(昭和 47 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

油槽船の横強度に関する実船計測 ならびにその解析

正員 永 元 隆 一* 正員 西 村 信 男*
正員 新 田 顕** 徳 永 完***

Full Scale Test on the Transverse Strength of Oil Tanker

by Ryuichi Nagamoto, *Member* Nobuo Nishimura, *Member*
Akira Nitta, *Member* Tamotsu Tokunaga

Summary

This paper deals with the method and results of a full scale statical test on the transverse strength of a 180,000 DWT oil tanker, in which some new design features are seen in the structural arrangement of its cargo oil tank construction, such as arched-type bottom transverses in center tank of centerline girderless system, transverse ring constructions with no struts in wing tank adjacent to the watertight bulkhead, large round bracket connection of bottom centerline longitudinal to the lowest horizontal girder attached to the transverse bulkheads, etc..

An extensive measurement is carried out on the stress distributions in structural components of the transverse strength members at 221 measuring points, as well as on the vertical deflections of hull girder and wing tank deformations of the ship. Accuracy of the test results is checked by evaluating their standard deviations through the least square method, and is assured that more than 90% of the strain readings are of tolerance within $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$.

Theoretical analysis is also made on the transverse strength calculations of the ship with use of computer programs for three-dimensional frame work analysis associated with the finite element method for plane structures. It is found from a comparison between the theoretical and the experimental results that the deformations and the stress distributions in tanker structures can generally be predicted by the above-mentioned computer programs within a satisfactory accuracy for practical design purpose.

1. 緒 言

大型油槽船の横強度に関する理論解析^{1)~4)}、模型実験ならびに実船計測^{5,6)}による研究は近年極めて活発に行なわれており、横強度部材の変形およびこれに生ずる応力などをかなり適確に把握しうる段階にまで到達していると言つても過言ではない。

油槽船のタンク内構造の応力解析は、その初期においては、梁理論を主体とする平面骨組構造物としてモデル化することから始まり、以後、電子計算機の容量増大・高速化と相俟つてマトリックス構造解析法の発展に伴い、これを立体骨組構造物として、さらには、有限要素法による平板の組み合わせ構造物として解析することが可能となるなど構造解析法の精度も日進月歩で向上している。

一方、実船の構造は極めて複雑であり、その理論解析を行なうためには適当なモデル化が必要となり、そこに

* 三菱重工業（株）長崎造船所

** 日本海事協会技術研究所

*** 三菱重工業（株）長崎研究所

いくつかの仮定を設けることが前提となる。さらに、油槽船の構造部材の配置ならびに形状寸法についての設計技術には絶えず改良が加えられているため、その妥当性と安全性を確認するためには、構造解析法の発達した現在においても、なおかつ実船実験による直接的な検討を必要とし、その意義は深いものと考えられる。

今回、三菱重工長崎造船所において、中心線縦桁を設けず、中央タンクの船底横桁をアーチ形状とし、また横隔壁に隣接する玄側タンク内の横桁リングの支材を省略する構造方式を採用した油槽船が建造されたので、タンクテスト時を利用して本船の横強度実船試験が行なわれた。

本論文は実船計測の方法ならびにその計測結果の精度および信頼度について報告すると共に理論計算結果との比較調査による結果の妥当性を検討したものである。

2. 供試船および実船計測の概要

2.1 供 試 船

供試船は三菱長崎造船所において建造された 18 万 DW トンの油槽船で、その主要寸法は $L_{pp} \times B \times D \times d = 285.0\text{m} \times 48.2\text{m} \times 25.0\text{m} \times 18.0\text{m}$ の NK 船級船である。

実験は本船が艀装岸壁に接岸繫留中のタンク漲水試験時を利用して行なわれた。

本船の貨物油タンクの構造の概要は図 1 (a)～(g) に示すとおりであり、その特徴点として、(i) 中心線縦桁がなく、(ii) 中央タンクの船底横桁にアーチ状の形式を採用し、また (iii) 横隔壁に隣接する玄側タンク横桁リングにおいて支材を設けない。さらに (iv) 横隔壁付最下層水平桁と隣接する船底横桁とを船体中心線上にある強力な肘板で固着していることなどが挙げられる。またタンク配置を図 2 (a) に示す。

2.2 実験条件

2.2.1 負荷条件

計測は昭和 44 年 6 月 24 日 21 時から翌朝 6 時に至る約 9 時間にわたって実施された。すなわち本船が軽荷吃水状態で静水に浮上中を基準状態（以下では 0 LOAD と称する）にとり船内ポンプにより第 2 貨物油タンク中央タンクに海水を注入して（注水開始時間 21 時）約 1 時間後にほぼ $D/3$ (D は船の深さ) まで注水した。この状態を $1/3$ LOAD と称する。さらに 23 時頃から再びポンプを作動させ、上記のタンク内に $2D/3$ まで注水を行ない、これにひきつづいてトリム調整のため第 1 貨物油タンク左右両玄の玄側タンク内にあつた海水（水頭約 3.42m）を排水した。この状態を $2/3$ LOAD と称する。最後に 3 時 15 分頃からポンプを再稼働させ、第 2 貨物

図 1(a) F86 TRANS. RING

図 1(b) F83 TRANS. RING
(特記の外は F86 にならう)

図 1(c) F82 TRANS. O. T. Bulkhead

図 1(d) No. 1 H.G

図 1(e) No. 2 & 3 H.G
() 内寸法は No. 3 HG

図 1(f) Centerline section

図 1(g) Transverse wash bulkhead

図 1 供試船の構造

図2 タンク配置, 吃水および載荷状態

油タンク中央タンクにはほぼ満載状態まで注水を完了し、最終計測を行なった。この状態を 3/3 LOAD と称する。

この間、吃水の計測を船尾、中央および船首の三個所で実施した。各載荷状態におけるタンク内の水位（いづれも海水）ならびに吃水を図2 (b) および (c) に示す。

なお、第2貨物油タンクの中央タンク内 (F 86) の船底に設置した電気抵抗線歪計型水圧計により常時タンク船底部の水圧をメータにより観察記録した。

2.2.2 温度条件

船体の応力計測中において、船体構造各部の温度変化に差異がある場合、構造部材相互の拘束にもとづく熱応力が発生し、負荷外力による応力と分離することが一般に困難となる。そこで計測タンク部の上甲板の各点 (㊶～㊿)、および船側、縦通隔壁ならびに船底の各部 (①～⑤) にサーミスタ温度計を貼付し鋼板温度の計測を行なった。まず、応力計測日の前日、鋼板温度の予備計測を行ない、昼間が晴天であつても、夕刻 20 時頃になれば、船体上下部ならびに左右舷における温度差は 5°C 以下であることを確認し、応力計測開始時刻を 21 時と決定した。図3は本実験時における温度計測結果を示す。なお、試験当日の天候は晴れのち曇り、夜半に入り雨となつた。

2.3 計測要領

2.3.1 船体上下撓み

船体の上下撓みの計測にはレーザー光線による方法を採用した。

図 3 船体各部温度の計測結果

図 4 レーザー光線による撓み計測要領

今回使用したレーザー装置は、He-Ne ガスレーザー発振器 (NEL 社製、型名 GLG-103B、出力 1mV) および集束望遠鏡 ($f=300\text{mm}$ 、倍率 30 倍) である。図 4 に示すように、船体前後方向の撓み分布を計測する場合には船首尾の両端に、また、船体横方向の分布を計測する場合には左右両舷にそれぞれ上甲板で基準位置を設定し、これらの基準点の一方 (A 点) にレーザー発振器を設置して光線を発進させ、集束望遠鏡を通して他方の基準点 (B 点) に設けたスクリーン上に集めた光点が常に一定位置に集点を結ぶよう発振装置の仰角を調整して、上記の両基準点を結ぶレーザー光線による基準レベルを空間に確保する。この基準レベルをもとにして上甲板上の任意の計測点 (C 点) にスケール付きのスクリーンを立て、ここに映る光線の高さの変化量を直読することにより、計測点位置における船体の上下撓みを求めた。船体前後方向にわたつての計測においては F 56 の位置を船尾側の基準点に選り、縦通隔壁に沿つての計測に対しては F 104 を、また船側に沿つての計測に対しては F 92 をそれぞれ船首側の基準点に選定し、その間の左舷側の横隔壁および制水隔壁位置において上下撓みを計測した。これと併行して第 2 貨物油タンク部 (F 82, 86, 87 および 92) において、船体横方向の分布についても計測を行ない、両舷の船側を基準とつて縦通隔壁位置における上下撓みを測定した。

2.3.2 歪 計 測

前述のように第 2 貨物油タンクの中央タンク内に注水を行ない、同タンクが満水状態に至るまでの各段階において、逐次歪計測を実施した。歪計測の対象とした部材は、同中央タンクおよび左舷 (左舷) タンク内の横部材および水平部材の一部で、横部材については、主としてタンク中央部に近い F 86 および支材を省略した F 83 の横桁リングを選定し、また水平桁としては、F 82 の横隔壁づきの第二番目の水平桁を選んだ。さらに、船底中心線縦通材 (他の船底縦通材に比べて大きい) の端部横隔壁下部づきの肘板、および F 86 の船底横桁スロット部周辺の歪計測も行なつた。

計測箇所合計 140、計測点数 221、温度補償ゲージ 33 点である。今回使用した歪計はスロット部の計測に対し

てはゲージ長さ5mmのもの、その他の部材についてはゲージ長さ10mmのポリエステルをベースとする抵抗線型歪計であり、接着剤には速乾性のものを使用した。

本計測において、とくに注意を払った点は言うまでもなく、歪計の防水、防湿処理である。すなわち注水を行なう第2貨物油タンク中央タンク内の部材に貼付された歪計については図5(a)に示す防水処理を施し、またその他の歪計に対しては図5(b)のような防湿処理を行ない、極力絶縁抵抗の低下を防止した。なお、歪計貼付導

備期間中、計測タンク内は十分乾燥しており、湿度はほぼ 65% 以下であつたのでコーティング作業の各段階でチェックされた絶縁抵抗にはほとんど低下が認められなかつた。

3. 実験結果およびその計算値との比較

今回実施した実船計測の結果を検討するため、三菱長崎造船所において開発された油槽船の横強度解析プログラム^{1)~3)} (以下 MHI-progm と呼称)、日本造船研究協会第 83 研究部会において開発されたプログラム⁷⁾ (T-SAP) および日本海事協会技術研究所で作成された平面応力解析プログラム⁸⁾ (以下 NK-progm と呼称) を用いて本船の横強度解析を試み実験結果との比較を行なつた。

3.1 船体撓みおよび舷側タンクの相対撓み

船側および縦通隔壁の上下撓みならびに両者の相対撓み δ の分布に関する計算結果を図 6 に示す。ここで撓みの基準レベルは荷油タンクの前後端すなわち F56 および F104 にとり、1/3、2/3 および 3/3 LOAD における撓みと 0 LOAD におけるそれとの差を、それぞれ鎖線、点線および実線で表わした。なお、参考のため T-SAP を用いて算出した計算結果 (F76~F104 間について解析) も同図に細線で記入した。これらの荷重状態に対応する撓みの計測値をそれぞれ、●、○および×印でプロットしている。ただし船側外板に沿つた撓みの計測値については、F56 と F92 を基点として計測したため、F92 の位置における縦通隔壁の撓みおよび舷側タンクの相対撓みの計測値を用いて基線の修正を行なつた。

さて、本実験結果の精度について検討を行なうため、船の長さ方向について計測した縦通隔壁の撓みと船側外板の撓みとから算出した舷側タンクの相対撓みと、一方、船の横方向について直接計測した相対撓みの値とを比較した結果、例えば 3/3 LOAD において、F87 の位置で 17(14.5) mm、F82 の位置で 4(5.5) mm であつた。ここで () 内は横方向について直接計測した値を示す。このような両者の差異は、本計測法におけるレーザー光線の集束光点の大きさ、スケールの目盛度およびレーザー発振器の仰角調整操作などによる誤差の介入によるものと考えられるが、上記結果から判断して本計測値の精度は $\pm 3\text{mm}$ 以下と推定される。

以上、計算および実測両結果を総合的に比較検討のうえ上記解析プログラムを使用すれば舷側タンクの相対撓みを 15% 以下の誤差の範囲内で推定できることが確認された。

図 7 有限要素法 (NK-PROGRAM) による F86 横桁リングの変形解析結果 (実測値との比較)

図8 歪計測値の精度検定の一例

水量の二乗に比例するものとの和と考えられる。そこで、各計測点について、歪の大きさを、中央タンク内の水位 h (メートル) の二次式

$$\epsilon(h) = Ah^2 + Bh + C$$

で表わし、未定係数 A , B および C の値を最小二乗法によつて決定し、さらに計測値の標準偏差 μ を求めた。ここで、 ϵ は歪の値を 10^6 倍したものとす。図8は、歪計測値の精度検定を示す一例である。いま、便宜上、(a) $0 \leq \mu \leq 25$, (b) $25 < \mu \leq 50$, (c) $50 < \mu \leq 100$ および (d) $100 < \mu$ のように、標準偏差の大きさを4段階に区分して、歪計測結果の有意性とその信頼度を評価した。このようにして、全計測値について精度検定を行なつた結果、表1に示す分布が得られた。同表からも明らかなように、本実験における歪計測の結果は、その過半数が $\mu \leq 25$ (一軸応力の場合に換算して $\pm 0.5 \text{ kg/mm}^2$ の精度)、また 90% 以上が、 $\mu \leq 50$ (精度 $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$) であり、有意な計測値と見做される。

表1 歪計測値の精度検定結果

階 級	(a)	(b)	(c)	(d)
標準偏差	$0 \leq \mu \leq 25$	$25 < \mu \leq 50$	$50 < \mu \leq 100$	$100 < \mu$
計 測 点 数	139 (62.9)	64 (28.9)	11 (5.0)	7 (3.2)

() 内は、計測点総数に対する %

3.2.2 湾曲部面材の歪

図9は、船底横桁の隅部円弧状湾曲部の面材に沿つて計測された歪の分布を示す。ここで、 ϵ_x は面材の長手方向の歪、 ϵ_y は幅方向の歪を表わす。同図から明らかなように、湾曲部面材にはかなり大きい ϵ_y が生じており、また、面材が圧縮側となる舷側タンクにおいては、その分布が不規則である。この面材の幅方向の歪 ϵ_y は、同図の (d) に示すような面材の反り曲げ変形によるものと想定されるが、その概略の大きさを推定するため、面材の単位長さ当りについて、これを片持ち帯板 (長さ $b/2$, b は面材の幅) と見做して解析を行なう。すなわち、片持ち帯板には、面材の断面力の湾曲部半径方向成分 $\sigma_{xt}l/R$ が分布荷重として作用し、その基部において面材

さらに、前述の有限要素法による平面応力解析プログラム (節点総数 383, 三角形要素数 551, トラス要素数 565, なお、図7の破線は防撓材、鎖線は倒れ止め肘板を示す) を用いて、F86 横桁リングの節点変位を計算した結果を図7に示す。ただし、本計算に際しては、縦通隔壁および船側外板の位置における各節点に、前記立体強度計算プログラム¹⁾を用いて求められたせん断力を節点力として船の深さ方向に均等に分布させた。なお、3/3 LOAD における縦通隔壁および船側外板のせん断力の分担率は、それぞれ、0.79 および 0.21 である。

3.2 応 力

3.2.1 歪計測結果の精度検定

歪計測結果の精度と信頼性を検討するため、各負荷段階において計測された歪の読取値について、最小二乗法による偏差値の検定を行なつた。

一般に、タンク内の各構造部材に生ずる歪の大きさと注水タンク内の漲水量との関係は、部材ごとにそれぞれ異なり一概に定めることはできないが、本実験の場合は、中央タンク内の漲水重量に比例するものと、縦通隔壁に作用する側水圧によるもの、すなわち、漲

図 9 湾曲部面材の歪分布

の反り曲げモーメント $\sigma_x t_f b^2 / 8R$ により誘起される幅方向応力 σ_y は、片持ち帯板の基部すなわち面材の中心線上の表面において、次式で与えられる。

$$\sigma_y = k \cdot \sigma_x$$

$$k = -\frac{3b^2}{4Rt_f}$$

ただし、 σ_x は面材の長手方向の応力、 t_f は面材の板厚、 R は湾曲部半径を表わす。

そこで、本船の例について k の値を求めると、中央タンク船底横桁アーチ部では -0.31 、舷側タンク船底横桁の隅部では -4.0 となり、後者のように、面材の幅が比較的大きく、かつ湾曲部半径がそれ程大きくない場合には、面材の幅方向応力は、長手方向応力より大きくなる。いま、面材の表面を平面応力状態と仮定して、上記 σ_x および σ_y から、表面歪 ϵ_x および ϵ_y を計算し、その両者の比 ϵ_y/ϵ_x を求めると、中央タンクで -0.54 、舷側タンクで -1.96 となり、歪の計測結果とかなり近い値を示す。ただし、舷側タンクの歪計測番号㊸の位置には、倒れ止め肘板が設けられており、面材の反り曲げ変形が拘束されているので、 ϵ_y の値は低下している。

また、舷側タンク船底横桁の縦通隔壁側隅部面材には圧縮応力 σ_x が作用しており、これにより誘起される二次的な変形として、上記反り曲げのほか、面材の長手方向に波をうつ局部面外曲げ変形、および面材の面内の横撓み変形などの影響が無視しえない程大きくなり、それらの重ね合わせの変形が生じていると考えられる。この点については、面材の両縁に貼布した歪計㊶および㊷（図9参照）による計測結果にもみられるように、中央タンク船底横桁アーチ部に沿つては、 σ_x が引張り応力であるため、面材の全幅にわたつて ϵ_x がほぼ一様に分布するのに反し、一方、上記舷側タンクの湾曲部面材では、面材の幅方向に著しく変化しており、上に述べた変形が誘起されていることを裏書きしている。

さらに、比較検討のため、面材の中心線上表面についての歪計測と併行して、船底横桁湾曲部の特定点㊸、㊹

図10 F86 横桁リングの応力分布

および㊟において、ウェブと面材の接合部のウェブ両面にも歪計を貼布して計測を行なった。図9に、㊟印でその計測結果を記入してあるが、それらは、面材中心線について計測された歪計測結果とはほぼ一致しており、歪の連続性は保たれていると考えられる。

3.2.3 横桁リング (F86) の応力分布

横桁リング (F86) の応力分布について、前記油槽船の横強度解析プログラム (MHI-PROGM) および平面応力解析プログラム (NK-PROGM) を用いて計算した結果を、図10の鎖線、破線および実線により示す。ここで、面材の応力は、その法線方向にプロットし、またウェブの剪断応力は、外板、甲板および縦通隔壁板に沿ってこれを基線として示した。なお、面材の有効幅については、C.G. Anderson の方法⁹⁾ により算出した。

一方、歪計測結果から、0-LOADを基準として、1/3 LOAD, 2/3 LOAD および 3/3 LOAD について換算した応力値を、同図中に、それぞれ、●, ○および×印でプロットした。また、剪断応力については、図中にその値 (3/3 LOAD と 0-LOAD との差) を記入した。

同図から明らかなように、全般的に、計算値と実験結果とはかなりよい一致を示しており、横桁リングの応力分布については、上記解析プログラムにより、設計上十分な精度で算出しうるということが認められた。

3.2.4 支材のない横桁リング (F83) の応力分布

前述のように、本船では、横隔壁に隣接する玄側タンク横桁リングにおいては支材を設けておらず、また、船体中心線上において、船底横桁と横隔壁付き最下層水平桁とを強力な肘板により固着している。このような構造における応力分布を調査するため、F83の横桁リングについて計測した応力値を図11に示す。同図の結果によれば、F86横桁リングに比べて、応力値は全般的に低く、また、支材基部湾曲部においてみられたような応力の上昇も解消する。

図 11 支材のない横桁リングの応力 (F83)

図 12 第2水平桁の応力分布

3.2.5 横隔壁付き水平桁の応力分布

横隔壁には三層の水平桁が設けられており、計測は、その第2層目水平桁について行なわれた。計測結果を、図 12 に示す。

一方、前記解析プログラムにより算出された応力分布を同図に併記した。両結果を比較すると、中央タンクにおいては、かなり良好な一致を示しているが、一方、舷側タンクの縦通隔壁よりの先端部においては、両者の差異が認められる。これは、本解析で扱った構造モデルが、横隔壁から前後2トランス心距分の部材からなる立体骨組構造として算出した部材力を分担するものとして計算が行なわれたことに起因するものと考えられ、先端部に作用する部材力の値に若干の問題があり、構造モデルをさらに拡張して解析を行なうなどの検討を要しよう。

3.2.6 船底中心線縦通材つき肘板の応力分布

本船の構造上の1つの特徴として、中心線縦桁を設けず、その代りにやや大きい中心線縦通材を設けている。

図 13 は、横隔壁との取り合い部の肘板の面材およびウェブにおける応力計測結果を示す。同結果にもみられるように、船底中心線縦通材の端部肘板の湾曲部面材およびウェブには、比較的高い応力が生じている。

図 14 スロット部周辺の応力分布

3.2.7 スロット部周辺の応力分布

F 86 船底横桁のスロット部周辺の応力計測結果の一例を図 14 に示す。スロット隅部および防撓材基部の応力はかなりの上昇を示し、防撓材基部の応力集中係数（基部最大応力／平均応力）の値は、玄側タンクのスロット A においては 3.5、スロット B においては 4.6 程度である。

4. 結 論

本研究において実施した油槽船の横強度に関する実船計測およびその理論解析から得られた結果を総括すると、大要次の通りである。

- (1) レーザー光線とスケールとの併用による船体上下撓みの計測を行なつた結果、大略 $\pm 3 \text{ mm}$ 程度の精度で実測値が得られた。これは、船体上下撓みの前後方向にわたつての分布を求めるうえで実用上十分な精度であると言える。一方、玄側タンクの相対変位に関しては、中央タンクに海水を満載した負荷状態において、制水隔壁位置 (F 87) で $17 \sim 14.5 \text{ mm}$ 、水密横隔壁位置 (F 82) で $4 \sim 5.5 \text{ mm}$ 程度と計測された。
さらに、油槽船の横強度解析プログラム T-SAP, MHI-PROGM および NK-PROGM を用いて理論計算を行なつた結果と実測値との比較によれば、縦通隔壁の上下撓みについては、上記解析法により、約 15% 程度以下の誤差の範囲内で推定しうることが認められた。
- (2) 今回実施した総計 221 点の歪計測においては、その 90% 以上の計測結果は、偏差 50×10^{-6} 以下、すなわち一軸応力の場合に換算して $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ 以内の精度であることが確認された。
- (3) 船底横桁湾曲部あるいは、支材基部湾曲部などのように、面材の幅が比較的大きく、また湾曲部半径が小さい場合にはとくに、面材の反り曲げ変形が著しい。したがつて、面材の表面に歪計を貼布して応力分布を計測する場合には、この局部変形の影響に留意する必要がある。また、圧縮をうける面材においては、面材の局部曲げ変形、あるいは面材の面内での横撓み変形などが重畳されて生ずることも確認された。
- (4) 横桁リング (F 86) における面材およびウェブの応力分布については、MHI-PROGM および NK-PROGM による解析結果と、今回実施した計測結果とは、全般的にかなりよい一致を示した。
また、中央タンクのアーチ状船底横桁においては、面材の湾曲部半径が大きいため、その有効幅はほとんど 100% に近く、面材応力の軽減に有効である。
- (5) 横隔壁に隣接する支材を設けない横桁リング (F 83) の玄側タンク横桁の面材の応力については、同リングは水平桁により支持されているため、全般的に低い値であり、また、支材基部の湾曲部でみられるような応力の上昇は解消される。
- (6) 水平桁の応力分布については、上記のプログラムによる計算値は、中央タンク内の桁部材に対しては計測結果とかなり良好な一致を示している。なお、玄側タンク内の縦通隔壁よりの先端部においては、その解析にさらに検討を必要とする。
- (7) 中心線船底縦通材の端部の横隔壁との取り付け部肘板の面材およびウェブには、比較的高い応力が生ずるので、設計上留意する必要がある。
- (8) 船底横桁ウェブの縦通材貫通部スロットの周辺、およびウェブ防撓材基部の応力については、桁に作用する剪断力が大きい部分では、比較的高い応力が生ずる。なお、玄側タンクの船底横桁防撓材基部の応力集中係数は、 $3.5 \sim 4.6$ 程度であつた。

なお、本研究の計画および実施にあたり、種々有益なご意見とご鞭達を賜つた三菱重工長崎造船所岡部技師長および日本海事協会田代主管に厚くお礼申し上げます。また、実験の遂行に際し、絶大な協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森 正浩, 井土 敏, 船岡宏一郎, 大山武彦: On the Transverse Strength of Oil Tankers, 造船協会論文集第 121 号 (1967 年)
- 2) 永元隆一, 船岡宏一郎, 河野恵裕, 老岐哲夫: Deep Girder 構造の強度について (三材結合部の強度, その 3), 西部造船会会報 35 号 (1968 年)
- 3) 永元隆一, 井土 敏, 小沼 守, 中山美都里: 水密隔壁付 Horizontal Girder の強度, 造船学会論文集第 123 号 (1968 年)

- 4) 日本造船研究協会第83研究部会：巨大船の船体横強度に関する研究，日本造船研究協会第83研究部会報告書，研究資料 No.86（昭和44年3月）
- 5) 岡部利正，永元隆一，井土 敏，徳永 完：大型タンカー横強度実船実験，三菱重工技報 Vol.6 No.2（1969年）
- 6) Germanischer Lloyd：The ESSO NORWAY Project-Full Scale Tanker Investigation—, presented at the 4th International Ship Structures Congress, Tokyo, 1970.
- 7) 日本造船研究協会第83研究部会：横強度計算プログラム (T-SAP) 説明書（昭和45年3月）
- 8) 根津紀久雄：中型計算機用有限要素応力解析プログラム技法，日本海事協会技術研究所研究報告 No.71-172（昭和46年12月）
- 9) 強度設計データブック，裳華房（昭和37年11月），p.970