

IV 高速船と構造安全設計に関する研究

— 特に波浪衝撃荷重について —

構造強度部 竹本 博安

1. まえがき

波浪中を航走する高速船には大きな波浪衝撃荷重が作用することが知られている。滑走艇や半滑走艇は、高速航走により船底に作用する衝撃水圧による動的揚力を利用して、接水面積を減少し高速を達成しているが、航走条件によっては非常に大きい波浪衝撃荷重を受けることがある。大洋を航行するコンテナ船や自動車専用船などは、大波高時に船首に青波をかぶることがないように大きなバウフレアを設けているが、これはバウフレアに働く波浪衝撃荷重による船体縦揺運動の減衰を目的としたものである。これらのいずれの場合にも、波浪衝撃荷重は避けることができない荷重であり、波浪衝撃荷重の適切な推定による構造設計が必要であることは言うまでもない。特に滑走艇、半滑走艇では波浪衝撃荷重により船体構造が決まる、とさえ言われている。波浪衝撃荷重の特性の把握と荷重推定精度の向上が必要とされる所以である。

当所では、波浪衝撃荷重に関する研究として、バスボートやプレジャーボート等の小型高速艇から巡視船、コンテナ船等の大型高速船に至る種々の船舶に関して、波浪衝撃荷重に関する水槽試験や実船試験等を実施してきた。同時に、水面衝撃荷重に関する種々の基礎的な模型実験も実施している。これらの研究を通じて、波浪衝撃荷重の発生メカニズム、荷重特性を明らかにし、水面衝撃水圧推定法の提案と検証を行っており、船体の波浪中非線形応答解析法についてもこれらの研究成果を用いた検討を行っている。

本報告では、波浪衝撃荷重に関して、(1) 波浪衝撃荷重発生メカニズム、(2) 波浪衝撃荷重推定法、(3) 波浪衝撃荷重を考慮した波浪中船体応答計算法について、概要を述べる。

(1) 波浪衝撃荷重発生メカニズムに関しては、二次元の水面衝撃水圧の理論として、Wagner の理論が成り立つことを示し、水面衝撃水圧の相似則、水面衝撃水圧の発生条件を明らかにする。

(2) 波浪衝撃荷重推定法に関しては、二次元の Wagner の理論を基に、三次元の幾何学的条件から衝撃角、衝撃速度、衝撃水圧を求め、これから設計に用いる等価静水圧を求める手法を提案し、三次元水面衝撃実験による検証例を示す。

(3) 波浪衝撃荷重を考慮した波浪中船体応答計算法に関しては、Wagner 型の衝撃モデルを用いた非線形解析法の衝撃荷重の求め方、前進速度を考慮した衝撃速度の求め方を示すと共に、数値計算例を示す。

これらの結果により、波浪衝撃荷重の発生メカニズム、波浪衝撃荷重の求め方を Wagner の理論を基に、合理的にまとめることができると思うが、等価圧力の求め方や波浪中非線形応答解析プログラムなどの細部に渡ってはまだ改善の余地があると思われる。

波浪衝撃荷重に関する研究は長い歴史を持っており、波浪衝撃荷重発生メカニズムに関しては、最近の研究が反映されてかなり見解がまとまってきたことを期待したが、最近の波浪衝撃荷重に関連するシンポジウムや国際会議のレポートでは、波浪衝撃荷重に

関する認識は必ずしも統一されていないようである。この報告が、これらの波浪衝撃荷重研究の進展に貢献できれば幸いである。

2. 従来の波浪衝撃水圧（荷重）研究の概観

2.1 Karman の理論[1]と Wagner の理論[2]

波浪衝撃荷重の研究に関して、Karman と Wagner の研究が有名である。飛行艇の着水時の衝撃荷重に関して、Karman は二次元の楔が水面に突入する場合の付加質量の変化による運動量の変化に注目し、衝撃荷重を求めた。物体が水中を動く時この物体と共に水が動くが、その量を付加質量と言い物体の形や運動の周期に応じて求められる。Karman は、着水時の付加質量の変化に伴う運動量の変化から荷重を推定できることを示し、この場合の付加質量を静止水面での接水幅を直径とする半円の面積に相当するものとした。一方、Wagner は楔が水面に突入する時の水面の盛り上がり（piling up water）を考慮した衝撃水圧計算法を導いた。これを Karman と同じように付加質量で表すと、静止水面幅の $\pi/2$ 倍の直径を持つ半円の面積に相当する付加質量を考えることになる。これらを水面の盛り上がりの有無により Karman 型衝撃モデル、Wagner 型衝撃モデルと呼ぶことがある。水面の盛り上がりがあるかどうかは重要で、衝撃荷重は Wagner 型によるものが Karman 型の $(\pi/2)^2$ 倍（約 2.5 倍）になる。

Wagner の理論は水面に突入する物体による水面の盛り上がりを考慮して求められるが、突入する物体が楔形の場合、衝撃水圧は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \rho V_i^2 \left[\frac{\pi}{\beta \sqrt{1 - (x/L)^2}} - \frac{(x/L)^2}{1 - (x/L)^2} \right] + \frac{1}{2} \rho V_i^2 + \rho \ddot{z} \sqrt{L^2 - x^2} \\
 P_{\max} &= \frac{1}{2} \rho V_i^2 \left[1 + \left(\frac{\pi}{2\beta} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho V_i^2 \\
 \text{at } \frac{x}{L} &= \left[1 - \left(\frac{2\beta}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \\
 \text{for } \ddot{z} &= 0
 \end{aligned} \right\} (1)$$

この式から、衝撃圧の最大値は deadrise angle β と速度 V_i で決まり、物体の大きさには関係しないことが分かる。図-2 に deadrise angle $\beta = 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ の場合の圧力分布を示しているが、このグラフから分かるように衝撃圧は水面と楔の接点近くで最大値を持ち、deadrise angle が小さいほど高い値のピークを持つ。

Karman の理論と Wagner の理論は、後の波浪衝撃荷重に関する研究の基礎となっており、波浪衝撃荷重としていずれを採用すべきかについては、未だに議論がある。楔の模型

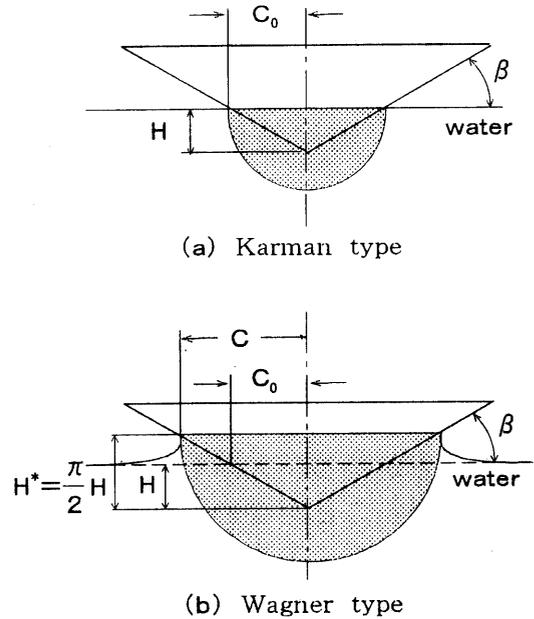


図-1 衝撃モデルと付加質量

実験や最近の数値シミュレーションでは、Wagner 型の水面の盛り上がりを観察され、水圧の大きさや分布も Wagner の理論と整合する結果が示されており、Wagner の理論が成り立つものと考えて問題ないと思われる。一方、船体の波浪中非線形応答計算等の分野では、以前から Karman 型の波浪衝撃荷重が採用されており、解析結果が模型実験とよく合うという報告もあり、問題を複雑にしている。[3]

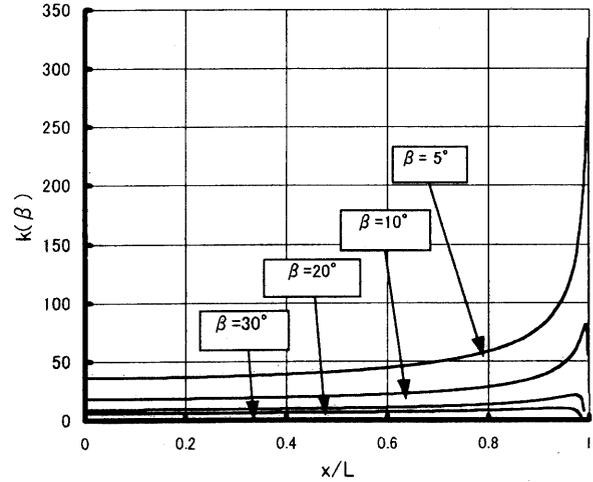


図-2 衝撃水圧の分布

2.2 比較的最近の波浪衝撃荷重の研究

波浪衝撃荷重の研究の動機は基本的には、船体損傷の多発に対する対策である。波浪衝撃による船体損傷の多発は、推進機関の進歩による波浪中航走速度の上昇、経済活動の変化に伴う高速船の一般化、船舶の大型化等と関係している。船体の大型化と高速化は波浪衝撃荷重に関して、非常に大きな IMPACT であったと思われる。

また、新形式船舶の研究や Design by Analysis 等のための基礎研究として、波浪衝撃水圧(荷重)の研究が実施されている。

これらの研究で認識されたことは、概略次のようになる。

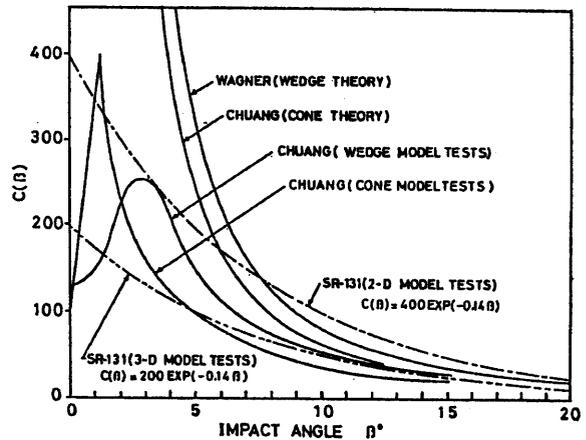


図-3 水面衝撃圧の理論と実験の比較

(1) 衝撃荷重

波浪衝撃荷重として Karman の運動量理論が妥当であると考えられた。現在も使用されている。

(2) 水面衝撃水圧の実験値と理論の関係

図-3 に代表的な水面衝撃水圧の理論と実験値の比較を示す。水面衝撃の実験結果に比べて、Wagner の理論値は大きく、特に deadrise angle が小さい範囲でその差が大きい。また、模型実験結果の比較においても、模型の大きさ、実験の種類によって差があることが分かった。Sellers[4]は、模型の材料中を伝播する波動によりこれが説明できるとしている。

(3) 水面衝撃水圧の実験式、三次元衝撃圧推定法

Stavovy & Chuang[5]は実験式を用い三次元衝撃圧推定法を提案した。実験式は Chuang が実施した二次元、三次元の水面衝撃実験結果をまとめたものである。三次元の水面衝撃現象を二次元の水面衝撃現象に変換するための仮定は、非常に簡単でかつ合理的である。この考え方をを用いると、前進速度がある場合に船首部の衝撃圧が非常に大きくなることをうまく説明できる。しかし、実験式は実験の誤差を含んでおり、一般的ではない。

(4) Allen & Jones[6]の圧力減少係数

Allen & Jones はある部材にかかる衝撃荷重を求める場合に、設計部材の面積と衝撃荷重を受ける全体の面積の比に注目し、この比が小さいほど衝撃荷重が高くなることを想定し、一連の数値シミュレーションを実施して、圧力減少係数を導いた。実際に実船計測結果について、Stavovy & Chuang の方法で衝撃圧のピーク値を推定し、Allen & Jones の圧力減少係数を用いると、計測値と非常によく合うことが分かっている。Allen & Jones の圧力減少係数は、DNV 等の高速船艇のルールの高重設定法に採用されている。

(5) 水面衝撃荷重に対する構造応答[7]

構造模型を用いて、水面衝撃実験を実施し構造応答を計測した例がある。船首構造の水面衝撃実験に対して、Wagner の理論による衝撃水圧を用いて、構造解析を行い実験結果と非常によく合う結果を得ている。

(6) その他

波浪衝撃荷重に関して、明確な報告としての記述はないが、大型船では衝撃荷重が大きいこと、前進速度があると船首部の衝撃荷重が大きいことなどが知られている。

この時点で衝撃荷重（水圧）に関してまとまった概念はなく、衝撃荷重としては Karman の運動量理論による衝撃荷重があり、構造物の水面衝撃実験の解析では Wagner の理論が成り立っているように見えるが、衝撃水圧の実験値と比べると Wagner の理論は実験値より大きすぎるということで衝撃水圧としては、Stavovy & Chuang の実験式を用いるのが、最も実際的な対応であったと思われる。

3. 二次元衝撃水圧の模型実験と解析[8],[9]

上記の様々な現象を説明するためには、水面衝撃水圧の実験を行い水面衝撃水圧の特性を明らかにすることが必要と思われた。実験には楔形模型を用い、落下速度一定での水面衝撃実験を実施した。衝撃水圧の計測には当時開発されたばかりの歪ゲージ式の小型水圧計を使用した。水面衝撃現象の計測には計測機器の非常に高い周波数特性を必要とするが、水圧計の特性で、計測機器のトータル周波数特性は 20kHz に抑えられた。

この実験では、deadrise angle 4° の楔形模型（鋼板パネル製、板厚 6mm）を用い、幅方向に 5 個の水圧計を取り付け、水面突入時の圧力変化を磁気テープ式データ・レコーダに記録した。また、鋼板パネルには歪ゲージを貼付し、パネルの歪状態を計測した。

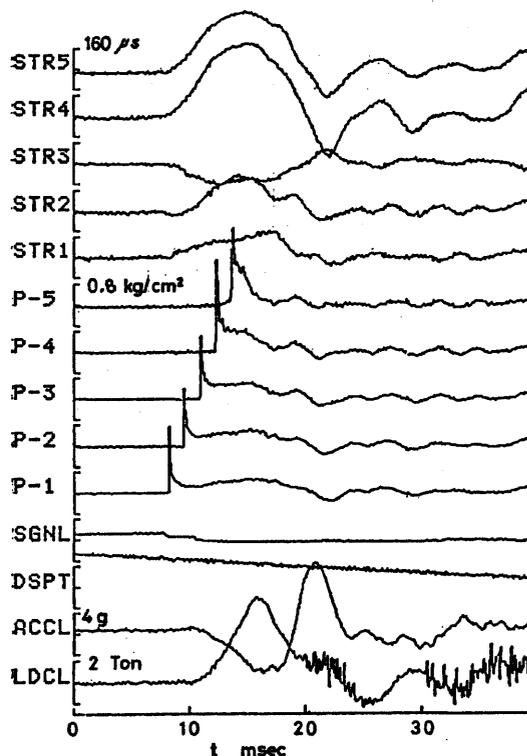


図-4 水面衝撃実験計測波形の例

図-4 は計測されたデータの例である。各水圧計の衝撃圧波形発生時間の時間差から水面の移動速度を求めることができる。模型の落下速度と水面の移動速度の関係を図-5 に示す。図中に示す直線は、Wagner の理論が成り立つとした場合の落下速度と水面の移動速度の関係である。両者が非常によく合っていることが分かる。

計測された衝撃水圧は、Wagner の理論よりかなり小さいこと、模型が大きくなると計測される衝撃水圧も大きくなることが確認された。

ここで Wagner の理論による衝撃水圧の分布を調べて見ると、そのピークは非常に高いが分布の幅は非常に狭く、水圧計の直径より遥かに小さい。Deadrise angle 4° の場合、ピーク値の $1/2$ の値をもつ部分の幅は全体の 1.2% にすぎない。水圧計の直径は約 5mm で模型の半幅は約 300mm である。模型の一番外側に取り付けた水圧計を考える場合、これは 3.6mm に相当する。高い衝撃水圧は非常に狭い範囲に作用しており、水圧計はその周辺を含んだ平均値を計測しているものと考えられる。これを確認するために、水圧計の受圧面の有限要素モデルを作成し、Wagner の理論による水圧を加えてその応答を計算した。その結果は、ほぼ予想道理で、計算結果は計測値とよく合うこと、模型の大きさが大きくなると計測結果が大きくなることが確認された。

さらに楔形模型の底面パネルの有限要素法モデルを作成し、これに Wagner の理論による衝撃水圧を加え応答を求めたところ、実験での計測結果とよく合う結果が得られた。

これらの結果は、Wagner の理論が成り立っていることを示しているが、さらに、これを確認するために、Chuang の水面衝撃実験結果について、同様の解析を行った。[9] Chuang の実験を対象にしたのは、実験の計測系の周波数特性が非常に高く信頼性が高いと判断されたためである。

Chuang の実験結果は、模型下端が水面に接する時の速度で整理されているため、これからさらに水圧計が水面に接する時の速度を求める必要がある。荷重として模型の重量と Wagner の理論による衝撃水圧を用いて運動の方程式を解いてこれを求め、図-6 に示す Chuang が用いた水圧計の Wagner 理論による衝撃水圧に対する特性：圧力

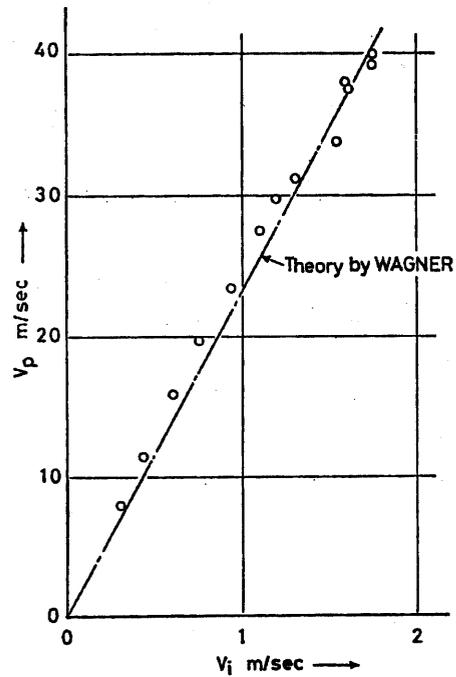


図-5 水面衝撃の移動速度

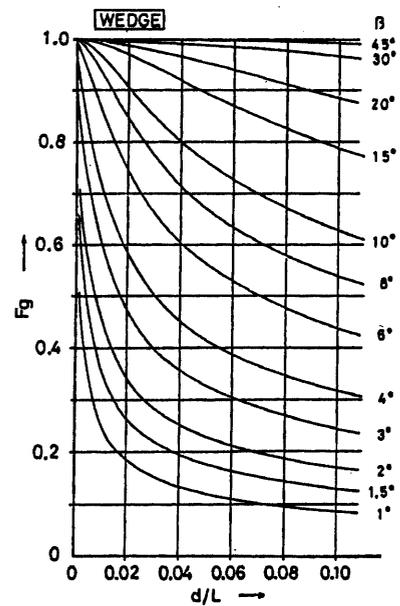


図-6 Wagner 型衝撃水圧に対する水圧計の特性

減少係数を用いて、Chuangの実験で計測される衝撃水圧を推定し、Chuangの実験結果と比較した。図-7にこれを示しているが、図中のcalculationが推定計算値を、experimentが実験値を示している。両者は非常によい一致を見せた。

ここで用いたWagnerの理論に対する水圧計の特性：圧力減少係数は、模型中央から水圧計までの距離と水圧計の大きさ（直径）との比及びdeadrise angleにより決まる。Deadrise angleが小さいとピークは非常に狭くなるので、圧力減少係数は小さくなる。模型の幅に対する水圧計の位置が外側に近づくとき、相対的に水圧のピークの幅が大きくなるので圧力減少係数は大きくなる。

この考え方は、構造部材にそのまま適用され、船の接水幅とその位置のパネルの幅の比として考えることができる。水圧計の場合には、水圧計受圧面形状が円形であることを考慮しているため、全く同じにはならないが、同じ性質のグラフが得られる。

Wagnerの理論は、その理論の前提によりdeadrise angleが小さい範囲で成り立つが、deadrise angleが大きい範囲では、Ferdinandeの理論[10]があり全体をカバーできる。また、これらの検討の過程から分かるように、理論計算値と実験計測値の直接の比較は無意味であり、比較する場合にはセンサの影響を考慮しなければならない。

実験方法や模型の大きさ、種類により計測結果に差が生じる原因は、他にも考えられるが、一因は水圧計の影響であると思われる。

4. 水面衝撃発生条件と衝撃現象[11]

水面衝撃水圧がWagnerの理論に従うことが分かったが、次に、水面衝撃現象はどのような条件下で起こり、衝撃が起こる場合と起こらない場合で現象にどのような相違があるのかが問題となる。

これを確かめるため、二次元の楔形物体による水面衝撃実験を行った。Deadrise angleの異なる楔形模型を用い、落下速度を低速から高速まで変え水面現象を観察し、楔形模型底面の水圧を計測した。

図-8は落下速度と水面の盛り上がりの変化を示したものである。高速では水面が盛り上がり、先端ではスプレーが生じている。低速では、模型が水面

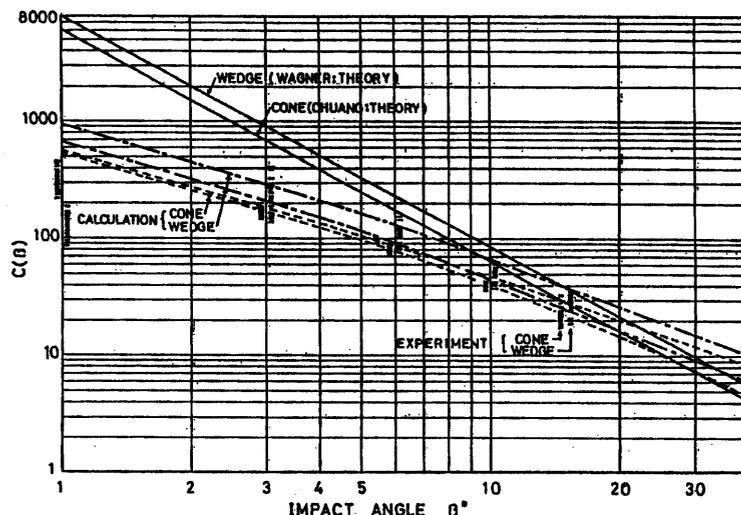


図-7 Chuangの水面衝撃実験計測値と推定値の比較

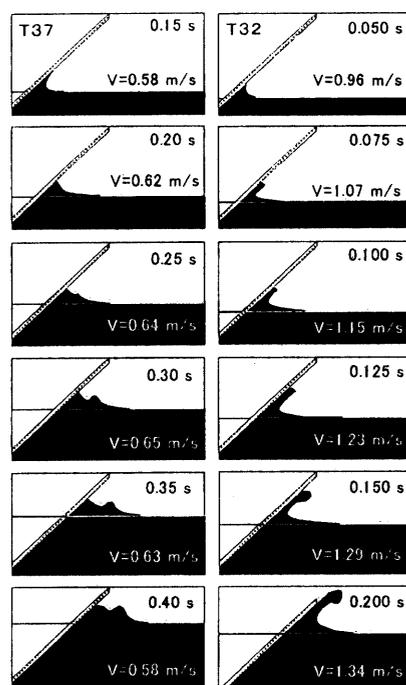


図-8 落下速度と水面の変化

に突入すると水面の盛り上がりとスプレーが生じるが、途中からこれがなくなり波が生じることが観察された。

Sellers[4]は、水面衝撃発生メカニズムとして、物体の突入による水面の乱れ（波）の伝播速度より、物体の水面突入による接水幅の広がり速度が大きいと衝撃現象が生じるとしている。

この考え方に従って、二次元の楔形物体について、水面の乱れによる波の速さと物体接水幅の広がり速度とを用いて、限界速度を求めると、次のようになる。

$$\frac{V_t}{(gH)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{\tan^{\frac{1}{2}} \beta}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ここで、 V_t ：限界速度、 H は静止水面からの楔の喫水、 β ：deadrise angleである。

図-9はこれを示したもので、図中の曲線が限界状態を示し、この線より上側では水面衝撃が起こることになる。図中のマークは実験から求めた水面衝撃発生の限界の点を示しており、傾向的によく合っていることが分かる。

図-10は物体の変位と水面の上昇の関係を示している。図中の直線は、Wagnerの理論による水面の盛り上がりを示しており、実験結果と理論がよく合っていることが分かる。図中で理論値から離れてゆく線は、衝撃現象が消えてゆく実験に対応している。

Deadrise angleが大きい模型では、水面の盛り上がりはWagnerの理論の代わりにFerdinandeの理論に従うことが確認されている。

以上で、二次元水面衝撃現象に関して、

Wagnerの理論及びFerdinandeの理論が実験と合うことが示された。

5. 三次元の衝撃水圧推定法[12],[13]

速い速度で波浪中を走る船に大きな衝撃荷重がかかることはよく知られている。Ferdinandeは、トロール船の船首部に大きな衝撃荷重が働く原因を明らかにすることを目的にして理論計算を行ったと述べているが、Wagnerの理論を補完する結果を得たものの目的に対する結果は得ていない様である。実際に、二次元の水面衝撃の理論のみによって船首部で観察される水面衝撃荷重を求めることはできない。

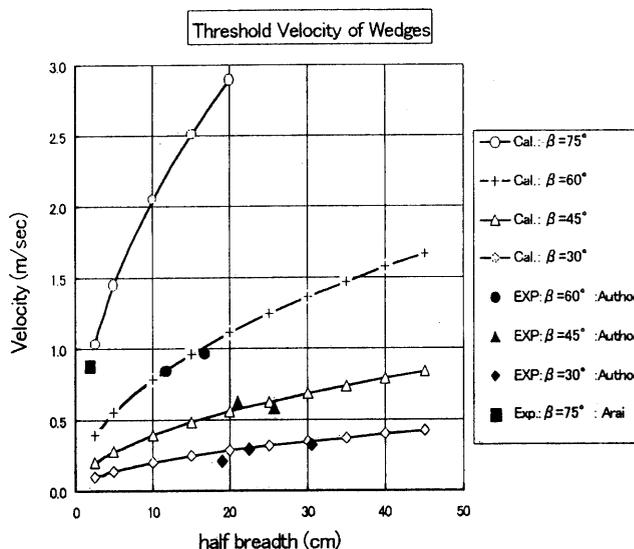


図-9 楔形物体の水面接水幅と限界速度

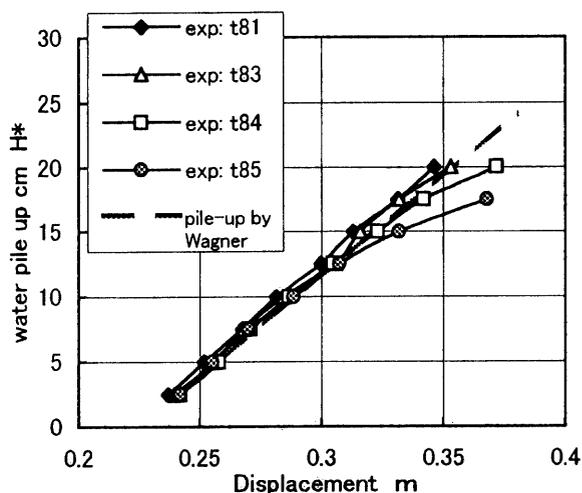


図-10 模型の水面突入量と水面の盛り上がり

Stavovy & Chuang は三次元衝撃水圧推定法を提案し、幾何学的な条件を用いて三次元の水面衝撃現象を二次元の水面衝撃に変換する方法を示している。ここで用いた仮定は、「水面衝撃水圧に關係する速度は、物体の表面に垂直な速度成分である。」というもので、これに等しい垂直速度を生じる二次元水面衝撃を考え対応する速度を用いて、衝撃水圧を求めることになる。衝撃角は水面と物体表面のなす角を用いる。

この考え方をさらに進めて、「水面衝撃水圧は水面に垂直な速度成分に關係し、物体表面に平行な速度成分には關係しない。」ものと仮定する。物体表面と水面の相対速度 V_r は、水面に垂直な成分 V_n と物体表面に平行な成分 V_t に分解できる。この水面に垂直な速度成分 V_n が衝撃速度になる。衝撃角は物体表面と水面のなす角である。

この仮定により三次元の水面衝撃現象を二次元の水面衝撃現象として取り扱うことが可能になる。これを数式で書くと次のようになる。

図-12 に示すように船体表面の微少部分 s と波面 w を考え、それぞれの面に垂直な単位ベクトルを n_s 、 n_w とする。また、船体表面の微少部分 s と波面 w の速度ベクトルをそれぞれ V_s 、 V_w とする。

船体表面の微少部分 s と波面 w の相対速度 V_r は次式で与えられる。

$$V_r = V_s - V_w \quad (2)$$

船体表面の微少部分 s と波面 w のなす角 ξ は次式で与えられる。

$$\cos \xi = (n_s \cdot (-n_w)) \quad (3)$$

相対速度 V_r は船体に平行な成分 V_t と波面に垂直な成分 V_n に分解できる。

$$V_r = V_t + V_n \quad (4)$$

ただし、

$$V_t = v_t \cdot t_s \quad (5)$$

$$V_n = v_n \cdot n_w$$

この関係式から V_t 、 V_n を求めることが出来る。ここで t_s は船体表面に平行な単位ベクトルである。

(4) 式と n_s の内積をとると $(t_s \cdot n_s) = 0$ であるから (3) 式を用いて次式を得る。

$$\begin{aligned} (V_r \cdot n_s) &= ((V_t + V_n) \cdot n_s) \\ &= ((v_t \cdot t_s + v_n \cdot n_w) \cdot n_s) \\ &= v_n (n_w \cdot n_s) \\ &= -v_n \cos \xi \end{aligned} \quad (6)$$

従って、

$$v_n = -(V_r \cdot n_s) / \cos \xi \quad (7)$$

上式の $V_r \cdot n_s$ は Stavovy & Chuang の仮定にある相対速度の船体表面に垂直な成分である。

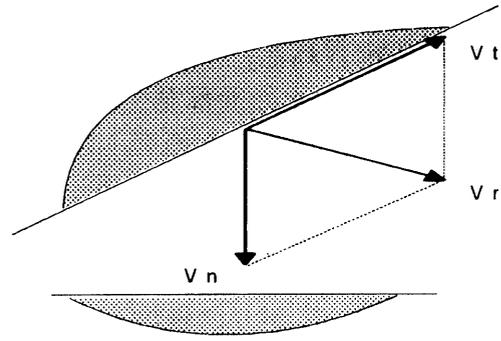


図-11 水面衝撃速度の求め方
 V_r : 相対速度、 V_n : 衝撃速度

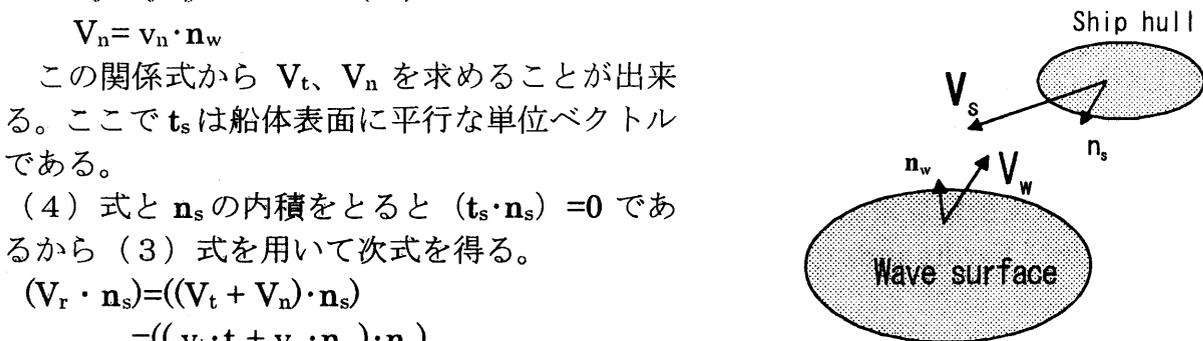


図-12 船体表面と水面の相対速度および位置関係

(7) 式の v_n が衝撃速度である。また、(3) 式の ξ が衝撃角である。この方法で三次元の水面衝撃問題を二次元の水面衝撃問題として扱うことができる。

二次元の水面衝撃水圧の計算式として、Wagner の理論式を用いる。衝撃角が大きい部分では、Ferdinande の理論が成り立つ。ここでは衝撃角が大きい場合に対しては、Ferdinande の理論値と Wagner の理論値との比をとり、Wagner の理論値に対するピーク値の修正係数という形で処理する。衝撃水圧の分布は Wagner の理論に従うものとして、圧力減少係数をあらかじめ計算しておく。

この三次元衝撃水圧推定法により、三次元模型実験における衝撃水圧の推定を行い、この推定法の検証を行った。実験は Chuang が行った三次元水面衝撃実験である。Chuang は3種類の模型を用い、トリム角、落下速度、水平速度を変えて模型底面に作用する衝撃水圧を計測している。模型の大きさは長さ 1.8m、幅 0.4m、落下重量 160kg である。水平速度は最大 22.5m/sec に達する。

模型のトリム、落下速度、水平速度を変えた実験に対して、衝撃水圧のピーク値を求め水圧計による補正を行って、Chuang の実験で計測される水圧を推定した。図-13 は水平速度 22.5m/sec を含む代表的な実験結果の例を示したもので、模型の deadrise angle は 10° 一定、トリム角は 6° の場合である。この場合、模型支持部の剛性の影響があると推定されたため、これを考慮したシミュレーションを行い、計測値を推定した。推定値は実験値と非常によく合っていることが分かる。

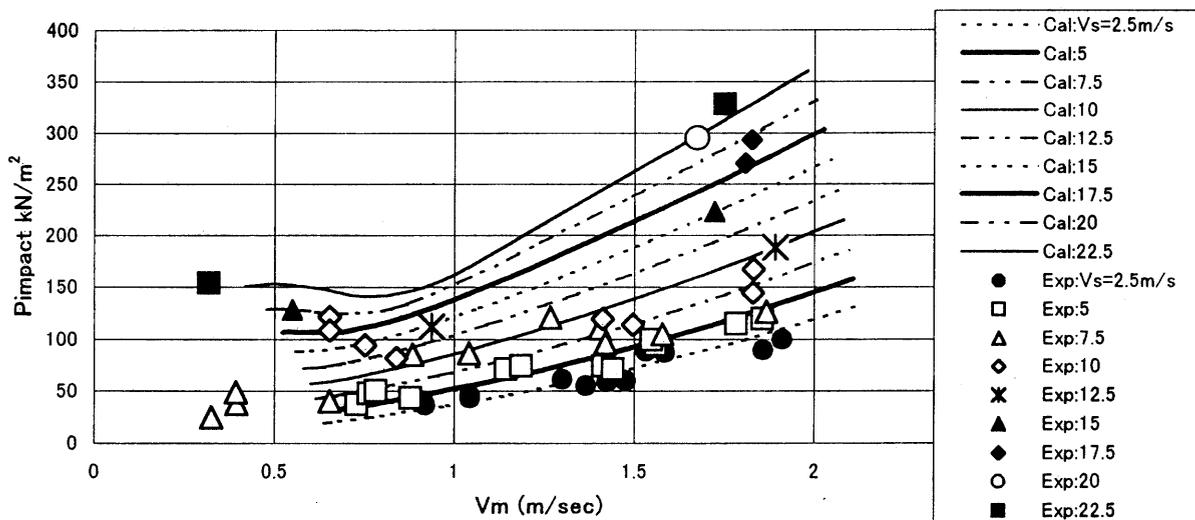


図-13 Chuang の落下実験における衝撃速度の補正を考慮する場合の推定値との比較

6. 高速船の波浪中応答のシミュレーション[14]

6.1 解析法の概要

前節までの方法により船体と波面の相対的な運動の条件が分かれば、衝撃荷重を求めることができる。これらの条件を求めるには、模型実験を行うか、波浪中で船体に衝撃荷重が作用する状態での非線形船体応答解析が必要になる。このような目的でストリップ法をベースにした波浪中非線形船体応答解析法を開発した。同じような非線形解析法[3]がこれまでに多く報告されているが、これらには Karman 型衝撃荷重モデルが使用されている。

これまでに述べてきたように、衝撃荷重（水圧）の発生メカニズムから考えると、Karman型モデルの採用には疑問がある。理論の整合性を保つためには、波浪中非線形船体応答解析法の衝撃荷重はWagner型モデルでなければならない。

以下に、Wagner型衝撃モデルによる非線形船体応答解析法の概要について述べる。この解析法の要点は、(1) Wagner型の衝撃モデルを採用したこと、(2) 船体と波面の相対速度の計算に船体表面の三次元形状を考慮するために新しい概念（等付加質量線）を導入したこと、(3) 水面衝撃発生の判断条件として前節の限界曲線を採用したことである。

(1) Wagner型の衝撃モデル

前節までに述べている様に水面衝撃に伴い水面の盛り上がりが生じる。水面の盛り上がりは、(3)の水面衝撃発生の条件により制御されるが、具体的には水面衝撃が発生している状況で喫水の増加が起きるとこれに伴い水面の盛り上がりが生じることになる。また、水面衝撃発生の条件が満たされていない状態では、喫水の増加は水面の盛り上がりを伴わず、もしそれまでに水面の盛り上がりがあったとすると、これは時間と共に減少する。

衝撃荷重は水面の盛り上がりを含めた付加質量の増加を考慮して運動量理論により求められる。

(2) 等付加質量線

三次元衝撃荷重推定法で分かるように、船首など三次元的に船体表面形状が変化している場合、前進速度の衝撃荷重への影響は非常に大きい。これを波浪中非線形船体応答の荷重計算法に反映させる方法として、等付加質量線の概念を導入した。

底面が楔型の柱状体が一定のトリム角（ θ ）で水面を速度 V_s で進む場合、前進速度による衝撃速度 V_z は、 $V_s \cdot \tan \theta$ で与えられる。

船体の一断面で喫水が与えられると付加質量が求められる。それから微小な位置だけ離れた断面で等しい付加質量を持つ喫水を求めることが可能である。この方向に水面が変化すると付加質量は変化せず、これによる衝撃荷重は働かない。このようにして求めた曲線を等付加質量線と定義する。

等付加質量線の傾き角は柱状体の場合のトリム角に相当する。従って、この付加質量一定の線を予め求めておけば、船体表面の形状を考慮した衝撃速度を求めることができる。付加質量の変化に関係する項を f_{za} として次式に示す。

$$f_{za} = \frac{DM_H}{Dt} \cdot \frac{D}{Dt} (w + \zeta_w - \zeta_w)$$

上式は付加質量による荷重項を表しているが、 ζ_a が等付加質量線を表している。

w : 船体の上下変位

ζ_w : 波面の上下変位

この式で求められる衝撃荷重は、前節の三次元水面衝撃荷重推定法により求められる荷重と等しいことが示されている。

(3) 水面衝撃発生の条件

船体の波浪中応答を計算する上で、水面衝撃荷重が発生する条件は重要である。前節の水面衝撃の限界速度をこの条件として採用した。

相対速度が限界速度を越えると水面の盛り上がりが生じ衝撃荷重が発生する。衝撃荷重は(8)式の f_{za} に水面の盛り上りを考慮することで求められる。水面の盛り上がりが生じる時、 f_{za} が衝撃力に相当する。もちろん、水面の盛り上がりがない時にも(8)式の

荷重は働いているが衝撃力ではない。

6.2 解析例

図-14 に示す半滑走形の高速艇について、波浪中応答計算を行い模型実験結果と比較した。模型の主要目は、 $L_{pp} : 4.0m$ 、 $B : 0.75m$ 、 $D : 0.4m$ 、 $d : 0.155m$ 、 $W : 195kg$ である。

速度は Froude 数で $0.2 \sim 1.2$ である。

図-15~17 に波高 $0.2m$ の場合の上下揺れ、縦揺れ及び船首加速度の計算と実験の比較を示す。計算結果と実験結果の対応は比較的によいと思われるが、計算値の方が若干低い傾向を示している。この傾向は上下揺れ、縦揺れとも高速域で顕著である。

図-1 は船体断面に働く衝撃力を作用する幅で割って、単位面積あたりの荷重として時間変化を示したもので、衝撃圧が時間と共に大幅に変化する状態が観察できる。

6.3 高速船の波浪中応答のシミュレーションのまとめ

船体運動に関して、本解析法の結果と実験結果の比較では、定性的な傾向については合っていると言えるが、大波高、高速域での精度は十分とは言えない。さらに本解析プログラムの改良が必要であると思われる。

本解析法により Wagner 型衝撃モデルによる非線形解析法が可能であることが示された意義は大きい。

7. あとがき

高速船に作用する波浪衝撃荷重に関して、二次元の衝撃水圧（荷重）として Wagner の理論あるいは Ferdinande の理論が成り立つことを示し、これらに基づいて三次元の衝撃水圧推定法を提案し、検証した。また、これらの理論と整合性のある高速船の波浪中非線形応答計算法についての検討結果を示した。

ここで紹介した三次元の衝撃水圧推定法は、既に高速船構造基準の設計荷重の設定に特化した形で用いられている。

高速艇の設計水圧設定法については、従来の軽構造船暫定基準や他船級の構造基準等

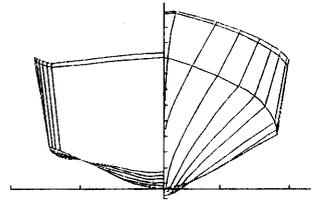


図-14 供試船の正面図

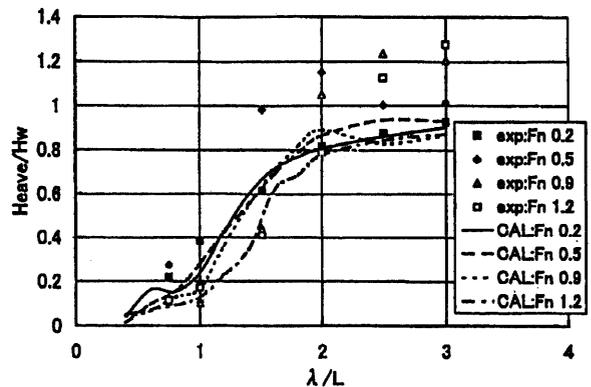


図-15 船体上下揺れの実験値と計算値の比較：波高 $0.2m$

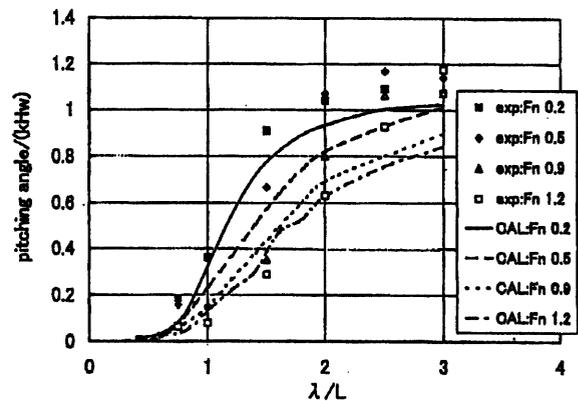


図-16 船体縦揺れ角の実験値と計算値の比較：波高 $0.2m$

様々なものがあるが、船が高速化する場合や大型化する場合には、そのまま適用できるかどうか検討が必要である。船体が大型化してもパネルの大きさが変わらない様な場合、荷重条件が非常に厳しくなることがあるので、注意が必要である。

参考文献

[1] von Karman, T., "The Impact on Sea Plane Floats During Landing", NACA TN 321 (1929)

[2] Wagner, H. "Über Stosse und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol.12, No.4, (1932)

[3] "Extreme Hull Gireder Loading", Special Task Committee report, Proceedings of ISSC2000, August, 2000

[4] Sellars, F. H., "Water Impact Loads", Marine Technology, Vol.13, No.1 (1976)

[5] Stavovy, A. B. & Chuang, S. L. "Analytical Determination of Slamming Pressure for High-Speed Vehicles", J. of Ship Research, No.20 (1976)

[6] Allen R.G. & Jones R.R.: "Considerations on the Structural design of high performance Marine vehicles", NY SNAME, Jan. 1977

[7] Hagiwara, K. et al.: "Fundamental Study of Wave Impact Load on Ship Bow (1st Report)", J. Soc. N. A. Japan, Vol. 135 (1974), (2nd Report) J. Soc. N. A. Japan, Vol. 136 (1974).

[8] 竹本博安：楔形模型による矩形板の水面衝撃実験とその解析、日本造船学会論文集、第156号（昭和59年12月）

[9] 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12月）

[10] Ferdinande, V., "Theoretical Consideration on the Penetration of a Wedge into the Water", International Shipbuilding Progress, Vol.13, No.140 (April 1966)

[11] 竹本博安、岡正義、佐久間正明：楔形物体の水面衝撃における限界速度の模型実験、西部造船学会会報、第100号（平成12年8月）

[12] 竹本博安、佐久間正明：船舶の波浪衝撃水圧簡易計算法について、西部造船学会会報、（平成12年12月）

[13] 竹本博安、佐久間正明、岡正義：高速域における三次元水面衝撃水圧簡易計算法の検証、西部造船学会会報、（平成13年12月；予定）

[14] 竹本博安：スラミングを考慮した高速船の波浪中応答計算法について、日本造船学会論文集、第188号（平成12年12月）

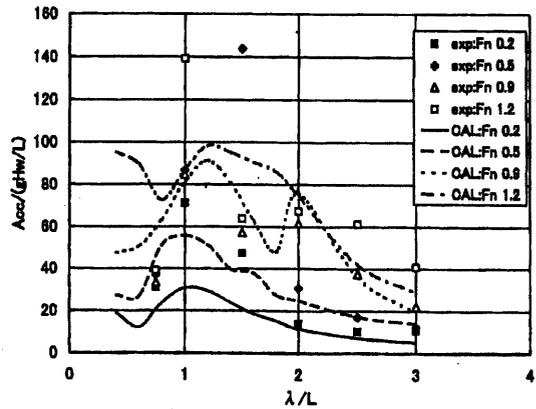


図-17 船首加速度の実験値と計算値の比較：波高0.2m

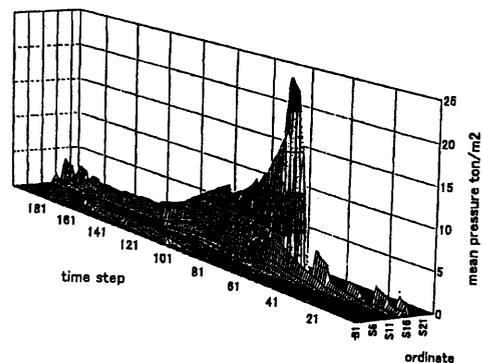


図-18 船体長さ方向波浪衝撃水圧分布の時刻歴