

ソフトテニスボールに見られる「ふく」現象について

鎌 田 康 平 郡山北小学校
中 村 元 彦 奈良教育大学理科教育講座 (物理学)
松 山 豊 樹 奈良教育大学理科教育講座 (物理学)

“Fuku” phenomenon seen in soft tennis ball

KAMATA Kohei

(Kooriyamakita Elementary School)

NAKAMURA Motohiko

(Department of Physics, Nara University of Education)

MATSUYAMA Toyoki

(Department of Physics, Nara University of Education)

Abstract

When a ball moves forward with a top spin (forward rotation), a downward force is applied to the ball and it falls faster than the case without the rotation. When it moves forward with a back spin (reverse or slice rotation), an upward force is applied the ball and it stays in the air longer than in the case with no rotation. In soft tennis play, it has been empirically confirmed that a peculiar flight behavior such as a motion of the ball is stretching despite the drive rotation or suddenly dropping despite the slice rotation. These motions commonly known as "Fuku" phenomenon. The purpose of this study is to analyze the cause of this "Fuku" phenomenon from the viewpoint of the Magnus effect. By using the super slow mode of Video camera, we find that the ball is flying with a rotating ellipsoid-like shape which has a larger aspect ratio in the shape than the usual motion. In addition, the axis of rotation is tilted from the horizontal by about $34^{\circ}\sim 42^{\circ}$. We calculate the magnitude of the force due to the Magnus effect on the soft tennis ball. Then we find that the magnitude of the tilt is likely to be a factor which reduces the force due to the Magnus effect. From these results, it is possible to intentionally generate the "Fuku" phenomenon by shaking the racket or applying the ball and racket.

キーワード：ソフトテニス, マグナス効果, ふく

Key Words : Soft tennis, Magnus effect, Fuku

1. はじめに

ソフトテニス競技は、ネット型の競技の一種であり、 $23.77\text{ m}\times 10.97\text{ m}$ (シングルス時は、 $23.77\text{ m}\times 8.23\text{ m}$) のコート上において4人ないし2人の競技者がラケットを用いてボールを打ち合い、ポイントを競う競技である。

基本的なルールは、硬式テニスと同様であるが、大きく硬式テニスと異なる点としてボールの性質があげられる。ソフトテニスで扱うボールは、ゴム製の皮に空気を入れた球 (以下ソフトテニスボール) である。ソフトテニスボールに入れる空気の量は、ソフトテニス競技規則

13条において次のように定められている。

「バウンドの高さは、マッチを行うコートにおいてボールの下端が1.50 mの高さから故意に力を加えることなく落下させた場合、コート面で弾んだ後の最高到達点がボールの下端で70 cmから80 cmまでの範囲となるよう調節する¹⁾。」

この競技規則で定められた範囲に空気の量が調節されたソフトテニスボールは、ボールの体積の80%ほどの空気しか入っていない。このため、ソフトテニスボールは他の球技で用いる球と比べても非常に変形しやすいという特徴を持つ。

また、ソフトテニスではラケットでソフトテニスボールを打つ際に順回転（ドライブ回転）や逆回転（スライス回転）をソフトテニスボールにかけることが多くある。この場合、次項で説明するマグナス効果により、順回転では下向きの力が球にかかり、逆回転では上向きの力がかかる。このため、回転がかかっていない球に比べて、順回転をかけた球は、速く落下し、反対に逆回転をかけた球は、長く空中にとどまることが知られている。

しかし、ソフトテニスでは、このマグナス効果に反する現象、すなわち、順回転をかけているにもかかわらず、球が伸びる、逆回転をかけているにもかかわらず、球が急激に落下するといった特異な飛行挙動をする現象、通称「ふく」現象が起こることが経験的に確認されている。

この「ふく」現象は、これまでも幾度か研究の対象とされてきた。前田²⁾の研究では、ソフトテニスボールの軌道や飛行中の映像から、「ふく」現象は球が35 rps以上の回転をして飛翔している場合に発生することが明らかになっている。また、宮川³⁾の研究では、「ふく」現象は、負のマグナス効果による力に関係していると推定されており、「ふく」現象発生時は、球の形状に変化が起きていることが明らかになっている。

今回、4Kビデオカメラレコーダー（FDR-AX700：SONY 社製）を用いて、「ふく」現象時の形状、軌道を観測した。その結果、通常のソフトボールテニスボールの正面から見た球の形状は、ほぼ球状になっているが、「ふく」現象発生時では、正面から見た球の形が楕円形になっていることと、楕円の長軸の向きが鉛直方向ではなく斜めになっていることから、回転軸が傾いていることが観測され、これらがマグナス効果による力の大きさに影響を及ぼしそうであることが確かめられた。

そこで、この研究では球にはたらくマグナス効果による力の大きさの計算から「ふく」現象の発生する要因を解明することを目的とする。

2. ソフトテニスボールにはたらく マグナス効果の理論解析

この章では、円柱、球、回転楕円体にはたらくマグナス力を我々の導入したパラメーターの表現によって、順次、統一的に導出する。これによって、特に第3章で議論される球および回転楕円体でのデータ比較が容易になる。

2.1. 回転円柱にはたらくマグナス効果

一様流中にある球や円柱が流れと垂直な軸まわりに回転しているとき、一様流と回転軸の双方に垂直な方向に流体から力を受ける現象はマグナス効果と呼ばれ、野球やテニスなどで、回転する球がカーブしたり、沈み込ん

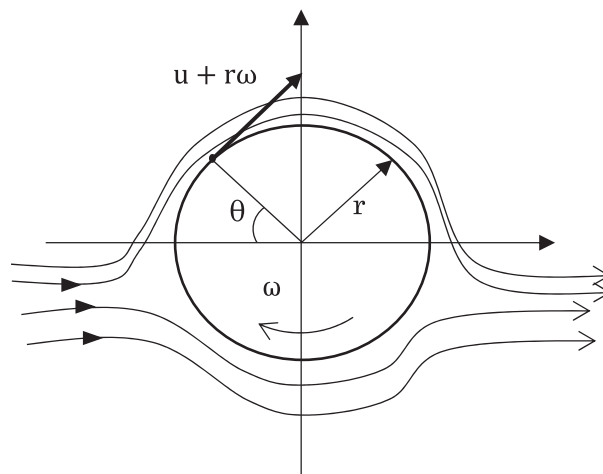


図1 回転円柱にはたらくマグナス効果

だりする原因としてよく知られている。

図1のように、一様な流れ U の中に置かれた円柱が角速度 ω で回転している場合を考える。円柱が回転しても、変形せずその断面の周長は変化しないと仮定する。

円柱表面の流体は、円柱の回転によって流速が変化する。円柱表面の任意の点 a ($0 \leq \theta \leq \pi$) での流体の速度 V は、円柱表面上の流体速度 u に周速度 $r\omega$ を加えた大きさと考えることができる。一様流速 U の中に置かれた円柱表面上の流体速度 u は、次の式で表されることが流体力学によって明らかにされている⁴⁾。

$$u = 2U |\sin \theta|$$

よって、任意の点 a での流体の速度 V は

$$V = 2U |\sin \theta| + r\omega$$

となる。今回考える θ の範囲は、 $0 \leq \theta \leq \pi$ より

$$|\sin \theta| = \sin \theta$$

である。

一様な流れの圧力を p として、任意の点 a での圧力を p_a とし、粘性によるエネルギー損失が小さいとして無視すると、ベルヌーイの定理から

$$p + \frac{1}{2} \rho U^2 = p_a + \frac{1}{2} \rho (2U \sin \theta + r\omega)^2$$

なので、圧力差 $p_a - p$ は

$$\therefore \frac{p_a - p}{\rho U^2 / 2} = 1 - \left(\frac{2U \sin \theta + r\omega}{U} \right)^2 \quad (1)$$

と求まる。

ここで、単位幅の円柱に作用する揚力を考える。これは、円柱表面の微小面積 $rd\theta$ に作用する圧力 $p_a - p$ による力の y 方向の成分を円柱全表面で積分すると、単位幅の円柱に作用する揚力 L が求められる。

$$L = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} - (p_a - p) r d\theta \times \sin \theta \quad (2)$$

式(2)に式(1)を代入すると

$$L = -\rho r U^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\left\{ 1 - \left(\frac{r\omega}{U} \right)^2 \right\} \sin \theta - \frac{4r\omega}{U} \sin^2 \theta - 4 \sin^3 \theta \right] d\theta \quad (3)$$

ここで

$$\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}, \quad \sin^3 \theta = \frac{3 \sin \theta - \sin 3\theta}{4}$$

を用いると、式 (3) は、

$$L = -\rho r U^2 \left[- \left\{ 1 - \left(\frac{r\omega}{U} \right)^2 \right\} \cos \theta - \frac{2r\omega}{U} \sin 2\theta + 3 \cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta \right]_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

となり、 $\cos \frac{\pi}{2} = 0$, $\sin \pi = 0$, $\cos \frac{3}{2}\pi = 0$ より、単位幅の円柱に作用する揚力 L は、

$$L = 2\pi r^2 \omega \rho U \quad (4)$$

となる。

2.2. 回転球にはたらくマグナス効果

2.1節の回転する円柱にはたらく揚力を基に、回転球にはたらく揚力を導く。ただし、球が回転しても、変形せずその断面の周長は変化しないと仮定する。

図2のような球を考え、回転軸を z とする。球を微小幅 dz で切ると考えると、球は微小幅 dz の円柱の集合体と考えることができる。流体速度 U 、流体密度 ρ の流体の中を角速度 ω で回転している微小幅 dz の円柱にはたらくマグナス効果による揚力 L は、式 (4) から

$$L = 2\pi r_0^2 \omega \rho U dz \quad (5)$$

で与えられる。

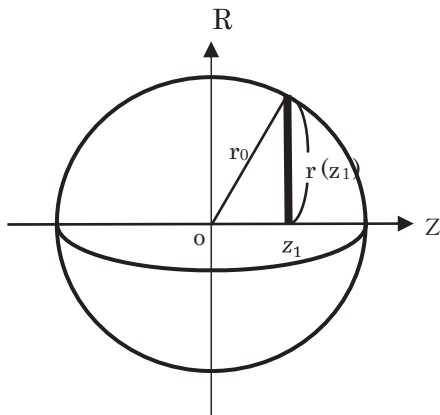


図2 球にはたらくマグナス効果

しかし、球は円柱と異なり切断する z の座標により、微小幅の円柱の半径 r は異なる。すなわち、回転軸上の任意の点 z を含む微小幅の円柱の半径 r は $r(z)$ と表される。

z_1 での円柱の半径 $r(z_1)$ は球の半径 r_0 と z_1 を用いて、三平方の定理より

$$r(z_1) = \sqrt{r_0^2 - z_1^2} \quad (6)$$

と表される。

よって、 z_1 で球を切断したときにできる、微小幅の円柱にはたらくマグナス効果による揚力 L_z は、式 (5) の r_0 に式 (6) の r_z を代入し

$$L(z_1) = 2\pi \omega \rho U (\sqrt{r_0^2 - z_1^2})^2 dz$$

となる。球にはたらくマグナス効果による揚力 L_b は、 z が $-r_0$ から r_0 まで変化したときの和と考えればよいので

$$L = 2\pi \omega \rho U \int_{-r_0}^{r_0} (r_0^2 - z^2) dz \quad (7)$$

と表すことができる。式 (7) の積分を実行すると

$$L_b = \frac{8}{3} \pi \omega \rho U r_0^3 \quad (8)$$

となり、これが球にはたらくマグナス効果による揚力である。

2.3. 回転楕円体にはたらくマグナス効果

2.1節の回転する円柱にはたらく揚力を基に、回転楕円体にはたらく揚力を導く。ただし、楕円体が回転しても、変形せずその断面の周長は変化しないと仮定する。

図3のような回転楕円体を考える。球同様に回転楕円体を微小幅の円柱の集合として考える。回転楕円体では、3径のうち2径は同じ長さであるので、 z_1 を含む微小幅の円柱の底面は、半径 $r(z_1)$ の円になっていると考えることができる。

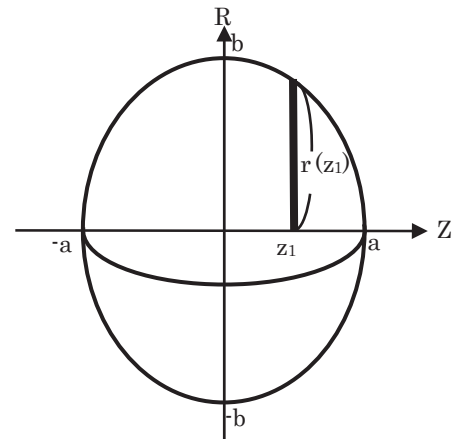


図3 回転楕円体にはたらくマグナス効果

また $r(z)$ は、任意の z 座標に対する R 座標の値であるので、楕円の公式を用いて表すことができる。

楕円の公式、

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

を、今回用いる座標系に対応させると

$$\frac{Z^2}{a^2} + \frac{R^2}{b^2} = 1$$

となる。また、今回考える楕円体は縦長のものを考えるので、 b が長軸の長さ、 a が短軸の長さを表す。この式を R について解くと、

$$R^2 = \frac{1}{a^2}(a^2 - Z^2)b^2$$

となる。よって、任意の Z 軸座標 z における、微小幅の円柱の底面半径 $r(z)$ は、

$$r(z) = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - z^2} \quad (9)$$

と表される。

回転楕円体にはたらくマグナス効果による揚力 L_e は、式(4)の r に式(9)の $r(z)$ を代入し、 z を $-a$ から a まで積分したものである。よって L_e

$$L = 2\pi\omega\rho U \int_{-a}^a \frac{b^2}{a^2}(a^2 - z^2) dz$$

となり、回転楕円体にはたらくマグナス効果による力を表す式は

$$L_e = \frac{8}{3}\pi\omega\rho Uab^2 \quad (10)$$

となる。

3. 「ふく」現象とマグナス効果

3.1. ソフトテニスボールの形状と

マグナス効果のシミュレーション

前節で求めた回転球にはたらくマグナス効果の式(4)と回転楕円体にはたらくマグナス効果の式(10)を用いてソフトテニスボールの形状とマグナス効果の関係をシミュレーションした。楕円体の長軸と短軸の大きさは、「球と球が変形した楕円体で断面の円周は変化しない」と仮定し、高精度計算サイトkeisan「楕円の円周と一方の径からもう一方の径を求める。」⁵⁾を用いて、球の状態(半径31.5 mm)から長軸を0.1 mm刻み変化させ計測を行った。また、この計算結果から縦軸と横軸の比であるアスペクト比を算出した。

マグナス効果による力を表す式(8)と式(10)からわかるように、角速度 ω 、流体密度 ρ 、流体速度 U は1次式で表されており、これら3つの値が各々増えれば力の大きさは大きく、各々減れば力の大きさは小さくなることわかる。ここでは、流体密度を 1.293 kg/m^3 とし、流体速度はソフトテニスの平均球速から 16.67 m/s 、球の直径 63 mm 、ボールの回転数として 40 rps と固定した。

回転数 N (rps) から角速度 ω (rad/s) を算出する式は以下の通りである。

$$\omega = 2 \times \pi \times N$$

これらの条件で、長軸の長さとマグナス効果による力の関係を計算し、グラフ化すると次の図4のようになった。また、力の大きさは下向きを正としている。

この結果、楕円体のマグナス効果による力は二次関数的な変化をすることが見て取れる。また、楕円体に関わるマグナス効果による力 L_e と球にはたらくマグナス効果による力 L_b の大小関係は長軸の長さによって変化し、長軸の長さ b が $31.5 < b < 43.4 \text{ mm}$ の範囲にあるとき、 $L_e > L_b$ となり、長軸の長さが $43.4 \text{ mm} \leq b$ と範囲にあるとき $L_e < L_b$ となることが確認できた。

また、実験で観測されたボールの長軸の大きさの範囲は、 $31.5 \text{ mm} \sim 36.0 \text{ mm}$ であり、図4からは楕円体に変形した方が鉛直下向きにはたらくマグナス効果による力が、変形せず球のままであるよりも大きくなることが明らかになった。

次に楕円体の体積とマグナス効果による力の関係を調べると次の図5のようになり、楕円体であっても球同様にマグナス効果による力は体積に比例することが確認できた。このことから、図4においてマグナス効果による力が二次関数的に変化したのは、長軸の変化によって体

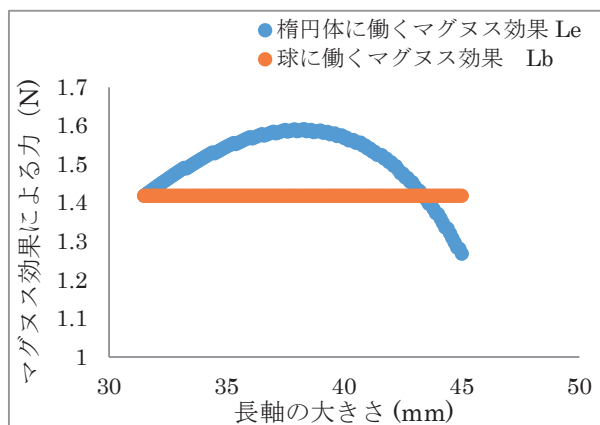


図4 長軸の長さとマグナス効果による力の関係

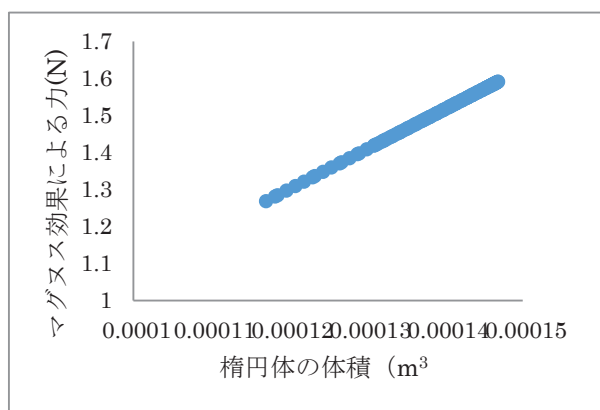


図5 楕円体の体積とマグナス効果による力の関係

積の値が二次関数的に変化することに起因すると考えられる。

3.2. ソフトテニスボールの回転軸角度と マグナス効果のシミュレーション

実験観測より、「ふく」現象が生じているボールは、回転軸が大きく傾いている。マグナス効果による力は、流体の向きと回転軸の両方に垂直な向きにはたらくとされている。よって、球が紙面の裏から表に向かう方向に速度 v (m/s)で運動しているとき、回転軸 z が地面平行な状態(図6)と回転軸が水平軸から θ 傾いている状態(図7)では、マグナス効果による力の向きも異なり、回転軸が傾いている場合では地面平行の場合と比べて θ 傾く。

この時の、ボールが落下する要因となる鉛直方向のマグナス効果 L_y による力に注目する。回転軸が地面平行の場合は球にかかるマグナス効果による力が全て鉛直方

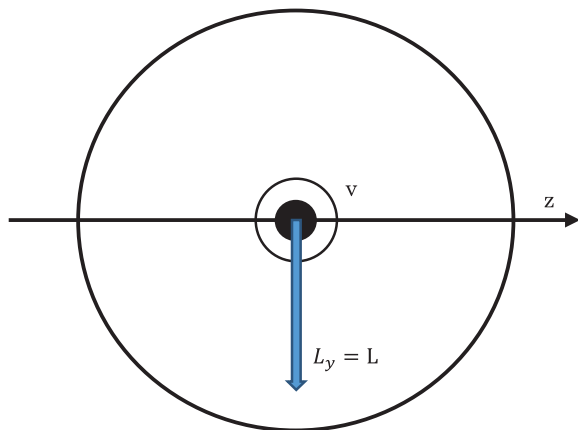


図6 回転軸が地面平行時のマグナス効果による力

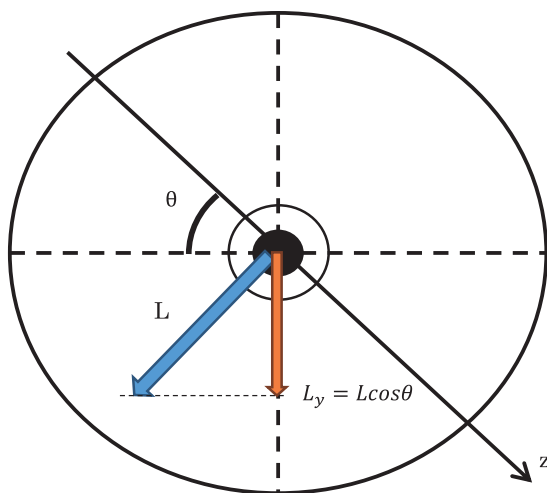


図7 回転軸が傾いた時のマグナス効果による力

向の運動に作用する。すなわち $L_y = L$ である。一方、回転軸が水平軸から θ 傾いているときマグナス効果による力ははたらく方向は鉛直方向から θ 傾いた方向であるので、鉛直方向の運動に作用する力は L の鉛直方向の成分となる。すなわち $L_y = L \cos \theta$ となる。

球(半径31.5 mm)、回転数40 rps、流体速度20 m/s、流体密度 1.293 kg/m^3 での鉛直方向のマグナス効果による力の大きさと回転軸角度のシミュレーションをおこなった。また、楕円体(長軸40 mm, 45 mm)、回転数40 rps、流体速度20 m/s、流体密度 1.293 kg/m^3 での鉛直方向のマグナス効果による力の大きさと回転軸角度のシミュレーションをおこなった。この結果、物体の形状が球であっても楕円体であっても共通して回転軸の傾きが大きいほど鉛直方向にはたらくマグナス効果による力の大きさは小さくなることがわかった。回転軸角度が 27° で楕円体にはたらくマグナス効果による力の鉛直成分の大きさと球にはたらくマグナス効果による力を比較すると、この角度以上に楕円体が傾くと長軸の長さによらず球のマグナス効果による力の鉛直成分が楕円体のマグナス効果による力の鉛直成分を上回ることがわかった。実験観測した「ふく」現象が生じている時の回転軸の傾き角度は、いずれも 27° より大きかった。

4. まとめ

ソフトテニスのストローク時に見られるソフトテニスボールの特異な飛行挙動である「ふく」現象に注目し、その現象の発生原因を球にはたらくマグナス効果という観点から解析的に解明することを目的とした。ボールの飛行をカメラのスーパースローモードを用いて撮影することにより、「ふく」現象時のボールの特性を分析・考察した。マグナス効果による力の解析では、回転する円柱にはたらくマグナス効果による力の大きさを表す式から、球や回転楕円体にはたらくマグナス効果による力の大きさを表す式を求め、その式で表されるマグナス効果による力が形状や回転軸の傾きによってどのように変化するかを解析・考察した。

その結果、「ふく」現象が見られるソフトテニスボールは、飛行中の形状におけるアスペクト比が通常時よりも大きく、回転楕円体のような形状で飛行し、回転軸も約 $34^\circ \sim 42^\circ$ 水平から傾いていることを実験から明らかにした。

また、ソフトテニスボールにはたらくマグナス効果による力の大きさを求める計算シミュレーションしたところ、球の形状の変化は、むしろ鉛直下向きにはたらくマグナス効果による力を増加させる要因になり、回転軸が傾くことによってマグナス効果による力を減少させることができることを明らかにした。

普段のプレーにおいて回転数を多くすると「ふく」現象が起こりやすく感じるのは、回転を多くかけるために、ラケットとボールが接する時間を長くしたり、ラケットとボールの当たる角度を大きくしたりすることによって、ボールの回転軸が傾きやすくなるためであると考えられる。

これらのことから、ソフトテニスボールの回転軸の傾きを多くするようなラケットの振り抜き方やボールとラケットの当て方を工夫すれば「ふく」現象を意図的に発生させることが可能であると考えられ、ソフトテニスの新たな攻撃法として扱われるかもしれない。

謝辞

本研究において、データ測定時に協力していただいた福本悠人さん、寺西柚稀さんに心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) ソフトテニス競技規則 2020年4月最終アクセス
(<http://yao-city-sta.sakura.ne.jp/picture/01kyogikisoku.pdf>)
- 2) 前田正登, 『ソフトテニスにおけるボールの特異な飛行挙動に関する研究』(2005)
スポーツ産業研究, Vol.15, No.2 (2005), 33~41
- 3) 宮川ら, 『ソフトテニスボールの特異な飛行軌道に関する空力特性』(2018)
日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2018 講演論文集
- 4) 九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻 編, 『地球環境を学ぶための流体力学』(2006), 丸山堂書店
- 5) 高精度計算サイトkeisan「楕円の円周と一方の径からもう一方の径を求める。」2020年4月最終アクセス
(<https://keisan.casio.jp/exec/user/1231660653>)