

平板ブーメランの旋回飛行について (Ⅲ)

2007年8月29日

未来科学技術情報館 技術相談員 尾崎 哲

(1) 目的

翼に迎え角あるいは上反角を持たない『平板ブーメラン』の旋回飛行のメカニズムを解明するため、支配的な因子を取り上げて実験・評価し、実験式に基づいて平板ブーメランの飛行軌道を計算するとともに、翼の揚力を含む影響因子について比較検討する。

(2) 概要

a. 背景

ブーメランの旋回飛行のメカニズムについては、定性的な通説があるだけで、これまで定量的な議論が十分になされていない。したがって、宇宙ステーションのような無重力場でブーメランがどのように飛行するかは予測できないとされている。

一方、『平板ブーメラン』という、翼に迎え角あるいは上半角を持たない特殊なブーメランがあり、それでも旋回飛行することが知られている。しかし、一般のブーメランに適用される通説では翼に迎え角があることが必須で、『平板ブーメラン』には適用できないために、『平板ブーメラン』がなぜ旋回飛行できるのかについては理論的な検討がされていない。

そこで、平板ブーメランの飛行をつぶさに観察した結果から、平板ブーメランが旋回飛行をする要因は、『自転によって等方化された平板翼が、水平方向の初速による飛行から重力によって落下を始める際に、気流に対して迎え角が生じて揚力を発生させるが、その後は揚力によって迎え角が徐々に増大し、最終的には気流に正対する方向に向かう』ことであるとの仮説に至った。自転の効果は、主として自転軸の維持による飛行姿勢の安定にあるが、等方化された平板翼では翼の間隙を抜ける気流が減少することから生ずる『翼面積の見かけの増大』にも着目した。

ここでは、この仮説に基づいて、『気流による迎え角の増大』、『迎え角と揚力係数』、『揚力係数と抗力係数』、『翼面積の自転による見かけの増大』、の各関係式を、平板ブーメランの自転落下実験により求め、これらの実験式に基づく計算法を開発して、典型的な平板ブーメランの飛行をシミュレーションしたほか、一般のブーメランを模擬したフラップ付き平板ブーメランの飛行、さらに、平板ブーメランとフラップ付き平板ブーメランの無重力場での飛行についてもシミュレーションし、相互に比較した。

b. 『平板ブーメラン』の飛行の観察

典型的な平板ブーメランとして、4枚翼の十文字形紙製ブーメランを取り上げる。0.66mm

厚の板目紙で、長さ 20.5cm、幅 2cm の長方形を 2 枚、カッターで切り抜き、この 2 枚をそのまま組み合わせ、中央部を十文字形に両面テープで貼り付ける。この寸法で、自重は約 4.0g となる。投げ方は、平板ブーメランの表裏と一翼を任意に選び、右利きの場合、右手の親指と人差し指で挟み、そのまま右手を斜め上に挙げて、後ろから見た場合に、頭上から右、時計回りに約 20 度傾けた状態で立て、手首のスナップを効かせて前方にほぼ水平に放出する。

なお、以下では、平板ブーメランの放出時の前方向を x 軸の正方向、左方向を y 軸の正方向、上方（重力の逆方向）を z 軸の正方向として扱う。

この『平板ブーメラン』の典型的な飛行パターンとして、

- ① 大人が直立した状態で、前述の投げ方で投げると、左（y 軸の正方向）へ旋回し、ほぼ一周して戻る。旋回範囲（直径）は 3m~4m、滞空時間は 2~3 秒、着地までの回転数は 5~6 回であり、平均速度は約 4m/s、平均回転速度は約 2rps となる。
- ② 飛行の経過は、一般的に、前期、中期、後期に区分できる。前期には高度と傾きを保ったまま直進する。中期には急に旋回を始め、高度を保ったまま、面の傾きを変えて水平に近づきながら、出発点に向き直る。後期には面をほぼ水平にして回転しながら、直線的に、あるいはやや緩い S 字形の軌道を描きながらゆっくり下降する。この間、自転は徐々に遅くなるが、着地まで継続して回転する。
- ③ ビデオ分析では、最遠点付近での自転軸の『傾き』は、z 軸から x 軸の負方向に 45 度ないし 60 度であり、初期の『傾き』である z 軸から y 軸の正方向に 70 度よりも『傾き』が減少し、自転軸が立ち上がっている。

などが、観察された。

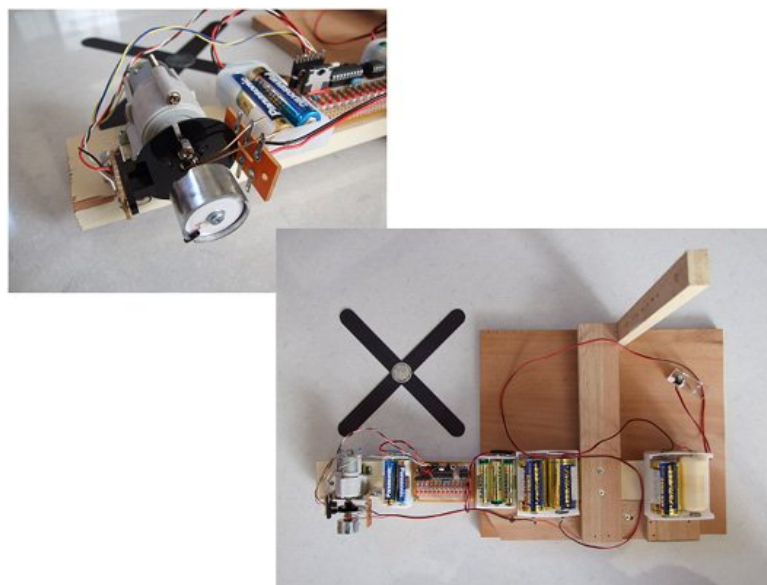
（3） 方法

『平板ブーメラン』に自転を加えながら『迎え角』を設定できる『落下実験装置』を自作し、平板ブーメランの飛行状況を動画カメラで撮影して、落下中の迎え角の増大を評価したほか、揚力係数 C_L と抗力係数 C_D を評価して実験式を導いた。さらに、平板ブーメランの自転による翼面積の増大係数 F_s を実験的に求め、エクセルのマクロ（VBA）を用いて飛行軌道のシミュレーションを行った。

a. 実験装置

実験装置と試験体を図-1 に示す。試験体の中央には $\phi 20\text{mm}$ の鉄片（0.94g）を貼り付け、落下装置の電磁石で通電保持する。傾斜台は、スケールを用いて 10 度刻みで『迎え角』を設定できる。自転の回転数は、ギアで減速したモーターをマイコンで制御するほか、モーターに同期したシャッターとフォトダイオードの回路で回転を検出し、LED に表示してカウントする。

図-1 試験装置と試験体



b. 実験方法 1

所定の『迎え角』に傾斜台を設定した後、試験体を落下装置で通電保持し、回転数をストップウォッチで計測して回転数を設定した。試験体を動画カメラで撮影しながら、電磁石を通電遮断することにより、落下させた。その後、動画を1秒30コマのコマ送り再生し、1/30秒毎に、スケールで落下の際の移動量を2次元測定するとともに、真横から見た試験体の角度を分度器で測定した。

c. 実験方法 2

翼面積の増大係数の測定には、傾斜台を『迎え角』90度を設定して、試験体を水平に通電保持または手で保持し、着地までに要した時間をストップウォッチで手動計測した。

(4) 評価の結果

自転速度、約2rpsおよび約4rpsの2条件について結果を整理した。また、比較のため、翼端中央部と翼端から50mmの位置を結んだ直線に沿って約15度折り下げたフラップ付きのブーメランについても約2rpsで落下実験を行った。

a. 落下中の『傾き』 ϕ の増分測定

『傾き』 ϕ と落下実験の『迎え角』 α には、 $\phi = \pi/2 - \alpha$ の関係があり、落下実験における『迎え角』の増加は『傾き』の減少と等価である。落下する方向からの気流によって試験体に揚力が水平方向に作用することで『迎え角』が増大することを考慮すれば、『傾き』 ϕ の増分 $\Delta\phi$ を ϕ で除した増大係数は、平板翼の揚力の式を準用すると、落下距離に比例し、平均速度の二乗に比例すると考えられる。実験結果を表-1に示す。

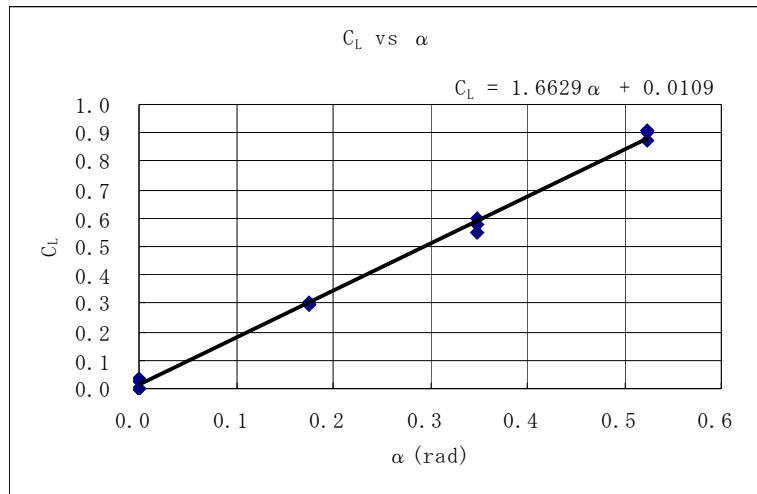
表-1 落下中の『傾き』 ϕ の増分 $\Delta\phi$

rps	$\Delta\phi / \phi / v_z^2 / \Delta z$	フラップ
2.34	0.155	無
4.63	0.075	無
2.01	0.400	有

b. 『迎え角』 α と揚力係数 C_L の実験式

落下時間 t_0 と移動距離 Δx を測定し、落下の運動方程式から導かれる $L=2W\Delta x/t_0^2$ を算出した後、 C_L は $L=(1/2)\rho SC_L v_0^2$ より逆算した。回転速度約4rpsでの結果と実験式の例を図-2に示す。

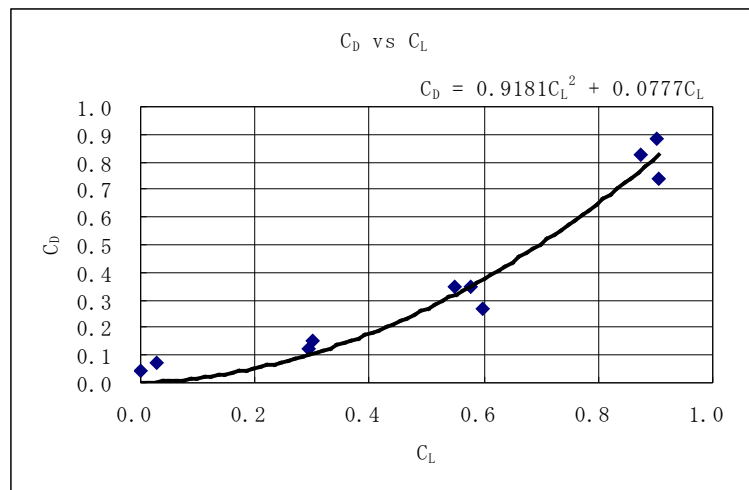
図-2



c. 揚力係数 C_L と抗力係数 C_D の実験式

落下時間 t_0 と落下距離 Δz を測定し、落下の運動方程式から導かれる $D=W(g-2\Delta z/t_0^2)$ を算出した後、 C_D は $D=(1/2)\rho SC_D v_0^2$ より逆算した。回転速度約4rpsでの結果と実験式の例を図-3に示す。

図-3



d. 自転による翼面積の増大係数 F_S

抗力 $D=(1/2)\rho SC_D v^2$ の式で、密度 ρ と抗力係数 C_D が変わらないと仮定すると、見かけの翼面積の増大係数 F_S は、平均速度 v に対して $F_S=S'/S=(D'/D)(v/v')^2$ で与えられる。抗力 D の代表値は、落下時間 t_0 から、落下の運動方程式に基づく $D=W(g-2h/t_0^2)$ により求める。落下実験の結果を表一2に示す。

表一2 自転による翼面積の増大係数 F_S

rps(/s)	t_0 (s)	v (m/s)	D (kgm/s ²)	F_S
0.00	0.67	1.41	0.029	1.00
6.09	0.98	0.97	0.040	2.93
4.48	0.89	1.06	0.038	2.33
2.30	0.81	1.18	0.036	1.78

(5) 計算の方法

3次元運動方程式を差分法で計算し、ステップごとの位置と速度を求めた。ただし、『迎え角』 α は、『傾き』 ϕ から実験式によって導いたほか、揚力係数 C_L は『迎え角』 α から、抗力係数 C_D は揚力係数 C_L から、それぞれ実験式により計算した。なお、揚力 L および抗力 D は、微小区間では一定として扱ったほか、パラメータとして採用した『進行角度』 δ の算出には、 z 方向の移動量を微小と仮定した。

a. 計算式

初期値：

$$\begin{aligned}
 x : \quad & Wd^2x/dt^2=-D \text{ より、} d^2x/dt^2=-D/W \\
 & (dx/dt)_0=v_0 \text{ より、} dx/dt=v_0-(D/W)t \\
 & x_0=0 \text{ より、} x=v_0t-(D/W/2)t^2 \\
 y : \quad & Wd^2y/dt^2=L\sin\phi \text{ より、} d^2y/dt^2=L\sin\phi/W \\
 & (dy/dt)_0=0 \text{ より、} dy/dt=(L\sin\phi/W)t \\
 & y_0=0 \text{ より、} y=(L\sin\phi/W/2)t^2 \\
 z : \quad & Wd^2z/dt^2=L\cos\phi-Wg \text{ より、} d^2z/dt^2=(L\cos\phi-Wg)/W \\
 & (dz/dt)_0=0 \text{ より、} dz/dt=\{(L\cos\phi-Wg)/W\}t \\
 & z_0=h \text{ より、} z=h+\{(L\cos\phi-Wg)/W/2\}t^2
 \end{aligned}$$

差分：

$$\begin{aligned}
 x : \quad & Wd^2x/dt^2=-L\sin\phi\sin\delta-D\cos\delta \text{ より、} \\
 & d^2x/dt^2=-(L\sin\phi/W)\sin\delta-(D/W)\cos\delta \\
 & dx/dt=(dx/dt)_1+\{-(L\sin\phi/W)\sin\delta-(D/W)\cos\delta\}t \\
 & x=x_1+(dx/dt)_1t+\{-(L\sin\phi/W/2)\sin\delta-(D/W/2)\cos\delta\}t^2
 \end{aligned}$$

y : $Wd^2y/dt^2=L\sin\phi\cos\delta-D\sin\delta$ より、

$$d^2y/dt^2=(L\sin\phi/W)\cos\delta-(D/W)\sin\delta$$

$$dy/dt=(dy/dt)_1+\{(L\sin\phi/W)\cos\delta-(D/W)\sin\delta\}t$$

$$y=y_1+(dy/dt)_1t+\{(L\sin\phi/W/2)\cos\delta-(D/W/2)\sin\delta\}t^2$$

z : $Wd^2z/dt^2=L\cos\phi-Wg$ より、

$$d^2z/dt^2=(L\cos\phi-Wg)/W$$

$$dz/dt=(dz/dt)_1+\{(L\cos\phi-Wg)/W\}t$$

$$z=z_1+(dz/dt)_1t+\{(L\cos\phi-Wg)/W/2\}t^2$$

『進行角度』 δ :

$$\tan\delta=\Delta y/\Delta x$$

『迎え角』 α と 『傾き』 ϕ :

$$\tan\alpha_0=0$$

$$\tan\alpha_1=-\{(z_1-z_0)/(x_1-x_0)\}\cos\phi_0$$

$$\tan\alpha_i=-\{(z_i-z_{i-1})/\{(x_i-x_{i-1})^2+(y_i-y_{i-1})^2\}^{1/2}\}\cos\phi_{i-1}$$

b. 実験式 (回転速度約 4rps の場合)

① 『傾き』 ϕ の増分 $\Delta\phi$ と速度 v_z の実験式 : $\Delta\phi/\phi/v_z^2/\Delta z=0.075$

② 『迎え角』 α と揚力係数 C_L の実験式 : $C_L=1.6629\alpha+0.0109$

③ 抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の実験式 : $C_D=0.9181C_L^2+0.0777C_L$

④ 自転による翼面積の増大係数 : $F_S=2.33$

c. 計算の手順

① 初期値を設定する。

② 前のステップの諸量に基づき、 t に対する x 、 y 、 z 、 dx/dt 、 dy/dt 、 dz/dt 、 v を計算する。

③ δ を計算する。

④ $\Delta\phi$ を計算し、 α 、 C_L 、 L 、 C_D 、 D を計算する。

⑤ 次のステップを計算する。

(5) 計算の結果

初速度 $v_0=6\text{m/s}$ 、初期傾き $\phi_0=70$ 度としたときの x - y 平面の計算結果を図-4に、 x - z 平面の計算結果を図-5に示す。なお、回転速度は約 4rps とし、1 ステップは 0.1 秒きざみで、20 ステップを計算し、1 ステップの進行距離は 0.60~0.79m (平均 0.72m) であった。

図-4 計算結果の例 (x - y 平面)

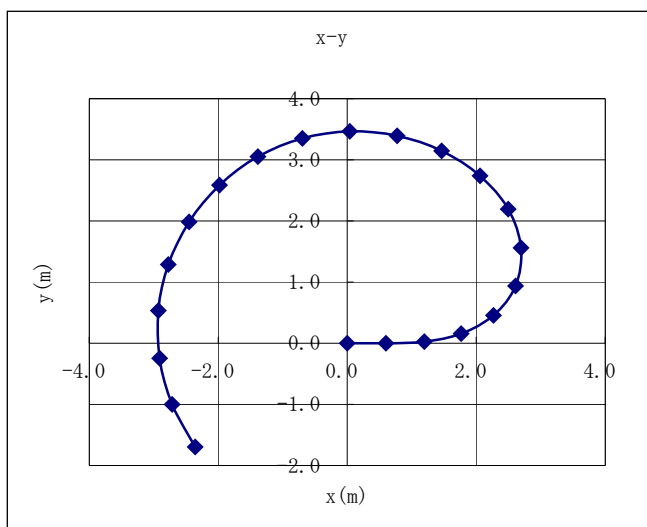
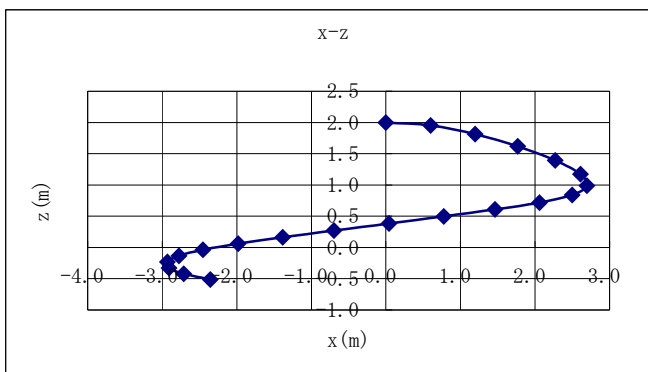


図-5 計算結果の例 (x - z 平面)



(6) 計算結果の評価

自転軸を z 軸の正方向から y 軸の正方向に 70 度傾斜させた典型的な『平板ブーメラン』に、水平で、 x 軸の正方向に初速度を 6m/s で与えた場合の旋回飛行の様子が計算でほぼ再現できた。

(7) 比較計算の結果と考察

a. 低回転速度約 2rps の場合：

各実験式を以下に示す。

- ① 『傾き』 ϕ の増分 $\Delta\phi$ と速度 v_z の実験式： $\Delta\phi/\phi/v_z^2/\Delta z=0.155$
- ② 『迎え角』 α と揚力係数 C_L の実験式： $C_L=1.5072\alpha+0.0518$
- ③ 抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の実験式： $C_D=0.8142C_L^2-0.0488C_L$
- ④ 自転による翼面積の増大係数： $F_S=1.78$

計算結果を図-6に示す。前出の回転速度約 4rps の場合に比べて、旋回範囲が大きくなっている。このことから、回転速度が大きいと旋回範囲は小さくなることが分かる。

b. 翼面積の増大を考慮しない場合：

前出の典型的な『平板ブーメラン』の計算において、翼面積の増大係数 F_S を $F_S=1$ とし、計算した結果を図-7に示す。翼面積を考慮した場合と比較して、旋回が不完全に終わっている。このことから、ブーメランにおいては、自転による翼面積の見かけの増大が旋回の要因の一つであることが分かる。

c. 『フラップ付き』の場合：

各実験式を以下に示す。なお、落下実験における回転速度は約 2rps であった。

- ① 『傾き』 ϕ の増分 $\Delta\phi$ と速度 v_z の実験式： $\Delta\phi/\phi/v_z^2/\Delta z=0.400$
- ② 『迎え角』 α と揚力係数 C_L の実験式： $C_L=2.0959\alpha+0.1504$
- ③ 抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の実験式： $C_D=0.6639C_L^2+0.1478C_L$
- ④ 自転による翼面積の増大係数： $F_S=1.78$

計算結果を図-8に示す。フラップなしの『平板ブーメラン』と比較して、旋回範囲がより小さくなり、落下距離も小さくなっているが、旋回飛行の傾向が大きく変わることはない。このことから、フラップの有無、すなわち翼自体の『迎え角』の有無で旋回飛行のメカニズムが異なるものではないことが分かる。

d. 無重力場の場合：

重力加速度 $g=0$ として計算した『平板ブーメラン』の計算結果を図-9に、『フラップ付き』の計算結果を図-10に示す。『平板ブーメラン』では、投げた方向に直線的に進行するのに対して、『フラップ付き』ではやや拡大した『らせん状』に旋回しながら上昇する。このことから、フラップなしの『平板ブーメラン』が旋回するには重力による落下が不可欠であることが分かる。

(8) 結論

a. 『平板ブーメラン』の自転落下実験により主要な実験式を求めることにより、『平板ブーメラン』の旋回飛行を計算でほぼ再現できた。このことにより、『平板ブーメラン』の旋回飛行において、『自転によって等方化された平板翼が、水平方向の初速による飛行から重力によって落下を始める際に、気流に対して迎え角が生じて揚力を発生させるが、その後は揚力によって迎え角が徐々に増大し、最終的には気流に正対する方向に向かう』ことであるとの仮説が検証できた。

b. 自転の回転速度の違い、自転による翼面積の増大係数の採否、フラップの有無、重力場と無重力場の違いについて、比較計算を行い、自転、翼自体による揚力、重力の各効果について検討した。

図-6 低回転速度約 2rps の計算結果

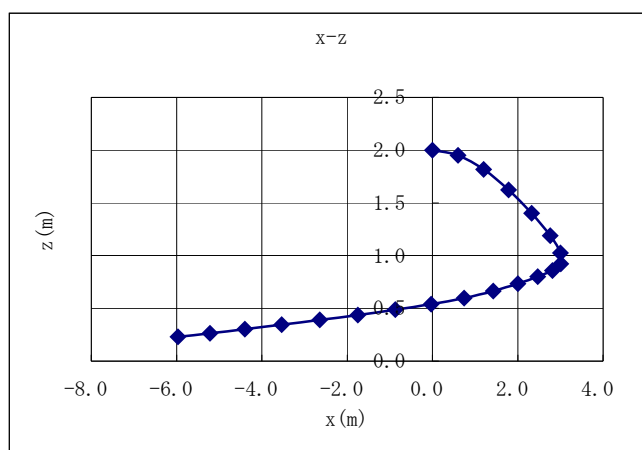
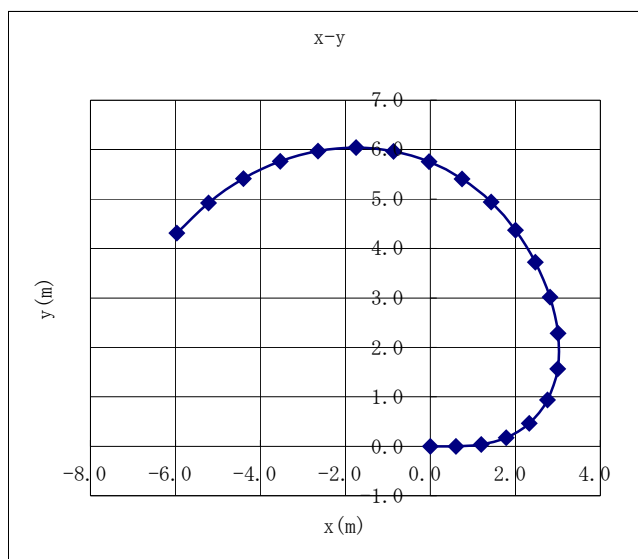


図-7 翼面積の増大を考慮しない場合の計算結果

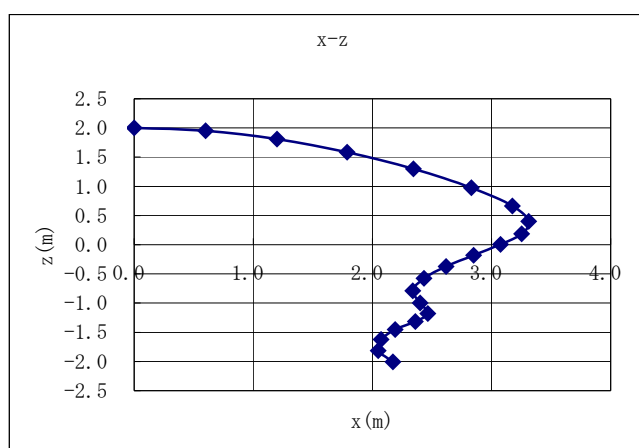
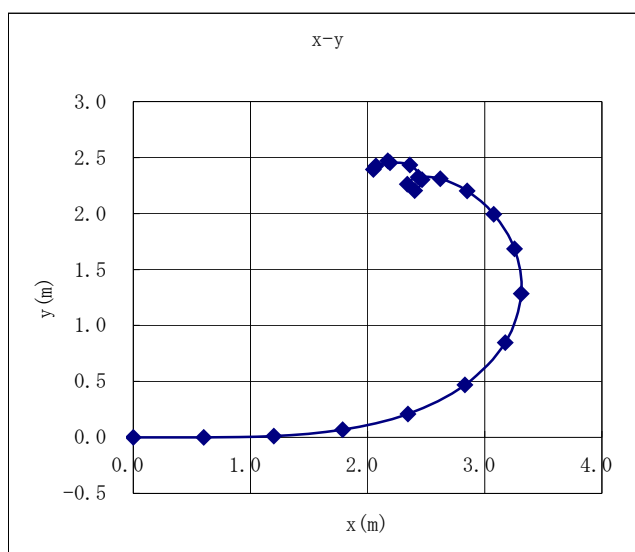


図-8 『フラップ付き』の場合の計算結果

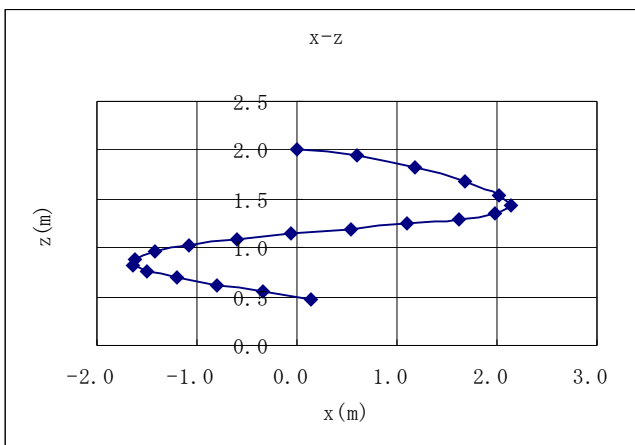
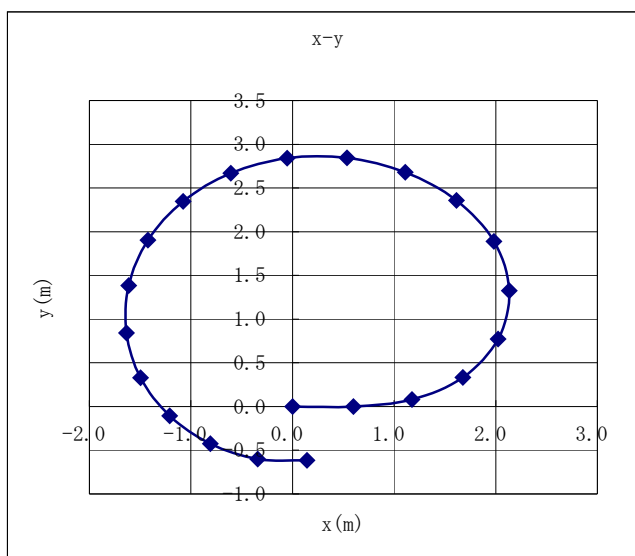


図-9 重力加速度 $g=0$ として計算した『平板ブーメラン』の計算結果

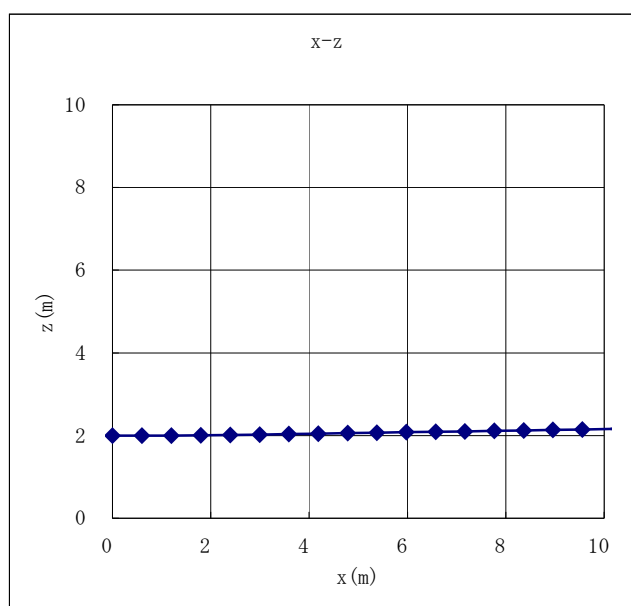
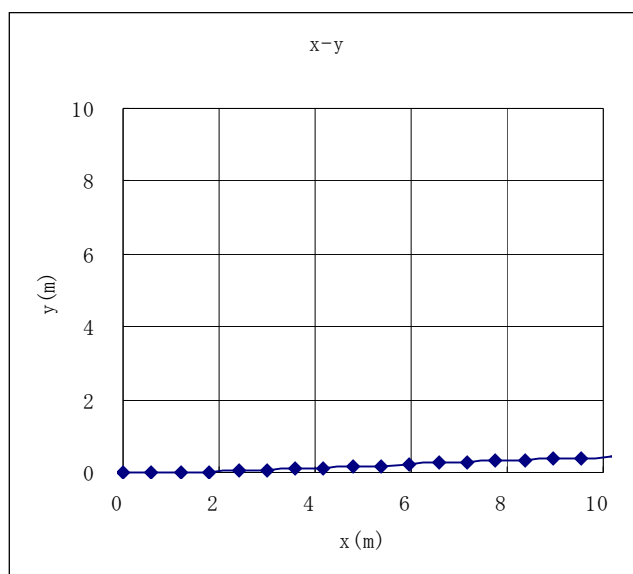


図-10 重力加速度 $g=0$ として計算した『フラップ付き』の計算結果

