

化学プラント用熱交換器の管端溶接部の強度

Strength of Tube-to-Tubesheet Joints in Heat Exchangers for Chemical Plant

化学プラント用熱交換器は、温度、圧力、腐食環境など使用条件が幅広く、設計・製作に当たって検討すべき問題が多い。とりわけ、管端溶接部は熱交換器の最も重要な個所であり、使用条件に応じた信頼性の高いものが要求される。

本稿は、化学プラントに使用される熱交換器の管端溶接部の強度上の問題点について考察し、これらのうち強度設計に際し重要な管端溶接部の強度解析方法と応力腐食割れの実験結果について述べたものである。

杉原元雄* Moto'o Sugihara
台 宏明* Hirotomo Dai
岡田利彦* Toshihiko Okada
蒲原秀明** Hideaki Kamohara
吉富雄二** Yûji Yoshitomi

1 緒 言

熱交換器は圧力容器の一種であるため、保安上の見地から「ボイラ及び圧力容器安全規則」⁽¹⁾や「高圧ガス取締法」⁽²⁾、あるいは「ガス事業法」⁽³⁾、「電気事業法」⁽⁴⁾、「消防法」など各種の法規が制定され、種々の監督、指導が行なわれている。また、法規とは別に日本工業規格(JIS)⁽⁵⁾、日本石油学会(JPI)⁽⁶⁾、TEMA(Tubular Exchanger Manufacturers Association)⁽⁷⁾などの各種関連規格があり、これらの法規、規格により一般の熱交換器の構造設計は規定される。

しかし、化学プラントに使用される熱交換器は、アンモニア合成やメタノール合成プラントの150~360kg/cm²の高圧で使用されるものから、スチレンプラントの750°C近くの高温や、空気分離プラントの-200°C近くの低温で使用されるものもあり、温度・圧力範囲が非常に広い。また流体の種類も有毒性、引火性流体から、海水のような塩類溶液や酸・アルカリ類溶液などの腐食性物質を含んだ流体まで、使用条件も極めて雑多である。

従って、使用条件の厳しい高温・高圧機器の強度的信頼性をより向上させるためには、法規・規格より一歩進んだ強度設計を行なう必要がある。

上記のような条件下で使用される熱交換器を、強度的な見地から考察した場合、管と管板の溶接部が最も重要と考えられ、設計、製作及び検査に関し、特別の配慮が必要である。このような考えから、本稿では管端溶接部の強度上の問題、すなわち強度設計に際し、最も重要な管端溶接部の強度解析法及び応力腐食割れ並びに管端自動溶接法と管端部超音波検査法について概説する。

なお、製作・検査上の問題に関しては別途言及する予定である。

2 管端溶接部の問題点

従来、熱交換器の管の取付方法はほとんど拡張によって行なわれてきたが、近年、機器の使用条件の過酷化に伴って、拡張だけでは漏れ止めと保持力を確保できないことから、シール溶接、強度溶接、あるいは溶接と拡張とを併用する方法が広く用いられるようになった。溶接、あるいは溶接と拡張との併用による方法は、拡張だけの場合に比較して、管端部の機能は大幅に増大し⁽⁷⁾⁽⁸⁾、溶接が完全であれば漏れることはない。

しかし、管端溶接部は、

- (1) 溶接部の強度設計が難しい。
- (2) シェル側流体が腐食性物質を含む場合、管と管板とのすきまに腐食性物質が濃縮し、溶接の残留応力、運転中の応力などによって応力腐食割れを起こしやすい。
- (3) 管と管板の板厚が大幅に異なる溶接継手構造であり、しかも管ピッチが狭いために溶接施工性が悪い。
- (4) 管の数が多く、溶接品質のばらつきを生ずる可能性が大きい。
- (5) 管と管板の熱容量が大幅に異なるために、製作過程における溶接、熱処理時の温度制御が難しく、Cr-Mo系耐熱鋼などにおいてはS R割れの問題が生ずる。
- (6) 非破壊検査が難しい。

などの問題点があり、過酷な条件下で使用される熱交換器においてはこれらの問題点を考察し、これらを解決することにより、強度的な信頼性を確保することが肝要である。

3 管端溶接部の強度解析

熱交換器の関連法規及び規格では胴、鏡、管板など、各部品の強度計算式や許容応力について規定しているが、前述したように強度設計上、最も問題となる管端溶接部など、各構造部材の接続部の強度計算式や熱応力については、ASME

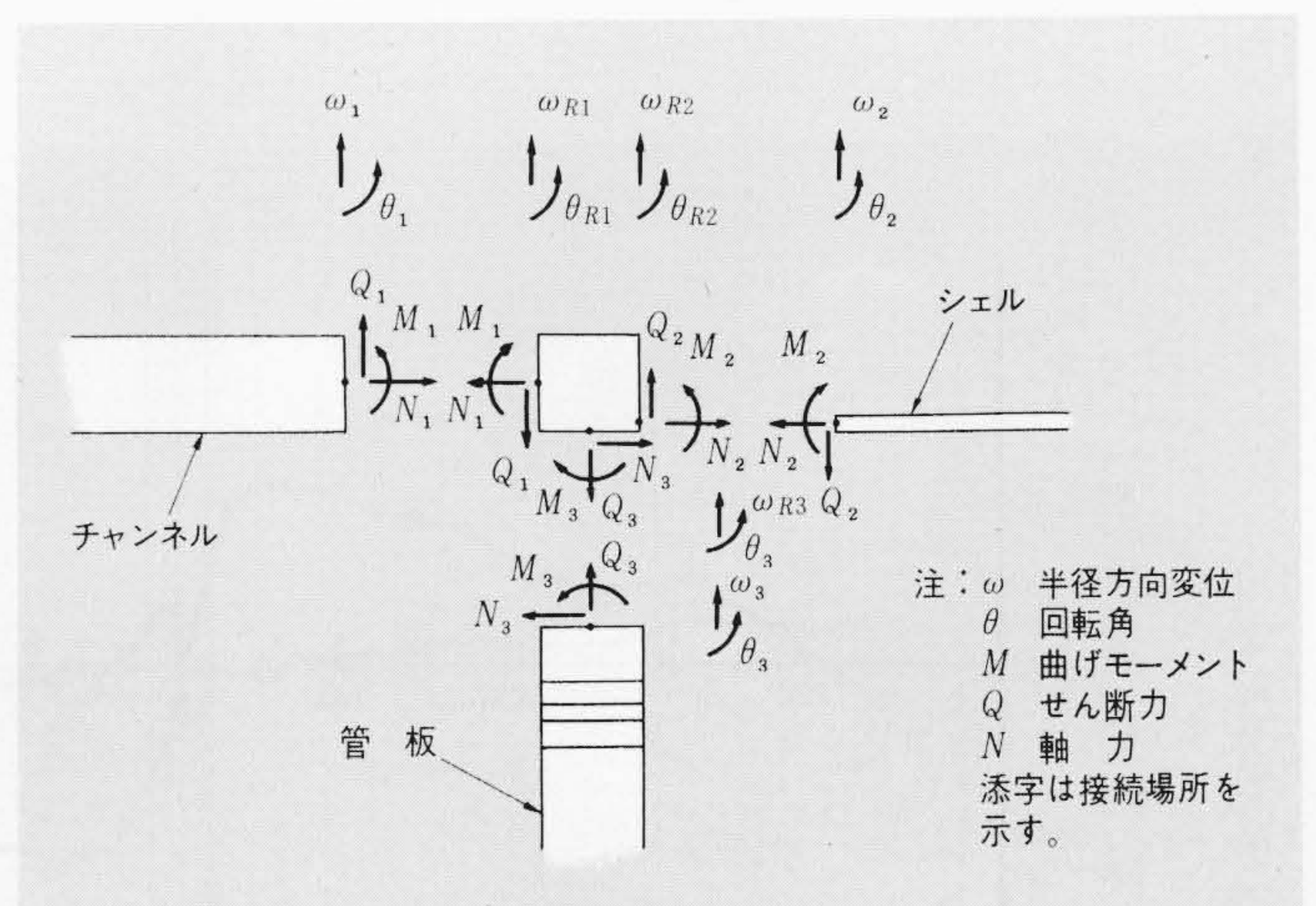


図1 管板部のユニット分割 管板部をユニットに分割して、軸対称殻の問題として解析する。

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所日立研究所

Sec VIII DIV. 2⁽⁶⁾を除いてほとんど触れていない。

ここでは、筆者らが管端溶接部の応力解析に一般に採用しているASME Sec VIII DIV. 2の考え方による方法と、有限要素法による方法について簡単に紹介する。

3.1 ASME Sec VIII DIV. 2の方法

ASME Sec VIII DIV. 2では管穴を数多くもつ管板を、管穴ピッチと管穴間最小間隔との比をパラメータとして与えられる相当弾性係数 E^* 、相当ポアソン比 ν^* の等価な中実平板として扱う。この考え方により、管板部を軸対称殻の問題として解析することができる。

すなわち、管板部を図1に示すようなユニットに分割し、各ユニットの結合部で機械的荷重、及び温度差に起因する各ユニットの変位、変角が連続な条件を与え、各不静定荷重を求める。

管穴縁部の応力は、このような解析法による不静定荷重及び内圧などの静定荷重の関数として求められる。

3.2 有限要素法による方法

有限要素法で管板部の応力解析を行なう場合には、温度分布計算も応力計算と同じ要素分割で行なうことができる。

図2はUチューブ形管内2パス、管外1パスの高温熱交換器(管内450°C、管外310°C)の管板面の温度分布の計算の一例を示す。

図3はこの温度分布による中央部の熱応力分布を示す。この計算では、管板部を管穴十数個を含む要素の大きさで分割しているため、更に一つの要素だけを取り出して小さい要素に分割し、最終的には図4に示すように、管端溶接部の局部応力を求める。

この結果より熱疲労強度、応力腐食割れなどが問題となる管端溶接ルート部(図4中A部)の局部応力を求めることができる。

4 管端溶接部の応力腐食割れ

化学プラント用熱交換器の場合、使用流体に腐食性物質を含むことが多く、管端溶接部は構造的に応力腐食割れを起こしやすい環境にある。⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

応力腐食割れの発生過程を、拡張と溶接を併用した場合について考えると、次のようになるものと思われる。

(1) 運転開始、停止の繰返しや、緊急停止などによる過大荷

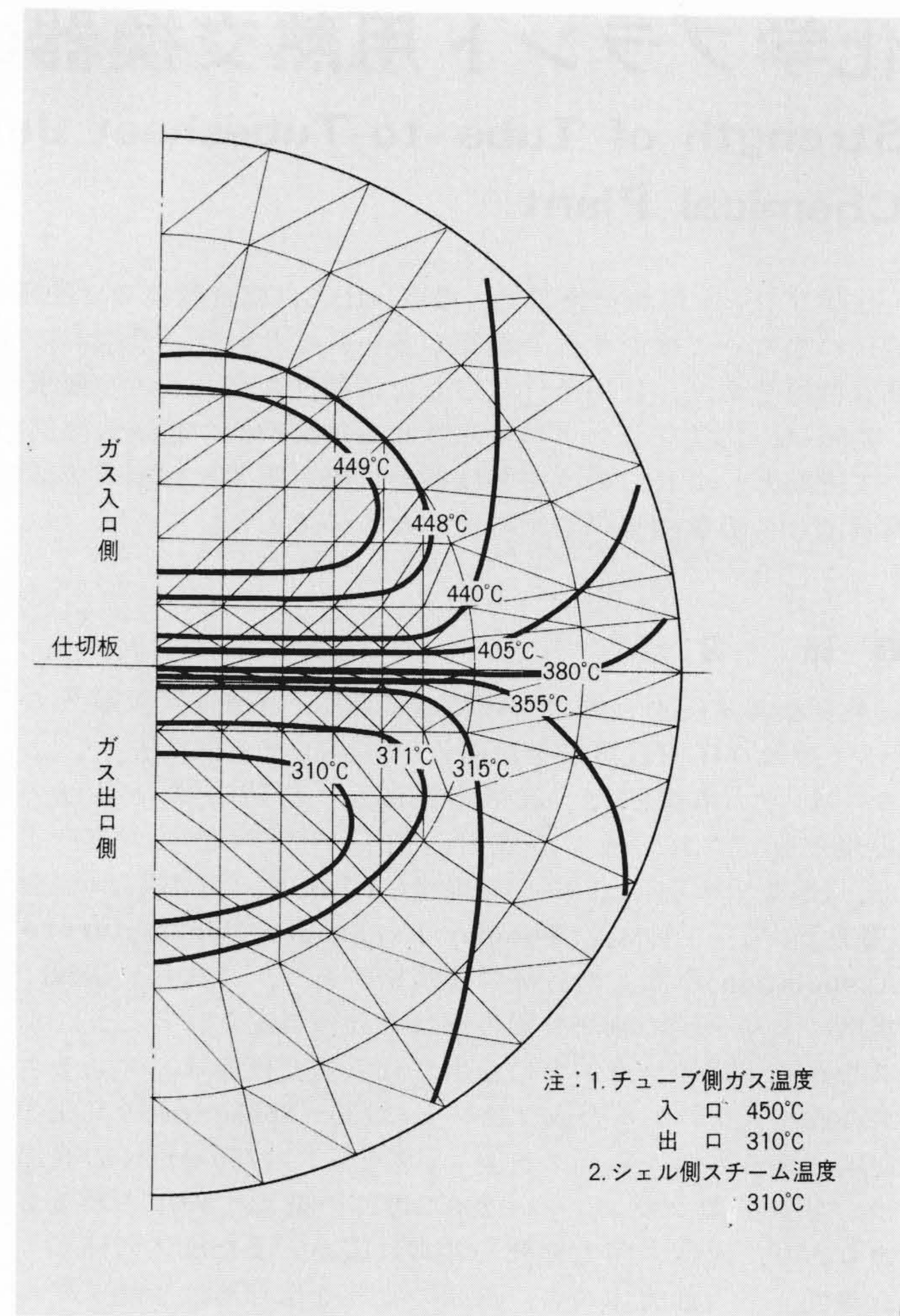


図2 管板面の温度分布 Uチューブ形管内2パス、管外1パスの熱交換器の温度分布の一例を示す。

重が管端部に作用し、拡張部の水密性を保持している拡張の残留応力が緩和されて、拡張部の水密性が低下する。

(2) シェル側流体が管端溶接のルート部へ浸入、腐食性物質が濃縮する。

(3) ルート部の残留応力や運転中の引張応力の作用で、き裂

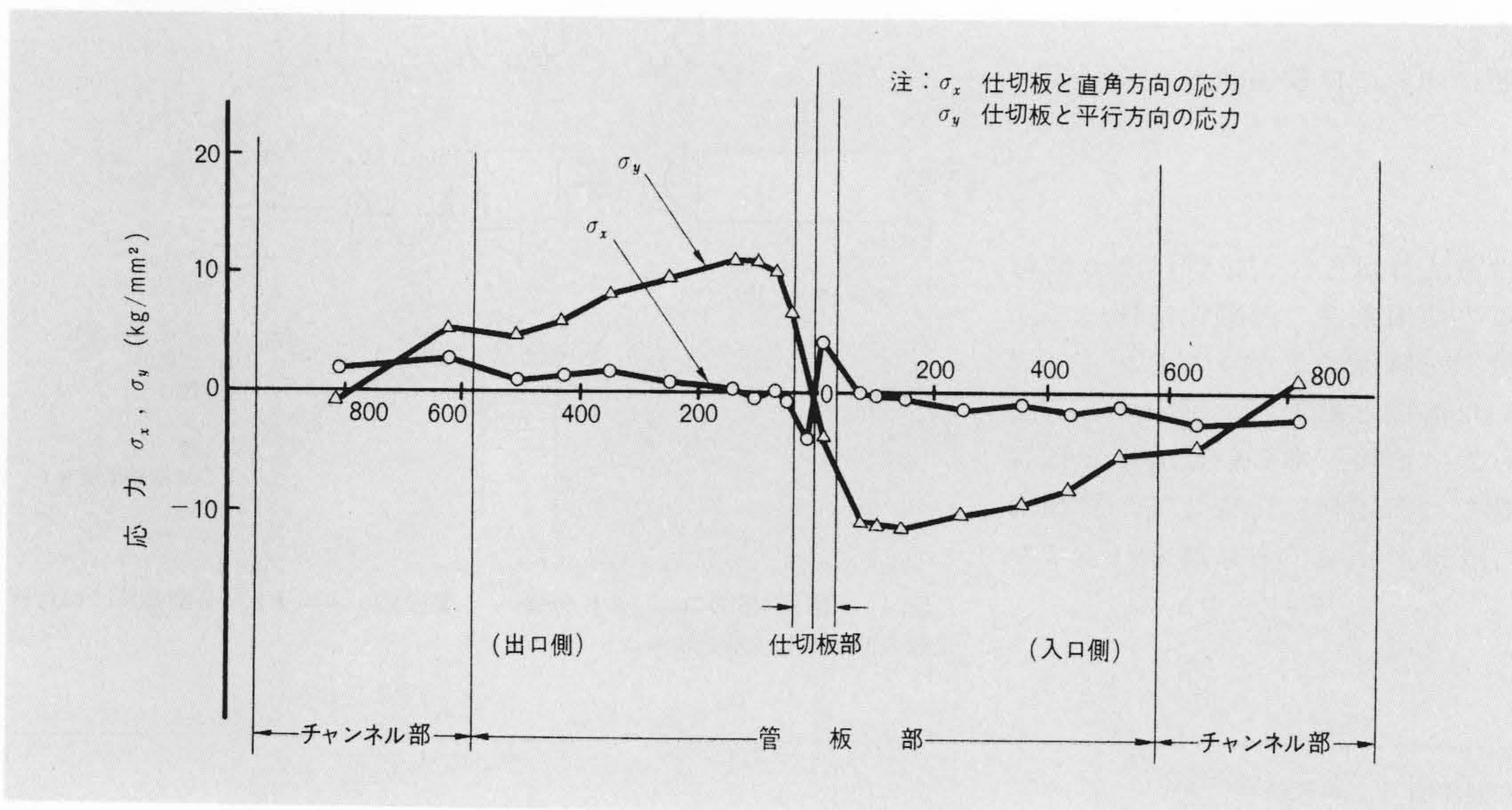


図3 管板面の熱応力分布 図2の温度分布による管板中央部の熱応力分布を示したものである。

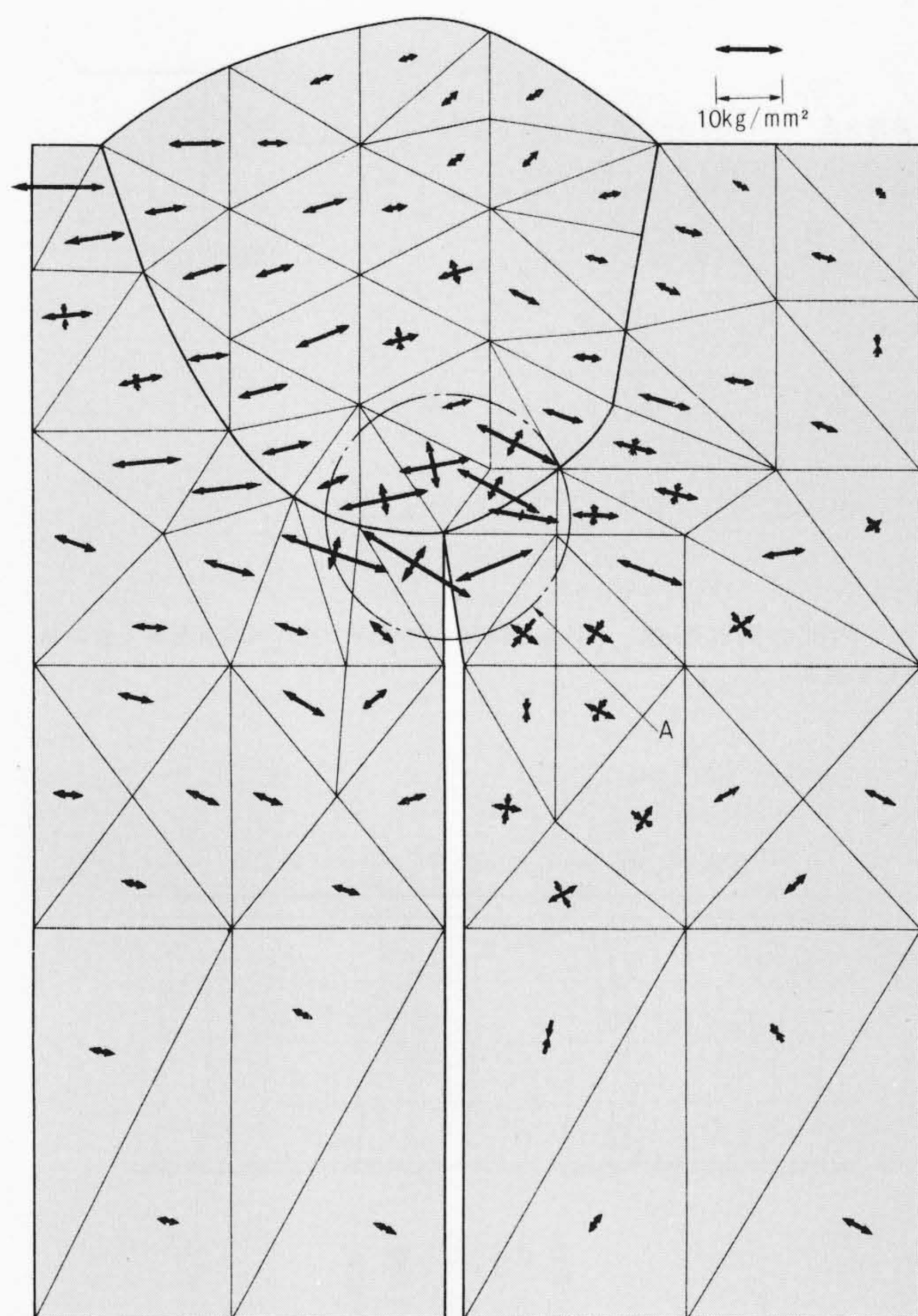


図4 管端溶接部の応力分布 図2の管板要素を更に小さく分割し、管端溶接部のルート部の応力を求める。

が発生、進展する。

4.1 運転開始、停止の繰返しや緊急停止の影響

実機の運転開始、停止の繰返しを想定し、溶接と拡管を併用した管端モデルの管に、引張応力 11kg/mm^2 の繰返し荷重を負荷した後、溶接部を削除して拡管部の保持力を測定した結果を図5に示す。同図から明らかなように、繰返し数とともに拡管部の保持力はほぼ直線的に低下する。

また、実機の緊急停止時の過大応力の発生を想定し、上記と同一モデルの管に大きな引張荷重を負荷した後、溶接部を削除して拡管部の水密性を調べた結果、過大引張荷重が一度作用し、拡管面が滑べることによって拡管部の水密性は大幅に減少することが分かった。

4.2 管端溶接部の残留応力

管端部の残留応力には、管の軸方向の伸縮や管板の変形などによって生ずる巨視的な残留応力と、管端部及びその近辺に生ずる局所的な残留応力とがあるが、ここでは応力腐食割れを支配すると考えられる局所的な残留応力について述べる。

管端溶接部の残留応力は次の手順で求められる。

- (1) 管端溶接部と管内面にひずみゲージをはり付け、溶接及び拡管の拘束を解放し、解放後のひずみを測定する。
- (2) 測定したひずみの値から、管端溶接部に作用する不静定荷重を推定する。
- (3) それら不静定荷重の関数として、管端溶接部の残留応力を求める。

このようにして求めた管端部の残留応力分布の一例を図6

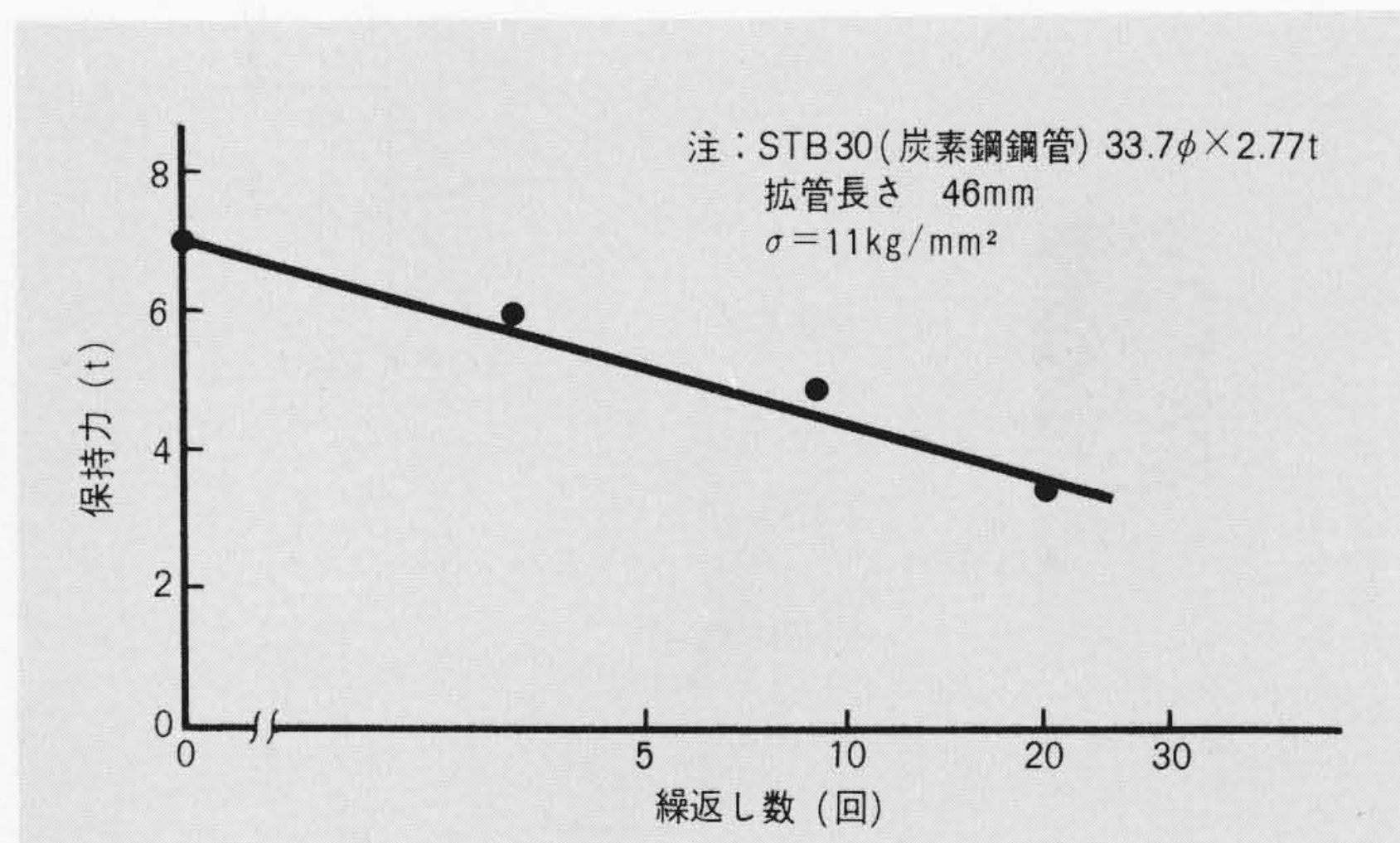


図5 繰返し荷重の影響 繰返し数とともに、拡管部の保持力は直線的に減少する。

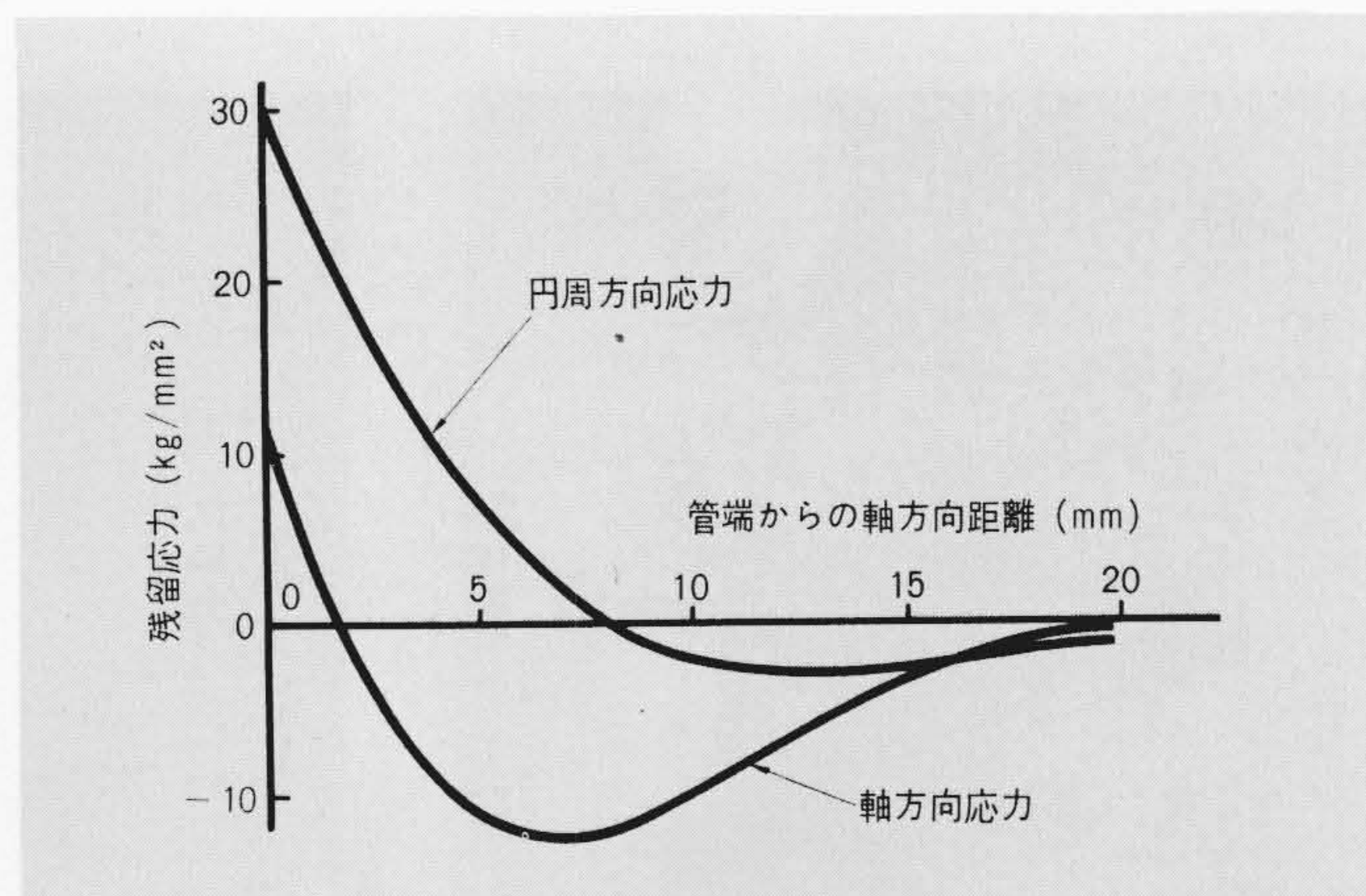


図6 管端部の残留応力分布 管端溶接部には、降伏点近くの引張残留応力が残存している。

に示すが、溶接のままだでは材料の降伏応力近傍の引張残留応力が残存していることが分かる。

4.3 応力腐食割れ試験

管端部の応力腐食割れを実験室的に再現させることは困難であるため、濃度の高い腐食液を強制的に管端溶接ルート部まで浸入させる、静的浸せき試験法(ピーカー試験法)で応力腐食割れを発生させた。

SUS304製の管端溶接部モデルについて、42% MgCl_2 沸騰水溶液中での応力腐食割れ試験を行なった結果を図7、8に示す。

図7は、溶接後拡管した場合の管端溶接ルート部の割れ形態を示す。割れは溶着金属と管板母材の境界を進展している。図8は拡管後溶接した場合を示す。割れは溶着金属と管の熱影響部に進展している。

この割れ形態と残留応力の分布を比較すると、溶接後拡管した場合の溶接ルート部の残留応力は、軸方向は引張応力、円周方向は圧縮応力となっており、軸方向の引張応力によって割れは円周方向に進展している。

一方、拡管後溶接した場合は、円周方向の引張応力によって割れは軸方向に進展している。両者の割れ発生までの時間は、溶接後拡管した場合112時間、拡管後溶接した場合65時間であった。このように割れ形態が残留応力分布に支配されていることが明確になり、設計段階で実機の構造モデル、使用環境により、この種の検討を行ない応力腐食割れに対する安全性を検討することができる。

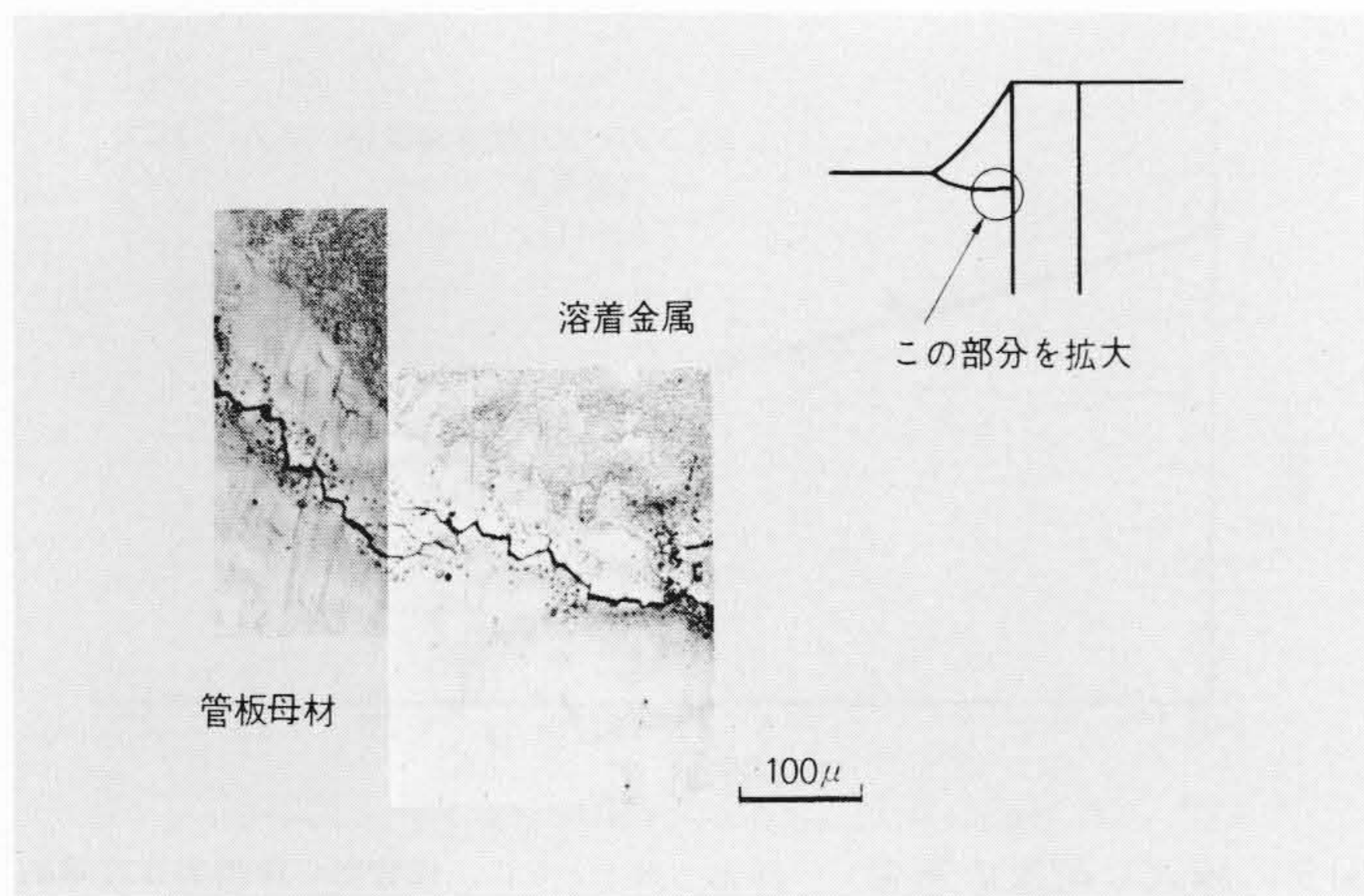


図7 内部の割れ形態 溶接後拡管した場合、割れは溶着金属と管板母材の境界を進展している。

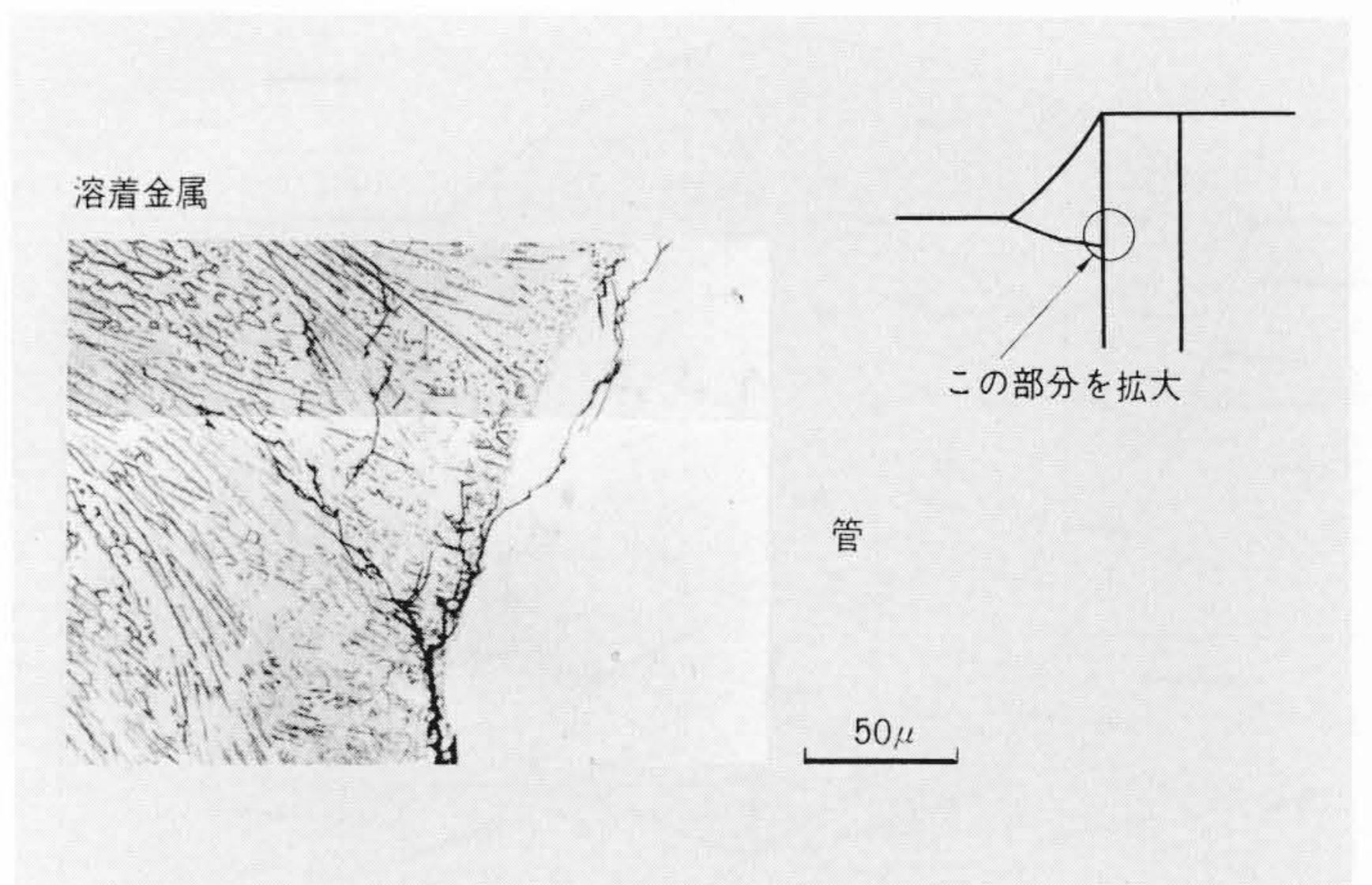


図8 内部の割れ形態 拡管後溶接した場合、割れは溶着金属と管の熱影響部を進展している。

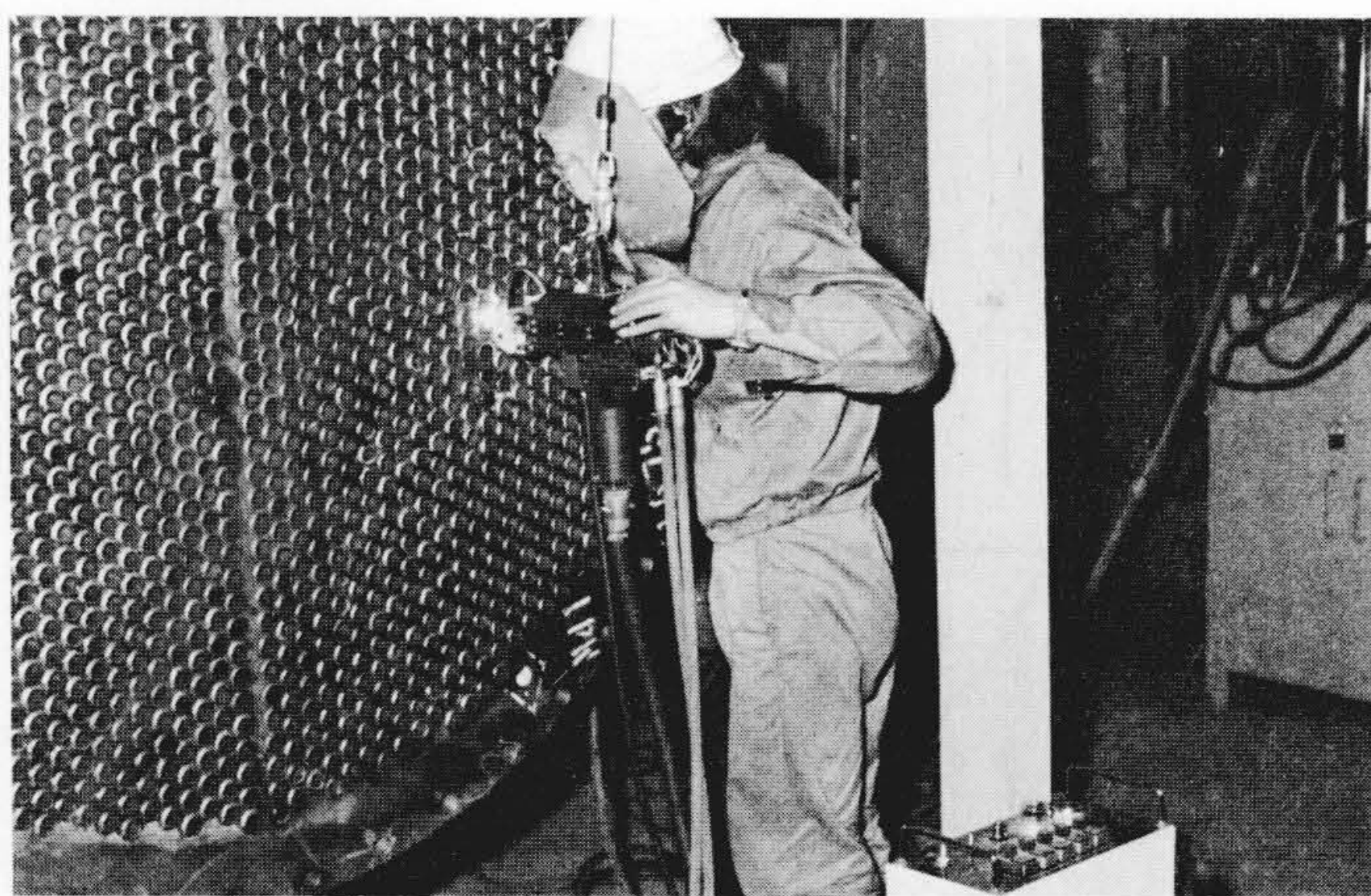


図9 管端自動溶接機 溶接ヘッド及び溶接状況を示す。

5 管端自動溶接法及び超音波による自動検査

以上、述べたように管端溶接部は強度上、又は腐食環境の面より見ると、厳しい条件にさらされていることが分かる。従って、溶接品質は高級なものでなければならない。そこで、図9に示す管端自動溶接機を開発した。この溶接機は、溶接条件が自動制御され、均質な溶接部が得られる機構となっている。特にこの溶接機の特徴とするところは、管の内壁温度を自動的に測定し、この温度を溶接条件にフィードバックする点にある。すなわち、管の外径、肉厚のばらつきにより、溶け込み不良や溶け込み過ぎが起こりやすいが、この自動溶接機では溶接部温度のフィードバック機構により、このようなトラブルは全く生じない。このための検査装置は管の内壁に沿って、360度回転する超音波プローブと、このプローブを管にセットするデジタル位置決め装置及び欠陥検出レコーダより成る。この検査装置により、管端溶接部は自動検査され、欠陥の種類、有無を確認することができる。図10はその比較波形の一例である。これにより、自動溶接装置及び検査装置を適用して高品質の管端溶接が能率的に得られる。

6 結 言

以上、管端溶接部の問題点のうち、管端溶接部の強度解析方法、管端溶接部の応力腐食割れ及び管端自動溶接並びに超音波による検査について概説した。

紙面の都合で本稿では触れなかったが、管端部の溶接方法、

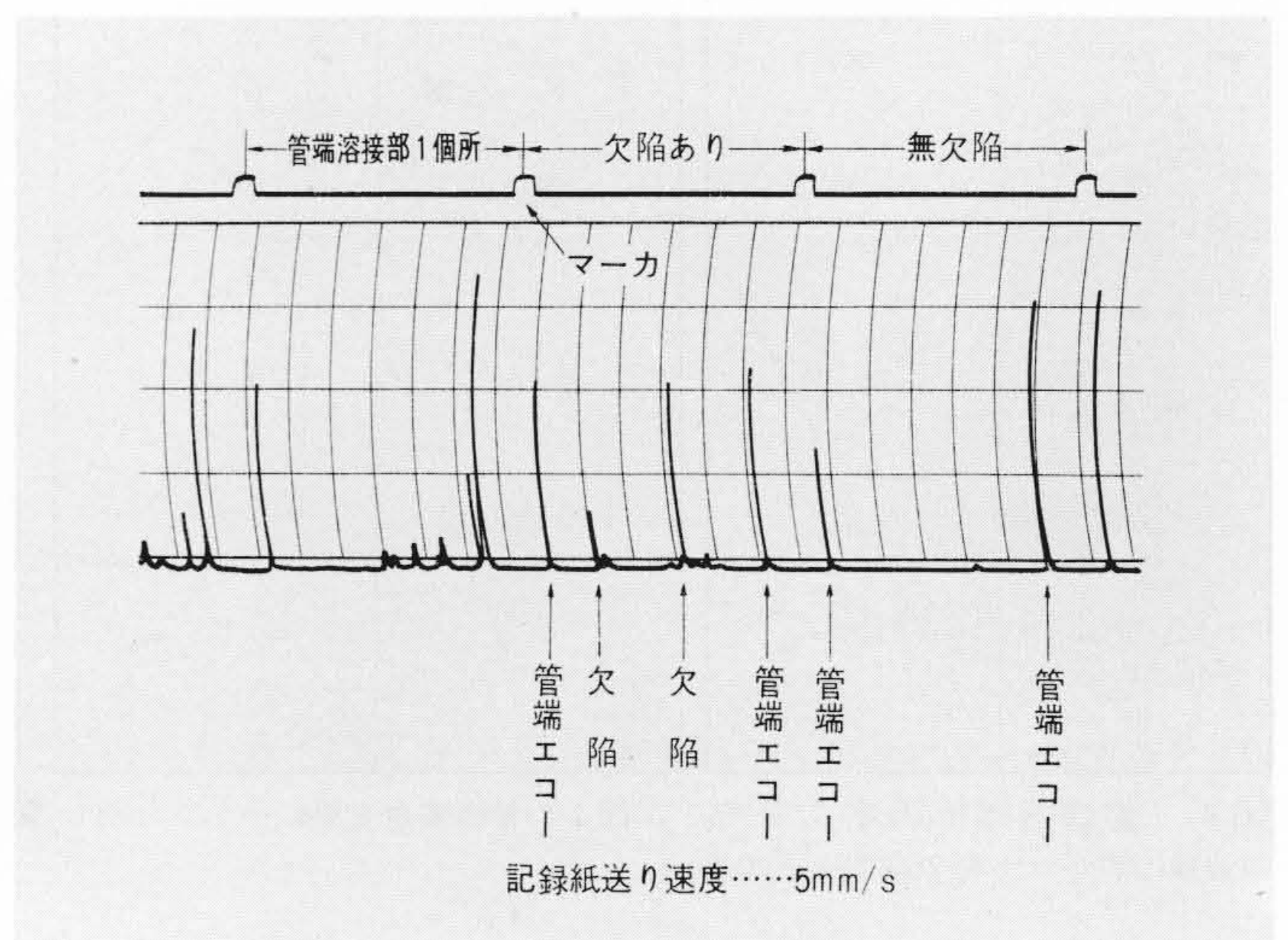


図10 超音波検査装置による管端溶接部の欠陥検出結果の例
本図は、管端接続部を超音波検査装置により検査した場合の欠陥検出記録を示したものである。図に示す上側の線の凸形マーク間の距離は、超音波探傷プローブが360度回転した場合の距離に相当する。また、下側の線は、溶接欠陥の有無を示すエコーを表わし、欠陥のある場合には、欠陥エコー波として記録用紙上に自動的に記録された。

熱処理方法、非破壊検査方法などについても、研究の成果や、製作実績を採り入れた作業基準により、品質の完璧を期している。これらの問題については別の機会に言及したい。

参考文献

- (1) 労働省「ボイラー及び圧力容器安全規則」
- (2) 通商産業省「高圧ガス取締法」
- (3) JIS B-8249-1972 一般化学工業用多管円筒形熱交換器
- (4) 日本石油学会 JPI-7S-33-72 多管円筒形熱交換器の構造
- (5) Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2
- (7) 奥村、怒和「熱交換器の管端構造について」化学装置(昭41-9)
- (8) 氏家ほか「熱交換器の漏れ止め溶接に関する問題点」三菱重工技報 2, 6 (昭40-6)
- (9) 大西ほか「高温水中におけるステンレス鋼熱交換器の応力腐食割れ」防食技術14, 8 (昭40-8)
- (10) 栄ほか「ステンレス熱交換器の応力腐食割れ」防食技術13 4, (昭39-3)