生産と技術　第55巻　第1号　(2003)

行き先はボールに聞いてくれ

研究ノート

梶　島　岳　夫*

On the Prediction of Self-Induced Motion of Sphere Particles

Key Words：Fluid Dynamics, Wake, Vortex, Numerical Simulation, Lift

1．変化球を設計できるか？

空間を一定速度で移動する物体に働く流体の力と，流れの中に固定された物体に働く流体の力は，(固定に要する支持部材の影響を別として)相対速度が同じであれば等しい．なぜなら，流れを支配するナヴィエ・ストークスの運動方程式は一定速度を差し引きしても変わらないからである．このために，風洞に固定した飛行機や回流水槽に固定した船の模型で実験した結果が意味を持つ．しかし，実際に流れの中を運動する物体に作用する力となると，話は別である．なぜなら，物体の運動は流体の力の影響を受けるからである．このことは，飛行機や船のような巨大な物体に対してはかなり強烈な変動流がぶつからない限り問題にならないと思われるが，慣性力の小さい物体には大きな問題になるに違いない．「魔球をつくる」[1]を読んでふとそんなことを思った．

よく知られているように，ボールに回転を与えて投げると，当たる風と回転の方向が一致する側と反対側の速度差からベルヌーイの定理によって圧力差が生じ，軌道がカーヴする．その意味では縦の回転によって揚力を得ている「直球」も立派な変化球である．

ところで，極端に回転の少ない場合には，表面の状態の影響が顕在化する．野球のナックルボールで言えば，縫い目の方向が重要になる．縫い目の凹凸まで考慮した姫野氏の数値計算の結果によれば，ボールの後流(ウェイク)の渦のパターンは2種類に大別されるそうである[1]．渦が異なれば誘導速度によってボールに作用する力も当然異なる．したがって，縫い目が都合の良い方向に向くように回転を与えれば，(大リーグボール3号ほどではないにしても)新しい魔球を考案できるという．先日，ナックルボールをテレビ中継で見たとき，投げるのも打つのも難しいが，捕球はもっと難しいと解説されていた．新しい変化球についても，準静的な解析ではなく，物体の運動とその周囲の流れの相互作用まで含めた連成問題として扱えばなお面白いだろう．そのような数値計算は原理的には可能であるが，結果はおそらく「行き先はボールに聞いてくれ」となると思う．そのことを以下に書く．

2．今さら球の落下運動

最近，筆者も別の目的で(縫い目も何もないツルツルの)球の運動を解析してみたことがある．たったひとつの球が重力で落下する問題である．高校物理の正解は加速度運動(自由落下)であるが，流体力学を習うと重力と抵抗が釣り合って等速運動(終端速度)に達することを知る．それでオシマイではないか？と思われるかも知れないが，そうはいかない．球は最も単純な三次元形状でありながら，その周りの流れはたいへん複雑である．そして，球は自分自身がつくった流れによって力を受ける．したがって，球が落ちるだけの話ではあるが，実は一筋縄ではゆかない問題を含んでいる．

実験では，大きなタンクの水を静めて，ガラスや金属の球を静かに放せばよいだろう．しかし，残念ながら，非定常な落下運動をする球に働く瞬時の流体力と運動の軌跡を同時に計測することは難しい．また，一様流に固定した球についても，実験では支持部材の影響が避けられない．そんなときには数値シミュレーションが有用である．

* Takeo KAJISHIMA
1958年9月生
1986年大阪大学・大学院工学研究科・機械工学専攻・後期課程修了
現在，大阪大学・大学院工学研究科・機械物理工学専攻，助教授，工学博士，流体工学
TEL　06－6879－7249
FAX　06－6879－7250
E-Mail kajisima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

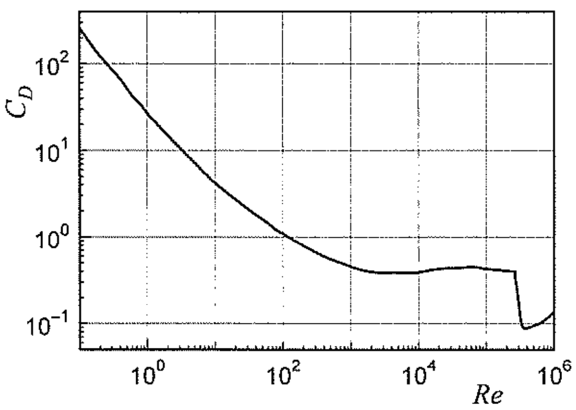

図１　一様流中に固定された球にかかる抵抗(係数)の測定値[2)]

図１は，一様な流れ中に固定された球の抵抗曲線(抵抗係数C_Dとレイノルズ数Reの関係)である[2)]．理論的に表すことができるのはRe<1のごく低レイノルズ数(遅い流れまたは小さい球)に限られる．よく研究されているのは，流れが定常から非定常に遷移するRe＝200〜300の領域と，境界層が乱流になり剥離が遅れて抵抗が急減するRe〜3×10^5の前後である．球技におけるボールのレイノルズ数はおおむね後者の付近であるらしい[3)]．

ここでは，流れのパターン変化として興味深い３桁のレイノルズ数領域に注目しよう．これ以降，筆者が行った数値計算の結果を示す．別の解説[4,5)]にも概要を紹介したので参照いただきたい．

はじめに，一様な流れの中に球を固定し，そのまわりの流れを差分法を使ってナヴィエ・ストークス式の時間進行計算により求めた．図２は，瞬時のウェイクを低圧部(渦の中心は低圧である)で表示したものである．レイノルズ数300ではほぼ同じ方向に渦列を放出し，レイノルズ数の増加とともに渦放出の方向とタイミングが次第にランダムになる．この結果は，ある程度以上の相対速度の中で解放された球は不規則に運動することを示唆している．

実際に自由な粒子のまわりの流れと粒子運動も計算してみた．固体と流体の密度比を2.5および8.8とした．これは水とガラスまたは銅に対応する組み合わせである．自由な球では，同じ相対速度の固定球に比べてわずかに時間平均抗力が増えるが，揚力変動は大幅に減少する．(揚力は必ずしも上向きの力ではなく，主流に直交する成分を示すので，この場合には水平方向である．)揚力の原因は主として非軸対称な圧力分布である．自由粒子はその表面上の最大圧力のポイントから小刻みに回避運動をしていると考えられる．

図３は運動の軌跡である．レイノルズ数の影響だけでなく，球の回転を考慮した計算と無視した計算を比較している．(並進だけ許して回転させない設定は実験では不可能であり，数値計算ならではのパラメーター分析である．)上から眺めた非回転の球の運動は，軽くて遅いとジグザグ運動，重くて速いと横滑り運動となる．その間に螺旋運動するモードがあり，実はこのときは固定球に対して抵抗の増加が少ない．方向が定まらないジグザグモード，特定方向だけしか向かないモードで抵抗が増えるのは，世

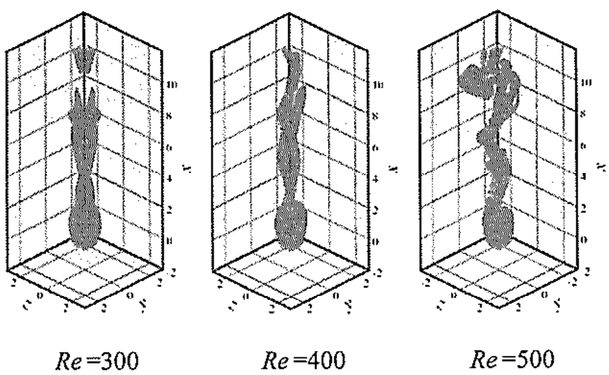

図２　球からの非定常渦放出のレイノルズ数依存性

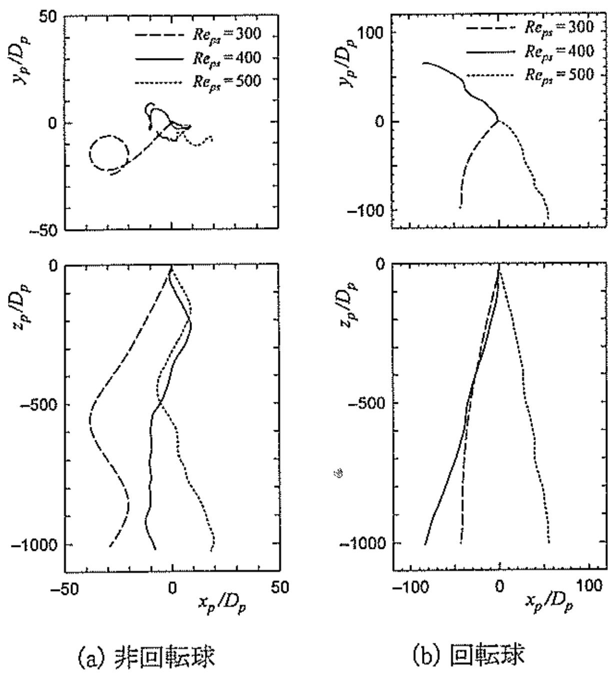

図３　静水中を落下する球形銅粒子の軌跡
(a) 非回転球　(b) 回転球

渡り下手を示唆するようでなかなか教訓的である．ところが，回転を考慮すると，渦放出と粒子回転の相互作用により，ほとんど揺動を伴う横滑りモードに変わる．この違いを固定球での実験から予測するのは難しい．

3．その先の話

固定粒子と自由粒子に作用する流体力の違いは，流体中を運動する物体の軌跡を予測するための基礎方程式を構築するために重要である．ここに示したのはひとつの球を扱った計算なので，そのまわりの流れを計算するのはそれほどたいへんではない．しかし，多数の粒子を含む流れの数値シミュレーションを行う場合には無理で，粒子を質点で近似し，抗力・揚力・履歴効果などを含む運動方程式が適用されるのが一般的である．そのとき，粒子に作用する力としては，上述のような固定球で測定されたデータに基づいたモデルが使用される．なぜなら，前述のように，粒子を流体中で運動させながら軌跡と流体力を同時に測定することは困難だからである．しかし，現実には流体中を運動する粒子に作用する流体力は固定球のそれとは異なることは上の例だけを見ても明らかである．

筆者の現在の関心事のひとつに粒子による乱流の変調がある．粒子による流動抵抗の増減，伝熱の増減は基礎研究としても興味深い．それだけでなく，粒子のもつ様々な機能や相変化まで考えれば，工学的な利用価値はますます高まると思われる．そのために必要なことは，乱流中での粒子運動の正確な記述である．そこで，本稿に紹介した単独球の運動を起点に，粒子群の挙動，乱流渦との相互作用など，素過程の解明に立脚した運動方程式の確立を目指したいと考えている．

文　献

1) 姫野龍太郎：魔球をつくる(2000)岩波書店．
2) Schlichting, H. : Boundary-Layer Theory (7th ed.), (1979) McGraw-Hill, New York.
3) Adair, R.K.(中村訳)：ベースボールの物理学 (1996)紀伊國屋書店．
4) 梶島岳夫：パリティ，16-2,(2001)28-34．
5) 梶島岳夫：機械の研究，54-1(2002)132-137．