

501.32
SU

腐食鋼板の表面形状と応力・強度・変形能の関係に関する研究

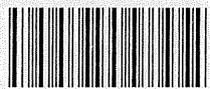
(研究課題番号 14350519)

平成14年度～平成16年度 科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成17年5月

横浜国立大学附属図書館



11643566

研究代表者 角 洋一

(横浜国立大学教授 大学院工学研究院)

はしがき

無塗装材の場合あるいは、塗装が劣化した経年構造物の鋼板の場合、板表面の腐食は、初期には腐食ピットがランダムに発生し、それが順次合体して進行すると考えられる。したがって、腐食面は一様な板厚減少を生じるのではなく、不規則な凹凸を持った表面を形成する。腐食の程度は一般に平均的な腐食速度で論じられることが多いが、強度評価の観点からの表面形状の不規則性の影響について現在のところ知見は極めて少ない。

不規則な表面形状による応力集中を伴う応力分布の解析については、現状の有限要素法などの数値解法では自由度が過大となり実際の結果を得ることのできる手法とは言えず、より合理的な解析手法の確立が望まれている。また、衝突・座礁時の鋼板の破断特性に関係して腐食鋼板は破断時の伸び（変形能）が小さく危険な可能性があるが、これを定量的に予測する数値解析技術が現状では無い。このような状況を踏まえ、本研究では、不規則な腐食平板の表面形状の不規則表面形状を数値的に再現し切削加工により同じ形状の表面を持つ試験片を製作する手法を確立するとともに、この種の引張り試験における寸法効果、標本寸法影響を実験的に解明する。

腐食部にしばしば観察される疲労き裂は、腐食表面の凹凸による応力集中部に発生する。したがって、腐食鋼板の表面凹凸による応力分布を理解することが重要となるが、このような複雑形状に対する効率的な応力解析手法が存在しない。この種の表面凹凸は板厚に比べオウダが小さいので、本研究では、表面の凹凸を平面からの摂動として扱う第1摂動法を新たに開発する。

上記の問題は疲労に関係した弾性解析であるが、一方破断特性に関しては、たとえ腐食材であっても、機械加工した試験片を用いると、その強度や延性は素材のそれと一致することが知られている。一方、素材に比べ、腐食した凹凸面をそのままに残した試験片では、降伏強度はほぼ同一レベルにあるもののその後の強度、特に破断時の伸びが大幅に低下することが指摘されている。腐食材の変形能の低下は表面不整による幾何学的影響として理解すべきであるが、現状ではこの問題について定量的把握ができていない。腐食材の応力-ひずみ関係は試験片の寸法にも依存する。なぜなら、表面形状不整は確率分布しているため、大きな試験片ほど大きな腐食による凹部を含む確率が高いからである。本研究では、腐食平板の表面形状を精密に実測し、機械加工によりそれと同じ表面形状を持つ各種寸法の平板の引張り試験を行うことにより、その寸法効果、標本寸法影響を解明した。

経年船や経年海洋構造物をそのライフサイクルにわたっての合理的に維持管理するためのライフサイクル・デザインの重要性が認識され始めたが、腐食の取扱いは一般に一様な板厚減少として扱われている。最近になって不均一な衰耗の座屈・最終強度への影響が論じられるようになったが、引張に対する影響を論じた研究は見られない。経年船の損傷は腐食と疲労き裂が混在しており、このような構造が衝突や座礁によって大規模破壊を生じたときの破壊状況を巨視的に見ると、十分塑性変形を生じず延性に欠けた破壊をしているように見えることが多い。これが、老朽船からの油漏洩などによる海洋環境汚染が拡大す

るひとつの原因である可能性があり、このような観点から本研究の社会的ニーズを理解する必要がある。

材料強度に及ぼす腐食の影響は腐食層近傍の金属組織に及ぼす化学変化と、もう一つは表面に形成される凹凸などの幾何学的不整である。軟鋼の場合、海水環境下では特にぜい化が起きる化学反応は無いとされており、また腐食層近傍の材料組織を観察しても母材と特に変化した組織は見られないことが知られている。また、強度についても、腐食材から研磨した標準試験片を作成し、引張試験を行うと十分な強度と延性を示すことが知られている。本研究は表面に形成される凹凸などの幾何学的不整による応力分布、引張り強度と変形能の低下に着目した初の基礎研究である。

研究組織

研究代表者：角 洋一（横浜国立大学教授 大学院工学研究院）

研究分担者：川村恭己（横浜国立大学助教授 大学院工学研究院）

和田大志（横浜国立大学助教授 大学院工学研究院）

研究経費

平成14年度	2,300,000 円
平成15年度	10,100,000 円
平成16年度	2,200,000 円
計	14,600,000 円

研究発表

(1) 学会誌等

1. 角 洋一、構造健全性のライフサイクル管理、日本造船学会誌、882, 2004, pp.49-52.
2. 川村恭己、藤田英理、菊地泰史、角 洋一、船体構造保全情報システムのための要素技術に関する研究—Express-X を用いた強度解析モデル生成手法—、日本造船学会論文集、194, 2003, pp.151-159.
3. 川村恭己、牧野杉雄、角 洋一、船体構造保全情報システムの研究—STEP 技術を用いたデータベース構築と腐食損傷に関するシステムの試作—、日本造船学会論文集、192, 2002, pp.601-609.
4. Y. Sumi and A. Rahbar-Ranji, Stress analysis of an undulated plate by the combined first order perturbation and alternating method, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 189, 2001, pp.225-230.

(2) 会議発表等

1. Y. Kawamura and Y. Sumi, A study on an information system for structural integrity of ships —STEP Technology based proto-type system for evaluation of corrosion damages—, Proceedings

of the 9th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Volume 2, Schiffbautechnische Gesellschaft e.V., Hamburg, 2004, pp.997-1004.

2. Y. Sumi and A. Rahbar-Ranji, Stress analysis of an undulated plate by the combined first order perturbation and alternating method, presented at the 39th Annual Technical Meeting of the Society of Engineering Science, October 13-16, 2002, The Pennsylvania State University, p.15-15.

(3) 出版物

1. 高橋幸伯、町田 進、角 洋一, 基礎材料力学、培風館、2004.

目次

第1部 腐食鋼板の表面形状と強度・変形能の関係

第1章 序論	7
1.1 研究の背景	7
1.2 研究の目的	7
第2章 鋼板の静的強度・変形能に及ぼす孔食の影響とその寸法効果	9
2.1 孔食の再現試験	9
2.2 試験結果と考察	19
第3章 鋼板の静的強度・変形能に及ぼすピット配置と板厚影響について	
3.1 引張試験片	33
3.2 引張強度及び破断伸びに及ぼすピット配置の影響	38
3.3 板厚の影響	40
3.4 まとめ	41
第4章 全面腐食鋼板の表面形状計測とその再現加工試験	
4.1 表面凹凸形状の計測とその再現加工	42
4.2 強度・延性試験	58
第5章 結論	84
参考文献	85
付録1 腐食表面再現加工法	86
付録2 ミルシート	91

第2部 表面形状と応力の関係・その他

構造健全性のライフサイクル管理	95
表面形状と応力の関係	101

第 1 部 腐食鋼板の表面形状と強度・変形能の関係

第1章 序論

1.1 研究の背景

1997年1月2日、島根県隠岐島沖の日本海においてロシア船籍原油タンカー「ナホトカ号」が折損沈没事故を起こした。この事故において流出した原油は約6,240kl(推定)と報告され、1府8県においてその漂着油が確認されている[1]。事故調査委員会によると事故原因は、腐食衰耗による上甲板および船底の鋼板板厚の減少による縦強度不足であるとのことである[2]。

一般に船舶などの海洋構造物は就航後、常に腐食環境にさらされ、経年劣化は避けられない状況に置かれる。バルクキャリアの船体構造に報告された損傷を、損傷の形態により「変形」、「亀裂」及び「腐食」に大別し、各船齢毎にそれぞれの損傷の占める比率が報告されているが[3]、船齢が10年を越えて生じる船体損傷の大半が腐食衰耗によると言っても過言ではない。つまり、船舶にとって腐食衰耗は切り離せない関係となっている。この腐食衰耗により船体折損事故の原因となるような著しい強度低下が引き起こされるとすれば、これは船体管理上の重要な問題の一であると共に、海洋環境保全の観点からも大変重要な問題であることがわかる。ここで重要なことは、船齢というパラメータで全てを区分し、評価することではなく、腐食による強度・延性低下の適切な予測を行うことである。それゆえに船舶や、その他の構造物などの残存強度や余寿命の評価を行うには、腐食の実態を把握し、局所的な腐食衰耗が全体的な強度に及ぼす影響を知ることがぜひとも必要である。

このような背景のもとに、近年腐食鋼材における強度調査が実施されてきている。しかし一方で、計測に基づいて強度を推定する際、実物を強度実験することは困難なため、縮尺模型試験片を用いて評価することになる。しかし、これまでの研究では縮尺模型試験片で得られた結果がそのまま実物大の大きさのものに生かせるか否かについて必ずしも明確な結論が得られていない。腐食による鋼材そのものの引張り強さの低下がないとすれば応力-ひずみ関係は相似試験片において一致すると考えられるが、実際には寸法効果の存在も否定できないため、これらの問題を解明した上で実験結果に基づく実船の強度を推定する必要がある。本研究では、腐食ピットおよび全面腐食が、鋼板の強度と延性に及ぼす影響を機械加工により形状を再現した試験片を用いて実験的に研究する。特に、CAD・CAMシステムを用いた全面腐食鋼板の再現試験は極めてユニークな研究である。

1.2 研究の目的

腐食には種々の形態があるが、腐食開始直後は、鋼板表面に複数のピットが形成され、それらが次第に合体して全面腐食に至ると考えられている。金属表面全体に進行する「全面

腐食」と局部的に衰耗し、孔状の侵食が深く進む「孔食(ピittingコロージョン)」は船体構造部材に見られる典型的な腐食として挙げられるが、これらは塗装面でしばしば共存する。このうちピittingコロージョンに関しては多くの研究がなされている[4]。また、それらの研究ではピittingコロージョンを模擬した部材を用いた強度評価なども行われている。腐食は化学変化による影響で進行していくが、鋼板の強度と延性に関してはその化学成分などの影響ではなく、表面凹凸に影響のみであることが知られている。

本研究ではこのような観点から、縮小試験片で得られた結果が同様の寸法比をもつ拡大試験片の結果と厳密に等しくなるか、あるいは寸法効果があるとすればどの程度のものなのかを評価し、実際の船舶におけるより精度の高い強度計算法の確立に役立てることを目的として先ず以下の3点を研究した。

- ・腐食ピットが鋼板の静的強度に及ぼす影響の調査
- ・ピットの施した相似試験片で引張り試験を行い、寸法効果の有無の調査
- ・縮小試験片から大型試験片への試験結果の適用の検討

比較的表面凹凸の激しい全面腐食した材料に関してはその特性が時間依存型の多くの不確定要素を含む確率統計モデルである為、その強度に関する研究は構造解析や実部材を用いた試験などしか行われていなかった。もし、腐食表面の表面凹凸が計測出来、且つその表面形状を再現した部材を用いて強度評価を行うことが出来れば、これは腐食材の強度評価を行う上で有用な情報を与える。そこで、本研究ではさらに、高性能な測定機器を用いて実際の船舶で使用されていた全面腐食材の表面凹凸に関する詳しいデータを計測し、再現加工を行い、全面腐食材の強度に及ぼす影響を調査するとともに、試験片幅の寸法を変化させ、試験片幅と強度との関係を調べ、大規模構造部材の強度予測を行うこととした。

第 2 章 鋼板の静的強度・変形能に及ぼす孔食 の影響とその寸法効果

2.1 孔食の再現試験

2.1.1 供試材

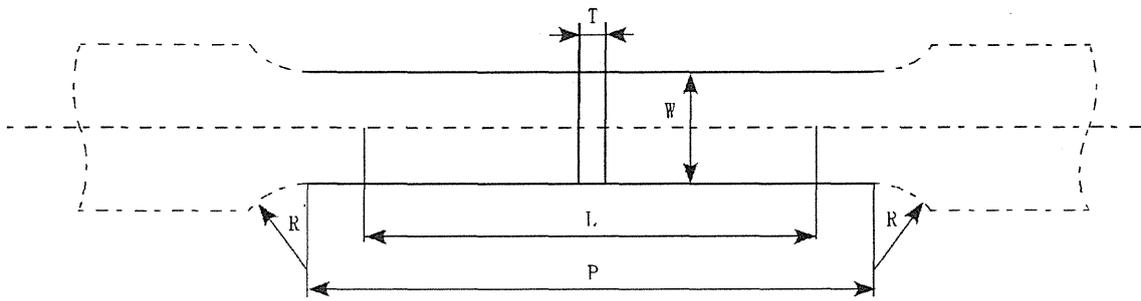
供試材は SM490A 鋼材であり、厚さ 8、4、2mm の板材を用いた。鋼種区分 A ではシャルピー吸収エネルギーの規定値が定められていない。その他の鋼種として、B は 27[J](0°C)、C は 47[J](0°C) と区分される。一般溶接構造では、構造部材の荷重伝達機能と溶接施工を考慮して各種鋼種の使用区分を決めている。今回の実験供試材のスペック値を表 2.1 に示すとおりである。ミルシートを付録 2 に添付するが、実際の値はかなりオーバースペックであることがわかる。

表 2.1 : SM490A 機械的性質と化学成分 (スペック値)

種類の記号	機械的性質			化学成分 %				
	耐力降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	C	Si	Mn	P	S
SM490A	325 以上	513	25 以上	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下

2.1.2 試験片形状の決定

本実験では異なる寸法の試験片間での試験値の比較を目的のひとつとしているので、試験片形状は JIS 規格引張試験片 14B 号比例型とした。図 2.1 に JIS 規格の形状及び寸法を示す。本実験で用いた試験片のサイズは、標点間で、最大の L 型試験片が板厚 8mm、幅 40mm、標点間距離 100mm であり、この寸法比を変えず相似形状になるように 1/2、1/4 サイズに縮尺したものをそれぞれ M 型、S 型試験片と呼ぶ。但し、つかみ部に関しては L 型と M 型試験片においては相似形状としたが、S 型試験片については、つかみ部が過小になり、実験に支障が出るのを避けるため、つかみ部のみ M 型と同サイズとした。図 2.2 に本実験で用いた試験片の寸法の詳細を示す。

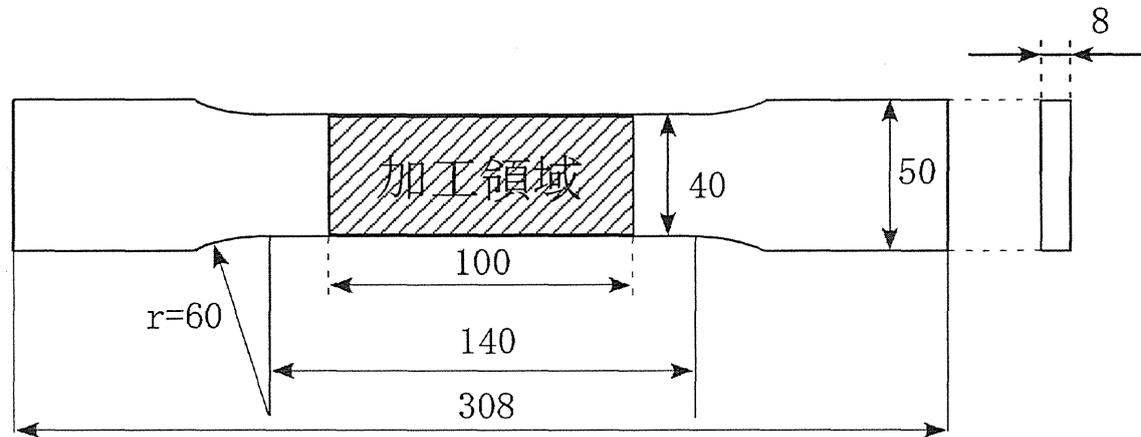


単位 mm

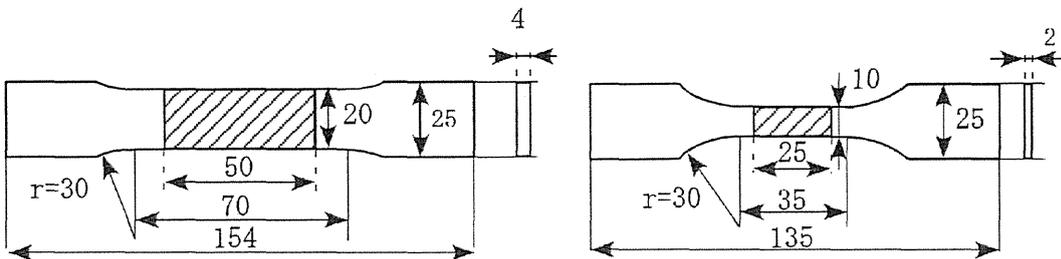
幅W	標点距離L	平行部の長さP	肩部の半径R	厚さT
8T以下	$5 \cdot 65\sqrt{A}$	$L + 1.5\sqrt{A} \sim L + 2.5\sqrt{A}$	15以上	もとの厚さのまま

A: 平行部の断面積

図 2.1 : JIS 規格 14B 号引張り試験片図



L型試験片



M型試験片

S型試験片

図 2.2 : 試験片寸法図

2.1.3 人工ピットの再現形状

日本海事協会の「バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度」[5]によれば、バルクキャリアの倉内肋骨に見られる腐食ピットは円錐形であり、その直径平均は約25~30mmとなっている。またピットの直径と深さの関係は概ね一定となる傾向にあり、バルクキャリアの倉内肋骨では概ね8:1~10:1、シングルハルトンカーの船底外版では約4:1であることも明らかにされている。

本研究ではバルクキャリア倉内肋骨の腐食ピットを参考に、形状を円錐形とし、試験片サイズも考慮した上で、L型試験片においては直径を20mmとした。従ってM型及びS型試験片におけるピット直径はそれぞれ10mm、5mmである。また直径と深さの比は8:1とした。よってL型試験片におけるピットの深さは2.5mm、M型、S型においてはそれぞれ1.25mm、0.625mmである。図2.3にピット平面図及び断面図を記す。

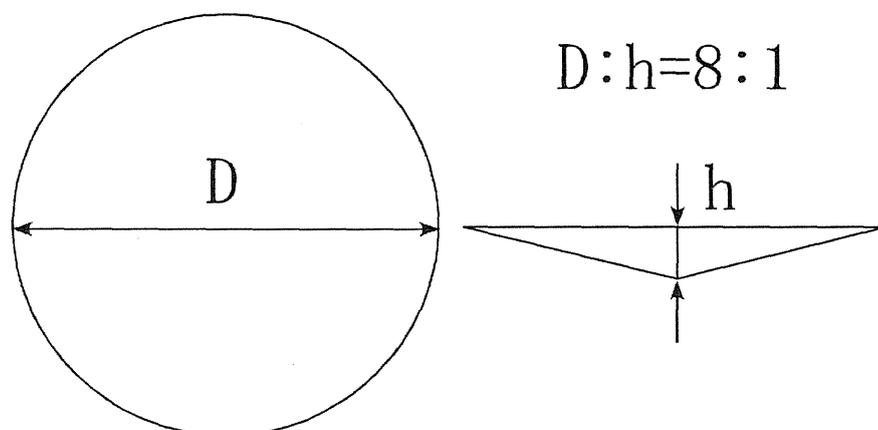


図 2.3 人工ピット平面図・断面図

2.1.4 ピット分布の設定

試験片に施したピットの分布を図2.4に、それぞれのパターンにおけるピットの個数及びピット面積率を表2.2に示す。ここでピット面積率とは試験片の標点間におけるピット面積の割合である。実部材においては腐食ピットの分布はランダムであると考えられるが、小型試験片で不規則なピット分布について検討することは、ピット及び試験片の大きさから無理があること、また本研究の目的は相似試験片間における寸法効果の評価に主眼を置いていることから本実験では規則的な分布を採用した。また表裏のピット配置の関係については、ピットが全く重なることのないような配置としてある。これはピットが全て重なる

という事象よりも全て重ならないという事象の方が多いであろうと考えたためである。ピット位置が表裏で重なる場合については、別途後述する。

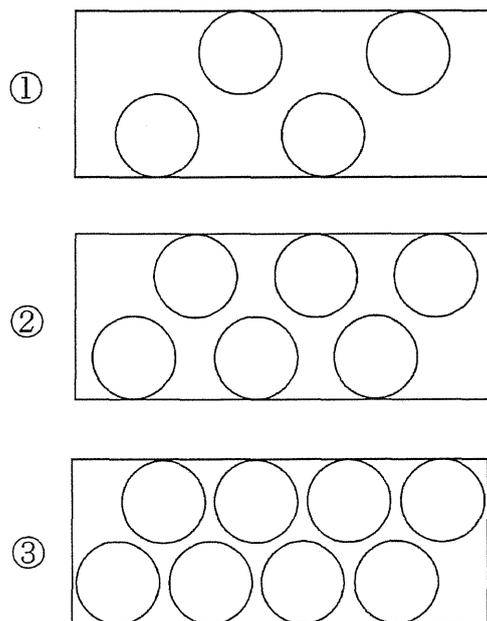


図 2.4 : ピットパターン

表 2.2 : ピット分布表

No.	ピット直径(mm)	ピットの数	ピット面積率
0	-	-	0
①	20:10:5	4	0.314
②	20:10:5	6	0.471
③	20:10:5	8	0.628

2.1.5 全試験片のパラメータ

表 2.7 に本実験で用いた全ての試験片の諸パラメータ計画値、ピット分布及び平均板厚減少の計画値を示す。また加工後の試験片写真を図 2.81~2.8.12 に示す。尚、ここで述べて

いる平均板厚減少とは、ピットの体積を標点間面積で割ることにより求めた板厚減少の平均値である。

表 2.7 全試験片一覧

No.	標点距離 L	幅 W	厚さ t	ピット分布		平均板厚減少 (mm)
				A	B	
L0	100	40	8.0	0	0	0
P-L1	100	40	8.0	①	①	0.523
P-L2	100	40	8.0	②	②	0.785
P-L3	100	40	8.0	③	③	1.047
P-M0	50	20	4.0	0	0	0
P-M1	50	20	4.0	①	①	0.262
P-M2	50	20	4.0	②	②	0.393
P-M3	50	20	4.0	③	③	0.523
P-S0	25	10	2.0	0	0	0
P-S1	25	10	2.0	①	①	0.131
P-S2	25	10	2.0	②	②	0.196
P-S3	25	10	2.0	③	③	0.262

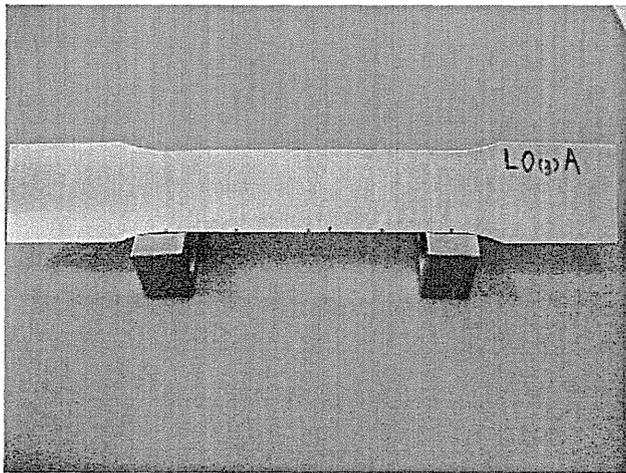


図 2.8(a) L0 試験片

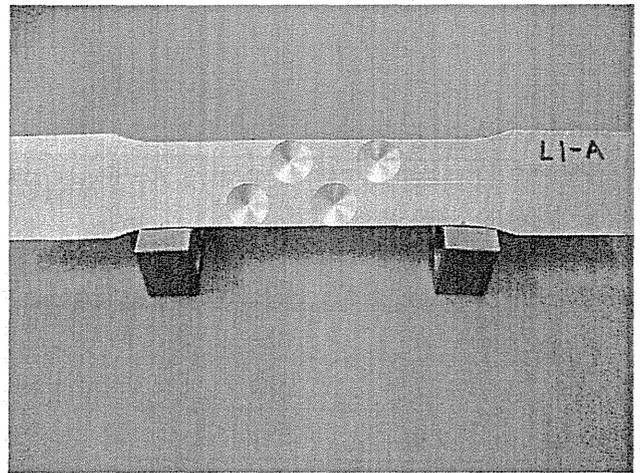


図 2.8(b) P-L1 試験片

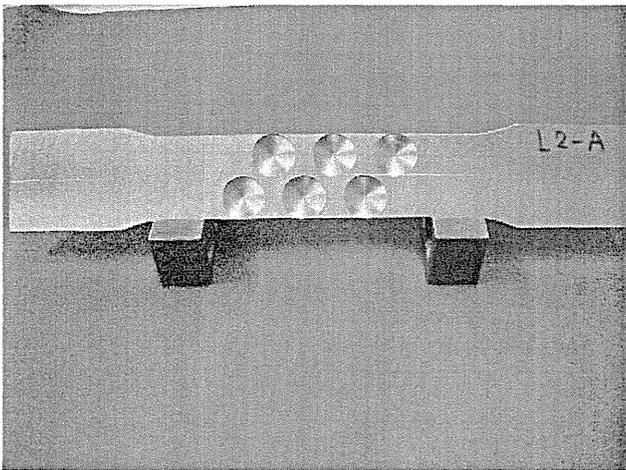


図 2.8(c) P-L2 試験片

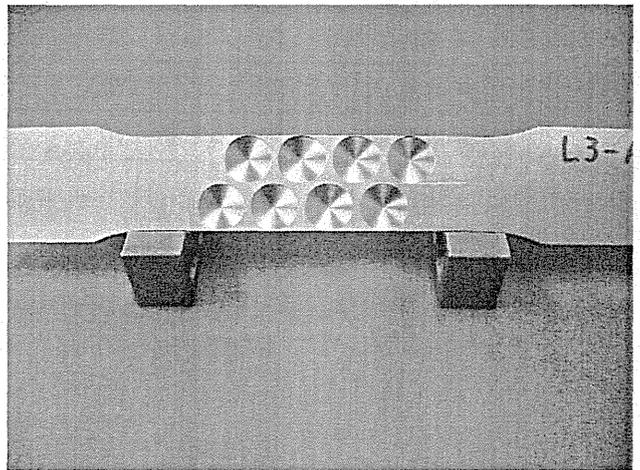


図 2.8(d) P-L3 試験片

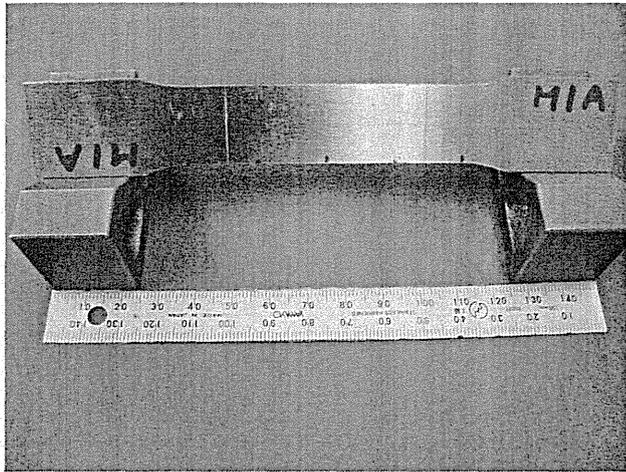


図 2.8(e) P-M0 試験片

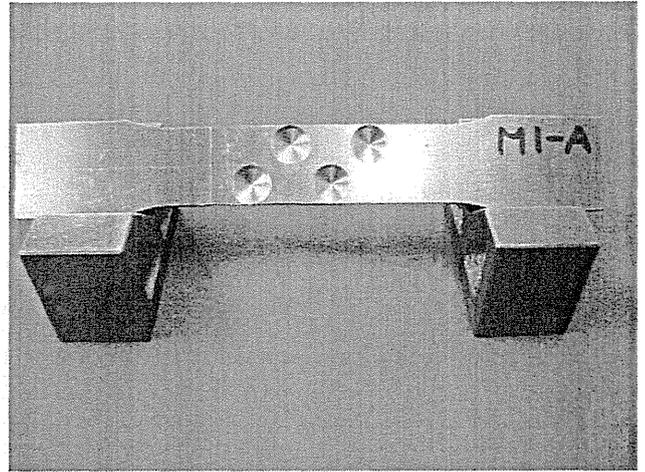


図 2.8(f) P-M1 試験片

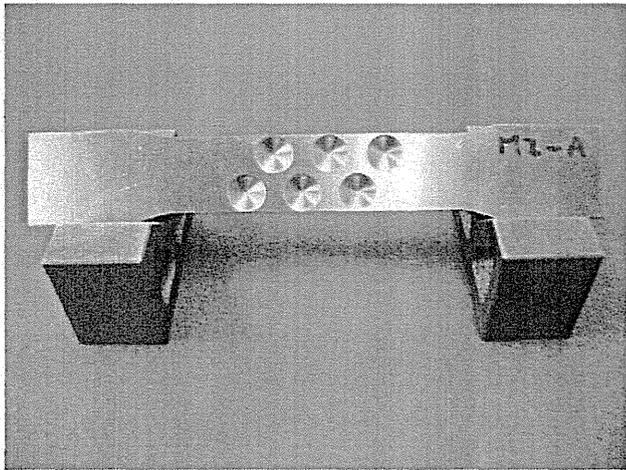


図 2.8(g) P-M2 試験片

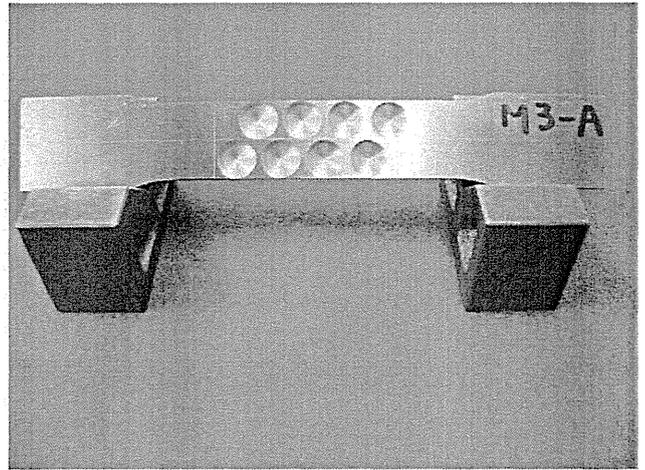


図 2.8(h) P-M3 試験片

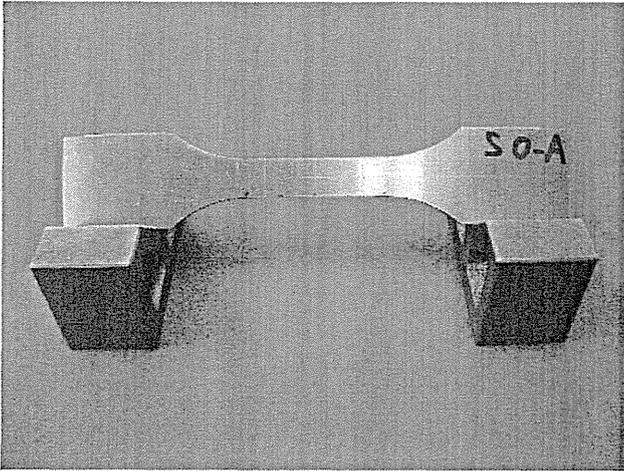


図 2.8(i) P-S0 試験片

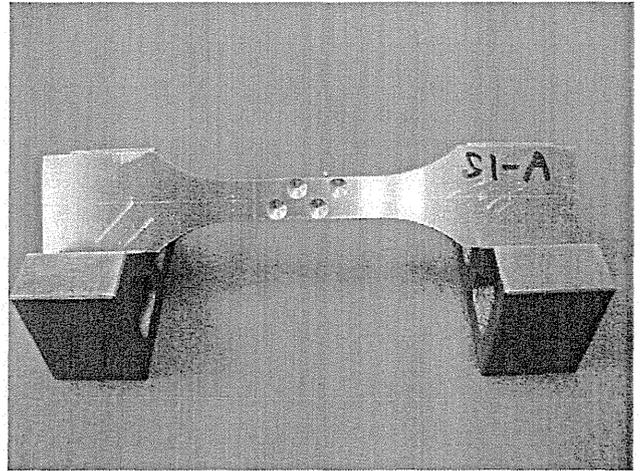


図 2.8(j) P-S1 試験片

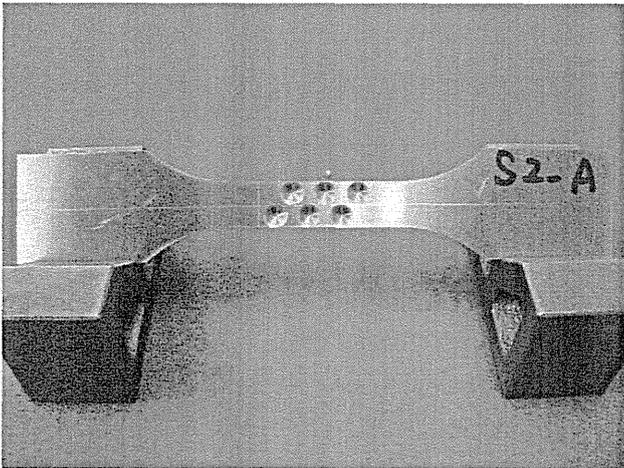


図 2.8(k) P-S2 試験片

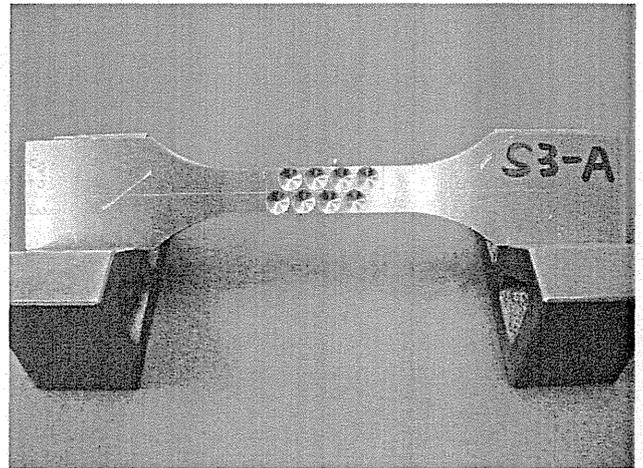


図 2.8(l) P-S3 試験片

2.1.6 引張試験

実験に際して以下の引張り試験装置を用い、荷重と標点間伸びを計測した。

●島津オートグラフ AG-IS250kN MO型(25tf)

仕様を表 2.8 に、試験機概要図を図 2.8 に示す。尚、今回の実験では試験速度を 5[mm/min] とし、一部小さい試験片については 3[mm/min]で行った。

表 2.8 : オートグラフ仕様

形式	AG-250kNIS
負荷容量	250[kN]/25[tf]
クロスヘッド速度と許容負荷	全速度 250[kN]/25[tf]
試験速度	0.0005~1000[mm/min]
リターン速度	550[mm/min]
クロスヘッド~テーブル間 距離(最大[mm])	1440
有効試験幅[mm]	575
試験機サイズ(幅×奥行き[mm])	1170×750
試験機高さ[mm]/質量[kg]	2412/約900
駆動モータ形式	ACサーボモータ
消費電力[kVA]	最大2.5
漏洩電流[mA]	最大10
所要電源容量	3相200-230V 7.5kVA

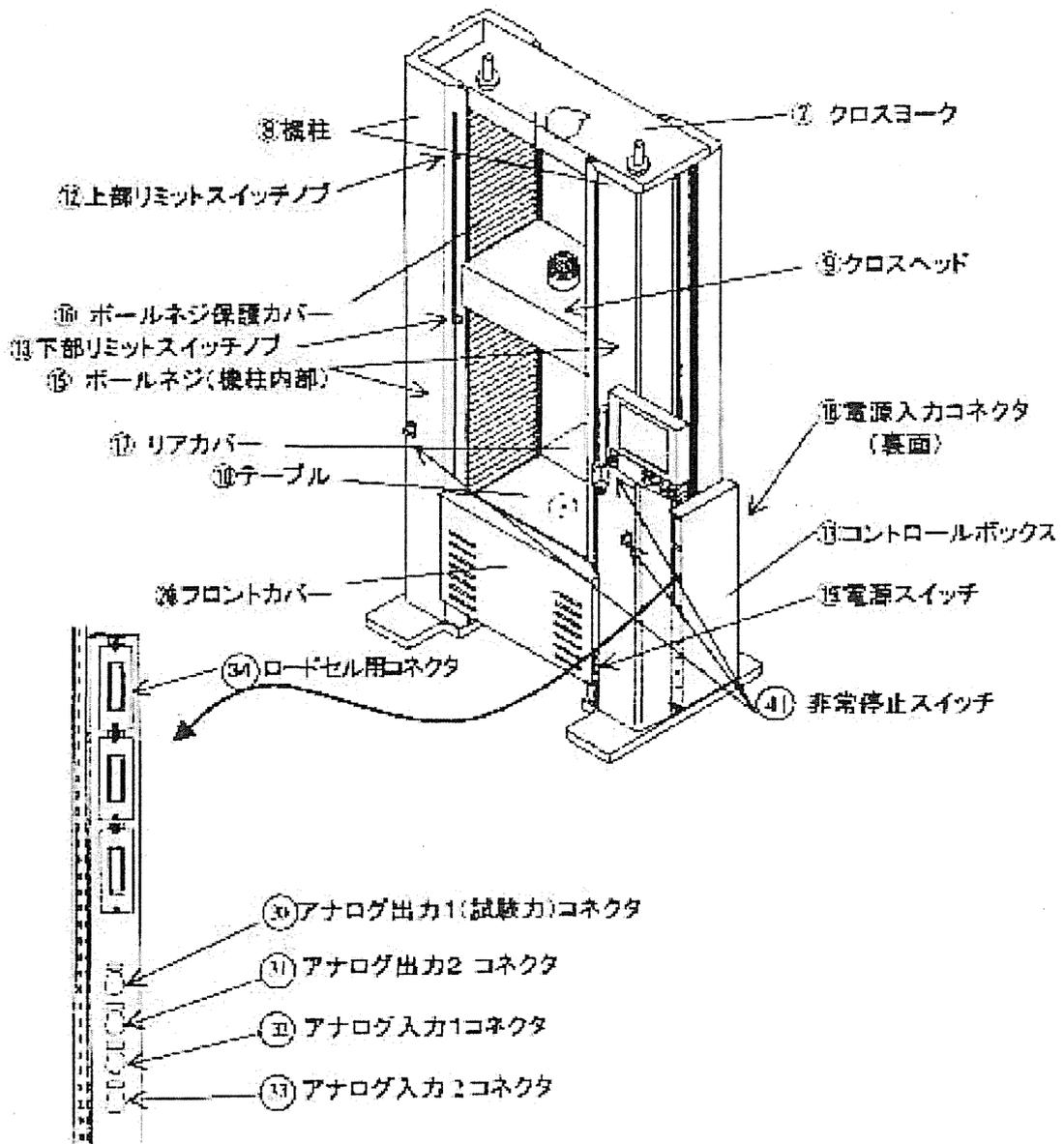


図 2.9 : 試験機の外部から見た各部名称

2.2 試験結果と考察

2.2.1 破壊挙動

ここではまず今回試験を行った全ての試験片について、破断に至るまでの力学的挙動と破断後の変形状態について述べる。

平滑試験片では最大荷重を超えると、ある一部分が両側から徐々にくびれ始め、やがて破断した。一方ピットのある試験片では、ある値の荷重を超えると試験片全体に図 2.10 のようなうねりを生じ、その後ピットのある断面でき裂が発生し、他のピットを伝うように伸びていき、やがて破断した。個々の試験片の破断挙動について以下に考察する。

図 2.11-2.17 は今回行った全試験片の破断後の変形状態である。図 2.11-2.13 は同サイズ試験片の破断を比較のため並べた。図の赤い線は標点位置を表している。これを見ると、ピットが存在する場合、破断はピットのある断面で生じ、平滑試験片と比較してその伸びは著しく減少していることがわかる。平滑試験片では幅方向に真直ぐに破断している。一方ピットのある試験片ではある個所のピットとピットをつなぐよういき裂が発生している。これはピットが存在する場合、局所的な応力の集中によりピットのある断面で急激に塑性変形が進み、そのために生じたくびれが板厚の激しい減少を引き起こし破断したものと思われる。

次に図 2.14-2.17 は相似試験片間で破断形態を比較するために、ピットパターンごとに比較のため並べたものである。全体的に見ると、破断形態は各相似試験片間で平滑試験片を除けば概ね一致していることがわかる。平滑試験片においては、L型試験片の場合、き裂は試験片のほぼ中央で発生しているが、M型では中央線と標点間の上端との中間位、S型においてもやはりほぼ同様の位置でき裂が発生した。ピットパターン①の試験片を見ると、L、M、Sの試験片は全て同じ個所のピットのほぼ中心からき裂を生じ、破断している。またピットパターン②についても同様で、同じ個所のピットのほぼ中央からき裂が発生し、破断に至った。ピットパターン③の場合は2つのピットをつなぐよういき裂が生じている。き裂の形態は一様ではなく、P・L3-1 試験片と P・S3 試験片では同様の斜めにピットをつなぐ形であったが、L型試験片のもう一本 P・L3-2 試験片と P・M3 試験片ではほぼまっすぐにピット同士をつないで破断した。この破断が一様でない理由については、ピットパターン③の場合、ピット同士の重なりが増えたことにより、最小断面の数が増え、且つそれらが非常に近接していることが関係していると考えられる。今回の試験で得られた全試験片の試験結果を表 2.9 に示す。

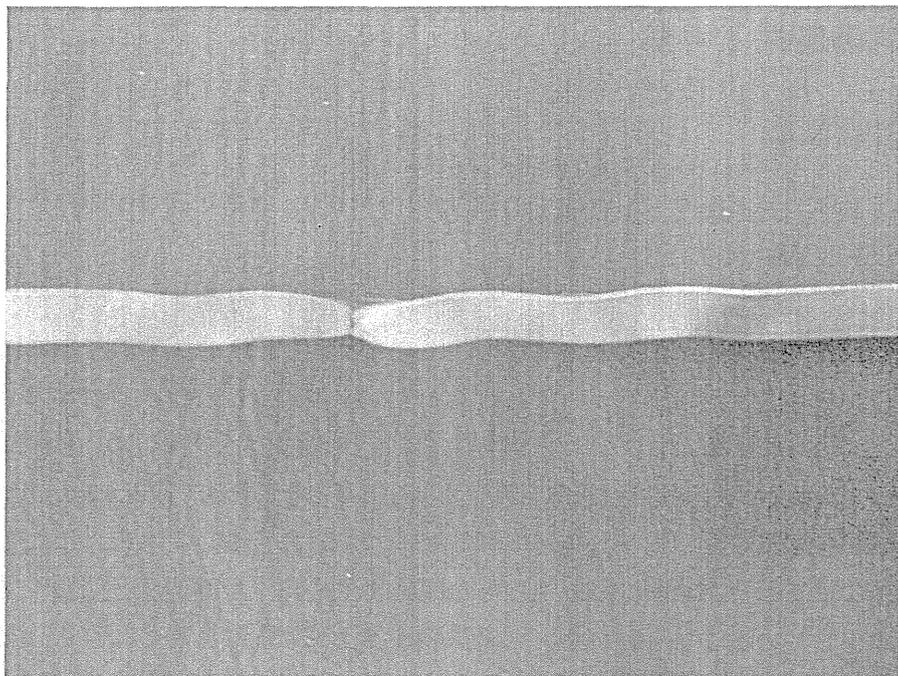


図 2.10 試験片側面に生じた塑性変形のうねり

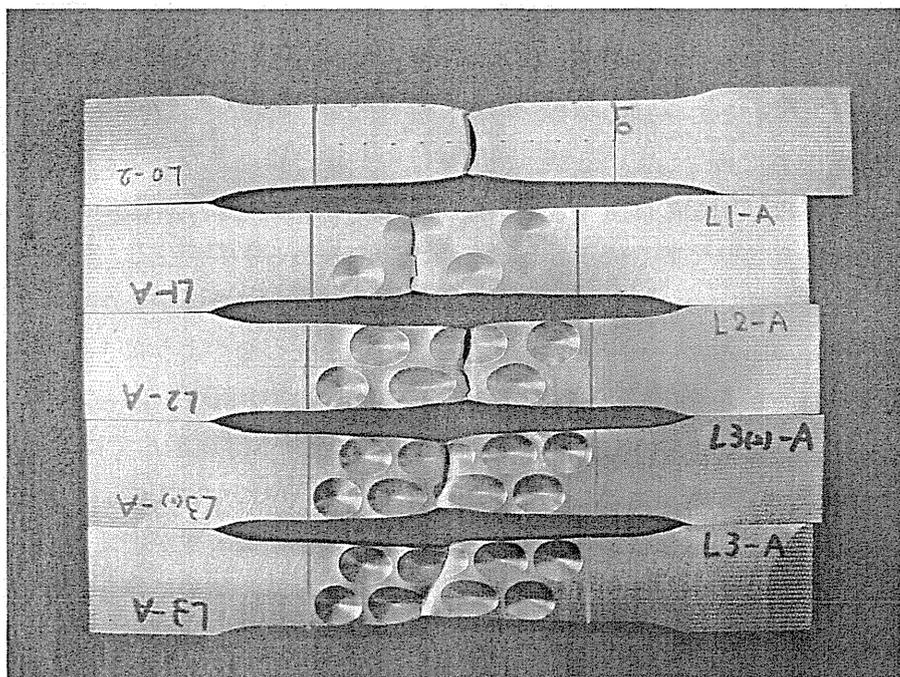


図 2.11 L型試験片の破断後の変形状態

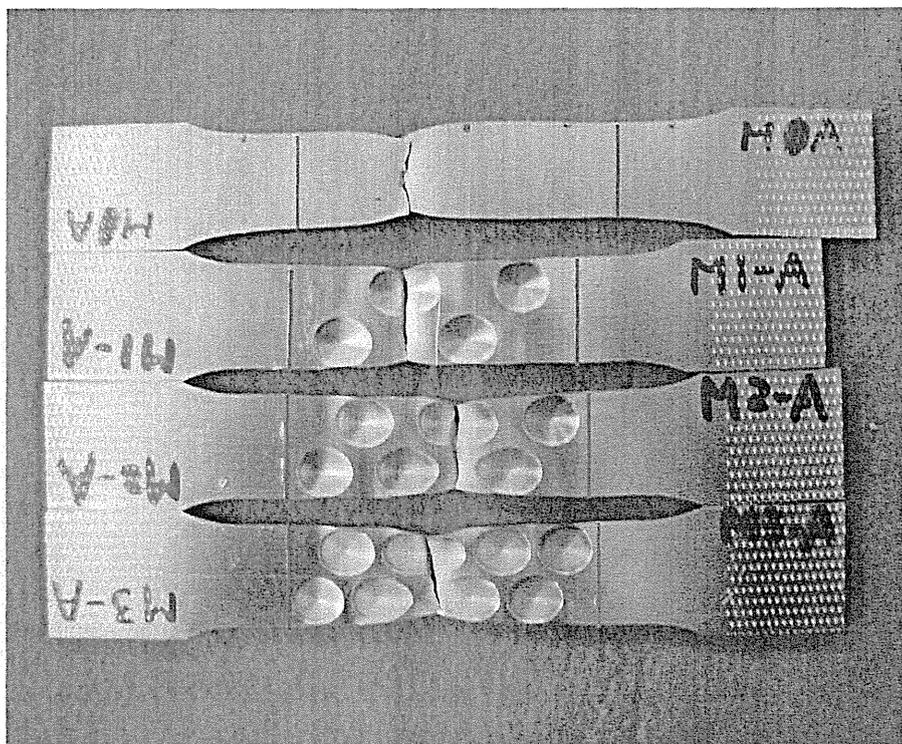


図 2.12 M型試験片の破断後の変形状態

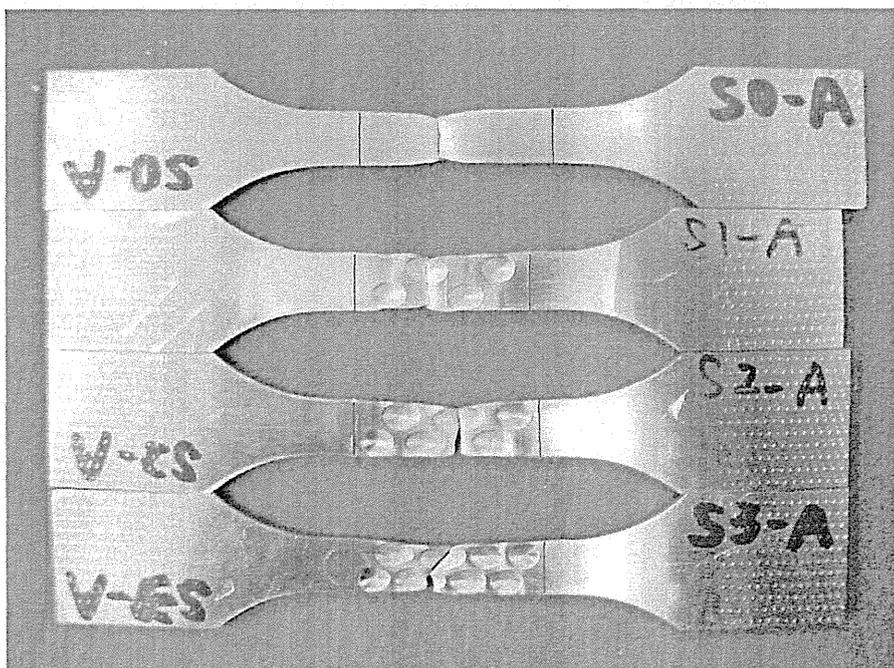


図 2.13 S型試験片の破断後の変形状態

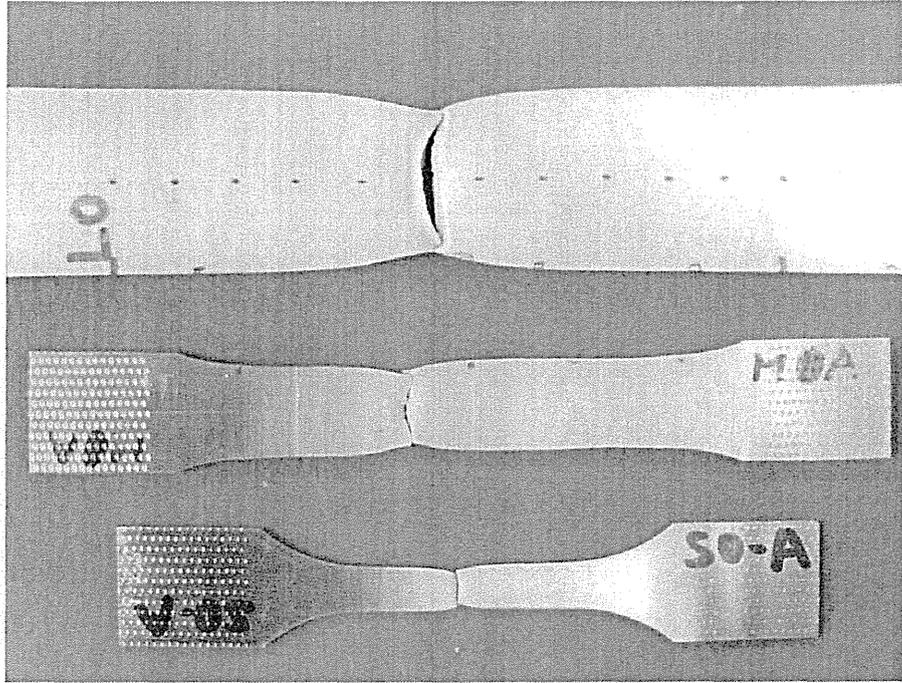


図 2.14 平滑試験片の破断後の変形状態

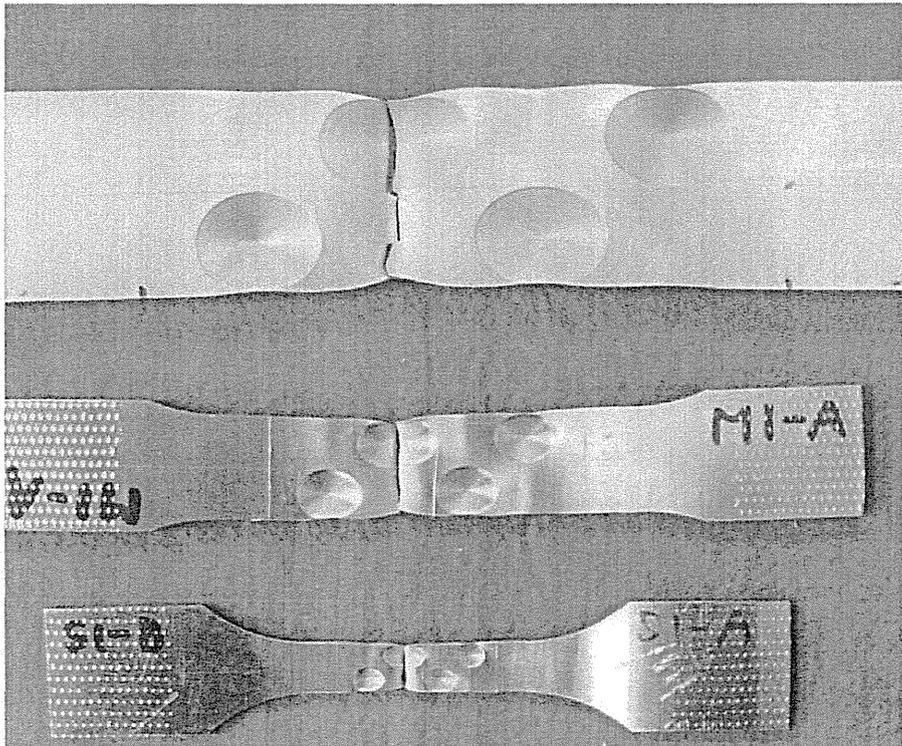


図 2.15 ピット付試験片(ピットパターン①)の破断後の変形状態

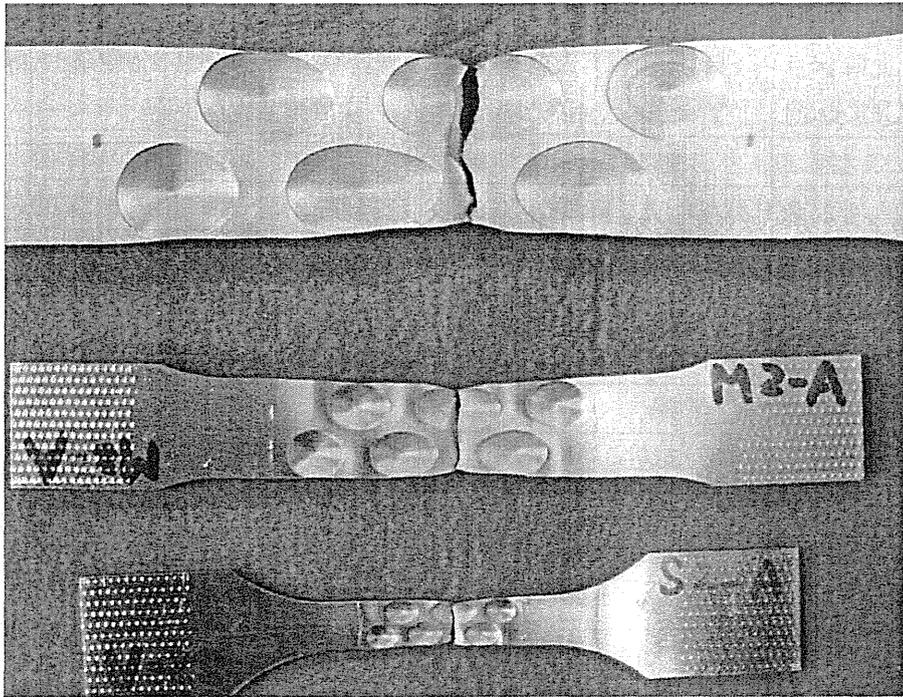


図 2.16 ピット付試験片(ピットパターン②)の破断後の変形状態

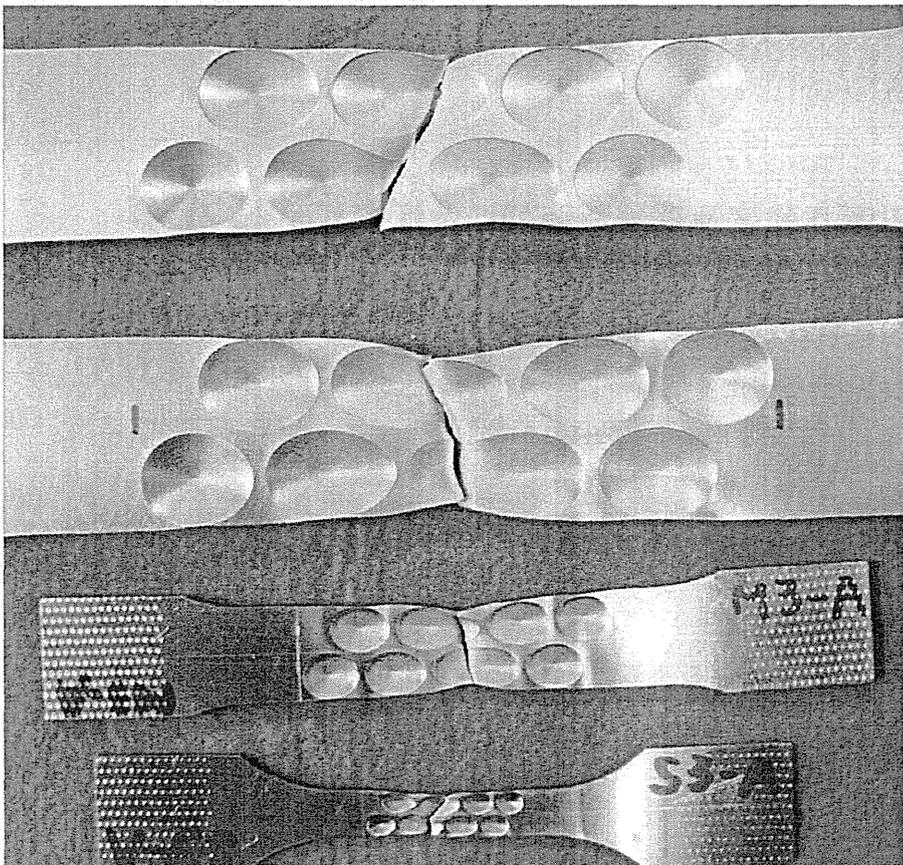


図 2.17 ピット付試験片(ピットパターン③)の破断後の変形状態

表 2.9 試験結果一覧

No	上降伏点 [N/mm ²]	下降伏点 [N/mm ²]	最大荷重 [N/mm ²]	公称引張り強さ [MPa]	伸び [mm]	破断伸び [%]
P-L0-1	124.00	118.38	165.50	517.19	32.46	32.46
P-L0-2	124.25	118.50	164.88	515.25	33.88	33.88
P-L1	103.75	102.25	149.25	466.41	20.76	20.76
P-L2	92.38	91.88	140.63	439.47	24.66	24.66
P-L3-1	91.63	89.75	137.50	429.69	25.90	25.90
P-L3-2	92.38	91.00	138.25	432.03	28.16	28.16
P-M0	31.53	30.20	420.25	525.31	16.09	32.18
P-M1	25.78	25.70	37.13	464.06	8.14	16.28
P-M2	24.60	24.43	36.48	455.94	11.81	23.62
P-M3	24.13	23.81	35.56	444.54	12.97	25.94
P-S0	7.44	7.19	10.31	515.65	5.58	22.32
P-S1	6.01	6.00	8.96	447.82	5.05	20.18
P-S2	5.39	-	9.03	451.57	5.71	22.84
P-S3	5.49	5.48	8.43	421.57	6.90	27.60

2.2.2 引張り強度及び破断伸びに及ぼすピットの影響

ここではL型試験片を例にとり、人工ピットが試験片の静的強度及び延性に及ぼす影響について考察する。

図 2.18 は今回行った 4 種類の L 型試験片の応力-ひずみ曲線である。本論文では平滑試験結果との比較を明確化するために、公称引張り強さを次式で定義する。

$$\sigma_{nominal} = \frac{P_{max}}{A_0}$$

ここで P_{max} は最大荷重、 A_0 は人工ピットを設ける前の断面積である。人工ピットを設ける前の断面積 A_0 は人工ピットを設ける前の板厚に試験片の幅を掛け合わせたものである。この図を見て分かる通りピットのある試験片では平滑試験片に比べ明らかに、応力、ひずみともに低下していることが見て取れる。またピットを施した試験片には平滑試験片と比較して、降伏点があまり明確には現れないという特徴も見られる。さらに、ピットのある試験片では伸びが 5% の前後において荷重が一度下がるか、もしくは伸びに伴って荷重が変化しない点があることに気づく。実験中の試験片の観察から、前述の図 2.10 のような変形がこの点付近で発生していたことが確認できた。したがってこの力学的変形挙動は試験片に

できたこの塑性変形によるうねりが原因であり、規則的で且つピットが表裏で重ならないような配置であるために生じたものと思われる。

次に平滑試験片の引張り強さを1としたときのピットのある試験片の公称引張り強さの比とピット面積率の関係を図 2.19 に、平滑試験片の破断伸びを1としたときの、破断伸びの比とピット面積率の関係を図 2.20 に示した。図 2.19 より S2 試験片を除き、公称引張り強さはピット面積率の増加とともに減少していることがわかる。ピットパターン①の場合、平滑試験片に比べ公称引張り強さは 10~13%、ピットパターン②では 13~15%、ピットパターン③に至っては 15~18%も減少している。但し、今回の実験ではピットサイズが一定で、規則的配置をとる場合のみを取り扱っているが、ピットのサイズ及び分布の影響については次章で検討する。また図 2.20 より、破断伸びはピットパターン①の場合で最も減少が激しく、その割合は平滑試験片に比べて 35%程度少なくなるが、一方ピット面積率増加とともに、破断伸びは回復する傾向にあることも伺える。これは、今回のようなピット配置においてはピットが多くなると、結果としてひずみ集中が緩和するためと思われる。しかし実部材においては、腐食ピットはランダムに分布しているため、単純にピットの面積率増加とともに伸びも回復する傾向になるとは必ずしも言えず、ひずみの集中する断面の数及びその面積が重要であると考えられる。破断伸びの挙動はピットの分布の仕方に敏感な可能性が大きいので、これについては次章で検討する。

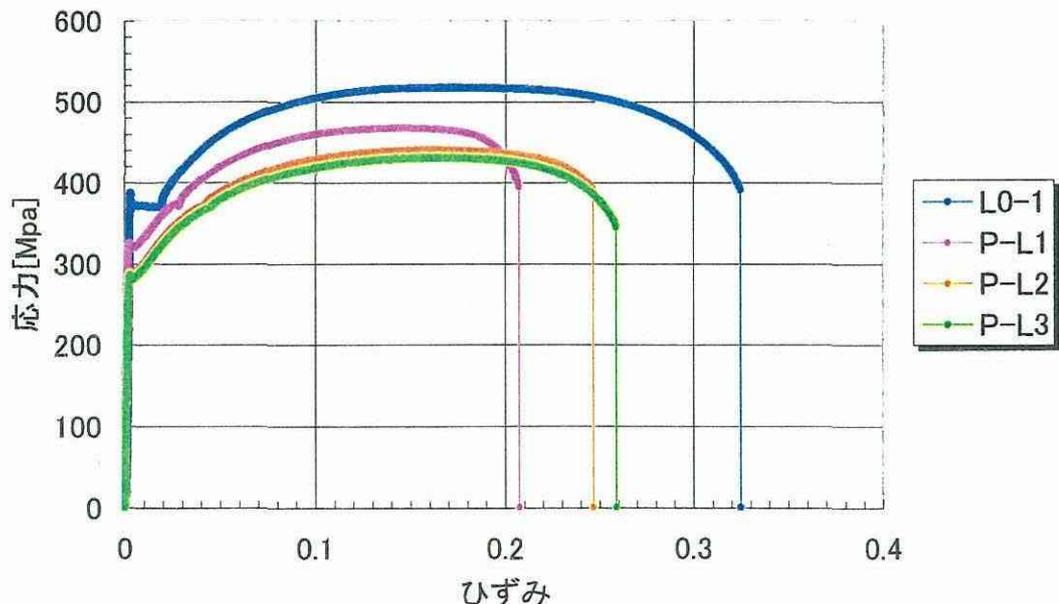


図 2.18 L型試験片における応力-ひずみ線図

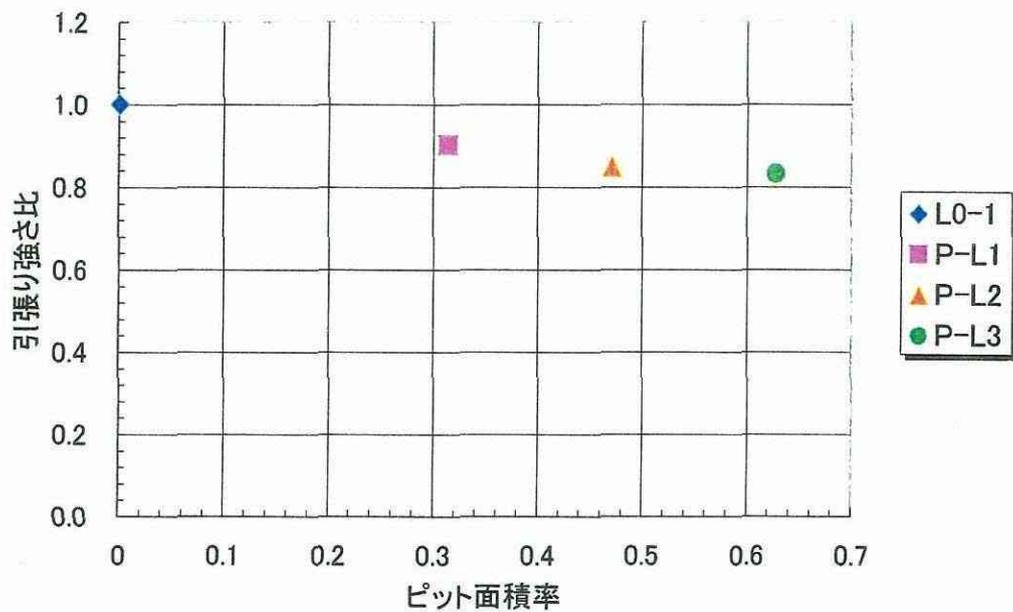


図 2.19 ピット付試験片の平滑試験片に対する引張り強さの比とピット面積率

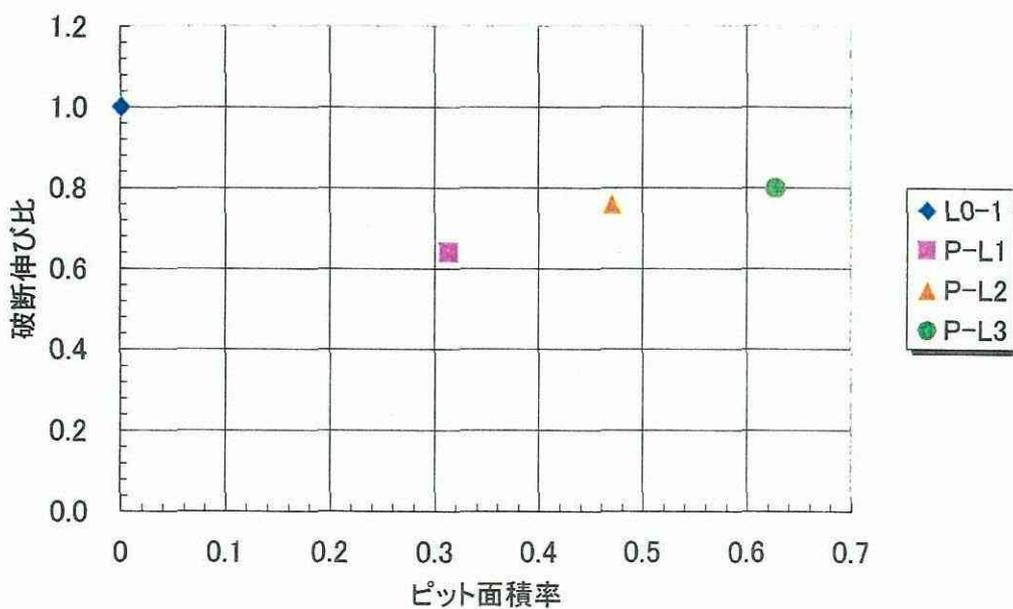


図 2.20 ピット付試験片の平滑試験片に対する破断伸びの比とピット面積率の関係

2.2.3 最大荷重の予測

日本海事協会の「船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 - 人工ピットを用いた強度調査」[4]によれば、最大荷重は最小断面にもとの材料の引張り強さを掛けたものから予測できることが明らかにされている。本実験においても実験で得られた荷重と比較し最大荷重の予測を行った。その結果を図 2.21 に示す。図から予測荷重と実験値はほぼ一致していることがわかる。よって最大荷重は[材料の引張り強さ×最小断面積]で予測できることが確認された。

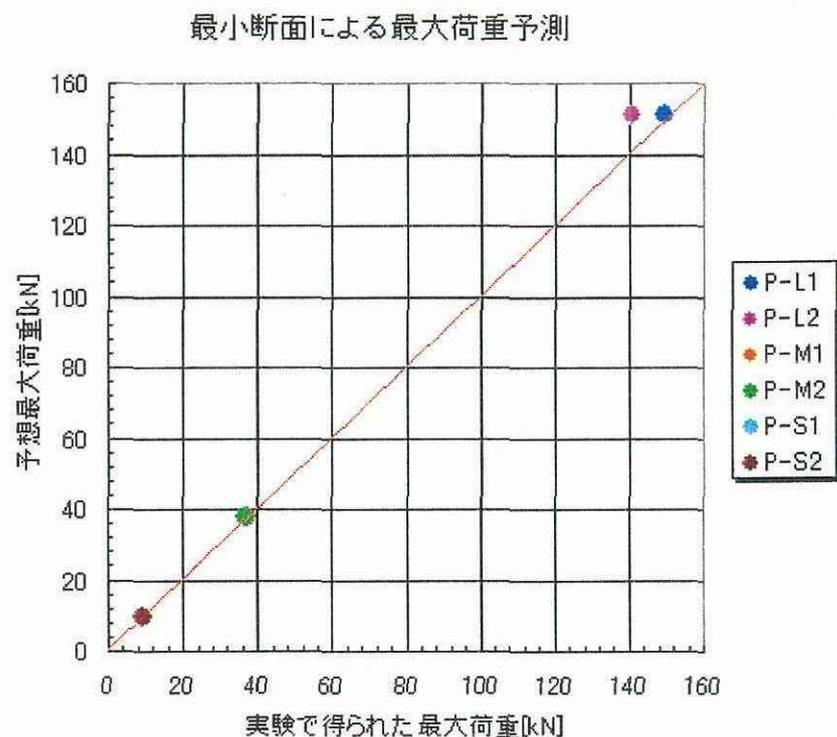


図 2.21 最大荷重予測

2.2.4 相似試験片による寸法効果の検討

腐食による材質そのものの強度低下が無いとすれば、強度はその形状で決まるということになる。つまり同じ形状の試験片で試験を行った場合、その応力-ひずみ曲線は一致することになる。しかし実際には寸法効果が存在すると言われており、正確な強度予測をするためにはその影響を知ることが重要となる。ここでは本研究の主眼である縮尺模型試験片の寸法効果について考察する。

前述の写真で見た通り、相似試験片間でその破断の様子はほぼ一致していた。図 2.22-2.25 に今回試験を行った全試験片の応力・ひずみ曲線を相似試験片間で比較するためにピット分布ごとにまとめた。全体を見ると、一部の試験片を除き、どのピットパターンにおいても相似試験片間で応力・ひずみ曲線は概ね一致した。つまり相似試験片間で破壊挙動がほぼ同じであったといえる。但し、S型試験片についてはL型M型にくらべ降伏挙動が現れにくい。これは試験片サイズが小さいことに起因する寸法効果と思われる。以下、最大のL型試験片を基準に取り寸法効果について考察していく。

図 2.26 はそれぞれのピットパターンでのL型試験片の引張り強さを1としたときのM型、S型試験片の公称引張り強さの比である。M型試験片に関してはピットパターン①以外の分布において、L型試験片の値に比べ2~4%程度大きくなった。またS型試験片においては、平滑試験片ではほぼ同じ、ピットパターン①と③では2~3%程度小さくなり、ピットパターン②の時は3%程度大きくなった。データとしてのばらつきはややあるもののM型試験片においてもS型試験片においてもL型試験片の値と概ね等しくなることがわかる。したがって、1/2 及び 1/4 スケールにおいて縮尺模型試験片での引張り強さには寸法効果の影響はほとんど無いものと考えられる。しかし、より一般的な結論を得るためには今後さらに試験範囲を拡大する必要がある。

次に破断伸びについて考察する。図 2.27 はL型試験片の各ピットパターンにおける破断伸びを1としたときのM型及びS型試験片の破断伸びの比を表したものである。破断伸びに関してはややばらつきが出たが、概ねL型と同じ値となったといえる。このばらつきの要因としては、試験片の破断の位置が異なる場合やピットの加工誤差、あるいは材料の中に存在する欠陥の影響などが考えられるが明確なことは言えない。また、破断伸びに関しては、M1試験片を除けば8%以下のずれであり、概ね一致していることから、この範囲の寸法では影響は少ないものと考えられる。

以上応力及び破断伸びの考察よりこのスケールでの寸法効果の影響はほとんどないものと思われるが、より大きなスケールでの寸法効果の影響については、今後さらに試験をする必要がある。

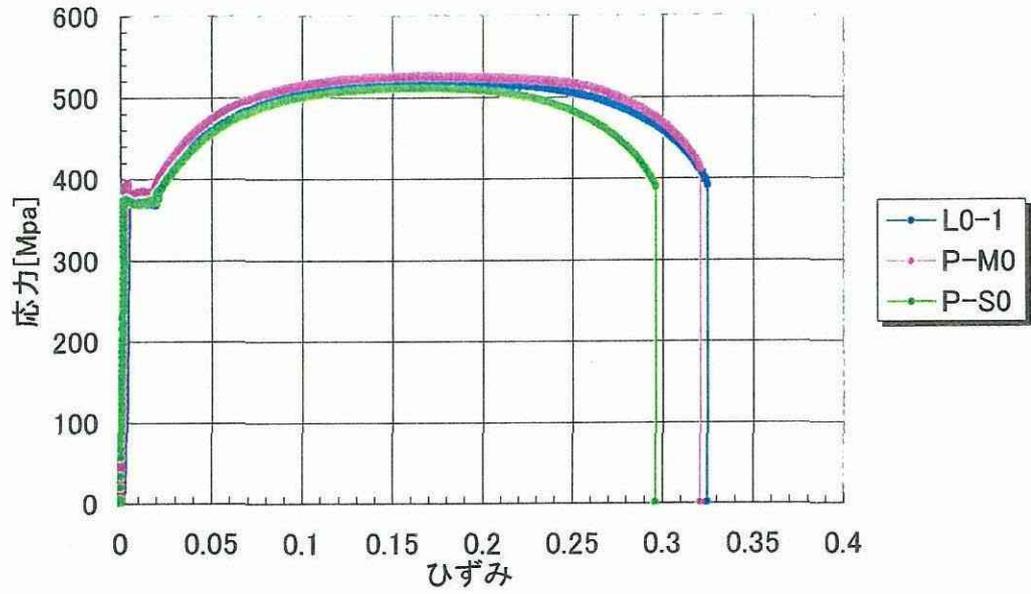


図 2.22 応力-ひずみ曲線 (平滑試験片)

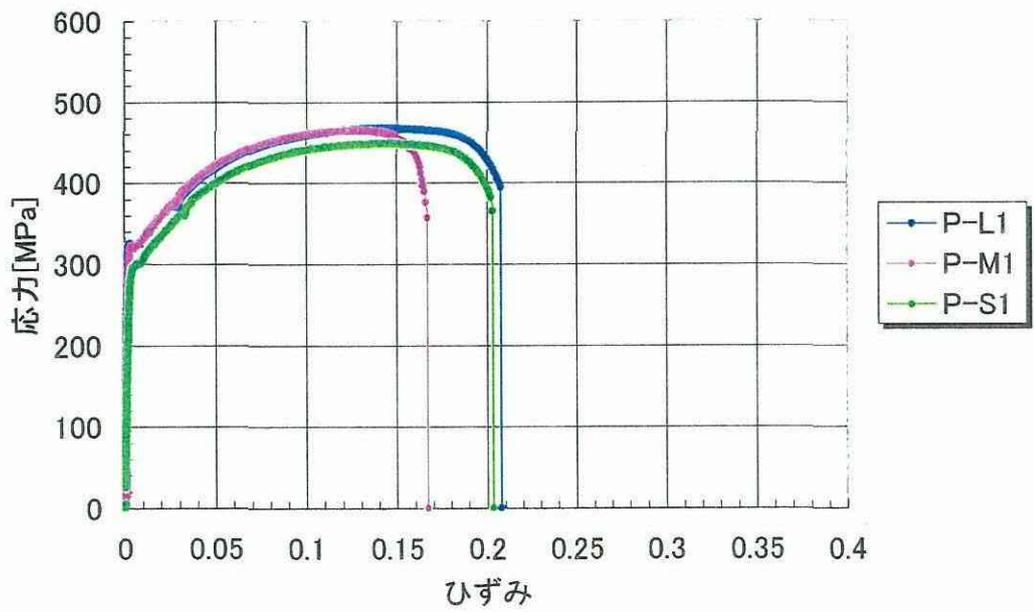


図 2.23 応力-ひずみ曲線(ピットパターン①)

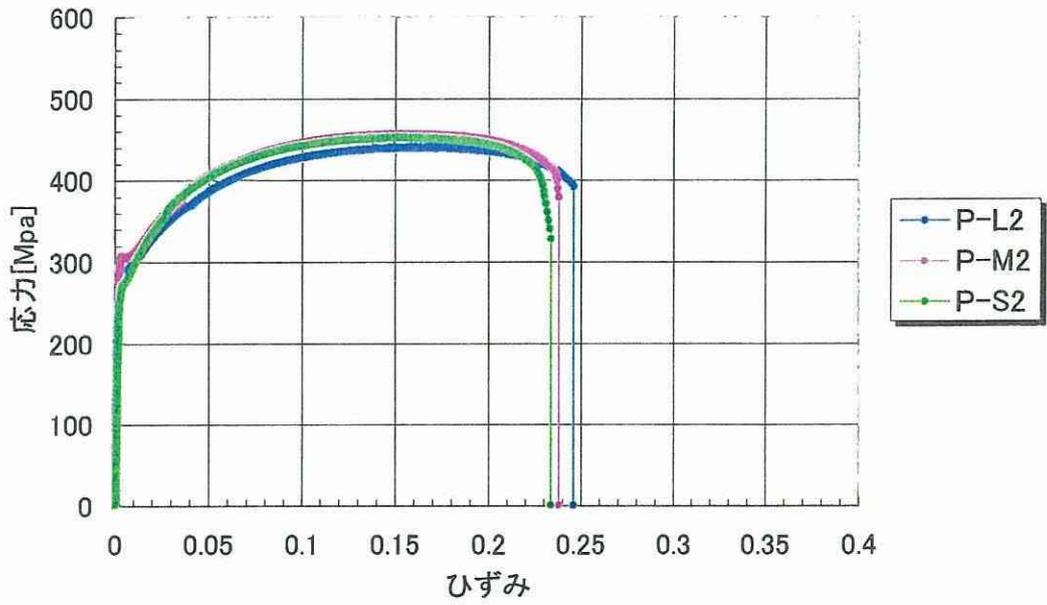


図 2.24 応力-ひずみ曲線(ピットパターン②)

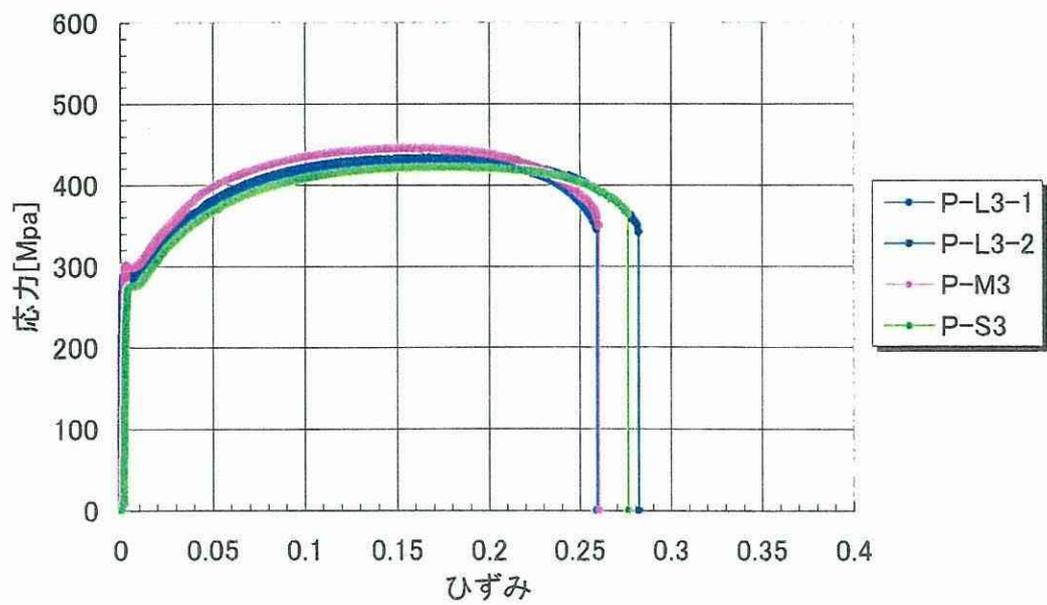


図 2.25 応力-ひずみ曲線(ピットパターン③)

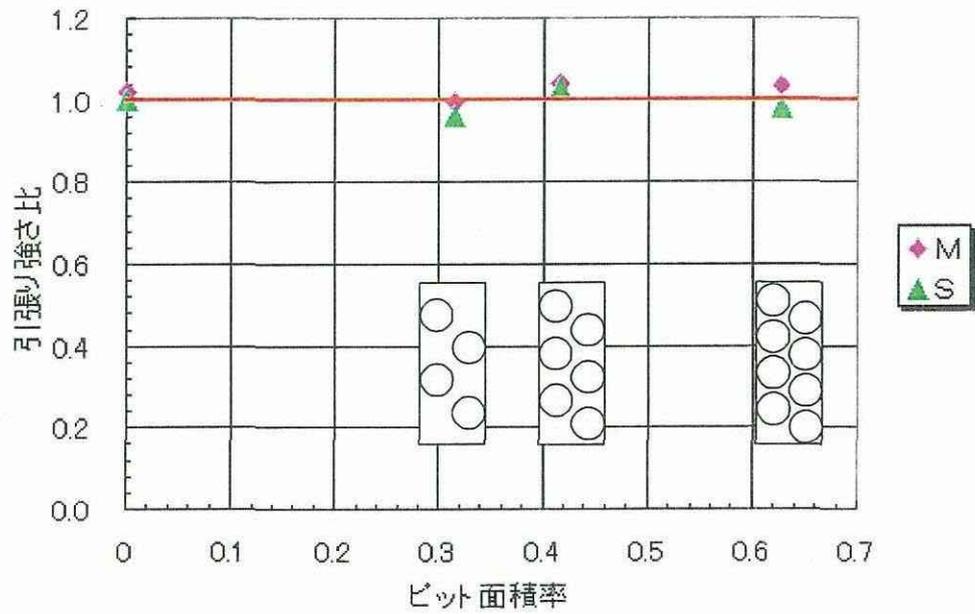


図 2.26 L型試験片の引張り強さに対する M 型 S 型試験片の引張り強さの比

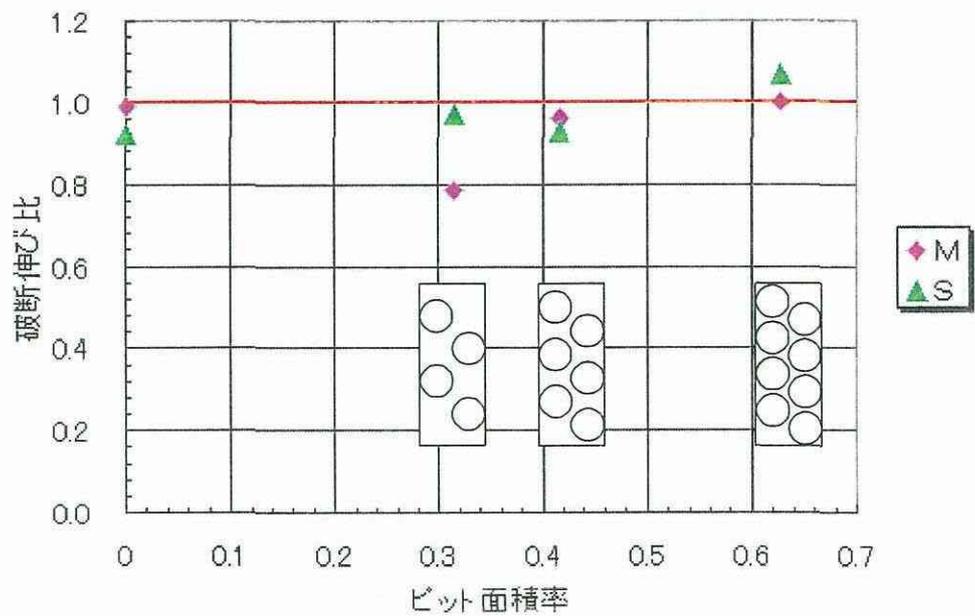


図 2.27 L型試験片の破断伸びに対する M 型 S 型試験片の破断伸びの比

2.2.5 まとめ

本研究では、人工ピットを施した 3 種類の相似試験片を用いた引張り試験を行い、鋼板の静的強度に及ぼすピッティングコロージョンの影響と縮尺試験片における寸法効果について考察し、以下の結論を得た。

- ・ 平滑試験片に対し、人工ピットを設けた鋼板の公称引張り強さはピット面積率の増加とともに減少し、その値は破断経路に沿った断面積に比例する。
- ・ 平滑試験片に対し、人工ピットを設けた鋼板の破断伸びはピットの分布に敏感で、ひずみの集中する断面が相対的に離れるほど破断伸びの低下が大きい。
- ・ 相似な縮尺試験片で得られた結果は 1/2、1/4 スケールにおいても寸法効果の影響はほとんど見られない。

なお、ピット間隔と配列の影響、ピット分布が試験片の表裏で重なる場合の影響、板厚影響については次章で検討する。

第3章 鋼板の静的強度・変形能に及ぼすピット配置と板厚影響について

前章では、ピットを有する板の静的強度・変形能の基本的性質と寸法効果について考察した。本章では、ピット配置の影響を検討するために、まず試験片に人工ピットを1つだけ設けた場合の鋼板の静的強度を調べ、さらに2個のピットを設けた場合の各種配置の影響、一回り大きい面積を持つピットを施した場合の影響について、前章で課題となった破断伸びとピット分布の関係をより詳細に調査する。また、前章で板厚8mmの試験片に設けたピットパターンと同じものを板厚6mmの試験片に設けて引張り試験を行い、その結果を比較することにより板厚影響を調べる。

3.1 引張試験片

供試材として前章と同一のSM490A鋼材、試験片形状も同一のJIS規格14B号比例型である。L8試験片は前報L型試験片と同様の寸法であり、L6試験片はL8試験片の厚さのみを6mmとした。

図3.1に今回用いたピットパターンを示す。ピット形状は直径20mmで、直径と深さの比が8:1の円錐型を用いたが、ピットパターンbに関しては、深さを変えず直径のみ $20\sqrt{2}$ としたもので、この面積は直径20mmのピット2倍となっている。また、ピットパターンa'はピットが表裏で重なるように両面加工した。ピットパターンeは直列ピットの中心間距離を70mmとした。今回作成した全試験片データを表.1に、作成した試験片の写真を図3.2～図3.10に示す

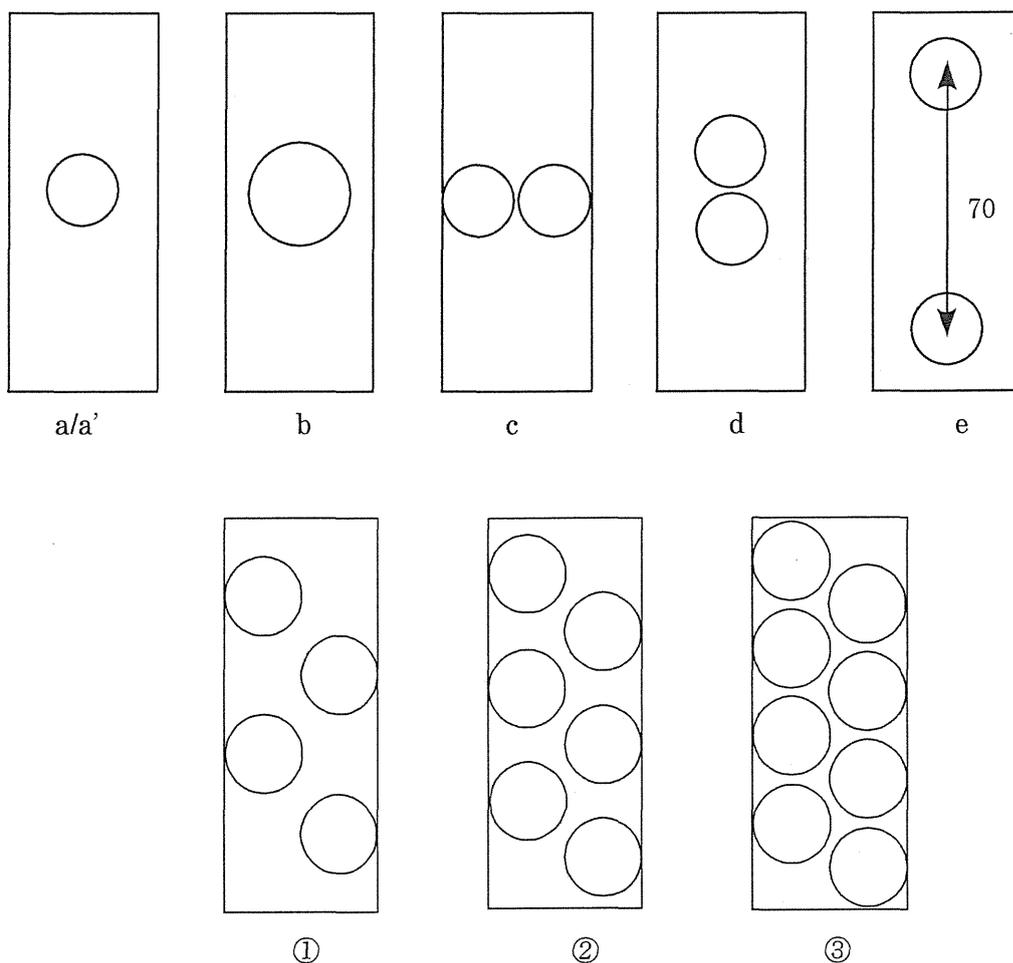


図 3.1 ピットパターン

表 3.1 試験片一覧

	標点距離	幅	厚さ	ピットパターン	
				A	B
P-L8a	100	40	8	a	-
P-L8a'	100	40	8	a	a
P-L8b	100	40	8	b	-
P-L8c	100	40	8	c	-
P-L8d	100	40	8	d	-
P-L8e	100	40	8	e	-
P-L6-0	100	40	6	-	-
P-L6-1	100	40	6	①	①
P-L6-2	100	40	6	②	②
P-L6-3	100	40	6	③	③

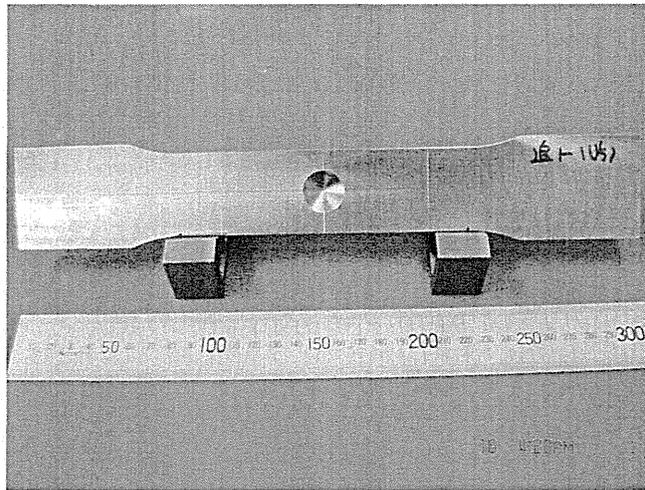


図 3.2 P-L8a、P-L8a' 試験片

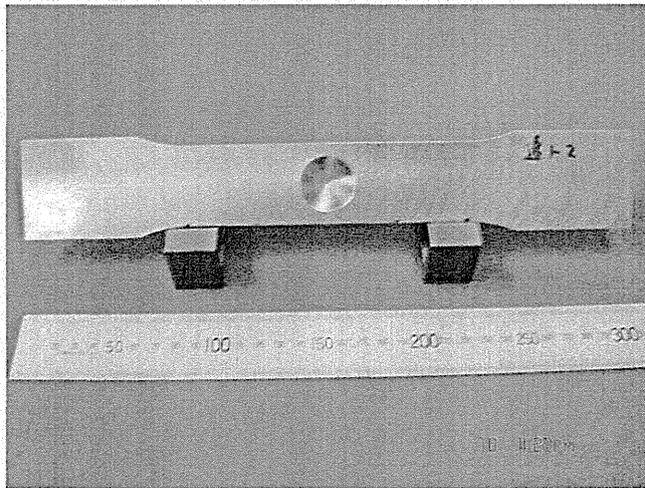


図 3.3 P-L8b 試験片

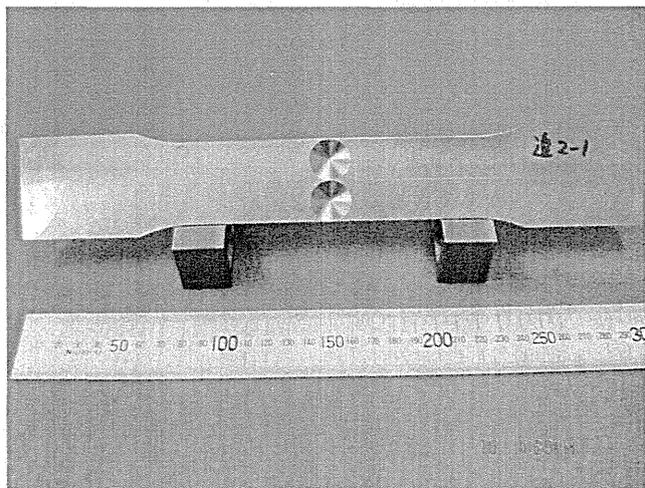


図 3.4 P-L8c 試験片

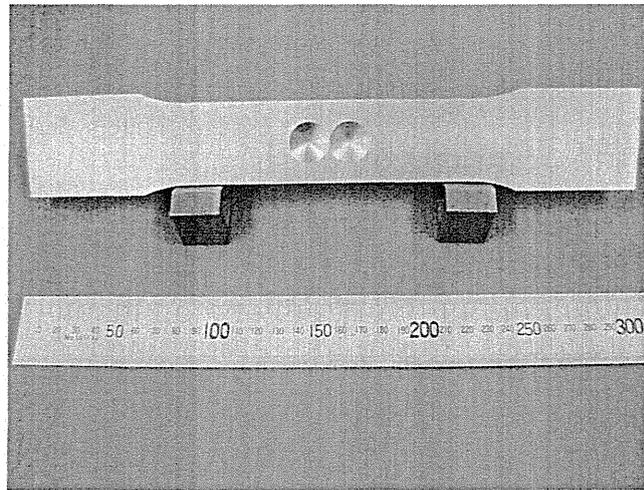


図 3.5 P-L8d 試験片

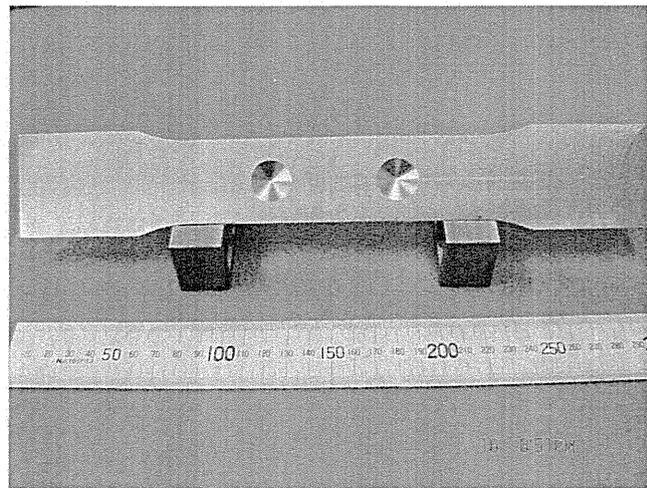


図 3.6 P-L8e 試験片

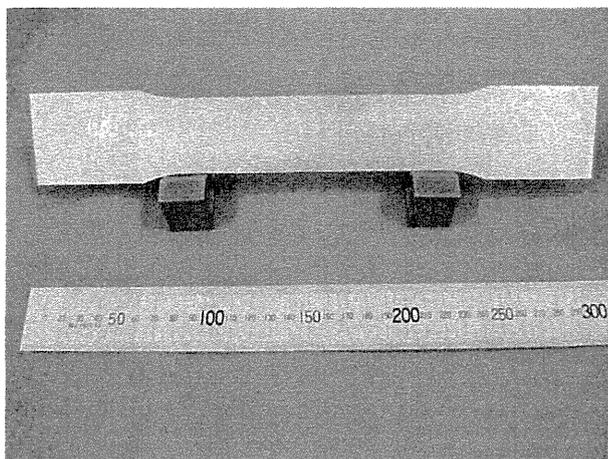


図 3.7 P-L6-0 試験片

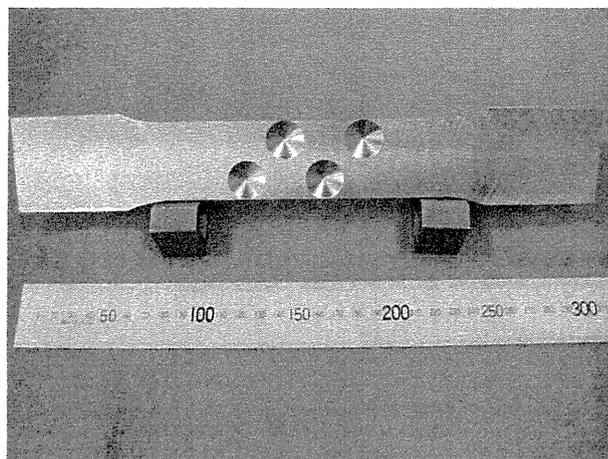


図 3.8 P-L6-1 試験片

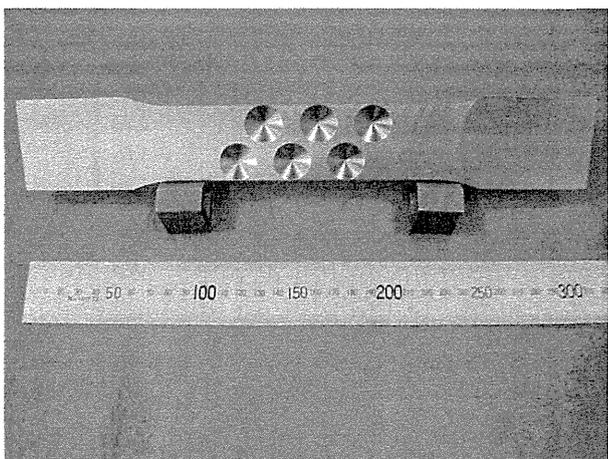


図 3.9 P-L6-2 試験片

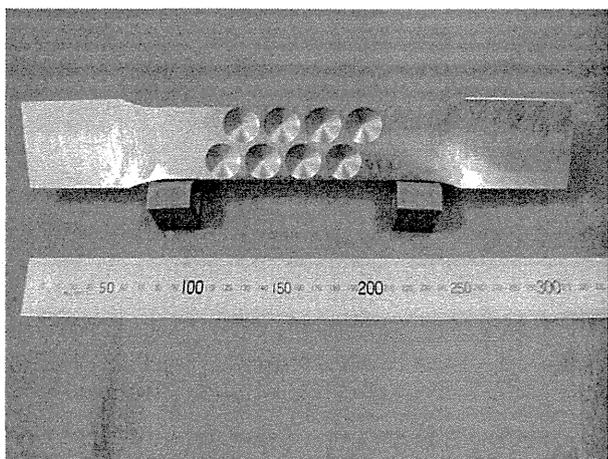


図 3.10 P-L6-3 試験片

3.2 引張強度及び破断伸びに及ぼすピット配置の影響

図 3.11 は平滑試験片及び、P-L8a、P-L8b、P-L8c 試験片の応力-ひずみ曲線である。これを見てわかる通り、ピットを設けた場合、引張り強さも破断伸びも低下し、特に単独ピットを設けた場合の破断伸びの低下が顕著である。平滑試験片と、P-L8a 試験片の結果を比較すると、片面に単独のピットを設けた場合、平滑試験片に比べ、引張り強さは約 5%、破断伸びは約 50%低下した。さらにピットを両面重なるように設けた P-L8a' 試験片で比較すると、平滑試験片に比べ引張り強さは約 12%、破断伸びに至っては約 73%と大幅な減少を引き起こした。また P-L8b の結果を見ると、平滑材に対しては、引張り強さが約 7%、破断伸びは約 57%減少しており、同じ分布で一回り小さいピットを施した P-L8a と比較すると、ピットの面積が大きくなると引張り強さ及び破断伸びがより低下することがわかる。

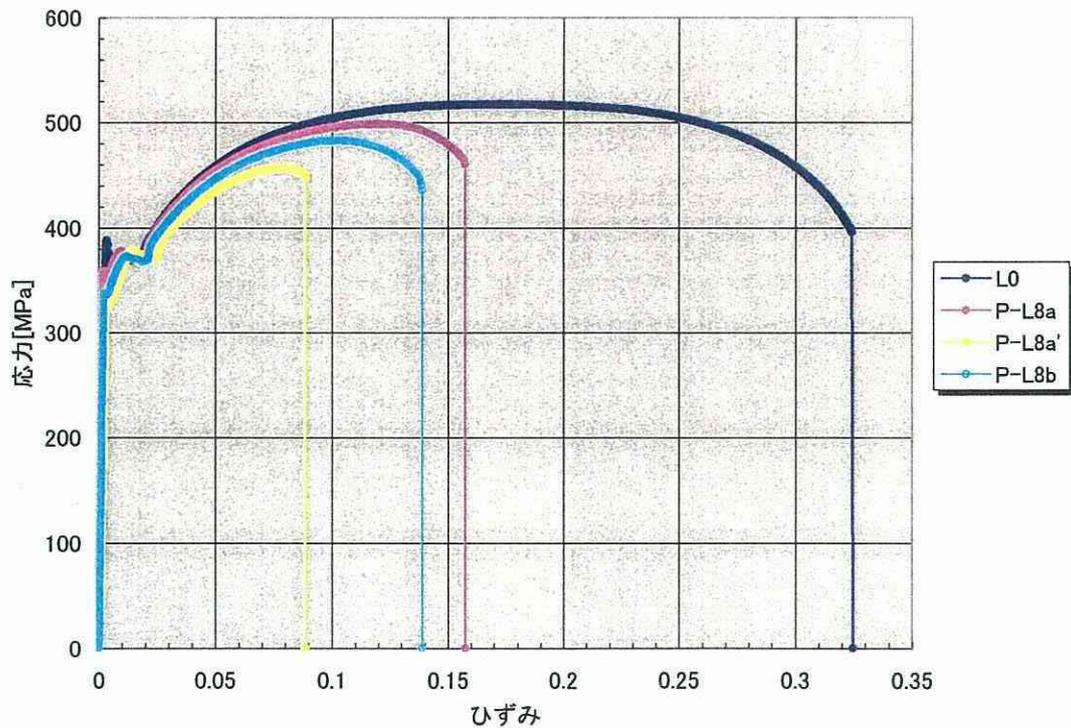


図 3.11 応力-ひずみ曲線

次にピット分布と破断伸びの関係を考察する。図 3.12 はピットパターン異なる 5 本の試験片の応力-ひずみ曲線を表している。これを見ると、最も破断伸びが小さくなっているのが表裏でピットが重なっている P-L8a' 試験片であり、およそ 9% 程度である。ついで小さいのが幅方向に並べた P-L8c 試験片であり、その大きさは約 12.5% である。また、破断伸びが最も大きくなるのは荷重方向にピットを並べた P-L8d 及び P-L8e 試験片であることがわかる。このことから、荷重方向にピットが多く存在する分布ほど、ひずみの集中の緩和により単独でピットの場合に比べ、破断伸びが増加すると考えられる。また P-L8e 試験片は P-L8d 試験片のピット同士の間隔を広くとったものであるが、この結果を見ると、ピットが隣接している場合に比べ破断伸びは小さくなり、単独で 1 つ存在している P-L8a 試験片結果とピットが隣接している P-L8d 試験片結果の間になる。これは離れて存在する場合、より応力集中が起こりやすいため考えられるが、今後詳細な応力解析により解明すべきと考える。

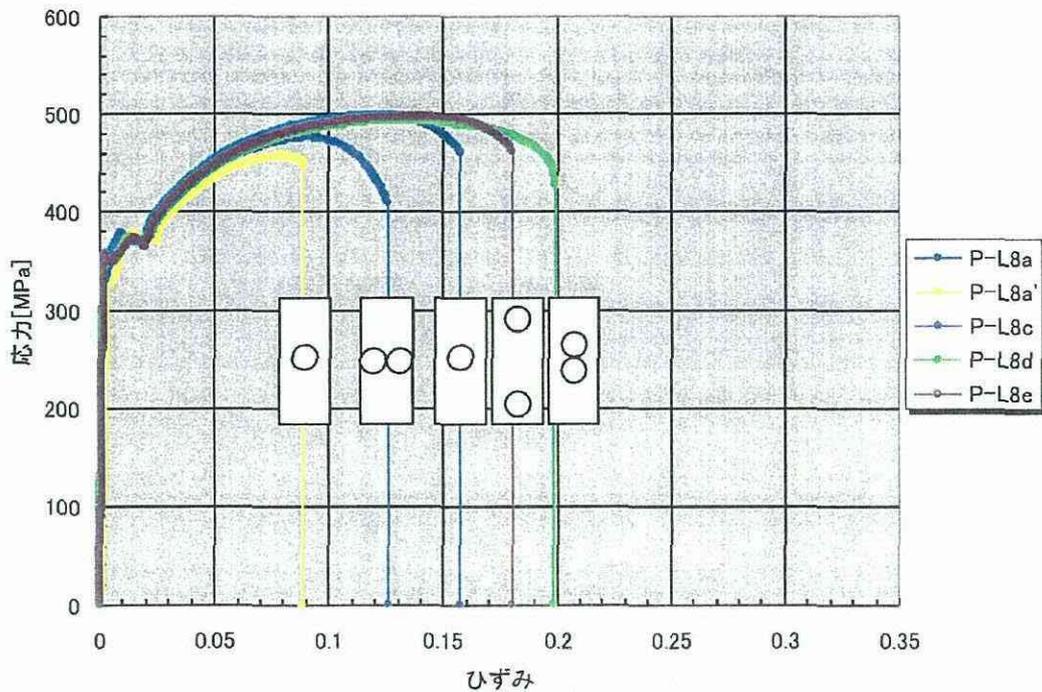


図 3.12 応力-ひずみ曲線に対するピット配置の影響

3.3 板厚の影響

図 3.13, 3.14 には 8 mm 及び 6 mm の平滑試験片の試験結果を基準として、ピットを設けた試験片の引張り強さと破断伸びの割合を示した。図 3.13 を見ると、8mm 試験片と 6mm 試験片の間で、引張り強さの変化にはそれほど違いは見られないが、6mm 試験片のほうがその低下量が若干大きいことがわかる。破断伸びについては、図 3.14 より、6mm 試験片においてもピットの面積率が増加するにつれて破断伸びは回復する傾向が見られたが、その低下量は 8mm 試験片に比べかなり大きいことを確認することができた。

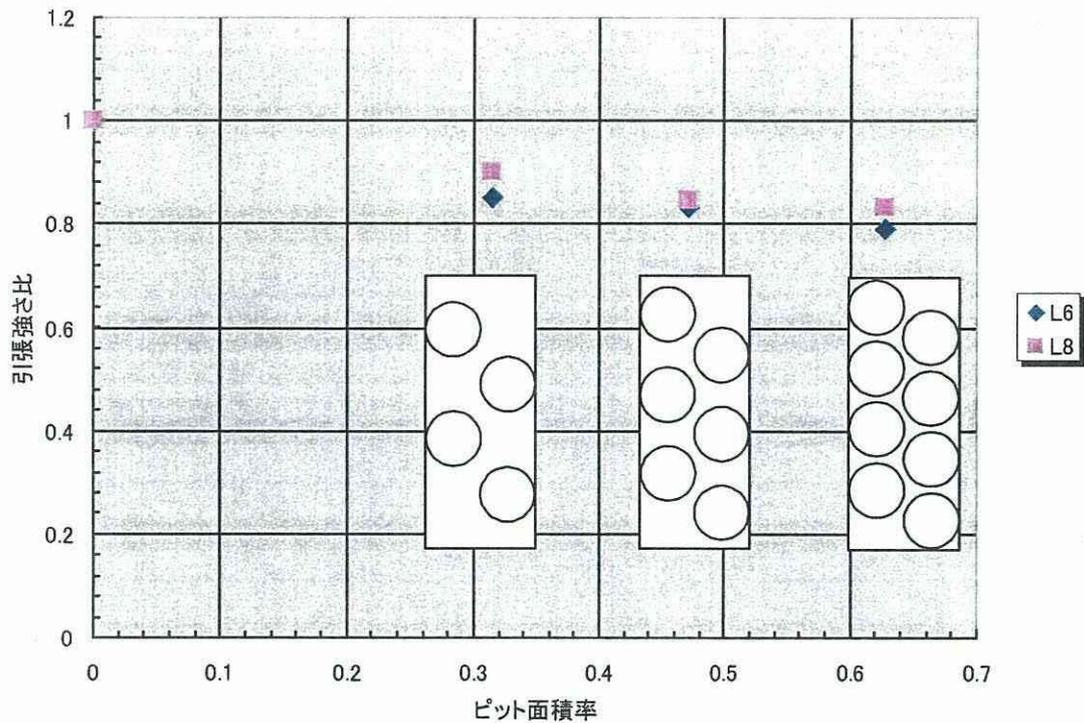


図 3.13 平滑試験片の試験結果を基準としたピット付試験片の引張強さの板厚影響 (板厚は 8 mm 及び 6 mm)

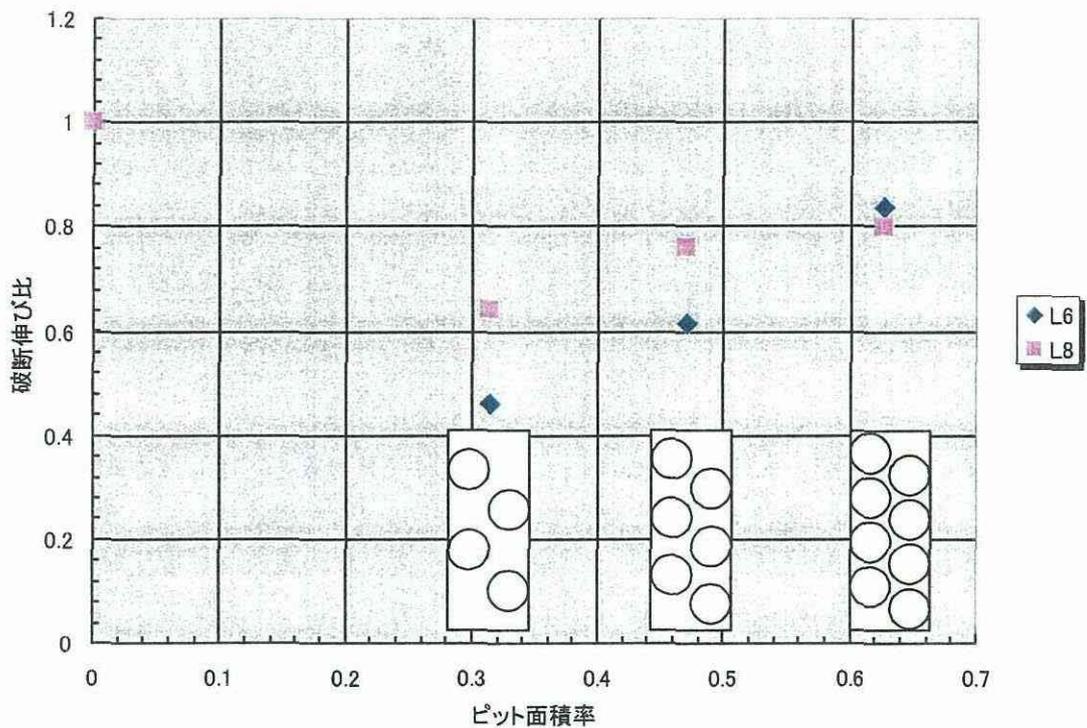


図 3.14 平滑試験片の試験結果を基準としたピット付試験片の破断伸びの板厚影響（板厚は 8 mm 及び 6 mm）

3.4 まとめ

本章のまとめを以下に記す。

- 平滑試験片に比べ、片面にピットが 1 つ存在する場合は引張り強さが約 5%、破断伸びは約 50% 低下する。また両面に重なってピットが存在する場合、引張り強さが約 12%、破断伸びは約 70% 程度減少する。
- ピットの面積が大きくなった場合、引張り強さ及び破断伸びがともにさらに低下する。
- 破断伸びはピットが表裏面で重なる場合に最も低下し、次いで低下量が多いのは、並列の場合である。直列ピットの場合には、それらが近接しているほど破断伸びは大きくなる。
- ピットが存在する場合、平滑試験片に比べ、引張り強さ及び破断伸びは板厚が小さいほどその低下量が多い。

第4章 全面腐食鋼板の表面形状計測とその再現加工試験

4.1 表面凹凸形状の計測とその再現加工

4.1.1 表面形状の測定

表面凹凸の測定に関しては、以下の装置を使用した。

- CCDレーザ変位センサLK-030(キーエンス社製)

この装置の概要を図4.1、図4.2に示す。この装置は三角測量を応用した方式で測定を行うもので、発光素子(半導体レーザ)と受光素子(CCD)によって構成されている。発光素子から照射されたレーザ光が投光側のレンズを通過し、対象物の表面で拡散反射する。その反射光の一部を受光側のレンズで集光し、CCD上に集光スポットを結ぶ。この時、この装置のサンプリング周期が一定の為、受光する反射光の距離も一定となるので、拡散反射している光の唯一つを受光する。そして対象物が変位すると、拡散反射光の集光する角度が変化し、CCD上のスポットが移動し、その位置を検出することで対象物の変位量を測定する。

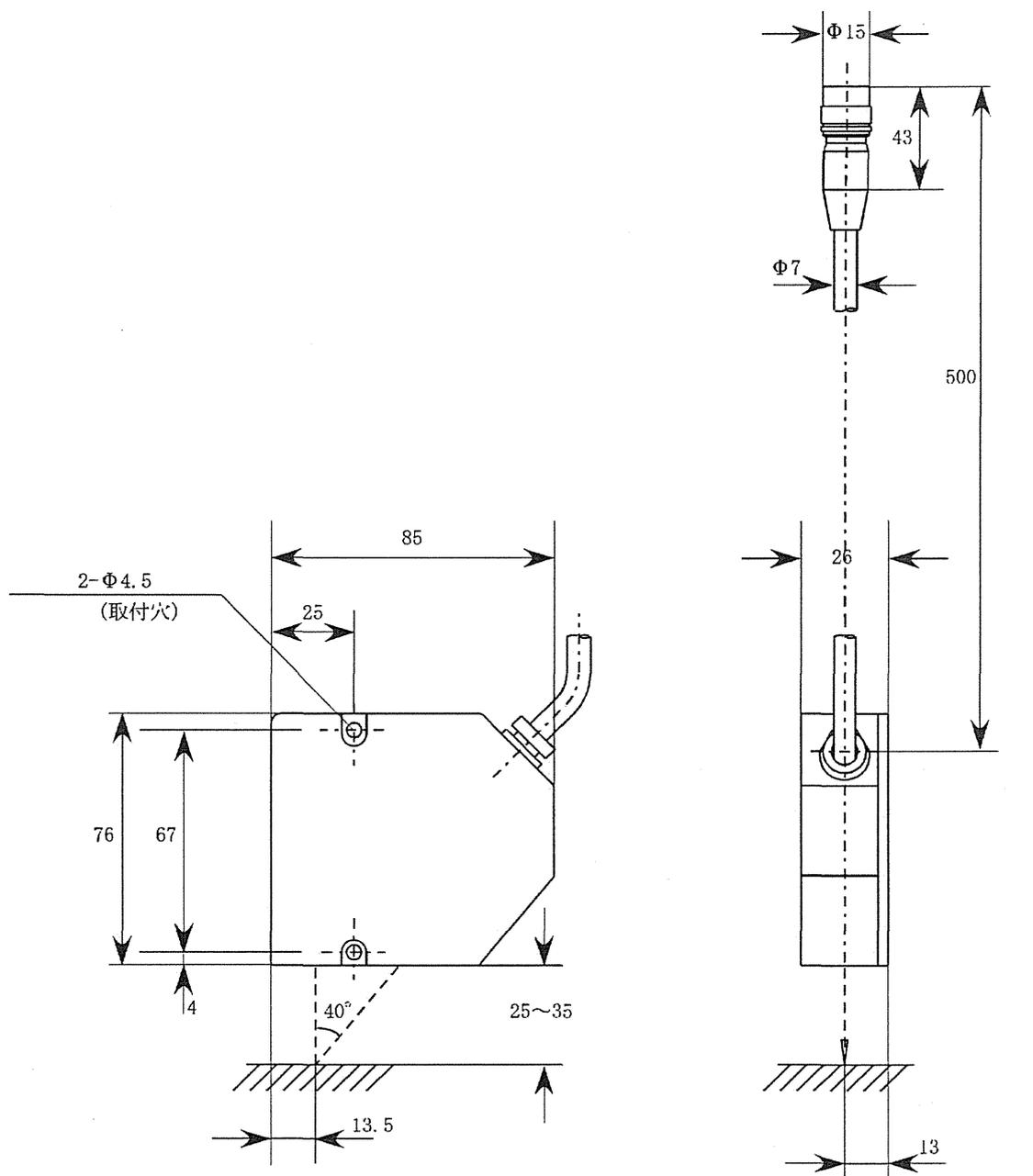
- 卓上型NCフライス盤-SG01

一定速度で試験片を移動させ、且つ精度良く稼働する台座としてフライス盤を使用した。また、SA100Mというコントロールソフトを用いて制御し、NCプログラムにより自動運転が可能であることから比較的簡便性の高いものである。その為、表面凹凸の測定から腐食面の再現加工まで一貫して使用する。

表面凹凸の測定では、フライス盤の主軸頭の部分に上記のレーザ変位センサを取り付け、テーブルの部分に測定対象となる試験片を固定して測定を行った。その図を図4.3に示す。この際、測定対象となる試験片とテーブルの移動方向とが平行になるように注意する。測定データとして読み込むデータは後に示す座標のz座標のみである。

- センサイインターフェイスPCD-320A

パソコンと組み合わせて使用する電圧測定器である。制御ソフトウェアであるPCD-30Aを使用し、測定された電圧を測定し、出力を行う。制御ソフトウェアPCD-30Aでは測定電圧の校正係数、サンプリング周波数、集録データ数を設定し、レーザ変位センサLK-030により測定された電圧値をA/D変換し収録を行う。



単位は全て[mm]

図 4.1 レーザ変位センサ外形寸法図

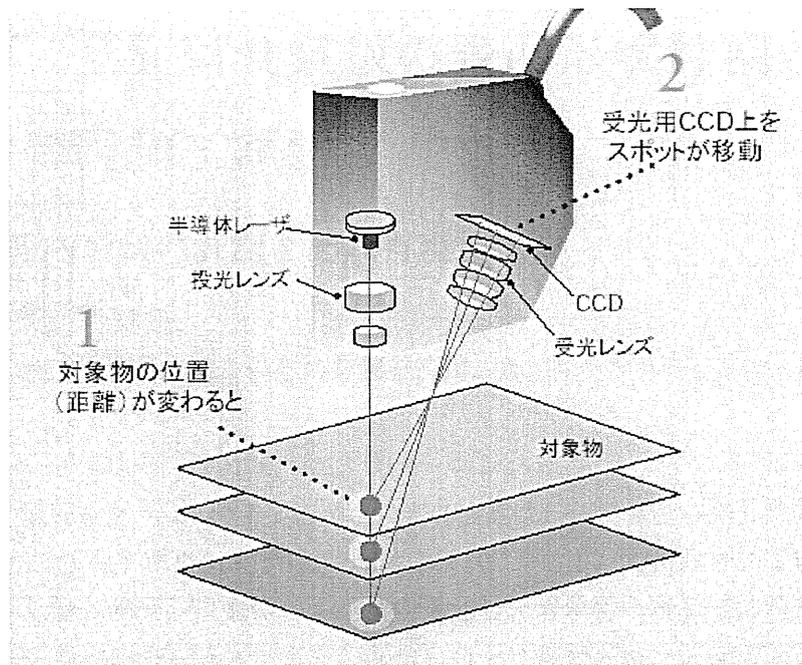


図 4.2 レーザ変位センサの測定原理

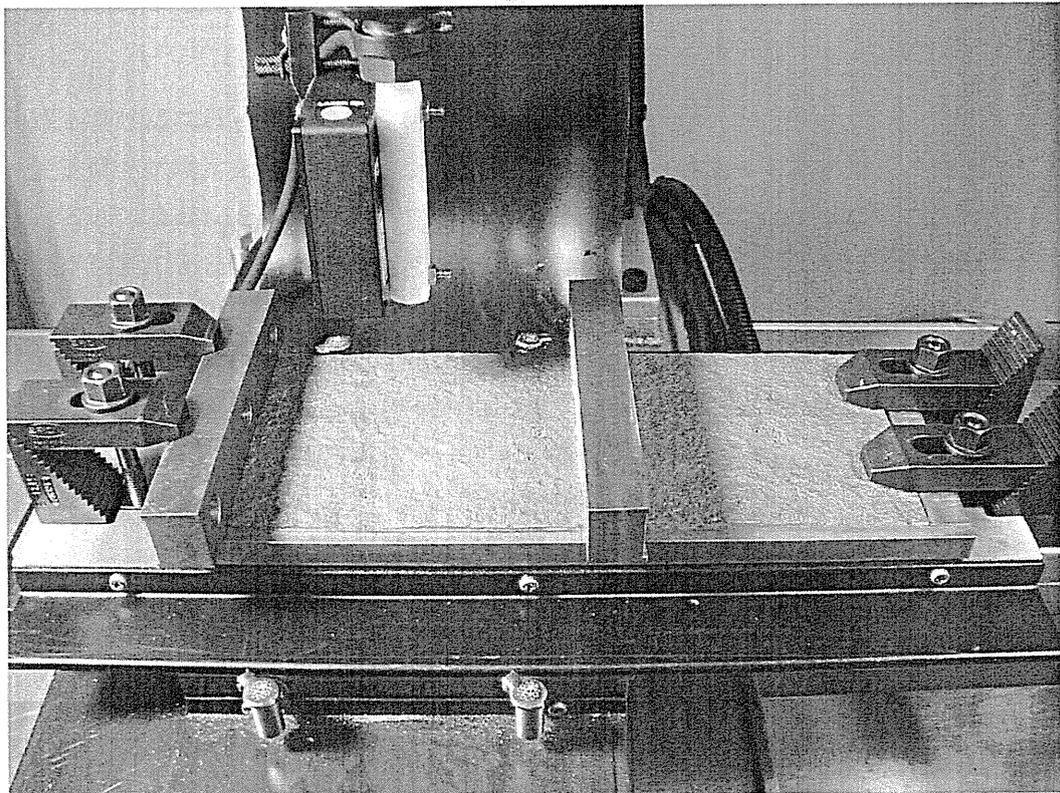


図 4.3 測定対象試験片の設置方法

4.1.2 測定対象試験片

今回の表面凹凸の計測に用いる試験片は、1997年1月2日に日本海沖で折損事故を起こしたロシア船籍タンカー「ナホトカ号」の船底外板である。裏表ともに腐食しており、表面の凹凸も激しい状態である。今回は、その「ナホトカ号」の一部を計測の為に加工し、基準面を設けた。試験片の表面写真と概形を以下に示す（図4.4-4.5参照）。

尚、今後の実験を進行していく上で、区別をつけるために測定対象試験片にA面、B面を定義し、その定義に従い今後の実験を進めていくものとする。

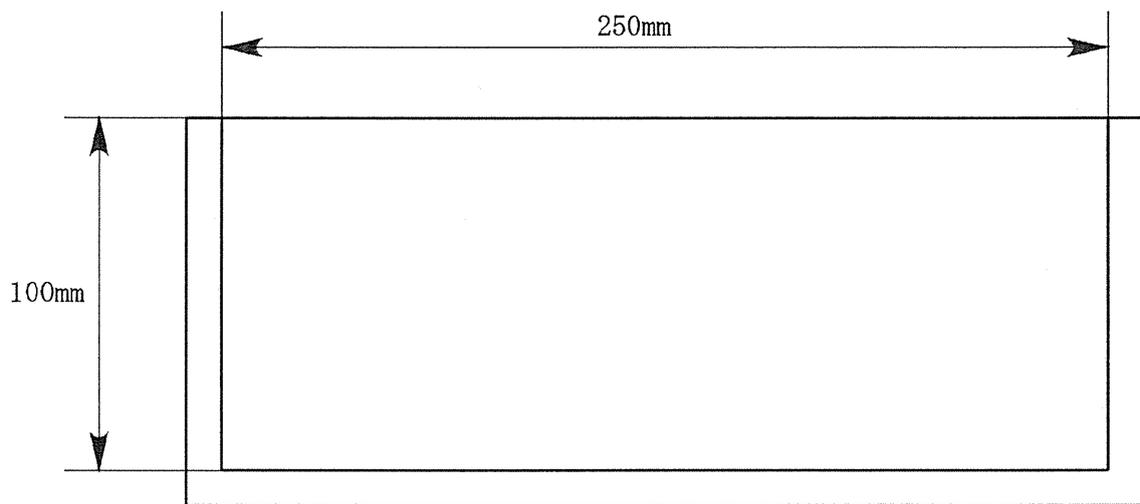


図 4.4 ナホトカ号試験片外形寸法

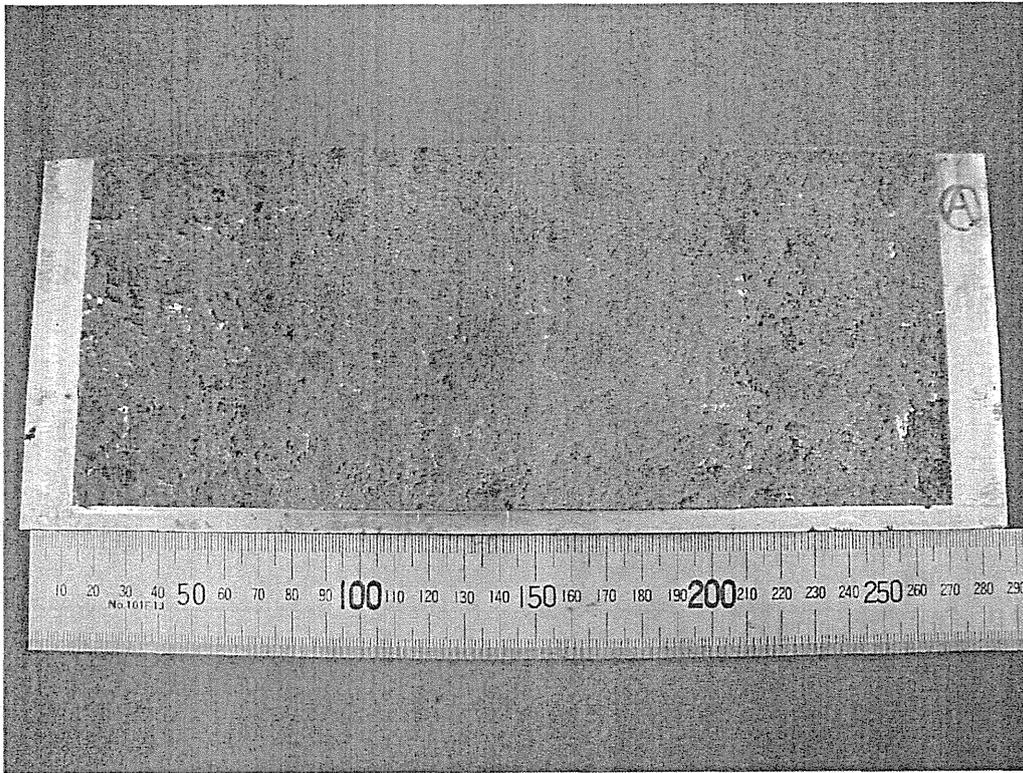


図 4.5(a) 測定対象試験片 A 面

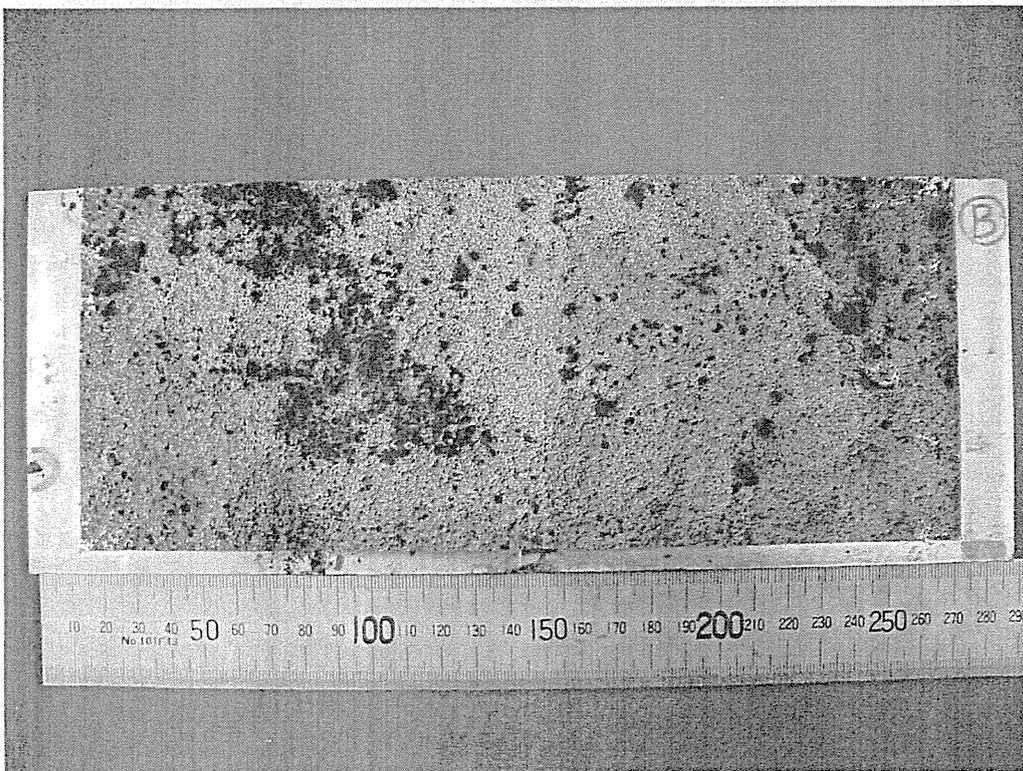


図 4.5(b) 測定対象試験片 B 面

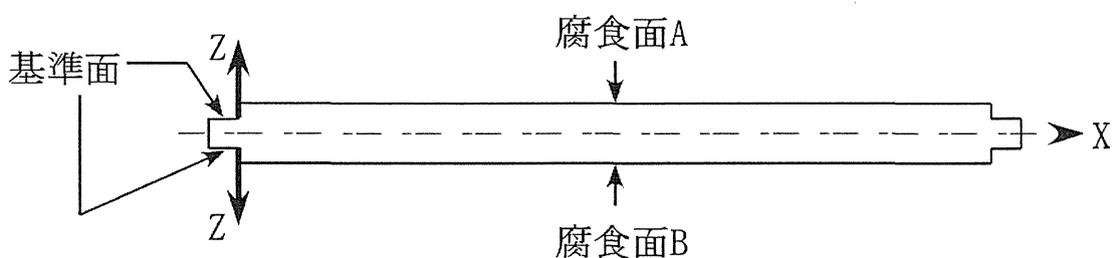
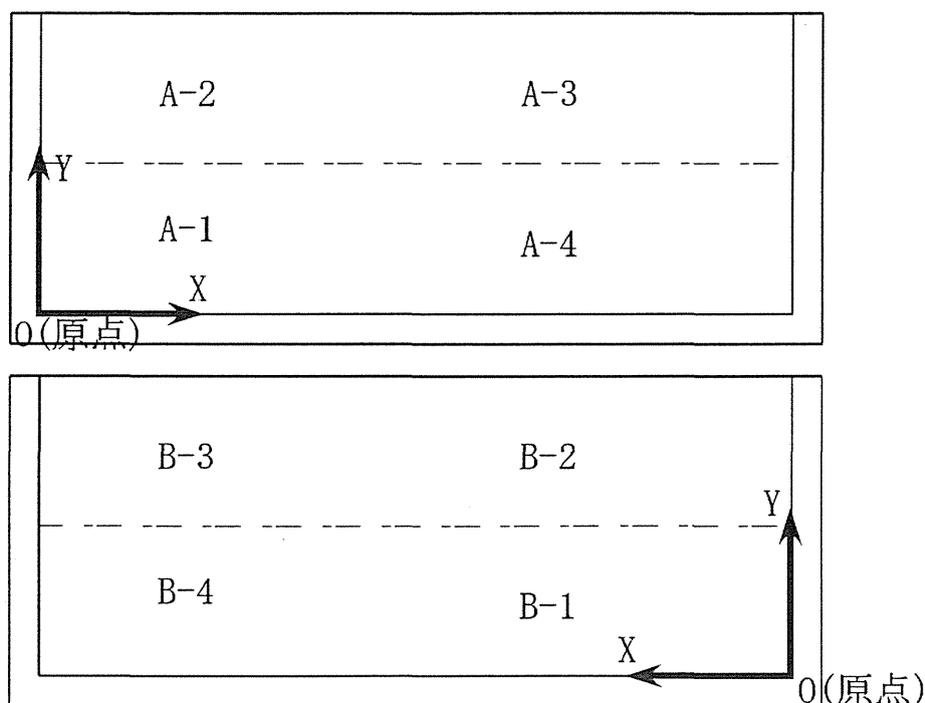


図 4.6 測定対象試験片詳細

4.1.3 測定方法

測定対象試験片に定義した座標や裏表の対応の図を図 4.6 に示す。測定に際して卓上フライス盤 SG01 の稼動範囲に制約があるため、試験片を上図に示す 4 つの領域に分割して計測を行った。また、計測を全て自動で行えるように、図 4.3 に示すように計測領域の端部にはブロックで大きな段差を設けた。これにより、x 方向の端点がはっきりと識別出来、データ整理を容易に行うことが出来る(図 4.7)。

計測方法の詳細は図 4.8 に示すように x 方向、y 方向ともに 0.5[mm]ピッチの測定である。この値はフライス盤 SG01 の台座の送り速度と計測に用いたソフトウェア PCD-30A のサンプリング周波数から設定される。

フライス盤 SG01 による NC プログラムで全自動計測を行ったが、その x 軸の自動走査方向は台座の稼動範囲の都合上、実際の座標軸とは逆向きとなっているが、あくまでこの試験片の座標系は図 4.8 に示すものである。

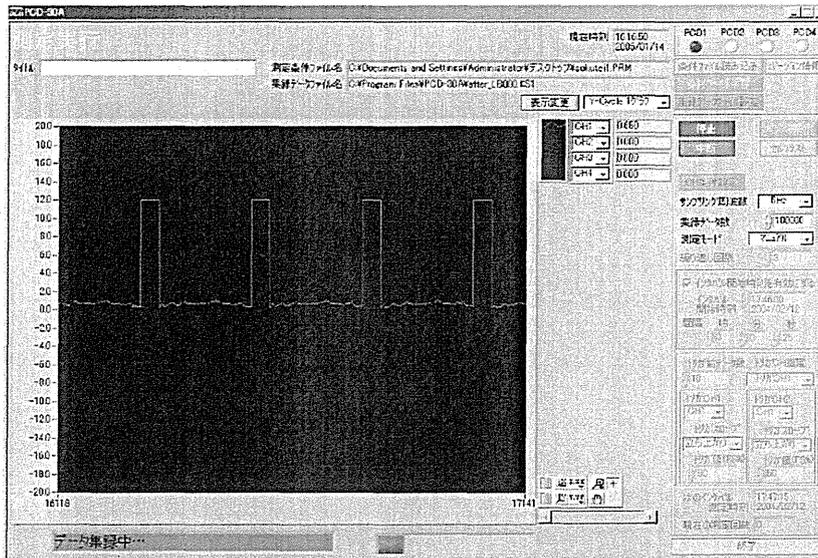


図 4.7 ソフトウェアPCD-30Aにおける計測の様子

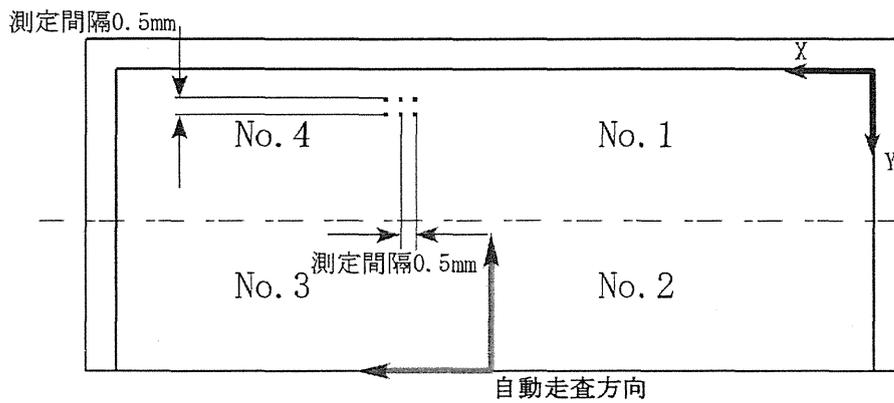
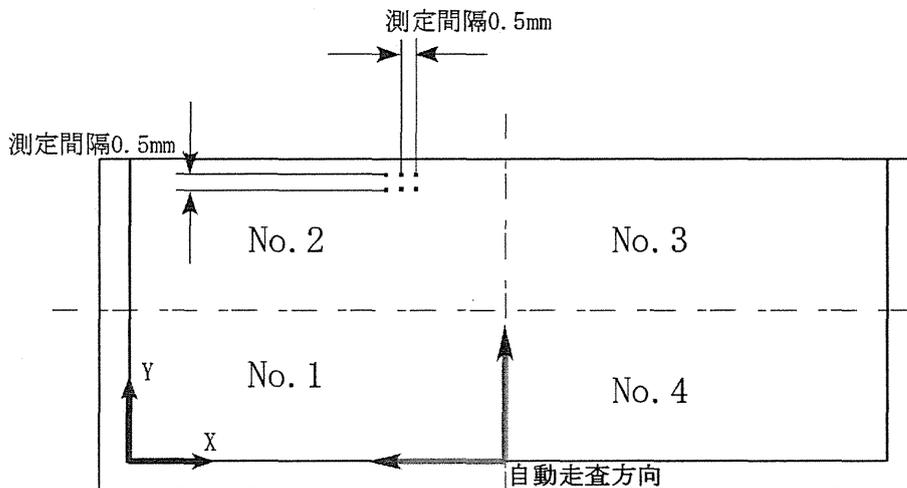


図 4.8 表面凹凸計測方法

4.1.4 測定精度確認試験

実際に、腐食平板の表面凹凸を測定する前に、使用機器の精度を確認する為に完全に平坦な表面形状を持つ測定対象を用いた表面測定精度の確認試験を行った。この際、用いた表面は、実際にレーザ変位センサを製造しているメーカーでも使用されている高精度計測器の校正用であるジルコニアセラミクス製のゲージブロックを使用した。測定方法に関しては前節で述べたものである。

図 4.9 に計測試験に用いた形状の詳細図と計測結果の 3D 表示を示す。また、表 4.1 に用いたゲージブロックの概要を示す。この測定結果から、レーザ変位センサの読み取り値の最大と最小の差が $10 [\mu\text{m}]$ であり、今後の測定精度の精度を十分に保証出来るものであることがわかる。但し、レーザ変位センサの測定の仕組み上、大きな段差の計測には精度上問題が起きる場合があることがわかった。今回の腐食表面の計測では x 方向の両端に大きな段差を設けている為、x 方向の両端は測定値から省くこととした。

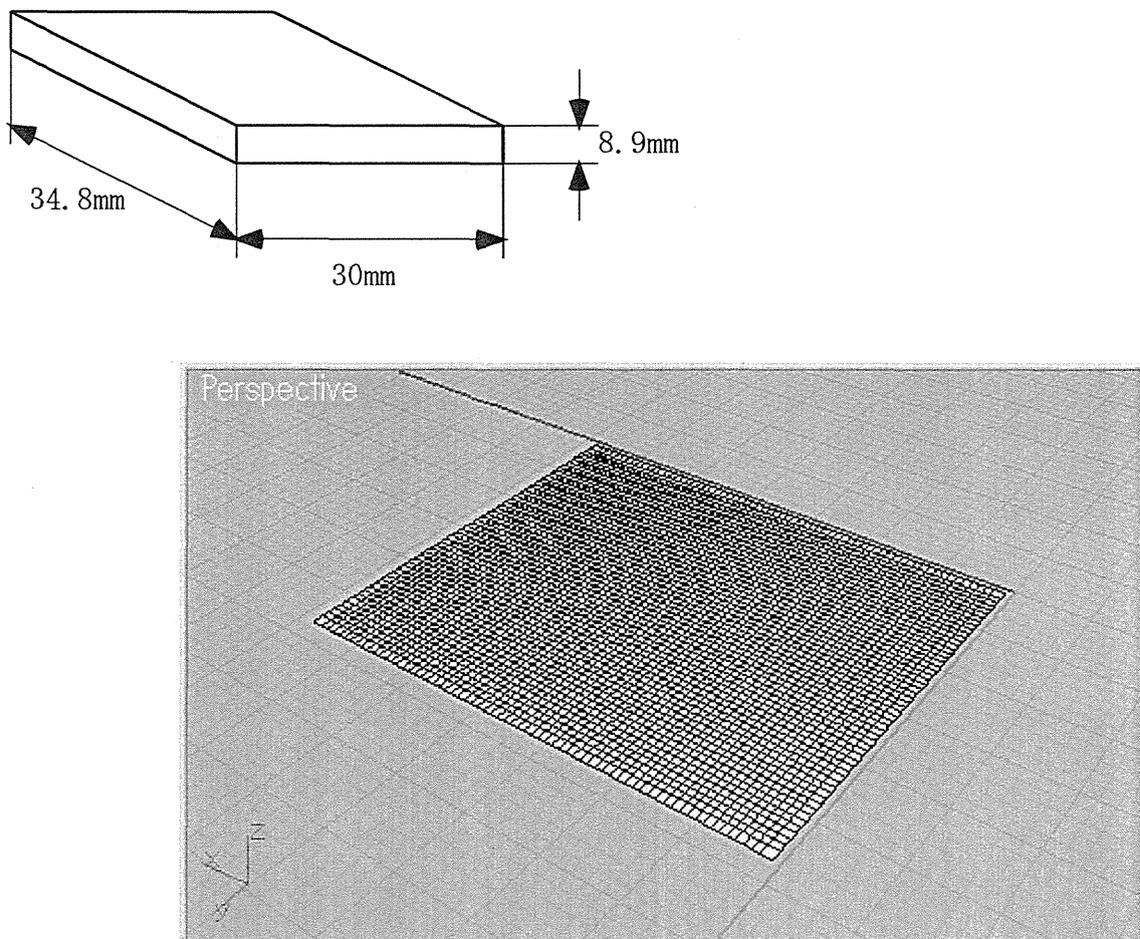


図 4.9 計測精度確認試験

表 4.1 ゲージブロックの概要

規格	J I S B 7 5 0 6 - 2 0 0 4
材質	ジルコニアセラミクス(Z r O 2)
等級	0 (高精度測定機器の定期校正, 感度調整用)
熱膨張係数	$(9.3 \pm 1.0) \times 10^{-6} / ^\circ \text{K}$

4.1.5 測定結果

前節の腐食表面凹凸の計測により得られたデータを基に、表面形状を3次元表示したものを以下に載せる。図のナンバリングは図 4.6 や図 4.7 と同様とした。これらの図から解るように、全面腐食といえどもその表面は凹凸はかなり激しく、必ずしも均一な腐食ではないことがわかる。また、測定対象試験片の表面形状と計測結果のそれとを目視により比較すると、ほぼ同一の形状であることが確認出来る。特に、腐食ピットのように大きく抉れた部位に関しては位置、大きさ、深さに関してもほぼ同じである。従って、今回の計測データを用いた試験を行うことで、腐食材の引張り特性が現れることが期待される。

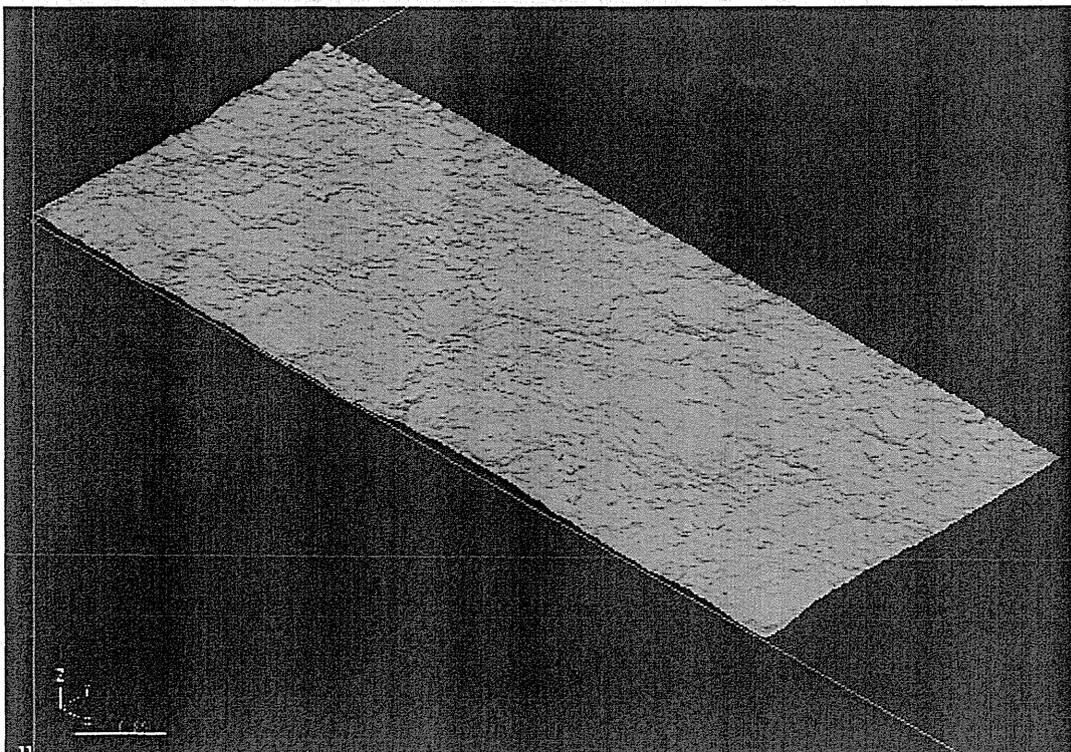


図 4.10(a) 腐食表面形状 A 1

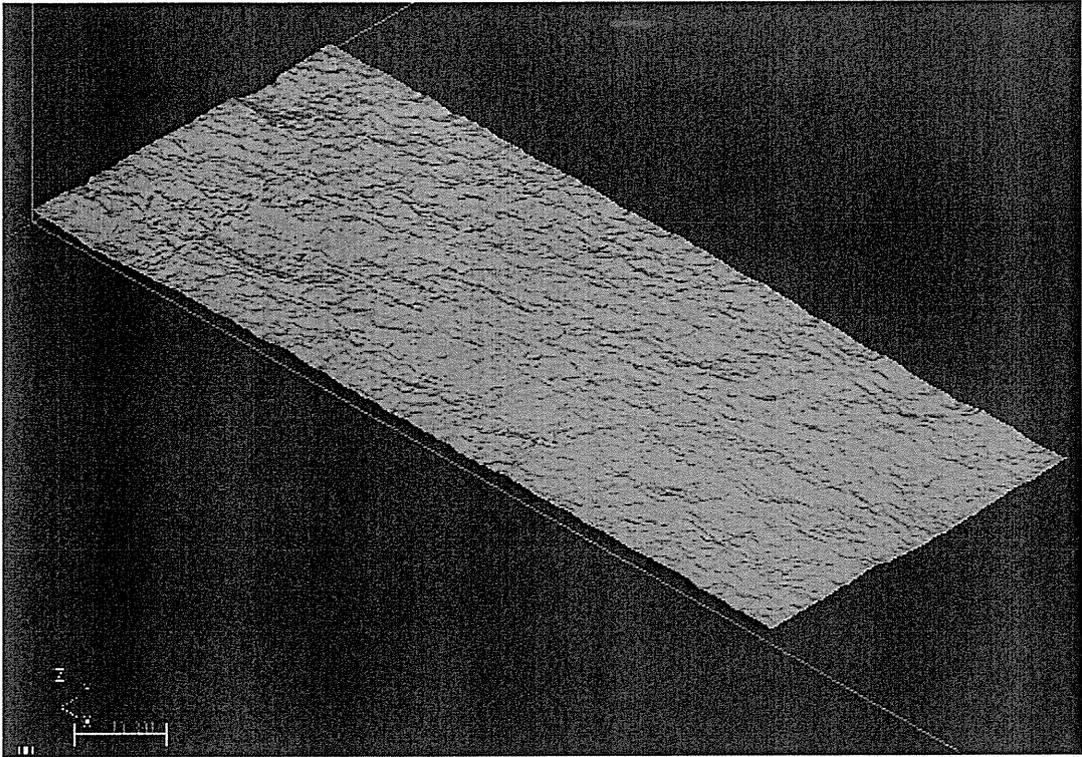


图 4.10(b) 腐食表面形状 A 2

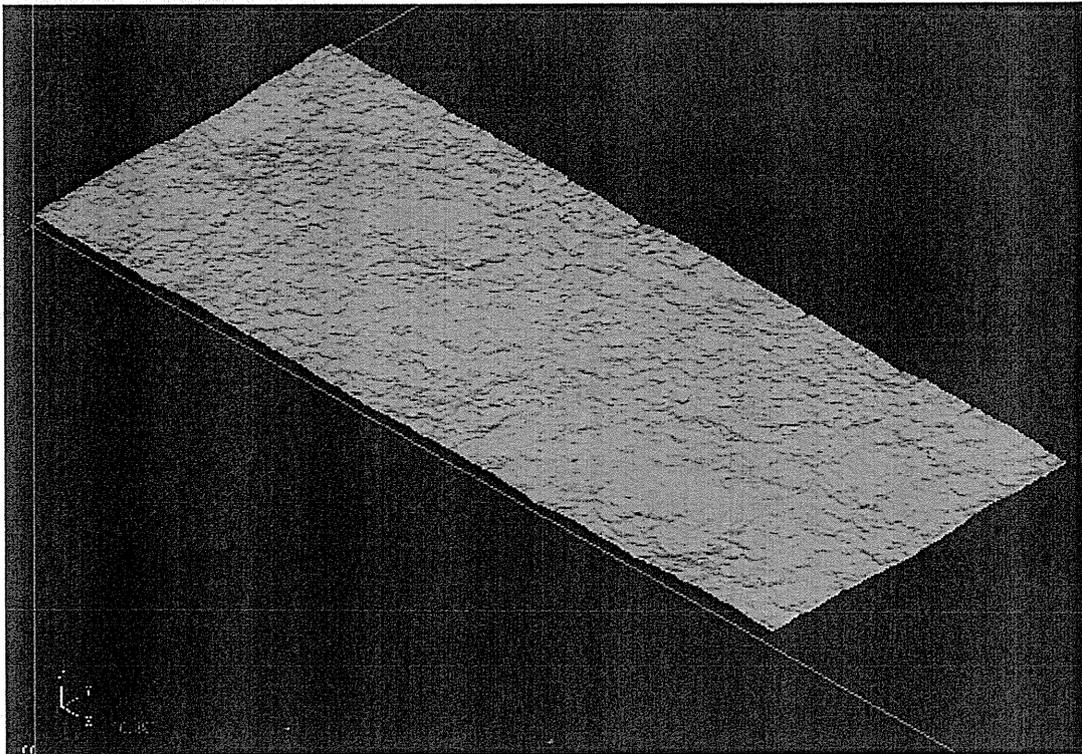


图 4.10(c) 腐食表面形状 A 3

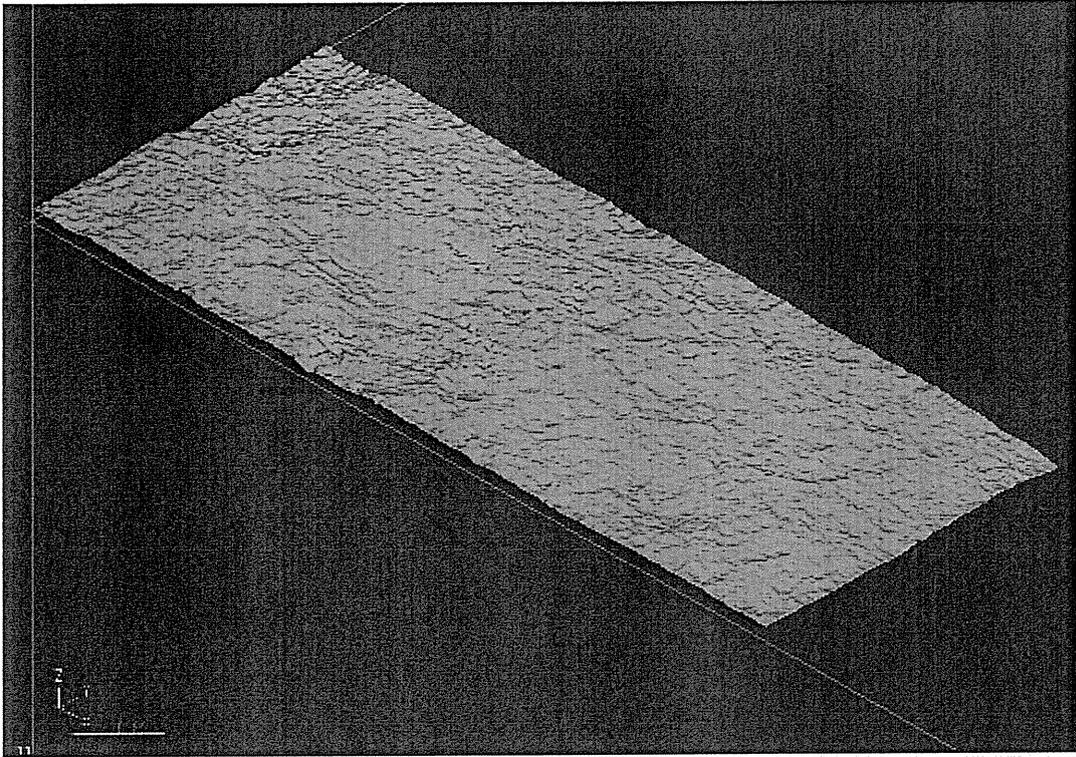


图 4.10(d) 腐食表面形状 A 4

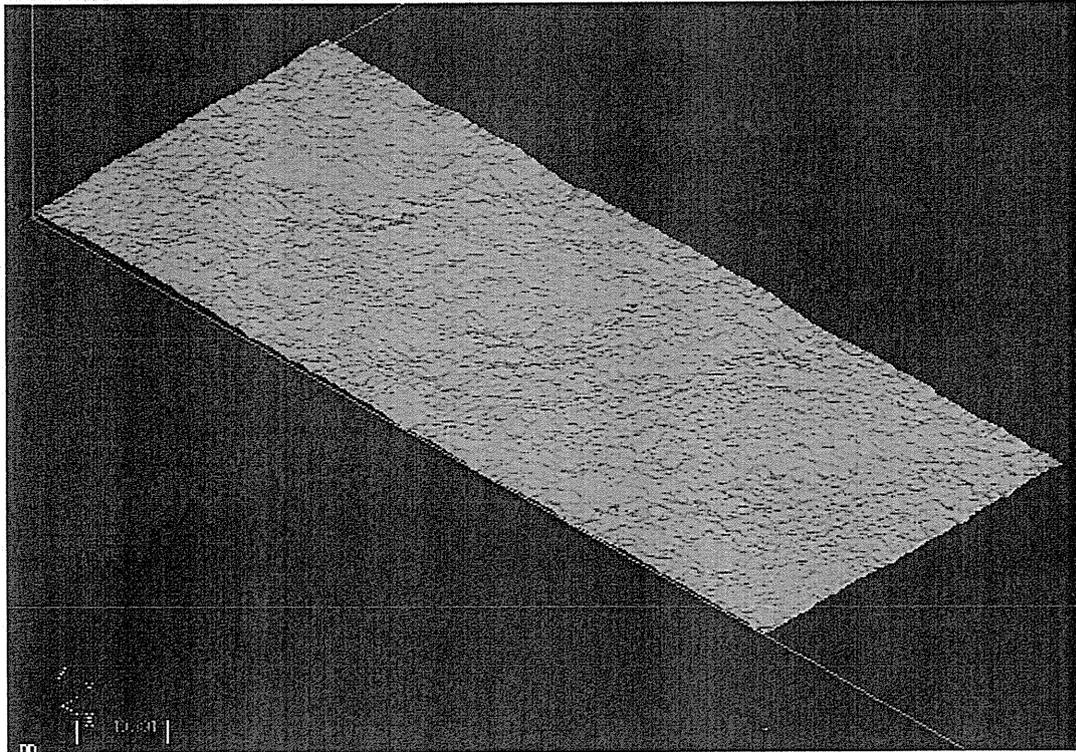


图 4.10(e) 腐食表面形状 B 1

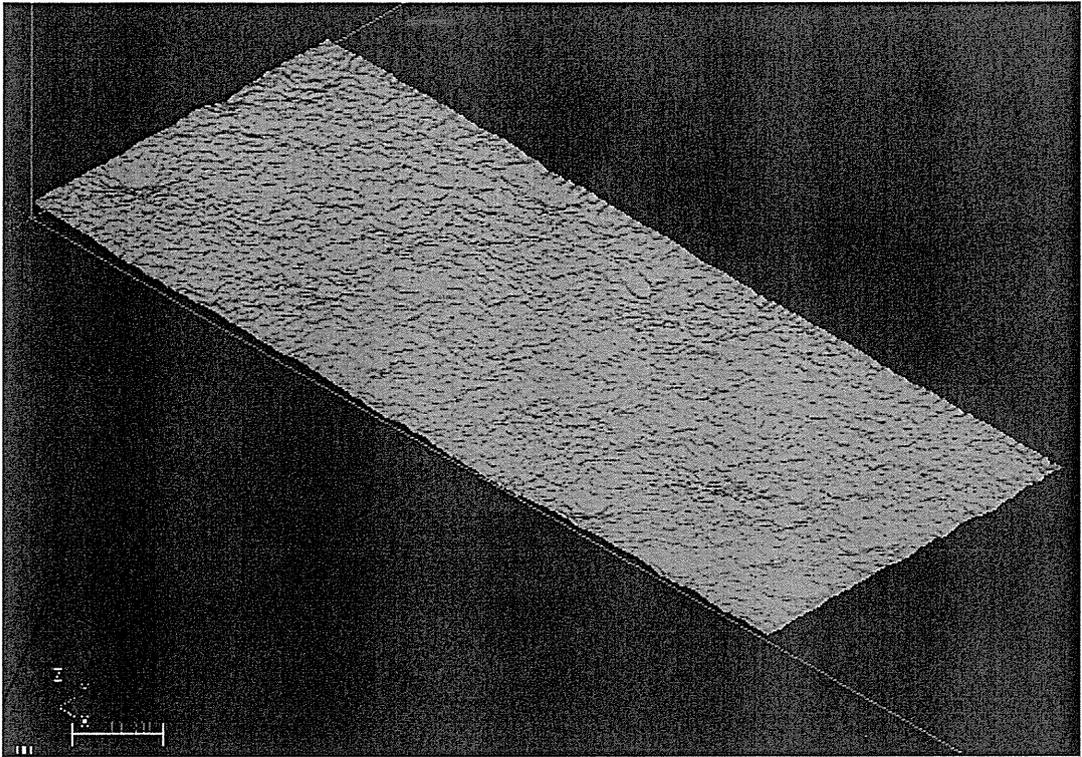


图 4.10(f) 腐食表面形状 B 2

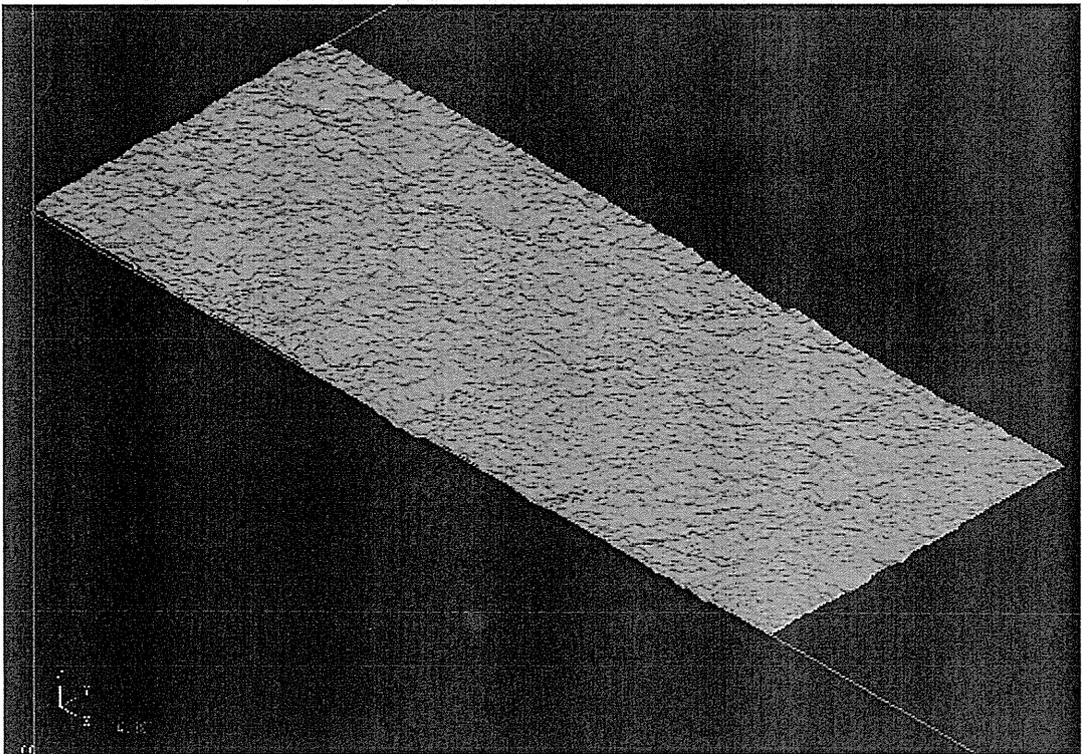


图 4.10(g) 腐食表面形状 B 3

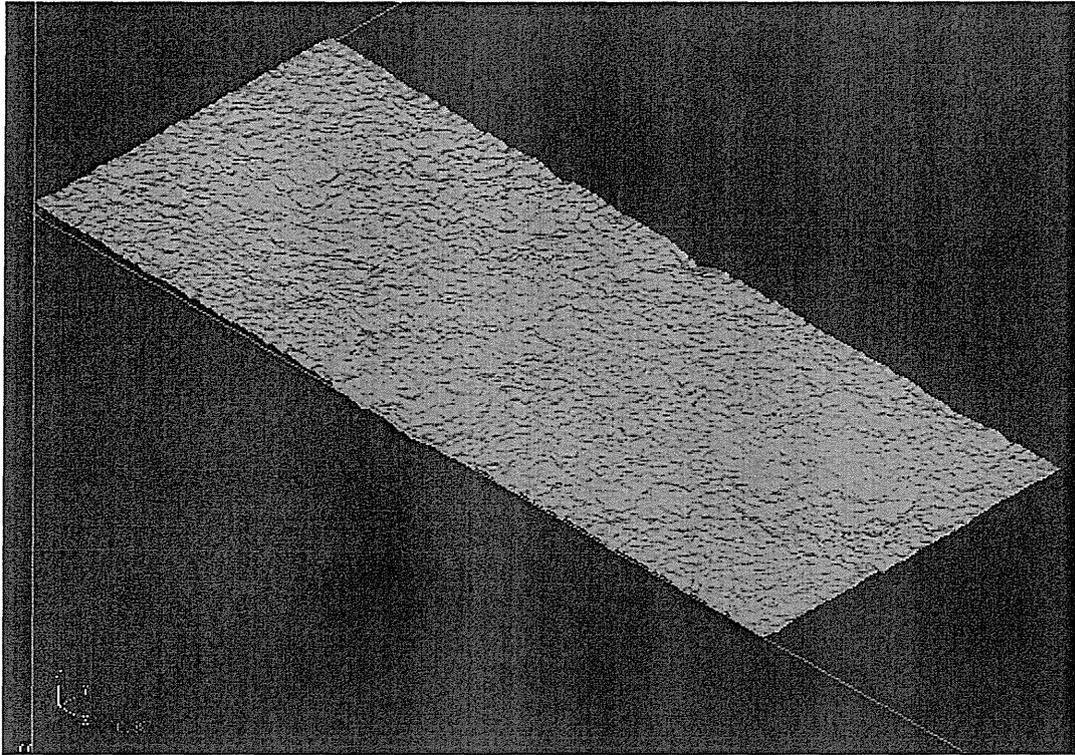


図 4.10(h) 腐食表面形状 B 4

4.1.6 腐食表面の再現

ここで、本研究におけるCAD/CAMシステムを用いた腐食表面凹凸形状の再現から加工までの一連の流れについて述べる。また、既に計測は終了し、 (x, y, z) のデータは揃っていることを前提とする。

1) 3DモデラーソフトウェアRhino 3.0を用いたサーフェス作成

計測されたデータを (x, y, z) の順序で並べたテキストファイルを作成し、そのファイルにRhinoのサーフェス作成コマンド“SrfPtGrid”を入力する。また、その際にx方向の要素数、y方向の要素数も入力し、サーフェス作成のためのコマンドファイルを作成させる。作成したコマンドファイルをRhino上で開くと、自動的にサーフェスを作成する。ここで使用する“SrfPtGrid”コマンドでは、点群の間を2次のNURBS曲線(Non-Uniform Rational B-splines)で近似したものであり、必要に応じて次数を大きくすることも可能である。NURBS曲線とは自由曲線、曲面の一つである。B-スプラインはなめらかで不自然な歪が出にくく、一部を変形しても影響が全体に及ばないのが特徴であるが、これに改良を加え、制御点に重みを与える(式の形が有理式になる)ことで、真円のような幾何的形狀も表現できるようにしたのが有理化B-スプラインである。

作成されたサーフェスはIGESファイル形式でエクスポートし、MasterCAMに転送する。

2) MasterCAMによるIGES変換とサーフェスの作成

Rhinoce rosで作成されたIGESファイルをMasterCAM内でMC9ファイルに変換し、サーフェスが作成される。このとき座標はRhinoce rosと同様の座標系となる。

3) MasterCAM Millによる切削ツールパスの作成

①荒取りツールパス

荒取りとは高速でワークの大部分を加工して、仕上げツールパスの準備を行う。この際、比較的大きめの工具を使用するとより高速な切削が可能となる。

②仕上げツールパス

荒取り加工で残された部分を取り除く。この際、比較的細いエンドミルを使用する為、加工の送り速度を極端に遅くする必要がある。

4) NCプログラムの卓上型NCフライス盤SG01へのポスト

MasterCAMのポストプロセッサを使用し、ツールパスをNCプログラムとして出力する。このとき荒取りと仕上げの工具径が異なる場合は別々のNCプログラムで保存する。またNCプログラムの座標系がワーク(切削対象)座標系に設定されていることに注意する。

5) 卓上型NCフライス盤SG01による切削

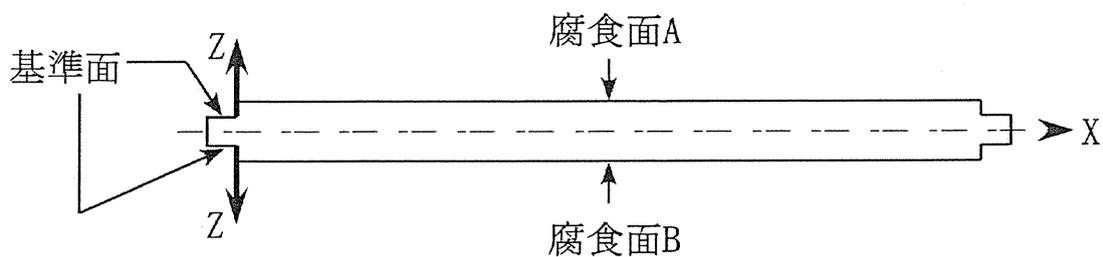
卓上フライス盤SG01にNCプログラムを転送し、制御用ソフトSA100Mによって自動切削で加工を行う。

4.1.7 腐食表面の再現精度の確認

前節までに述べた手法により腐食表面形状を原寸の40%に縮尺し再現加工を行った。本節では、この腐食表面の再現の精度について検討する。その方法として、再現加工を施した試験片に対して4.1節で行った表面計測と同様の計測を行い、その精度を確認する。誤差の平均は約0.052[mm]と多少大きな結果にはなったが、これは切削の際に出来た誤差であると考えられる。加工に使用された最も細いエンドミルの直径は1[mm]であるが、これを用いて0.5[mm]ピッチで計測された元データを40%に縮小した0.2[mm]ピッチの腐食面データを完璧に再現することは難しいということである。

結果を表4.2に示す。また領域A1の $y=0, 10, 20$ [mm](40%縮尺後を基準とする)におけるx方向の元の腐食面計測値と切削後の計測値を2次元で示したものを図4.12に示す。

(a) 「ナホトカ号」試験片



(b) 再現加工後の腐食面

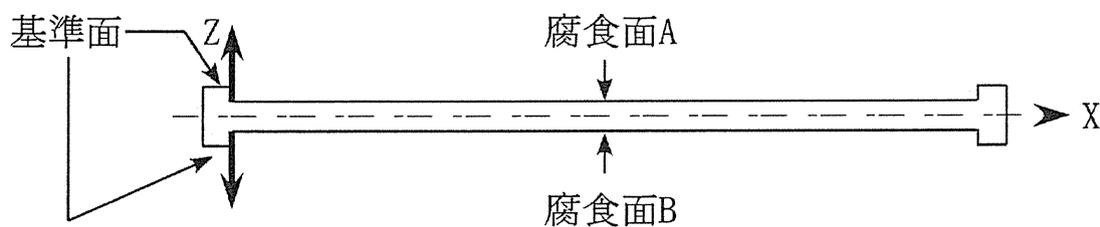


図 4.11

表 4.2

試験片の 識別番号	誤差の平均 [mm]
A1	0.057
A2	0.046
A3	0.052
A4	0.065
B1	0.033
B2	0.063
B3	0.068
B4	0.037

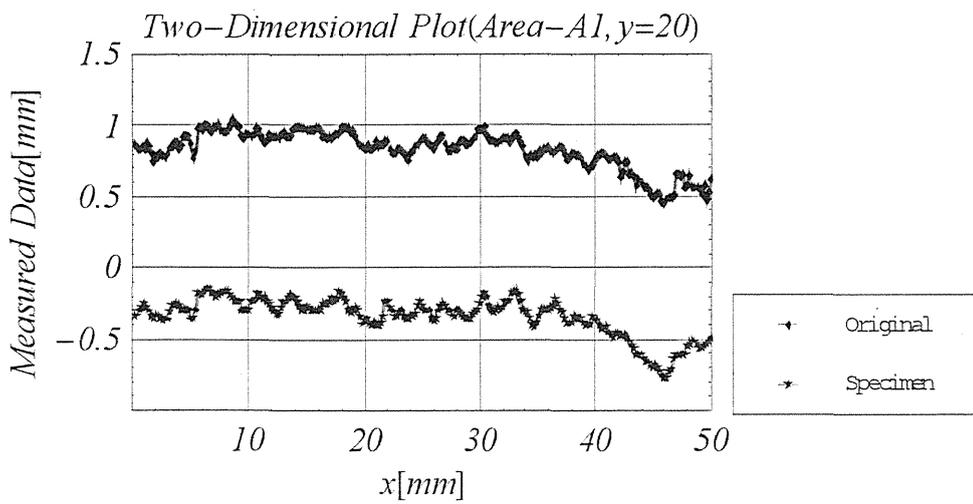
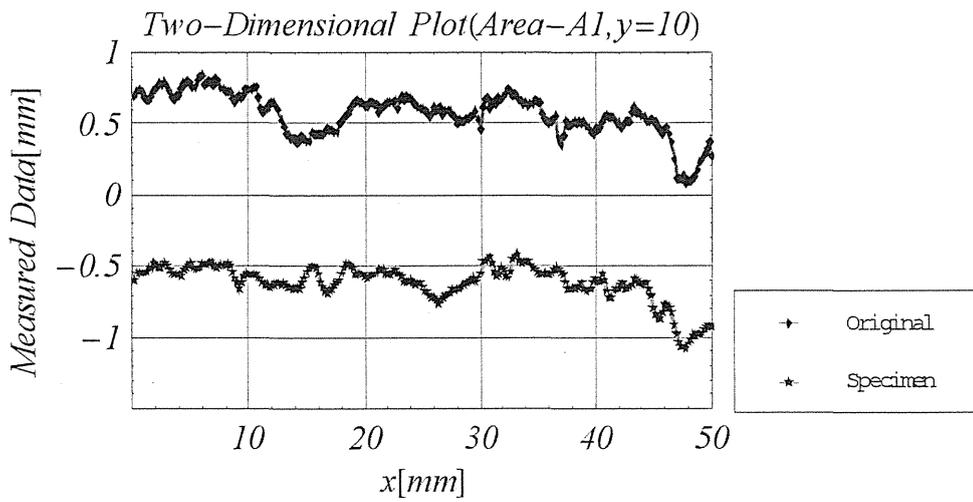
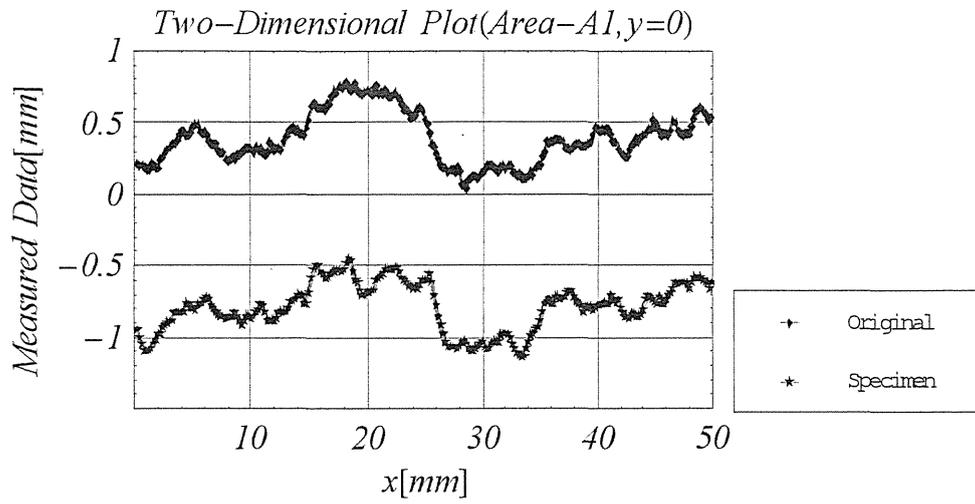


図 4.12 「ナホトカ号」試験片と再現された腐食面断面形状の比較

4.2 強度・延性試験

4.1.1 実験の目的

第2章までに計測、再現された「ナホトカ号」の一部を卓上型NCフライス盤SG01によって、加工し、その強度を調べる。今回の実験では、腐食表面の実測値に基いた試験片を作成し、その破壊挙動を調べることにより、機械加工による腐食表面再現試験を実施する。さらに、この再現試験において試験片のサンプルサイズ（試験片の幅と長さ）の違いによる強度・延性変化を調べ、全面腐食した大規模構造部材の強度特性を推定する上で問題点を抽出する。

4.2.2 供試材及び試験片

供試材は主に橋梁、船舶、車両、産業機器等幅広い分野に用いられる溶接構造用圧延鋼材SM490A(JIS規格名称—JISG3106)を使用し、今回の試験では試験速度は全て5[mm/min]で統一して実験を行った。

試験機容量は250[kN]であり、またつかみ具の大きさにも制約がある為、引張り試験片は最大で、幅40[mm]、板厚8[mm]、標点間距離100[mm]とした。「ナホトカ号」から切出された腐食材の寸法は幅100[mm]、長さ250[mm]である。従って、そのままの大きさでは引張り試験を行うことが困難である。そこで、今回の引張り強度試験では計測された腐食表面の40%縮尺模型試験片を作成し、その強度を調べることにした。第2章で述べたように、この範囲での相似縮尺試験片による強度・延性への寸法効果はほとんど無い。「ナホトカ号」試験片の腐食表面全体を40%スケールにし、裏表両面に対して再現加工したものを試験片C-L1とする。また、C-L1試験片の再現性を確認するため、C-L1-2試験片を作成し、同じ腐食面を持つ同じ条件の下の引張り試験を行った。このL型試験片に関しては、全て幅40mm、標点間距離100mm、板厚8mmである。「ナホトカ号」試験片からの腐食面の切出し範囲を図4.13に、引張り試験片L型の外形寸法を図4.14に示す。

次に、「ナホトカ号」試験片を4つの領域に分割したものを裏表に再現加工した引張り試験片をC-M型とする。C-M型試験片は全て幅20mm、標点間距離50mm、板厚8mmである。その腐食面の切出し範囲を図4.15に、引張り試験片の外形寸法を図4.16に示す。試験片識別のため、これらの試験片をC-M1～C-M4と呼ぶ。

最後に「ナホトカ号」試験片を16個の領域に分割し、且つその領域内における腐食表面凹凸計測値の分散の値が大きい方から2つ、平均板厚減耗の大きい方から2つを選び出し、それらを裏表再現した引張り試験片をC-S型とする。C-S型試験片は全て幅10mm、標点間距離25mm、板厚8mmである。その腐食面の切出し範囲と各領域に対するナンバリングを図4.17に、C-S型引張り試験片の外形寸法を図4.18に示す。また、C-S型引張り試験片の選び出しに使用したA面、B面の16領域の分散、平均板厚減耗

の値の一覧を表 4.3 に示す。この表からわかるようにS型引張り試験片で使用する領域は No. 2、No. 3、No. 7、No. 14 領域であり、C-M型試験片と同様に識別のため試験片番号をC-S2、C-S3、C-S7、C-S14とした。また、各試験片の形状とA面、B面それぞれの平均板厚減耗値の対応を表 4.4 に示す。試験片の写真を図 4.19(1)–4.19(9)に示す。C-L1試験片とC-L1-2試験片については全く同じ形状、表面凹凸を持つため、C-L1試験片のみを掲載した。尚、ここで述べている平均板厚減少とは切削基準面つまり加工前の試験片表面からの板厚減少値である。

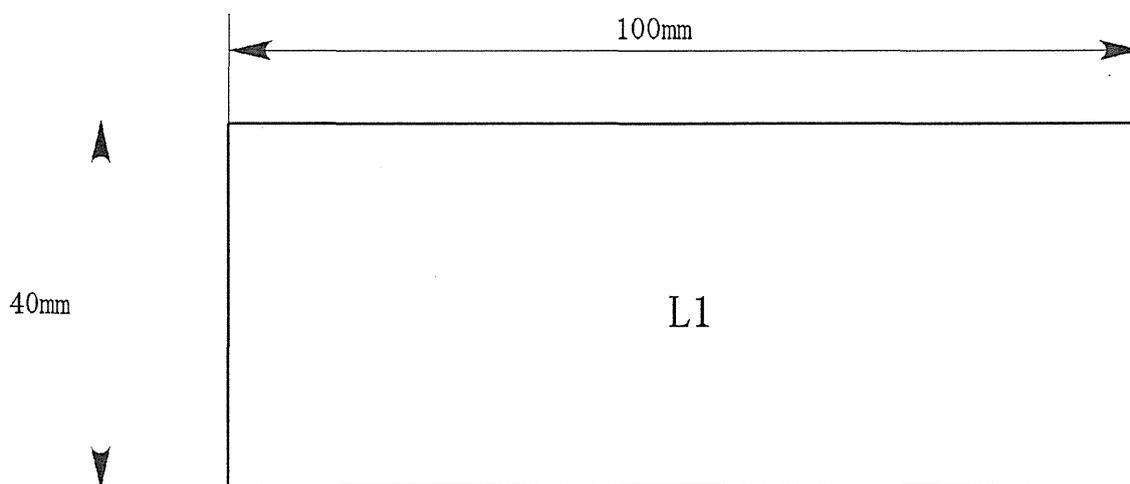


図 4.13 C-L1 試験片切出し範囲

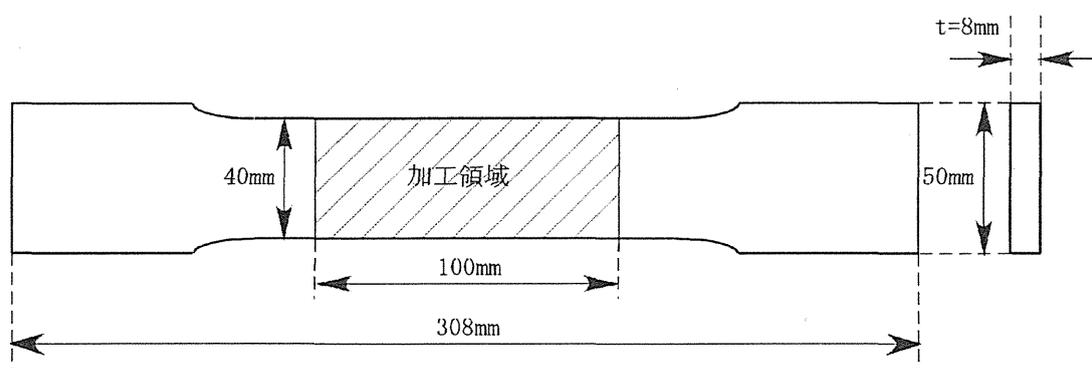


図 4.14 引張り試験片L型

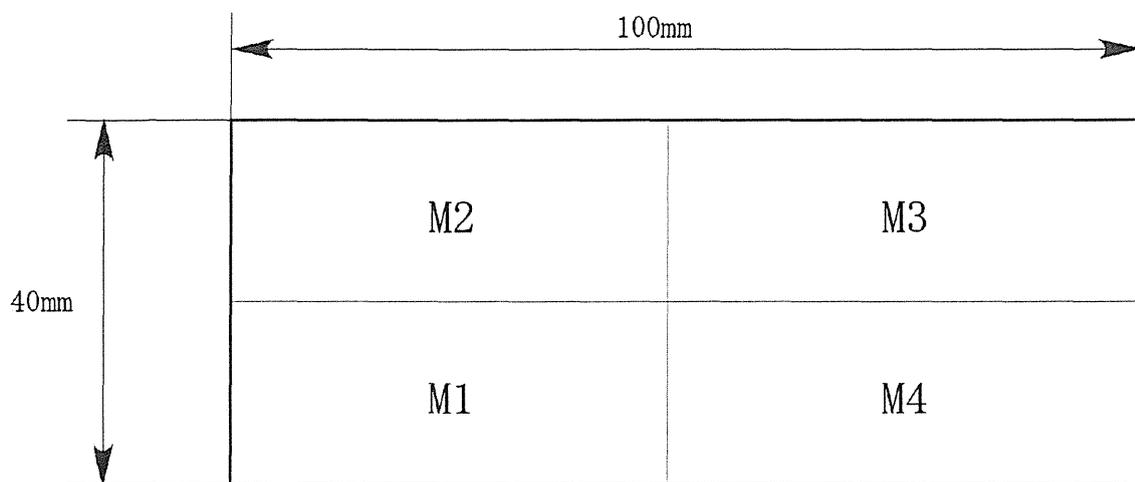


図 4.15 C-M型試験片切出し範囲

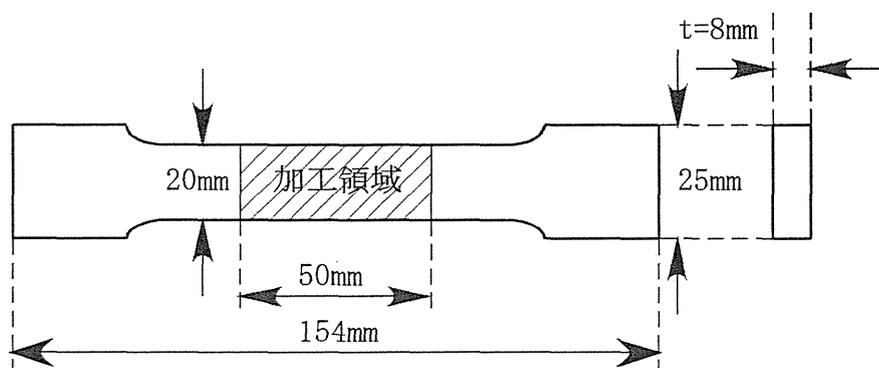


図 4.16 引張り試験片M型

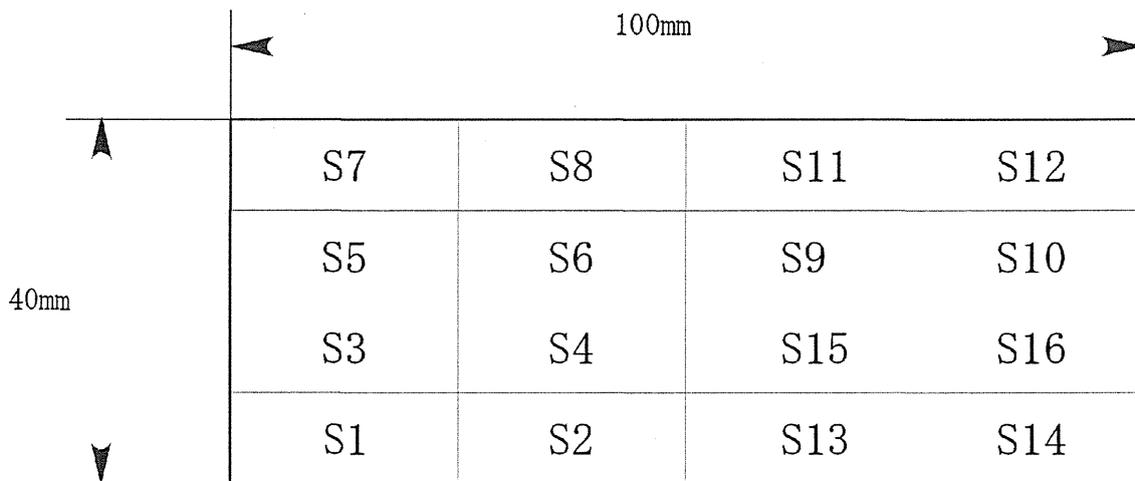


図 4.17 C-S型試験片切出し範囲

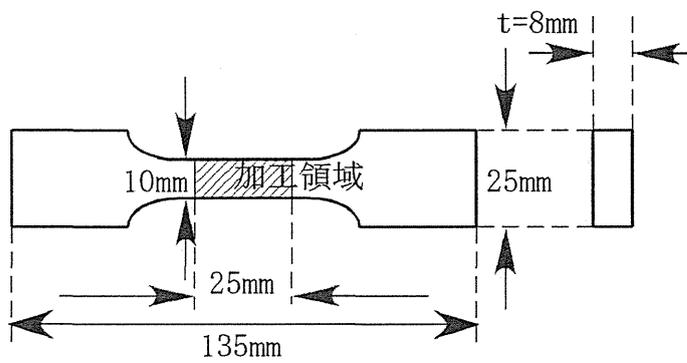


図 4.18 引張り試験片 S 型

表 4.3 S型試験片の選択

C-S1		C-S2		C-S3		C-S4	
標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量
0.370	0.361	0.560	0.337	0.415	0.366	0.320	0.247
0.382	0.340	0.361	0.386	0.503	0.500	0.294	0.288
0.376	0.350	0.471	0.361	0.461	0.433	0.307	0.292
C-S5		C-S6		C-S7		C-S8	
標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量
0.406	0.408	0.210	0.227	0.438	0.386	0.271	0.243
0.385	0.373	0.263	0.301	0.425	0.457	0.375	0.339
0.395	0.391	0.238	0.264	0.432	0.422	0.327	0.291
C-S9		C-S10		C-S11		C-S12	
標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量
0.273	0.225	0.415	0.376	0.435	0.329	0.303	0.336
0.270	0.288	0.382	0.383	0.503	0.124	0.297	0.327
0.271	0.257	0.399	0.379	0.369	0.227	0.300	0.331
C-S13		C-S14		C-S15		C-S16	
標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量	標準偏差	平均板厚減耗量
0.257	0.296	0.407	0.379	0.263	0.242	0.461	0.407
0.355	0.308	0.531	0.442	0.455	0.308	0.343	0.340
0.310	0.302	0.473	0.411	0.372	0.275	0.406	0.374

単位は全て[mm]

表 4.4 試験片パラメータ

試験片 No.	標点距離 [mm]	幅 [mm]	板厚 [mm]	A面平均減厚 [mm]	B面平均減厚 [mm]	試験片全体の 板厚減耗[mm]
L0-1	100	40	8	NO CORROSION		
L0-2						
C-L1				0.323	0.345	0.668
C-L1-2						
C-M1	50	20		0.328	0.379	0.707
C-M2				0.316	0.368	0.684
C-M3				0.317	0.281	0.598
C-M4				0.331	0.350	0.681
C-S2	25	10		0.337	0.386	0.723
C-S3				0.366	0.500	0.866
C-S7				0.386	0.457	0.843
C-S14				0.379	0.442	0.821

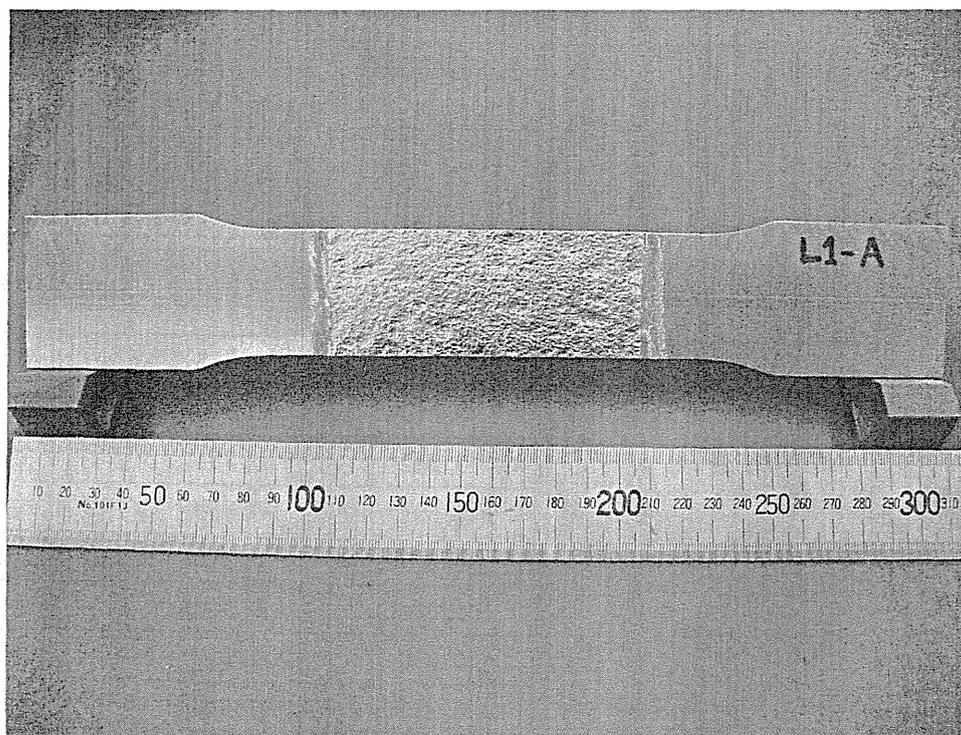


図 4. 19(1) (a) 試験片 C-L 1 A 面

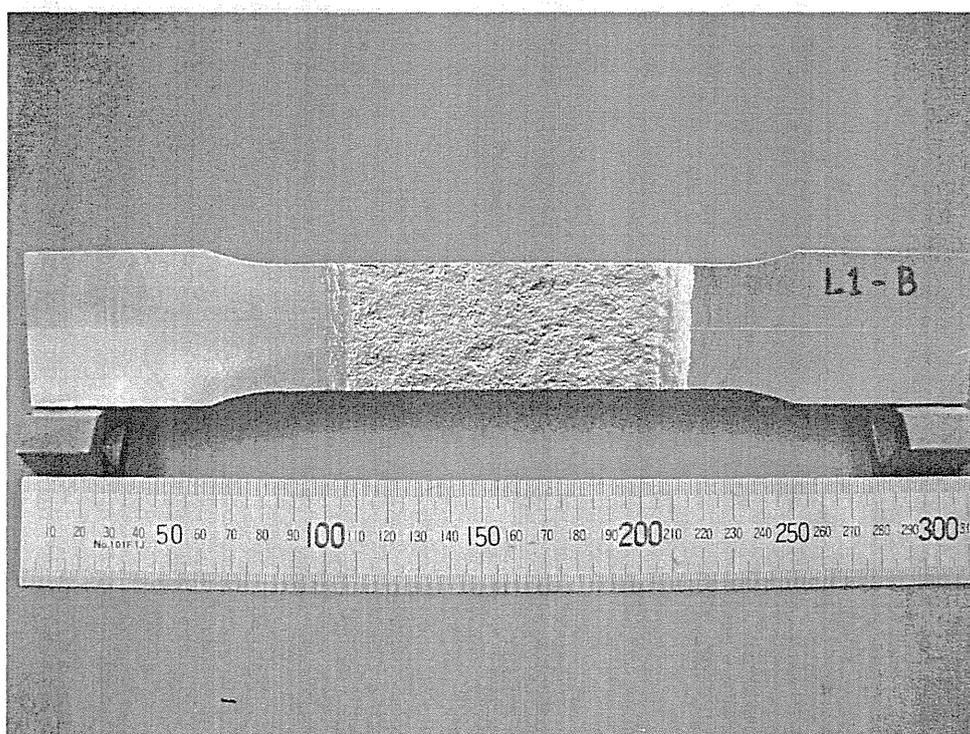


図 4. 19(1) (b) 試験片 C-L 1 B 面

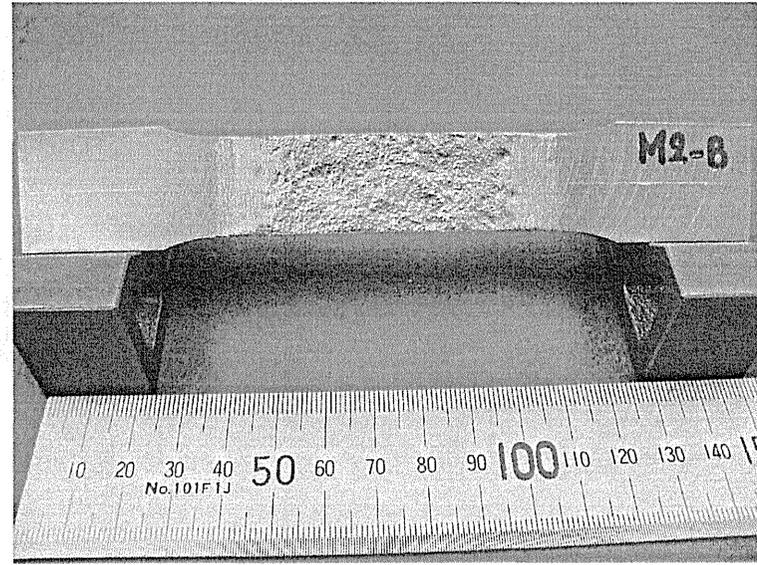
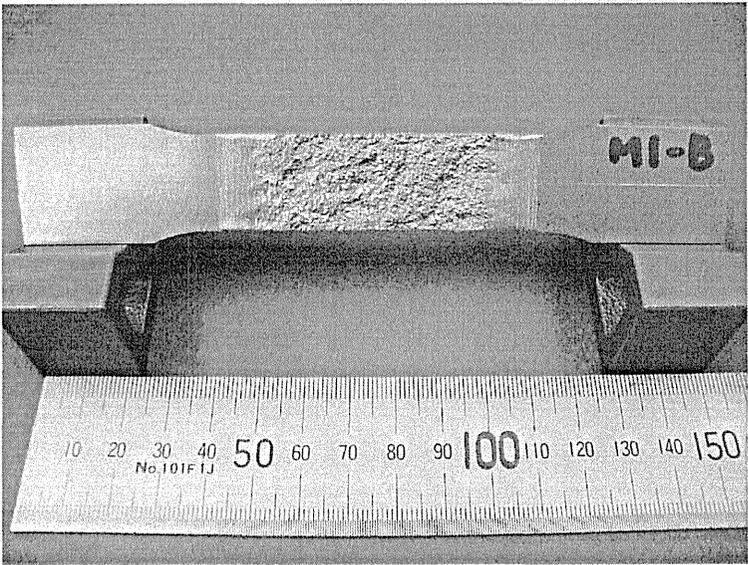
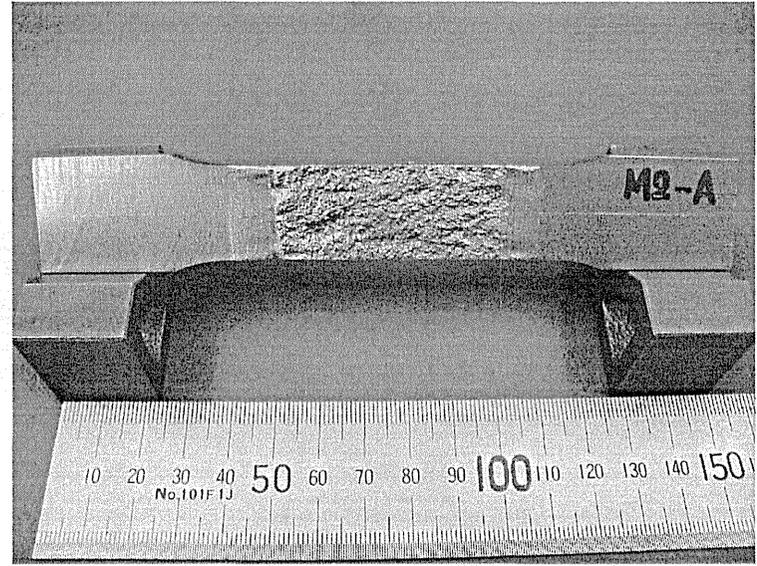
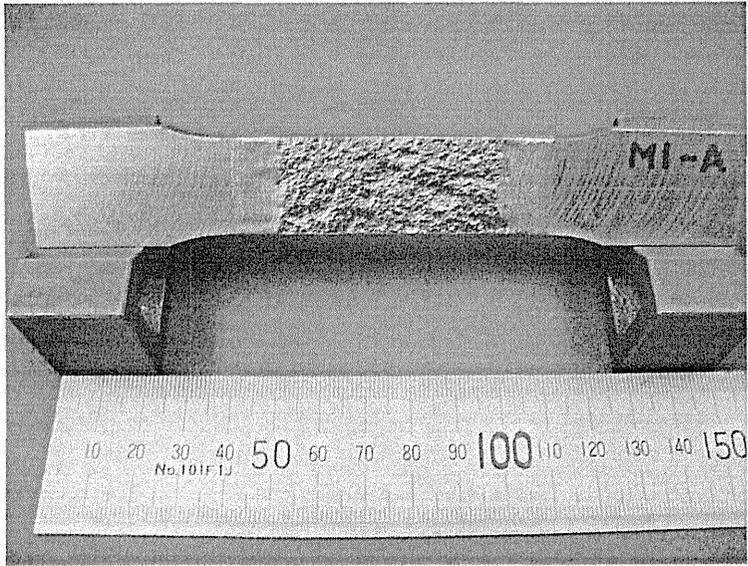


図 4. 19(2) 試験片C-M1

図 4. 19(3) 試験片C-M2

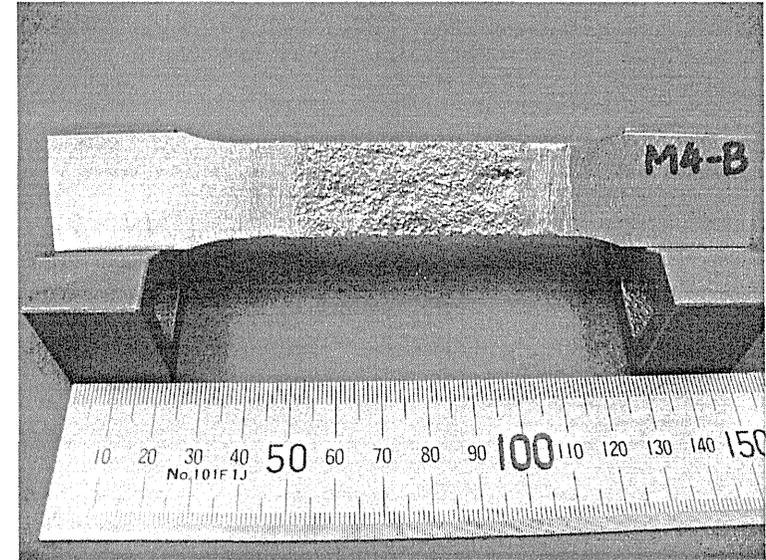
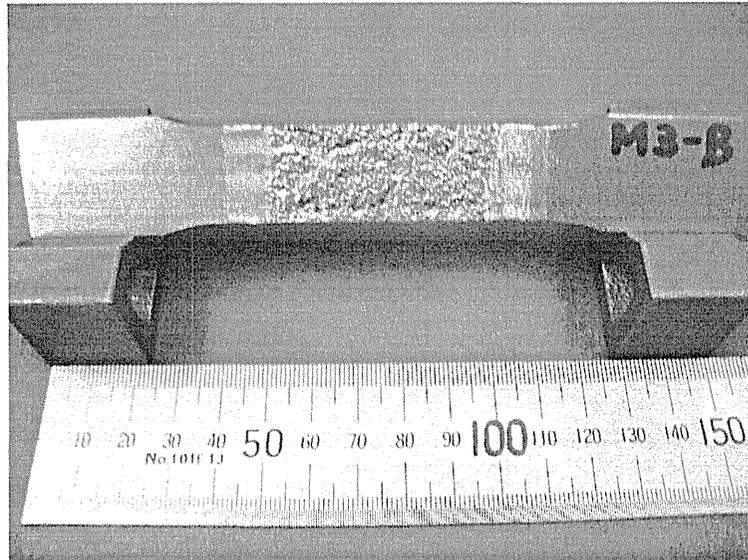
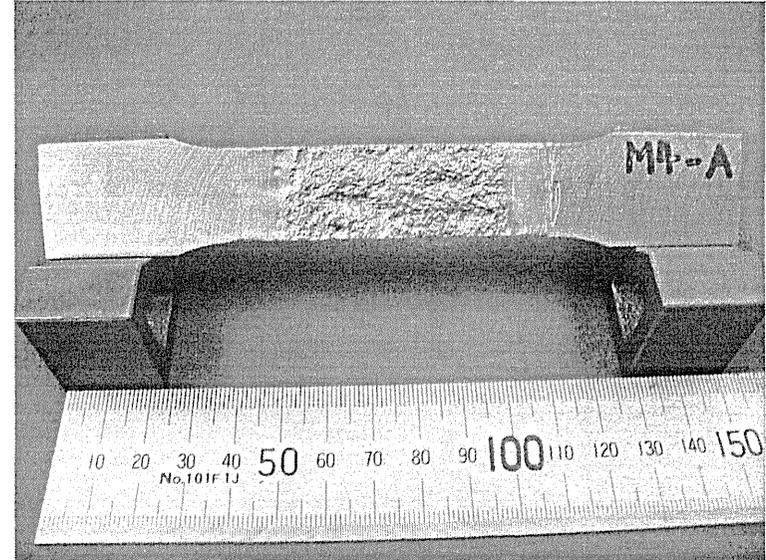
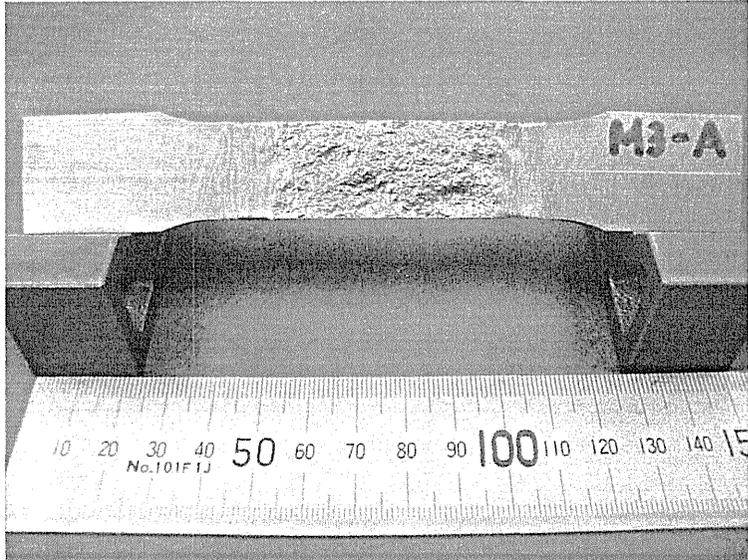


図 4.19(4) 試験片C-M3

図 4.19(5) 試験片C-M4

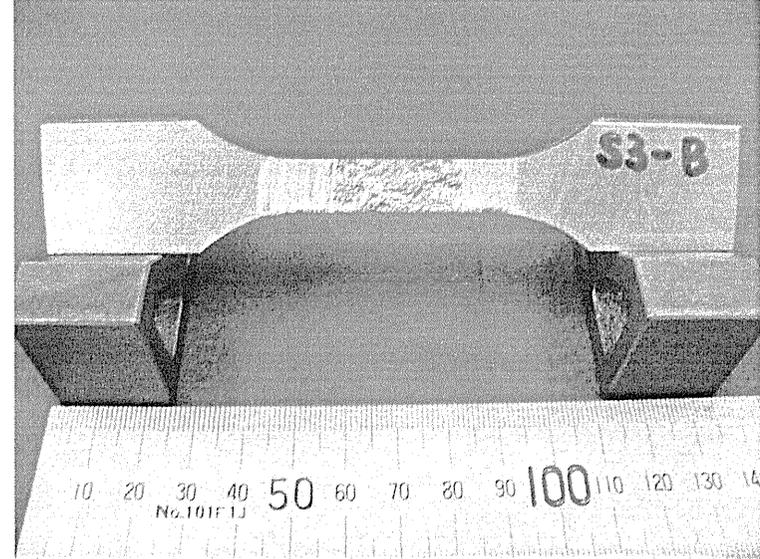
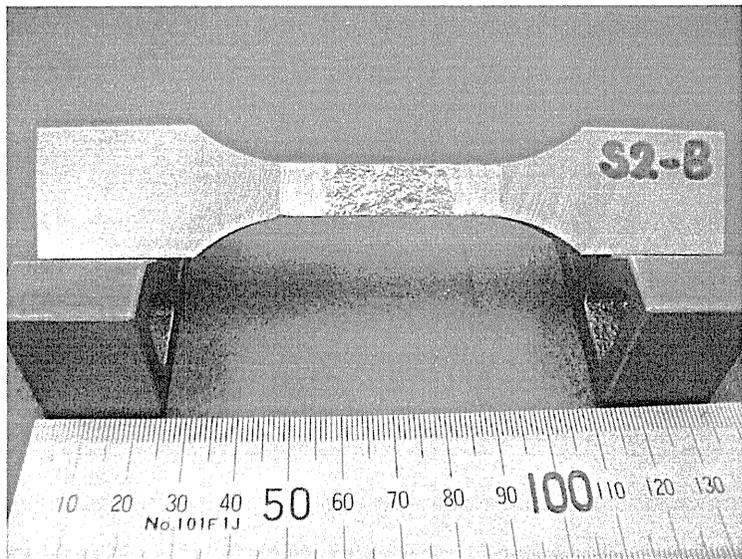
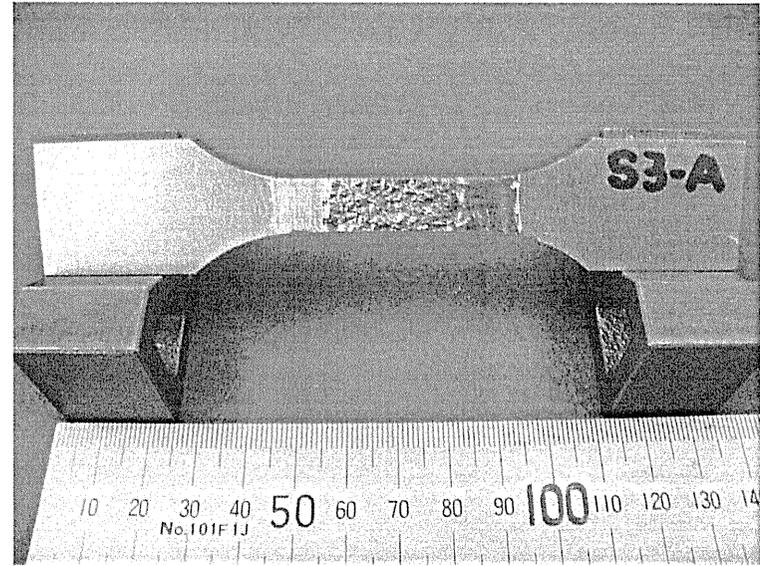
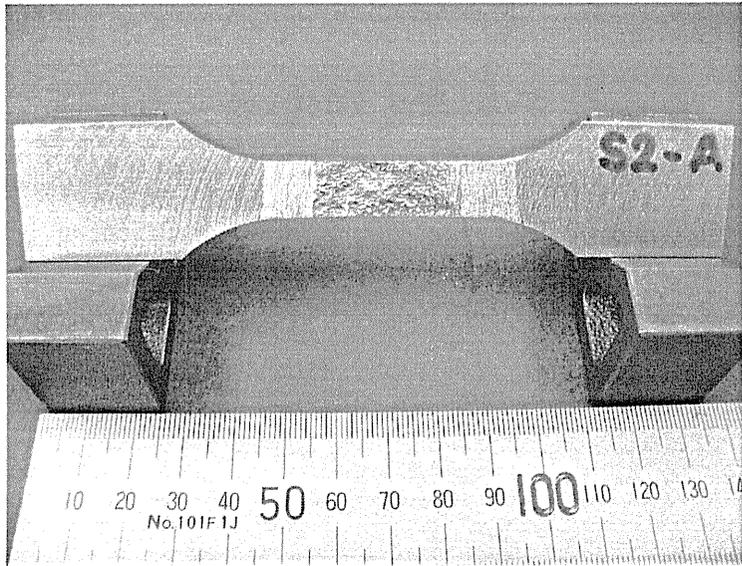


図 4.19(6) 試験片C-S 2

図 4.19(7) 試験片C-S 3

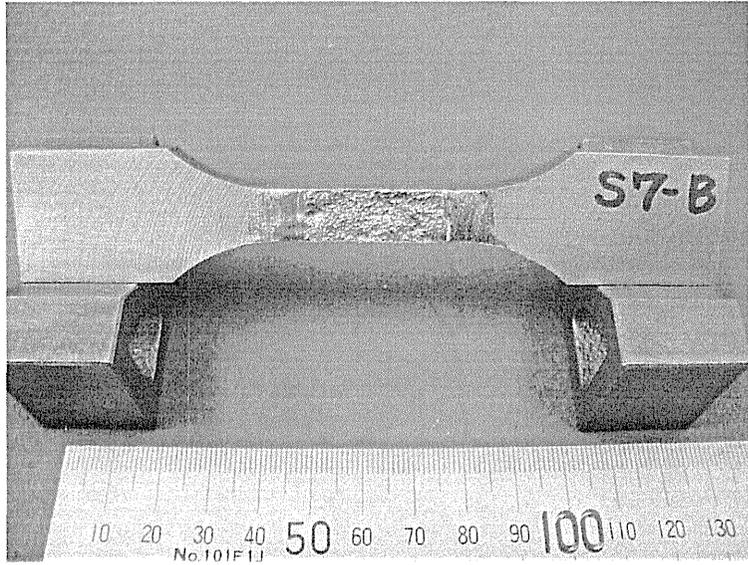
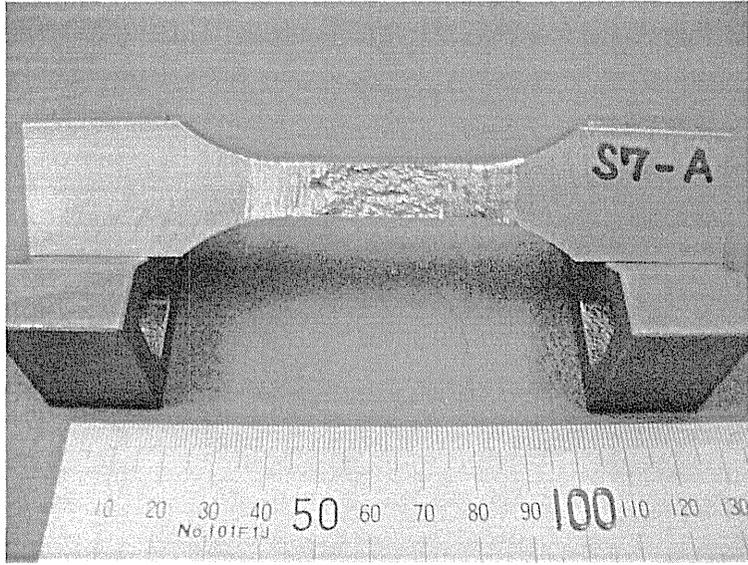


图 4.19(8) 試驗片C-S 7

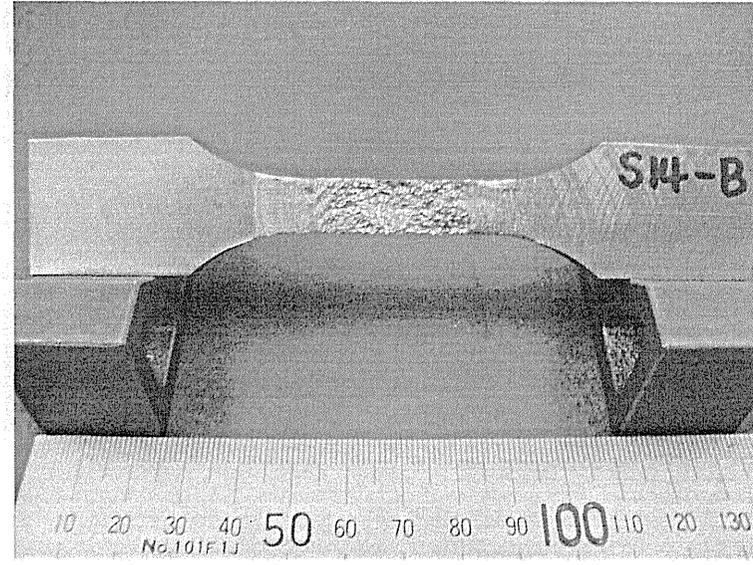
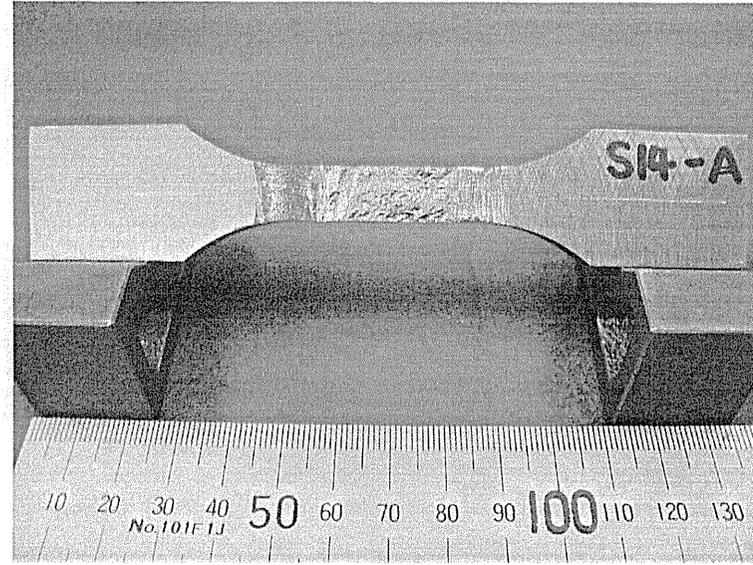


图 4.19(9) 試驗片C-S 1 4

4.2.3 破壊挙動

今回の実験においては「ナホトカ号」腐食平板の40%縮尺模型試験片を1本、4領域に分けたものを4本、16領域に分け平均板厚減耗量と表面凹凸の標準偏差が大きいものをそれぞれ2本の引張り試験を行った。それらの破断形態に対する考察を以下に述べる。

まず、同様のサイズの平滑材(腐食加工なし)の試験(L0試験片)を2本行った。平滑材では、丁度標点間の midpoint 付近で、試験片の幅方向に真直ぐに破断した(図4.20)。しかし、腐食表面加工を施したC-L1試験片では図4.21に示すようにくびれが2方向に生じ、その二つのくびれが丁度重なる付近でき裂が生じ、破断に至った。これは明らかに平滑材とは違う破断挙動であり、腐食表面加工の影響によりその挙動が変化したものと考えられる。腐食表面では、いくつかの比較的大きな表面凹凸に対し応力集中が起こり、そこに生じたくびれにより板厚の激しい減少が生じ、破断に至る。C-L1試験片の再現性を確認するために行ったC-L1試験片と同じ腐食面を持つ同じ寸法のC-L1-2試験片においてもC-L1試験片と全く同じ箇所からき裂を生じ、破断に至った。これにより今回の腐食表面凹凸を再現加工した引張り試験における実験の再現性が確認された。

ここでC-L1試験片を16領域に分割し、その平均板厚を図4.26に示す。この図を見る限りでは破断位置と平均板厚の分布にあまり相関は見られない。しかし、孔食(ピittingコロージョン)の強度に関する研究結果では、ピットの数が少なくなると破断伸びが減少することが知られており[6]、今回の全面腐食平板においても一部の大きなくぼみに応力が集中し、そこから破断したのではないかと考えられる。そのことを検証する為に、図4.27では16領域の表面凹凸の標準偏差を示す[7]。これを見ると中心部において明らかにS2の領域の標準偏差が大きく、そこから破断していることが分かる。

次にC-M型試験片の破断について検討してみる。これらの試験片は図4.22に示す位置で破断した。これらの破断位置と各領域の平均板厚と標準偏差を図4.28-4.31に示す。これらの図を見ると、破断位置と平均板厚、標準偏差に相関が見られるのはC-M1とC-M2だけである。C-M3、C-M4については予想していなかった部位から破断したが、C-M3についてはC-L1試験片のくびれの生じた位置とC-M3試験片の破断位置がほぼ一致している。C-M1試験片についてはC-L1試験片とほぼ同様の位置から破断していることから、この位置に大きなくぼみがある可能性が高い。またC-M2試験片については領域S5、S7と領域S6、S8の平均板厚や標準偏差に大きな違いがあるため、破断位置はある程度予測出来た。

C-S型試験片についてはかなり領域を絞った試験であるため、上記のような破断位置と板厚、分散との関係についての考察はかなり難しい。L型、M型の試験片における破断位置に対応する領域S2についての実験では図4.22と図4.23を見比べると破断位置が少しずつれていることがわかる。しかし、いずれにしてもこの近傍が全体の最弱部である可能性が高いと思われる。

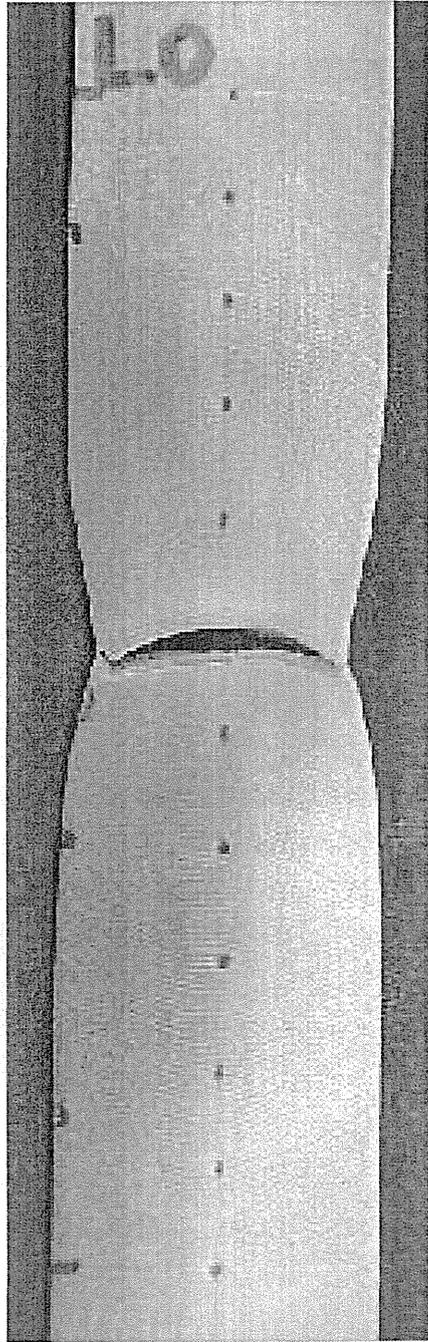


図 4.20 L0 試験片の破断形態

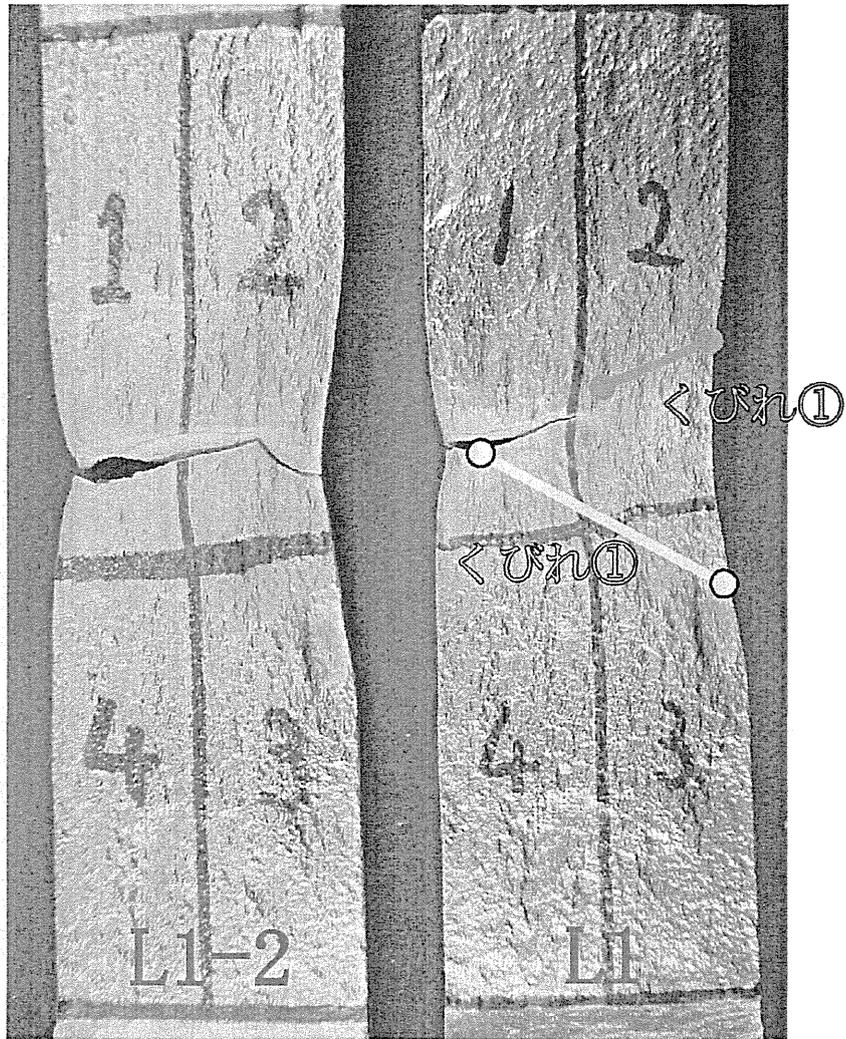


図 4.21 C-L1 試験片と C-L1-2 試験片の破断形態

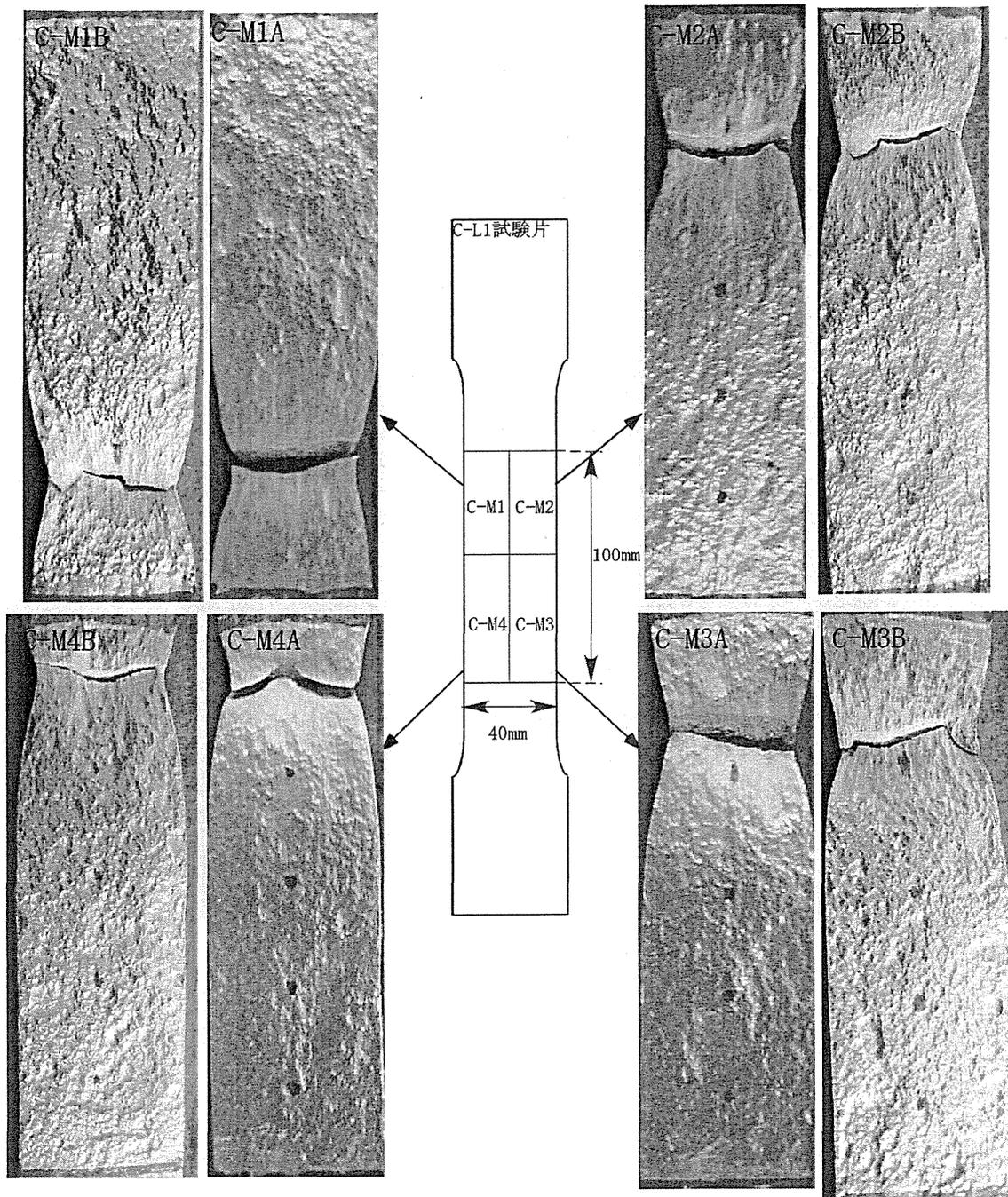


図 4.22 C-M型試験片の破断形態とC-L 1との対応

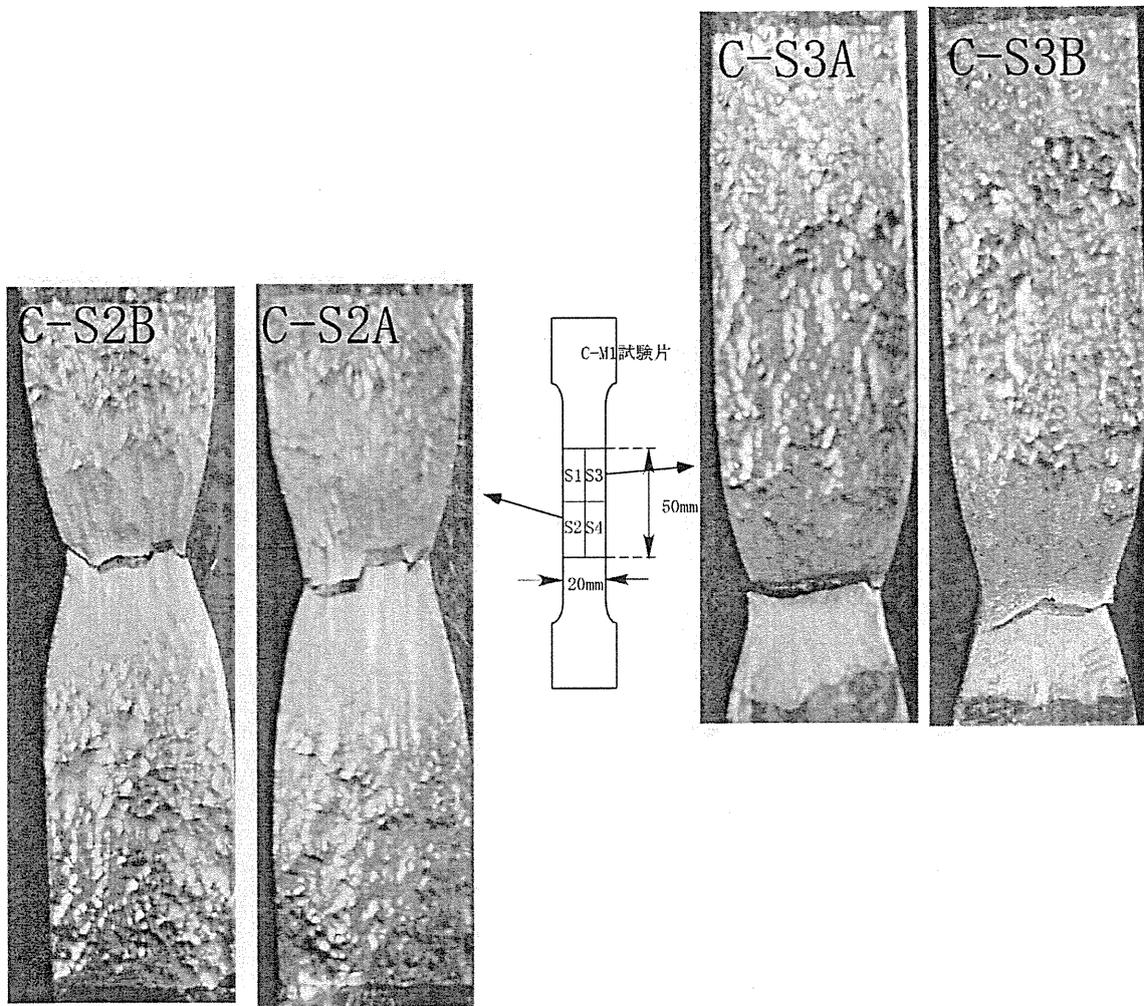


図 4.23 C-S2 試験片と C-S3 試験片の破断形態と C-M1 との対応

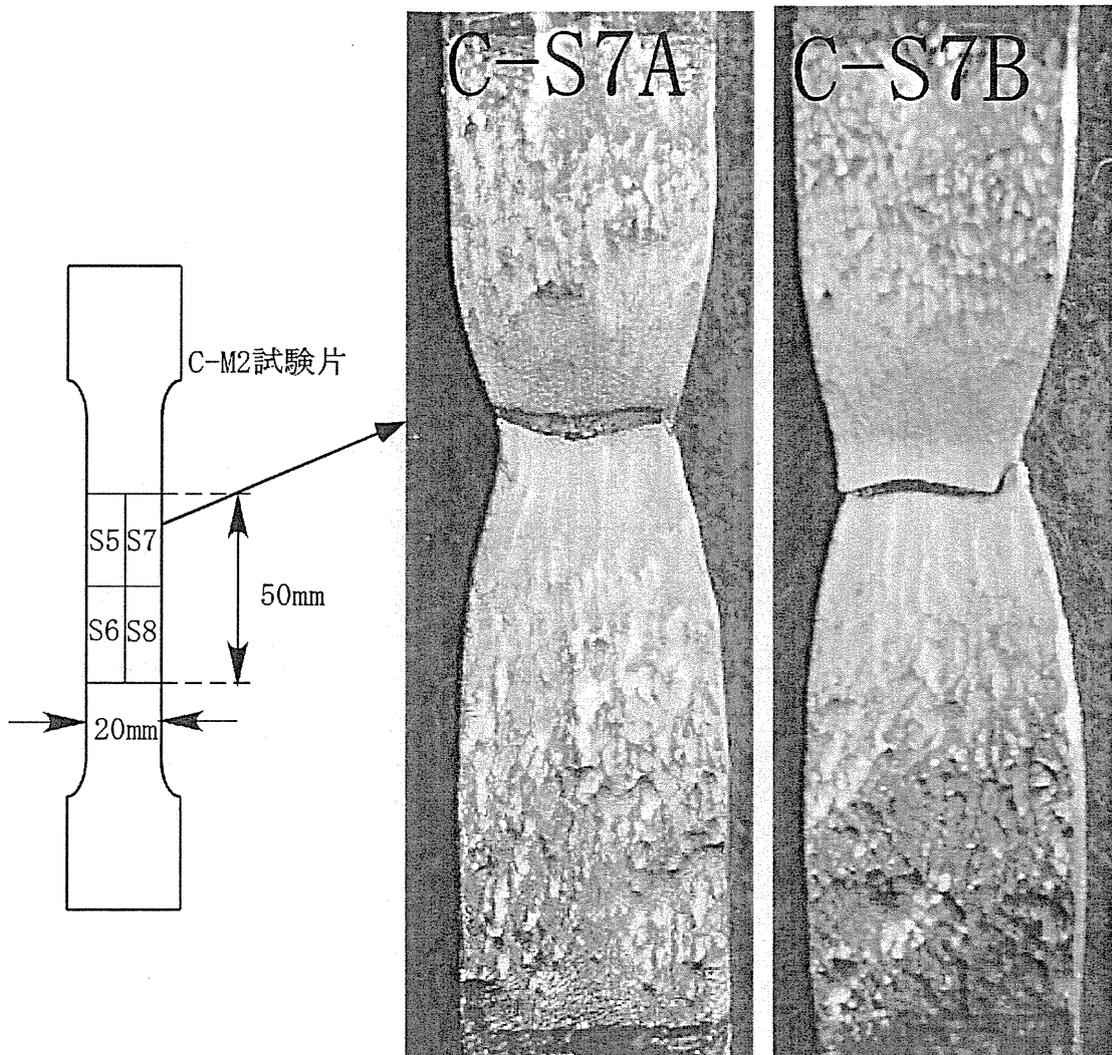


図 4.24 C-S7 試験片の破断形態と C-M2 との対応

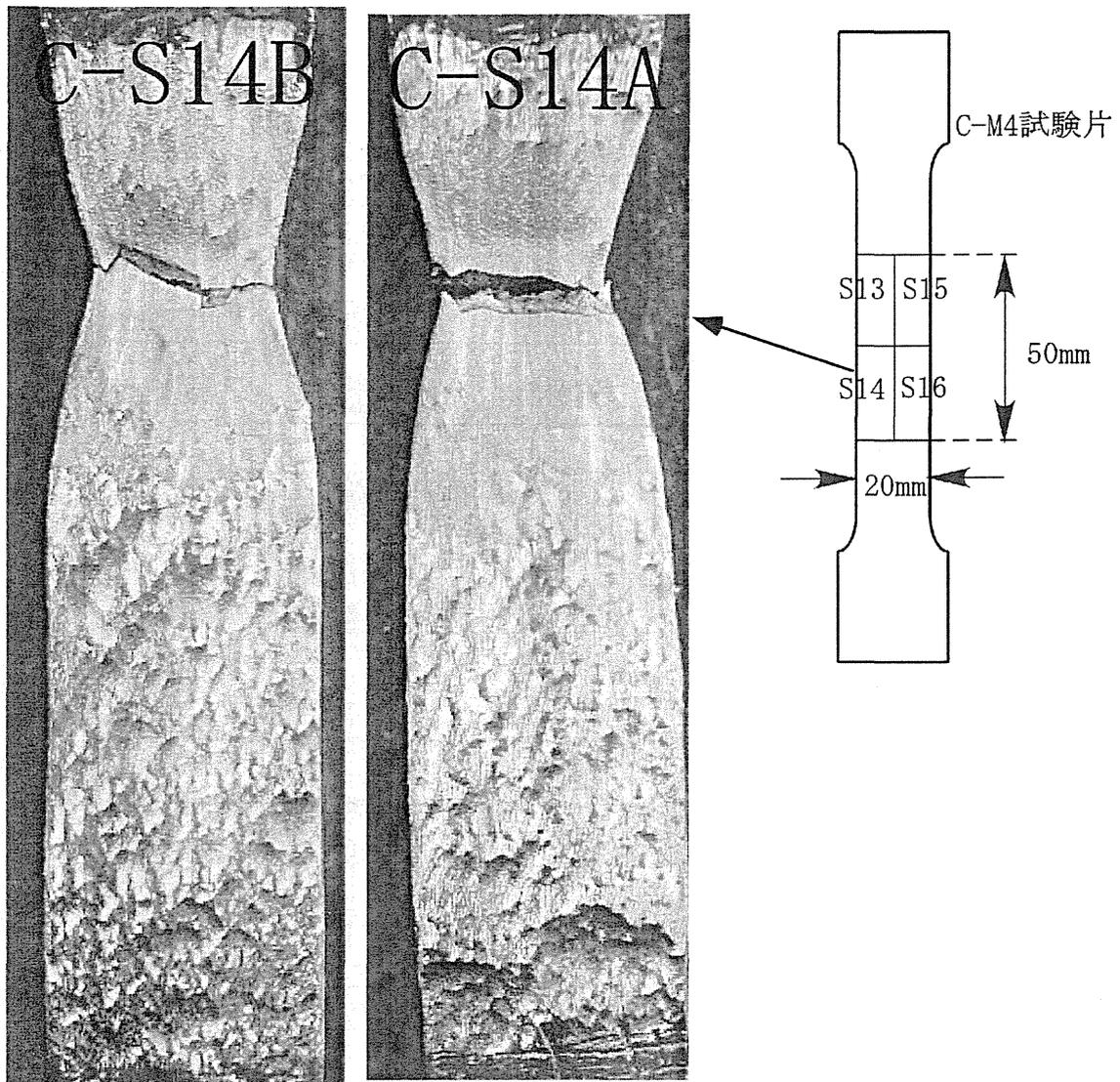


図 4.25 C-S14試験片の破断形態とC-M4との対応

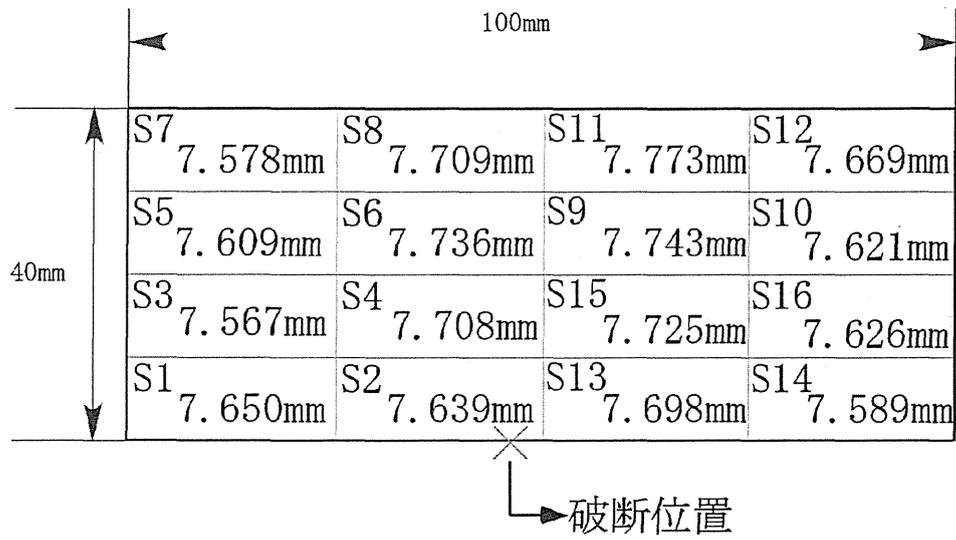


図 4.26 C-L 1 試験片の各領域の平均板厚と破断位置の関係

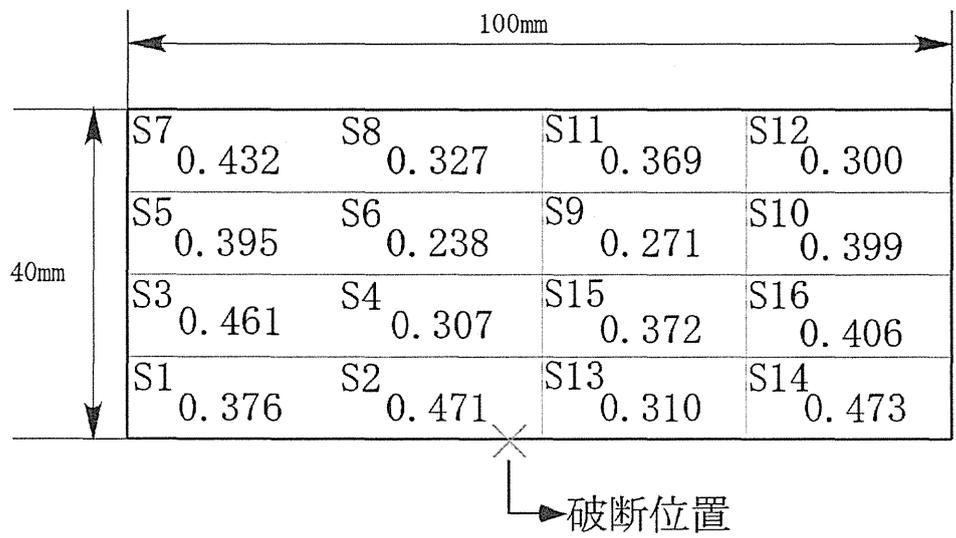


図 4.27 C-L 1 試験片の各領域の標準偏差と破断位置の関係

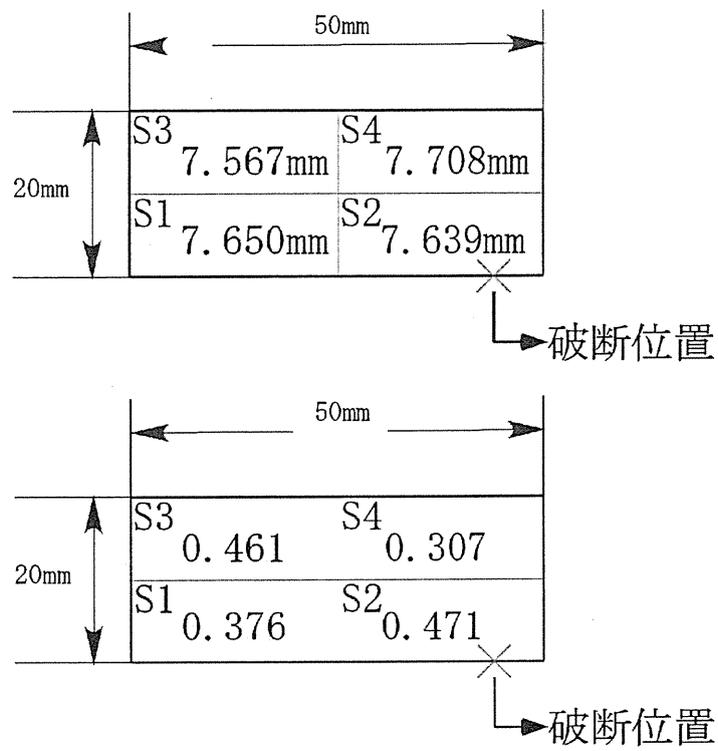


図 4.28 C-M1 試験片の各領域の平均板厚と標準偏差と破断位置の関係

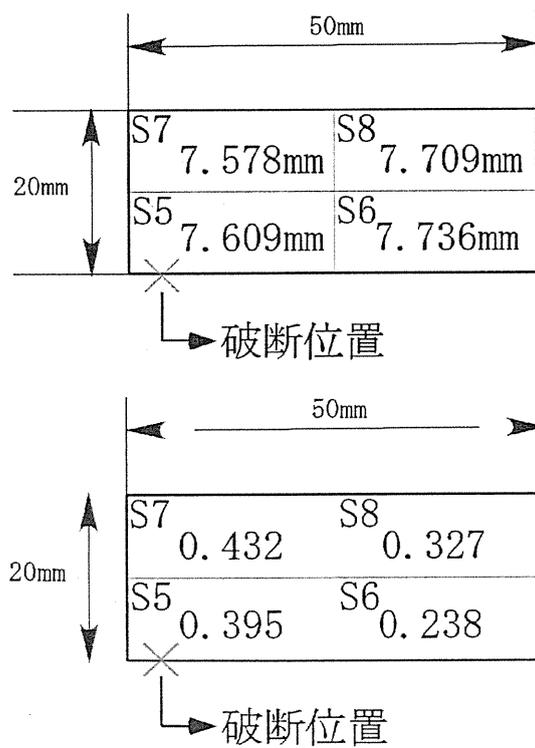


図 4.29 C-M2 試験片の各領域の平均板厚と標準偏差と破断位置の関係

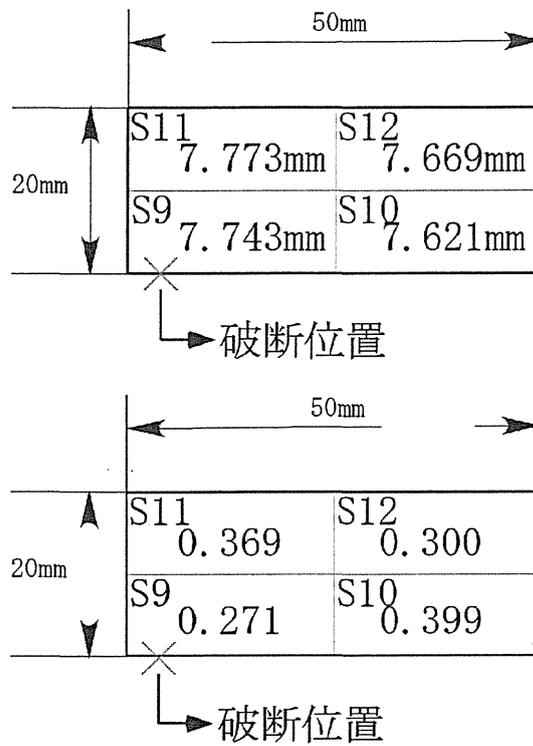


図 4.30 C-M3 試験片の各領域の平均板厚と標準偏差と破断位置の関係

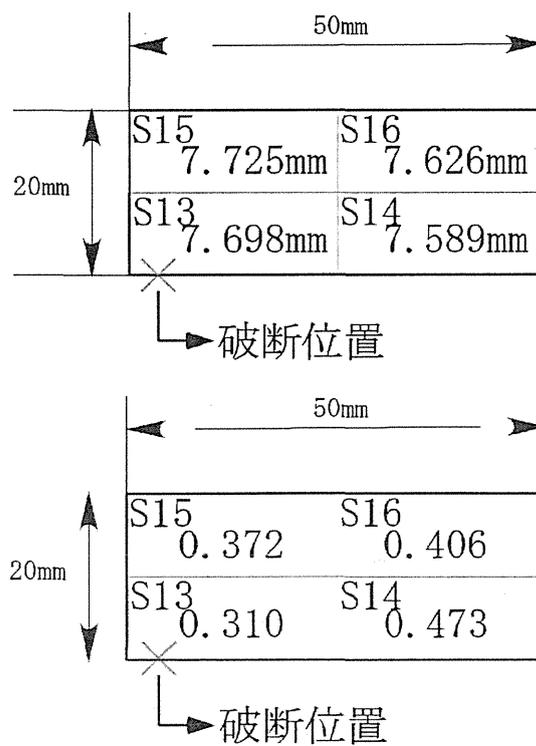


図 4.31 C-M4 試験片の各領域の平均板厚と標準偏差と破断位置の関係

4.2.4 腐食材の引張り強度に対する影響

図 4.32・4.36 に各縮尺試験片の応力-ひずみ線図を示す。今回の実験では公称引張り強度を以下の式(4.1)で定義する。

$$\sigma_{nominal} = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (4.1)$$

但し、ここで P_{max} は試験時の最大荷重、 A_0 は腐食加工後の断面積である。腐食加工後の断面積 A_0 は、腐食加工後の平均板厚に各試験片の幅を掛け合わせたものである。表 4.5 に各試験片の平均板厚と断面積を示す。

図 4.32 に示した平滑材試験片 L0 とナホトカ号腐食材の 40%縮尺試験片 C-L1 の応力-ひずみの関係を見ると、ひずみ量も最大応力も大きく異なる。降伏点近傍では、降伏挙動が大きく異なっている。まず上降伏点近傍では、鋼の結晶粒が、結晶のすべり面に沿ってすべりを起こし、引張り方向と約 45 度の方向にすべり変形を生じた結晶群より成るリュウダース帯が、徐々に成長していく [8]。C-L1 試験片について見ると、このリュウダース帯の成長速度が明らかに速くなっていることがわかる。これは、腐食表面凹凸の一部に塑性域が集中し、荷重を受ける断面積が局所的に減少したことによると推察される。また、図 4.32 において同じ腐食表面凹凸を持つ C-L1 と C-L1-2 の二つの試験片を比べると、この二つの試験片はほぼ同じ挙動を示しているが、これは、今回の CAD/CAM システムによる腐食表面の再現加工試験において実験の再現性が確認されたことを示している。前節での破断の形態と併せて考えるとより分かり易い。平滑材と腐食材の引張り挙動の違いをわかり易く見るために、表 4.6 に各試験片の上降伏点、公称引張り強度、破断伸びの値を示す。これを見ると平滑材と腐食材の違いが明らかとなる。また、今回のように板厚一定の縮尺模型試験の場合、試験片サンプルサイズが小さくなればなるほどその引張り強度が大きくなることも分かる。

C-M 型試験片を C-L1 試験片と比べると、降伏応力に関しては C-M 型試験片の方が大きくなっていることが分かる。また上降伏点の判別が難しくなっていることも分かる。また、破断伸びは M 型の方が比較的大きな値となっていることも分かる。

C-S 型試験片については降伏挙動が明らかに異なり、降伏応力、引張り強度、破断伸びもすべて大きくなっている。

これら 3 タイプのサンプルサイズの試験片の引張り挙動に関しては、明らかな相違が見られるが、その関係については次節で検討する。

表 4.5 各試験片の平均板厚と断面積

	腐食加工後の平均板厚 [mm]	断面積 [mm ²]
L0	8.000	320.00
C-L1	7.332	293.28
C-L1-2		
C-M1	7.293	145.86
C-M2	7.316	146.32
C-M3	7.402	148.04
C-M4	7.319	146.38
C-S2	7.277	72.77
C-S3	7.134	71.34
C-S7	7.157	71.57
C-S14	7.179	71.79

表 4.6 各試験片の強度と延性特性

	上降伏点 [MPa]	下降伏点 [MPa]	最大荷重 [kN]	公称引張り 強さ[MPa]	伸び [%]
L0	387.50	367.95	165.50	517.19	32.46
C-L1	342.27	332.90	140.25	478.21	23.92
C-L1-2	337.99	335.86	140.63	479.51	23.26
C-M1	359.08	357.37	72.63	497.91	28.44
C-M2	357.95	355.94	73.19	500.19	30.84
C-M3	354.22	347.46	71.15	484.67	26.48
C-M4	360.36	357.38	72.44	494.86	25.20
C-S2	379.96	373.09	36.90	507.08	32.00
C-S3	376.37	369.36	36.45	510.93	32.32
C-S7	380.05	371.66	37.20	519.77	36.84
C-S14	371.22	366.35	37.45	521.66	37.24

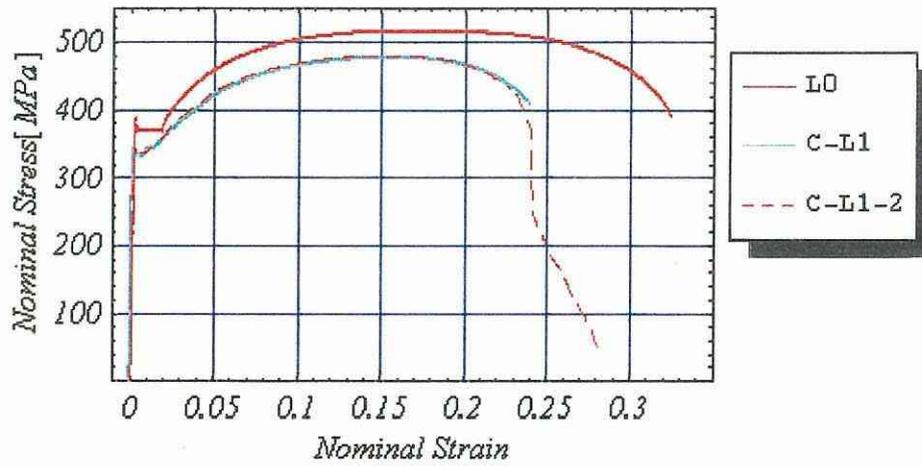


図 4.32 L 試験片(平滑材 L 0 とナホトカ号腐食材の 40%縮尺モデル C-L 1)の応力-ひずみ線図

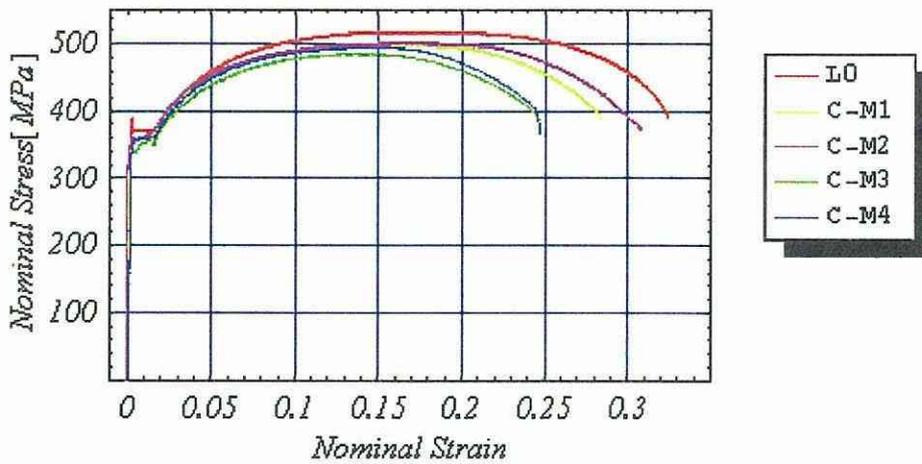


図 4.33 C-M 型試験片(C-L 型試験片の 1/2 寸法のサンプル)の応力-ひずみ線図

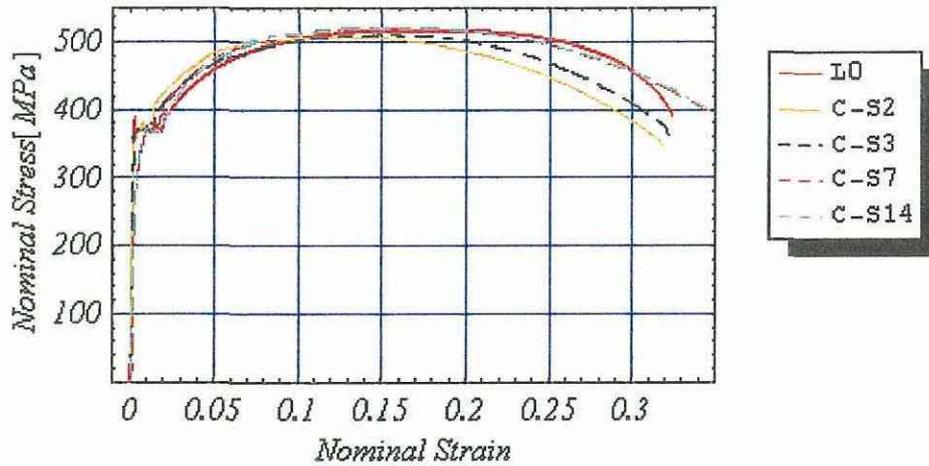


図 4.34 C-S 型試験片(C-L 型試験片幅の 1/4 寸法のサンプル)の応力-ひずみ線図

4.2.5 試験片サンプルサイズと強度・延性パラメータの関係

試験片サンプルサイズの影響を検討するため、L 型試験片の試験片幅を 1 とした場合の M 型試験片と S 型試験片幅の寸法比と試験時の最大荷重、伸び、上降伏点、下降伏点との関係を図 4.36-4.39 に示す。なお、図中の Ultimate Value は今回用いた試験片の強度の上限値を意味する。但し破断伸びに関しては、L0 試験片よりも伸びが大きく出た為、上限値を設けなかった。

これらの結果を見ると、今回用いた試験片の寸法比と上降伏点、下降伏点、引張り強さ、および破断伸びに関しては、寸法が大きくなるにつれ、その特性が低下していることがわかる。引張り強さに関しては S 型試験片 4 本の平均値に比べ C-L 1 型は 7.12% 低下し、破断伸びに関しては S 型試験片 4 本の平均値に比べ、C-L 1 型は 30.87% も低下した。これは腐食材の寸法が大きくなる程に、その強度と延性が低下し破断伸びが大きく減少することを意味している。今後、より一般的な強度・延性特性の寸法依存性を解明し、小型試験の結果から実構造の対応する特性を推定できるようにする必要がある[9]。

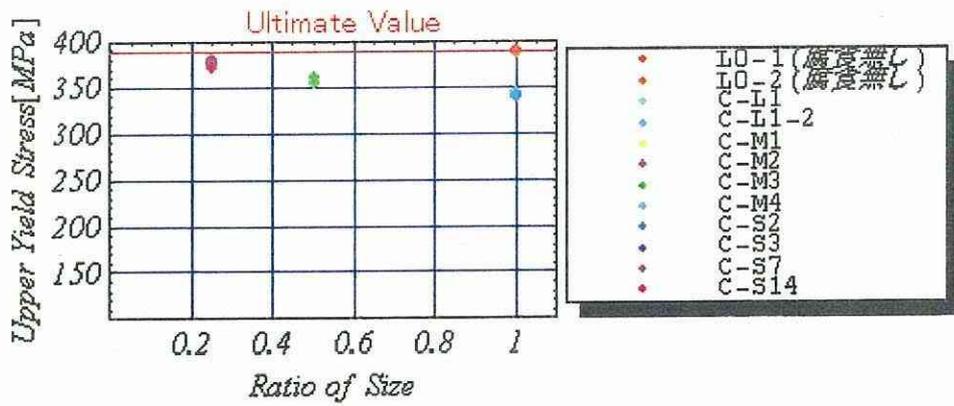


図 4.35 試験片幅寸法比と上降伏点の関係

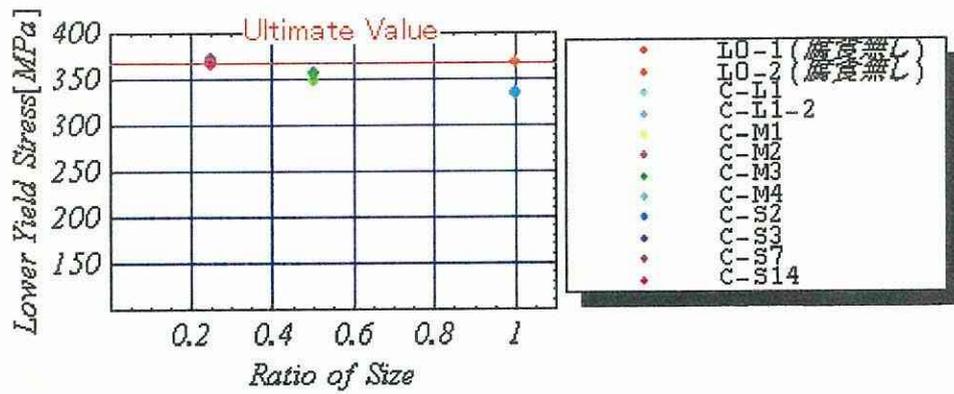


図 4.36 試験片幅寸法比と下降伏点の関係

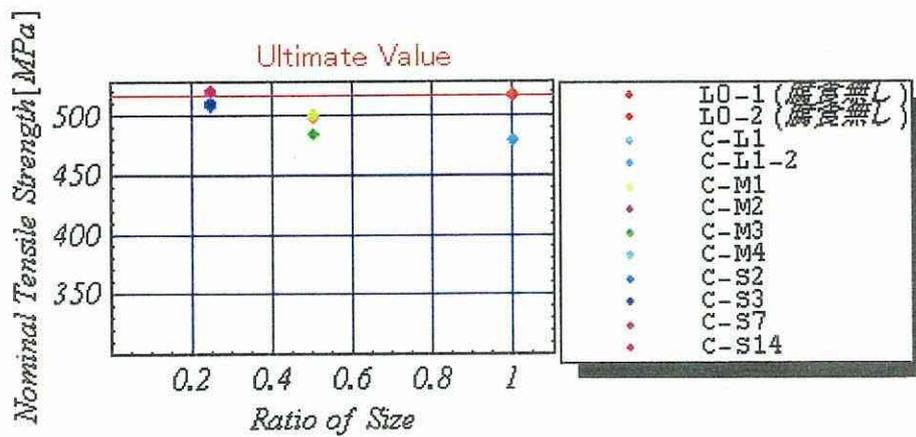


図 4.37 試験片幅寸法比と公称引張り強さの関係

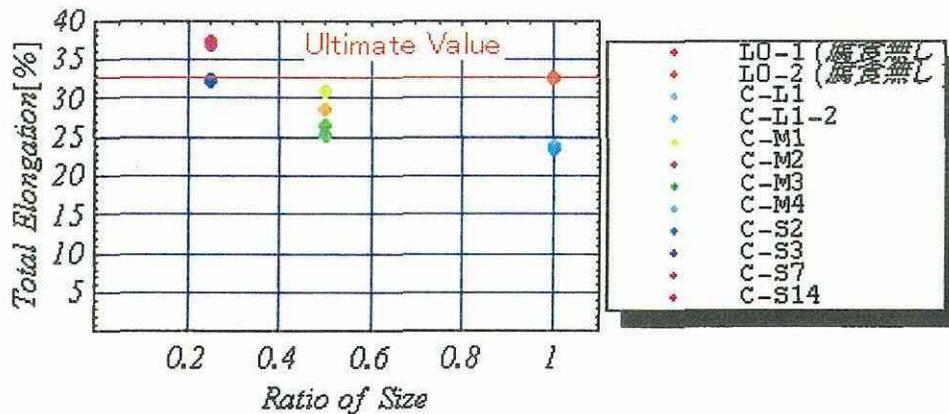


図 4.38 試験片幅寸法比と破断伸びの関係

4.3 まとめ

本章の結論は下記の通りである。

- 腐食した実部材の表面凹凸の計測に基づいた加工を行いその精度がある程度、実証された。但し、使用するエンドミルの径に限界が再現精度の限界を与える。
- 同一の腐食表面を持ち、同一のサイズの試験片の結果を比較し、試験の再現性が確認できた。
- 腐食材を再現加工した試験片において、同一寸法の平滑材に比べて7.5%の強度低下、約26%の破断伸びの低下を観察した。
- 腐食材の寸法が大きくなる程、その強度と延性が低下し破断伸びが大きく減少することが実験的に観察された。今後、より一般的な強度・延性特性の寸法依存性を解明し、小型試験の結果から実構造の対応する特性を推定できるようにする必要がある。

第5章 結論

本研究の結論を以下に述べる。

- CAD/CAM システムを用いた腐食表面再現加工法を確立した。
- 腐食ピット付試験は相似模型試験片により強度と延性の推定が可能である。
- 腐食材の寸法が大きくなる程、その強度と延性が低下し破断伸びが大きく減少することが実験的に観察された。
- 今後、より一般的な強度・延性特性の寸法依存性を解明し、小型試験の結果から実構造の対応する特性を推定できるようにする必要がある。

参考文献

- [1] 海上保安庁：「ナホトカ号海難・流出油事故の概要と今後の課題」、1997.
- [2] 社団法人 日本造船研究協会：「ナホトカ号事故と老朽船の安全対策」RR 7 4 (船舶関係書基準に関する調査研究)老朽船の安全対策・操縦性基準の見直し、1999.
- [3] 日本海事協会：「高齢ばら積み貨物船に関する調査報告書」、1992.
- [4] 松下久雄、中井達郎、山本規雄、荒井宏範：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響－実部材での腐食ピット影響調査、日本造船学会論文集 第192号、2002, pp.357-365.
- [5] 中井達郎、松下久雄、山本規雄、荒井宏範：バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度、日本海事協会研究発表会講演集、2002.
- [6] 中井達郎、松下久雄、山本規雄、荒井宏範：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響－人工ピットを用いた強度調査、日本造船学会講演論文集 第2号、2003, pp.27-28.
- [7] 高橋宏一、脇本和昌、平野勝臣：「統計学要論」(共立出版).
- [8] 高橋幸伯、町田進、角洋一：「基礎材料力学三訂版」(培風館), 2004.
- [9] 山本善之、大坪英臣、角洋一、藤野正隆：「船体構造力学二訂版」(成山堂書店), 2004.

付録 1 腐食表面再現加工法

A1.1 表面形状加工装置

試験片の加工に関して以下の装置を使用した。

● MasterCam Mill 9.1

人工ピットを3DのCADデータにしたものに対する加工パスを作成する為に本ソフトウェアを用いた。これは米国 CNC software,inc.製で、2D/3Dワイヤフレームジオメトリ作成とサーフェスマデリングの両方が可能な MasterCam Design を含み、モデリングから切削オペレーションまでの一連の作業を一括して行うことができる。また、切削オペレーションとジオメトリがリンクし、パーツのジオメトリが変わるとツールパスも自動的に再計算を行うことができる。図 A1.1 に本ソフトを用いて作成したソリッドモデルの一例を示す。

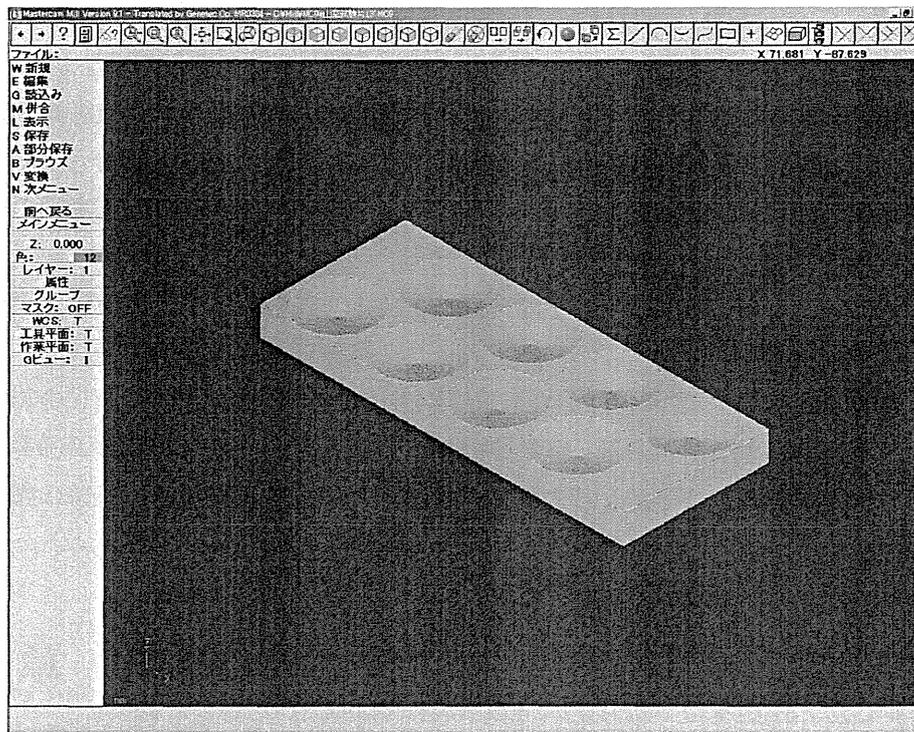


図 A1.1 : MasterCam Mill9.1 により作成したソリッドモデル

● 卓上型 NC フライス盤 SG01

切削装置として本装置を用いた。主な特徴としては、卓上サイズながらも金属を高精度で

加工でき、さらにNC制御側にPCを採用しているため、CAD/CAMで作成した3次元データを素早く取り込み、加工に移ることができる。またNC(数値制御)プログラムにより自動運転が可能のため利便性に富んでいるものである。

切削条件としてはドリルの回転数が最大3000回転、主軸動力は200Wであり、それほど大きな負荷を与えることはできない。従って、通常の工作装置に比べ、切削能力が1/20~1/40程度となるが、本研究の試験片加工においては十分な能力を備えている。また大きな負荷がかかると回転が止まる仕組みとなっており安全性にも十分配慮された仕様である。図A1.2にSG01の外形寸法図を載せる。

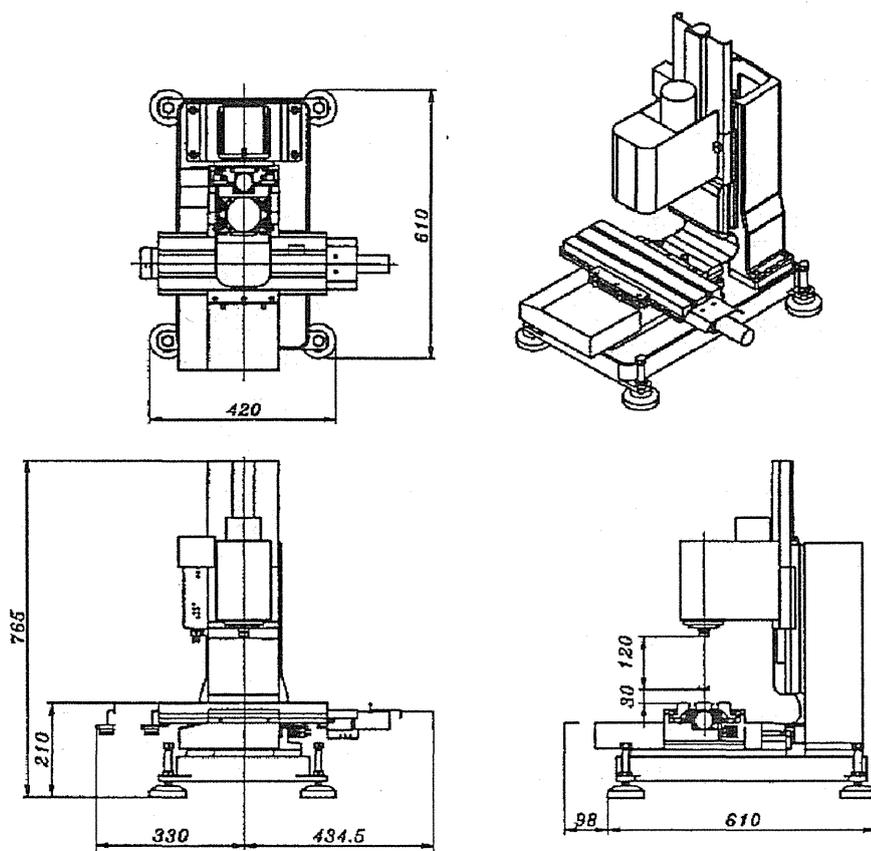


図 A1.2 SG01 外形寸法図

A1.2 表面切削加工

試験片表面加工に関しては、全てSG01により自動で行うが、切削に関する諸パラメータ(回転数、送り速度等)に関しては全て機械加工における計算方法で自ら計算し設定した。今回使用する工具は当研究室で所有するものであり、全て高速度工具鋼(HSS; High Speed Tool Steel)をである。従って、工具の回転数Nの計算には次式、

$$N = \frac{1000 \times V}{\pi \times D} [rpm] \quad (A1.1)$$

で求められる。このとき送り速度F[mm/min]は

$$F = V \times T \times S \times M [mm/min] \quad (A1.2)$$

但し、

D : エンドミルの直径[mm]

V : 切削速度[mm/min]

T : エンドミルのタイプ

S : エンドミルの直径に関する係数

M : 被削材係数

である。このうちエンドミルのタイプに関しては表 A1.1 に、エンドミルの直径に関する係数に関しては表 A1.2 に、被削材とその被削材係数、標準切削速度に関して表 A1.3 に載せた。また図 A1.3 に実際の加工の様子を示す。

表 A1.1 エンドミルのタイプT

刃数 \ 刃長	2	3	4	5
1×D~2×D	1.0	1.3	1.5	1.8
2×D~3×D	0.8	1.0	1.2	1.4
3×D~4×D	0.6	0.7	0.9	1.0
4×D~5×D	0.4	0.5	0.6	0.7

表 A1.2 エンドミルの直径に関する係数S

D(エンドミル直径)	1	2	3	5	6	8	10
S(係数)	0.80	0.85	0.95	1.05	1.12	1.25	1.34

表 A1.3 被削材とその係数及び標準切削速度

被削材	被削材係数(M)	標準切削速度(H S S 鋼の場合)
アルミニウム合金	16.8	70~150
軟鋼(S S 41等)	4.2	30~50
黄銅	4.9	50~80
Fステンレス鋼 (SUS405等)	3.8	30~40
Mステンレス鋼 (SUS403等)	3.4	20~30
Oステンレス鋼 (SUS201等)	2.9	15~25



図 A1.3 SGO 1 による人工ピット加工の様子

A1.3 ピット精度の確認

人工ピットの精度の確認を行った。直径の確認にはデジタルノギスを用い、深さについてはSG01に直径1mmのエンドミルを取り付け、エンドミルの先端をピット頂点の座標にあわせることで確認した。尚、SG01は1/1000mm単位で制御することができ高精度の確認が可能である。表A1.4に確認した加工後の寸法の詳細を示す。若干のばらつきが見られるが、これはエンドミルの刃先の磨耗などによるものと思われる。概ね予定とする寸法と一致させることができた。

表 A1.4 人工ピット加工精度

	面	直径	深さ
P-L1	A	19.87	2.468
	B	19.64	2.485
P-L2	A	20.24	2.513
	B	20.05	2.429
P-L3	A	19.94	2.385
	B	20.00	2.506
P-L3-2	A	19.81	2.413
	B	19.90	2.384
P-M1	A	10.04	1.276
	B	10.05	1.269
P-M2	A	9.91	1.254
	B	9.85	1.232
P-M3	A	9.66	1.247
	B	9.71	1.269
P-S1	A	4.93	0.613
	B	4.95	0.623
P-S2	A	4.88	0.602
	B	5.12	0.617
P-S3	A	5.10	0.628
	B	4.75	0.641



検査証明書 INSPECTION CERTIFICATE

品名 1002119-11A11213
 商標/登録商標
 製造元 MARUBINI-IWASUMI STEEL IND.
 品番 No. 1002119-11A11213
 品名 HOT ROLLED STEEL PLATE
 規格 JIS G3106 SM490A

引当番号 JASH-1999
 引当 No. 12003-11-05
 検査 No. 1002119-11A11213
 検査 No. 1002119-11A11213
 検査 No. 1002119-11A11213

品番	寸法	数量	重量	引張強さ	降伏強さ	伸び	断面収縮率	試験結果
SPECIFIED VALUE (STANDARD)								
				490	235	22	40	
25775	100 X 2038 X 6096	1	2082.6	373.9	20.9			TC 320 552 25
25783	100 X 2038 X 6096	1	2082.6	364.0	19.3			TC 359 592 26
25810	100 X 2038 X 6096	1	2082.6	351.7	19.2			TC 360 511 28
	TOTAL	3	6247.8					
VISUAL & DIMENSIONS 1.0000								

検査項目: 引張試験, 降伏試験, 伸び試験, 断面収縮率試験, 試験結果
 試験方法: 引張試験機, 降伏試験機, 伸び試験機, 断面収縮率試験機
 試験場所: 株式会社 日本製鉄所 品質保証部 試験センター

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN TESTED
 AND INSPECTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE
 REQUIREMENTS OF THE ABOVE SPECIFICATION.

日本製鉄株式会社 品質保証部 試験センター 東京都港区新橋三丁目1番1号

T. Takahashi
 日本製鉄所 品質保証部
 Quality Assurance Section
 East Japan Works

第2部 表面形状と応力の関係・その他

特集

損傷に学ぶ



4.4 構造健全性のライフサイクル管理

正 員 角 洋 一*

1 ライフサイクル管理と情報

船舶の構造保全に係る情報は船舶の運航履歴とともに膨大な量となる。これらの情報は主として造船所が所有する設計・建造情報、船主が有する運航情報、船級協会および船主が有する点検・検査・補修情報などであるが、それぞれが関係者固有の形式の情報として所持されており、船体の維持管理に必要なすべての情報を瞬時にすべてリストアップできる状態にないことが問題とされている。これを解決するために船舶のライフサイクル全体にわたって船主、運航管理者、船級協会、造船所などの関係者が有する情報を電子化し一元管理することによって、迅速な評価により適切で効率的な構造健全性の維持を行うシステムの必要性が認識され、その開発が進められている^{1)~4)}。本項では、個船の3次元船殻情報と検査情報を統合化した船体構造保全情報システムの有用性^{2)~4)}を腐食衰耗および疲労評価の観点から論じたい。この種のデータベースと評価システムは、現時点の船体強度、疲労強度を直接評価することによって、合理的な検査・点検計画や計画的かつ効率的な補修工事を可能にするとともに経年船の構造健全性向上にも有用である (Fig. 1)。

2 船体3次元モデルを含む設計情報と検査情報の統合化

2.1 船級協会の研究開発動向

ノルウェー船級協会 (DnV) では、船体3次元モデルの電子情報と検査履歴情報を統合化し、船主が実際の定期点検を実施する前にコンピュータ画面上の3次元船体モデル内を仮想検査することのできるシステムを開発中である。この主要な目的は、事前に重点検査箇所の抽出など詳細な検査計画の立案、補修計画の立案を可能にし、定期検査をスムーズに実施できるようにすることにあると考えられる。このようなシステムの有用性は理解できるが、船体構造の3次元モデルの電子データは、既存船の場合設計図から新たに入力する必要があることが多い。また、新造船の場合でも、このような電子データを設計担当の企業が無償

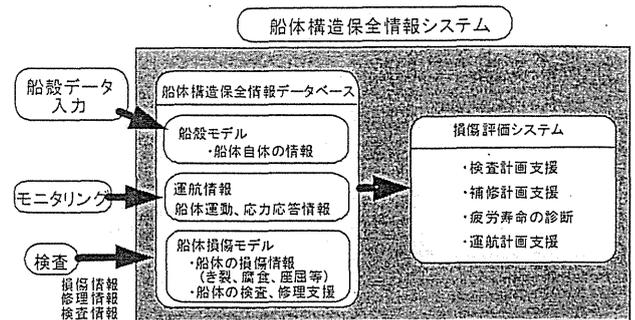


Fig. 1 船体構造保全情報システムの概要

で提供するとは考えられない。そのコスト負担に見合う船主のメリットが明らかとなるような体制作りが、最大の課題である。

日本海事協会を始め他の船級協会でも検査情報のシステム化が行われており、その詳細は上記参考文献2)などを参照されたいが、船体3次元モデルと検査履歴情報を統合化する試みは、未だ手探り状態である。

2.2 STEPによる船体3次元モデルと検査情報の統合化

前述の船体3次元モデルと検査情報の統合の考え方は魅力があるが、船舶の運航が20~25年間という長期間にわたることを考えると、この間にハードとソフトを含む計算機環境の劇的な変化が予想される。したがって、これらの情報は計算機環境の変化に依存せず長期間にわたってアクセス可能な形式でなければならない。また、船体の設計・製造段階で作成された船殻構造情報は、できる限り付加的な労力なく自動的に船体構造保全情報システムに保存されるべきである。そこで、以下では、プロダクトモデルの標準規格であるSTEPを用いたデータ交換の事例を示す。船舶に関するSTEPの応用分野としては、AP218 (船体構造情報)、AP216 (船型情報)、AP215 (区画情報) 等が間もなく国際標準規格 (ISO) となる予定である。本稿では、AP218に準拠したモデルにより、船殻の3次元構造情報 (プロダクトモデル) をシステムに取り込む⁵⁾。

船体構造保全システムにおける船体3次元モデルとその検査情報の統合化に際しては、STEPにおける船体構造モデルを参考に、EXPRESS言語⁶⁾を用いて作成した。システムの機能は以下の通りである。

* 横浜国立大学大学院工学研究院

検査情報から、その状態に応じた解析モデルを自動生成することが可能となる。

具体的な解析モデルとしては、船体はりとしての縦強度評価モデルや最終強度評価モデル、シェル要素による3次元船体構造解析モデルなどの生成が可能である。ここで生成される3次元有限要素モデルは、一般的な有限要素法によるシェル解析の概念を表現するモデルであり、このデータは構造解析プログラムの入力ファイルそのものではないことに注意すべきである。船体構造保全情報システムの3次元船殻構造モデルから有限要素解析の入力ファイルを生成するには、まず一般的なシェル解析モデルを生成した後に、使用する解析コードに対応したプリプロセッシング（メッシュ生成等）を行う必要がある。例えば汎用有限要素解析コードMSC. Nastranの場合、PCL（Patran Command Language）と呼ばれるMSC. Nastranのプリプロセッサを操作できるプログラミング言語を利用して、Nastran入力ファイルを自動生成できる。

このようなデータ管理は一見複雑そうであるが、シェル解析モデルなどの標準強度解析モデル（Fig. 4参照）は時代とともに変化の激しい計算機環境には依存せずに長期利用可能である。使用解析ソフトウェアの変化にはこの標準強度解析モデルのデータから使用解析ソフトウェアの入力ファイルへの変換プログラムを用意するだけでよい。船体構造保全情報モデルと強度解析モデルについて、上述のような標準データモデルを確立することができれば、長期的「データ」の利用（Long Term Data Retention）だけでなく、このような「解析モデル生成の知識（Mappingの知識）」を長期的・汎用的に利用することが期待できる。

3.2 腐食状態を反映した船体構造の効率的解析

前節で、経年船の強度解析データの自動生成手法について述べたが、3次元シェルモデルによる直接強度計算はその応力応答関数の計算に長時間を要することが知られている。既存経年船の場合であっても、荷重データなどは基本的に設計時のものが構造保全情報システムには保存されるべきであるし、また応力評価部位も、設計時の評価対象部位がわかっており、それらの箇所に腐食の激しい部位を追加すればよいので、経年船の現時点評価は十分絞込みがされた解析と考えてよい。このような場合、重み関数法による応力応答関数の計算高速化が有効なので、本節ではそれについて触れる。

数値重み関数法による応力応答関数の高速計算

有限要素法による重み関数の算定と任意の荷重系に対する評価点の変位および応力の計算手順は以下の通りである⁸⁾。

- ・変位あるいは応力の応答評価点に、対応する単位集中力あるいは集中力対系を作用させ、その変位場を求める。これが、応答の重み関数ベクトル場となる。

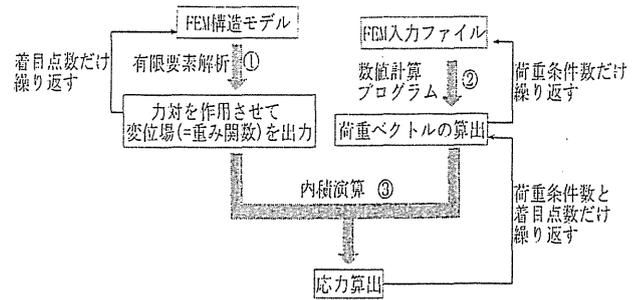


Fig. 5 重み関数法の計算手順

- ・構造体に作用する荷重系に対する節点荷重ベクトルを算出する。
- ・得られる重み関数ベクトルと荷重ベクトルの内積をとると評価点における応答が直ちに計算できる。

経年船の場合、前節の手法で生成された船体構造解析データを用いMSC-Nastranなど汎用構造解析プログラムにより重み関数は計算できる。一方、荷重ベクトルは設計時のものが保存されていればそれを用いればよい。本手法では、Fig. 5に示すように有限要素解析による求解回数が増える評価すべき応答の総数となるので、通常の解析に比べ格段に計算時間の短縮が図れる。

重み関数法による応力応答関数の計算

荷重条件として、波高一定の規則波について波向きを30 deg間隔、波長船長比を約0.5から1.5まで30ケース、出会い波1周期間の位相は12等分して計算すると、全計算に要する荷重ケースはこれだけでも2,520ケースとなる。

一般にMケースの荷重条件に対してN個の着目点の応力を算出するとき、重み関数法による計算時間 T_w は、

$$T_w = T_1 + T_2 \times M + T_3 \times N \times M \quad (1)$$

となる。ここに、 T_1 は着目点応力の重み関数を求める計算時間、 T_2 は1個の荷重ケースに対して節点力ベクトルを計算する時間、 T_3 は荷重ベクトルと重み関数の内積演算を全節点に対して行う計算時間である。Fig. 7(a)に示すような構造解析モデルについて、現状の高速パソコンを用いた直接解析による応力応答関数算定には10時間程度を要するのに対して、重み関数法による計算時間は評価点が1箇所であれば約30分、20箇所としても3時間以内に収まる。本計算手法は、一種の情報圧縮技術であり、時間の限られた経年船の定期検査時に極めて迅速な強度評価を実行可能にする手段となり得る。

3.3 検査で発見された疲労き裂診断

点検・検査で発見された疲労き裂は、補修することになるが、

- ・適切な補修方法の立案には構造詳細を含む疲労き裂発生原因の解明

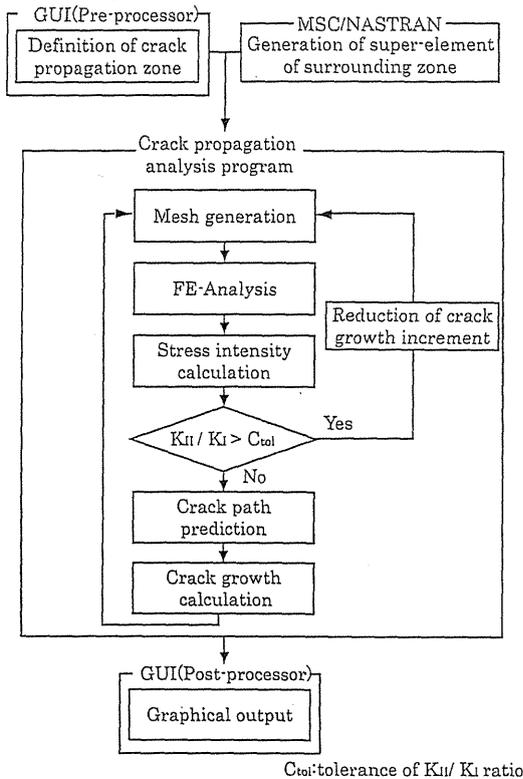


Fig. 6 き裂伝播経路と伝播寿命の数値シミュレーション

・タイトな運航スケジュールの中で補修工事までに許容される期間の合理的判断
 が必要になる。このためには、当該部の疲労き裂伝播シミュレーションによる疲労強度評価が有用である。

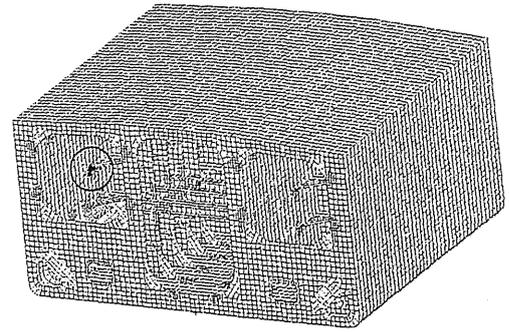
疲労き裂伝播挙動の診断には、

- ・船体構造応答モニタリングによる当該個船の荷重履歴データ
- ・3.1節で述べた統合された船体構造情報と検査情報に基づく強度解析データモデル
- ・発見された疲労き裂に関する情報
- ・き裂伝播シミュレーションプログラム

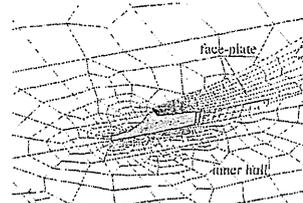
が必要である。構造保全情報システムの理想形としてはこれらすべての情報が存在し、一元管理されていることが期待されるが、現実にはモニタリングデータも存在しないことが多く、そのような場合には一般的な設計荷重を用い、疲労き裂発生部位におけるき裂伝播シミュレーションを行うことになる。

疲労き裂伝播シミュレーション

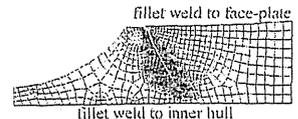
ここでは、筆者らが最近開発した疲労き裂伝播形態シミュレーションシステム (CP-System)⁹⁾¹⁰⁾を参考に、疲労き裂診断に必要なシミュレーションプログラムについて考察する (Fig. 6 参照)。本システムでは船体構造内にき裂伝播領域を定義し、き裂伝播領域の自動要素分割と境界条件を与え、有限要素法によりき裂先端の応力解析を行う。



(a) hull module of a tanker structure



(b) surrounding structural detail



(c) crack-propagation domain

Fig. 7 ダブルハルトンカーの疲労危険部位: (a) 1船倉の有限要素モデル, (b) 周辺構造のスーパーエレメント化, (c) き裂伝播領域の有限要素モデル

き裂先端の応力拡大係数範囲などを計算し次のステップまでのき裂進展経路を定め、逐次計算により疲労き裂伝播経路を追跡する。また、大規模溶接構造体中の疲労き裂伝播を扱うシステムは、

- ・き裂伝播部と周辺構造の相互影響
- ・溶接残留応力影響
- ・積載荷重および波浪荷重履歴影響

を十分に反映したものでなければならない。

積載荷重と波浪荷重の嵐モデルなどにより作用応力履歴はかなり現実的に再現できるようになったが、現状で最も困難なのは、き裂進展速度の評価である。簡便には、応力比の効果を考慮した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を用いてパリス則により評価するが、実海象に対応するランダム荷重下の疲労き裂の遅延・加速現象には本特集第4.1節¹¹⁾で解説されるような、き裂面の残留塑性変形層に関する詳細な計算を必要とする。

シミュレーションによる疲労き裂管理

Fig. 7はダブルハルトンカーの大骨端部の疲労き裂について、シミュレーションに基づくき裂管理の可能性を検討した事例である。簡単のため荷重条件として、き裂発生点の公称応力を85 MPaとした一定繰り返し応力を仮定したが、溶接残留応力が大きな圧縮応力となる場合には、その影響によりFig. 8(a)に示すようなき裂伝播遅延現象が認められる。これは、同図(b)の対応する応力拡大係数範囲の計算結果からも理解できる。このような疲労き裂伝播挙動が期待できる構造部位では、Fig. 9に示すように発生した疲労き裂が目視検査による定期点検で管理可能なことを

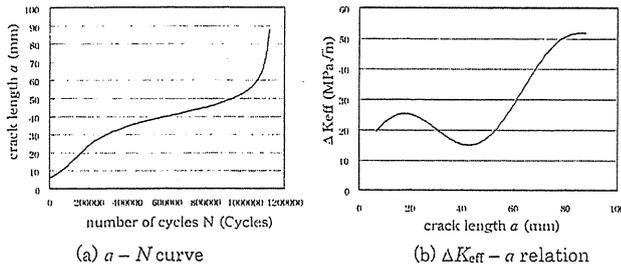


Fig. 8 き裂伝播寿命と有効応力拡大係数範囲の変化

示唆しており、今後溶接構造体の疲労き裂管理との関係でこのようなシミュレーション技術の一層の活用が期待される。

4 まとめ

構造保全情報システムとしての統合化をいかに実現するかという今後の実行上の問題を解決するには、設計・製造・運用・保守・廃棄などに関わる複雑に利害の絡み合ったステークホルダーの協調的情報管理への合意形成を促す仕組みが是非とも必要である。

本解説の内容の一部は、鉄道建設・運輸施設支援整備機構「運輸分野における基礎的研究推進制度（船舶の構造健全性向上のための設計・検査評価手法の高度化に関する研究）」によって実施された研究成果である。

参考文献

- 1) 日本海事協会 (2004), PrimeShip-HULLCare, ClassNK Magazine, 2004 56th Edition, pp. 4-5 (2004).
- 2) Det norske Veritas: Nauticus family welcomes new addition, Classification News, September, 2004.
- 3) 川村, 牧野, 角: 船体構造保全情報システムの研究—STEP 技術を用いたデータベース構築と腐食損傷に関するシステムの

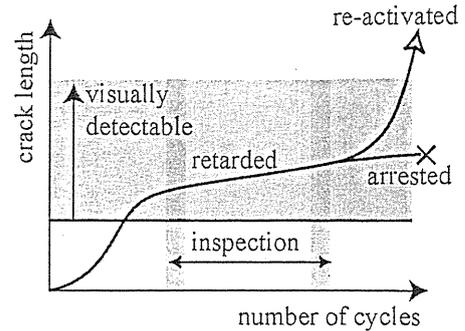


Fig. 9 目視点検による溶接構造体の疲労き裂管理の概念

- 試作—日本造船学会論文集, 第192号, pp. 601-609 (2002).
- 4) 川村, 藤田, 菊地, 角: 船体構造保全情報システムのための要素技術に関する研究—EXPRESS-Xを用いた強度解析モデル生成手法—, 日本造船学会論文集, 第194号, pp. 151-159 (2003).
- 5) MHI, Mitsubishi Heavy Industry News, Vol. 3843 (2000).
- 6) ISO, ISO 10303-11: Industrial automation systems and integration—Product data representation and exchange—Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual (1994).
- 7) ISO, ISO TC184/SC4/WG11 N088: EXPRESS-X, Reference manual (1999).
- 8) 角, Bashar, A.T.M.M., 川村: 数値重み関数法による構造解析手法の開発, 日本造船学会論文集, 第193号, pp. 33-38 (2003).
- 9) 毛利, 角, 川村, 松田: 疲労き裂伝播経路予測のシステム化と疲労試験による検証, 日本造船学会論文集, 第194号, pp. 185-192 (2003).
- 10) Y. Sumi, M. Mohri, and Y. Kawamura, Computational prediction of fatigue crackn paths in ship structural details, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 27, 2004 (in press).
- 11) 豊貞: 特集「損傷に学ぶ」4.1 疲労, 日本造船学会誌テクノマリン, 882, pp. 37-40 (2004).

以下の頁は著作権者の許諾を得ていないため、公表できません。

p. 101 ~ p. 106

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.