

第4種学術刊行物 ISSN 1880-3717

# 日本船舶海洋工学会論文集

JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND OCEAN ENGINEERS

第23号

平成28年6月

VOLUME 23

JUNE 2016

振動翼周りの流場シミュレーション

— その2 : Pitching 振動する翼 —

堀 勉

*Flow Simulation around an Oscillating Wing*

— 2<sup>nd</sup> Report : Pitching Wing —

*Tsutomu HORI*

日本船舶海洋工学会

THE JAPAN SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND OCEAN ENGINEERS

# 振動翼周りの流場シミュレーション

## — その 2 : Pitching 振動する翼 —

正会員 堀 勉\*

### Flow Simulation around an Oscillating Wing — 2<sup>nd</sup> Report : Pitching Wing —

by Tsutomu HORI, Member

#### Summary

In this 2<sup>nd</sup> report, unsteady flow field around a 2-D oscillating wing has been calculated for the pitching mode. On the other hand, in our 1<sup>st</sup> report was calculated for the heaving mode. Mathematical treatment is boundary element method which distributes the continuous vortex layer on the wing camber line. Calculated unsteady lift and moment were good agreement to Theodorsen's analytical solution for the thin wing.

Flow simulation at the time-dependent is performed, and flow vectors are visualized in the case of pitching mode. As well as the previous heaving mode, flow field of the induced velocity is also separated by bound vortex and trailing vortex. As a result, we showed the dependence of the frequency and pitching amplitude to flow vector around oscillating wing. And, the generation process of trailing vortex has been elucidated by visual flow vectors.

#### 1. 結 論

非定常翼に関する研究は、航空機が突風中を飛行する際に発生するフラッター現象などの技術的な問題を解決する必要性から、航空流体力学の分野で、盛んに研究が行われてきた。特に、2次元振動翼に対する空力特性については、Theodorsen<sup>1)</sup>、山口<sup>2)</sup>、別所<sup>3)</sup>等により理論解析されてきた。

一方、船舶工学の分野でも、以前から水中翼船や動揺軽減を目的とした Anti-Rolling Fin や Anti-Pitching Fin、近年では海洋計測等の特殊目的の水中曳航体<sup>4)</sup>や新型式の船舶に装着する水中翼に対し、非定常な流力特性の解明を目的に、計算・実験の両面から研究<sup>5),6)</sup>が実施されてきた。そのような研究経緯の中、船舶流体力学の分野で公表されている振動翼周りの流場計算を実施した結果<sup>7),8)</sup>は、何れも数値流体力学的手法に基づくものであり、翼周りの圧力分布や流線の結果が示されているが、流場全体をシミュレーションした例は見受けられない。最近では、定常航走する水中翼の造波特性を、2次元渦糸による造波グリーン関数を用いた境界要素法的手法に基づいて、詳細な造波シミュレーションを実施した結果<sup>9)</sup>が報告されている。

このような状況に鑑み、著者は、前報<sup>10)</sup>で Heaving する 2次元振動翼周りの流場について、翼面を離散的な渦糸で近似することなく、連続的な渦層モデルに基づいて定式化した境界要素法的手法でシミュレーション計算を実施した。これにより、流場全体を流速ベクトルの形で可視化した結果を

報告し、束縛渦と後流渦の流場構造を明らかにした。水中翼の流力特性を把握する為には、振動モードとして Pitching の場合についても、流場データを提供する必要がある。

本論では、前報<sup>10)</sup>と同様な手法を、Pitching する振動翼に適用し、流場シミュレーションを実施する。渦分布の求解に際しては、振動成分に加えて、Heaving 時には生じない角変位による迎角成分が存在することを示すと共に、その結果をご報告し、諸賢のご批判を仰ぐ次第である。

#### 2. Pitching 振動する翼の非定常揚力問題

弦長  $c$  の 2次元翼が、流体密度  $\rho$  の一様流  $U$  の中で、角振幅  $\Theta_A$ 、円周波数  $\omega$  で、Pitching 振動する際の、時間  $t$  ベースの非定常揚力問題を構築する。

##### 2.1 流場の定式化

座標系  $o-xz$  は、Fig. 1 に示すように、翼のミッドコードに原点  $o$  を配し、一様な流れ方向に  $x$  軸、鉛直上向きに  $z$  軸を取る。このとき、時計回り方向を正とする角変位  $\theta(t)$  と、それによる線変位  $\zeta(x, t) = -x \tan \theta(t)$  を、それぞれ、

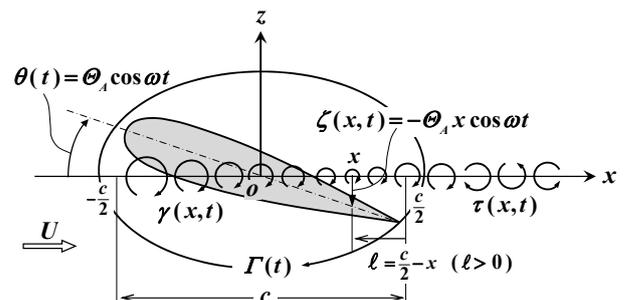


Fig. 1 Coordinate system and some definitions.

\* 長崎総合科学大学 工学部 工学科 船舶工学コース

$$\left. \begin{aligned} \theta(t) &= \Theta_A \cos \omega t = \operatorname{Re} \left[ \Theta_A e^{i\omega t} \right] \\ \zeta(x,t) &= -x \theta(t) = -\operatorname{Re} \left[ \Theta_A x e^{i\omega t} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

のように、時間因子  $e^{i\omega t}$  を分離して複素表記する。後者の上下変位  $\zeta$  は、角振幅  $\Theta_A \ll 1$  を仮定して線型化したものであり、式中の  $\operatorname{Re}[\dots]$  は、実部を採ることを意味する。

この非定常流場の速度ポテンシャル  $\Phi$  は、

$$\Phi(x,z,t) = Ux + \phi(x,z,t) \quad (2)$$

のように、一様流のポテンシャル  $Ux$  と翼による攪乱ポテンシャル  $\phi$  の重畳で表現される。後者の  $\phi$  は、前報<sup>10)</sup> に倣い、

$$\begin{aligned} \phi(x,z,t) &= \phi_\gamma(x,z,t) + \phi_\tau(x,z,t) \\ &= \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{2\pi} \left\{ \bar{\phi}_\gamma(x,z) + \bar{\phi}_\tau(x,z) \right\} e^{i\omega t} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

のように、束縛渦による  $\phi_\gamma$  と、後流渦による  $\phi_\tau$  に分離して表現する。ここに、複素表記した  $\bar{\phi}_\gamma$ 、 $\bar{\phi}_\tau$  は、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \bar{\phi}_\gamma(x,z) &= -\int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \bar{\gamma}(\xi) \tan^{-1} \left( \frac{z}{x-\xi} \right) d\xi \\ \bar{\phi}_\tau(x,z) &= -\int_{\frac{c}{2}}^{\infty} \bar{\tau}(\xi) \tan^{-1} \left( \frac{z}{x-\xi} \right) d\xi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

の形で与えられる。前者の  $\bar{\phi}_\gamma$  は、薄翼の仮定から Fig. 1 に示すように、Pitching 振動の平均位置での翼のキャンパーライン ( $x$  軸) 上に束縛渦  $\bar{\gamma}$  を分布させ、後者の  $\bar{\phi}_\tau$  に対する後流渦の分布密度  $\bar{\tau}$  は、西山の教科書<sup>11)</sup> に拠れば、Kelvin の渦定理によって、

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau}(x) &= -i \frac{\omega \bar{\Gamma}}{U} e^{ik \frac{\ell(x)}{c}} = -i \frac{k \bar{\Gamma}}{c} e^{ik \frac{\ell(x)}{c}} \\ \text{但し、} &\left\{ \begin{aligned} k &= \frac{\omega c}{U} \left( = \frac{2\pi c}{\lambda} \right) \\ \ell(x) &= \frac{c}{2} - x \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

のように、束縛渦  $\bar{\gamma}$  を(10)式に示すように翼面上で積分した循環量  $\bar{\Gamma}$  によって定まる。式中の無次元数  $k$  は、振動翼の流力特性を支配する Reduced Frequency であり、後流渦の波

長も  $\lambda = \frac{2\pi c}{k}$  として決まる。ここに、 $\bar{\phi}_\gamma$ 、 $\bar{\phi}_\tau$ 、 $\bar{\gamma}$ 、 $\bar{\tau}$ 、 $\bar{\Gamma}$  は、時間因子  $e^{i\omega t}$  を分離して、 $\theta(t)$ 、 $\zeta(x,t)$  と同様に複素表記したものである。

## 2.2 境界値問題の設定

Pitching 振動する翼面上での境界条件  $[H]$  は、 $\Theta_A \ll 1$  を仮定して線型化すれば、平均位置 ( $z=0, -c \leq x \leq c$ ) において、 $z$  方向の誘導速度  $w$  は、

$$\begin{aligned} w(x,0,t) &= \left( \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \zeta(x,t) \\ &= -x \dot{\theta}(t) - U \theta(t) \end{aligned} \quad (6)$$

を満たす必要があり、 $[H]$  を複素表記の  $\bar{w}$  で記せば、

$$\begin{aligned} [H] \quad \bar{w}(x,0) &= -(U + i\omega x) \Theta_A \\ &= -U \left( 1 + ik \frac{x}{c} \right) \Theta_A \end{aligned} \quad (7)$$

となる。右辺について言及すると、第 2 項の虚部は、角速度による振動成分であり、Heaving 時にも存在するが<sup>10)</sup>、第 1 項の実部は、角変位による迎角成分であり、Pitching 特有の成分である。また、左辺の誘導速度  $\bar{w}$  は、

$$\bar{w}(x,0) = \bar{w}_\gamma(x,0) + \bar{w}_\tau(x,0) \quad (8)$$

のように、束縛渦  $\bar{\gamma}$  と後流渦  $\bar{\tau}$  による両成分の和で求まるが、これら両成分の計算式については、既に前報<sup>10)</sup> で導出済みである。 $\bar{w}_\gamma$  については、 $\bar{\gamma}$  に関して区分的<sup>(j)</sup> に折れ線近似することにより、連続的な渦層分布として定式化した  $W_L^{(j)}$ 、 $W_R^{(j)}$  を、 $\bar{w}_\tau$  については、積分正弦関数  $\operatorname{si}$  と積分余弦関数  $\operatorname{ci}$  を用いた  $\Omega_c$ 、 $\Omega_s$  を使って、それぞれ計算できる。

併せて、Kutta 条件  $[K]$  として、翼後縁  $\left( x = \frac{c}{2} \right)$  での束縛渦  $\bar{\gamma}$  が、後流渦  $\bar{\tau}$  として流出するよう、

$$[K] \quad \bar{\gamma} \left( \frac{c}{2} \right) = \bar{\tau} \left( \frac{c}{2} \right) = -i \frac{k \bar{\Gamma}}{c} \quad (9)$$

を課すことと、総循環  $\bar{\Gamma}$  は、

$$[\Gamma] \quad \bar{\Gamma} = \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \bar{\gamma}(x) dx \quad (10)$$

ように束縛渦の翼面全体に亙る積分値で定まる。

$$\left. \begin{aligned} A_{11}\gamma_{c1} + A_{12}\gamma_{c2} + A_{13}\gamma_{c3} + A_{14}\gamma_{c4} - \Omega_{c1}\Gamma_c &= -\Theta_A \quad \text{..... ①} \\ A_{21}\gamma_{c1} + A_{22}\gamma_{c2} + A_{23}\gamma_{c3} + A_{24}\gamma_{c4} - \Omega_{c2}\Gamma_c &= -\Theta_A \quad \text{..... ②} \\ A_{31}\gamma_{c1} + A_{32}\gamma_{c2} + A_{33}\gamma_{c3} + A_{34}\gamma_{c4} - \Omega_{c3}\Gamma_c &= -\Theta_A \quad \text{..... ③} \\ &\quad \gamma_{c4} &= 0 \quad \text{..... ④} \\ G_1\gamma_{c1} + G_2\gamma_{c2} + G_3\gamma_{c3} + G_4\gamma_{c4} - \Gamma_c &= 0 \quad \text{..... ⑤} \\ \Omega_{c1}\Gamma_c + A_{11}\gamma_{s1} + A_{12}\gamma_{s2} + A_{13}\gamma_{s3} + A_{14}\gamma_{s4} - \Omega_{s1}\Gamma_s &= -k\Theta_A x_1 \quad \text{..... ⑥} \\ \Omega_{c2}\Gamma_c + A_{21}\gamma_{s1} + A_{22}\gamma_{s2} + A_{23}\gamma_{s3} + A_{24}\gamma_{s4} - \Omega_{s2}\Gamma_s &= -k\Theta_A x_2 \quad \text{..... ⑦} \\ \Omega_{c3}\Gamma_c + A_{31}\gamma_{s1} + A_{32}\gamma_{s2} + A_{33}\gamma_{s3} + A_{34}\gamma_{s4} - \Omega_{s3}\Gamma_s &= -k\Theta_A x_3 \quad \text{..... ⑧} \\ &\quad \gamma_{s4} &= 0 \quad \text{..... ⑨} \\ G_1\gamma_{s1} + G_2\gamma_{s2} + G_3\gamma_{s3} + G_4\gamma_{s4} - \Gamma_s &= 0 \quad \text{..... ⑩} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

この  $[H], [K], [\Gamma]$  の 3 条件を連立して、束縛渦分布  $\bar{\gamma}$  を求解すればよい。

### 2.3 渦分布 $\bar{\gamma}$ の求解

例えば、翼面を  $N=3$  分割した場合について、前節の 3 条件を離散表記してみると、未知数が  $\bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2, \bar{\gamma}_3, \bar{\gamma}_4, \bar{\Gamma}$  の実部(c)と虚部(s)があるから、(11)式のような 10 元の連立方程式となる。式中の  $x_i, \gamma_c, \gamma_s, \Gamma_c, \Gamma_s$  は、前報<sup>10)</sup>と同様、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} x &= cx_i \\ \bar{\gamma} &= U(\gamma_c + i\gamma_s) \\ \bar{\Gamma} &= U_c(\Gamma_c + i\Gamma_s) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

のように、無次元化した量で表記した。

(11)式の①～③、⑥～⑧が(7)式の翼面条件  $[H]$  であり、前半が迎角成分、後半が振動成分に対応する。左辺については、計算点  $x_i$  に対する束縛渦の影響を  $A_{ij}$ 、後流渦の影響を  $\Omega_{ci}, \Omega_{si}$  で表している。また、④、⑨が(9)式の Kutta 条件  $[K]$ 、⑤、⑩が(10)式の  $[\Gamma]$  の循環量  $\Gamma_c, \Gamma_s$  を示し、その係数を  $G_j$  と書いたものである。式中左辺の係数  $A_{ij}, \Omega_{ci}, \Omega_{si}, G_j$  は、前報<sup>10)</sup>に示す通りである。

結果、未知数である束縛渦の分布  $\gamma_c, \gamma_s$  は、Pitching の角振幅  $\Theta_A$  に比例して求まることが分かり、この事情は、上下揺れ振幅  $Z_A$  に比例して求解された前報<sup>10)</sup>と同様である。

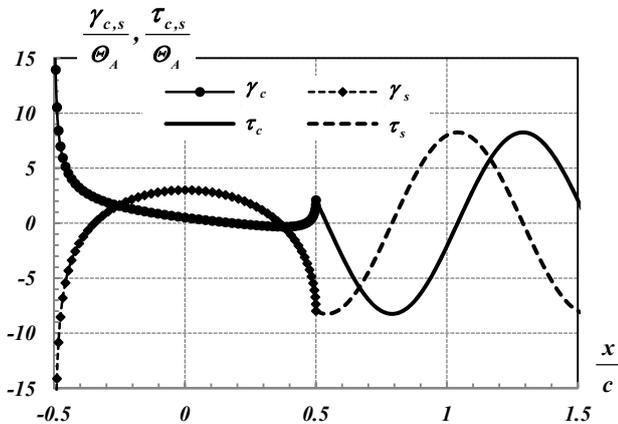


Fig. 2 Distribution of bound vortex  $\gamma_c, \gamma_s$  and trailing vortex  $\tau_c, \tau_s$  ( $k = 2\pi$ ).

翼面の分割は、翼弦長を直径とするセミサークルの偏角を等分割することにより、翼の前後縁付近を細分割して行なう。実際、翼面を  $N=60$  分割して、124 元の連立方程式を解いて渦強さ  $\gamma_c, \gamma_s$  を求め、Pitching 振幅  $\Theta_A$  で規格化した  $\frac{\gamma_{c,s}}{\Theta_A}$  と、後流渦強さの分布  $\frac{\tau_{c,s}}{\Theta_A}$  を、Fig.2 に示す。周波数は  $k=2\pi$  である。

### 3. Pitching 翼に働く揚力とモーメント

振動翼の上下面での圧力差  $\bar{\delta p}$  は、Bernoulli の定理により、

$$\begin{aligned} \bar{\delta p}(x) &= \rho \left( U\bar{\gamma} + i\omega \int_{-\frac{c}{2}}^x \bar{\gamma}(\xi) d\xi \right) \\ &= \rho U \left( \bar{\gamma} + i \frac{k}{c} \int_{-\frac{c}{2}}^x \bar{\gamma}(\xi) d\xi \right) \end{aligned} \quad (13)$$

によって求まるから<sup>11)</sup>、翼に働く揚力  $\bar{L}$  と、ミッドコード回りのモーメント  $\bar{M}$  は、それぞれ翼面上での圧力積分により、

$$\left. \begin{aligned} \bar{L} &= \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \bar{\delta p}(x) dx \equiv \frac{1}{2} \rho U^2 c \Theta_A (L_c + L_s) \\ \bar{M} &= \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} x \cdot \bar{\delta p}(x) dx \equiv \frac{1}{2} \rho U^2 c^2 \Theta_A (M_c + M_s) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

によって、Heaving 時と同様に算定できる。ここに、 $\bar{\delta p}, \bar{L}, \bar{M}$  は、時間因子  $e^{i\omega t}$  を分離して複素表記したものである。

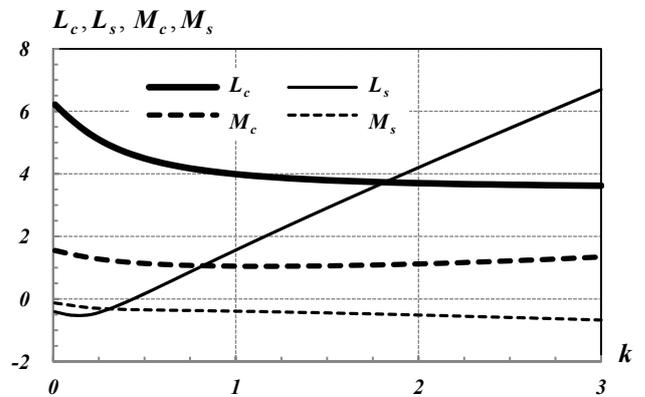


Fig. 3 Components of unsteady lift and moment.

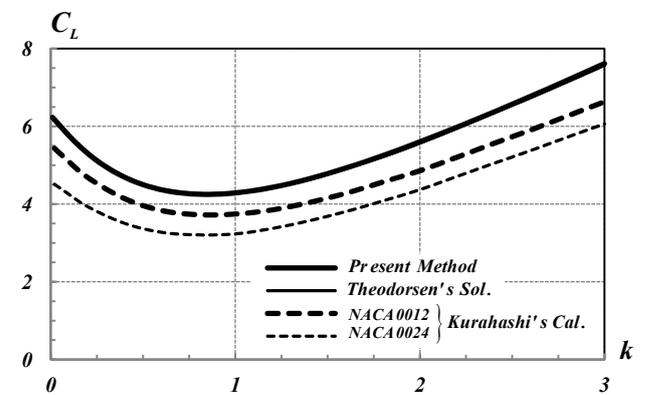


Fig. 4 Amplitude of unsteady lift for pitching.

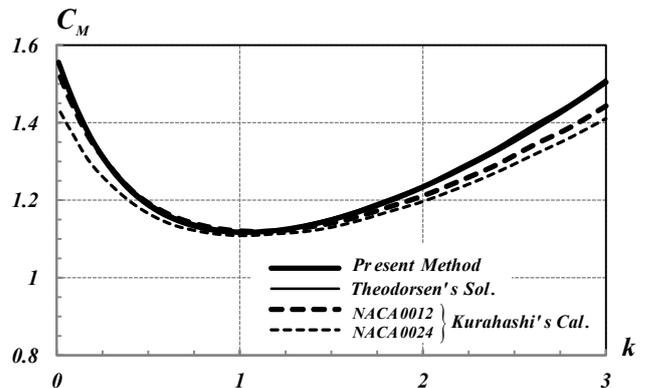


Fig. 5 Amplitude of unsteady moment for pitching.

Fig.3は、Pitchingによる揚力 $\bar{L}$ とモーメント $\bar{M}$ の実部 $(c)$ と虚部 $(s)$ を、計算し、周波数 $k$ ベースで置点したものである。 $L_c, L_s, M_c, M_s$ は、(14)式で定義するように、Pitching振幅 $\Theta_A$ で規格化された無次元量である、

この両成分を用いて、揚力の絶対値 $|\bar{L}|$ とモーメントの絶対値 $|\bar{M}|$ を、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} C_L &= \frac{|\bar{L}|}{\frac{1}{2}\rho U^2 c \Theta_A} = \sqrt{L_c^2 + L_s^2} \\ C_M &= \frac{|\bar{M}|}{\frac{1}{2}\rho U^2 c^2 \Theta_A} = \sqrt{M_c^2 + M_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

のように規格化して $C_L, C_M$ を定義する。その計算結果を、Fig.4, Fig.5に示す。本論の結果は、前報のHeavingの場合<sup>10)</sup>と同様、Theodorsen<sup>1)</sup>による平板翼の解析解と、揚力 $C_L$ 、モーメント $C_M$ とも、図中で重なって得られており、渦層分布による本論の計算が、Pitchingの場合も、正しく解かれていることが分かる。

両図中には、倉橋<sup>5)</sup>による厚翼(NACA0012, NACA0024)の計算結果も、併せて置点した。 $C_L$ については、 $k$ の全領域に亘り、本論やTheodorsenの解より、翼厚が増す程、やや低めに得られている。一方、 $C_M$ は $C_L$ に較べて、翼厚の影響は小さく、特に $k=1$ の辺りでは、薄翼の結果と同値に得られている。このことから、Pitching時の流体力に対する翼の厚みが及ぼす影響は、揚力については多少あるものの、モーメントについては殆どないことから、薄翼を仮定した本論の手法によって、翼近傍の局所的な流れを除けば、翼周りの流れを妥当にシミュレートできると考える。

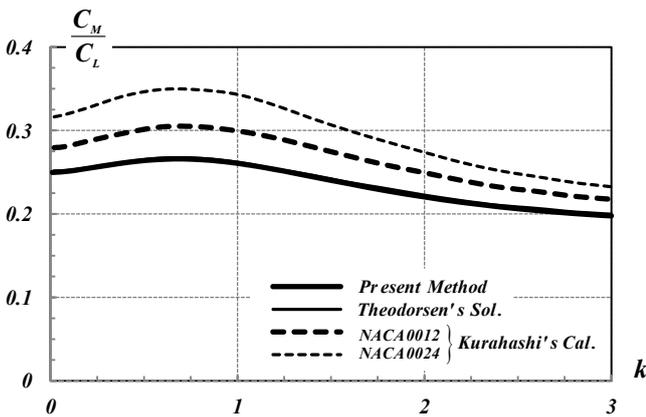


Fig. 6 Point of action caused by unsteady lift.

Fig.6は、Pitching振動する翼に作用するモーメント $|\bar{M}|$ を揚力 $|\bar{L}|$ で除すことにより、揚力の作用点の位置を調べた結果である。揚力とモーメントの位相差を無視した $\frac{C_M}{C_L}$ の計算であり、周波数 $k$ や翼厚によって、多少の変動はあるものの、概ね0.25付近の値を取っており、Pitching振動する翼においても、定常翼の $\frac{1}{4}$ 弦長点の近似が成立することを示唆している。

#### 4. Pitching 翼周りの流れシミュレーション

2.3節で求めた束縛渦 $\gamma_c, \gamma_s$ の解を用いて、誘導速度場をシミュレートした結果をFig.7~Fig.16に示す。

##### 4.1 誘導速度場の成分分離

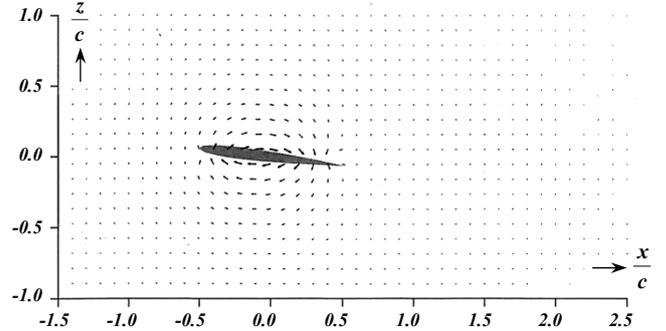


Fig. 7 Flow field caused by bound vortex.

$$\left( k = 2\pi \left( \frac{\lambda}{c} = 1 \right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4} \right)$$

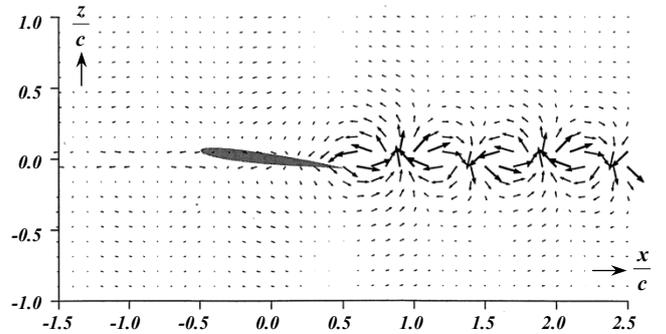


Fig. 8 Flow field caused by trailing vortex.

$$\left( k = 2\pi \left( \frac{\lambda}{c} = 1 \right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4} \right)$$

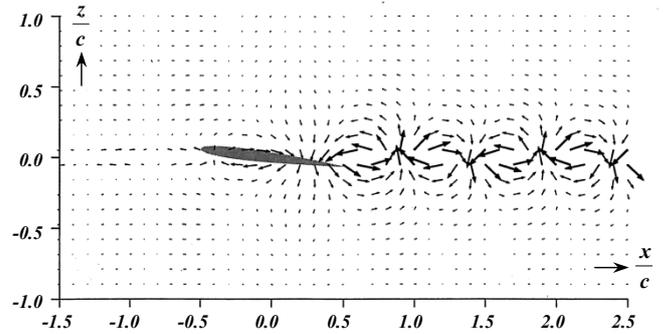


Fig. 9 Total flow field without uniform flow.

$$\left( k = 2\pi \left( \frac{\lambda}{c} = 1 \right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4} \right)$$

Fig.7は束縛渦のみ、Fig.8は後流渦のみ、Fig.9は両者を重畳した誘導速度場であり、角振幅 $\Theta_A = 10^\circ$ 、周波数 $k = 2\pi$ 、時間 $\omega t = \frac{7\pi}{4}$ のときを示す。

このとき、Pitchingは時計回りであり、翼の前縁は上向き、後縁は下向きに振動しているから、束縛渦のみの流れは、ミッドコードを中心にした時計回りの渦で表現されている。後流渦の流れからは、反時計回りとき計回りの渦が、後縁から交互に生成されている様子が分かる。両者を合成した誘導速度場は、(7)式の第2項が示す、前後縁が反対向きの振動成

分に, 同式の第 1 項に相当する, 迎角状態の角変位による弦長に互る下向きの成分が加わることから, 前縁では吹上げの誘導速度が相殺されるのに対し, 後縁では吹下しの速度が増速されている様子が, シミュレートされている。

### 4.2 周波数 $k$ に対する依存性

周波数影響については, Fig. 10 に低周波数の  $k = 2\pi$ , Fig. 11 に高周波数の  $k = 4\pi$  の場合を示す。流場は, 誘導速度場に一樣流を加えたものであり, 前節と同様, 時間  $\omega t = \frac{7\pi}{4}$ , 角振幅  $\Theta_A = 10^\circ$  の場合である。これらの図から, 周波数  $k$  が低いときは, 翼の全弦長に互り一樣流が支配的であるが, 周波数が高くなると, Pitching 振動により, 前縁では上向き, 後縁では強い下向きの誘導速度が顕著に表われる。何れの周波数でも, 翼後縁から後流渦が流出される様子が良く分かる。

本論では, 翼面を離散的な渦糸に集約する近似を施すことなく, 連続的な渦層モデルで計算している。各要素端部では渦分布の微係数は不連続であるが, 翼面上を細かく分割 ( $N = 60$ ) していることから, 周波数に関わらず, 翼面近傍でもスムーズで妥当な流速ベクトルが得られている状況は, 前報<sup>10)</sup>の Heaving 時と同様である。

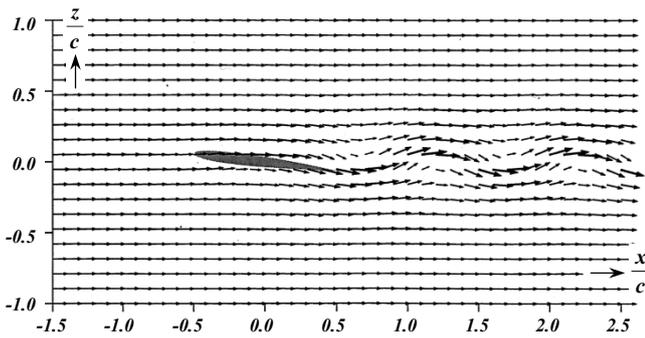


Fig. 10 Total flow field at low frequency.  
 $\left(k = 2\pi \left(\frac{\lambda}{c} = 1\right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4}\right)$

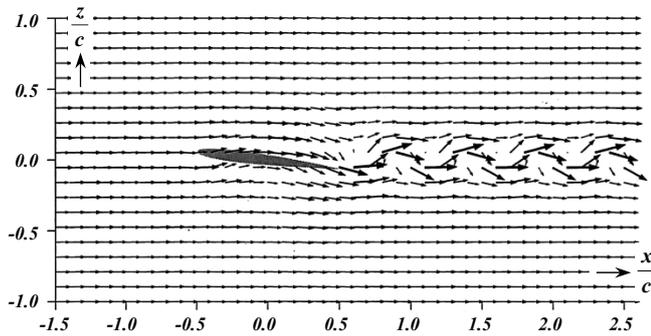


Fig. 11 Total flow field at high frequency.  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4}\right)$

### 4.3 角振幅 $\Theta_A$ に対する依存性

Fig. 12 は, 小振幅  $\Theta_A = 5^\circ$  の場合, Fig. 13 は, 振幅がその倍の  $\Theta_A = 10^\circ$  の速度場であり, 周波数は  $k = 4\pi$ , 時間は前節と同様  $\omega t = \frac{7\pi}{4}$  である。

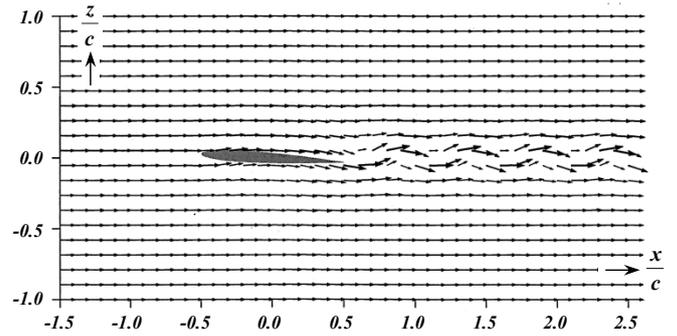


Fig. 12 Total flow field at small amplitude.  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 5^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4}\right)$

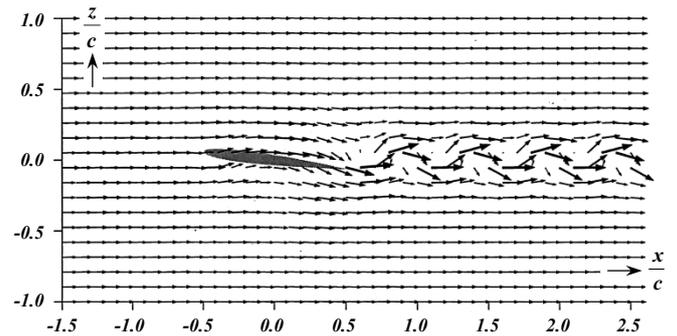


Fig. 13 Total flow field at large amplitude.  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 10^\circ, \omega t = \frac{7\pi}{4}\right)$

両図からは, Pitching 振幅  $\Theta_A$  が大きくなると束縛渦, 後流渦が, 共に強くなっている様子が表われている。

### 4.4 時間 $t$ ベースに変化させたシミュレーション

Fig. 14, 15, 16 は, 翼の迎角が負から正へ, 時計回りに Pitching 振動するときの流場を, 時間  $t$  を  $\frac{1}{8}$  周期ずつ変化させてシミュレートした結果である。周波数, 振幅は, それぞれ  $k = 4\pi$ ,  $\Theta_A = 10^\circ$  で固定し, 位相角  $\omega t$  が,  $\frac{5\pi}{4}$ ,  $\frac{3\pi}{2}$ ,  $\frac{7\pi}{4}$  の 3 状態である。

これらの図から,  $\omega t = \frac{3\pi}{2}$  のときは, 平均位置で迎角はゼロであるが, 翼の Pitching 速度は最大で, 翼の前縁では吹上げ, 後縁では吹下しの強い誘導速度が生じている様子が分かる。

一方,  $\omega t = \frac{5\pi}{4}$  と  $\frac{7\pi}{4}$  では, 翼の迎角は正負反対であるが, 流場は単純に上下反対とはなっていない。これは, (7)式の境界条件[H]の第 1 項が示す, 角変位による迎角成分は上下反対であるが, 同式の第 2 項が示す振動成分は, 同じ回転方向であることに起因する。結果, 両成分の足し引きにより, 前縁での吹上げ速度は  $\omega t = \frac{5\pi}{4}$  の方が強く, 後縁での吹下し速度は,  $\omega t = \frac{7\pi}{4}$  の方が強く生じている, この翼面条件[H]を満たす物理現象を, 本シミュレーション結果は良く捉えている。

## 5. 結 論

Pitching 振動する 2 次元翼周りの非定常な誘導速度場につ

いて、前報<sup>10)</sup>と同様、翼面上の各要素を離散的な渦糸で近似することなく、連続的な渦層モデルで定式化した境界要素法を適用して、数値シミュレートした。

誘導速度場を成分分離して計算した結果を、流速ベクトルの形で可視化することにより、Pitching 時の翼面条件における振動成分と迎角成分に対する束縛渦と後流渦の特性を把握できた。

Pitching 翼の周波数や角振幅が、速度場に及ぼす影響を明らかにした上で、時間  $t$  ベースに変化させて流場をシミュレートすることにより、迎角の正負に対する翼周りの誘導速度場の構造や、後流渦の生成過程を可視化することができた。

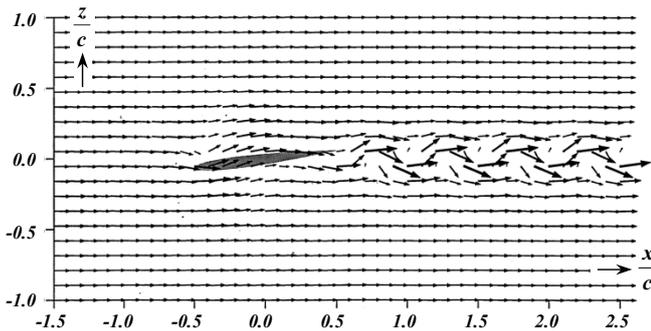


Fig. 14 Total flow field at  $\omega t = \frac{5\pi}{4}$ .  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 10^\circ\right)^4$

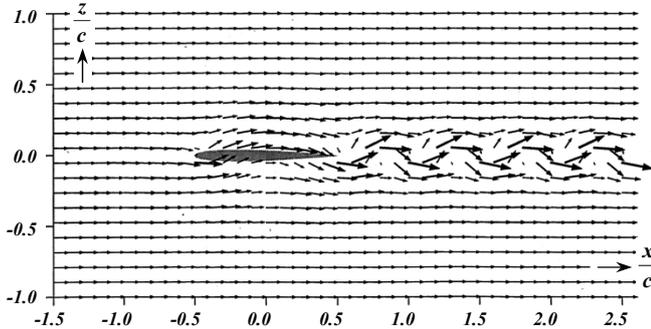


Fig. 15 Total flow field at  $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ .  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 10^\circ\right)^2$

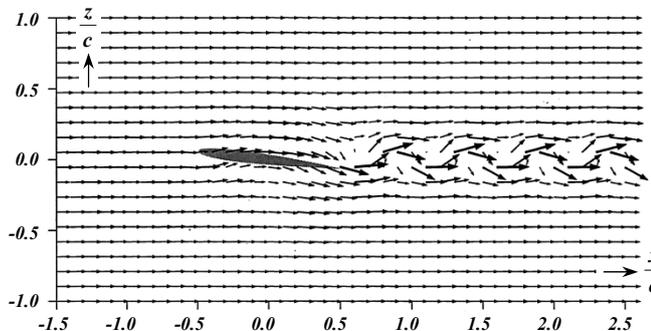


Fig. 16 Total flow field at  $\omega t = \frac{7\pi}{4}$ .  
 $\left(k = 4\pi \left(\frac{\lambda}{c} = \frac{1}{2}\right), \Theta_A = 10^\circ\right)^4$

今後、本論の計算手法を、Heaving と Pitching の連成振動や自由表面下での造波現象を伴う 3 次元問題に拡張することにより、水中翼船が波浪中を翼走する際の性能評価や姿勢制御に関する定量的な設計資料を提供できると考える。

プログラムの開発には、Borland C++ 5.0 コンパイラーを、流速ベクトルの可視化には、日本電子計算機の Gsharp (Ver 2.0) を用いたことを付記する。

### 謝 辞

本稿を閉じるに臨み、長崎総合科学大学 船舶工学科の卒業研究や大学院 流体工学専攻の修士論文のテーマとして、ともに本研究の計算に鋭意取り組んだ、小島 明君 (長崎県五島市・浜脇教会 司祭) と 山下 達也君 (下ノ江造船) に、深甚なる感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) Theodorsen, T. : General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter, NACA Trans., Vol.496, 1935.
- 2) 山口 裕, 岩崎 松之助: 有限振幅で振動している翼型の非定常空気力の計算, 日本航空宇宙学会誌, 第 26 巻, 第 295 号, pp. 425~432, 1978.
- 3) 別所 正利: 二次元振動翼理論について, 関西造船協会誌, 第 189 号, pp. 91~101, 1983.
- 4) 小寺山 亘, 経塚 雄策, 中村 昌彦, 大楠 丹, 柏木 正: 海洋観測用曳航体の開発研究 (第一報: 曳航体の運動と制御について), 日本造船学会論文集, 第 163 号, pp. 130~140, 1988.
- 5) 倉橋 宗和: 非定常流中の二次元翼に働く流体力に関する研究, 九州大学 応用力学研究所 修士論文, pp. 1~93, 1988.
- 6) 経塚 雄策, 堀 勉, 小寺山 亘: 水中揚力体に加わる非定常流体力について (第一報: 翼単独の場合), 日本造船学会論文集, 第 167 号, pp. 43~53, 1990.
- 7) Todor A. Videv, 土井 康明: Numerical Study of the Flow and Thrust Produced by a Pitching 2D Hydrofoil, 日本造船学会論文集, 第 172 号, pp. 165~174, 1992.
- 8) 田中 茂, 宮田 秀明: 補助翼を有する非定常水中翼の数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 176 号, pp. 19~30, 1994.
- 9) 堀 勉: 水中翼の造波シミュレーション, 日本航海学会誌, 第 196 号, pp. 99~108, 2016.
- 10) 堀 勉: 振動翼周りの流場シミュレーション, 日本船舶海洋工学会 論文集, 第 20 号, pp. 13~20, 2014.
- 11) 西山 哲男: 非定常翼の特性, 流体力学 (I) 6.6 節, 日刊工業新聞社, pp. 122~126, 1978.

# 日本船舶海洋工学会論文集

第 23 号 平成 28 年 6 月

## 目 次

| No. | 論 文 名   | 著 者 名   | 頁   |
|-----|---|---|-----|
| 1   | RANS Simulation of KVLCC2 using Simple Body-Force<br>Propeller Model With Rudder and Without Rudder | Yan Naing Win<br>Ping-Chen Wu<br>Keisuke Akamatu<br>Hiroshi Okawa<br>Frederick Stern<br>Yasuyuki Toda | 1   |
| 2   | 振動翼周りの流場シミュレーション<br>-その2: Pitching振動する翼-  | 堀 勉   | 13  |
| 3   | BHP最小化を目的とした船尾船型最適化手法 (第1報)<br>-最適化手法の検討-   | 岡 本 直 也<br>鈴 木 和 夫<br>日 野 孝 則<br>増 田 聖 始  | 19  |
| 4   | ポッド推進器装備船の操縦性指数について   | 佐久間 俊<br>成 瀬 俊 宏  | 27  |
| 5   | 航路保持システムのための保針制御に基づく解析的方法による設計  | 羽 根 冬 希   | 33  |
| 6   | 肥型船の波浪中抵抗増加に及ぼす波高影響   | 安 川 宏 紀<br>松 本 晃 範<br>池 添 修 自   | 45  |
| 7   | AISデータの主成分分析による海上交通流の特徴抽出と<br>それに基づく遭遇確率評価シミュレーション  | 河 川 園 子<br>伊 藤 恭 博<br>福 藤 博 子<br>戸 淳 司  | 55  |
| 8   | 小型高速旅客船の不規則向波中上下加速度に関する研究   | 片 山 徹<br>天 野 遼 介  | 65  |
| 9   | 波漂流力の新しい数値計算法に関する研究<br>-ゼロ次要素法(コンスタントパネル法)をベースにした計算法の提案-  | 李 橋<br>池 田 良 穂<br>二 瓶 泰 範   | 77  |
| 10  | 非定常横揺れ時の減衰力に関する研究<br>-ビルジキール成分の履歴影響-  | 梅 田 隼<br>片 山 徹  | 87  |
| 11  | 回流水槽における操縦流体力の計測精度について  | 橋 詰 泰 久<br>佐 野 川 宏 昭<br>安 川 宏 紀   | 95  |
| 12  | 傾斜円筒型振動水柱波力発電の一次変換特性の実験的検討  | 飯 野 光 政<br>宮 崎 武 晃<br>松 井 亨 介<br>下 里 耕 平<br>瀬 川 浩 司<br>飯 田 誠  | 105 |

JOURNAL  
OF  
THE JAPAN SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND OCEAN ENGINEERS

Vol.23

June 2016

CONTENTS

|   |     |
|---|-----|
| 1. RANS Simulation of KVLCC2 using Simple Body-Force Propeller Model With Rudder and Without Rudder,<br><i>Yan Naing Win, Ping-Chen Wu &amp; others</i> .....   | 1   |
| 2. Flow Simulation around an Oscillating Wing - 2 <sup>nd</sup> Report : Pitching Wing -,<br><i>T. HORI</i> .....   | 13  |
| 3. An Optimization Method of Stern Hull Form to Minimize Brake Horse Power,<br><i>N. Okamoto, K. Suzuki &amp; others</i> .....  | 19  |
| 4. On the Steering Quality Indices of Some Pod-Driven Ships,<br><i>S. Sakuma &amp; T. Naruse</i> .....  | 27  |
| 5. Design by Analytical Method Based on Course-Keeping Control for Track-Keeping System,<br><i>F. Hane</i> .....  | 33  |
| 6. Wave Height Effect on Added Resistance of Full Hull Ships in Waves,<br><i>H. Yasukawa, A. Matsumoto &amp; others</i> .....   | 45  |
| 7. Characterization of ship traffic flow by Principal Component Analysis of AIS data and its application to ship traffic<br>simulation for evaluation of encounter probability, <i>S. Kawashima, Y. Kawamura &amp; others</i> .....                             | 55  |
| 8. An Experimental Study on the Characteristics of Vertical Acceleration on Small High Speed Passenger<br>Craft in Irregular Head Waves, <i>T. Katayama &amp; R. Amano</i> .....  | 65  |
| 9. A Study on the Wave Drift Forces Calculation Based on BEM<br>- Attempt for Improvement of Constant Panel Method -, <i>Q. Li, Y. Ikeda &amp; others</i> .....   | 77  |
| 10. A Study on Flow-Memory Effects on Roll Damping for Non Periodic Motion, <i>J. Umeda &amp; T. Katayama</i> .....   | 87  |
| 11. Measurement accuracy of hydrodynamic forces on ship maneuvering in CWC, <i>Y. Hashizume, M. Sano &amp; others</i> .....   | 95  |
| 12. Experimental Analysis of Performance of Inclined Cylindrical Oscillating Water Column Wave Energy Converter,<br><i>M. Iino, T. Miyazaki &amp; others</i> .....  | 105 |
| 13. Underwater Pipe Rupture disk Tests Simulating Fractures in Offshore Pipelines and Development of<br>Numerical Model for Gas Decompression, <i>H. Nakai, K. Shibamura &amp; others</i> .....   | 115 |
| 14. A Study on Defect Identification of Ultrasonic Testing by Neural Network, <i>M. Maeda &amp; T. Yoshikawa</i> .....  | 129 |
| 15. Study on Underfilm Corrosion Simulation Method Based on Cellular Automaton<br>(1st Report: corrosion simulation of coated and scribed steel panels), <i>N. Osawa, Y. Kanou &amp; others</i> .....   | 139 |
| 16. Improvement of Prediction Accuracy of Hull Fatigue Life by a Fatigue Damage Sensor under a Storm Model Loading,<br><i>T. Kobayashi, Y. Takaoka &amp; others</i> .....   | 153 |
| 17. Improvement of Prediction Accuracy of Hull Fatigue Life by a Fatigue Damage Sensor under a Storm Model Loading<br>- Prediction method applying frequency distribution data related to ship sailing -,<br><i>T. Kobayashi, Y. Takaoka &amp; others</i> ..... | 169 |