講 義

脆性破壊試験法について (1)*

越 賀 房 夫**

Brittle Fracture Testing Methods (1)*

By Fusao Koshiga**

目 次

1. 緒 言	3.1 降伏型試験
2. 小型試験	3.2 非降伏型試験
2.1 衝撃試験	4. 各種試験結果の相関
2.2 静的試験	5. 脆性破壊事故防止対策
3. 大型試験	6. 結 言

1. 緒 言

第2次世界大戦の戦中戦後を通じて頻発した船舶を中心とする各種溶接鋼構造物の脆性破壊事故に対処して、米国では Ship Structure Committee, 英国では Admiralty Ship Welding Committee, 日本では鋼材研究会、等々各方面で大規模な研究委員会が組織され、脆性破壊の試験法についても多種多様な研究が行なわれた。ところが、そのようにして老大な研究成果が集積されたにもかかわらず、脆性破壊の本質には未解明点がいまなお少なからず残っており、その試験法についても当然のことながら諸説乱立の現状である。

脆性破壊の試験法としてこれまでに提案されたものを残らず網羅してそれぞれの内容を説き長短を論じようとしても、上記のような事情が反映して、ただ冗長で無味乾燥な羅列となるおそれがある。そこで本稿では比較的重要と思われる試験法を多分に独断的に選定して積極的に私見を織り込んで適宜解説を試み、むしろ諸賢の批判をあおぐための材料に供したいと考える。

さて、脆性破壊に関する鋼の性質を調べる各種の試験法をごく大まかに分類すれば、工業的試験 (commercial test) と研究室的大型試験 (large scale laboratory test) とになる。前者においては、試験のために消費される鋼材の量をできるだけ少なく済ませることと試験の操作が

簡単であることが重要となるので、いきおい小型の試験片が用いられることになる。しかし小型試験片における脆性破壊の機構は実際の使用状態 (actual service) におけるそれとは同じでないで、小型試験の成績と実際の使用成績 (service performance) との間には別途調査を行なって相関を見出す必要がある。逆に後者においては、実際の使用成績を直接的に把握しようとするのが主眼であって、試験片はおのずから大型となり、試験の操作は煩雑となって多くの経費と時間を要するが、使用実績のない新鋼種の適否判定ないし工業的試験の基準値検討には重要な役割りを演ずる。

このような小型試験と大型試験の分類に従って論を進め両者の関連にも付言し、最後に脆性破壊事故防止のための鋼材の工業的試験法とその判定基準について述べることにする。

2. 小 型 試 験

脆性破壊に対して鋼材が示す抵抗の度合いをできるだけ簡便に調べるのが小型試験の目的であるから、試験操作の高効率な各種の衝撃試験が有力な小型試験としての地位を堅持しているのは当然と考えられる。いっぽう、衝撃試験では期待できない何らかの特性に着目して、能率の点では若干劣るにもかかわらず、静的荷重による小型試験も各種開発されている。

2.1 衝 撃 試 験

衝撃試験機として最も普及しているのは Charpy 試験機である。比較的最近まで英国その他では図-1に示すような片持梁荷重方式による Izod 試験が盛んに行なわれていたが、現在では世界的にほとんど Charpy 試験に統合されてしまったようである。図-2に示すとおり Charpy 試験では試験片を支持台に乗せるだけで直ちに衝撃を与えることができるので、片持梁の締めつけ操作を要する Izod 試験よりも試験の迅速さ、ひいては試験

* 原稿受付, 昭和38年1月16日

** 正員, 日本鋼管KK技術研究所 Member, Nippon Kokan KK

図-1 Izod 衝撃試験機 (JIS B 7723)

図-2 Charpy 衝撃試験機 (JIS B 7722)

図-3 各種 Charpy 試験片
(JIS Z 2202, Z 3112 および Z 3172 参照)

温度の正確さ、の点で好都合である。

Charpy 試験の試験片には、図-3 に示すとおり実に多くの種類がある。同図には比較的標準化された試験片のみを掲げたが、このほか切欠角度、切欠深さ、切欠底部半径、等をいろいろ変えたものも行なわれている。鋼板の場合、試験片は板厚の中央からその長軸方向を圧延方向に平行に採取することが多い。切欠の長さ方向は原則として鋼板表面に垂直とし、試験片での亀裂進行方向を実際損傷でのそれと合わせるようにする。

各種 Charpy 試験のうちで現在最も標準化されているのは図-3 (a) に示す切欠を付した試験片による標準 V-Charpy 試験である。同図 (b) に示すものは脆性破壊の伝播に対する鋼材の阻止能力を調べるのに適すると最近国内でしばしば用いられている。(c) に示すものは脆性破壊の発生に対する鋼材の抵抗を調べるのに適すると考えられ国内でも (b) に呼応して用いられることが多くなった。ドイツでは DVM 試験という衝撃試験が発生、伝播の別なく代表的なものとなっているが、それは (c) の深さ 3 mm の切欠による Charpy 試験である。米国で代表的な工業的試験となっているのは (d) に示す Keyhole 切欠を付した試験片によるものであるが、これは (c) の深さ 5 mm の切欠を付したものと実質上同一である。

以上のほかにも小型衝撃試験の種類はいろいろあるが、それらは本節の最後に一括して述べることにし、まず使用頻度の高いものについての各論から始めよう。

2.1.1. 標準 V-Charpy 試験

前述のとおり図-3 (a) に示す試験片を用い、図-2 に示す試験機によって試験を行なう。ありとあらゆる脆性破壊試験のうちで現在国内的にも国際的にも最も標準化されている試験である。造船関係でとくに重要なのは日、英、米、独、仏、伊、諾、の 7 船級協会が協議決定した船体用鋼板の統一規格案において標準 V-Charpy 試験が鋼材等級の分類に重要な役割りを演じている事実である。また国際溶接会議 (I.I.W.) で制定された溶接構造用鋼の分類にもこの試験が大きな一役をかつている。このような国際標準化の有力な裏付けとなったのは、Ship Structure Committee による損傷調査の豊富な資料¹⁾、最近では英国船級協会ロイド (LR) の広範囲な損傷調査²⁾、その他多くの調査研究に用いられたこの試験の実績である。

この試験が代表試験となっている以上、その試験成績のばらつきは研究関係のみならず鋼材取引の利害関係においても重要な意味をもつ。そこで I.I.W. では英、独、仏、伊、等欧州の 8 カ国による共同研究の形で衝撃値のばらつきに関する統計的調査が行なわれ、図-4 の結果

図—4 標準 V-Charpy 試験の衝撃値平均 $E(X)$ とその標準偏差 $D(X)$ の関係 (I.I.W. 調査)³⁾

表—1 衝撃値母平均の区間推定 (Herbiet et al)³⁾

標本の大きさ	1	2	3	4	5	6	7
信頼区間 (kg-m)	± 1.32	± 0.93	± 0.76	± 0.66	± 0.59	± 0.54	± 0.50

本表は 20 ft-lb 近傍の衝撃値に対して適用できる。危険率は10%。

表—2 衝撃値 (X) の 20 ft-lb 基準に関する逐次抜取検査 (Herbiet et al)³⁾

試験数 N	棄却の最大値 (kg-m)		採択の最小値 (kg-m)	
	ΣX	$\bar{X} = \frac{\Sigma X}{N}$	$X \Sigma$	$\bar{X} = \frac{\Sigma X}{N}$
1	0.9	0.9	5.1	5.1
2	3.7	1.85	7.9	3.85
3	6.5	2.18	10.7	3.65
4	9.3	2.32	13.5	3.37
5	12.1	2.42	16.3	3.26
6	14.9	2.48	19.1	3.18
7	17.7	2.53	21.9	3.13
8	20.5	2.56	24.7	3.09
9	23.3	2.59	27.5	3.05
10	26.1	2.61	30.3	3.03

本表を用いた場合、良い板を拒否する確率は5%、悪い板を受入れる確率は2.5%。

が得られた³⁾。これは構造用鋼板 370 枚のそれぞれにつき標準 V-Charpy 試験片 30 個による一定温度 (0°C あるいは -20°C) における衝撃値の平均と標準偏差を求めたものである。この調査結果にもとづき、Herbite 等は衝撃値の任意個数による標準平均から母平均を区間推定する方法と 20 ft-lb 基準に対する逐次抜取検査法を定

図—5 衝撃値のばらつきおよび遷移曲線の勾配に関する統計調査の結果 (吉識)⁴⁾

図—6 衝撃値の平均と標準偏差の相関 (吉識)⁴⁾

めた。これらを表—1 および表—2 に示す。

日本では吉識らの研究グループによって同様な目的の統計調査が行なわれ、図—5 および図—6 の結果が得られた⁴⁾。この場合には I.I.W. 調査のように改まった試験は全然行なわず、各研究者手持ちの普通の遷移データを蒐集整理したのであって、精度は若干落ちるかも知れないが、I.I.W. 調査では求めることのできなかつた遷移曲線の形に関する統計的調査結果も得られ、実用上注目されている。ただし調査対象となった材料は I.I.W. 調査と同様普通の構造用鋼板であり、枚数は 164 枚である。遷移データは各鋼板ごとに T (試験温度) $\sim X$ (衝撃値) の表にして蒐集され、特定の作図者によって 20 ft-lb および 35 ft-lb の遷移温度 T_{20} および T_{35} がそれぞれ決定された。つぎに $(T-T_{20})$ および $(T-T_{35})$ に対応する X の値を鋼板の別にかかわらず寄せ集め同一の相対温度に対応する X の件数すなわち標本の大きさ N をふやし、平均 $E(X)$ および標準偏差 $D(X)$ を各相対温度ごとに計算した。そのさい、いずれの相対温度に対する N もほぼ同程度のものとするため、 $3n-1^\circ\text{C}$ 、 $3n^\circ\text{C}$ および $3n+1^\circ\text{C}$ ($n=-9, -8, \dots, 0, \dots, +8, +9$) で表わされる連続 3 相対温度を同一視して、これらを $3n^\circ\text{C}$ と表現した。図—5 はこのようにして計算した結果を示す

ものであり、図-6は同じ計算結果を図-4との比較に便利な形に表わしたものである。

標準 V-Charpy 試験の精度として上記の材質的なばらつきと同様重視しなければならないのは試験片の工作誤差にもとづく遷移温度の偏りである。これに関しては吉識および金沢の系統的な研究があるが⁵⁾、結論的には切欠底部半径の影響が支配的とされている。図-7にそ

図-7 V-Charpy 試験の遷移温度に及ぼす切欠底部半径の影響⁶⁾⁷⁾

の影響に関する実験データを一括して示すが⁶⁾⁷⁾、ごく大まかに表現すれば切欠底部半径が 0.25 mm の付近で ± 0.05 mm 程度狂うと遷移温度は $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度動く、ということになる。たとえば、切欠底部半径 0.30 mm の試験片を用いた場合、ある温度における衝撃値が 4.8 kg-m であったならば、半径 0.25 mm の正しい試験片では同じ温度において 3.8 kg-m となるであろう、ということがいま述べた遷移温度の動きと図-5の遷移曲線形状に関する統計的調査結果とによって推定できる。

ところで、このような補正は実際の試験片の切欠底部半径を実測した上ではじめて可能であり、その煩雑な半径測定(拡大投影機等による)を実施することは研究室の実験の場合なら問題とならないが、工業的試験として生産工場における日常作業に持込むにはかなり問題があると考えられる。

2.1.2. P-Charpy 試験 (pressed-notch Charpy 試験)

この試験はかつて Christensen と Augland によって行なわれたことがあるが⁸⁾、その後筆者はこれについて詳細な検討を加えた⁹⁾。試験の方法としては、図-3(b)に示す pressed-notch を用いることのはかは標準 V-Charpy 試験と何ら変わるところがない。しかし試験の結果には非常な特徴がある。一般の切欠衝撃試験では切欠底部からまず繊維状亀裂が起り、それがある深さまで進展したのち結晶状亀裂に変貌するのであるが、この P-Charpy 試験では現象が全く逆であり、まず切欠底部から結晶状亀裂が起り、それがある深さまで伝播してのち停止する。その後の破壊は繊維状となる。図-8には

図-8 P-Charpy, 標準 V-Charpy 両試験の破面外観の比較

P-Charpy 試験の¹⁾破面外観を標準²⁾ V-Charpy 試験のそれと比較して示す。この試験での結晶破面率は図-8(a)に示す結晶状亀裂深さ (crystalline depth) との間に図-9に示すとおり密接な関連があるので、破面遷移

図-9 P-Charpy 試験の結晶破面率と結晶状亀裂深さの関係⁹⁾

のデータは標準 V-Charpy 試験の場合よりもはるかに容易にかつ正確に求めることができる。この特徴的な破面外観はある種の低温用鋼材を別にすれば鋼種がいろいろ変化しても共通して認められる。切欠底部から直接結晶状亀裂が発生する理由は、刃型の圧入によって形成された切欠側面の加工硬化帯により切欠底部における横収

縮が極度に拘束されている点にある。切欠の圧入に起因する歪時効が試験結果に及ぼす影響については、系統的な実験を行なった結果、圧入後数時間以内に試験を実施すれば圧入直後の試験と同じデータが得られることがわかった。標準 V-Charpy 試験では前述のとおり試験結果が切欠の工作誤差に過敏であるという重大な弱点を背負っているが P-Charpy 試験はその点全然問題がない。すなわち、刃型の圧入によって切欠を深さ $\pm 0.05 \text{ mm}$ に設けることは操作上きわめて容易であり、深さのその範囲のばらつきは試験結果にほとんど影響を与えないこと、刃型の先端は200~300回程度の繰返し使用後も磨耗が目立たないこと、かりに先端半径が 0.06 mm にまで磨耗したとしても試験結果に及ぼす影響は無視しう程度であること、等が詳細な実験によって確められた。

以上のとおり、P-Charpy 試験は工業的試験としての適性を十分有していることがわかったのであるが、のちに van der Veen 試験の項で述べる根拠にもとづいて筆者はこの試験が脆性破壊の伝播に関する鋼材の特性を判定するに最適の小型試験であると主張した¹⁰⁾。日本溶接協会の WES 規格「低温構造用鋼板判定規程(案)」では A 種鋼板(事故によって脆性亀裂が発生してもそれを阻止する性能を有するもの)にはこの試験を行なうことが規定されている¹¹⁾。

2.1.3. U-Charpy 試験

切欠の形状寸法が図-3(c)に示すとおりであることは、すべて前述の標準 V-Charpy 試験ないし P-Charpy 試験と同様な方法で試験が行なわれる。図-3(d)に示す切欠を用いる Keyhole-Charpy 試験は前述のとおり 5 mm U-Charpy 試験と同等である。どの切欠深さを採用するかは国情によって一定しないが、いずれの U-Charpy 試験も多数の国々でそれぞれ代表的試験としてかなり実績を積んでいる。

しかし、これら U-Charpy 試験によって得られる遷移温度は標準 V-Charpy 試験(P-Charpy 試験はもとより)によるものより相当に低温側にあるため試験実施の手軽さに若干難点がある、等の理由で従来日本ではこれらの試験を脆性破壊に関連して本格的な研究の対象に取上げた例は余りないようである。

ところが最近、木原等の研究によって、この種の切欠の鈍い Charpy 試験が脆性破壊の発生に関する大型試験との間に高い相関のあることが明瞭となり¹²⁾、その結果、前述の WES 規格(案)の G 種鋼板(静的外力のみでは脆性亀裂を発生させない特性を有するもの)に対する受納試験として 5 mm U-Charpy 試験が規定されるにいたった¹³⁾。

この種の U-Charpy 試験によって得られる遷移曲線

は標準 V-Charpy 試験による遷移曲線のように uni-modal (任意の試験温度に対する衝撃値がほぼ一義的に定まる)ではなく、20~30°C 程度の幅をもつ遷移領域において bi-modal (任意の試験温度において衝撃値が高低2水準に分配される)な傾向を示すことが多い。そして、図-3(c)に示す3種の U-notch のうち、いずれを用いても mid-range (あるいは mid-span) によって定義される遷移温度には大きな差がないといわれている。

2.1.4. その他の小型衝撃試験

まず有名な Schnadt 試験がある¹³⁾。これは図-10に示す

図-10 Schnadt 試験¹³⁾

各種の試験片を用い、これまでに述べた普通の Charpy 試験と同様な操作で試験を行なうものである。大きな特徴は各試験片の打撃部に硬鋼のピンを図示のとおり差込んでおき、試験断面全体に引張応力のみがかかるようになっていることである。このピンを正確に打撃するために試験機のハンマの刃縁はやや特殊な形に仕上げられているが他はすべて図-2の Charpy 試験のままでよい。比較的最近まで Schnadt は図-10のように切欠の鋭さを変化させることに重点をおいていたが、現在ではむしろ試験片種類としては図-10(a)に示す coheracic 試験片1種類に限定し歪速度の方を変化させることを提唱しているようである¹⁴⁾。Schnadt の理論的主張はともかく、結果的にはいずれ標準 V-Charpy 試験等とかなりの相関があるように期待され一部ではある程度それが実証されているので、この一連の Schnadt 試験は日本ではあまり行なわれない。

そのほか, Charpy 試験に関連のものとしては, Wundt 等が提案している B.B. (brittle-boundary) 試験がある¹⁵⁾。これは試験片の表層を窒化, 炭化あるいは酸化等によって脆化させ, いわゆる shear-lip の影響を試験結果に混入させないようにしたものである。金沢はこの思想をくみ, さらに脆化のための入熱による影響を排除するよう, P-Charpy 試験に用いる刃型の圧入によって試験断面位置の表層を塑性拘束した P.B. (press-boundary) Charpy 試験を提案している。これらは脆性亀裂の伝播特性を調べる上に興味ある試験法と考えられている。

以上の 10 mm×10 mm 断面のものよりは若干試験片寸法が大きくなるが約10年ほど前から注目を集めだした小型衝撃試験として無視しえないものに Pellini 等の NRL 落重試験がある¹⁶⁾。これの試験片および試験要領は図-11に示すとおりである。この試験は米国(とくに

図-11 NRL 落重試験¹⁶⁾

軍需方面)で有力視されており, 実際の損傷との関連も求められているが¹⁶⁾, 筆者の私見によれば, 亀裂の進行方向が実際の損傷の場合と若干異なること, 母材とcrack starter weld の組合せに変化がある場合の試験結果に対する解釈の困難, 鋼種および板厚に変化がある場合の打撃エネルギーをどのように調節すればよいか(重量, 落下距離その他の調節)の問題, 等まだ説明すべき点がいくつもあり, 実際の損傷との関連ということで公表されているものもさほど満足できるものでないと考えられる。

日本では, NRL 落重試験そのものも若干行なわれているが, そのほか振子型の大型衝撃試験機により類似の試験片を試験することも二, 三行なわれている。

2.2. 静的試験

各種の小型静的試験はいずれも前述の Charpy 試験ほどには手軽でないが, それぞれの特徴に注目されて日本でもこれまで数多く検討が行なわれてきた。それらのうち比較的話題にのぼることの多い試験法を若干選んで以下に略述する。

2.2.1. Kahn 引裂試験 (Navy tear test)

この試験の標準試験片は図-12に示すとおりであ

図-12 Kahn 引裂試験¹⁷⁾

り¹⁷⁾, 上下の孔にそれぞれピンを入れ 0.3" (8 mm)/min の引張速度でこれを引裂く。最大荷重以降の吸収エネルギーには明瞭な遷移現象がみられる。それは破面外観の遷移現象によく対応している。代表的なデータは繊維状破面率50%で定義される遷移温度である。切欠底部半径を意識的に変化 (0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm および 8 mm) させた実験では, 切欠底部半径の遷移温度に及ぼす影響がほとんど認められなかった¹⁸⁾。鈴木等は試験片の厚さを機械切削により種々変えた試験を行なって遷移温度の変化を調べ, 構造用鋼板の Charpy 試験に対する要求値を鋼板の厚さに応じて変えることの必要を説いた¹⁹⁾。Charpy では板厚のいかにかわらず試験片が均一寸法に仕上げられて鋼板の厚さに帰因する塑性拘束の違いが消去されているからである。

この試験の問題点は荷重開始から破断にいたるまでの時間が非常に長く, その間に試験片の温度が大幅に上昇することである。試験を恒温槽内ではなく大気中で行なう場合には試験片に熱電対をとりつけて温度変化を実測するが, どの部分のどの時の温度を試験温度とみなすかは大きな問題点であって, 結局現状では, 予冷(または予熱)のための保温液の温度をとるのが最も妥当である。

表-3 Austria 試験の諸寸法²¹⁾

試験材の厚さ t (mm)	試験片の長さ l_p (mm) (圧延方向)	試験片の幅 B (mm) (圧延方向に直角)	溝の半径 (mm) r	ビードの長さ (mm) l_s	溶接棒の直径 (mm)	押型の直径 d (mm)	ローラー間距離 l_r (mm)
20~25	350	150	3	125	4	75	140
25~30	380	150	3	150	4	90	165
30~35	410	150	3	175	4	105	190
35~40	440	200	4	200	5	120	220
40~45	470	200	4	225	5	135	250
45~50	500	200	4	250	5	150	280

(JIS Z 3161 参照)

との意見が強い。また、この試験では試験片の形状寸法が厚さ $\frac{3}{4}$ " (19 mm) 前後の鋼板に適するように決められているので、最近のように 50 mm あるいはそれ以上の厚板が出現するようになれば試験がきわめて困難である。

2.2.2. Tipper 試験

この試験の標準試験片は図-13に示すとおりである。

図-13 Tipper 試験²⁰⁾
(JIS Z 3171 参照)

り²⁰⁾、普通の引張試験機で上下に引張って試験を行なう。代表的なデータは Kahn 試験の場合と同様繊維状破面率50%で定義される遷移温度である。切欠底部半径を 0.05 mm, 0.10 mm, 0.25 mm, 0.50 mm および 1.00 mm の各種に変化させた実験では、さきと同様、切欠底部半径の変化が破面遷移温度に及ぼす影響はほとんどなかった¹⁸⁾。しかし、吸収エネルギー、伸び、厚さの減少、および、降伏点と引張強さの差、によって定義される各種の遷移温度には若干の影響が認められた¹⁸⁾。

この試験の問題点はやはり Kahn 試験の場合と同様である。すなわち、荷重開始から破断までの温度上昇ならびに、非常に厚い板を試験するさいの幅と厚さの

図-14 Austria 試験²¹⁾
(JIS Z 3161 参照)

比率にみられる不自然さである。

2.2.3. Austria 試験 (Kommerell 試験の改良)

試験片の形状寸法、試験要領、および試験成績の判定基準を一括して図-14および表-3に示す²¹⁾。この試験は溶接熱影響部の硬化性と母材の脆性破壊に対する抵抗との総合的效果を調べるのに適するものとして欧州では盛んに用いられたようであるが、試験法の詳細に関して不明点が多いので日本では実験的に種々検討が加えられた²²⁾。

鋼板の厚さに応じて試験の各種規定寸法が変更されているが、少なくとも筆者の感じでは、それだけの煩雑さに見合うだけの価値があるかどうか疑問である。亀裂の進行方向についても NRL 落重試験の場合と同様な問題がある。

文 献

- 1) Ship Structure Committee Report, Serial No. NBS-3, (1951).
- 2) Hodgson, J., and Boyd, G.M., Trans., Royal Inst. Nav. Arch., London, Vol. 100, (1958).
- 3) Herbiet, H., and Descovich, S., I.I.W. Document IX-184-57, (1957).
- 4) Yoshiki, M., I.I.W. Document IX-268-60, (1960).
- 5) Yoshiki, M., and Kanazawa, T., Brittle Fracture in Mild Steels and their Welded Joints, Soc. Nav. Arch. Japan, (1953).
- 6) Kahn, N.A., Imbembro, E.A., and Ginsberg, F., Proc. A.S.T.M., Vol. 50, (1950).
- 7) 対馬克己, 若崎浩, 東大船舶卒業論文, (1957).
- 8) Christensen, N., and Augland, B., SINTEF, Norway, (1956).
- 9) 越賀房夫, 造船協会論文集104号, (1958).
- 10) 越賀房夫, 造船協会論文集106号, (1959).
- 11) WES 規格「低構造用鋼板判定規程(案)」, 「溶接技術」第9巻第2号, (1961).
- 12) Kihara, H., Yoshida, T., and Ōba, H., I.I.W. Document X-217-59, (1959).
- 13) Weck, R., Trans. Inst. Weld., April, (1950).
- 14) Schnadt, H.M., Paper No. 27, (1961), (小倉 信和訳, J.I.W.-X 配布).
- 15) Newhouse, D.L., and Wundt, B.M., Memo BMW-14, (1961), (金沢武訳, 造船協会 6 分科配布).
- 16) Puzak, P.P., Eschbacher, E.W., and Pellini, W.S., Weld. Jnl., Dec., (1952).
- 17) Kahn, N.A., and Imbembro, E.A., Weld. Jnl., April, (1948).
- 18) 日本造船研究協会報告第14号, (1957).
- 19) 銀木春義, 柴田博幸, 運輸技術研究所八幡支所報告第7号, (1952).
- 20) Baker, J.F., and Tipper, C.F., "The Value of the Notch Tensile Test," Inst. Mech. Engr., (1955).
- 21) Melhardt, H., Weld. Jnl., July, (1952).
- 22) 日本造船研究協会報告第20号, (1957).