

地上二重殻1,000t液酸貯槽

Upper-ground Double-wall Flat-bottom Spherical Roof Liquid Oxygen Storage Tank (Capacity 1,000 tons)

Hitachi recently completed a 1,000-ton liquid oxygen storage tank of upper-ground double-wall type to be installed in combination with an air separation plant. This unusual tank is made of aluminium, has ordinary insulation, and is designed in a flat bottom, cylindrical type. After installation, the authors measured stress at the time of its hydraulic tests and temperature and displacement when the installation was cooled down thereby to study stress concentration due to welded angular distortion and thermal stress during cool-down period, as these characteristics present difficult design problems. The measured results verified that the performance of the tank is satisfactory fulfilling design specifications. The data obtained which are given in this article will be a valuable guide for designing and manufacturing of this sort of vessels.

渡辺直幸* Naoyuki Watanabe

栗田義久* Yoshihisa Awada

台 宏朋* Hirotomo Dai

1 緒 言

近年、産業社会の発展とともに、低温液化ガスの取扱い技術の発達によって、低温液化ガスの需要が大幅に増大しつつある。日立製作所は空気分離装置を昭和27年より製作し、100プラント以上の納入実績をあげている。空気分離装置は大気中の空気より、酸素、窒素などをその沸点差を利用してガス体または液体で採取するプラントであるが、これらプラントには緊急停止時とか、定期修理時などに備えて、プラントより発生した液体酸素、液体窒素などの低温液化ガスを一時貯蔵する貯槽(そう)が併設される場合が多い。一般に、貯槽の形式は容量、圧力、用途などにより決定され、球形、円筒形、平底円筒形などがある。また、それら貯槽の保冷方式として、常圧普通保冷、真空保冷などがある。このうち、平底円筒形貯槽は常圧普通保冷形式で、構造上、大容量化、大気圧に近い圧力で貯蔵する場合には適した貯槽とされており、最近では、液化天然ガス(LNG)用貯槽として、35,000~100,000klの大容量のものまでが建設されている。ここに本報では、空気分離装置に併設された平底円筒形、常圧保冷のAl製地上二重殻(かく)1,000t液酸貯槽の設計上、強度的に特に問題となる溶接角変形による応力集中とクールダウン時の熱応力を検討するため、耐圧試験時に応力測定を、またクールダウン時に変位と温度の測定を行ない、計算値との比較考察を行なったので報告する。

2 機器の概要

2.1 仕 様

貯槽仕様は次のとおりである。

- (1) 貯槽形式……………二重殻式平底球面屋根円筒形
- (2) 貯蔵内容物……………液体酸素(比重1.143)
- (3) 貯蔵容量……………1,000t(有効貯蔵量)
- (4) 貯蔵圧力……………大気圧
- (5) 設計圧力…………… $0.1\text{kg/cm}^2\text{G} + \text{液頭圧}$
- (6) 設計温度…………… -183°C
- (7) 保冷方式……………常圧粒状パーライト保冷

(8) 適用法規……………高圧ガス取締法⁽¹⁾⁽²⁾

図1は本貯槽の概略構造を、図2は完成した貯槽を示すものである。

2.2 材 料

本貯槽の内槽は液体酸素によって、 -183°C の超低温になるので、使用材料は低温において靱(じん)性を有し、強度が十分あり、溶接性、加工性の良い、経済的なものを選ぶ必要がある。 -100°C 以下の低温貯槽材料としてはSUS304、9%Ni鋼、Al合金がある。SUS304は一般に小形貯槽を除いてほとんど用いられていない。これに反してAl合金と9%Ni鋼は大

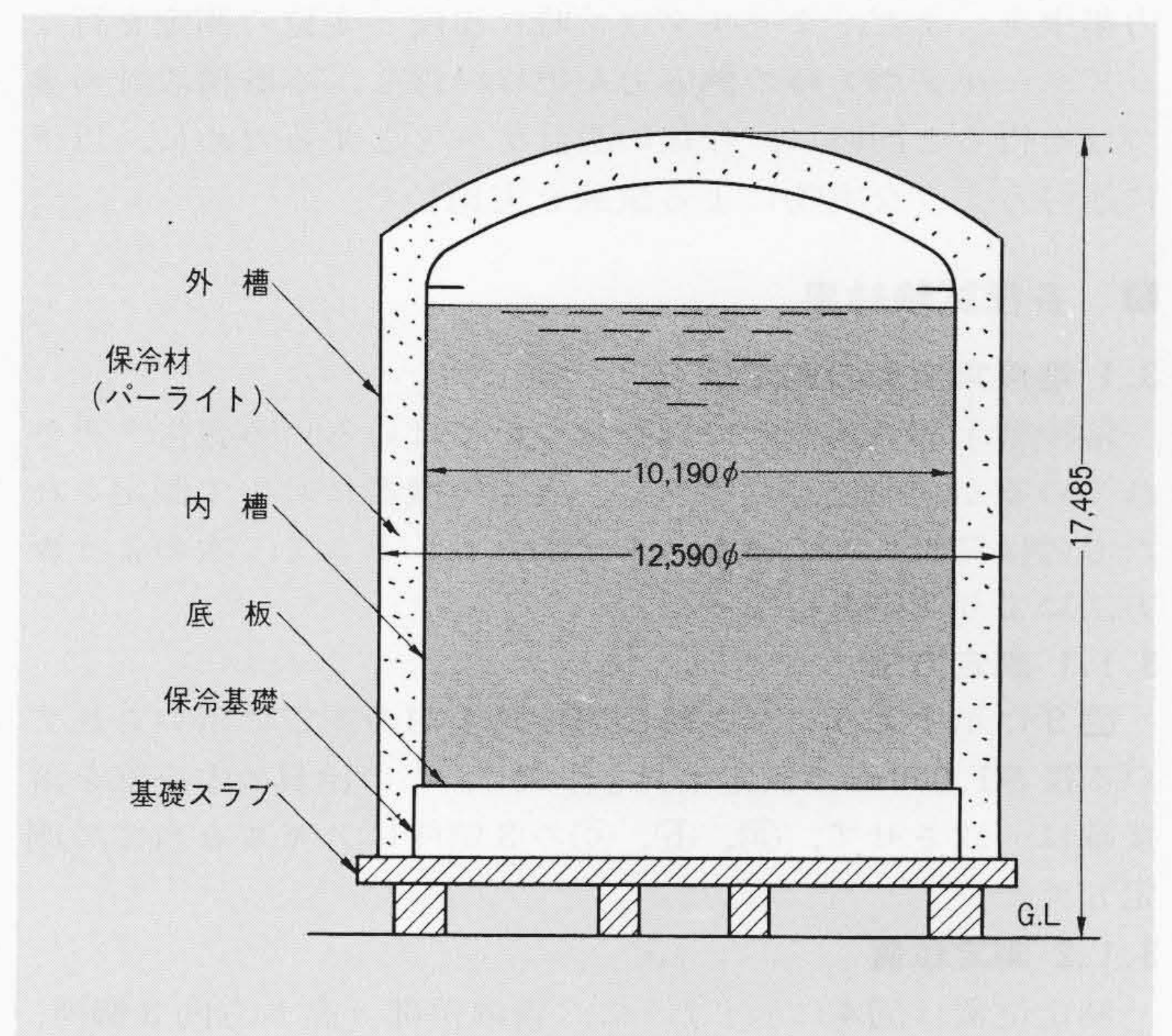


図1 二重殻式平底球面屋根円筒形貯槽 1,000t液酸貯槽の概略仕様を图示したものである。

Fig. 1 Double-wall Flat-bottom Spherical Roof Storage Tank

* 日立製作所笠戸工場

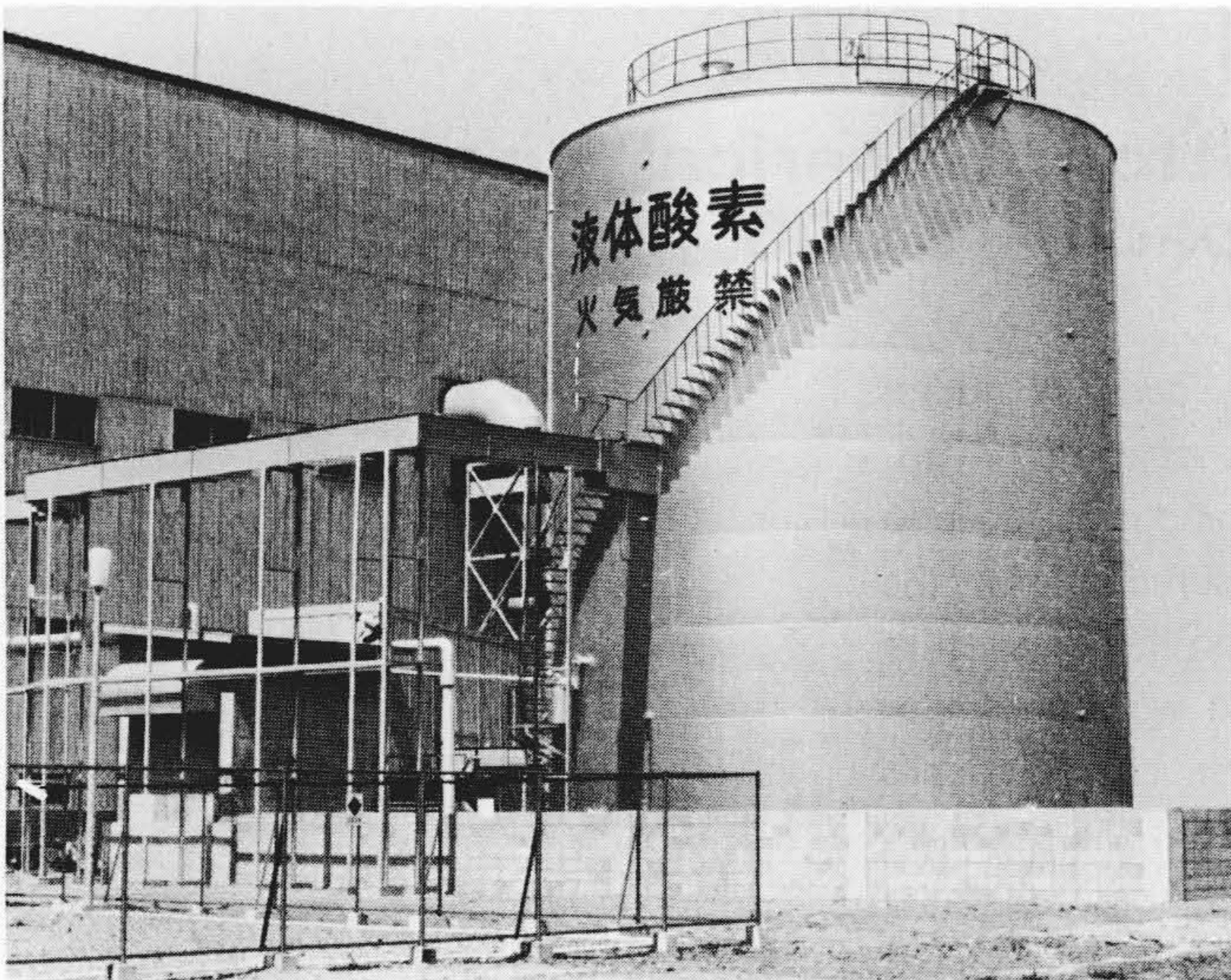


図2 液体酸素貯槽 液体酸素貯槽の完成写真(外観)を示す。

Fig. 2 Liquid Oxygen Storage Tank

形低温貯槽用材料として広く使用されている。このたび、内槽に採用したAl合金の場合、熱膨張係数が大きく、曲げ剛性が小さいために、炭素鋼に比較して同一溶接継手に生ずる溶接角変形は大きい。さらに本形式の貯槽は現地組立および据付が主体であるために作業条件が悪いので、溶接角変形をどの程度まで許容するかということは重要な問題である。Al合金の溶接変形については試験片で検討されたものはあるが、実際の機器において測定されたものは発表されていないようである。そこで、内槽の角変形量を実測し、さらに、耐圧試験時に角変形部の応力を測定することによって角変形部の応力集中を、また、クールダウン時に温度と変位の測定を行なってクールダウン時の熱応力を把(は)握し、本貯槽設計の裏づけを得ると同時に、今後の設計データとするために、以下に述べるような実物による試験を実施した。

3 各種試験結果

3.1 溶接角変形の測定

溶接継手部の角変形の影響についてはいろいろ報告^{(3),(4)}されているが、前述したように、実際の機器において測定されたものは発表されていないようである。そこで、次のような方法により測定を行なった。

3.1.1 測定方法

図3に示すように、一般に溶接角変形の測定に用いられている長さ1,000mmの測定治具を作成し、この治具の中央部を溶接線に一致させて、(a)、(b)、(c)の3個所にノギスを当てて測定した。

3.1.2 測定位置

測定位置は図4に示すように、周継手部は高さ方向3個所、周方向33等分の99点、長手継手部は高さ方向6個所、周方向4等分の24点とした。

3.1.3 測定結果

上記測定結果のうち変形量の大きな個所については、詳細な変形パターンを求めるために、50mm間隔で再測定を行なった。図5および図6はその代表的なものを示すものである。測定結果から溶接角変形量の最大値は周継手で $27/1,000$ 、長手継手で $13/1,000$ であることがわかった。

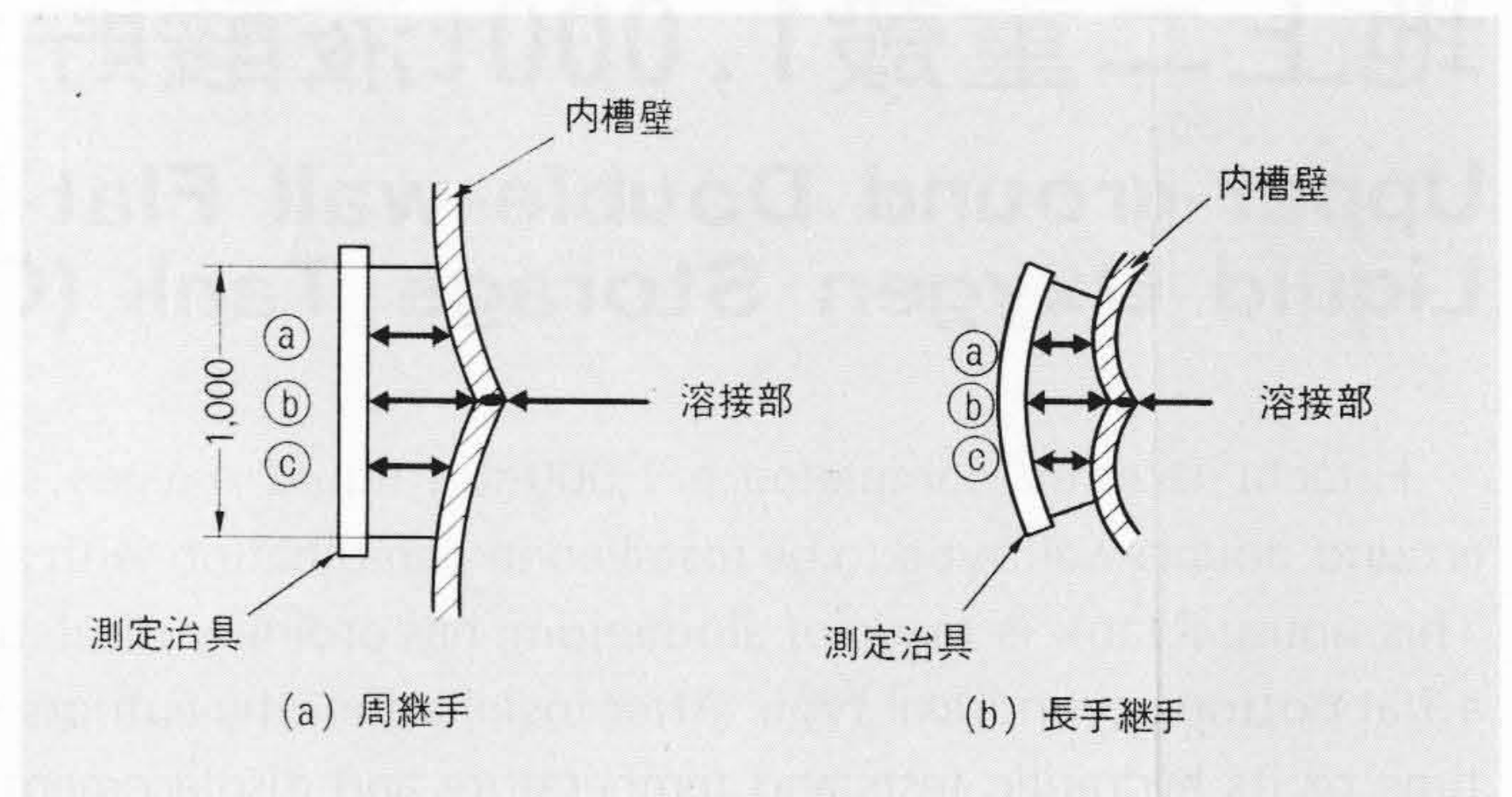


図3 溶接角変形の測定方法 長さ1mの測定治具は、周継手は直線形、長手継手は円弧形である。

Fig. 3 Method for Measuring of Welded Angular Distortion

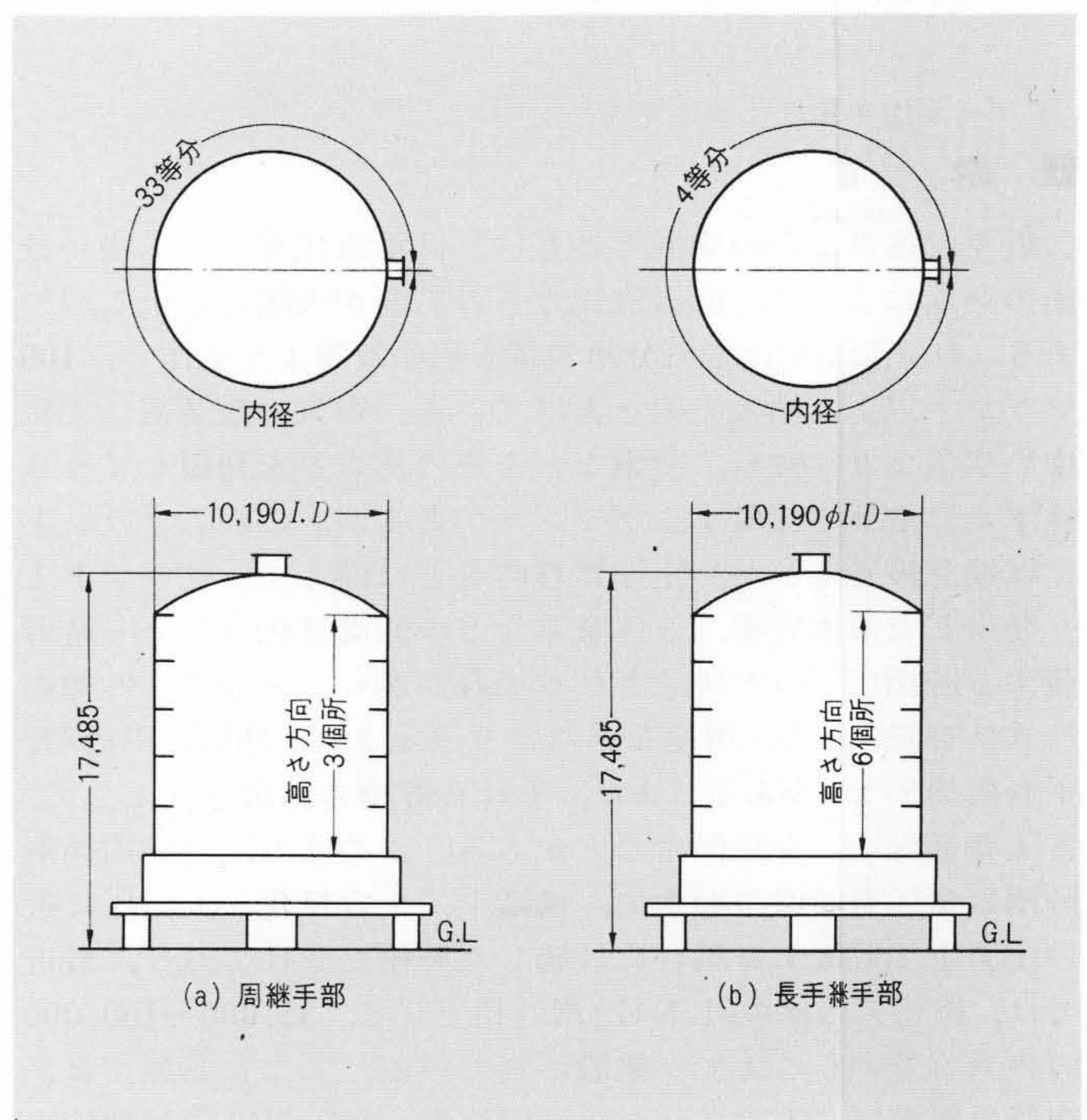


図4 溶接角変形の測定個所(内槽) 角変形測定個所は周継手99個所、長手継手24個所である。

Fig. 4 Measured Point of Welded Angular Distortion (Inner Tank)

3.1.4 溶接角変形部の応力

溶接角変形による応力集中についてはいろいろ検討されており、矢田⁽⁴⁾は角変形のいろいろなタイプについて理論計算式を導いている。すなわち、溶接角変形部の板の凹(おう)入面のひずみ ϵ_A および凸(とつ)出面のひずみ ϵ_B は次式で示される。

$$\left. \begin{matrix} \epsilon_A \\ \epsilon_B \end{matrix} \right\} = \epsilon_m \left[1 \pm \alpha \frac{\omega_0}{t} \cdot \kappa \right] = \epsilon_m K \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ϵ_m ：平均ひずみ

ω_0 ：最大溶接変形量

α ：外力の多軸性に関係し、1軸の場合 $\alpha=6(1-\nu^2)$

t ：板厚

κ ：形状係数

K ：ひずみ集中係数

形状係数 κ は外力、変形形状、拘束条件に関係する。

実機の変形形状は先に示したように、ほぼアングルタイプ

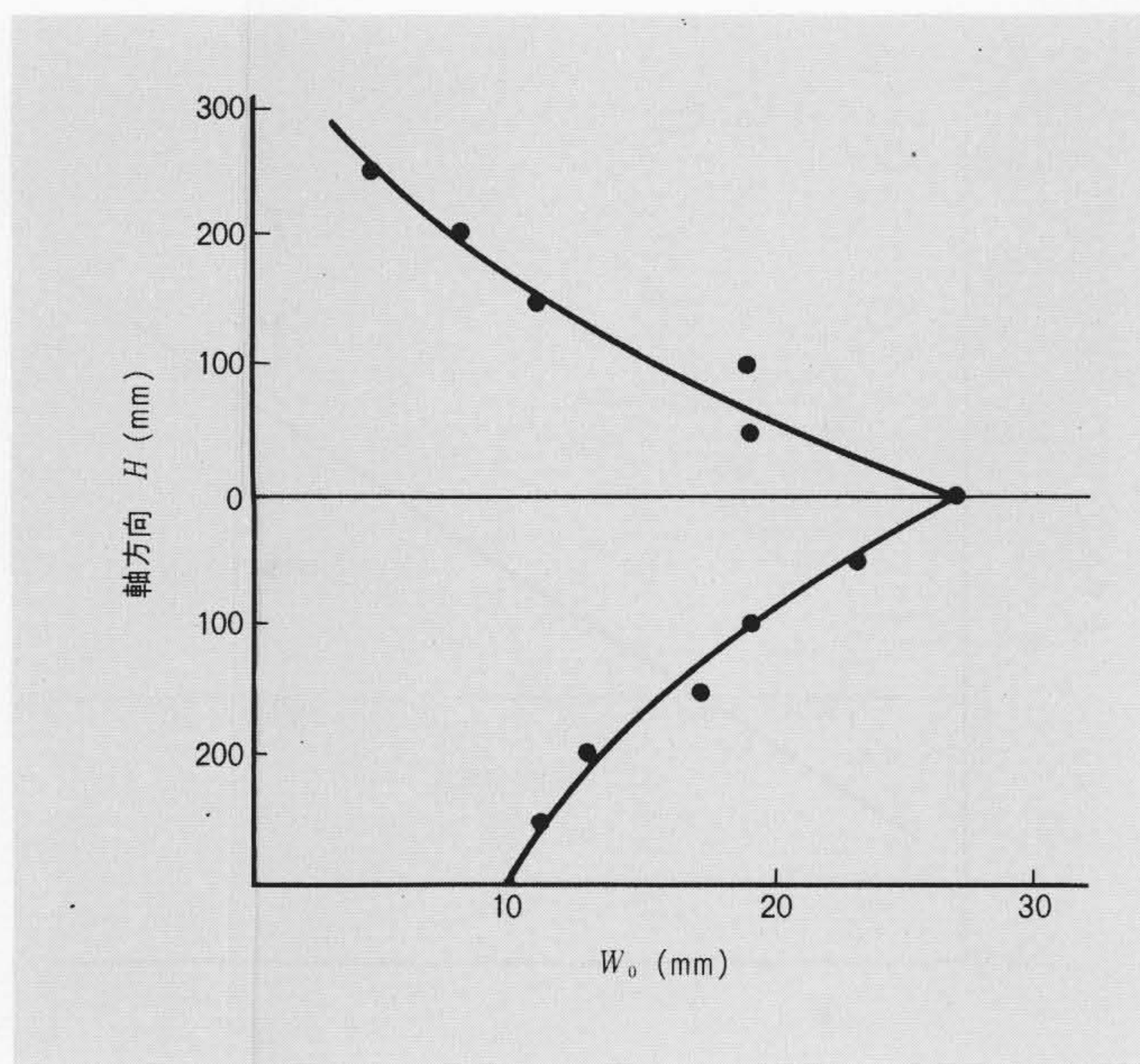


図5 溶接角変形量測定結果(長手継手方向) 50mm間隔で測定し、変形パターンを求めた。

Fig. 5 Measured Value of Welded Angular Distortion (longitudinal Joint)

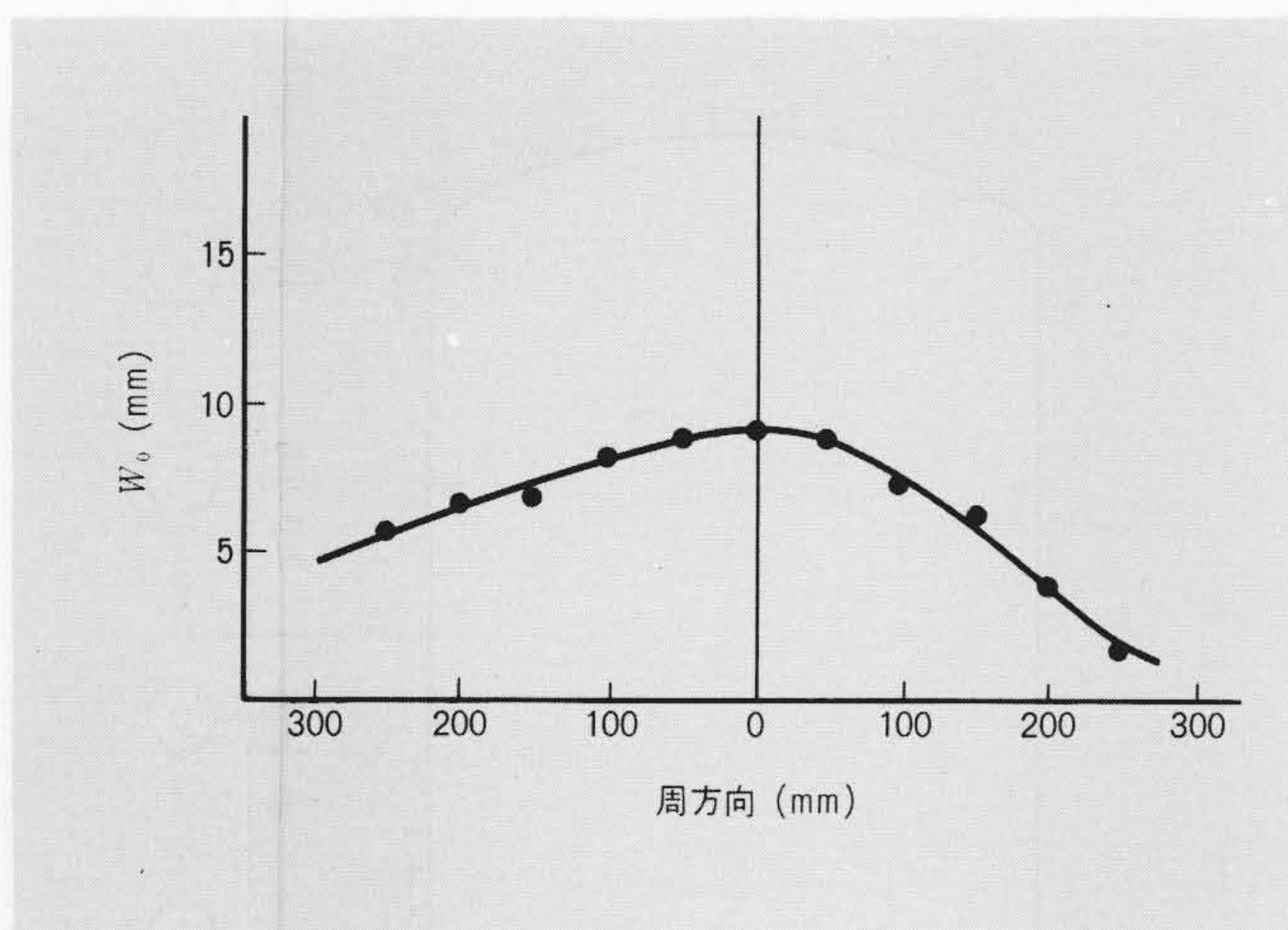


図6 溶接角変形量測定結果(周継手方向) 50mm間隔で測定し、変形パターンを求めた。

Fig. 6 Measured Value of Welded Angular Distortion (Circumferential Joint)

と考えることができるので、初期変形を次式のように仮定することができる。

$$y_0(x) = \omega_0 \frac{|x|}{l} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

x : 最大溶接変形量 ω_0 の位置からの距離
したがって、周継手および長手継手の形状係数 κ_1 および κ_2 はそれぞれ次式で求めることができる。

$$\kappa_1 = \frac{1}{\cosh A \times \cos B} \left[\frac{\sinh A}{A} + \frac{\sin B}{B} \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$\kappa_2 = \frac{\tanh m}{m} \dots \dots \dots (4)$$

ここで $A = n^2 + m^2$

$$B = n^2 - m^2$$

$$n^4 = 48(1 - \nu^2) \left(\frac{l}{t} \right)^2 \left(\frac{l}{r} \right)^2$$

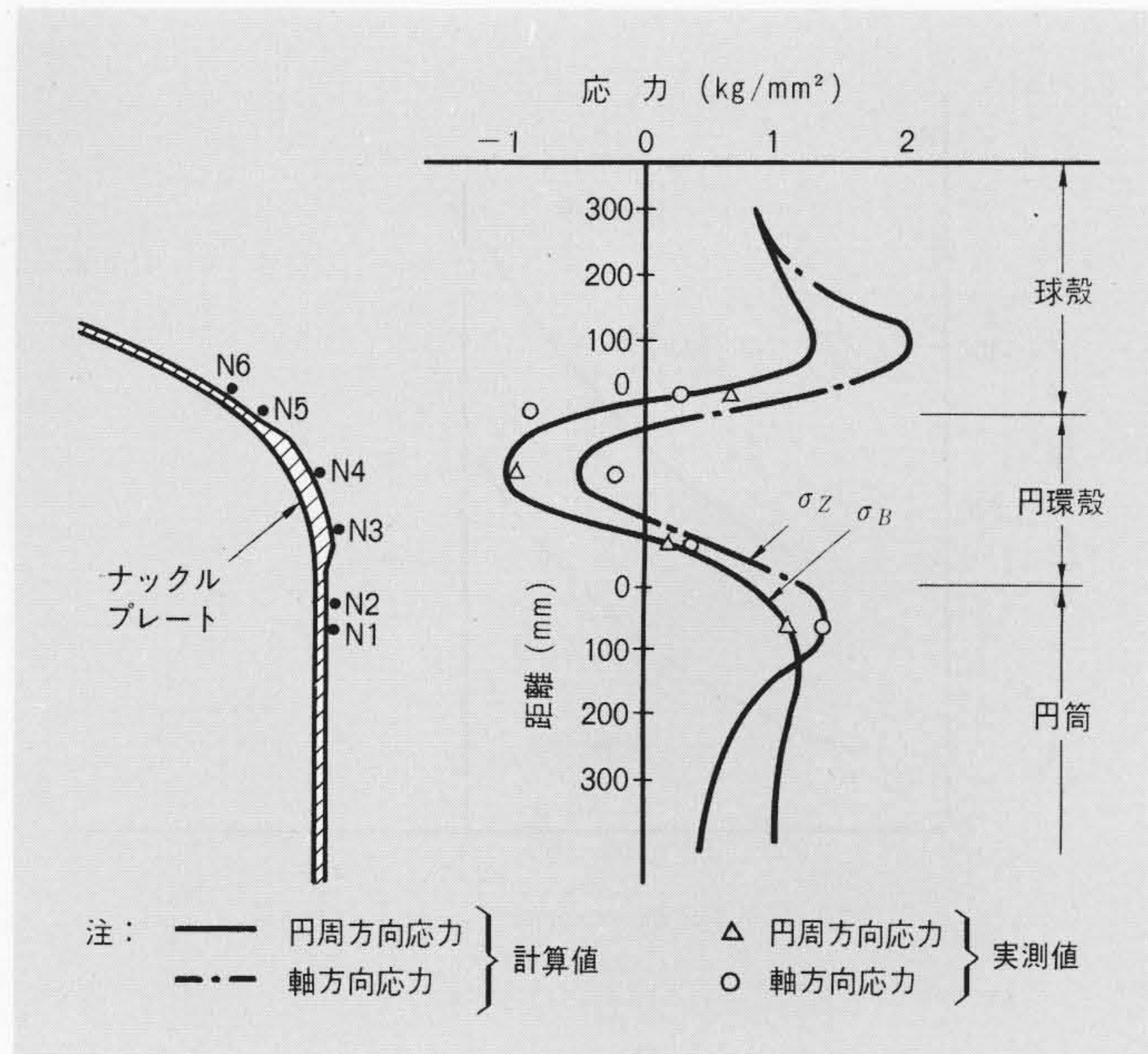


図7 ナックルプレート部の応力分布 実測値と計算値の比較を示したもので、比較的計算値に一致している。

Fig. 7 Stress Distribution of Knuckle Plate

$$m^2 = 12(1 - \nu^2) \frac{\delta m}{E} \left(\frac{l}{t} \right)^2$$

r : 円筒の半径

δm : 平均応力

E : ヤング率

ν : ポアソン比

3.2 耐圧試験時の応力測定

3.2.1 試験方法

耐圧試験は内槽に液体酸素1,000tに相当する水(高さ12.7m)を上部マンホールから注水した後、マンホールを閉じて、圧縮機で容器の上部すきまに圧縮空気を送り込んで、設計圧力の1.5倍の0.15kg/cm²Gまで0.03kg/cm²G間隔で測定した。測定は3回くり返して行ない、再現性を確認した。

3.2.2 測定位置

ひずみゲージはり付け位置は、構造的な不連続部で局部応力が発生する胴部、さらに基礎コンクリートおよびアンカーボルトの合計47点である。

3.2.3 測定結果

図7は球殻、円環殻および円筒から成る「さら形鏡」のナックル部の応力測定結果を示したもので、実線および一点鎖線でシェル理論による計算結果を示した。計算値と実測値はほぼ一致しており、最大応力は約2 kg/mm²である。図8は溶接角変形部の応力測定結果と計算値を比較して示したものである。計算式は矢田の理論式⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた。実測値のほうが周継手、長手継手とも計算値より大きな値となっているが、これは溶接部近傍の局部変形の影響がでているものと考えられる。この測定の結果、角変形部のひずみ集中係数は周継手で3.8、長手継手で2.3となるが、本容器の場合、胴部の公称応力が1 kg/mm²程度の小さい応力なので問題はない。

その他の場所の応力は、底板近傍の胴部で4 kg/mm²、基礎コンクリート1.2kg/mm²、アンカーボルト4.8kg/mm²であった。この結果、いずれも、材料の許容応力(A5083材=8.4kg/mm²)以下に収まっており、強度上問題のないことがわかった。

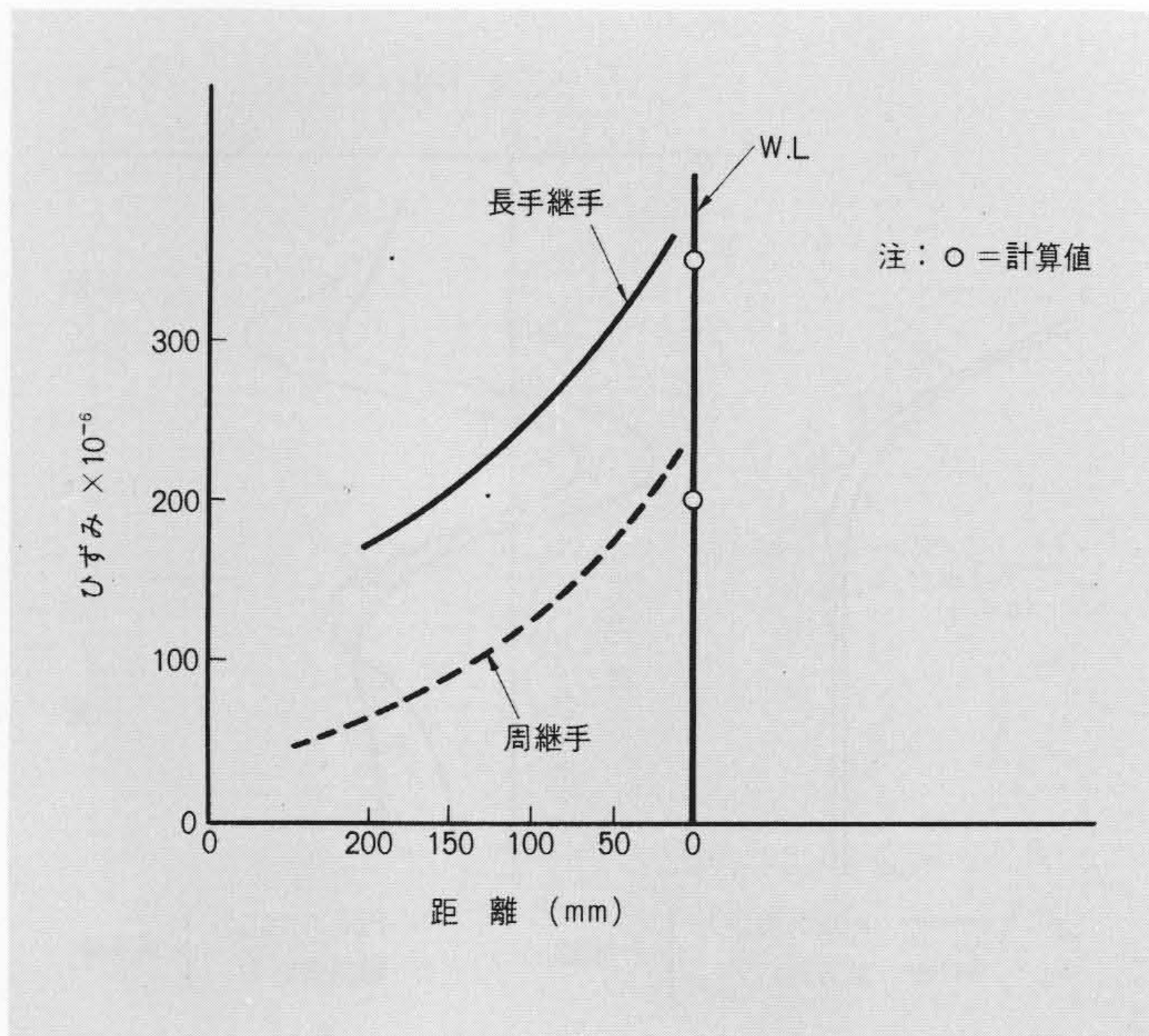


図8 溶接角変形のひずみ集中 溶接角変形部の応力測定結果と計算値を比較したものである。

Fig. 8 Strain Concentration of Welded Angular Distortion

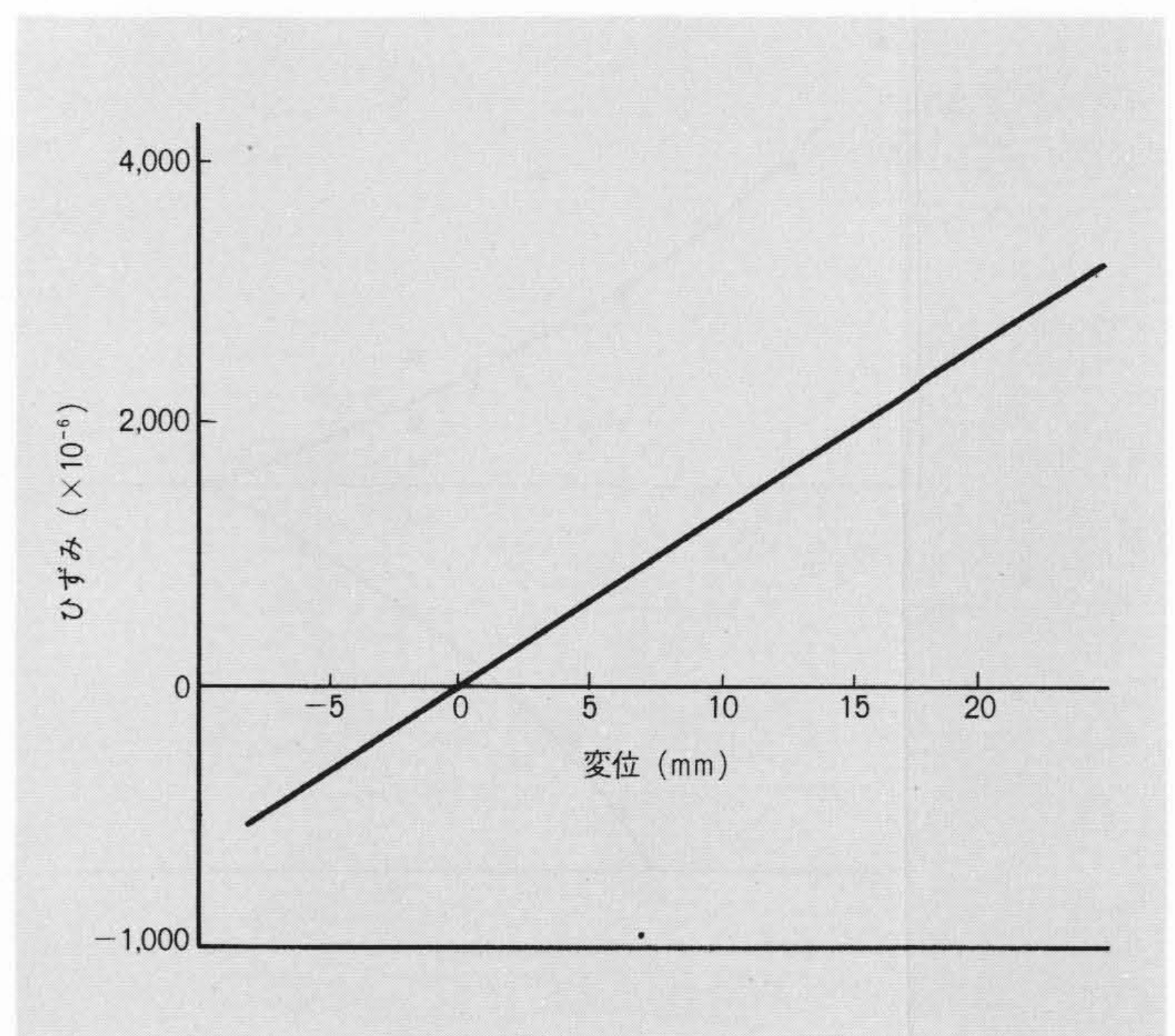


図10 変位計の検定曲線 変位計の薄板リングの変位と検出ひずみの関係を示したものである。

Fig. 10 Approval Curve of Displacement

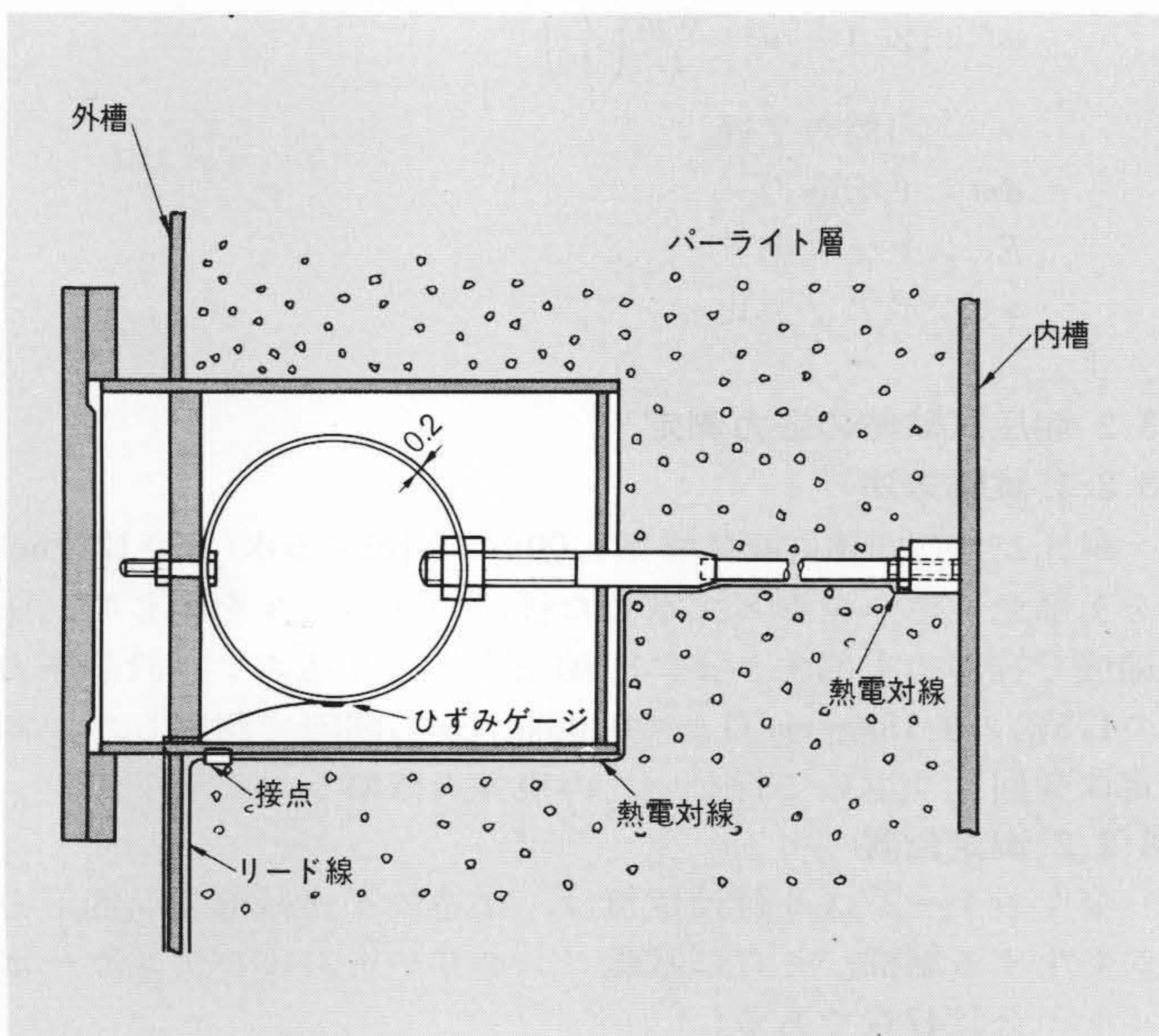


図9 変位計と熱電対線の取付状態 内槽に変位棒を剛結しその変位棒を0.2mm薄板リングに伝達し、リングの変形をひずみゲージで検出し、内槽の変位を測定する。

Fig. 9 Fitting of Displacement Gauge and Thermocouple

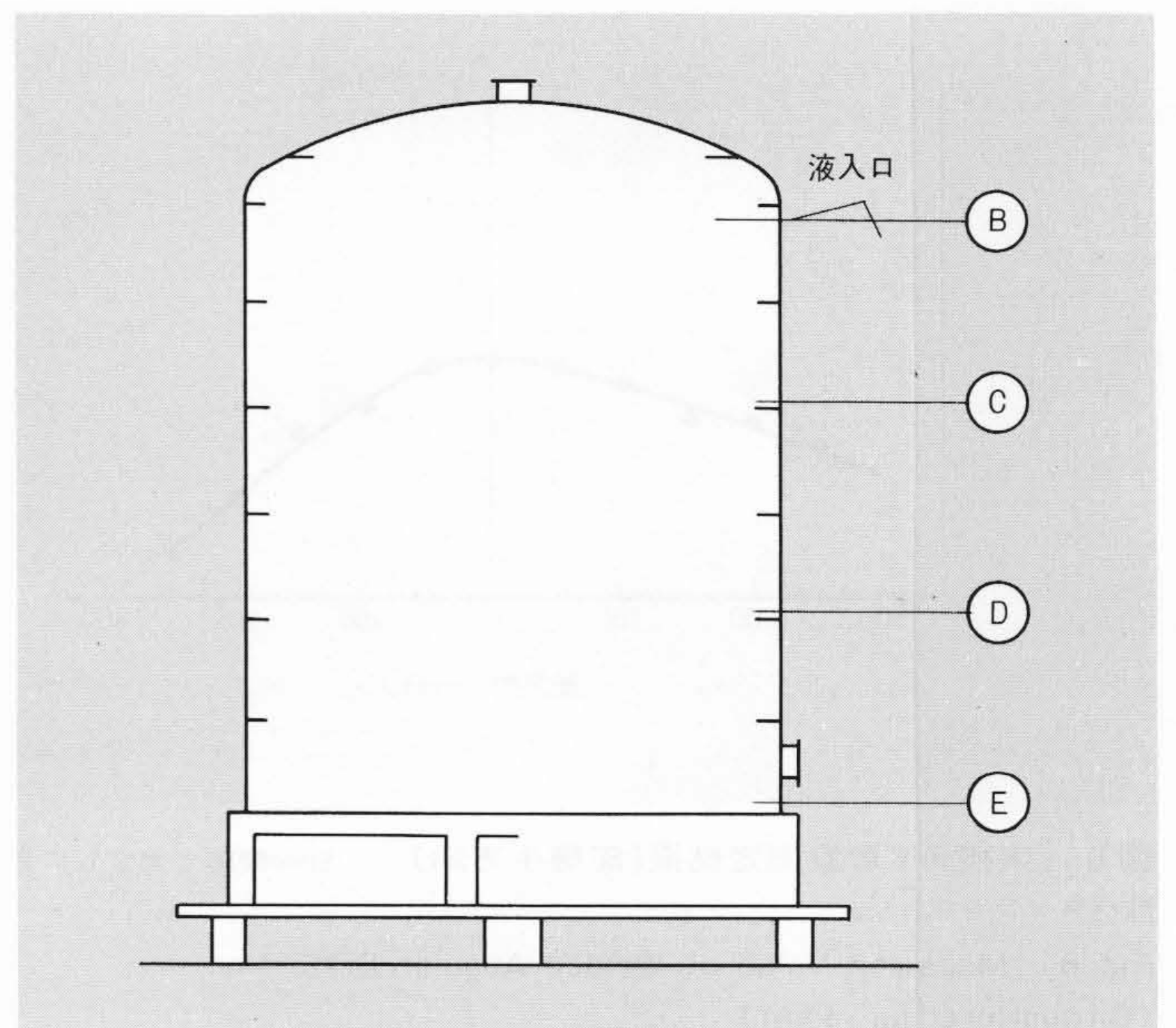


図11 変位および温度の測定位置 内槽の変位測定点は16点、温度測定点は26点である。

Fig. 11 Measured Point of Displacement and Temperature

3.3 クールダウン時の温度と変位の測定

3.3.1 測定方法

クールダウン時における内槽の変位を測定するために、図9に示すような変位計を製作した。これは内槽に変位棒を剛結し、変位棒の変位を0.2mmの薄板のリン青銅リングに伝達し、このリングの変形とリングにはり付けたひずみゲージで検出するものである。薄板リングは図10に示すような検定曲線をそれぞれ求めて、現地で取り付けした後、再度検定し検定曲線が一致することを確認した。内槽の温度はアルメルクロメ

ル熱電対線を図9に示した変位計の変位棒取付区を利用し、座に熱接点をナットで締め付けて固定し、保護ケースの途中に接点を設け、ここで補償導線に接続した。

3.3.2 測定位置

変位の測定点は図11に示すように、内槽上部の液体酸素分配管の位置の⑧部の円周上等間隔に8点、そこから中央上部の⑨部に2点、さらに中央下部の⑩部に2点、最下部の位置⑪部に4点の合計16点とした。温度測定点は上記16点に基づきコンクリートに取り付けた10点の合計26点である。

3.3.3 測定結果

液体酸素を送り始めたときから内槽の温度と変位の測定を開始し、液体酸素が底にたまりはじめ、液酸ブロー弁より液体酸素が出て、ブローさせた後、液体酸素を少しためた時点

まで連続的に測定を行なった。図12は⑧部の温度変化を示したものである。液体酸素は⑦の位置から入り、ここで両側に分岐し、⑧、①の方向と⑥、⑤の方向へ流れ分配管の穴から噴出する。内槽全体の温度が降下するまでは液体酸素は熱を

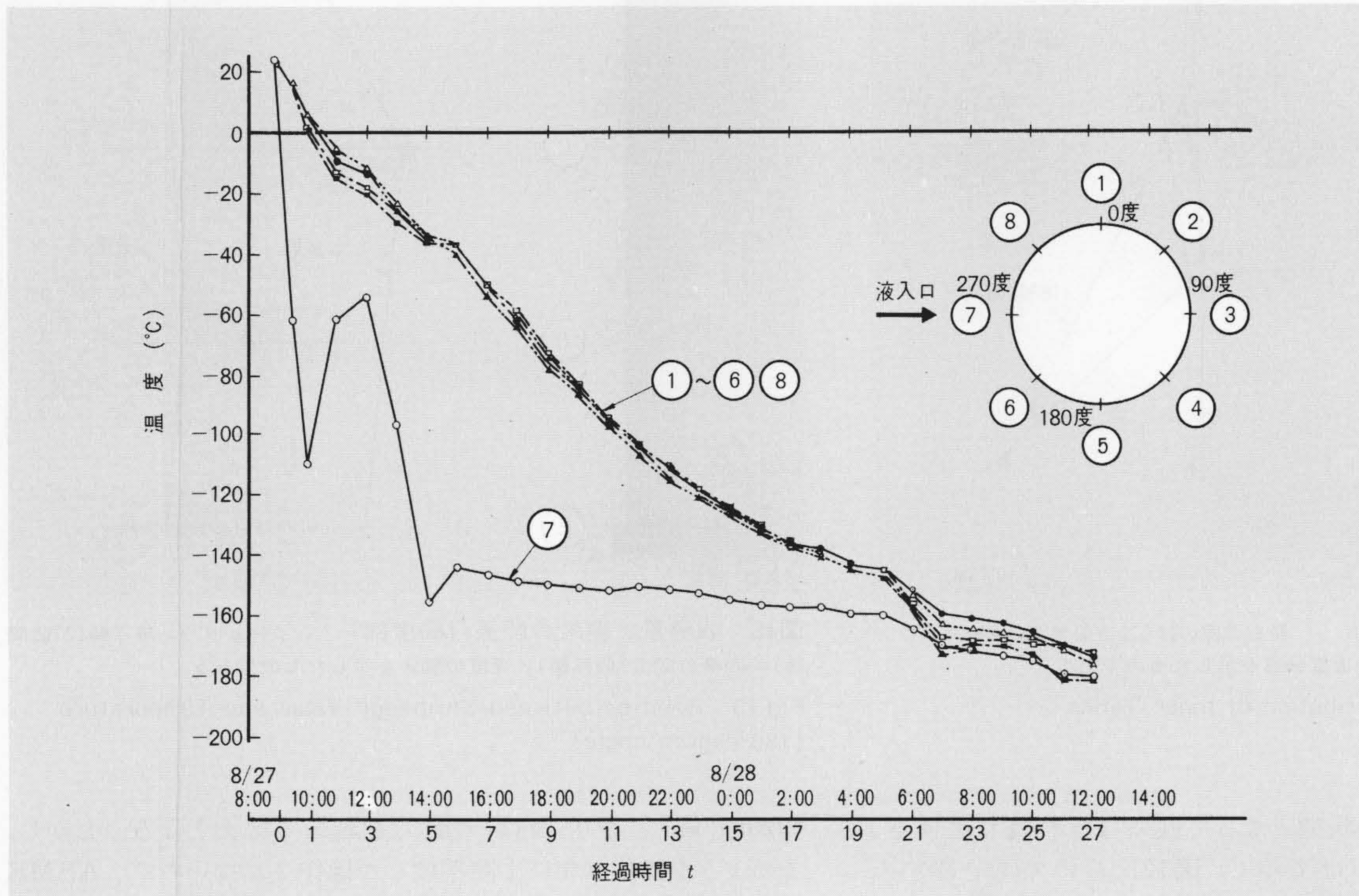


図12 (B)部の温度変化 内槽に液体酸素を送り始めて底に少したまった時点までの(B)部温度の連続測定の結果である。
Fig.12 Temperature Variation of (B) Point

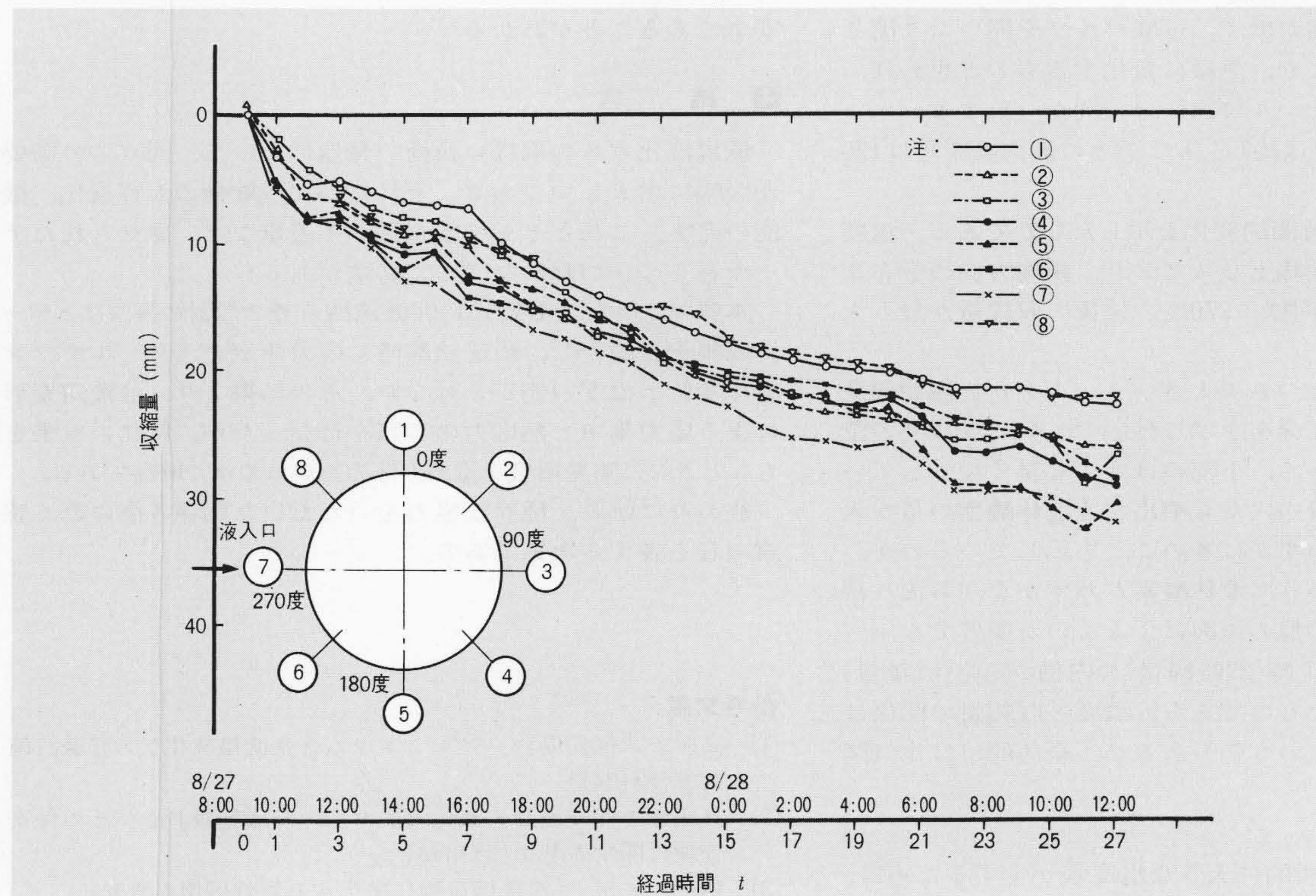


図13 (B)部の変位変化 内槽に液体酸素を送り始めて底に少したまった時点までの(B)部の変位の連続測定結果である。
Fig.13 Displacement Variation of (B) Point

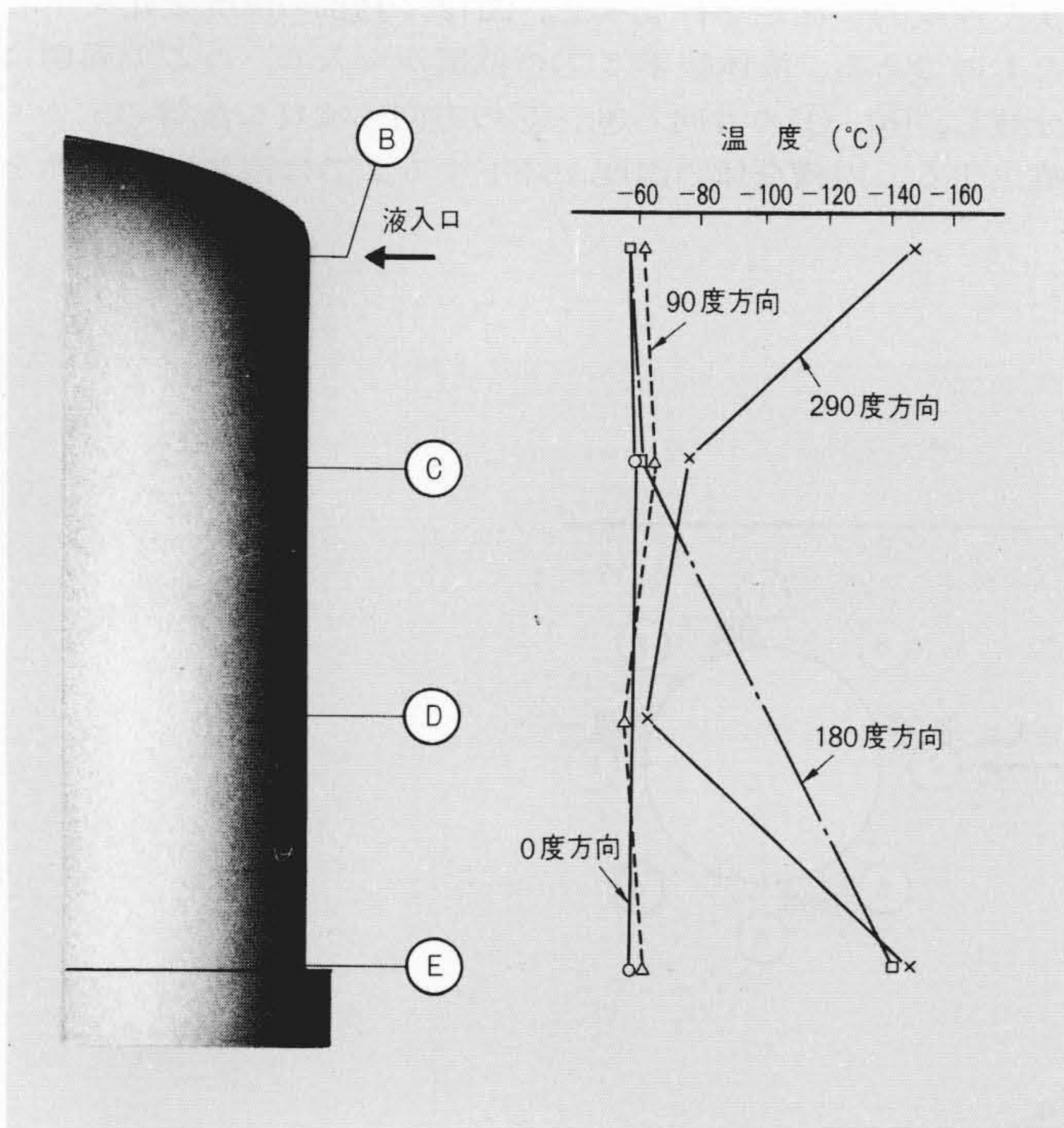


図14 内槽全体の温度分布 最も温度のばらつきの大きいクールダウン開始7時間における内槽全体の温度分布を示したものである。

Fig.14 Temperature Distribution of Inner Tanks

奪われて気化してガスの状態となって底のほうへ降りてゆき、しだいに内槽の温度を下げてゆく。図12において⑦を除いた他の温度はほぼ一様になだらかに低下している。このことは分配管によって液体酸素が、全周に均一に分配されていることを示している。測定点⑦は液体酸素の入口パイプの近くにあるため、この入口までは液体酸素は液体の状態であるために他の測定点よりも温度が低く、送酸バルブを開いたり閉じたりすることの影響により、急激に変化するものと思われ、急激な温度変化の時期とバルブ操作の時間が一致する。

測定結果から冷却速度は約7°C/hで⑦との最大温度差は120°Cとなった。

図13はB部の変位の時間的変化を示したものである。温度曲線と同じような変位曲線となっており、円周方向の分布まではやはり温度の場合と同様に270度の位置の収縮量が最も大きい。

図14は最も温度のばらつきの大きいクールダウン開始後7時間での内槽全体の温度分布を示したものである。270度の位置が最も温度変化が大きく、下部のほうでも早く冷却している。このことは、分配管の穴から噴出する液体酸素の量が入り口パイプに近いほうがわずかに多いことを示しているのか、この位置で内槽面を伝って液体酸素がわずかながら流れ落ちているのか、またその他の原因によるものか明確でない。

図15はクールダウン終了時(27時間後)の内槽の変位(収縮量)と温度との関係を示したものである。温度と収縮量の関係は二、三の場所で一致しないものもあるが、全体的には比例関係となっている。

3.3.4 熱応力の検討

クールダウン時には場所的に大きな温度差が生ずるために、この温度差による応力が問題となる。今回の測定の結果、この温度差は液体酸素入口付近で最も大きく約120°Cであった。この場合、厳格側に考えて完全拘束として熱応力を計算すると

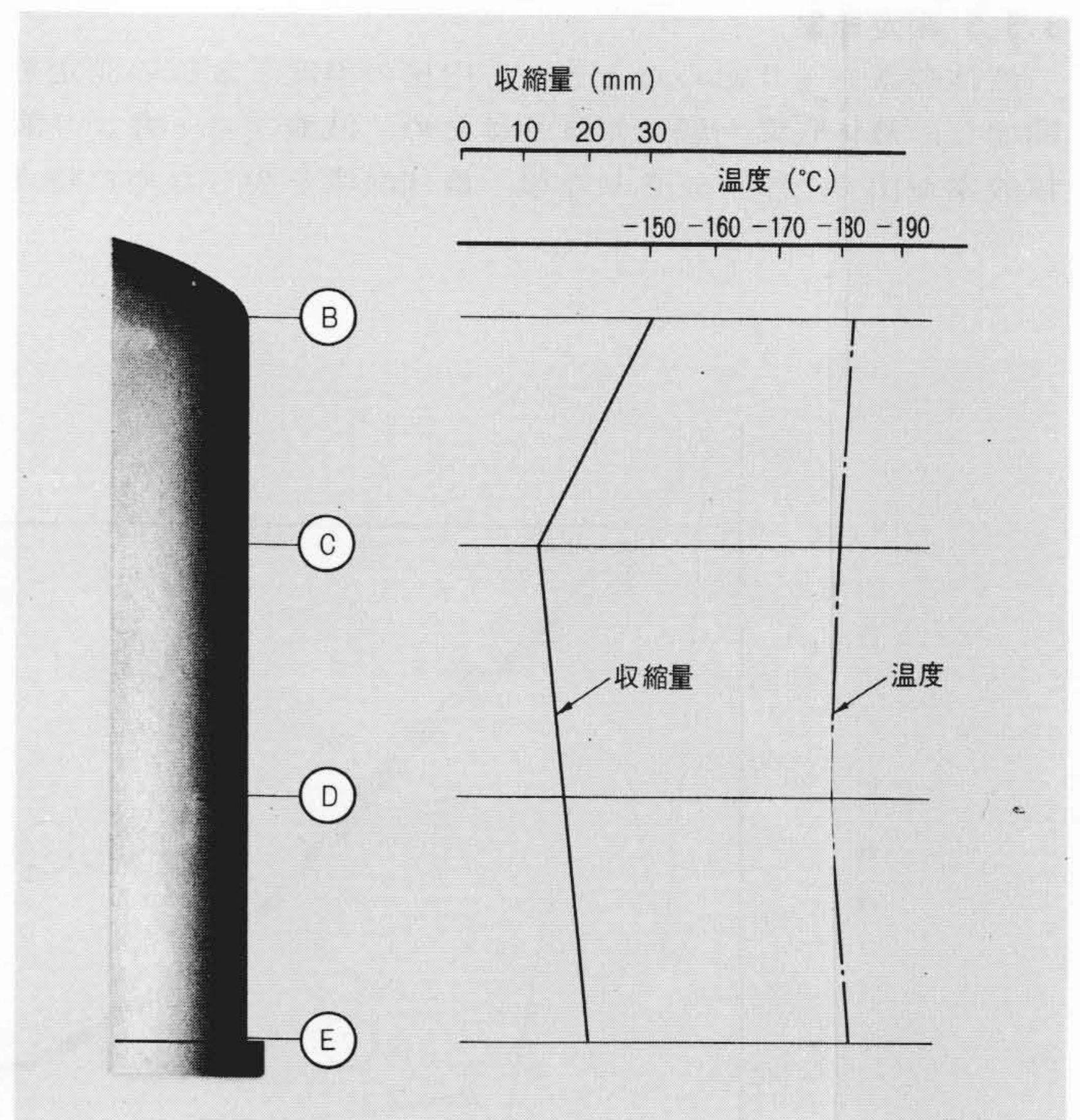


図15 収縮量と温度の関係(180度部) クールダウン終了時(27時間後)の内槽の変位(収縮量)と温度の関係を示したものである。

Fig.15 Relation between Shrinkage Value and Temperature (180-degree angle)

約20kg/mm²となり、材料の耐力を越える応力となる。しかし、このような操作は年に1回程度しか操作されないもので、ASME (American Society of Mechanical Engineers) Sec. VIII Div. 2.に基づいて、この熱応力による疲れ解折を行なうと許容繰返し数は 5×10^2 となる。クールダウンに相当する温度変化は10年間に 1×10 以下と考えられるので、強度的には十分安全であることがわかる。

4 結 言

低温液化ガスの取扱い技術の発達によって、同ガスの需要が大幅に増大しつつある。それにつれ、貯槽の大容量化、機能の充実、これとともに安全性への追求など、課せられたテーマを一つ一つ解決してゆく必要がある。

本報では地上二重殻式1,000t液酸貯槽の設計の裏づけとデータ収集を目的とし、耐圧試験時に応力測定を、クールダウン時に変位と温度の測定を行ない、その結果より、溶接角変形による応力集中と熱応力の考察を行なったが、現在の成果をもっとさらに開発研究を進め、努力を重ねてゆく所存である。

終わりに臨み、種々ご協力をいただいた関係各位に厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 高压ガス保安協会：アルミニウム合金低温液化ガス貯蔵設備基準(昭和41)
- (2) 高压ガス保安協会：液化天然ガスの貯蔵施設およびその保安管理に関する基準(昭和43)
- (3) 秋田、矢田：「溶接構造物に発生する脆性破壊の研究」(第1報)、造船協会論文集第117号(昭和40-6)
- (4) 矢田：「溶接構造物に発生する脆性破壊の研究」(第3報)、造船協会論文集第119号(昭和41-6)