傾斜角を持つ物体の空気巻き込みを伴う水面衝撃問題

正員 土 橋 純 也*

The water impact problem with the trapped air on the heeled body

by Junya Dobashi, Member

Summary

The influence of the trapped air on the water impact is studied when the heeled body enters into the water surface. The water surface and the body surface are modeled by a subsequence of circular hollows and the triangular prism, respectively. It is seen from numerical simulation that the peak value of the trapped air pressure becomes larger and the duration of the pressure becomes shorter as the heel angle increases, and that the impact force becomes larger as the wave height of the water surface decreases. Some numerical results demonstrate that the effect of the trapped air on the impact force of the model scale is larger than that of the full scale. It is understood that the averaged pressure decreases due to the three dimensional effect of the water surface, irrespective of the trapped air.

1. 結 言

船体に損傷を与える要因の一つとして、スラミングによる衝撃力がある。このスラミングによる衝撃力の推定は船舶の構造設計にとって重要である。これまで、スラミングによる衝撃力について、理論的、あるいは実験的に数多く研究されてきた。この代表として、スラミングによる衝撃圧の推定に広く用いられている Wagner¹⁾による水面衝撃理論がある。

一般的に、スラミングによる水面衝撃問題では、物体が平らな水面に落下することが仮定されている。また、これらの研究の多くが、物体が水面に対して垂直に落下することを仮定している。

そこで、斜波中を航行する船体にスラミングが発生する場合、船体に横傾斜角が付いた状態で船首部船底が水面に落下することが考えられる。また、船首部船底が傾斜のついた波面に落下することも考えられる。このように、必ずしも物体は水面に対して垂直に落下するだけではなく、物体が水面に対して傾斜角が付いた状態で落下する状況もある。この傾斜角が付いた状態で水面に突入する状況は左右非対称な物体が水面に落下する問題に対応する。この左右非対称物体の水面衝撃問題に関する研究²⁾³⁾は数少ない。

また、実際の海面は平らではなく、うねりの表面には風波による多くの凹凸が存在し、船体にスラミングが生じる時の

水面の表面にも凹凸があると考えられる。この凹凸のある水面に船底が落下する時、船底と水面との間に空気が巻き込まれると考えられる。このことに着目して、Takagi⁴⁾は、平板が凹凸のある水面に落下する問題を凹凸のある物体が平らな水面に落下する問題に置き換えて、水面衝撃問題に対する3次元影響や空気巻き込みの影響について論じている。

一般的に、スラミングによる衝撃力はフルード則により実船の値を推定できるとされているが、空気巻き込みの影響はフルード則でスケールアップすることができない。よって、模型スケールと実船スケールの間に尺度影響が生じる。スラミングによる衝撃力の推定精度を向上させるには、巻き込まれた空気による尺度影響を明確にする必要がある。

以上のことから、実海域でのスラミングによる衝撃力を明確に推定するには、傾斜角を持つ物体が凹凸のある水面に突入する時の空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を議論する必要がある。

そこで、本研究では、傾斜角を持つ物体が凹凸のある水面に落下する問題を検討し、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する傾斜角の影響について論じる。また、うねりの表面にある凹凸の波高の影響や巻き込まれた空気による尺度影響、そして、波面の影響についても論じる。

2. 理 論

理論は、これまでの研究⁵⁾とほぼ同様なので、概略のみを記す。まず、座標系は平水面に xy 平面をとり、 xy 平面に鉛直方向上向きに z 軸を取る。そして、諸量の無次元化を以下

*防衛省技術研究本部

原稿受理 平成 19 年 2 月 28 日

のように行う。

$$(x, y, z) = \left(\frac{X}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{Z}{H} \right), t = \frac{V_0 T}{H}$$

$$p_c(t) = \frac{\varepsilon P_c(T)}{\rho_w V_0^2}, p(t) = \frac{\varepsilon P(T)}{\rho_w V_0^2}, f(t) = \frac{\varepsilon F(T)}{\rho_w V_0^2 D^2}$$

ここで、 D , H 及び T は、それぞれ窪みの水平方向の長さ、垂直方向の長さ及び時間を、 ρ_w は水の密度を、 $P_c(T)$, $P(T)$, $F(T)$ は、それぞれ巻き込まれた空気の圧力、物体に働く圧力、衝撃力を表している。また、 V_0 は物体が着水した時の物体の落下速度である。本研究では $\varepsilon = H/D$ と定義し、 ε が微小であると仮定の下で接合漸近展開法を適用する。

衝撃問題の全体の解は、外部解と内部解で構成される。外部解は物体表面と自由表面との交点で特異性を持ったために、その点で内部解を考えなければならない。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⁶⁾ので、本研究では外部解のみを考える。

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 に示すような窪みの連なりで表せると仮定した。そして、波長 $2D$ 及び波高 H を持つ窪みの形状を表わす関数を $Z = -H[(X/D)^2 + (Y/D)^2 - 1]^2$ とした。実際の海面は異なる周期と振幅、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。また、落下速度 V_0 は一定と仮定した。

Fig.1 Schematic view of the triangular prism falling onto the distorted water surface.

物体の形状については、三角柱が傾き α をもつとすると、三角柱の形状を表わす関数は $Z = aX$ で表わせる。三角柱が凹凸のある水面に落下する様子を Fig.1 に示す。ここで、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、傾斜角の付いた物体の水面衝撃問題における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際、その最も深い底辺が着水し、物体が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計算した。衝撃力は、空気巻き込みが発生する前では、流体力のみで構成される。一方、空気巻き込みが発生した後では、流体力と巻き込まれた空気による力で構成されている。前の研究と同様に、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。この巻き込まれた空気の圧力 $p_c(t)$ は次式で求めた。

$$p_c(t) = \beta \left(\frac{1}{v^n(t)} - 1 \right) \quad \beta = \frac{1}{n} \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{C_0}{V_0} \right)^2 \frac{H}{D} \quad (1)$$

ここで、 ρ_a は気体の密度、 C_0 は音速、また、 n は気体の比熱比を表しており、 $n=1.4$ とした。また、 $v(t)$ は $v(t) = N(t)/N_0$ であり、この $N(t)$ は巻き込まれた空気の体積の有次元値で、 N_0 は空気巻き込みが発生した直後の巻き込まれた空気の体積の有次元値である。また、浸水部分に働く流体による圧力は、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。したがって、速度ポテンシャルを用いて、浸水部分に働く流体による圧力を求める。理論については、前の研究⁵⁾に詳述している。

3. 計算結果と考察

空気巻き込みを伴う衝撃力に対する傾斜角の影響を調べるために、以下の値を用いた計算を行った。

$$V_0 : 3.0 \text{ m/s}, D : 4.0 \text{ m}, H : 1.14 \text{ m} (\varepsilon = 0.284)$$

上記の値を決定するために、例として、船長 150m の船が $Fn=0.20$ で波高 4m, $\chi=150\text{deg}$ ($\chi=180\text{deg}$: 向かい波) の斜波中を航行していることを想定する。船首部でスラミングが発生するのは、船体運動が激しくなる波長を航行している時と考えられるので、波長は波長船長比が 1.0 となるように設定した。この時の船首部船底と波面との相対速度は約 3.0m/s

となるため、 $V_0=3.0\text{m/s}$ とした。また、窪みの半径 D は船幅より大きくなると、本研究の理論では、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題の検討ができなくなるため、 $D=4.0\text{m}$ とした。また、スラミングが発生するのは荒天中であると考えられるので、風波の波皁度の最大値に相当する $\varepsilon=H/D=0.284$ と仮定した。

そして、Fig.2 のように、三角柱が角度 θ で傾斜した場合の左右のデッドライズアングルを β_2, β_1 とする。本研究では、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を検討するので、空気巻き込みの発生を保証するには、左右のデッドライズアングルが波傾斜(H/D)よりも小さくなければならない。このことを踏まえて、三角柱の傾き a は 4.5° ($a=0.0787$)とした。そして、傾斜角を $0^\circ, 1.5^\circ, 3.0^\circ$ と変えた計算を実施した。この時の β_2, β_1 は次式で計算できる。

$$\beta_1 = a - \theta, \quad \beta_2 = a + \theta \quad (2)$$

また、本研究で推定できる傾斜角の範囲は $\beta_1 < \beta_2 < H/D$ である。

Fig.2 Definition of deadrise angle β_1 and β_2

以上により、平らな水面に突入する底面に窪みを持つ物体の形状は、三角柱と凹凸のある水面の形状から次式のように表わせる。

$$b(x,y) = \frac{\beta_1}{\varepsilon} x + (x^2 + y^2 - 1)^2 \quad \text{for } x > 0 \quad (3)$$

$$b(x,y) = \frac{\beta_2}{\varepsilon} x + (x^2 + y^2 - 1)^2 \quad \text{for } x < 0 \quad (4)$$

ここで、 $b(x,y)$ は物体の形状を表し、 $b(x,y)=B(X,Y)/H$ で無次元化している。

3.1 傾斜角の影響

始めに、空気巻き込みを伴う水面衝撃問題に対する傾斜角の影響について検討する。Fig.3 に傾斜角が変化した時の巻き込まれた空気の圧力の結果を示す。また、空気巻き込みが発生した直後の巻き込まれた空気の体積を Table.1 に示す。

Fig.3 と Table.1 の結果から、傾斜角が大きくなるほど、巻き込まれる空気の体積が小さくなるので、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。巻き込まれる空気の体積が小さくなるほど、圧力の最大値が大きくなる結果は、前の研究⁵⁾と同じである。

Fig.3 Trapped air pressure with variation of the heel angle

Table.1 The volume of the trapped air immediately after the air trapped

θ (deg.)	0	1.5	3
N_0	0.632	0.445	0.290

Fig.4 Cross section view along AA' line (Fig.1).: (a) before the triangular prism touches the water surface, (b) before the air is trapped, (c) immediately after the air is trapped

これを考えるために、Fig.4 に三角柱が凹凸のある水面に浸水していく様子を示す。Fig.4(a)に示すように β_1 , β_2 のデッドライズアングルを持つ底面を、それぞれ β_1 面、 β_2 面と呼ぶことにする。まず、Fig.4(b)に示すように、三角柱が浸水していく過程で窪み内部の自由表面と物体表面との交線が形成される。次に、この交線が Fig.4(c)に示すように β_2 面における窪み内部で閉じた時に、物体表面と自由表面との間に空気が閉じ込められ、空気巻き込みが発生する。本研究では、この交線が閉じた時の巻き込まれた空気の体積を N_0 としている。

ここで、(2)式から傾斜角が大きくなるにつれ、 β_1 の値は小さくなり、 β_2 の値は逆に大きくなる事が分かる。よって、傾斜角が大きくなるほど、 β_2 面での窪み内部の自由表面と物体表面との交線が閉じる時間が遅くなる事が分かる。これは、傾斜角が大きくなるほど、 β_2 面で交線が閉じる、つまり空気巻き込みが発生する瞬間まで、接水面が拡大する時間が長くなることを表している。このため、傾斜角が大きくなるほど、空気を巻き込んでいる領域が小さくなることになる。以上のことから、Table.1 の結果のように、傾斜角が大きくなるほど巻き込まれる空気の体積が小さくなる事が分かる。また、傾斜角が大きくなるほど、空気巻き込みが発生する時間が遅くなることは Fig.3 の結果にも表れている。

次に、衝撃荷重の計算結果を Fig.5 に示す。図中の破線は巻き込まれた空気による力 $f_c(t)$ を、一点鎖線は浸水部分に働く流体力 $f_b(t)$ 、実線はそれらの力之和である物体に働く衝撃力 $f(t)$ を表している。ここで、 $f_c(t)$ 、 $f_b(t)$ の無次元化は、 $f(t)$ の無次元化と同じ方法で行った。

Fig.5 Impact force with variation of the heel angle

Fig.5 を見ると、空気巻き込みが発生する前では、傾斜角が大きくなるほど、物体に働く衝撃力は大きくなっている事が分かる。また、空気巻き込みが発生した後では、巻き込まれた空気の力が大きくなるにつれて流体力も増加し、結果的に、傾斜角が大きくなるほど、衝撃力の最大値が大きくなる事が分かる。

3.2 波高の影響

次に、衝撃力に対するうねりの表面にある風波の波高の影響を調べるために、波長 $2D$ を一定にし、 ε の値を 0.270 に変更して衝撃力を計算した。ここで、巻き込まれた空気の圧力 $P_c(T)$ 、衝撃力 $F(T)$ や時間 T の無次元値は ε に依存するので、計算結果の比較を簡単にするために、これらの無次元値には ε を乗じている。

初めに、巻き込まれた空気の圧力の結果を Fig.6 に示す。また、空気巻き込みが発生した直後の巻き込まれた空気の体積 N_0 を Table.2 に示す。

Fig.6 Trapped air pressure

Table.2 The volume of the trapped air immediately after the air trapped

θ (deg.)		0	1.5	3
N_0	H/D=0.284	0.632	0.445	0.290
	H/D=0.270	0.617	0.415	0.276

Fig.6 から、傾斜角の大きさが大きく、また、波高が低くなるにつれ、巻き込まれた空気の圧力の最大値は大きくなり、作用時間は短くなっている事が分かる。また、Table.2 の結果から、波高が小さくなるほど、巻き込まれる空気の体積が小さくなっている。ここで、波高が小さくなるほど、物体表面と自由表面との相対角度が小さくなるので、接水面の拡大速度が大きくなる。また、この接水面の相対速度が大きくなることで、巻き込まれる空気の体積が小さくなる。以上のことから、波高が小さくなるほど、巻き込まれる空気の体積が小さくなるために、空気の圧力の最大値が大きくなり、作用時間が短くなる。

次に、衝撃力の計算結果を Fig.7 に示す。この結果から、空気巻き込みが発生する前後において、波高が低くなるほど、衝撃力が大きくなっている事が分かる。これは、波高が減少するにつれ、物体表面と波面との相対角度が小さくなるためと考えられる。

Fig.7 Impact force with variation of the wave height

3.3 巻き込まれた空気による尺度影響

空気巻き込みを伴う水面衝撃の相似な模型試験を行うには、フルード数とバグノルド数を同時に合わせる必要があるが、一般的な船舶水槽試験では、フルード数が同じになるように試験条件が決定される。よって、フルード数とバグノルド数を同時に満たすような実験を行うことはできない。これは空気巻き込みを伴う水面衝撃の相似な実験を行うことができないことを意味しており、これにより、空気巻き込みによる尺度影響が生じる。衝撃力の明確な推定には、衝撃力に対する空気巻き込みによる尺度影響を検討する必要がある。

これまで計算に使用した値を実船スケールとし、その 1/50 の模型スケールを考える。この模型スケールでの値はフルード則で換算すると、

$$V_0 : 0.42 \text{ m/s}, D : 0.08 \text{ m}, H : 0.023 \text{ m} (\varepsilon = 0.284)$$

となる。これらの値を用いて、傾斜角が 1.5, 3.0° である場合の衝撃力を計算した結果を Figs.8, 9 に示す。

Fig.8 Impact force in the full and model scale ($\theta = 1.5^\circ$)

ここで、これらの図中の実線及び破線は、それぞれ実船スケールと模型スケールの値を用いて計算した衝撃力の結果を表わしている。また、一点鎖線は空気巻き込みを考慮しない場合 ($\beta=0$) の衝撃力の計算結果である。

これらの結果を見ると、空気巻き込みが発生する前では、実船と模型スケールの結果は一致している。一方、空気巻き込みが発生した後では、 $\beta=0$ の衝撃力の結果との差は模型

スケールの方が実船スケールよりも大きくなっている。そこで、空気巻き込みを考慮しない場合、衝撃力の無次元値は実船スケールと模型スケールでは一致する。これらのことから、

Fig.9 Impact force in the full and model scale ($\theta = 3.0^\circ$)

傾斜角の大きさに関係なく、衝撃力に対する空気巻き込みの影響は模型スケールの方が実船スケールより大きくなることが分かった。また、傾斜角が大きくなるほど、空気巻き込みの影響が大きくなっていることも分かる。

次に、船首部船底等の局所構造の設計に用いられる等価静水圧を設定するには、衝撃圧力の空間分布を把握する必要がある。そこで、Figs.10, 11 に、それぞれ傾斜角が 1.5, 3.0° である場合の圧力分布の結果を示す。ここでは、例として、 $Y/D=0.1$ での圧力分布の結果を示している。ここで、図中の実線と破線は、それぞれ実船スケールと模型スケールでの圧力分布の無次元値を表している。

Fig.10 Pressure distribution ($\theta = 1.5^\circ$) Fig.11 Pressure distribution ($\theta = 3.0^\circ$)

これらの結果から、模型スケールで求めた圧力分布が実船スケールで求めた圧力分布より大きくなっていることが分かる。空気巻き込みを考慮しない場合、実船スケールと模型スケールで求めた衝撃圧の無次元値は一致する。このことから、空気巻き込みが発生する場合、模型試験で計測した船底に働く衝撃圧の分布をフルード則で実船スケールの値に換算すると、圧力分布を過大に推定する可能性があることを示唆している。

以上により、本研究では、衝撃力や衝撃圧に対する空気巻き込みの影響は模型スケールの方が実船スケールより大きくなることが分かった。しかし、巻き込まれた空気による尺度影響を詳細に把握するには、落下速度 V_0 や窪みの形状を表すパラメータである H , D あるいは H/D 等が空気巻き込みの尺度影響に及ぼす影響の検討する必要がある。これについては今後の課題としたい。

3.4 波面の影響

これまで、三角柱が突入するうねりの上に存在する凹凸のある波面を窪みでモデル化してきた。この節では、傾斜角を持つ物体に働く衝撃力に対する波面の影響について検討を試みる。実際の海面の波面は、異なる周期、振幅や波向きを持った波の重ね合わせで表わすことができる。よって、本節では、上記の波面を次式で表されるものと仮定する。

$$Z = \frac{H}{2}(\cos kX + \cos kY), \quad k = \frac{\pi}{D} \quad (5)$$

ここで、 k は波数を表している。(5)式は xy 、それぞれの方向に進む波長 $2D$ 、波高 H を持つ正弦波が重なり合った波面の形状を表している。

三角柱が凹凸のある水面に突入する場合、三角柱の底面が着水する位置により接水面の広がりが増減する。この接水面の広がりには衝撃力に影響を与えられとされる。よって、

Fig.12 Schematic view of the triangular prism falling onto the distorted water surface (Type1)

本研究では、Fig.12 のように三角柱の先端が波の波頂に着

水する場合 (Type1) と、Fig.13 のように三角柱の側面が先端より先に着水する場合 (Type2) を考える。ここで、これらの図の右には、AA'における断面図を示している。

ここで、Type1, 2 の物体形状は、それぞれ以下のようになる。

$$\text{(Type1)} \quad b(x, y) = \frac{a}{\varepsilon}x + \frac{1}{2}(\cos 2\pi x + \cos 2\pi y) + 1 \quad (6)$$

$$\text{(Type2)} \quad b(x, y) = \frac{a}{\varepsilon}x - \frac{1}{2}(\cos 2\pi x + \cos 2\pi y) + 1 \quad (7)$$

Fig.13 Schematic view of the triangular prism falling onto the distorted water surface (Type2)

ここで、三角柱が突入する波面の形状が異なるので、比較を容易にするために、単位面積あたりに働く衝撃力、つまり、平均圧力を用いて、衝撃力に対する波面の影響を検討する。この平均圧力の式は以下の通りである。

$$p_h(t) = \frac{-\iint_{\Omega_B} \frac{\partial \phi}{\partial t} dS + \iint_{\Omega_C} p_c(t) dS}{S_B + S_C} \quad (8)$$

上式の、 S_B , S_C は、それぞれ浸水部分及び空気を巻き込んでいる部分の面積を表している。ここで、平均圧力 P_h は $p_c(t)$ と同じように次式で無次元化している。

$$P_h = \frac{\varepsilon P_h(T)}{\rho_w V_0^2}$$

衝撃力に対する傾斜角と波面の影響を検討する為に、傾斜角が 1.5° , 3.0° である場合の平均圧力を計算した。Figs.14, 15 に、それぞれ傾斜角が 1.5° , 3.0° である場合の平均圧力の結果を示す。これらの図には、デッドライズアングルが 4.5° の三角柱が平らな水面に突入する際に、三角柱に働く平均圧力の解析解も示している。

図中の太い実線は水面が窪みである場合の平均圧力の結果で、太い破線と一点鎖線は、それぞれその平均圧力の成分である巻き込まれた空気による平均圧力及び流体による平均圧力を表している。また、破線と一点鎖線は、それぞれ前述の Type1, Type2 における平均圧力の結果であり、二点鎖線は水面が平らである場合の平均圧力の解析解を表してい

る。

これらの結果から、波面が窪み、タイプ 1, 2 の状況における平均圧力の明確な大小を言うことはできないが、波面が窪みである場合では、空気巻き込みが生じるために平均圧力の結果に明確な最大値があり、傾斜角が大きくなるほど平均圧力の最大値は大きくなっていることが分かる。また、水面が平らである場合の平均圧力の計算結果は、他の水面に凹凸がある場合における平均圧力の計算結果より大きくなっている。これは空気巻き込み発生がある場合でも、物体が突入する波面に存在する凹凸の 3 次元影響により、船底に働く平均圧力が低減されることを表している。

Fig.14 Averaged pressure ($\theta = 1.5^\circ$)

Fig.15 Averaged pressure ($\theta = 3.0^\circ$)

4. 結 言

本研究では、斜波中を航行する船体にスラミングが発生する場合を想定し、船底が横傾斜角を持って水面に突入する問題を考え、傾斜角を持つ物体の空気巻き込みを伴う水面衝撃問題を検討した。この結果、以下の結論が得られた。

- 1) 傾斜角が大きくなるほど、船底と水面との間に巻き込まれた空気の圧力の最大値が大きくなることやその作用時間が短くなること、また、船底に働く衝撃力が大きくなることが分かった。
- 2) 船底が突入する波面に存在する凹凸の波高が小さくなるにつれ、船底の物体表面と水面の相対角度が小さくな

るために、衝撃力が大きくなることが分かった。

- 3) 傾斜角の大きさに関係なく、衝撃力に対する空気巻き込みの影響は模型スケールの方が実船スケールより大きくなることが分かった。また、傾斜角が大きくなるほど、衝撃力に対する空気巻き込みの影響が大きくなることも分かった。
- 4) 物体が傾斜角を持って水面に突入する際においても、空気巻き込みが発生した場合、模型スケールの値で計算した圧力は実船スケールのものよりも大きくなることが分かった。これは、模型試験で計測した圧力分布をフルード則で換算した場合、実船では過大な推定を与える可能性を示唆している。
- 5) 本研究での計算例によると、うねりの表面に存在する風波の 3 次元影響により、物体に働く平均圧力が低減されることが分かった。

謝 辞

大阪大学大学院工学研究科高木健助教授には、多くの御指導と貴重なご助言を賜りました。ここに謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H.Wagner : Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschr. für Angewandte Mathematik und Mechanik, Bind 12, Heft4, pp.193-215, 1932
- 2) 遠山泰美 : 任意形状物体の 2 次元水面衝撃計算法について, 日本造船学会論文集, 第 173 号, pp.285-291, 1993
- 3) Xu.L, Troesch.W.A, and Vorus.W.S. : Asymmetric Vessel Impact and Planing Hydrodynamics, Journal of Ship Research, Vol.42, No.3, pp.187-198, 1998
- 4) K.Takagi : Three-dimensional Slamming of a Distorted Plate, Proc. of Symposium on ISOPE, pp.237-244, 1997
- 5) 土橋純也 : 水面衝撃問題における物体形状と空気巻き込みの影響, 日本船舶海洋工学会論文集第 3 号, pp. 183-188, 2006
- 6) Arman, J.L. and Coint, R. : Hydrodynamic Impact Analysis of a Cylinder, Proc. of 5th Int. OMAE Symposium, vol.1, pp.250-256, 1986