



ブーメランから はじめる物理

西山 豊

ブーメランについて語るにはあまりにも誌面が少なすぎる。本来ならば、ブーメランの作り方や投げ方、調整方法や競技について詳しく説明したいのだが、実践的なことはすべて割愛せざるを得ない。

私の初期の研究⁽¹⁾は非常に未熟なものであったが、フェリックス・ヘスやジャール・ウォーカーの研究⁽²⁾⁽³⁾を参考にして、今では理論も技術も格段に進歩し、ほぼ完成の域に達したといえる⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ここではブーメランが戻る理由を中心に説明したい。

…………… いくつかの誤解 ……………

ブーメランが戻ってくる理由について、一般の人が考えるおもなものは、

1. く字形をしているから戻ってくる、
2. 風の力でおし戻される、
3. 野球ボールのカーブと同じ原理で戻ってくる、である。

まず、く字形をしているから戻ってくるというのは誤解である。その理由は、最近はやりのブーメランを知るとよい。翼の枚数が3枚または4枚のものが市販されている。さらに、カンガルーやカモメの形をしたものがある。戻ってくるように作ってあるのだ。

これらすべてをブーメランと呼ぶべきかどうかがよく議論される。文化人類学者にすれば、戻ってくる戻ってこないにかかわらず、「く字形」をしているならブーメランであるということになり、自然科学者にすれば、形や翼の枚数にかかわらず、「戻ってくる」ならどんなものでもブーメランであるということになる。

つぎに風があるから戻ってくるというのも誤解である。その理由は、風のまったくない室内でもブーメランが戻ってくるということを知るだけで十分だ。風は戻る直接の原因ではない。ブーメランが戻るのは風ではなく空気存在である。空気さえあれば戻ってくるのだ。

3つめのカーブの原理で戻るとするのも誤解である。野球ボールの場合は、前進運動だけで前に進む。ボールに回転を与えると、カーブやシュートになり進路が左右に変化する。これを発見者の名前をとってマグヌス効果とよんでいる。

桜井伸二『投げる科学』(大修館書店)によると、毎秒30メートルの初速で投げたカーブが18メートル先の本塁上では40センチメートル横にそれるといふ。マグヌス効果で曲がる距離ははれている。漫画『巨人の星』の主人公が幼少の頃に、家の中から野球ボールを投げて手元に戻すというシーンがあるが、これは空想である。

…… ブーメランはなぜ「く」の字形か? ……

採集狩猟民族の最初の武器は石と棒切れであった。これらを空中に投げるとどうなるだろうか。石は放物線運動をして飛ぶが、棒切れはそうにならない。力一杯投げても空中でぐるりとまわって落ちてしまい、なかなか遠くへ飛ばない。それは、棒切れが回転するからだ。石は質点としてあつかえるが、棒切れは剛体としてあつかわねばならない。

回転運動は、静止しているものはいつまでも静止し続け、回転しているものはいつまでも回転し続けるという性質がある。質量に距離の2乗をかけて得

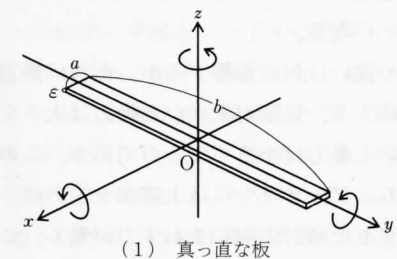
られる慣性モーメントがあり、回転のしやすさ、回転のしにくさを示す物理量である。

板の重心を3次元座標の原点にして、板の幅方向をx軸に、長さ方向をy軸に、厚さ方向をz軸にとる。3つの軸のまわりにはそれぞれの慣性モーメントがあり、その大小関係は、z軸まわりが一番大きくて、そのつぎにx軸まわり、そしてy軸まわりの順になる。

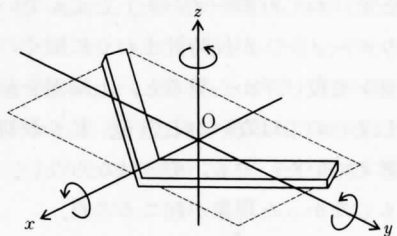
これの意味するものはこうである。z軸まわりは、静止しているなら回転しにくく、回転しているなら止まりにくい。また、y軸まわりは、静止していても回転しやすく、回転していても止まりやすいということだ。

慣性モーメントの一番大きいz軸まわりに回転していたとしても、何らかの空気の乱れによって回転が維持できなくなると、すぐに慣性モーメントの一番小さいy軸まわりの回転に移ってしまうことになる。

この弱点を克服するには板を曲げることになる。板を曲げると、見かけ上の板の長さは短くなり、板の幅は大きくなる。さらに幅方向の空気抵抗が増えてy軸まわりに回転しにくくなる(図1)。



(1) 真っ直な板



(2) 板を曲げる

図1 3つの慣性モーメント

さらに、面白いことは、板の重心が移動することである。く字に曲がった板を空中に投げると、真ん中に空洞ができてドーナツ状になる。この空洞は

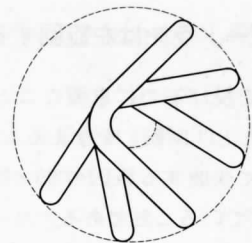


図2 空洞ができる

板の上面と下面の空気圧を調整して、飛行の安定性を増すことになる(図2)。

このような理由で、ブーメランは「く」の字に曲げられているのである。

…………… 揚力だけでは戻らない ……………

ブーメランは飛びながら戻ってくる。つまり、「飛ぶ」と「戻る」ことが重要なキーになる。まず、飛ばすためには浮く力、つまり揚力が必要である。

揚力は空気の流れて発生するが、それには2通りある。1つ目は、翼の断面の形状による。これを翼形断面という。

飛行機の翼の断面の形は、上面が凸状になっているが、下面が平坦になっている。こういう形の翼が空気中をある速さで進むと、空気の流れは上面はゆがめられ、下面は真っ直に進む。ゆがめられた上面の方は、進んだ距離が長いので下面より速度が速いことになる。流れが速い方は、遅いほうに比べて空気の圧力が小さくなり、その圧力差のために下面から上面に対して翼を押し上げようとする。この力が揚力であり、ベルヌーイの定理として知られている。

翼の断面の形状が、このように上側が凸状になっていないと、揚力が発生しないのだろうか。そうではない。文房具の下敷きを投げるときのように、平坦なプラスチック板でも揚力は発生するのだ。

ここで、揚力が発生する2つ目は、気流方向に対していくらかの迎え角がついていることだ。迎え角とは、翼の断面の基準線と飛行方向、つまり流れの方向とのなす角度であり、この角度が5~10度の値を持っていることが必要である。

..... ブーメランは左旋回する

ブーメランを投げるのに重要なことは、「たて投げ」をすることと「回転」を与えることである。ブーメラン投げで失敗する原因の99パーセントは、「横投げ」をしていることである。

右利きの人ブーメランを投げる時、その投げ方と軌道の関係を詳しく観察すると、つぎの3つの現象が起こることが分かる(図3, 図4, 図5)。

1. たてに投げると左旋回して戻ってくる。
2. 横に投げると急上昇してストンと落ちる。
3. たてに投げると横倒しになり最後は水平になって戻ってくる。

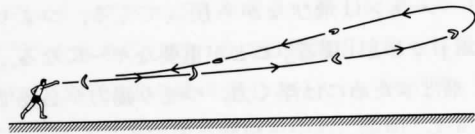


図3 たて投げ

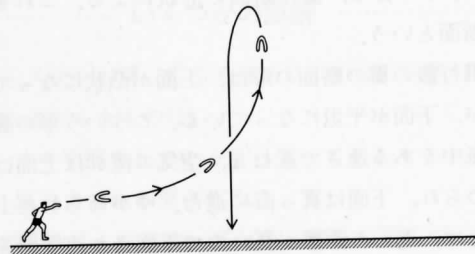


図4 横投げ

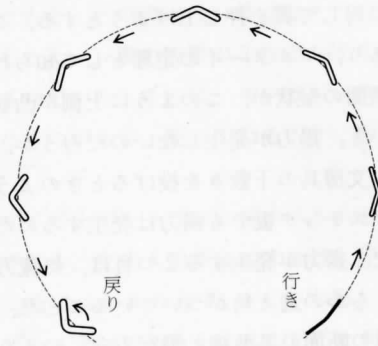


図5 左旋回と横倒し(上空から見た図)

そこで、これらの理由を説明していこう。

ブーメランの前進運動と回転運動の関係を見てみよう。図6ではブーメランが手前から向こうへ時速

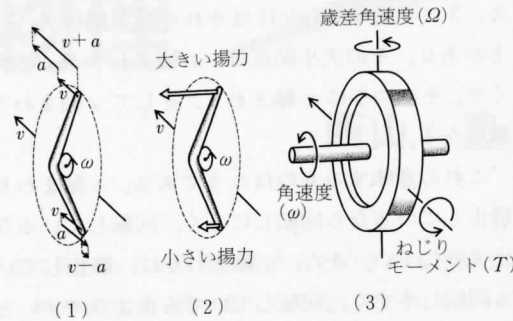


図6 歳差運動による左旋回

この図はF.ヘス(1968年)が示したものを模写したものである。前進速度 v に100km/h, 回転速度 a に20km/hをあてはめて考えるとよい。

100キロの前進速度と20キロの回転速度で飛んでいたとする。2枚の翼を比べてみると、上の翼は前進速度100キロに加えて回転速度20キロが足し算されて120キロになるが、下の翼は回転の向きが反対方向であるため、速度は前進速度100キロから回転速度20キロが引き算されて80キロになる。風に対する速度が120キロと80キロで40キロの差が生じることになる。

速度の違いは何に影響するか。それは揚力の大きさに関係する。速度が大きいと揚力は大きく、速度が小さいと揚力は小さくなるのである。この揚力の差により、ブーメランには上端部を左方向にまわす力、つまり反時計方向にまわす力が働く。この回転力のことを「ねじりモーメント」とよんでいる。

ねじりモーメントが反時計まわりに働くのだから、ブーメランを投げ手から見ると、上端部を左方向に倒してしまうのではないかと思う。私も最初はそうのように考えていた。でも、そうはならない。まったく予想もしなかった現象が起こるのだ。

ブーメランが回転する軸に対して、回転する面を反時計方向に回すねじりモーメントが働くとき、ブーメランはみずからの回転の軸を維持しつづけるために、もう一つの力が働く。それは、歳差(さいさ)の力である。

この歳差の力は、ブーメランが回転する軸にも、

ねじりモーメントの軸にもどちらにも直交した3番目の軸に働く。このような運動を歳差運動またはジャイロ効果という。歳差の力によってブーメランの進行方向は左側に向けられ、それが連続して起こるから結果としてブーメランは戻ってくるのである。

ブーメランを「たて投げ」すると、進路を「左旋回」させるのが分かった。では、ブーメランを「横投げ」すると、なぜ「急上昇」するのだろうか。

これも、歳差運動である。首を90度右に傾けてブーメランの翼をながめると、これらの現象が同じであることに気づくであろう。地平線の方向を直進するとすれば、その左旋回は上空になるのだ。つまり、横投げをすると急上昇してストンと落ちてしまうのだ。

..... 日常生活にある歳差運動

歳差運動をする代表的なものにコマの運動がある。コマは軸が傾いても倒れずに回り続ける。おもちゃ屋に売ってある木製のコマは、1秒間に10~20回転でまわる。コマの歳差運動は2~3秒間かかって一周するといった、ゆっくりしたものなので自分の目で確かめることができる。

また、自転車の車輪とハンドルの関係もそうである。自転車が何かの拍子に傾いたとしよう。そこで、ハンドルを同じ状態で持ち続けるのではなく、自転車が右に傾けば右にハンドルを切り、左に傾けば左にハンドルを切ればよい。そうすれば自転車は、倒れずに走り続ける。これは歳差運動の応用だ。

机の上に転がした硬貨の運動もそうである。硬貨がまっすぐに転がっているとしよう。そして、机のひずみか何かで少し傾いたとする。右に傾けば右に、左に傾けば左に進行方向を変える。硬貨は回転を維持しようとするため進行方向をその向きに変えるのだ。

飛行機にはジャイロとよばれる大きなコマが積んである。これは、自動操縦を助けるためで、飛行機は東西方向、南北方向、上下方向の姿勢を制御するために3つのコマを備えている。コマの歳差運動から飛行機の進路のずれを計算している。

..... ブーメランの横倒し現象

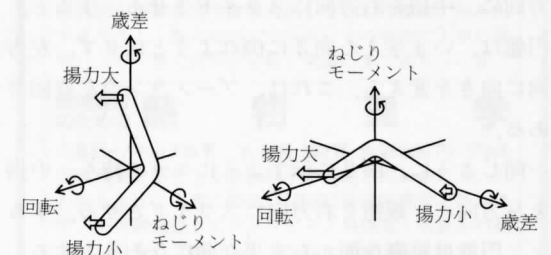
ブーメランは、たてに投げると左旋回するとともに、横倒しになり最後は水平になって戻ってくる。

なぜ、横倒しになるかについて、オランダの物理学者フェリックス・ヘスは、「く」の字形のブーメランと十文字形のブーメランを比較している。ブーメランがぐるっと一周する間に翼がうける揚力分布図を作成し、その図から、くの字形のブーメランだけが横倒しになると解く。翼の位置が重心からずれている(偏心している)からだと説明している。

ところが、十文字形のブーメランでも横倒しが起こることが分かっている。アメリカの物理学者ジャール・ウォーカーは、2つの翼にあたる空気の問題として解く。

まず、前進姿勢で回転する翼は、通過する空気の流れを曲げる。そこへ、すぐ後から次の翼が前進してくる。前の翼は、初めての空気(処女空気)を切るために揚力は大きめになり、後の翼は、乱された空気(後流空気)の中に入っていくから揚力は小さめになるからだと説明している。

2つの説は、互いに補完しながら現象をよく説明している。どちらにせよ、翼の上下揚力差がブーメランを左旋回させる力になり、翼の前後揚力差がブーメランを横倒しさせる力になるのである(図7)。



(1) 上下揚力差 (2) 前後揚力差

図7 上下揚力差と前後揚力差

..... 右手の法則

左旋回と横倒しの現象は、地球ゴマを使えば統一的に理解することができる。

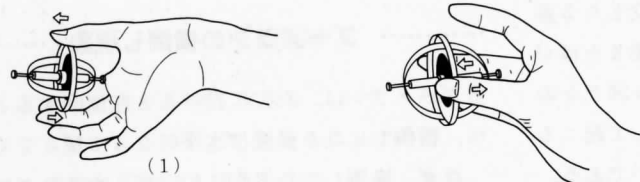


図8 上下に偶力を与えると回転面は向きを変える

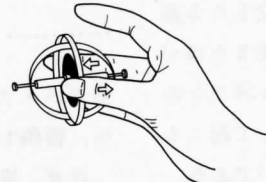


図9 前後に偶力を与えると回転面は横倒しになる

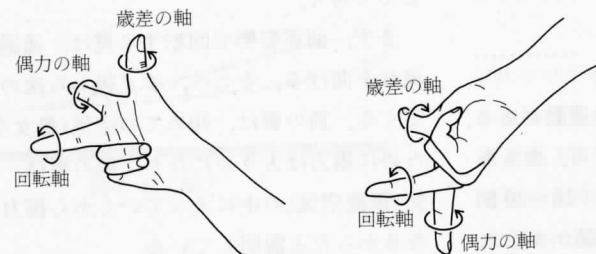


図10 右手の法則

地球ゴマを勢いよく回転させて、図8に示すように右手の親指と中指で、コマを軽く持ち、親指を左方向に、中指を右方向にスライドさせる。すると、円盤は、いま与えた向きに倒れようとはせず、左方向に向きを変える。これは、ブーメランの左旋回である。

同じように、図9に示すようにコマを持ち、中指を左方向に、親指を右方向にスライドさせる。すると、円盤は垂直な面から水平な面になろうとする。これは、ブーメランの横倒し現象である。

歳差運動の軸の関係を理解するために、右手の親指、人差し指、中指の3本を互いに直交するように形づくる。そして、コマが回転する軸を中指に、揚力差によるねじりモーメントの軸を人差し指に対応させると、歳差の軸は親指になる。これを、回転の方向も含めて図10に示しておく。上下揚力差による左旋回の場合も、前後揚力差による横倒しの場合

も、歳差の軸は、この「右手の法則」に保たれていることが分かる。

…後退翼ブーメランの理論…

翼の上下揚力差は、左旋回して戻ることに関係し、前後揚力差は横倒しに関係する。前後揚力差が大きいと、早い時点でブーメラン面が横倒しになる。横倒しになると風の影響を大きく受け、それが揚力となり上空に舞い上がる。

部屋の中でも同じで、紙製のブーメランを投げると、揚力の影響で上昇し、天井にあたってしまふ。天井にあてまいとして低めに投げると、戻ってきたとき手前に落ちてしまふ。そこで、天井にあたらず、かつ正確に戻ってくるブーメランが作れないかということになる。

ブーメランの翼を重心との位置関係から、重心より前にあれば前進翼、後ろにあれば後退翼である

ということにすれば、くの字形のときは、一方が前進翼になり、もう一方が後退翼になる。先に空気を切る翼が前進翼であるために、前後揚力差がプラスの方向に働くことがわかっている。

そこで、3枚翼のブーメランを検討してみると、すべてが前進翼のタイプと、すべてが後退翼のタイプのものを作れることがわかった。後者の場合は前後揚力差がマイナスの方向に働き、ブーメランが垂直のまま揚力が発生せず、軌道の高さを維持しながら正確に戻ってくる。このようにして私が考案したのが、3枚翼の後退翼ブーメランである(図11)。作り方と投げ方の詳しくは、雑誌『BE-PAL』(小学館、1996年2月号)を参照のこと。

参考文献

- (1) 西山豊「ブーメランの飛行力学」『数学セミナー』1978年12月(『サイエンスの香り』日本評論社、1990年

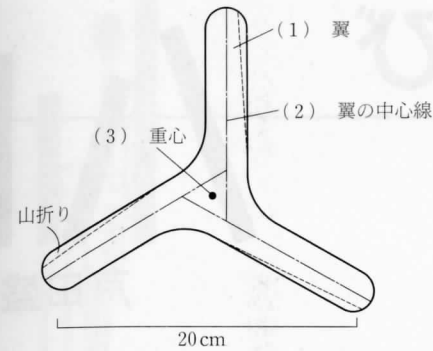


図11 後退翼ブーメラン

に所収)

- (2) Felix Hess, *The Aerodynamics of boomerangs*, Scientific American, Nov 1968
 (3) ジャール・ウォーカー「ブーメラン、その作り方、飛び方」『日経サイエンス』1979年5月
 (4) 西山豊「研究室の窓、ブーメランの数理」『数理解科学』1993年7月
 (5) 西山豊『ブーメランはなぜ戻ってくるのか』ネスコ、1994年9月
 (6) 西山豊「ブーメランの飛行力学に関する研究」『大阪経大論集』1995年9月

(にしやま ゆたか/大阪経済大学、情報処理)

朝倉書店

トポロジー万華鏡 I・II

小竹義朗・瀬山士郎・玉野研一・根上生也・深石博夫・村上 斉著
 A5判 (I)176頁 (II)184頁 各定価2987円 各千310
 数学好きの高校生以上に贈る、どの章から読んでもOKの、ハートは万華鏡の書。〔内容I〕点列を調べようー距離空間の話ー切ったり貼ったりーホモロジー理論ー結んでほいどいてー結び目理論ー
 〔内容II〕開とくりゃ閉ー位相空間入門ー伸びたり縮んだりーホモトピー理論ー曲面で踊るグラフたちー位相幾何学的グラフ理論ー

すうがく トポロジー

ぶっくす5 ループと折れ線の幾何学ー

瀬山士郎著 A5変判 180頁 定価2678円 千310
 ホモトピー理論を直観的に図を多用してやさしく解説。〔内容〕主題と方法/ホモトピー理論/基本群/基礎群の計算/複体と折れ線群/基本群の応用

すうがく 曲面と結び目のトポロジー

ぶっくす11 ー基本群とホモロジー群ー

小林一章著 A5変判 160頁 定価2266円 千310
 基本群とホモロジー群の長所を組み合わせ、曲面と結び目の話を中心にトポロジーのおもしろさを展開。〔内容〕曲面/多面体/連結和/基本群/ホモトピー/他

新数学 関数解析とフーリエ級数

講座9 森本光生著 A5判 176頁 定価3296円 千340
 微積分と線形代数を終え関数解析を学ぶ人のためにフーリエ級数からわかりやすく解説。〔内容〕フーリエ級数とは/ノルム空間/セミノルム空間/分布のフーリエ展開/不変作用素と重畳積/フーリエ級数の応用

現代物理学

江沢 洋著 A5判 584頁 定価7004円 千380
 理論物理学界の第一人者が、現代物理学形成の経緯を歴史的な実験装置や数値も出しながら具象的に書き出すテキスト。数式も出てくるが、その場所で丁寧に説明。この一冊で力学から統一理論にまで辿りつける!

環境理解のための熱物理学

白鳥紀一・中山正敏著 A5判 232頁 定価2987円 千340
 環境理解に不可欠な熱物理学の基礎を文科系の人にもわかるように丁寧に開示。〔内容〕資源物理学と熱物理学/不可逆過程とエントロピー/熱機関/開放系の熱力学/混合と分離/エントロピーと原子論/他

複雑系 複雑系のカオスのシナリオ

双子書1 金子邦彦・津田一郎著 A5判 304頁 定価4944円 千340
 カオス、複雑現象の研究から到達した新しい自然認識を開示。〔内容〕複雑系科学の必然性/カオスとは何か/情報論的立場による観測問題/CML/カオス要素のネットワーク/脳の情報処理とカオスの記述

*定価は消費税込みです。

〒162 東京都新宿区新小川町6-29/振替00160-9-8673
 電話 営業部 (03) 3260-7631 FAX (03) 3260-0180