水面衝撃問題における物体形状と空気巻き込みの影響

正員 土 橋 純 也*

Influence of the body shape and the trapped-air on the water impact problem

by Junya Dobashi, Member

Summary

In this paper, the influence of the body surface and trapped air on the water impact problem is discussed. It is assumed that the water surface can be expressed by a subsequence of circular hollows, and that the body surface can do the triangular prism, or circular cylinder. Under this assumption, the influence of the body surface and trapped air for the water impact problem is investigated in the case that the dropped speed is constant. Results show that the maximum value of the trapped air pressure becomes larger and larger and the period of that is shorter and shorter, as the steepness of the body surface increases, and that the impact force could be large because of the trapped air, even if the steepness of the body surface increases. Also, we find that the impact force becomes smaller and smaller as the steepness of the water surface increases, whether the air trapping happens or not.

1. 緒 言

船舶の構造設計において、スラミングによる衝撃荷重の推定は重要である。スラミングの衝撃荷重の推定には Wagner 理論¹⁾が広く用いられている。しかし、この Wagner 理論はデッドライズアングルが微小である場合、実際よりも過大な推定値を与えることが知られている。この原因として、水の圧縮性、空気巻き込み等の影響が考えられている。

一般的に、スラミングによる水面衝撃問題を検討する際、物体が突入する水面は平らであると仮定されている。しかし、スラミングが発生する時の水面には、多くの凹凸が存在しており、この凹凸のある水面に船底が突入する際に空気巻き込みが発生すると考えられる。この空気巻き込みを伴う水面衝撃の検討には、平板が平らな水面に落下する問題が用いられてきた²⁾。この場合、空気巻き込みの現象が不安定であるため、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する理論的及び実験的な解析が困難となる。

そこで、線型理論では、凹凸のある水面に平板が落下する問題は、底面に凹凸のある水面と同じ形状の窪みを持つ物体

が平らな水面に落下する問題に置き換えることができる。この考えを踏襲し、Korobkin³⁾は、底面に窪みがある物体が平らな水面に落下する流力モデルを用いて、2次元での空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を検討した。この流力モデルは、あらかじめ安定した空気巻き込みが保証されている。また、Takagi⁴⁾は、凹凸のある水面を窪みの連なりで表せると仮定し、底面に仮定した凹凸のある水面と同じ形状を持つ3次元軸対称物体の空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を検討した。

しかし、上記の空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を検討する際の物体形状は平板であるが、高速V字船型等のように船首部船底は、一般的に船体中心線に対して左右対称な形状で勾配を持っている。したがって、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を議論するには、水面に突入する物体形状が平板だけでなく、左右対称で勾配を持つ場合についても、検討する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、高速V型船の船首部船底の形状を三角柱と、また、船首バルブの形状を円柱と仮定し、これらの左右対称な物体が凹凸のある水面に突入する問題を検討し、水面衝撃問題における物体形状と空気巻き込みの影響について論じる。三角柱の傾き及び、円柱の半径を変えた計算することで、空気巻き込みを伴う水面衝撃に対する物体形状の影響を、また、波長を一定にして波高を変えた計算を行い、波高の影響を検討した。

* 防衛庁技術研究本部

原稿受理 平成18年2月28日

本研究では、理論に用いる記号の定義とその諸量の無次元化を以下に行う。

$$(x, y, z) = \left(\frac{X}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{Z}{H} \right), \quad t = \frac{TV_0}{H},$$

$$p(t) = \frac{\varepsilon P(T)}{\rho_w V_0^2}, \quad f(t) = \frac{\varepsilon F(T)}{\rho_w V_0^2 L^2}.$$

ここで、 L 、 H 及び T は、それぞれ窪みの半径、深さ及び時間を、 ρ_w は水の密度を、 $P(T)$ 、 $F(T)$ は、それぞれ巻き込まれた空気の圧力、衝撃力を表している。 V_0 は物体が着水した時の物体の落下速度を表しており、物体が水面に着水した瞬間を $t=0$ とする。本研究では、 $\varepsilon = H/L$ と定義し、 ε が微小であるという仮定の下で接合漸近展開法を適用する。そこで、衝撃問題の解は、外部解と内部解で構成されている。外部解は、自由表面と物体表面との交点で特異点を持つため、この交点で内部解を考える必要がある。しかし、内部解の衝撃力への寄与は無視することができるので、本研究では、外部解のみを考えることにする⁵⁾。

次に、凹凸のある水面と物体形状について述べる。凹凸のある水面は Fig. 1, 2 に示すような波長 $2L$ 及び波高 H を持つ窪みの連なりで表せると仮定し、形状を表わす関数を $H[(X/L)^2 + (Y/L)^2 - 1]^2$ とした。実際の海面は、異なる周期と波向きを持った波の重ね合わせで表せるが、本研究では、空気巻き込みをあらかじめ保証するために上記の形状を選択した。物体の形状については、傾き a をもつ三角柱の形状を表わす関数は aX で、また、半径 R を持つ円柱の形状を表わす関数は $1 - (R^2 - X^2)^{1/2}$ で表わせる。三角柱及び円柱が凹凸のある水面に落下する様子と断面図をそれぞれ Fig. 1, 2 に示す。ここで、物体の勾配は波傾斜に比べて小さいと仮定した。

線型理論では、平板が凹凸のある水面に落下する問題は、底面に凹凸を持つ物体が平らな水面に落下する問題に置き換えることができる。この考えを踏まえて、三角柱と円柱の形状を持つ物体が凹凸のある水面に落下する問題を、底面に窪みを持つ物体が平らな水面に落下する問題に置き換えて、水面衝撃問題における物体形状と空気巻き込みの影響について検討した。

三角柱が凹凸のある水面に突入する問題を検討する場合、平らな水面に突入する底面に窪みを持つ物体の形状 $b(x, y)$ は三角柱と凹凸のある水面の形状から次式で表わせる。

$$b(x, y) = \frac{a}{\varepsilon} x + (x^2 + y^2 - 1)^2. \quad (1)$$

また、円柱が凹凸のある水面に突入する問題を検討する場合は、同様に次式のように表せる。

$$b(x, y) = \frac{R}{H} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R} \right)^2 x^2} \right) + (x^2 + y^2 - 1)^2. \quad (2)$$

Fig.2 Schematic view of the circular cylinder falling onto the distorted water surface.

三角柱及び円柱が凹凸のある水面に突入する際、まず、それらの最も深い底辺が着水し、浸水する過程で、空気巻き込みが発生すると考えられる。したがって、本研究では、空気巻き込みが発生する前後における衝撃力を求めた。また、スラミングのような短時間の現象に対して、排水量の大きな船体の運動は着水後に、ほとんど変化しないと考えられるので、物体の浸水速度は一定と仮定した。

衝撃力は、Wagner が示した境界値問題を解くことで、得ることができる。しかし、この問題では、自由表面と物体表面との交点で特異点を持つので、まず、物体表面と自由表面の交点で特異点を持たない変位ポテンシャルを用いて、物体表面と自由表面の交点、自由表面の変位及び巻き込まれた空気の圧力を求める。また、浸水部分に働く圧力は、変位ポテンシャルの代わりに速度ポテンシャルを用いる方が、精度良く求めることができる⁴⁾。したがって、速度ポテンシャルを用いて、浸水部分に働く圧力を求める。

変位ポテンシャル ϕ は速度ポテンシャルを用いて、次式で定義する。

$$\phi(x, y, z, t) = \int_0^t \phi(x, y, z, \tau) d\tau. \quad (3)$$

この変位ポテンシャルの支配方程式と境界条件は以下のようになる。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{for } z < 0 \quad (4)$$

$$(\phi + q(t)) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + t - b(x, y) \right) = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (5)$$

$$\phi \leq -q(t), \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} + t - b(x, y) \leq 0 \quad \text{on } z=0 \quad (6)$$

上式の $q(t)$ は次式で与えられる。

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} = p(t) \quad \text{on } z=0, (x, y) \quad C \quad (7)$$

$$q(t) = 0 \quad \text{on } z=0, (x, y) \quad F \quad (8)$$

ここで、 C 、 F は、それぞれ空気を巻き込んでいる部分と自由表面の領域を $z=0$ に投影した領域を表している。また、巻き込まれた空気の圧力 $p(t)$ は次式のようにになる。

$$p(t) = \beta \left(\frac{1}{v(t)^n} - 1 \right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{1}{n} \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{C_0}{V_0} \right)^2 \frac{H}{L}. \quad (10)$$

ここで、 ρ_a 、 c_0 と n は、それぞれ空気の密度、音速と気体の比熱比を表しており、 $n=1.4$ を用いている。また、 $v(t)$ は $v(t)=N(t)/N_0$ で、巻き込まれた空気の体積の無次元値である。 $N(t)$ は瞬時々の巻き込まれた空気の体積で、 N_0 は空気巻き込みが発生した直後の空気の体積である。

次に、速度ポテンシャルの支配方程式と境界条件を以下に示す。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{for } z < 0 \quad (11)$$

$$\phi = -\frac{dq(t)}{dt} \quad \text{on } z=0, (x, y) \quad C \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -1 \quad \text{on } z=0, (x, y) \quad B \quad (13)$$

$$\phi = 0 \quad \text{on } z=0, (x, y) \quad F \quad (14)$$

ここで、 B は浸水部分を $z=0$ へ投影した領域である。

以上により、変位ポテンシャルと速度ポテンシャルは、それぞれの支配方程式を境界条件を満足するように境界要素法で解いて求めた。ここで、変位ポテンシャルの境界条件として、(5)と(6)、また、速度ポテンシャルの境界条件として、空気巻き込みが発生する前では、(13)と(14)を、空気巻き込みが発生した後では、(12)～(14)を用いる。

以上により、求めた変位ポテンシャルと速度ポテンシャルから、空気巻き込みが発生する前の衝撃力は

$$f(t) = - \iint_{\Omega_B} \frac{\partial \phi}{\partial t} dS \quad (15)$$

また、空気巻き込みが発生した後の衝撃力は、

$$f(t) = - \iint_{\Omega_B} \frac{\partial \phi}{\partial t} dS + \iint_{\Omega_C} \beta \left(\frac{1}{v(t)^n} - 1 \right) dS \quad (16)$$

で求めることができる。

3. 計算結果と考察

式(10)から、巻き込まれた空気の圧力は着水時における落下速度 V_0 、波面の波長 $2L$ 及び波高 H 、そして、物体形状 $b(x, y)$ の影響を受ける。したがって、本研究では、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する物体形状の影響を検討するために、風波の波粗度に相当する $H/2L = 1/2$ の値を0.142とし、物体の勾配(三角柱の傾き a 及び円柱の半径 R)を変えた計算を行った。また、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する波高の影響を検討するために、波長を一定にし、前述の波粗度の値を変えた計算を行った。計算には、船長約200mのばら積み船を対象とし、半径 L は船幅と隔壁の間隔より小さくなるように5.0mと設定した。また、落下速度 V_0 は波高5mの波浪中を $Fn=0.15$ で航行している時の船首部の船底と波面との相対速度に相当すると考え、5.0m/sとした。

また、底面にくぼみを持つ軸対称物体の自由落下試験で、計測した巻き込まれた空気の圧力の計測値と本研究の手法による計算値の比較では、両者が良く一致することは確認されている⁶⁾。

3.1 物体形状の影響

空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する物体形状の影響を調べるために、三角柱の勾配 a の値を0.02, 0.05, 0.08、また、円柱の半径 R を40, 80, 120と変えて計算した。始

めに、三角柱及び円柱が凹凸のある水面に突入した場合に、物体と水面との間に巻き込まれた空気の圧力の計算結果を、それぞれ Fig.3, 4 に示す。

Fig.3 Trapped-air pressure (triangular prism).

これらの結果から、物体の勾配が大きくなるほど、巻き込まれた空気の圧力の最大値が大きくなり、作用時間が短くなっていることが分かる。これは、物体の勾配が大きくなるにつれ、物体と水面との間に巻き込まれる空気の体積が小さくなるためと考えられる。

Fig.4 Trapped-air pressure (circular cylinder).

次に、三角柱と円柱の物体に働く衝撃力の計算結果を、それぞれ Fig.5, 6 に示す。ここで、衝撃力は空気巻き込みが発生する前では、物体の浸水部分に働く力のみで、発生した後では、巻き込まれた空気による力と物体の浸水部分に働く流体力で構成されている。図中の実線は物体に働く衝撃力を、点線は巻き込まれた空気の圧力による力を、そして、破線は浸水部分に働く流体力を表わしている。

Fig.5, 6 の結果を見ると、三角柱では、およそ $V_0 T/H=0.1$ 以下、また円柱では、およそ $V_0 T/H=0.05$ 以下において、巻き込まれた空気による力が0、つまり、空気巻き込みが発生していない状態では、物体の勾配が大きいほど、衝撃力は小さくなっている。一般的に空気巻き込みを無視した場合、物体の勾配が大きいほど、物体に働く衝撃力は小さくなるが、

Fig.5 Impact force (triangular prism).

空気巻き込みが発生した後では、巻き込まれた空気による力が増加するにつれて、流体力も増加し、結果的に物体の勾配が大きくなるほど、衝撃力の最大値が大きくなっている。

Fig.6 Impact force (circular cylinder).

そこで、上記のことを調べるために、空気を巻き込んでいる部分(C)と物体が水に接している部分(B), それぞれの面積 S_C と S_B の結果をそれぞれ Fig.7, 8 に示す。

Fig.7 The area of Ω_B and Ω_C (triangular prism).

これらの結果から、勾配が大きくなるほど、 S_C の最小値が小さくなり、これに伴い S_B の最大値も大きくなっている

Fig.8 The area of Ω_B and Ω_C (circular cylinder).

ことがわかる。これは勾配が大きくなるにつれ、巻き込まれる空気の体積が小さくなることで、巻き込まれた空気が圧縮されやすくなり、これに伴い浸水部分の面積が増加することが考えられる。この勾配が大きくなるほど、空気が圧縮されやすくなることは、Fig.3, 4 の巻き込まれた空気の圧力の結果にも表われている。以上により、勾配が大きくなるほど、巻き込まれた空気による力は大きくなり、これに伴い流体力も大きくなることが分かる。

3.2 波高の影響

次に、空気巻き込みを伴う衝撃力に対する波高の影響を検討するために、物体の傾きと波長を一定にし、波高を変えた場合の計算を行った。計算には、凹凸のある水面に落下する物体である三角柱の傾きと円柱の半径をそれぞれ 0.02, 80, また、 $L=5.0\text{m}$ とし、 ϵ を 0.08, 0.142, 0.284 の値を用いた。

物体形状が三角柱と円柱である場合における、巻き込まれた空気の圧力の計算結果を、それぞれ Fig.9, 10 に、また、衝撃力の結果を Fig.11, 12 に示す。

ここで、時間 t 、巻き込まれた空気の圧力 $p(t)$ 及び衝撃力 $f(t)$ の無次元値にはパラメータ ϵ が含まれているので、計算結果の比較をし易くするために Fig.9 ~ 12 の計算結果には、 ϵ を乗じている。

Fig.9 Trapped-air pressure (triangular prism).

Fig.9, 10 の結果から、 ϵ の値が小さくなるほど、つまり、波高が低くなるほど、巻き込まれた空気の圧力の最大値は大きくなり、圧力が作用する時間が小さくなっている。これは波高が低くなるにつれ、物体と水面の間に巻き込まれる空気の体積が小さくなるためと考えられる。

Fig.10 Trapped-air pressure (circular cylinder).

次に、Fig.11, 12 の結果では、三角柱と円柱の両方の場合において、空気巻き込みが無視できる $V_0 T/L=0.025$ 以下において、波高が低くなるほど、衝撃力が大きくなっていることが分かる。また、空気巻き込みが発生した後でも、波高が低くなるほど、物体に働く衝撃力が大きくなっていることが分かる。

Fig.11 Impact force (triangular prism).

Fig.12 Impact force (circular cylinder).

ここで、前節と同様に、Fig.13, 14 に波高を変えた場合の S_C と S_B の計算結果を示す。これらの結果から、空気巻き込みが発生していない $V_0 T/L=0.025$ 以下において、波高が低くなるほど、 S_B が大きくなっていることが分かる。また、空気巻き込みが発生した後においても、波高が低くなるほど、Fig.7, 8 の結果と同様に、 S_C の最小値が小さくなり、それに伴い、 S_B も大きくなっていることが分かる。これは、波高が低くなることで、巻き込まれる空気の体積が小さくなるだけでなく、物体が水面に接する角度が小さくなるためと考えられる。以上により、空気巻き込みが発生する、しないにかかわらず、波高が低くなるほど、衝撃力が大きくなることが分かる。

Fig.13 The area of Ω_B and Ω_C (triangular prism).

Fig.14 The area of Ω_B and Ω_C (circular cylinder).

最後に、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題では、巻き込まれた空気の圧力をフルード則に従って、スケールアップできないため、相似な模型実験を行うことができない。このため、水面衝撃問題における空気巻き込みの尺度影響を論じる必要がある。本研究における物体形状と空気巻き込みの影響を考慮した水面衝撃問題においても、空気巻き込みの尺度影響を検討する必要があるが、これは今後の課題としたい。

4. 結 言

本研究では、水面衝撃問題における物体形状と空気巻き込みの影響を調べるために、三角柱及び円柱のような左右対称物体が凹凸のある水面に突入する問題を検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 物体形状に関係なく、物体の勾配が大きくなるほど、物体と水面との間に巻き込まれた空気の圧力のピーク値が大きくなること、また、その圧力が作用時間が短くなることが分かった。
- (2) 物体の勾配が大きくなっても、空気巻き込みの影響により、物体に働く衝撃力が大きくなる場合があることが分かった。
- (3) 空気巻き込みの有無に関係なく、波高が低くなるほど、物体に働く衝撃力は大きくなることが分かった。

謝 辞

大阪大学大学院高木健助教授には、多くの御指導、貴重な御助言を賜りました。ここに謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Wagner, H : Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschr. für Angewandte Mathematik und Mechanik, Bind 12, Heft 4, 1932, pp.193-215.
- 2) 宮本武, 谷澤克治 : 船首部に作用する衝撃荷重について (第2報), 日本造船学会論文集, 第158号, 1985
- 3) Korobkin A.A. : Entry problem for body with attached cavity, Proc. of 11th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 1996, pp93-96
- 4) K.Takagi and J. Dobashi : Influence of Trapped air on the Slamming of a Ship, Journal of Ship Research, Vol.47, 2003, pp.187-193.
- 5) Armand J.L. and Cointe R. : Hydrodynamic Impact Analysis of a Cylinder, Proc. of 5th Int. OMAE Symposium, Vol.1, 1996, pp.250-256
- 6) J. Dobashi, K. Takagi : Water entry problem of an axisymmetrical body with attached cavity, Proc. of 4th Japan, Korea-Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 1999, pp.15-21.