

LNG地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第2報)

—80K L超低温液体地下貯蔵槽冷却実験—

齋藤二郎 内藤和章
河野彰 上野孝之
(本社土木本部設計部)
大村満雄
(泉北土木工事事務所)

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas

—Cooling Test of Tank with Volume of 80 Cubic Meters—

Jiro Saito Kazuaki Naito
Akira Kono Takayuki Ueno
Mitsuo Omura

Abstract

For the purpose of development of safe and economic underground storage tanks for liquefied natural gas, the authors constructed an underground storage tank with a volume of 80 cubic meters in the Senboku district of Osaka and conducted cooling tests using liquefied nitrogen.

The experiment was for one year from November 1971 to November 1972 including the time required for construction of the tank. The objects of this experiment were development of a sealing and insulating materials, establishment of a method of calculating thermal stress and clarification of phenomena accompanying freezing of surrounding soil such as the process of freezing, expansive pressure, displacement of ground, etc.

Although there are some problems remaining to be solved, the experiment may be said to have achieved its desired aim.

概要

安全かつ経済的な無公害液化天然ガス (LNG) の地下貯蔵槽を開発する目的で、大阪泉北地区において内容積が80K Lの鉄筋コンクリート製超低温液化ガス貯蔵槽を築造し、液化窒素による冷却実験を実施した。

実験の期間は、貯蔵槽の構築を含めて、昭和46年11月から昭和47年11月までの1カ年にわたった。

実験のねらいは液シールを兼ねた断熱材の開発、躯体の熱応力の算定方法の確立、さらに周辺地盤の凍結に伴う諸現象 (凍結の進行過程、凍結膨脹圧、地盤変位等) の解明などにあり、若干の問題はあるが、上記の目的はほぼ満足されるものであった。

1. まえがき

液化天然ガス (LNG) を地下に貯蔵することは安全性、まわりの住民に与える心理的影響、さらに敷地の有効利用などの点で有利であるが、反面周辺地盤の凍結が時間と共に進行することによって種々の問題が生じてくる。

粘性土が凍結すればその体積は膨脹し、地盤に変位が生じて躯体および周辺の構造物に圧力を及ぼす。この凍結膨脹による変位、圧力がどの程度であるかは確かめられていない。

また鉄筋コンクリート構造物の内部と外部との温度差により発生する熱応力の問題もまだ明らかでなく、設計法も確立されていない。

上述の問題を明らかにする目的で沖積粘土層を埋立てた地盤に鉄筋コンクリート製の地下貯蔵槽を構築し、液化窒素 (LN₂) による冷却実験を行なった。

軀体内には温度計 (Cu-Co熱電対), 鉄筋応力計を、また周辺地盤には温度計, 傾斜計, 土圧計を埋設して超低温である液化窒素の温度が外方に伝播していく過程で逐次測定をおこなった。

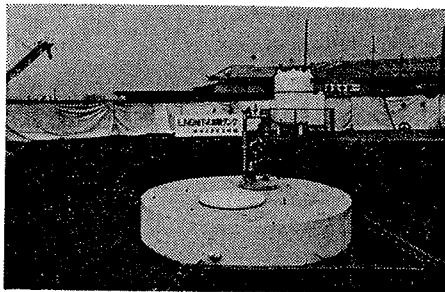
以下地下貯蔵槽の概略の構造と測定結果について述べる。

2. 実験概要

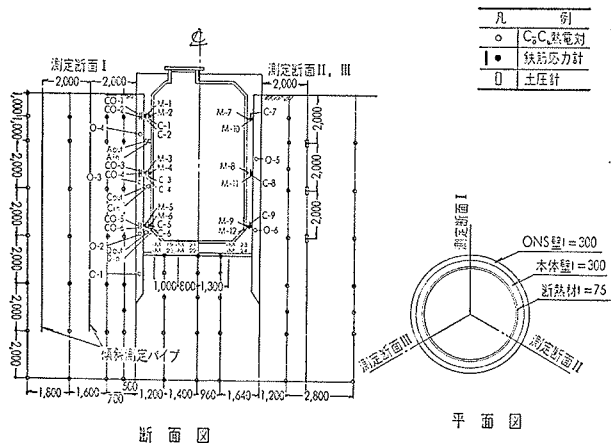
地下貯蔵槽の施工方法について簡単に述べると、ONS工法 (ドーナツオーガ掘削機で掘削した穴にU型断面のプレキャスト鉄筋コンクリート製ぐいをそう入し、柱列状に連続した土留壁を構築する工法) によって円形の土留壁を先行して打設し、内部を掘削して鉄筋コンクリート造の本体壁を構築した。さらに内壁に、ウレタン系の断熱層を設け熱の遮断を図る構造とした。

この貯蔵槽を用いて、軀体に発生する鉄筋応力, 凍結膨脹圧, 地盤変位, ポイルオフガス量, 温度分布等の測定をおこなった。

実験場の全景は写真一1に示しており、貯蔵槽の概略構造と計測器の埋設位置を図一1に示す。



写真一1 実験場全景

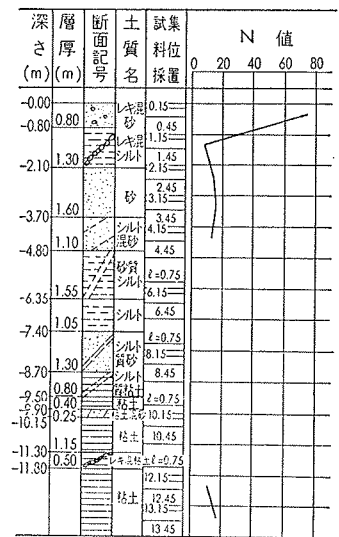


図一1 貯蔵槽の概略構造と計測器設置位置

また地盤の性状は図一2の土質柱状図に示すように主としてシルト質粘土である。

軀体コンクリートは表一1に示す配合のものを使用し、室内実験によって求めた地盤, コンクリートおよび断熱材の熱的性質の代表的な値を一覧表にして表一2に示す。

貯蔵槽の冷却は液化窒素 (LN₂) を用



図一2 土質柱状図

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量 (%)	単位水量 (W kg)	単位セメント量 (C kg)	水セメント比 (W/C %)	絶対対骨材率 (S/A %)	単位細骨材量 (S kg)	単位粗骨材量 (G kg)	単位A/E割量 (kg)
25	15	4	162	300	54	61.2	707	1155	12

備考: セメントは普通ポルトランド, A/E割はポゾリスNO.10

表一1 コンクリートの配合

		熱伝導率 kcal/m.h.°C		比熱 kcal/kg°C		凍結潜熱 kcal/kg
		凍結前	凍結後	凍結前	凍結後	
地	砂質シルト	1.95	3.65	0.44	0.23	20.9
	シルト質粘土	1.90	4.15	0.47	0.25	22.6
盤	粘土	1.80	4.00	0.43	0.33	18.0
	シルト質粘土	1.80	1.75	0.75	0.23	27.2
コンクリート		1.95	2.15	0.22	0.15	2.0
保冷材		0.025		0.167		-

表一2 熱定数測定結果

いて、15日間でクールダウンをおこない、槽内温度を約-190°Cに低下させた後、貯液を開始し、以後約2カ月にわたってLN₂による冷却を継続した。実験終了後、再び貯蔵槽を空にして内部点検をおこない、断熱材表面のクラックの状況、軀体コンクリートのひび割れの有無、また周辺地盤を掘削して凍土の状態等の観察をおこなった。

本報文では一連の実験結果のうち、温度分布の時間過程、周辺地盤の凍結膨脹による圧力と変位、軀体の熱応力を取り上げ検討を加えた。

3. 周辺地盤の凍結進行過程

躯体内部および周辺地盤の温度分布は銅-コンスタンタン熱電対で測定し、電子式自己平衡型指示記録計で自記記録した。

この実験では貯液後断熱材にクラックが生じたため、断熱材が健全であるときに比べて断熱性能が劣化したことが認められた。そこで、劣化の程度を推定するためにつぎのような解析をおこなった。

球面座標系における熱負荷の準定常解を用い、 B_i (Biot Number = $\alpha \cdot a / k$, 但し α : 境膜熱伝導係数, a : 半球の相当半径, k : 断熱材の熱伝導率) を変えた熱負荷曲線を何本も描き、実測のボイルオフ量と最もよく一致するものを選び B_i と冷却開始時間 $t=0$ の時期を推定した。図-3は実測値にほぼ一致した熱負荷曲線で、これより $B_i=2.10$, $t=0$ の時期は8月9日が得られた。

この B_i から断熱層の劣化程度を検討した結果、熱伝導率 $k_1=0.2169\text{Kcal/mh}^\circ\text{C}$ で断熱層の防熱力が初期の約1/8.7に劣化したことが判明した。

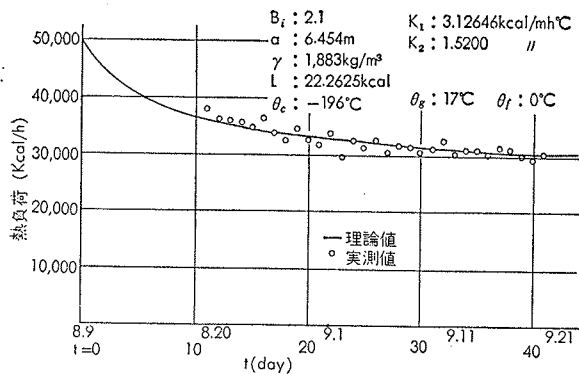


図-3 熱負荷の経時変化

温度分布の経時変化の算定は軸対称問題として有限要素法を用い、非定常問題の常套手段である時間項の処理に差分手法を用いた解法²⁾によるもので、凍結前線の形は図-4に示すように計算結果と測定結果は両者とも同様に回転楕円体の形状で進行している。また凍結前線の進行速度を比較するために、GL-5mにおける経時変化を図-5に示したが、測定値と計算値とはよく近似している。

なお、凍結前線は断熱力劣化のため当初の予想を大きく上回るものであったが、理論の検証を行うには好都合であった。

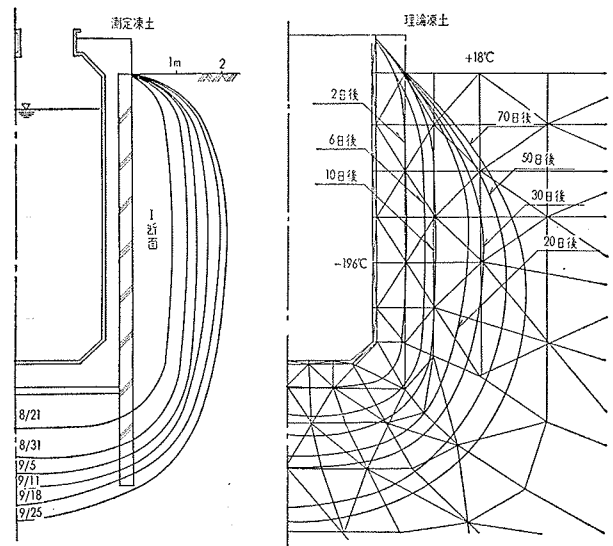


図-4 凍結前線形状の経時変化

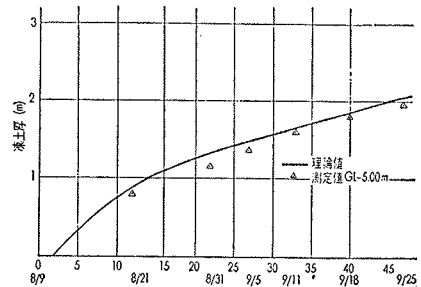


図-5 凍結前線進行経時変化 (GL-5m)

4. 凍結膨脹圧と変位

4.1. 凍結膨脹圧

貯蔵槽周辺の土が凍結すると、その体積膨脹によって貯蔵槽壁体と周辺地盤に圧力を及ぼすことが考えられる。この圧力を凍結膨脹圧と称すが、これは温度、凍結速度、凍結土の膨脹率、未凍結領域の土の強度に影響されるといわれている。

凍結膨脹圧は、土圧計を貯蔵槽壁体あるいは周辺未凍結地盤に設置することによって測定できるが、前者の場合低温用土圧計がなかったこと、躯体に作用する凍結膨脹圧は小さいと推定されたことから、本実験では後者の方法で測定した。土圧の測定にはカールソン型土圧計を用い、同位置の温度をCu-Co熱電対で測定した。測定結果を図-2に示す。これによると、土圧計の温度が 0°C (凍結前線が到達) になった時点で膨脹圧がピークに達していることがわかる。

ここで、凍結膨脹圧についてつぎのような解析を行った。凍結領域と未凍結領域の境界面における凍結膨脹圧は図-7に示す記号を用いて次式で表わせる³⁾。

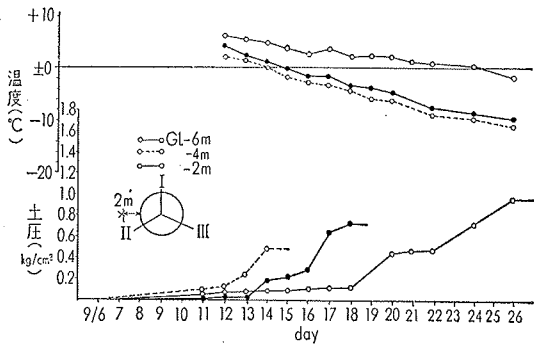


図-6 凍結膨脹圧経時変化

$$\sigma_{r1} = \frac{\xi}{2} \frac{(R^2 - r^2) - BTr^2 + \frac{r^3}{E_3} \frac{B}{t} + \frac{1 + \nu_1}{E_1} R^2 \sigma_{\infty}}{\frac{1 + \nu_1}{E_1} R^2 + \frac{r^3}{E_3} \cdot \frac{A}{t}} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

$$A = \frac{2R^2}{R^2 + r^2 + \left(\nu_2 + \frac{E_2}{E_3} \cdot \frac{r}{t}\right) (R^2 - r^2)} \quad \dots\dots(2)$$

$$B = \frac{E_2 (R^2 - r^2) \beta T}{R^2 + r^2 + \left(\nu_2 + \frac{E_2}{E_3} \frac{r}{t}\right) (R^2 - r^2)} \quad \dots\dots(3)$$

また軀体に作用する凍結膨脹圧 σ_{r2} は

$$\sigma_{r2} = A\sigma_{r1} - B \quad \dots\dots(4)$$

となる。

そこで、 $r = 2.6$
 $0m$, $R = 4.60m$
 (土圧計位置),
 $t = 0.30m$, $\nu_1 =$
 0.3 , $E_1 = 7.7 \text{ kg/cm}^2$,
 $\nu_2 = 0.2$, $E_2 = 2 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$,
 $\xi = 0.03$ (室内凍上
 試験による), $E_3 =$
 $1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

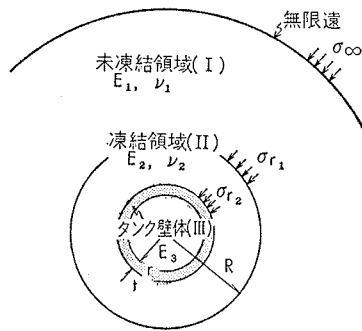


図-7 理論計算条件

(凍結コンクリート), $\beta = 1.3 \times 10^{-5}$ (凍結コンクリート), $T = 200^\circ\text{C}$ (9月25日における常温との差) とすると、(1)式より

$$\sigma_{r1} - \sigma_{\infty} = 0.556 \text{ kg/cm}^2$$

となる。一方凍結前線が土圧計位置に到達したときの土圧 ($\sigma_{r1} - \sigma_{\infty}$ に相当) は、 $0.5 \sim 0.9 \text{ kg/cm}^2$ であり、計算値はやや小さい値となっている。これは (1)式の σ_{r1} が ξ に大きく左右され、 ξ は凍結速さが遅い程大きい (凍上試験では 12 mm/hr , 本実験の場合は 1 mm/hr) ことによると考えられる。

つぎに、(4)式より σ_{r2} を算定すると、 $\sigma_{r2} < 0$ となる。すなわち凍結膨脹圧は貯蔵槽壁体には作用しないことになる。

4.2 地盤水平変位

地盤の水平変位は、ガイドレール付のパイプ内を、差動トランス型地中変位計をスライドさせることによって測定し、またパイプ頂部の変位は、不動点からスチールテープにより測定した。

測定結果のうち、GL-3.00mにおける水平変位量の経時変化を図示すると図-8のようである。

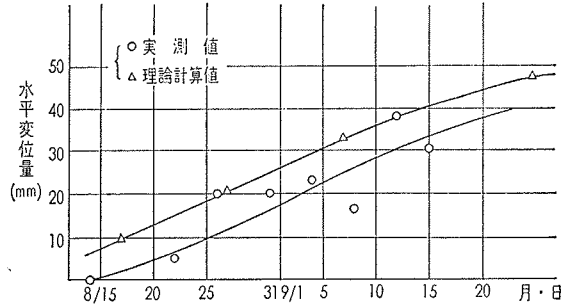


図-8 GL-3.00mの水平変位量

ここで、貯蔵槽中心より l の距離にある要素の水平変位量 δl は次式から求められる。

$$\delta l = \frac{1 + \nu_1}{E_1} (\sigma_{r1} - \sigma_{\infty}) \frac{R^2}{l} \quad \dots\dots(5)$$

凍結半径 R の経時変化測定値を代入して $l = 4.60m$ における δl の経時変化を(5)式より算定すると図-8に併記したように実測値と計算値とほぼ一致する。ところが(1)で述べたように $(\sigma_{r1} - \sigma_{\infty})$ は過小な値を与えているので、(5)式による δl は過大な値を与えることになる。

5. 軀体応力

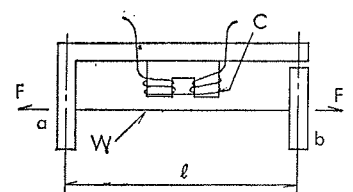
熱応力の実体を把握するために、軀体の鉄筋応力の測定をおこなった。応力測定にはカールソン型および振動弦型の鉄筋応力計を用い、熱応力算定のための温度測定には Cu-Co 熱電対を用いた。

ここで、計器の概略の機構について述べる。カールソン型計器については一般的なものなので省略するが、使用可能な温度範囲が

低温域では -70°C 程度のものを使用した。振動弦型計器は図-9に示す測定原理で、弦の振動数と張力とは

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho}}$$

(但し、 f_0 : 固有振動数、 l : 鋼線の長さ、



a,b: 標点
 W: 高抗張力線
 C: 発振・検出コイル

図-9 振動弦型計器原理図

ρ : 鋼線の密度, F : 鋼線の張力, a : 正の整数, の関係にあることを利用したもので, これは -200°C 程度の低温領域で使用可能なものである。

測定結果のうち, 躯体の温度変化と応力変化の一部をそれぞれ図-10, 図-11に示す。

つぎに, 温度変化によって発生する熱応力を有限要素法によって計算をし, 測定値との比較をおこなってみた。計算は ONS 壁と本体壁の拘束条件を2ケースにわけ, ONS 壁と本体壁との拘束がない場合, 完全に一体とした場合をそれぞれ Case I, Case II とした。応力計算に際して, 貯蔵槽を単一のコンクリート部材で構成されているという条件とし, したがって鉄筋応力はコンクリートの応力度をモーメントと軸力に換算して算定したものである。

Case I と Case II の計算結果と測定値との比較したものの一部を図-12に示す。

計算応力は Case I のものが鉄筋応力の引張と圧縮の表われ方としては測定値と近似している。したがって, 今回の実験では本体壁と ONS 壁との間の拘束はあまりなかったと想定される。

また, 応力度の数値でみた場合, 応力レベルの小さい段階ではコンクリートの引張力を無視した計算では測定値より相当大きな値を与えることになる。そこで, コンクリートの引張力が期待できるとして, コンクリートのヒズミに相当する鉄筋応力を, コンクリートのヤング係数とヤング係数比をそれぞれ $E_c \cong 1.9 \times 10^5$, $E_s/E_c \cong 11$ 程度にして計算すると計算値と近似してくる。しかし, この E_c は一般に用いられる値に比し小さい値である。

また, コンクリートのヒズミが 200μ 程度以上になると, コンクリートの引張力は期待できないとされているが, 本実験の場合にはさらに高い応力レベルの段階でも測定値は計算値より一般に小さくなる傾向を示し, その比は $1/2 \sim 1/15$ 程度である。このような両者の差異はコンクリートに発生するクラックによる熱応力の緩和, クリープによる応力の緩和, 温度変化による物理定数の変化等から生ずるものと考えられる。

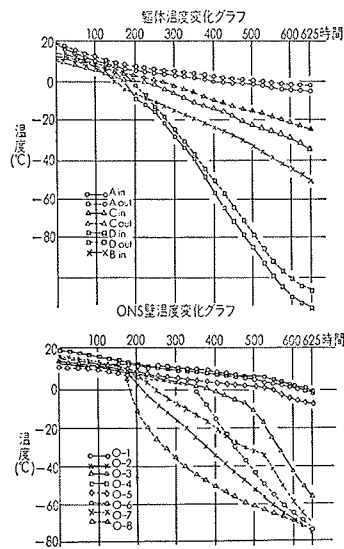


図-10 躯体温度変化

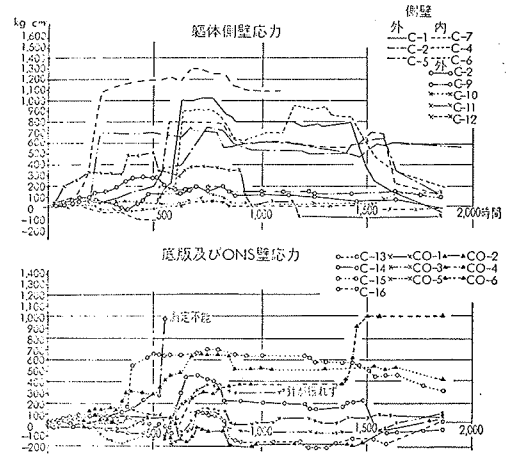


図-11 鉄筋応力測定結果

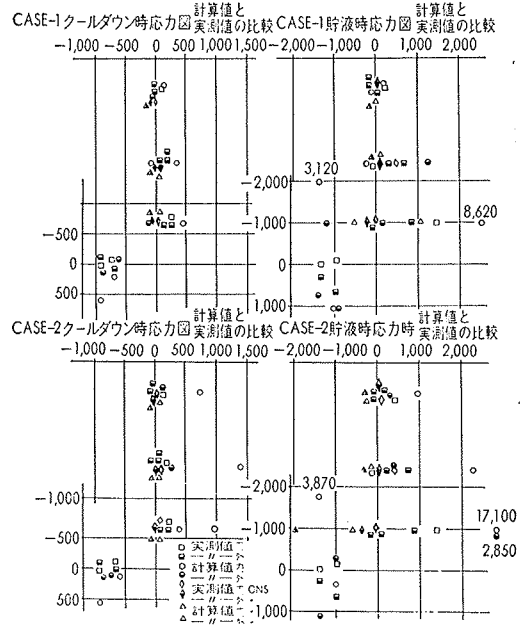


図-12 測定値と計算値との比較

6. あとがき

- 以上の実験結果と考察からつぎの推論が得られる。
- (1) 凍結前線の進行については実測値と計算値とが比較的よく合い, 熱定数が与えられれば有限要素法による解, あるいは半球理論による解で凍土の成長過程を推定することの妥当性が認められた。
 - (2) 凍結膨脹圧については, 凍結速さを与慮した凍結膨脹率を求めれば(1)式より算定してよいであろう。
 - (3) 地盤の水平変位量については, (5)式より求めたものは測定値に比べてやや過大な値を与えている。
 - (4) 熱応力に関しては, 一般に測定値が計算値より小さくなる傾向を示し, その比は $1/2 \sim 1/15$ 程度という結果が得られた。この理由については種々考えられる

が、今後明らかにすべき課題である。

なお、本報文は昭和48年土木学会第28回年次学術講演会で発表したものと同内容である。

参考文献

- 1) 高志：液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲の地盤の凍結について(II) 冷凍—第47巻第56号
- 2) 斎藤，藤原：有限要素法による浸透流，熱流などの解析，第8回土質工学会E-7-139
- 3) 高志：凍結膨脹による未凍結領域内の土圧の変化の経時変化，土木学会論文報告集第200号
- 4) 高志・住吉：上載荷重がある場合の開放型凍上に

おける凍上量の増減について，第24回年次学術講演概要

本実験は大林組，精研冷機，日本ソフラン三者の共同実験であり，当社の参加メンバーは下記の通りである。

本社技術部

河野 彰 高瀬邦雄 三浦昭爾 田中徹哉
手塚 功

本店泉北工事事務所

大村満雄 杉尾栄行 長谷川拓夫

技術研究所

斎藤二郎 内藤和章 藤原紀夫 上野孝之