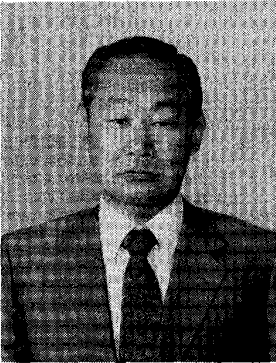


© 1992 ISIJ

特別講演



構造力学・溶接力学からみた 鋼構造物製作技術の発展

藤 田 譲*

Development of Steel Structure Fabrication Technology from
Viewpoint of Structural Mechanics and Welding Dynamics

Yuzuru FUJITA

このたび名誉ある浅田賞を受賞致しまして、誠に光栄に存じております。その際講演をという事で気軽に御引受けしましたが、主題のテーマを短時間で論ずることは難しいことでもありますし、また皆様は鉄鋼関係の方々の方が大部分と存じますので、私の専門である力学的なお話をするよりは、むしろ小生の研究活動を通して感じましたことあるいは私の主張などのうち、今回のテーマに多少とも関連のあるお話を致しまして、その責を塞ぎたいと考えております。

1. 経験工学について

最近、ハイテク技術特にコンピューター関連技術の進歩により、あらゆる工業分野で近代化が進んでいます。先日もある製鉄所を拝見しましたが、その大部分の工程がコンピューターコントロールでありましたし、私の専門である造船の分野でも、かつてはルールブックによるルール計算が主要な船体構造の設計法であったものが、現在では船体構造全体をコンピューターにより構造解析

するいわゆる直接計算法が主流になってきています。

ところが、私は最近世の中は必ずしも理論計算一辺倒ではないという「経験工学」についての一つの経験を致しましたので、まずそのことからお話ししたいと思います。

写真1は、現在(1991年10月)イラン方面に派遣され機雷の除去に活躍している掃海艇ですが、この艇の活躍については多くの方が御存知であると思います。しかし、この掃海艇が長さ約55m(55型と呼ばれている)の木造船であることを御存知ない方もおられると思います。鋼構造物に関してお話をこの機会に木船について語ることをまず御許しいただきたいと思います。

最近になりまして、防衛庁では75型(長さ約75m)の世界でも類のない大型木船の掃海艇を建造することになりまして、その大型木船の構造設計の研究委員会の委員長を小生が仰せつかったわけです。そもそもこの委員会の狙いは、従来船大工という言葉で象徴されるように設計の大部分を経験と簡単な梁理論によって行われてき



写真1 掃海艇の外観

平成3年10月本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演 平成3年11月1日受付 (Received Nov. 1, 1991)

* 東京理科大学工学部教授 東京大学名誉教授 工博 (Professor, Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, Professor Emeritus, The University of Tokyo, 1-3 Kagurazaka Shinjuku-ku, Tokyo 162)

Key words : fabrication technology ; quality standard ; JSQS ; welding imperfection ; CIMS.

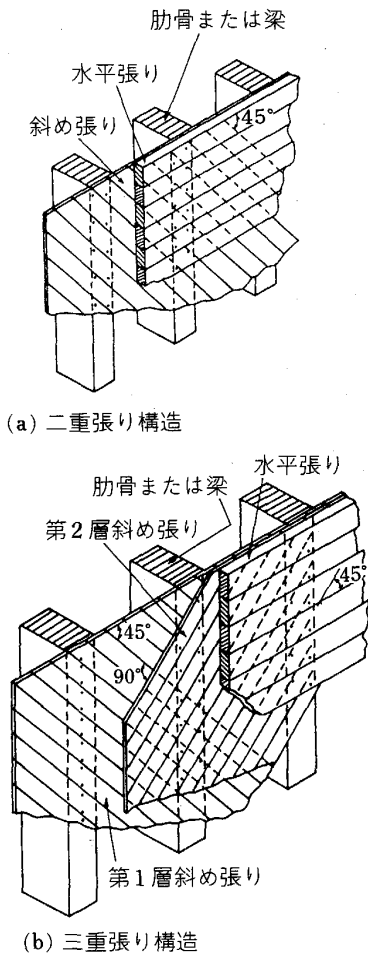


図 1 掃海艇外板構造

た木船構造設計を、現在の最先端のコンピューターを駆使した構造解析技術に乗せて木船構造設計の近代化と精密化を計ることにありました。

従来の 55 型の外板は、水平張りと斜め張りの二重構造であったのですが、今回の 75 型では水平張りと言文字の斜め張りの三重構造となっています(図 1)。さて、この構造をモデル化し(図 2)、釘の固着度の影響まで入れて応力解析を実施し、また種々の大型模型実験を実施し、これらの結果と比較し、また従来の手法とも比較検討を実施したわけです。その中で最も驚いたことは、斜め張り外板の波浪による船体縦曲げに対する有効度のことでした。従来の木船の設計基準によれば、水平張りの外板の有効度 100% は当然として、斜め張り外板の有効度は経験上 20% と言われてきたのですが、今回の大規模な計算の結果得られた数値は甲板部 21.5%、船側部 20.5% とほとんど一致したことです。このことは、経験的に得られた数値の確かなことを示す好例ではないかと感じました。

「工学」には、「物を作る」という場合が多く、その際にはたとえ学問的に完全に解明できていない事象についても、過去の経験を生かし、その時点における最大限の

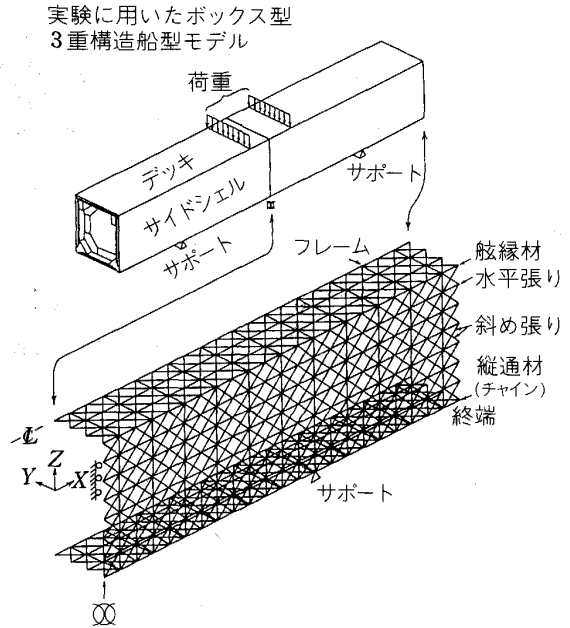


図 2 3次元骨組構造モデルによる大型木船の構造解析

努力を払って「判断」せざるを得ないことがあります。このようなときには経験と勘が大きく物を言うので、「経験を侮ってはいけない」ことを痛切に感じました。コンピューターによる解析にしても所詮何らかの仮定と前提の上に乗っていることを忘れてはいけないと思います。

2. Timing 論

2.1 塑性設計

私事で恐縮ですが、私は 1954 年～1956 年の間米国リーハイ大学に留学しまして、当時リーハイ大学で研究が進んでおりました「塑性設計」という構造力学の分野を勉強しました。御存知とは存じますが、簡単に一言で言えば、「塑性設計」とは、従来のように応力解析をして応力を求め、その応力がある一定の許容応力度を超えないように部材寸法またはその配置を決定する(許容応力度設計)のではなくて、ある構造物の担いうる荷重を計算し、その最大荷重によりその構造物の強度を評価する考え方です。先日の松戸のトンネル水没事故などでも、最高水位の推定を誤ったようですが、要は水止め工事の擁壁の最終強度が問題となったと考えられます。塑性設計的な考え方はこの例からもわかるように事故または災害を取り扱うときに重要な概念であり、従って安全性の評価に有効であると言えます。

当時、日本の造船界では、構造設計はすべて先ほど申し上げた許容応力度設計で行われていたので、それだけでは不十分で是非塑性設計の考え方を導入する必要があると唱えたわけですが、時期尚早であったのか私が若すぎて至らなかったのか、その主張は認められなかったのです。現在、塑性強度を考えない構造設計など考えられ

ないことを思うと感無量なものがあります。物事を提唱するときには、それを言いだす Timing が極めて重要であると悟りました。

2.2 直線構造

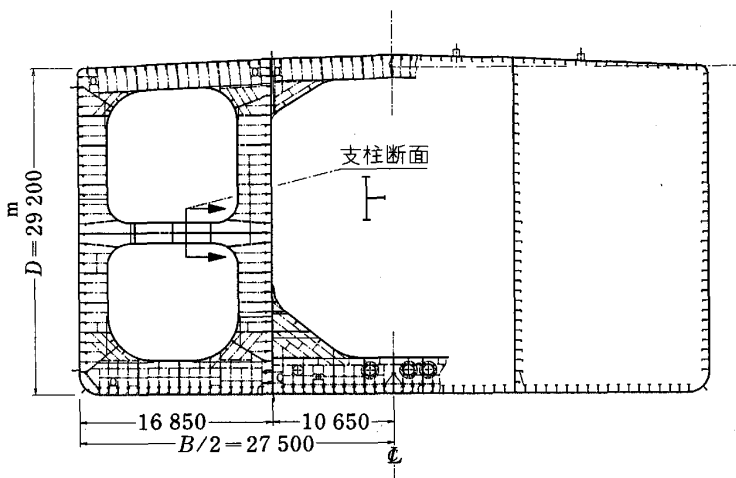
昭和 30 年代に入って私は「建造講座」を担当することになり、鋼船工作法研究委員会を引き受けたのですが、当時日本の造船所では、設計・工作・艤装の三つの Section が互いに独立的で連絡が悪かったので、私はこの三者が三位一体でなければならないことを唱えました。これは当時はまだシステムという言葉がなかったのですが、一種のシステム思考であったわけですが、この考えの一環として、例えば造船の船殻設計ではブロックの組立て溶接法まで考えたすなわち工作（作り方）まで考えた構造設計をすべきであり、このことにより現場での Man-hour（労力）が節約されることから節労設計と呼び、その一例として Tanker の船体構造の直線構造化を提案しました。図 3 は最も一般的な日本で設計建造された Tanker の中央横断面図ですが、図の左の部分（ウィングタンク）には Face plate がぐるっと廻っていて、この隅角部で大型のブロックをつなぐことの工作の難しさは推察できましよう。日本の造船屋は職人芸と言われ

るほどの技術で美事にこのコーナー部分を建造していたのですが、その労力を少しでも省くため図 4 に示すような「直線構造 + Bracket」を推奨したのですが、鋼材重量が多少増えるという理由で採用されませんでした。その後欧州の造船所で全く同じ直線構造の Tanker が建造されました。

現在になって、造船所の近代化、自動化、Robotics の採用のため、Robot によるブロックの組立てやすさすなわち Robot 向けの設計が求められるようになり、当時の私の発想である直線構造が再び見直される時代が来ています。

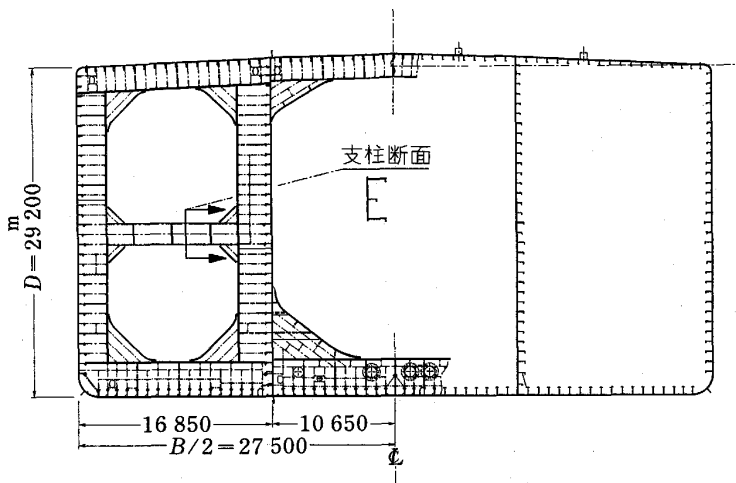
2.3 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System for Ships)

1980 年代の後半に入って、日本造船界は誠に苦しい時代を迎えましたことは御存知のとおりであります。当時私は、このように苦しい年こそ造船の生き残りをかけて造船所の近代化・自動化・CIMS 化のための研究を開始すべきであると提唱しました。しかし、「今死にかかっている病人に向かって 10 年先 20 年先の将来のことを考えよというのは無理である」と言われ採り上げられませんでした。とは言え、日本の造船界はこの間人員削減



VLCC の横断面

図 3 大型タンカーの中央横断面



VLCC の横断面

図 4 直接結合構造の大型タンカーの中央横断面

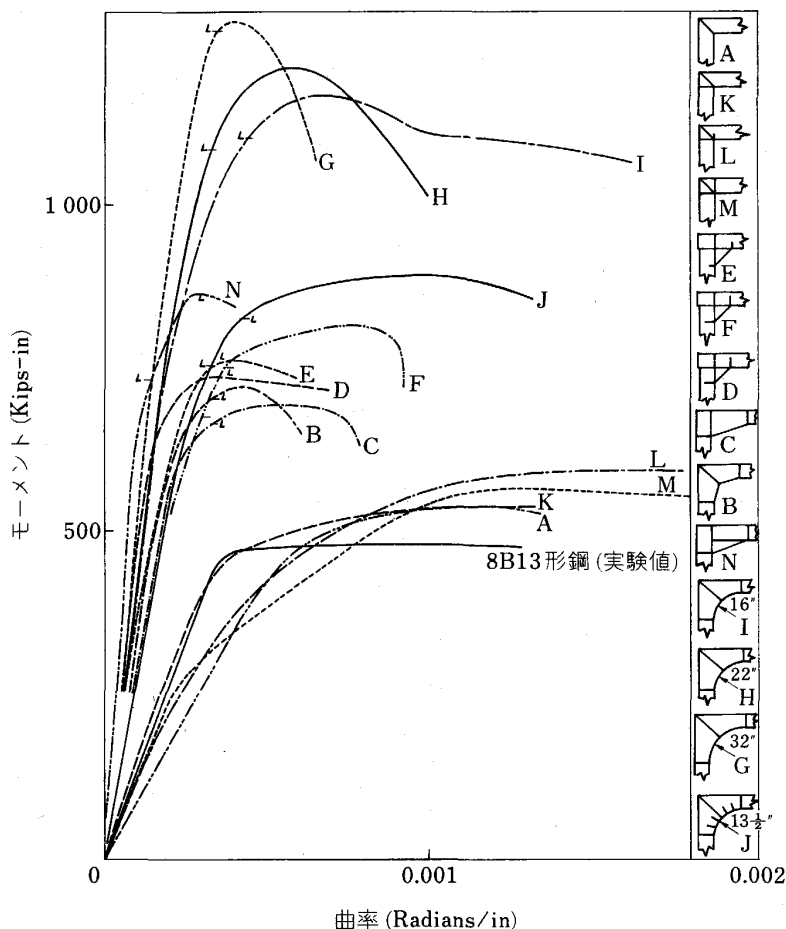


図 5 実物大隅角構造モデルによる実験

と設備の廃棄によるスリム化を断行し、美事にこの危機を乗り越えたことは世界的にも高く評価されています。

現在、S & O (Ship and Ocean) 財団を中心に CIMS の委員会が設置され既に過去 2 年ほどにわたり活発に研究成果をあげておられるのは、誠に喜ばしいことに思います。

以上、三例いずれも Timing を考えて行動すべしという教訓のお話です。

3. 工学とは総合である

「工学」とは一般的には「物を作る」ための学問であるとも言えるように、多くの事象を総合的にまとめあげることが必要となります。そのためには相反する事象、例えば高張力鋼の開発での材料の強度と衝撃値のようなものを総合的に多角的に判断することが必要になります。一つのものを見方を変えると全く異なる結論となることも多く、その一例として隅角部の構造についてお話ししましょう。

図 5 はリーハイ大学フリッツ工学研究所で行われた実物大隅角構造モデルの実験結果ですが、塑性設計的には、隅角部は構成部材である梁または柱 (図中の 8B13 形鋼) と同等程度以上の強度を持ちかつ延性のある構造であることが必要であるので、この図から明らか

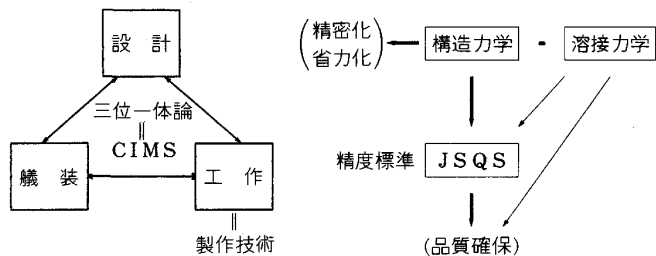


図 6 三位一体論

に経済性も考えて、直接結合構造 (A~M) が最もよく、Bracket (or Haunch) 結合構造 (E~N), Curved knee 結合構造 (I~J) の順になります。

ところが、オランダのイエーガ教授は、これらと全く同じ構造の模型を使って疲労実験を行い疲労強度の面から眺めると全く逆の結論になることを指摘しました。繰返し荷重のかかることの少ない建築構造では前者が、船や自動車のように変動荷重のかかる構造物では後者が、というように構造物の置かれる周辺条件その他を総合的に判断しなければ、容易に構造物の強度の評価はできないことを示す一例です。

先ほど、造船所の設計・工作・艦装の三部門の三位一体論を唱えたことを申し上げましたが、工学においては、

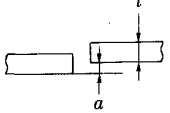
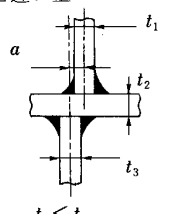
初期不整量の許容値の比較 (mm)						
各国標準 項目	米 国	ドイツ	スウェーデン	フランス	英 国	日 本
肋骨と梁のギャップ	< 4.8	< 5	≤ 3			≤ 5
突合継手の目違い量 	$a < 3.2$	強度メンバー: $a \leq 0.15t$ $a \leq 4$ いずれかの内 小さいもの その他: $a < 2$ $a \leq 0.15t$ いずれかの内 大きいもの	強度メンバー: $a \leq 0.2t$ その他: $a \leq 1/3t$	$t \leq 10$ $a = 1$ $t \leq 20$ $a = 2$ $t > 20$ $a = 3$	$a \leq 0.15t$ $a \leq 3$ いずれかの内 小さいもの	強度メンバー: $a \leq 0.15t$ (max 3) その他: $a \leq 0.20t$ (max 3)
板を介した部材間の 目違い量 	$a \leq 0.5t$	$t_2 < t_3$ のとき $a \leq 0.5t_1$ $t_2 \geq t_3$ のとき $a \leq 0.5t_2$	強度メンバー: $a \leq t_2/4 + 3$ $\max t_1/2$ その他: $a \leq t_2/4 + 3$	$a \leq t_3/2$		強度メンバー: $a \leq t_1/3$ その他: $a \leq t_1/2$

図 7 各国の精度標準と JSQS との比較

「物を作る工程全体を一つのシステムとして捕える」ことが重要であると思います。従ってすべての部門は有機的に結びつき、相互間で共通の Data-base を有し情報のやりとりがスムーズでなければなりません。CIMS とは将来にそういったシステムを志向しているわけです (図 6)。

品質のよい物を作るためには、もちろん良い設計が不可欠ですが、よい品質を作り出す製作技術も重要であることは言うまでもありません。製作面において、よい品質を確保するためには、品質管理の際準拠すべき精度標準 (例えば JSQS (Japanese Ship Quality Standard)) が確立されておらねばなりません。この精度標準 (JSQS) によって品質が管理されている日本で建造される船舶は高い品質水準に常に保たれているのです (図 7)。また、このような精度標準が権威あるものであるためには、構造力学・溶接力学その他により理論武装していることが重要になります。構造力学・溶接力学で理論的に裏打ちされ、かつ世界に先がけて作られた JSQS は世界から高く評価され、各国は競ってその後同様な品質基準を作成しています (図 7)。この意味で、構造力学・溶接力学は製作技術に深くかかわりを持っているわけです。

4. 構造力学・溶接力学と製作技術

私と溶接との出会いは、構造力学の後でしたので、私の力学屋としての実績を生かす方向として溶接力学 (熱弾塑性学, 溶接構造物の強度, 残留応力など) に取り組

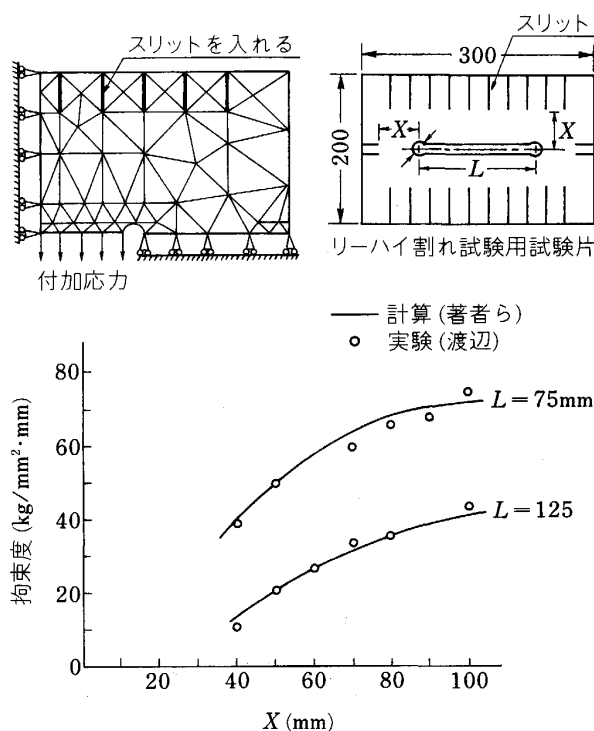


図 8 FEM による低温割れ試験片の拘束度の解析

んだわけです。

昭和 30 年から 40 年代にかけて、溶接は熱が絡んでいるためか理論計算に乗せることが難しく、どちらかと言えば実験工学的色彩が強かったのですが、有限要素法 (FEM) などコンピューター利用の数値解析法の進展に

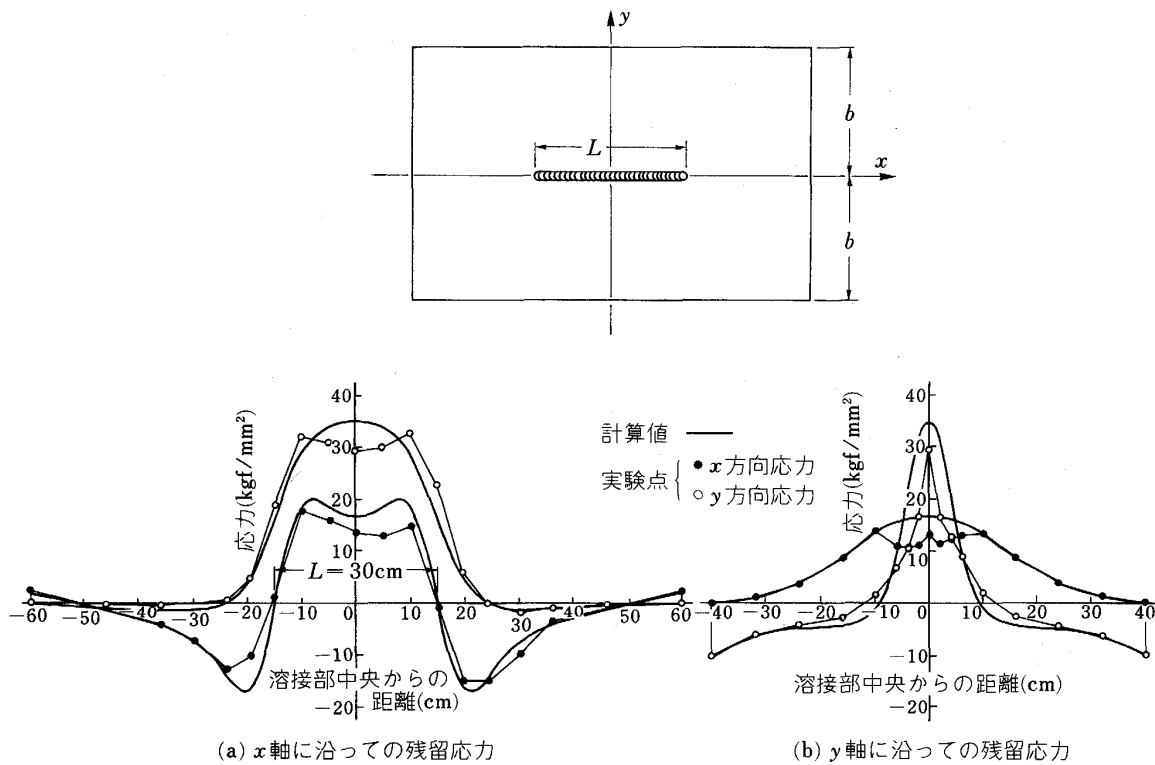


図 9 二次元残留応力分布の計算値と実測値との比較

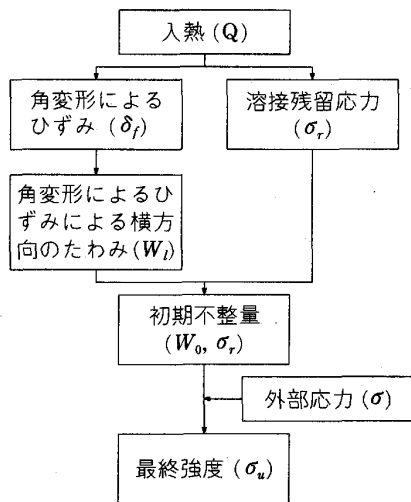


図 10 すみ肉溶接で囲まれたパネルの初期撓み及び最終強度の計算

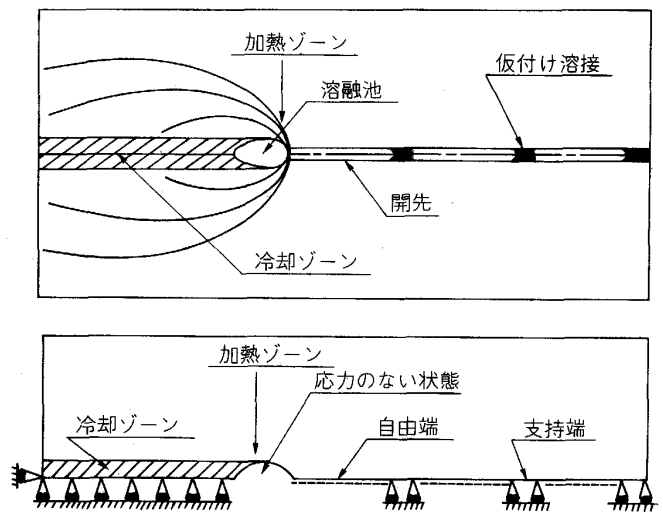


図 11 溶接による過渡現象のモデル化と終端部割れの解析

伴って、溶接現象の解明に FEM などを利用しようと考えて、初めて適用した一例を紹介しします (図 8). 図中の○は阪大の渡辺正紀先生が実験的に求められたものですが、FEM の計算値とよく合っています. 図 9 は二次元の残留応力分布の計算値と実測値の比較ですが比較的によく合っています. 一般的に船体のような箱型板構造物では、周辺をすみ肉溶接で囲まれたパネルが多くありますが、すみ肉溶接の入熱のみを知られば、これらのパネルに発生する初期撓み量及び残留応力が計算でき、更に

そのパネルが面内圧縮力を受けるときのパネルの圧縮強度をも計算できるプログラムを作っています (図 10). また、2 枚の鋼板をサブマージアーク溶接などで自動溶接する際に終端部に発生する縦割れのメカニズムの解明のために溶接による過渡現象を図 11 のようにモデル化して逐次計算し、割れは最終の Tack weld が溶融するときに発生する引張力によることを明らかにした等多くの溶接の問題に (ここでは二三の例を示したに過ぎませんが) FEM をはじめ各種の解析法を適用し、溶接現象

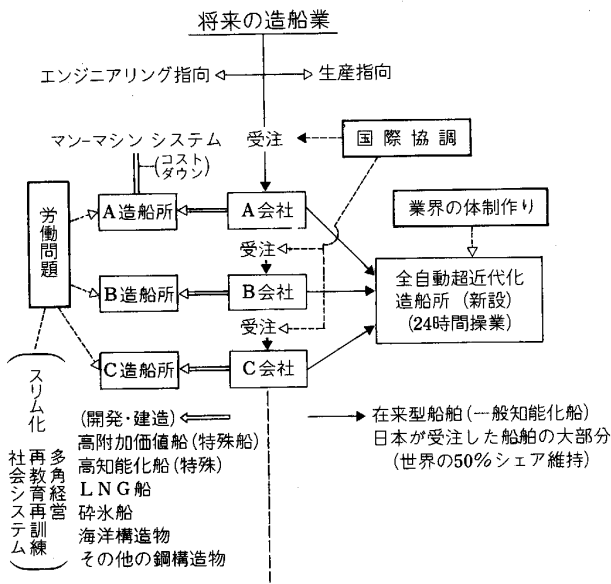


図 12 将来の造船業

の熱工学的及び力学的解明がなされていることは誠に心強い限りであると思います。そしてこれら構造力学・溶接力学の成果が JSQS 等の根拠となっています。例えば、図 10 のプログラムにより船体パネルに発生する許容初期撓み量が求められ、また図 7 に示されている許容される目違い量は、FEM による計算と実験で裏打ちされています。このように構造力学・溶接力学は精度標準を通して、鋼構造物の製作技術と製品の品質確保に大きく貢献しているのです。

申し上げるまでもなく、鋼構造物の近代製作技術は溶接技術によって一大飛躍を遂げました。造船をはじめとする多くの製造業の分野における製作技術への溶接技術の貢献は高く評価されています。翻って将来の製作技術を考えるとき Robotics を抜きにしては考えられないと思います。溶接の採用によって飛躍的に進歩した鋼構造物の製作技術はここで再び溶接技術と一体となった Robotics によって一段と飛躍するものと確信しています。

5. これからの製造業について

昭和 60 年 3 月、私は東大を停年退職するに当たって、当時世の中では「軽薄短小」でなければ技術でないかのような風潮に反発して、「讃重厚長大」というテーマの最終講義をしました。図 12 はその際提示した日本の造

船業が将来生き残るためのあり方を示した一私案ですが、6 年たちました今でも当時の主張は変わっていません。

資源もエネルギーも乏しい我が国が一億を超える人口を抱えて繁栄を維持するためには、知的生産のみでは困難であり、ある程度の量をこなす製造業（重厚長大産業を中心とする）なしにはやっていけないことを論じました。21 世紀に向かって、これからは基幹産業としての製造業のあり方が問われる時代になると思います。ますます高齢化が進み、また 3K 嫌いに象徴される世の流れからみると、若い人々に製造業の魅力を感じさせるためには、まず第一には CIMS に代表されるコンピュータ化され極限にまで省人化された製作技術の確立（Production 指向）と、第二にはこれからの産業を支える新しい材料の開発などの各種新技術の研究開発力の増強と維持（Engineering 指向）が肝要であると思います。

しかしながら、このような姿になるまでの過程においては、Man-machine system に頼らざるを得ないのでから、有能な人（Man）の教育・育成と確保が当分の間は重要であろうと考えます。

私は最近超高張力鋼の開発研究に関係する機会がありましたが、優秀な鋼材は開発できても、その溶接材料の一部ではなかなか規格値を満足できないという経験を持ちました。溶接なしには大型鋼構造物の建造を考えることはできないのですから、もう少し溶接及びその周辺技術の重要性を鉄鋼関係の方々に認識していただきたいと痛感している今日この頃です。

以上甚だとりとめのない、また記念講演に相応しいお話であったかどうか忸怩たるところではありましたが、このような機会に鉄鋼に御関係の深い皆様方に私の「讃製造業」の主張と、「これからの製造業にとって製作技術の近代化、CIM 化は必須のものである」との主張をお話しできましたことは、誠に幸であったと思います。上記の主張は、過去の私の主張と比較しますと、既に世の中に相当に認められてきております。例えば 1991 年秋に放映されました NHK スペシャル「電子立国日本の自叙伝⑥」の中でも、その最後に製造業の重要性が強く説かれていたほどですから。従いまして、私の Timing 論からしましても、今ここで「讃製造業」をあえてお話しさせていただきましたのは、誠に時宜を得たものと考えられる次第です。

御清聴有難うございました。