

ターボジャブの空力特性の計測

山本翔平^{*1}, 山本健太^{*1}, 中嶋智也^{*2}, 板野智昭^{*3}, 関眞佐子^{*4}

Measurements of Flight Characteristics of Turbo-Javs

Shouhei YAMAMOTO^{*1}, Kenta YAMAMOTO, Tomoya NAKAJIMA,

Tomoaki ITANO and Masako SUGIHARA-SEKI

^{*1} Kansai University, 3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

The “turbo-jav” which is used for the javelic throw in the junior Olympic games has four fins at its tail unlike a spear used for the javelin throw. In order to investigate the aerodynamic characteristics of the turbo-jav, we performed wind tunnel tests, throwing experiments and numerical simulations for the flight of the turbo-jav. In the wind tunnel test, we measured the drag force, lift force and pitching moment acting on the turbo-javs in a low speed wind tunnel at the flow speed up to 25 m/s. The experimental results showed that these aerodynamic coefficients are almost constant irrespective of the Reynolds number for given angles of attack when the flow speed is larger than about 12.5 m/s. The moment coefficient was found to decrease from zero with increasing angle of attack from zero. In accord with this property for the pitching moment, throwing experiments showed that the turbo-javs fly stably with oscillating angle of attack around 0. The flying distance, the orbit and the variation of angle of attack for turbo-javs launched by a launcher agree closely with the numerical simulation performed based on the wind tunnel test. The turbo-javs launched by the launcher are found to fly without rolling whereas the turbo-javs thrown by athletes rotate considerably. A comparison of the throwing experiments by athletes with those by the launcher suggested that the turbo-javs flying without rolling could reach farther than turbo-javs with rolling for the same initial conditions.

Key Words : Turbo-jav, Drag, Lift, Pitching Moment, Tail fins

1. 緒 言

中学生の陸上競技の投擲種目であるジャベリックスローでは、ターボジャブと呼ばれる投擲用具が用いられる。図1に示すターボジャブ（ニシスポーツ T5109）は、本体がポリエチレン製、穂先がエラストマー製で、内部は中空である。全長が70cm、質量が300gで、先端から約42cmの位置に重心があり、重心位置における直径が3.6mmである。尾翼として4枚の羽を有する点が槍投げのやりと大きく異なる特長である。これまでターボジャブの飛行特性に関して、リリース時の初期条件と飛距離の関係等の研究⁽¹⁾はあるものの、流体力学的な研究はほとんどなされていない。本研究では、風洞実験、投射実験および数値シミュレーション⁽²⁾により、ターボジャブの飛行特性を調べたので報告する。

2. 実 験 方 法

2・1 風洞実験

風洞実験は、最大風速約25m/s、断面1.0m×1.5m、長さ3.0mの測定部をもつ大阪府立大学工学部機械工学科

^{*1} 関西大学大学院理工学研究科（〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35）

^{*2} 正員、大阪府立大学

^{*3} 関西大学システム理工学部

^{*4} 正員、関西大学システム理工学部

E-mail: k422435@kansai-u.ac.jp



Fig. 1 Turbo-jav.

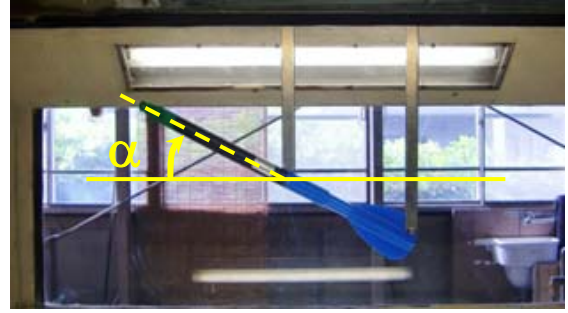


Fig. 2 Side view of the turbo-jav in the wind tunnel.
Angle of attack is expressed as α .

のゲッチング型風洞装置を用いた。測定部上部には、抗力、揚力、およびピッチングモーメント（以下、モーメント）の三分力を計測する天秤装置が設置されている。図2に示すように、ターボジャブの重心位置をメインストラットにより回転支持し、メインストラットの後方 30cm の位置（羽の位置）をサブストラットで支持することにより、三分力の計測を行った（2点支持）。このとき、ターボジャブの4枚の羽のうち2枚が鉛直となるように支持した。また、メインストラットのみで支持した場合に抗力と揚力の計測も併せて行った（1点支持）。ストラットはアルミ製で、流線型の断面形状をもつ。実験条件は、文献⁽¹⁾および投射実験のデータを参考にして、風速 $U=12.5\sim 25$ m/s, 迎え角（ターボジャブが流れ方向に対してなす角, 図2参照） $\alpha = -5^\circ \sim 35^\circ$ とした。

ターボジャブの全長 l を用いてレイノルズ数を $Re = Ul/\nu$ と定義する。ただし、 ν は空気の動粘性率である。各風速 U , 迎え角 α に対して計測された抗力 D , 揚力 L , モーメント M の値から次のように抗力係数 C_d , 揚力係数 C_l , およびモーメント係数 C_m を求めた。

$$C_d = \frac{D}{(1/2)\rho U^2 S}, \quad C_l = \frac{L}{(1/2)\rho U^2 S}, \quad C_m = \frac{M}{(1/2)\rho U^2 S(l/2)} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 S は重心位置におけるターボジャブの断面積である。

ストラットに作用する力の抗力への影響を調べるため、メインストラット単体に働く抗力 D_0 の計測も行なった。このとき、ターボジャブがあるときの流れを再現するため、メインストラットから少し下方にターボジャブを設置した状態で抗力の計測を行った。

2・2 投射実験

投射実験は、(1) 投擲者による投射と、(2) 投射装置による射出の2種類の方法で実験し、ターボジャブの飛行軌道の撮影と解析を行った。

図3に自作の投射装置を示す。投射台には、幅 1.4cm, 深さ 4.5cm, 長さ 183cm の溝が設けてあり、そこにターボジャブの羽の1枚を入れることで、その姿勢を保ったまま溝に沿って移動させることができる。両端を投射台に固定したゴム（フィットネスバンド・ラテックス製）をターボジャブの後尾にあてがい、引き伸ばして放すことで射出できる。投射台は水平に対して任意の角度で固定できる。

撮影には、図4に示すように2台のデジタルカメラ(CASIO EX-F1)を用いた。カメラ1は投射時の初期条件を正確に得るため、投擲者あるいは投射装置から約 2m 離れた位置に設置し、フレームレート 300fps, 画素数 512 × 384 ピクセルのハイスピードモードで撮影した。カメラ2は飛行の全体の様子を捉えるために、フレームレート 20fps, 画素数 2816 × 2112 ピクセルの静止画の連続写真モードで撮影を行った。撮影した画像は画像処理ソフト Image J を用いて解析を行い、各画像でのターボジャブの重心位置と姿勢角 φ （ターボジャブが水平方向に対してなす角）を求めた。図5に示すように、迎え角 α は、姿勢角 φ と速度ベクトルが水平方向に対してなす角 θ との差から求めた。

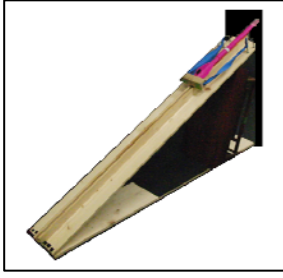


Fig. 3 Turbo-jav launcher.

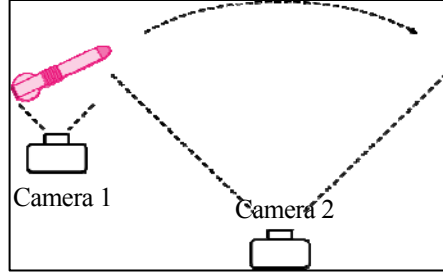


Fig. 4 Set-up for throwing experiments.

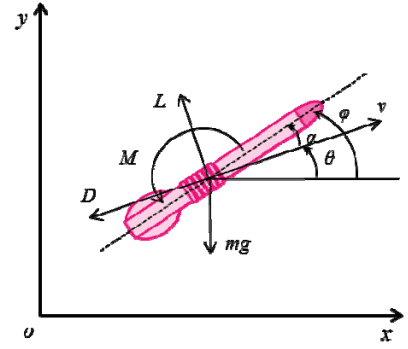


Fig. 5 Configuration of a flying turbo-jav.

2・3 数値シミュレーション

ターボジャブは一つの鉛直面内で運動するものとし、図5に示すように水平方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。時刻 t におけるターボジャブの重心位置と姿勢角をそれぞれ、 (x,y) 、 φ とすると、抗力 D 、揚力 L 、モーメント M がはたらいているとき、ターボジャブの並進運動と重心まわりの回転運動は次式に従う。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -L \sin \theta - D \cos \theta \quad (2)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = L \cos \theta - D \sin \theta - mg \quad (3)$$

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M \quad (4)$$

ここで、 m は質量で、 I は重心まわりの慣性モーメント、 g は重力加速度の大きさである。慣性モーメントの値は2点吊り法により計測した。

風洞実験で得られた空力係数 C_d 、 C_l 、 C_m を用いて D 、 L 、 M の値を評価し、式(2)~(4)を数値的に解くことでターボジャブの重心軌道と姿勢角および迎え角の変化を求めることができる。本研究では、各投射実験の初期条件からスタートして式(2)~(4)の時間発展を差分法により計算した。その結果と投射実験の結果との比較を行った。

3. 実験結果と考察

3・1 風洞実験による空力特性の計測結果

図6に空力係数とレイノルズ数の関係を示す。抗力係数 C_d と揚力係数 C_l はメインストラットのみで1点支持し、モーメント係数 C_m はサブストラットを併用して2点支持により計測した値である。ただし、これらには支持部に作用する値も含む。図6より、風速 $U=12.5\sim 25\text{m/s}$ に対応する $5.5 \times 10^5 < Re < 11 \times 10^5$ の範囲で、いずれの迎え角に対しても各空力係数の値はレイノルズ数に依存せず、ほぼ一定となることが分かる。

メインストラットに働く抗力 D_0 を式(1)により無次元化して抗力係数 C_{d0} を評価したところ、 C_{d0} の値はレイノルズ数にも迎え角にもほとんど依らない結果となり、その平均値は $C_{d0}=0.465$ となった。

$5.5 \times 10^5 < Re < 11 \times 10^5$ の範囲で空力係数がレイノルズ数に依らないことから、図6に示した値を各迎え角に対して平均し、 α の関数として図7に描いた。ただし、抗力係数に関しては、図6(a)の値からメインストラットの値 C_{d0} を差し引いた値を示している。参考のため、羽を切り取ったターボジャブに対する各係数の値も図7に示している。抗力係数 C_d は $\alpha=0$ で最小値をとり $|\alpha|$ の増加とともに増大し、揚力係数 C_l は原点を通る右上がりの曲線となった。一方、モーメント係数 C_m は右下がりの曲線となり、ターボジャブには常に $\alpha=0$ に戻す向きのピッチン

グモーメントがはたらくことを示している。羽を切り取ったターボジャブに対するモーメント係数が右上がりになることと比較すると、羽の存在はターボジャブの姿勢を安定化する働きがあることが分かる。

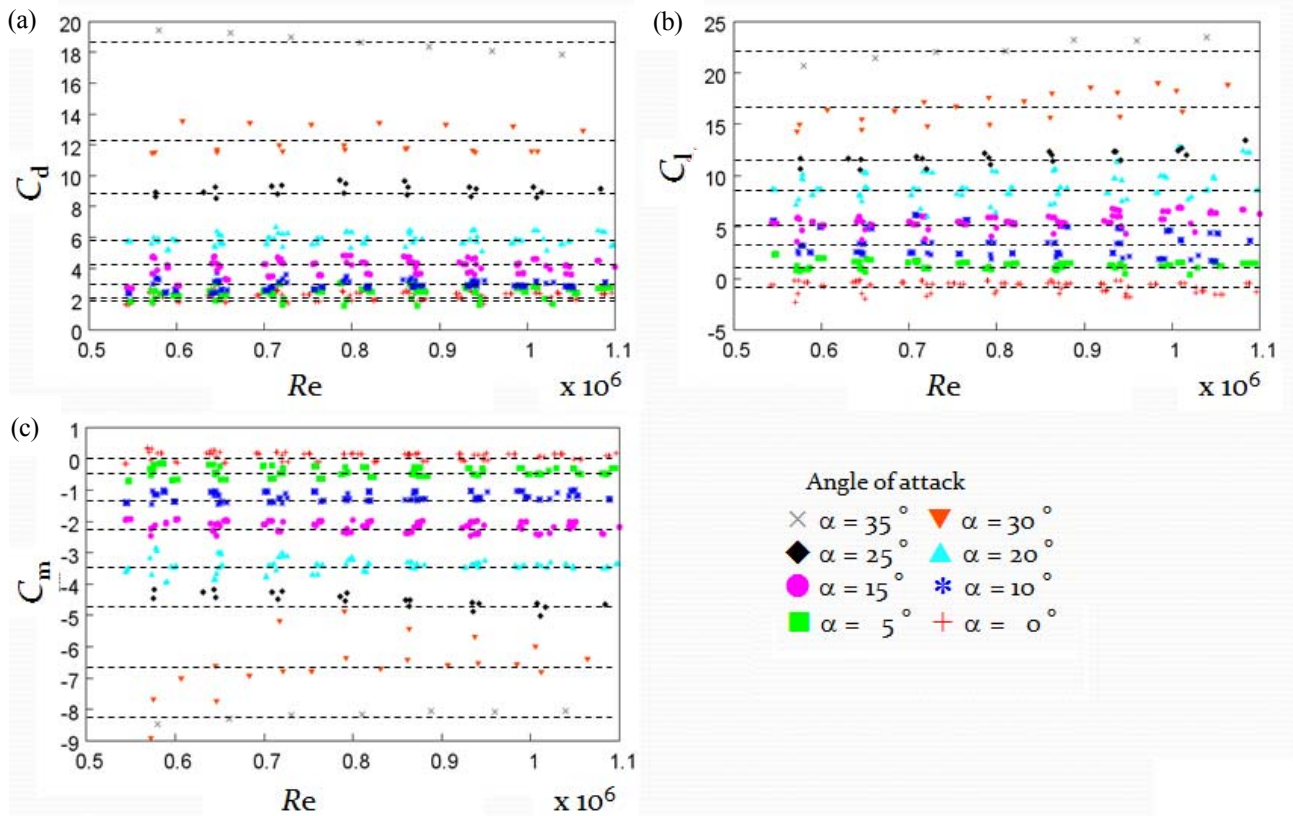


Fig. 6 (a) Drag coefficients, (b) lift coefficients, and (c) moment coefficients.

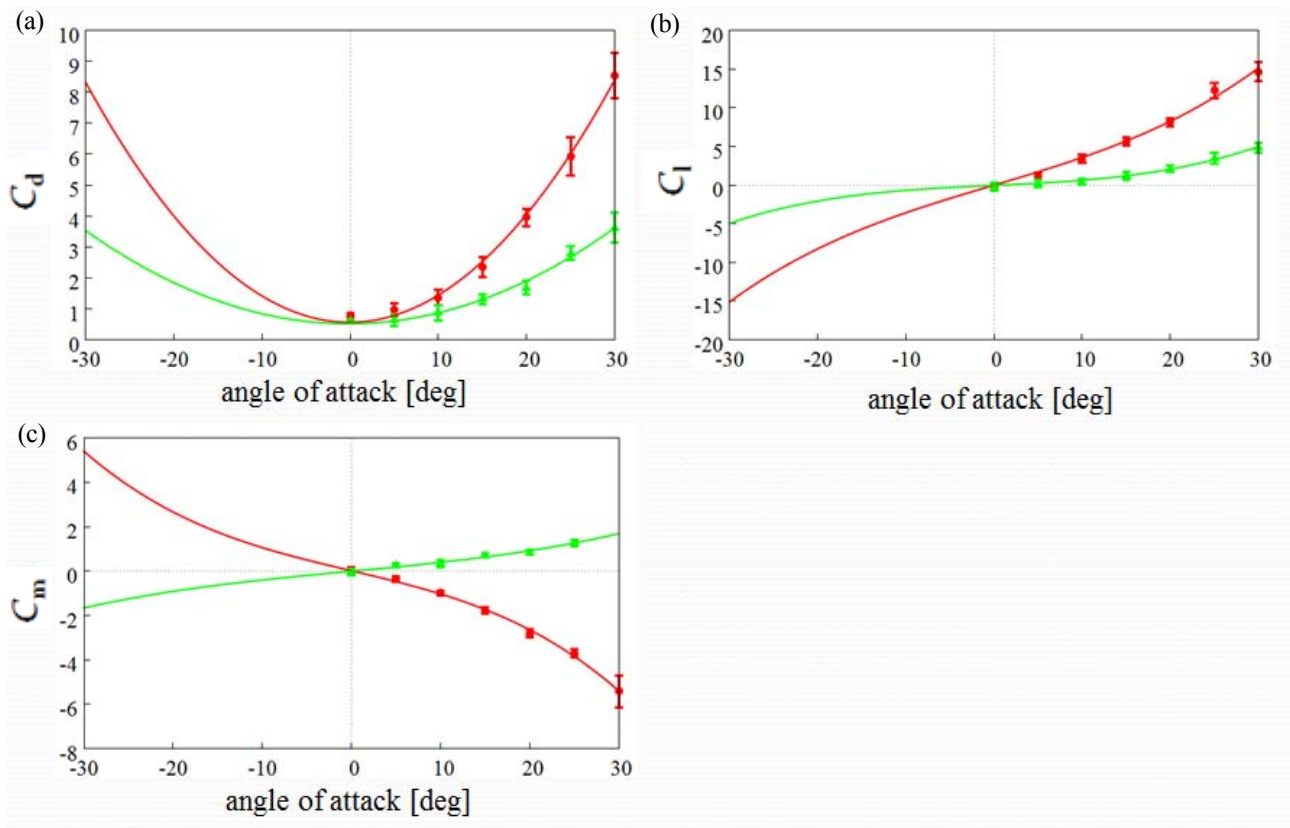


Fig. 7(a) Drag coefficients, (b) lift coefficients, and (c) moment coefficients (red: intact turbo-javs, green: turbo-javs without fins).

3・2 投射実験と数値シミュレーションとの比較

(1) 投擲者による投射の結果の例を図8に、(2)投射装置による射出の結果の例を図9に示す。それぞれの図において、(a)は重心軌道を表し、地表面を y 座標の原点とし、ターボジャブのリリース位置を x 座標の原点としている。(b)は対応する迎え角変化である。

まず、図8(b)および図9(b)から、いずれの場合もターボジャブは迎え角を振動させながら飛行していることが分かる。これは図7(c)のピッチングモーメントの計測結果から予想される結果であり、羽の存在によりターボジャブの姿勢が安定することが示された。

また、投射実験結果と数値シミュレーション結果との比較を行うと、図8に示す投擲者による投射では両者の差異がかなり大きいことが分かる。一方、図9に示される投射装置による射出では数値シミュレーション結果が投射実験をおおよそ再現している。この差異の原因を検討すると、ターボジャブの軸まわりの回転（ローリング）の有無が大きく関係していることが分かってきた。

投射装置では羽の1枚を溝に入れ、それと垂直な2枚の羽を投射台に沿わせて発射するため、2枚の羽が投射台と平行で、残りの2枚の羽が鉛直となった状態で射出される。飛行中もこの姿勢をほぼ保っていることが撮影した画像から確かめられる。この姿勢は風洞実験におけるターボジャブの姿勢と同じである。従って、風洞実験の結果を用いて行った数値シミュレーションの結果が、投射装置による投射実験結果とほぼ一致することは納得できる。実際、角速度センサー（STT-IBS）を組み込んだターボジャブを試験的に投射して、軸まわりの回転運動について調べたところ、投射装置を用いた投射では飛行中のターボジャブの軸まわりの回転角速度はほぼ0であった。一方、投擲者による投射では、角速度センサーの測定限界（34 rad/s）を超えた回転運動が起こっており、計測できなかった。投擲者が意図的に軸まわり回転を抑えて投射を行った場合でも測定限界に近い回転運動が計測された。槍投げでは、リリース時においてヤリの軸まわりに100~150 rad/s（毎秒16~24回転）の回転が起こっていることが報告されている⁹⁾。以上のことから、投擲者による投射と数値シミュレーション結果との差異は、ターボジャブの軸まわりの回転に起因すると推測される。

図8(a)において、投射実験結果はターボジャブの軸まわりの回転がある場合の軌跡を表し、数値シミュレーション結果は軸まわりの回転がない場合の軌跡を表すと解釈される。両者を比べると、もし初期条件が同じであるならば、軸まわりの回転がない場合の方が飛距離が大きくなることを示している。ターボジャブに軸まわりの回転が加わると、羽が周囲の空気の流れを乱すことで抗力が増加するために飛距離が伸びない可能性が考えられる。

4. 結 語

流体力学観点からターボジャブの飛行特性を明らかにするために、風洞実験によるターボジャブの空力特性の計測と、その計測結果に基づく数値シミュレーションと投射実験による飛行軌道の解析を行った。軸まわりの回転がない場合では数値シミュレーション結果と投射実験結果とはほぼ一致した。ターボジャブは、羽の存在により姿勢を安定化する向きにピッチングモーメントが働き、迎え角を振動させながら飛行することが分かった。また、通常の投擲者による投射では軸まわりの回転が顕著であり、それに起因して飛距離が小さくなることが示された。

今後の課題の一つとして、風洞実験における計測精度の向上があげられる。現在用いている天秤装置は微妙な調整が必要であり、実験データのばらつきが大きい。より正確な計測を行うために、三分力の計測を可能とするひずみセンサーをターボジャブ内部に組み込んだ、内蔵式センサーの開発を行っているところである。

本研究の一部は、科学研究費補助金(23360087, 25630057)、関西大学先端科学技術推進機構研究グループ予算により行った。

文 献

- (1) 前田正登, 丹松由美子, “ジャベリックスローにおけるターボジャブの投射初期条件が飛距離に及ぼす影響”, スポーツ方法科学研究, Vol. 21, No.2 (2008), pp. 139-145.

- (2) 長尾将史, 中嶋 智也, 板野 智昭, 関 眞佐子, “ターボジャブの空力特性の計測”, 日本機械学会論文集(B 編) 79 巻 804 号 (2013-8), pp.1561-1570.
- (3) 石井喜八, 西山哲成, “スポーツ動作学入門”, 市村出版 (2002), pp.83-84.

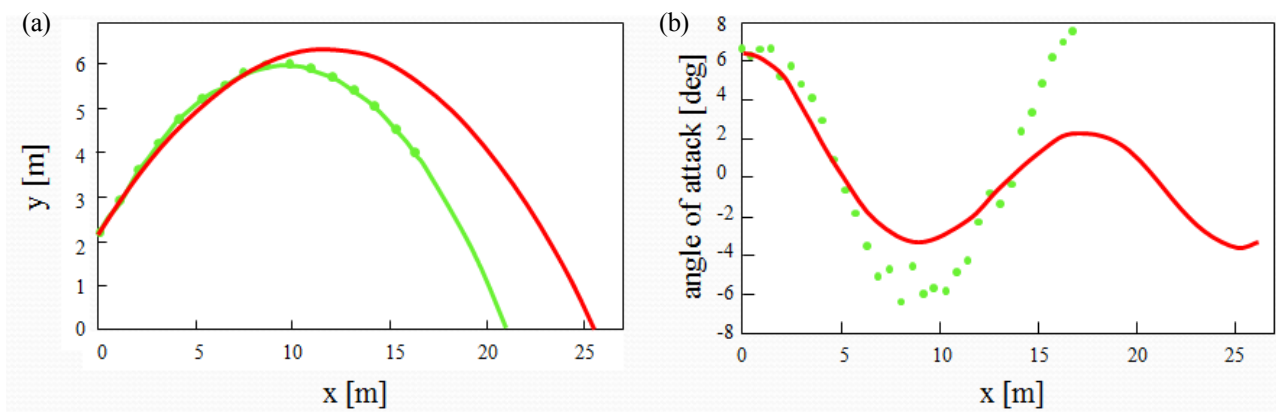


Fig. 8(a) Trajectories of the center of mass, and (b) variations of angle of attack when a turbo-jav was thrown by an athlete (green: throwing experiment, red: numerical simulation) .

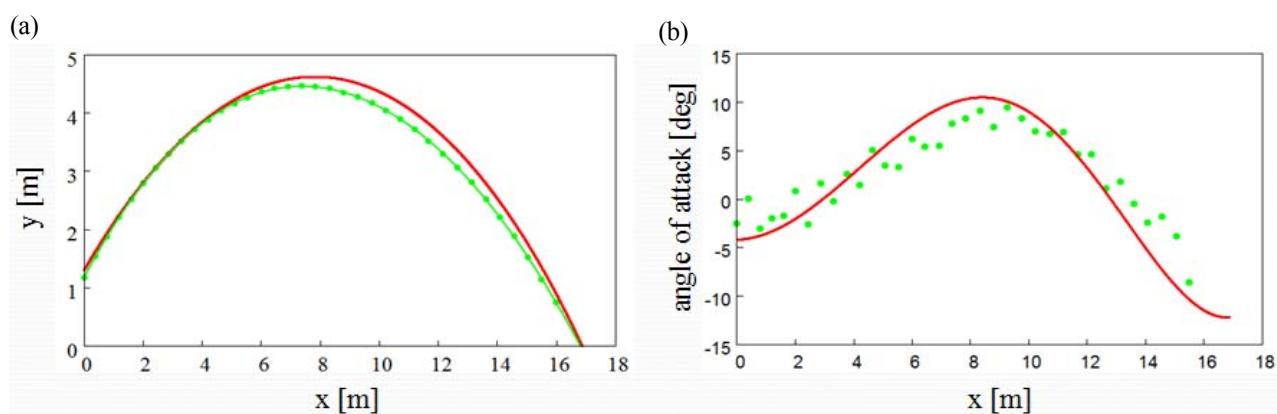


Fig. 9(a) Trajectories of the center of mass, and (b) variations of angle of attack when a turbo-jav was launched by the launcher (green: throwing experiment, red: numerical simulation) .