1,000m³ LNG 実験船による波浪中航走実験 (第二報)

—— タンク応力応答 ——

正員	堀	徹*	正員	竹 沢 誠	二**
正員	片 埜 泰 治***	正員	原 田 耕	二***	
正員	田 畑 潤 一****		清 水	昇*	
	田 中 雅 子*				

Test results by 1,000m³ experimental LNG Ship at actual sea going (2nd report)

—— Stress response of LNG tank ——

by Tohru Hori, *Member* Seiji Takezawa, *Member*
 Taiji Kataza, *Member* Kōji Harada, *Member*
 Jun-ichi Tabata, *Member* Noboru Shimizu
 Masako Tanaka

Summary

The recent outstanding development of computer, accompanied with such powerfull methods of analysis as FEM, has yielded the design concept “design by analysis” where the structures are not designed by “rules”, but almost entirely by “analysis”. In the application of the design based on the concept, the designers are required to analyse the each physical quantities as the stochastic valuables, and to prove the safety of the objective structures statistically.

Then it is the problems how to prove the rationality of the analysed values or, if the analysis have some difficulties how to correct those, because the stochastic valuables are too difficult, though not impossible, to be simulated artificially. And it can be said that the experiments under the natural conditions are the most reliable way to solve those problems.

In the sense above, Hitachi Zosen have built up the 1,000m³ experimental LNG ship, where two types of tanks prismatic independent tank and spherical tank, were equipped. The several kinds of quantities such as ship motion, pressure and stress in the tanks and so on, were measured under the conditions where the ship ran on the actual sea. Those measured values were compiled to obtain the statistical distributions or the various kinds of the statistical quantities. And the method of analysis of the safety assessment which are being developed by Hitachi Zosen were checked by those experimental values and the problems which requires further research were pointed out.

In this report, as the 2nd report, the results of the experiments as to the pressure and stress response to the ship motion, and the several kinds of the statistical distribution of stress are indicated and are investigated by the analysis.

1 緒 言

電子計算機の急激な発達とそれに合致した形で進められてきた解析法の進歩は、構造物の安全性を全て解析に

よって確めようといういわゆる “design by analysis” と呼ばれる設計概念をもたらしたものと考えられる。

この設計概念の特徴は物理量を全て確率論的に取り扱う点にあると思われ、従来の決定論的な考え方とはかなり異なる要素を多く含んでいる。

この概念に従って解析を進めるためには確率変数としての各物理量の実体を掴む事が必要であるが、それらが

* 日立造船 (株) 技術研究所
 ** 横浜国立大学工学部
 *** 日立造船 (株) 船舶設計本部
 **** 日立造船 (株) 因島工場

自然現象の1つであって多くの原因を含むため、単に理論のみでは実体をあきらかにする事が難しい場合も多いと考えられる。したがってまず実際に観察することによって各物理量の発生原因、仕組などに目安をつけ解析方法を開発していくことが必要ではないかと考えられる。

そこで日立造船では総容量 1,000m³ の実験船を建造し、実際の海面を航走する状態で各物理量の計測を行ない、それら実験値に統計的な処理を加え実体の把握に努めると共に現在開発中の解析手法の妥当性を見ると同時に今後の問題点を明らかにすることに努めた。

今回は第二報として船体運動以後の問題、タンク内圧力、および応力の船体運動との応答関係や各種統計分布について実験結果を示すと共に解析結果との比較検討を行なっている。

2 実験の背景

2.1 実験の目的

いわゆる B-Type の LNG 船タンクを建造するためには、タンクの安全性を解析によって証明する必要がある。つまり与えられた航路、海面を基に波浪外力を推定し、その波浪外力下での応力の評価、そして得られた応力から疲労強度、Fracture Mechanics 強度などの強度解析を行ないその安全性を確める必要がある。

しかるに、波浪外力またはそれに惹起される応力などは自然現象の一環として確率論的に取り扱う必要がありその実体を研究室内の実験などで把握するのは、はなはだ難しい事柄であると考えられる。

そこで当社では、1,000m³ の実験船を建造し、実際の海面を航走させ船体運動、タンク内圧力、応力などを収録した。

これら収録された実験データを解析し、各物理量間の応答関係や統計的な実体を明らかにし、現在当社が考えている応力推定法が実際にどの程度反映しているものかを確認すると共に今後のより合理的な応力推定法の確立に役立てることを目的としている。

2.2 応力推定法

当社が現在考えている応力推定の解析フローを Fig.1 に示す。この解析フローにはいくつかの前提条件が含まれているが、そのうち主なものは次の2点である。

(i) タンクの载荷状態は満載状態のみを対象とする。

(ii) 応力推定に当って船とタンクの間の相互作用の影響を無視する。

このうち (ii) については実用的な解析方法としては致命的な欠陥と思われるが、その主旨はタンクに対する primary な外力であるタンク内圧力による応力をまず

正確に評価し、実験結果から逆に相互作用の影響を求めその実体を明らかにしようとするものであって、正確に評価しようとするばばう大な計算を必要とする相互干渉の影響をできるだけ簡単な計算で評価する方法を模索する基礎データを得ようとする目的を背後に持っている。

解析フローのうち与えられた海面状態より船体運動を得る過程については既に第一報¹⁾で報告しており、解析の結果は実験結果をよく説明しており問題はないものと考えられる。

本報告の対象は船体運動以後の過程であって、その解析方法を以下に概説する。

(a) タンク重心位置における加速度成分

船体運動は計算の都合上タンクの重心位置における加速度成分に置換される。つまり、満載状態においてはタンク内の圧力を加速度成分によって一意的に決定できるためである。したがって本報告の対象は確率変数としてタンク重心位置における加速度3成分が与えられた場合にタンク内圧力や応力がどのような確率変数として与えられるかということに要約できる。

(b) 加速度とタンク内圧力

タンクが満載の場合、タンク内圧力は重心位置での加速度3成分の関数として求めることができる。詳細については参考文献 2) に報告したが、ここではその結果についてのみ述べる。

Fig.2 に示すように座標をとるものとする。つまりタンク重心位置を座標原点とし、船の長さ方向、幅方向、上下方向に各々 x_1, x_2, x_3 軸をとるものとする。このとき方形タンク、球形タンクの圧力は次のように表すことができる(なお式では圧力を kg/cm²、長さを m、加速度を g で表すものとする)。

方形タンクの場合

$$p^p(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 p_i^p(x_1, x_2, x_3) \cdot A_i + p_0 + 0.1\rho \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{2} |A_i| \quad (1)$$

ここに、 A_1, A_2, A_3 はタンク重心位置における加速度成分を表す。 ρ はタンク内液体の比重を表す。

$p^p(x_1, x_2, x_3)$ は加速度 (A_1, A_2, A_3) 下における点 (x_1, x_2, x_3) における圧力を表す。

$p_i^p(x_1, x_2, x_3)$ は、単位の各加速度成分が単独に働き、タンク重心位置の圧力を 0 とした場合の点 (x_1, x_2, x_3) における圧力値を表す (Fig.3 参照)。

l_1, l_2, l_3 はタンクの大きさを表し、各々長さ、幅、深さに対応する。

球形タンクの場合

$$p^s(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^3 p_i^s(\theta, \varphi) \cdot A_i + p_0 + 0.1\rho \cdot R \sqrt{\sum_{i=1}^3 A_i^2} \quad (2)$$

ここに、 p^s, p_i^s については方形タンクの場合と同様、 R は球型タンクの曲率半径を表す。

なお式中の θ, φ については Fig.2 を参照。

式 (1), (2) において圧力は加速度成分についての非線型の関数となっている。これは head point つまりタンク内の蒸気圧に圧力が等しくなる位置が一定せず加速度の方向によって移動するためである。

(c) 加速度と応力

もし船とタンクの間の相互作用の影響を無視するとすれば、タンク内の応力はタンク内圧力が与えられれば一意に決定できる。しかるに圧力は加速度の関数として表すことが可能であるから応力についても加速度の関数として表すことができる。

つまり式 (1) で表される圧力から圧力分布を求めタンクに加わる外力と考えると、例えば方形タンクの場合

$$p^p = \sum_{i=1}^3 p_i^p A_i + \left(p_0 + 0.1\rho \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{2} |A_i| \right) p_0 \quad (3)$$

ここに、 $p_1^p \sim p_3^p$ は各单位加速度成分が単独に働いた場合の圧力分布を表す (Fig.3 参照)。

p_0 は単位蒸気圧に対応する圧力分布 (Fig.3 参照)。

そこで Fig.3 の4つの外力(圧力)分布について応力解析を行ない、タンク内の任意の1点Qにおける応力値を $\sigma_0^Q, \sigma_1^Q \sim \sigma_3^Q$ とすれば、加速度 (A_1, A_2, A_3) 下における点Qの応力 σ^Q は、重ね合わせの原理より次のように与えることができる。

$$\sigma^Q = \sum_{i=1}^3 \sigma_i^Q A_i + \left(p_0 + 0.1\rho \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{2} |A_i| \right) \sigma_0^Q \quad (4)$$

式 (1) および (4) を比較すると圧力および応力は全く同じ形式の関数として表されていることが判る。球型タンクについても同様に求めることができるがここでは省く。

(d) 各種応力値の統計分布

(c) において応力が加速度成分の関数として表わされることを示したが、ここで応力の構成変数である加速度を確率変数とした場合、応力はどのような確率変数となるかを求める必要がある。

このためにはまずどのような形の応力値を知る必要があるかが問題となり、そのためには得られた応力値をどのような強度解析に適用して安全性を評価するかが問題となる。LNG 船タンクの場合、疲労解析、Fracture Mechanics 解析 (Leak Before Failure) および許容応力の3本立てで評価することになっている。これら3つの評価方法のうち、前者2つの場合、どのような応力値の確率分布が必要かということについては必ずしもはっきりしていないのが現状ではないかと考えられるが、現状では応力振幅 (stress range) の分布、極値の分布および応力時系列そのものの分布を考えておけば十分では

ないかと考えられる。

これらの分布のうち、時系列については正規分布、極値については Cartwright & Longuet-Higgins の分布になることが知れており、振幅についてははっきりした理論分布は見当らないが数値実験の結果、越智の Truncated 分布で近似しうることを報告している (参考文献2) 参照)。

この3つの理論分布を決定するパラメータは時系列の分散および時系列に関するパワースペクトラムの相対的な広がり程度を表すバンド幅の2つであり、この2つを求めることができればとりあえず問題は解決する。

これらの値を求めるに当って船体運動解析から与えられる情報は各加速度成分のパワースペクトラム、および分散であって必要ならば各加速度間の相関係数も得ることができ、相関関係を考慮すると問題はかなり複雑化するものと考えられ、とりあえず相関関係を無視し、各加速度成分は統計的に独立と考えることにすれば、問題は関数の確率分布を求める問題に帰することができる。

以下に分散およびバンド幅の求め方および問題点を述べる。

(i) 分散

関数が線型であれば簡単にいわゆる square root 法によって求めることができるが、問題は式 (4) に示されるように関数が非線型の場合であって、この場合の近似法については既に報告しているが (参考文献2)、ここではその結果のみについて述べると、(4) 式のような関数の分散を求める問題は以下に示すような簡略化した関数の分散を求めることに帰着させることができる。

$$Y = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 |x_1| + k_5 |x_2| \quad (5)$$

ここに、 $k_0 \sim k_5$ は定数、 $x_1 \sim x_3$ は関数 Y の従属変数であり、その平均値が 0, 0, 1, 分散が $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ である確率変数と考える。

このとき関数 Y の平均値は

$$E(Y) = k_0 + k_3 + k_4 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_1 + k_5 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_2 \quad (6)$$

分散は

$$D(Y) = k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + k_3^2 \sigma_3^2 + k_4^2 \frac{\pi-2}{\pi} \sigma_1^2 + k_5^2 \frac{\pi-2}{\pi} \sigma_2^2 \quad (7)$$

と求めることができる。

(ii) バンド幅

関数のバンド幅の求め方については殆ど知られていない。ここでは関数が線型の場合についてのみ考えることにする。簡単のため関数関係を次のように表示する。

$$Y = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \quad (8)$$

もし従属変数 $x_1 \sim x_3$ のスペクトラム分布 $E_1(\omega), E_2$

ω), $E_3(\omega)$ が与えられ, また $x_1 \sim x_3$ が統計的に独立ならば Y のスペクトラムは以下のように求めることができる。

$$E_Y(\omega) = k_1^2 E_1(\omega) + k_2^2 E_2(\omega) + k_3^2 E_3(\omega) \quad (9)$$

Y のスペクトラムが定まるので, バンド幅は各々の方法で計算することができる³⁾。

(iii) 問題点

与えられた海面において, 波と船とのなす角度 (Heading Angle) を一定に保ち航行するとすれば, タンク重心位置の各加速度間に当然いくらかの相関関係が存在するものと考えられる。しかし, もしいくつかの Heading Angle における加速度を累積すれば相関関係はかなり減少し, 結果として相関関係を無視してもよい予測値を期待できるのではないかと予想されるが実験により確かめる必要がある。一方バンド幅については現状では確かな方法がないが, バンド幅係数 ϵ が 0.3~0.4 以下であれば Cartwright & Longuet-Higgins の分布は実質的に Rayleigh 分布で表すことができ, バンド幅の影響を無視できるといわれている⁵⁾。したがって応力が実際にはどの程度のバンド幅を持っているのかを実験により確かめる必要がある。

3 実験の概要

3.1 計測項目および位置

Fig.4 に実験に用いられた 1,000 m³ 実験船の Profile を示す。図にみられるごとく本船は方形タンクおよび球型タンクを搭載しており両タンクに対して実験が行なわれた。

本実験では多くの目的に従って計測が行なわれており, 計測された項目も多岐にわたっているが, ここでは本報告に関連ある項目についてのみ説明することにする。

(a) 加速度

加速度は本来波に対する船体運動の応答を見るために計測するのであるが, タンクに対する外力の原因として船体運動を考えるとときには, 2章で述べたごとく, タンク重心位置における加速度 3 成分の形で求めた方が都合がよい。そこで方形, 球型両タンクについてその重心位置で加速度の 3 成分が計測された。

(b) 圧力

船体運動によってタンク内に圧力が発生し, 発生した圧力によって応力が惹起される。したがって応力を正しく評価するためには, 圧力が正しく評価される必要がありかなり詳しく計測を行なった。

方形タンクについては Fig.5 に示すように 12 ヶ所で, 球型タンクについては Fig.6 に示すように 15 ヶ所で圧力が計測されている。なおゲージとしては共和電業製 BE

-2KB, 直径 94mm の土圧計を使用した。

(c) 応力

応力の計測は計測技術上かなり難しい問題であるので, 計測箇所決定に当っては可能なかぎり信頼性の高い計測値が得られることを念頭においた。

Fig.7 には水平面におけるゲージ貼布位置, Fig.8 にはトランスリングにおけるゲージ貼布位置を示す。図には他の目的で貼布されたゲージも合わせて表示されているが, 本報告の対象となるゲージは水平面では H1, H5, H7, H8, H9 の 5 点, トランスリングでは T1, T3, T6, T9, T10 の 5 点である。

なお球型タンクについても応力計測を行なっているが未だ解析の段階に至っていないのでここでは説明を省略する。

また計測値の安定をはかるため, 1k Ω の抵抗と 33 μ F のコンデンサで構成されるフィルターを, 全ての計測点 (加速度, 圧力, 応力とも) にほどこしている。

3.2 計測方法

(a) 実験海域および日時

実験は Fig.9 で示される海域で昭和 49 年 6 月 12 日から 7 月 12 日までの間で比較的海が荒れている日を選んで計測が行なわれた。幸い台風に遭遇する機会に恵まれほぼ所期のデータ収録に成功したものと考えられる。

(b) タンクの载荷状態

タンクは満載, 75% フル, 50% フルの状態で計測されたが, 本報告ではこのうち満載状態に対するものを対象としている。

(c) 実験方法

実験の目的は考えられた海面における各物理量の統計的な諸量を求めることにあるが, これらは波と船がなす角 (Heading Angle) の関数と考えられる。そこで実験では 1 つの海面に対していくつかの Heading Angle をとり, 各々の Heading Angle についておよそ 20min の連続計測を行なっている。このようにすることによって各 Heading Angle に対するデータを求めると同時に, 全ての Heading Angle に対する統計量を累積することによって, Heading Angle の影響を取り除いた状態, いわゆる All Heading の状態に対応する統計量を求めようとしたものである。以上の事柄を Table 1 にまとめて示す。

データ収録機としてはディジタルデータレコーダー (DATAC 1500) 1 台およびアナログデータレコーダー 5 台 (TEAC R-251) が使用された。本報告で示すデータは主として DATAC 1500 によって収録されたものであって, 合計 63 個の物理量が約 0.4 秒のサンプリングタイムでディジタル化され同時に収録されている。

4 実験結果および考察

2章に述べた背景のもとに実験の結果および解析値との比較を以下に述べる。

4.1 Time History

2章で述べた如く、応力の推定に当たってまず前提となるのは、応力が加速度の関数として表されることにあった。そこで応力が加速度の関数として表せるものかどうか、またその関数式の妥当性はどうかという問題を調べるためには Time History の比較が有効である。

つまり加速度の関数として (4) 式が与えられ、時々刻々の加速度成分が与えられたとすれば、それらの加速度値を (4) 式に代入すれば1つの応力に対する Time History をうることができる。これを歪ゲージから直接計測された実験値としての Time History と比較すれば (4) 式の妥当性を見ることができる。

ただ応力についてはその値を決定する要因が加速度もしくはそれによって惹起されるタンク内圧力だけではなく、船とタンクの間の相互作用の影響があって上記の比較のみでは (4) 式の妥当性を見ることができない。幸いタンク内圧力も加速度の関数として表らわされておりその関数の形は応力に関するものと同じである。したがってまず圧力の Time History に関する上記の比較を行なうことによって関数式の妥当性を確認できるものと考えられる。

また応力について上記の比較を行えば、両者に相違があれば、その差は船とタンクの間の相互作用の影響を示すと考えられる。

(a) 加速度の Time History

Fig. 10 に加速度の Time History の例を示す。加速度は方形タンク重心位置で計測されており、各々前後、左右、上下の方向の加速度を示している。

これら加速度の Time History は以下の圧力、応力の Time History の比較の基になるものであって、これらの Time History から時々刻々の加速度成分値が読みとられ計算上の圧力、応力の Time History が求められている。

(b) 圧力の Time History

タンク内応力値を決定する primary な外力であるタンク内圧力を正しく推定できるかどうかは非常に重要な問題と考えられる。

Time History の比較に際し、推定式 (1) は実験状態に合わせ若干修正する必要がある。つまり (1) 式においては圧力の Head Point が加速度の方向に従って移動することを考慮している。しかるに実験状態ではタンク内の各種ゲージの導線を取り出すためにタンクのトッププレート中央にもうけられたハッチのふたをとりはず

している。したがってハッチ部に存在する自由表面では常に大気圧に等しくなり、ここが加速度方向に拘らず Head Point になっている。この点を考慮すると (1) 式は実験状態に対し次式のように修正される。

$$p^p(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 p_i^p(x_1, x_2, x_3) \cdot A_i + 0.1 \rho \frac{l_3}{2} \cdot A_3 \quad (10)$$

同様の理由で応力の推定式 (4) も次式のように修正される。

$$\sigma^q = \sum_{i=1}^3 \sigma_i^q A_i + 0.1 \rho \frac{l_3}{2} \cdot A_3 \sigma_0^q \quad (11)$$

(10), (11) 式から判るように実験状態においては、圧力、応力は加速度に関して線型の関数となり、実際のタンク状態で現れる非線型の影響については本実験では見ることができなかった。

Fig. 11 に加速度の Time History から読みとられた各加速度成分値を推定式 (10) に代入して得られた Time History と、圧力計から直接得られた Time History の比較例を示す。

図にみるごとく両者は非常によい一致をみせている。比較は他の実験ケース、圧力計測位置についても行なわれているが、いずれも非常によい一致を見ることが判った。

したがって、タンク重心位置での加速度成分が判ればタンク内圧力は十分の精度で予測できることが確認できるものと思われる。また同時に本実験での各計測値が十分信頼に足るものであることを示すものと考えられる。

(c) 応力の Time History

応力を推定するためには (11) 式における $\sigma_0^q \sim \sigma_3^q$ を決定する必要があるが、 $\sigma_0^q \sim \sigma_3^q$ は Fig. 3 に示す外力について応力解析を行ない、点 Q における応力を求めることによって決定できる。

そこで有限要素法による応力解析を行なった。Fig. 12 は計算に用いられたタンクの要素分割図であって約 17,000 個の節点 (約 37,000 自由度) が含まれている。境界条件としては船からの相互作用の影響を除くため、タンクのキー、サポートの船との接触位置において変位を拘束している。計算には当社開発のプログラム MAP が使用された⁵⁾。

計算の精度を確認するために、タンクが陸上で建造完成した時にいくつかの静的実験を行ない、上記の要素分割、プログラムで計算し比較を行なった。その結果は非常に満足すべきものであって計算値は実験値を十分に説明できるものであった。

計算の結果、Fig. 3 の各荷重パターンに対応する実験各点の応力係数 $\sigma_0 \sim \sigma_3$ を Table 2 に示す。

Table 2 の各値を (10) 式に代入し、更に各加速度成分値を代入すればタンク内の圧力に起因する Time History になるであろうことは前述の過程から明らかなのと考えられる。

Fig.13, Fig.14 はこのようにして得られた計算上の Time History と実験計測から得られた Time History を比較したものである。図は両者が比較的良好なものとの相異が最もはげしいものを選んで示したものであるが、両者の差が船とタンクとの相互作用の影響を表すとすれば、最も影響の小さい例と大きい例を示したことになる。

相互作用の影響をさらに詳しくみるために両時系列の標準偏差をとり、各 Heading Angle ごに示したのが Table 3 である。Table 3 にみるごとく実験点 T9 では相互作用を含んだ実験値の標準偏差は相互作用を拘束した計算値の標準偏差に比べ 80~100% の大きさであるのに反し、H5 では 30~60% と大きく減少している。

この現象を裏付ける 1 つの例として次のようなデータがある。

同じく 1,000 m³ 実験船において岸壁係留中に方形タンクに注水テストを行ない応力計測して計算値との比較を行なっている。解析は船およびタンクを梁要素で分割することによって行なわれた (自由度約 4,650)。その結果、タンクが空の状態から満載状態に至る差として H5 の応力は実験値および計算値とも 3.5 kg/mm² の値を得た。一方同じ負荷状態に対して相互作用を拘束した有限要素法解は 6 kg/mm² を示しており、相互作用を考慮することによって応力が 60% 程度減少することを示している。同様の比較を T9 で行なうと両者にはほとんど差がみられなかった。以上は Fig.13, Fig.14 または Table 3 に現れる差を裏付けるものの 1 つと考えられる。

次に Fig.14 にみるごとく、相互作用の大きいものでも、その変化の様子はほとんど同じで、ちょうど振幅を定数倍したような形になっている。これは相互作用の影響をサホート、キーにおける支持条件で置き変えうる可能性を示しているものと考えられる。つまり相互作用による外力が加速度による外力 (タンク内圧力による外力) とは独立な外力であれば Fig.13 の両 Time History は変化の様子の含めて相違するものと考えられるからである。この点については更に検討を行ないたいと考えている。

4.2 統計値

2章で述べた如く各種応力値の統計分布を決定するためには分散、およびバンド幅が必要である。ここでは実験値と 2章で述べた計算式による値を比較検討する。

(a) 分散

分散の予測に当たっての問題点は応力計算式における非線型の取扱と従属変数である加速度成分間に存在する相関関係の影響の程度をしらべることであった。しかるに前者については、実験状態で関数が線型となり、比較の対象とならないため、後者についてのみ述べる。

加速度成分の Time History から (11) 式を介して得られる応力の Time History は加速度成分間の相関の影響を含んでいる。そこでこの Time History から得られた分散と (7) による計算値を比較すれば相関の影響をみることができる。

Table 4 は上記の 2 つの分散を標準偏差の形で示したものである。この表に示したものは比較的相関の影響が少ない例であり、場合によっては 30% 程度の相違を示すものもあったが、いずれにしてもいくつかの Heading Angle による値を累積すると影響は小さくなり、最も相違の大きいものでも 10% 以下の相違であることが判った。

(b) バンド幅

バンド幅の場合、その計算方法がいろいろあり今回の実験の場合、計算方法の相異によってかなり値がばらついた。Table 5 は数値実験の Time History において負の極大値の割合からバンド幅を求めたものと、(9) 式に示すごとく加速度成分の各スペクトラムを線型重ね合わせることによって応力のスペクトラムを求め、その各モーメント値から計算されたバンド幅を比較したものである。前者は相関の影響を含んでおり、後者は含んでいないため、両者の差は相関の影響を表すと解せられるが、Sample 数が少ないこと、および計算方法の相異などがあってダイレクトに相関の影響とはいえないのではないと思われる。

注目されるのはいずれにしてもかなり大きなバンド幅を示すことであるが、(9) 式から判るようになんとかのスペクトラムが重なり合うため必然的に広いバンド幅になるものと考えられる。

4.3 統計分布

応力評価以後の諸強度解析を念頭に応力時系列、応力極値、応力振幅に関する確率分布を実験結果から求め、各々の分布に対応すると考えられる理論分布との比較を行なった。

1 つの海面で 1 つの Heading Angle をとって船を航走させれば定常状態にあるものと考えられ、2章に述べたごとく応力時系列における各瞬時の応力値の分布、極値の分布、振幅の分布はそれぞれ正規分布、Cartwright & Longuet-Higgins の分布および Truncated 分布になることが予想される。

Fig.15, Fig.16, Fig.17 はそれぞれ応力時系列、極大値、振幅に関する実験値および各々に対応する理論分布

を比較したものである。理論分布に用いられる分散は応力の Time History から直接2乗平均をとって計算され、バンド幅は同じく Time History における負の極大値の割合から計算したものである。

図にみるごとく応力時系列については両者は非常によく合致しており、極値、振幅についてもサンプル数の少なさによるものと考えられるバラツキが見られるものの理論分布はよく実験値を説明しているものと考えられる。今後 χ^2 -検定などによってさらに詳しく検定を行ないたいと考えている。

5 結 言

1,000 m³ 実験船による実海面で行われた実験の計測値をもとに現在考えられている応力推定法の妥当性または今後の問題点などについて検討を行なった結果について報告した。

最後に実験実施に当って有益なご指示、ご指導をいただいた阪大寺沢名誉教授をはじめ、当社 HL 委に出席下さった諸先生方に心からお礼を申し上げる。

なお本実験は全社を挙げて行われたもので関係各位にお礼を申し上げるが、特に応力解析関係を受け持っていた船基本設計の各位、また実験の実施に当って限りの協力をして下さった因島工場の各位の努力に負う所が大きかったことを申しこえる。

参 考 文 献

- 1) 浅野 他：1,000 m³ 実験船による波浪中航走実験（第一報），日本造船学会論文集，138号（昭和50年12月）。
- 2) 高木 他：波浪による船内タンクの不規則応力推定法，関西造船協会誌，156号（昭和50年3月）。
- 3) M. S. Longuet-Higgins et al：The statistical distribution of maxima of a random function, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 237 (1956)。
- 4) 堀 他：有限要素法プログラムにおける Data Generation, 日本造船学会誌，No. 554 (Aug. 1975)。
- 5) 日立造船 K. K. 編集：渡辺恵弘先生講義集（昭和48年10月）。

Fig. 1 応力推定フロー

Fig. 2 タンク座標

Fig. 3 基本荷重

Lpp × B × D × d = 60.0 × 13.0 × 6.5 × 4.1m

No.1 tank (spherical) 412m³
No.2 tank (prismatic) 894m³ Fig.4 1000 m³ 実験船

Fig.5 圧力計配置図 (方形タンク)

Table 1 Test condition

Load Condition	Date (1974)	Wave Height ^a	No. of Trial
100%	6/12	0.5 m	8
	14	0.3	8
	15	0.2	3
	17	1.5	6
	18	2.0	7
	19	1.0	6
	7/7	3.0	7
75%	6/21	0.8	7
50%	6/24	0.5	7
	27	1.5	7
	28	0.8	7
	7/ 6	2.0	7
100%	7/ 1	1.0	7
	2	1.5	7
	3	1.0	4
	4	2.0	2
75%	7/ 4	2.0	7
50%	7/ 5	1.5	7

Fig.6 圧力計配置図 (球形タンク)

* 航走中実験計測点: T1, T3, T6, T9, T10
 (係留中実験と併用)
 他は係留中実験のみに使用
 計測点数: 1方向ゲージ 5点
 リード線 5本

Fig. 8 トランスリング応力計測点

Fig.12 応力解析要素分割

Fig.10 加速度のTime History

Fig.11 圧力のTime History(理論値との比較例)

Table 3 相互作用の影響

Ex. No.	H. Angle	T 9			H 5		
		①	②	①/②	①	②	①/②
1	↓	0.112	0.120	0.93	0.142	0.423	0.34
2	↑	0.041	0.047	0.87	0.060	0.107	0.56
3	↗	0.053	0.057	0.93	0.056	0.110	0.51
4	↘	0.102	0.120	0.85	0.134	0.394	0.34
5	←	0.111	0.121	0.92	0.124	0.268	0.46
6	↖	0.066	0.069	0.97	0.056	0.122	0.46
7	↙	0.088	0.108	0.81	0.119	0.355	0.34
累積		0.086	0.096	0.90	0.105	0.285	0.37

- ① タンク内圧力のみによる応力
② 船との相互作用を含んだ応力

Table 2 応力係数

応力係数 応力位置	0.1σ ₀	σ ₁	σ ₂	σ ₃
T 1	-0.925	13.0	-0.118	-2.41
T 3	-0.715	2.20	-1.06	7.93
T 6	2.07	-13.6	1.82	-6.83
T 9	-0.510	5.20	-0.627	2.95
T 10	-0.886	5.35	2.50	3.53
H 1	-2.59	20.0	-0.041	4.81
H 5	2.74	-20.8	0.361	-5.97
H 7	-0.736	-1.37	-0.988	2.24
H 8	-0.227	4.09	0.012	2.45
H 9	-0.736	-1.37	0.986	2.23

Table 4 加速度成分間の相関の影響

Ex. No.	H. Angle	T9 (標準偏差)			H5 (標準偏差)		
		①	②	①/②	①	②	①/②
1	↓	0.128	0.120	1.07	0.423	0.423	1.00
2	↑	0.040	0.047	0.85	0.109	0.107	1.02
3	↗	0.047	0.057	0.82	0.114	0.110	1.04
4	↘	0.132	0.120	1.10	0.391	0.394	0.99
5	←	0.120	0.121	0.99	0.278	0.268	1.04
6	↖	0.055	0.069	0.80	0.125	0.122	1.02
7	↗	0.119	0.108	1.10	0.358	0.355	1.01
累積		0.099	0.096	1.03	0.285	0.285	1.00

① (7)式による計算値

② (10)式によって得た数値実験TimeHistoryから得られた値

Table 5 バンド幅の比較(計測点H5)

Ex.No.	1	2	3	4	5	6	7
HAngle	↓	↑	↗	↘	←	↖	↗
実験値	0.215	0.734	0.794	0.441	0.569	0.679	0.467
計算値	0.281	0.555	0.546	0.329	0.362	0.536	0.321

Fig.16 応力の統計分布(極大値)

Fig.17 応力の統計分布(振幅)

Fig.15 応力の統計分布(時系列)