T'$  は  $T$  に対し  $\Delta\tau$  時間後の求める温度である。この式を  $T'$  についてまとめると次式をえる。

$$T'_i = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x} \left( \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_p} - \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x_M} \right) + T_i \quad \dots(12)$$

要素  $i$  において凍結が進行するとき、時間  $\Delta\tau$  で凍結する容積を  $\Delta X$  [m<sup>3</sup>]とし、また、 $\Delta Q$  を次式と置くと、式(3)は式(14)と書き表すことができる。

$$\Delta Q = L\rho_w \Delta X \quad \dots(13)$$

$$\Delta Q = \Delta \tau \left[ \lambda_y \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x_M} - \lambda_w \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_P} \right] \dots (14)$$

ここで、容積  $\Delta x$  [m<sup>3</sup>]の要素  $i$  が凍結するのに要する潜熱量  $L_F$  [kcal]は次式により表される。

$$L_F = L \rho_w \Delta x \dots (15)$$

ここで、次の条件が成立する時、要素  $i$  の凍結を完了し、凍結面は  $i+1$  の要素に移動する。

$$\sum \Delta Q = L_F \dots (16)$$

なお、松永らは要素の寸法  $\Delta x$  を等しくし、また、凍結要素前後間の熱伝導率を  $\lambda$  の異なる積層板での値とし次式に計算し、数値解析による近似度を高めている。

$$\lambda_{i-1,i} = \frac{2\lambda_{i-1}\lambda_i}{\lambda_{i-1} + \lambda_i}$$

$$\lambda_{i,i+1} = \frac{2\lambda_i\lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}} \dots (17)$$

水深を  $x_{M+1}$  とし、断熱とするとこの点での温度  $T_{M+1}$  は次式により計算される。

$$T_{M+1} = T_M \dots (18)$$

この N88basic によるプログラムと結果の例を図4に示す。なお、この数値解析における解析結果の一例を図8に示すが、要素の寸法  $\Delta x$  を小さくしても温度分布の不連続性は解決されない。なお、さらに  $\Delta x$  を小さくし解析を行うと実用上、認容できる程度の不連続さとはなり得る。しかし、数値解析の安定性から次の条件に従う必要があり、 $\Delta x$  を小とすると時間刻み  $\Delta \tau$  も小さな値となり、とくに次元の高い場での解析では、実用的な解析方法であるとは言いがたい。

$$\Delta \tau \sim (\Delta x)^2 / a \dots (19)$$

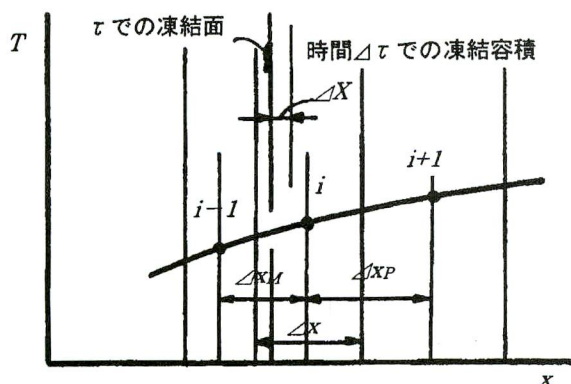


図3 不等間隔差分格子

2.4 凍結要素内で凍結面を移動させる本研究での数値解析

図5に示すある凍結中の要素  $i=I_{FRZ}$  での潜熱蓄熱量  $\sum \Delta Q$  (式(14)の積算値) と完全に凍結するのに必要な潜熱量  $L_F$  (式(15)) との比を次式に示す  $I_{PF}$  とし、要素内の  $I_{PF} \times \Delta x$  を凍結面とし、その温度を凍結温度  $T_F$  とし、また、前後の要素間の距離  $\Delta x_M$  と  $\Delta x_P$  を計算しこれを用い数値解析を行う。

$$I_{PF} = \frac{\sum \Delta Q}{L_F} \dots (20)$$

凍結要素  $I_{PF}$  に係る  $\Delta x$  の採り方を表1に、また、それらの値を図5に示す。

この N88basic によるプログラムと結果の例を図6に示す。

表1 Δxの取り方一覧

		i (x軸方向)					
		1	2	3	4	5	6 ..
IFRZ (凍結要素 時間軸)	1	◎	○				
	2	○'	◎				
	3	△	◎	◎			
	4	△		◎	◎	◎	
	5	△			◎	◎	◎
	6	△		□		◎	◎
	:						◎

◎: 凍結中(Δx変化)  
○, ○': Δx変化  
△: Δx定型変化  
□: Δx一定

3. 計算結果の例

冷却面温度  $T_s = -15^\circ\text{C}$ 、凍結温度  $T_F = 0^\circ\text{C}$  と、水側の初期水温  $T_w = 4^\circ\text{C}$  とし、冷却開始後 48 時間における温度分布の計算例を示す。なお、要素凍結法および要素内 IPF 法では水深  $x_{M+1}$  を 0.5m とする。

Neumann による結果の例を図7に、要素凍結法および要素内 IPF 法による結果の例を図8, 9に示す。

48時間後の凍結面は Neumann によると  $x = 0.181\text{m}$ 、要素内 IPF 法では  $0.178\text{m}$  に存在し、要素内 IPF 法の方が 1.66%浅いが、両者は比較的良好一致を示している。

4. おわりに

要素内 IPF 法の詳細を記載した、なお、同法において、ある点での温度の時間経緯を調べると凍結要素が進む時点での結果に円滑さの欠ける場合があり、図6に示したプログラムは完全なものではないことを付記しておく。

参考文献

- 1) 媚山政良, 「“夏の雪” 雪氷冷熱エネルギー資源」, 日本機械学会誌, Vol.108 No.1045(2005), pp38-39.
- 2) Kjell Skogsberg: The Sundsvall hospital snow storage, Cold Regions Science and Technology, 2001, pp.63-66.
- 3) 平取町, 「二風谷ガムの結氷等を利用する野菜予冷貯蔵施設整備事業調査」, 2007. 3, pp19-25.
- 4) 南・了戒・土谷, 自然冷熱を利用した低温貯蔵庫、農業



```

凍結問題の解析 [Neumann の解析 (誤差関数ERFの計算はSimpsonの数値積分による)] by Dr. M
1030 DEFINT I-N : DEFDBL A-H, O-Z
1040 DIM X(100), DEPIC(100), TIC(100, 100), TWT(100, 100) : DEPIC(I, TM), TIC(I, TM, J), TWT(I, TM, J)
1050
1060 DEF
FNG(G) = EXP(-G*G)/ERFG-DTW/DTI*RAMWI*SQRAIW)*EXP(-AIW*G*G)/(1.-ERFSQRAIWG)-SQRAIW)*QL*G/(CI*DTI)
1070 DEF FNFDISTIC(TM, X, G) = TS+DTI*ERFX2SQRAIWM/ERFG
1080 DEF FNFDISTWT(TM, X, G) = TW-DTW*(1.-ERFX2SQRAIWM)/(1.-ERFGSQRAIW)
1090 PAI=3.141592653589793
1100 ===== PROPERTIES =====
1110 QL=80. : [kcal/kg]
1120 AI=0.0042 : AW=0.000485 : AIW=AI/AW : [m2/h]
1130 RAMI=1.9 : RAMW=0.489 : RAMWI=RAMW/RAMI : [kcal/mhC]
1140 CI=0.487 : [kcal/kgC]
1150
1160 ===== Value of G =====
1170 TS=-15. : TF=0. : TW=4. : DTI=TF-TS : DTW=TW-TF : [C]
1180
1190 G=0.1 : DG=0.01 : ITA=0
1200 ZERF=G : GOSUB *SUBERFZ : ERFG=VERFZ
1210 ZERF=SQRAIW*G : GOSUB *SUBERFZ : ERFSQRAIWG=VERFZ : VALFNGD=FNG(G)
1220 ITA=ITA+1 : IF ITA>50 THEN END
1230 G=G+DG : ZERF=G : GOSUB *SUBERFZ : ERFG=VERFZ
1240 ZERF=SQRAIW*G : GOSUB *SUBERFZ : ERFSQRAIWG=VERFZ : VALFNG=FNG(G)
1250 IF ABS(VALFNG)<0.000001 THEN GOTO 1280
1260 IF VALFNG<0. THEN DG=-DG/2.
1270 VALFNGD=VALFNG : GOTO 1220
1280
1290 ===== Depth of Ice =====
1300 FOR I=0 TO 48 STEP 2 : TM=I
1310 DEPIC(I)=G*2.*SQRAIW*TM : PRINT USING " TM=###.##[h] DEPIC=###.###[m]":TM,DEPIC(I)
1320 NEXT I
1330
1340 ===== Temp. Distribution =====
1350 TM=48. : ITM=TM : [h]
1360 XCALMX=.5 : DX=0.025 : JCALMX=XCALMX/DX : [m]
1370
1380 ZERF=G : GOSUB *SUBERFZ : ERFG=VERFZ
1390 FOR J=0 TO JCALMX : X(J)=DX*J
1400 ZERF=X(J)/(2.*SQRAIW*TM) : GOSUB *SUBERFZ : ERFX2SQRAIWM=VERFZ
1410 TIC(ITM, J)=FNFDISTIC(TM, X(J), G)
1420 ZERF=X(J)/(2.*SQRAIW*TM) : GOSUB *SUBERFZ : ERFX2SQRAIWM=VERFZ
1430 ZERF=G*SQRAIW : GOSUB *SUBERFZ : ERFSQRAIW=VERFZ
1440 TWT(ITM, J)=FNFDISTWT(TM, X(J), G)
1450 PRINT USING " TM=###.##[h] X=###.###[m] TIC=###.##[C] TWT=###.##": TM, X(J), TIC(ITM, J), TWT(ITM, J)
1460 NEXT J
1470
1480 END
1490
1500
1510 *SUBERFZ : 'Subroutine of ERF [ given=ZERF to return=VERFZ ]
1520 Z=ZERF : SUM=EXP(0) : MT=20 : DT=Z/(2.*MT)
1530 FOR IT=1 TO 2*MT-1 : TIT=IT*DT
1540 IF (IT MOD 2)=1 THEN SUM=SUM+4.*EXP(-TIT^2) : TM=48.00[h] DEPIC=0.181[m]
1550 IF (IT MOD 2)=0 THEN SUM=SUM+2.*EXP(-TIT^2) : TM=48.00[h] X=0.000[m] TIC=-15.00[C]
1560 NEXT IT : SUM=SUM*EXP(-Z^2) : ERFX2=2./SQRAIW*SUM*DT/3. : X=0.025[m] TIC=-12.90[C]
1570 VERFZ=ERFX2 : X=0.050[m] TIC=-10.81[C]
1580 RETURN : X=0.075[m] TIC=-8.72[C]
1590 : X=0.100[m] TIC=-6.65[C]
1600 : X=0.125[m] TIC=-4.58[C]
1610 : X=0.150[m] TIC=-2.53[C]
1620 : X=0.175[m] TIC=-0.51[C]
1630 : X=0.200[m] TWT= 0.47
1640 : X=0.225[m] TWT= 1.04
1650 : X=0.250[m] TWT= 1.54
1660 : X=0.275[m] TWT= 1.98
1670 : X=0.300[m] TWT= 2.38
1680 : X=0.325[m] TWT= 2.68
1690 : X=0.350[m] TWT= 2.95
1700 : X=0.375[m] TWT= 3.18
1710 : X=0.400[m] TWT= 3.36
1720 : X=0.425[m] TWT= 3.51
1730 : X=0.450[m] TWT= 3.63
1740 : X=0.475[m] TWT= 3.72
1750 : X=0.500[m] TWT= 3.80

```

図2 Neumann の解析のプログラムと出力例

```

1000 =====
1010 凍結問題の数値解析 [松永による] by Dr. M
1020 =====
1030 DIM T(50), TD(50), DQ10(50), SUML(50), RO(50), C(50), RAM(50)
1040
1050 M=40 : DX=0.125 : LO=80. : TS=0. : TA=-15. : TW=4. : ROI=920. : ROW=1000.
1060 CI=487 : CW=1.01 : RAMI=1.9 : RAMW=489 : LS=1.*1.*DX*ROW*LO
1070
1080 T(I)=TA
1090 FOR I=2 TO M : T(I)=TW : NEXT I
1100 DS=5*(CI*ROI/RAMI)*(DX^2) : PRINT USING "DS[max of DTAU(hr)]=###.###":DS : ' stop
1110
1120 DTAU=0.01 : ET=48.
1130 GOTO 1190 :
1140 PRINT USING " M=### DTAU=### PTO=### ET=###":M,DTAU,PTO,ET
1150 PRINT USING "DX=### LO=### TS=### LS=###":DX,LO,TS,LS
1160 PRINT USING "TA=### TW=### ROI=### ROW=###":TA,TW,ROI,ROW
1170 PRINT USING "CI=### CW=### RAMI=### RAMW=###":CI,CW,RAMI,RAMW
1180
1190 ===== initial cond. =====
1200 SUML(1)=LS
1210 FOR I=2 TO M : SUML(I)=0. : NEXT I
1220 ITA=0 : TT=0. : PT=0.
1230 ===== time advance =====
1240 ITA=ITA+1 : TT=TT+DTAU
1250
1260 TD(I)=T(I) : RO(I)=ROI : C(I)=CI : RAM(I)=RAMI
1270 FOR I=2 TO M+1
1280 IF SUML(I)<LS THEN RO(I)=ROW ELSE RO(I)=ROI
1290 IF SUML(I)<LS THEN C(I)=CW ELSE C(I)=CI
1300 IF SUML(I)<LS THEN RAM(I)=RAMW ELSE RAM(I)=RAMI
1310 NEXT I
1320 FOR I=2 TO M
1330 L12=2.*RAM(I-1)*RAM(I)/(RAM(I-1)+RAM(I))
1340 L23=2.*RAM(I)*RAM(I+1)/(RAM(I)+RAM(I+1))
1350 DQ10(I)=(L12*DTAU/DX)*(T(I)-T(I-1))-L23*DTAU/DX*(T(I+1)-T(I))
1360 IF T(I)>TS THEN 1390 ELSE 1370 : KOVY
1370 SUML(I)=SUML(I)+DQ10(I)
1380 IF SUML(I)>LS THEN 1390 ELSE 1410
1390 TD(I)=T(I)-DQ10(I)/(RO(I)*C(I)*DX)
1400 GOTO 1420
1410 TD(I)=TS
1420 NEXT I
1430
1440 TD(M+1)=T(M)
1450 FOR I=1 TO M+1 : T(I)=TD(I) : NEXT I
1460 PRINT USING "ITA=### TM=###.##":ITA,TT
1470 FOR I=1 TO M/2 : PRINT USING " ###.##":T(I) : NEXT I : PRINT
1480
1490 IF TT>ET THEN GOTO 1510 ELSE 1240
1500
1510 PRINT USING "TM=###.##[h] (Δx=###[m] XM=###.###)":TT,DX,M
1520 FOR I=1 TO M/2 : PRINT USING " ###.##":T(I) : NEXT I : PRINT
1530 FOR I=M/2+1 TO M+1 : PRINT USING " ###.##":T(I) : NEXT I : PRINT
1540 END
1550
1560 PRINT USING "TIME(hr)=###.##":TT
1570 PRINT USING "T(*I)=###.## SUML(*I)=###":T(1),SUML(1)
1580 FOR I=2 TO M
1590 H=(I-1.-5)*DX : DY=TT/24. : KT=H/(((I-TA)*DY)^.5)
1600 IF SUML(I)<0 THEN SUML(I)=0.
1610 PRINT USING "T(##)=###.## SUML(##)=### K=###.##":I,T(I),I,SUML(I),KT
1620 NEXT I
1630 END

```

TM=48.00[h] (Δx=0.0125[m] XM=0.5000)

-15.00	-13.84	-12.87	-11.81	-10.78	-9.70	-8.68	-7.61	-6.58	-5.55	-4.52	-3.60	-2.48	0.00	0.32	0.83	0.83	1.20	1.45	1.88
1.89	2.08	2.27	2.44	2.60	2.74	2.87	2.89	3.08	3.18	3.27	3.35	3.41	3.47	3.52	3.58	3.58	3.61	3.63	3.63

図4 要素凍結法のプログラムと出力例

```

1000 ***** 凍結問題の数値解析(IPF法)
1010 by Dr. M
1020 DEFINIT I-N
1030 DEFDBL A-H, Q-Z
1050 DIM X(50), CT(50), CTD(50), XFRZ(10000), VX(10000), VY(10000), TMP(10000, 50)
1060 DEF FNGDDXG(I, A)=A*DTAU/(DX+DX/2)*CT(I+1)-2*CT(I)-CT(I-1)+CT(I)
1070 DEF FNGDDXV(I, A, DX, DXP, DX/2)=A*DTAU/(DX+DX/2)*CT(I+1)-2*CT(I)-CT(I-1)+CT(I)
1080 DEF FNGDDXG(I, A, DX, DXP, DX/2)=A*DTAU/(DX+DX/2)*CT(I+1)-2*CT(I)-CT(I-1)+CT(I)
1090 M=10 : DX=0.5 : ET=48.
1100 QLO=480 : CTS=0 : CTA=15 : CTV=4 : ROI=920 : ROW=1000.
1120 CI=487 : CW=1.01 : RAMI=1.9 : RAMV=489
1140 PRINT
1150 QLS=1.*1.*DX+ROW*QLO : AN=RAMV/(CW*ROW) : AI=RAMI/(CI*ROI)
1160 DSW=OX/2./2./2.*W) : DSI=(DX/2./2./2.*A1) : DS=DSW : IF (DSI<DSW) THEN DS=DSI
1180 DTAU0=0.05 : PRINT USING "DSmax=###.### (hr) > DTAU=###.### : DS, DTAU0 : STOP
1190 X0(O)=0. : FOR I=1 TO M : X0(I)=DX*(I-1)+DX/2. : NEXT I
1200 X0(M)=X0(M)+DX/2.
1220 GOTO 1280.
1230 PRINT USING "M=### DTAU=### PTO=### ET=###.### M, DTAU, PTO, ET
1240 PRINT USING "DX=### QLO=### # TS=### #
1250 PRINT USING "CTA=### # ROW=### # CTA, CTV, ROI, ROW
1260 PRINT USING "CI=### CW=### # RAMI=### # RAMV=### #
1270 PRINT USING "AN=### # AI=### #
1280 ***** initial cond. ***** 0th Cond. *****
1300 CT(O)=CTA : SUMOL=0
1310 FOR I=1 TO M+1 : CT(I)=CTW : NEXT I
1320 I=0 : TT=0. : XFRZ(0)=0.
1330 ***** time advance ***** Solve *****
1350 CTD(O)=CT(O) : FOR I=0 TO M : TMP(O, I)=CTW : NEXT I
1370 ***** freezing cell *****
1380 DTAU=DTAU
1390 DTAU=DTAU
1400 I=1 : TT=DTAU : HOUR(ITA)=TT
1410 XST=6370*(-0.0006*CTW+0.0543)*SOR(-CTA+DTAU/24.) : SUMOL=1.*1.*XST*ROW*QLO : PEI=SUMOL/QLS
1430 XFRZ(I)=PEI+OX : TMP(I, I)=CTW*(I-2)+PEI) : FOR I=2 TO M : TMP(ITA, I)=CTW : NEXT I
1440 PRINT USING "ITA=### Time=### #hr Ifz=### Xfz=### #
Xast=### : ITA, DTAU, PEI, XFRZ(I), XST : STOP
: TMP calculated by linear approximation in freezing cell
1460 ***** IFRZ=1 *****
1470 TT=TT+DTAU
1480 ITA=ITA+1 : TMP(ITA, 0)=CTA : HOUR(ITA)=TT : IF TT>ET THEN GOTO 2510
1500 IFRZ=1 : CTD(IFRZ)=CTS
1520 DX=DX+PEI : DXP=(1.-PF1)*DX+DX/2. : D0I0=FND010(IFRZ, DX, DXP)
1530 SUMOL=SUMOL+D0I0 : PEI=SUMOL/QLS
1540 XFRZ(ITA)=PEI+OX
1550 DXM=DX+PEI : DXP=(1.-PF1)*DX+DX/2.
1560 IF PF1<=0.5 THEN TMP(ITA, 1)=CTW*(I.-2)+PEI) ELSE TMP(ITA, 1)=CTA+OX/2./DXM*(CTS-CTD)
1570 I=2
1580 DXM=(1.-PF1)*DX+DX/2. : DXP=DX : DXI=(DXM+DXP)/2.
1590 CTD(2)=FNGDDXV(I, A, DX, DXP, DXI) : TMP(ITA, 2)=CTD(1)
1600 FOR I=3 TO M : CTD(I)=FNGDDXG(I, A, W) : TMP(ITA, I)=CTD(I) : NEXT I
1610 CTD(M+1)=CTD(M) : TMP(ITA, M+1)=CTD(M)
1620 PRINT USING "ITA=### Time=### #hr dTAU=### # Ifz=### #
Xfz=### : ITA, TT, DTAU, PEI, XFRZ(ITA)
FOR I=0 TO M+1 : PRINT USING "###.### : TMP(ITA, I) : NEXT I : PRINT
FOR I=0 TO M+1 : CT(I)=CTD(I) : NEXT I
VX(ITA)=ITA : VY(ITA)=CTD(I)
1660 IF (PF1<1.) THEN GOTO 1480 ELSE 1680
1680 BEEP : PRINT : STOP
1690 ***** IFRZ=2 *****
1700 TIME(48.00hr Ita= 960) Xfz=0.178m K=0.0325
0.000 0.025 0.075 0.125 0.175 0.225 0.275 0.325 0.375 0.425 0.475 0.500
-15.00 -12.87 -8.62 -4.41 0.00 1.08 1.99 2.67 3.13 3.42 3.55 3.55

```

図6 要素IPF法のプログラムと出力例