低温地下タンク基礎実験

土　橋　吉　輝*　　吉　田　　弘**
平　野　舜　一***

要　　約

本実験はＬＮＧ等の低温地下タンク建設に伴なう凍結問題に関する基礎的な傾向を把握する目的で行なわれた。測定はタンク周辺の地盤内温度分布、地表面鉛直変位、凍結土圧について行なった。地盤内温度分布については有限要素法（ＦＥＭ）による数値計算との比較検討を行ない期待どおりの結果を得ることができた。

目　　次

§１．まえがき

石油ショック以来，エネルギーの大半を石油に依存した状態から，エネルギーの供給安定を目的とし，原子力および天然ガスなどのエネルギーへの多様化が進められている。原子力発電所建設の遅れなどにより，これらの多様化したエネルギーの中で天然ガスの需要は年々増加しており，昭和55年度の液化天然ガス（ＬＮＧ）輸入量は2060万トン，１次エネルギーに占める割合は5.2%，昭和60年度は4200万トン，同7.9%を目標としておりＬＮＧにかける期待はかなり大きいものがある。

現在，ＬＮＧの貯蔵方法は地上金属２重殻タンクが世界の主流を占め，我国でも広く採用されている。しかし建設コストもさることながら，安全性に対する考えが重視され地上式タンクに替り，地下式タンクが東京ガス袖ヶ浦工場を初めとして，最近増加しつつある。この事実は，地下式タンクは万一破損しても液が地上に流出することが少なく，安全性に優れている，防液堤の建設が不要である，土地の占有率も少い，外観からの威圧があまり感じられない，そして大型化，大容量化に適しているという利点が理由であろう。

今回の実験はこの様な現状を考慮して低温タンクを地下に設けた場合に生ずる周辺地盤の影響（温度分布，地盤変位など）に対する基礎的な傾向を把握するために行なったものである。

*技術研究部土木技術課
**技術研究部土木技術課課長
***技術研究部土木技術課係長

§２．実験装置および実験方法

２－１　実験装置

(1)模型タンク
　Ｄ＝75cm，ｈ＝60cm，ｔ＝９mmの鋼製タンク
(2)実験容器
　360cm×360cm×160cmのビニール容器
(3)冷源装置
　日立製作所製　105M４Ｒ－ＣＷ
　調整精度　：±0.5℃
　冷凍機容量：45KW
　ブライン　：塩化カルシウム
　冷媒　　　：Ｒ－22
(4)温度記録計
　江藤電気製　小型多点温度データ集録システム
　　　　　　　サーモダックＥ60Ｔ
　測定範囲　：－150℃～200℃
　補正精度　：約±0.3℃
(5)熱電対
　ＣＣ（銅－コンスタンタン）
　ϕ＝0.32mm　テフロン被覆

(6)ひずみ測定装置

東京測器研究所製　自動デジタルひずみ測定装置
テムエルII

測定範囲　　：$\pm 39999 \times 10^{-6}$
$\pm 399990 \times 10^{-6}$（大ひずみ測定）

総合精度　　：±（表示値の0.1％＋1digit）

スイッチボックス　ASW−324／322

自動スタート用タイマー　T−24P

(7)土圧計

共和電業製　BE−2KBS52

容量　　　：2 kg/cm²

許容温度範囲：−30℃〜＋70℃

受圧面直径　：　ϕ ＝92mm

(8)変位計

東京測器研究所製　ダイヤルゲージ型変位計
DDP-30

測定範囲　：0〜30mm

許容温度範囲：0〜40℃

2−2　実験方法

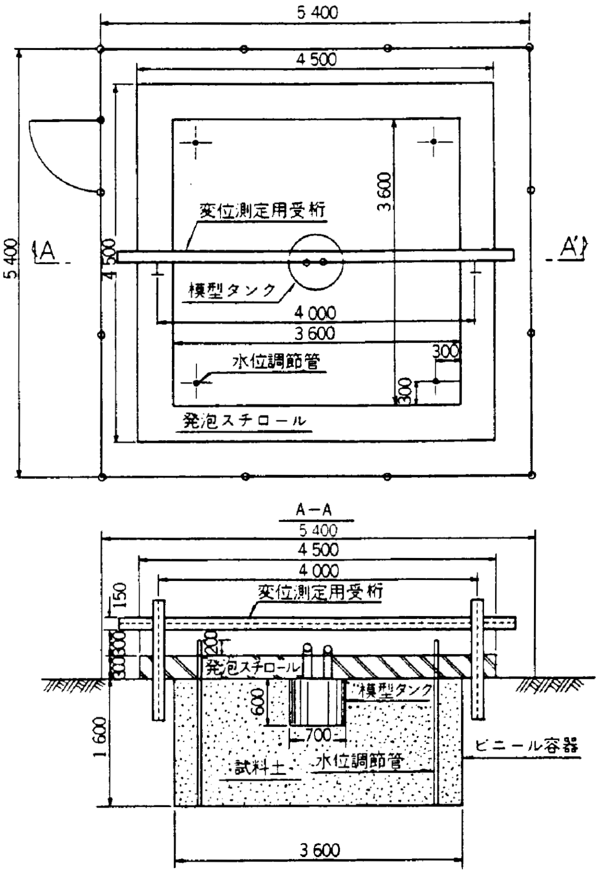
実験は粘土地盤を**図−1**に示すように掘削し，ビニール容器を入れて，その中で行なった。先ず，試料土が十分水で飽和するように容器の四隅に水位調節管を立て，その後，試料土を徐々に容器内に投入し，地盤の密度が均一になる様に十分に締固めを行ない，散水により飽和させ，熱電対・土圧計を所定の位置に埋込みながら模型タンクを設置した。又，地表面鉛直変位測定用の受桁を模型タンク上方60cmの位置に組立てた後，地表面を厚さ10cmの発泡スチロールで千鳥に3枚重ねて断熱した。これは地表面から空気中に逃げる熱を少くして，地盤の凍・結速度を速めるためと，外気温の影響を少くして，後で行なう解析を容易にする目的で行なった。この後水位調節管により，試料土が飽和状態を保持するように水位を調節し，試料土の土質試験を行ない，物理的性質を確認した後，冷源装置よりブラインをタンクに供給し，地盤凍結を開始した。観測は凍結開始後約1ヶ月間継続した。尚，今回の実験における測定は主として次の項目について行なった。

(1)冷媒・模型タンク・地盤の温度分布および経時的変化。

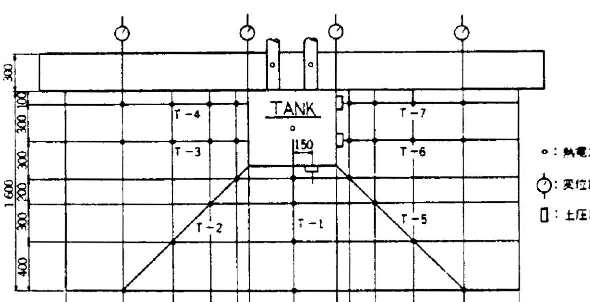
(2)模型タンクに作用する凍結土圧

(3)模型タンク・地表面の鉛直変位

上記の各項目の測定器具の配置は**図−2**に示す通りである。



図−1　実験装置



図−2　熱電対，土圧計及び変位計配置図

§3．実験に使用した試料土の性質

3−1　土質試験結果

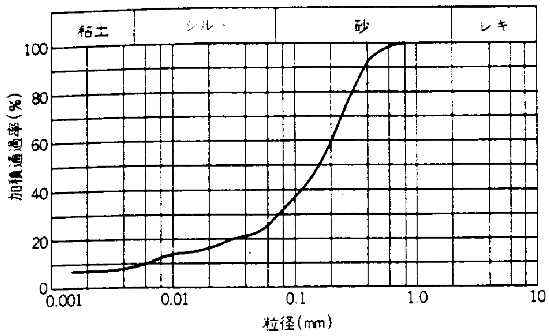
実験に使用した試料土は，茨城県竜ヶ崎産のシルト混り砂（砂分70％，シルト分20％，粘土分10％）である。その土質試験結果を**図−3**，**表−1**に示す。尚，物理的性質は数回の試験結果による平均値を採用した。

3−2　土の熱的性質飽和度

試料土の熱的性質は次の(1)〜(4)で示すような計算方法を用いて行った。その結果は**表−2**に示す。

(1)熱伝導率

水で飽和された土の熱伝導率について，西垣・田中[4]は



図－3 粒径加積曲線

表－1 試料土の物理的性質

含水比	w(%)	25.0
乾燥密度	γ(kg/m³)	138.5
土粒子密度	γs(kg/m³)	270.0
間ゲキ比	e	0.949
飽和度	Sr(%)	71.1
容積含水率	P	0.346
空ゲキ率	P′	0.141

次式を提案している。

$$K = K_w P + K_s(1 - P)$$

ここに，Kw，Ksはそれぞれ水と土粒子母岩の熱伝導率であり，Pは容積含水率である。

しかしながら，実験においては完全な飽和土を得ることは困難であり,たいていの場合不飽和土となる。そこで不飽和土の熱伝導率を考えてみると，熱の伝導の主要因子はSmithとByersによって粗密の度合と空ゲキ率であることが知られているので，空ゲキ率をP′，乾燥空気の熱伝導率をKaとすれば次式で方えられる。

$$K_1 = K_w P + K_a P' + K_s(1 - P - P')$$

凍結後の熱伝導率は氷の容積の膨張による土粒子の移動がないものとし，空気が全部気泡となって析出するものと仮定すると気泡の混入した氷の熱伝導率 Ki がわかれば，次式で与えられる。

$$K_2 = K_i(P + P') + K_s(1 - P - P')$$

ここで実験に用いた，土粒子母岩，乾燥空気，水の熱伝導率は

$K_s = 2.500\,kcal/mh℃$
$K_a = 0.0215\,kcal/mh℃$
$K_i = 1.939\,kcal/mh℃$

(2)土の密度

凍結前の土の密度ρ_1は土粒子の密度ρ_sがわかれば，熱伝導率を算定した時と同様に，容積含水率と空ゲキ率とにより次式により計算できる。

$$\rho_1 = (1 - P - P')\rho_s + P\rho_w + P'\rho_a$$

ここに，ρ_w，ρ_a はそれぞれ水および空気の密度である。

凍結後の土の密度ρ_2は上式のρ_w，ρ_a の代わりに，気泡が析出した氷の密度ρ_iを入れて計算すればよい。

$$\rho_2 = (1 - P - P')\rho_s + (P + P')\rho_i$$

ここで実験に用いた各物質の密度は

$\rho_s = 2700\,kg/m^3$
$\rho_w = 1000\,kg/m^3$
$\rho_i = 882\,kg/m^3$
$\rho_a = 1.2\,kg/m^3$

である。

(3)比熱

凍結前の土の比熱C_1は混合物質の熱容量に関する物理的法則により，土粒子の比熱をCs，水の比熱をCwとすれば次式で与えられる。

$$C_1\rho_1 = C_s\rho_s(1 - P - P') + C_w\rho_w P$$

ここに，空気の熱容量の項は他項に比べて値が小さいので無視する。

凍結後の土の比熱C_2は上式の水及び無視した空気の熱容量の項を氷の熱容量に代えれば次式で与えられる。

$$C_2\rho_2 = C_s\rho_s(1 - P - P') + C_i\rho_i(P + P')$$

ここで，実験に用いた各物質の比熱は

$C_s = 0.180\,kcal/kg℃$
$C_w = 1.000\,kcal/kg℃$
$C_i = 0.500\,kcal/kg℃$

である。

(4)凍結潜熱

凍結潜熱は土に含まれる水分の凍結潜熱と考えて，高志等[*2]の提案する次式によって計算できる。

$$L = \frac{P \times L_i \times 1000}{\rho_1}$$

ここに，L_i は水が凍結する時の潜熱である。

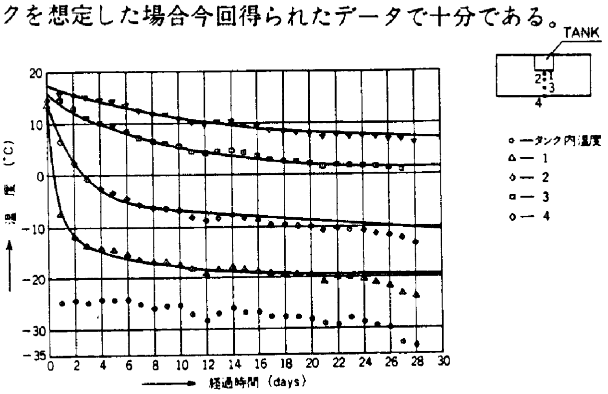
表－2　試料土の熱的性質

熱伝導率 Kcal/mh℃	凍結前　K_1	1.632
	凍結後　K_2	2.227
土の密度 kg/m³	凍結前　ρ_1	1731
	凍結後　ρ_2	1815
比　熱 Kcal/kg℃	凍結前　C_1	0.344
	凍結後　C_2	0.256
凍結潜熱　Kcal/kg　L		15.9

§4．実験結果及び考察

4－1　地中の温度分布

温度測定結果より，タンク内ブライン温度とタンク直下の地中温度に関して，横軸に時間，縦軸に温度をとりプロットしたのが**図－4**である。これから読み取れるように，タンク内温度は凍結開始後10日目位迄はほぼT＝－25±1℃で一定である。10日目以後は，冷源装置を他工事との併用で行なった理由によりかなりの温度低下がみられる。実物タンクとの相似率の関係を考えてみると必要なデータは10日間位で十分であることがわかる。今Fourier Number(kt/a^2)により，Time Scaleを考えると，地盤条件が同一の仮定のもとに，直径50mの地下タンクの場合，今回実験で使用したモデルでの4日目が約56年に相当する。上記の理由により，LNG貯蔵タンクを想定した場合今回得られたデータで十分である。



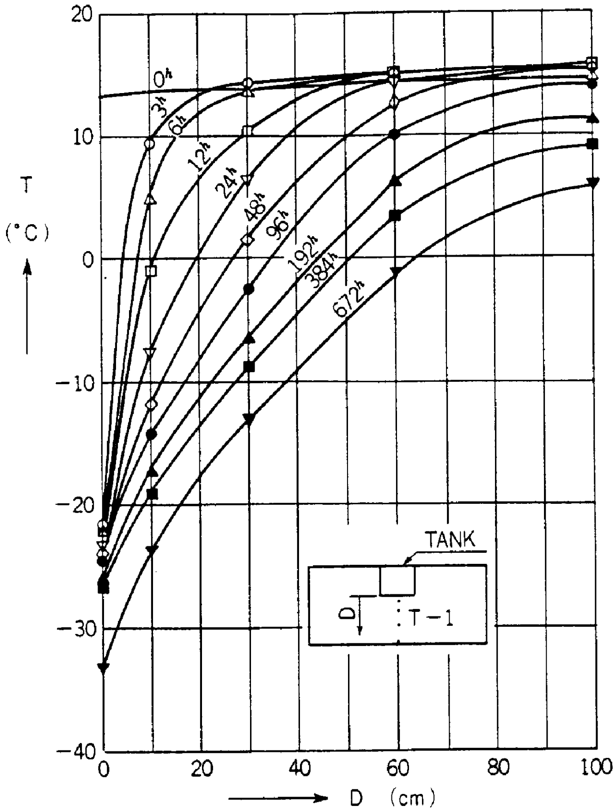
図－4　タンク内温度と地中温度の経時変化

又，**図－4**より，タンク内の温度変化を考慮すれば，10日目位から地中温度はほぼ定常状態に近いことがわかる。

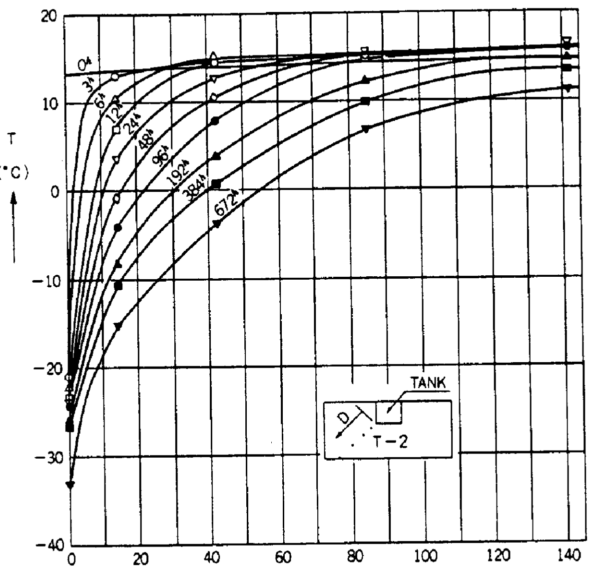
図－5～11はタンク周辺地盤の時間と距離による温度分布を示したものである。0℃を凍結フロントとすると，例えばタンク直下においては24時間後にタンク外面から20cmの間が凍結したことがわかる。又，凍結開始後，未凍結領域においては逆に温度上昇がみられ興味深い現象である。

図－12は凍結境界線（0℃）の経時変化を示したものである。尚，凍結境界線が左右非対称になっているのは，右側には土圧計を埋設しており，その断熱効果が働き，時間遅れが生じたことによる。

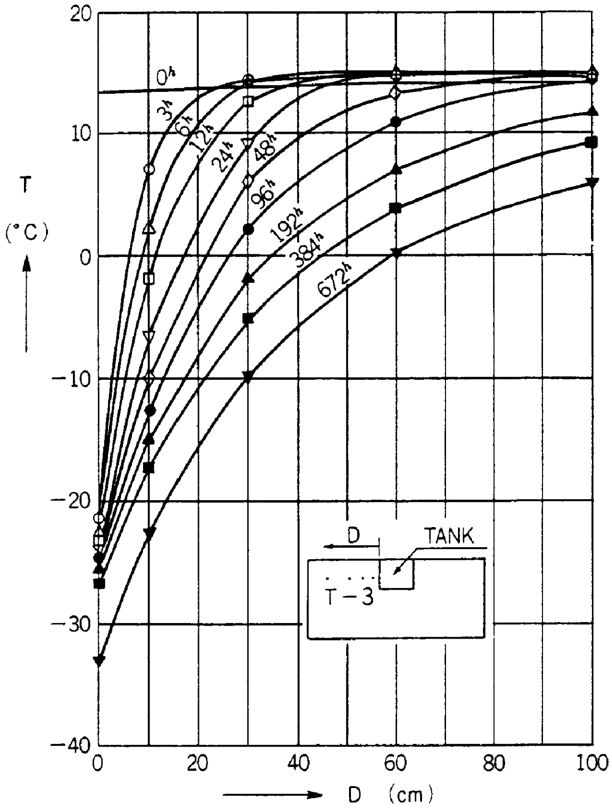
図－13～20は各時間における地中温度分布を示したものである。凍結初期において，15℃等温線が定性的な傾向と異っているのは地盤密度の不均一さなどの影響によると考えられる。



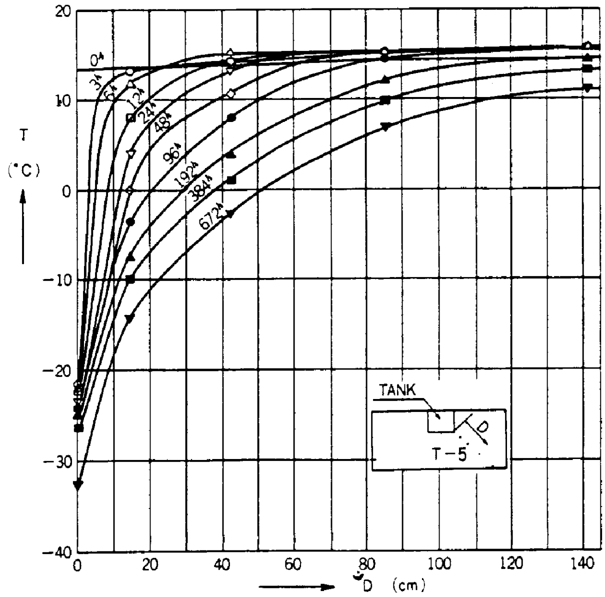
図－5　温度分布曲線T－1



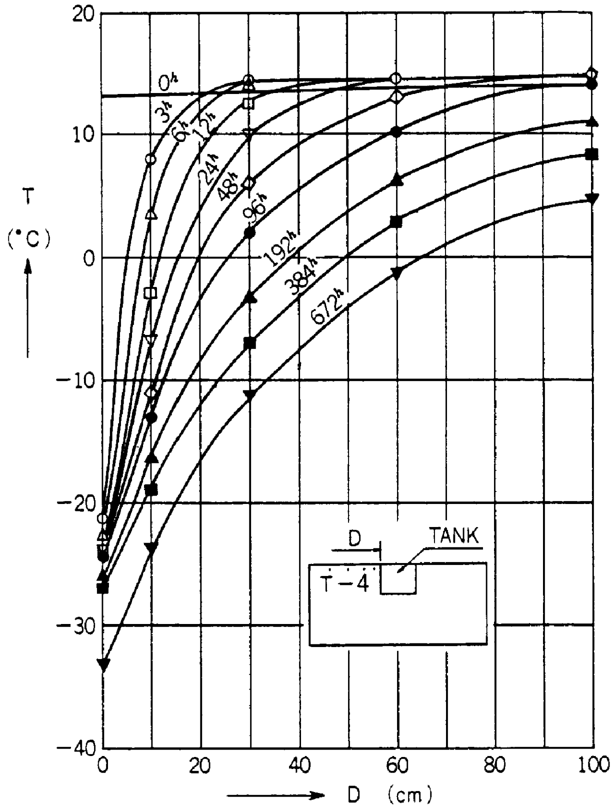
図－6　温度分布曲線T－2



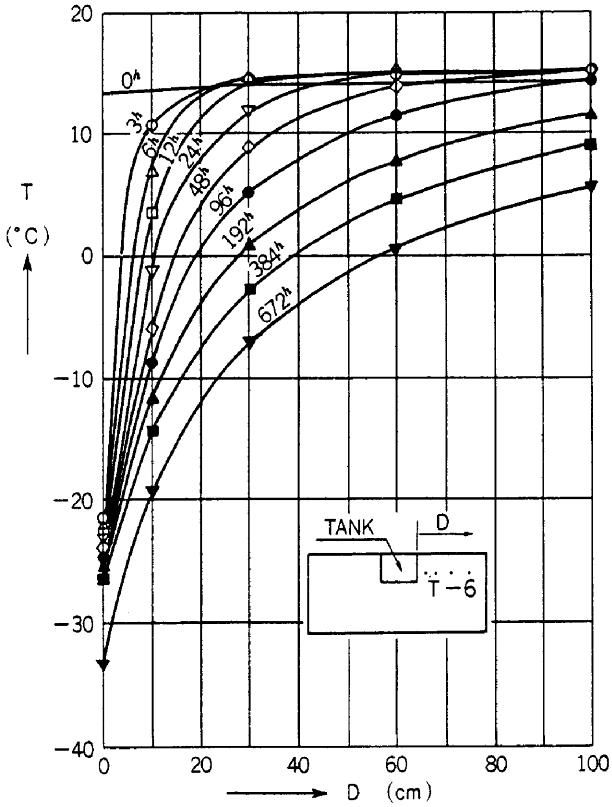
図－7　温度分布曲線T－3



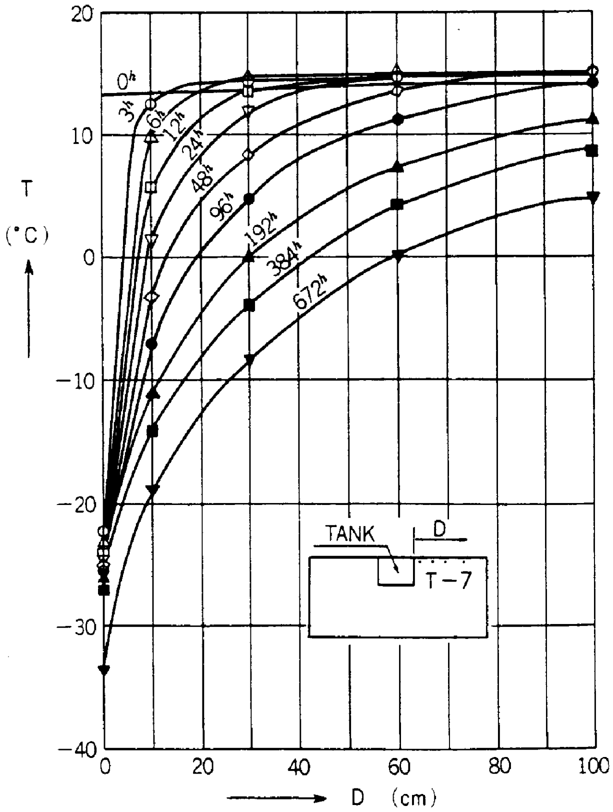
図－9　温度分布曲線T－5



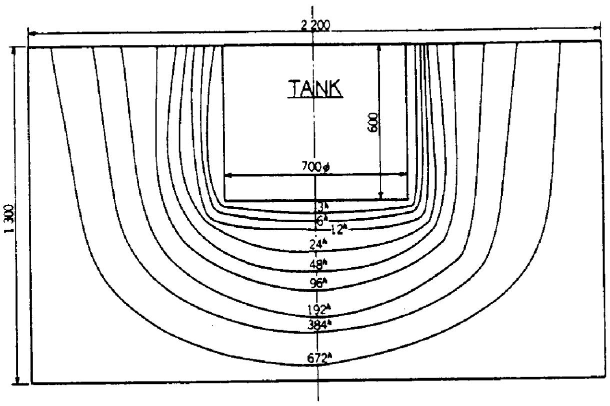
図－8　温度分布曲線T－4



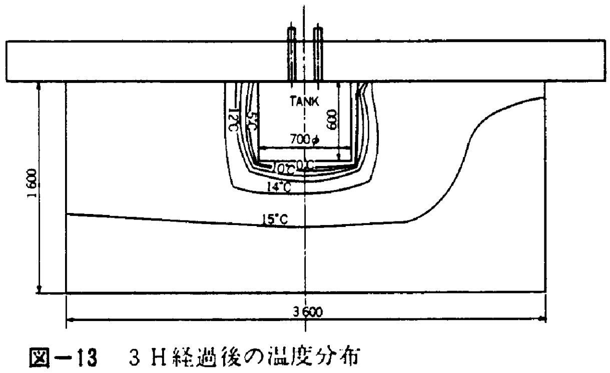
図－10　温度分布曲線T－6



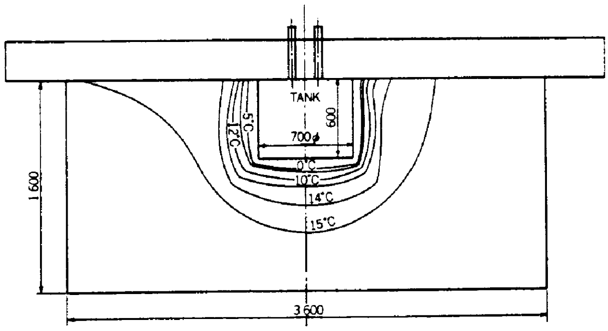
図−11　温度分布曲線T − 7



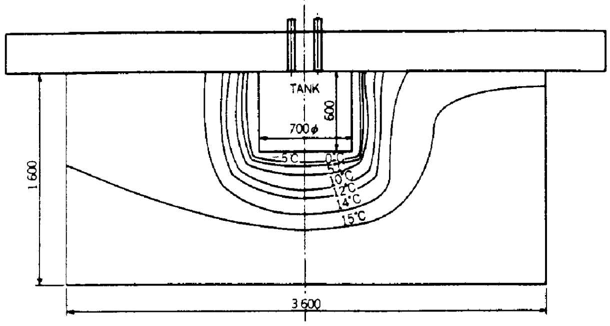
図−12　凍結境界線の経時変化



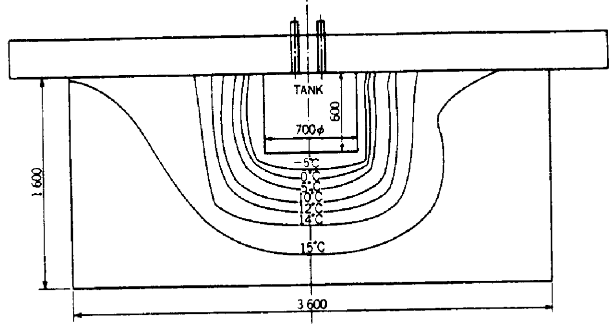
図−13　3 H経過後の温度分布



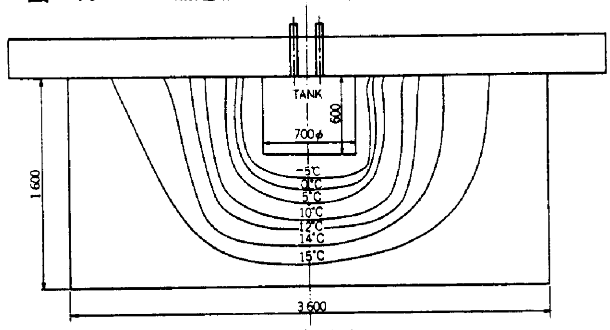
図−14　6 H経過後の温度分布



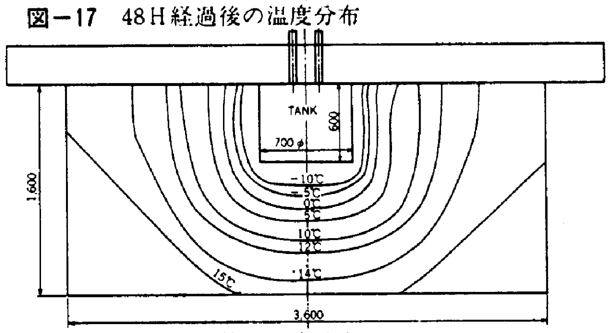
図−15　12H経過後の温度分布



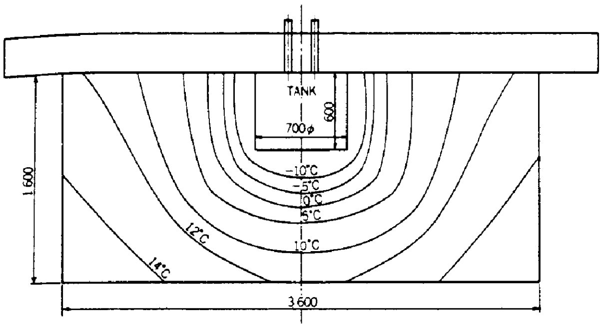
図−16　24H経過後の温度分布



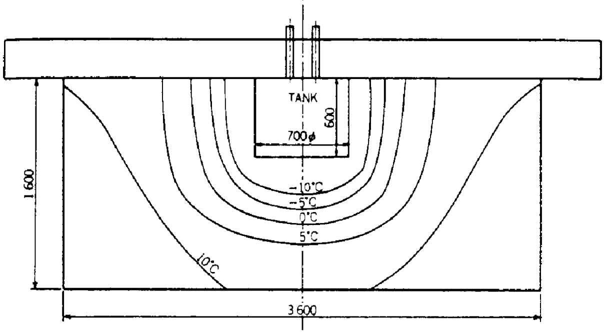
図−17　48H経過後の温度分布



図−18　96H経過後の温度分布



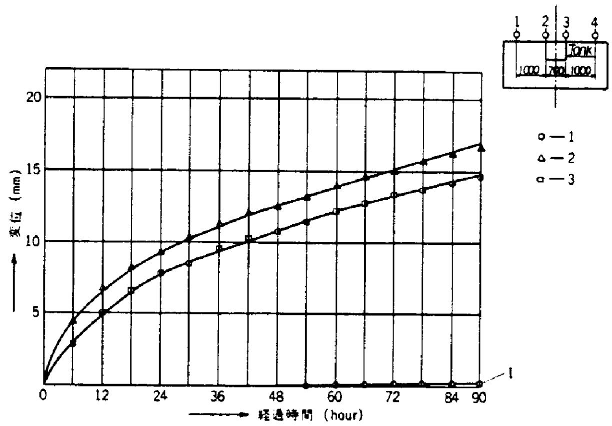
図−19　192H経過後の温度分布



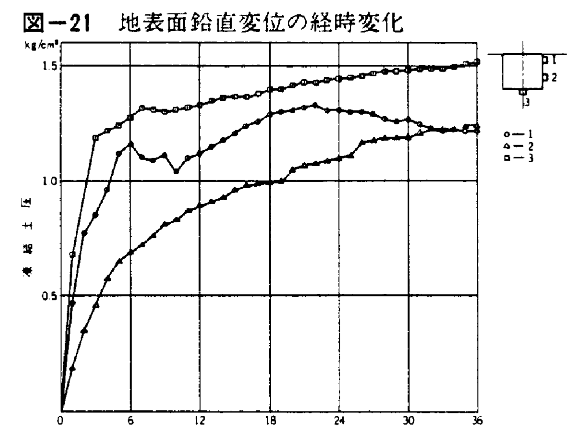
図−20　384H経過後の温度分布

4−2　地表面鉛直変位および凍結土圧

図−21は地表面鉛直変位の経時変化を示したものである。地表面鉛直変位は地盤の凍結領域と密接な関係があり，図−12に示した凍結境界線の変化に伴って，地表面が変化することがわかる。

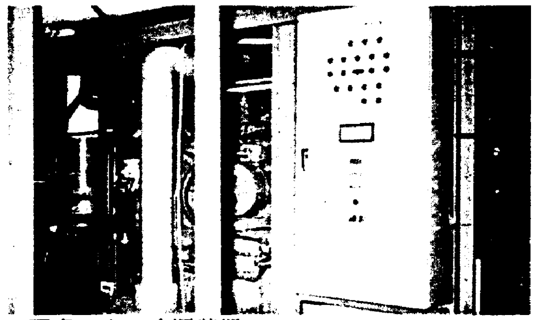


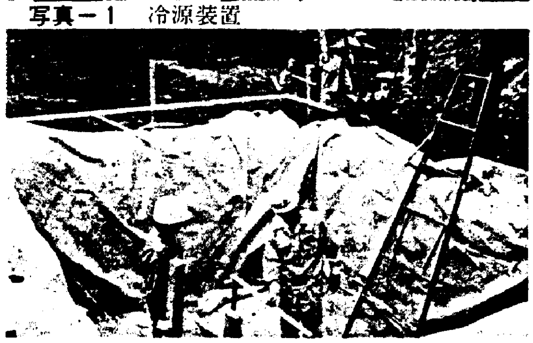
図−21　地表面鉛直変位の経時変化



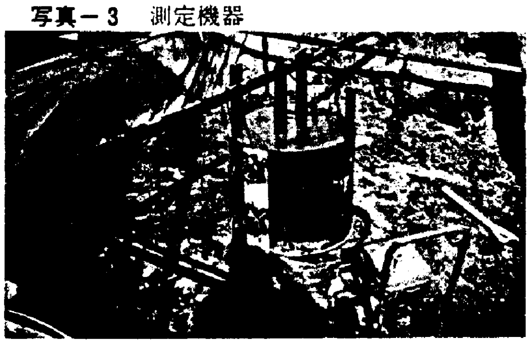
図−22　凍結土圧の経時変化

図−22は凍結土圧の経時変化を示したものである。図−22は土圧計の温度差による零ドリフトの影響を考慮したものであるが，土圧計の周囲が凍結領域に入った場合土圧計の出力低下と，土圧計内外の温度差による影響などの理由により，凍結土圧曲線の定性的な傾向は参考になるが，定量的な値は参考になり難いと考えられる。

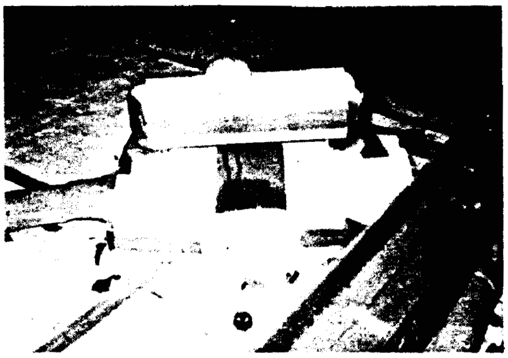

写真−1　冷源装置


写真−2　ビニール容器


写真−3　測定機器


写真−4　模型タンク，土圧計および熱電対

写真−5　変位計



写真−6　凍結中

§5. 熱伝導理論

5−1　熱伝導問題に対する有限要素法の適用

熱伝導問題の解析は従来，単純積分法，フーリエ解析グリーン関数法，変分法などの古典解析および差分法などの数値解析あるいは図式解法などにより行なわれてきた。しかし近年電子計算機の発達により，有限要素法 (Finite Element Method) は Zienkiewicz 等により，構造解析を初めとして，種々の問題に適用されそして改良されて発展してきた。当然ながら有限要素法は熱伝導問題，浸透流問題などのいわゆる場の問題にも適用可能であり，既に各方面で使用されている。又有限要素法はその特徴から明らかなように異方性，不均一性の取扱いは容易であり，任意の断面に対してモデル化が可能であり，精度も実用上十分である。以下に最も単純な要素である三角形要素を用いてＦＥＭによる熱伝導解析理論を紹介する。

5−2　2次元非定常熱伝導問題の公式化

非定常熱伝導方程式は2次元問題において，一般に次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+Q-c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=0 \cdots\cdots(1)$$

ここに，T：温度(℃)，$K_{x,y}$：熱伝導率(kcal/mh℃)，Q：発熱率(kcal/m³h)，C：比熱(kcal/kg℃) ρ：密度 (kg/m³) を示す。

(1)を解くためには個々の問題や考えている領域の物理的条件等の境界条件が必要で次の2つの条件が与えられる。

(a)　$T=T_B$

(b)　$\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}l_x+K_y\frac{\partial T}{\partial y}l_y\right)+q+\alpha(T-T_c)=0 \qquad (2)$

ここに，T_B：境界既知温度(℃)，q：境界発生熱量(kcal/m²h)，α：境界層熱伝達率(kcal/m²h℃)，T_c：境界接触面既知温度(℃)，l_x，l_y：境界面法線方向余弦である。尚，$q=0$，$\alpha=0$ の場合には境界面は断熱境界となり，境界条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial n}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

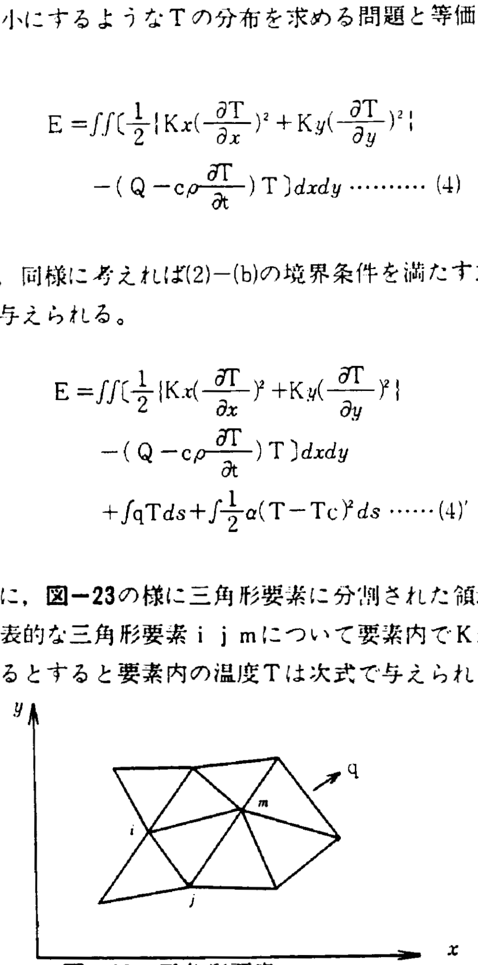
今，(1)式において $c\rho\partial T/\partial t$ の項は，ある時間に限れば場所の関数とみなすことができ，変分原理の適用が可能となる。変分原理によれば(1)の解は次の汎関数Ｅの値を最小にするようなＴの分布を求める問題と等価である。

$$E=\iint\left[\frac{1}{2}\left\{K_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+K_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2\right\}-\left(Q-c\rho\frac{\partial T}{\partial t}\right)T\right]dxdy \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

又，同様に考えれば(2)−(b)の境界条件を満たす式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}E=&\iint\left[\frac{1}{2}\left\{K_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+K_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2\right\}-\left(Q-c\rho\frac{\partial T}{\partial t}\right)T\right]dxdy\\&+\int qT\,ds+\int\frac{1}{2}\alpha(T-T_c)^2ds \cdots\cdots(4)'\end{aligned}$$

次に，**図−23**の様に三角形要素に分割された領域の中の代表的な三角形要素 i j m について要素内でＫが一定であるとすると要素内の温度Ｔは次式で与えられる。



図−23　三角形要素

$$T=\alpha_1+\alpha_2 x+\alpha_3 y \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

三角形要素のｉｊｍ点における各温度をTi，Tj，Tmとし，上式に代入してα_1，α_2，α_3を求めると(5)式は次式の様に表わされる。

$$T=[N_i\ \ N_j\ \ N_m]\begin{Bmatrix}T_i\\T_j\\T_m\end{Bmatrix}=[N]\{T\}^e\cdots\cdots(6)$$

ここで

$$\left.\begin{aligned}N_i&=(a_i+b_i x+c_i y)/2\triangle\\N_j&=(a_j+b_j x+c_j y)/2\triangle\\N_m&=(a_m+b_m x+c_m y)/2\triangle\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

$$\left.\begin{aligned}a_i&=x_j y_m-x_m y_j\\b_i&=y_j-y_m\\c_i&=x_m-x_j\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

尚，a_i，b_i，c_i，……c_mについてはi，j，mの添字を循環的に置き換えて得られる。又

$$\triangle=\text{三角形の面積}=\frac{1}{2}\begin{vmatrix}1&x_i&y_i\\1&x_j&y_j\\1&x_m&y_m\end{vmatrix}\cdots\cdots\cdots(9)$$

である。

Eの最小の条件を求めるためには各要素で$\partial E^e/\partial T_i$，$\partial E^e/\partial T_j$，$\partial E^e/\partial T_m$を求め，全要素についてこれらの微係数の和が各節点でそれぞれ0になる条件を作成する必要がある。要素Eの各節点の微係数は(4)，(6)より次式で与えられる。

$$\left\{\frac{\partial E}{\partial T}\right\}^e=\begin{Bmatrix}\dfrac{\partial E^e}{\partial T_i}\\\dfrac{\partial E^e}{\partial T_j}\\\dfrac{\partial E^e}{\partial T_m}\end{Bmatrix}=[h]^e\{T\}^e+[P]^e\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}^e+\{F\}^e\cdots\cdots(10)$$

$$[h]^e=\frac{Kx}{4\triangle}\begin{pmatrix}b_ib_i&b_jb_i&b_mb_i\\b_ib_i&b_jb_j&b_mb_j\\b_ib_i&b_jb_m&b_mb_m\end{pmatrix}+\frac{Ky}{4\triangle}\begin{pmatrix}c_ic_i&c_jc_i&c_mc_i\\c_ic_j&c_jc_j&c_mc_j\\c_ic_m&c_jc_m&c_mc_m\end{pmatrix}\cdot(11)$$

$$[P]^e=\frac{c\rho}{12}\triangle\begin{pmatrix}2&1&1\\1&2&1\\1&1&2\end{pmatrix}\cdots\cdots\cdots(12)$$

$$\{F\}^e=-\frac{Q}{3}\triangle\begin{Bmatrix}1\\1\\1\end{Bmatrix}\cdots\cdots\cdots(13)$$

である。

全領域においてEを最小にするように，各節点における温度を求めるための条件式は次の様に各要素に対する微係数を重ね合せてその和を0にすることにより求められる。

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial T_1}&=\frac{\partial E^{e1}}{\partial T_1}+\frac{\partial E^{e2}}{\partial T_1}+\cdots\cdots\cdots+\frac{\partial E^{eN}}{\partial T_1}=0\\&\ \ \vdots\\\frac{\partial E}{\partial T_i}&=\frac{\partial E^{e1}}{\partial T_i}+\frac{\partial E^{e2}}{\partial T_i}+\cdots\cdots\cdots+\frac{\partial E^{eN}}{\partial T_i}=0\\&\ \ \vdots\\\frac{\partial E}{\partial T_n}&=\frac{\partial E^{e1}}{\partial T_n}+\frac{\partial E^{e2}}{\partial T_n}+\cdots\cdots\cdots+\frac{\partial E^{eN}}{\partial T_n}=0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(14)$$

(14)のｉ番目の式に(10)を代入すると

$$\frac{\partial E}{\partial T_i}=\sum\sum h_{im}T_m+\sum\sum P_{im}\frac{\partial T_m}{\partial t}+\sum F_i=0\cdots\cdots\cdots(15)$$

となる。従って解析領域全体に対して行列表示で

$$[H]\{T\}+[P]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}+\{F\}=0\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

と与えられる。

各節点の温度は(16)に示す多元連立方程式を解けば得られるが，時間項を含んでいるのでこの処理方法が必要である。本解析ではWilson ＆ Cloughの提案する方法を用い次に示す方法で処理する。

$\{\partial T/\partial t\}$の値が時間内に直線的に変化すると仮定すると，時間tにおける{T}の値{T}tは

$$\{T\}_t=\{T\}_{t-\Delta t}+\left(\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t}+\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_t\right)\frac{\Delta t}{2}\cdots(17)$$

である。上式を(16)に代入して整理すると次の様な漸化式が与えられる。

$$\left([H]+\frac{2}{\Delta t}[P]\right)\{T\}_t=[P]\left(\frac{2}{\Delta t}\{T\}_{t-\Delta t}+\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t}\right)-\{F\}_t\cdots\cdots(18)$$

又，(16)より次に示す関係が与えられる。

$$[P]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}_{t-\Delta t}=-[H]\{T\}_{t-\Delta t}-\{F\}_{t-\Delta t}\cdots\cdots\cdots(19)$$

上式は(18)に代入すれば

$$[S_1]\{T\}_t=[S_2]\{T\}_{t-\Delta t}-(\{F\}_t+\{F\}_{t-\Delta t})\cdots\cdots\cdots(20)$$

となる。ここに

$$
\left.\begin{array}{l}
[S_1]=[H]+\dfrac{2}{\Delta t}[P] \\
[S_2]=\dfrac{2}{\Delta t}[P]-[H]
\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots (21)
$$

である。従って各節点の時間 t における $\{T\}_t$は既知温度$\{T\}_{t=0}$ を出発値として(20)に示す多元連立方程式を各時間毎に解けば与えられる。

又，本文では説明は省略するが，プログラム内ではパラメーターの指定により Galerkin 法を用いた時間の有限要素化による方法も選択できる。

尚，凍結潜熱の取扱いは内田等の示す方法を用いる。計算手順を簡単に示すと，各節点において温度が負になった時からの各時間毎に畜えられる熱量の和が凍結潜熱を超えた時，凍結したと判定するもので，その時の温度は次式で与えられる。

$$
T'=\frac{\Sigma Q+L_0}{c\rho}\quad\cdots\cdots\cdots (22)
$$

ここに，$\Sigma Q=\Sigma c\rho T$

　　　T：各時間毎に計算される温度（$T<0$）

　　　L_0：凍結潜熱

である。

5－3　軸対称非定常熱伝導問題

軸対称問題の非定常熱伝導方程式は一般に次のように与えられる。

$$
\frac{\partial}{\partial r}\left(rKr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(rKz\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q-rc\rho\frac{\partial T}{\partial t}=0\cdots(23)
$$

これより座標は 2 次元問題で x，y であったのが r，z に代り，熱定数K，$c\rho$ がそれぞれrk，$rc\rho$ に代っただけであるから，rK，$rc\rho$ を見かけの熱定数と見なせば先に示した 2 次元プログラムが利用できる。

§ 6．数値計算結果との比較

§ 3 で計算した熱定数を用いて計算した結果が**図－24**である。尚，図中実線は計算値を示し，破線は実測値を示す。

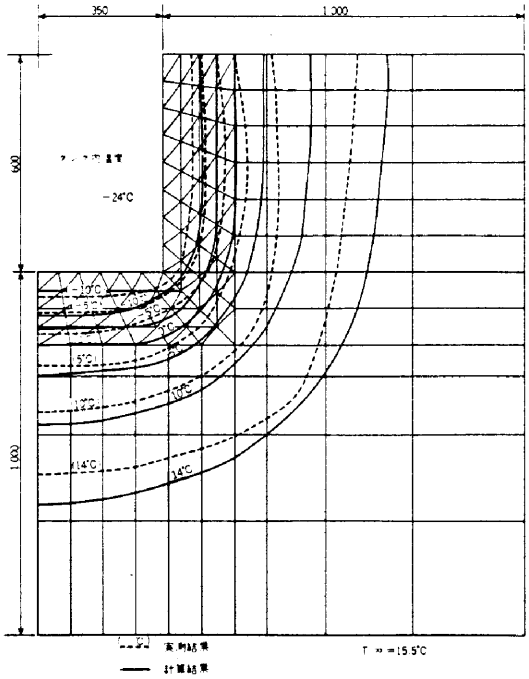
図－24より，地盤凍結速度は実測値に比べて，計算値の方が多少上回っているが，次に列記することなどが原因と考えられる。

(1)境界上における境界層熱伝達率および境界発生熱量の実測値がなく考慮できなかったこと。

(2)地盤を均一と考え，平均容積含水率による熱定数の採用。

(3)温度勾配が急なタンク周辺の要素分割が多少大きく凍結潜熱の影響が少なかったこと。

しかし，熱定数や境界条件が既知の場合，凍結範囲の予測には多節点要素の採用や 3 次元プログラムによらなくても，本計算法で実用上十分であると考えられる。



図－24　24時間後の温度分布

§ 7．あとがき

今回の実験において，低温地下タンク設置に伴う凍結進行過程の予測は，FEMによる本解析プログラムを利用できることが確認できた。又，本プログラムは地盤凍結工法の設計やその他熱伝導問題に広く利用できる。

今回の実験は特に地中の温度分布の測定を主体にしたことにより，地表面鉛直変位と凍結土圧の測定には定性的な傾向しか把握できなく解析にいたらなかったのは残念である。尚，次回の実験には地表面鉛直変位と凍結土圧の測定および解析を主体にして実験を行う予定である。

最後に本実験に御協力頂いた江戸川台作業所川原主任，技術研究所斎藤係長他各位に心から感謝致します。

参考文献

(1)西垣好彦，田中邦熙「凍結工法実験について」
鹿島建設技術研究所年報第13号
(2)高志勤，和田正八郎「土壌凍結工法 I」
冷凍ＶＯＬ 36－408
(3)吉識雅夫監訳「マトリックス有限要素法」
培風館
(4)斎藤二郎，藤原紀夫「有限要素法による浸透流，熱流などの解析」
第 8 回土質工学発表会　Ｅ－７－139
(5)内田博，高瀬啓元，平野隆久「曲面体要素による潜熱を含めた非定常熱伝導解析法」
土と基礎　ＶＯＬ25－7