

低温地下タンク基礎実験（第2報）

稲葉 力* 齊藤 顕次**
平野 舜一***

要 約

前回の屋外実験に続き、凍結土圧とタンク間の熱干渉の解析を主目的として室内実験を行った。タンク1基の場合、温度分布に関しては前報告と同様FEMによる軸対称非定常熱伝導解析による計算値とよく一致している。タンク2基の場合には、鉛直・水平2断面の2次元解析に際して、土質条件から求めた熱伝達係数を用いて満足すべき成果が得られた。凍結土圧については定性的傾向がつかめた。

目 次

- § 1. 概 要
- § 2. 実験装置および実験方法
- § 3. 実験に使用した試料土の性質
- § 4. 実験結果と解析
- § 5. ま と め

§ 1. 概 要

前回の技報で屋外凍結実験の結果を報告した。FEMを用いた軸対称非定常熱伝導計算の結果と屋外実験の実測値を比較して、良好な結果を得た。実際に複数の地下タンクを建設する場合、タンク間で熱の相互干渉が問題となるので、今回は小規模な実験ながら、凍結土圧と温度の測定を主目的としてタンク2基の実験を行った。

タンク1基の場合、タンク内の温度を -40°C または -10°C に保ち計4回の実験を行い、タンク2基の場合、タンク内の温度を -40°C に保ち1回だけ行った。今回は、タンク内の温度が -40°C でタンク1基と2基の場合の2ケースを主に解析し報告する。

タンク1基の場合、計算は前回同様、軸対称非定常熱伝導解析プログラムで進めた。タンク2基の場合、軸対称では困難なので、後述するように鉛直方向・水平方向の2断面でとらえ、各々2次元で熱伝導計算を行なった。以上の方法で温度分布（等温線）と凍結線（凍結距離）を求めた。

* 土木設計部設計課
** 技術研究所係長
*** 技術研究部土木技術課係長

凍結土圧と凍上量に関しては、実験値の報告をする。

§ 2. 実験装置および実験方法

2-1 実験装置

(1) 模型タンク

直径 $D=24\text{cm}$ 、深さ $H=24\text{cm}$ 、 $t=2\text{mm}$ のステンレス製タンク

(2) 実験容器

150cm×100cm×80cmの鋼製容器

(3) 冷源装置

気体冷却装置：液化炭酸ガスの気化熱を利用した装置

液体冷却装置：大洋科学工業(株)製
循環式恒温装置、クールニットCM
L-1

使用温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$

メタノール使用

(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E-60T

測定範囲： $-200 \sim +50^{\circ}\text{C}$

補正精度：約 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

(5) 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
ルエムII

自動デジタルひずみ測定器 TDS256DC

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）（0～50℃）

デジタルプリンタ DP12-02

スイッチボックス ASW-324 B

自動スタート用タイマー T-24 P

(6)熱電対

CC（銅-コンスタンタン）

φ=0.32mm, テフロン被覆

(7)土圧計

① 共和電業製：低温用土圧計，BE-3KJS

容量：3 kgf/cm²

許容温度範囲：-160～+30℃

形状：外径φ=155mm, 厚=25mm

② 共和電業製：小型土圧計，BE-2KC, 2KD

容量：2 kgf/cm²

許容温度範囲：-30℃～+70℃

形状寸法：外径φ=30mm, 厚=6.5mm

(8)変位計

① 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 小野測器製作所製：6チャンネルデジタルダイヤルゲージ

ダイヤルゲージ

ダイヤルゲージセンサー GP-500型

測定範囲：0～50mm

許容温度範囲：0～40℃

デジタルプリンター RQ-335

(9)荷重計

共和電業製：圧縮型荷重変換器LC-10TE

容量：10 tf

許容温度範囲：-10～+70℃

(10)積算流量計

金門製作所製：CN06-20E11, 20m/m

Y型ストレーナー付

口径：20mm

使用最大流量：1 m³/h

2-2 実験方法

概要にも記したが、実験はタンク1基、2基の両ケースでそれぞれ温度を-40℃、-10℃に変化させて行った。実験名と組み合わせは、表-1の通りである。

実験A-2～A-4は、実験A-1、B-1に比べて凍結速度を遅くした場合の挙動を探る目的で行った。A-4は、A-1～A-3、B-1のモデル地盤で飽和度

表-1 実験条件の組み合わせ

実験名	タンク数	凍結温度	タンク冷却方法	実験時間	地盤の飽和度
1 A-1	1基	-40℃	気体冷却、液化炭酸ガス	28h	S _r =100%
2 B-1	2基	-40℃	"	40h	100%
3 A-2	1基	-10℃	液体冷却、メタノール	8h	100%
4 A-3	1基	-10℃	"	100h	100%
5 A-4	1基	-10℃	"	66h	83%

が100%なのに対して、83%と不飽和の状態で行ったものである。

実験の状態を写真-1、2、3に示す。写真-1は実験土槽の全景でタンク1基の場合、写真-2は実験A-1の実験終了時の凍結土の様子である。写真-3は測定計器類である。

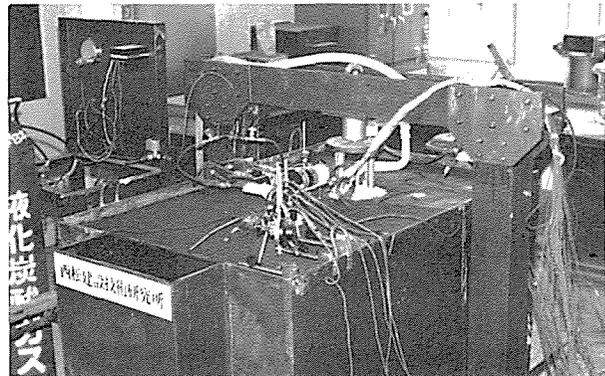


写真-1 実験の全景 (実験A-1)



写真-2 実験終了時(28h経過)における凍結土の状況(実験A-1)

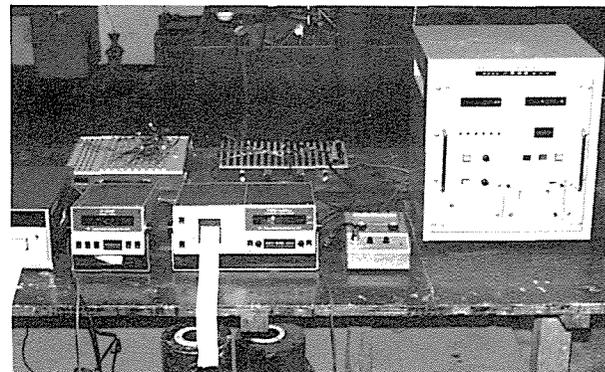


写真-3 測定計器類

実験開始と同時に、メタノールまたは液化炭酸ガスをモデルタンクの上から送り込み冷却する。

モデル地盤の作成は § 3 に示す試料土をよく締め固めながら実験容器に入れ、散水して飽和させ、熱電対・土圧計を所定の位置に埋め込んだ。地盤を常に飽和状態にしておくために水位調節装置で水位を調節した。

測定計器の配置例として、タンク 2 基で行なった実験 B-1 の例を図-1, 2, 3 に示す。

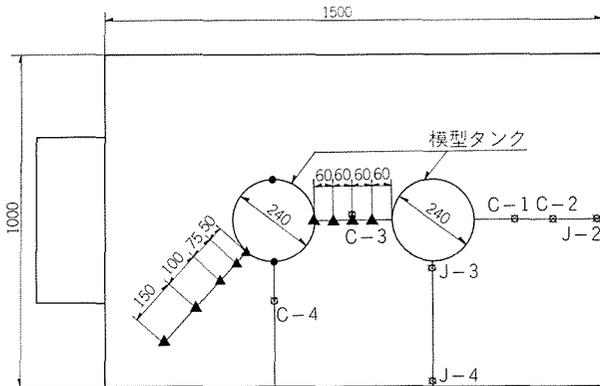


図-1 測定計器配置図(平面図)

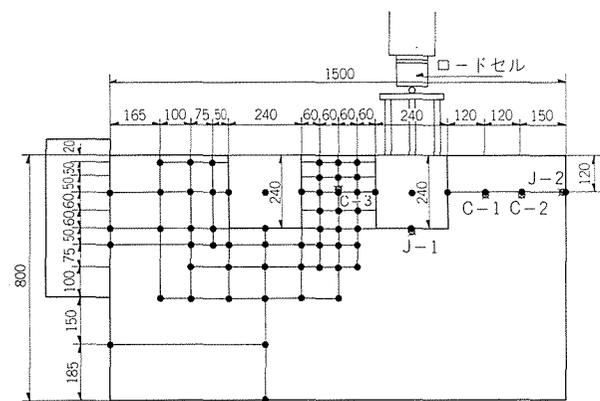
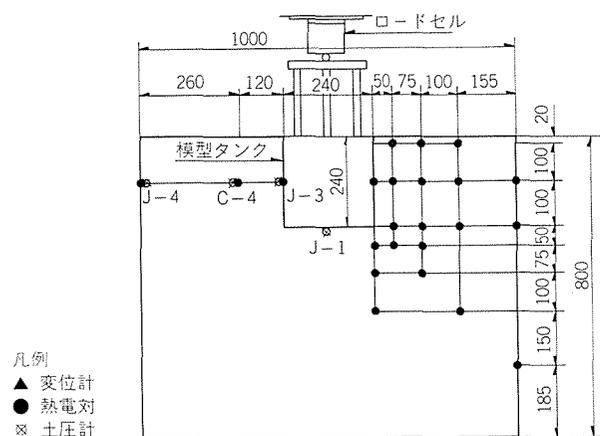


図-2 測定計器配置図(正面図)



凡例
 ▲ 変位計
 ● 熱電対
 ⊗ 土圧計

図-3 測定計器配置図(側面図)

§ 3. 実験に使用した試料土の性質

3-1 土質試験結果

実験に用いた試料土は、木更津産の山砂で、砂分79~

91%, シルト分6~16%, 粘土分3~6%となっている。三角座標分類法では砂ないし砂質ロームである。A-1 (砂分79%, シルト分15%, 粘土分6%), B-1 (砂分91%, シルト分6%, 粘土分3%)の粒径加積曲線を図-4に、A-1の物理的性質を表-2に掲げる。(本報告で使用する土質定数は、A-1の値を使用する)。

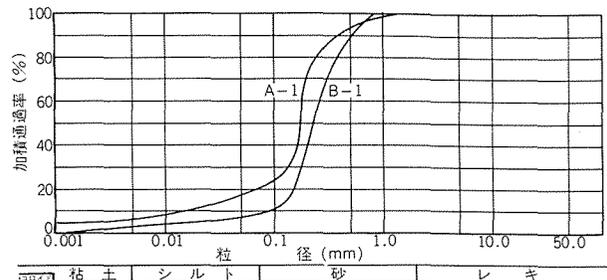


図-4 粒径加積曲線(実験A-1及びB-1)

表-2 土質定数(実験A-1)

含水比 $w(\%)$	29.3
乾燥密度 $\gamma(\text{kg}/\text{m}^3)$	1500.0
土粒子密度 $\gamma_s(\text{kg}/\text{m}^3)$	2672.0
間ゲキ比 e	0.783
飽和度 $S_r(\%)$	100%
容積含水率 P	0.438
空ゲキ率 P'	0.0

3-2 土の熱的性質

前回の技報 (§ 3. 実験に使用した試料土の性質) に記してある計算式を用いて、表-2の土質定数より求める(詳細は、前回の報告参照)。結果のみを表-3に示す。

表-3 熱定数(実験A-1)

熱伝導率 Kcal/mh°C	凍結前 k_1	1.843
	凍結前 k_2	2.254
土の密度 kg/m³	凍結前 ρ_1	1940
	凍結前 ρ_2	1888
比熱 Kcal/kg°C	凍結前 c_1	0.365
	凍結前 c_2	0.245
凍結潜熱	Kcal/kg L	18.1

§ 4. 実験結果及び考察

4-1 地中の温度分布と凍結線

表-1に掲げた5回の実験の内、実験A-1、実験B-1のモデルタンク側面における経時温度変化は、それぞれ図-5、図-6のようであった。また、Fourier Number $\left\{ \frac{kt}{a^2} \right\}$ (k : 温度伝播率, t : 時間(h), d : 半径(m))によりTime Scaleを考えると、地盤条件が同一として、実タンクの半径が25m, 30m, 35mの場合には、直径24cmのモデルタンクと対比して時間の関係は表-4のようになる。

表-4 モデルタンクと実タンクのTime Scale

$a_m = 0.12m$	$a_p = 25m$	$a_p = 30m$	$a_p = 35m$
0.5h	2.5 yrs.	3.6yrs.	4.9yrs.
1.0h	5.0	7.1	9.8
2.0h	10.0	14.3	19.7
4.0h	20.1	28.5	39.3
8.0h	40.1	57.8	78.7
16.0h	80.3	114.0	157.4
28.0h	140.5	202.0	275.4

表-4 から半径30mの地下タンクを想定すると、モデルタンクの4.0hが28.5年、半径25mで考えるとモデルタンクの8.0hが40.1年に想定することが分かる。したがって、実験の解析においても4.0~8.0h付近で実測値と計算値が一致することが望ましい。

一方、図-5の温度変化図を見ると、モデルタンク内部に-40°Cのガスを送り込んでから2時間経過して、ようやくタンク側壁では-35°Cに達し、以後一定となっている。図-6に示す実験B-1の温度変化図でも、やはり同様の傾向を示している。モデルタンクには断熱材を使用していないが、この2時間のタイムラグ（半径30mのタンクを想定すれば、14.3年に相当する）を解析に際し考慮する必要があると考えられる。

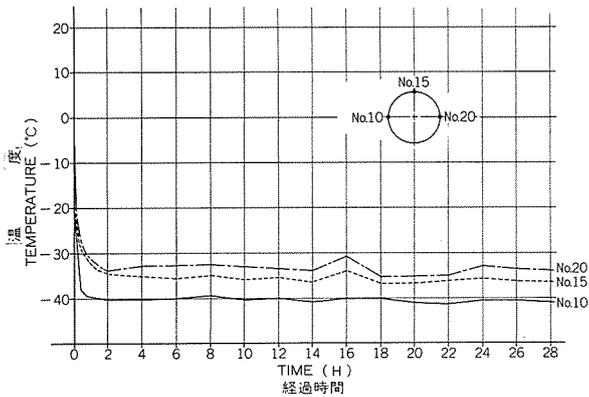


図-5 実験A-1, モデルタンク側面温度変化

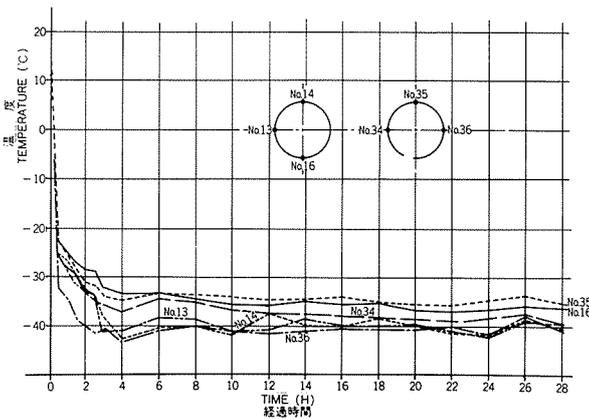


図-6 実験B-1, モデルタンク側面温度変化

以下に述べる実験A-1のFEMで用いた計算モデルを図-7に示す。185節点、240要素のモデルとした。

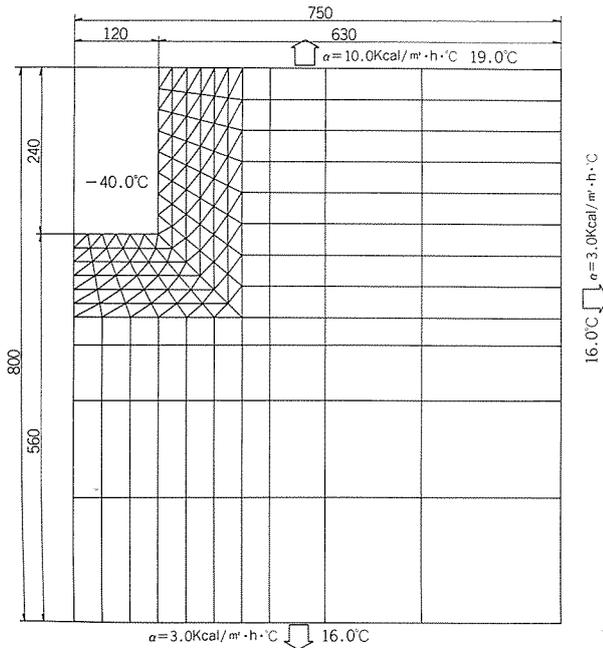


図-7 計算モデル(実験A-1)

図-8は実験A-1の凍結距離~時間の関係を表わしている。図中(○)は図の右下説明図において測点番号95~70, (●)は測点番号15~19, (△)は測点番号10~14の実測値を表わし、破線はそれぞれ(○), (△)に対応する計算値である。図-8をみると、実験初期0~8hにおいては計算値の方が実測値より凍結の進行が早く(すなわち、凍結速度が大きい)、実験後期においては逆の傾向——計算値では定常状態に漸近するにも拘らず、実験では依然として凍結が進んでいる——が見られる。実験A-1, B-1を同じ図にまとめると図-9のようになる。測点番号、記号の説明は図-8と同様である。モデルタンクに対して外向きの測線と比較しているので隣接タンクの影響はほとんどないと考えられるが実際には図-8の値より、わずかに上方に推移している。32h経過した後、凍結速度が急上昇しているが、これはタンク相互の干渉によるものではないと考えられる。図-8, 9両図より、計算値と実測値はよい対応を示していると思われる。

参考までにモデルタンク内の温度を-10°Cに保持して行った実験A-2, 3, 4の実験値と計算値の比較を図-10に掲げる。この図では温度が余り低くないせいか、測線による実験値の拡がりは少なく、鉛直下向きの測線について求めた計算曲線の周囲に分散している。

図-11, 12は、実験A-1の実験開始後それぞれ8時間、20時間経過時の等温線を計算値と比較したものである。両図を検討すると0°Cで差異が大きい他は、実験値

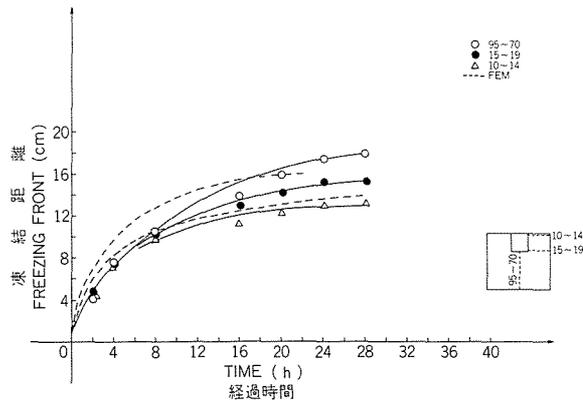


図-8 凍結距離～経過時間の関係(実験 A-1)

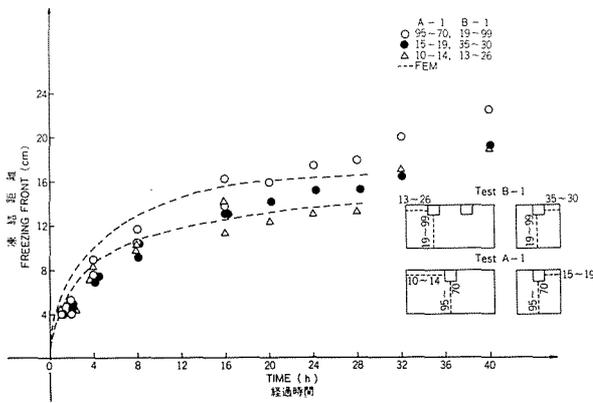


図-9 凍結距離～経過時間の関係(実験 A-1, B-1)

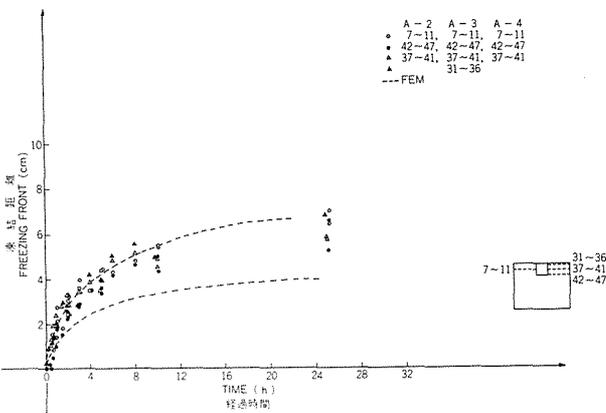


図-10 凍結距離～経過時間の関係(実験 A-2, A-3, A-4)

と計算値は比較的良く一致している。特に図-11の8時間経過後の等温線は非常によく合っている。実験の初期で計算値の温度低下が実験値より早く、時間の経過に伴い逆の関係になる傾向がうかがわれる。0℃付近で計算値と実験値の差が特に大きいのは、凍結潜熱を考慮した熱伝導計算でもアイスレンズなど凍結初期のメカニズムが完全に表現しきれていないためと考えられる。

図-13, 14, 15は、温度～距離(モデルタンク側壁から測る)の関係を時間をパラメータとして表わしたものである。図-13はモデルタンク鉛直下向きの測線の実測

値と計算値を対比したものであり、同様、図-14はモデルタンク底面位置で水平方向の対比、図-15はモデルタンク上部で水平方向の対比をしたものである。初期の地中温度が実験容器中で少しバラついて完全には一致していないが、定性的には満足出来る結果と考えられる。図-15の計算値は室内温度の影響を受けて、充分時間が経過するとモデルタンク遠方で地中温度が上るものと考えられる。実験値も室温の影響で温度の下がり方が遅いが、計算値程ではない。境界付近で一致しないのは境界条件の選び方が不適当だったためと考えられる。

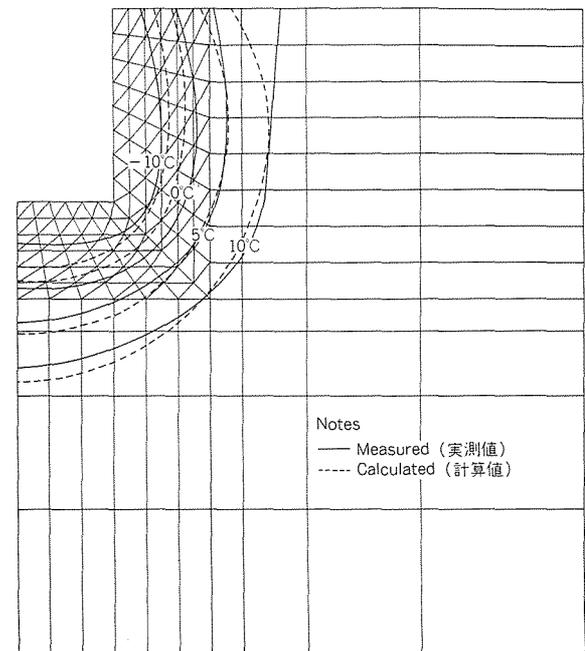


図-11 8時間経過後の等温線(実験 A-1)

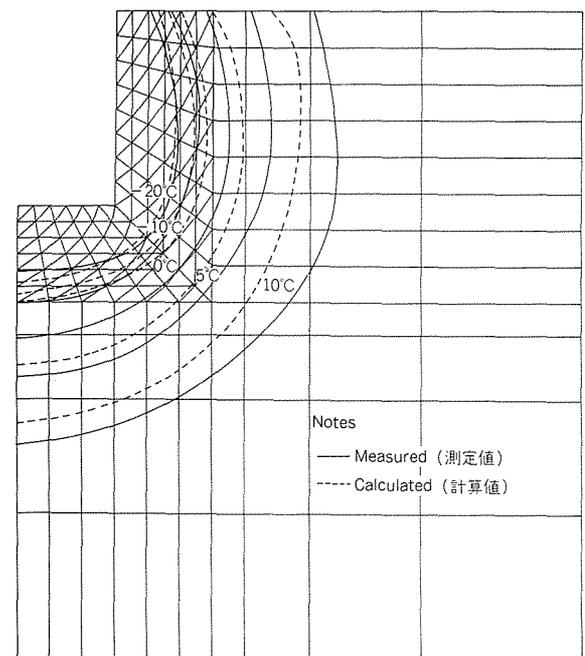


図-12 20時間経過後の等温線(実験 A-1)

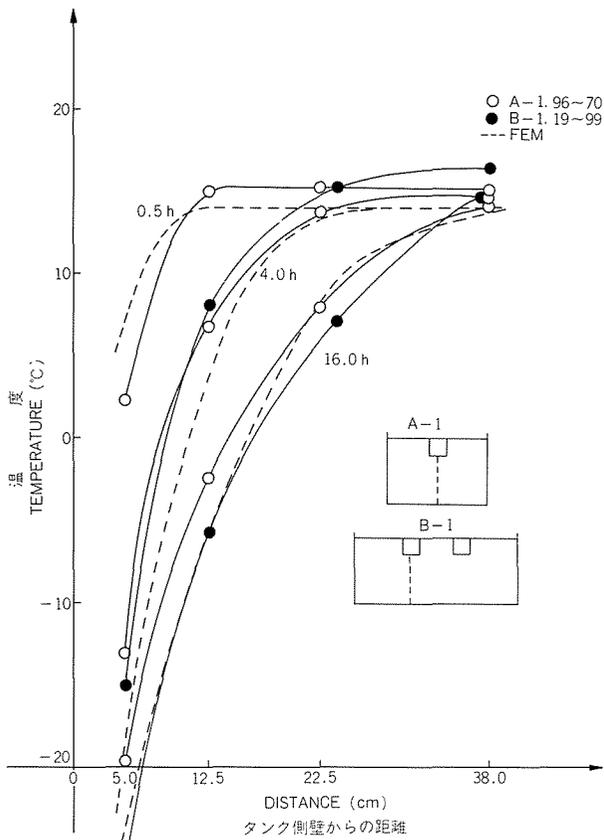


図-13 距離～温度～経過時間の関係(実験A-1, B-1)

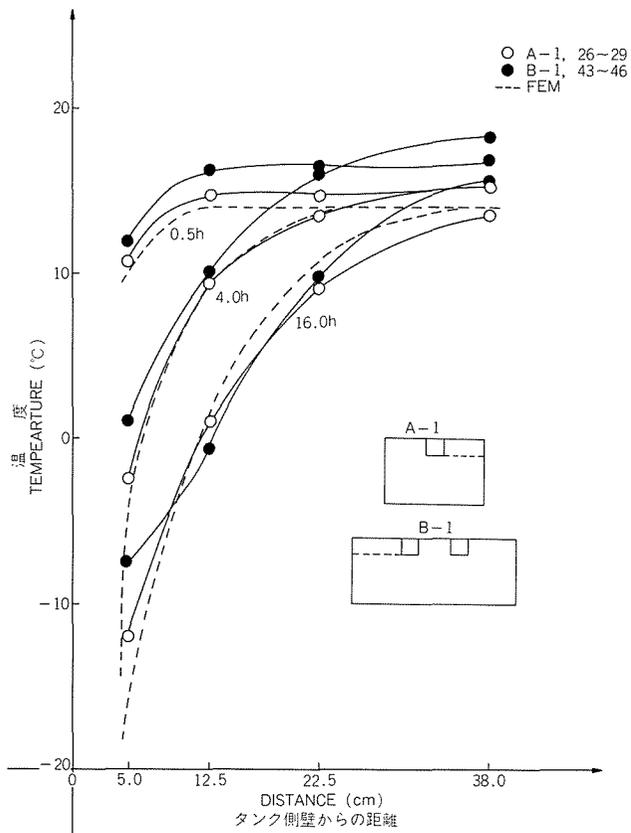


図-14 距離～温度～経過時間の関係(実験A-1, B-1)

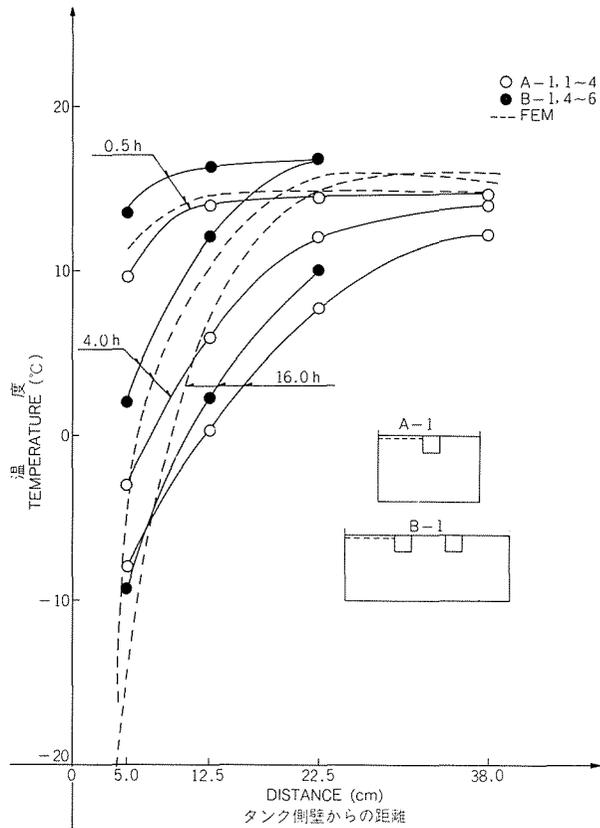


図-15 距離～温度～経過時間の関係(実験A-1, B-1)

隣接タンクによる影響を調べるためにタンク2基で実験を行なった。タンク2基を考えると軸対称構造物とはならず、3次元の解析になるので、計算容量が非常に大きくなる。容量の縮小、計算時間の短縮を考え、水平・鉛直の2断面(ともに中心軸を通る)に分け、各断面について2次元での解析を考えることとする。図-16の等温線を描いた図に水平断面の要素分割図、同様に図-17に鉛直断面の要素分割図を示す。水平断面はタンク深さの中間位置で切断したものである。この解析でモデルタンクの熱伝達率($\alpha = \lambda / \delta$)は、ステンレスの厚さ($\delta = 2$ mm)、熱伝導率($\lambda = 0.245 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$)より、 $\alpha = 100 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ を用いた。

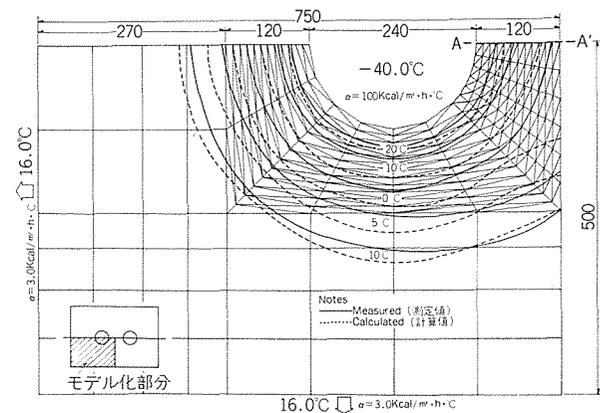


図-16 8時間経過後の等温線(実験B-1)

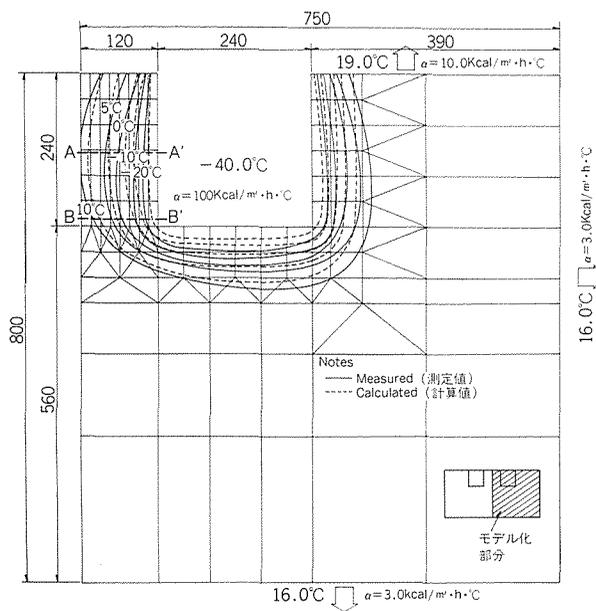


図-17 2時間経過後の等温線 (実験B-1)

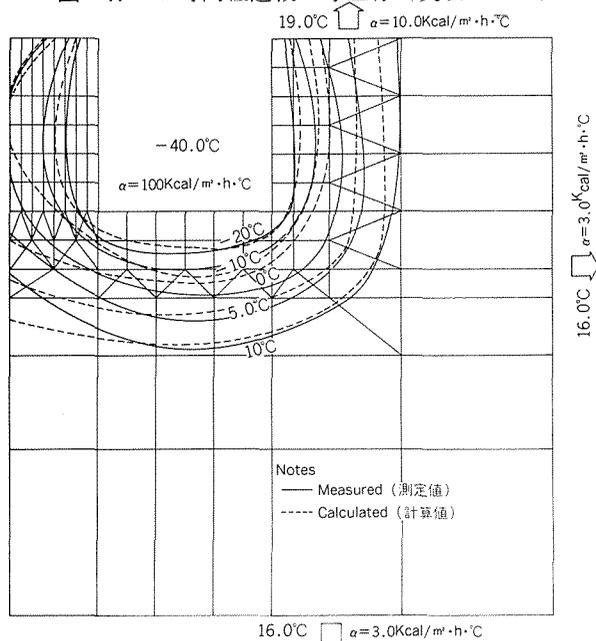


図-18 8時間経過後の等温線 (実験B-1)

図-16は実験開始後2時間経過時の等温線を描いたものである。実線が実験値を、破線が計算値を表わしている。図示してあるようにモデルタンク側より、それぞれ-20°C、-10°C、0°C、5°C、10°Cの等温線である。図中右側のメッシュの細かい部分は隣接タンクにはさまれている場所であるが、実験値、計算値とも隣接タンクの影響をそれ程受けていないようで中央部(図中A-A'線のA'側)で計算値より進行が多少早い程度である。半径30mの実タンクに換算すると2hで14.3年は相当するが、精度よく一致する。

図-19, 20は図-16中、A-A'線上の温度～距離～時間の関係を表わしている。図-19はタンク中央位置、図-20はタンク底版位置での比較である。図中、実線は実験値、破線は計算値である。図-19は凍結潜熱の影響が大きい0°C付近を除けば、比較的精度が良いが、図-20ではモデルタンクと2次元の差がより大きくなるせいか、時間の経過とともに乖離が大きくなる。2次元解析の限界かと思われる。

図-17, 18は鉛直断面の等温線を表わしている。図-17は実験開始後2時間経過時、図-18は8時間経過時の状態である。両図ともに実験値の進行が計算値より早く、時間が経過するにつれて両タンク中間での干渉地域で実験値と計算値の差がより著しくなるようである。全体で見ると水平断面に較べて精度が落ちるが、8時間経過した図-18の方が2時間経過したものより精度が高いようである。原因は凍結潜熱の影響がうすれるためと考えられる

図-21, 22はそれぞれ図-17のA-A'線, B-B'線における、温度～距離～時間の関係である。やはり、ともに実験初期では精度が良いが、時間が経過するにつれ乖離が大きくなる。(注、これは、タンクにはさまれた部分だけの比較である。)

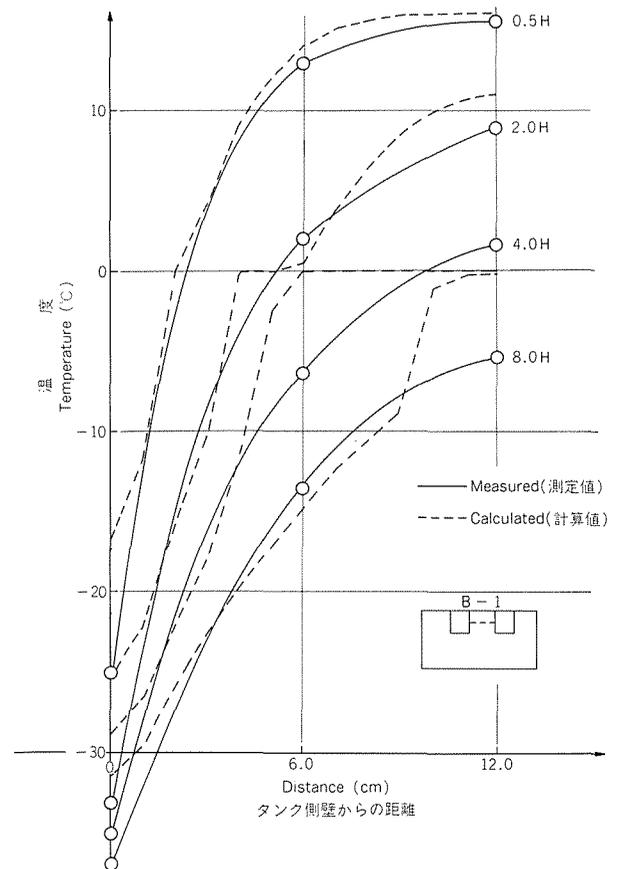


図-19 距離～温度～経過時間の関係 (実験B-1)

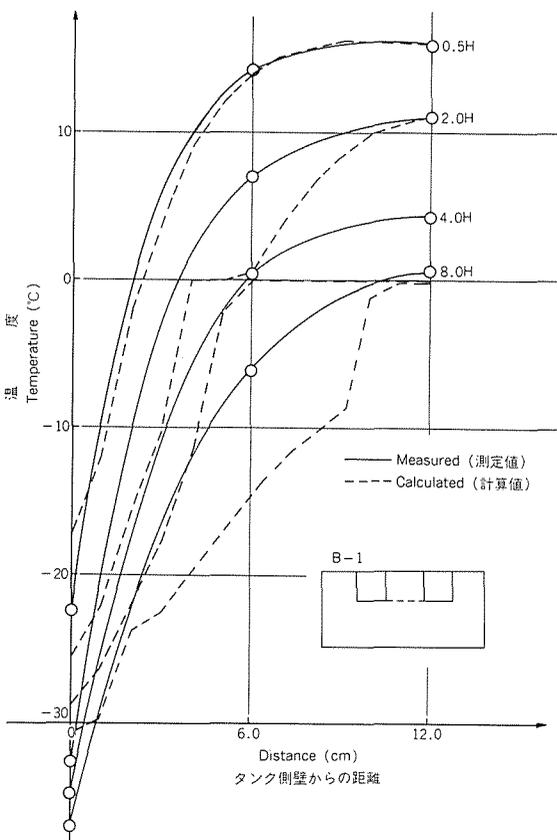


図-20 距離～温度～経過時間の関係 (実験 B-1)

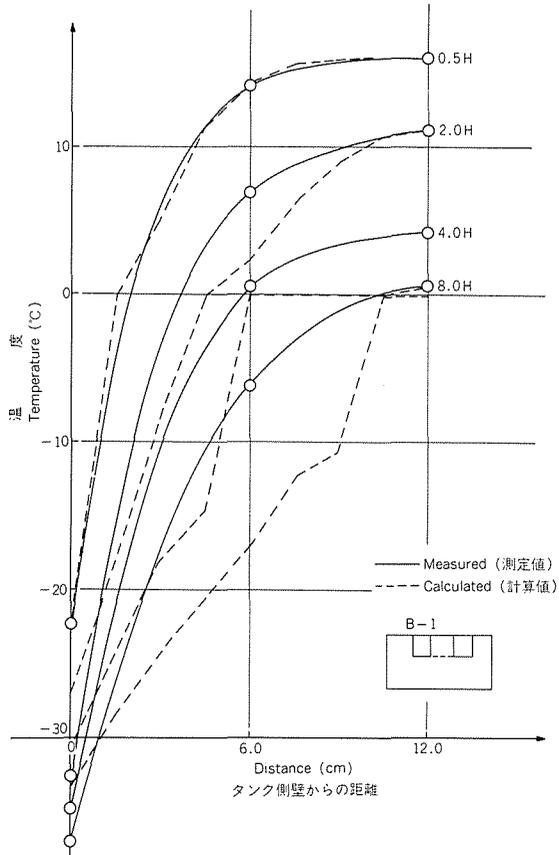


図-22 距離～温度～経過時間の関係 (実験 B-1)

4-2 凍結土圧

§ 2 で述べたが、反力梁にロードセルを取付けタンクに作用する凍上圧を測定した (正確には摩擦力も作用している)。ロードセルの測定値を図-23 に示す。図-24 は図-23 の値をモデルタンクの底面積でわったものであるが、20 h 経過後位からほぼ一定値となっている。A-1 と B-1 の値を比較すると B-1 の方が大きな値になっており、これは群設による影響と考えられる。

図-25 はモデルタンク側壁から 12cm 離して設置した土圧計 (埋め込み深さも同じ) の測定値を比較したものである。図中の (↓) は土圧計の設置位置まで凍結が進行した時間を指している。初期条件が異なるため到達時間は一致しないが、到達時間以降の勾配は 3 測定値 (A 1-C 1, B 1-C 1, B 1-C 1) と一致している。B 1-1-C 3 はタンク中間での測定値だが、実験開始後 6 時間で土圧計位置まで凍結し、以後急激に上昇している。これは明らかに隣接タンクの影響のためであると考えられる。LNG 地下タンクの場合、凍結土圧は土質によって 10~50t/m² といわれている。タンクが隣接している場合には、図-25 に見られるように更に大きな値をとると考えられる。タンク間の凍結土圧は相似率の関係が明確

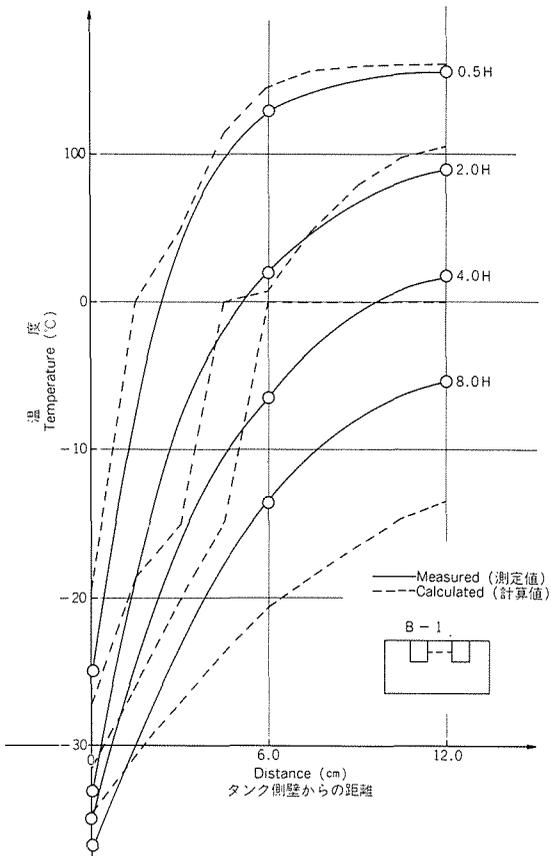


図-21 距離～温度～経過時間の関係 (実験 B-1)

でなく、簡単には論じられない問題だが、タンクの間
 間に凍結線が到達する時間までは、土圧も問題になる程
 増加しないと考えられる。

4-3 凍上

実験A-1, A-2, B-1で測定した凍上量を比較

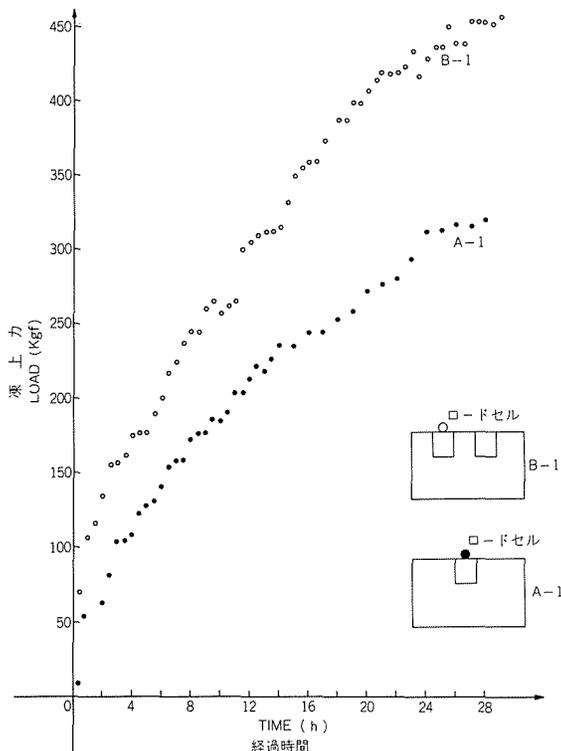


図-23 凍上力～経過時間の関係(実験A-1, B-1)

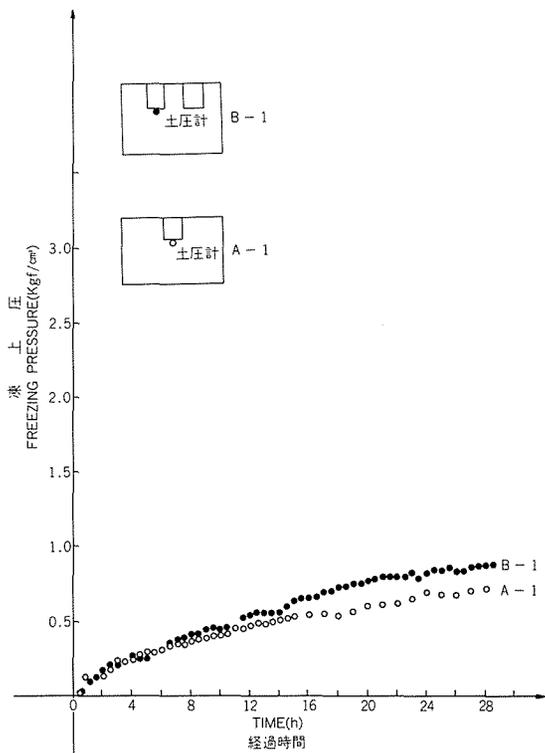


図-24 凍上圧～経過時間の関係(実験A-1, B-1)

する。図-26は図-1でタンク外側に向けて配置した変
 位計による測定例である。A-1, A-2はロードセル
 でタンクの凍上が押えられているが、B-1は凍上可能
 である。図-26によると、B-1の測定値からタンク自
 身の凍上による周辺土の影響を考えるとA-1の測定値
 と大差ないようである。A-1とA-2を比較すると温
 度の高いA-2の方が大きな凍上量を示している。B-
 1の場合も考えに入れると凍上量は温度より別の要因
 の方が大きそうである。また、A-1とA-2では最大凍
 上量を示す点が違い、A-2の方がよりタンク近くに発
 生している。

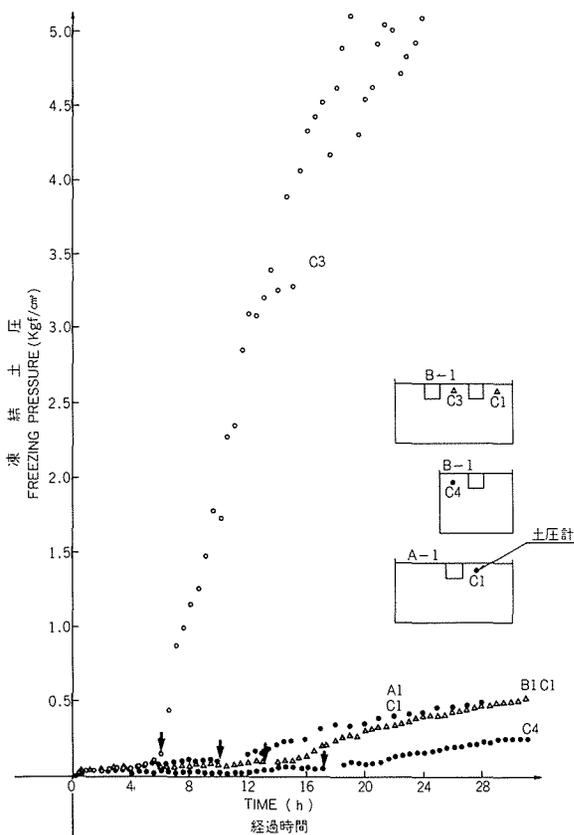


図-25 凍結土圧～経過時間の関係

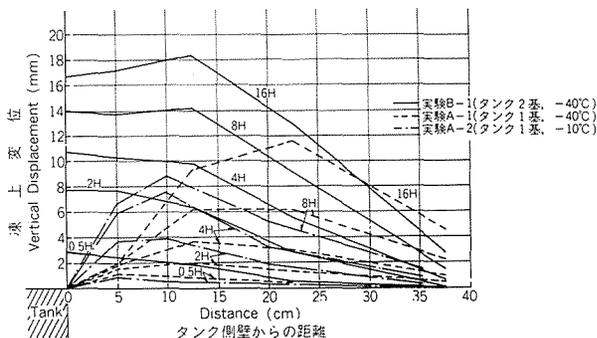


図-26 凍上変位～距離の関係(実験A-1, B-1, A-2)

§ 5. あとがき

今回の実験では凍上変位と凍結土圧を解明する予定であったが、残念ながらそこまで到らなかった。凍結土圧を算定する式がこれまで2, 3 発表されており、いずれも室内実験値との対比は良好であるようだが、凍結速度の遅い実タンクの場合に、その適合性は分かっていない。今回の実験では、推定した土質定数を用いて既発表の式で算定した凍結土圧と合う実験と合わない実験があった。合ったものは、これまでに見られる報告書と同様であるし、合わないものには、土圧計の挙動が不審なものもあった。モデルのスケールとか、間ゲキ水圧を測定していない等の理由で今回は先へ進めなかった。次報では凍上変位も含めてFEMで解析する予定である。

また、複数タンクを3次元のモデルで解析するのは正確であるが、モデル作成、計算を含めて時間がかかり過ぎるきらいがあり、2次元解析が必要となる。今回も鉛直・水平2断面の2次元解析で適切な熱伝達係数を選ぶことによって設計上十分な精度が得られることが分かった。今後更に検討を進めたい。

最後に執筆にあたり当社技術研究所の低温実験グループと前回報告者土橋吉輝氏に多大なるご協力を仰いだので紙面を借りて謝意を表したい。