

小型船舶の船体構造用特殊材料の  
特性に関する調査研究報告書  
(その1：アルミニウム合金鋳物、SMC材料編)

平成13年3月

日本小型船舶検査機構

本調査研究における調査の一部は、独立行政法人 海上技術安全研究所との共同研究として実施した。

# 目 次

1	調査研究の目的及び実施方法	1
1-1	調査研究の目的	1
1-2	調査研究の実施方法	1
1-3	委員会	2
1-3-1	委員会の構成	2
1-3-2	委員会の経過	3
1-4	アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会	4
1-4-1	検討部会の構成	4
1-4-2	検討部会の経過	4
1-5	SMCの特性に関する検討部会	5
1-5-1	検討部会の構成	5
1-5-2	検討部会の経過	5
2	アルミニウム合金鋳物の特性に関する調査研究の内容	7
2-1	調査研究の概要	7
2-2	長期使用材	8
2-2-1	実態調査	8
2-2-2	試料の形状寸法等	8
2-2-3	試験内容および結果	10
2-3	新規成形材	34
2-3-1	新規成形材による調査研究の課題	34
2-3-2	新規成形材による調査内容	35
2-3-3	試験結果	40
2-3-4	スチロイ E-11 と JIS AC4CH の相違点	49
2-3-5	結論	50
3	SMCの特性に関する調査研究の内容	51
3-1	調査研究の概要	51
3-2	SMC材料の特性試験	52
3-2-1	実施概要	52
3-2-2	供試材	52
3-2-3	試験結果	54
3-2-4	まとめ	67
3-3	水上オートバイの船殻の構造強度	73
3-3-1	実施概要	73
3-3-2	供試モデル	73
3-3-3	計算精度の確認実験	74

3-3-4	発泡充填材が、強度に及ぼす影響	77
3-3-5	荷重設定法	78
3-3-6	解析結果と考察	82
3-3-7	まとめ	86
4	船体構造用材料として使用する場合の検査上の留意事項	87
4-1	アルミニウム合金鋳物材料	87
4-1-1	背景—材料の性質	87
4-1-2	検査における留意事項	87
4-2	SMC材料	90
4-2-1	SMC材料の特性	90
4-2-2	水上オートバイの船殻の構造強度	91

## 1. 調査研究の目的及び実施方法



## 1 調査研究の目的及び実施方法

### 1-1 調査研究の目的

船殻材料として量産船舶に用いられるようになってきている次の材料について、材料としての基本的な特性を把握し、船殻材料として使用する場合の検査上の留意事項等について検討を行うことを目的とする。

- ① アルミニウム合金鋳物
- ② SMC（水上オートバイ 船殻仕様材料）
- ③ ポリエチレン
- ④ ポリプロピレン

### 1-2 調査研究の実施方法

本委員会は、平成10年度～平成12年度は、①アルミニウム合金鋳物及び②SMCを検討対象とし、それぞれ「アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会」及び「SMCの特性に関する検討部会」を設置し調査研究を行った。

各検討部会では、様々な新規材料と経年使用材料を対象とした材料試験を行い機械的特性を確認することにより、検討対象の材料を船殻材料として使用する場合の検査上の留意事項についてとりまとめた。

本委員会では各検討部会の方向付け、調整等の検討を行い、また、各部会でとりまとめた検査上の留意事項について最終審議を行った。

本報告書は、①アルミニウム合金鋳物及び②SMCの2種類の材料について、それぞれ試験結果及び検査上の留意事項を取りまとめたものである。

なお、③ポリエチレン及び④ポリプロピレンについては平成12年度から「ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会」を設置し調査研究を行い、平成13年度に報告書（その2）としてとりまとめる予定である。

### 1-3 委員会

委員会の構成及び経過は、以下のとおりである。

#### 1-3-1 委員会の構成

委員会の構成は次のとおりである。(敬称略)

委員長	金原 勲	東京大学 工学部 船舶海洋工学科 教授
委員	松岡 一祥	国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部 高エネルギー利用研究室長 (アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会長)
	橋爪 豊	国土交通省 船舶技術研究所 構造強度部 強度研究室長 (SMCの特性に関する検討部会長)
	櫻井 昭男	国土交通省 船舶技術研究所 大阪支所 船舶用材料研究室長 (ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会長)
	村井 七生	社団法人 日本舟艇工業会 技術委員会 委員長
旧委員	菅 政之	元 社団法人 日本舟艇工業会 技術委員会 委員長
関係官庁	矢萩 強志	国土交通省 海事局 安全基準課長
	伊藤 茂	国土交通省 海事局 検査測度課長 (北村 正一 同上前任者)
	松村 純一	国土交通省 海事局 次席船舶検査官
事務局	松本 公道	日本小型船舶検査機構
	後藤 芳博	〃 (島村 正明 同上前任者)
	坂元 謙介	〃
	小竹 壽朗	〃 (渡邊 勝世 同上前任者)
	大賀 信夫	〃
	伊藤 淳	〃 (鈴木 輝昭 同上前任者)
	福島 正朗	〃



## 1-3-2 委員会の経過

### 第1回委員会

- ①開催年月日 平成10年8月6日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・事業計画について

### 第2回委員会

- ①開催年月日 平成10年12月11日
- ②開催場所 国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部会議室
- ③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会経過報告  
・SMCの特性に関する検討部会経過報告  
・アルミニウム合金鋳物の材料試験について

### 第3回委員会 (2検討部会と合同開催)

- ①開催年月日 平成11年3月18日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会平成10年度報告  
・SMCの特性に関する検討部会平成10年度報告

### 第4回委員会 (2検討部会と合同開催)

- ①開催年月日 平成11年7月29日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会  
平成11年度試験計画及び経過報告  
・SMCの特性に関する検討部会  
平成11年度試験計画及び経過報告

### 第5回委員会 (2検討部会と合同開催)

- ①開催年月日 平成12年6月6日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会平成11年度報告  
・SMCの特性に関する検討部会平成11年度報告  
・平成12年度事業計画

### 第6回委員会 (2検討部会と合同開催)

- ①開催年月日 平成12年9月20日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・委員会報告書案について  
・検査上の留意事項について

## 1-4 アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会

### 1-4-1 検討部会の構成

アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会の構成は次のとおりである。(五十音順、敬称略)

部会長	松岡 一 祥	国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部 高エネルギー利用研究室長
委員	清水 満 雄	フルマン(株) 代表取締役
	隅田 啓 生	アレックス(株) 代表取締役
	武林 慶 樹	(株)神戸製鋼所 アルミ・銅カンパニー 技術部 技術企画室 主任部員
	吉井 徳 治	国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部 主任研究官
旧委員	杉下 幸 男	(株)神戸製鋼所
関係官庁	矢萩 強 志	国土交通省 海事局 安全基準課長
	伊藤 茂	国土交通省 海事局 検査測度課長
	(北村 正一 同上前任者)	
	松村 純 一	国土交通省 海事局 次席船舶検査官
事務局	委員会の事務局に同じ。(1-3-1 参照)	

### 1-4-2 検討部会の経過

#### 第1回部会

- ①開催年月日 平成10年10月1日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項 ・調査、研究計画(案)について

#### 第2回部会

- ①開催年月日 平成10年12月8日
- ②開催場所 国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部会議室
- ③主な審議事項 ・経過報告

これ以降第3回～第6回の検討部会は、委員会と合同で開催した。

## 1-5 SMCの特性に関する検討部会

### 1-5-1 検討部会の構成

SMCの特性に関する検討部会の構成は次のとおりである。(五十音順、敬称略)

部会長	橋 爪 豊	国土交通省 船舶技術研究所 構造強度部 強度研究室長
委員	飯 田 和 三	ヤマハ発動機(株) 舟艇事業部 技術室 技術管理グループ 主任技師
	櫻 井 昭 男	国土交通省 船舶技術研究所 大阪支所 船舶用材料研究室長
	積 山 喜 規	川崎重工業(株) 汎用事業本部 CP事業部 技術統括部 第三技術部 部員
旧委員	金 内 良 雄	川崎重工業(株)
関係官庁	矢 萩 強 志	国土交通省 海事局 安全基準課長
	伊 藤 茂	国土交通省 海事局 検査測度課長 (北村 正一 同上前任者)
	松 村 純 一	国土交通省 海事局 次席船舶検査官

事務局 委員会の事務局に同じ。(1-3-1 参照)

### 1-5-2 検討部会の経過

#### 第1回検討部会

- |         |                    |
|---------|--------------------|
| ①開催年月日  | 平成10年9月28日         |
| ②開催場所   | 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室 |
| ③主な審議事項 | ・調査、研究計画(案)について    |

#### 第2回検討部会

- |         |                           |
|---------|---------------------------|
| ①開催年月日  | 平成10年10月16日               |
| ②開催場所   | 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室        |
| ③主な審議事項 | ・材料試験について<br>・波浪中航走試験について |

これ以降第3回～第6回の検討部会は、委員会と合同で開催した。



## 2. アルミニウム合金鋳物の特性に関する調査研究の内容



## 2 アルミニウム合金鋳物の特性に関する調査研究の内容

### 2-1 調査研究の概要

船殻材料として用いられているアルミニウム合金鋳物の基本的な材料特性を把握し、同材料を使用することに際しての留意点を抽出し、検査に活用できる基礎資料とするために、以下の調査研究を行った。

- (1) 長期にわたり使用された長さ 6m のアルミニウム合金鋳造船を対象に、実態調査、材料の成分及び組織、並びに機械的性質について調査した。
- (2) 新たにスミカロイ E-11 及び AC4CH 合金によるアルミニウム合金鋳物試験体を制作し、材料の機械的性質について調査した。

## 2-2 長期使用材<sup>1, 2)</sup>

1980年に建造され、10年間稼働、その後、8年間係留あるいは上架されていたアルミニウム合金鑄造船を対象に、実態調査、材料の成分および組織、並びに、機械的性質について調査した。

### 2-2-1 実態調査

長さ6mのアルミニウム合金鑄造船を対象に調査した(図2-2.1および2-2.2<sup>3)</sup>参照)。

外観は概ね良好であり、稼働あるいは係留中の犠牲電極等による防食の効果が認められる。船首部船側外板頂部に衝突により生じたか、衝突による塑性ひずみと残留応力に起因する応力腐食割れか不明であるが、長さ25mm程度の割れが存在した。

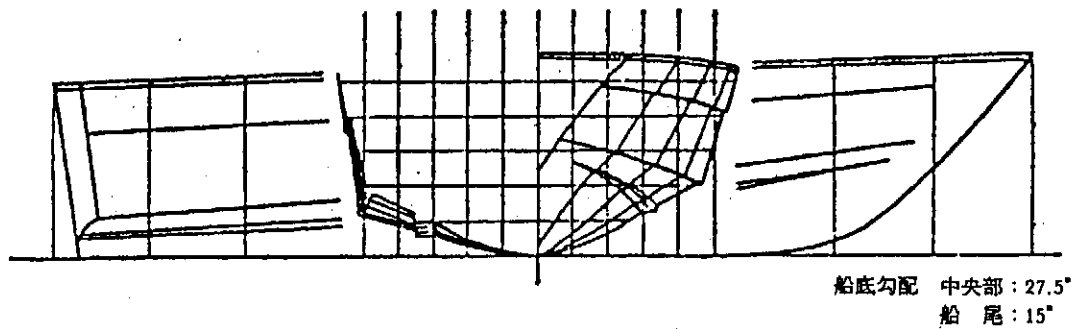


図 2-2.1 6 m 艇の線図<sup>3)</sup>

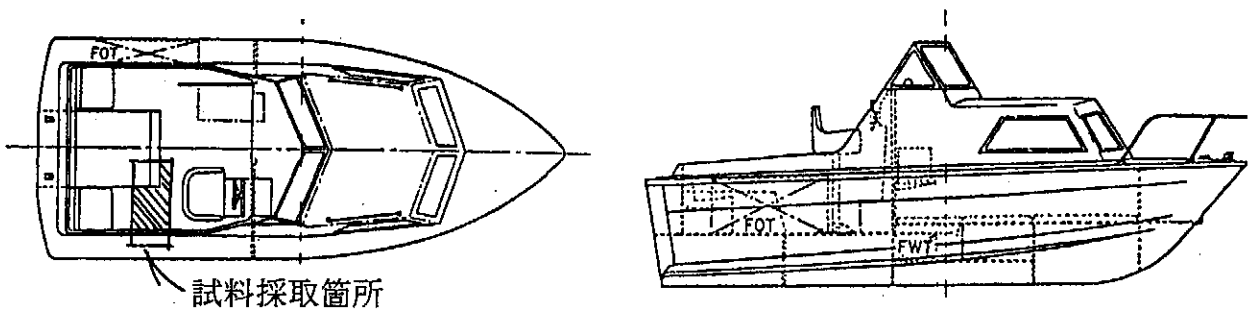


図 2-2.2 6 m 艇の一般配置図<sup>3)</sup>

### 2-2-2 試料の形状寸法等

船底から船側に到る箇所(図2-2.2参照)をプラズマ切断して試料とした。

試料の概形、寸法を図2-2.3に示す。

試料の接水面は、大部分塗料は剥がれているものの、孔食もなく滑らかである(図2-2.4参照)。しかし、内面の腐食は激しい(図2-2.5参照)。これは、係留中に飛沫、雨水等が内部にたまり、内装材固定用の鉄製ボルトとの間で電池を形成したものと考えられる。孔食の著しいところは2箇所あり、1箇所は外板まで貫通している(図2-2.4参照)。

船底板厚は一様ではなく、主機を置くために増厚したと思われる箇所(図2-2.3中A)がある。



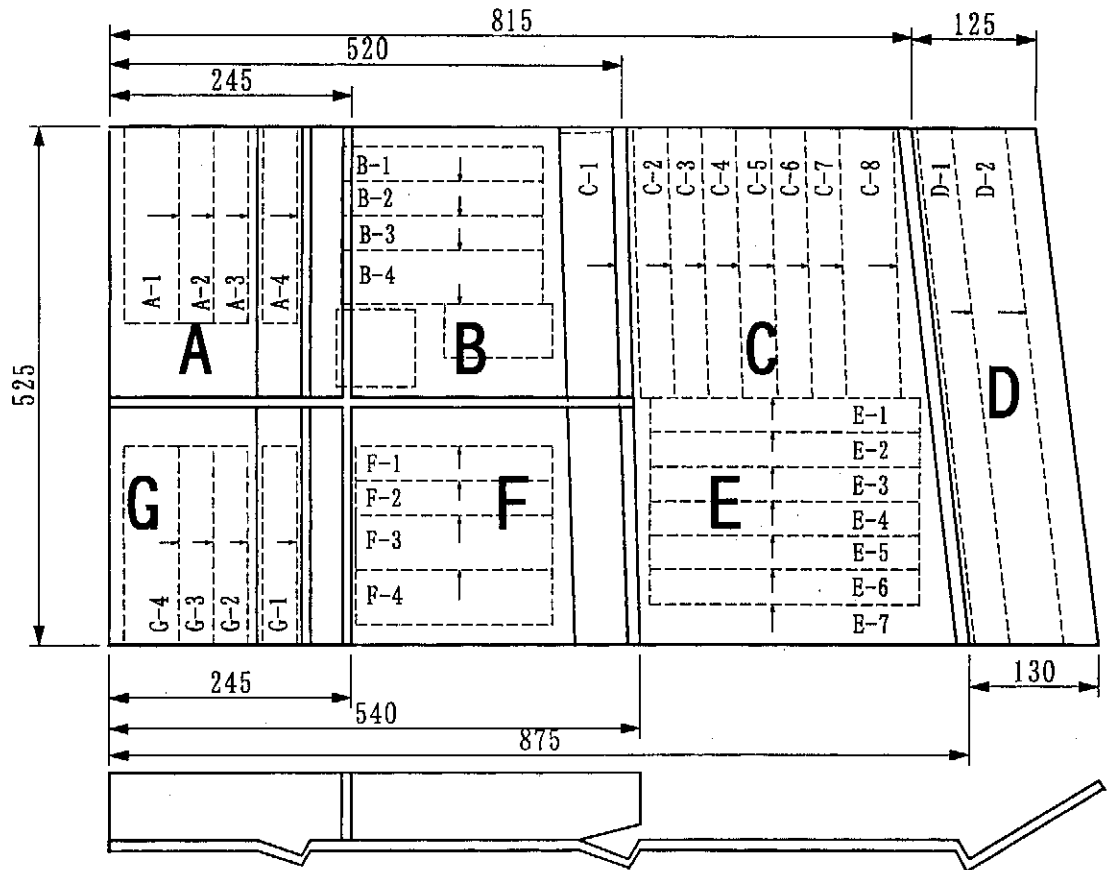


図 2-2.3 試料の概形、寸法および切り出し要領と板厚計測線

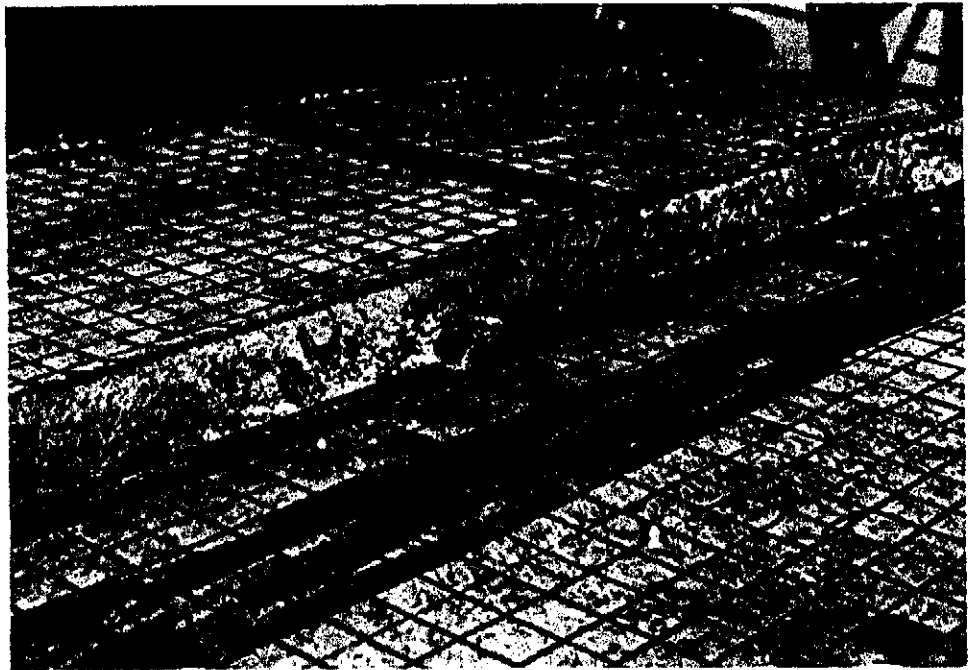


図 2-2.4 試料の接水側の様子(中央の穴は内側からの孔食が貫通している)

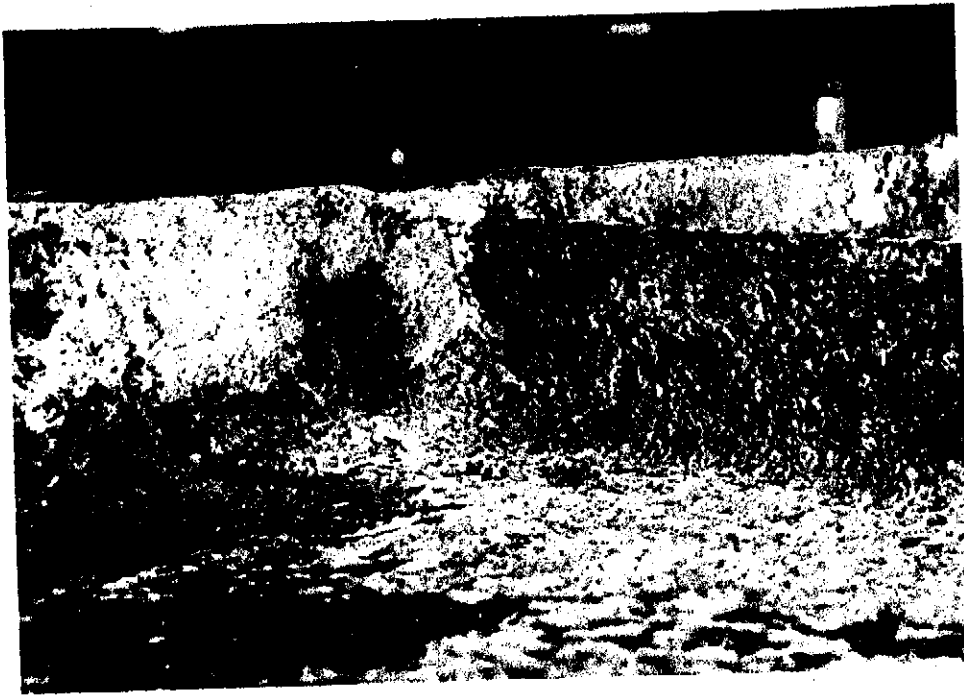


図 2-2.5 試料の内側の様子(一体鋳造した縦骨に孔食が見られる)

## 2-2.3 試験内容および結果

### 2-2.3-1 板厚計測

#### (1) 超音波板厚計測

接水面に孔食が無く比較的滑らかであるため、表面処理を行わず接水面に図 2-2.4 に示したセルを作り、セル毎に超音波板厚計測を行った。超音波探傷器と探触子を用いて、健全部の音速を計測した後、板厚計測を行った。結果を図 2-2.6 に示す。図中の A から G は図 2-2.3 に示した区画である。図は板厚の刻みを 0.2 mm として、頻度を確率に直して表示している。

区画 A の腐食が著しく、板厚のばらつきは大きい。側板 D が 2 山の分布になっているのは、チェーン部から上方へ急激な板厚変化があるためである。

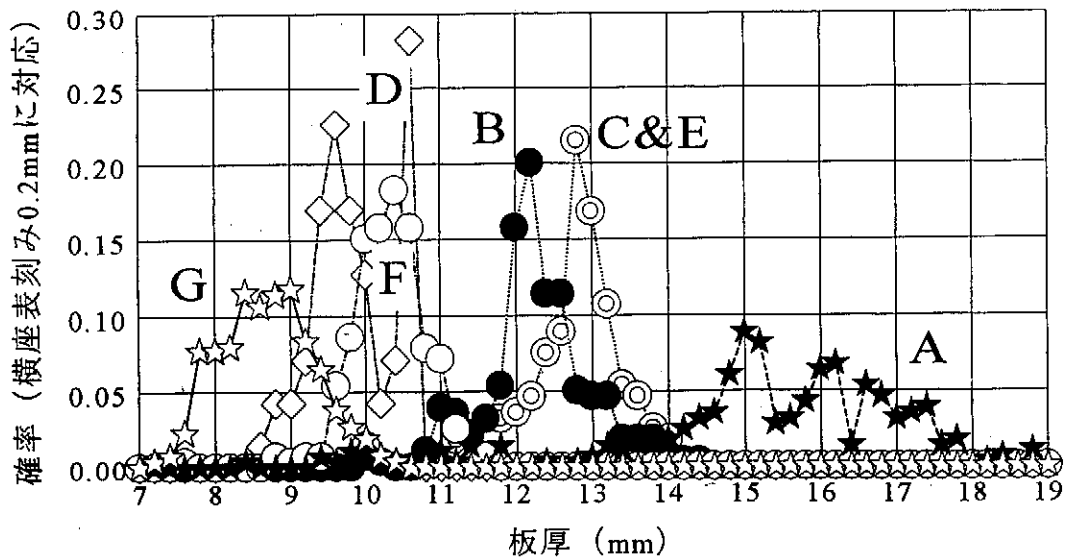


図 2-2.6 板厚分布(超音波)

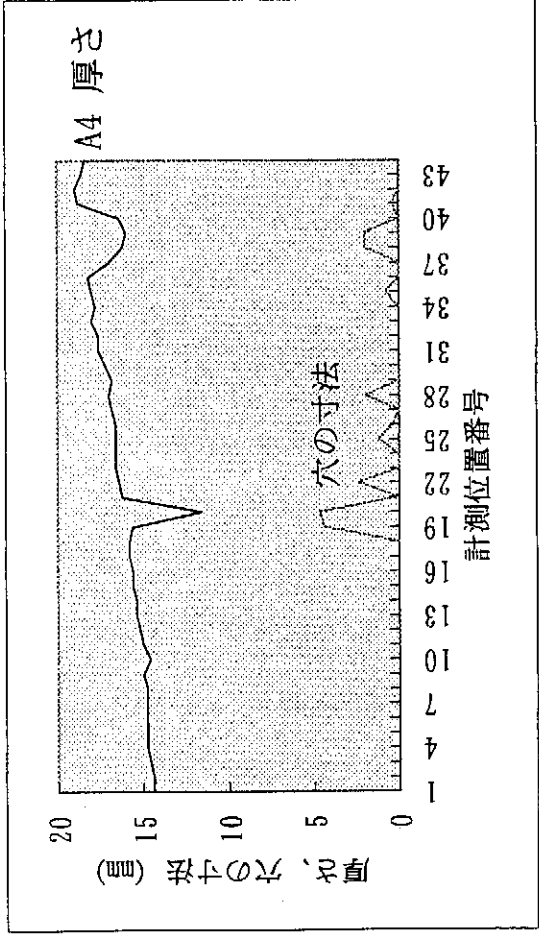
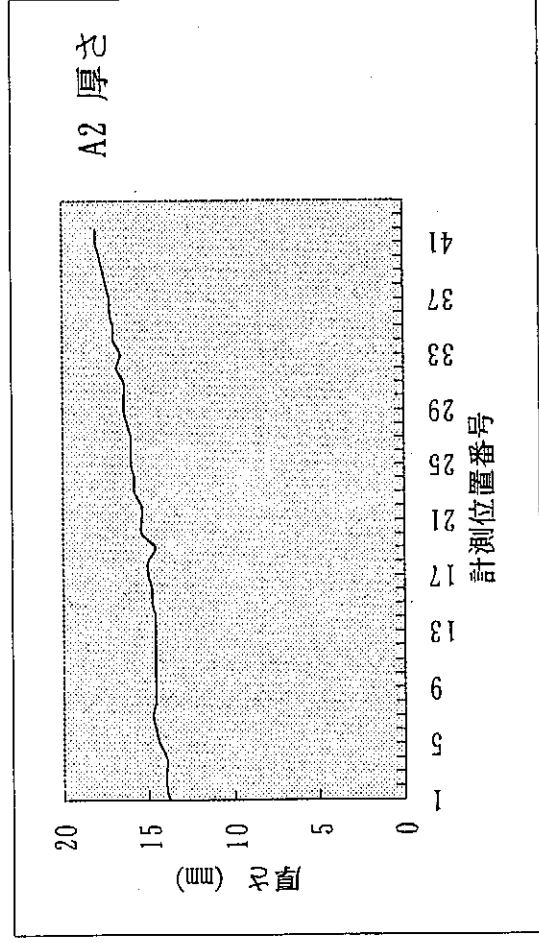
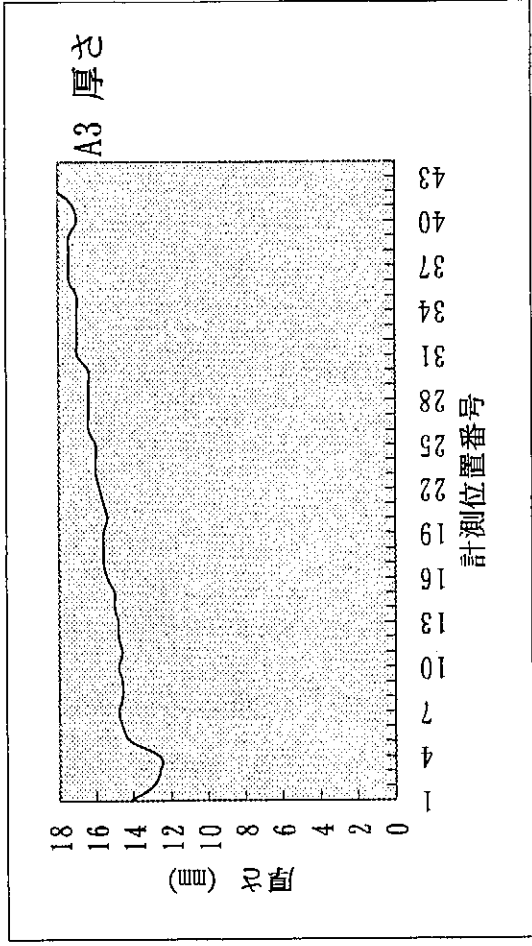
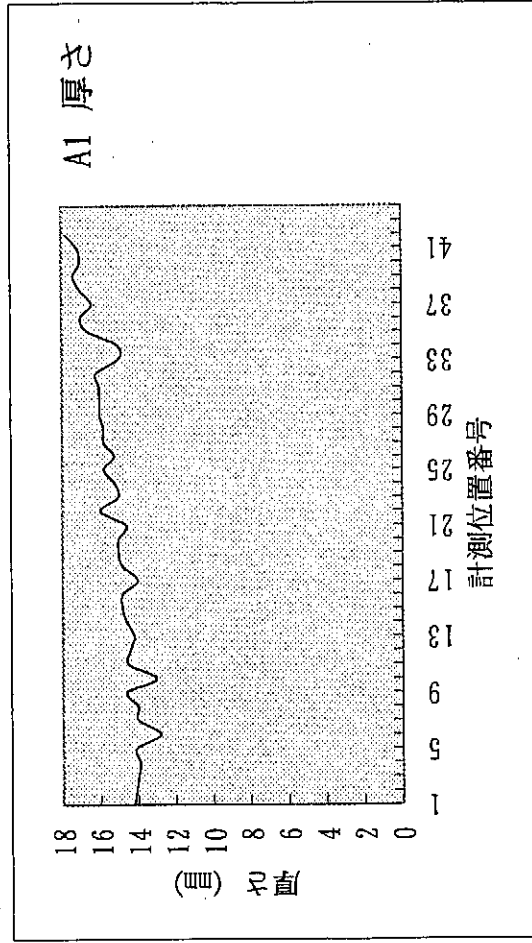


図 2-2.7 A 区画の板厚計測結果 (A1 から A4 計測線)

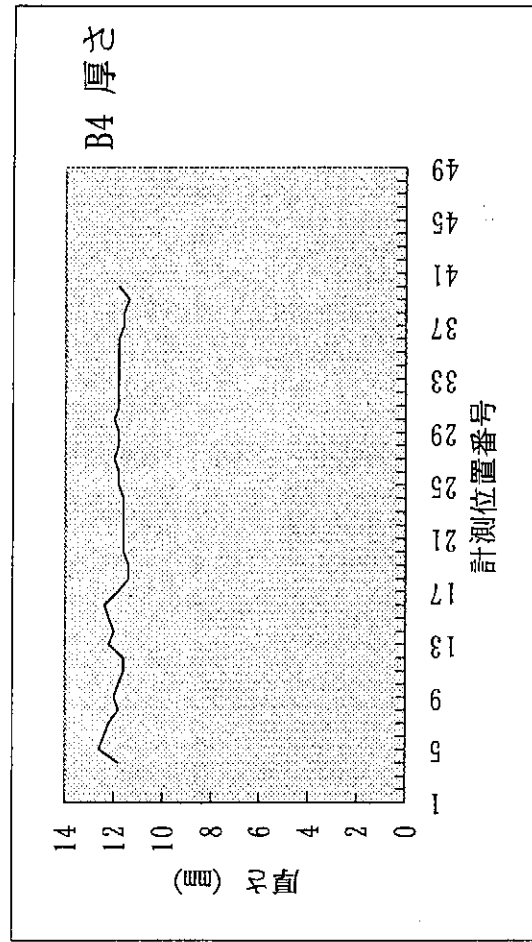
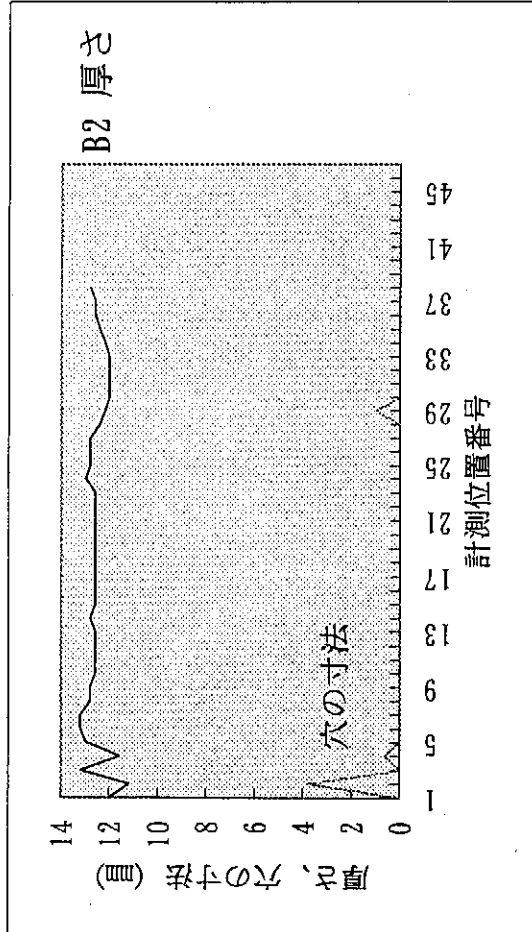
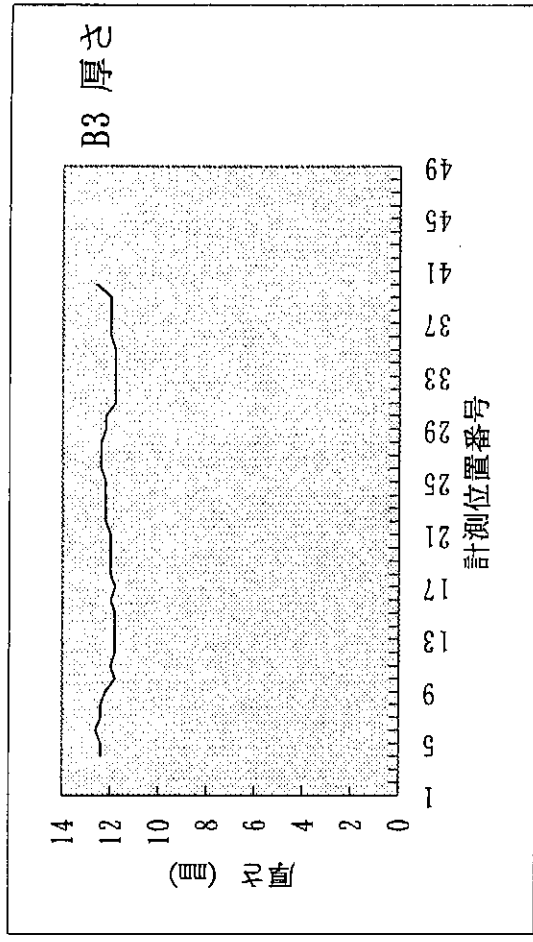
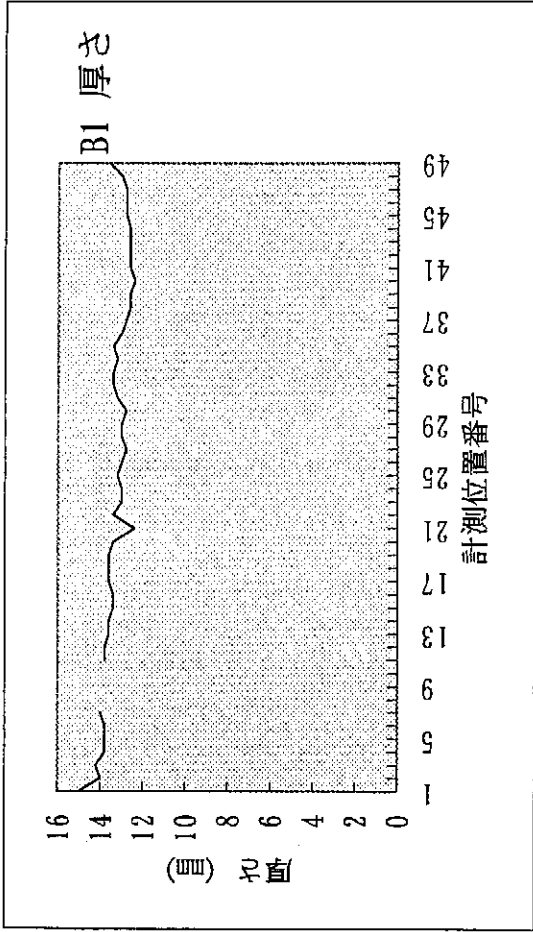


図 2-2.8 B 区面の板厚計測結果 (B1 から B4 計測線)

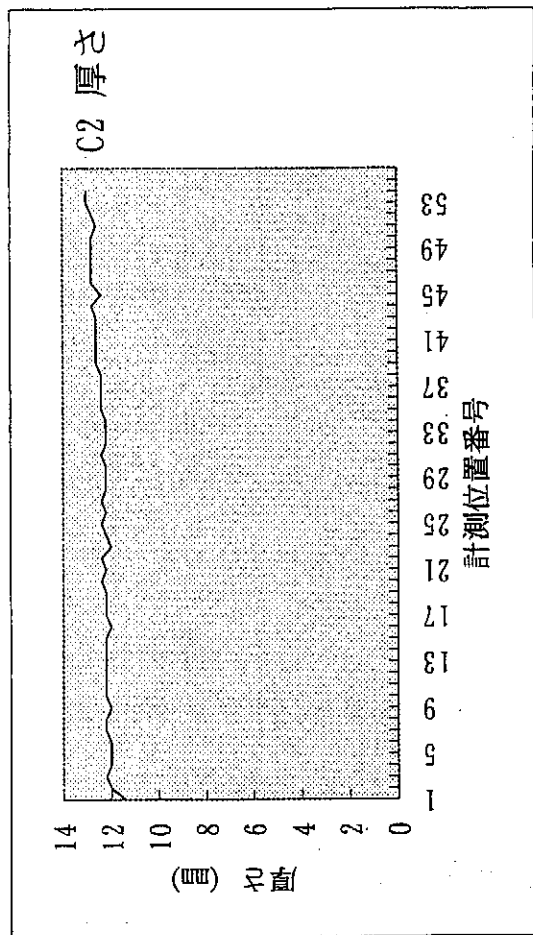
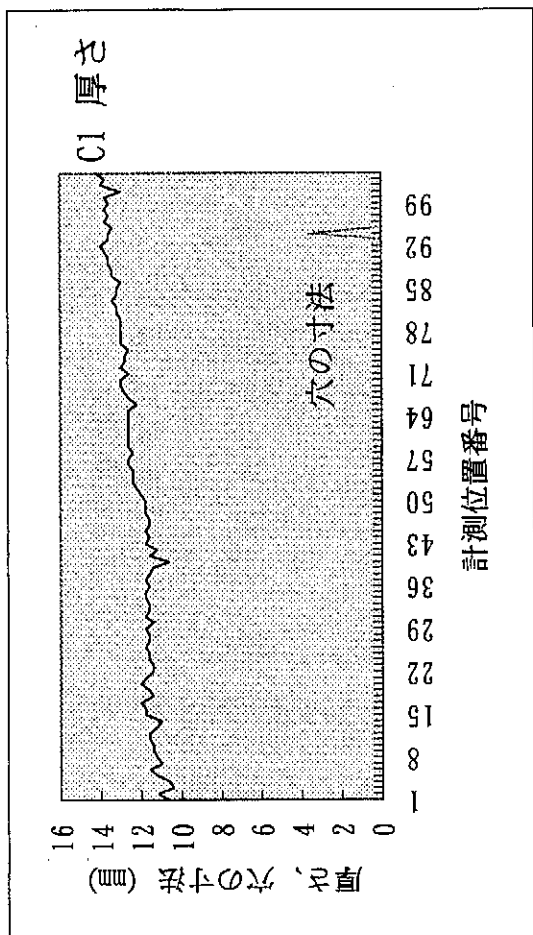
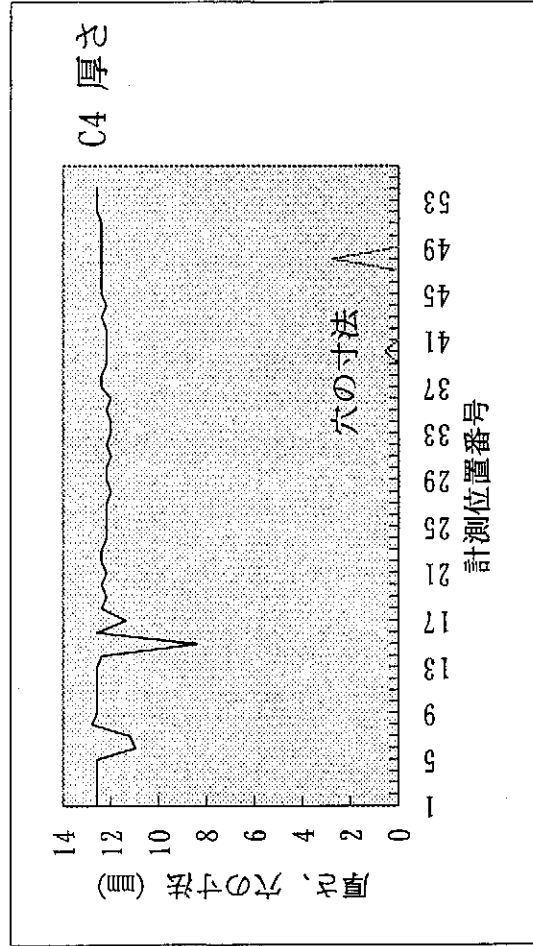
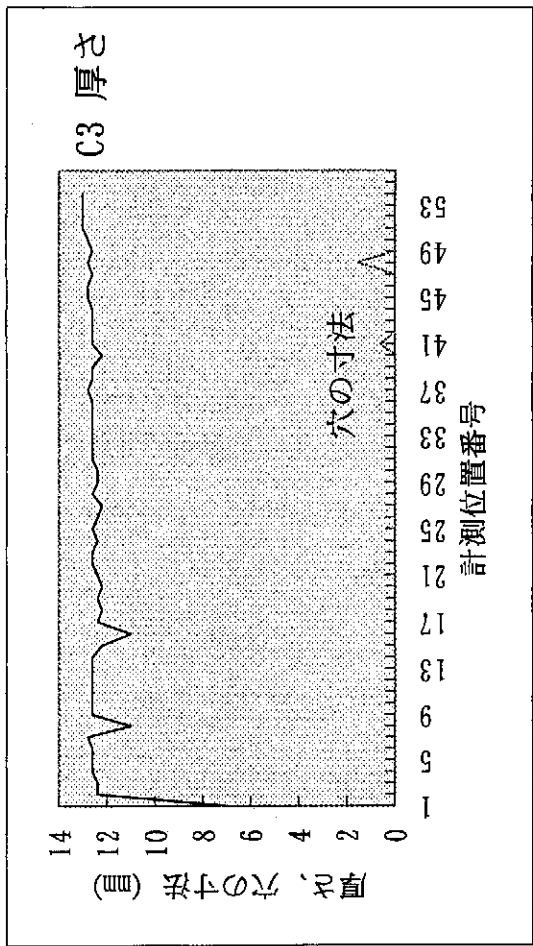


図 2-2.9 C 区画の板厚計測結果 (C1 から C4 計測線)

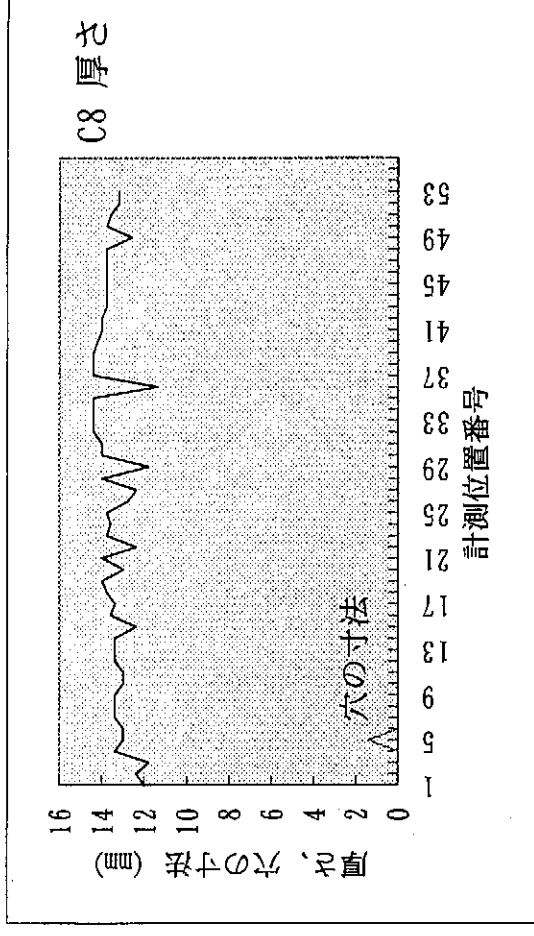
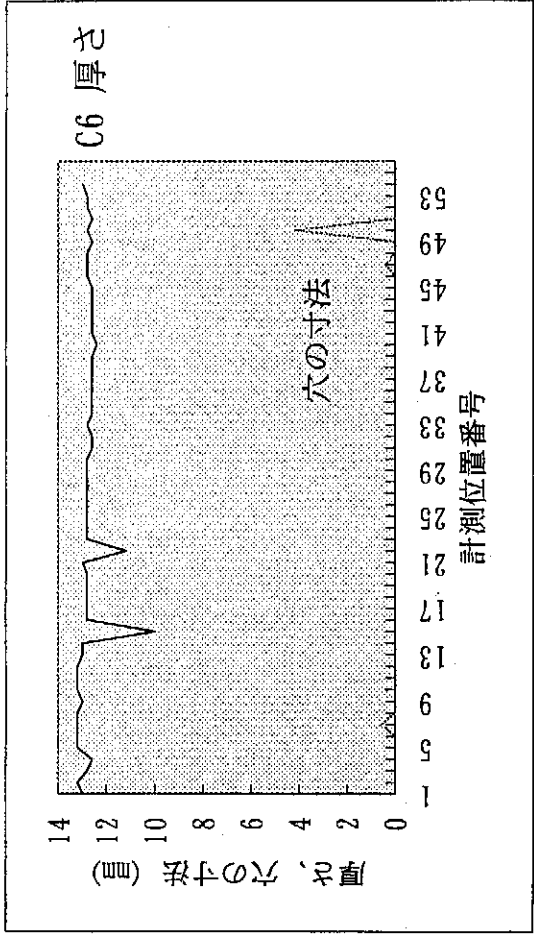
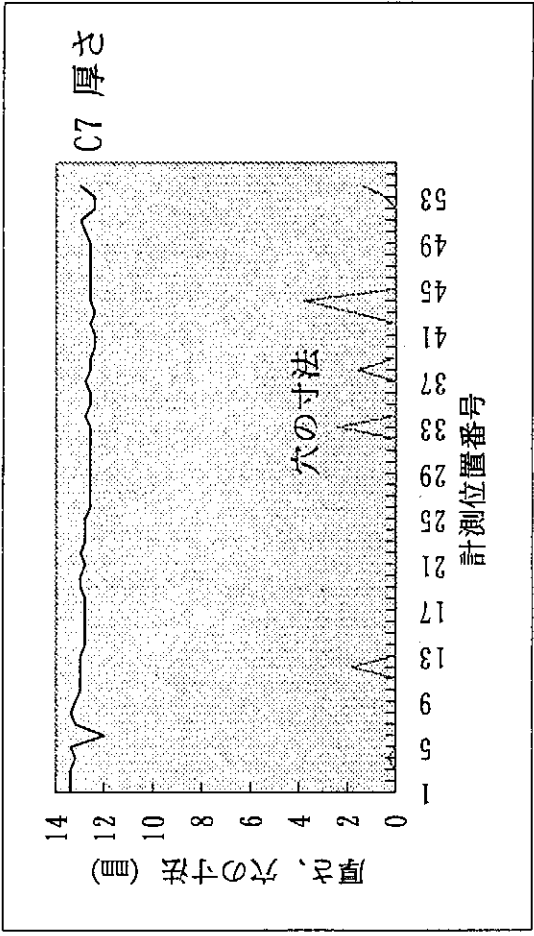
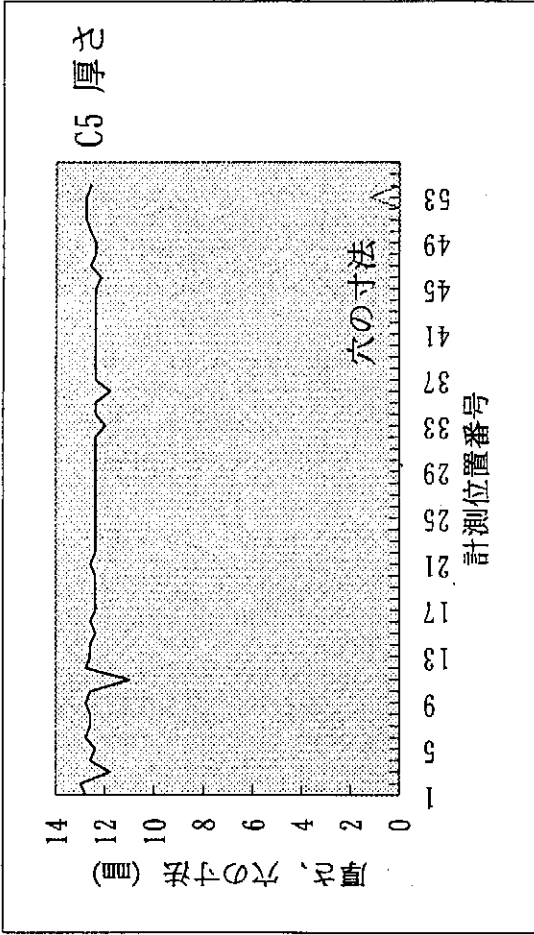


図 2-2.10 C 区画の板厚計測結果 (C5 から C8 計測線)

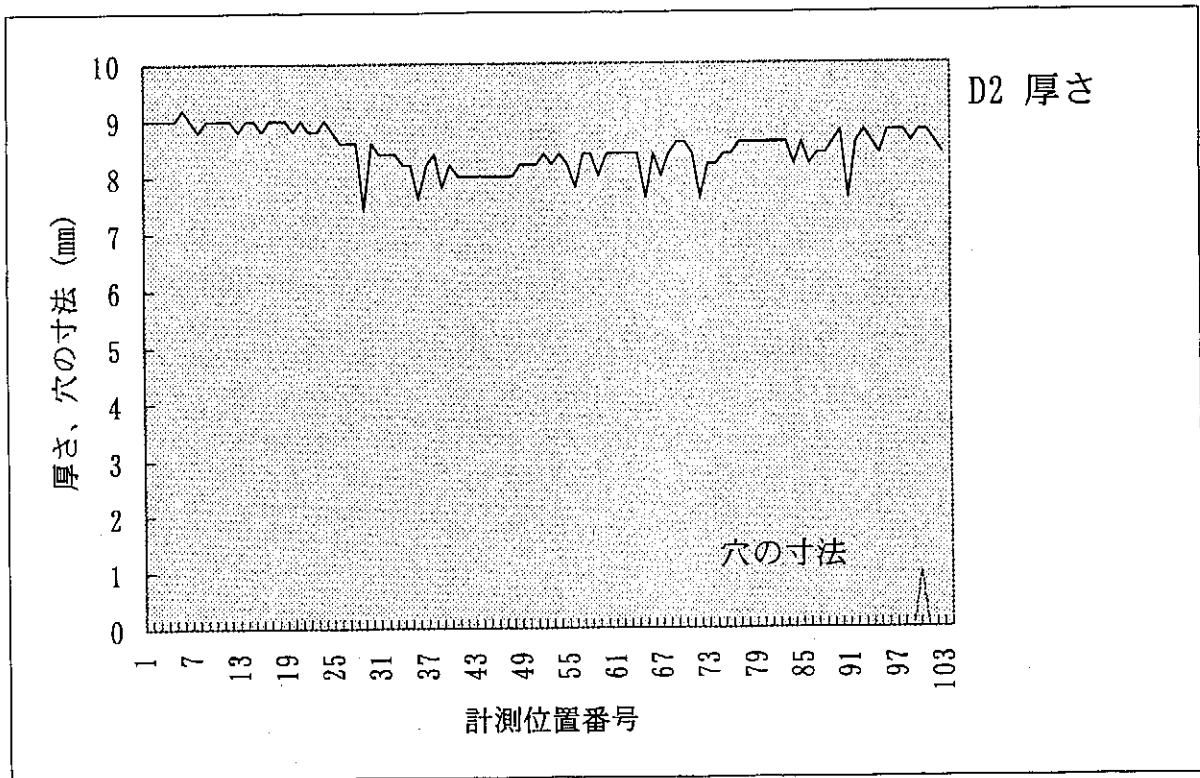
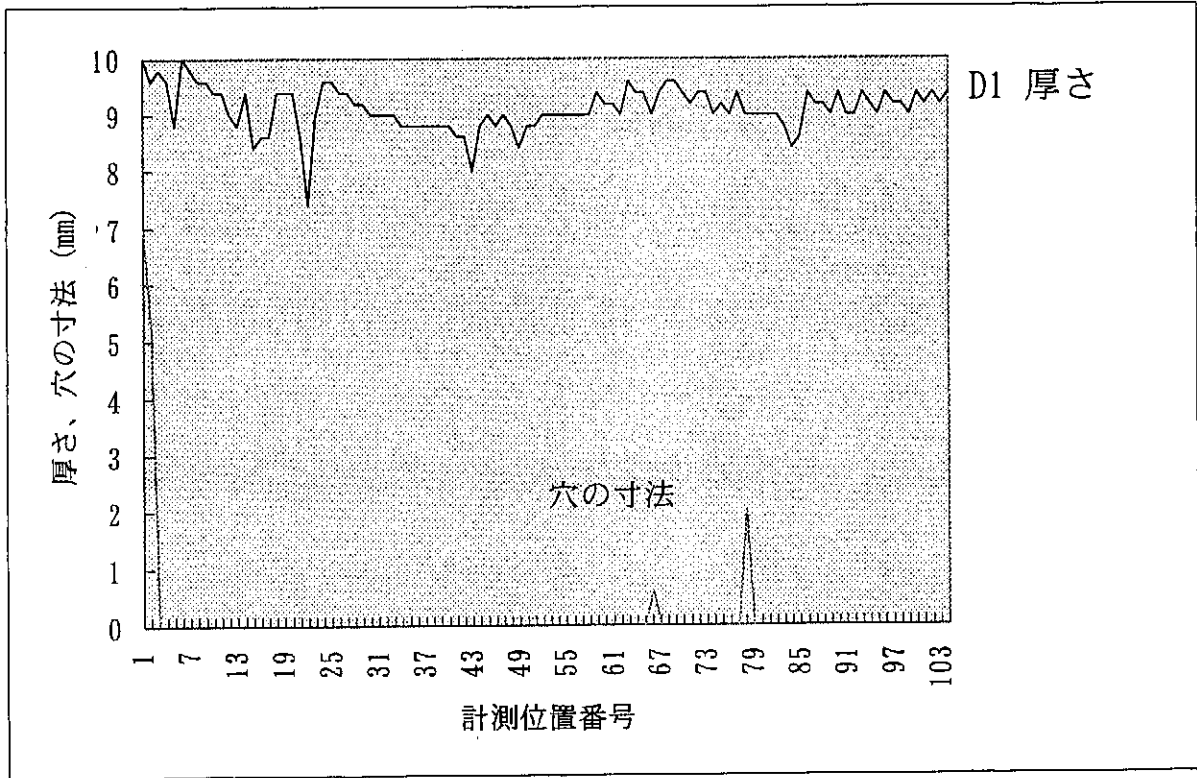


図 2-2.11 D区面の板厚計測結果 (D1 と D2 計測線)

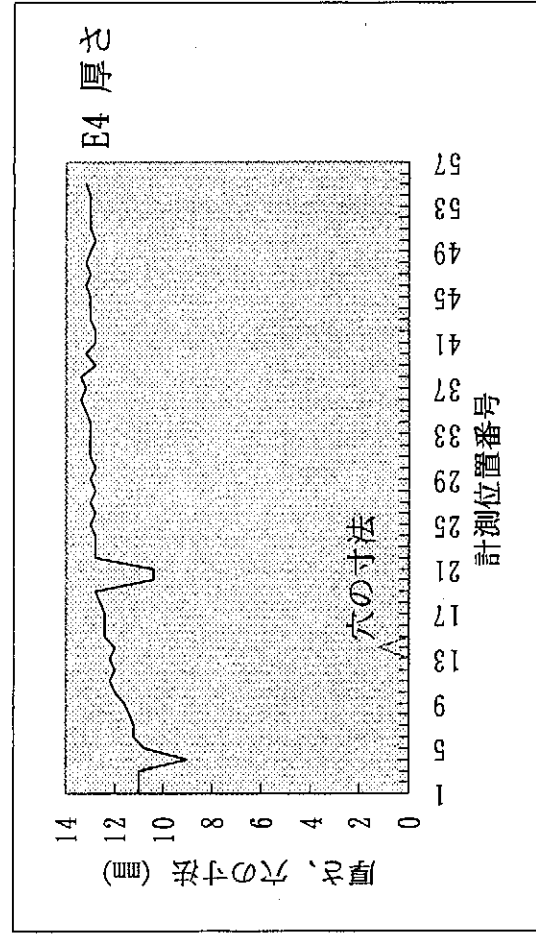
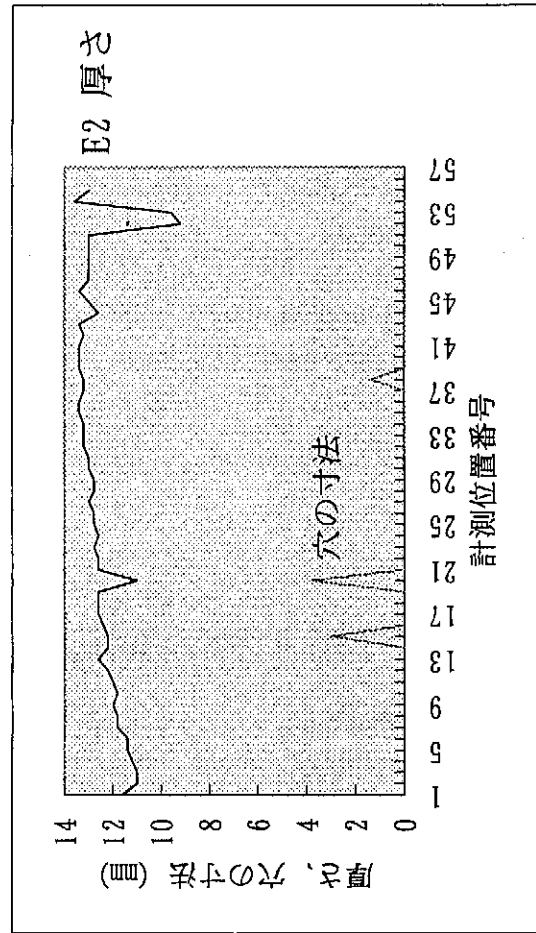
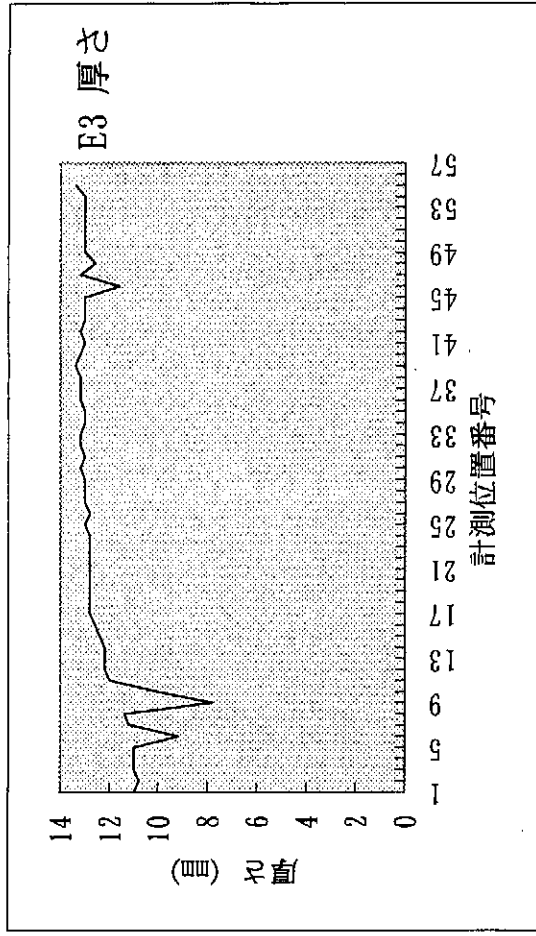
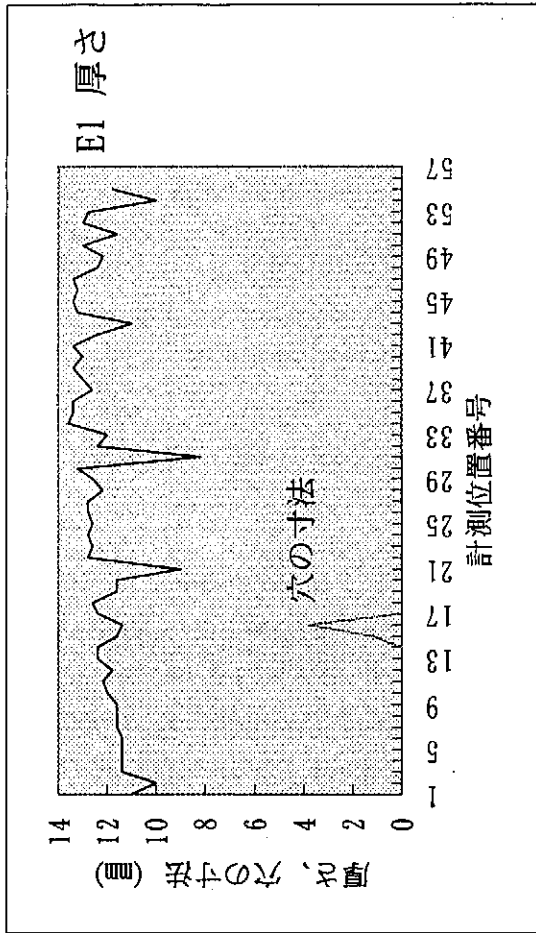


図 2-2.12 E 区画の板厚計測結果 (E1 から E4 計測線)



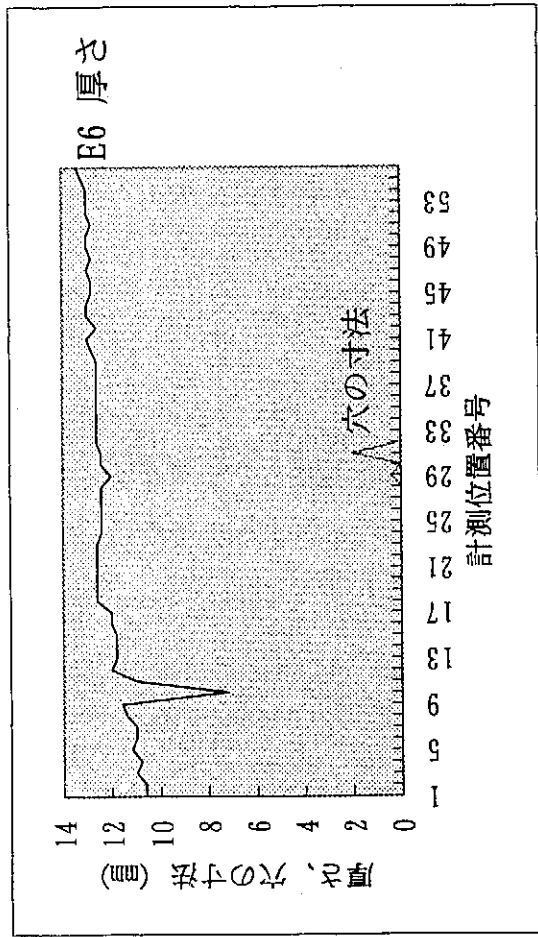
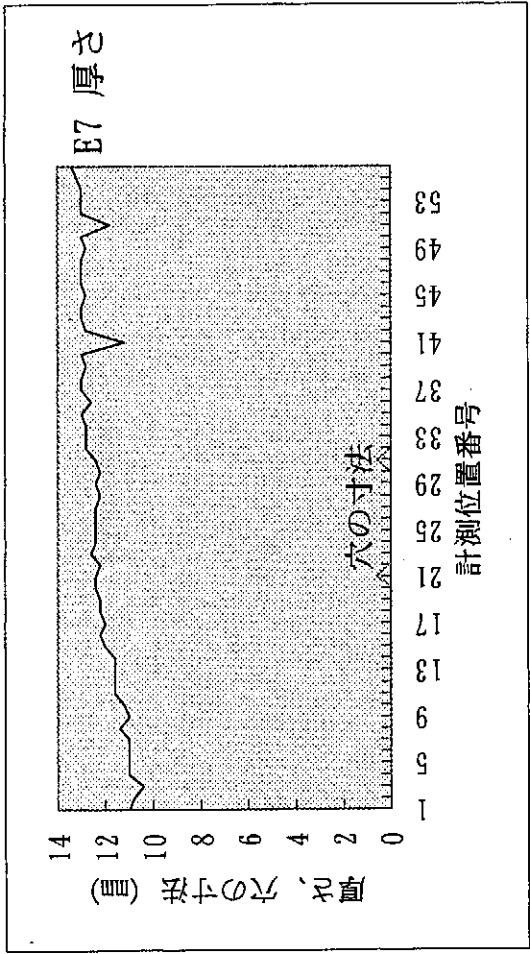
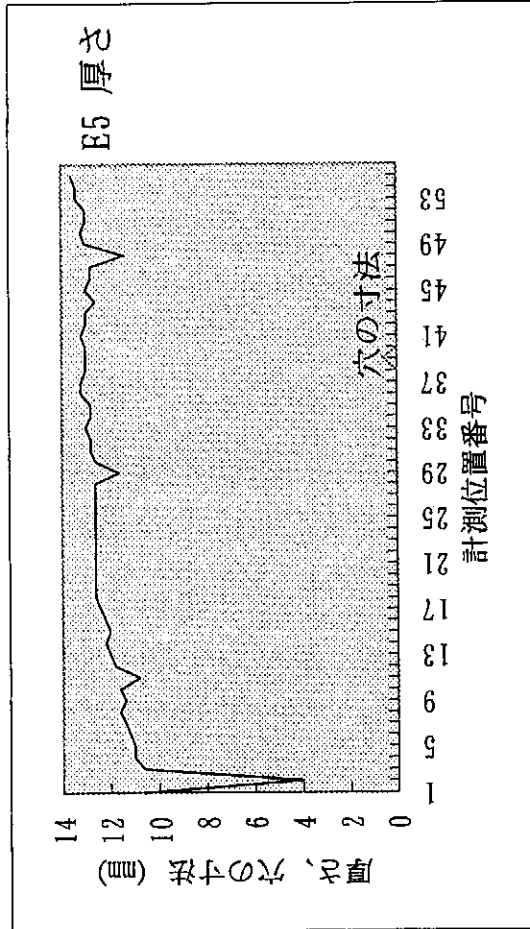


図 2-2.13 E 区画の板厚計測結果 (E5 から E7 計測線)

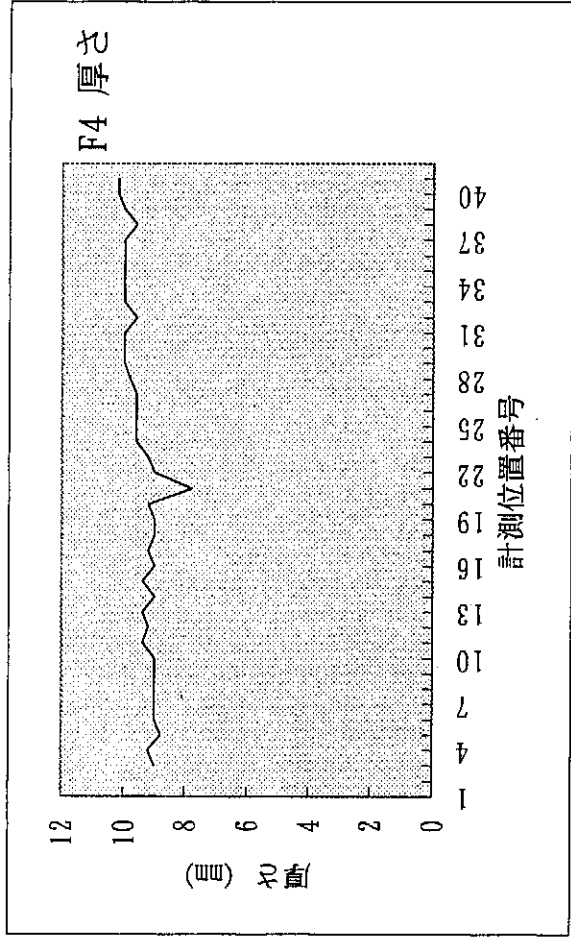
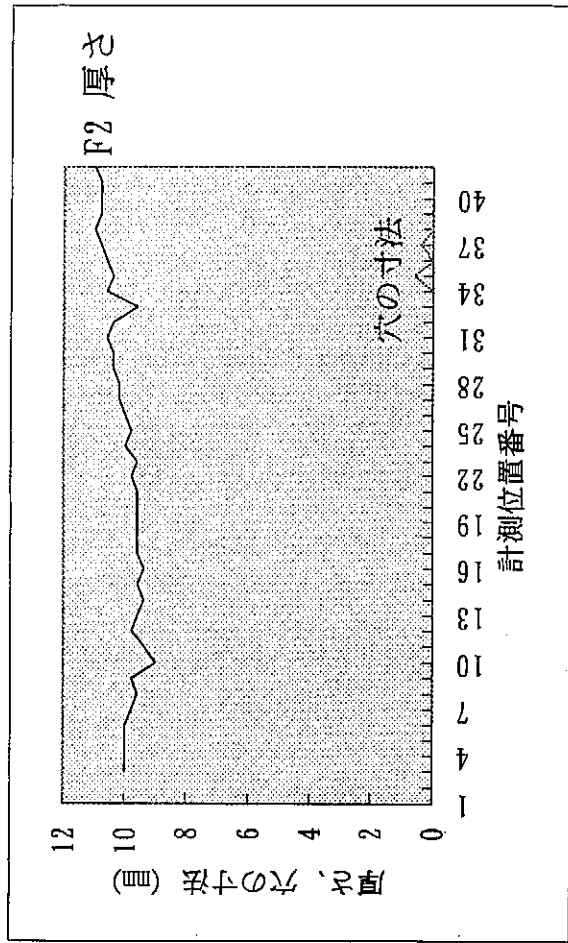
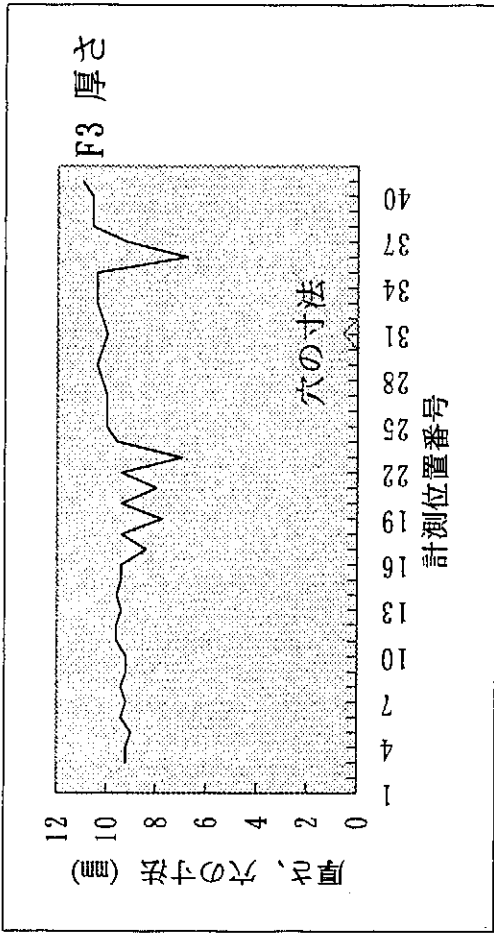
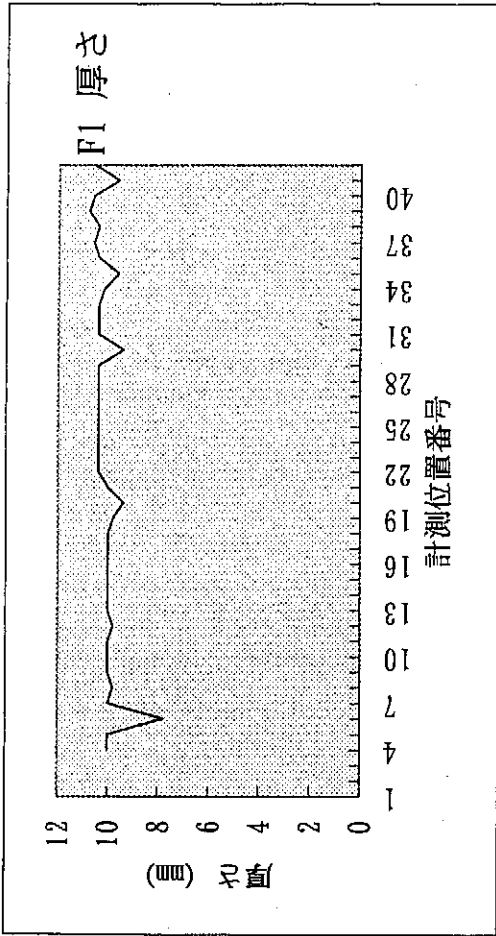


図 2-2.14 F 区画の板厚計測結果 (F1 から F4 計測線)

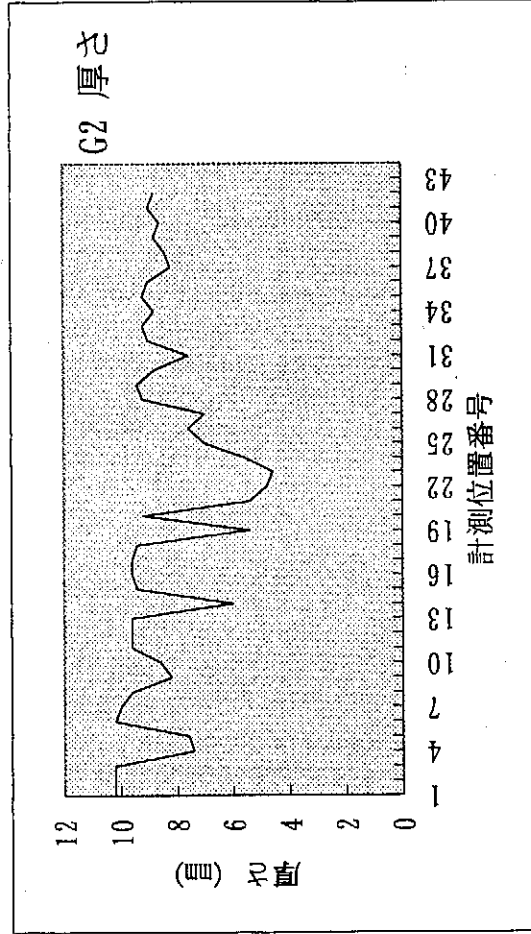
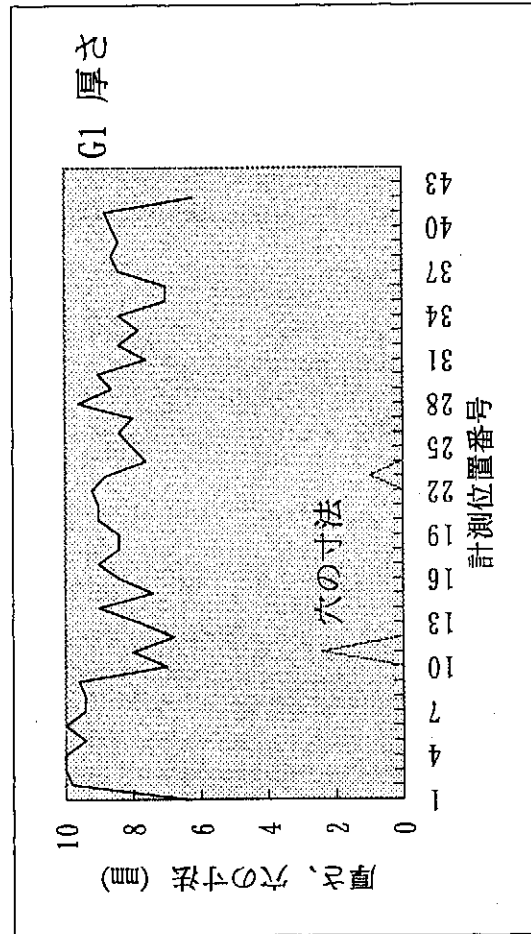
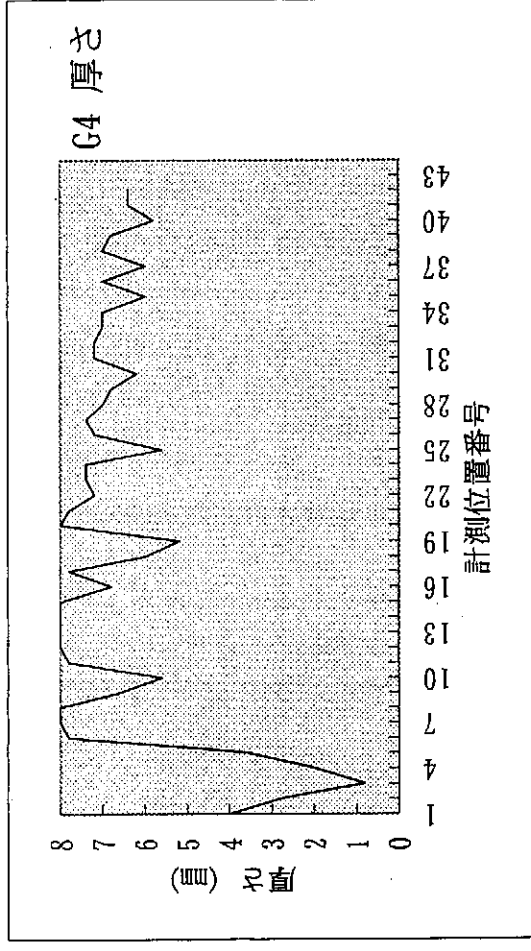
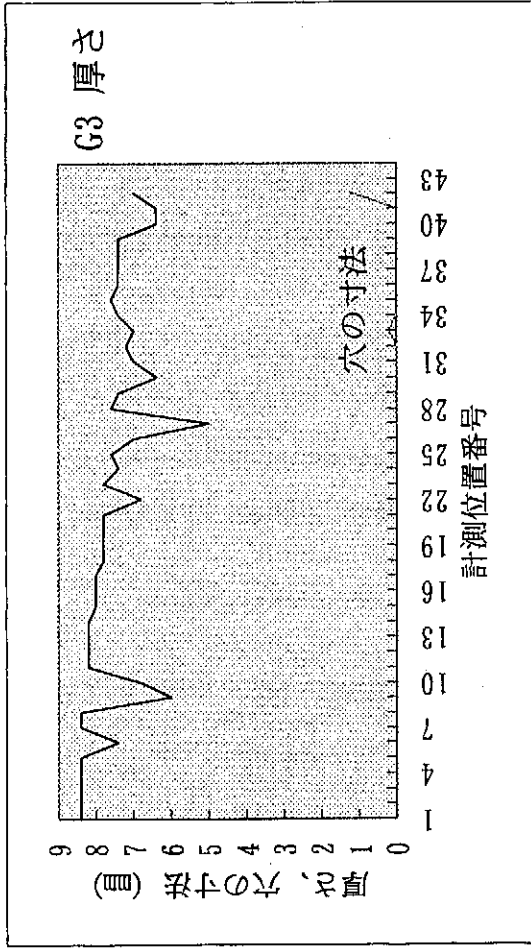


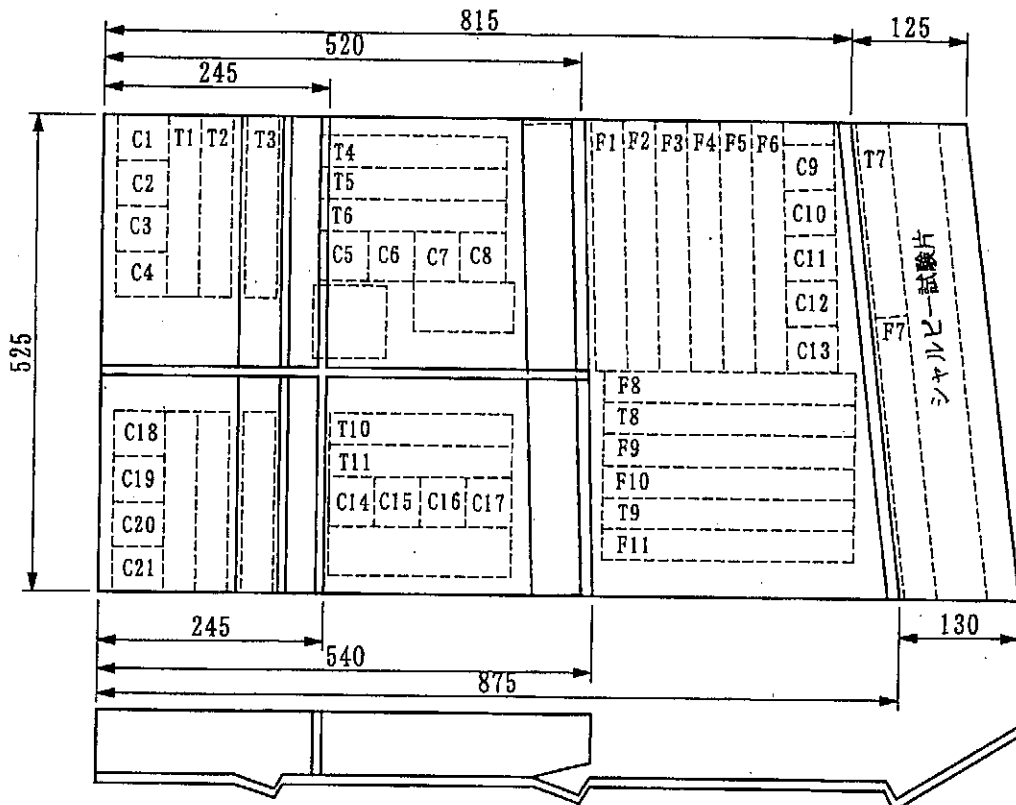
図 2-2.15 G 区画の板厚計測結果 (G1 から G4 計測線)

(2) 切断面の直接計測

図 2-2.3 の切り出し要領に基づき、試料を切断した。切断した試料を試験片に加工するに先立ち、切断面の板厚を 5 mm 刻みで計測した。測定結果を図 2-2.7~2-2.15 に示す。図中の番号は、図 2-2.3 の試験片採取用の矩形板に矢印を示した辺を示している。図の上の線は板厚であり、その低下部は孔食が存在することを示している。下の方に示されている線は、板厚計測時に測定された穴の寸法である。

2-2-3-2 試験片採取計画

試験片採取計画を図 2-2.16 に示す。引張試験片および疲労試験片の形状をそれぞれ図 2-2.17 と 2-2.18 に示した。図 2-2.19 にシャルピー衝撃試験片の採取および切欠方向を示した。



T1~11 : 引張試験片 F1~11 : 疲労試験片

図 2-2.16 試験片採取計画

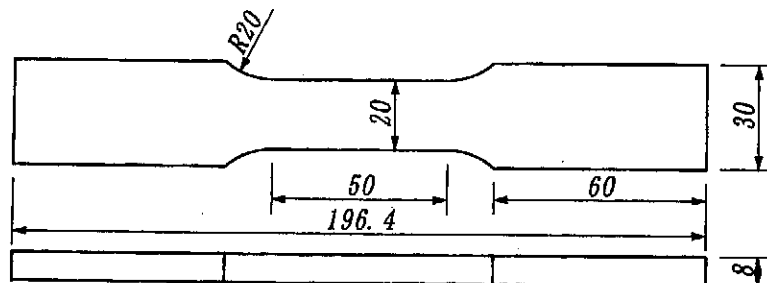


図 2-2.17 引張試験片形状

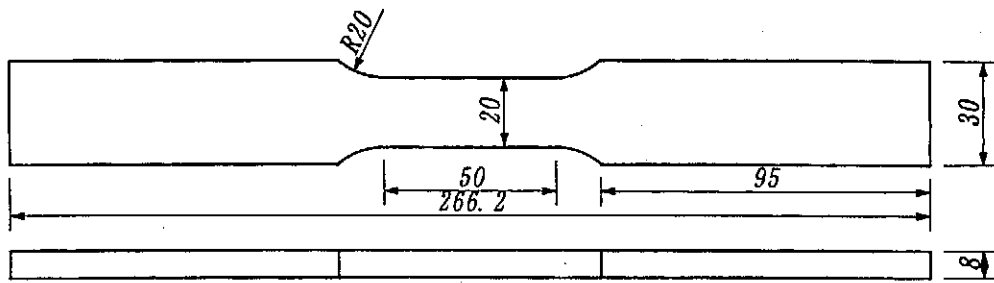


図 2-2.18 疲労試験片形状

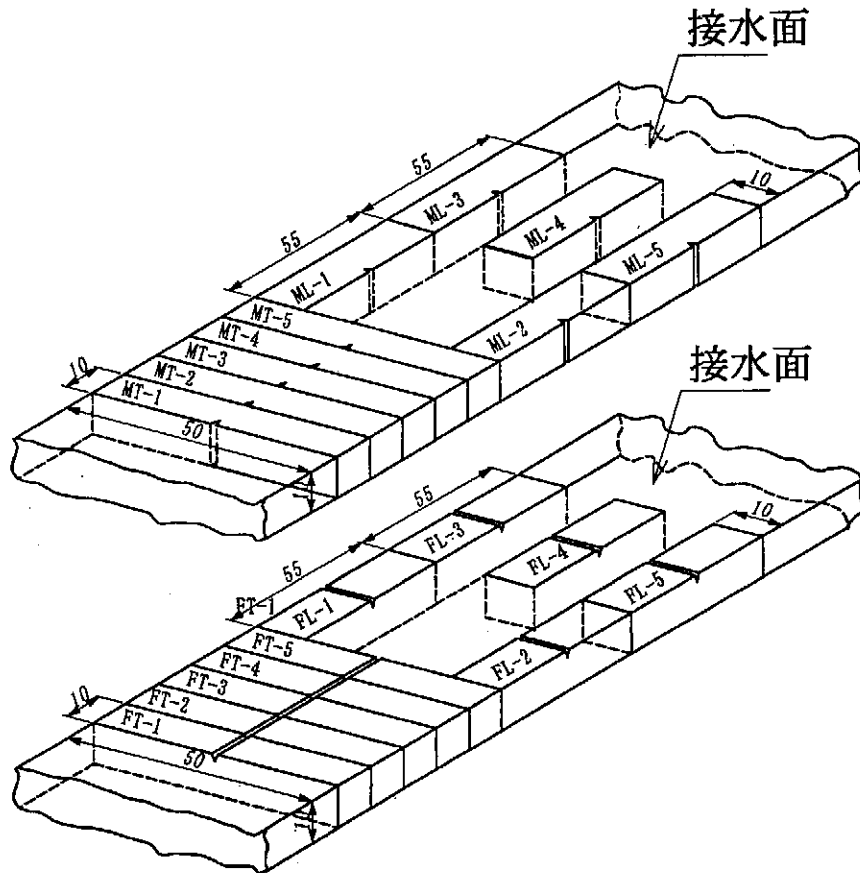


図 2-2.19 シャルピー試験片採取方法

### 2-2-3-3 成分および組織

縦方向の防撓材は一体鋳造されているが、横方向の防撓材は溶接されている。そこで、鋳造された底板、溶接部および横方向防撓材の材質を調べるために、EPMA (Electric Probe Microanalyser : 分析走査顕微鏡) による分析を行った。分析箇所を概略を図 2-2.20 に示す。図中、A が防撓材(骨と略す)、B が溶接部、C が鋳造された底板(板と略す)である。

鋳造された板については、別途化学分析も実施した。

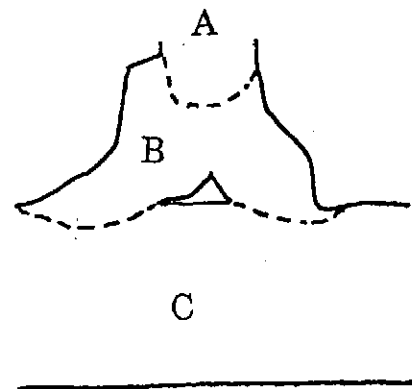


図 2-2.20 分析箇所

### (1) 成分

図 2-2.21 に組成像を示す。図中で白っぽい部分の元素番号が大きい。A(骨)およびC(板)は類似の組織であり、マトリックス(黒っぽい部分。Al を主成分とし、比較的軽い元素からなると考えられる)と介在物(白っぽい部分。Al-Si の共晶)が明瞭に識別される。B(溶接金属)にはこのような偏析は見られないが、ブローホールが多い。

上述の骨および板の組織形態に差は無く、アルミニウム合金鋳物のサンプル写真と比べると標準的なものと判断される。

表 2-2.1 に EPMA による定量分析結果と化学分析結果を併せて示した。表には、溶接金属と比較して JIS 4043 合金 (JIS Z 3239 「アルミニウム及びアルミニウム合金溶接棒並びにワイヤ」で定められた溶接用合金の一種) の、また板および骨と比較して、JIS AC4CH および JIS AC7A 並びに住友化学株製 E-11 合金の規格値を示した。

溶接金属は Si が若干多いが、EPMA による計測誤差の範囲 (EPMA による Si の測定値の標準偏差は 0.5 % 程度) を考慮すると 4043 合金と判断される。

骨および板のマトリックスの成分は EPMA の誤差範囲を考えるなら差がないと判断される。板の化学分析結果は E-11 合金の範囲にある。この合金は、Si が AC4CH 合金の規格値に比べて相当少なく AC7A 合金の範疇に入るが、Mg は AC7A 合金の下限よりはるかに少なく AC4CH 合金の上限程度以上である。本合金配合の材料は JIS 等には登録されていない。また、Fe、Cu、Mn 等も相当厳しく制御されているものと判断される。

図 2-2.22 に X 線分析結果を示した。Al および Si が単体で存在している。

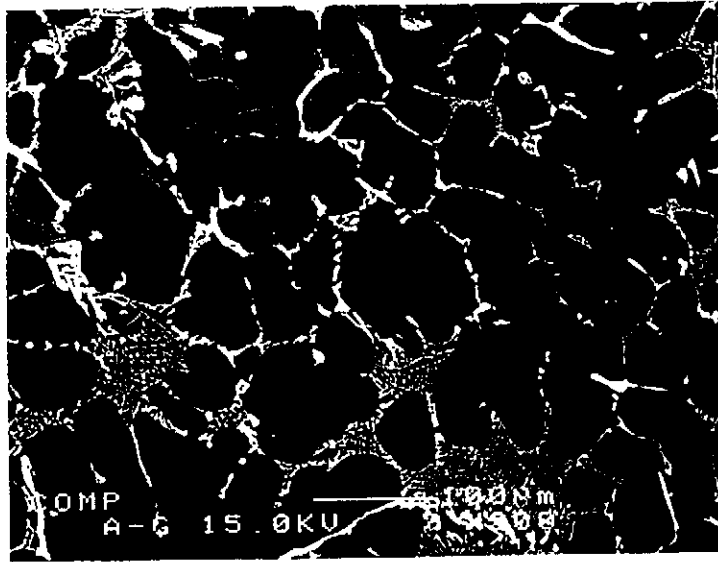
表 2-2.1 化学組成

	成分(重量%, Res. Al )							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
溶接金属	6.421	0.199	0.037	—	0.057	—	—	0.044
JIS 4043	下限	4.5	0	0	0	—	0	0
	上限	6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	0.10
骨のマトリックス	1.841	0.009	0.063	—	0.354	—	—	0.355
板のマトリックス	1.737	0.021	0.011	—	0.338	—	—	0.222
板の介在物	29.531	4.622	0.055	—	6.764	—	—	0.015
板の化学分析結果	4.81	0.13	0.01	0.01	0.46	Tr.	0.01	0.12
JIS AC4CH	下限	6.5	0	0	0	0.25	0	0
	上限	7.5	0.20	0.20	0.10	0.45	0.05	0.10
JIS AC7A	下限	0	0	0	0	3.5	0	0
	上限	0.20	0.30	0.10	0.6	5.5	0.15	0.15
スカイ E-11	下限	4.5	0	—	—	0.3	—	—
	上限	5.5	0.2	—	—	0.5	—	—

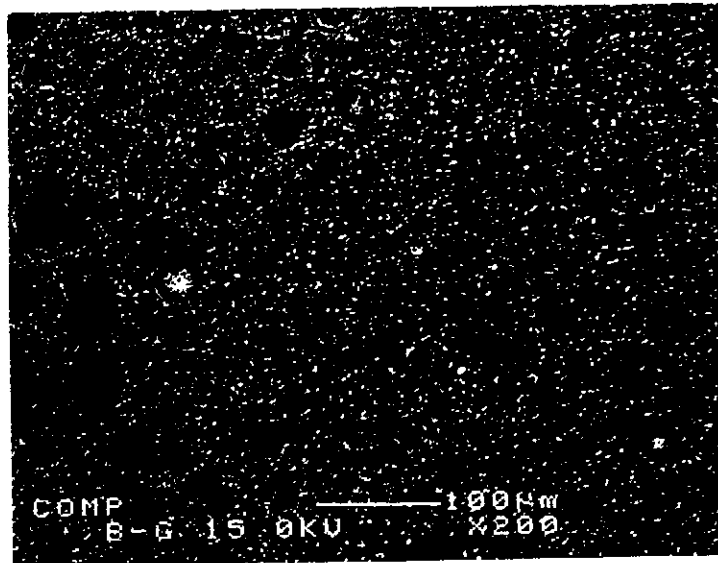
### (2) 組織

図 2-2.20 の A、B および C の元素分布をそれぞれ図 2-2.23 から 2-2.25 に示した。A(骨)およびC(板)の元素の分布は、概ね図 2-2.26 のようであると考えられる。

A



B



C

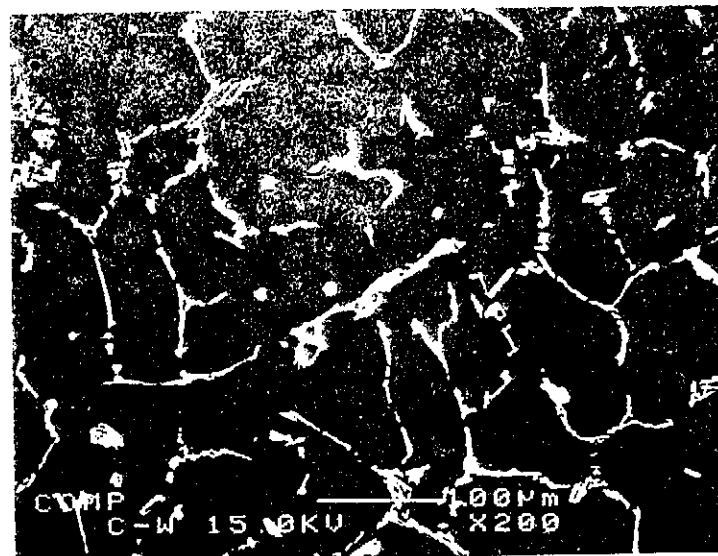


図 2-2.21 電子顕微鏡組成像

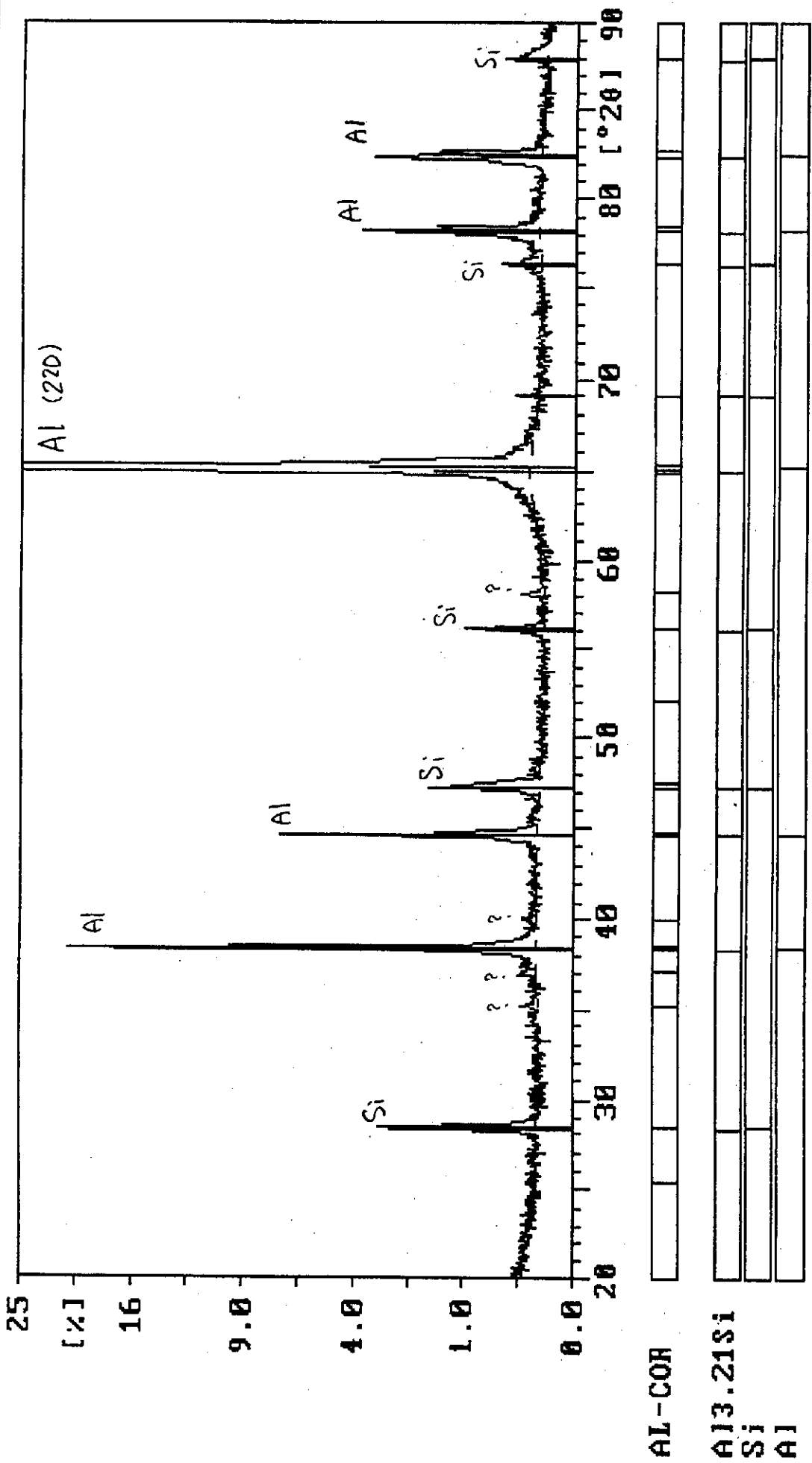


図 2-2.22 X線分析結果



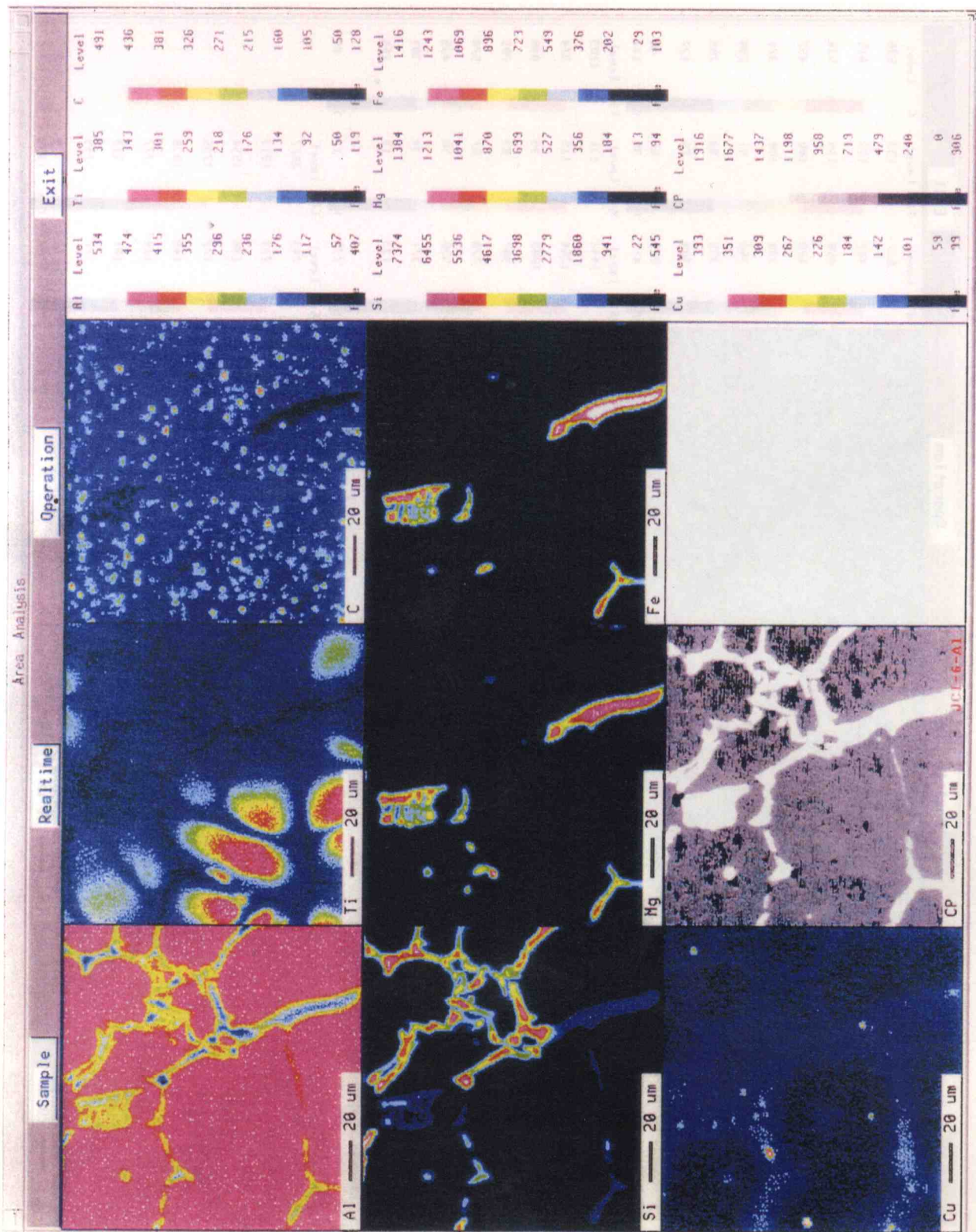


図 2-2.23 骨 (A) の元素分布

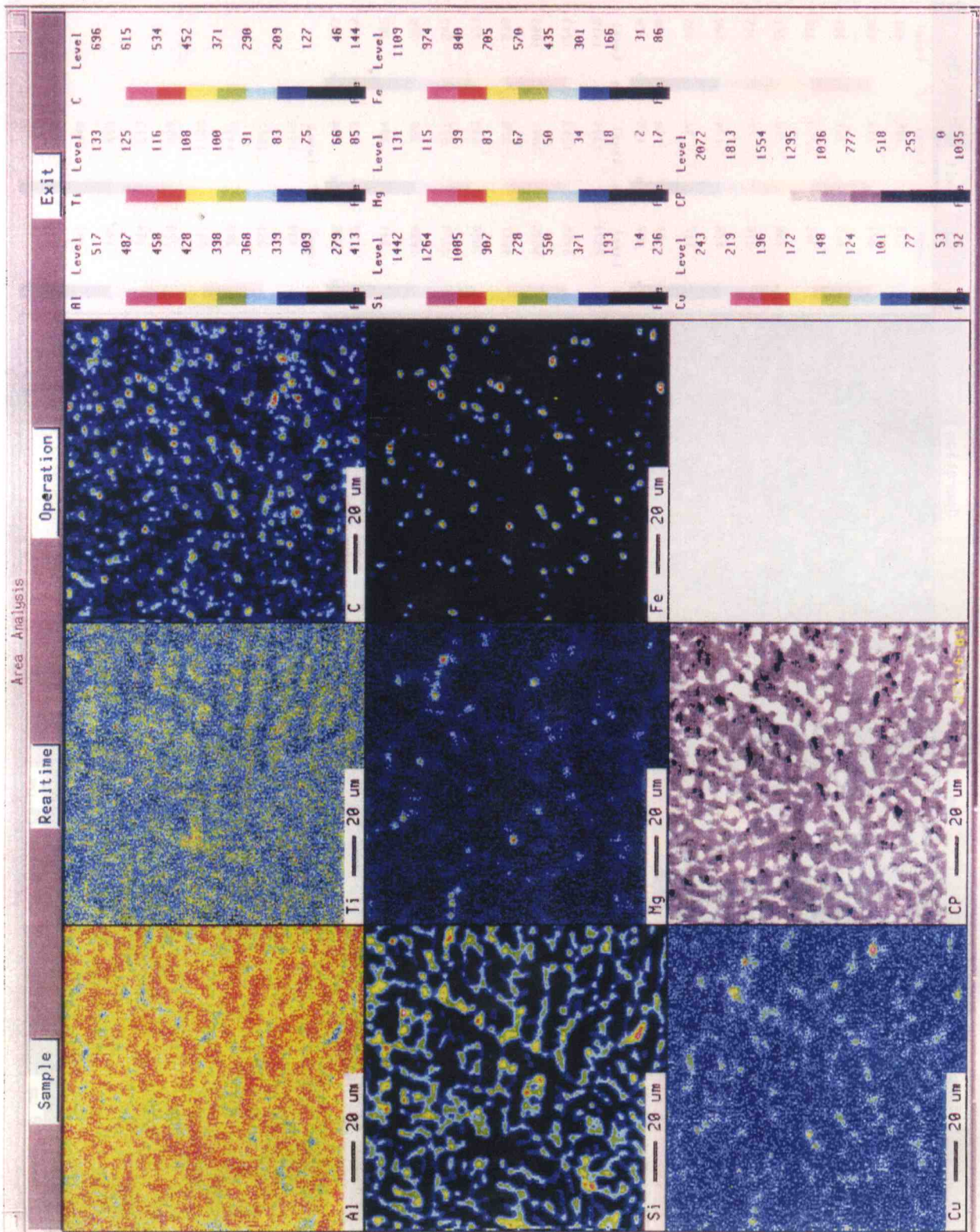


図 2-2.24 溶接部の元素分布

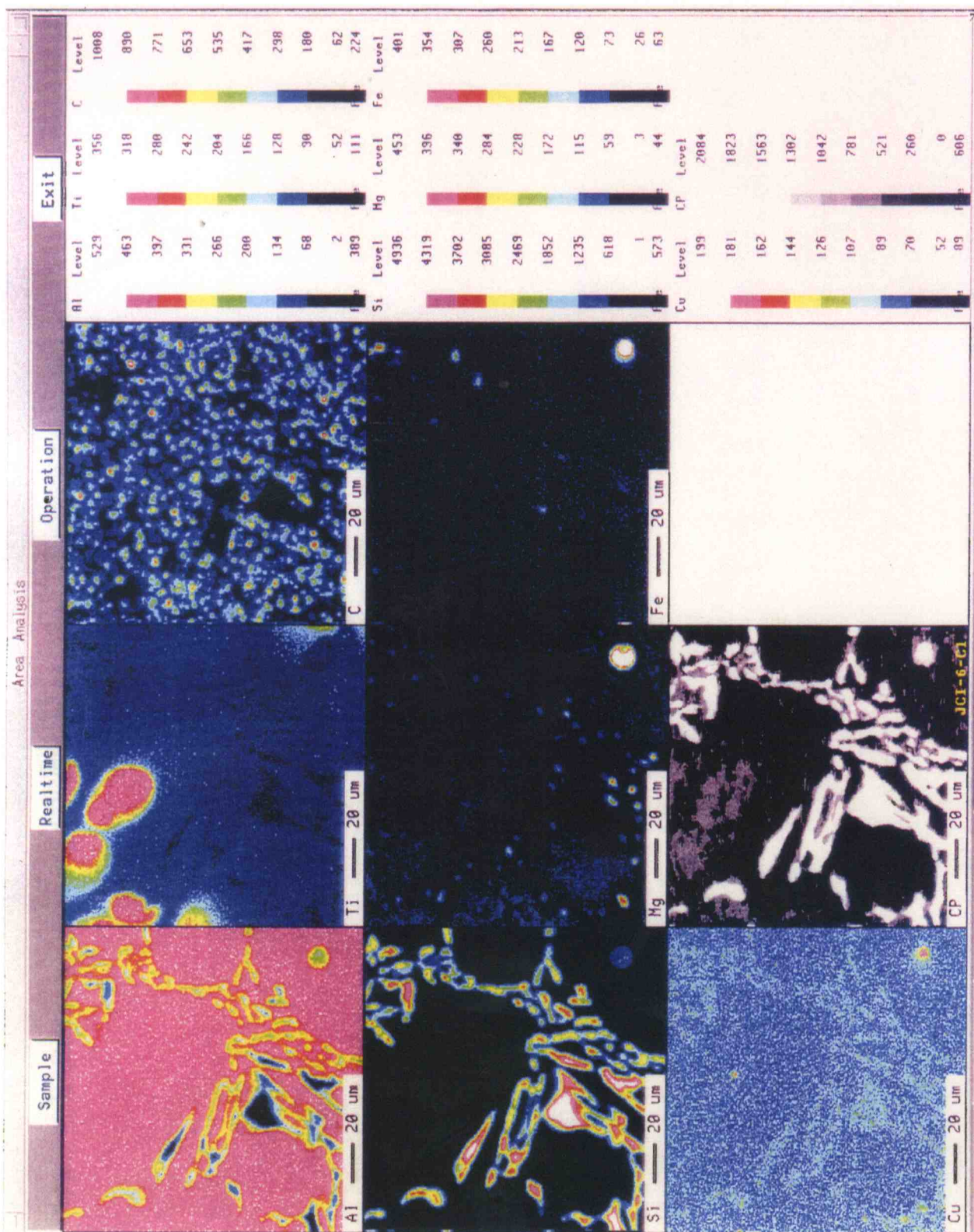
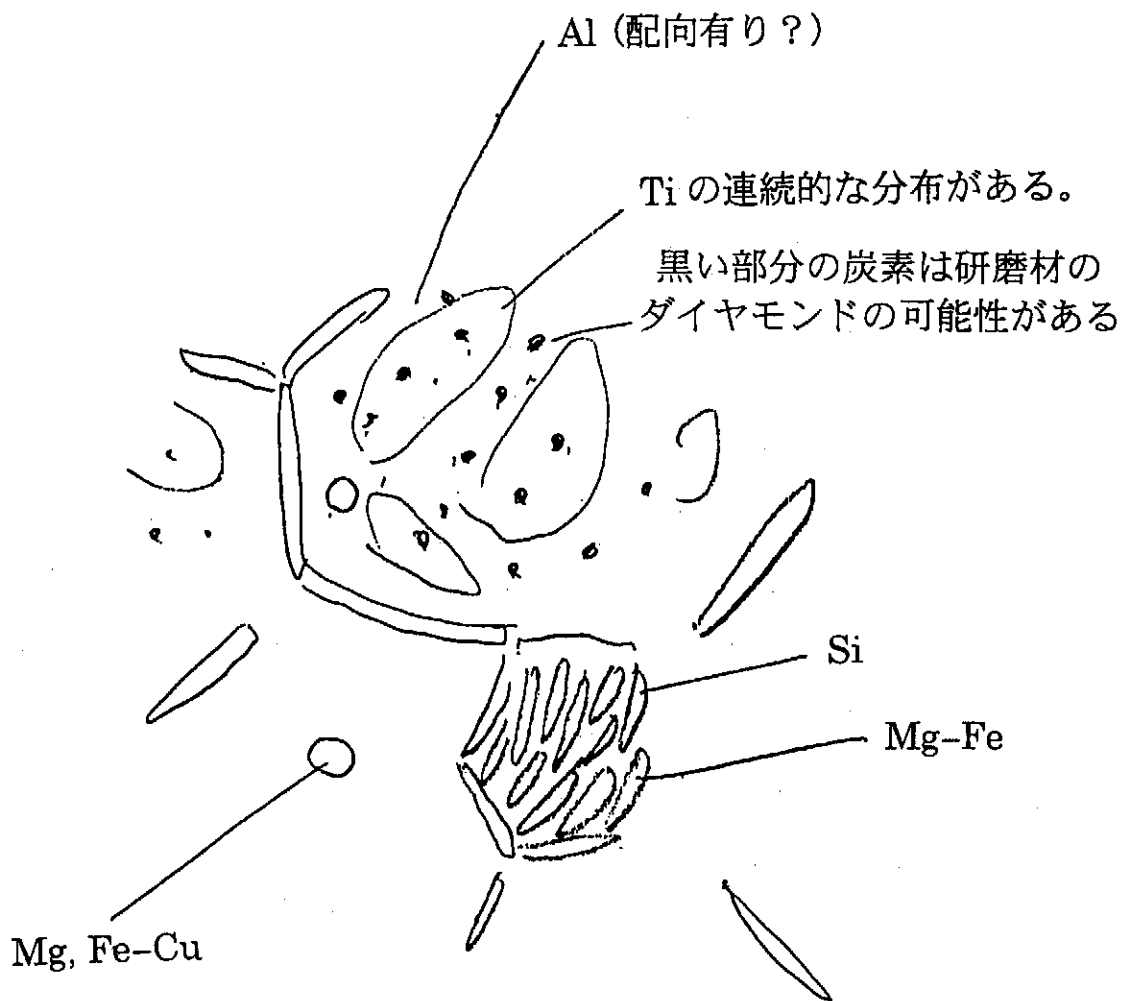


図 2-2.25 板 (C) の元素分布



图 2-22 图 (C) 的元数据



コンポ像の明るさ	成分	備考
グレー	Al-Ti	アルミにチタンが固溶?
白	Si Mg-Fe	珪素単体(結晶?)とマグネシウム・鉄化合物が個別に存在

図 2-2.26 アルミ鋳物の元素分布の概念図

#### 2-2-3-4 引張試験

引張試験片の形状は図 2-2.17 に、番号と採取位置は図 2-2.16 に、元厚は図 2-2.7、2-2.8、2-2.11 から 2-2.14 に示されている。試験片に、ゲージ長 25 mm の箔ひずみゲージを貼付し、標点間距離 50 mm の伸び計と併せて応力/ひずみ関係を得、0.2 % 耐力を求めた。最大荷重と破断後の試験片から、引張強さと伸びを求めた。

代表的な応力/ひずみ関係を図 2-2.27 に示した。ひずみゲージと伸び計による応力/ひずみ関係はほぼ同一と見なせる。図 2-2.28 に T-10 試験片の破面の SEM (Scanning Electric Microscope : 走査型電子顕微鏡) 写真を示した。

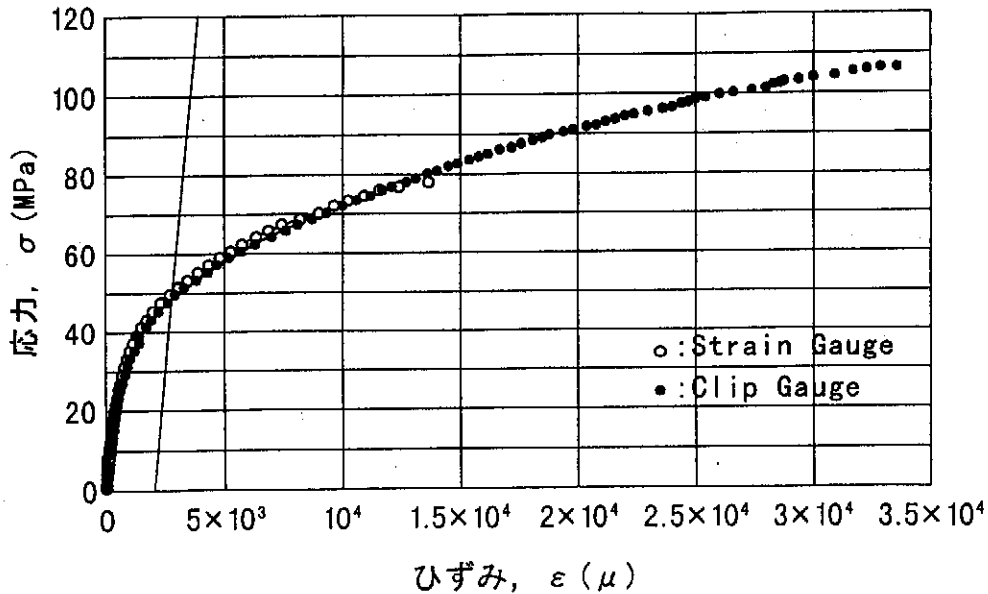


図 2-2.27 応力/ひずみ関係 (T-11 試験片)

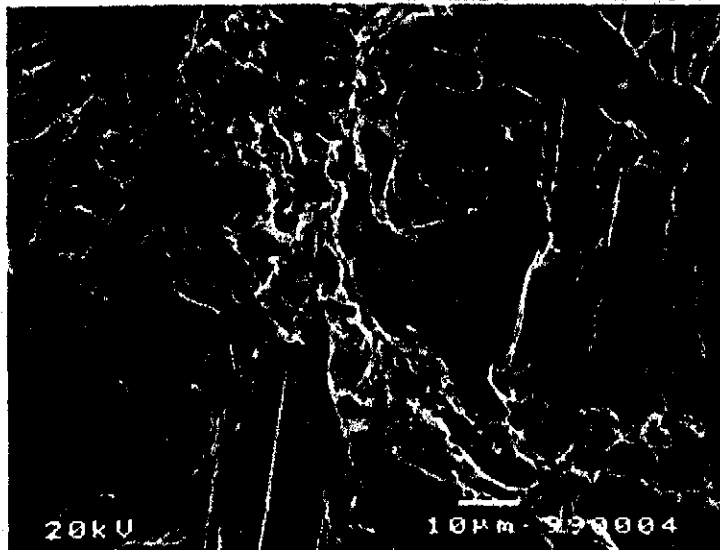


図 2-2.28 引張試験破断面の SEM 写真 (倍率 1000 倍、T-10 試験片)

応力/ひずみ関係(図 2-2.27)を見ると、伸びが 3.5%以下と小さいものの異常滑りなどの材料の欠陥に起因すると見なされる兆候はない。しかし、SEM 写真(図 2-2.28)を見ると、破面は擬劈開の様相を示し、塑性変形帯に囲まれた劈開面が見られる。

表 2-2.2 に引張試験結果をまとめて示した。表には、JIS H 5202(アルミニウム合金鋳物)の AC4CH-F (鑄造まま)の規格値とこの試料に使用されたとされる AC4CH 改(住友化学工業スミ

表 2-2.2 引張試験結果

Spec. No.	0.2 % Offset Strength		Tensile $\sigma_B$ (MPa)	Elong. (%)	Note
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)				
	Clip G.	Strain G.			
T-1	—	—	—	—	Reserved Specimen
T-2	54.8	59.0	98.3	2.26	
T-3	52.3	56.4	92.6	2.01	
T-4	—	61.1	96.7	1.72	Clip Guage Failed.
T-5	55.6	53.3	95.3	1.72	
T-6	53.5	55.5	94.6	1.58	
T-7	59.9	54.7	> 103	—	Gripping Part Failed.
T-8	52.1	52.5	91.8	1.67	
T-9	48.9	52.3	84.8	1.45	
T-10	44.1	50.5	109	3.06	
T-11	48.6	50.3	106	3.36	
JIS H 5202	—	—	$\geq 140$	$\geq 2$	AC4CH-F, Sand Mold Spec.
do.	—	—	$\geq 160$	$\geq 3$	AC4CH-F, Metal Mold Spec.
Sand Mold Spec. <sup>3)</sup>	108	—	167	5.0	Sumicalloy E-11-F
Sand Mold Spec. <sup>4)</sup>	110	—	172	4.6	do.
do.	110	—	172	5.2	do.
Metal Mold Spec. <sup>4)</sup>	144	—	202	9.2	do.
do.	145	—	191	8.4	do.

カロイ E-11)<sup>3, 4)</sup>の砂および金型試験結果の例を併せて示している。強度の試験結果は、AC4CH の規格値あるいは E-11 の代表値よりも明らかに劣っている。

引張試験結果を板厚測定結果(図 2-2.7 から 2-2.15 の結果から、試験片を採取した箇所の最大値)と比較整理すると、図 2-2.29 が得られる。図中、☆は引張強さ、★は 0.2%耐力、○は伸びである。0.2%耐力があまり板厚の影響を受けないのに対し、伸びは板厚 12 mm 以下で大きくなっている。この伸びの増加により、板厚 12 mm 以下では引張強さも若干大きくなっている。

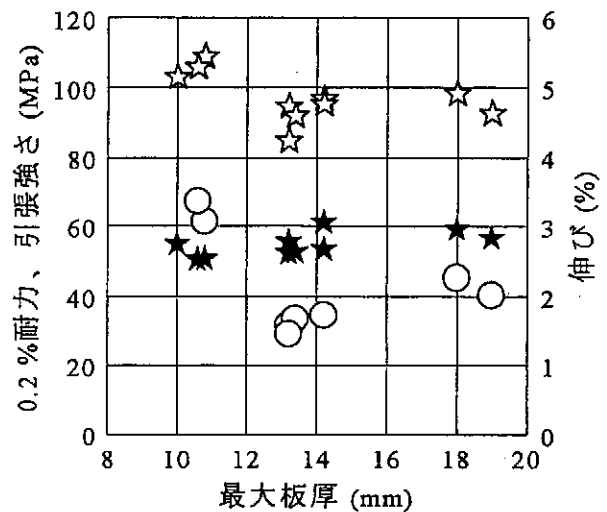


図 2-2.29 板厚と機械的性質の関係

E-11 合金は、伸びを重視した Al-Si-Mg 系鋳物用合金であるが、その強度および伸びは、冷却速度に影響される<sup>4)</sup>。例えば、金型試験では、金型温度により冷却速度が変化するが、金型温度が高くなると強度、伸び共に急速に減少する。本試料は、長さ 6 m と大きな一体鋳造物から採取したものであり、鋳造物の冷却速度は相当に遅かったものと考えられる。

以上を考慮すると、表 2-2.2 の計測値は妥当なものと思なせる。

#### 2-2-3-5 衝撃試験

シャルピー衝撃試験後の破面の SEM 写真を図 2-2.30 に示した。破面は引張試験の場合と同様の擬劈開の様相を示している。

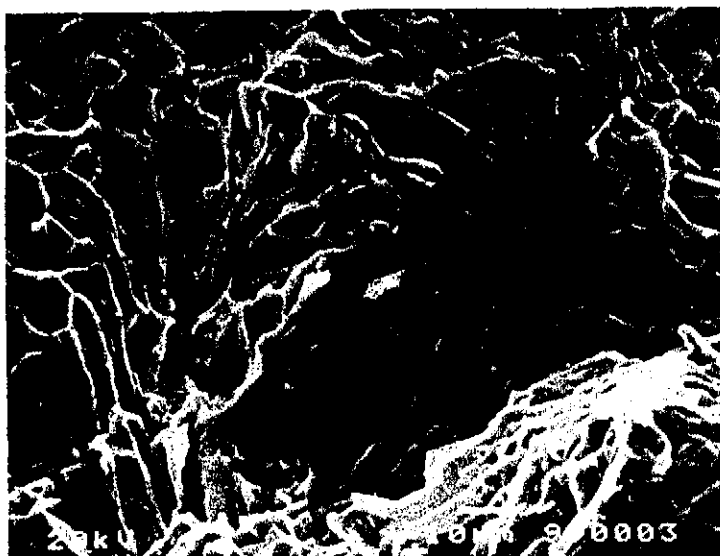


図 2-2.30 破断面の SEM 写真(倍率 1000 倍、MT-1 試験片)

シャルピー衝撃試験結果をまとめて表 2-2.3 に示した。試験片番号と試料採取および切欠の方向は図 2-2.19 に示されている。備考欄に「振り上げ角度大」とした FL-1 および ML-1 は、振り上

表 2-2.3 シャルピー衝撃試験結果

番号	エネルギー kgf·m	衝撃値 J/mm <sup>2</sup>	備考	番号	エネルギー kgf·m	衝撃値 J/mm <sup>2</sup>	備考
FL-1	0.12	0.015	振り上げ角度大	ML-1	0.10	0.012	振り上げ角度大
FL-2	0.60	0.074		ML-2	0.50	0.061	
FL-3	0.63	0.077	(0.75 kgf·m)	ML-3	0.50	0.061	(0.40 kgf·m)
FL-4	0.60	0.074		ML-4	0.60	0.074	(0.40 kgf·m)
FL-5	0.60	0.074		ML-5	0.60	0.074	(0.50 kgf·m)
FT-1	0.60	0.074		MT-1	0.60	0.074	
FT-2	0.60	0.074		MT-2	0.60	0.074	
FT-3	0.58	0.071		MT-3	0.60	0.074	(0.50 kgf·m)
FT-4	0.60	0.074	(0.45 kgf·m)	MT-4	0.64	0.078	(0.45 kgf·m)
FT-5	0.60	0.074	(0.80 kgf·m)	MT-5	0.64	0.087	(0.60 kgf·m)



げ角度  $144.5^\circ$  であり、その他は  $119^\circ$  である。振り上げ角度大とした2つの試料は、その他に比べて、初期位置エネルギー1.22倍、負荷速度1.49倍で試験したこととなる。備考欄に括弧で括って示した数値は、変位/荷重関係から求めたエネルギー損失であり、吸収エネルギーと比較的よく一致している。

振り上げ角度  $119^\circ$  の試験結果は、MLシリーズの衝撃値が若干小さいことを除けば、ほぼ  $0.6 \text{ kgf}\cdot\text{m}$  の一定値と判断できる。この値は、室温での軟鋼の値の7%程度である。文献3)ではAC4CH改のシャルピー衝撃試験結果の代表値として  $0.6 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  が示されているが、これを  $0.6 \text{ kgf}\cdot\text{m}$  の誤りとすれば、値は一致する。

振り上げ角度の大きいFL-1およびML-1はその他に比べて1/5程度の吸収エネルギーおよび衝撃値である。この吸収エネルギーの速度依存性は、一般的には、低温脆性を示唆する。

## 2-3 新規成形材

### 2-3-1 新規成形材による調査研究の課題

前節 2-2 で取り扱った長期使用材についての検討結果から、以下の結論が得られた。

- 1) 調査対象とした 6 m アルミニウム合金鋳物船の材料は、住友化学(株)製スミカロイ E-11 (現在、住友化学では製造していないが、関連会社から入手可能)あるいは同等品<sup>3, 4)</sup>と見なせる。
- 2) 外観観察の結果、塗装および犠牲電極で防食した場合、上記材料を接水部に使用することに問題はない。しかし、犠牲電極が無く、鋼製ボルトが接触している条件では、孔食が著しいことから、異種金属との接触を避け、防食施工を施すことが、接水部への使用の条件となる。これは、IACS の 6000 系アルミニウム合金に対する要求<sup>5)</sup>とも共通するものである。
- 3) スミカロイ E-11 は Al-Si-Mg 系析出強化型合金である<sup>4)</sup>。6000 系アルミニウム合金等の Al-Si-Mg 系析出強化型合金は Al マトリックス中に微細な Mg<sub>2</sub>Si を析出させることで塑性変形を妨げ、高強度化を図っている。微細な Mg<sub>2</sub>Si 析出による強化には適切な熱処理が必要である。その標準的な処理法を以下に示す。

(1) 溶体化熱処理：460 ないし 490℃から急冷し、Al 中に Si と Mg を固溶させる。

冷却速度が小さい場合、Si と Mg は粗大な晶出物となり、固溶 Si および Mg は減少する。Si と Mg の粗大な晶出物の強度向上効果は小さい。

(2) 人工時効処理：170 ないし 180℃に数時間保持し、微細な Mg<sub>2</sub>Si を析出させる。

Al 中の微細な Mg<sub>2</sub>Si 析出物により強度が向上する。

(1)の溶体化熱処理が行われていると、特に温度を上昇させず室温で放置しても、時間と共に自然時効により、Al 中の固溶 Si および Mg は析出して微細な Mg<sub>2</sub>Si が形成され、長時間の後には高強度化が実現する。

上記により、スミカロイ E-11 では、鋳造後の熱処理、特に鋳造直後からの冷却速度が機械的性質に及ぼす影響が大きい。

スミカロイ E-11 の砂型試験(砂鋳型を用いた材料試験)によるカタログ値は、鋳造まま材で 0.2 %耐力 110 MPa、引張強さ 170 MPa、伸び 5 %程度であるが、寸法の大きい実船では、砂型試験片に比べて冷却速度が小さいため、強度、伸び共にこれを大きく下回る。また、全船一体鋳造された船体を焼鈍炉に入れることは困難で、鋳造後の熱処理はほとんど不可能である。すなわち、砂あるいは金型試験(金属鋳型を用いた材料試験)結果を設計用材料強度として使用することは適切でない。

本調査の範囲では、スミカロイ E-11 鋳造船の板厚 12 mm 以上の部材の設計用強度としては、0.2 %耐力 50 MPa、引張強さ 80 MPa を推奨することができる。

板厚が 12 mm を下回って減少するほど、伸びと引張強さは大きくなることが予想されるが、本調査の範囲では、板厚の減少に対する強度の割り増し量を定量化することは出来ない。

- 4) シャルピー衝撃試験結果は、室温で軟鋼の 0.07 倍程度である。一般に信じられているように、アルミニウム合金に低温脆性が無いとするなら、この値でも問題は生じない。しかし、载荷速度を 1.5 倍にすると、衝撃値は 1/5 程度となる。この速度依存性を低温脆性の特徴と解釈するなら、低温での使用には問題があり、今後検討を加えることが望ましい。

それらの結果に基づき、以下の 3 つの検討課題が抽出された。

- 1) 析出強化型合金であるスミカロイ E-11 の機械的性質に及ぼす板厚影響の把握。
- 2) 低温脆性に関する検討。
- 3) 疲労強度の把握。

一方、スミカロイ E-11 は現在も入手可能ではあるものの、JIS に規定されておらず、船体材料としては、汎用的ではない。そこで、JIS H 5202(アルミニウム合金鋳物)に定義されており実績の多い AC4CH 合金についての調査も必要であると判断された。

### 2-3-2 新規成形材による調査内容

前節により、新たにスミカロイ E-11 および AC4CH 合金によるアルミニウム合金鋳物試験体を製作し、引張試験、衝撃試験および疲労試験を実施した。また、実供船から採取した材料(スミカロイ E-11)の疲労試験を実施した。

#### 2-3-2-1 アルミニウム合金鋳物試験体の制作と試験片の採取

##### (1) アルミニウム合金鋳物試験体

制作したアルミニウム合金鋳物試験体の形状寸法を図 2-3.1 に示す。試験体は2体で、用いた合金はスミカロイ E-11 (Eモデルとする。以降、試験片番号の先頭に E を付す) および JIS AC4CH (Aモデルとする。以降、試験片番号の先頭に A を付す) である。化学成分を表 2-3.1 に示す。表には規格値を併せて示している。

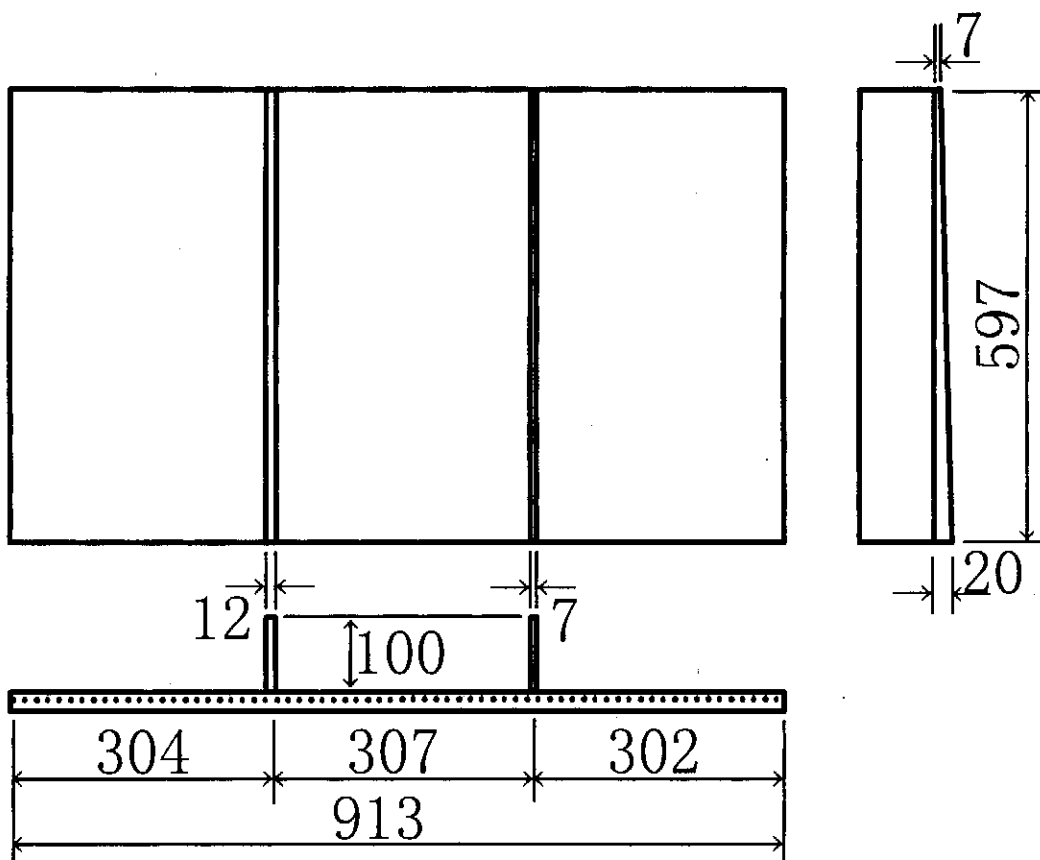


図 2-3.1 アルミニウム合金鋳物試験体の形状、寸法 (単位 : mm)

試験体は鋳造物の厚さによる影響を調査するために、主板の板厚を変化させ、板厚の違う2つのリップを持つ構造である(図 2-3.1 参照)。

表 2-3.1 アルミニウム合金鋳物試験体の化学成分 (単位: 重量%)

Model No.	Chemical composition (wt.%, Res. Al)								Note
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	
E	4.74	0.14	Tr.	0.01	0.33	Tr.	0.02	0.14	Sumicalloy E-11
A	7.05	0.14	Tr.	0.01	0.31	Tr.	0.02	0.12	JIS AC4CH
Sumicalloy E-11	Min.	4.5	0	—	—	0.3	—	—	Ref. 4)
	Max.	5.5	0.2	—	—	0.5	—	—	
JIS AC4CH	Min.	6.5	0	0	0	0.25	0	0	JIS H 5202
	Max.	7.5	0.20	0.20	0.10	0.45	0.05	0.10	

## (2) 試験片の採取

試験片の加工に先立ち、試験体を図 2-3.2 に示すように帯板に切断し、それぞれの帯板の板厚を計測した。図中、主板の記号 I は湯口側、O は湯止まり側を示している。リップの番号 L7 および L12 はそれぞれリップの目標板厚が 7 および 12 mm であったことを示している。採取した帯板の番号は下記のように定められている。

XB-N

X = E (スミカロイ E-11) または A (JIS AC4CH)

B = I (湯口側)、M (中間)、O (湯止まり側)、L7 (7 mm 厚のリップ) または L12 (12 mm 厚のリップ)

N = 数値番号

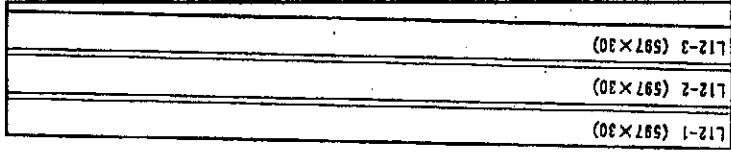
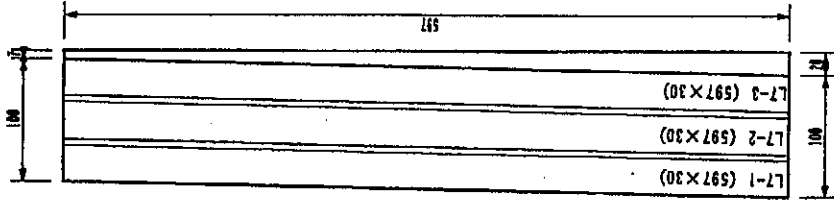
試験片の採取の方法を図 2-3.3 に示した。図には引張試験片、耐海水性を調査するための腐食試験片(図中正方形の試験片)の採取位置が示されている。引張試験片は、引張試験および疲労試験に用いた。

### 2-3-2-2 引張試験および疲労試験

試験片形状を図 2-3.4 に示した。試験片の板厚は、元厚により異なる。試験片の番号は帯板の番号を流用した。

まず、スミカロイ E-11 および AC4CH それぞれについて、引張試験を実施し、0.2 %耐力(塑性ひずみが 0.2 %となる応力)、引張強さおよび伸びを計測し、機械的性質に及ぼす板厚の影響を調べた。

板厚と機械的性質の関係を把握した後、疲労試験の荷重条件を設定した。疲労試験は完全片振りで実施した。



O-1 (288x30)	M-1 (278x30)	I-1 (288x30)
O-2 (288x55)	M-2 (278x50)	I-2 (288x55)
O-3 (288x30)	M-3 (278x30)	I-3 (288x30)
O-4 (288x30)	M-4 (278x30)	I-4 (288x30)
O-5 (288x30)	M-5 (278x30)	I-5 (288x30)
O-6 (288x30)	M-6 (278x30)	I-6 (288x30)
O-7 (288x30)	M-7 (278x30)	I-7 (288x30)
O-8 (288x50)	M-8 (278x55)	I-8 (288x50)
O-9 (288x30)	M-9 (278x30)	I-9 (288x30)
O-10 (288x30)	M-10 (278x30)	I-10 (288x30)
O-11 (288x30)	M-11 (278x30)	I-11 (288x30)
O-12 (288x30)	M-12 (278x30)	I-12 (288x30)
O-13 (288x30)	M-13 (278x30)	I-13 (288x30)
O-14 (288x55)	M-14 (278x50)	I-14 (288x55)
O-15 (288x30)	M-15 (278x30)	I-15 (288x30)

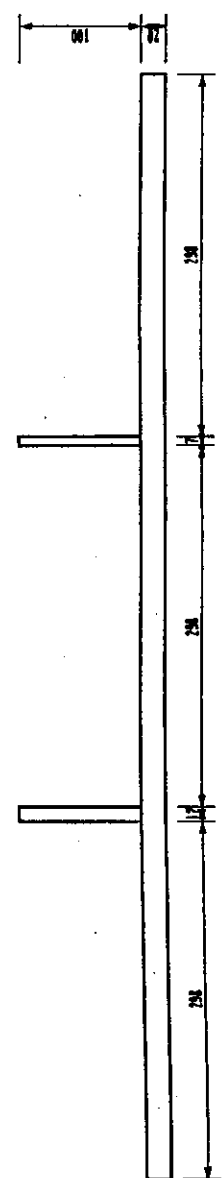
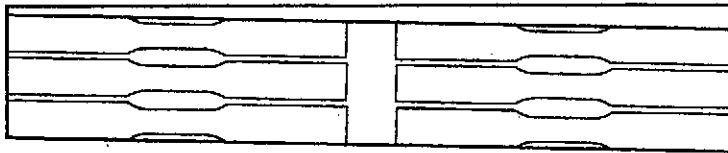
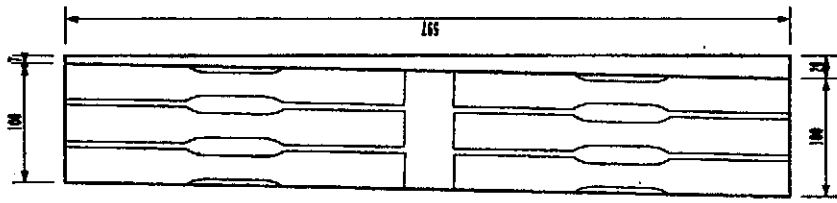


図 2-3.2 試験体の切断方法



\*ハンチング部分の試験片は  
衝撃試験片②とする

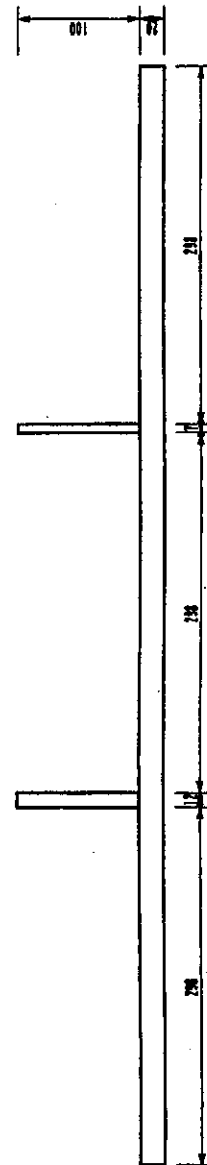
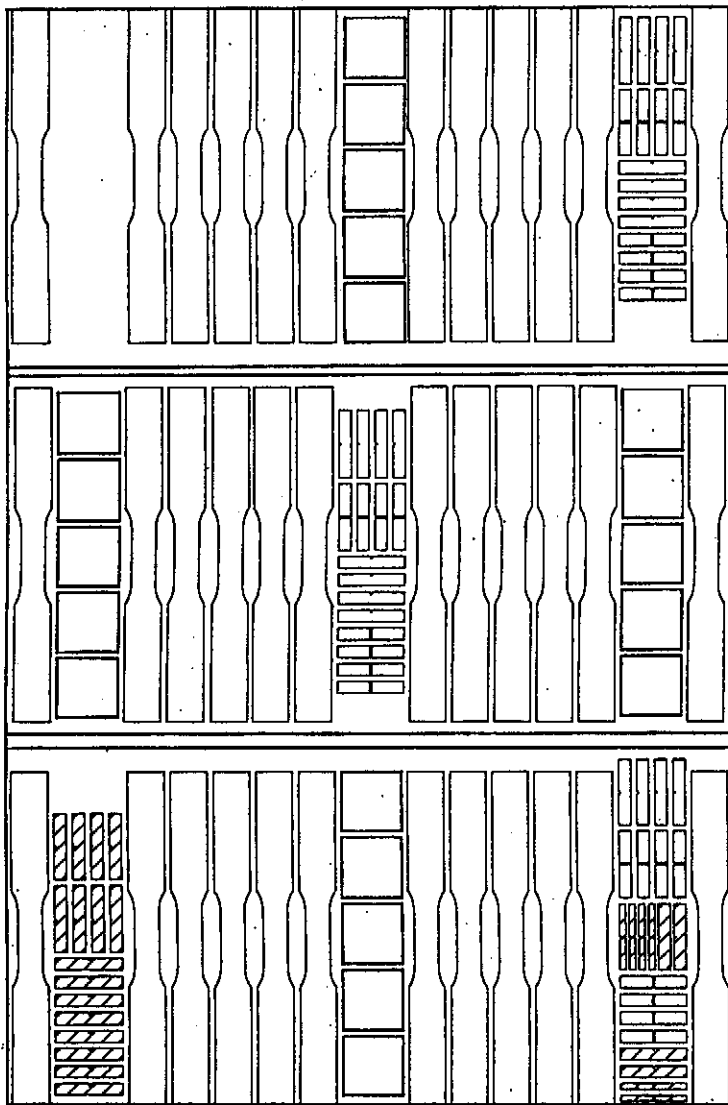


図 2-3.3 試験片採取方法

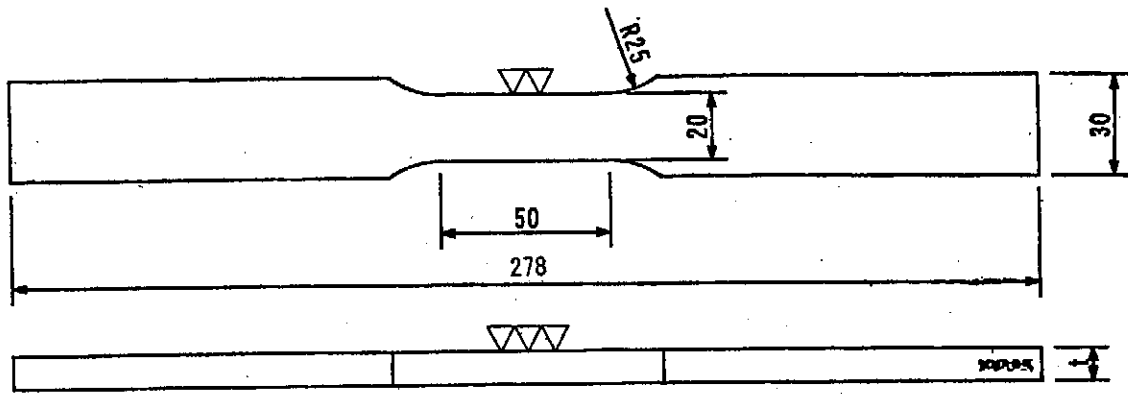


図 2-3.4 引張・疲労試験片形状、寸法（単位：mm）

### 2-3-2-3 衝撃試験

試験片の形状寸法を図 2-3.5 に示した。

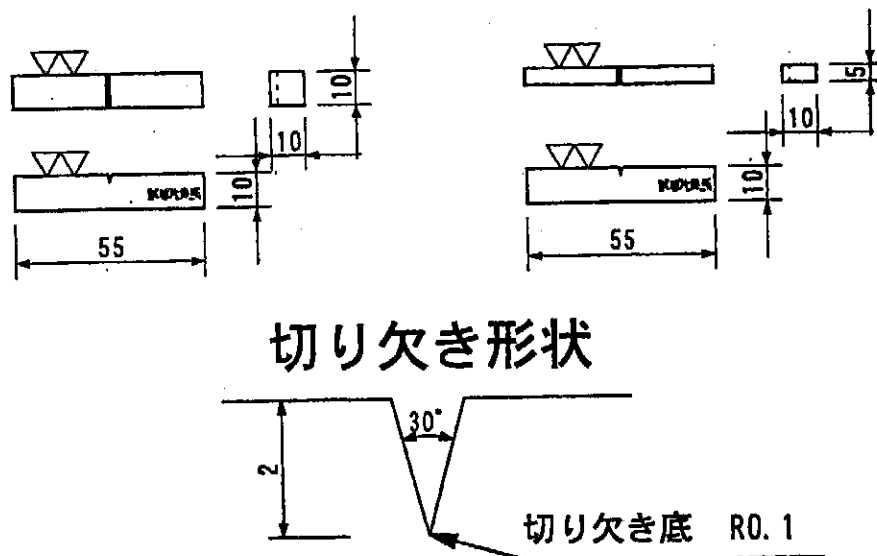


図 2-3.5 衝撃試験片形状、寸法（単位：mm）

衝撃試験片は JIS Z 2202（金属材料衝撃試験片）5号試験片およびそのサブサイズ試験片（厚さ 5 mm）であり、図 2-3.2 に示す帯板の M-8、I-14 および O-14 から採取している。

試験片の記号は下記のように定めた。

XBCD-N

X = E（スミカロイ E-11）または A（AC4CH）

B = M8（M-8 から）、I14（I-14 から）または O14（O-14 から採取）

C = L（湯流れ方向に試験片採取）または T（湯流れ垂直方向に試験片採取）

D = S（表面に平行な面に切欠）または T（表面に垂直な面に切欠）

N = 数値番号

温度依存性、特に低温脆性が現れるかを検討するために、試験温度は、 $-60^{\circ}\text{C}$ 、室温および  $60^{\circ}\text{C}$  の 3 レベルとした。

### 2-3-3 試験結果

#### 2-3-3-1 板厚測定

主板の板厚計測結果を整理して図 2-3.6 に示した。図中の測定位置番号は、2-3-2-1 項の番号表記法の XB に従っている。図の横座標は、最も板厚の薄い辺からの距離(mm)である。

主板の板厚は、計画の最小 7 mm 最大 20 mm に比べると若干小さくなる傾向があるものの、概ね計画通りの板厚となっている。

リブの板厚計測結果をまとめて表 2-3.2 に示した。表中の測定位置番号は、2-3-2-1 項の番号表記法の XB に従っている。表には、各測定領域での板厚の平均値(Mean)および正規確率分布を仮定した標準偏差(S.D.)が示されている。

リブの板厚は計画板厚に比べて若干厚くなる傾向がある。板厚の標準偏差は、EL-7、EL-12 および AL-7 が 0.08 mm 程度と小さいのに比べ、AL-12 では 0.15 mm と大きい。

表 2-3.2 リブの板厚計測結果

	EL7	EL12	AL7	AL12
Mean	7.32	12.07	7.40	12.15
S.D.	0.077	0.079	0.080	0.151

#### 2-3-3-2 引張試験

##### (1) スミカロイ E-11

スミカロイ E-11 の引張試験結果を表 2-3.3 に示した。表には、試験片を切り出した帯板の板厚 T、0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$ 、引張強さ  $\sigma_B$  および破断伸び EI が示されている。0.2%耐力および引張強さに板厚の影響が見られると共に、EI、EO、EL7 および EL12 で強度に若干の差が見られる。0.2%耐力に及ぼす板厚の影響を(1)式の指数関数と仮定して、EI、EO および EL から採取した試験片の試験結果から最小自乗法で  $\alpha$  および m の係数を定めた。求められた係数は表 2-3.4 に示されている。

$$\sigma_{0.2} = \alpha T^m \quad (1)$$

表 2-3.3 には、上記推定式による値を併記している。表中の推定値の Case 1 は EI、EO あるいは EL について別個に推定式を適用した場合で、Case 2 は総ての結果を併せて作成した推定式を適用したものである。

表 2-3.4 には、推定式による値と実験値との誤差の標準偏差(S.D.)が示されている。総ての結果を 1 つの推定式で表現した場合でも標準偏差は 3.5 MPa 程度と小さい。

図 2-3.6 に、新規成形材の試験結果を長期使用材の試験結果と比較して示した。図は横軸を板厚としている。図中の記号☆、○および△はそれぞれ引張強さ、0.2%耐力および伸びを示している。また、それぞれの記号で黒塗りは新規成形材の結果を、白抜きは長期使用材の結果を示している。



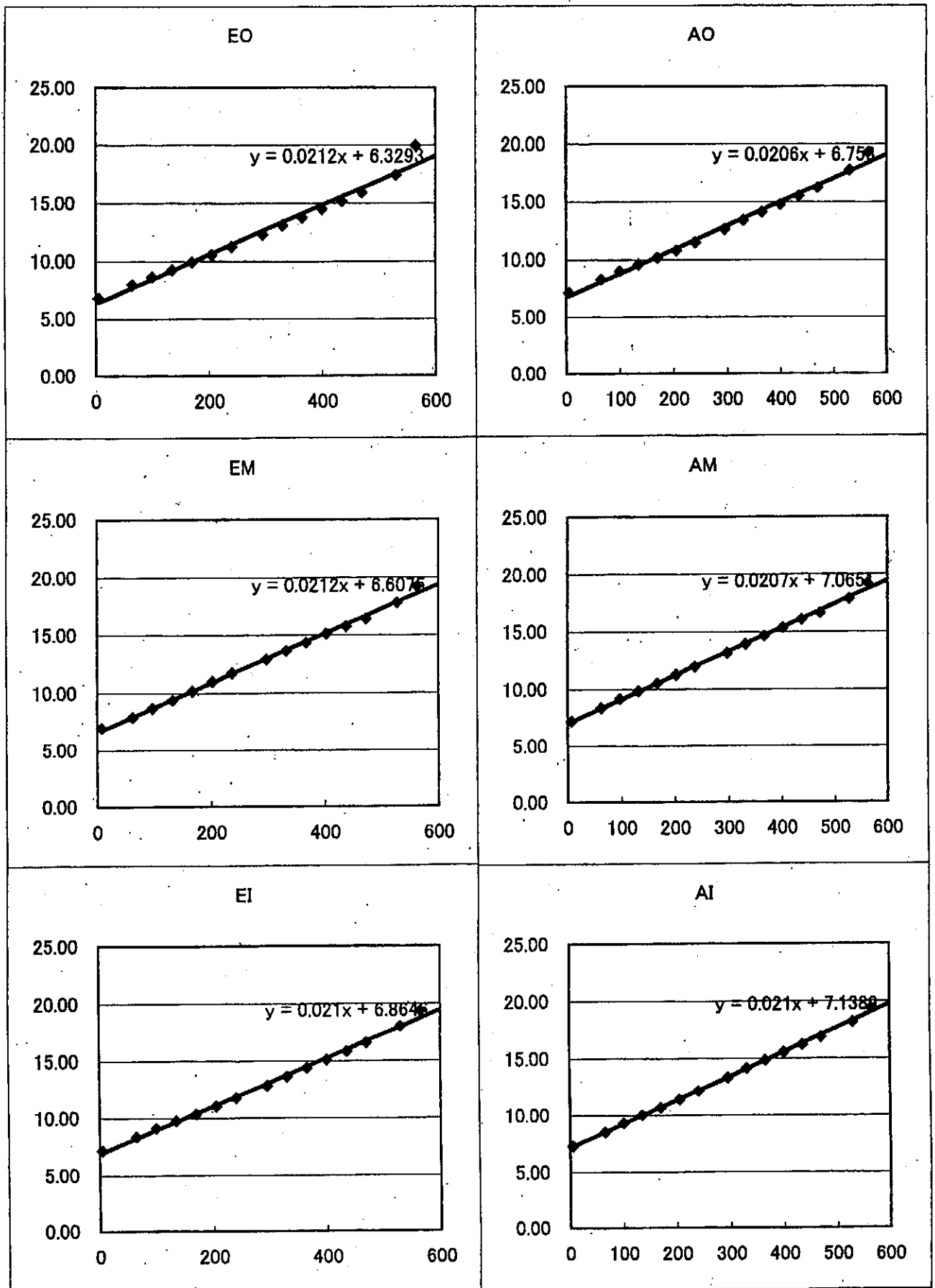


図 2-3.6 板厚測定結果 (図中、横軸 x は主板の薄い辺からの距離(mm)、縦軸 y は板厚(mm)。図中の式は主板の板厚変化の直線回帰式)

表 2-3.3 引張試験結果 (スミカロイ E-11)

Test No.	T (mm)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	El. (%)	Estimated $\sigma_{0.2}$ (MPa)	
					Case 1	Case 2
EI-1	6.81	79.4	124.4	2.9	78.0	72.6
EI-6	10.83	64.3	125.6	4.0	67.1	63.1
EI-10	14.05	62.8	101.4	4.4	61.6	58.3
EI-15	18.89	56.2	89.4	3.1	55.9	53.3
EO-1	6.45	70.4	129.4	5.2	70.6	73.8
EO-6	10.35	60.4	116.0	4.5	61.1	63.9
EO-10	13.47	58.1	104.5	3.4	56.4	59.0
EO-15	19.31	49.9	86.2	5.9	50.6	52.9
EL7-1	7.38	73.2	133.1	4.1	70.1	70.8
EL7-3	7.34	67.3	133.2	4.8	70.2	70.9
EL12-1	12.14	58.9	108.5	3.1	59.7	60.9
EL12-3	12.01	60.7	122.3	4.2	59.9	61.1
Sand Moled Spec <sup>3)</sup>		108	167	5.0		
Sand Moled Spec <sup>4)</sup>		110	172	4.6		
do.		110	172	5.2		
Metal Moled Spec <sup>4)</sup>		144	202	9.2		
do.		145	191	8.4		

表 2-3.4 0.2%耐力推定式の係数 (スミカロイ E-11)

	EI	EO	EL	Total
$\alpha$	146.1	124.2	133.8	129.7
m	-0.3270	-0.3033	-0.3234	-0.3028
S.D.	1.92	1.13	2.54	3.49

長期使用材の結果(白抜きの記号)では不明確であった機械的性質に及ぼす板厚の影響が、新規成形材の結果(黒塗りの記号)では明白になっている。具体的には、0.2%耐力(●)と引張強さ(★)は板厚が小さいほど大きくなるが、伸び(▲)には板厚依存性がない。

(2) JIS AC4CH

JIS AC4CH の引張試験結果を表 2-3.5 に示した。表には、試験片採取部の板厚、0.2%耐力、引張強さおよび伸びが示されている。表の下2段は JIS の要求値を示している。図 2-3.7 に機械的性質と板厚の関係を示した。図中の記号☆、○および△はそれぞれ引張強さ、0.2%耐力および伸びを示している。

伸びはほとんど JIS の砂型試験の要求値を満足しているのに対し、引張強さについては JIS の要求値を満足する例は極めて少ない。これは、スミカロイ E-11 について得られた長期使用材の結論が JIS AC4CH についても当てはまることを示している。しかし、板厚と 0.2%耐力の関係を見ると、JIS AC4CH の耐力に及ぼす板厚の影響はスミカロイ E-11 に比べて小さく、AI、AM、AO および AL の資料採取箇所による違いの方が大きい。また、同一箇所から採取した場合には、

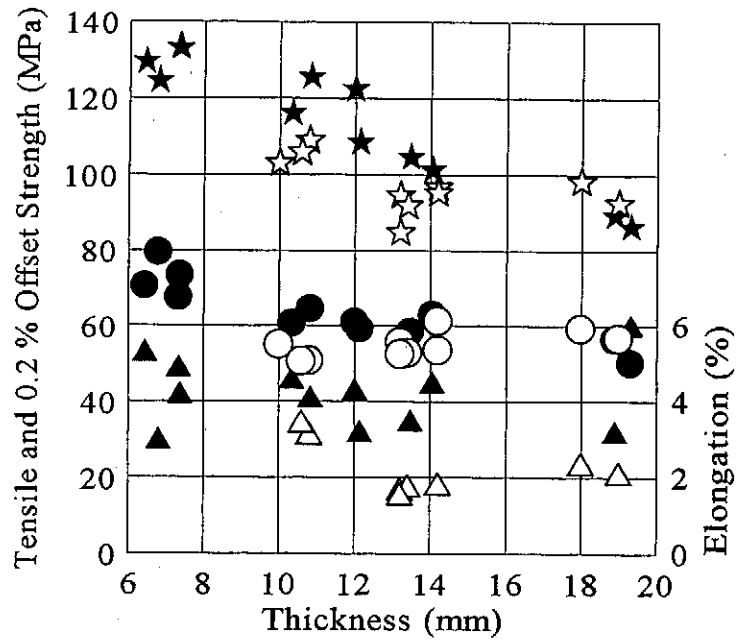


図 2-3.6 スミカロイ E-11 の板厚と機械的性質の関係

表 2-3.5 引張試験結果 (JIS AC4CH)

Test No.	T (mm)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	El. (%)	Estimated $\sigma_{0.2}$ (MPa)	
					Case 1	Case 2
AI-1	7.00	79.0 <sup>#</sup>	79.0	1.5 <sup>#</sup>	77.9	79.0
AI-6	11.14	78.4	125.3	2.7	79.9	81.7
AI-10	14.45	79.8	157.8	3.3	81.0	83.1
AI-15	18.99	83.9	116.0	2.9	82.3	84.8
AM-1	7.00	65.6 <sup>*</sup>	103.3	1.9	73.3	79.0
AM-5	10.23	77.1	122.0	1.9	77.3	81.2
AM-9	13.56	81.0	118.9	2.6	80.5	82.8
AM-13	16.39	82.3	88.2	2	82.6	83.9
AO-1	6.75	88.0	120.2	**	87.9	78.8
AO-6	10.65	90.3	131.4	2.3	89.1	81.4
AO-10	13.77	87.3	122.8	2.7	89.7	82.9
AO-15	18.78	91.7	115.0	2.1	90.5	84.7
AL7-1	7.33	76.3	141.1	4.0	75.9	79.3
AL7-3	7.22	75.5	135.9	2.8	75.8	79.2
AL12-1	12.21	80.0	134.9	3.3	79.2	82.2
AL12-3	12.19	78.4	113.1	2.8	79.2	82.2
Sand Moled Spec		—	140<	2<		
Metal Moled Spec		—	160<	3<		

<sup>#</sup> : Breaking before plastic strain reaches 0.2 %

<sup>\*</sup> : Omitted

<sup>\*\*</sup> : Breaking out of the range of gauge covering

表 2-3.6 0.2%耐力推定式の係数 (JIS AC4CH)

	AI	AM	AO	AL	Total
$\alpha$	70.03	55.66	83.31	64.42	68.99
$m$	0.05466	0.1413	0.02826	0.08257	0.06990
S.D.	1.60	0.478	1.71	0.710	4.77

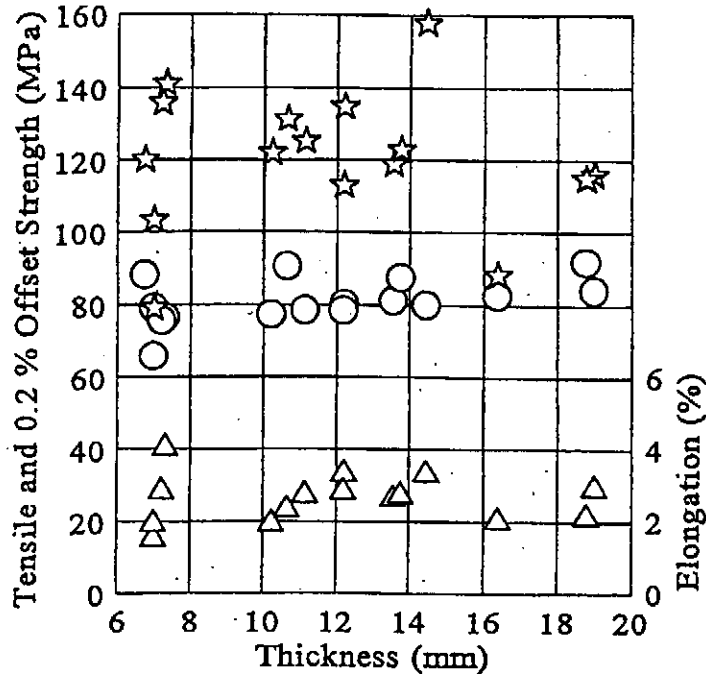


図 2-3.7 JIS AC4CH の板厚と機械的性質の関係

板厚が大きいほど0.2%耐力が大きくなるというスミカロイ E-11 と逆の傾向が見られる(表 2-3.5、図 2-3.7 参照)。

表 2-3.6 に(1)式による推定式の係数をまとめて示した。スミカロイ E-11(表 2-3.4 参照)に比べると、 $m$  の絶対値が小さく正負逆であること、採取箇所毎では推定値と試験結果の誤差の標準偏差が小さいにもかかわらず総ての結果をまとめて推定式とした場合にはばらつきが大きいことなどが特徴としてあげられる。

### 2-3-3-3 疲労試験

長期使用材を用いた疲労試験を行った後、新規成形材の E および A モデルからの試験片による疲労試験を実施した。なお、疲労試験は応力比 0 の完全片振りで実施した。

#### (1) スミカロイ E-11 (長期使用材)

長期使用材による疲労試験片の形状は新規成形材と同じである(図 2-3.4 参照)。試験結果を表 2-3.7 に示した。表には、負荷した応力範囲  $\Delta S$ 、破断までの回数  $N_f$ 、破断面の欠陥率  $R_d$  および有効断面率で除した応力範囲  $\Delta S^*$  を示している。なお、アルミニウム合金溶接部の内部欠陥の疲労強度への影響は、断面積の減少として取り扱える<sup>6)</sup> ことが知られており、アルミニウム合金鋳

物についてもこの関係が成り立つ。

図 2-3.8 に S/N 関係を示した。図中の記号●は  $\Delta S$  と  $N_f$  の関係を、○は  $\Delta S^*$  と  $N_f$  の関係を示している。破断面の欠陥率を考慮した場合、 $\Delta S^*/N_f$  関係は両対数グラフ上で明瞭な直線関係(式参照)となる。

$$\Delta S^* = 176 N_f^{-0.091} \quad (2)$$

(2) スミカロイ E-11 (新規成形材)

新規成形材の E モデルから採取した試験片による疲労試験結果を表 2-3.8 に示した。表には、

表 2-3.7 長期使用材の疲労試験結果

Stress Range $\Delta S$ , MPa	$N_f$ Cycle	Defect Rate $R_d$ , %	Modified $\Delta S$ $\Delta S^*$ , MPa
40	$10^7 <$	0	40
45	$4.08 \times 10^6$	0	45
45	$1.15 \times 10^6$	5	47.4
50	$7.43 \times 10^5$	5	52.6
50	$6.31 \times 10^5$	5	52.6
55	$3.00 \times 10^5$	0	55
55	$9.06 \times 10^4$	10	61.1
60	$1.49 \times 10^5$	0	60
60	$6.57 \times 10^3$	25	80

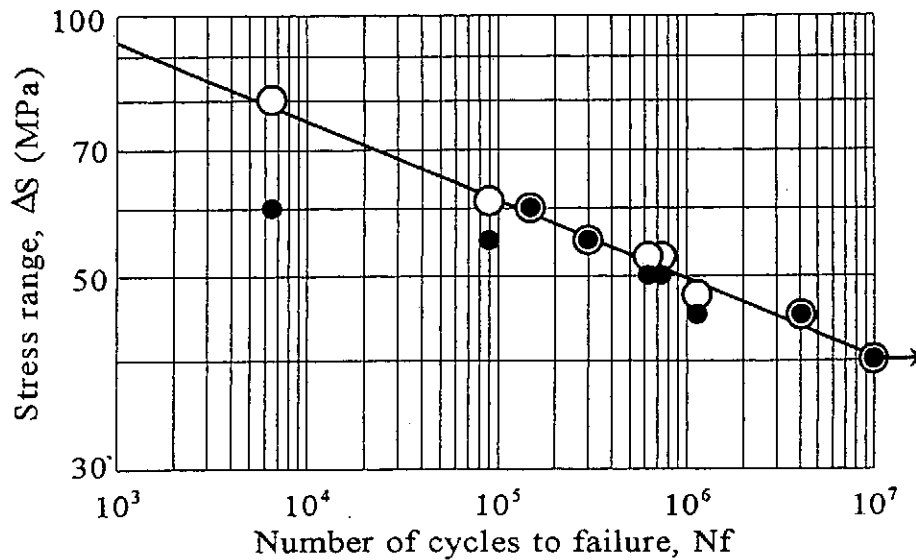


図 2-3.8 長期使用材の S/N 関係

表 2-3.8 E モデルの疲労試験結果

Test No.	Thickness T, mm	Estimated $\sigma_{0.2}$ , MPa	Stress Range $\Delta S$ , MPa	$N_f$ Cycle	$\Delta S/\sigma_{0.2}$
EI-3	8.72	67.3	70.0	$1.44 \times 10^5$	1.04
EI-13	16.16	55.9	57.0	$2.96 \times 10^4$	1.02
EM-1	6.60	73.2	66.0	$8.97 \times 10^5$	0.90
EM-10	13.98	58.4	53.0	$2.00 \times 10^6$	0.91
EM-15	19.43	52.8	47.0	$1.09 \times 10^6$	0.89
EO-3	8.30	68.3	56.0	$2.58 \times 10^6$	0.82
EO-11	14.15	58.1	51.8	$3.38 \times 10^6$	0.89
EO-12	14.84	57.3	57.7	$3.46 \times 10^5$	1.01
EO-13	15.52	56.5	45.0	$1.76 \times 10^6$	0.80

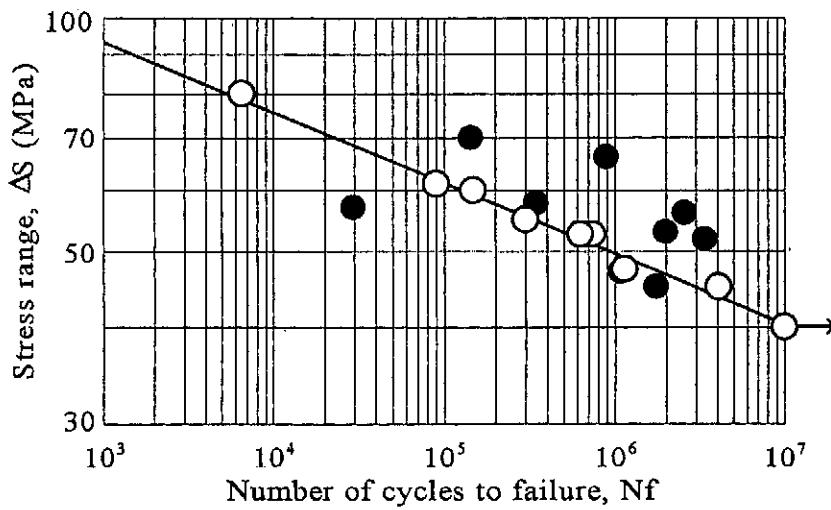


図 2-3.9 スミカロイ E-11 の S/N 関係

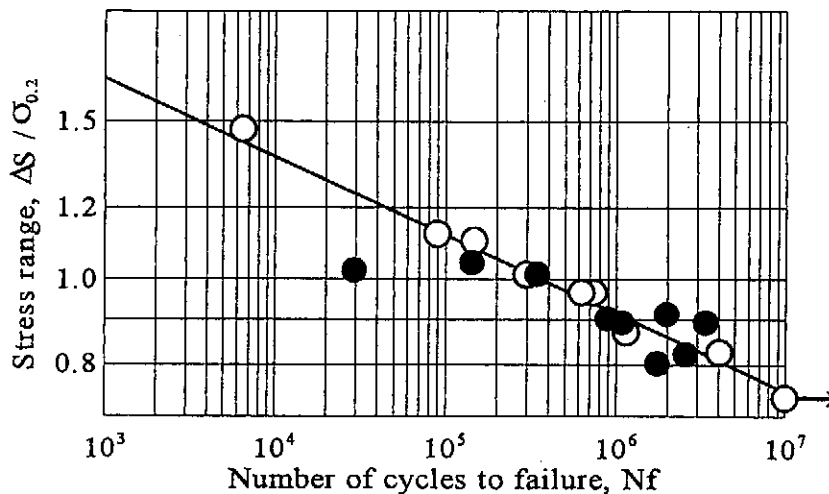


図 2-3.10 スミカロイ E-11 の無次元化された S/N 関係

疲労試験片の中心線上での元板厚、(1)式にこの板厚 T と表 2-3.4 の全データに基づく係数を用いて推定した 0.2 %耐力  $\sigma_{0.2}$ 、負荷した応力範囲  $\Delta S$ 、破断寿命  $N_f$  および 0.2 %耐力で無次元化した応力範囲  $\Delta S/\sigma_{0.2}$  が示されている。E モデルから採取した試験片の破断面では、明確な欠陥は観察されなかった。

図 2-3.9 に  $\Delta S/N_f$  関係を示した。図中の記号●は E モデルから採取した試験片による結果、○は長期使用材による結果(図 2-3.8 の  $\Delta S^*/N_f$  関係)を示している。E モデルから採取した試験片による結果はばらついている。

図 2-3.10 に無次元化した応力範囲  $\Delta S/\sigma_{0.2}$  と  $N_f$  の関係を示した。図中の記号は図 2-3.9 と同じで、長期使用材(○印)については、0.2 %耐力を 54.6 MPa(2-2-3-4 項参照)としている。図を見ると、図 2-3.9 における E モデルの結果(●印)のばらつきの原因が 0.2 %耐力の違いで説明できることがわかる。両対数グラフ上の直線から外れた 1 点を除いて、長期使用材および新規成形材のスミカロイ E-11 の S/N 関係を最小自乗法で求めると(3)式が得られる。

$$\Delta S/\sigma_{0.2} = 3.10 N_f^{-0.0884} \quad (3)$$

すなわち、スミカロイ E-11 の疲労強度は 0.2 %耐力に比例する。

### (3) JIS AC4CH (新規成形材)

新規成形材の A モデルから採取した試験片による疲労試験結果を表 2-3.9 に示した。表には、疲労試験片の中心線上での元板厚、(1)式にこの板厚 T と表 2-3.6 の全データに基づく係数を用いて推定した 0.2 %耐力  $\sigma_{0.2}$ 、負荷した応力範囲  $\Delta S$ 、破断寿命  $N_f$  および 0.2 %耐力で無次元化した応力範囲  $\Delta S/\sigma_{0.2}$  が示されている。

図 2-3.11 に  $\Delta S/N_f$  関係を示した。図中の記号○、△、●および▲はそれぞれ元板厚 10 mm 未満、10 から 14 mm、14 から 18 mm および 18 mm 以上であることを示している。図を見ると、

表 2-3.9 A モデルの疲労試験結果

Test No.	Thickness T, mm	Estimated $\sigma_{0.2}$ , MPa	Stress Range $\Delta S$ , MPa	$N_f$ Cycle	$\Delta S/\sigma_{0.2}$
AI-3	8.96	80.42	78.4	$1.22 \times 10^6$	0.97
AI-11	15.17	83.43	56.6	$3.17 \times 10^6$	0.68
AI-12	15.90	83.71	64.6	$4.60 \times 10^5$	0.77
AM-3	8.82	80.33	93.6	$2.46 \times 10^5$	1.17
AM-6	10.94	81.55	76.6	$1.08 \times 10^6$	0.94
AM-10	14.27	83.08	76.6	$3.16 \times 10^5$	0.92
AM-15	18.76	84.68	75.7	$1.43 \times 10^5$	0.89
AO-3	8.60	80.19	75.9	$2.84 \times 10^6$	0.95
AO-11	14.45	83.15	60.0	$3.00 \times 10^6$	0.72
AO-13	15.81	83.54	74.4	$1.51 \times 10^4$	0.89

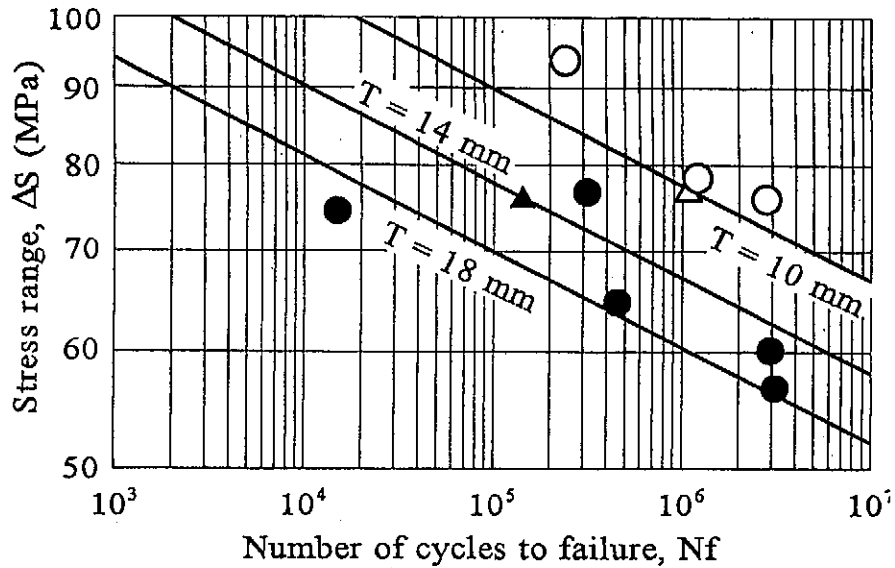


図 2-3.11 A モデル (JIS AC4CH) の S/N 関係

明らかに、元板厚が薄いほど疲労強度が大きい。2-3-3-2(2)に示したように、JIS AC4CH の 0.2 % 耐力は元板厚が大きいほど高くなる傾向がある。また、スミカロイ E-11 では疲労強度は 0.2 % 耐力と比例した。ところが、JIS AC4CH では、0.2 % 耐力が小さく、板厚が薄いほど疲労強度が高い。

0.2 % 耐力が疲労強度に影響しないこと、および、強い板厚依存性があることの理由は明確でないが、疲労強度への板厚依存性を指数関数的であると仮定して  $S/T/N$  関係を求めると、(4)式が得られた。

$$\Delta S = 500 T^{-0.425} N_f^{-0.0641} \quad (4)$$

図 2-3.11 には、(4)式の元板厚  $T$  を 10、14 および 18 mm とした場合の S/N 関係が示されている。

#### 2-3-3-4 衝撃試験

衝撃試験の結果を表 2-3.10 および 2-3.11 に示した。表 2-3.10 はスミカロイ E-11、表 2-3.11 は JIS AC4CH である。

##### (1) スミカロイ E-11

表 2-3.10 に示したスミカロイ E-11 の新規成形材の結果では、試験装置、振り上げ角度は 2-2-3-5 項と同じであるが、吸収エネルギーは 2-2-3-5 項の結果に比べると極端に小さく、温度による有意な差も現れない。むしろ高温では軟化して吸収エネルギーが小さくなると考えられる例も見られる。

はじめに示したごとく、Al-Si-Mg 系合金は、 casting 後固溶 Si および Mg が残っていれば、時間と共に微細な  $Mg_2Si$  が析出する自然時効により強度が改善される。長期使用材の衝撃試験における吸収エネルギーがスミカロイ E-11 の新規成型材の結果より大きいことの原因としては、この自然時効の可能性が高い。



表 2-3.10 E モデル (スミカロイ E-11) の衝撃試験結果

Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )	Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )	Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )
EM8LT-1	12	0.020	EO14LT-1	13	0.011	EI14LT-1	12	0.028
EM8LT-2	60	0.011	EO14LT-2	60	0.011	EI14LT-2	60	0.002
EM8LT-3	-60	0.018	EO14LT-3	-60	0.014	EI14LT-3	-60	0
EM8LS-1	12	0.018	EO14LS-1	13	0.043	EI14LS-1	12	0.049
EM8LS-2	60	0.010	EO14LS-2	60	0.010	EI14LS-2	60	0
EM8LS-3	-60	0.020	EO14LS-3	-60	0.014	EI14LS-3	-60	0.003
EM8TT-1	13	0.16	EO14TT-1	13	0	EI14TT-1	13	0.028
EM8TT-2	60	0.16	EO14TT-2	60	0	EI14TT-2	60	0.012
EM8TT-3	-60	0.17	EO14TT-3	-60	0.008	EI14TT-3	-60	0.014
EM8TS-1	13	0.004	EO14TS-1	13	0.028	EI14TS-1	13	0.048
EM8TS-2	60	0.004	EO14TS-2	60	0.012	EI14TS-2	60	0.008
EM8TS-3	-60	0.017	EO14TS-3	-60	0.014	EI14TS-3	-60	0.015

表 2-3.11 A モデル (JIS AC4CH) の衝撃試験結果

Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )	Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )	Test No.	Temp (°C)	E (J/mm <sup>2</sup> )
AM8LT-1	12.5	0.004	AO14LT-1	12.5	0.010	AI14LT-1	13	0.004
AM8LT-2	60	0.034	AO14LT-2	60	0	AI14LT-2	60	0
AM8LT-3	-60	0.011	AO14LT-3	-60	0.014	AI14LT-3	-60	0.012
AM8LS-1	12.5	0.002	AO14LS-1	12.5	0.010	AI14LS-1	13	0
AM8LS-2	60	0	AO14LS-2	60	0	AI14LS-2	60	0
AM8LS-3	-60	0.007	AO14LS-3	-60	0.011	AI14LS-3	-60	0.008
AM8TT-1	12.5	0.010	AO14TT-1	13	0	AI14TT-1	13	0.008
AM8TT-2	60	0.009	AO14TT-2	60	0	AI14TT-2	60	0.004
AM8TT-3	-60	0.008	AO14TT-3	-60	0.008	AI14TT-3	-60	0.006
AM8TS-1	12.5	0.036	AO14TS-1	13	0.004	AI14TS-1	12.5	0.012
AM8TS-2	60	0.001	AO14TS-2	60	0.010	AI14TS-2	60	0.012
AM8TS-3	-60	0.008	AO14TS-3	-60	0.012	AI14TS-3	-60	0.014

(2) JIS AC4CH

表 2-3.11 に示した JIS AC4CH の衝撃試験結果もスミカロイ E-11 と変わらない。

2-3-4 スミカロイ E-11 と JIS AC4CH の相違点

スミカロイ E-11 と JIS AC4CH の強度についての検討結果を、両合金の相違点を材料強度の観点から整理すると、以下の結論が得られる。

- 1) 0.2%耐力、引張強さ共に JIS AC4CH の方が高強度である場合が多い。
- 2) 共に析出強化型材料であるため、鋳造後の冷却速度の遅い実構造の材料強度は、冷却速度の速い砂型、金型試験結果より低下する。しかし、その低下の度合いはスミカロイ E-11 の方が大きい。
- 3) 実構造では冷却速度は部材厚さで異なり、薄いほど冷却速度が大きく、高強度になる。しかし、JIS AC4CH の 0.2%耐力だけは、元厚の影響が少なく、むしろ、厚いほど強くなる傾向がある。

- 4) 疲労にも元厚の影響が見られ、厚いほど疲労強度は低下する。スミカロイ E-11 ではその低下は 0.2 %耐力で評価できるのに対し、JIS AC4CH ではこれよりはるかに大きな低下となる。
- 5) すなわち、スミカロイ E-11 では、板厚によらず、疲労強度が 0.2%耐力に比例するのに対し、JIS AC4CH では板厚が厚いほど 0.2%耐力に対する疲労強度の割合が低下する。
- 6) 対衝撃性については両者に差は見られない。

### 2-3-5 結論

前項の結果により、アルミニウム合金鋳物船については以下の点に留意する必要がある。

- 1) 0.2%耐力等を設計強度とする場合には、実構造より冷却速度の速い小型試験片による値を用いてはならない。実船製造時の冷却速度を再現した試料による値を設計用強度とすべきである。
- 2) 短期的な確証試験は上記の困難を回避する手段となる。特に、スミカロイ E-11 では静的強度と疲労強度が比例するため、短期的な試験でも耐久性の目安となりうる。しかし、JIS AC4CH 合金を使用する場合には、冷却速度あるいは板厚の影響は静的強度よりむしろ疲労強度に大きな影響を与えることに配慮すべきである。すなわち、JIS AC4CH では、短期的な確証試験を行っても、厚肉部材の疲労損傷の危険は残っている。
- 3) 衝撃試験結果から低温脆性については問題ない。

### 参考文献

- 1) 日本小型船舶検査機構：アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会平成 10 年度報告書，1999.
- 2) 松岡，清水，吉井，北村，千田，勝又，秋山，牛嶋：船体用 Al-5 Si-0.1 Fe-0.4 Mg 合金鋳物の特性，軽金属溶接，第 38 巻，第 1 号，5，2000.
- 3) 清水：アルミニウム合金鋳造ポートの歴史と製造概要，船舶・海洋とアルミニウム，軽金属溶接構造協会，126，1990.
- 4) 熊谷，明神，長枝，藤本：新しい鋳造用アルミニウム合金スミカロイ®E-11, T-31, H-13, 住友化学，1973-11，59，1973.
- 5) International Association of Classification Societies：Aluminium Alloys for Hull Construction and Marine Structure, IACS Requirement UR-W25, 1998.
- 6) Sanders Jr., W. W. and Day, R. H.：Fatigue behavior of aluminium alloy weldments, Welding Research Council Bulletin, No. 286, 1983.

### 3. SMC の特性に関する調査研究の内容



### 3 SMC の特性に関する調査研究の内容

#### 3-1 調査研究の概要

近年、飛躍的に市場が拡大している水上オートバイの艇体の構成材料として、従来のハンドレイアップ工法とは全く異なる SMC (シートモールディングコンパウンド) 工法により制作された材料が使用されている。また、最近の水上オートバイ性能は著しく向上しているが、新材料を使用した小型船舶の強度の確認については「水上オートバイ特殊基準」等に基づき落下試験等を行うのみであり、漂流物との衝突や高速航走時の波浪衝撃等を考慮すると、疲労、衝撃などの動的強度特性を把握し、これらの面からの検証が必要となってくる。このため、SMC 工法による材料の静的強度並びに疲労、衝撃試験などの動的強度等の基本的な特性を把握するとともに、船殻材料として使用する場合の検査・設計上の留意事項を策定するために、以下の調査研究を行った。

- (1) 水上オートバイの船殻として新規に成形された素材各部位より切り出した試験片について、組成調査、静的試験、衝撃試験、吸水試験等を実施した。
- (2) 試験艇として使用された水上オートバイの船殻から切り出した試験片について、外観、組成調査、引張・曲げ等の静的強度試験、衝撃・疲労等の動的試験を実施した、
- (3) SMC 製の水上オートバイの 1 モデルについて、FEM 構造モデルを作成し、構造解析を行い、実機に生じる応力と変形を計算し、SMC 製水上オートバイの構造強度について検討した。

### 3-2 SMC材料の特性試験

#### 3-2-1 実施概要

平成10年度には新規成形SMC材料について、また平成11年度には試験艇として使用された水上オートバイの船殻から切り出した試験片について、外観、組成調査、引張・曲げ等の静的強度試験、衝撃・疲労等の動的試験を実施した。また、新規成形材の劣化特性を調べるため、吸水試験並びに吸水強度の測定もあわせて行った。試験項目を表-3.2.1に示す。

表-3.2.1 試験項目

	項目	適用基準	試験片	試験設備
組成調査	外観・寸法			
	比重・密度	JIS K7112		
	繊維含有率	JIS K7052		
	パーコル硬さ	JIS K7060	曲げ試験片	
静的試験	引張試験	JIS K7054	A型試験片	大型テンシロンUTM-10T (東洋ボールドウィン)
	圧縮試験	BEF法	短冊形試験片	
	曲げ試験	JIS K7055 (3点曲げA法)	短冊形試験片	
疲労試験	引張疲労試験	JIS K7118	短冊形試験片	サーボバルサEFH-EG5-10L EG10-20L(島津)
	曲げ疲労試験	JIS K7119	短冊形試験片	
衝撃試験	落錘3点曲げ	(JIS K7211)	短冊形試験片	(船研)
吸水試験	吸水試験	ASTM D570 (JIS K7209)	曲げ試験片	

#### 3-2-2 供試材

##### 3-2-2-1 SMC成形法とは

SMC成形法は、FRPの機械成形法の中では最も主要な技術であり、成形効率の優れた圧縮成形法である。このSMC成形法は、SMC材料の製造工程とプレス機による成形工程とからなる。

不飽和ポリエステル樹脂と硬化剤、増粘剤、充填材、内部離型剤、顔料などを混合したペースト状の混合物をガラス繊維チョップドストランドに含浸し、両面をフィルムで覆ってシート状とする(図-3.2.1左)。これを所定の温度に一定時間置き、化学反応によって増粘させ粘性のない状態としたものがSMCである<sup>2)</sup>。

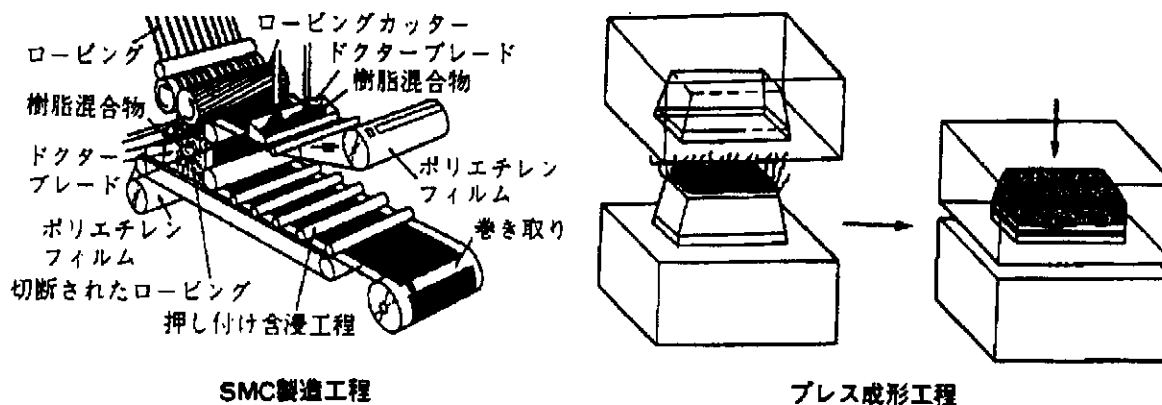


図-3.2.1 SMC 成形法<sup>1)</sup>

表-3.2.2 SMC 成形法の特徴<sup>1)</sup>

長所	短所
① 材料を流動させて成形するため、形状の制限が少ない。 ② 表面の平滑性に優れる。 ③ 圧縮成形法の中でもっとも成形効率の優れた方法である。 ④ 省力化、自動化ができる。 ⑤ リブ、ボス、インサートができる ⑥ 連続長繊維の強化材を利用できる。	① 強度が低くなる。 ② 流動による繊維の方向性が発生することがある。

成形工程は、加熱した金型内にSMCを成形品の形状に合わせてチャージし、プレス機によって加圧流動させて賦形し（図-3.2.1右）、加熱硬化後、離型する方法である<sup>1)</sup>。

SMC成形法の特徴を表-3.2.2に示す。

### 3-2-2 供試材

強度試験に使用するSMC材料は本部会委員2社よりご提供いただいた。表-3.2.3に概要を示す。

A、B及びM材は水上オートバイの船殻として新規に成形したものである。A、Bについては成形したままの状態のものを入手することができた。また、経年材であるC及びN材はメーカーの性能確認艇あるいは試験艇として約2～3年使用されたものである。各供試材とも、平面部が比較的広く、密集して数多くの試験片が採取できるように、図-3.2.2に示す部位より供試板を切り出している。なお、本報告ではそれぞれの部位に3桁の記号を付与して区分した。すなわち、左桁は上下位置(S：側板、B：底板)、中央桁は左右位置(L：左舷側、R：右舷側)、右桁は前後位置(F：前側、B：後ろ側)を示す。

試験片は、試験項目を勘案し、また採取部位及び採取方向の差異を明らかにできるように考慮して寸法及び位置決めを行った。ただ、平面部が限られることから、十分な数量を確保できない試験項目もあった。加工は、基本的に精密ダイヤモンドカッターで行い、また引張試験片のダンベル形状への加工はFRP専用のフライス盤により行った。なお、強度試験用の試験片の板厚は原則として元厚のままとしたが、板厚が不均等で試験に支障が生じる場合は必要最小限の研削を施している。また、経年材は実機から採取したため、接着剤、ステッカー等が付着したのももあったが、試験に支障のないよう注意深く取り除いた。

表-3.2.3 供試材

供試材記号	供試材	使用	形態
A	川崎重工業(株) Jet ski 1100Zxi ハルボトム	新規成形材	成形したまま
B	川崎重工業(株) Jet ski 750Xi ハルボトム	新規成形材	成形したまま
C	川崎重工業(株) Jet ski 1100Zxi ハルボトム	H8年1月製造	実機(HIN:KAW80096A696)より 切り出したもの
M	ヤマハ発動機(株) MJ-1200GP ハルボトム	新規成形材	成形材より切り出したもの
N	ヤマハ発動機(株) MJ-760GP ハルボトム	H8年12月製造	実機(HIN:YAMA2073L697)より 切り出したもの

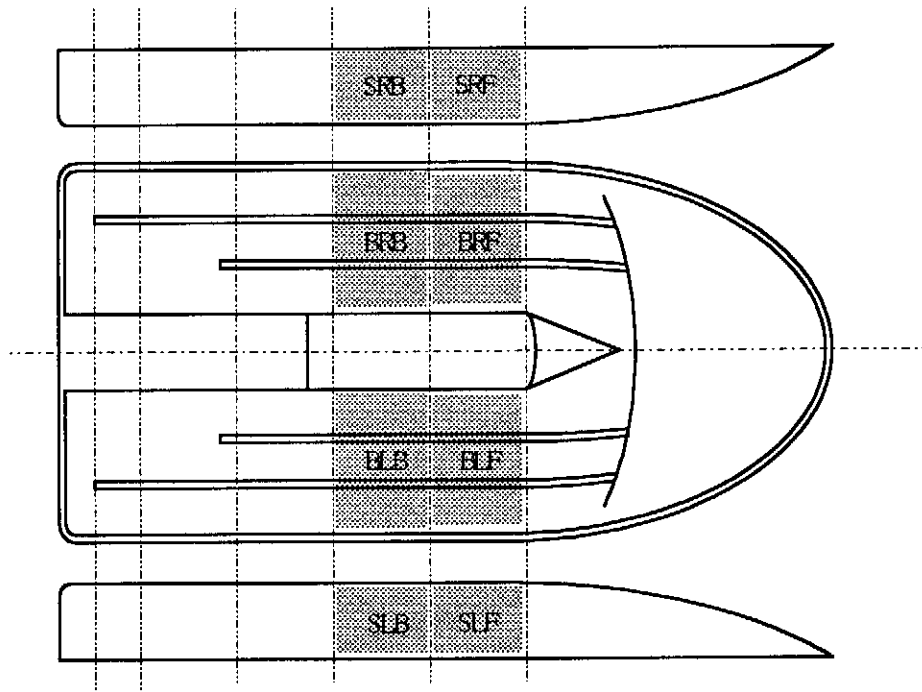


図-3.2.2 供試板採取位置と記号

### 3-2-3 試験結果

#### 3-2-3-1 外観・寸法及び組成

外観検査の結果、新規成形材はいずれもキズ、ひけ、変形等の欠陥は目視では観察されなかった。また、供試板を

表-3.2.4 供試板の板厚、比重、組成及び硬さ

切り出した際の切断面についても調べたが、同様であった。経年材については、運搬時に付いたと思われる小さな擦り傷が船底部に見られたが、その他は新規成形材と同じであった。また、経年材から供試板を採取する際に、補強材と接着剤で固定してある箇所を調べたが、強固に接着しており不具合な箇所は見られなかった。

供試材	供試板	平均板厚 (mm)	平均比重	繊維 (wt.%)	充填材 (wt.%)	樹脂 (wt.%)	バーコ ル硬さ
A (新材)	BLF	5.99	1.90	31.5	43.9	24.6	46
	SLF	5.02	1.87	25.7	48.5	25.8	43
	BLB	5.68	1.91	29.2	46.1	24.7	46
	SLB	4.26	1.90	25.4	48.6	25.6	42
B (新材)	BLF	6.81	1.89	25.5	48.6	25.9	40
	SLF	4.29	1.90	24.4	48.8	26.8	39
	BLB	6.84	1.89	26.9	47.2	25.9	41
	SLB	4.23	1.92	26.0	48.4	25.6	41
C (経年材)	BLF	6.05	1.92	25.9	47.6	26.5	46
	SLF	5.09	1.88	24.0	49.3	26.7	50
	BLB	5.93	1.92	28.2	46.3	25.5	49
	SLB	4.55	1.90	27.9	45.0	27.1	51
M (新材)	BLF	7.26	1.72	37.3	26.2	36.5	40
	SLF	4.41	1.71	35.9	27.6	36.6	42
	BLB	7.10	1.71	35.7	25.9	38.4	43
	SLB	4.37	1.71	37.9	25.8	36.3	46
N (経年材)	BLF	6.84	1.73	38.4	25.0	36.6	46
	SLF	4.32	1.72	39.8	24.1	36.2	57
	BLB	6.79	1.74	35.2	25.0	39.8	51
	SLB	4.40	1.72	37.8	23.6	38.7	46



各供試板（左舷側）の平均板厚、平均比重並びに組成は表-3.2.4のとおりである。なお、組成はJIS K7052に従って樹脂分を燃焼させた後、残留物を繊維と充填材とに分別して計測した。

これによると、いずれの供試材も採取部位により板厚の違いがあるものの、同一メーカーでは繊維含有率等の組成の違いがほとんど認められない。したがって、採取部位による比重の差異もあまり認められない。パーコル硬さについては、全体的に新材よりも経年材の硬さがやや増大する傾向が見られるが、採取部位による明らかな違いはあらわれなかった。

### 3-2-3-2 静的引張強度

静的引張試験はJIS K7054に準じて行った。試験片は全長180mm、幅20mm、平行部長さ60mm、平行部幅15mmのA型（ダンベル型）とし、試験前に60℃の熱風炉に24時間以上放置して、乾燥させた。その後、デシケータ内に放置し、20℃にて試験に供した。試験は東洋ゴールドウィン社製大型テンシロン試験機UTM-10Tを用いて、引張速度1mm/minで行った。引張ひずみは試験片表裏面に貼った2方向ひずみゲージにより測定した。各供試板ごとの引張強さと引張弾性率を表-3.2.5に示す。

引張強さは各供試材とも、側板よりも底板が、また船長方向よりも船幅方向が大きな値を示している。試験部位による強さの違いは板厚が影響しているものと考えられる。一方、方向性については強化繊維の配向性の影響が強いものと思われる。したがって、プレス成形工程におけるSMCの型内流動が顕著で、繊維の方向性が発生しやすいであろう側板において、強さの方向依存性がよりはっきりと現れている。これらは引張弾性率の特性についてもほぼ同様の結果であることがわかる。

表-3.2.5 各供試板の引張強度特性

供試材	供試板	引張強さ(MPa)				引張弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	SLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLB	59.02	2.48	—	—	12.07	0.65	—	—
	SLB	44.31	6.41	76.23	9.56	10.50	0.38	12.91	1.11
B (新材)	BLF	53.82	5.02	59.57	6.08	11.29	0.87	11.57	0.52
	SLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLB	50.54	3.98	67.57	5.62	10.82	0.68	12.10	0.66
	SLB	47.01	2.78	—	—	10.90	0.65	—	—
C (経年材)	BLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	SLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLB	56.22	7.41	—	—	12.53	0.82	—	—
M (新材)	SLB	37.14	3.35	53.98	4.56	10.23	0.76	13.66	0.44
	BLF	76.70	16.55	—	—	9.98	0.20	—	—
	SLF	51.12	4.12	—	—	9.56	0.52	—	—
	BLB	—	—	—	—	—	—	—	—
N (経年材)	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLF	69.62	12.40	—	—	8.93	0.63	—	—
	SLF	72.01	7.38	54.73	7.92	10.09	0.61	11.31	1.00
	BLB	—	—	—	—	—	—	—	—
		SLB	—	—	—	—	—	—	—

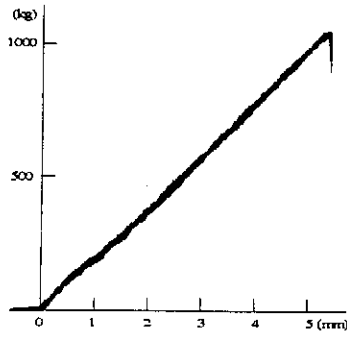


図-3.2.3 引張試験における荷重-伸び線図の一例

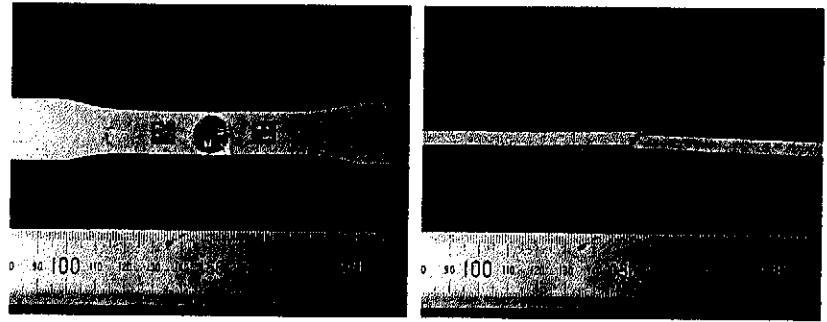


図-3.2.4 引張試験片破壊状況

しかしながら、試験片の破壊形態には顕著な違いは認められない。すなわち、いずれの試験片も図-3.2.3に示すような荷重-伸び関係でほぼ直線的に変化して破壊に至り、クリープ的な挙動はほとんど見られなかった。破断面は図-3.2.4に示すように、部分的に繊維の引き抜けが生じていた。

新材と経年材との比較においては、特段の差異は認められなかった。サンプル数が少なく、ある程度のばらつきもあることから確定的ではないが、引張強度特性はガラス繊維の特性が支配的であるためであろう。

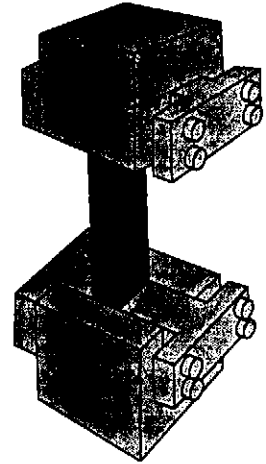


図-3.2.5 B E F 法<sup>3)</sup>

### 3-2-3-3 静的圧縮強度

静的圧縮試験はBEF(Both End Fixed)法<sup>3)</sup>を用いて行った。これは試験片の両端をそれぞれ別々の治具(図-3.2.5)で固定して圧縮する方法である。こ

表-3.2.6 各供試板の圧縮強度特性

供試材	供試板	圧縮強さ(MPa)				圧縮弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	125.68	12.68	140.06	8.67	13.42	1.54	14.39	0.20
	SLF	113.10	9.37	111.22	16.27	12.76	0.51	13.72	0.48
	BLB	116.42	10.62	141.80	12.18	13.12	1.06	14.71	0.58
	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—
B (新材)	BLF	124.46	7.06	121.27	15.93	11.79	0.32	13.86	0.64
	SLF	85.74	5.97	103.14	10.18	12.60	0.52	13.31	0.69
	BLB	116.74	9.86	144.48	9.87	13.19	0.57	14.50	0.69
	SLB	—	—	112.81	—	—	—	13.40	—
C (経年材)	BLF	109.42	5.84	128.45	10.79	12.18	1.41	13.88	0.69
	SLF	96.12	13.94	121.64	8.19	11.13	0.75	13.72	0.70
	BLB	107.32	10.47	114.35	4.96	12.19	1.05	14.46	0.57
	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—
M (新材)	BLF	145.29	21.73	164.51	6.80	10.35	1.37	12.82	0.23
	SLF	65.83	—	—	—	8.52	—	—	—
	BLB	126.56	23.72	168.26	5.16	9.99	0.98	12.00	0.20
	SLB	86.18	7.13	125.84	9.42	9.46	0.63	13.05	1.20
N (経年材)	BLF	130.46	15.31	156.34	17.12	11.11	1.75	12.64	2.81
	SLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLB	113.25	17.18	160.43	10.61	9.99	1.08	16.72	3.93
	SLB	67.08	4.26	124.76	11.41	13.03	0.78	15.76	2.07

のため、試験片へのタブやダンベル加工が不要で、ひずみゲージの貼付も可能である。また、圧縮強さ測定値や破壊様式にはJIS K7076の試験方法で得られる結果との違いはない。試験片は全長100mm、幅15mmの短冊型とし、大型テンシロン試験機UTM-10Tを用いて、試験速度1mm/minで行った。圧縮ひずみは試験片表裏面に貼ったひずみゲージにより測定した。

各供試板ごとの圧縮強さと圧縮弾性率を表-3.2.6並びに図-3.2.6(a)、(b)に示す。側板から採取した試験片では、船長方向の圧縮強さが100MPaに達しなかったものが少なくなかったが、それは繊維の方向性の影響に加えて、板厚が薄いためにバックリング変形が生じたためである。その他のものについては、引張強さのおよそ2倍の値を示している。新材と、経年材との違いはほとんどみられない。

圧縮弾性率においては、M、N材が経年により、やや大きくなる傾向を示している。

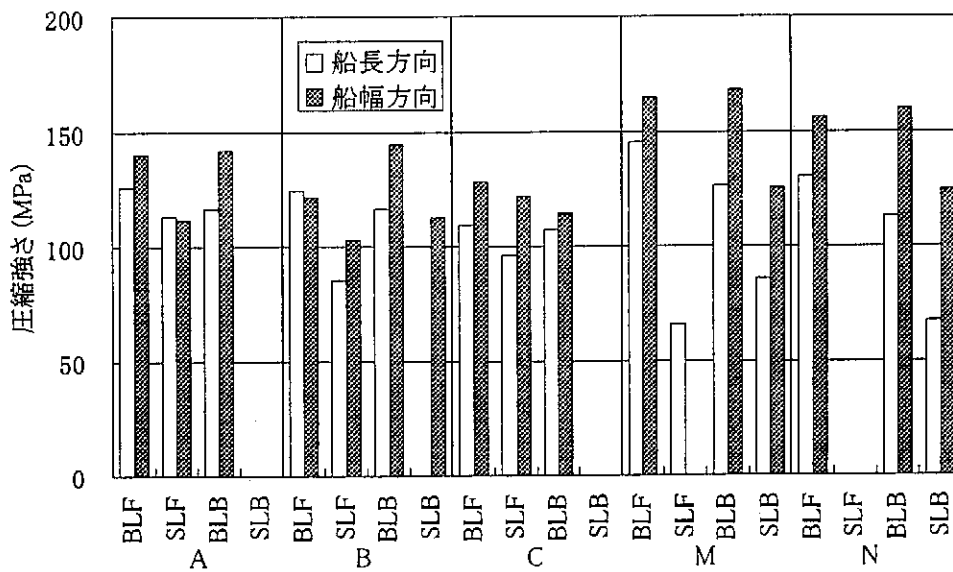


図-3.2.6(a) 圧縮強さ

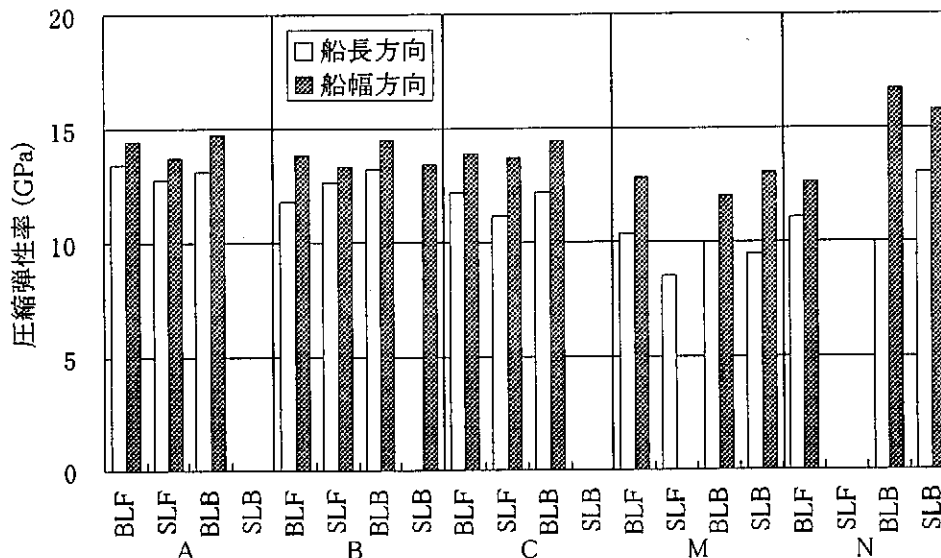


図-3.2.6(b) 圧縮弾性率

### 3-2-3-4 静的曲げ強度

静的曲げ試験はJIS K7055に準じて3点曲げで行った。試験片は全長100mm、幅15mmの短冊型とし、大型テンシロン試験機UTM-10Tを用いて、スパン80mm、試験速度2mm/minで行った。このため、ひずみ速度は板厚により異なるが、0.008~0.015(min<sup>-1</sup>)程度である。

曲げ強度及び弾性率は次式を用いて計算した。

曲げ強さ

$$\sigma_b = 3PL/2bh^2$$

曲げ弾性率

$$E_b = (L^3/4bh^3) \times (W/\delta)$$

P：荷重値

L：スパン

b：試験片幅

h：試験片厚さ

W/δ：荷重-たわみ線図の初期傾斜

各供試板ごとの曲げ強さと曲げ弾性率を表-3.2.7並びに図-3.2.7(a)、(b)に示す。なお、今回提示する曲げ強度データは、水圧荷重を考慮して、いずれも外表面に圧縮応力、内表面に引張応力が作用するように載荷している。

表からわかるように曲げ強さと曲げ弾性率のいずれも船幅方向が船長方向より卓越しており、その違いは圧縮強度特性の場合よりも顕著である。これは、曲げ試験において大きな応力が生じる表面近傍において繊維の方向性がより顕著であることによるものと考えられる。

表-3.2.7 各供試板の曲げ強度特性

供試材	供試板	曲げ強さ(MPa)				曲げ弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	124.52	21.82	170.23	6.93	10.63	1.22	12.43	0.44
	SLF	122.59	13.01	164.81	18.82	10.08	0.80	12.29	0.78
	BLB	125.47	23.15	181.63	31.55	10.97	0.59	12.50	1.00
	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—
B (新材)	BLF	108.81	20.14	156.19	23.60	9.77	0.03	11.62	0.67
	SLF	107.78	4.70	162.85	26.61	9.95	0.51	12.20	0.47
	BLB	129.79	21.03	151.57	23.47	10.71	0.95	11.62	0.52
	SLB	—	—	160.58	7.66	—	—	12.53	0.06
C (経年材)	BLF	111.39	21.28	150.20	15.11	9.28	0.79	11.94	0.40
	SLF	93.19	12.01	148.27	16.65	8.63	0.18	11.53	0.34
	BLB	108.68	28.59	138.39	2.68	9.53	0.87	11.44	0.51
	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—
M (新材)	BLF	151.25	21.23	210.22	12.50	7.49	0.66	10.39	0.71
	SLF	105.15	—	—	—	6.64	—	—	—
	BLB	150.28	44.37	182.37	31.74	7.93	0.63	9.68	0.59
	SLB	133.13	16.80	221.26	28.36	7.33	0.31	12.12	1.37
N (経年材)	BLF	138.81	25.02	184.62	25.60	7.51	1.49	9.70	0.65
	SLF	—	—	—	—	—	—	—	—
	BLB	125.30	13.33	226.56	23.76	7.70	0.93	11.23	1.14
	SLB	91.41	12.65	193.39	32.79	6.60	0.37	10.58	1.18

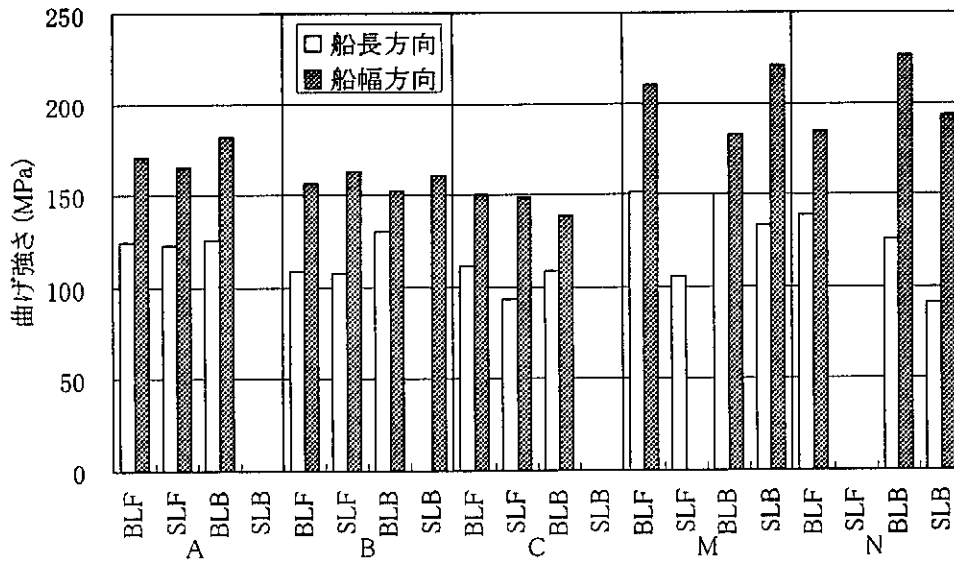


図-3.2.7(a) 曲げ強さ

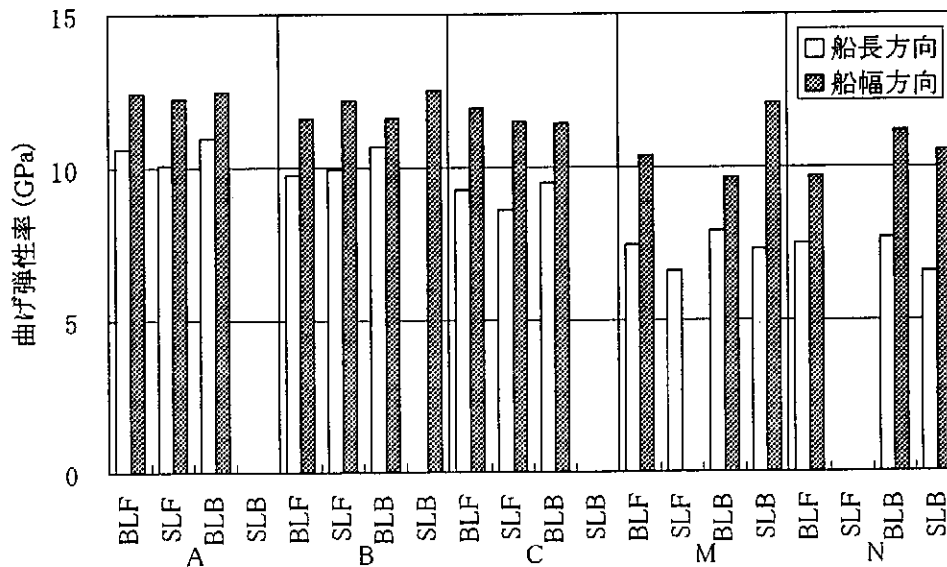


図-3.2.7(b) 曲げ弾性率

新材と経年材との比較においては、強さ、弾性率ともC材がA材よりわずかに低下する傾向がみられるが、3年以上の使用の結果であり、ほとんど問題ないものと考えられる。

### 3-2-3-5 衝撃3点曲げ強度

衝撃試験は落錘3点曲げ試験装置を使用して行った。落錘重量は0.77、0.81kg、落錘落下高さは1.2～1.4mとした。衝撃荷重は支点到に設置したロードセル(東京測器製 TCLZ-500K、CLP-200KS)により計測し、サンプリング速度 $10\mu\text{s}$ でパソコンに取り込み、処理した。試験片は全長100mm、幅15もしくは20mm、スパン80mmである。

衝撃曲げ試験の結果を静的曲げの結果とあわせて図-3.2.8に示す。衝撃曲げ強さは、静的試験の結果より高くなる傾向にあることがわかる。長期材と新材とでは、曲げ強さに顕著な差はあらわれなかった。この理由として、実際の水上オートバイでは船底の剛性を上げるために、縦通材や横フレームがあり、この補強材の効果で船底部の撓み等が抑えられ、疲労等の経年劣化の影響はほとんど表れなかったものと考えられる。

破壊様相は、静的試験の場合、初期に引張側のマトリックスにき裂が生じ、その後、繊維の引張破壊及び層間剥離等を伴う複合破壊となったが、衝撃試験の場合は確実に破壊する高さとしたことから、静的試験の場合より破壊が進んだ状態となる。しかし、衝撃破壊様相も静的な場合と同様な複合破壊であり、両者に大きな違いは見られなかった。

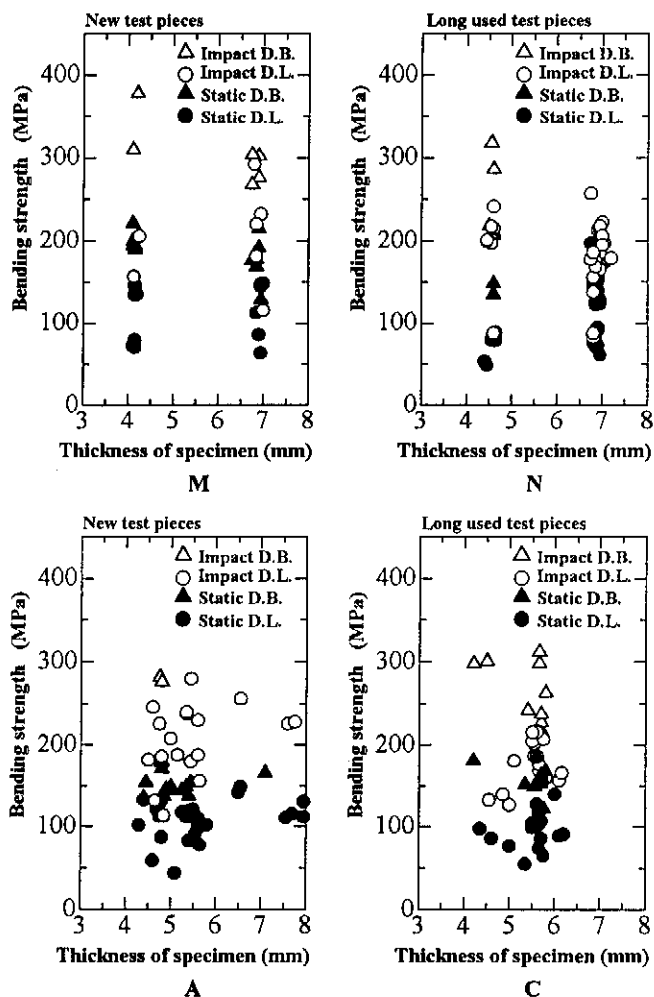
### 3-2-3-6 引張疲労強度

引張疲労試験はJIS K7118硬質プラスチック材料の疲れ試験方法通則を準用して行った。試験片は長手方向が船長方向、すなわち、船長方向に引張応力が作用するように採取した。試験片の寸法は幅15mm×長さ175mmの短冊形とし、厚さは元厚とした。試験片は各供試材より所定形状、寸法に切り出し、試験前に60℃の熱風炉に24時間以上放置して、乾燥させた。その後、デシケータ内に放置し、20℃にて試験に供した。試験は島津サーボパルサEFH-EG10-20L及びEFH-EG5-10Lを使用して、5Hz sin波の引張応力を与え、荷重制御により行った。

疲労試験では試験材の制約から十分な数の試験を行うことができなかったが、表-3.2.8に示す結果を得、これをもとに図-3.2.9に示す応力-繰返し数線図を作成した。プラスチック系の材料においては明確な疲労限を示さないことが多いため、今回の試験においても、107回を越えて試験片にき裂の発生がみられなかった場合は、その応力を疲労限とし、試験を停止した。この図より、A、C材がM、N材より時間強度及び疲労限がやや小さくなっているが、静的試験の結果と同様、繊維含有量等組成の相違によるものと考えられる。また、いずれの試験材も経年材の時間強

表-3.2.8 引張疲労試験結果

A		C		M		N	
最大応力差 (MPa)	繰返し数	最大応力差 (MPa)	繰返し数	最大応力差 (MPa)	繰返し数	最大応力差 (MPa)	繰返し数
35.40	4	38.93	248	37.17	1	49.52	211
39.91	6	35.21	3331	38.44	248	45.11	637
30.30	30	31.09	25948	31.68	27428	38.93	23340
26.48	288	28.05	80008	29.32	197186	35.60	32762
20.59	5046	25.40	404228	22.95	>10000000	35.59	382480
15.78	>7739481	23.93	>14500000	18.34	>10000000		
		22.26	>10000000				



D.B.:船幅方向(Direction of Breadth) D.L.:船長方向(Direction of Length)

図-3.2.8 曲げ衝撃強さ

度が新材よりもやや高くなる傾向にある。この原因については明確ではないが、少なくとも通常の使用による疲労強度の低下については問題ないことを示していると考える。

引張疲労破壊様相は、先にマトリックスにき裂が生じ、その後繊維の引き抜けや切断により、試験片の分断破壊となるケースがほとんどであった。そこで、疲労過程における試験材の剛性変化を調べた結果の一例が図-3.2.10である。この図と、疲労破壊の進行を対比させると、試験材表面にき裂が見えた直後から急激に剛性低下を生じたが、き裂の生じないものは初期の剛性を保持していた。このため、表面き裂の有無が耐久性判断の指針になるものと考える。

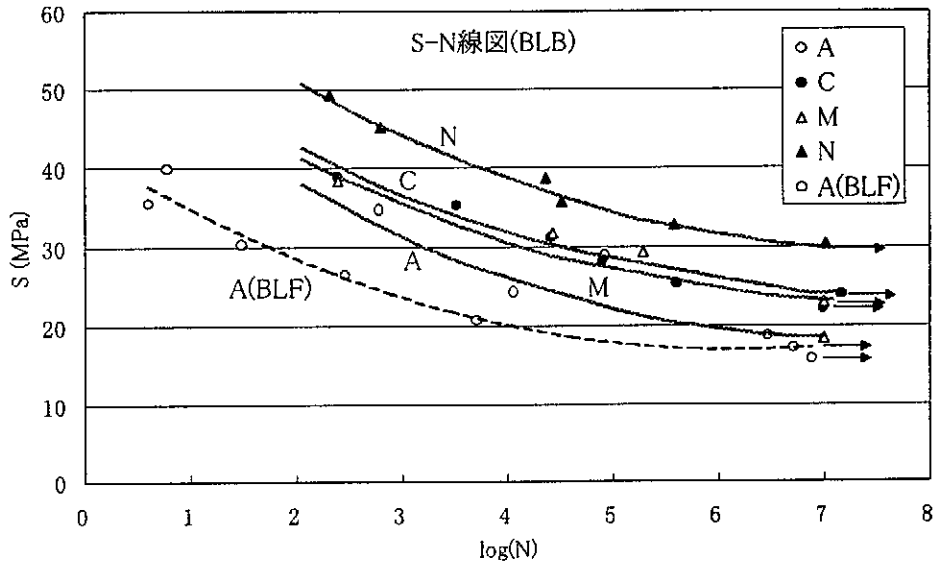


図-3.2.9 引張応力-繰返し数線図

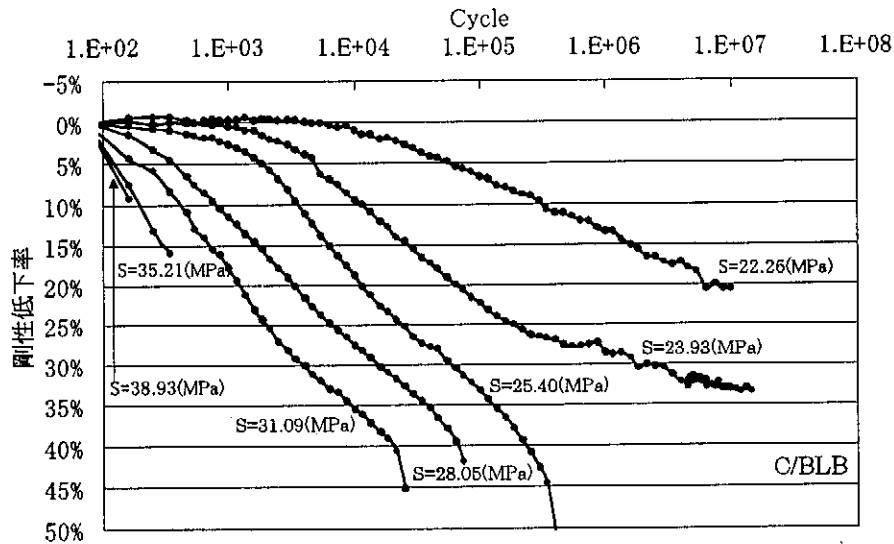


図-3.2.10 引張疲労過程における剛性低下率(C材)

### 3-2-3-7 曲げ疲労強度

曲げ疲労試験はJIS K7119硬質プラスチック平板の平面曲げ疲れ試験方法を準用して行った。試験片は長手方向が船長方向となるように採取した。試験片の寸法は幅15mm×長さ100mmの短冊形とし、厚さは元厚とした。試験片の前処理は引張疲労試験と同様である。試験は島津サーボパルサEFH-EG5-10Lを使用して、2Hz sin波の片振り曲げ応力を与え、荷重制御で行った。プラスチック系材料では弾性率が小さいために曲げ応力によるたわみ量、すなわち試験機のストロークが長くなるので、繰り返し速度は引張疲労試験の場合より遅くしている。スパンは80mmとし、応力は水圧荷重を考慮して、外表面に圧縮応力、内表面に引張応力が作用するように载荷した。なお、引張疲労試験において、いずれの試験材も応力-繰り返し数線図が似た傾向を示していたので、曲げ疲労試験については経年材についてのみ実施した。

表-3.2.9に疲労試験結果、図-3.2.11に応力-繰り返し数線図を示す。引張疲労試験結果と比較して値のばらつきが大きい、平均的にはほとんど同じ線図となっている。

表-3.2.9 曲げ疲労試験結果

C		N	
最大応力差 (MPa)	繰返し数	最大応力差 (MPa)	繰返し数
55.42	7	68.79	4
33.67	98	51.75	18
22.16	820	41.60	942
22.37	1096	39.17	20328
22.81	2261	32.53	>1543816
29.48	13573	25.01	>1858692
24.67	110334		
20.49	>1239996		
18.62	>1930901		

破壊様相は、はじめに引張側のマトリックスにき裂が生じ、その後繊維の引き抜け、破断、層間はく離等が複合して試験片の破壊が進行した。この間の剛性変化を図-3.2.12に示したが、引張疲労の場合と比較して、寿命の末期における剛性の低下が著しい。換言すると、剛性低下率が10%を越えると、疲労破壊の可能性が高まったことを示しており、注意を要するものと考えられる。

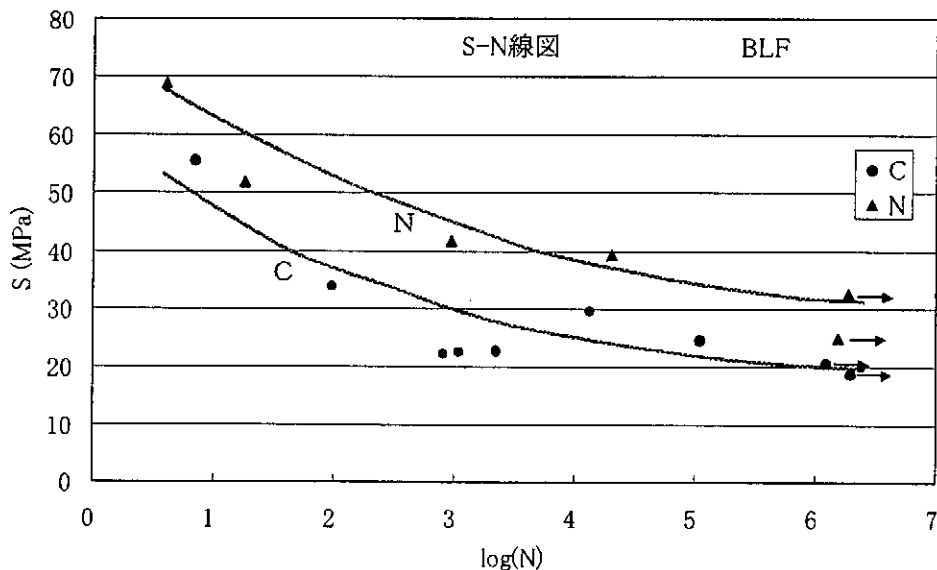


図-3.2.11 曲げ応力-繰返し数線図



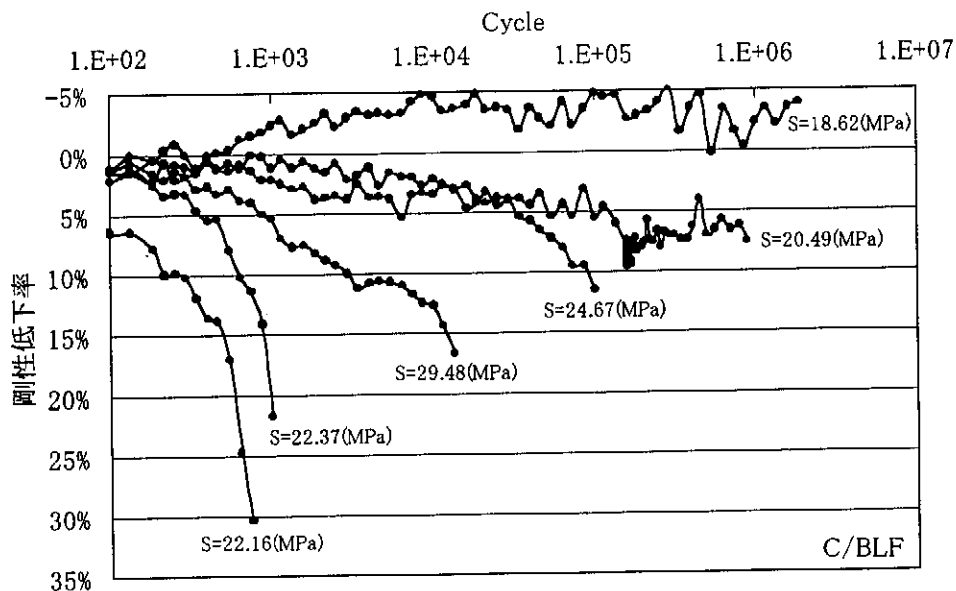


図-3.2.12 曲げ疲労過程における剛性低下率(C材)

さらに、参考のため船体材料として長期使用の実績の多いFRP材の曲げ疲労特性と比較した。

図-3-2-13(a)、(b)に示す。

SMC材は報告書に記載したものと同一物である。FRP材は約20年使用したFRP船の船側より船長方向に切り出した物(SMCと同じ)である。図-3-2-13(a)は応力を最大応力と最小応力の差であらわしたものであり、図-3-2-13(b)は最大応力で整理している。但し、 $N=1$ の値はいずれの図も静的試験における結果である。図から解ることは、

- ① SMCの強度はFRPの $1/2 \sim 1/4$ である。
- ② SMCは100回以上でカーブがほとんど寝ることから、100回で壊れなかったものは同じ使用条件であれば10万回でも大丈夫といえる。
- ③ FRPは連続長繊維があるために、応力の繰り返しとともに徐々に破壊が進むが、SMCは短繊維で引き抜けが生じやすいため回数少ない段階での変化が大きい。充填材の炭酸カルシウムの影響も考えられる。

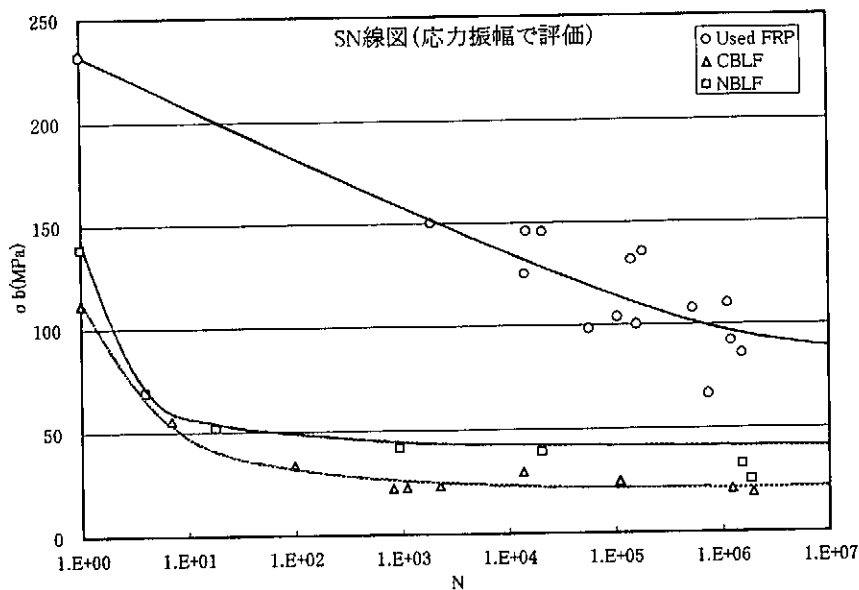


図-3.2.13(a) 曲げ応力-繰り返し数線図(応力振幅で評価)

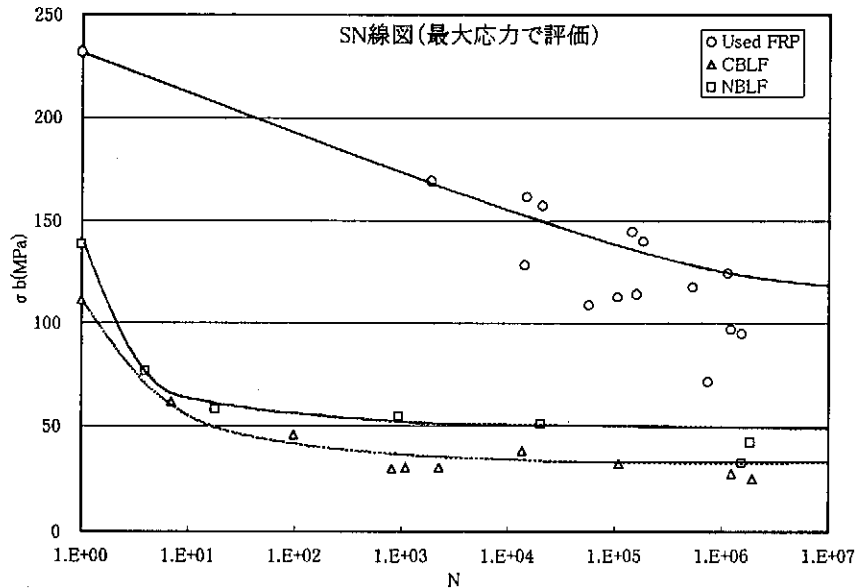


図-3.2.13(b) 曲げ応力-繰り返し数線図 (最大応力で評価)

### 3・2・3・8 吸水特性

疲労試験では、はじめに試験材表面にき裂が入り、その直後から急激に剛性低下を生じていくことを示した。実機ではき裂が生じれば、そこから水分が進入し、さらに特性が低下するであろうことは十分予測される。このため、SMC材料の吸水時の物性を調べることにし、はじめに吸水率の測定を行った。

吸水特性の測定はASTM D570 (Standard Test Method for Water Absorption of Plastics、プラスチックの吸水試験方法)に準拠して行った。この方法はJIS K7209 (プラスチックの吸水率及び煮沸吸水率試験方法)とほぼ同等である。ただし試験片は吸水強度の測定を考慮し、曲げ試験片と同じ100mm×15mmの長方形板とした。板厚は原寸とした。試験片は50℃で24時間乾燥させ重量を測定した後、所定温度の精製水に浸漬して、時間の経過に伴う重量の変化を測定し、次式により吸水率 $\beta$ を求めた。

$$\beta = (w_2 - w_1) / w_1 \times 100 (\%)$$

$w_1$  : 浸漬前の試験片重量

$w_2$  : 浸漬後の試験片重量

海水でなく精製水を使用したのは、精製水が海水に比べ、接触角が小さく、毛細管現象による吸水率が高いためである。吸水条件は通常海域の海面近傍を想定し、20℃常圧とし、恒温水槽で再現した。

図-3.2.14は各供試材の吸水率と浸漬時間との関係調べた結果である。これによると、いずれの試験片も浸漬開始直後に顕著に吸水し、その後吸水率の増加は徐々に緩やかになって浸漬60日を過ぎるとほぼ飽和吸水率に達する。供試した試験片は機械加工面すなわち試験片の側面に繊維-樹脂界面が露出しているため、吸水の大部分は樹脂内部ではなく、繊維と樹脂との界面に毛細管現象で取り込まれているものと考えられる。繊維含有率が高いほどこの界面は多く存在するので、供試材による吸水率の差はこれにより生じたものと推察できる。

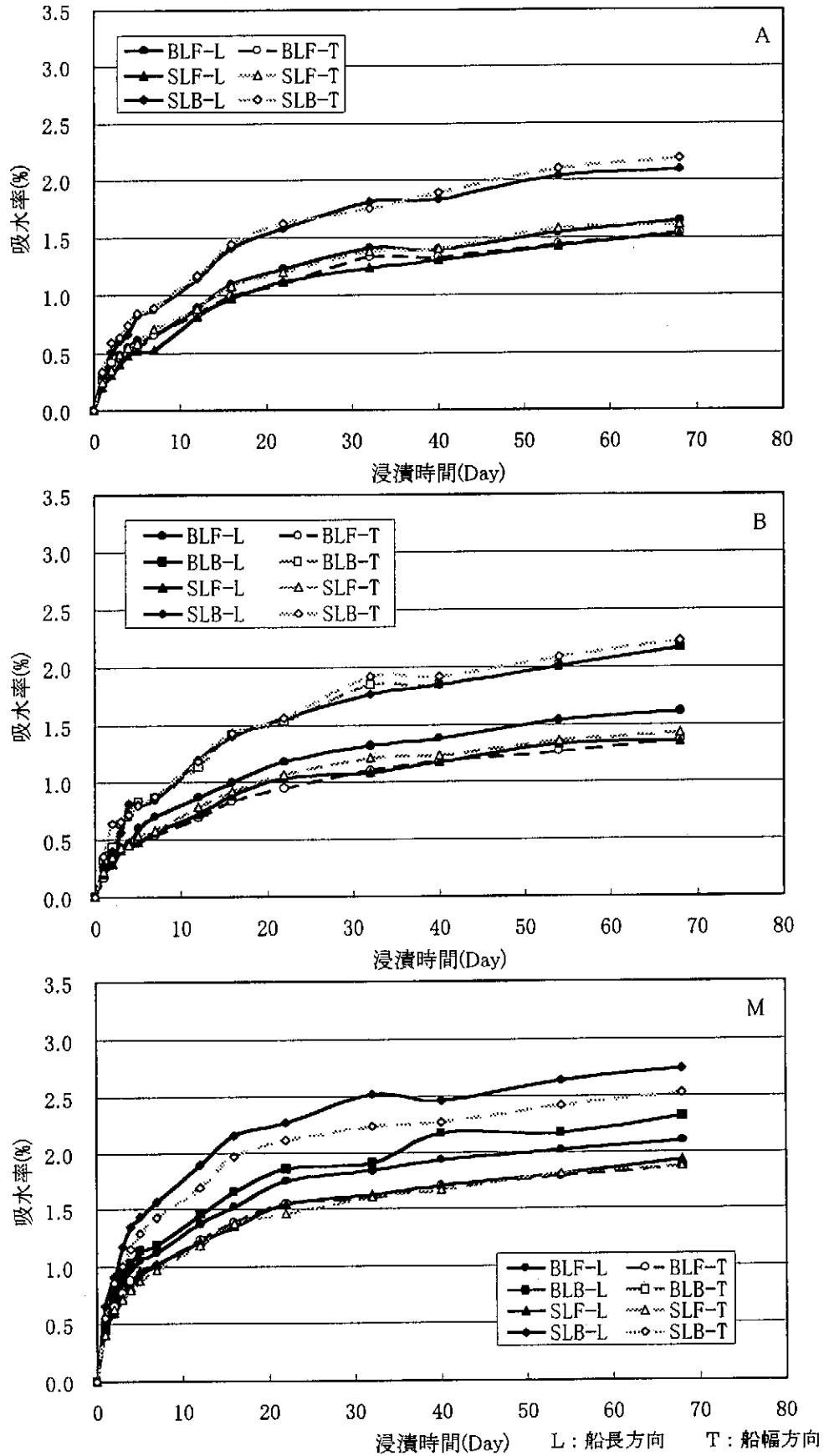


図-3.2.14 吸水特性

### 3-2-3-9 吸水強度

吸水強度は、供試板から所定形状に切り出した試験片中に十分水分が浸透するよう2ヶ月間常温水中に放置し、飽和吸水状態とした試験片を用いて、静的曲げ試験により調べた。

表-3.2.10に曲げ強度特性を示す。また、図-3.2.15は先に示した乾燥状態の試験片で行った結果とあわせて比較している。

バーコル硬さについては、A、B材で、吸水に伴う低下が認められるが、M材についてはほとんど影響はなかった。

曲げ強さ、弾性率は、いずれの試験材も、吸水に伴い減少している。多いものでは1/2程度にまで低下しているものもあり、吸水、特にガラス繊維が露出するき裂等からの吸水に注意を払う必要があることがわかった。ただし、試験片の破壊は引張側のき裂から開始しており、乾燥試験片の場合とほとんど違いは認められなかった。

表-3.2.10 各供試板の曲げ強度特性 (飽和吸水)

供試材	供試板	バーコル硬さ	曲げ強さ(MPa)				曲げ弾性率(GPa)			
			船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
			平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A	BLF	31	81.63	12.16	102.04	6.13	7.87	0.23	9.26	0.25
	SLF	36	84.26	5.33	86.87	9.79	7.37	0.18	8.60	0.73
	BLB	30	84.17	11.33	115.22	20.63	7.70	0.50	9.28	0.75
	SLB	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	BLF	22	83.36	13.74	105.99	12.31	6.53	0.06	8.12	1.15
	SLF	29	71.90	6.47	102.23	5.26	7.74	0.63	9.49	0.85
	BLB	25	88.54	11.82	107.36	16.13	7.20	1.13	8.39	0.58
	SLB	32	—	—	97.95	3.87	—	—	9.67	0.47
M	BLF	45	125.59	11.74	159.82	9.29	6.33	0.58	8.67	0.27
	SLF	44	86.91	—	—	—	5.56	—	—	—
	BLB	43	119.48	13.48	164.01	5.36	6.68	1.24	8.48	0.44
	SLB	48	107.82	12.08	161.75	11.65	6.14	0.36	9.73	0.52

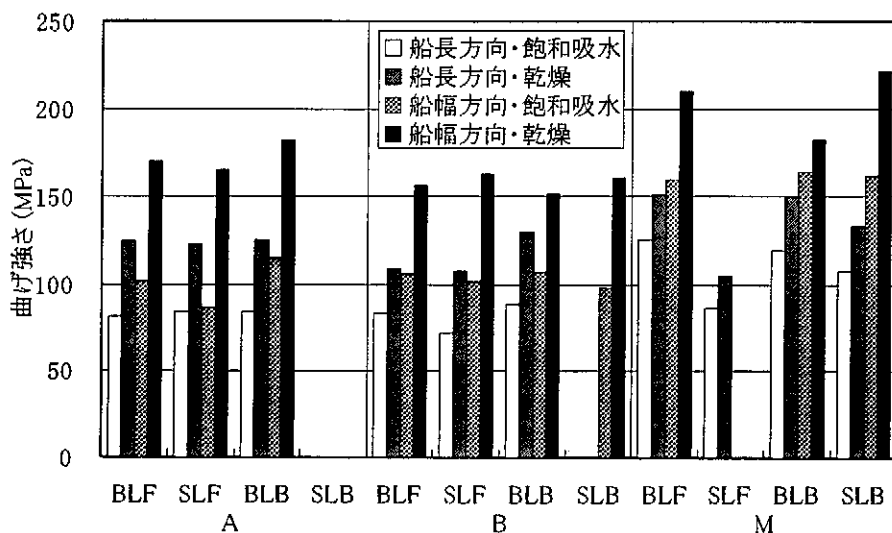


図-3.2.15(a) 吸水に伴う曲げ強さの変化

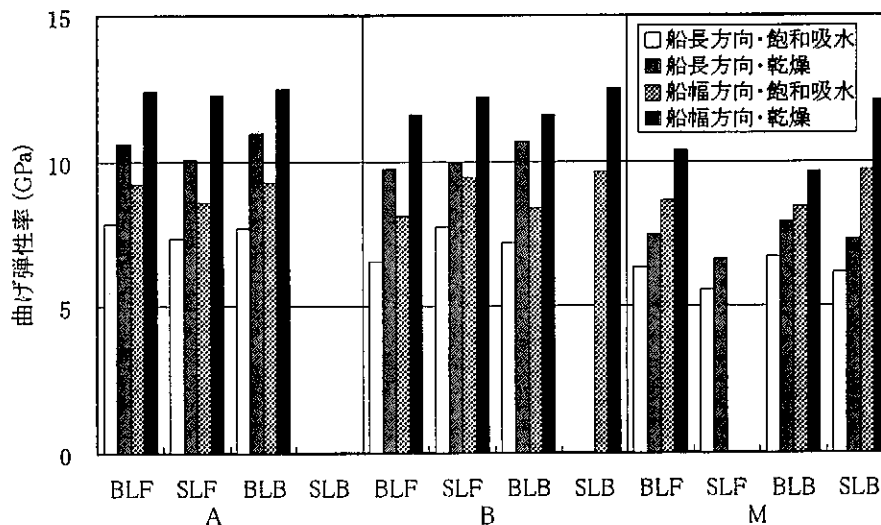


図-3.2.15(b) 吸水に伴う曲げ弾性率の変化

### 3-2-4 まとめ

新規成形材及び経年材から採取したSMC材について強度等の物性を調べ、以下のことを明らかにした。

- ① 同一艇における組成は安定しており、部位によるばらつきも少ない。
- ② プレス成形工程におけるSMCの型内流動により発生すると考えられる強化繊維の配向性の影響により、船長方向よりも船幅方向の強度が大きくなる。とくに、曲げにおいて、この傾向が顕著である。
- ③ 経年材の静的強度は新規成形材と比較して、一部に小さくなるものもあるが、大半は同程度かやや大きくなった。経年材の経過年数や船底材に配置された補強材の効果を考慮すると、経年劣化はほとんど問題ないものと考えられる。
- ④ 衝撃強さは静的強さよりも大きくなることが認められた。
- ⑤ SMC材について、明確な疲労限は認められないが、時間強度は経年材の方が大きく、通常の使用による疲労強度の低下については問題ないと考えられる。ただし、材料表面にき裂が生じると急激に剛性低下を生じる。特に曲げ疲労では剛性低下率が10%を越えると疲労破壊の可能性が高まる。
- ⑥ 飽和吸水した供試材の曲げ強度は吸水前の半分近くにまで低下するものもあった。吸水の大半が露出した繊維-樹脂界面からの水分侵入であり、また、前項の疲労破壊過程を考慮すると、表面き裂の有無が耐久性判断の指針となるであろう。

なお、個々の試験片の採取位置と板厚測定結果を記したマップの一例を資料-3.2.1に、また静的強度試験結果のマップ例を資料-3.2.2~5に示す。

### 参考文献

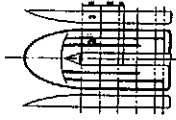
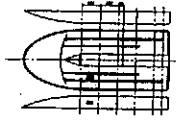
- 1) 後藤卒土民、“わかりやすい実践FRP成形”、工業調査会、(1998)
- 2) 宮入裕夫、“FRP試験マニュアル”、日本規格協会、(1989)
- 3) 吹上紀夫、津島聡、小野正夫、“CFRPの圧縮試験方法の検討”、41st FRP CON-EX'96講演要旨集(1996)

資料-3.2.1 板厚・比重測定結果

板厚 板重 斜字

黑字：(mm) 比重

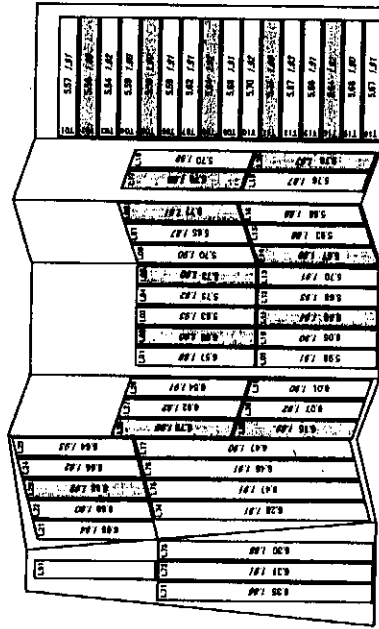
板厚 黑字：(mm) 比重 斜字



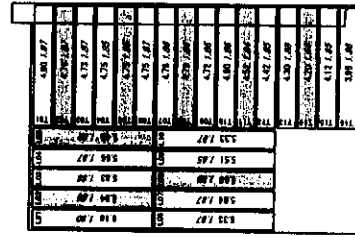
A材

A材

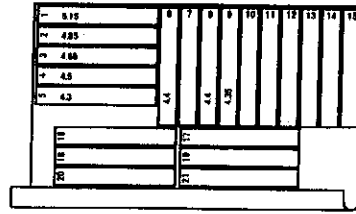
BLF



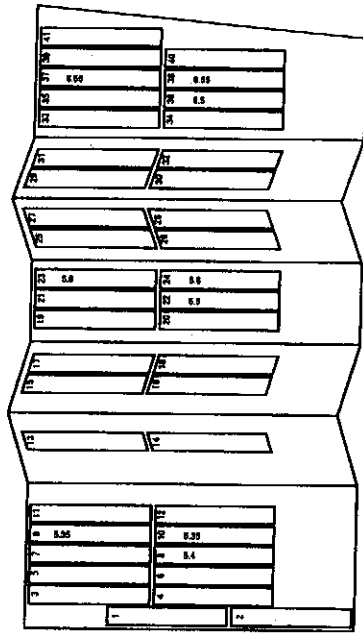
SLF



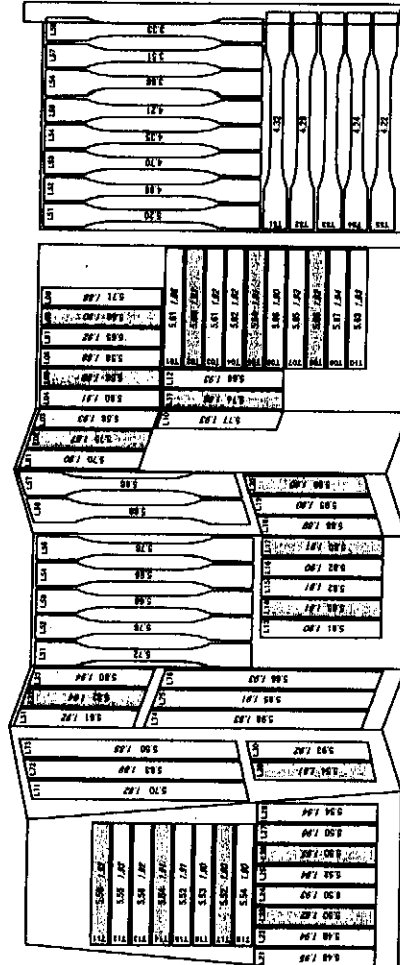
SRF



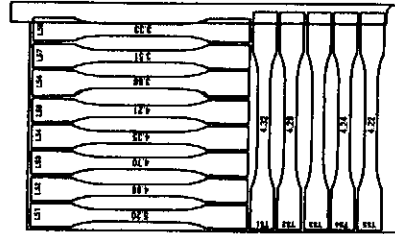
BRF



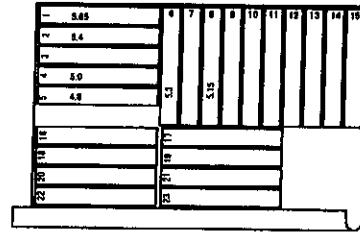
BLB



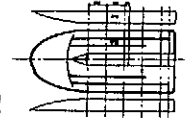
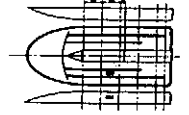
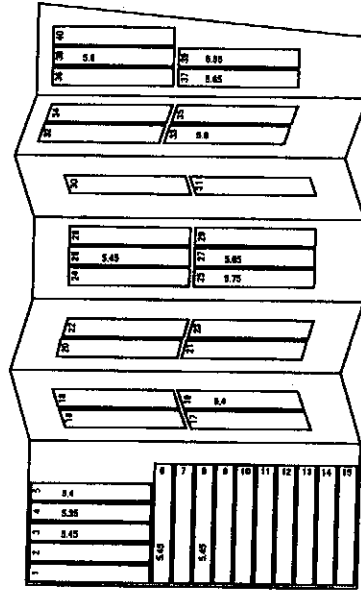
SLB



SRB



BRB



資料一3.2.2 靜的引張試驗結果

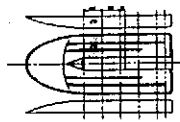
飽和吸水試驗片

引張強度

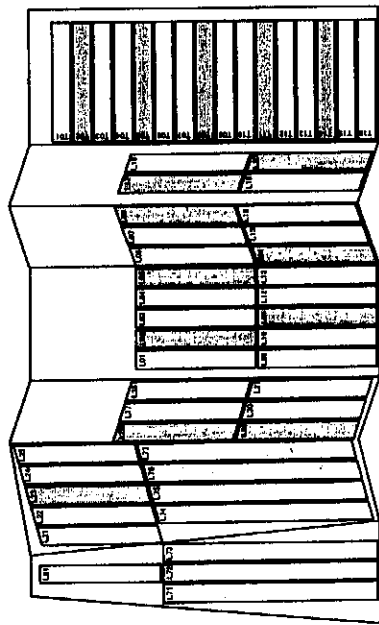
黑字:  $\sigma$  (MPa)

斜字:  $E$  (GPa)

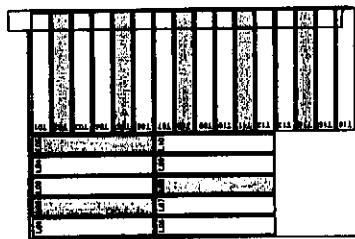
A材



BLF



SLF

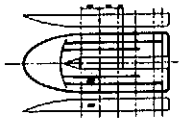


A材

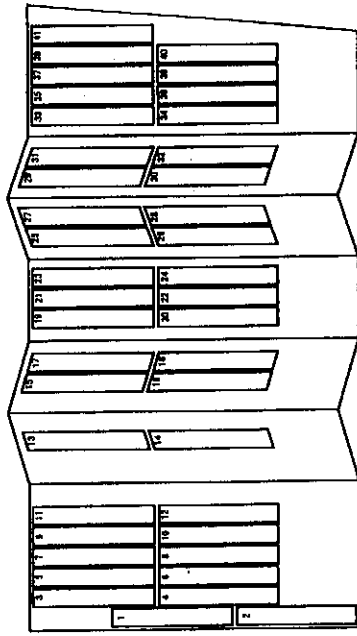
引張強度

黑字:  $\sigma$  (MPa)

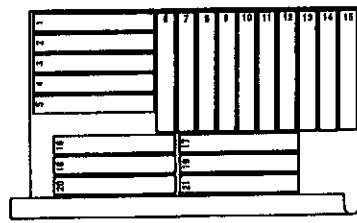
斜字:  $E$  (GPa)



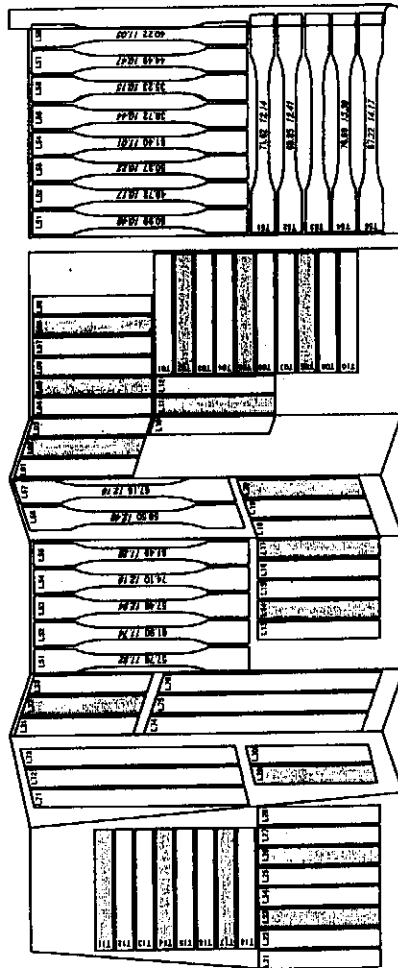
BRF



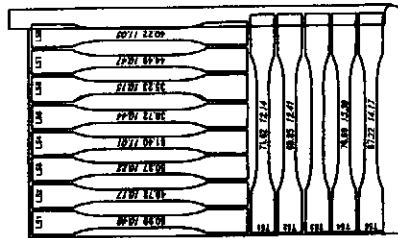
SRF



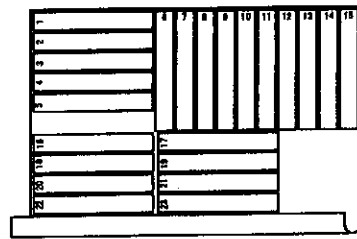
BLB



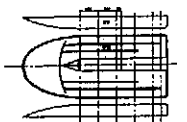
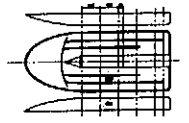
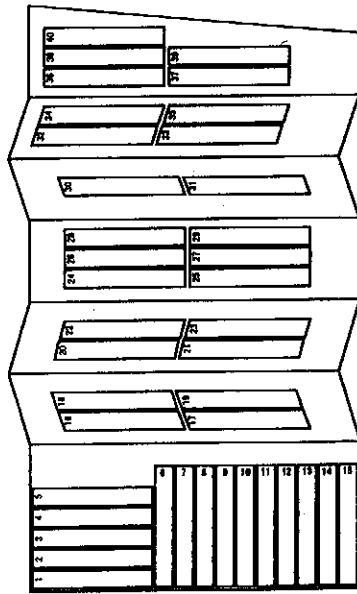
SLB



SRB

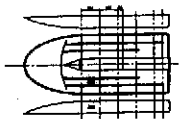


BRB



資料一 3.2.3 靜的壓縮試驗結果

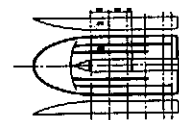
飽和吸水試驗片



壓縮強度

黑字:  $\sigma$  (MPa) 斜字:  $E$  (GPa)

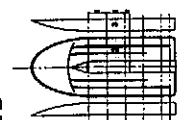
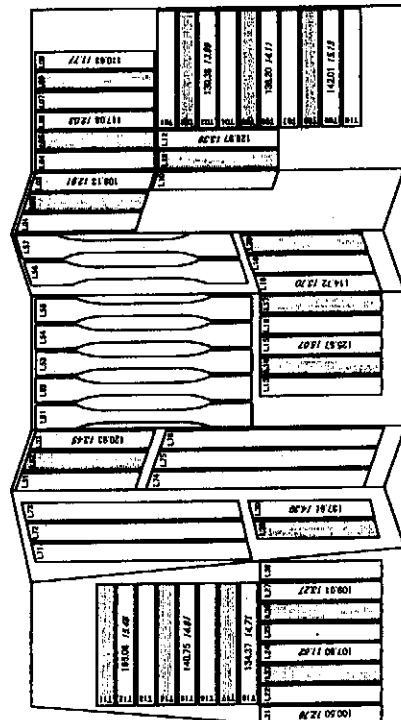
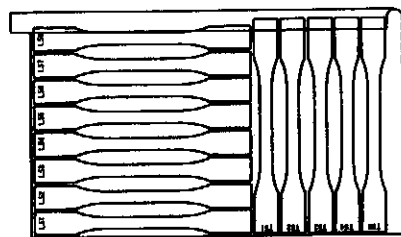
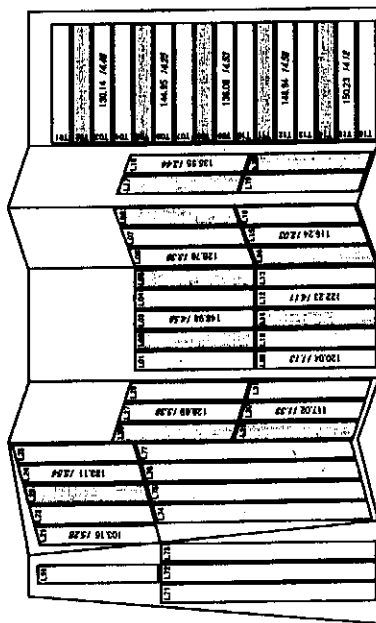
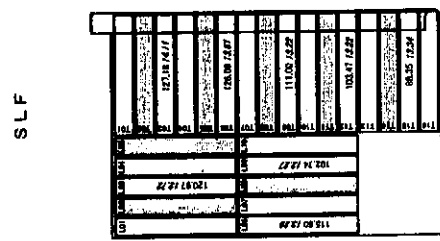
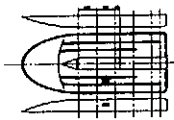
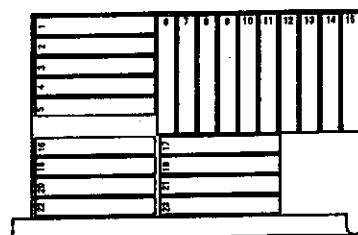
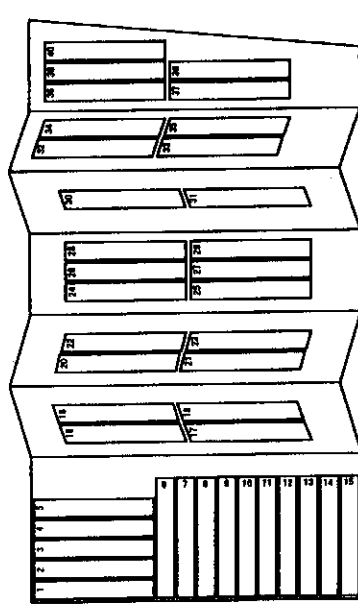
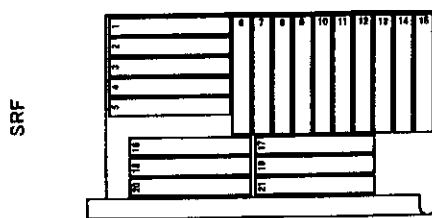
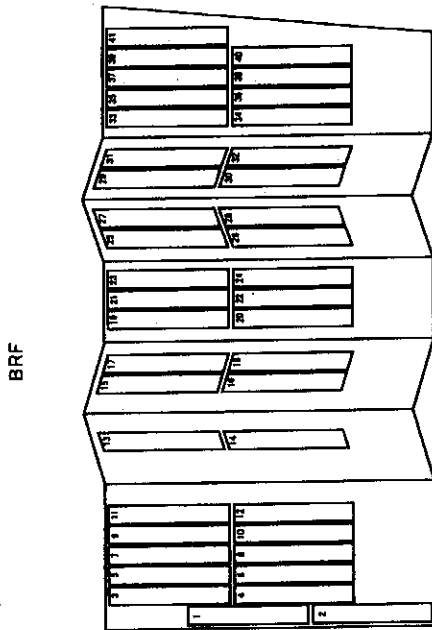
A材



壓縮強度

黑字:  $\sigma$  (MPa) 斜字:  $E$  (GPa)

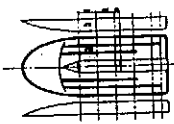
A材





資料-3.2.4 靜的曲げ試験結果

飽和吸水試験片

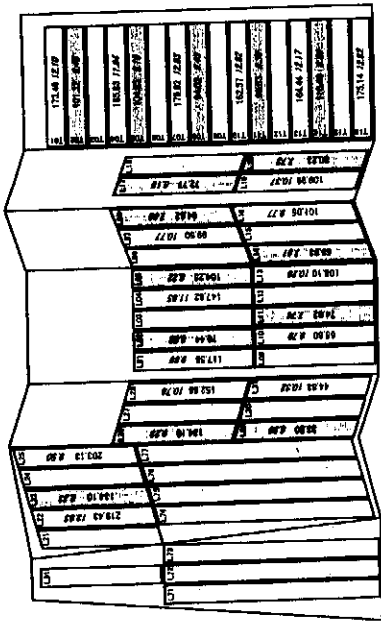


黒字:  $\sigma$  (MPa) 斜字:  $E$  (GPa)

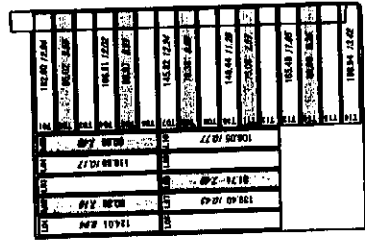
曲げ強度

A材

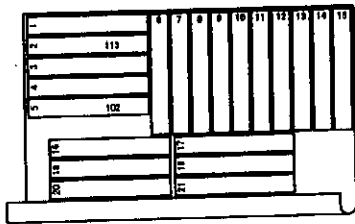
BLF



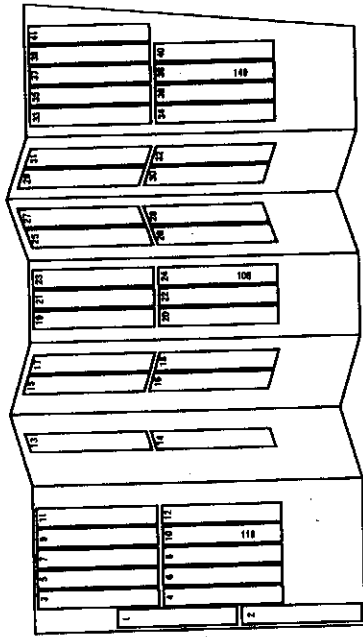
SLF



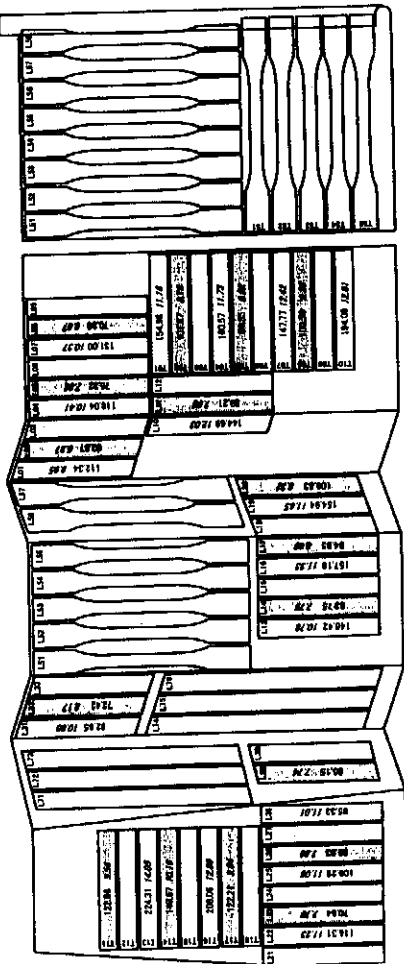
SRF



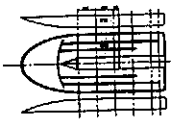
BRF



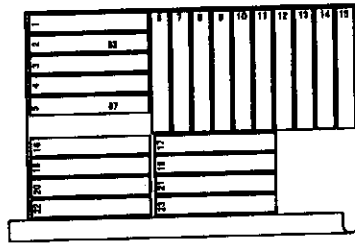
BLB



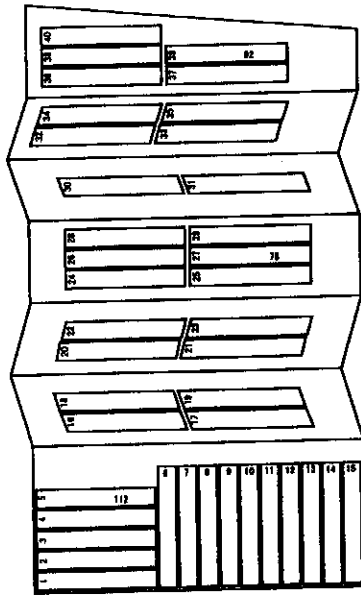
SLB



SRB



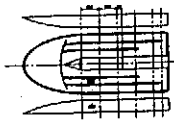
BRB



A材

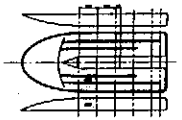
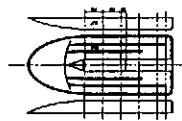
曲げ強度

黒字:  $\sigma$  (MPa) 斜字:  $E$  (GPa)



資料-3.2.5 衝擊試驗結果  
超和吸水試驗片

A材

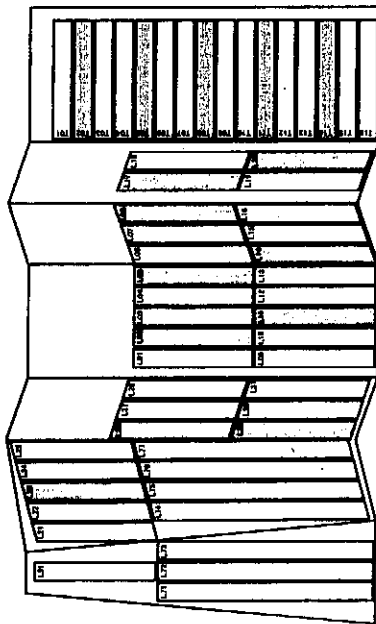


衝擊強度

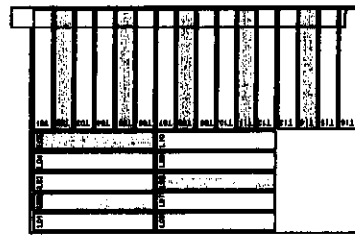
黑字:  $\sigma$  (MPa)

A材

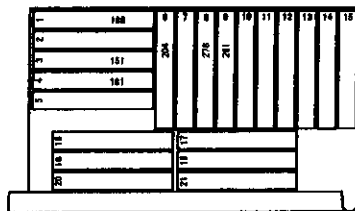
BLF



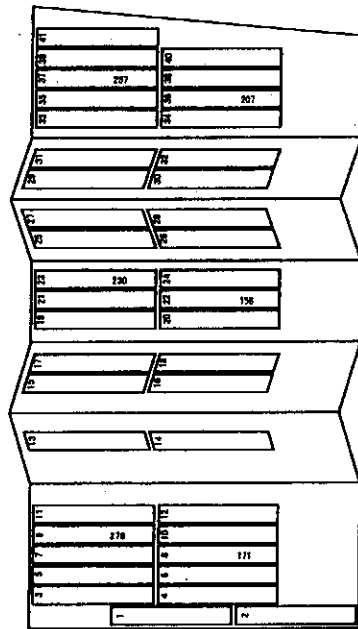
SLF



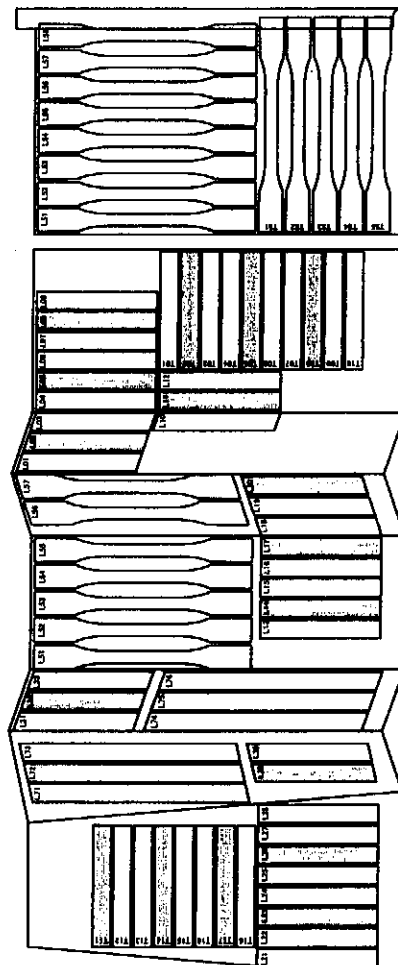
SRF



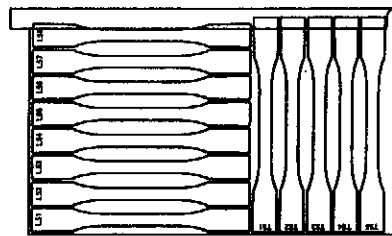
BRF



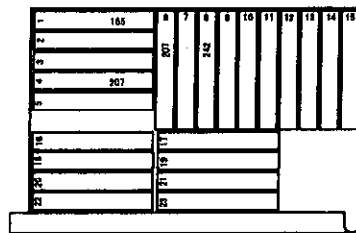
BLB



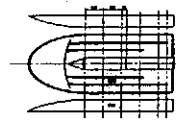
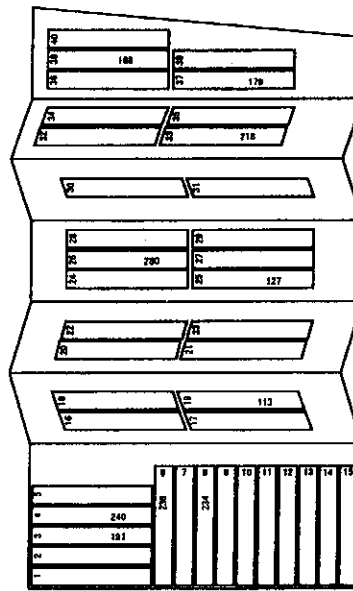
SLB



SRB



BRB



### 3-3 水上オートバイの船殻の構造強度

#### 3-3-1 実施概要

SMC 製の水上オートバイの 1 モデルについて FEM 構造モデルを作製し、構造解析を行ない実際に生じる応力と変形を計算し、SMC 製水上オートバイの構造強度について検討した。

#### 3-3-2 供試モデル

供試モデルは、長さ 2.8m で 2 人乗りの水上オートバイで、最高速度は 90km/h である。表-3.3.1 に供試モデルの主要目を示す。

表-3.3.1 供試モデル主要目

長さ (m)	幅 (m)	全高 (m)	乾燥重量 (kg)	速度 (km/h)	出力 (ps)
2.76	1.07	1.0	265	90	120

供試モデルを汎用構造解析コード MSC/NASTRAN を用いて構造解析を行なう為に、FEM 全体構造モデルを作製した。水上オートバイは、基本的に薄板構造であるので、平面殻要素を使用した。また船底部の発泡充填材は、立体要素を用いてモデル化した。平面殻要素として CQUAD4 (四辺形)、CTRIA3 (三角形)、立体要素として HEXA 等の種々の要素を使用した。表-3.3.2 に使用した要素数と節点数を示す。

表-3.3.2 モデルの節点数と要素数

総節点数	総要素数	四辺形要素	三角形要素	立体要素
23,574	27,574	20,897	2,444	4,233

ここでは板の曲げ歪が支配的なので、材料定数は 3-2-3-4 節の表-3.2.7 の A 材の曲げ強さと弾性率を参考にして決定した。表-3.3.3 に材料定数を示す。この材料定数は、船底外板の値であり、本来、場所によって材料定数は異なるが、実験データがないので、ここではモデル全体にわたって、この値を使用した。発泡充填材の材料定数は、正確な値が不明の為、ここでは、文献[1]を参考にして、 $19.6\text{N/mm}^2$ 、 $196\text{N/mm}^2$ 、 $1,960\text{N/mm}^2$  の 3 ケースを仮定し、充填材なしの場合と比較し、充填材の効果を確認した。以後の計算には、 $19.6\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.25 と仮定して計算した。供試船は、基本的に船殻 (hull)、内部殻 (inner hull)、甲板 (deck) の 3 個の構造体から構成され、

表-3.3.3 SMC 材料定数

船長方向縦弾性係数	$10,290\text{N/mm}^2$
船長方向破壊応力	$120\text{N/mm}^2$
船幅方向縦弾性係数	$12,250\text{N/mm}^2$
船幅方向破壊応力	$165\text{N/mm}^2$
ポアソン比	0.3



図-3.3.1 FEM 全体構造モデル

これらを接着剤により接合して、全体構造が構成されている。図-3.3.1に全体構造モデルを示す。構造モデルは、SMC材料と充填材で構成されているもののみをモデル化し、主機等の機械類は、重量分布で負荷している。

3-3-3 計算精度の確認実験



写真-3.3.1 実機構造モデル

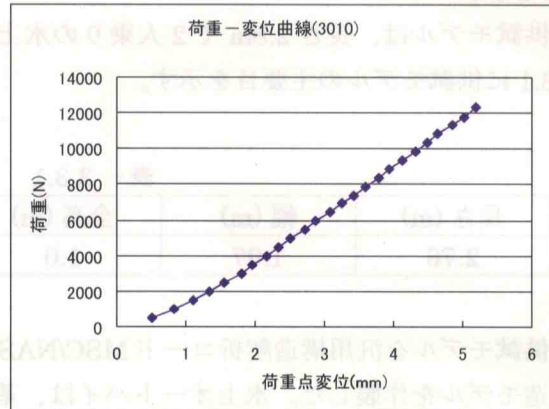


図-3.3.2 荷重-変位曲線



写真-3.3.2 実験状況 (縦曲げ試験)

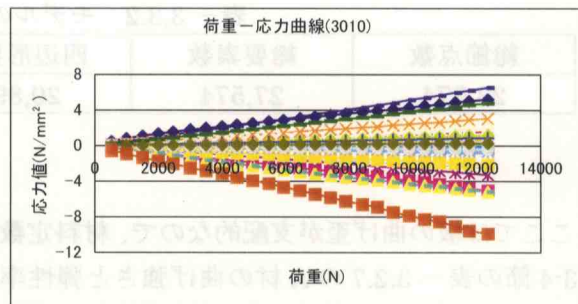


図-3.3.3 荷重-応力曲線

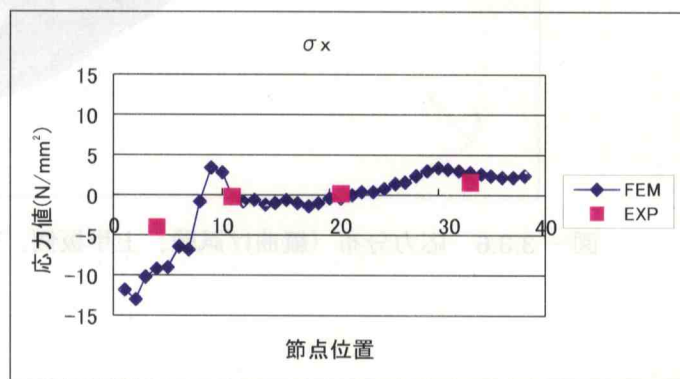
計算には汎用構造解析コードのMSC/NASTRANを使用した。計算精度を確認するために機械類等を取り除いた実機の構造モデルを使用して縦曲げ試験を行なった。実験は船船舶技術研究所の500トン構造試験機で行なった。写真-3.3.1に構造モデルと歪ゲージの貼付位置、写

表-3.3.4 荷重点の上下変位の比較 (9,800N 負荷, X=1,500mm)

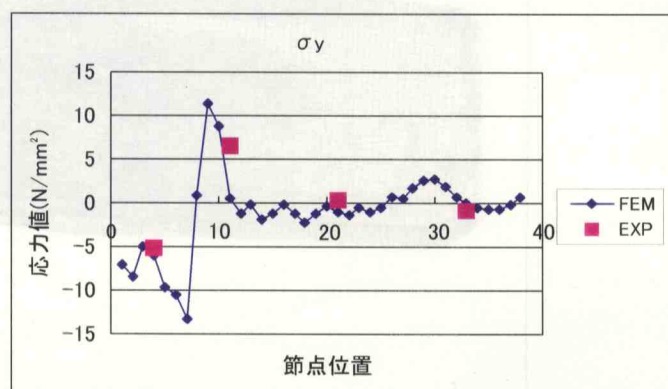
	実験値	計算値
荷重点変位	3.6mm	3.2mm
比率	1.13	1

真一 3.3.2 に実験状況を示す。荷重は船底の中央部分よりもやや前方 (X=1,500mm) のキール板が最も凸な位置に、加圧盤により上方から集中荷重をかけた。支持治具により船首先端のガンネル部分と船尾甲板部分を単純支持し、3点縦曲げ状態の弾性試験を行なった。データ計測は490N刻みで行ない、荷重は約12kN迄負荷した。計測項目は荷重、負荷点の上下方向変位、船体に2方向歪みゲージを添付し、1回の計測で合計30項目を計測した。左右対称なので、右舷を中心に歪みゲージを貼付した。図一 3.3.2 に荷重点の荷重-変位曲線を示す。横軸は荷重点の上下変位、縦軸は荷重を示す。荷重が2,000N以上になると、弾性変形をしているのが分かる。図一 3.3.3 に荷重-応力曲線を示す。横軸に荷重値、縦軸に各計測点の応力値を示す。いずれも直線的に変化しており弾性変形しているのが分かる。次に実験値と計算値の比較を示す。表一 3.3.4 に荷重点の上下方向変位の比較を示す。実験値は最初変形が大きく、その後弾性変形となっているので、最初から弾性変形していると仮定して、値を補正している。実験値のほうが1割程大きい荷重のかけ方が実験と計算では、若干異なるので、ほぼ妥当な結果といえる。

図一 3.3.4 と図一 3.3.5 に応力分布の比較の例を示す。いずれも荷重位置断面 (X = 1,500mm) 船底外板の、船長方向応力 ( $\sigma_x$ ) と船幅方向応力 ( $\sigma_y$ ) の分布である。図の FEM 表示が計算値、EXP 表示が実験値である。図の左端が船体中心、右端が船側である。いずれも船幅の1/4位までは、変化が大きいが、それ以上になると、応力値は小さくなる。実験値の方が計算値よりも少し小さいが、両者は、ほぼ対応が取れているといえる。これを見ると、変形と応力が、船底の荷重点の近傍ではやや大きいものの、少し離れた位置では、応力も変形も急に小さくなるのが分かる。図一 3.3.6 に上甲板、図一 3.3.7 に船底部分のフォン・ミーゼス (Von-Mises) 応力分布 \*解説参照 を示す。応力値は荷重位置近傍では、応力分布が激しく変化しており、局部変形もしているが、荷重点から少し離れると、応力、変形とも急激に小さくなっている。鋼船のように全体の変形で応力を分担するのでなく、局部的な変形により、応力を分散している。この実験と計算の比較により、MSC/NASTRAN が解析に使用できることを確認した。



図一 3.3.4 船長方向応力分布の計算値と実験値の比較 (X = 1,500mm 断面、荷重 : 1tonf)



図一 3.3.5 船幅方向応力分布の計算値と実験値の比較 (X = 1,500mm 断面、荷重 : 1tonf)

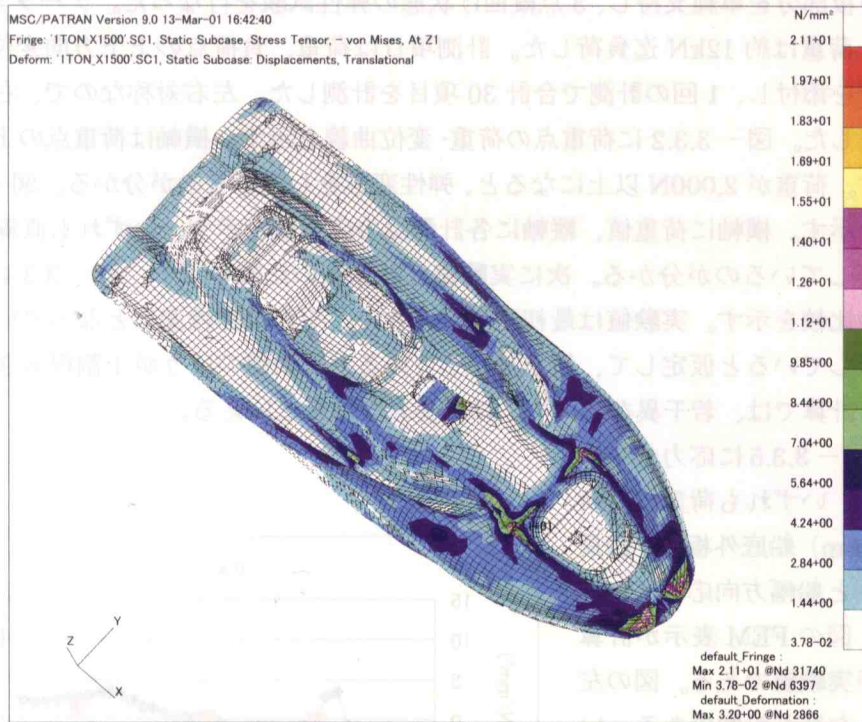


図- 3.3.6 応力分布 (縦曲げ試験、上甲板側、Von-Mises 応力、荷重 : 1tonf)

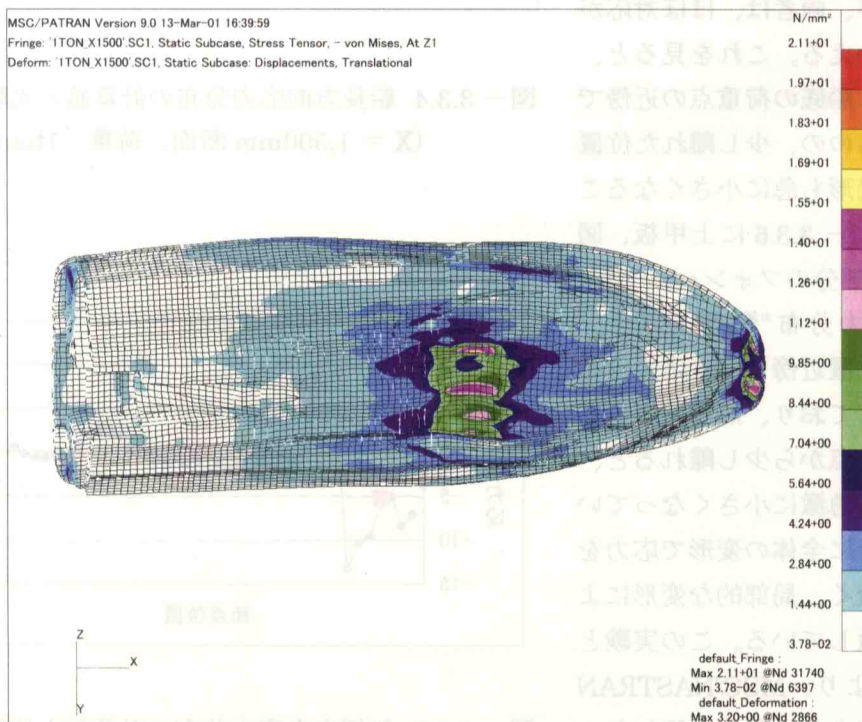


図- 3.3.7 応力分布 (縦曲げ試験、船底外板側、Von-Mises 応力、荷重 : 1tonf)

解説：フォン・ミーゼス (Von-Mises) 応力について

フォン・ミーゼスの等価応力  $\sigma_{vm}$  は、薄板のような平面応力状態 ( $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ) とみなせる場合は以下の式で与えられる。

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

(ここで  $\sigma_x, \sigma_y$  : X方向、Y方向の直応力、 $\tau_{xy}$  : せん断応力)

フォン・ミーゼスの等価応力は、板やシェル等の降伏判定の応力として一般に用いられている。フォン・ミーゼス応力は、全ての直応力とせん断応力が含まれているので、相対的にどの部分が総合的に歪エネルギーが高いか(総合的に最も厳しいか)を判定するのに役立つ。また直応力がプラス、マイナスの符号を持っているのに対し、プラス側にしかない。また一つの応力分布で応力分布の傾向を見ることができる利点がある。

3-3-4 発泡充填材が、強度に及ぼす効果

供試モデルは、浮力材として、船底外板とインナーハルの間にポリウレタン性の発泡充填材が注入されている。この材料が撓みや応力に及ぼす効果を調べた。本船に使用されている充填材の材料定数が不明なので、文献 [1] を参考にして、ヤング率を  $19.6\text{N/mm}^2$ 、 $196\text{N/mm}^2$ 、 $1,960\text{N/mm}^2$  の3種類に仮定し、充填材無しの場合と合わせて、2.5mの高さから落下させた時の荷重に対して最大応力と最大撓みを比較した。表-3.3.5に結果を示す。充填材がない場合に比べて、弾性定数  $19.6\text{N/mm}^2$  の場合は、最大撓みで約10%、応力で20%ほど低下しており、充填材の効果が確認できる。 $196\text{N/mm}^2$  の場合は、撓みで20%、応力で30%ほど低下している。 $1,960\text{N/mm}^2$  の場合は、最大応力はほとんど  $196\text{N/mm}^2$  の材料と差がない。発泡充填材の剛性は、余り大きくしても効果が少ない事が分かる。ここでは、最も弱い  $19.6\text{N/mm}^2$  の弾性定数を用いて以下の計算を行った。

表-3.3.5 発泡充填材の剛性が応力、変位に及ぼす効果

発泡材弾性定数	最大撓み (mm)	撓み比 ( $\delta/a$ )	最大応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	応力比 ( $\sigma/\sigma_a$ )
発泡材無し (a)	10	1	64.3	1
$19.6\text{N/mm}^2$	9	0.9	50.2	0.78
$196\text{N/mm}^2$	7.9	0.79	45.7	0.71
$1,960\text{N/mm}^2$	6.8	0.68	46.1	0.72

### 3-3-5 荷重設定法

現行の水上オートバイ特殊基準<sup>2)</sup>では、実機を2.5 m高さから自然落下させて、艇体に亀裂や破壊がないことを、目視で確認することになっている。一方、実機は波浪中を高速航行する為に、船底外板に波浪衝撃荷重を受ける。実機が波浪中航走時に受ける衝撃荷重と、2.5 m落下試験時に作用する荷重の関係を明らかにし、最近の高速航行条件でも、現行の試験法でよいのかどうか検討する必要がある。

荷重は、本来実機実験で求めるべきであるが、今回は諸般の事情から、実験ができなかった。また過去に行なわれた水上オートバイの落下試験の結果によると、落下時のわずかな姿勢の変化により、計測された衝撃加速度が大きく変動し、落下高さとの相関を実験的に明らかにするのも困難な面がある。

そこで今回は、理論計算により衝撃加速度、衝撃水圧を推定した。また実機計測に替わるものとして、以前に供試モデルとほぼ同型船について行なわれた落下試験及び波浪中航走時のデータを参考に使用し、理論計算の値と比較することにした。衝撃加速度は船体中央部付近と、船首付近の2箇所の船体上下加速度を計測している。図-3.3.8に加速度計測位置を示す。ch1が船首部付近、ch2が船体中央部付近である。

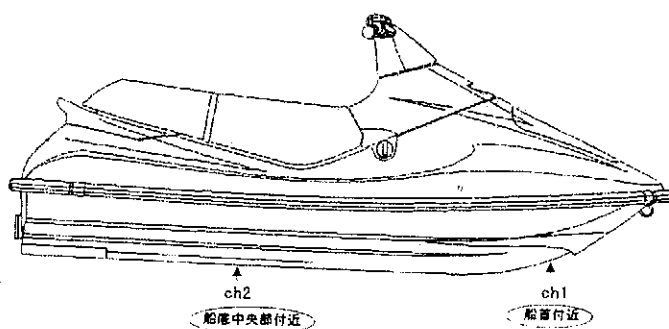


図-3.3.8 加速度計位置 (ch1, ch2)

#### 3-3-5-1 衝撃荷重計算法

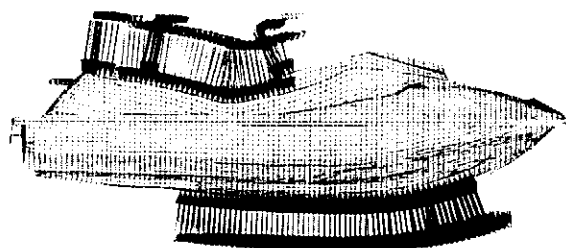


図-3.3.9 荷重載荷状態 (落下試験)

Wagner の理論を、Runge-Kutta 法を用いて、楔形 2 次元断面が水面に突入する際の、時々刻々楔に作用する加速度、最大水圧、平均水圧、荷重幅等のシミュレーション計算を行ない、加速度が最大になる瞬間の値を求め、これをその断面に作用する最大衝撃加速度、最大衝撃水圧、荷重幅とした。<sup>3,4)</sup>

船長方向の各位置について、0.2 m 間隔で各横断面に作用する衝撃荷重を計算し、これを平均衝

表-3.3.6 落下試験の衝撃加速度計測値 (最大値)

落下高さ	順番	向き	ch1	ch2
0.5m	1	+	3.5	3.7
		-	9.5	26.9
	2	+	4.7	10.2
		-	2.3	2
1.0m	3	+	16.8	11.1
		-	1.5	125
	4	+	10.9	12
		-	32.7	3.5
1.5m	5	+	3.7	57.4
		-	5.6	119.4
	6	+	21.8	13.2
		-	2.5	190 以上
2.0m	7	+	5.9	9.9
		-	6.4	190 以上
	8	+	8.8	9.9
		-	3.2	170.4

注) + 符号: 上向き 加速度単位: g



撃水圧に換算し、これらが船長方向の各断面に同時に作用すると仮定し、所定の位置に分布荷重を負荷して静解析を行ない、モデルに作用する応力と撓みを計算した。慣性力を考慮する為に、NASTRANのINRELという機能を使用し、境界条件は全断面自由とした。エンジン等の機械類や乗船者は、分布荷重として所定の位置に負荷した。図-3.3.9に荷重の載荷状態を模式的に示す。

### 3-3-5-2 落下試験の衝撃荷重計測例と計算値

水上オートバイ特殊基準では、2.5 mの高さからの自由落下試験を行ない、亀裂等が発生しないことを確認することになっている。

表-3.3.6に、過去に図-3.3.8に示すモデルについて実施された落下試験時の衝撃加速度の計測値(最大値)を示す。落下高さを0.5 mから2 m迄0.5 m刻みで変えて実験を行なっている。+符号が上向きの加速度である。ch1が船首付近、ch2が船体中央部付近である。かなり計測値がばらついている。下向きの加速度(-符号)は特にばらつきが大きく、100 g以上の値が計測されている。この原因としては船体の共振加速度や、船底の他の部分が先に着水したことによる船体の回転モーメントによる加速度を計測していること等が考えられるが、はっきりとした原因は不明である。

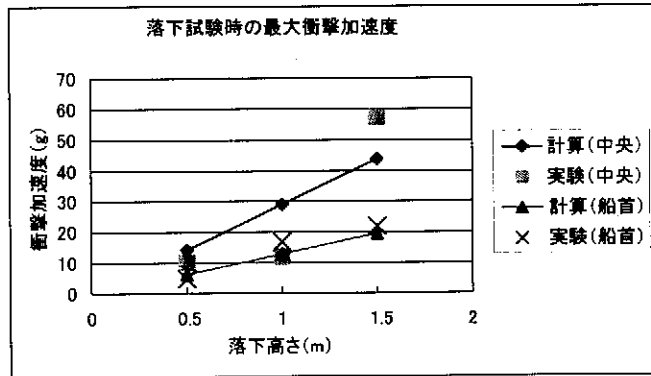


図-3.3.10 落下試験最大衝撃加速度の比較

実験値と比較する為に、表-3.3.7と表-3.3.8に、3-3-5-1節で述べた方法により求めた落下高さを0.5 mから2.5 m迄0.5 m刻みで変えた場合の、供試モデルの船体中央部付近と、船首部付近に発生する最大衝撃加速度、最大衝撃水圧、平均水圧の計算値を示す。荷重幅ほどの断面でもほぼ全幅の20%であった。このときの船底傾斜角は、中央部付近で10度、船首部付近で20度を用いている。

表-3.3.7 船体中央部付近の衝撃加速度、衝撃水圧、平均水圧 (計算値)

落下高さ (m)	最大衝撃加速度 (g)	最大衝撃水圧 (N/mm <sup>2</sup> )	平均水圧 (N/mm <sup>2</sup> )
0.5	14.2	0.29	0.07
1	29.0	0.57	0.14
1.5	43.7	0.84	0.2
2	58.3	1.09	0.26
2.5	73.3	1.37	0.33

表-3.3.8 船首部付近の衝撃加速度、衝撃水圧、平均水圧 (計算値)

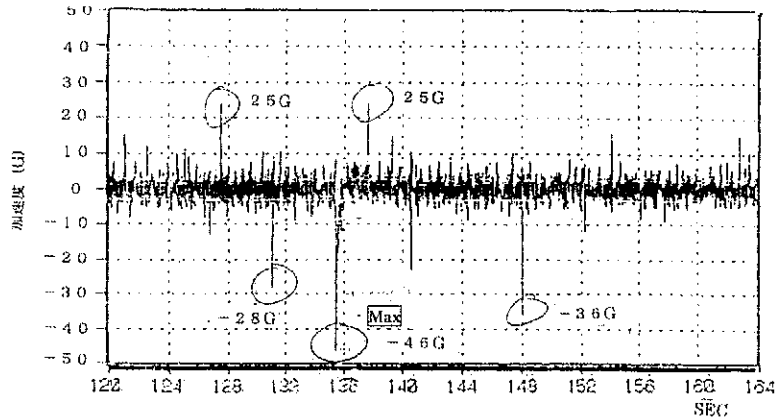
落下高さ (m)	最大衝撃加速度 (g)	最大衝撃水圧 (N/mm <sup>2</sup> )	平均水圧 (N/mm <sup>2</sup> )
0.5	6.2	0.07	0.03
1	12.8	0.14	0.06
1.5	19.4	0.2	0.09
2	26.0	0.27	0.12
2.5	32.7	0.34	0.15

表－3.3.6を見ると、落下高さが大きくなると計測値が不安定になる。この原因としては、落下中に艇体の姿勢が変化する等が考えられる。そこで落下高さ1.5m以下の試験について計測値(上向きの加速度)のうち大きいほうの値のみを採用して、これを計算値と比較したものを図－3.3.10に示す。船体中央部はややバラツキがあるが、船首部は計算値と実験値は良い一致を示している。これより3-3-5-1節で示した計算方法はほぼ正しい値を与えると考えられる。

### 3-3-5-3 波浪中航走時の衝撃加速度計測例

次に同型船の波浪中航走試験時の衝撃加速度(船体上下方向加速度)の計測記録の例を示す。

図－3.3.11に船首部分船体上下方向加速度(ch1)の時系列計測記録の1例を示す。図の横軸は時間(秒)、縦軸は加速度(g)を示す。横軸の1目盛が4秒で全部で44秒間のデータである。



図－3.3.11 加速度計測例(船首部加速度計ch1)

符号は+が上向き、即ち船底が上に突き上げられる加速度である。

常時±5g程度の衝撃加速度が発生しており、また4～5秒間隔で±20g以上の衝撃加速度を計測している。この時の計測条件は、波高50cmのラフ海面を70km/hの速度で7分間航走している。表－3.3.9に衝撃加速度計測値の最大値を、表－3.3.10に衝撃加速度の発生頻度を示す。表－3.3.9によると、ラフ海面では船体中央部(ch2)で上向きの最大衝撃加速度40g、船首部で29gを記録している。衝撃加速度の大きさ、発生頻度とも、船体中央部の方がやや大きくなっている。これは船底断面形状が、中央部のほうが扁平な為だと考えられる。

表－3.3.9 衝撃加速度計測値(最大値)

	ch1(船首)	ch2(中央)
ラフ水面(海水) 波高約50cm	+29g	+40g
	-48g	-56g
平水面(湖)	+16g	+21g
	-31g	-14g

表－3.3.10 衝撃加速度発生頻度(7分間)

		+10g以上	-10g以上	+20g以上	-20g以上
ラフ水面 (波高:50cm)	ch1	70～80	23	5	6
	ch2	200以上	200以上	8	10
平水面(湖)	ch1	17	20	0	0
	ch2	90～100	30～40	1	0

一方、供試モデルを用いた理論計算によれば、1.5m高さからの落下試験を行なった時の船体中央部及び船首部分に生じる最大衝撃加速度は、船体中央部付近で約44g、船首部付近で19gで

あり (表- 3.3.7,8 参照)、波浪中航走時に計測された最大衝撃加速度とほぼ同じ大きさになる。

### 3-3-5-4 波浪中航走時の衝撃荷重の計算値

波浪中航走時の荷重分布については、日本海事協会の高速度船規則の5編2章の設計荷重を参考にして荷重を推定した<sup>5)</sup>。この規則は50m以下の単胴排水量型の船舶に適用する規則であり、本モデルのように、船長2.5mと短く、船速が90km/h (フルード数  $Fn=5.5$ ) もの高速度で航走する場合に適用するには、やや不都合な点もあるが、この規則を使用した。この規則では、船底の衝撃速度は下記の3つの速度成分の和で与えられる。

① 船体運動による船体の上下方向速度 ( $V_{hz}=0.025 \pi \omega e \cdot Lwl/2$ )、② 波面の上下方向速度 ( $V_w=\pi H_w/T$ )、③ 船の前進速度とバウラインの傾斜角の積 ( $V_s=V_{s0} \cdot \tan \theta$ )。

水上オートバイは、船首を上げた状態で高速滑走するので、この他に、④ 航走トリムによる前

進速度 ( $V_s=V_{s0} \cdot \tan \tau$ )、及び ⑤ 跳躍による落下速度 ( $V_z=\sqrt{2gH_w}$ ) の影響を考慮する必要がある。船体中央部分では、バウラインの傾斜角は零とした。航走時のトリム角  $\tau$  は、観察では3度であるが、安全側をみて4度とした。海象は波長  $\lambda =10m$ 、波高  $H_w= \lambda /20$  で50cm、前進速度  $V_{s0}$  は最高速度の90km/hを仮定した。

一般に水上オートバイは、排水量型船舶のように縦揺れはほとんどせずに、船首をやや上げた状態で滑走する。一般の小型船舶では、海象と船速が決まれば、ほぼ一定の条件が決まるが、水上オートバイは、多種多様な航走状態が存在する。水面上にジャンプすることも有るし、レースのように極限状態で使用されることもある。したがってどのような状態を想定すべきなのかを一概に決定することができないが、ここでは下記のように、二つの走行パターンを仮定した。<sup>4)</sup>

即ち

- ・ CASE(a) 跳躍せずに速度90km/hで、縦揺運動をしながら航走する。(上記①~④考慮)
- ・ CASE(b) 波高50cm分跳躍して、波の谷に航走姿勢一定で突入する。(上記③~⑤考慮)

CASE (a) の航走時の定常姿勢は、トリム角4度で、前部喫水の位置は後端から1.8mの位置と仮定し、船底外板の没水面積に対して波浪荷重を負荷した。CASE (b) は衝撃速度に相当する自然落下高さを求めて、3-3-5-1節の方法により、船底各断面の衝撃荷重を計算した。負荷位置は、船底外板が全通している位置とし、後端は船尾から0.7m位置、前端は、航走時は船尾から1.8mの位置迄、落下試験では、船底の傾斜のきつくなる2.1m迄の位置である。(図-3.3.9参照)。

図-3.3.12に船底衝撃速度の船長方向分布の比較を示す。落下試験では、速度は7m/secと一定なのに対し、跳躍しないCASE(a)の場合は、縦揺れによる速度と、船底のバウライン傾斜角が前方のほうが大きいため、前方に行くほど急激に大きくなる。また50cm跳躍する

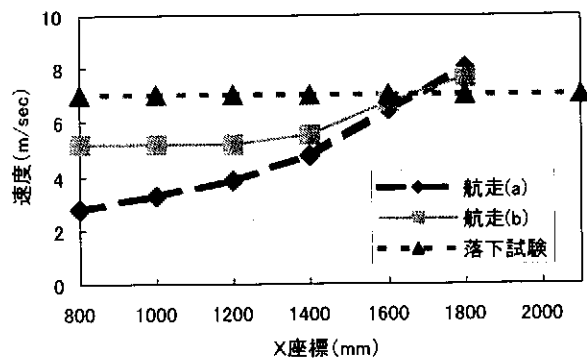


図- 3.3.12 衝撃速度の船長方向分布の比較

CASE(b) の場合は、バウラインの傾斜角の影響で、前の方が大きくなっている。衝撃水圧は、速度の自乗に比例するので、航走時の荷重分布は前方に行くほど急激に大きくなる。

表- 3.3.11 に上向き衝撃荷重の計算値と、最大衝撃加速度の計算値と計測値の比較を示す。落下試験では船体重量の 16 倍以上、最も荷重の小さい航走 CASE(a) でも船体重量の約 6 倍の荷重が作用している。また衝撃加速度の計算値と波浪中航走試験計測値を比較すると、航走 CASE(b) が波浪中の計測値とほぼ同じ大きさであることが分かる。

表- 3.3.11 衝撃荷重、最大衝撃加速度の計算値/計測値 比較

計算条件	衝撃荷重 (kN)	衝撃荷重 / 船体重量	衝撃加速度 (g)	
			中央部	船首部
2.5m 落下試験	56.3	16.4	73.3	32.7
航走 CASE(a)	20	5.8	21.7	42.7
航走 CASE(b)	36.3	10.6	40	39.5
航走試験計測値 (表- 3.3.9 参照)	-	-	40	29

### 3-3-6 解析結果と考察

図- 3.3.13 と図- 3.3.14 に 2.5m 落下試験の NASTRAN による構造解析結果を示す。この図には応力と変形を同時に表示している。図- 3.3.13 に甲板部分、図- 3.3.14 に船底部分のフォン・ミーゼス応力分布を示す。最大応力で約  $50\text{N/mm}^2$  を示しているが、これはハット型スティフナの頂板に生じている(図- 3.3.15 参照)。図- 3.3.13 より、上甲板はほとんどの部分が  $17\text{N/mm}^2$  以下であり、小さい応力分布となっている。図- 3.3.14 の船底応力分布は、衝撃水圧の作用している部分は  $20\text{N/mm}^2 \sim 30\text{N/mm}^2$  程度の応力が出ているが、少し外れると  $10\text{N/mm}^2$  程度に低下している。変形は、船底外板の水圧が作用している部分で数mm変形しているが、荷重点から少し離れると弾性変形は小さい。船底外板及びインナーハルの局所的な変形により、衝撃エネルギーを吸収し、デッキ部分は、ほとんど寄与していないことが分かる。また船首尾部分も変形、応力とも非常に小さい。また図- 3.3.15 は、デッキ部分を切断して、内部のインナーハルの応力分布と変形状態を示したものである。インナーハルハット型スティフナ頂板の応力が  $30\text{N/mm}^2 \sim 50\text{N/mm}^2$  と大きく、構造材として十分機能しているのがわかる。

図- 3.3.16 と図- 3.3.17 に航走状態 CASE(a) の応力分布を示す。図- 3.3.13、図- 3.3.14 の落下試験と同じような分布となっている。最大応力は約  $20\text{N/mm}^2$  で、やはりインナーハルのハット型スティフナの頂板付近に生じている。ここでは図示しないが、航走状態 CASE(b) (50cm 跳躍) の場合は、値は異なるが落下試験とほぼ同じような応力分布、変形状態となった。

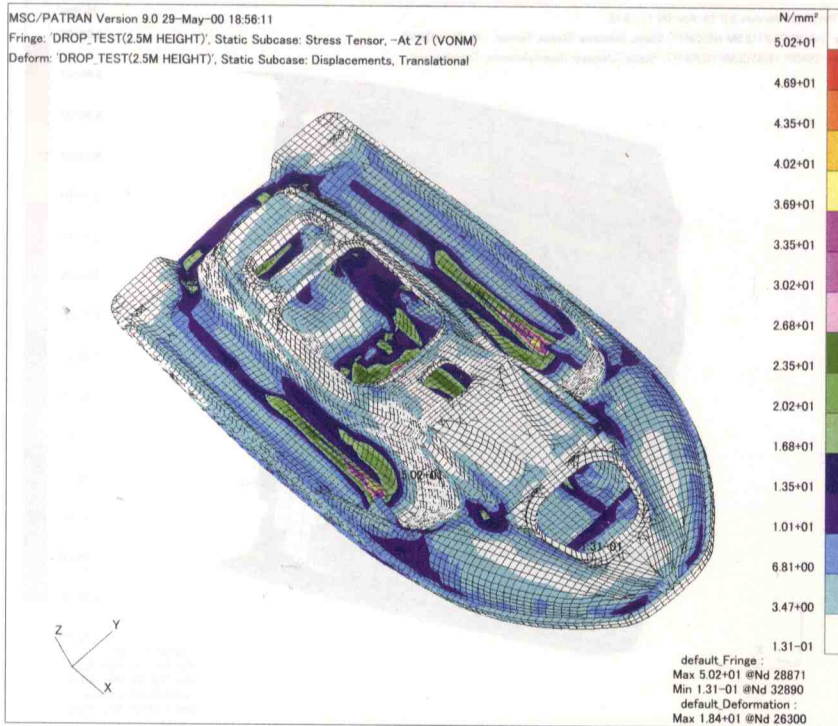


図- 3.3.13 応力分布 (落下試験、上甲板側、Von-Mises 応力)

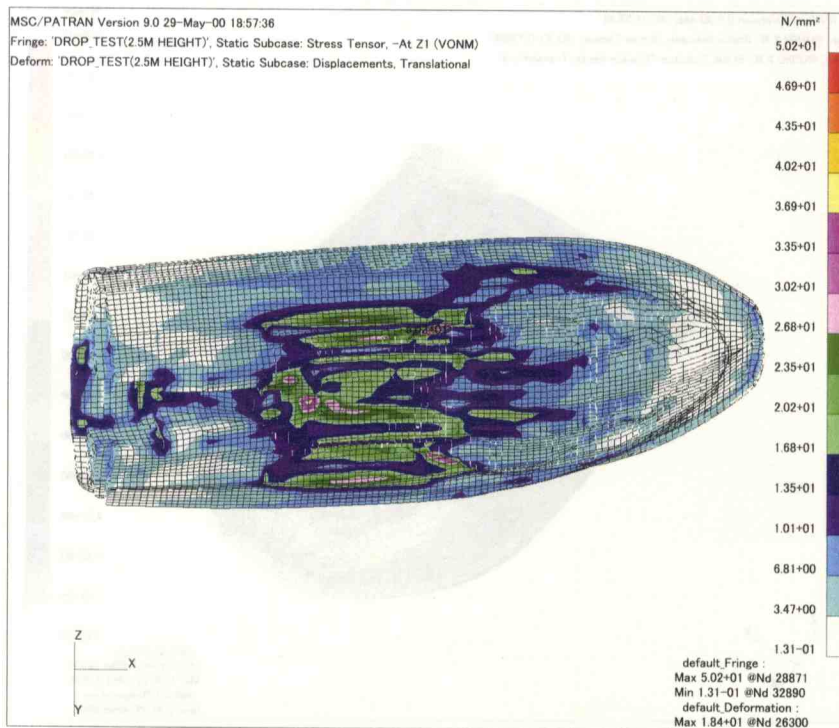


図- 3.3.14 応力分布 (落下試験、船底外板側、Von-Mises 応力)

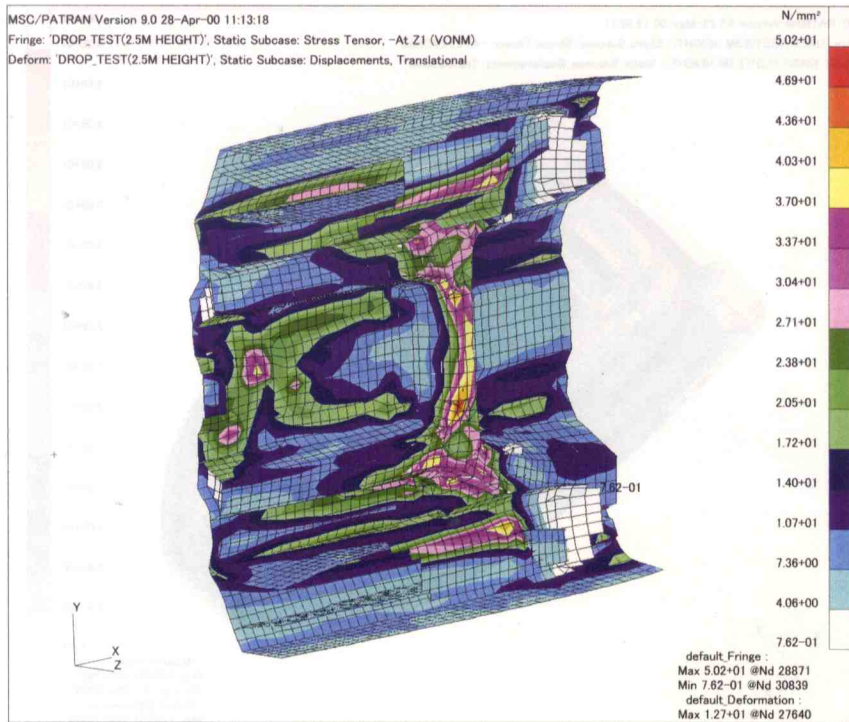


図- 3.3.15 応力分布 (落下試験、インナーハル、Von-Mises 応力)

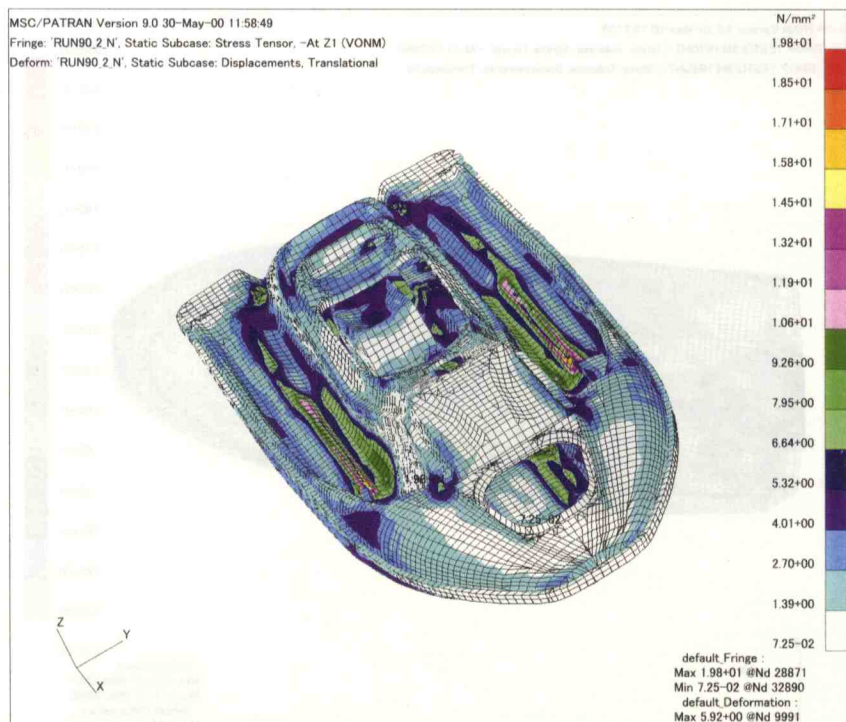


図- 3.3.16 応力分布 (航走 CASE(a)、上甲板側、Von-Mises 応力)

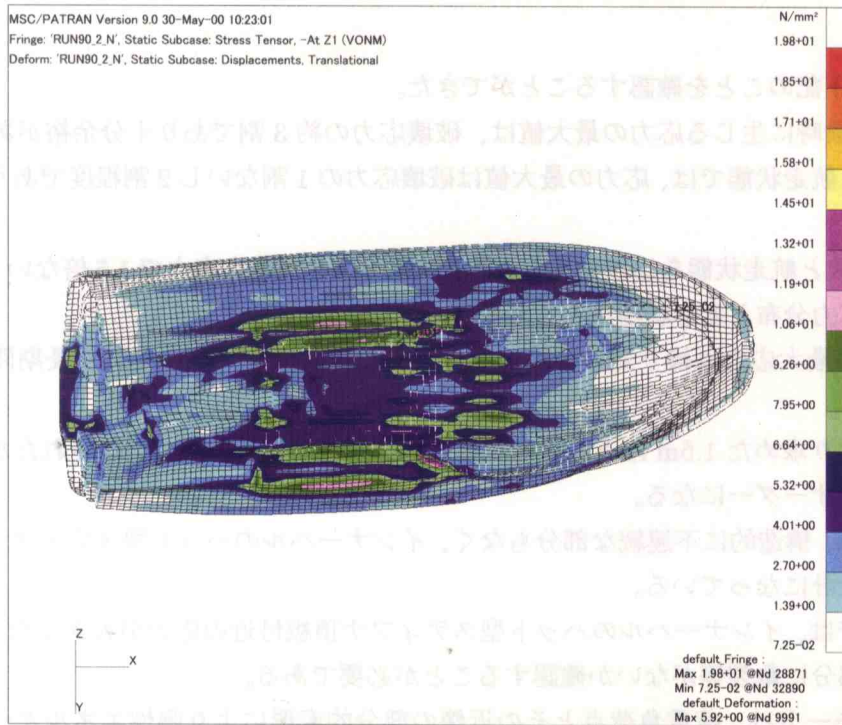


図- 3.3.17 応力分布 (航走 CASE(a)、船底外板側、Von-Mises 応力)

表- 3.3.12 に最大応力 (Von-Mises 応力) の比較を示す。航走状態に対して、落下試験の方が 1.5 倍ないし 2.5 倍大きくなっている。これは荷重の値が大きいだけでなく、航走状態では前方 1.8m 位置までしか負荷していないのに対し、落下試験では 2.1m とさらに前方まで負荷している為である。

表- 3.3.12 最大応力の比較 (Von-Mises 応力)

計算条件	応力値 (N/mm <sup>2</sup> )	係数
2.5m 落下試験	50.2	1
航走 CASE(a)	19.8	0.4
航走 CASE(b)	32.6	0.65

表- 3.3.13 と表- 3.3.14 には、それぞれ船長方向と船幅方向の最大応力  $\sigma_{x,max}$ 、 $\sigma_{y,max}$  と破壊応力 ( $\sigma_{xc}$ 、 $\sigma_{yc}$ ) に対する応力比 (強度余裕) を示す。破壊応力値は、表- 3.3.3 の船長及び船幅方向の破壊応力試験値を用いている。船長方向、船幅方向とも、各計算条件につき破壊応力の約 1 割ないし 3 割であり強度的には十分余裕があること、また方向による強度のバラツキがないこと、フォン・ミーゼス応力は船幅方向応力  $\sigma_y$  とほぼ同じ大きさであることが分かる。

また、航走 CASE(b) の船長方向最大応力 24.8N/mm<sup>2</sup> を 3-2-3-7 節の曲げ疲労強度 (船長方向) の試験結果図 3-2-13(b) と比較すると、航走状態での最大応力は繰り返し荷重を受ける時の疲労限を下回っており長期間使用しても安全側にある。

表- 3.3.13 船長方向最大応力と強度余裕の比較

計算条件	$\sigma_{x,max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{x,max} / \sigma_{xc}$
2.5m 落下試験	38.7	0.32
航走 CASE(a)	11.1	0.09
航走 CASE(b)	24.8	0.21

注)  $\sigma_{x,max}$  : 船長方向最大応力  
 $\sigma_{xc}$  : 船長方向破壊応力 (120N/mm<sup>2</sup>)

表- 3.3.14 船幅方向最大応力と強度余裕の比較

計算条件	$\sigma_{y,max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{y,max} / \sigma_{yc}$
2.5m 落下試験	48.9	0.3
航走 CASE(a)	20.1	0.11
航走 CASE(b)	32.8	0.2

注)  $\sigma_{y,max}$  : 船幅方向最大応力  
 $\sigma_{yc}$  : 船幅方向破壊応力 (165N/mm<sup>2</sup>)

### 3-3-7 まとめ

検討の結果、下記のことを確認することができた。

- (1) 2.5m 落下試験時に生じる応力の最大値は、破壊応力の約 3 割であり十分余裕がある。
- (2) 今回仮定した航走状態では、応力の最大値は破壊応力の 1 割ないし 2 割程度であり十分余裕がある。
- (3) 2.5m 落下試験と航走状態を比較すると、落下試験のほうが最大応力で 1.5 倍ないし 3.5 倍大きくなった。応力分布と変形状態はどちらも良く似ている。
- (4) 航走状態での最大応力は繰り返し荷重を受ける時の疲労限を下回っており長期間使用しても安全側にある。
- (5) 理論計算により求めた 1.5m 落下試験の加速度は、波浪中航走状態で計測された加速度最大値と、ほぼ同じオーダーになる。
- (6) 供試モデルは、構造的に不連続な部分もなく、インナーハルのハット型スティフナの配置等合理的な構造設計になっている。
- (7) 供試モデルでは、インナーハルのハット型スティフナ頂板付近の応力が大きくなるので、検査時にはこの部分に亀裂等がないか確認することが必要である。
- (8) 船殻の変形モードは、荷重負荷点とその近傍の部分的変形により弾性エネルギーを吸収する FRP 船と同じ特徴を示している。

今回の解析では、航走パターンを 2 ケースに仮定し、荷重の負荷範囲も適当に仮定した。また動的な現象を静荷重に置き換えて解析するなど、かなり簡略化している。

#### [参考文献]

- 1) 吹上紀夫、多賀謙治、原正一：軽量芯材を用いた FRP サンドイッチ材の強度（第 3 報）、昭和 60 年度春季船研発表会講演集
- 2) 運輸省小型船舶安全規則、及び水上オートバイ特殊基準
- 3) 竹本博安：水面衝撃水圧に関する一考察、日本造船学会論文集第 156 号、昭和 59 年 11 月
- 4) 宮本武、平方勝、加納敏幸、福島正朗：小型高速艇の落下試験方法の検討、FRP 漁船、平成 11 年 7 月号
- 5) 日本海事協会高速船規則：日本海事協会 1999 年版



4. 船体構造用材料として使用する場合の  
検査上の留意事項



## 4 船体構造用材料として使用する場合の検査上の留意事項

### 4-1 アルミニウム合金鋳物材料

#### 4-1-1 背景—材料の性質

アルミニウム合金鋳物の船殻への使用は、国際的にも希であり、板材あるいは押出材用の船体用耐食アルミニウム合金に準拠して、特に使用を認めるものである。

板材あるいは押出材用の船体用耐食アルミニウム合金は Al-Mg (5000 系)および Al-Mg-Si (6000 系)合金の範疇であって、耐海水性と溶接性が良好であると実証されたものである。

アルミニウム合金鋳物としての Al-Mg(-Si)合金には、鑄造時の湯流れをよくするために、Si が必須元素であり、かつ、通常の Al-Mg-Si 合金としての 6000 系合金に比して、Si 量が多い。

鑄造用 Al-Mg-Si 合金の強化機構は基本的には、

##### ① Al-Si の網目状の共晶相による強化

であるが、Si を少なく、Mg を多くした合金では、①よりもむしろ、

##### ② 微細な Mg<sub>2</sub>Si の析出による強化

が期待されている。

現在、我が国で入手可能な Al-Mg-Si 系鑄造用アルミニウム合金の範囲では、前記①と②の境界は Si 量 6 重量%にある。JIS AC4C あるいは AC4CH は Si 量 6 重量%以上であり、①による強化が主体である。②による強化は JIS に規定されていない Si 量 6 重量%以下の合金(例えばスミカロイ E-11)に見られる。

①による強化が熱履歴の影響をあまり受けないのに対し、②による強化は、鑄造後の冷却速度の機械的性質に及ぼす影響が著しい。特に、スミカロイ E-11 は鑄造後、溶体化熱処理、時効熱処理により高強度化を図る材料である。

#### 4-1-2 検査における留意事項

##### (1) 材料

船体用アルミニウム合金鋳物としての使用材料は Al-Mg-Si 系合金に限る。JIS に規定されている合金では AC4C および AC4CH がこれにあたる。JIS に規定されていない Al-Mg-Si 系合金を使用する場合には、成分等の材料についての記録を確認する必要がある。Si 以外には Mg が 0.3 重量%以上、Cu が 0.2 重量%以下であることが望ましい。

##### (2) 材料強度特性

- i) 材料の強度特性としては 0.2 %耐力、引張強さ、疲労強度、伸びおよび衝撃値がある。伸びと衝撃値については特段の理由がある場合を除いて要求値を定める必要性は少ない。
- ii) 直接計算により設計を行い、実艇の落下試験による確認を省略する場合には、設計に用いた 0.2 %耐力と引張強さが妥当なものであることを引張試験で確認する必要がある。
- iii) JIS に定められている砂型あるいは金型による小型試験片では、実艇の鑄造後の熱履歴と異

なる冷却速度となるため、0.2%耐力、引張強さ等の材料特性を把握することは困難である。そこで、実艇から切り出した材料又は実艇の鑄造時を再現した熱履歴の同一組成の材料を用いて、JIS H 5202（アルミニウム合金鑄物）に規定する引張試験片又は JIS Z 2201（金属材料引張試験片）に規定する板状試験片を作成し、引張試験（JIS Z 2241）を実施する必要がある。

iv) 一般的に、落下試験による確認を行う場合には、衝撃試験および疲労試験を省略できる。しかし、Si 量 6 重量%以上の合金は、静的強度と疲労強度の板厚依存性が異なるという特性を有する。従って、このような合金を使用する場合には、上述の引張試験および完全片振りの引張疲労試験（JIS Z 2273）を実施し、応力範囲 $\Delta\sigma$ 、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ および破断までの繰返し数 N の間に以下の関係があることを確認すべきである。（繰返し速度は 10Hz 程度が適当。）

$$\Delta\sigma/\sigma_{0.2} > 2 N^{-0.065}$$

### （3）腐食、防食

異種合金との電気的な接触を避けることが重要である。異種金属を使用する場合には、可能な限り電気的な絶縁を行う必要がある。

直接海水と接触する箇所には原則として防食塗装と電気防食を併用することが望ましい。

可搬型小型船舶あるいは常時上架して保管する船舶については、使用前に所有者が上架により船底を目視で検査できることを前提にして、電気防食を省略してよい。

検査にあたっては、接水面の塗装の健全性、発錆による膨れ、犠牲電極の消耗量に注目することが重要である。

内部ボイドスペースに滞留水がある場合には、内部の腐食、内側からの孔食にも十分に注意を要する。

解説：4-1 節の要求疲労強度について

落下試験等の確率  $10^{-N}$  程度(一般商船の 20 年に 1 回の荷重については、 $N=8$  と考えられている)の荷重に対する短期的な強度確認試験をもって、疲労等の耐久性能を保証するためには、疲労強度が準静的強度(例えば 0.2 %耐力)に対して一定以上の値を持つことを確認する必要がある。

本調査の範囲では、スミカロイ E-11 による船体では、稼働中に疲労損傷が生じなかったため、上記の「疲労強度が準静的強度に対して一定以上の値を持つ」ことが確認されている。そこで、スミカロイ E-11 の疲労強度と 0.2 %耐力の関係のばらつきを考慮した下限値を要求疲労強度とする事ができる。

図 A.1 は E モデルの試験結果(图中●印、表 2-3.8 および図 2-3.10 参照)と式

$$\Delta S / \sigma_{0.2} = 2 N_f^{-0.065}$$

(图中実線)の関係を示している。図を見ると、上式が疲労強度の下限値を押さえていることがわかる。また、実船では、引け巣等の内部欠陥が存在し、疲労強度が低下している。図 A.2 は長期使用材の疲労試験結果(表 2-3.7、図 2-3.8 参照)を図 A.1 と同様に整理したものである。ここでは、0.2 %耐力を 54.6 MPa とし、破断面の欠陥率による補正は行っていない。ここでも、要求疲労強度が試験結果の下限値となっていることがわかる。

なお、要求値を表す式の係数“2”は丸めた値であり、指数“-0.065”は 2-3 節(4)式を参考にして丸めている。

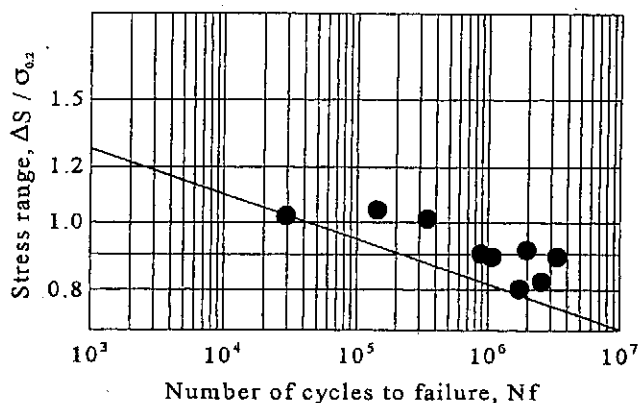


図 A.1 E モデルの疲労試験結果と要求疲労強度

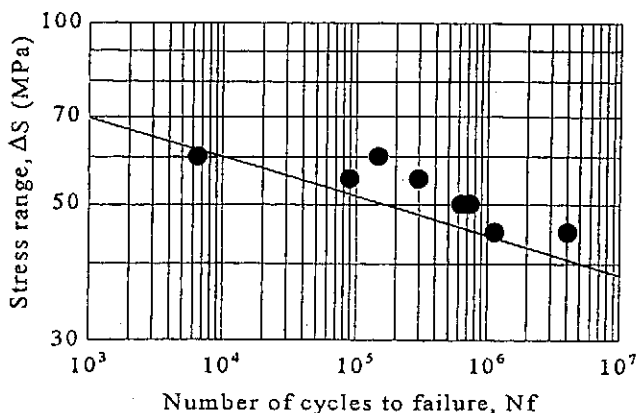


図 A.2 長期使用材の疲労試験結果と要求疲労強度

## 4-2 SMC 材料

### 4-2-1 SMC 材料の特性

新規成形材及び経年材から採取した SMC 材について強度等の物性を調べた結果、3-2 項で示したとおり、以下のことが明らかになっている。

- ①組成については同一艇における組成は安定しており、部位によるばらつきも少ない。
- ②プレス成形工程における SMC の型内流動により発生すると考えられる強化繊維の配向性の影響により、船長方向よりも船幅方向の強度が大きくなる。とくに、曲げにおいて、この傾向が顕著である。
- ③経年材の静的強度は新規成形材と比較して、一部に小さくなるものもあるが、大半は同程度かやや大きくなった。経年材の経過年数や船底材に配置された補強材の効果を考慮すると、経年劣化はほとんど問題ないものと考えられる。
- ④衝撃強さは静的強さよりも大きくなることが認められた。
- ⑤SMC 材について、明確な疲労限は認められないが、i) 引張りの時間強度は経年材の方がむしろ大きくなっていること、及び ii) 引張りの場合も曲げの場合も応力-繰返し数線図が平均的にほとんど同じ線図となっていることから、通常の使用による疲労強度の低下については問題ないと考えられる。ただし、材料表面にき裂が生じると急激に剛性低下を生じる。特に曲げ疲労では剛性低下率が 10%を越えると疲労破壊の可能性が高まる。
- ⑥飽和吸水した供試材の曲げ強度は吸水前の半分近くにまで低下するものもあった。吸水の大半が露出した繊維-樹脂界面からの水分侵入であり、また、前項の疲労破壊過程を考慮すると、表面き裂の有無が耐久性判断の指針となるであろう。

以上のことから、通常の使用状態においてき裂等が認められない場合には、使用による強度の低下はほとんど問題ないと考えられる。しかし水上オートバイは海浜で使用される事が多く船底を外部から砂利でこすられる可能性が高い等の使用形態を考慮すると、検査の際には顕著なき裂や板厚が大幅に減少する磨耗を認める場合には局所的な剛性とそれに伴う船体強度の低下を疑い、補修等の対策を取る必要がある。また、圧縮側よりも引張側から破壊が進行することが多いことから、外表面に異常が見られない場合でも内表面側にき裂等が存在する可能性があることを念頭に置いて、必要に応じテストハンマー等による打音検査を実施すべきである。

#### 4-2-2 水上オートバイの船殻の構造強度

船殻の構造強度については、水上オートバイの 1 モデルについて、ほぼ実機に忠実な構造モデルを作製し、2.5m 落下試験と波浪中を高速航行する場合について、FEM 構造解析を実施し、応力分布、変形状態を計算した。その結果、今回の供試モデルに付いては、落下試験、航走時とも十分な強度余裕を有すること、また落下試験の方が、航走時よりも約 1.5 倍ないし 3.5 倍ほど最大応力が大きいことを確認した。今回の航走状態はかなり厳しい航走状態を想定しているため、これよりも落下試験の方が最大応力が大きいということは、一般のユーザーが使用する範囲においては、最近の高速化した機種においても、2~2.5m 落下試験を実施しておけば、ほぼ安全側にあると推定される。

また、供試モデルは合理的な構造設計になっていること及び船殻の変形モードは、一般の FRP 船と同様なモードであることを確認した（変形モードは、材料よりも構造部材配置の違いに支配されるため）。供試モデルの構造は、基本的に船殻、インナーハル、デッキの 3 の構造体から構成され、これらを接着剤で接合して全体構造が構成されている。この場合、船体が受ける衝撃エネルギーは船底外板とインナーハルで吸収しており、特にインナーハルのハット型ステイフナ（例えばエンジンベッド）の頂板付近に高い応力が生じている。現在多くの水上オートバイは同様の構造をしていることから、供試モデルと同様、インナーハルのハット型ステイフナの頂板付近に高い応力が出る可能性があるため、検査時には特にこの部分に亀裂がないかどうか注意し、必要に応じ 4-2-1 と同様打音検査等により確認することが必要である。