

# 魚ロボットの多自由度運動解析に関する研究

青木, 将一 / AOKI, Shoichi

---

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2008 年度修士論文

魚ロボットの多自由度運動解析に関する研究

(指導教授) 御法川 学

大学院工学研究科

機械工学専攻修士課程

07R1101

アオキ ショウイチ

青木 将一

# 目次

記号の定義	4
第1章 諸言	9
第2章 部位の動きと組み合わせた運動	10
2.1 それぞれの部位の動き	10
2.1.1 胴部	10
2.1.2 胸びれ	10
2.1.3 尾柄	10
2.1.4 尾ひれ	10
2.1.5 まとめ	10
2.2 組み合わせた運動	10
2.2.1 上下旋回	11
2.2.2 左右旋回	11
2.2.3 螺旋運動	11
第3章 解析方法	16
3.1 揚力及び抗力の計算方法	16
3.1.1 従来 of 計算方法と問題点	16
3.1.2 作用・反作用を用いた揚力及び抗力の計算	16
(a) 考え方	16
(b) 翼の下面	16
(c) 翼の上面	17
(d) 翼の前面	17
(e) まとめ	17
3.2 運動方程式	17
3.2.1 並進運動の運動方程式	17
3.2.2 回転運動の運動方程式	17
3.3 それぞれの成分の求め方	18
3.3.1 推進速度	18
3.3.2 Z 軸方向の並進速度	18
3.3.3 Y 軸方向の並進速度	19
3.3.4 Z 軸周りの回転速度	20

3.3.5 Y 軸周りの回転速度	21
3.3.6 X 軸周りの回転速度	22
3.4 パラメータ	23
3.4.1 Z 軸周りの旋回運動の場合	23
3.4.2 Y 軸周りの旋回運動の場合	23
3.4.3 X 軸周りの旋回運動の場合	24
3.4.4 まとめ	24
3.5 周期と旋回半径	24
3.5.1 周期	25
3.5.2 旋回半径	25
第4章 解析結果	28
4.1 モデル	28
4.1.1 翼	28
4.1.2 楕円部	28
4.1.3 胴部	28
4.1.4 尾柄	28
4.1.5 尾ひれ	28
4.1.6 間隔	28
4.1.7 その他	29
4.2 解析結果	29
4.2.1 迎角を変化させた場合	29
(a)尾柄及び尾ひれの上下の迎角を変化させた場合	29
(b)尾柄及び尾ひれの左右の迎角を変化させた場合	29
(c)右翼の迎角を変化させた場合	30
(d)尾ひれの角度のみ変化させた場合	30
4.2.2 長さを変化させた場合	30
(a)尾柄の全長を変化させた場合	30
(b)胴幅を変化させた場合	30
(c)尾ひれの全長を変化させた場合	31
(d)尾ひれの幅を変化させた場合	31
(e)翼長を変化させた場合	31
(f)翼幅を変化させた場合	31
4.2.3 重心の位置を変化させた場合	32
(a1)重心の位置を前後に変化させた場合(左右旋回)	32
(a2)重心の位置を前後に変化させた場合(上下旋回)	32
(b1)重心の位置を上下に変化させた場合(上下旋回)	32

(b2)重心の位置を上下に変化させた場合(螺旋運動)	32
4.2.4 推進力を変化させた場合	32
(a)左右旋回	33
(b)上下旋回	33
第 5 章 結言	81
謝辞	82
参考文献	83

# 記号の定義

$L$  : 揚力

$D$  : 抗力

$\rho$  : 密度

$V$  : 速度

$S$  : 翼面積

$C_L$  : 揚力定数

$C_D$  : 抗力定数

$\beta$  : 揚力 0 の迎角を基準としたときの迎角

$F_W$  : 翼が流体に与える力

$L_B$  : 翼の下面での揚力

$D_B$  : 翼の下面での抗力

$L_T$  : 翼の上面での揚力

$D_T$  : 翼の上面での抗力

$D_F$  : 翼の前面での抗力

$d_0$  : 揚力が 0 の時の抗力定数

$a_i$  : 加速度

$L_i$  : 任意の方向における揚力

$R_i$  : 任意の方向の並進における抗力

$M$  : 質量

$L_{WR}$  : 右翼の揚力

$L_{WL}$  : 左翼の揚力

$L_P$  : 尾柄の揚力

$L_T$  : 尾ひれの揚力

$R_{WR}$  : 任意の方向における右翼の抗力

$R_{WL}$  : 任意の方向における左翼の抗力

$R_P$  : 任意の方向における尾柄の抗力

$R_T$  : 任意の方向における尾ひれの抗力

$R_B$  : 任意の方向における胴部の抗力

$\alpha$  : 角加速度

$Lr$  : 回転モーメント

$Rr$  : 回転運動における抗力

$I$  : 慣性モーメント

$r_{WR}$  : 全体の重心 ~ 右翼の重心の距離

$r_{WL}$  : 全体の重心 ~ 左翼の重心の距離  
 $r_P$  : 全体の重心 ~ 尾柄の重心の距離  
 $r_T$  : 全体の重心 ~ 尾ひれの重心の距離  
 $r_B$  ; 全体の重心 ~ 胴部の重心の距離  
 $D_{WR}$  : 右翼の抗力  
 $D_{WL}$  : 左翼の抗力  
 $D_P$  : 尾柄の抗力  
 $D_T$  : 尾ひれの抗力  
 $V_X$  : 推進速度  
 $F$  : 推進力  
 $RX$  : 推進方向に対する抗力  
 $RX_{WL}$  : 推進方向に対する左翼の抗力  
 $RX_{WR}$  ; 推進方向に対する右翼の抗力  
 $RX_P$  : 推進方向に対する尾柄の抗力  
 $RX_T$  : 推進方向に対する尾ひれの抗力  
 $RX_B$  : 推進方向に対する胴部の抗力  
 $\beta_{WL}$  : 左翼の迎角  
 $\beta_{WR}$  : 右翼の迎角  
 $\beta_P$  : 尾柄の迎角  
 $\beta_T$  : 尾ひれの迎角  
  
 $d_{0_{WL}}$  : 揚力 0 の時の左翼の抗力定数  
  
 $d_{0_{WR}}$  : 揚力 0 の時の右翼の抗力定数  
  
 $d_{0_P}$  : 揚力 0 の時の尾柄の抗力定数  
  
 $d_{0_T}$  : 揚力 0 の時の尾ひれの抗力定数  
  
 $C_{D_x}$  : 推進方向の胴部の抗力定数  
  
 $S_{WL}$  : 左翼の翼面積  
 $S_{WR}$  : 右翼の翼面積  
 $S_P$  : 尾柄の翼面積  
 $S_T$  : 尾ひれの翼面積  
 $S_B$  : 胴部の翼面積  
 $V_Z$  : Z 軸方向の並進速度

$L_Z$  : Z 軸方向の揚力

$RZ$  : Z 軸方向の並進運動に対する抗力

$RZ_{WL}$  : Z 軸方向の並進運動に対する左翼の抗力

$RZ_{WR}$  : Z 軸方向の並進運動に対する右翼の抗力

$RZ_P$  : Z 軸方向の並進運動に対する尾柄の抗力

$RZ_T$  : Z 軸方向の並進運動に対する尾ひれの抗力

$RZ_B$  : Z 軸方向の並進運動に対する胴部の抗力

$C_{Dz}$  : Z 軸方向の胴部の抗力定数

$V_Y$  : Y 軸方向の並進速度

$R_Y$  : Y 軸方向の並進運動に対する抗力

$R_{Y_{WL}}$  : Y 軸方向の並進運動に対する左翼の抗力

$R_{Y_{WR}}$  : Y 軸方向の並進運動に対する右翼の抗力

$R_{Y_P}$  : Y 軸方向の並進運動に対する尾柄の抗力

$R_{Y_T}$  : Y 軸方向の並進運動に対する尾ひれの抗力

$R_{Y_B}$  : Y 軸方向の並進運動に対する胴部の抗力

$C_{Dy}$  : Y 軸方向の胴部の抗力定数

$\omega_Z$  : Z 軸周りの回転運動における角速度

$Lr_{\omega Z}$  : Z 軸周りの回転モーメント

$Rr_{\omega Z}$  : Z 軸周りの回転運動における抗力のモーメント

$l_{GP}$  : 全体の重心 ~ 胴端の距離

$I_{BP}$  : 胴部 ~ 尾柄の間隔

$l_{PG}$  : 尾柄の先端 ~ 尾柄の重心の距離

$\beta_{PB}$  : 尾柄の左右方向の迎角

$l_P$  : 尾柄の全長

$I_{PT}$  : 尾柄 ~ 尾ひれの間隔

$l_{TG}$  : 尾ひれの先端 ~ 尾ひれの重心の距離

$\beta_{TB}$  : 尾ひれの左右方向の迎角

$l_G$  : 魚口ポットの先端から魚口ポット重心の距離

$l_B$  : 胴部の全長

$l_{GPG}$  : 魚口ポットの重心 ~ 尾柄の重心の距離

$\beta_{GPG}$  : 推進方向と魚口ポットの重心 ~ 尾柄の重心の直線の交差角度

$l_{GTG}$  : 魚口ポットの重心 ~ 尾ひれの重心の距離

$\beta_{GTG}$  : 推進方向と魚口ポットの重心 ~ 尾ひれの重心の直線の交差角度

$\omega_Y$  : Y 軸周りの回転速度

$Lr_{\omega Y}$  : Y 軸周りの回転モーメント  
 $Rr_{\omega Y}$  : Y 軸周りの回転運動に対する抗力  
 $\beta_{PL}$  : 尾柄の上下方向の迎角  
 $\beta_{TL}$  : 尾ひれの上下方向の迎角  
 $lX_{GWRG}$  : X 軸上での魚ロボットの重心 ~ 右翼の重心の距離  
 $lZ_{GWRG}$  : Z 軸上での魚ロボットの重心 ~ 右翼の重心の距離  
 $lX_{GWL G}$  : X 軸上での魚ロボットの重心 ~ 左翼の重心の距離  
 $lZ_{GWL G}$  : Z 軸上での魚ロボットの重心 ~ 左翼の重心の距離  
 $l_{WR}$  : 右翼の全長  
 $l_{WL}$  : 左翼の全長  
 $\omega_X$  : X 軸周りの回転速度  
 $Lr_{\omega X}$  : X 軸周りの回転モーメント  
 $Rr_{\omega X}$  : X 軸周りの回転運動に対する抗力のモーメント  
 $lY_{GWRG}$  : Y 軸上での魚ロボットの重心 ~ 右翼の重心の距離  
 $lY_{GWL G}$  : Y 軸上での魚ロボットの重心 ~ 左翼の重心の距離  
 $\beta_P$  : 尾柄の迎角  
 $\beta_T$  : 尾ひれの迎角  
 $lZ_{GC}$  : Z 軸上での魚ロボットの重心 ~ 楕円部の中心  
 $A_T$  : 尾ひれの横幅  
 $H_T$  : 尾ひれの高さ  
 $S_{TA}$  : 尾ひれの横方向の翼面積  
 $S_{TH}$  : 尾ひれの縦方向の翼面積  
 $t$  : 時間  
 $\theta_Z$  : 魚ロボットの Z 軸周りの角度  
 $\dot{X}$  : 魚ロボットの X 方向の絶対速度  
 $\dot{Y}$  : 魚ロボットの Y 方向の絶対速度  
 $\theta_Y$  : 魚ロボットの Y 軸周りの角度  
 $\dot{Z}$  : 魚ロボットの Z 方向の絶対速度  
 $\theta_X$  : 魚ロボットの X 軸周りの角度  
 $T$  : 魚ロボットが一周旋回する周期  
 $\omega$  : ある軸周りの角速度  
 $V_i, V_j$  : 垂直方向の 2 成分の速度

$S$  : 旋回を 2 次元的に考えたときの一周の距離

$R$  : 旋回半径

$l$  : 楕円部の全長

$A_B$  : 胴幅

$l_T$  : 尾ひれの全長

$l_W$  : 翼長

$A_W$  : 翼幅

# 第1章 緒言

現在の海中・海底調査は調査船による航海を通じた調査・観測が主流となっており、ここで、調査を行っているのは有人または有策によるロボットである。しかし、これらによる調査は安全性や取り扱いの困難さにより制限が多く、より広く、深い海域を調査する上で大きな制約となっており、新しい探索ツールの開発が望まれる。

さて、水中には多種多様な水生生物が存在している。水生生物は、自らの遊泳方法を進化発達させ、それぞれの生活様式を確立している。その中で、最も繁栄を誇っている水生生物が「魚類」である。そのため、水中における魚類の推進は非常に高効率・高性能である。

新たな海中作業ロボットとして、魚の泳法を模擬した海中ロボット（魚ロボット）の研究が進められている。現在までに推進性能、旋回性能及び上下運動に関する研究は行われていたが、いずれも二次元的な運動であり、三次元的な運動については十分な知見は得られていない。また、魚ロボットの根本的な運動解析についての研究も十分とはいえないのが現状である。

本研究では、胸びれ、尾柄及び尾ひれを動かすことのできる、自由度の高い魚ロボットの開発を目指し、その運動解析を行った。

## 第 2 章 部位の動きと組み合わせた運動

本研究でモデルとする魚ロボットは胴部、右翼部及び左翼部からなる胸びれ、尾柄、及び尾ひれからなっている。この章ではそれぞれの部位の動き及び組み合わせたときの運動について述べていく。なお、Fig.2.1 に参考図を示す。

### 2.1 それぞれの部位の動き

#### 2.1.1 胴部

胴部は特に動かないものとする。なお、推進力は胴部の前方へかかっていることとする。

#### 2.1.2 胸びれ

胸びれは左右独立して、翼の中心を軸に回転して任意の迎角にすることができるものとする。そして、運動方向としては、左右の揚力を用い、合力による Z 軸方向の並進運動、尾柄及び尾ひれとの前後のモーメントによる Y 軸周りの回転運動、及び左右のモーメントによる X 軸周りの回転運動を行う。

#### 2.1.3 尾柄

尾柄はつけ根を支点として動かすことによって、上下方向、または左右方向に任意の迎角にすることができるものとする。そして、運動方向としては、上下方向に動かした時には胸びれと同じように Z 軸方向の並進運動及び Y 軸周りの回転運動を行う。また、左右方向に動かした時には Y 軸方向の並進運動及び Z 軸周りの回転運動を行う。

#### 2.1.4 尾ひれ

尾ひれも尾柄と同じようにつけ根を支点として動かすことによって、上下方向または左右方向に任意の迎角にできるものとする。また、運動方向も上下方向に動かした時には Z 軸方向の並進運動及び Y 軸周りの回転運動、また左右方向に動かした時には Y 軸方向の並進運動および Z 軸周りの回転運動を行う。

以上の事をまとめたものを Table.2.1 に示す。

### 2.2 組み合わせた運動

以上の部位ごとの運動を組み合わせることによって、複合的な動きを行うことができる。以下にそれを示す。

### 2.2.1 上下旋回

上下旋回は胸びれ、尾柄、及び尾ひれによる Z 軸方向の並進運動、Y 軸周りの回転運動、及び前方への推進を組み合わせることによって、行う運動である。魚ロボット自身が回転することによって、上下及び前方への運動の向きが変わり、上下方向での旋回を行う。

### 2.2.2 左右旋回

左右旋回は尾柄、及び尾ひれによる Y 軸方向の並進運動、Z 軸周りの回転運動、及び前方への推進を組み合わせることによって、行う運動である。魚ロボット自身が回転することによって、左右及び前方への運動の向きが変わり、左右方向での旋回を行う。

### 2.2.3 螺旋運動

螺旋運動は胸びれによる Z 軸方向の並進運動、X 軸周りの回転運動、及び前方への推進を組み合わせることによって、行う運動である。魚ロボット自身が回転することによって上下への運動の向きが変わり、魚ロボット自身も横回転をしながら横へ旋回を行い、なおかつ前方へ推進し続けるので、螺旋に動いていく。

以上のことをまとめたものを Table.2.2、Fig2.2(a) ~ (c)に示す。

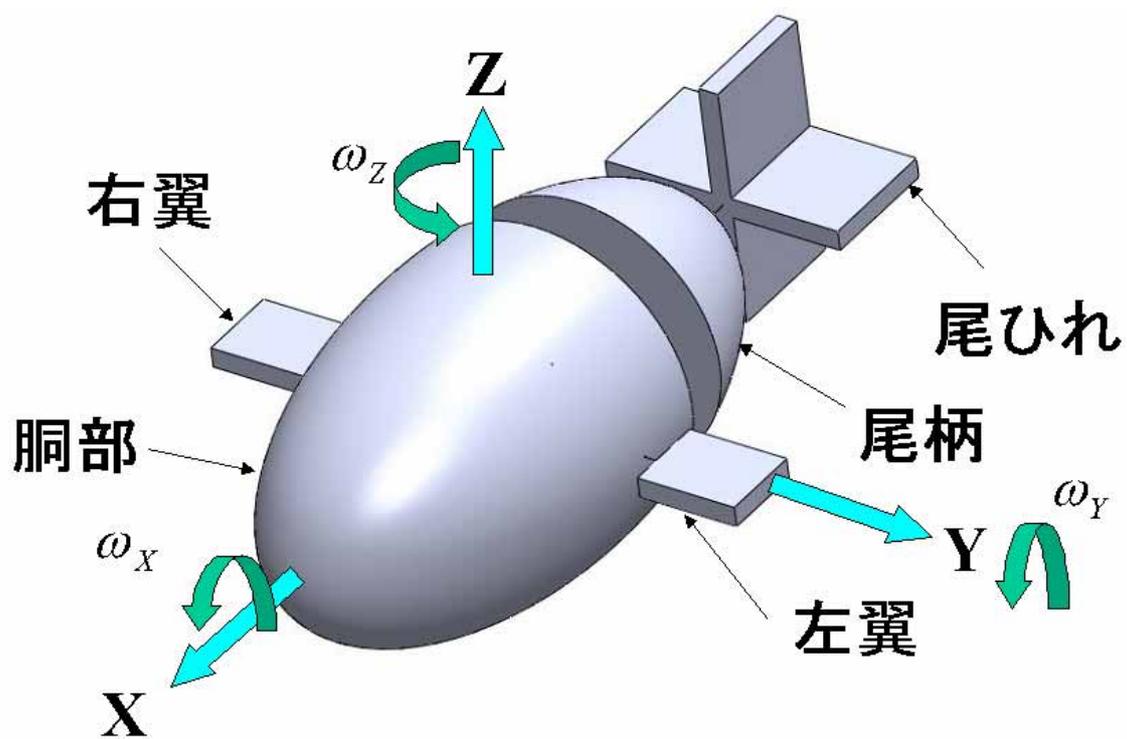


Fig.2 1 参考図

Table.2.1 それぞれの部位

部位	動き	並進	回転
胴部	動かない (推進力は前)	(推進)	
胸びれ	左右独立で任意の迎角	Z方向	Y軸 X軸
尾柄	上下方向に任意の迎角	Z方向	Y軸
	左右方向に任意の迎角	Y方向	Z軸
尾ひれ	上下方向に任意の迎角	Z方向	Y軸
	左右方向に任意の迎角	Y方向	Z軸

Table.2.2 複合的な動き

並進	回転	動き
Z方向 (推進)	Y軸	上下旋回
Y方向 (推進)	Z軸	左右旋回
Z方向	X軸	螺旋運動

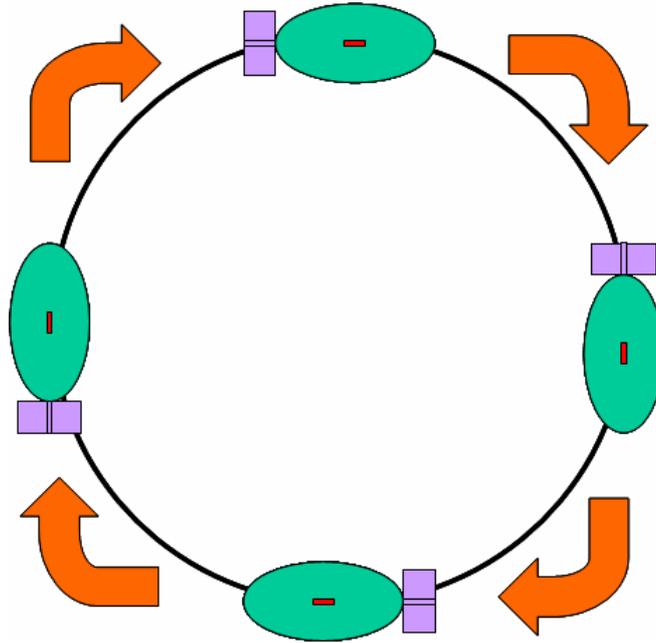


Fig.2 2(a) 上下旋回

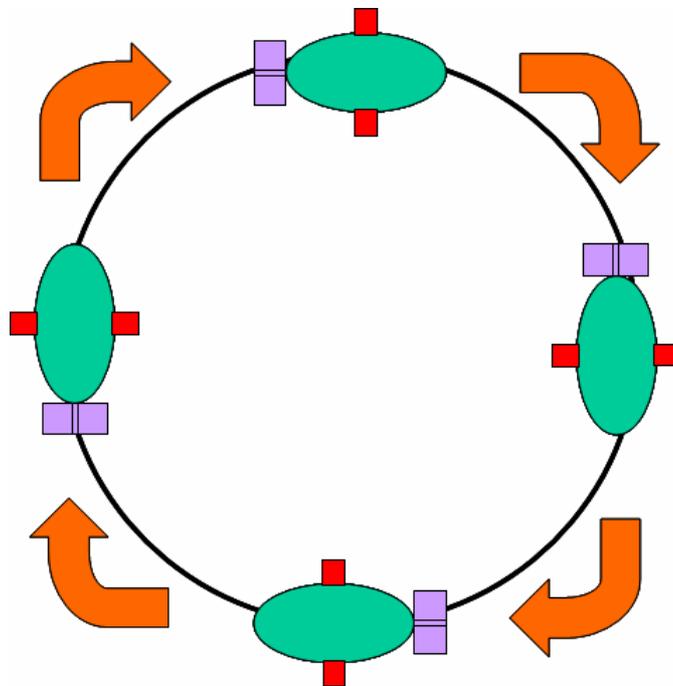


Fig.2 2(b) 左右旋回

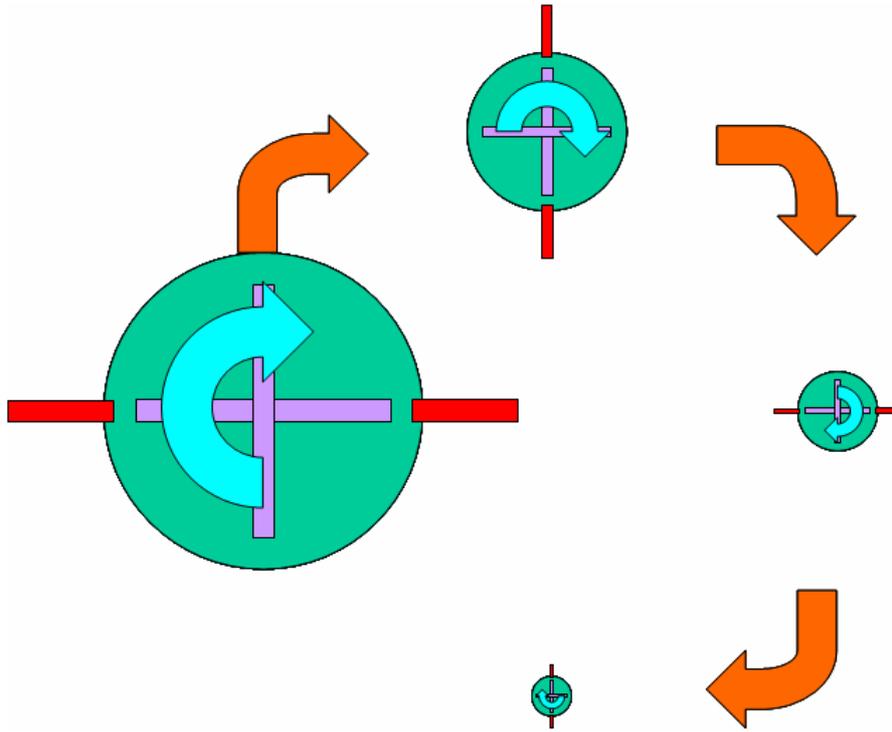


Fig.2 2(c) 螺旋運動

# 第3章 解析方法

## 3.1 揚力及び抗力の計算方法

### 3.1.1 従来の計算方法と問題点

従来の揚力及び抗力の計算方法を以下に示す。

$$L = \frac{\rho}{2} V^2 S C_L \quad (1)$$

$$D = \frac{\rho}{2} V^2 S C_D \quad (2)$$

しかし、この計算式の場合、揚力定数及び抗力定数が迎角によって、値が不規則に変化してしまうため、迎角の連続的な変化の解析には向いていないと思われる。そのため、本研究では揚力定数及び抗力定数を用いずに作用・反作用の考えを用いた新たな考えを用い、計算していくこととする。以下にて、その考え方を述べる。

### 3.1.2 作用・反作用を用いた揚力・抗力計算

ここでは揚力及び抗力の計算方法として、作用・反作用の考えを用いた計算方法を使用する事とする。以下にその考え方を述べる。

#### (a) 考え方

密度  $\rho$ 、速度  $V$  の流体中に翼面積  $S$  のある部位の翼 1 枚を迎角  $\beta$  で置かれた時に翼に発生する力を下面、上面、及び前面の 3 つに分けて考える。なお、便宜上揚力が上方向の時について考える。

#### (b) 翼の下面

翼の下面での考え方の概略図を Fig3.1 に示す。翼によって、流体の荷重  $\rho S V^2$  は翼の下面に沿うようにして、迎角方向に運動の向きを変えられる。このときに翼が流体に与えた力は

$$F_w = \frac{\rho S V^2 \times \sin \beta}{\sin\left(90 - \frac{\beta}{2}\right)} = \frac{\sin \beta}{\cos \frac{\beta}{2}} \rho S V^2 \quad (3)$$

となる。この時、作用・反作用の定理より翼が反力を受ける。この力を揚力と抗力に分解すると、

$$L_B = F_w \sin\left(90 - \frac{\beta}{2}\right) = F_w \cos \frac{\beta}{2} = \sin \beta \cdot \rho S V^2 \quad (4)$$

$$D_B = F_W \cos\left(90 - \frac{\beta}{2}\right) = F_W \sin \frac{\beta}{2} = \frac{\sin \beta}{\cos \frac{\beta}{2}} \sin \frac{\beta}{2} \cdot \rho S V^2 = \sin \beta \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot \rho S V^2 \quad (5)$$

となる。

#### (c) 翼の上面

翼の上面では計算上の虚空（局所的な負圧）ができ、上部の流体を引きおろすため、揚力としては

$$L_T = \sin \beta \cdot \rho S V^2 \quad (6)$$

の力がかかる。また、流体が後ろから入る余地は少ないので

$$D_T = 0 \quad (7)$$

と考えられる。

#### (d) 翼の前面

翼の前面には厚さがあるため

$$D_F = d_0 \rho S V^2 \quad (8)$$

となる。

#### (e) まとめ

以上の式をそれぞれ足し合わせると以下のような式となる。

$$L = L_B + L_T = 2 \sin \beta \cdot \rho S V^2$$

$$D = D_B + D_F = \left( \sin \beta \cdot \sin \frac{\beta}{2} + d_0 \right) \rho S V^2 \quad (9)$$

以上の式を用い、揚力計算及び抗力計算を行っていく。

### 3.2 運動方程式

#### 3.2.1 並進運動の運動方程式

並進運動の運動方程式は以下ようになる。

$$a_i = \frac{L_i - R_i}{M}$$

$$L_i = L_{WR} + L_{WL} + L_p + L_T \quad (10)$$

$$R_i = R_{WR} + R_{WL} + R_p + R_T + R_B$$

#### 3.2.2 回転運動の運動方程式

回転運動の運動方程式は以下ようになる。

$$\alpha = \frac{Lr - Rr}{I}$$

$$Lr = r_{WR}L_{WR} + r_{WR}D_{WR} + r_{WL}L_{WL} + r_{WL}D_{WL} + r_P L_P + r_P D_P + r_T L_T + r_T D_T \quad (11)$$

$$Rr = r_{WR}R_{WR} + r_{WL}R_{WL} + r_P R_P + r_T R_T + r_B R_B$$

### 3.3 それぞれの成分の求め方

それぞれの座標を Fig.3.2 に示す。

#### 3.3.1 推進速度

並進運動の運動方程式より速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{L - R}{M} \quad (12)$$

$$L = R$$

となる。推進において、 $L =$ 推進力  $F$  [N]であり、 $R \propto V_x^2$ のため、 $V_x$  は以下のように求めることができる。

$$F = V_x^2 \times \rho R X$$

$$V_x = \sqrt{\frac{F}{\rho R X}}$$

$$R X = R X_{WL} + R X_{WR} + R X_P + R X_T + R X_B$$

$$R X_{WL} = \left( \sin \beta_{WL} \times \sin \frac{\beta_{WL}}{2} + d_{0WL} \right) \times S_{WL}$$

$$R X_{WR} = \left( \sin \beta_{WR} \times \sin \frac{\beta_{WR}}{2} + d_{0WR} \right) \times S_{WR} \quad (13)$$

$$R X_P = \left( \sin \beta_P \times \sin \frac{\beta_P}{2} + d_{0P} \right) \times S_P$$

$$R X_T = \left( \sin \beta_T \times \sin \frac{\beta_T}{2} + d_{0T} \right) \times S_T$$

$$R X_B = \frac{1}{2} * C_{Dx} \times S_B$$

胴体は平行であるため従来の抗力計算を用いているが、今回提案している方法を用いてもほぼ同値になることは確認済みである。

#### 3.3.2 Z軸方向の並進速度

並進運動の運動方程式より速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{L-R}{M} \quad (12)$$

$$L = R$$

となる。Z軸方向の並進運動において、 $L$ は左翼、右翼、尾柄、及び尾ひれの揚力の合計であり、 $R$ は左翼、右翼、尾柄、尾ひれ、胴部のZ軸方向の並進運動に対する抗力の合計であり、 $R \propto V_Z^2$ のため、 $V_Z$ は以下のようにして求めることができる。

$$L_Z = V_Z^2 \times \rho RZ$$

$$V_Z = \sqrt{\frac{L_Z}{\rho RZ}}$$

$$L_Z = L_{WL} + L_{WR} + L_P + L_T$$

$$RZ = RZ_{WL} + RZ_{WR} + RZ_P + RZ_T + RZ_B$$

$$RZ_{WL} = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{WL}\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_{WL}}{2}\right) + d_{0WL} \right) \times S_{WL} = \left( \cos \beta_{WL} \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_{WL}}{2}\right) + d_{0WL} \right) \times S_{WL}$$

$$RZ_{WR} = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{WR}\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_{WR}}{2}\right) + d_{0WR} \right) \times S_{WR} = \left( \cos \beta_{WR} \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_{WR}}{2}\right) + d_{0WR} \right) \times S_{WR}$$

$$RZ_P = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_P\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_P}{2}\right) + d_{0P} \right) \times S_P = \left( \cos \beta_P \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_P}{2}\right) + d_{0P} \right) \times S_P$$

$$RZ_T = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_T\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_T}{2}\right) + d_{0T} \right) \times S_T = \left( \cos \beta_T \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_T}{2}\right) + d_{0T} \right) \times S_T$$

$$RZ_B = \frac{1}{2} \times C_{Dz} \times S_B$$

...(14)

Z軸方向でも同様に胴体は平行であるため従来の抗力計算を用いているが、作用・反作用の方法を用いてもほぼ同値になることは確認済みである。

### 3.3.3 Y軸方向の並進速度

並進運動の運動方程式より速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{L - R}{M} \quad (12)$$

$$L = R$$

となる。Y軸方向の並進運動において、 $L$ は尾柄、及び尾ひれの揚力の合計であり、 $R$ は尾柄、尾ひれ、胴部のY軸方向に対する抗力の合計であり、 $R \propto V_Y^2$ のため、 $V_Y$ は以下のようにして求めることができる。

$$L_Y = V_Y^2 \times \rho RY$$

$$V_Y = \sqrt{\frac{L_Y}{\rho RY}}$$

$$L_Y = L_P + L_T$$

$$RY = RY_P + RY_T + RY_B$$

$$RY_P = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_P\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_P}{2}\right) + d_{0P} \right) \times S_P = \left( \cos \beta_P \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_P}{2}\right) + d_{0P} \right) \times S_P$$

$$RY_T = \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_T\right) \times \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \beta_T}{2}\right) + d_{0T} \right) \times S_T = \left( \cos \beta_T \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_T}{2}\right) + d_{0T} \right) \times S_T \quad (15)$$

$$RY_B = \frac{1}{2} \times C_{Dy} \times S_B$$

Y軸方向でも同様に胴体は平行であるため従来の抗力計算を用いているが、作用・反作用の方法を用いてもほぼ同値になることは確認済みである。

### 3.3.4 Z軸周りの回転速度

回転運動の運動方程式より角速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{Lr - Rr}{I} \quad (16)$$

$$Lr = Rr$$

となる。Z軸周りの回転運動において、 $Lr$ は尾柄、及び尾ひれの抗力及び揚力のモーメントの合計であり、 $Rr$ は尾柄、尾ひれ、及び胴部のZ軸周りの回転運動に対する抗力のモーメントの合計であり、 $Rr \propto \omega_Z^2$ のため、 $\omega_Z$ は以下のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned}
Lr_{\omega Z} &= \omega_Z^2 \times \rho R r_{\omega Z} \\
\omega_Z &= \sqrt{\frac{Lr_{\omega Z}}{\rho R r_{\omega Z}}} \\
Lr_{\omega Z} &= L_P \times (l_{GP} + (I_{BP} + l_{PG}) \times \cos \beta_{PB}) + L_T \times (l_{GP} + (I_{BP} + l_P) \times \cos \beta_{PB} + (I_{PT} + l_{TG}) \times \cos \beta_{TB}) \\
&+ D_P \times (I_{BP} + l_{PG}) \times \sin \beta_{PB} + D_T \times ((I_{BP} + l_P) \times \sin \beta_{PB} + (I_{PT} + l_{TG}) \times \sin \beta_{TB}) \\
Rr_{\omega Z} &= \frac{1}{2} \times \left( \frac{(l_G)^2 + (l_B - l_G)^2}{2l_B} \right) \times S_B \times C_{Dy} + S_P \times l_{GPG}^2 \times \left( \sin \beta_{GPG} \times \sin \frac{\beta_{GPG}}{2} + d_{0P} \right) \\
&+ S_T \times l_{GTG}^2 \times \left( \sin \beta_{GTG} \times \sin \frac{\beta_{GTG}}{2} + d_{0T} \right)
\end{aligned}$$

...(17)

### 3.3.5 Y軸周りの回転速度

回転運動の運動方程式より角速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{Lr - Rr}{I} \quad (16)$$

$$Lr = Rr$$

となる。Y軸周りの回転運動において、 $L$ は右翼、左翼、尾柄、及び尾ひれの抗力及び揚力のモーメントの合計であり、 $Rr$ は右翼、左翼、尾柄、尾ひれ、及び胴部のY軸周りの回転運動に対する抗力のモーメントの合計であり、 $Rr \propto \omega_y^2$ のため、 $\omega_y$ は以下のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned}
Lr_{\omega Y} &= \omega_Y^2 \times \rho Rr_{\omega Y} \\
\omega_Y &= \sqrt{\frac{Lr_{\omega Y}}{\rho Rr_{\omega Y}}} \\
Lr_{\omega Y} &= L_P \times (l_{GP} + (I_{BP} + l_{PG}) \times \cos \beta_{PL}) + L_T \times (l_{GP} + (I_{BP} + l_P) \times \cos \beta_{PL} + (I_{PT} + l_{TG}) \times \cos \beta_{TL}) \\
&+ D_P \times (I_{BP} + l_{PG}) \times \sin \beta_{PL} + D_T \times ((I_{BP} + l_P) \times \sin \beta_{PL} + (I_{PT} + l_{TG}) \times \sin \beta_{TL}) \\
&- L_{WR} \times lX_{GWRG} - L_{WL} \times lX_{GWL G} + D_{WR} \times lZ_{GWRG} + D_{WL} \times lZ_{GWL G} \\
Rr_{\omega Y} &= \frac{1}{2} * \left( \frac{(l_G)^2 + (l_B - l_G)^2}{2 * l_B} \right) * S_B * C_{Dz} + S_P * l_{GPG}^2 * \left( \sin \beta_{GPG} * \sin \frac{\beta_{GPG}}{2} + d_{0P} \right) \\
&+ S_T * l_{GTG}^2 * \left( \sin \beta_{GTG} * \sin \frac{\beta_{GTG}}{2} + d_{0T} \right) \\
&+ \left( \cos \beta_{WR} * \left( \cos \frac{\beta_{WR}}{2} - \sin \frac{\beta_{WR}}{2} \right) + d_{0WR} \right) * S_{WR} * (lX_{GWRG}^2 + lZ_{GWRG}^2) \\
&+ \left( \cos \beta_{WL} * \left( \cos \frac{\beta_{WL}}{2} - \sin \frac{\beta_{WL}}{2} \right) + d_{0WL} \right) * S_{WL} * (lX_{GWL G}^2 + lZ_{GWL G}^2)
\end{aligned}$$

...(18)

ただし、 $lX_{GWRG} = 0, lZ_{GWRG} = 0, lX_{GWL G} = 0, lZ_{GWL G} = 0$  のとき、翼の回転となるため、平板の場合、以下のようになる<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned}
&\left( \cos \beta_{WR} \times \left( \cos \frac{\beta_{WR}}{2} - \sin \frac{\beta_{WR}}{2} \right) + d_{0WR} \right) \times S_{WR} \times (lX_{GWRG}^2 + lZ_{GWRG}^2) = 1.65 \times S_{WR} \times \left( \frac{l_{WR}}{4} \right)^2 \times \frac{1}{2} \\
&\left( \cos \beta_{WL} \times \left( \cos \frac{\beta_{WL}}{2} - \sin \frac{\beta_{WL}}{2} \right) + d_{0WL} \right) \times S_{WL} \times (lX_{GWL G}^2 + lZ_{GWL G}^2) = 1.65 \times S_{WL} \times \left( \frac{l_{WL}}{4} \right)^2 \times \frac{1}{2}
\end{aligned}$$

...(19)

### 3.3.6 X軸周りの回転速度

回転運動の運動方程式より角速度が定常になっているときを考えると

$$0 = \frac{Lr - Rr}{I} \quad (16)$$

$$Lr = Rr$$

となる。X軸周りの回転運動において、 $Lr$  は右翼、及び左翼の抗力及び揚力のモーメントの合計であり、 $Rr$  は右翼、左翼、尾柄、尾ひれ、及び胴部のX軸周りの回転運動に対する抗力のモーメントの合計であり、 $Rr \propto \omega_x^2$  のため、 $\omega_x$  は以下のようにして求めることが出来る。

$$\begin{aligned}
Lr_{\omega X} &= \omega_X^2 \times \rho R r_{\omega X} \\
\omega_X &= \sqrt{\frac{Lr_{\omega X}}{\rho R r_{\omega X}}} \\
Lr_{\omega X} &= L_{WR} \times lY_{GWRG} - L_{WL} \times lY_{GWL G} \\
R_{\omega X} &= \frac{1}{2} \times d_{0p} \times \left( (I_{BP} + l_{PG}) \times \sin \beta_P \right)^2 \times S_P + \frac{1}{2} \times d_{0r} \times \left( (I_{BP} + l_P) \times \sin \beta_P + (I_{PT} + l_{TG}) \times \sin \beta_T \right)^2 \times S_T \\
&+ \left( \cos \beta_{WR} \times \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\beta_{WR}}{2} \right) + d_{0WR} \right) \times S_{WR} \times (lY_{GWRG}^2 + lZ_{GWRG}^2) \\
&+ \left( \cos \beta_{WL} \times \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\beta_{WL}}{2} \right) + d_{0WL} \right) \times S_{WL} \times (lY_{GWL G}^2 + lZ_{GWL G}^2) + S_B \times C_{Dy} \times lZ_{GC}^2 \\
&\dots(20)
\end{aligned}$$

なお、 $\beta_P = 0, \beta_T = 0$  で、尾ひれの形が平板を十字に組んだ形状の場合、次のようになる<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned}
d_{0r} \times \left( (I_{BP} + l_P) \times \sin \beta_P + (I_{PT} + l_{TG}) \times \sin \beta_T \right)^2 \times S_T &= 1.65 \times S_{TA} \times \left( \frac{A_T}{4} \right)^2 + 1.65 \times S_{TH} \times \left( \frac{H_T}{4} \right)^2 \\
&\dots(21)
\end{aligned}$$

### 3.4 パラメータ

以下の考え方でパラメータ計算を行っていく。

#### 3.4.1 Z 軸周りの旋回運動の場合

$t = 0$  のとき、 $\theta_Z = 0$  とすると  $t = t_1$  の時の速度は

$$\dot{X} = V_X \cos \omega_Z t_1 + V_Y \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega_Z t_1 \right) = V_X \cos \omega_Z t_1 - V_Y \sin \omega_Z t_1 \quad (22)$$

$$\dot{Y} = V_X \sin \omega_Z t_1 + V_Y \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega_Z t_1 \right) = V_X \sin \omega_Z t_1 + V_Y \cos \omega_Z t_1 \quad (23)$$

それぞれ積分を行い、

$$X = V_X \sin \omega_Z t_1 / \omega_Z + V_Y (\cos \omega_Z t_1 - 1) / \omega_Z \quad (24)$$

$$Y = V_X (1 - \cos \omega_Z t_1) / \omega_Z + V_Y \sin \omega_Z t_1 / \omega_Z \quad (25)$$

#### 3.4.2 Y 軸周りの旋回運動の場合

$t = 0$  のとき、 $\theta_Y = 0$  とすると  $t = t_1$  の時の速度は

$$\dot{X} = V_X \cos \omega_Y t_1 + V_Z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega_Y t_1 \right) = V_X \cos \omega_Y t_1 - V_Z \sin \omega_Y t_1 \quad (26)$$

$$\dot{Z} = V_X \sin \omega_Y t_1 + V_Z \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega_Y t_1 \right) = V_X \sin \omega_Y t_1 - V_Z \cos \omega_Y t_1 \quad (27)$$

それぞれ積分を行い、

$$X = V_X \sin \omega_Y t_1 / \omega_Y + V_Z (\cos \omega_Y t_1 - 1) / \omega_Y \quad (28)$$

$$Z = V_X (1 - \cos \omega_Y t_1) / \omega_Y + V_Z \sin \omega_Y t_1 / \omega_Y \quad (29)$$

### 3.4.3 X 軸周りの旋回運動の場合

$t = 0$  のとき、 $\theta_X = 0$  とすると  $t = t_1$  の時の速度は

$$\dot{Y} = V_Y \cos \omega_X t_1 + V_Z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega_X t_1 \right) = V_Y \cos \omega_X t_1 - V_Z \sin \omega_X t_1 \quad (30)$$

$$\dot{Z} = V_Y \sin \omega_X t_1 + V_Z \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega_X t_1 \right) = V_Y \sin \omega_X t_1 - V_Z \cos \omega_X t_1 \quad (31)$$

それぞれ積分を行い、

$$Y = V_Y \sin \omega_X t_1 / \omega_X + V_Z (\cos \omega_X t_1 - 1) / \omega_X \quad (32)$$

$$Z = V_Y (1 - \cos \omega_X t_1) / \omega_X + V_Z \sin \omega_X t_1 / \omega_X \quad (33)$$

### 3.4.4 まとめ

以上の式をまとめると以下ようになる。

$$X = (V_X \sin \omega_Y t_1 + V_Z (\cos \omega_Y t_1 - 1)) / \omega_Y + (V_X \sin \omega_Z t_1 + V_Y (\cos \omega_Z t_1 - 1)) / \omega_Z \quad (34)$$

$$Y = (V_X (1 - \cos \omega_Z t_1) + V_Y \sin \omega_Z t_1) / \omega_Z + (V_Y \sin \omega_X t_1 + V_Z (\cos \omega_X t_1 - 1)) / \omega_X \quad (35)$$

$$Z = (V_X (1 - \cos \omega_Y t_1) + V_Z \sin \omega_Y t_1) / \omega_Y + (V_Y (1 - \cos \omega_X t_1) + V_Z \sin \omega_X t_1) / \omega_X \quad (36)$$

ただし  $\omega_X = 0$  ならば、

$$V_Y \sin \omega_X t_1 / \omega_X + V_Z (\cos \omega_X t_1 - 1) / \omega_X = V_Y t_1 \quad (37)$$

$$V_Y (1 - \cos \omega_X t_1) / \omega_X + V_Z \sin \omega_X t_1 / \omega_X = V_Z t_1$$

$\omega_Y = 0$  ならば、

$$V_X \sin \omega_Y t_1 / \omega_Y + V_Z (\cos \omega_Y t_1 - 1) / \omega_Y = V_X t_1 \quad (38)$$

$$V_X (1 - \cos \omega_Y t_1) / \omega_Y + V_Z \sin \omega_Y t_1 / \omega_Y = V_Z t_1$$

$\omega_Z = 0$  ならば、

$$V_X \sin \omega_Z t_1 / \omega_Z + V_Y (\cos \omega_Z t_1 - 1) / \omega_Z = V_X t_1 \quad (39)$$

$$V_X (1 - \cos \omega_Z t_1) / \omega_Z + V_Y \sin \omega_Z t_1 / \omega_Z = V_Y t_1$$

となる。

### 3.5 周期と旋回半径

角速度  $\omega$  で回転している魚ロボットについて、考える。

### 3.5.1 周期

魚口ポットが一回転すると元の姿勢に戻ると考えられるため周期は以下のように表すことができる。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (40)$$

### 3.5.2 旋回半径

魚口ポットが回転しながら、互いに垂直方向の2成分 $V_i$ 及び $V_j$ で動いていると考えるとこの魚口ポットの旋回を2次元的に見たとき、周期 $T$ の間に動く距離 $S$ は

$$S = T\sqrt{V_i^2 + V_j^2} \quad (41)$$

となる。この魚口ポットが円運動を行っていると考えたときの旋回半径は以下のように表すことができる。

$$S = 2\pi R$$
$$R = \frac{S}{2\pi} = \frac{T\sqrt{V_i^2 + V_j^2}}{2\pi} = \frac{\sqrt{V_i^2 + V_j^2}}{\omega} \quad (42)$$

この式について、それぞれの場合で考えるとZ軸周りの旋回運動の場合は

$$(\omega, V_i, V_j) = (\omega_Z, V_X, V_Y) \quad (43)$$

Y軸周りの旋回運動の場合は

$$(\omega, V_i, V_j) = (\omega_Y, V_Z, V_X) \quad (44)$$

X軸周りの旋回運動の場合は

$$(\omega, V_i, V_j) = (\omega_X, V_Y, V_Z) \quad (45)$$

となる。ただし、X軸周りの旋回運動の場合、 $V_Y = 0$ であるため、旋回半径は以下のようなになる。

$$S = \frac{V_Z}{\omega_X}$$

以上の式を用いて解析をおこなっていく。

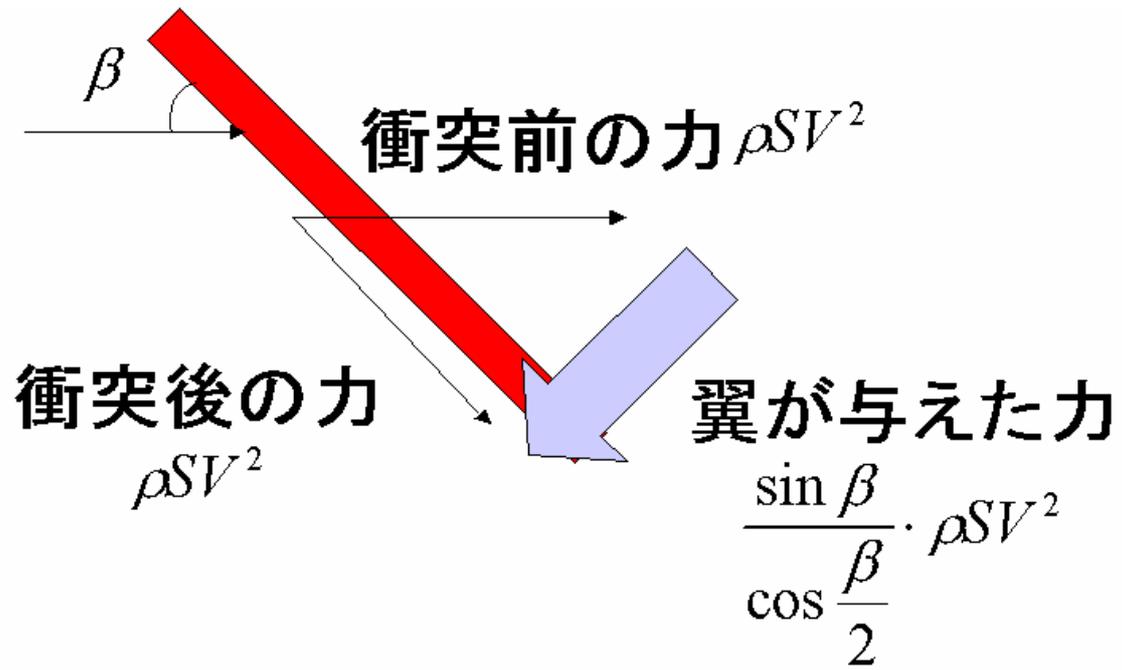


Fig.3.1 翼の下面

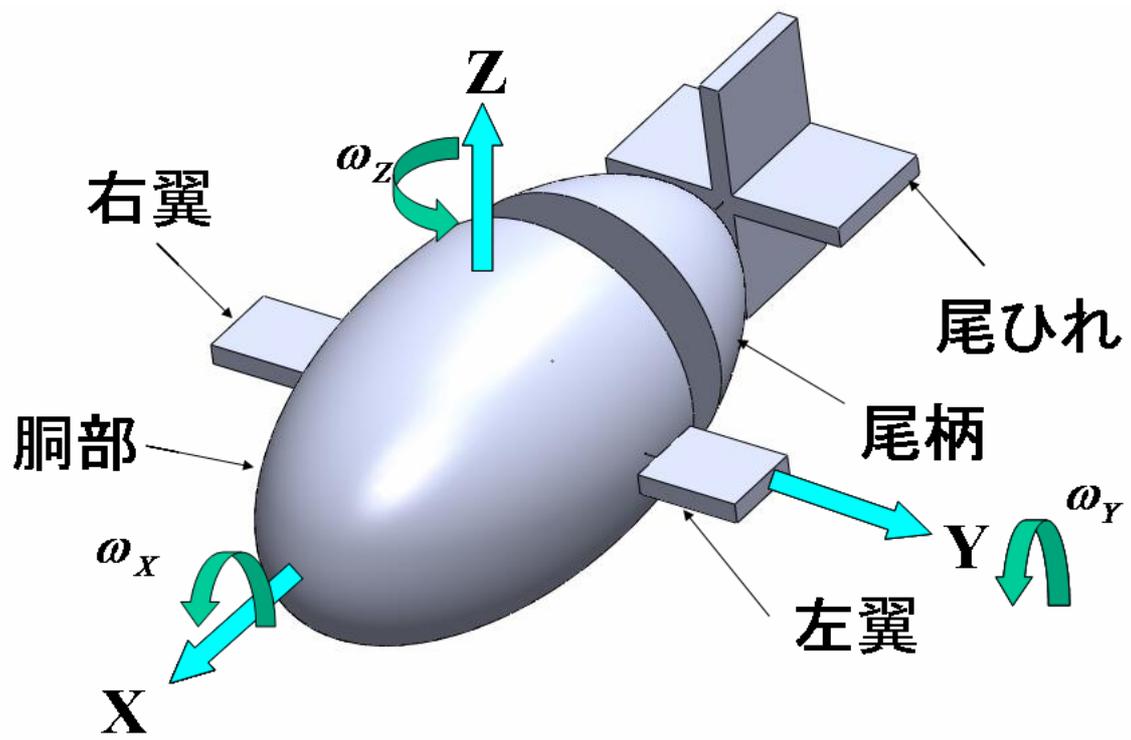


Fig.3.2 魚口ボットの座標

# 第4章 解析結果

## 4.1 モデル

Fig.4.1 にモデルの概略を載せる。次の項にてそれぞれの部位ごとの詳細を説明する。

### 4.1.1 翼

Fig.4.2 及び Table.4.1 にそれぞれ翼の形状及び寸法を示す。

右翼及び左翼の迎角をそれぞれ  $\beta_{WR}$  及び  $\beta_{WL}$  とし、 $d_{0WR} = d_{0WL} = 2.00$  とする。

なお、翼は楕円部の中心に配置する。

### 4.1.2 楕円部

Fig.4.3 及び Table.4.2 にそれぞれ楕円部の形状及び寸法を示す。

楕円部は胴部と尾柄からなり、共に寸法を変えても楕円体の形は変わらないものとする。

なお、全体の重心は楕円部の中心部にあるとする。

### 4.1.3 胴部

Fig.4.4 及び Table.4.3 にそれぞれ胴部の形状及び寸法を示す。

推進力は胴部の上下でスクリューを動かし、出すものとする。なお、抵抗係数  $CD_X$ 、 $CD_Y$ 、及び  $CD_Z$  はそれぞれ 0.02、1.01、1.01 とする<sup>3)</sup>。

### 4.1.4 尾柄

Fig.4.5 及び Table.4.4 にそれぞれ尾柄の形状及び寸法を示す。

上下方向及び左右方向の迎角をそれぞれ  $\beta_{PL}$  及び  $\beta_{PB}$  とする。なお、 $d_{0p}$  に関しては前方に入ってくる余地は少ないと考えられるため、0 とする。

### 4.1.5 尾ひれ

Fig.4.6 及び Table.4.5 にそれぞれ尾ひれの形状及び寸法を示す。

上下方向及び左右方向の迎角をそれぞれ  $\beta_{TL}$  及び  $\beta_{TB}$  とし、 $d_{0r} = 2.00$  とする。

### 4.1.6 間隔

Table.4.6 にそれぞれのパーツの間隔を示す。

#### 4.1.7 その他

その他としては、以下のような条件にする。

- 1.尾柄及び尾ひれは、それぞれ胴部及び尾柄の支点から曲がるものとする。
- 2.推進力は 6[N]とする。(直進時：約 0.47m/s)
- 3.翼、尾柄、及び尾ひれの重心はそれぞれの中央とする。
- 4.解析結果は速度が定常になった時点(加速度=0)からの解析とする。

以上のようなモデルで考えていく。

#### 4.2 解析結果

本研究では、以下のような場合について、解析を行っていく。

- 1.迎角を変化させた場合
- 2.長さを変化させた場合
- 3.重心位置を変化させた場合
- 4.推進力を変化させた場合

##### 4.2.1 迎角を変化させた場合

###### (a)尾柄及び尾ひれの上下の迎角を変化させた場合

Fig.4.7(a)~(e)に尾柄の上下の迎角及び尾ひれの上下の迎角を一定の迎角に保った場合の時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの迎角における旋回半径及び周期を示す。

この結果より、どの迎角にしても円運動を行うことがわかる。また、旋回半径及び周期に関しては、尾柄の迎角及び尾ひれの迎角が大きくなればなるほど、旋回半径も小さくなり、周期も短くなる。そのため、このモデルにおいては、尾柄及び尾ひれの迎角を大きくすれば旋回半径を小さく周期を短くすることができるといえる。ただし、今回用いた揚力抗力計算の翼の下面での考え方では翼の前方への流れを考えていなく、迎角が大きければ大きい程その影響は大きいと考えられるので迎角が大きくなるほど実際とは異なってくると考えられる。

###### (b)尾柄及び尾ひれの左右の迎角を変化させた場合

Fig.4.8(a)~(e)に尾柄の左右の迎角及び尾ひれの左右の迎角を一定の角度に保った場合の時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの迎角における旋回半径及び周期を示す。

この結果より、どの迎角にしても円運動を行うことがわかる。また、旋回半径及び周期に関しては、迎角が大きくなるほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、尾柄及び尾ひれの迎角を大きくすれば旋回半径を小さく周期を短くすることができるといえる。ただし、今回用いた揚力抗力計算の翼の下面での考え方では翼の前方への流れを考えていなく、迎角が大きければ大きい程その影響は大きい

と考えられるので迎角が大きくなるほど実際とは異なってくると考えられる。

#### (c)右翼の迎角を変化させた場合

Fig.4.9(a)~(e)に右翼の迎角を一定に保った場合の時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの迎角における旋回半径及び周期を示す。

この結果より、どの迎角にしても円運動を行いながら、前進をしているため、螺旋運動を行うことがわかる。また、旋回半径及び周期に関しては、迎角が大きくなるほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、右翼の迎角を大きくすれば旋回半径を小さく周期を短くすることができるといえる。ただし、今回用いた揚力抗力計算の翼の下面の考え方では翼の前方への流れを考えていなく、迎角が大きければ大きい程その影響は大きいと考えられるので迎角が大きくなるほど実際とは異なってくると考えられる。

#### (d)尾ひれの角度のみを変化させた場合

Fig.4.10(a)~(d)に尾柄の迎角を 10 度としたときの尾ひれの迎角のみを変化させた場合の時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの迎角における旋回半径及び周期を示す。

また、旋回半径及び周期に関しては、迎角が大きくなるほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、旋回半径を小さくしたい場合及び周期を短くしたい場合は迎角を大きくすればよいといえる。ただし、今回用いた揚力抗力計算の翼の下面の考え方では翼の前方への流れを考えていなく、迎角が大きければ大きい程その影響は大きいと考えられるので迎角が大きくなるほど実際とは異なってくると考えられる。

### 4.2.2 長さを変化させた場合

#### (a)尾柄の全長を変化させた場合

Fig.4.11(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの尾柄の全長を変化させた場合の魚口ポット自身の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋回半径及び周期を示す。なお、楕円部の全長は変えないので、尾柄が長くなるほど胴部の全長は短くなる。

この結果よりどの長さでも円運動を行うことがわかる。130mm~140mm の域をピークに旋回半径が大きくなり、周期も長くなる。そのため、このモデルにおいては 130mm~140mm の域より離れたほうが旋回半径を小さく、周期を短くできるといえる。

#### (b)胴幅を変化させた場合

Fig.4.12(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの胴幅を変化させた場合の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋

回半径及び周期を示す。なお、胴幅が変わると楕円部の幅が変わるため尾柄の幅も変わる。

この結果よりどの胴幅においても円運動を行うということが分かる。また、胴幅が小さくなるほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、胴幅を小さくすると旋回半径を小さく、及び周期を短くできるといえる。

#### (c)尾ひれの全長を変化させた場合

Fig.4.13(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角  $\beta_{TB}$  を 20 度としたときの尾ひれの全長を変化させた場合の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの長さにおいても円運動を行うということが分かる。旋回半径に関しては、全長が長くなるほど、旋回半径が小さくなっている。周期に関しては全長が 20mm の点をピークに周期が短くなっている。そのため、このモデルにおいては、全長を長くした場合は旋回半径を小さくでき、全長を 20mm にした場合は周期を短くできるといえる。

#### (d)尾ひれの幅を変化させた場合

Fig.4.14(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの尾ひれの幅を変化させた場合の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの幅においても円運動を行うということが分かる。旋回半径に関しては、幅が広くなるほど、旋回半径が小さくなっている。周期に関しては、30mm~40mm の域をピークに周期が短くなっている。そのため、このモデルにおいては、幅を広くした場合は旋回半径を小さくでき、30mm~40mm の域にした場合は周期を短くできるといえる。

#### (e)翼長を変化させた場合

Fig.4.15(a)~(e)に右翼の迎角を 10 度としたときの翼長を変化させた場合の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの翼長においても円運動を行うということが分かる。旋回半径に関しては、対して違いが見られなかった。周期に関しては翼長が短くなるほど、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、翼長を短くすれば周期を短くできるといえる。

#### (f)翼幅を変化させた場合

Fig.4.16(a)~(e)に右翼の迎角を 10 度としたときの翼幅を変化させた場合の角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの長さにおける旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの翼幅においても円運動を行うということが分かる。旋回半径に関しては、翼幅が長くなるほど、旋回半径が小さくなっている。周期に関しては、翼幅が短くなるほど周期が短くなっている。そのため、このモデルにおいては、翼幅を長くした場合は旋回

半径を小さくでき、翼幅を短くすれば周期を短くできるといえる。

#### 4.2.3 重心の位置を変化させた場合

##### (a1) 重心の位置を前後に変化させた場合（左右旋回の場合）

Fig.4.17(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの重心の位置を前後に変化させた場合の左右旋回における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの位置における旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの重心位置においても円運動を行うということが分かる。重心の位置が後にいくほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、重心を後にすれば、旋回半径を小さく、周期を短くできるといえる。

##### (a2) 重心の位置を前後に変化させた場合（上下旋回の場合）

Fig.4.18(a)~(e)に左翼の迎角及び右翼の迎角を共に 10 度、及び尾柄の上下の迎角及び尾ひれの上下の迎角をそれぞれ 10 度及び 20 度としたときの重心の位置を前後に変化させた場合の上下旋回における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの位置における旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの重心位置においても円運動を行うということが分かる。また、重心の位置が 160mm~180mm の域をピークに旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、重心の位置を 160mm~180mm の域にすれば、旋回半径を小さく周期を短くできるといえる。

##### (b1) 重心の位置を上下に変化させた場合（上下旋回）

Fig.4.19(a)~(e)に尾柄の上下の迎角を 10 度及び尾ひれの上下の迎角を 20 度としたときの重心の位置を上下に変化させた場合の上下旋回における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの位置における旋回半径及び周期を示す。

この結果より重心が楕円部中心より 70mm 上の点までは重心が上にあるほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなった。また、それより上の点ではあまり違いが見られなかった。そのため、このモデルにおいては、楕円部中心より 70mm 以上の点にすれば、旋回半径を小さく、周期を短くできるといえる。ただし、実際には安定・不安定があり、中心より上部においては安定性が低いため、重心が上部にあるほど実際の現象とは違ってくると考えられる。

##### (b2) 重心の位置を上下に変化させた場合（螺旋運動）

Fig.4.20(a)~(e)に右翼の迎角を 10 度としたときの重心の位置を上下に変化させた場合の螺旋運動における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの位置における旋回半径及び周期を示す。

この結果よりどの重心位置においても螺旋運動を行うということが分かる。また、旋回半径及び周期に関しては、重心の位置が中心に近づくほど、旋回半径が小さくなり、周期も短くなっている。そのため、このモデルにおいては、重心を中心に近づければ、旋回半径を小さくでき、周期を短くできるといえる。なお、重心の位置の上下による動きの違いは見られなかったが、実際には安定・不安定があり、中心より上部においては安定性が低いため中心より上部においては実際の現象とは違ってくると考えられる。

#### 4.2.4 推進力を変化させた場合

##### (a)左右旋回

Fig.4.21(a)~(e)に尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの推進力を変化させた場合の左右旋回における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの推進力における旋回半径及び周期を示す。

この結果より推進力が上がるほど、旋回半径が小さくなり、周期が短くなっている。そのため、このモデルにおいては、推進力を上げれば、旋回半径を小さくでき、周期を短くできるといえる。

##### (b)上下旋回

Fig.4.22(a)~(e)に左翼の迎角及び右翼の迎角を共に 10 度、並びに尾柄の迎角を 10 度及び尾ひれの迎角を 20 度としたときの推進力を変化させた場合の上下旋回における角速度と速度、時間ごとの動き、全体の軌跡、及びそれぞれの位置における旋回半径及び周期を示す。

この結果より、旋回半径に関しては推進力を変化させてもあまり変化はなかった。また、周期に関しては推進力を上げるほど、周期が短くなっている。そのため、このモデルにおいては、周期を短くしたい場合は推進力を上げればよい

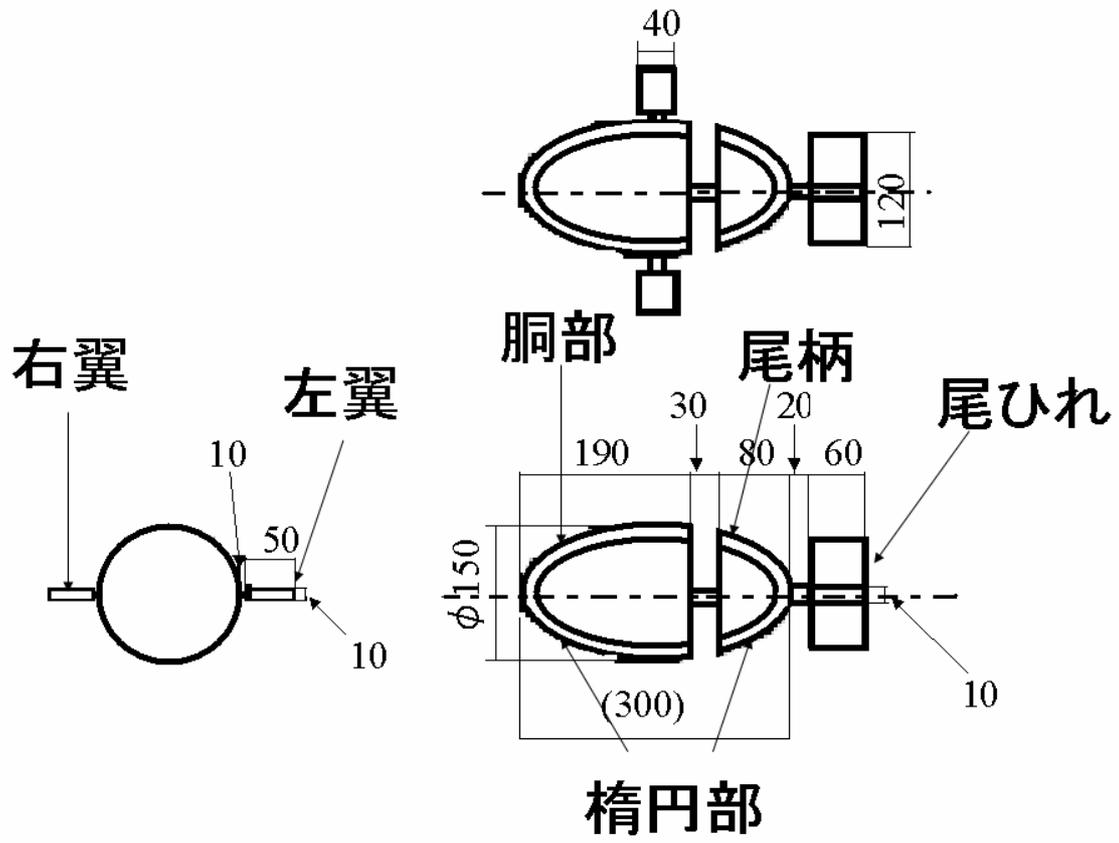


Fig.4. 1 概略図

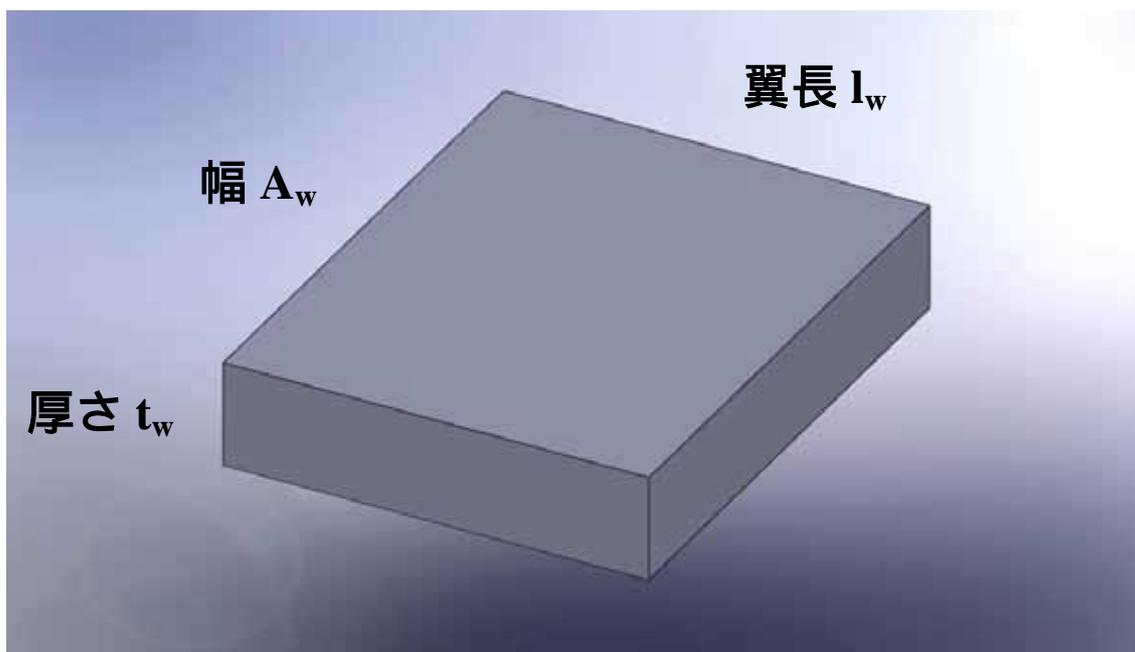
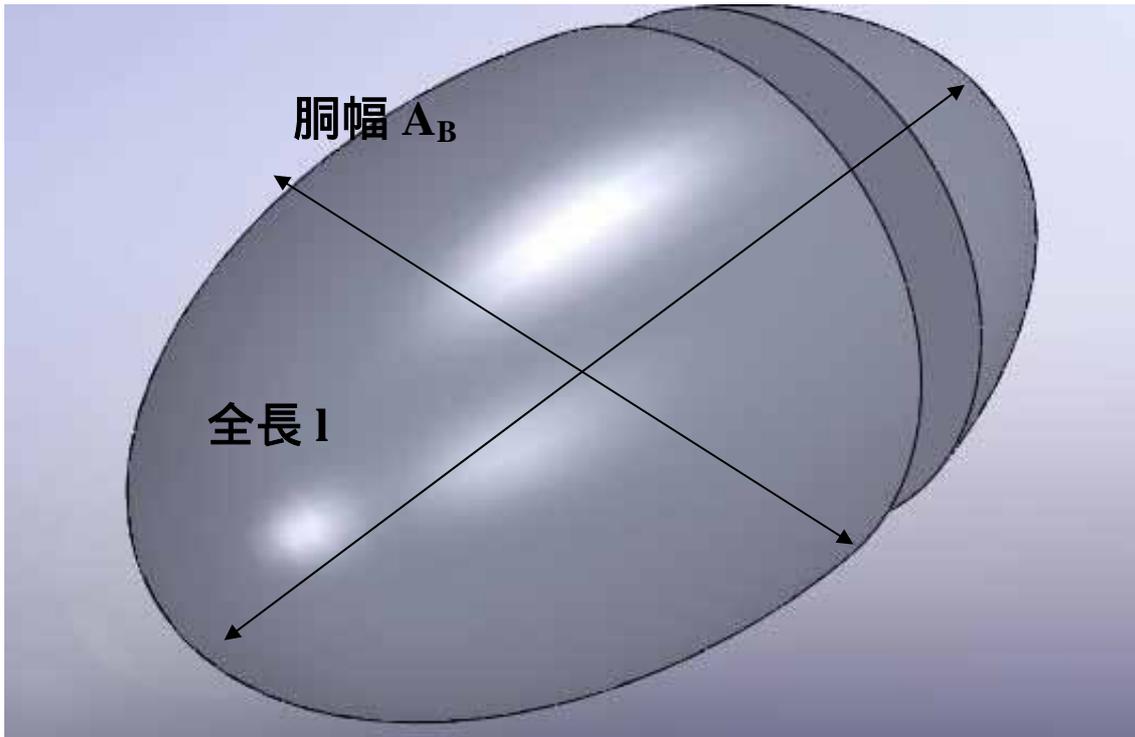


Fig.4.2 翼の形状

Table.4.1 翼の寸法

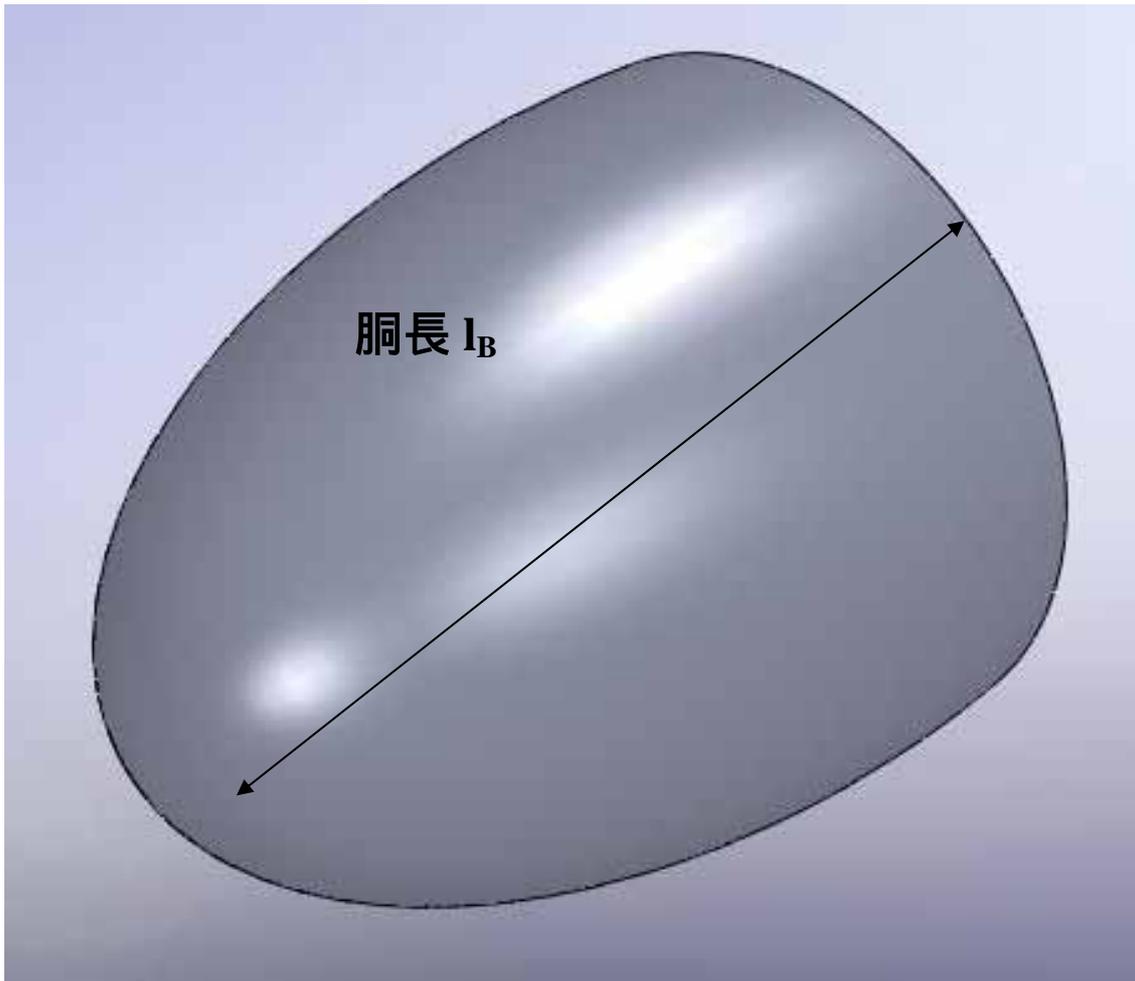
翼長 $l_w$	40mm
幅 $A_w$	50mm
厚さ $t_w$	10mm



**Fig.4.3 楕円部の形状**

**Table.4.2 楕円部の寸法**

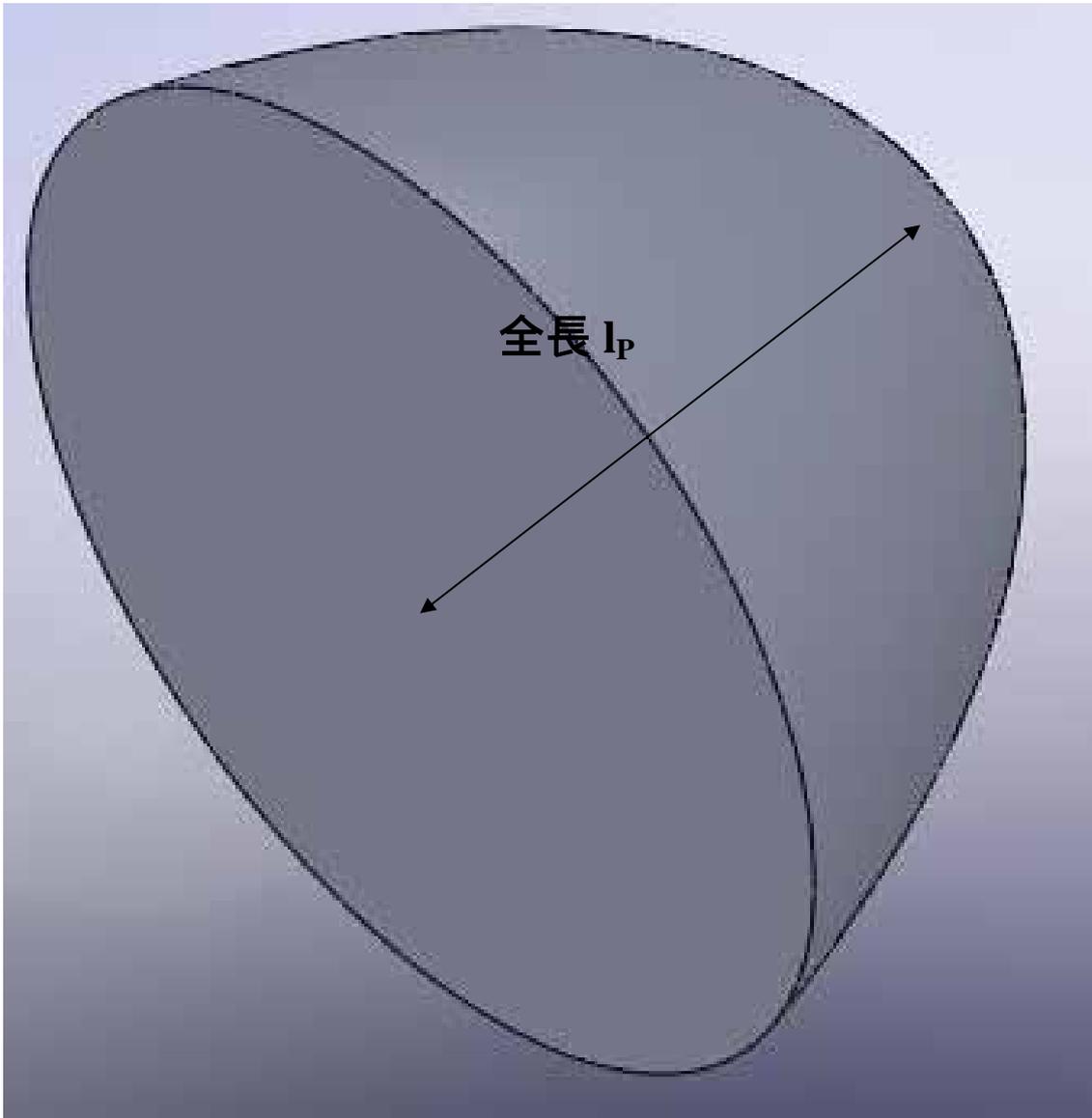
<b>胴幅 <math>A_B</math></b>	<b>150mm</b>
<b>全長 <math>l</math></b>	<b>300mm</b>



**Fig.4.4 胴部の形状**

**Table.4.3 胴部の寸法**

<b>胴長 <math>l_B</math></b>	<b>190mm</b>
----------------------------	--------------



**Fig.4.5 尾柄の形状**

**Table.4.4 尾柄の寸法**

<b>全長 <math>l_P</math></b>	<b>80mm</b>
----------------------------	-------------

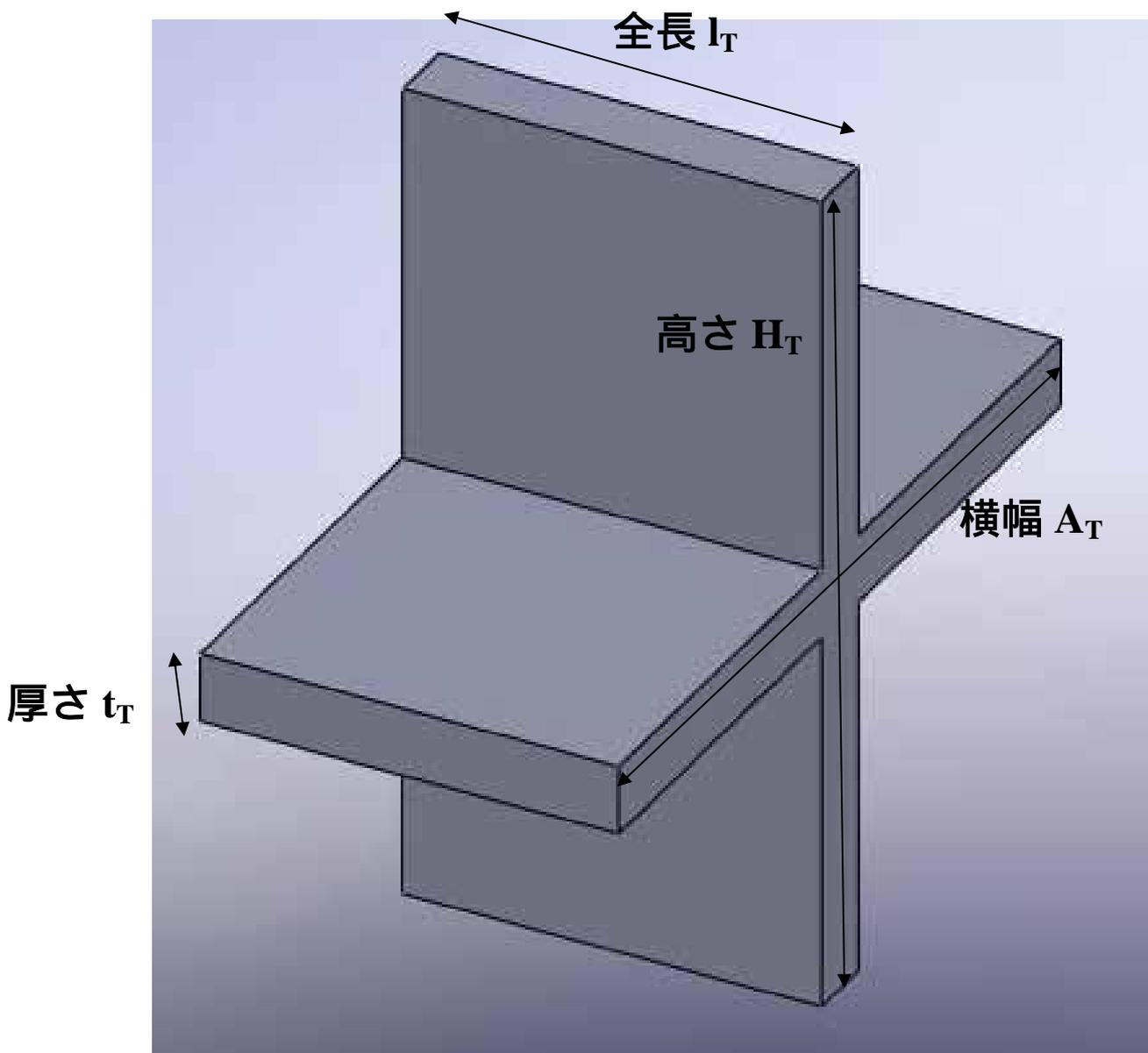


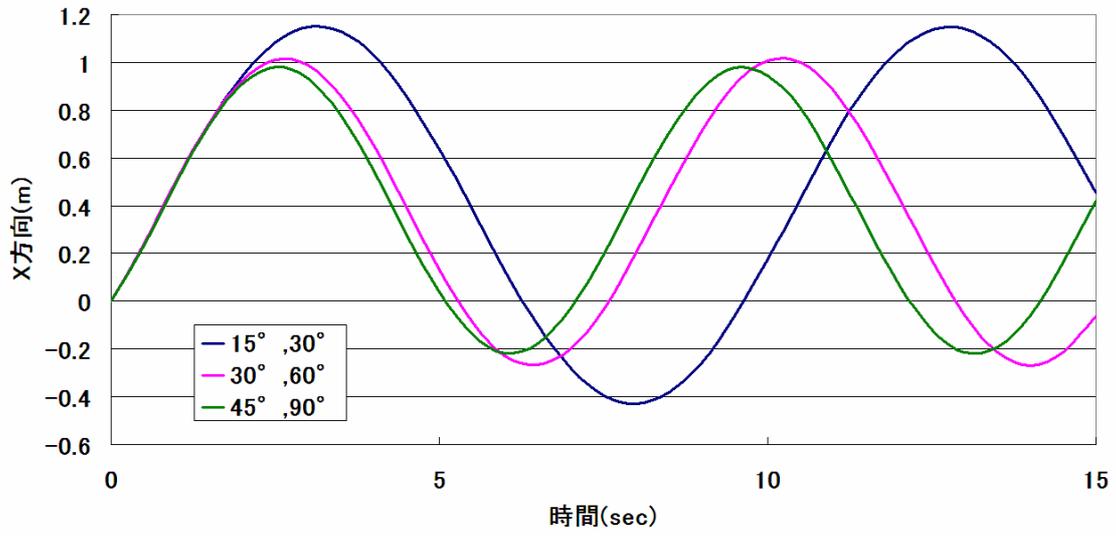
Fig.4.6 尾ひれの形状

**Table.4.5 尾ひれの寸法**

<b>全長 <math>l_T</math></b>	<b>60mm</b>
<b>高さ <math>H_T</math></b>	<b>120mm</b>
<b>横幅 <math>A_T</math></b>	<b>120mm</b>
<b>厚さ <math>t_T</math></b>	<b>10mm</b>

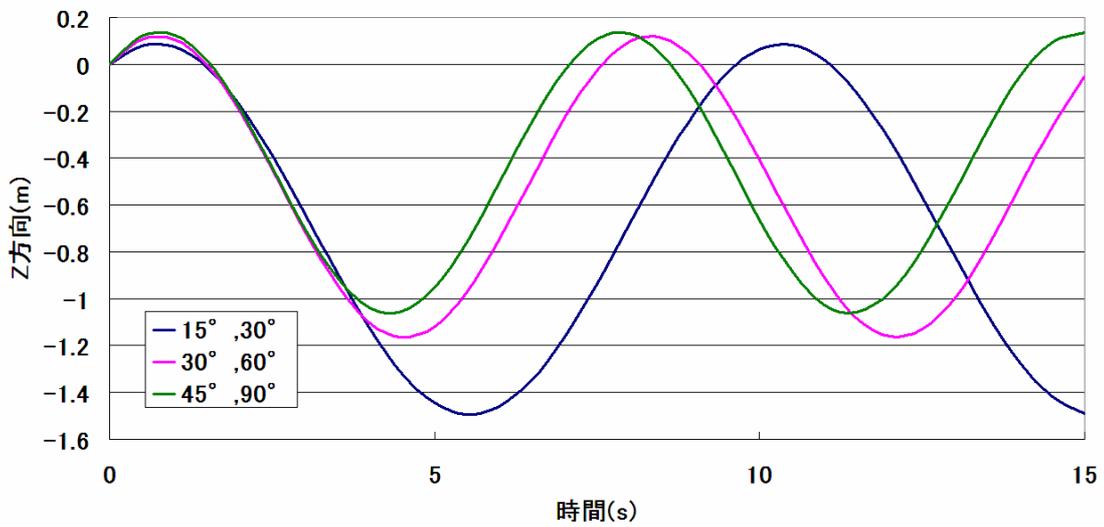
**Table.4.6 間隔**

<b>胴部 ~ 翼間</b>	<b>10mm</b>
<b>胴部 ~ 尾柄間</b>	<b>30mm</b>
<b>尾柄 ~ 尾ひれ間</b>	<b>20mm</b>



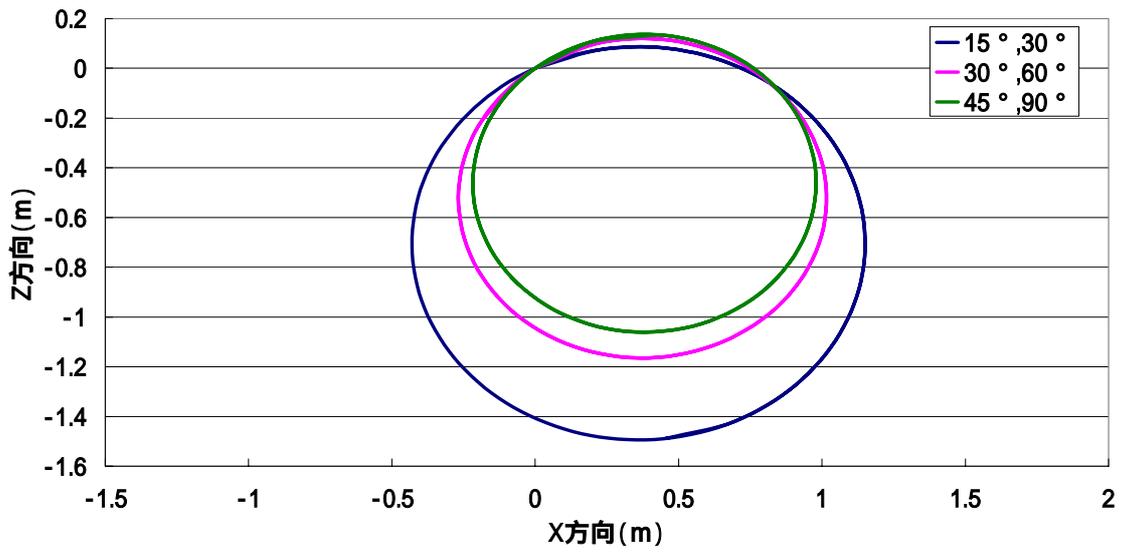
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.7(a)**  $\beta_{PL}, \beta_{TL}$  による X 方向の時間変化



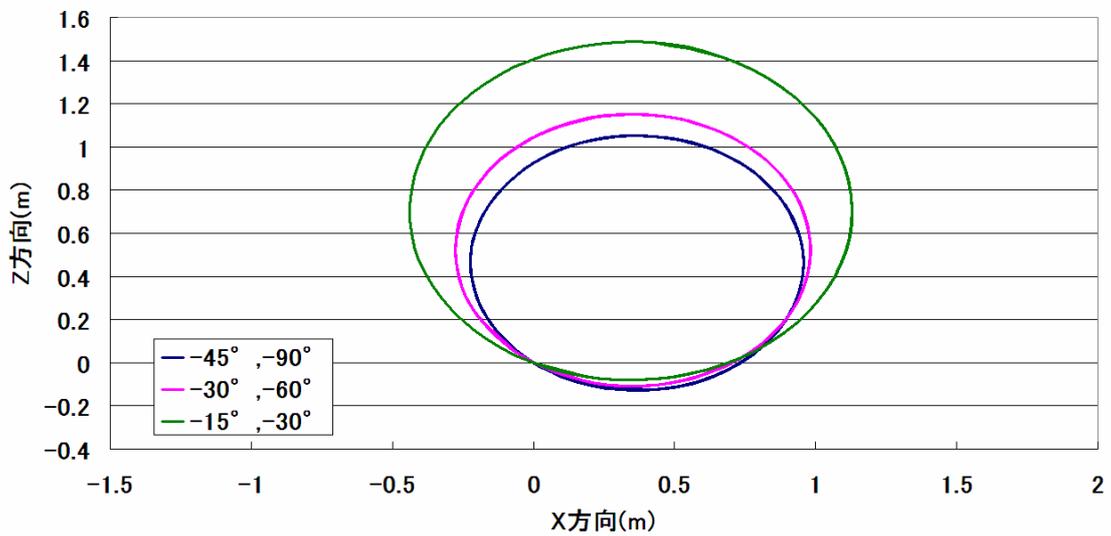
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.7(b)**  $\beta_{PL}, \beta_{TL}$  による Z 方向の時間変化



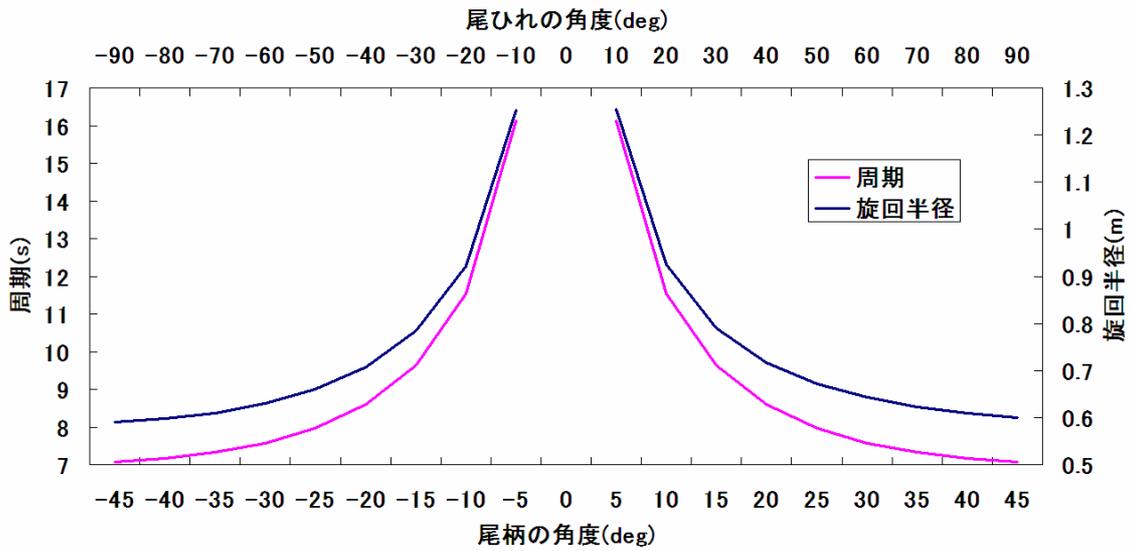
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.7(c)**  $\beta_{PL}, \beta_{TL}$  による軌跡の違い(1)



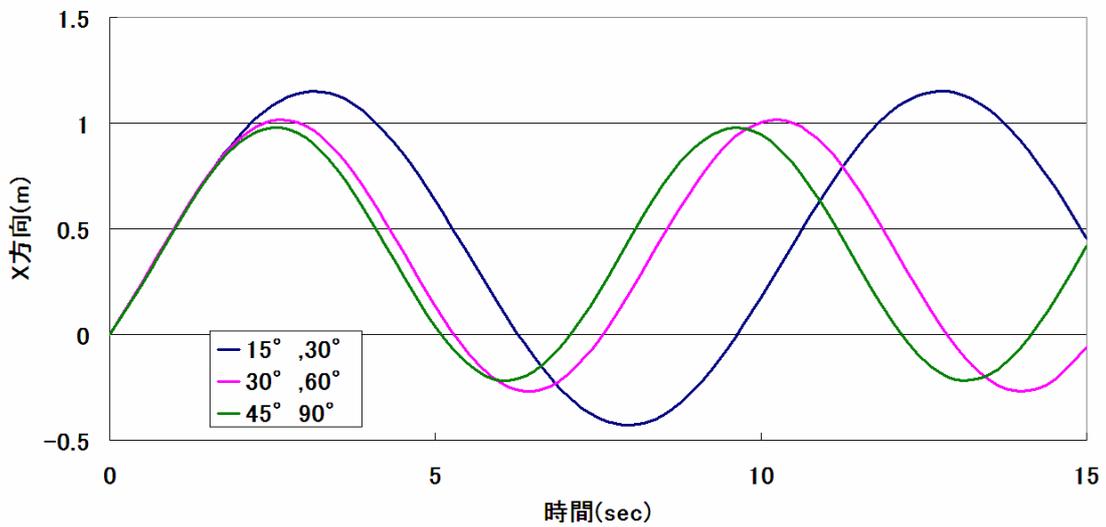
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.7(d)**  $\beta_{PL}, \beta_{TL}$  による軌跡の違い(2)



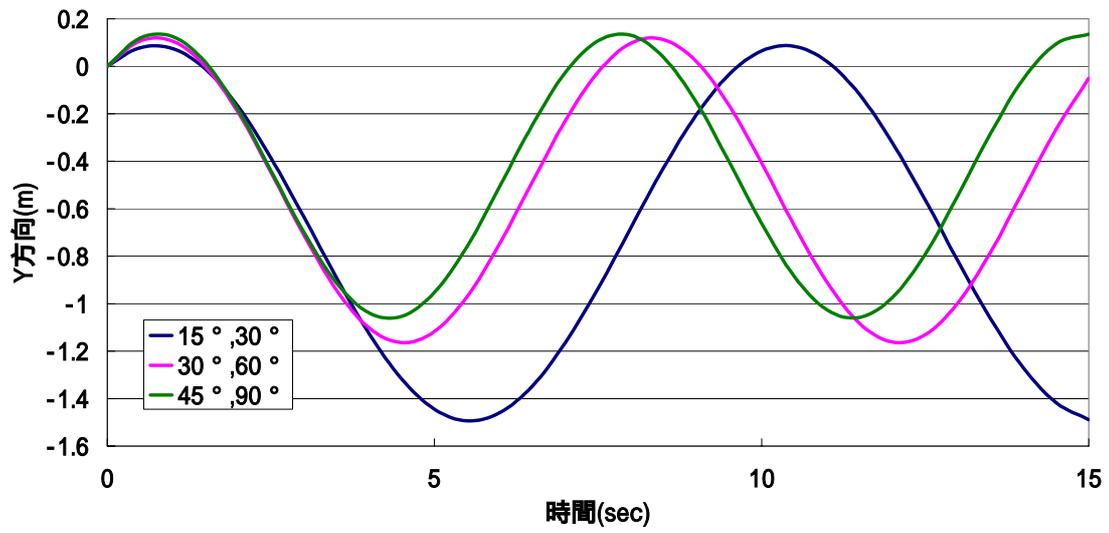
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.7(e)**  $\beta_{PL}, \beta_{TL}$  による周期及び旋回半径の違い



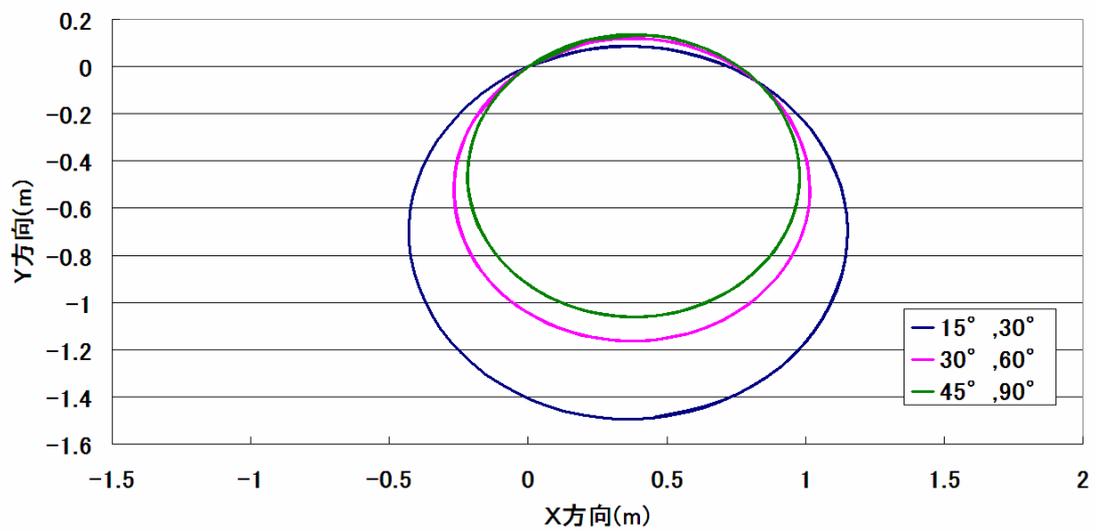
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.8(a)**  $\beta_{PB}, \beta_{TB}$  による X 方向の時間変化



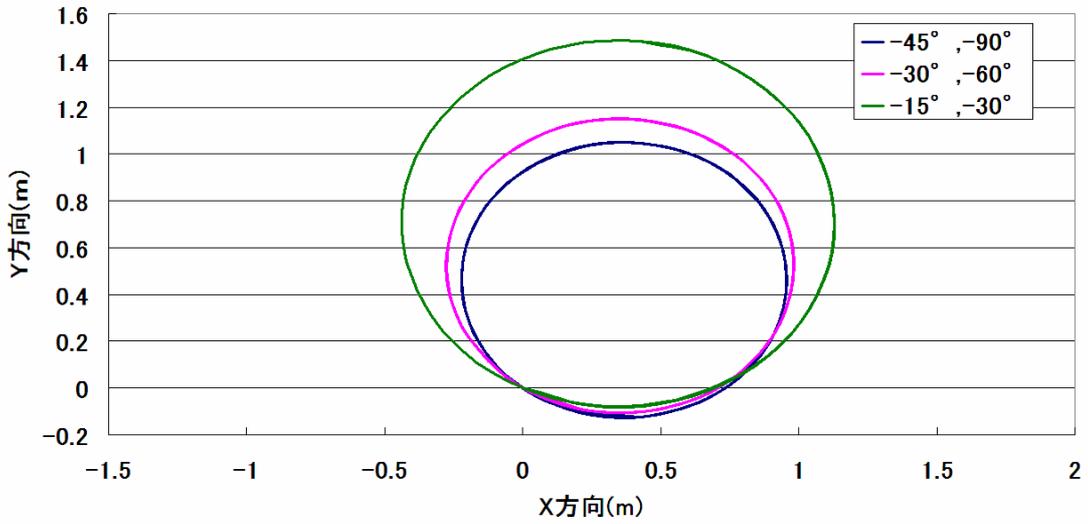
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.8(b)**  $\beta_{PB}, \beta_{TB}$  による Y 方向の時間変化



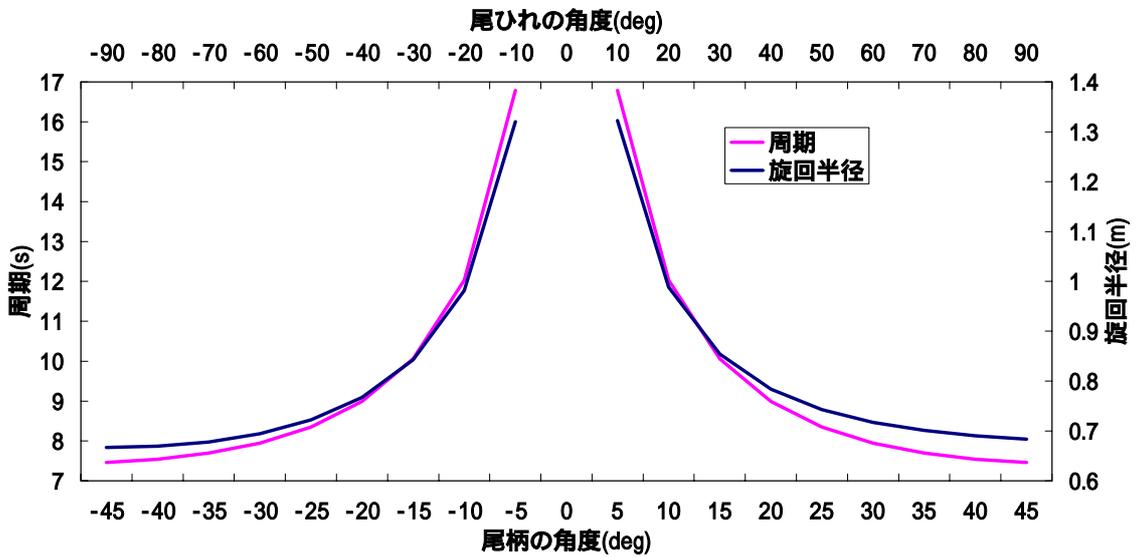
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

**Fig.4.8(c)**  $\beta_{PB}, \beta_{TB}$  による軌跡の違い(1)



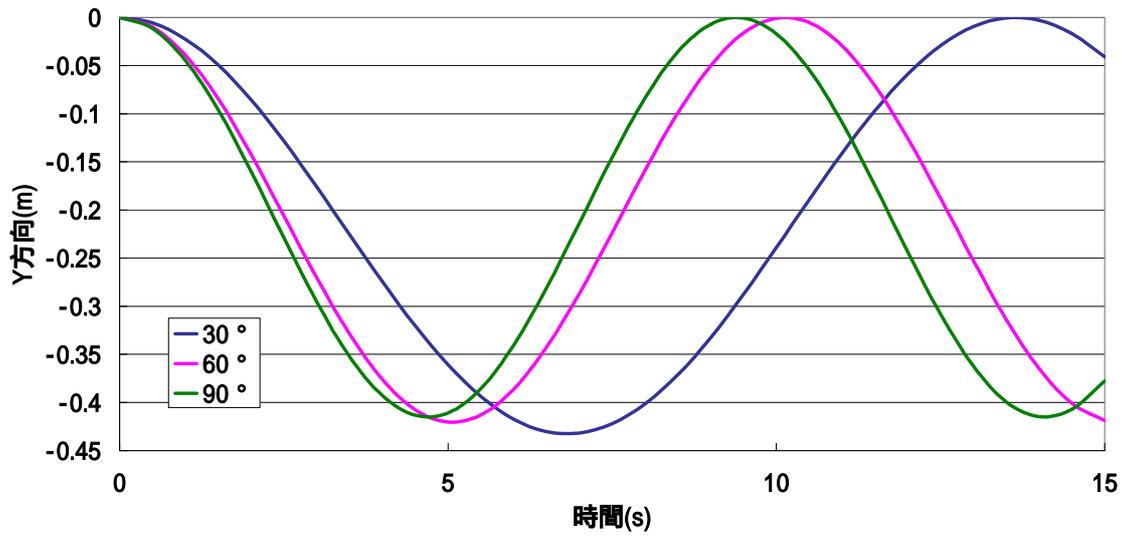
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

Fig.4.8(d)  $\beta_{PB}, \beta_{TB}$  による軌跡の違い(2)



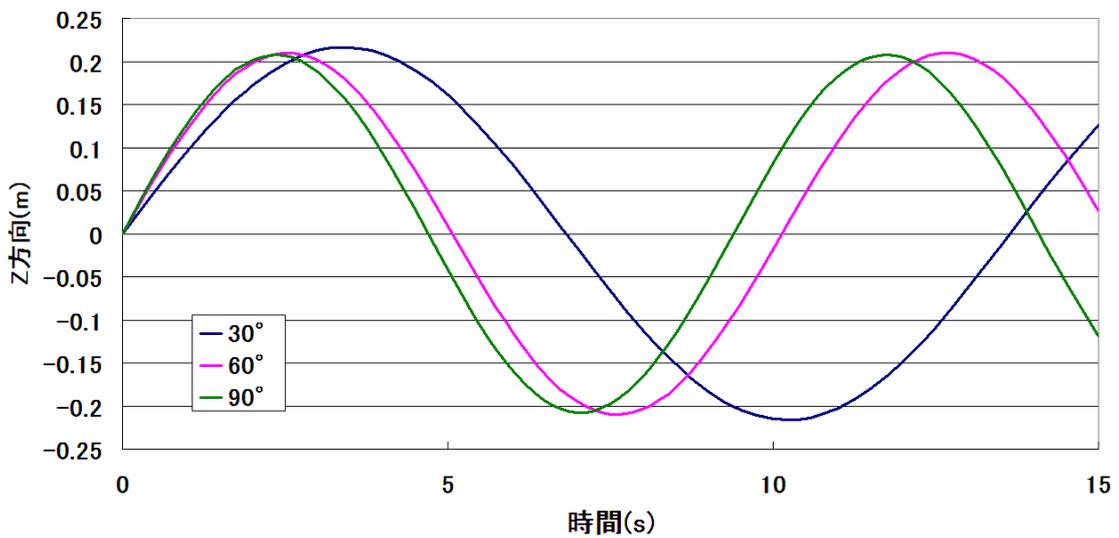
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ$$

Fig.4.8(e)  $\beta_{PB}, \beta_{TB}$  による周期及び旋回半径の違い



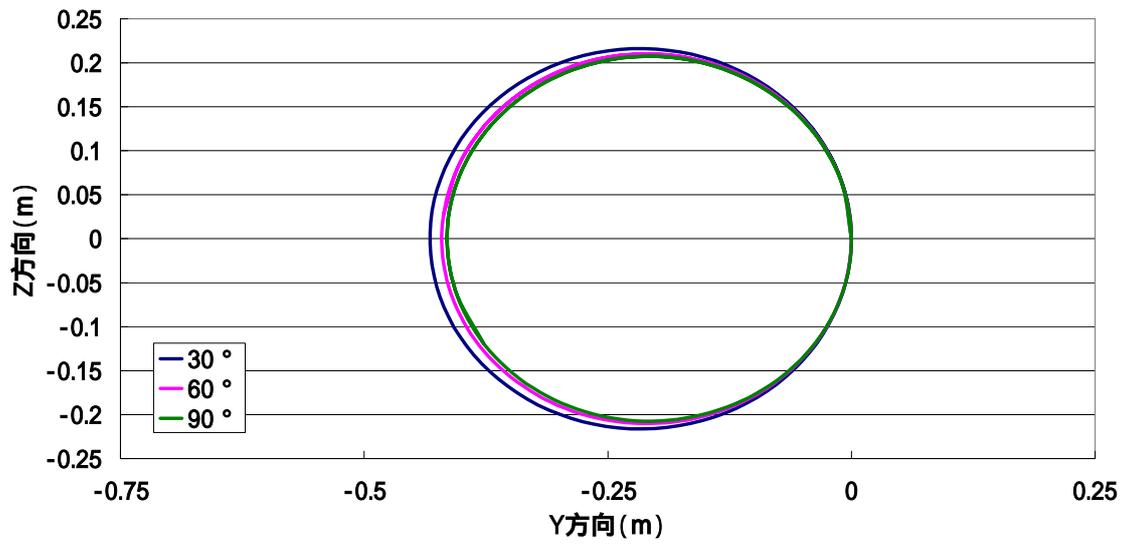
$$\beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.9(a)  $\beta_{WR}$  による Y 方向の時間変化**



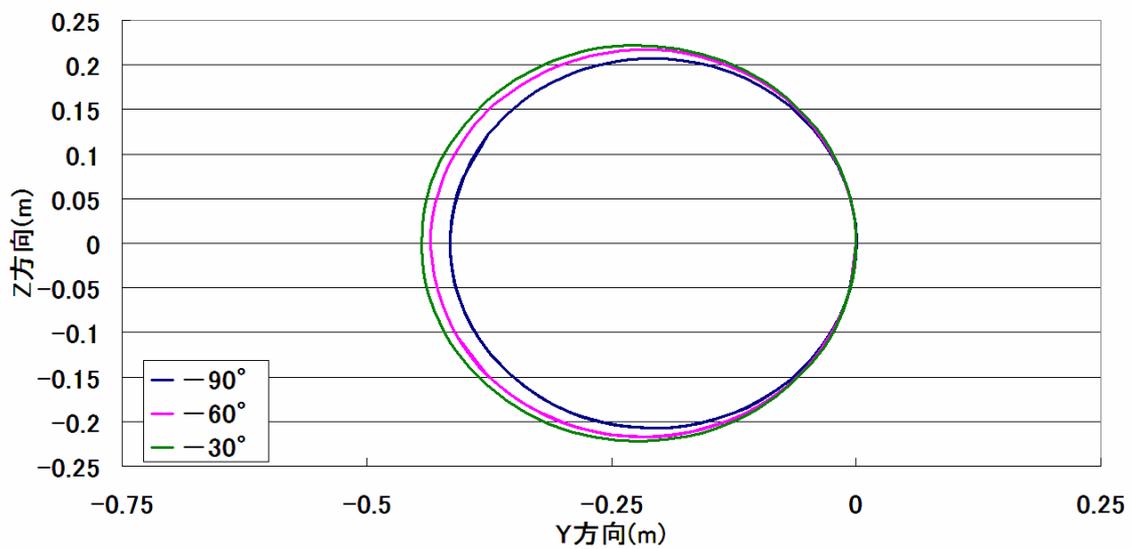
$$\beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.9(b)  $\beta_{WR}$  による Z 方向の時間変化**



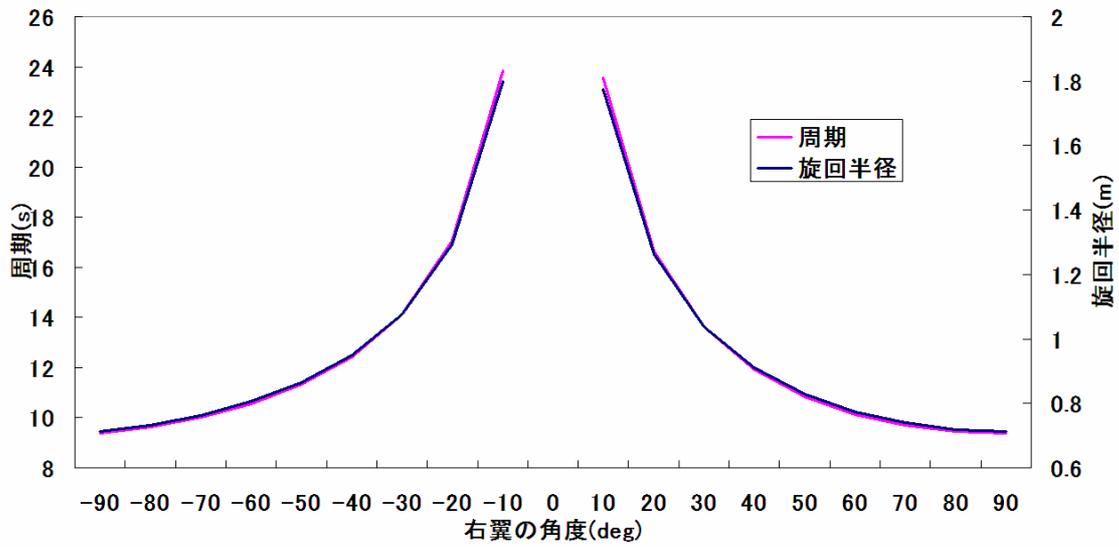
$$\beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.9(c)  $\beta_{WR}$  による軌跡の違い(1)**



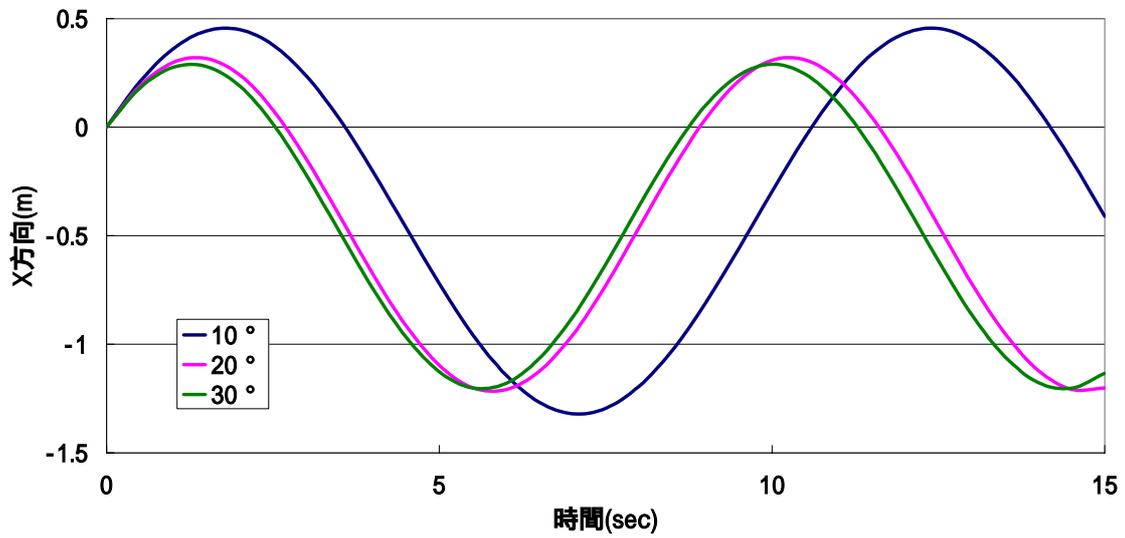
$$\beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.9(d)  $\beta_{WR}$  による軌跡の違い(2)**



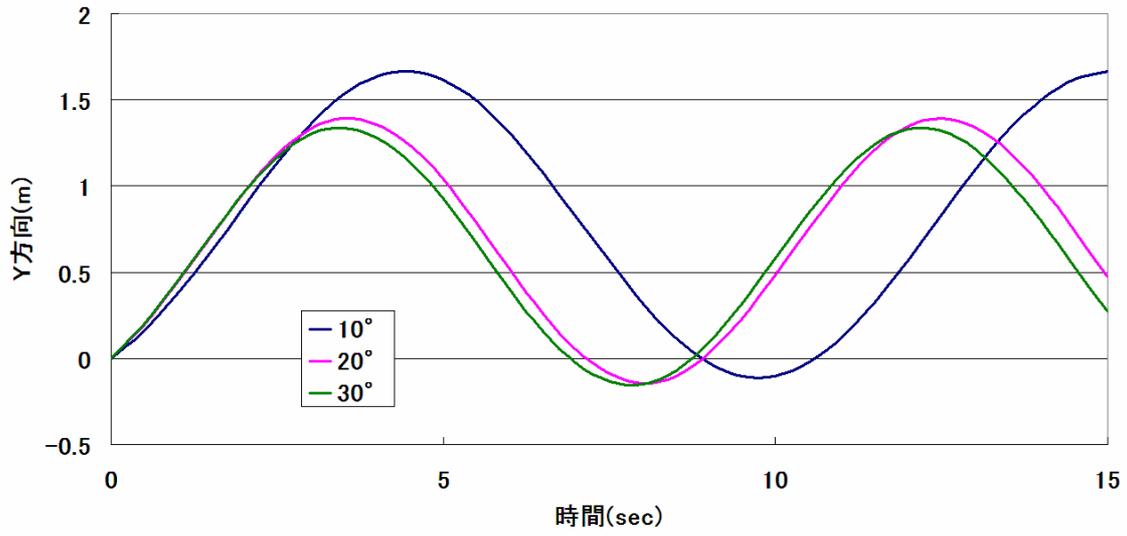
$$\beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

Fig.4.9(e)  $\beta_{WR}$  による周期及び旋回半径の違い



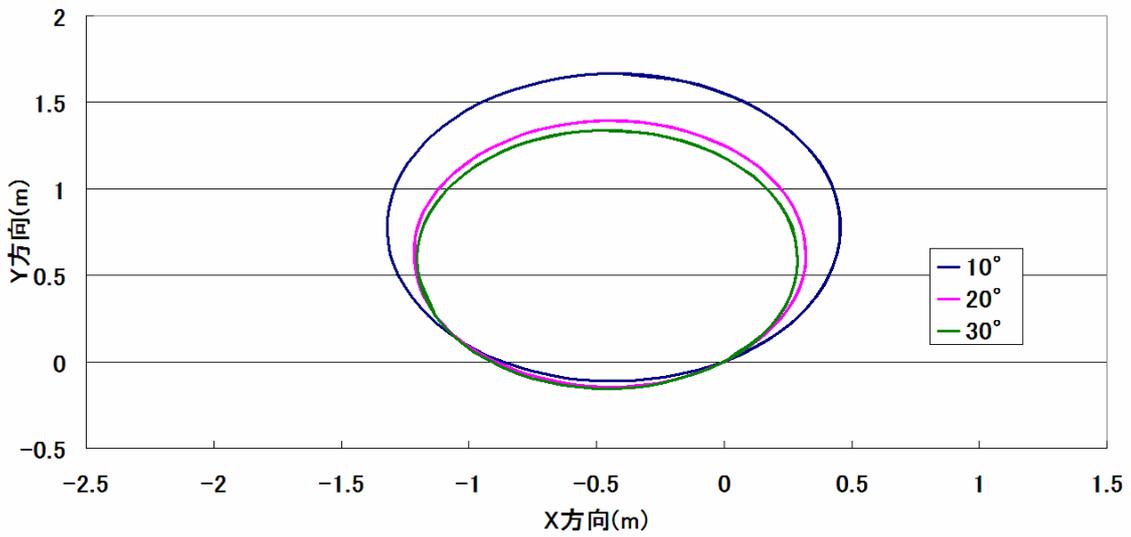
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ$$

Fig.4.10(a)  $\beta_{TB}$  による X 方向の時間変化



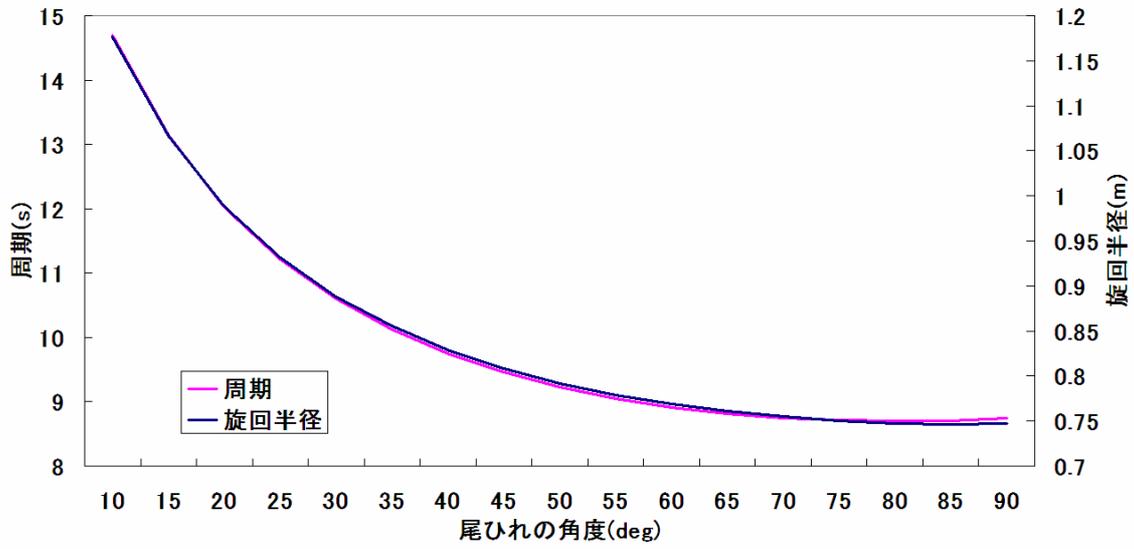
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ$$

**Fig.4.10(b)  $\beta_{TB}$  による Y 方向の時間変化**



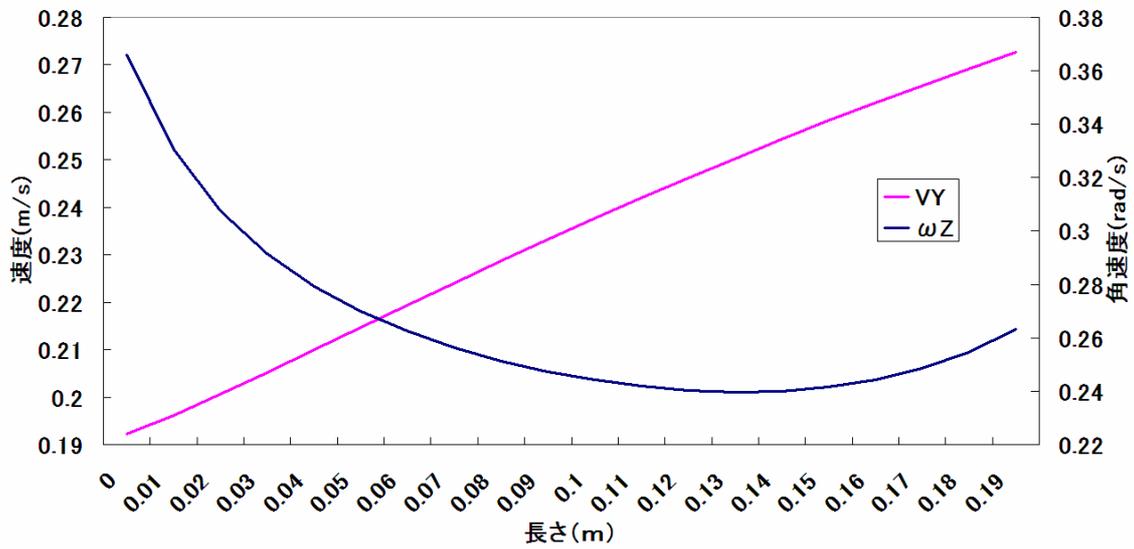
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ$$

**Fig.4.10(c)  $\beta_{TB}$  による軌跡の違い**



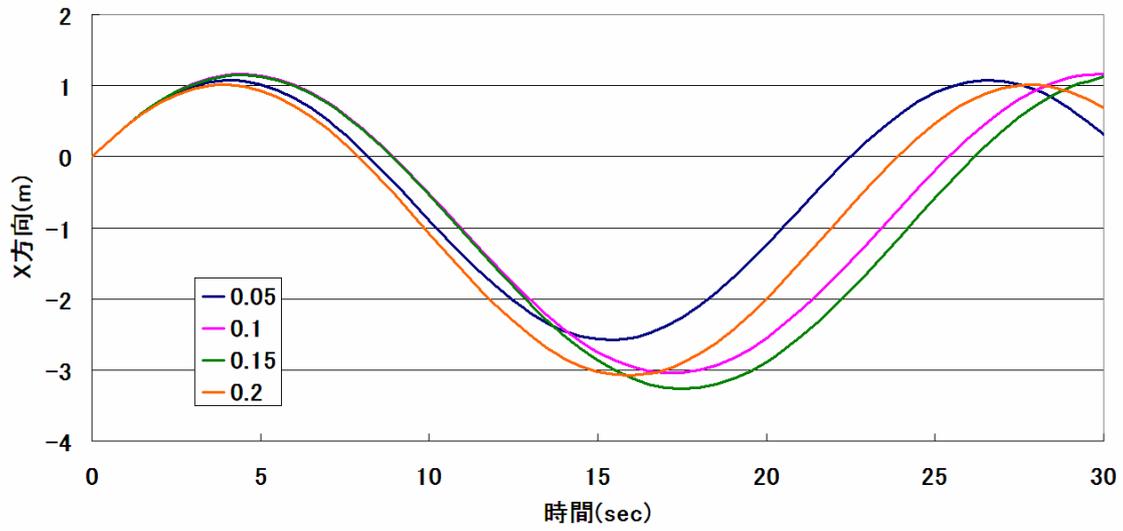
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ$$

Fig.4.10(d)  $\beta_{TB}$  による周期及び旋回半径の違い



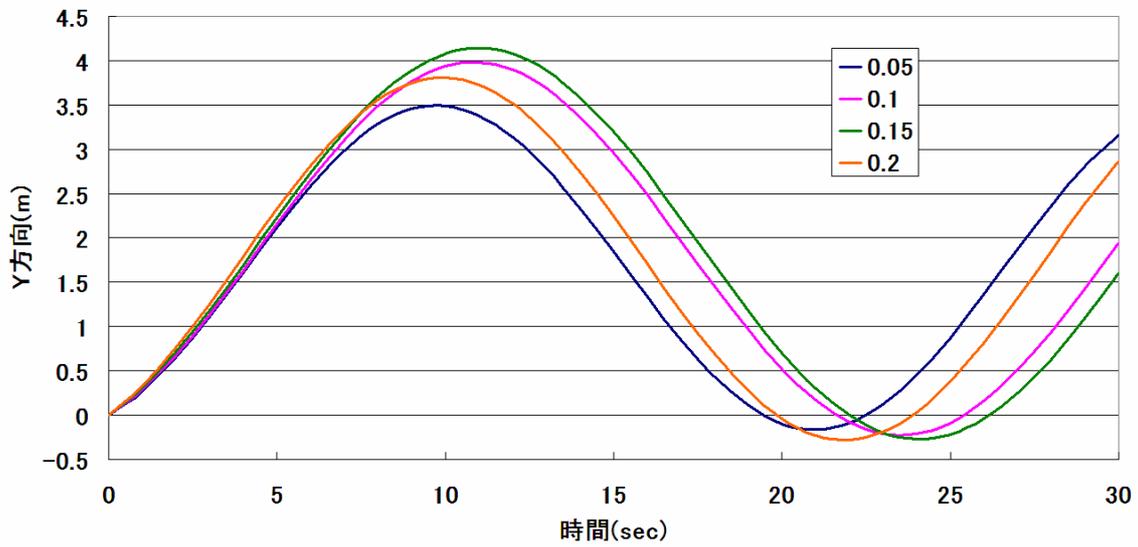
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.11(a)  $l_p$  による  $V_Y, \omega_Z$  の違い



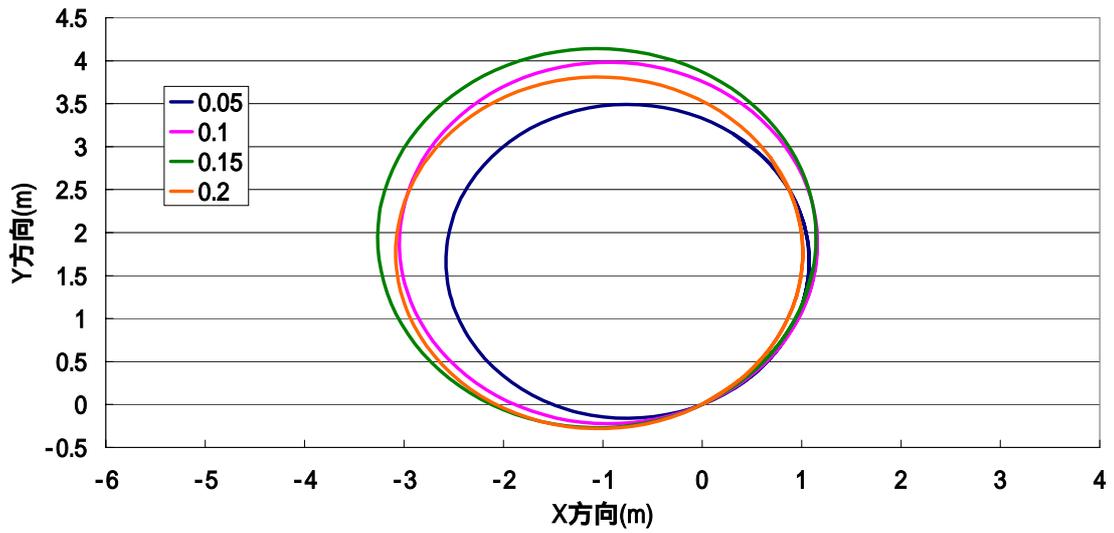
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.11(b)  $l_p$  による X 方向の時間変化**



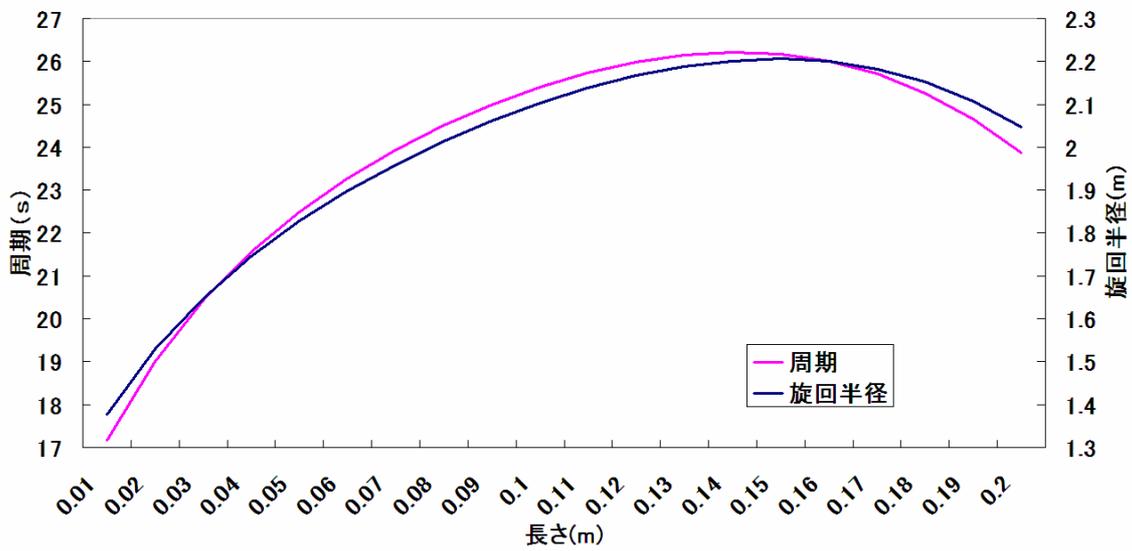
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.11(c)  $l_p$  による Y 方向の時間変化**



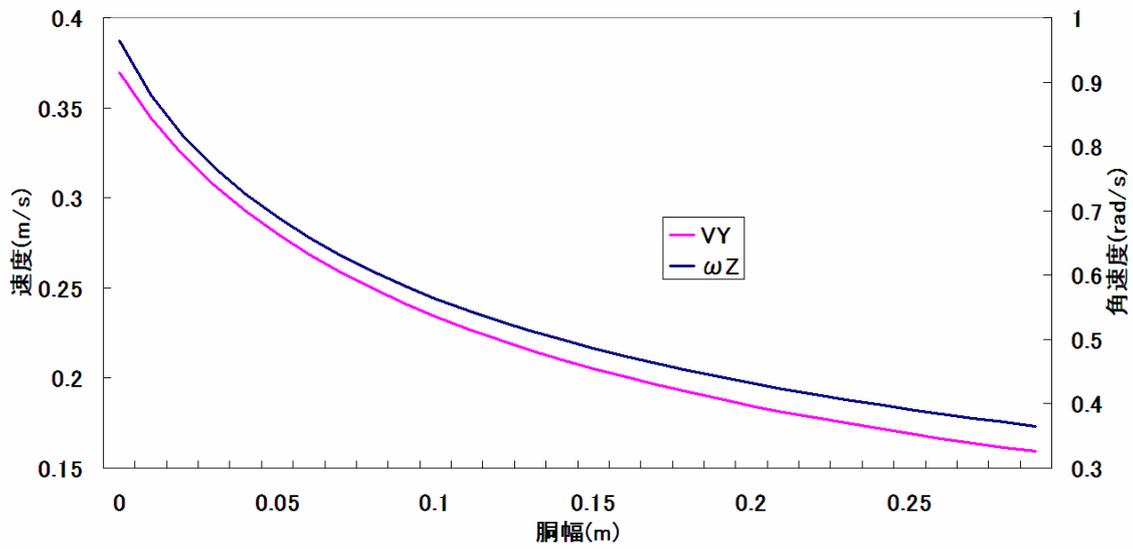
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.11(d)  $l_p$  による軌跡の変化



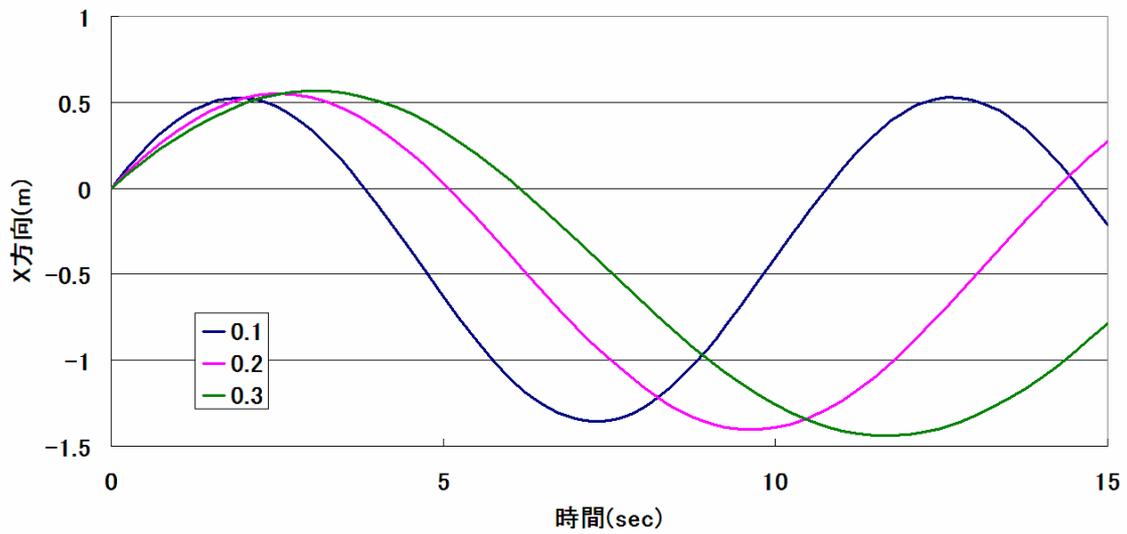
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.11(e)  $l_p$  による周期及び旋回半径の違い



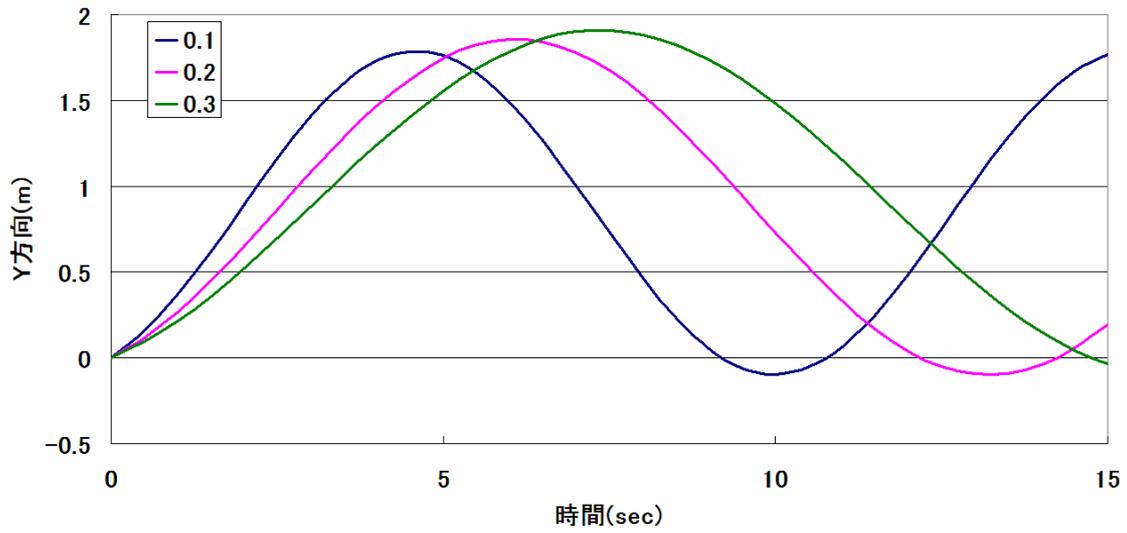
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.12(a)**  $A_B$  による  $V_Y, \omega_Z$  の変化



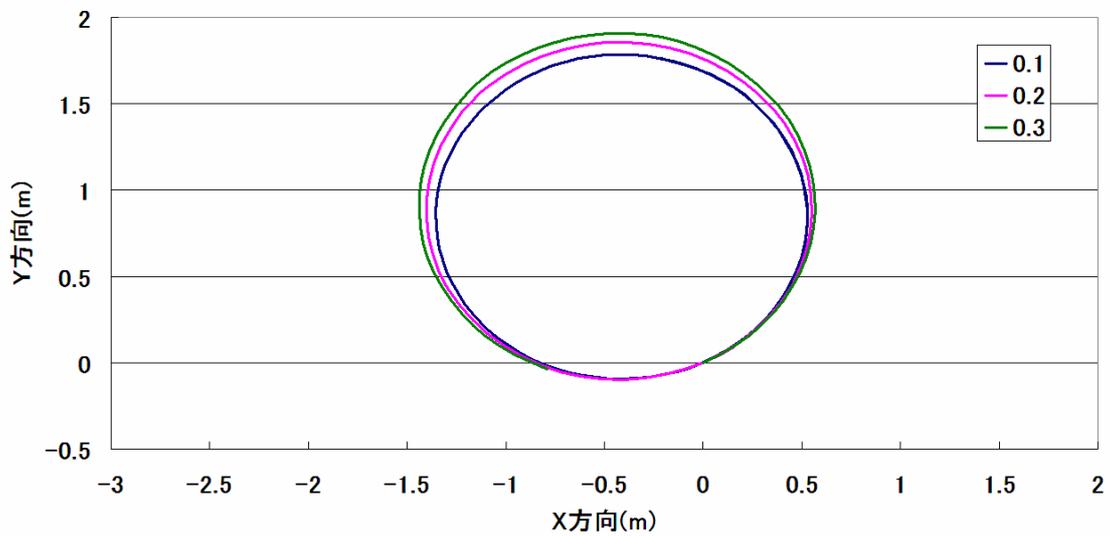
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.12(b)**  $A_B$  による X 方向の時間変化



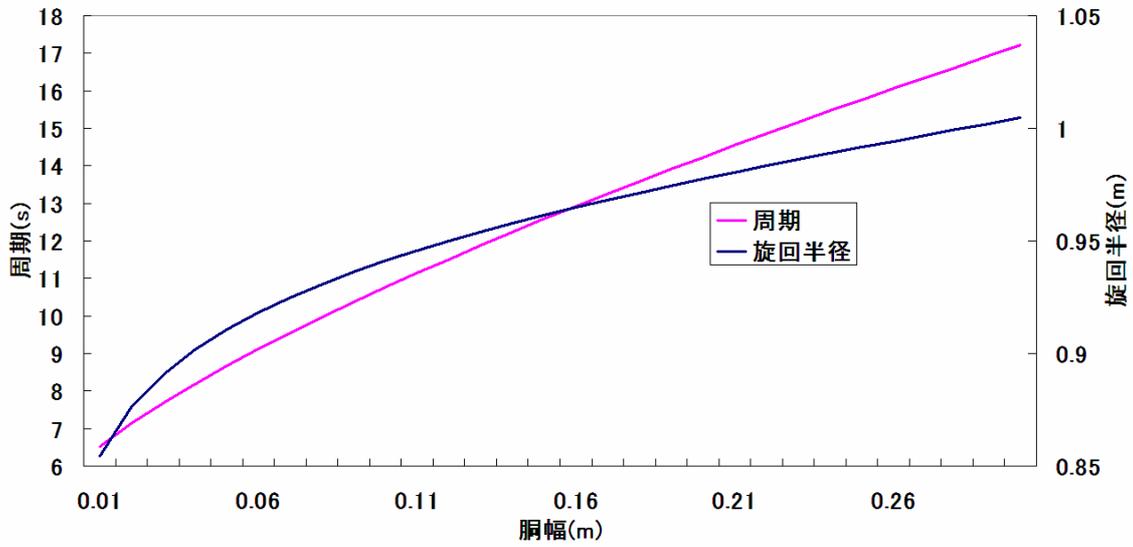
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.12(c)  $A_B$  による Y 方向の時間変化**



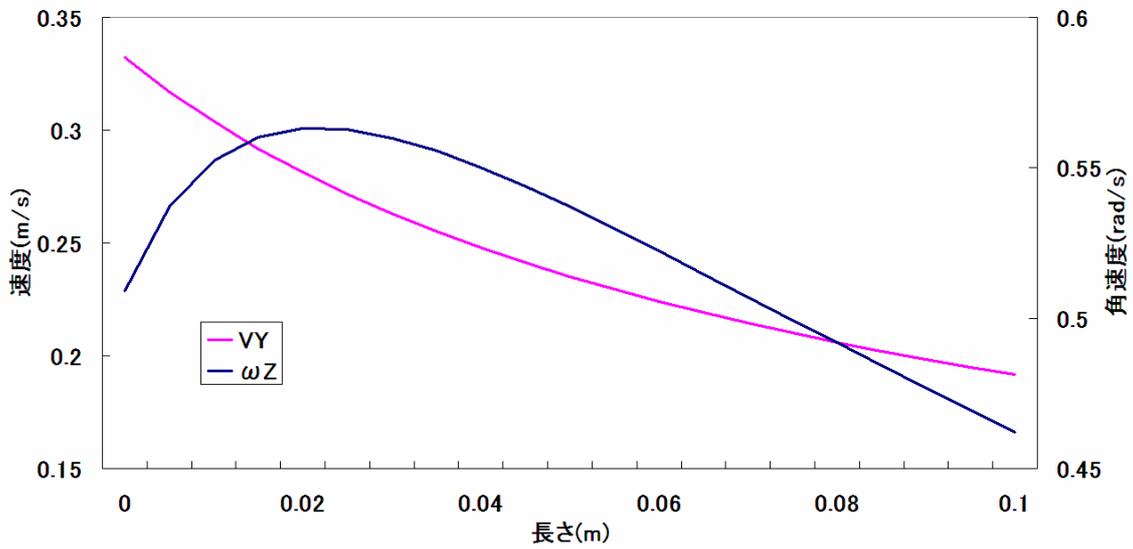
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.12(d)  $A_B$  による軌跡の違い**



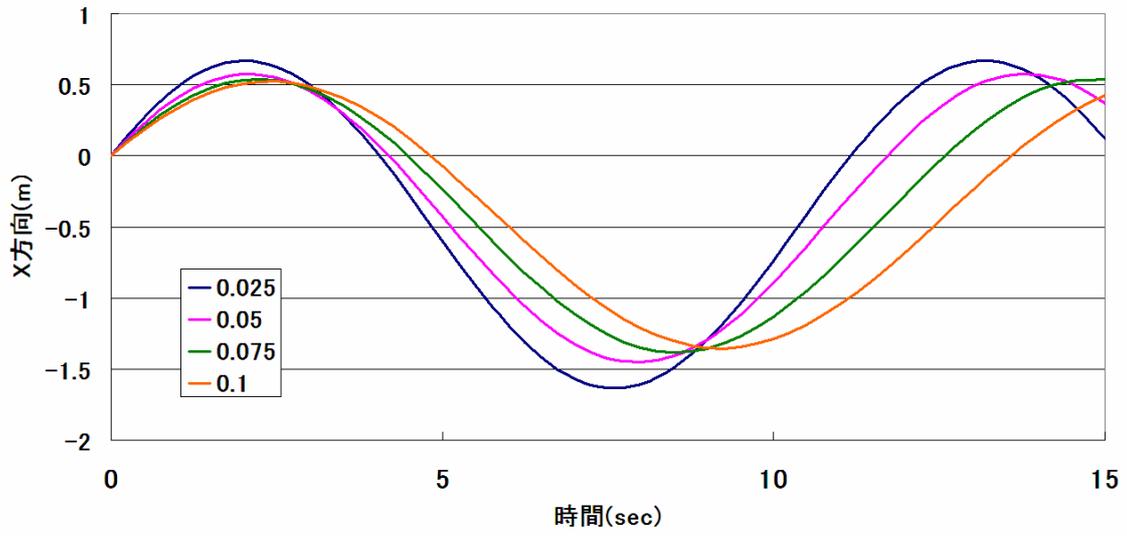
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.12(e)  $A_B$  による周期及び旋回半径の違い



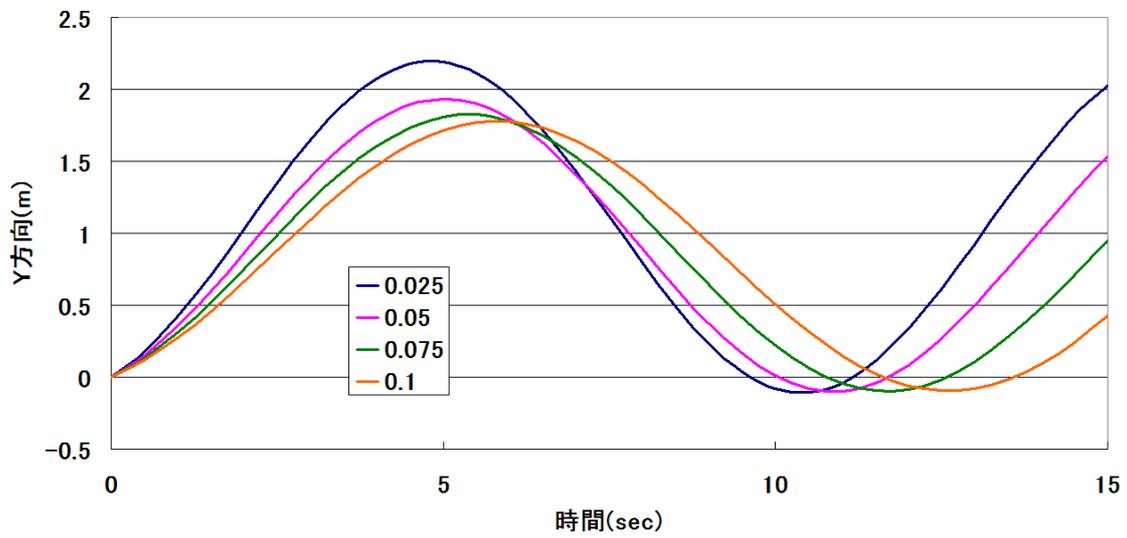
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.13(a)  $l_T$  による  $V_Y, \omega_Z$  の変化



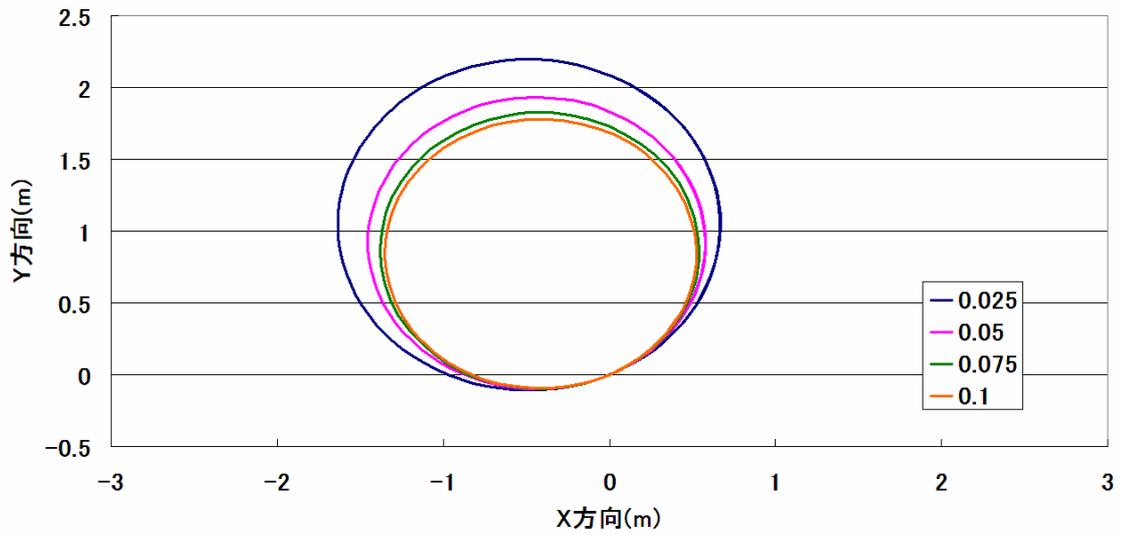
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.13(b)  $l_T$  による X 方向の時間変化**



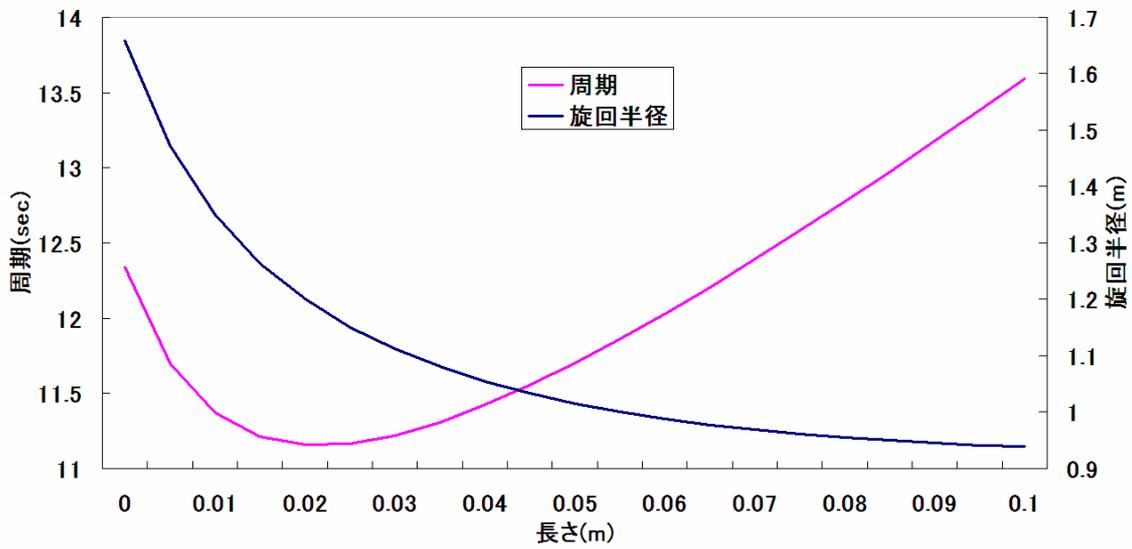
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.13(c)  $l_T$  による Y 方向の時間変化**



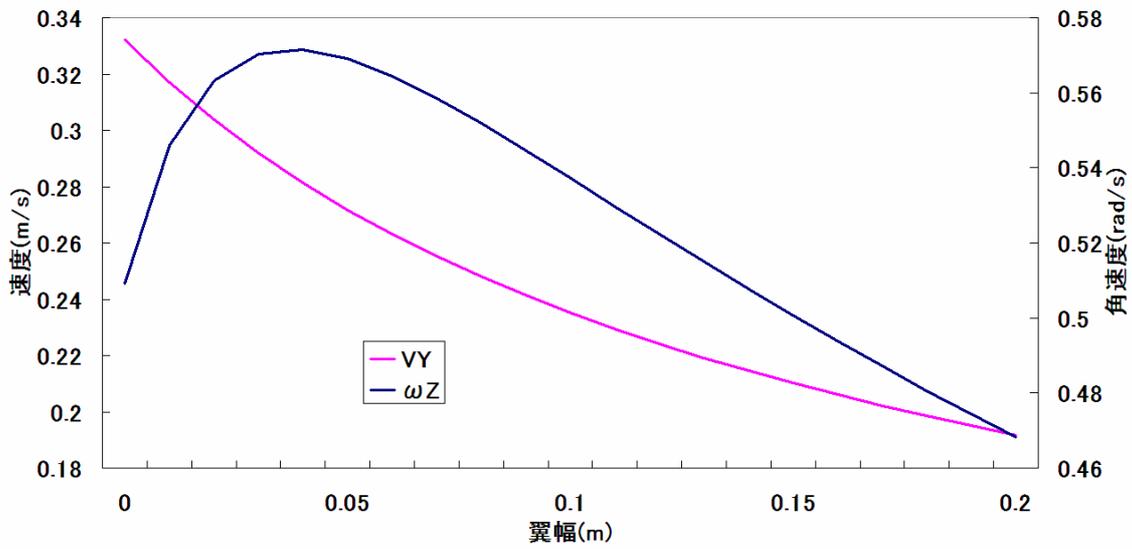
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.13(d)  $l_T$  による軌跡の違い



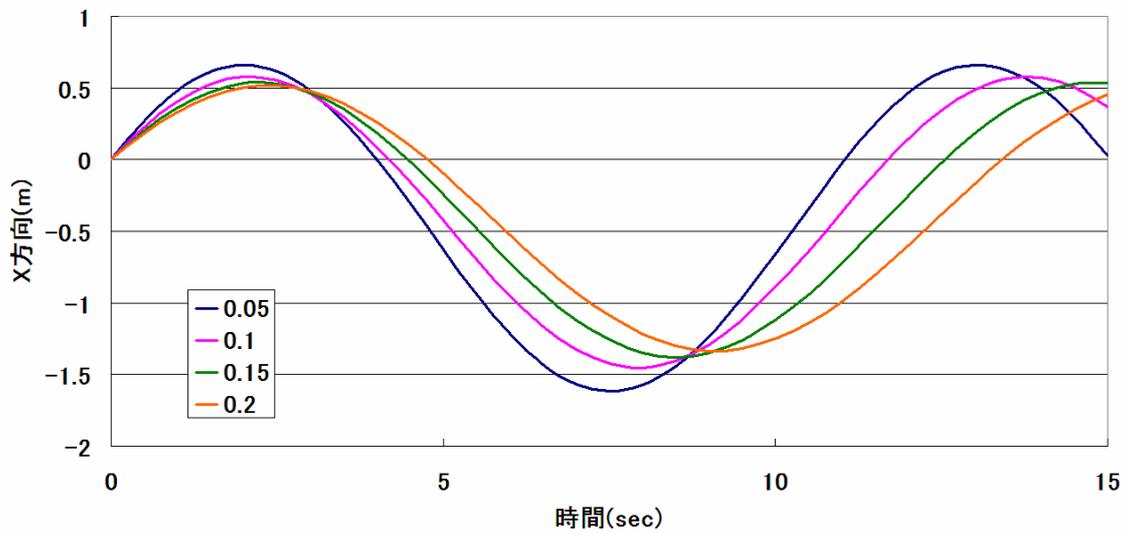
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.13(e)  $l_T$  による周期及び旋回半径の違い



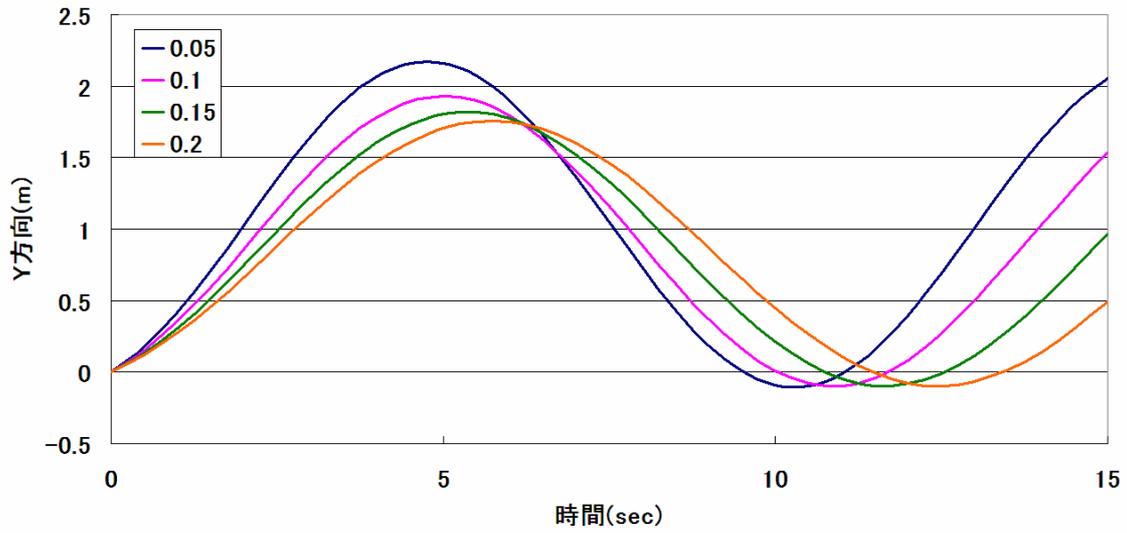
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.14(a)**  $A_T$  による  $V_Y, \omega_Z$  の変化



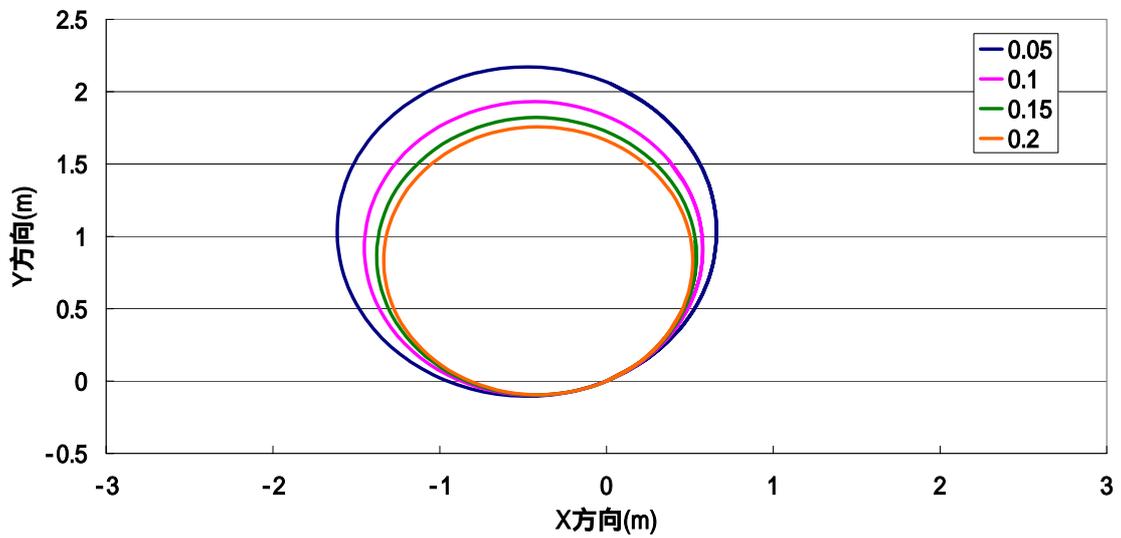
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.14(b)**  $A_T$  による X 方向の時間変化



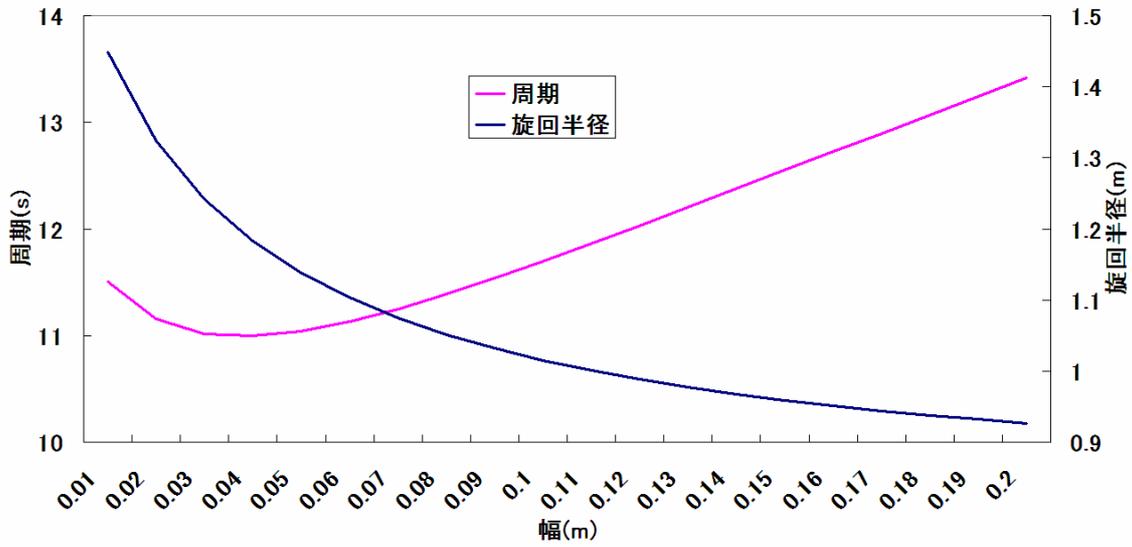
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.14(c)  $A_T$  による Y 方向の時間変化**



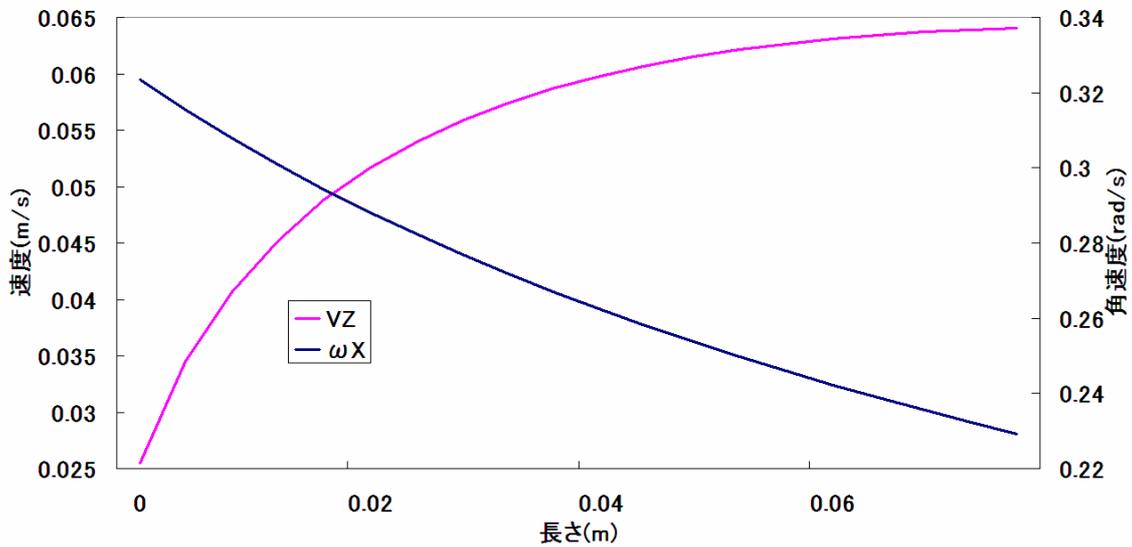
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.14(d)  $A_T$  による軌跡の違い**



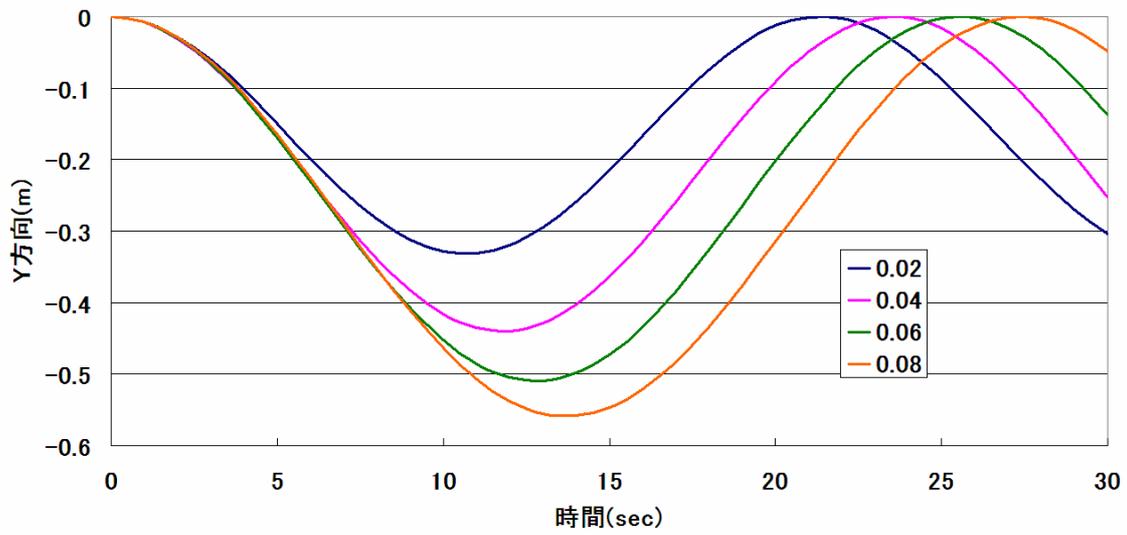
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

Fig.4.14(e)  $A_T$  による周期及び旋回半径の違い



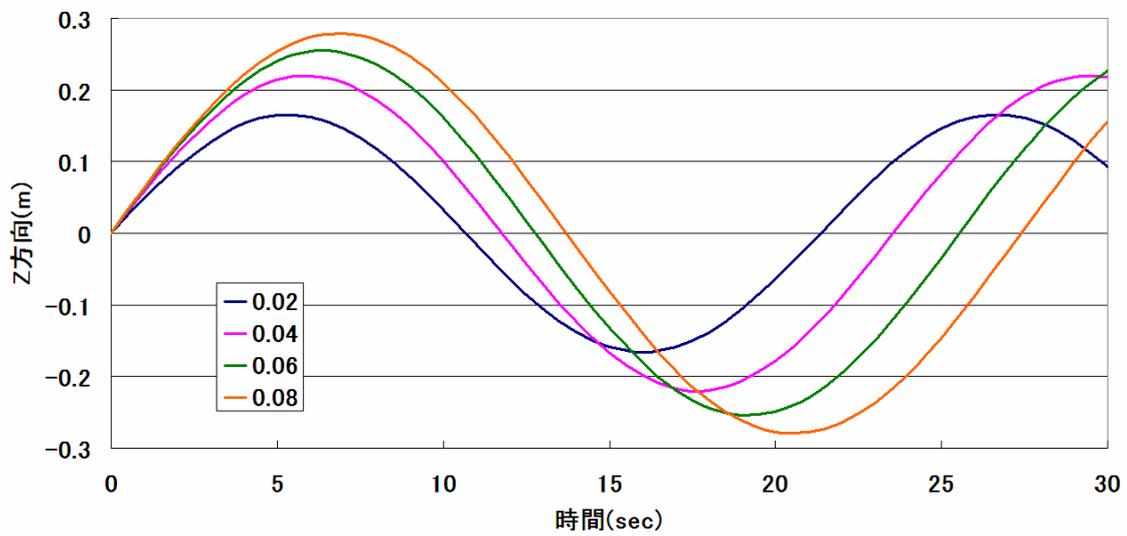
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

Fig.4.15(a)  $l_W$  による  $V_Z, \omega_X$  の変化



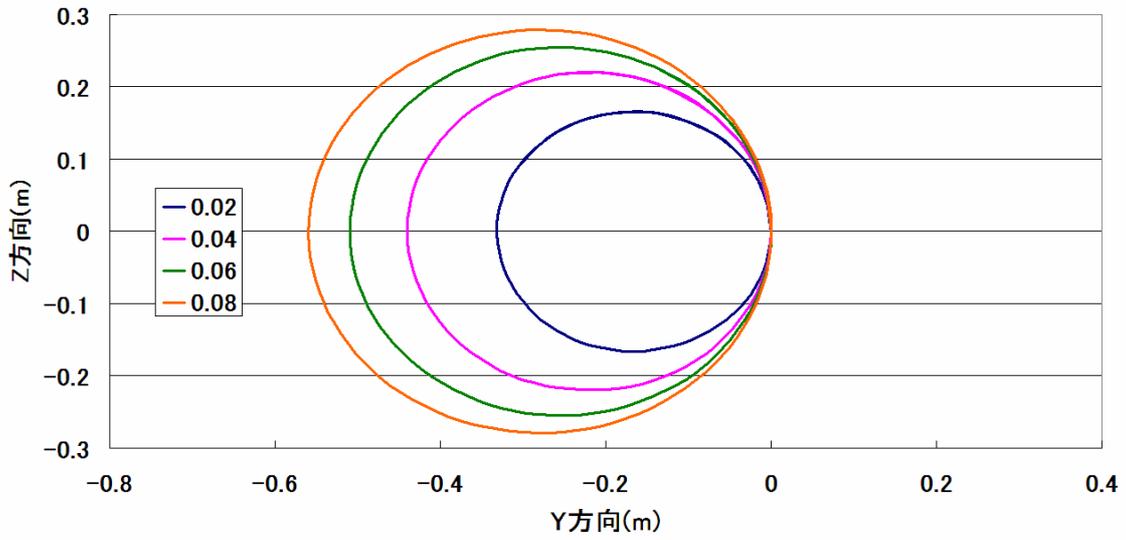
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.15(b)  $l_w$  による Y 方向の時間変化**



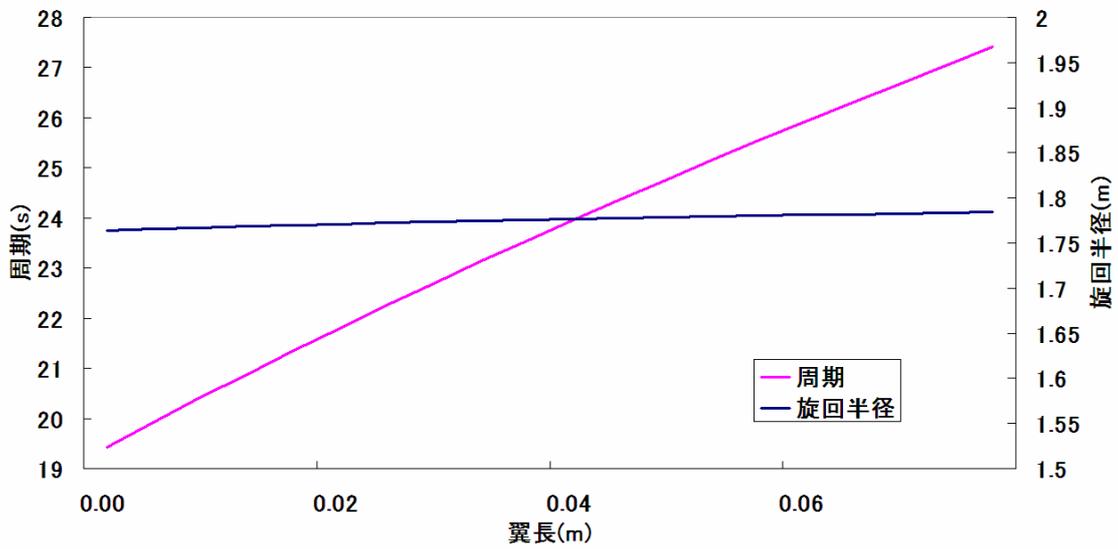
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.15(c)  $l_w$  による Z 方向の時間変化**



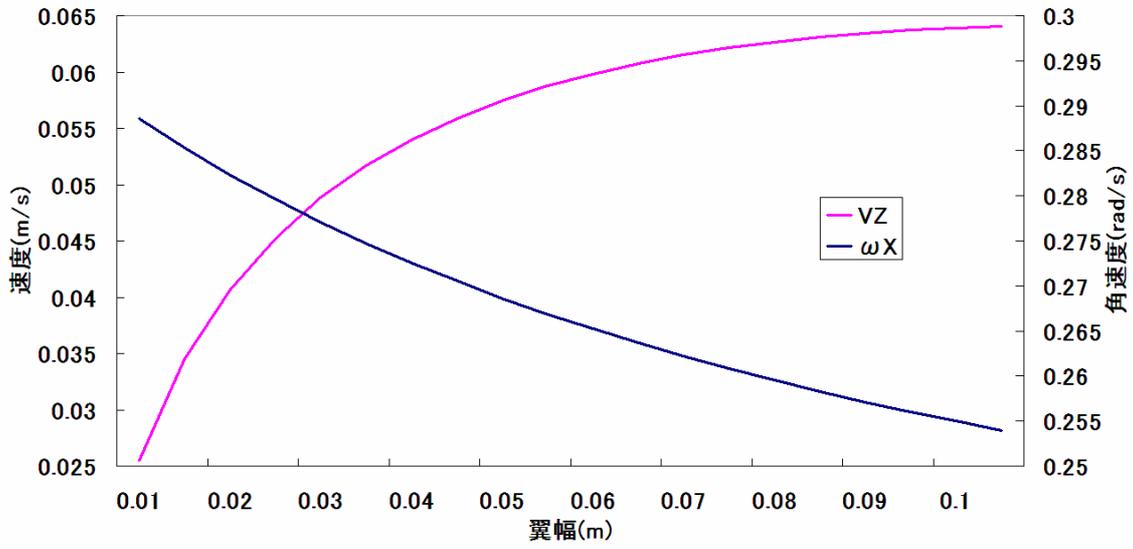
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.15(d)  $l_w$  による軌跡の違い**



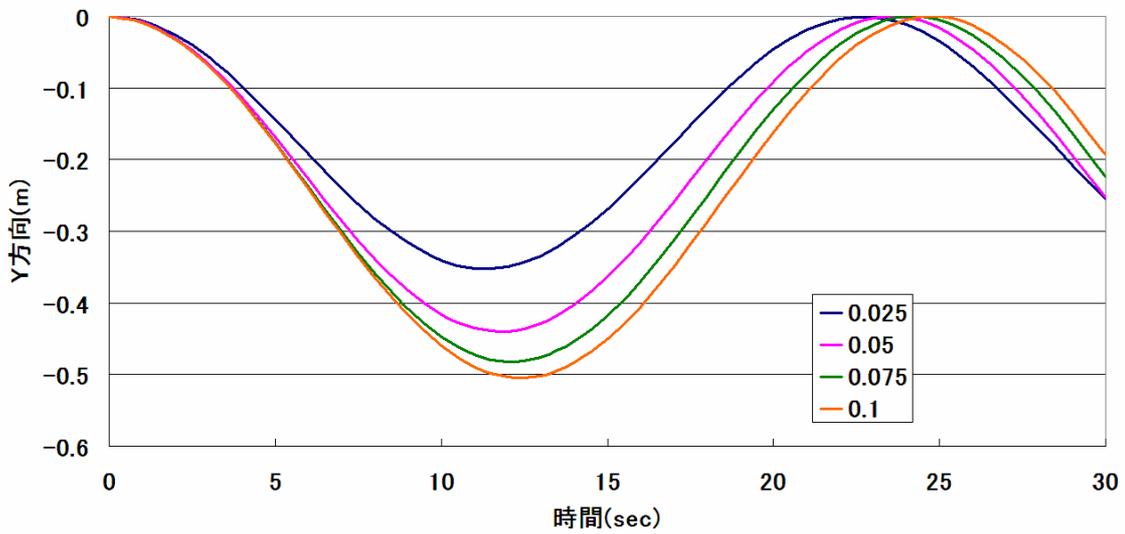
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.15(e)  $l_w$  による周期及び旋回半径の違い**



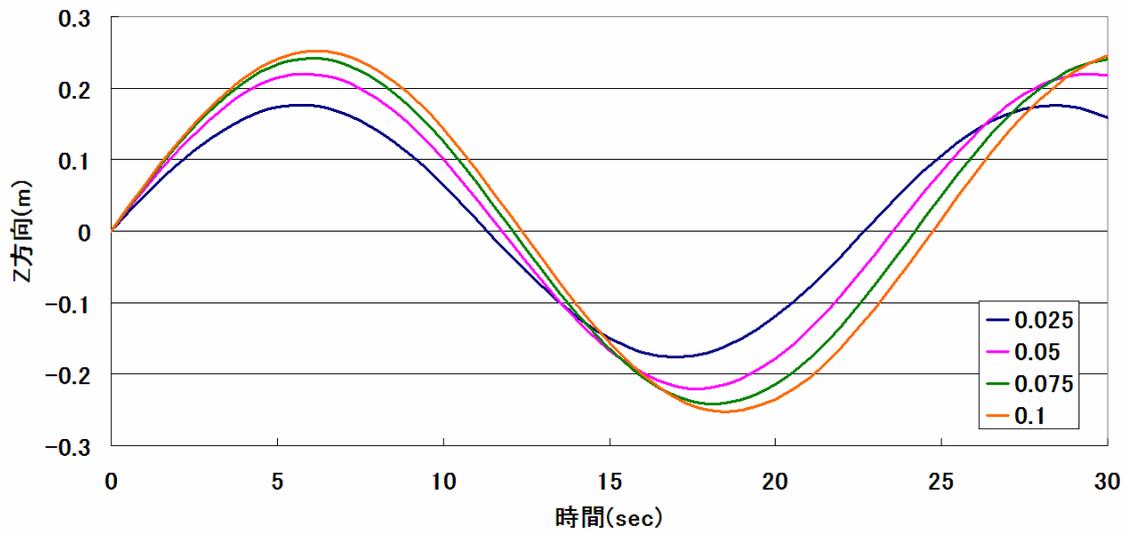
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.16(a)**  $A_w$  による  $V_z, \omega_x$  の変化



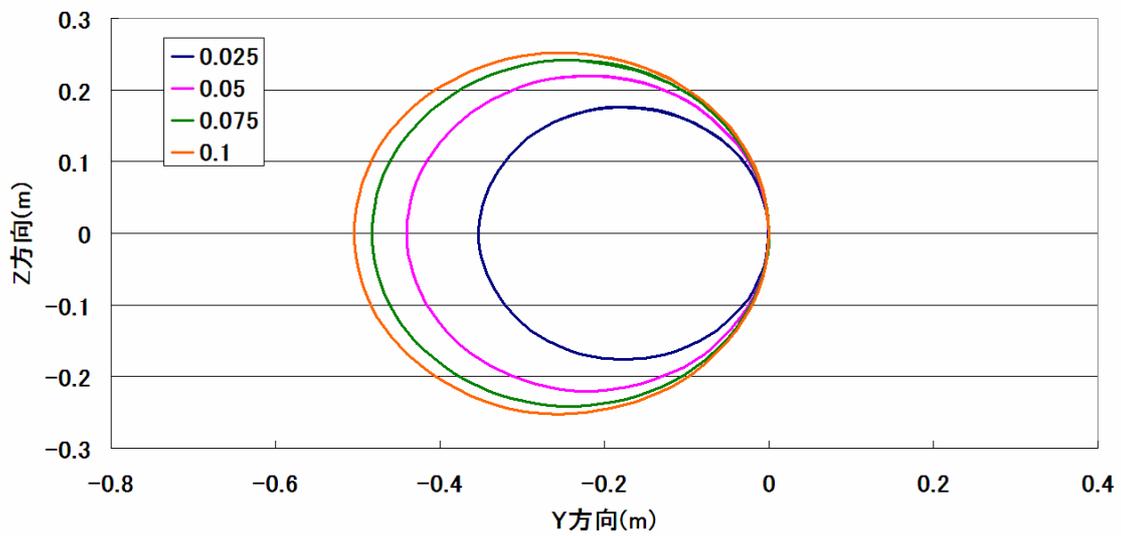
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.16(b)**  $A_w$  による Y 方向の時間変化



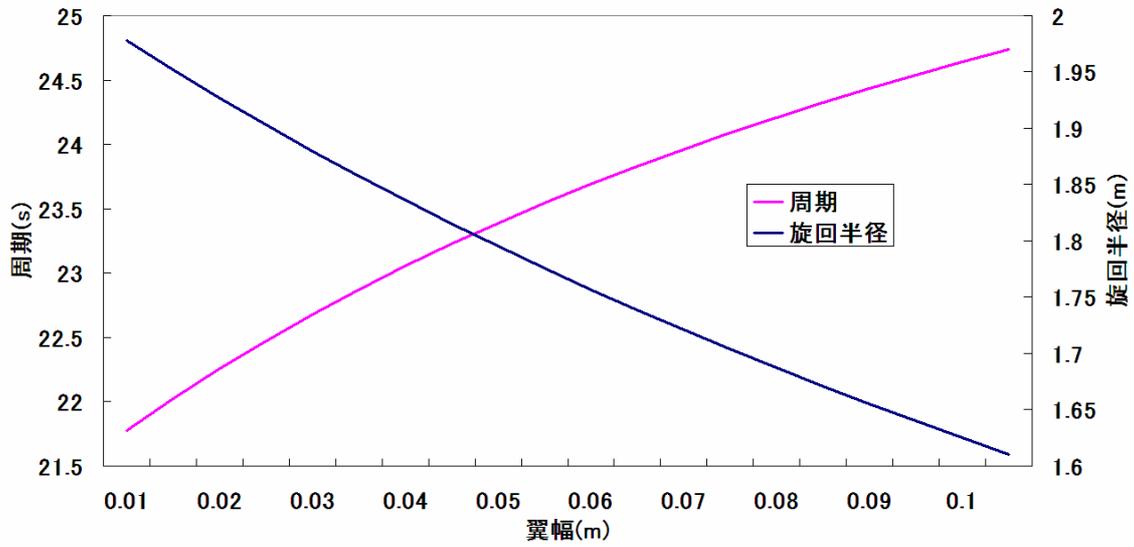
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.16(c)  $A_w$  による Z 方向の時間変化**



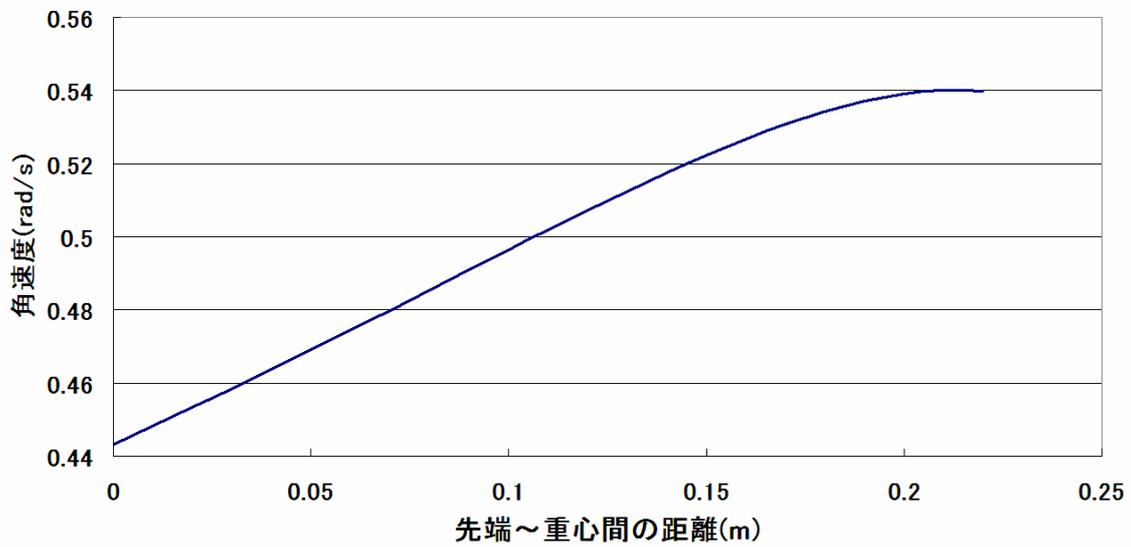
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.16(d)  $A_w$  による軌跡の違い**



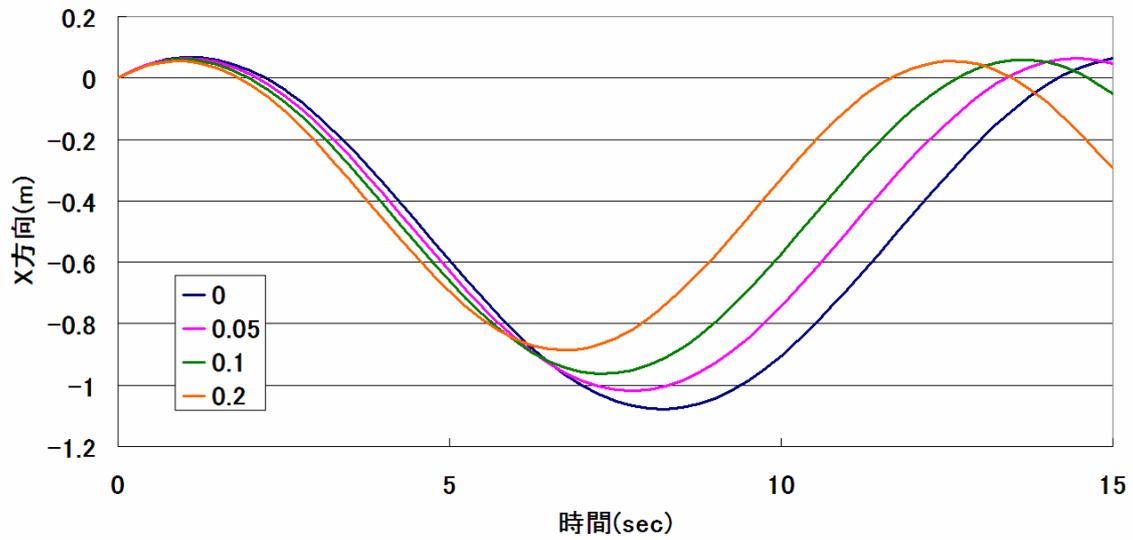
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.16(e)  $A_W$  による周期及び旋回半径の違い**



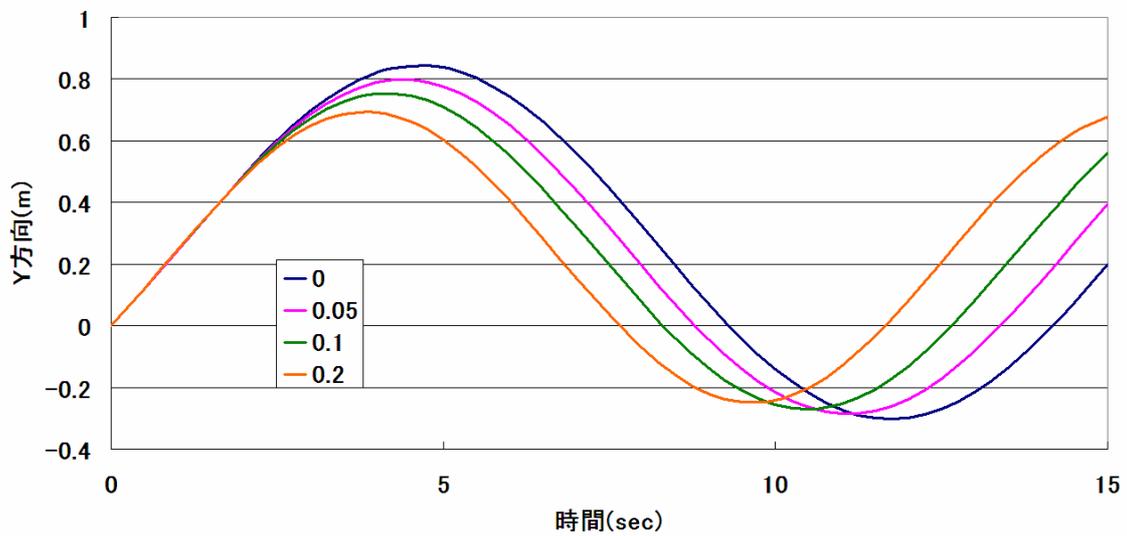
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.17(a) 重心の位置による  $\omega_z$  の変化**



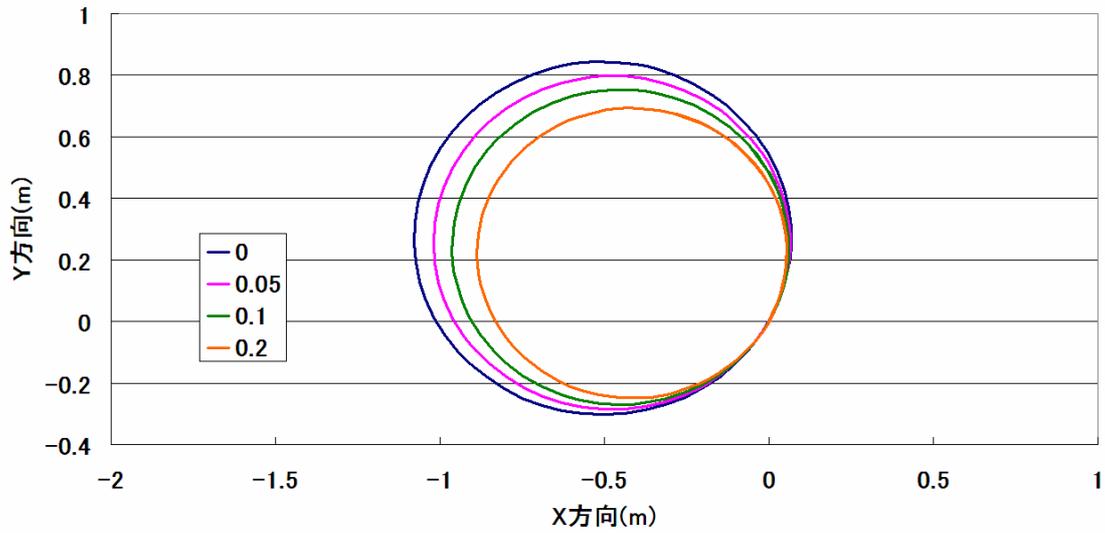
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.17(b) 重心の位置による X 方向の時間変化**



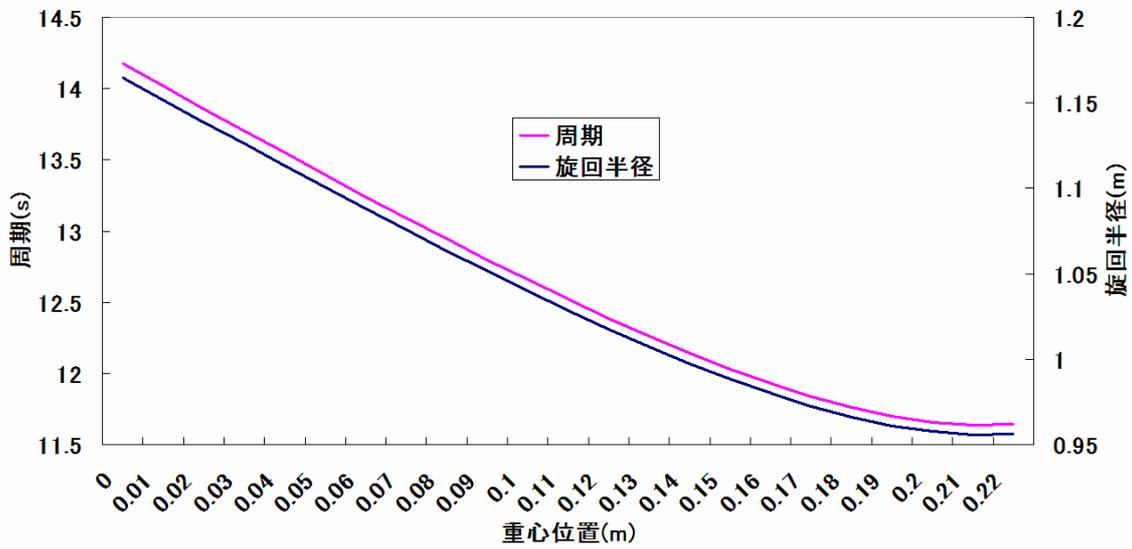
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.17(c) 重心の位置による Y 方向の時間変化**



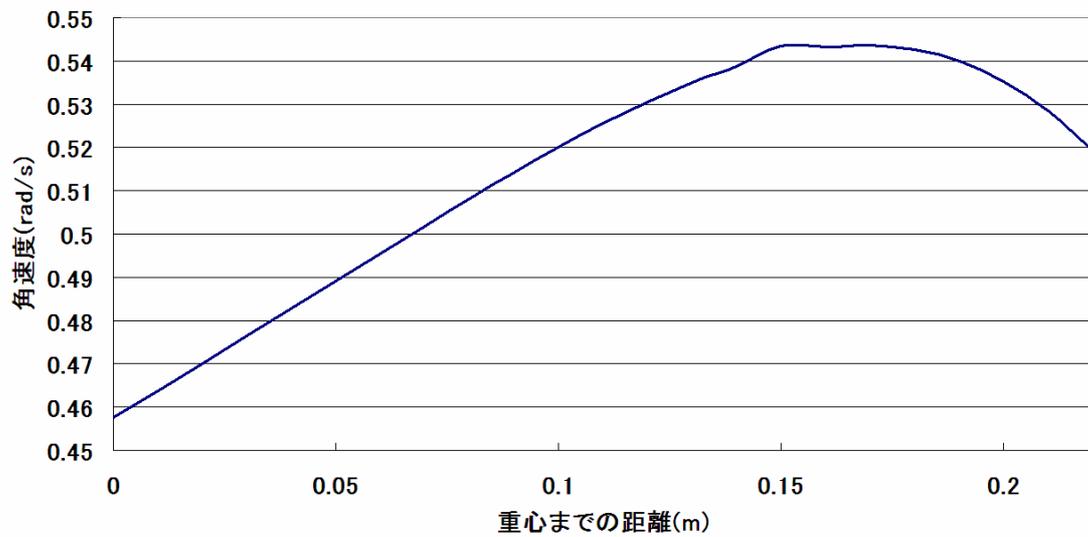
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.17(d) 重心の位置による左右旋回の軌跡の違い**



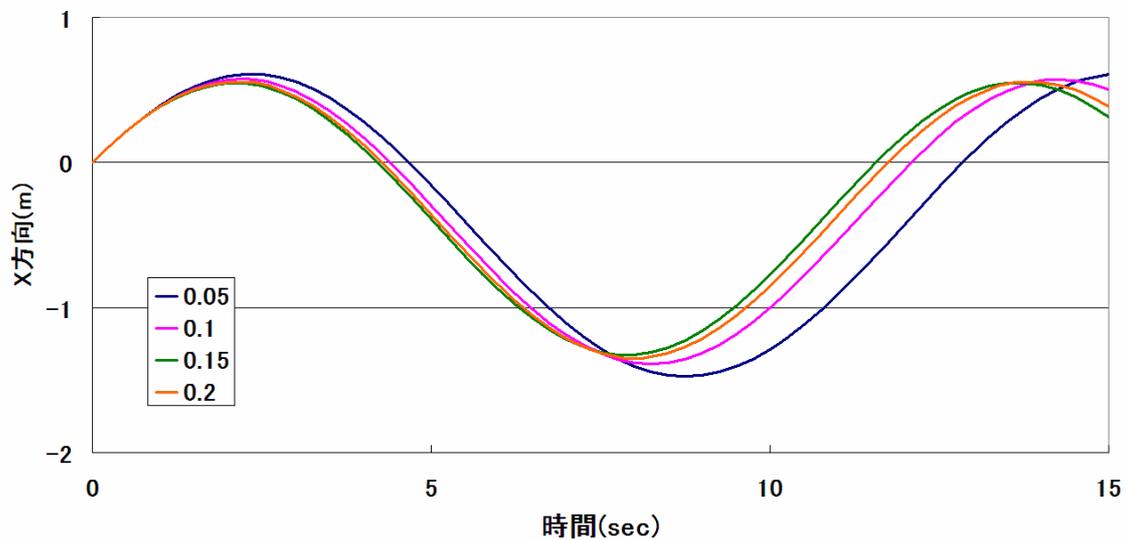
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.17(e) 重心の位置による周期及び  
旋回半径の違い**



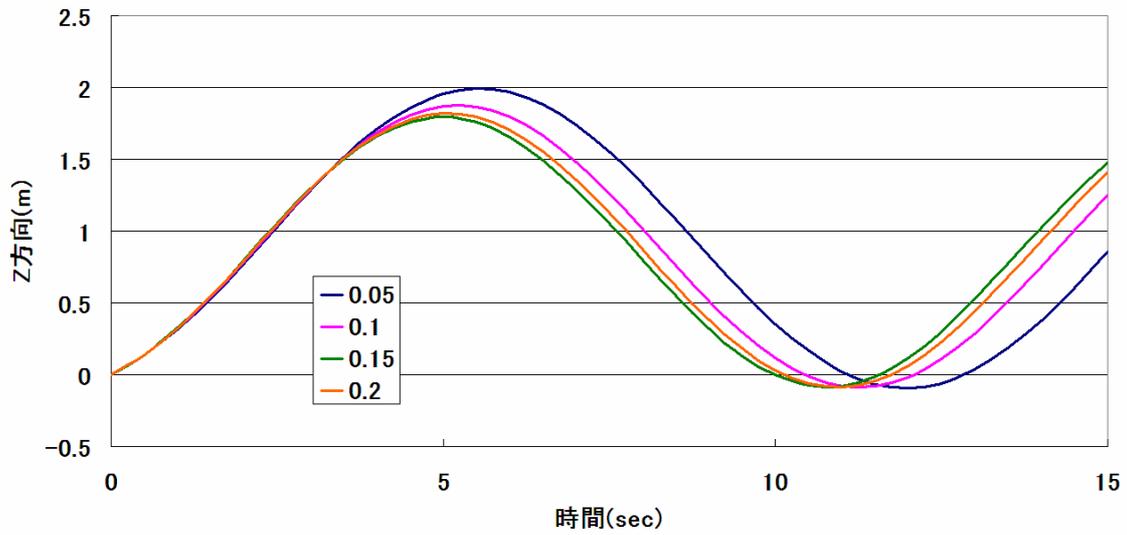
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.18(a) 重心の位置による  $\omega_y$  の変化**



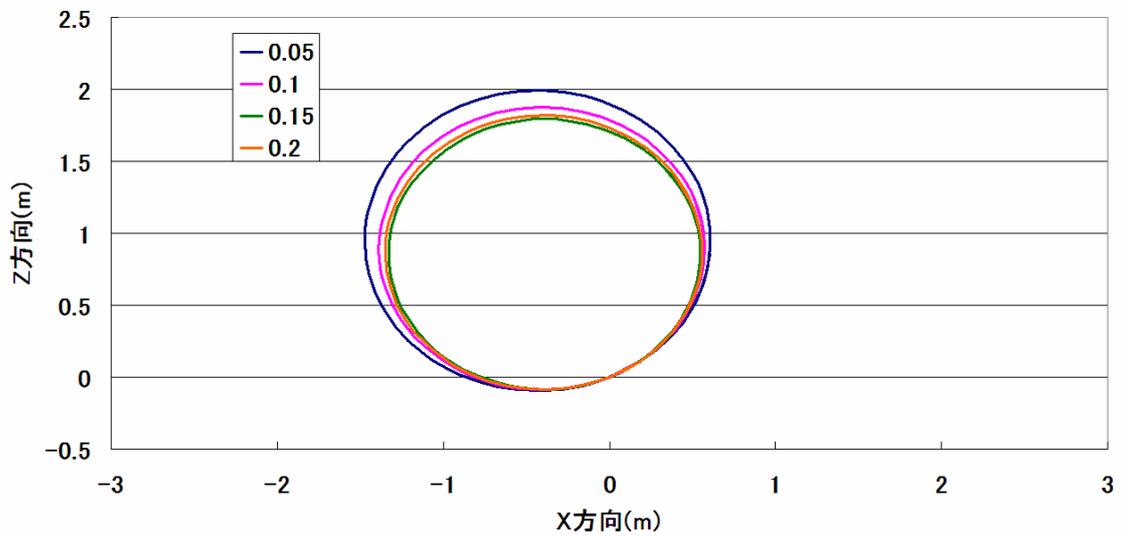
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.18(b) 重心の位置による X 方向の時間変化**



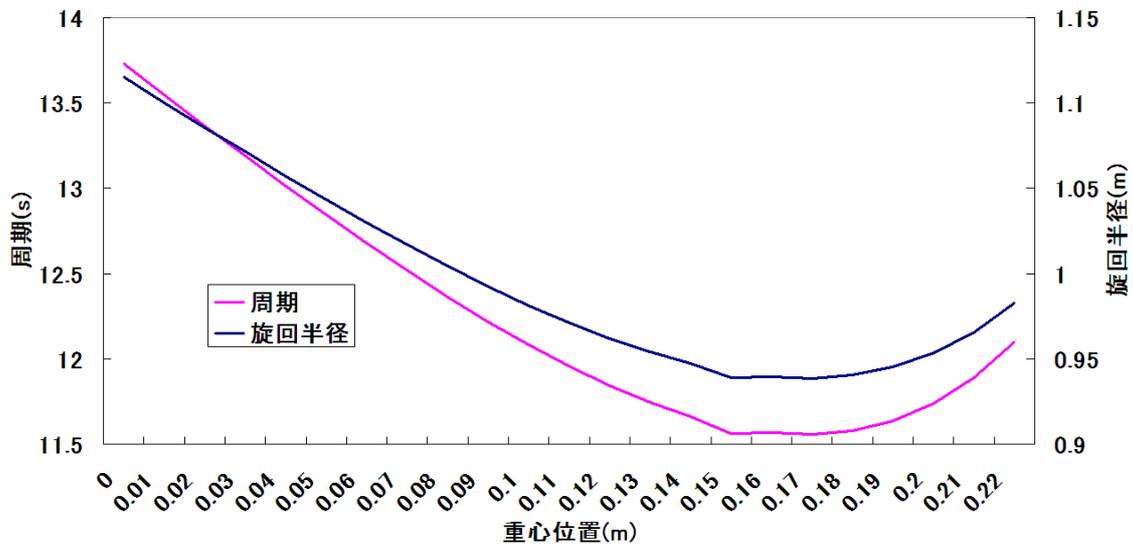
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig4.18(c) 重心の位置による Z 方向の時間変化**



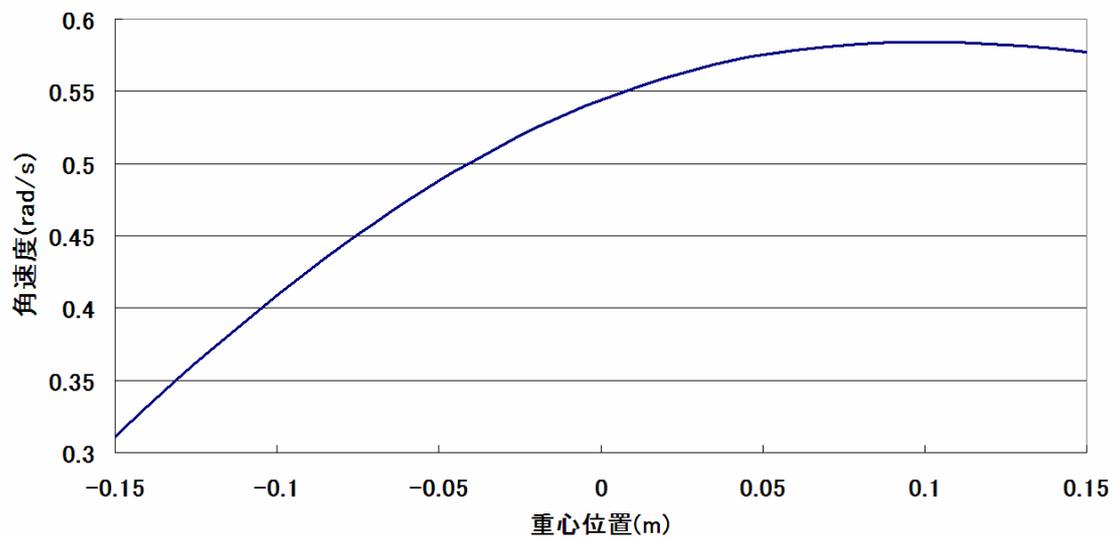
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.18(d) 重心の位置による上下旋回の軌跡の違い**



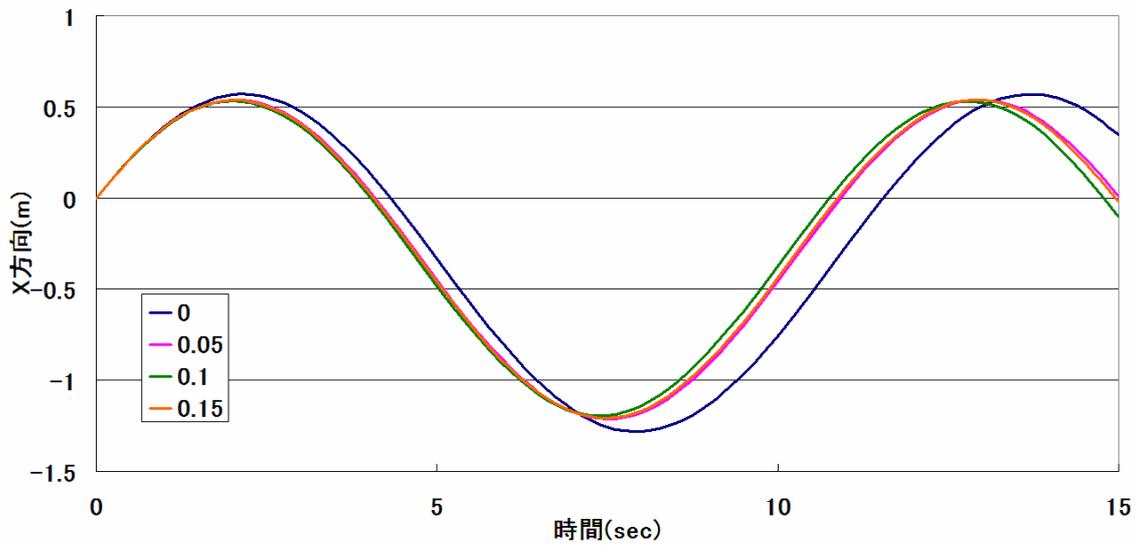
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.18(e) 重心の位置による周期及び  
旋回半径の違い**



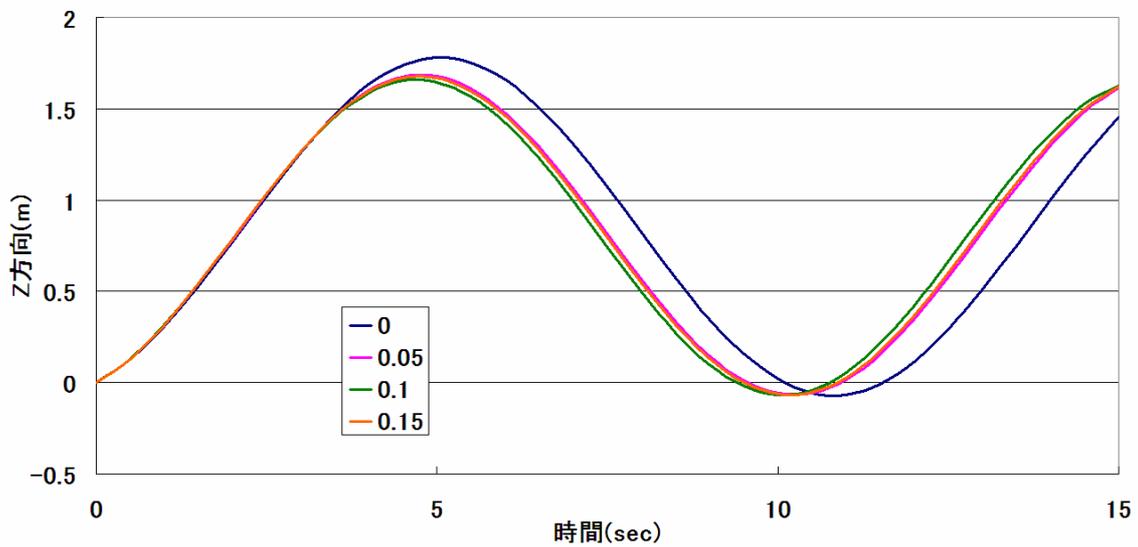
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.19(a) 重心の位置による  $\omega_Y$  の変化**



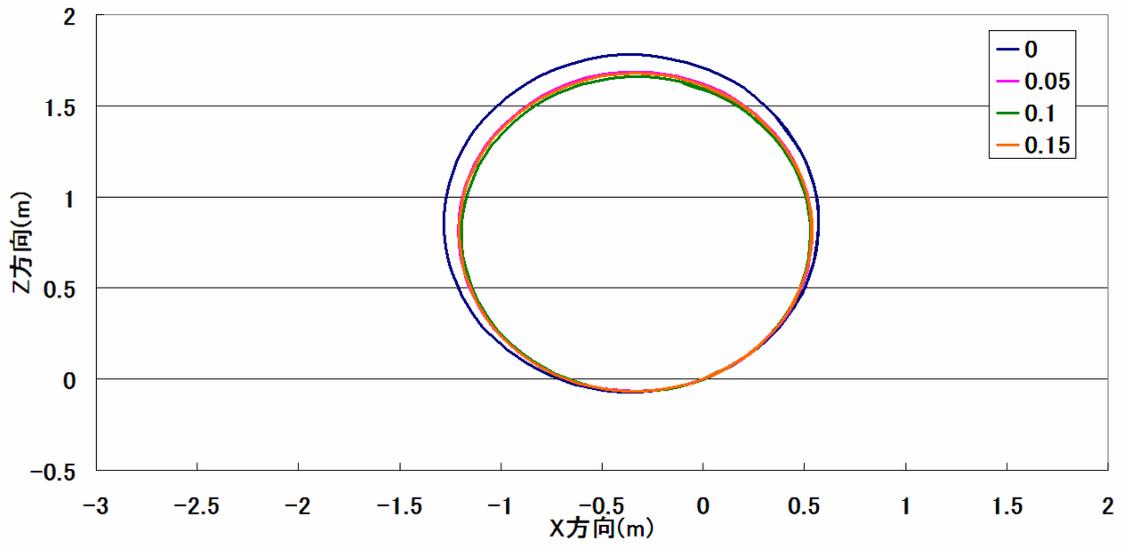
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.19(b) 重心の位置による X 方向の時間変化**



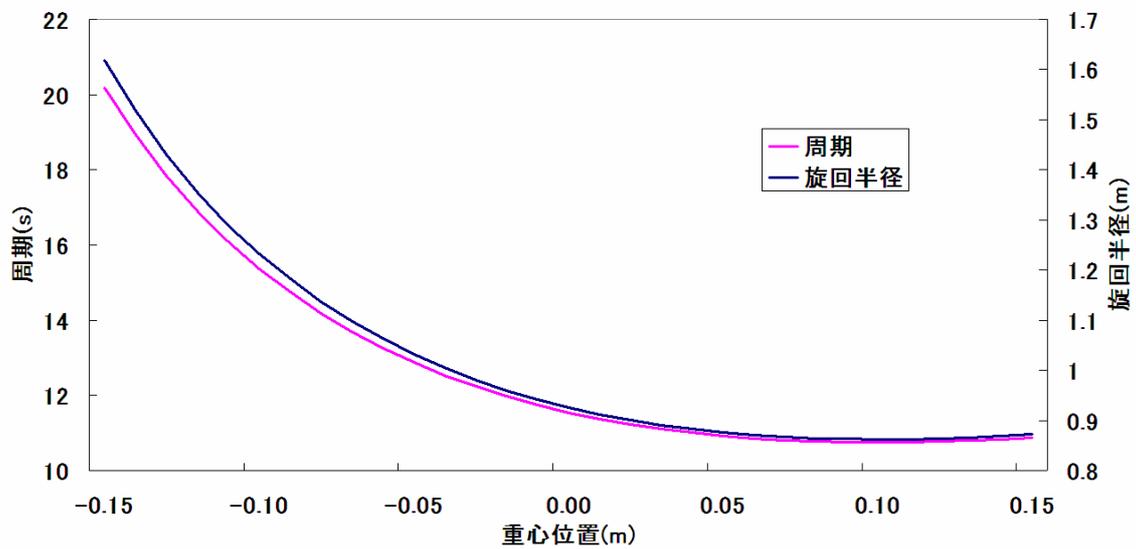
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.19(c) 重心の位置による Z 方向の時間変化**



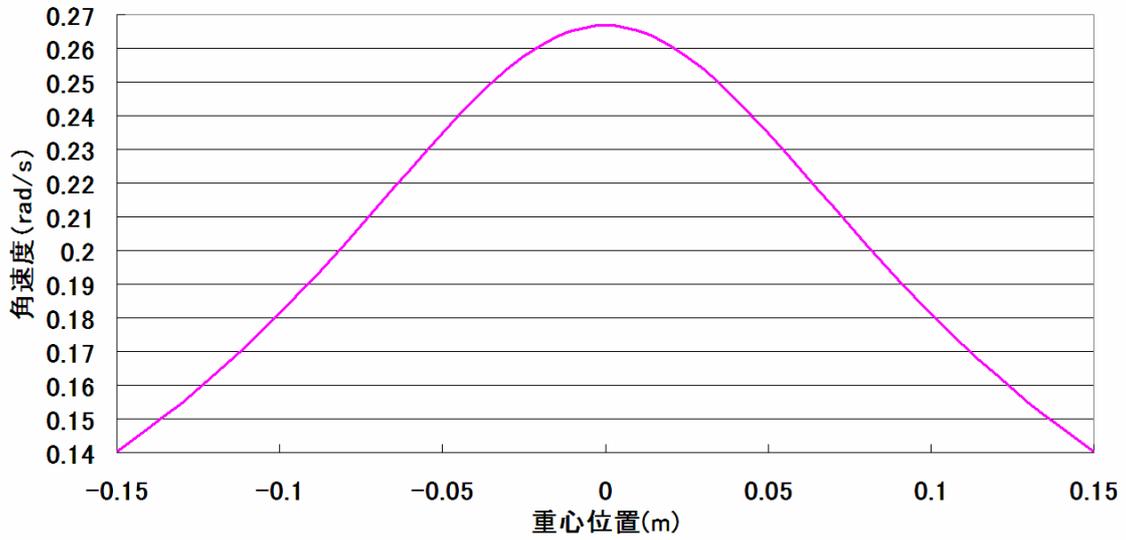
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig4.19(d) 重心の位置による上下旋回の軌跡の違い**



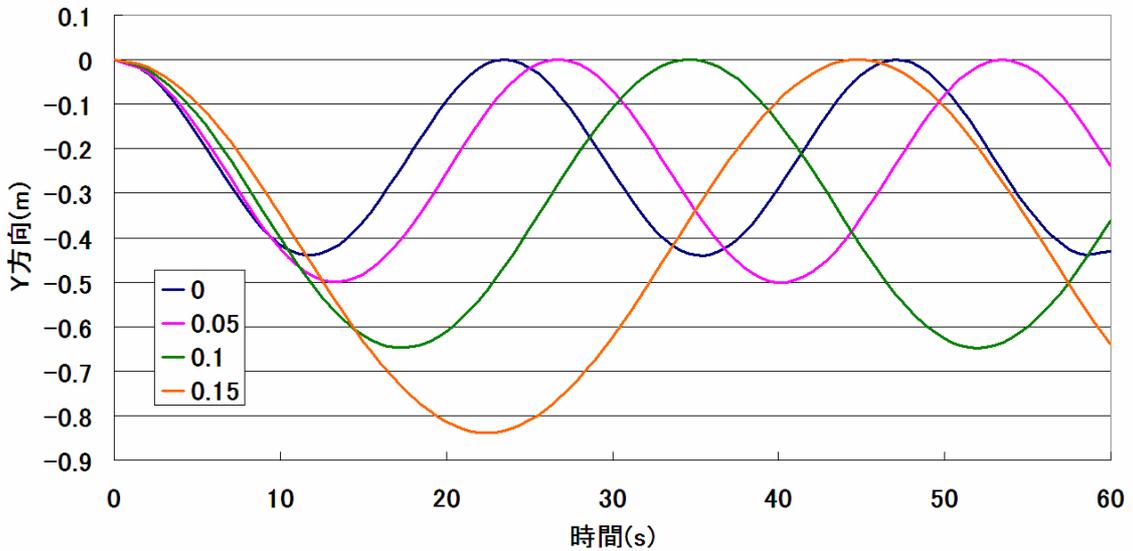
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.19(e) 重心の位置による周期及び  
旋回半径の違い**



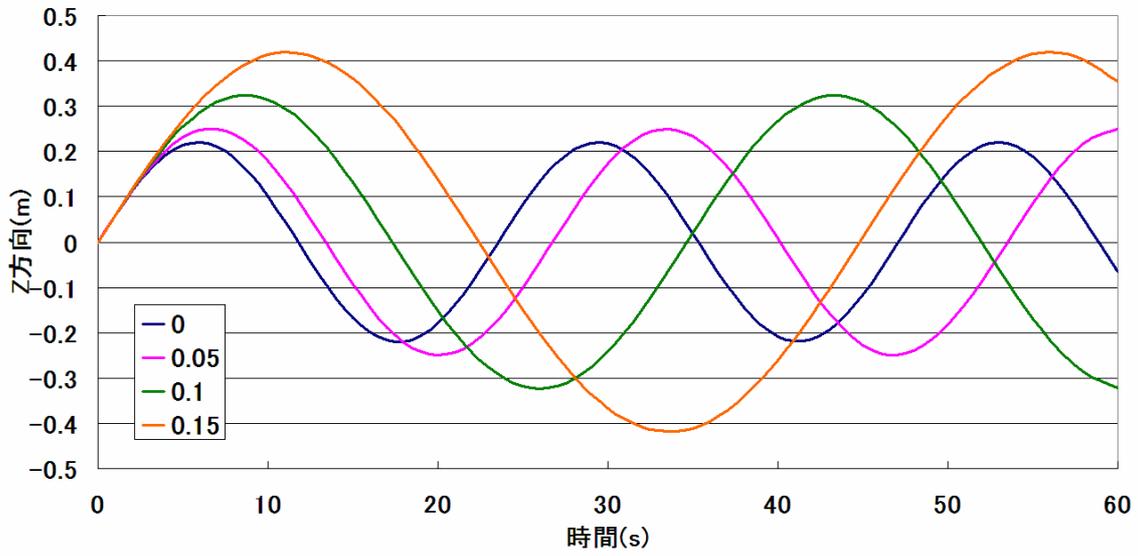
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig4.20(a) 重心の位置による  $\omega_x$  の変化**



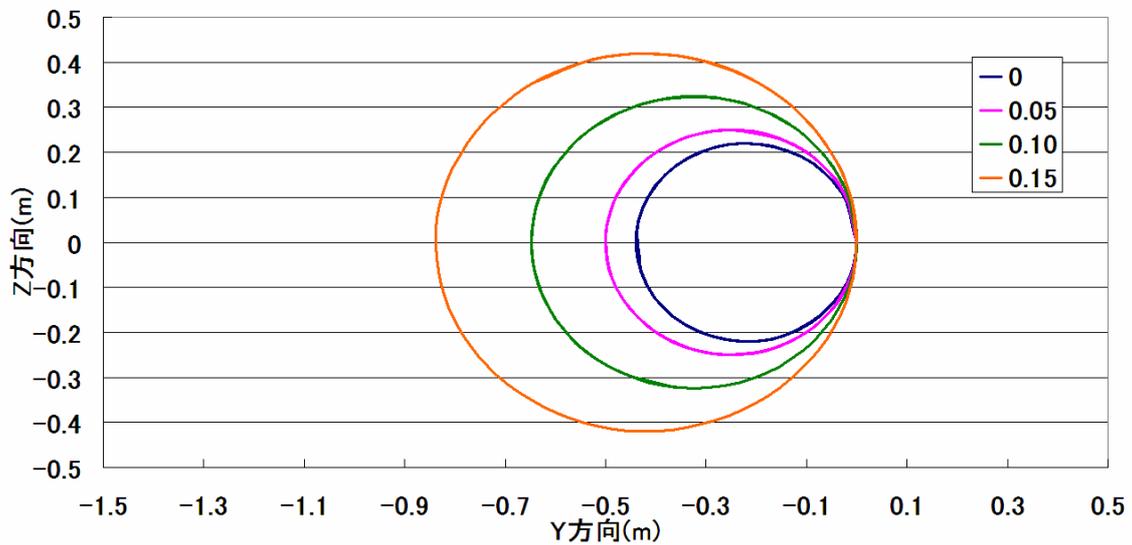
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.20(b) 重心の位置による Y 方向の時間変化**



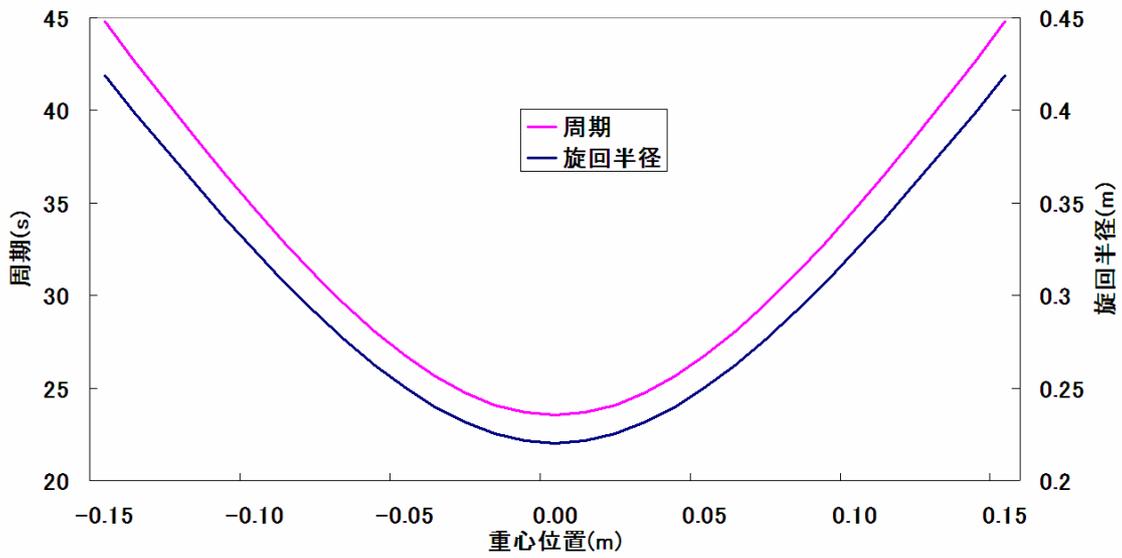
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.20(c) 重心の位置による Z 方向の時間変化**



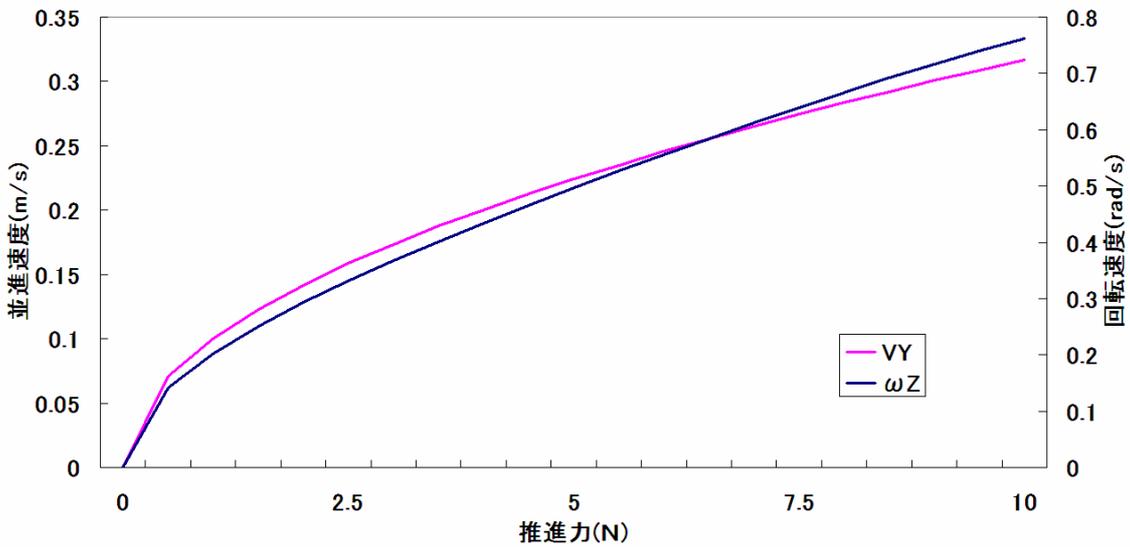
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.20(d) 重心の位置による螺旋運動の軌跡の違い**



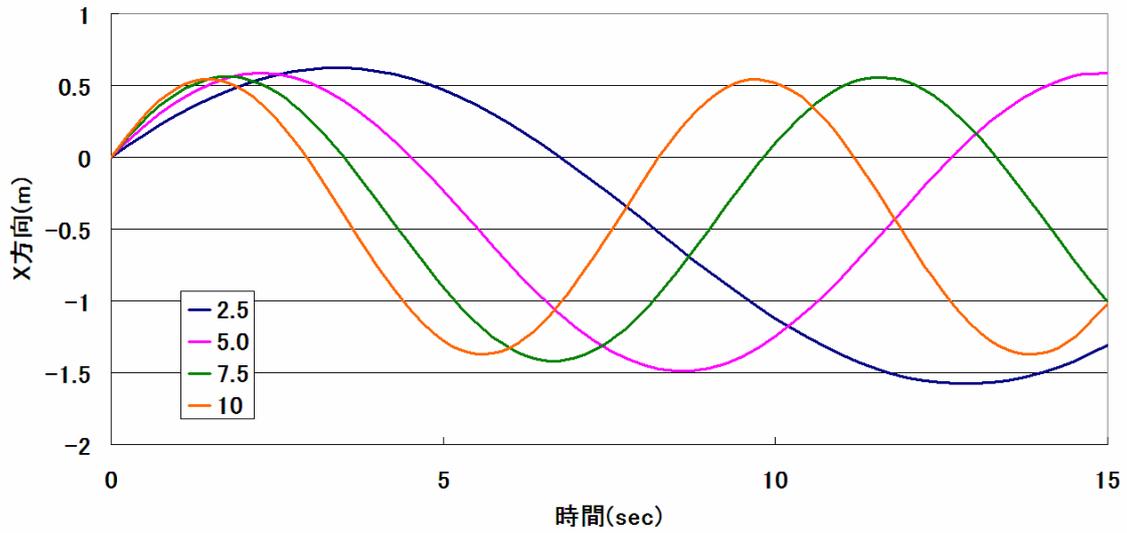
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_P = 0^\circ, \beta_T = 0^\circ$$

**Fig.4.20(e) 重心の位置による周期及び  
旋回半径の違い**



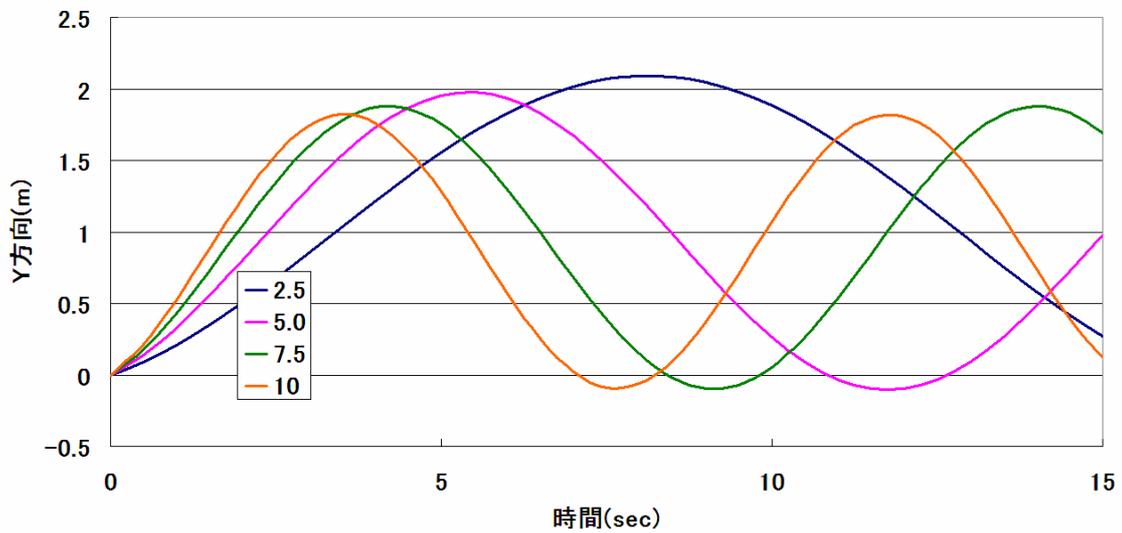
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig4.21(a) 推進力による  $V_Y, \omega_Z$  の変化**



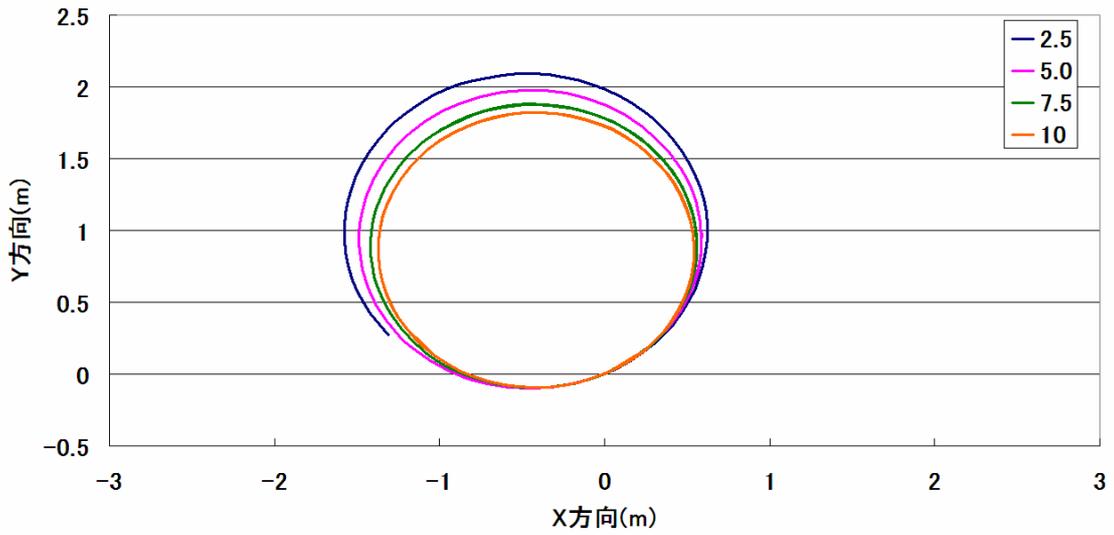
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.21(b) 推進力による X 方向の時間変化**



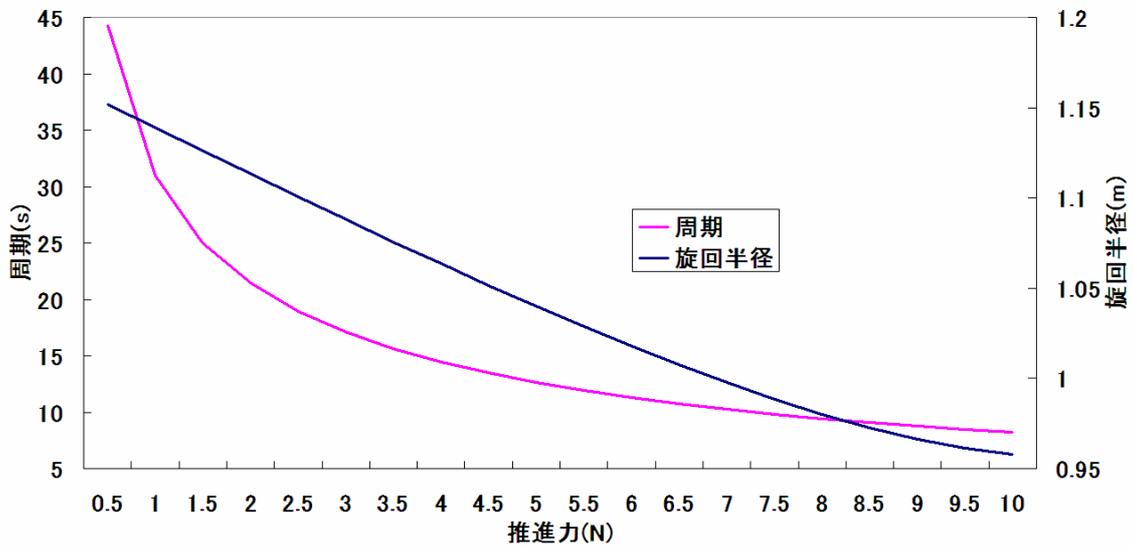
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.21(c) 推進力による Y 方向の時間変化**



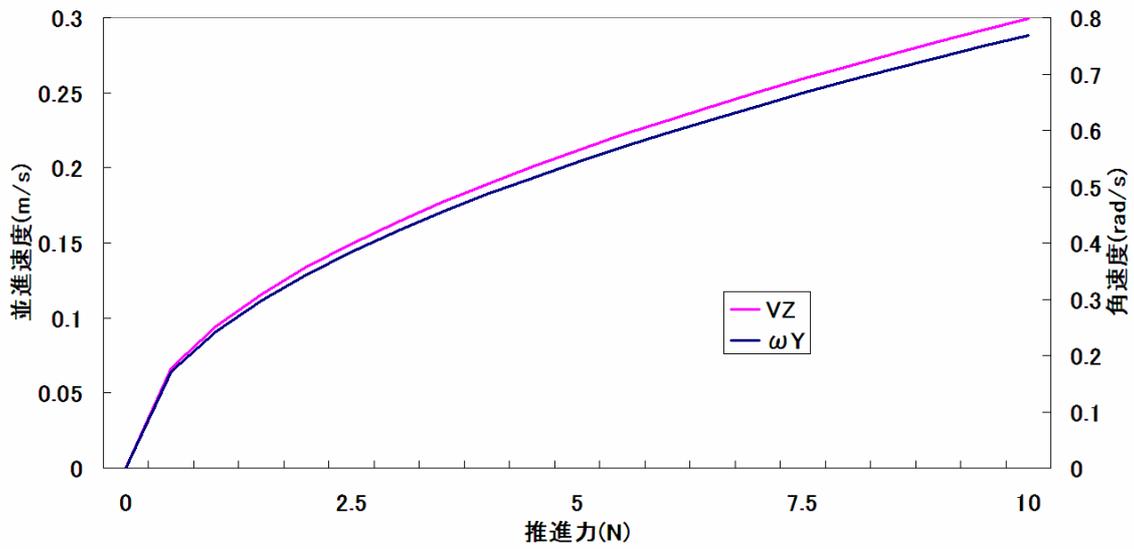
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig4.21(d) 推進力による左右旋回の軌跡の違い**



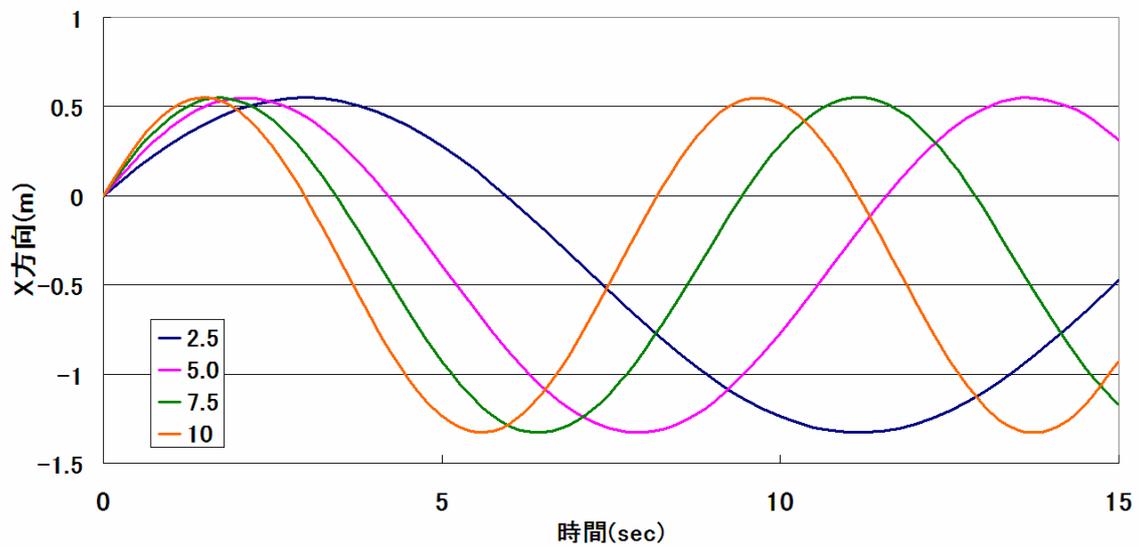
$$\beta_{WR} = 0^\circ, \beta_{WL} = 0^\circ, \beta_{PB} = 10^\circ, \beta_{TB} = 20^\circ$$

**Fig.4.21(e) 推進力による周期及び旋回半径の違い**



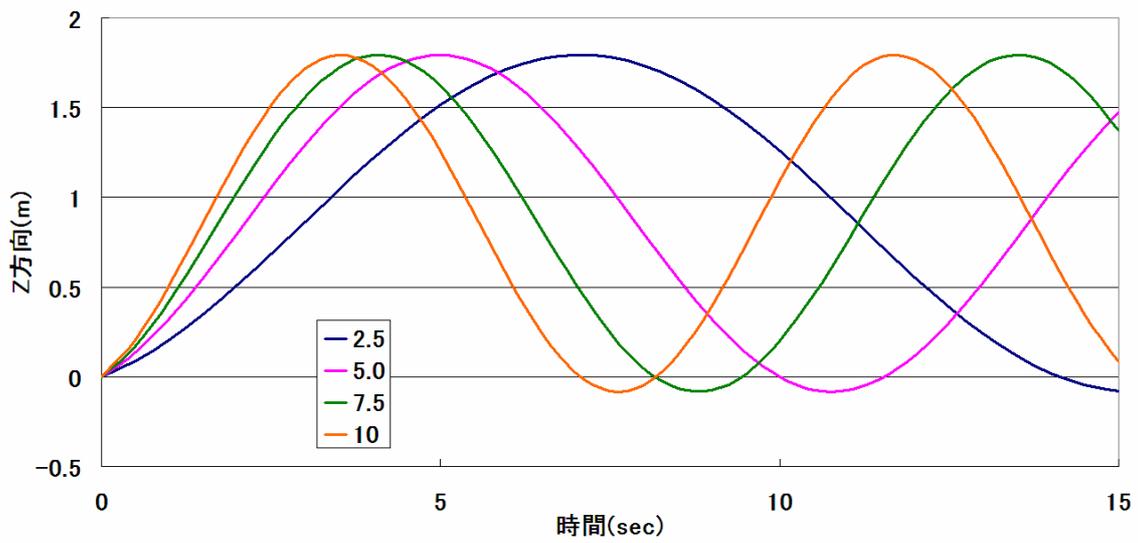
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.22(a) 推進力による  $V_Z, \omega_Y$  の変化**



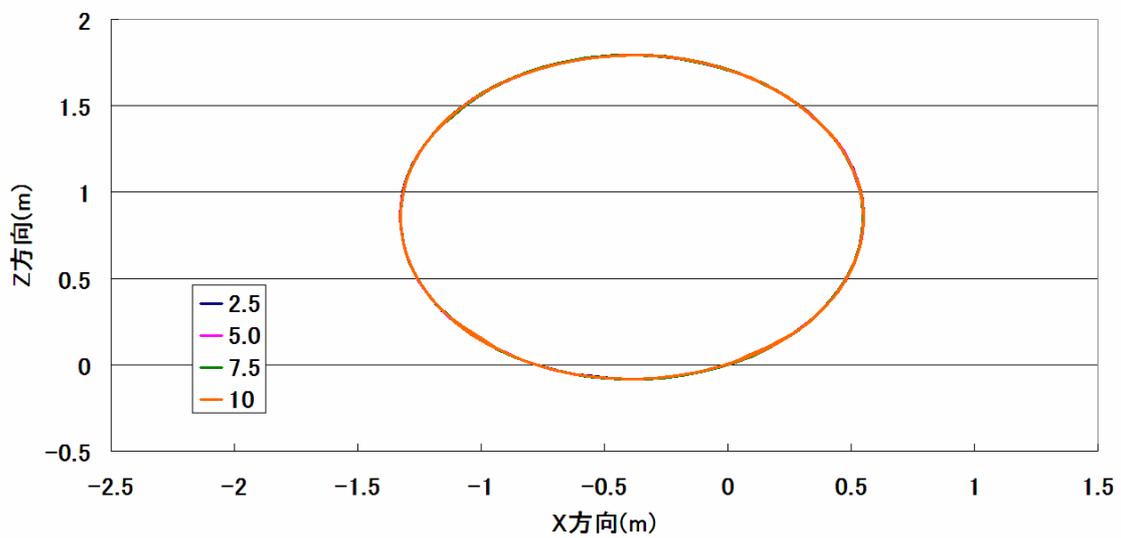
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.22(b) 推進力による X 方向の時間変化**



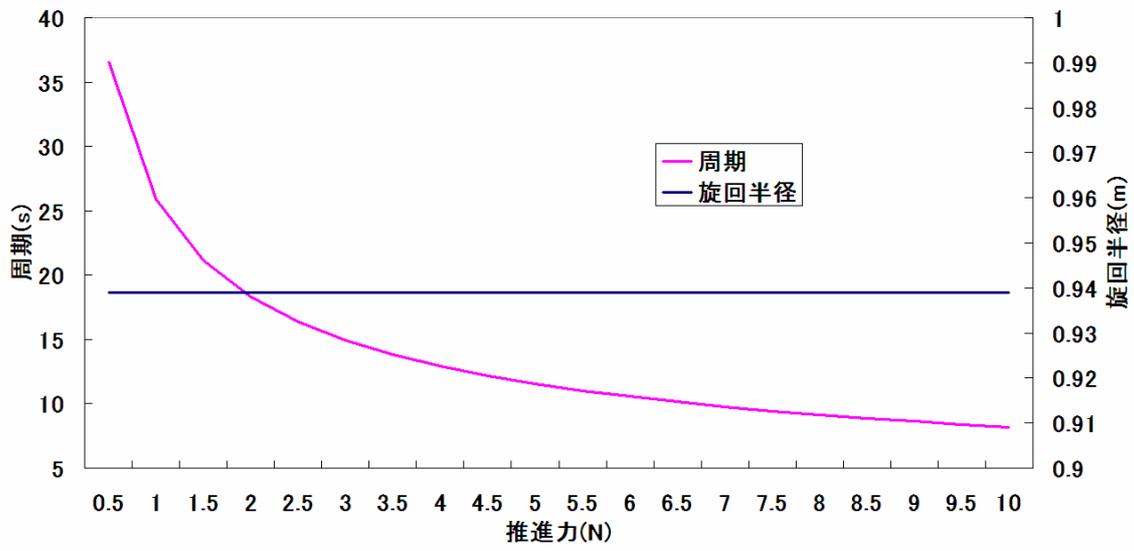
$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.22(c) 推進力による Z 方向の時間変化**



$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.22(d) 推進力による軌跡の違い**



$$\beta_{WR} = 10^\circ, \beta_{WL} = 10^\circ, \beta_{PL} = 10^\circ, \beta_{TL} = 20^\circ$$

**Fig.4.22(e) 推進力による周期及び旋回半径の違い**

## 第5章 結言

本研究では海中作業ロボットの高性能化を目指して、魚ロボットの多自由度運動解析方法の提案を行うと共に、実際に魚ロボットの設計をして解析を行い、解析式の評価及び検討を行う目的で以下のようなことを行った。

1. 揚力係数及び抗力係数を用いずに揚力及び抗力の計算を行う考え方について提案した。
2. その計算式を用い、魚ロボットの多自由度運動解析における解析方法の提案を行った。
3. モデルを考え、提案した解析方法を用いて、モデルの運動解析を行った。
4. 解析結果を元に提案した解析式について検討を行った。

その結果、簡易的ではあるが魚ロボットの多自由度運動解析について新たな解析方法についての提案を行うことができた。ただし、粘性や安定性などが入っていないため、実際の現象とは異なっていると考えられるものもあった。そのため、モデルの試作を行った上でどのくらいの誤差が生じるのか調べる必要はあると考えられる。

最後に提案した計算式について、さらに粘性や安定性などの要素をいれて、精度を高めていくことができれば、海中作業ロボットの高性能化を実現することができると考えられる。

なお、今回は定常動作についてのみ解析しているが、魚ロボットの質量及び慣性モーメントを加味することができれば、ルンゲクッタ法等を用いることにより、過渡特性についても解析を行うことが可能である。

## 謝辞

本研究は、(独)海上技術安全研究所において、同研究所の平田宏一主任研究員の指導の下で実施された。平田宏一主任研究員をはじめとするスタッフの方々に、この場を借りて御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1)土肥実夫： 解り易い新航空論  
<http://www7a.biglobe.ne.jp/~do-high/>
- 2)機械工学便覧 編
- 3)平田宏一：魚ロボットホームページ  
<http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish>