

## 退官記念講演筆記

種子田, 定俊  
九州大学

<https://hdl.handle.net/2324/4784735>

---

出版情報：應用力學研究所所報. 66, pp. i-xxvi, 1988-10. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：

## 退官記念講演筆記

種子田 定 俊

ただ今は、所長の光易先生から身に余るご紹介をいただきまして、大変恐縮いたしております。本日は私の研究の思い出話とそれに関連したことをお話ししたいと思います。

先ほどのご紹介にもありましたように、私は第二次世界大戦の末期であります昭和18年の9月に九州帝国大学の理学部物理学科に入学いたしました。その当時、もう戦局は暗くなる一方でありまして、実に暗い学生生活でありました。2年生のとき理論と実験とに分れるということで、私は実験物理を希望いたしまして、水野善右衛門先生のご指導を受けることになりました。当時、水野先生は理学部にあります原子核実験用のベルト式静電高圧装置について研究をなさっておられました。学生時代、私は全く流体には関係がなかったわけでありまして、今申しましたような静電高圧装置をやろうかななどと思っていたわけでありまして、そのころから次第に戦局が厳しくなりまして、理工系の大学は全面的に戦時研究に参加することになり、昭和20年3月から水野先生のお伴をいたしまして、沼津の海軍技術研究所にでかけました。そこで音響に関する研究に従事いたしましたが、ちょうどそのときに海軍技術研究所には九大の流体工学研究所から山田彦児先生がおみえになっておられ、時々お目にかかる機会があったわけでありまして、戦争はその年の8月に終わり、10月ごろから再び大学の授業が再開されました。翌年の21年9月に卒業いたしましたが、卒業と同時に水野先生のご推薦をいただきまして、山田彦児先生の助手として流体工学研究所に採用していただくことができました。山田先生は京都大学理学部物理学科のご出身でありまして、数理解析に非常に秀でた方でありまして、当時は気象高潮の理論的研究を熱心に進めておられました。先ほど所長のお話しにもありましたように、流体工学研究所というのは昭和17年に設置された3部門の研究所でありまして、その当時の所長は造船教室の渡辺恵弘先生が兼務で就任しておられました。その当時、流体工学研究所は建物を持ちませんでしたので、航空教室のご好意により、航空教室本館の3階を借していただいております。当時は食料事情および住宅事情が極端に悪い時代でありまして、下宿など全くありませんでしたので、自宅以外の方は大学に寝泊まりするという状況でありました。流研でも山田先生をはじめ、助手の樁さん、吉田さん、大路さん、それに私の5人が航空の建物に泊まりこんでおります。食事も研究室内で自炊するという、今からは想像もできないような生活をしていたわけでありまして、そのうちにだんだん国民の生活水準が向上して参りまして、研究室に寝泊

まりしていた人たちが次々に下宿に移ることができるようになりました。

ここでその当時の写真を数枚お目にかけてしたいと思います。今映っておりますのが昭和23年か24年頃の写真でありまして、私が撮りました写真であります。したがって私は入っておらないわけであります。一番右が山田彦児先生、山田先生はその後京都大学の数理工学にお移りになられ、現在もお元気でいらっしゃいます。その次の方が栗原道徳先生であります。栗原先生は京都大学の宇宙物理のご出身で、ご停年ののちに長崎大学の工学部長などをお勤めになられました。先年お亡くなりになりました。それからその次の方は、もうこの辺になりますとお顔をよくご存じの方が多いと思いますが、岡部淳一先生であります。航空教室のご出身で4年ほど前に応研を停年で御退官なさいました。その次の方は造船教室ご出身の田才福造先生で、この当時はまだ助教授でいらっしゃいました。残念ながら田才先生も数年前にご病気のためお亡くなりになりました。それから次が池田茂さんといって助手の方です。それから一番左側が土木教室ご出身の篠原謹爾先生であります。篠原先生はその後水工土木に移られましたが、現在も非常にお元気で活躍であります。流体力学研究所の主なメンバーとしてはほかに妹尾先生がいらっしゃいますが、あとの写真に入っております。次のスライドは同じときにやはり私が撮った写真でありますけれども、篠原先生、岡部先生のほかは当時の助手の方々です。この方は航空教室出身の椿東一郎さん、次は東大物理出身の大路通雄さん、その次は機械教室出身の古屋さん、その隣りは土木教室出身の吉田俊彌さんであります。当時、流研の所員は6名、助手も6名でありました。

次のスライドをお願いします。この方が先ほどのスライドには入っておられなかった機械教室ご出身の妹尾先生であります。その隣りは先ほど申しました田才先生です。それから吉田さん。次の人は牛島君といって研究補助員です。そのほかは大路さん、古屋さん、村山さん、それから井上さんです。井上さんは現在流体力学部門の助手をしておられます。

これは栗原先生と山田先生の間に入っている写真でありまして、24才のときの私です。夜、山田先生の部屋で撮りましたもので、撮ったのは大路通雄さんです。カメラはF6.3、フィルムはASA16ぐらいで露出時間は8秒から10秒が必要でした。

今でておりますのは、当時昼間よく皆さんでテニスをやっておりましたそのときの一枚であります。これが大路さん、これが私で、これが椿さん、これが後藤さんという研究補助員の人であります。毎日のように天気のいい日は必ず昼間テニスをやっておりました。

次のスライドをお願いします。航空教室の建物のタワーの屋上にちょっとしたいい場

所がありまして、ちょうどこれは5月で大変気候のいい頃、毎日のようにここに碁盤をもちこみまして、昼食時間は碁を打っていたわけでありまして。これが椿さんで、私の最も良い碁仇でした。これが吉田さん、これが篠原先生、篠原先生が碁を打たれるということは皆さんご存じないかもしれませんが、お相手をしておりますのが大路通雄さんです。これはタワーの上から撮っておりまして、向こうに見えておりますのが航空教室の別館であります。のちに応用力学研究所が誕生しましたときには、この別館をそっくり全部お借りして応用力学研究所が建物をもったわけでありまして。

このスライドは皆んなで志賀ノ島に遠足に行ったときの一コマで、これが井上さんです。当時メガネをかけておられたのです。それからこれが私で、これが古屋さん、これが大路さん、これが村山さんで現在の天本さんの夫人であります。

さて、昭和26年に流体力学研究所と弾性工学研究所が合併いたしまして応用力学研究所が誕生いたしまして、建物としては先ほどの写真に出ておりました航空教室の別館を使わせていただくことになったわけでありまして。応用力学研究所が誕生いたしましてから2年目の昭和28年に私は神戸商船大学に移りましたけれども、昭和39年に岡部先生のところの助教授として、再び応用力学研究所に帰って参りました。早いものでもうそれから23年がたちまして、このたび停年を迎えるということになりました次第であります。

以上が簡単な歴史であります。このあと私が大学を出ましてから今日までの研究の概略をスライドで見ていただきたいと思っております。

先ほど所長からご紹介ありましたように、私の仕事というのはほとんどが流れの可視化ということで、流れの写真を撮ることばかりで40年が過ぎたわけでありまして。流れの写真のスライドの数はかなりたまりまして、ざっと部屋にあるので5~6千枚はあるのですけれども、きょうはとて全部見ていただくというわけにはいきませんので、そのなかから100枚ぐらいもって参りました。時間が許すかぎりそれを見ながら説明させていただきたいと思っております。

私の一番最初の論文がどうゆう題目であったかと申しますと、「電解槽の類推による造波抵抗の測定」共著者岡部淳一ということで、これは岡部先生が主になって計画された研究で、私は実験技術の面で協力いたしましたもので、昭和24年に出版されております。第二番目が山田彦児先生と共著の「Uチューブの中の粘性流体の振動」です。粘性がなければ自由振動でいつまでも減衰しないわけでありましてけれども、粘性があるために急激に減衰いたします。さらに周期も決して等時性があるわけではなく時間的にずれていく。そういうことを山田先生がお得意の数理解析で計算なさって、それを確かめるため



の実験を私がしたわけでありまして、その当時は実験設備が全くゼロの状態でありましたが、先ほど申しました航空教室の3階の研究室のなかに小さな装置を組み立てましてなんとか実験をやったわけでありまして、それから次は「後流の乱流特性の研究(1)」,これは熱線流速計の補償増幅器についての研究で、当時熱線流速計が世界的に爆発的にはやりはじめたところで、当然流研でもやらなければいけないということで、山田先生から熱線流速計をやれということではじめたわけでありまして、実はこの論文は(1)しか出ておりません。そのうち私の興味が流れの可視化の方についてしまいまして、その後この続きをやる機会がなかったわけでありまして、これが昭和26年で、4番目は第1番目の英訳であります。それから5番目が“Studies on Wake Vortices(1)”でありまして、これは有限の長さの円柱後方のカルマン渦列がどうゆう構造をしているかということ調べたものであります。山田彦児先生はさっき申しましたように理論の方で、ご自分では実験はあまりなさらなかったのですが、助手としてとっていただいた私には理論ではなしに実験をやるようにすすめられました。理論の先生は大体理論の助手をとって自分の手伝いをさせるというのが普通だと思いますけれども、山田先生の場合には「自分は理論をやるから君は実験をやってくれ」ということでありました。当時、後流についてはほとんど何もわかっておらず、とりあえずカルマン渦列を観察いたしました。

これがその当時撮りました写真であります。レイノルズ数は87。ここに円柱の後がちらっと見えておりますが、静止した水槽のなかで円柱を動かしますとカルマン渦ができます。流れを見るためにアルミニウム粉末を一様に懸濁させてあるのですが、思ったより簡単に写真が撮れましたので、すっかり気を良くしまして、その後、流れの可視化にのめり込むことになりました。

これは同じくアルミニウム粉末を水槽のなかに一様に分散させて懸濁させておきまして、薄い光の膜を矢印の方向に入れたものです。そうするとこうゆう縦のしま模様がきれいに見えてくるわけです。最初これを見た瞬間には、どうもここに渦の柱があるに違いないと感じたのでありますけれども、よく調べると実はそうではないのであります。こうゆうことでありまして、カルマン渦列はこのようにできておりますが、光の狭い帯はここを通過しているわけです。アルミニウム粉末というのは剪断層のなかでは前断層に平行に配列するという性質があることが、そのときに分かったわけでありまして、ですから光をあてるとこの辺のアルミニウム粉末はこちら側に光を反射いたしますが、この部分のアルミニウム粉末はこちら側に反射いたします。ですからこれを下の方から観察いたしますと、この部分が明るく輝いてみえるけれども、この部分はまっ暗に見えるというわけです。流れに周期性がありますと、非常に敏感に周期性をとらえることがで

きます。

しかしこの方法では円柱の端の影響はよく分かりませんでした。そこで、円柱に薄くコンデンスミルクを塗りつけて実験を行いました。円柱から離れたミルクの膜は筋を形成しますが、その筋が円柱の端の後方では前後につながり合っていることが分かりました。アルミ粉懸濁法で後流の横断面を観察してみますと、このスライドのように、渦巻き断面が明瞭に現われます。こうゆう写真をたくさん撮った結果、有限長円柱の後方のカルマン渦列はこうゆう構造をもっているということが分かりました。それがさっきの論文第5の内容であります。このあと私は神戸商船大学に移ることになりまして、研究はしばらく中断いたしました。神戸商船大学は当時開学したばかりで、学生も第一期生が入ったばかりという非常に忙しい時で、研究どころではないといった雰囲気の中かに移っていったわけでありまして。しばらく経って、やっと少しは研究できる状態になりましたが、そのころ山田彦児先生は円柱後方にはじめて双子渦が現われる臨界レイノルズ数をオセーン近似で計算され、その値が3.02であることを見い出されました。それを実験で確かめられないかというお話しがあつたわけでありまして。幸いに、その程度の実験であれば神戸商船大学でもできるのではないかと思ひまして、大学のなかを歩きまわり、実験に使えるようなものを拾い集めました。落ちておりました四角い鉄製のダクトがありましたので、それを付属工場で水槽の格好に切ってもらつて、さらに窓を開けてガラス板をつけるということをしてもらひまして、一応水槽ができました。その上に車を走らせてその車に円柱をとりつけまして、その円柱の後の双子渦を見ようというわけでありまして。車は手作りで作りました。動かすモーターは自分の電気蓄音機のモーターを外して使用しました。流れはアルミ粉懸濁法で可視化しました。

これはレイノルズ数が5のときの流線模様です。これより小さいレイノルズ数では画面に双子渦は現われません。大体この付近で双子渦がなくなるというのが分かつたわけでありまして。ただ、この実験はすごく面倒でありまして、たとえばここを非常に詳しく調べようと思えば露出時間を相当長くかけなければなりません。実際には一万秒ぐらいが必要であります。そうでないとアルミ粉は筋を引かないわけです。その1万秒の間流れの状態が同じでないといけない。ところが残念なことに実際の水槽の水というのはしょつちゅう動きまわっているわけでありまして、1万秒もの間じっとしてくれることはなくて、常に生き物のように動きまわっています。それがあとから考えると温度の不均一による熱対流によると思ひますけれども、当時はそれを止める方法を知らないものですから、朝から用意して昼まで待っても止まらない。夜中まで待っても止まらない。あくる日になつてもまだ止らない。そういったことが延々と続きまして、たまたま止まっ

ている状態のときにやっと1枚撮れる。1枚撮れると又水が動きますからそれが静まるまで又延々と待つ。そういうことで大変な実験だったわけです。それとごらんになるとわかるように円柱の周囲が暗いのです。これは前に申しましたように、アルミニウム粉末というのは流れのなかで剪断層に平行に配列しますから、円柱表面の近くではアルミ粉は円柱表面に平行に配向します。したがって、円柱の軸方向から見ると暗く見えるわけで、肝心なところが見えにくいのであります。そういうことで、円柱表面近傍のことはあまりよく分かりません。双子渦が無いように見えても、ほんとうにないかと聞かれると困るわけでありまして、顕微鏡で見るとあんがいあるのかも知れません。あるとかないとかということを深刻に考えはじめたわけでありまして、存在するというのを証明することがどんなに難しいかということを感じました。それで仕方ありませんので、渦巻きが大きく現われているときの大きさをレイノルズ数に対してプロットいたしまして、それを外挿いたしまして、それが横軸をきるところの点を探しますと5から6ぐらいにくるわけで、臨界レイノルズ数は実験的には5ぐらいであるということを論文には書いたのであります。しかし残念ながら今日でも正確な値を知る方法はないのであります。外挿したということは外挿ただけのことで、真実であるかどうかは分かりません。真実を知りたいければ解析的に解く以外に方法はありません。実験的にはどうやっても検出不可能です。また、最近はやりの数値実験でも検出できません。数値実験というのはどこまで行っても網の目の精度で決まってしまうから、あるかないかと聞かれると、数値実験では答えられないわけでありまして、現在でも正しい値は分かっておりません。しかし実用的には5か6か、この付近が臨界レイノルズ数ではないかというわけでありまして、山田先生はオセーン近似で臨界値が3.02とおだしになったわけでありまして、その少し前の1950年にイギリスの雑誌“Quarterly journal of mechanics and applied mathematics”に発表されました有名な友近・青井の論文によりますと、臨界レイノルズ数は0だということになっておりまして、世界中の人々は0だと思いこんでいたわけです。ところが山田先生は3.02である。それから私の実験の結果では5か6の間であるということで、実験結果を学会で発表するときには大変な勇気が要りました。その当時友近先生は日本の流体力学の大御所であり、京都大学の教授でいらっしやいまして、G. I. Taylorのところまで研究なさったという経歴の方であります。その大先生の前で大先生の結果と違うことを発表するのですから緊張いたしました。友近先生は最前列で聞いておられました。意外にも友近先生は私の実験を高く評価してくださって、「非常にいい実験である。自分のところの計算をもう一度チェックしなおしてみる」とおっしゃっていただいて、ホッとしました。そのあと友近先生にはいろいろな面でお世話になりまして、

感謝申しあげている次第であります。また、この実験は谷一郎先生からも大変ほめていただきました。

円柱が済みましたので、早速同じことを球で調べたのがこれです。これはレイノルズ数が 118 の程度の渦の輪であります。これがいかなるレイノルズ数で消えるかというわけです。これがレイノルズ数 34 のときの流線模様ですが、渦の輪はずっと小さくなりますがまだ存在しています。これがレイノルズ数 17.7 なんですけれども、もう消えてなくなっています。球の渦輪発生の臨界レイノルズ数は私の実験では 20 の程度ということになります。本当の値は現在でも分かっておりません。皆さんもよくご存じのとおり、流体力学の基礎方程式としては有名な Navier Stokes の式がありますけれども、レイノルズ数が 1 より大きくなりますと解析的には解くことができません。ですから、レイノルズ数が 20 ぐらいの付近の流れを解析的に調べるといことは現在もできていないのであります。

それにひき続いて私がやりました実験は、負のマグナス効果の実験でありました。その当時神戸商船大学に大きな船型試験用の水槽を作っていただきましたので、それを使って実験を行いました。大きいと申しまして幅 2 メートル、深さ 1.5 メートル、長さ 25 メートルだったと思います。負のマグナム効果というのはどうゆうことかといいますと、一般に円柱とか球に回転を与えますと、横向きの力を生じるのですが、その向きが通常の向きと逆に現われる現象であります。通常の場合、円柱の表面が流れと同じ方向に移動する側の圧力が低くなり、そちらの方に揚力がかかるのですが、不思議なことにレイノルズ数が  $10^5$  から  $10^6$  の付近で、しかもある回転数の範囲のときに、全く逆の方向に揚力が発生します。それを負のマグナス効果と申しますけれども、そういう現象があることを実験で確かめたわけでありました。試験物体として直径 20 cm の球を使用し、流れの可視化の手法としてはアルミ粉懸濁法を用いました。この写真で球の回転の方向は矢印の方向です。上が通常のマグナス効果でありまして、流れは左から右へ向かっています。この画面で揚力の向きは下向きであり、後流は反対側の上の方に曲がっているのがわかります。これは通常のマグナム効果の場合であります。ところが下の写真を見ていただくとわかりますように、回転方向が同じであるにもかかわらず後流が下の方に曲がり、このとき揚力は上向きに作用しております。揚力を測定するためには、球及び球に回転を与えるモーターを 1 体にして船型試験水槽の台車の上に置き、ナイフエッジでこの装置全体が自由にかたむくようになっておりまして、力を受けると傾斜するようにセットいたしまして、その傾斜角によって力を測るというやり方で測ったわけであり

この斜線をほどこした部分が負のマグナム効果が発生する領域です。レイノルズ数  $2.3 \times 10^5$  の付近からこのように上の方に広がりまして、この辺で閉じる。こうゆうハート形の領域内で負のマグナム効果が発生するということがわかったわけです。なお、この図の with grid というのは、乱流格子を球の前方において引っぱりますと、負の領域がこのように小さくなって低い方にずれるわけです。このことから、メカニズムといたしましては遷移に関係があることがわかります。円柱あるいは球の流れというのはレイノルズ数が  $10^5$  をこえた付近で層流から乱流へと境界層が遷移するわけで、それとともに剥離点もずっと後退するのでありますけれども、回転を与えることにより、逆回転側の表面の遷移が早まるわけでありまして、その結果逆回転側の剥離点が早く後退し、通常のマグナス力と反対方向に力を受けることとなります。これが負のマグナス力発生メカニズムであると考えられます。

カルマン渦というのはその当時、現在でもそう思っておられる方がおられるかもしれませんが、一様流れの中にブラフボディがあるとき、ブラフボディの表面から流れが剥離して、その剥離渦が交互にうしろの方に離れ、その結果渦列が発生すると信じられていたわけでありまして、しかしながらどうもそうではないらしいということに気がつきまして、実験を行いました。これは迎角  $0^\circ$  の平板です。その後流を見ると、この平板の後端から少しはまっすぐ行きますけれども、まもなく揺れはじめるわけで、そのうしろには非常にきれいなカルマン渦列ができます。つまりこの実験によりまして、カルマン渦列というのは後流の不安定の結果発生するものであり、物体表面からの流れの剥離の有無には無関係であることが明らかになったわけでありまして。

さらに、これは円柱ですけれども、そのうしろのカルマン渦列がうしろに行くといつの間にもやもやモヤモヤしてまいりますけれども、もっとずっとうしろに行くと、もう一度非常にきれいな配列が戻ってくるということに気がつきまして、このことは 1959 年に論文にいたしました。

円柱だけでなく、 $0^\circ$  平板の場合もまったく同じで、流れに平行な平板の後端の少しうしろから非常にきれいなカルマン渦列が発達しはじめ、一時くずれますけれどもそのうしろで再びきれいなカルマン渦列の配列が現われるのであります。これは現在でもいろいろ意見がありますが、私自身はほとんど間違いなく流れの安定性で説明できると考えております。つまり、この付近では後流は幅が狭いためそれに比例いたしまして波長の短いカルマン渦列ができるけれども、だんだんうしろに行くと粘性の作用で後流の幅が広がりますと、その後流の幅に比例して大きな波長の不安定波が発達する。その結果として下流で大規模なカルマン渦列が再配列されるというのはべつに不思議ではないと

解釈しているわけでありませぬ。

それからさらにレイノルズ数の高い場合を調べてみました。この写真は前に申しました船型試験水槽のなかで、迎角 $0^\circ$ の大きな平板を曳行したもので、レイノルズ数は $10^6$ を越えています。しかもトリップワイヤーを前端近くにつけてありますから、境界層は完全に乱流で、平板から流れだしてくる後流は完全に乱流であります。この場合にも後流は少しうしろに行くとも揺れはじめ、一定の波長をもったかなり規則的な波動運動を始めるといふわけで、つまり層流であるとか乱流であるとかにかかわりなく、後流というのは進行波運動を行う強い傾向があるわけであります。

これは今申しましたようなことを線形安定性理論で確かめようといふわけで、山田先生のご指導で計算をいたしまして、それを確かめるために行った実験の結果であります。流れに平行な平板の迎角を周期的に変えた場合の周期がここにあります24秒とか8秒とか18秒とかです。ごらんになるとわかりますように、24秒という非常に周期が長い場合には攪乱は下流に向かって増幅されますが、8秒という短い周期の場合にはすぐに減衰して非常にきれいな直線に戻ってしまいます。ところが18秒ぐらいの攪乱を与えますと中立安定といひまして、ほぼ同じ振幅でずっと下流まで行くといふわけです。これを理論と比べると線形安定理論と非常によく合うということがわかりました。それによりまして、後流が揺れる原因、つまりカルマン渦列ができる原因は後流の安定性で説明できるというふうと考えております。

次に、カルマン渦列ができた状態で、長波長の攪乱をさらに加えてやります。すると、下流では攪乱の振動数と同じ振動数のカルマン渦列が増幅され、きれいに見えてまいります。一方最初のカルマン渦列はどんどん減衰して、見えなくなってしまう。この実験により、自然に発生するカルマン振動数よりも低い周波数の攪乱というのは、必ず下流に行くとも増幅されるということが確かめられたわけであります。

ひき続きまして、まだこれは神戸商船大学にいたときの仕事でありますけれども、非常にレイノルズ数の低い流れに一時興味をもちました。と言ふのは先ほど申しました友近先生がその当時精力的にたくさんのお弟子さんを使って、低レイノルズ数の計算をなさっておられましたが、そのなかのひとつに物体に及ぼす壁の影響の研究がありました。たとえば愛媛大学の高石先生は極低レイノルズ数における壁の影響を熱心に計算しておられました。それを実験でも確かめてみようと考えたわけであります。これはここに壁があつて、もうひとつの壁は画面では見えませんが、その2枚の壁の中央に流れに直角な非常に薄い平板、具体的には厚みが0.1 mmで幅が10 mmですが、そういう平板を置きまして、流体としてはグリセリンを使ってレイノルズ数は0.01の程度であります。

す。ごらんのように剝離はありませんし、流れの向きを変えても流線模様はまったく変化しません。

次は静止した水槽のなかで壁の近くを円柱を一定の速度で移動する場合です。このような流れについても理論計算が次々に出されていた時代でありますけれども、流れの写真ははじめて得られたものであります。非常にきれいに対称によどみ点がありまして、流れの場も対称であり、流れの向きを変えても流れの場は全く変化いたしません。このことはいろいろ物体の形状を変えてやっても同じであります。

これは厚み 0.1 mm、長さ 10 mm の非常に薄い平板が壁に平行に進行する場合がありますが、平板まわりの流線はこのように大きく彎曲するわけでありまして、つまり極低レイノルズ数の流れにおきましては、物体から少し離れた場所の流線模様は物体の形にほとんど無関係であります。

次は正三角柱です。それは今までの物体の形がすべて前後対称なのでおもしろくないというわけで、前後非対称の物体を調べた例です。この矢印の方向に流れがあるわけですが、流れの向きを逆にしても全く流線模様は変わらないことがわかります。

それから極低レイノルズ数における物体の抵抗であります。壁に接近するにつれて抵抗はぐっと高くなります。興味深いのは、物体を壁から離していくと、物体の抵抗は最初は急激に減少しますが、2枚の壁の中央付近で再び少し増大します。このことは物体の形状に無関係であります。

それから、神戸商船大学での一番最後の実験はこれでありまして、旗のフラッター現象であります。小型の垂直風洞の中に上端を細い針金で支持した布を置きますと、布は激しくフラッターします。旗がはためくわけで、そのときの布の形状を写真に撮ったものであります。いろいろの形のモードがあるということがわかります。特にストロボで見ると、各瞬間ごとの布の形が変化する状況がよくわかるわけであります。それから、旗の運動は2次元モードだけでなく、この写真のような3次元モードもありまして、非常に複雑だということがわかったわけであります。

次の写真は布が非常に軽い場合です。旗のフラッターというのは質量比というのがすぐ効くものでありまして、もちろん無次元化しての話でありますけれども非常に軽い布を使いますと、表面に細かい波動が走っているのがよくわかります。このように、旗のフラッターというのを調べれば調べるほど非常に面倒でありまして、面倒であるということがわかっただけで、それ以上はあまり深く追求しませんで、これを最後にまた昭和39年にこちらの応力研に戻ってまいりました。次のスライドからは応力研に戻ってからのものであります。

昭和41年には現在海洋環境部におられる本地先生が私のところに助手として来られました。それから遅れて42年には辰野先生が同じく助手として応研に入って来られました。これは本地先生と一緒にやった実験の一例でありますけれども、円柱に振動を与えますとその後流はロッキングという現象を起こします。流れの非線形性の結果として、後流の周波数はある範囲で加振周波数にロックされるわけです。加振しない場合、後流はカルマン渦列を発生いたしますけれども、その振動数は一定の範囲で加振周波数に同期されます。これはそのロッキングされた状態です。加振しないときの無次元振動数よりも10%高いのですが、完全に同期されています。興味深いのは、同期が外れる付近で後流は同期されたり同期されなかったりを不規則に繰り返すことであります。

本地さんと一緒にやりました次の実験は、表面がしなやかな壁の抵抗係数の測定であります。実験には津屋崎の大水槽を使わせていただき、北さんや田代さんのお世話になりました。しかし、残念ながらしなやかな壁の抵抗は期待したほど下がらず、抵抗はむしろ増える場合が多いことがわかり、実験は打ち切ってしまいました。

それから次に模型船の船体まわりの渦巻きについて実験を集中的に行いました。この実験は主に天本さんに手伝ってもらいました。

水流中に水面を突きぬけて円柱を置きますと、円柱前方の水面がこんもりと盛りあがります。上流側の水面に黒インクを流してみますと、水面を流れてきた黒インクはこうゆうふうに、首飾り渦と我々は呼びますが、首飾り状に渦を形成するわけです。それに対して、水面下数センチのところから流しだした色素はそのまますすぐ行きすぎてしまいます。ということは、水面付近には非常に強い渦巻が存在するというを示すものであります。流れの構造はこの図のとおりです。

船の模型でもまったく同じことをやりました。水面から流しこんだ青いインクはやはりここに渦巻きを作りまして、水面下を来た赤い色素は青インクの筋の下をくぐりぬけます。

これは日立造船の大型タンカーのまわりの水面波の写真であります。実船でも模型船の場合とほとんど同じ流れが形成されていることがわかります。

次に円柱の傾きと首飾り渦の関係ですが、この写真のように、円柱を斜めにいたしますと水は円柱前面を水膜状に這い上り、流れがきれいになり、首飾り渦が消えるのであります。そうゆうことならば船の場合も同じであろうと思ひまして、船首に斜面を取りつけて実験しました。

これは普通の船の模型で、ここに大きくこんもりと逆流領域があります。しかし船首に球をつけ、水面が球の斜面にかかるとき、首飾り渦はきれいに消えてしまいます。そ



の結果として船の抵抗は減少いたします。

次に、流体部の共同研究「実船における境界層の計測」について少しばかりお話しします。スライドに出ておりますのは、実験に使用されました鹿児島大学の漁業練習船かごしま丸で、総トン数は1,038トンであります。その船の境界層を測ることになりまして、流体部の全員で鹿児島まで出向きまして、錦江湾で実験をしたわけであります。これはその実験に先だちまして、かごしま丸の底の、ここの辺に喫水がくるわけですが、その底の方の水面下に測定する場所を決めまして、そこにマークをつけてもらい、この位置にあとで吸盤をとりつけました。その吸盤には櫛型のピトー管とか櫛型の熱線流速計を取りつけて、実際に船の境界層を測ったわけであります。

これがそのときの吸盤と櫛型のピトー管です。この吸盤は水工土木の粟谷先生が考案されたもので、非常に具合がよろしかったものであります。

次にお見せするのは櫛型熱線流速計であります。吸盤もピトー管も熱線流速計も、いずれもうまく作動しました。平均速度分布は櫛型のピトー管を使いまして船の上で計測するわけでありますけれども、船が大きくなりますと甲板までの高さが非常に高いわけでありまして、ご承知のとおり水はいくら吸いあげても10メートル以上はあがってきませんので、この吸い上げ式のマンオメーターというのでは測れないわけであります。そこで逆に圧搾した空気をピトー管に吹き込んで水流の圧力とバランスさせ、その圧力を測ることにより境界層内の平均速度分布を精度よく測定する方法を採用しました。この測定法は深町技官の考案によるもので、我々は深町式マンオメーターと呼んでいます。

さらに、かごしま丸のまわりの流れを可視化しようというわけで、かごしま丸の一番船首のところの両側の、水面下の非常に浅い位置にフロレッセンナトリウムという非常に鮮やかな緑色を出す色素の袋、製品としてはシー・マーカーとっておりますが、それを取りつけ、一方船のビルジ付近、ずっと後の方の両側の少し深いところにローダミンBという赤い色素の袋を取りつけました。ごらんとおり、船首から両側に分かれてずっと壁に沿って流れてきた流れは再び船の後端で一体になり、一本の筋になって出ていく。しかしながらビルジ付近両側から出た流れというのは閉じることなく、そのまままっすぐに行く。これはあきらかに渦巻きが存在することの証明でありまして、模型実験だけではなしに実船でも間違いのないことを確かめたわけであります。

これは右旋回中で、先端の船首付近からフロレッセンナトリウムの緑の色素が旋回中の内側にシート状になって出ていくさまがよくわかります。つまり、船の旋回中は決して船に沿って流れているわけではなく、船から大きくシート状をなして流れが剥離しているということがわかります。それから、ここには船首付近から下流へ伸びる空気の詳細

い紐状の筋が見えます。これは、ここに細い強い渦巻きがあることを示すものであります。以上で実船の流れの計測の話を終わります。

次に私が興味をもちましたのは非定常流れであります。時間的に変化する流れを系統的に調べてみようというわけです。まず最初に物体が静止の状態から急に動き出した場合を調べました。急出発の次の瞬間、物体のまわりには必ずポテンシャル流れが現われます。それに続いて流れの剥離が起こり、渦巻きの発達します。出発流れおよび加速流の実験のほとんどすべては本地さんと一緒にやったものであります。

これは非常に早いスピードで動き出した場合であります。レイノルズ数は1700であります。円柱背後の肩のところにさらに一對の渦がそれぞれ形成されることがわかりました。この第2の双子渦の存在はのちに数値実験によっても確かめられています。

次に静止の状態から一様加速度で動き出した場合を調べました。この場合、速度は最初0からだんだんに速くなっていきます。ここで急出発の場合と一様加速の場合を比べてみます。いま、直径を $d$ 、双子渦の長さを $s$ 、物体の進行距離を $x$ とすれば、 $s/d$ と $x/d$ の関係は急出発と一様加速でほとんど差が無いことがわかります。つまり、動かし方はあまり関係ない。要するに出発点からどれだけ位置がずれたかということで双子渦の大きさが決まるということを示しています。

次に、非定常流の重要な問題の1つに剥離点の定義があります。このスライドはレイノルズ数21.5の円柱まわりの流れをアルミ粉懸濁法と電解沈殿法を同時に使用して観察したものです。これがアルミニウム粉末による流線で、この白く見えておられますのが電解沈殿法における流脈でありますけれども、その流線と流脈とが定常流の場合には一致します。この状態からレイノルズ数を急にあげてやりますと、その次の瞬間から流線の方はきれいに閉じてしましますが、流脈(streak line)の方は加速前の形とほとんど変わりません。このように、非定常流れでは流線と流脈が全く一致しません。ですから剥離点の定義も流線で定義するか、流脈で定義するかによって、全然違ってくるということになるわけであります。

それから楕円柱の場合も実験いたしました。迎角をもっている楕円柱を急に一定の速度で動かしますと、揚力 $L$ ははじめ上りまして、次に下がってほとんど0に戻りますけれども、また上りまして、それからこの辺ではむしろ負になります。それから一定におちつく。そういうことであるということを見出したわけであります。一時的に負になるというのはもちろん条件によるわけで、いつでもそうなるというわけではありませんが、大体このような傾向があります。

揚力が負の状態のときの写真です。あきらかに流れは上の方に傾いておりまして、迎

角が正であるにもかかわらず、揚力は下向きに作用しているわけでありませう。

非定常の場合には定常のときからは想像もできないようないろいろなおもしろいことがあります。これは一定の速度から急に減速した場合です。この減速に関する実験はほとんど辰野さんが一緒にやってくれました。その数年前から私どもの研究室には技官として石井幸治さんが来てくれておりました。石井さんは実験の達人といいますが、私は実験の神さまだと言っておりますけれども、ほとんどうちの実験すべてを手がけてくれました。大体の要領を言いますと、すぐに理解して、こちらが考えた以上の精密な実験装置を組み立ててくれますし、写真技術はもとより電気技術、あらゆる技術に優れておりました。おかげをもちまして私どもの研究室は大変に助かったといいますが、感謝しているわけでありませう。それから写真技術の方は天本さんが写真の名人でありまして、たとえば風洞実験はほとんど天本さんが撮ってくれましたし、水槽実験の一部も天本さんが撮ってくれました。たくさんのきれいな流れの写真が撮れましたのは天本さんに負うところが大きいのでありませう。

これは減速のときで、減速を与えるとその次の瞬間、変な渦巻きが上の方に登っていきまして、やがておし流されるわけだ。こいうことも実験してみないとわからないわけだ。

それから迎角を急に  $0^\circ$  から  $60^\circ$  に変えてやりますと、あとこいうふうに変化いたします。x というのは最初の出発の位置から移動した距離でありまして、d というのは長軸の長さです。

あるいは逆に  $60^\circ$  から  $0^\circ$  に戻してやると、その次の瞬間、下のところからあらたな剝離が起こりまして、表面の流体粒子が流れのなかに入り込んでくるということがよくわかります。

それからこれは前端を中心にして回転振動させますと、こいうふうに変化していくというわけだ。

とにかく非定常と名がつくものは、基本的なものは一通りやってみようというわけでありまして、これは一様流のなかで、楕円の中心を軸にして回転振動を与えた場合です。アルミニウム粉末の流線模様を見ると最大迎角  $30^\circ$  の位置において楕円柱がとまって見えますけれども、途中は動いています。いずれにせよ複雑な渦巻きが見えます。しかしながら、まったく同じ流れを可視化の手法を変えて観察したのが次の写真です。

今度は表面から電解沈殿法でトレーサを出してやると、不思議なことに一本の曲線が出てまいりまして、このうしろに渦の袋ができます。あらゆる位相においてそうなっているわけでありまして、表面から離れた流体粒子は必ずこの線に沿ってうしろに出てい

き、しかもその後方で定常的な渦巻き領域が形成されます。先ほどの流線模様の写真からは想像もできないような流れになっているということがわかるわけでありまして、このように非定常というのはやることがいくらでもありまして、私たちはほんの一通りといえますか、できる範囲のことを簡単にやっただけでありまして、まだ今後やるべきことはいくらでもあるのではないかと考えております。

次は魚の運動でありますけれども、魚というのは進行波運動を行いまして、その反動として推進力を得ているわけでありまして。ちょうどこのころ、イルカの抵抗が非常に小さいらしいということが世界的に話題になっておりました。イルカの謎をなんとか解明しようということになり、いろいろ試みました。そのなかの一つとして、イルカが泳ぐときの進行波運動により表面の境界層が層流を保ち、抵抗が減るのではないかと予想いたしましたして、それを確かめるための実験をしたわけでありまして。ちょうどこのころ、航空教室から友成義正氏が大学院の学生としてうちに参りましたので、集中的にこの進行波運動の流れを調べてもらいました。

たとえば、これは静止した水槽のなかで進行波運動だけを行わせる場合です。この辺から出てまいりました色素はゴム膜に吸いよせられ、うしろに向かって加速されます。つまり、この反動で推力を得ることがはっきりわかるわけでありまして。

これはその少し前に完成しました風洞の写真であります。昭和43年に航空宇宙技術研究所から中村泰治先生を流体部にお迎えして、風洞建設の仕事を手伝っていただき、いろいろと苦勞の末昭和45年3月にこの大風洞が完成しました。それから今日まで非常に活躍している風洞であります。もうしかし、これができてから17~18年がたちました。近くこれは拡張してもっと近代的な研究に適するような形のものに更新して、筑紫地区に移転することを希望しているところであります。イルカの謎を解くには、イルカが速く泳ぐときのレイノルズ数は $10^7$ 程度でありますから、 $10^7$ 程度の実験をしたいわけでありまして、それには普通の小さな実験装置ではだめで、この大風洞でもまだ足りません。実験には足らなかったわけでありましてけれども、ぎりぎりのところまでこの大風洞を使いまして実験を行いました。

これが最初に作りました風洞実験用の進行波運動発生機でありまして、ゴム膜の長さは2.2mです。この装置で得られるレイノルズ数は $10^6$ の程度で、あまり高くありませんが、ゴム膜表面の流れを煙で見ると、進行波運動がないときにはここで剝離します。しかしながら、進行波運動を与えて、しかもその進行波運動の波速が主流の速度より高くなりますと、ぴつたりと表面に沿って煙が流れはじめます。熱線流速計で測ると完全に層流状態になるということがわかったわけでありまして。しかし残念ながらさつき申し

ましたように、イルカが泳ぐときのレイノルズ数は  $10^7$  ですから、これではまだレイノルズ数が足りないわけで、もっとレイノルズ数を上げようということになりました。

そこで、新しく全長が 3.8 m のゴム膜の装置を作って実験したのが次のスライドであります。この場合、表面の境界層は乱流境界層になっておりますけれども、やはり進行波運動の波速が小さいときはこの辺で剥離いたします。しかし、進行波運動の波速が高くなり、一様流速度の 1.2 倍になりますと、乱流ではあるけれども境界層はぴったりと表面に沿って流れるようになります。しかし、イルカの謎を解明するにはまだレイノルズ数が足りませんので、残念ながらこれ以上この風洞ではできないというわけで、ここまでしかやっております。

平板の上に置かれた円筒や直方体まわりの流れも大型風洞を使って調べました。この写真は平板の上に円筒があったときの流れで、ここに流れの渦巻きがありまして、非常に早い流れがこちらからこう入りこんでいまして、ここにえりまき状の渦ができます。流れの構造を図解しますと、こうゆうことになっているわけです。

それからその当時、うちに研究生として泉君が来ておりまして、平板の上に円錐が置かれた場合の流れを調べてくれました。この写真は電解腐蝕法を使って表面の流線模様を調べたものです。

いろいろの流れの可視化技術の欠陥についても調べてみました。円柱がありまして、ここに白金線を張り、水素気泡法で流れを見ると、ここにすき間が見えるわけでありまして、このすき間がなぜできるかということでもあります。まったく同様なことが電解沈殿法やスモークワイヤー法の場合にも起こります。とにかく、物体の上流側にトレーサ発生用の細い針金を張りますと、常に物体とトレーサのシートの間隙間ができます。その理由を図解しますと、こうゆうことになっておりまして、この針金の後流は主流よりも速度が遅いものですから、後流は物体前方岐点圧力に逆らって前進することができないのであります。後流のエネルギーが足りないわけで、途中までしか行けなくて、ここで行きどまってしまいます。実際にアルミニウム粉末で流れを見ると、この針金の後流はこの辺でゆきどまっているということがわかります。先ほどの図面の構造で間違いがないというわけでありまして。

次は高レイノルズ数の円柱の流れでありまして、 $10^5$  程度では流れが非常に大きく剥離しているのがわかります。しかし、 $3.5 \times 10^5$  をこえると、急に後流の幅が狭くなりまして、抵抗係数がぐっと減るわけです。

そのときの表面の流れの状況を油膜法で見ると、3本の筋が現われます。これが層流剥離、これが再付着、これが乱流剥離の線であります。

次は油滴が静水中を降下するときの油滴まわりの流れの例を見ていただきます。レイノルズ数は 550 です。高レイノルズ数における固体球のまわりの流れは、大風洞を使って調べました。この写真はレイノルズ数が  $2.4 \times 10^4$  の場合ですが、後流は進行波運動を行っていることがわかります。

さらにレイノルズ数を高くして  $3 \times 10^5$  をこえると、再びこうゆうふうの流れが安定してまいります。その構造を調べるために、表面の油膜模様を観察いたしますと、このような渦巻き模様が現われます。臨界レイノルズ数をこえると、この図のような構造に変わることがわかったわけです。この実験はうちの風洞で最高の風速を使って行ったものでありまして、私どもはこの構造に自信がありますけれども、誰も追試してくれた人がおりません。この構造が世界的に認められるまでにはまだ時間がかかるように思われます。

時間がまいましたので、あとのスライドは全部省略いたしますが、先ほど所長の方からご紹介いただきましたように、このあと私どもの研究室ではいろいろな実験をやりました。最近では乱流の構造ということに大変興味をもっておりまして、乱流境界層、乱流後流、それからごく最近では円管内の乱流の構造を調べているところであります。

そうゆうことで、40 年ちかく流れの可視化をやってまいりましたが、私どもが見たものは自然の流れのほんの一部であります。自然界の流れというのは大変に複雑でありまして、まだ見ていない流れは無限に多く、今までに見ることのできた流れはあまりにも少ないように感じています。まだ見たい流れはたくさんありますが、いよいよこのたび 3 月で停年退職することになりました。永年、この応用力学研究所におきまして、好きな研究に専念できましたことは誠にありがたく、感謝の気持ちでいっぱいです。その間、応研の皆さん方はもちろんのこと、工学部、とくに航空教室の方々、それから九大の多くの方々に大変お世話さまになりました。厚く御礼申し上げます。皆さま方のますますのご健康とご活躍をお祈りいたします。長時間ありがとうございました。

## あ と が き

本文は退官記念講演の際の録音テープを研究室の石村京子さんに聞き書きしていただいたものに多少手を加えたものです。講演には多数のスライドを使用しましたので、本文だけでは分かりにくいところが多いのではないかと思いますがお許しください。

## 種子田定俊論文リスト

論文題目	発表機関誌等名	発行年
1) 電解槽の類推による造波抵抗の測定 共著者 岡部淳一	西部造船会会報 第1号	1949
2) Note on the Liquid Motion in U-Tube 共著者 山田彦児	九州大学流体工学研究所 報告 Vol. VII, No. 1	1950
3) 後流の乱流特性の研究 (1)	九州大学流体工学研究所 報告 Vol. VII, No. 3	1951
4) Measurement of the Wave-Making Resistance of a Ship by Means of an Electric Analogy 共著者 岡部淳一	Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Vol. I, No. 4	1952
5) Studies on Wake Vortices (1)	Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Vol. I, No. 4	1952
6) Experimental Investigation of the Wake behind Cylinders and Plates at Low Reynolds Numbers	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 11, No. 3	1956
7) Experimental Investigation of the Wake behind a Sphere at Low Reynolds Numbers	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 11, No. 10	1956
8) Negative Magnus Effect	Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Vol. V, No. 20	1957
9) Experimental Studies of the Lift on Two Equal Circular Cylinders Placed Side by Side in a Uniform Stream at Low Reynolds Numbers	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 12, No. 4	1957
10) Oscillation of the Wake behind a Flat Plate Parallel to the Flow	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 14, No. 6	1959
11) Downstream Development of the Wake behind Cylinders	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 14, No. 6	1959
12) 二次元層流後流の安定	神戸商船大学紀要 No. 8	1961
13) 低 Reynolds 数における後流の安定	神戸商船大学紀要 No. 9	1962
14) The Stability of Two-Dimensional Laminar Wakes at Low Reynolds Numbers	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 18, No. 2	1963
15) Experimental Investigation of the Wall-Effect on a Cylindrical Obstacle Moving in a Viscous Fluid at Low Reynolds Numbers	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 19, No. 6	1964
16) Experimental Investigation of Vortex Streets	J. Phys. Soc. Jpn Vol. 20, No. 9	1965

- 17) Flexible な表面をもつ平板の摩擦抵抗  
共著者 本地弘之 九州大学応用力学研究所  
所報 第26号 1967
- 18) 壁面の Flexibility が遷移に及ぼす影響  
共著者 本地弘之 九州大学応用力学研究所  
所報 第27号 1967
- 19) 船の剝離渦 (1)  
共著者 天本 肇 九州大学応用力学研究所  
所報 第27号 1967
- 20) The Skin-Friction Drag on Flat-Plates Coat-  
ed with Flexible Material Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XV, No. 49 1967  
共著者 本地弘之
- 21) Determination of the Drag on Vibrating Cir-  
cular Cylinders Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XV, No. 50 1967  
共著者 本地弘之
- 22) 実船における境界層の計測 (第1報)  
共著者 熊井豊二 他9名 九州大学応用力学研究所  
所報 第28号 1967
- 23) 実船における境界層の計測 (第2報)  
共著者 熊井豊二 他14名 九州大学応用力学研究所  
所報 第28号 1967
- 24) Waving Motions of Flags J. Phys. Soc. Jpn  
Vol. 24, No. 2 1968
- 25) 船の剝離渦 (II)  
共著者 天本 肇 九州大学応用力学研究所  
所報 第29号 1968
- 26) 振動する円柱の後流渦  
共著者 本地弘之 九州大学応用力学研究所  
所報 第29号 1968
- 27) 流体運動の Visualization 日本物理学会誌  
第23巻, 第6号 1968
- 28) 実船における境界層の計測 (I)  
共著者 熊井豊二 他7名 西部造船会会報 第36号 1968
- 29) Standing Twin-Vortices behind a Thin Flat  
Plate Normal to the Flow Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XVI, No. 54 1968
- 30) Vortex Wakes of Oscillating Circular Cylin-  
ders Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XVI, No. 54 1968  
共著者 本地弘之
- 31) 比較的大きな振幅で振動する円柱の流れ模様  
について 九州大学応用力学研究所  
所報 第30号 1968  
共著者 本地弘之
- 32) 静止から一定速度で急に動きだした円柱の非定  
常後流渦 九州大学応用力学研究所  
所報 第30号 1968  
共著者 本地弘之
- 33) Reynolds 数 $50 \sim 10^4$ における円柱後方の逆流  
域の測定 九州大学応用力学研究所  
所報 第31号 1969  
共著者 辰野正和
- 34) 船首くび飾り渦 九州大学応用力学研究所  
所報 第31号 1969  
共著者 天本 肇



- 35) 実船における境界層の計測 (第3報)  
共著者 熊井豊二 他18名 九州大学応用力学研究所  
所報 第32号 1969
- 36) 減速する円柱のまわりの流れ  
共著者 辰野正和 九州大学応用力学研究所  
所報 第33号 1969
- 37) Unsteady Flow past a Circular Cylinder  
共著者 本地弘之 J. Phys. Soc. Jpn  
Vol. 27, No. 6 1969
- 38) Time-Dependent Flow around a Circular  
Cylinder Accelerated Uniformly from One  
Steady Speed to Another Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XVII, No. 59 1969  
共著者 本地弘之
- 39) 実船における境界層の計測 (II)  
共著者 熊井豊二 他11名 西部造船会会報 第40号 1970
- 40) 物体の非定常運動に伴う双子渦  
京大数理解析研究所講究  
録 第101号 1970
- 41) U字管内の自由振動流れ  
九州大学応用力学研究所  
所報 第34号 1970
- 42) Unsteady Flow past a Flat Plate normal to  
the Direction of Motion J. Phys. Soc. Jpn  
Vol. 30, No. 1 1971  
共著者 本地弘之
- 43) Measurements of Boundary Layers of Ships (I)  
共著者 熊井豊二 他7名 J. S. N. A. Jpn  
Vol. 7 1971
- 44) 流れを眼で見る 科 学  
Vol. 41, No. 6 1971
- 45) Measurements of Boundary Layers of Ships  
共著者 熊井豊二 他19名 Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XIX, No. 63 1971
- 46) Visualization of the Unsteady Flow past  
Cylinders and Plates Decelerated from a  
Steady Speed J. Phys. Soc. Jpn  
Vol. 31, No. 4 1971  
共著者 辰野正和
- 47) 風洞測定部に発生する渦  
共著者 深町信尊 九州大学応用力学研究所  
所報 第36号 1972
- 48) 回転振動する円柱の境界層の安定  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所  
所報 第36号 1972
- 49) 円柱後方の逆風域の測定  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所  
所報 第36号 1972
- 50) 応用力学研究所台風災害実験用風洞装置に  
ついて 九州大学応用力学研究所  
所報 第36号 1972  
共著者 熊井豊二 他6名
- 51) Experimental Values of Starting-Vortex  
Length for Circular Cylinders Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. XIX, No. 64 1972  
共著者 本地弘之
- 52) Visualization Experiments on Unsteady Vis-  
cous Flows around Cylinders and Plates Proc. I. U. T. A. M.  
Symposium  
Quebec 1972

- 53) 静止から急に一定速度で動き出した楕円柱の揚力  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所 1972  
所報 第38号
- 54) 進行波運動による剝離の遅れに関する実験  
共著者 友成義正 九州大学応用力学研究所 1972  
所報 第38号
- 55) いくつかの非定常剝離渦の観察 日本航空宇宙学会誌 1972  
第20巻, 226号
- 56) The Development of the Lift of an Impulsively Started Elliptic Cylinder at Incidence J. Phys. Soc. Jpn 1972  
Vol. 33, No. 6
- 57) 進行波表面に沿う流れの速度分布  
共著者 友成義正 九州大学応用力学研究所 1973  
所報 第39号
- 58) 進行波表面に沿う流れの可視化実験  
共著者 天本 肇 他3名 九州大学応用力学研究所 1973  
所報 第39号
- 59) 海洋波シミュレーションに関する研究  
共著者 光易恒 他5名 九州大学応用力学研究所 1973  
所報 第39号
- 60) 物体まわりの粘性流の観察 造船学会粘性抵抗シンポジウム 1973
- 61) 流体運動の可視化 高分子学会会誌 1973  
Vol. 22, No. 254
- 62) イルカのなぞ 日本物理学会誌 1973  
28巻, 7号
- 63) 進行波表面に沿う境界層の計測  
共著者 友成義正 他3名 九州大学応用力学研究所 1973  
所報 第40号
- 64) 振動翼まわりの流れの観察  
共著者 友成義正 九州大学応用力学研究所 1973  
所報 第40号
- 65) Necklace Vortices J. Phys. Soc. Jpn 1974  
Vol. 36, No. 1
- 66) 電解を利用する水流の可視化法の問題点  
共著者 本地弘之 他6名 九州大学応用力学研究所 1974  
所報 第41号
- 67) 加速流の境界層の遷移  
共著者 友成義正 九州大学応用力学研究所 1974  
所報 第41号
- 68) An Experiment on the Flow around a Waving Plate J. Phys. Soc. Jpn 1974  
共著者 友成義正 Vol. 36, No. 6
- 69) The Behaviour of Tracer Particles in Flow Visualization by Electrolysis of Water J. Phys. Soc. Jpn 1974  
共著者 本地弘之, 辰野正和 Vol. 37, No. 3
- 70) 進行波表面の乱流境界層  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所 1975  
所報 第42号
- 71) 非定常運動を行う平板まわりの流れ (I)  
共著者 石井幸治 九州大学応用力学研究所 1975  
所報 第42号

- 72) 電解を利用する新しい流れの可視化法  
共著者 石井幸治 他3名 九州大学応用力学研究所  
所報 第42号 1975
- 73) 平板上円錐まわりの流れの観察  
共著者 泉 耕二 九州大学応用力学研究所  
所報 第42号 1975
- 74) 流れの可視化法と流動解析 日本機械学会誌  
第78巻, 681号 1975
- 75) 非定常運動を行う平板まわりの流れ (II)  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所  
所報 第43号 1975
- 76) 高レイノルズ数における球のまわりの流れ  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所  
所報 第44号 1976
- 77) Visual Study of Unsteady Flows around  
Bodies 14th I. U. T. A. M. Con-  
gress  
Delft 1976
- 78) 非定常運動を行う楕円柱のまわりの流れの  
可視化 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇 他3名 所報 第45号 1976
- 79) 風洞縮流部の壁面圧力分布 九州大学応用力学研究所  
共著者 深町信尊 所報 第45号 1976
- 80) 斜め平板の後方の渦列 九州大学応用力学研究所  
共著者 泉 耕二 所報 第45号 1976
- 81) Visual Study of Unsteady Separated Flows  
around Bodies Prog. Aerospace Sci.  
Vol. 17, No. 4 1977
- 82) 自己推進運動を行う物体の抵抗 Nagare  
9巻, 2号 1977
- 83) 一様流中で回転振動する円柱のまわりの流れ 九州大学応用力学研究所  
共著者 石井幸治 所報 第46号 1977
- 84) 一様流中で回転する円柱のまわりの流れ 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇 所報 第46号 1977
- 85) The Electrolytic Precipitation Method of  
Flow Visualization Proc. Int. Symposium  
共著者 本地弘之, 辰野正和 on Flow Visualization 1977
- 86) 流れの可視化のための電解沈澱法に関する基礎  
的実験 九州大学応用力学研究所  
共著者 辰野正和 他4名 所報 第47号 1978
- 87) 非定常剥離の定義 九州大学応用力学研究所  
所報 第47号 1978
- 88) Visual Observations of the Flow past a  
Sphere at Reynolds Numbers between  $10^4$   
and  $10^6$  J. Fluid Mech.  
Vol. 85, Part 1 1978
- 89) スポーツと抵抗 数 理 科 学  
No. 181 1978

- |      |  |  |      |
|------|--|--|------|
| 90)  | Visual Observations of the Flow past a Circular Cylinder Performing a Rotatory Oscillation                             | J. Phys. Soc. Jpn<br>Vol. 45, No. 3            | 1978 |
| 91)  | 剥離を伴う Stokes 流れの可視化<br>共著者 天本 肇, 石井幸治  | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第48号                         | 1978 |
| 92)  | 円柱の回転振動による流れの加速<br>共著者 石井幸治  | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第48号                         | 1978 |
| 93)  | Moffatt 渦の観察   | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第49号                         | 1979 |
| 94)  | Visualization of Separating Stokes Flows   | J. Phys. Soc. Jpn<br>Vol. 46, No. 6            | 1979 |
| 95)  | 円柱を過ぎる Shear Layer の渦構造<br>共著者 天本 肇, 石井幸治  | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第50号                         | 1979 |
| 96)  | 偏心振動する円柱のまわりの2次流れ<br>共著者 石井幸治  | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第50号                         | 1979 |
| 97)  | カルマン渦列 (その1)   | タ — ボ 機 械<br>7 巻, 11号                          | 1979 |
| 98)  | カルマン渦列 (その2)   | タ — ボ 機 械<br>7 巻, 12号                          | 1979 |
| 99)  | カルマン渦列 (その3)   | タ — ボ 機 械<br>8 巻, 1号                           | 1980 |
| 100) | カルマン渦列 (その4)   | タ — ボ 機 械<br>8 巻, 2号                           | 1980 |
| 101) | 乱流剪断層の低周波数振動<br>共著者 天本 肇, 石井幸治   | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第52号                         | 1980 |
| 102) | The Visual Study of Unsteady Flows around an Elliptic Cylinder Performing Rotatory Oscillation<br>共著者 S. B. Hansen     | Rep. Res. Inst. Appl.<br>Mech. Vol. 28, No. 88 | 1980 |
| 103) | Visualization of Steady Flows Induced by a Circular Cylinder Performing a Rotatory Oscillation about an Eccentric Axis | J. Phys. Soc. Jpn<br>Vol. 49, No. 5            | 1980 |
| 104) | ミニコンピュータによる風洞運転制御システムについて<br>共著者 中村泰治 他5名  | 九州大学応用力学研究所<br>所報 第53号                         | 1980 |
| 105) | Definition of Separation   | Rep. Res. Inst. Appl.<br>Mech. Vol. 28, No. 89 | 1980 |
| 106) | Some Practical Details of the Electrolytic Precipitation Method of Flow Visualization<br>共著者 本地弘之, 辰野正和                | Rep. Res. Inst. Appl.<br>Mech. Vol. 28, No. 89 | 1980 |
| 107) | 乱流境界層の流れの可視化   | 流 れ の 可 視 化<br>Vol. 1, No. 1                   | 1981 |

- 108) Large Scale Periodic Motions in Turbulent Shear Layers J. Phys. Soc. Jpn Vol. 50, No. 4 1981
- 109) Amplification of Artificial Disturbances in Turbulent Boundary Layers J. Phys. Soc. Jpn Vol. 50, No. 7 1981
- 110) 乱流境界層中における周期的攪乱の成長の可視化  
共著者 天本 肇, 石井幸治 流れの可視化 Vol. 1, No. 2 1981
- 111) 乱流境界層の大規模な組織的運動の発生機構  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第55号 1981
- 112) 振動平板のまわりの流れ模様  
共著者 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第56号 1982
- 113) 乱流境界層の構造 日本流体力学会誌 第1巻, 第1号 1982
- 114) 乱流後流の構造  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 115) 一様流中で角振動する平板の後流  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 116) 円柱の層流剝離泡の観察  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 117) 乱流を見る 数 理 科 学 第233号 1982
- 118) Visualization of Unsteady Flow Separation Flow Visualization II ed. W. Merzkirch Hemisphere 1982
- 119) Formation of Streamwise Vortices in the Flow past a Corner J. Phys. Soc. Jpn Vol. 52, No. 1 1983
- 120) 平面壁の屈折部における縦渦の発生  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第58号 1983
- 121) 回転平板の後流  
共著者 天本 肇, 石井幸治 九州大学応用力学研究所報 第58号 1983
- 122) 連続スペクトルの発生機構 九州大学応用力学研究所報 第59号 1983
- 123) Visual Observations on the Amplification of Artificial Disturbances in Turbulent Shear Flows Phys. Fluids Vol. 26, No. 10 1983
- 124) The Main Structure of Turbulent Boundary Layers J. Phys. Soc. Jpn Vol. 52, No. 12 1983
- 125) The Spectrum of Turbulence Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Vol. 31, No. 98 1984
- 126) 流体力学における2, 3の疑問点 日本流体力学会誌 第3巻, 第3号 1984

- 127) 平板上直方体まわりのストークス流れ  
共著者 石井幸治 九州大学応用力学研究所  
所報 第60号 1984
- 128) Flow Field Visualization Theor. Appl. Mech. ed.  
F. Niordson and N. Olhoff, North-Holland 1985
- 129) Flow Visualization Proc. Intern. Symp. Se-  
parated Flow around  
Marine Structures,  
Trondheim, June 26-28 1985
- 130) Visual Studies of Wake Structure behind  
Two Cylinders in Tandem Arrangement Rep. Res. Inst. Appl.  
Mech. Vol. 32, No. 99 1985  
共著者 Huhe-Aode, 辰野正和
- 131) Visualzation of Coherent Structures in Tur-  
bulent Flows ANALES DE FISICA 1985  
共著者 R. Martinez-Val Vol. 81
- 132) スモークワイヤー法の欠陥 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇, 石井幸治 所報 第62号 1986
- 133) 乱れの観察と流体の秩序 数 理 科 学  
Vol. 24, No. 7 1986
- 134) Transfiguration of Surface Waves around an  
Oscillating Sphere Fluid Dynamics  
Research Vol. 1, No. 1 1986
- 135) Irregular Flows Proc. 3rd Asian Con-  
gress of Fluid Mech. 1986
- 136) カルマン渦列の不規則性 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇, 石井幸治 所報 第63号 1987
- 137) 加振円柱後流の挙動 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇, 石井幸治 所報 第64号 1987
- 138) 流れの博物誌 科 学  
Vol. 57, No. 6 1987
- 139) Irregular Flows SADHANA 1987  
Vol. 10, Parts 3 & 4
- 140) アルミ粉による乱流の観察 九州大学応用力学研究所  
共著者 天本 肇, 石井幸治 所報 第65号 1987
- 141) 流体運動の画像処理による解析システムの開発 九州大学応用力学研究所  
共著者 中村泰治 他9名 所報 第65号 1987
- 142) 流れの可視化の問題点 流 れ の 可 視 化  
Vol. 7, No. 27 1987
- 143) 流れの可視化 土 木 学 会 論 文 集 II 1987  
第387号
- 144) 流体における不規則運動 日 本 流 体 力 学 会 誌 1987  
共著者 船越満明 第6巻, 第4号