

特別寄稿

人生の活力は研究活動にあり ～私の流体の力学研究のトピックス～

中山 泰喜（未来技術研究所所長）

人生の活力は研究活動にあり

～私の流体の力学研究のトピックス～

目次

1. はじめに	1
2. 新幹線開発に利用したレイノルズの相似則の応用	2
3. 国鉄を救った大型自動軌道整正機（オートマルタイ）	2
4. レーザドップラー流速計の開発	3
5. 火花追跡法の開発	4
6. ターボ機械羽根車内の流れの可視化	5
7. ゴルフボールの開発	5
8. 大量生産に適したダクトの開発	6
9. トンネル工事の換気に関する研究	6
10. 流体の力学から見た縄文土器	6
11. 曲水の宴の水路の流体の力学的考察	7
12. ウォータベールの癒し効果の検証と心の可視化	8
13. 水の美味しさの数値表現	9
14. 渦室発振素子の融雪への利用	10
15. おわりに	11

人生の活力は研究活動にあり

～私の流体の力学研究のトピックス～

東海大学工学部教授として長らく教鞭を取られ、多くの後進を育てられた流体力学の権威、中山泰喜先生の特別寄稿を掲載します。中山先生の多様な研究業績を通じて、流体の力学の奥深さや可能性を紹介し、先生の研究への想いを通じて人生の活力について考えます。



中山 泰喜
未来技術研究所所長

1. はじめに

私は幼少の頃より機械関係の物造りが好きで小学校入学前に自転車の模型を製作し近所の人を驚かせた記憶があります。小学校に入学してからも鉄道や船の模型を作り楽しみました。絵を描くことも大好きで6年生のとき県のスケッチ大会で入賞し県知事賞を頂きました。また、特に算数が得意でした。

中学入学以後は勉学に励み、早稲田大学理工学部に進み1952年に卒業いたしました。ここで私は生涯の仕事として流体の力学を選びました。その理由の一つは流体の力学は正確に計算できることと、もう一つは可視化によって明瞭にその現象を直接目で見るができることでもあります。

当時早稲田大学には著名な先生が多くおられました。水力学で沖巖先生、流体力学で伊原貞敏先生、熱力学で柴山信三先生、自動制御で高橋利衛先生に強く憧れて、卒業後も12年大学に通い指導を受けました。学位論文は『空気マイクロメータ内の流体の作動に関する研究』でした。

大学卒業後は鉄道技術研究所で研究を続け、1972年に松前重義先生を慕って東海大学に移りました。

それでは私の行った主な研究についてお話したいと思います。まずは、鉄道技術に関する研究についてです。ひとつは、新幹線の開発における空力特性の研究であり、もうひとつは、線路の位置を自動的に修正する画期的な装置の開発でした。特に後者は、ロボット技術の先駆けともいえるもので、実際に全国に配備され、安全な鉄道運行に欠かせない、保線業務に大きな効果をあげました。

2. 新幹線開発に利用したレイノルズの相似則の応用

新幹線車両の走行中の空力特性を研究するのに、1958年に津田沼の国鉄用地に大きなプールを造り、模型車両を水中で走らせる実験を行いました（図1）。

レイノルズの相似則を用いると空気の流れを水の流れに置き換えることが可能になります。それに基づくと、水中では空中での15分の1の速度で同じ現象を生じさせ、力は800倍になり、現象を把握しやすくなります。また流れの可視化にも大変便利でした。

この法則をレイノルズ以前に利用し、図2に示すように油を注ぐときに漏斗を使わず、永楽銭の穴に通して「油が穴にふれたらお代は頂きません」といって油を注ぐパフォーマンスを見せ、京都で巨万の富を得て油売りの行商から戦国武将になった松波庄九郎（斉藤道三）の特技は、レイノルズの相似則による速く流れても粘り気があれば乱れないという油の特性を利用したものでした。

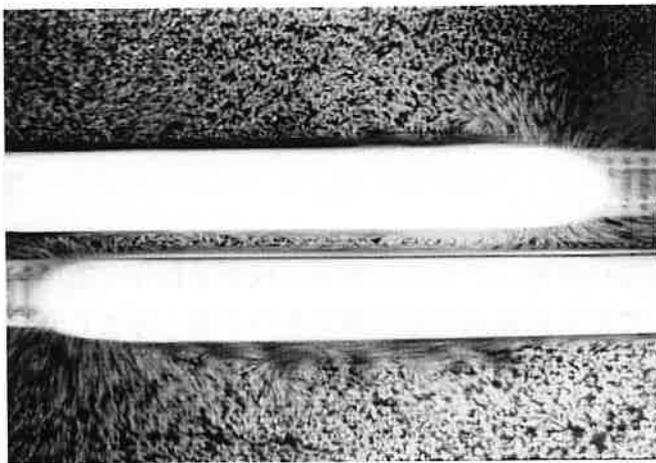


図1 すれちがう新幹線



図2 松波庄九郎

3. 国鉄を救った大型自動軌道整正機（オートマルタイ）

1963年に、国鉄本社より最重点課題として大型自動軌道整正機の開発を命ぜられました。これは大きなロボットで変動荷重の定位置制御と言う新しい命題であります。

この命題を解決すべく、当時の油圧制御のバイブルと言われていたMIT（マサチューセッツ工科大学）のDr.Blackburn等の原著になる『Fluid Power Control』を鉄研グループで完訳しました。これは日本で最初の快挙です。

これと平行して、この制御系の基礎研究を行いその結果を利用し、3台の試作機を経て、図3に示す実用機1号が1970年に完成しました。この実用機は完全自動で、直線路は勿論、カーブのカント曲線も、上り下りの円曲線も総て1mmの精度で、全自動で搦き固めを行う世界最初の完全自動の大型軌道整正機であります。

この実用機1号を用いて現地試験を繰り返し、完全な性能を確認した後、1973年大量生産にはいりました。実用機は約800台製作され、全国に配置され、保線作業に大きな効果をあげております。私はこの功績により、1975年紫綬褒章を頂くことができました。



図3 大型自動軌道整正機 (オートマルタイ)

続いて、空気の流れに関連した研究を6件ほど紹介します。まずは、レーザの利用、ついで火花追跡法とその利用、ダクトの開発とトンネル工事の換気についてです。

4. レーザドップラー流速計の開発

流体中を流体とともに移動するトレーサ粒子にレーザ光を当てると、粒子からの散乱光はドップラー効果により元の入射光に比べて粒子速度分だけ周波数に差を生じます。周波数の差を光電変換器(フォトマル)によって測定し、その信号を処理し、トレーサ粒子の速度から流速を求めることができます。

この装置はそれまでの研究をもとに1971年より計画し、1972年 生産機械工学科、光学工学科、電子工学科と溝尻光学工業所、日本科学工業(現カノマックス)との協同研究として進める事になりました。1973年装置を完成することができ、レーザドップラー流速計と命名して日本科学工業より販売を開始しました。当時外国製品は輸入されておらず、日本独自の開発で、日本における産学協同の成功例と思います。図4に第1号流速計を示します。

この流速計は、mm/sの程度の低速から数百m/sの高速までの流速の測定が可能であり、圧力・温度・密度・粘度の影響を受けないなどの特徴を持っています。



図4 レーザドップラー流速計

5. 火花追跡法の開発

高電圧を向かい合った電極に供給して火花放電をおこさせます。火花はすぐ消えますが、その後にはイオン化された空気の線を残します。その線は流れと共に下流に移動し、次に高電圧を供給すると、火花は電極の最短距離を飛ばないで、抵抗の少ない流れにつれて移動したイオン化された線を通して放電が行なわれます。このようにして次々に高圧パルスを供給すると、次々にその瞬間のタイムライン、即ち速度分布が示されます。

この方法を使ってターボ機械羽根車内の空気の流れや、ゴルフボールの周りの空気の流れの可視化を行ないました。

6. ターボ機械羽根車内の流れの可視化

三角プリズムを用いた動バランスに優れた回転像静止装置を開発し、ターボ機械の内部流れを観察しました。サージング現象（ポンプ・送風機・圧縮機を低流量で運転するとき圧力・流量が周期的に変動する現象）を可視化したのも貴重な写真と思います（図5）。

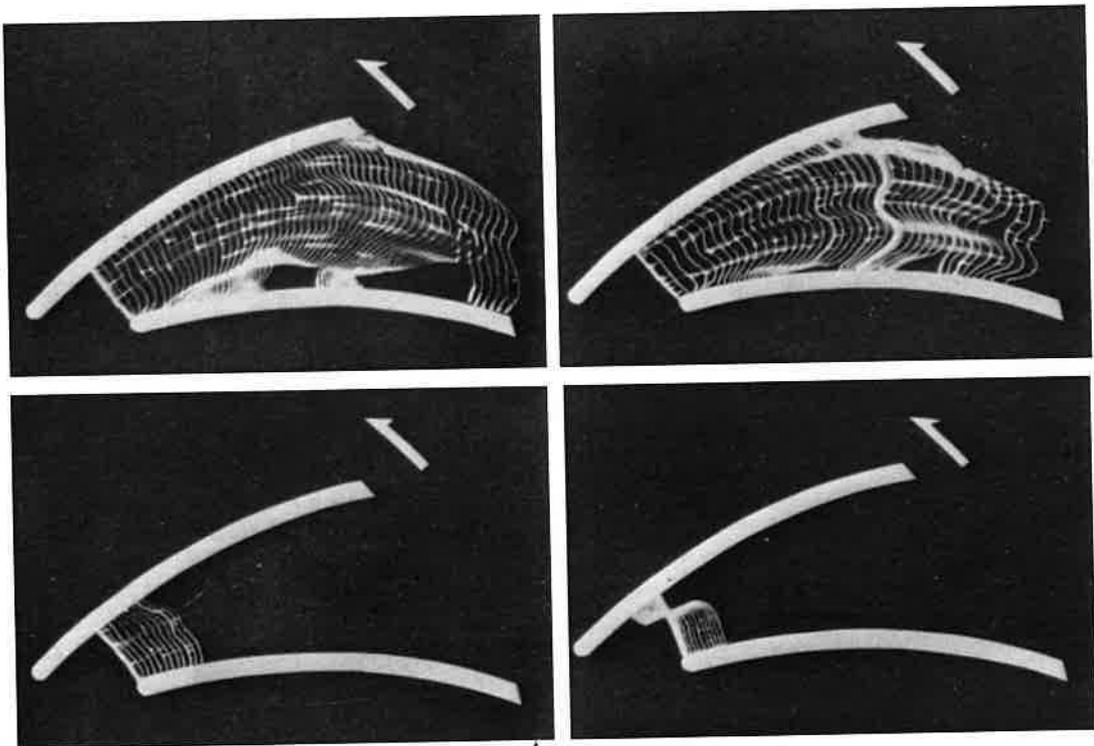


図5 火花追跡法によるサージング現象の可視化

7. ゴルフボールの開発

横浜ゴム（株）の協力を得て、流体の力学を根拠とした、飛ぶゴルフボールの開発をいたしました。これにも可視化が効果を発揮しております。

23m/sで飛翔するディンプルのないボール（滑面球）と、あるボール（ゴルフボール）の

非回転と 4000rpm で回転している場合の周りの流れを可視化し、ディンプルと回転の効果を明瞭に観察することができました。滑面球とゴルフボールの写真(図6)は実速度で可視化した世界最初のものとしてアメリカ・スミソニアン博物館に展示されました。

図6-1は非回転時の滑面球周りの流れであり、約80°付近で層流はく離しております。これに対し、図6-3のゴルフボールはディンプルにより表面の流れは乱流境界層となり、はく離点が下流側へと移動し約125°となり、後流の渦領域は小さくなるため抗力係数が格段に低減します。

また、ボールに時計方向の回転を与え飛翔させると、滑面球(図6-3)の増速側(上側)では、はく離点が約80°で層流はく離しているのに対し、減速側(下側)でははく離点は約110°で乱流はく離となるため、増速側よりはく離点は下流側に移動し、従って揚力の方向は下向きに発生していることがわかります。

これに対し、ゴルフボールの場合(図6-4)周り流れは乱流境界層となり、増速側では約110°で、減速側では約90°付近ではく離していることがわかります。従って、揚力は上向きに発生していることが推察できます。

また、ディンプルの数、大きさ、深さを変えることにより、臨界領域をレイノルズ数の小さい領域に移動し、クラブのヘッドスピードに応じてボールを選べるようにした試みは、世界最初の試みとして高く評価されております。なお、このボールは製品化され、プロゴルファーをはじめ多くの方々に愛用されております。

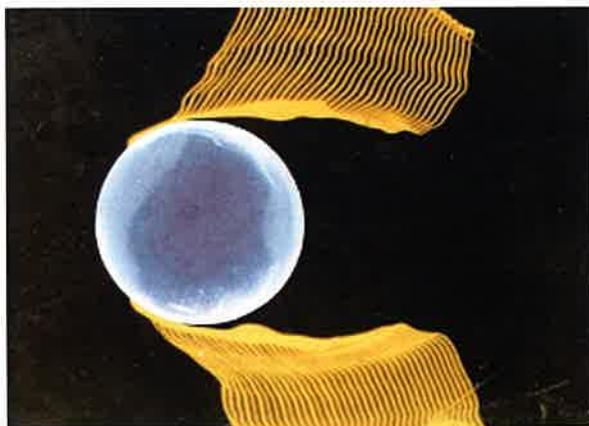


図6-1 滑面球 非回転

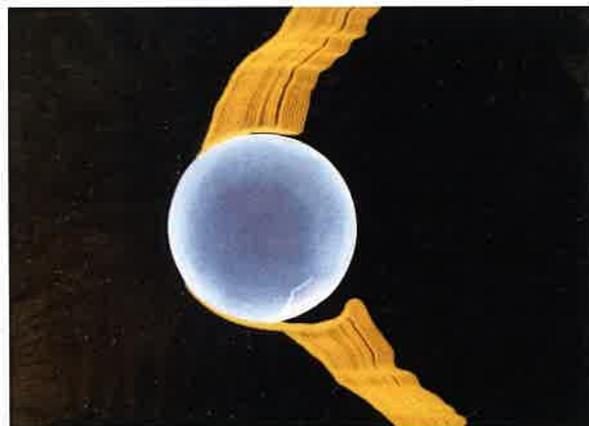


図6-2 滑面球 回転 時計方向 4000rpm



図6-3 ゴルフボール 非回転

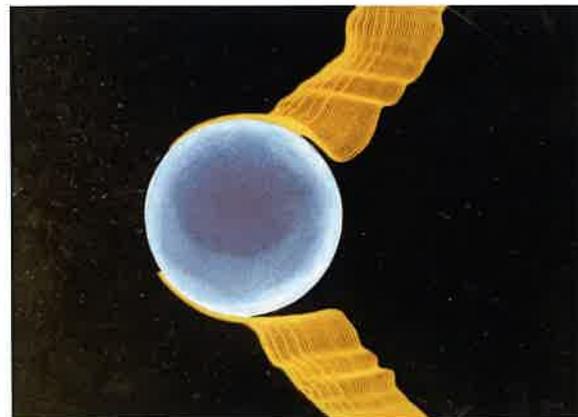


図6-4 ゴルフボール 回転 時計方向 4000rpm

図6 火花追跡法による可視化(飛び速度 23m/s)

8. 大量生産に適したダクトの開発

T形分岐管の工法の合理化を目的とし、また、生産容易でかつ生産の合理化を目的として、製作容易でかつ生産の近代化に適する長方形断面ドン付け分岐管を開発し、その評価を分岐損失という立場から行ないました。

新しい8種類の分岐管と従来の割り込みT型分岐管と比較し、面取りの程度を5種類に変え、可視化も併用してその効果を確認しました。この研究成果を利用したダクトは新宿センタービル（大成建設）に使われております。

9. トンネル工事の換気に関する研究

切羽付近を対象に最も適した換気方式を明らかにすることを目的とし、掘削中のトンネル（小倉山トンネル）とその約1/20縮尺模型内の流速分布を比較検討し、それらの流れの相似性を確認した後、模型を用いて、トンネル内特に切羽付近を対象として速度分布と粉塵濃度を換気方式、ダクトの位置、局所ファンの位置を変化して調査しました。また、可視化によってその現象を確かめました。この結果を用いて、切羽付近の作業員に対する空気を清浄にする為の最適な換気方法を明らかにしました。

次は、少し目線を変えて、人文社会学系的话题を提供しましょう。縄文土器と曲水の宴に関連するお話です。

10. 流体の力学から見た縄文土器

縄文時代は今から約12,000年前に始まり、約2,500年前に至ると言われております。この時代に作製された縄文土器は日本各地で発見され、沢山の種類があります。その中で、1931年に新潟県長岡市郊外の馬高遺跡で発見された土器は特に見事な文様をもっております（図7）。

特に馬高遺跡の土器は上部の双子渦と下部のカルマン渦と区別して造形した点において優れております。火焰からはこのような渦はできません。この研究結果により、縄文土器の文様が水流からの着想であることが明らかとなりましたので、従来の火焰という発想も尊重し、同類の土器を今後、火焰水文土器と呼ぶと共に、双子渦とカルマン渦を合わせて縄文渦と呼ぶことを学会論文で提案しております。



図7 火焰水文土器（馬高遺跡）



(a) 双子渦



(b) カルマン渦

図8 石の背後の渦の可視化結果

11. 曲水の宴の水路の流体の力学的考察

曲がりくねった水路の両側に歌人を配し、上流から酒の盛られた杯を浮かべて流し、ある所で停滞したら、その杯が一番近い歌人はすぐに詩を一首読む、という雅やかな宴会は、353年に中国の紹興で王羲之が文人41名を集めて行った宴が有名で、その様子は蘭亭修禊図巻に描かれています。

その後、韓国を経て、485年にわが国に伝わったことは日本書紀に記されております。以来曲水の宴と名付けられて全国各地で行われました。

現在全国8ヶ所にその遺構をみることができ、そのうち5ヶ所で昔ながらの様式で曲水の宴が催されております。京都・城南宮の曲水の庭を図9に示します。城南宮では王朝風で行われております。

蘭亭と城南宮と磯庭園(鹿児島)の曲水の宴の水路の水の流れの速度分布、渦、逆流、はく離などを表面浮遊法とPIV(粒子画像流速測定法)を用いて可視化し、杯の流れを優雅なものにした昔の造園師の知恵を探りました。

そのデータを参考にして作成した新しい理想的な模型水路における可視化実験と数値シミュレーションの結果を図10、図11に示します。



図9 曲水の宴(城南宮)



図 10 可視化実験による結果 (模型水路)

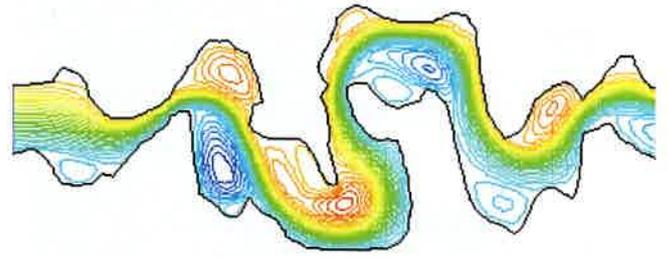


図 11 数値シミュレーションによる結果 (模型水路)

最後にご紹介するのは、私たちの生活に密接な「水」に関する研究成果です。実際の暮らしに役立てられているほか、今後の発展が期待される研究です。

12. ウォータベールの癒し効果の検証と心の可視化

二枚円板形ノズルの流出流れを加速流れになるように出口形状を工夫することにより、厚さ 1 mm の極めて薄いビニールシートのような透明膜からなるウォータベールを形成することに成功しました。

このウォータベールは空気清浄効果、加湿効果があり、またレナード効果によりマイナスイオンを発生することも分かり、ゆらぎの効果も認められたので、このウォータベール内の空間を癒しに使うことを考えました。そこで、1人用と4人用、8人用(図 11)のウォータベールを製作し、数値解析と実験を行い、その特性を明らかにするとともに、これを、心身の癒しに利用した場合についての効果を脳波測定による感情の分析により検証しております。この装置を用いた健康ランドの建設を考えております。

癒しに利用した場合についての効果を脳機能研究所の協力により脳波測定による感情の分析より検証しております。

それについて2例を示します。被験者は入浴前に脳波を計測し、10分間ウォータベール付浴槽に入浴します。10分間の入浴後、脳波を計測します。その脳波の信号を、感性スペクトル分析法(ESAM)により処理すると図 13 のようになりました。入浴前はストレスの値は大きく表れ、リラクスの値は小さかったのが入浴後は、逆にストレスの値は小さく表



図 12 8人用ウォータベール

れ、リラクスの値は大きくなりました。すなわちウォーターバールにはいることによりストレス解消ができるということが立証されました。

この装置は健康産業、予防医学（心身のケア）分野の産業への利用が考えられます。

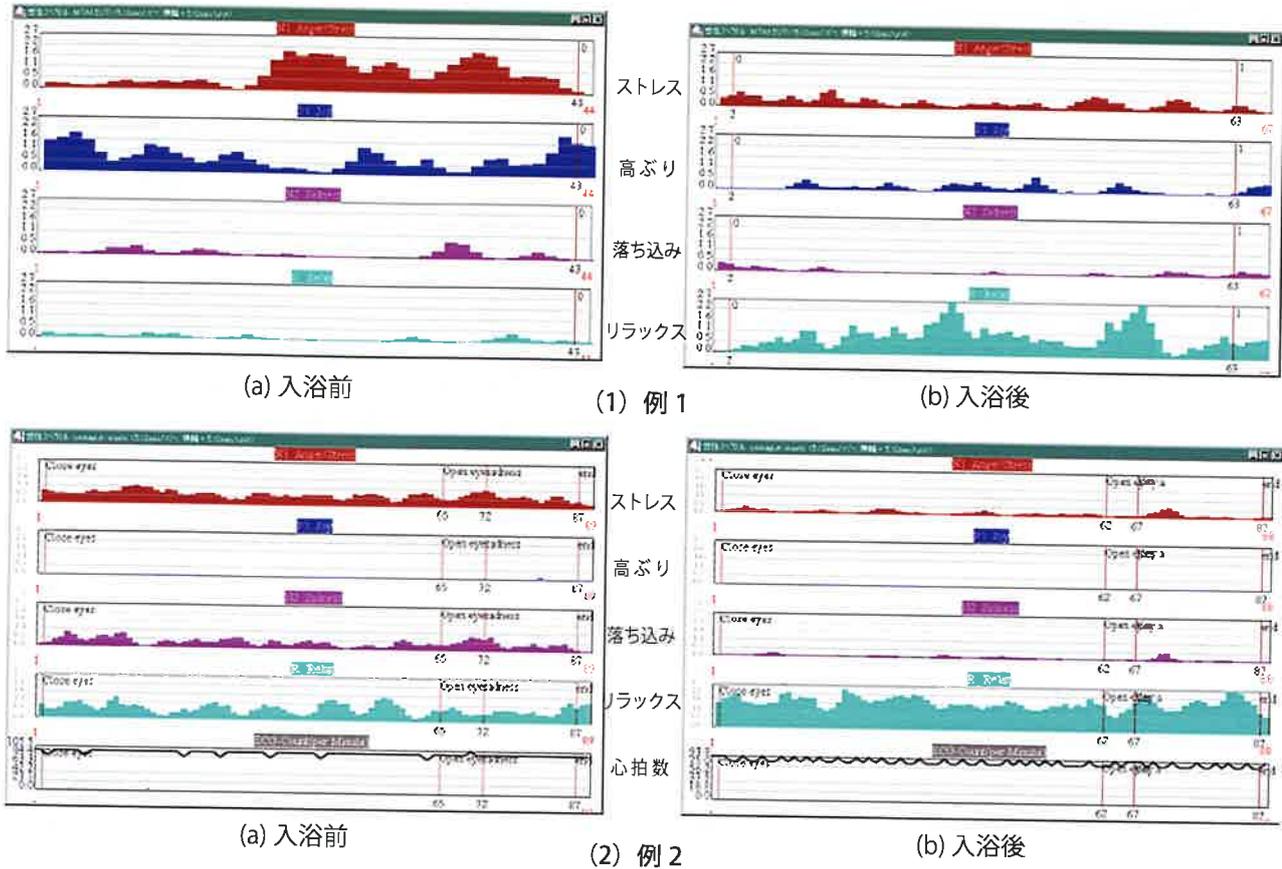


図 13 入浴前後の脳波の比較

13. 水の美味しさの数値表現

私の住む東京・練馬区には、地下 230m 以下にある東久留米層の美味しい水を汲み上げて利用する大泉名水会*があります。

これらの水の水質を数値化しようと、東海大学の故真下悟教授に続いて八木原晋教授と共同研究を実施しました。その結果、水の美味しさを数値表現した表 1 の数値を得ました。水の美味しさを数値表現できたのは世界初めてで、高く評価され、この研究は NHK から放送され、何箇所かの民放からも放送が行われました。

表 1 美味しい水の比較

各地の水	おいしさの評価
カナダ・ケベックの水	0.999
*大泉名水会の水道（2号井戸）	0.997
*大泉名水会の水道（3号井戸）	0.993
鎌倉の水道	0.992
秦野の湧水（弘法の水）	0.991
横浜の水道	0.990
東海大学の水道（浄水器を通す）	0.990
六甲の水	0.988
東海大学の水道	0.978
大阪の水道	0.975
東京の水道	0.969

練馬区ふるさと文化講座にも取り上げられ、「大自然からの贈り物～大泉の名水～」の題名で文化講座として2013年9月に講演を行いました。

14. 渦室発振素子の融雪への利用

図14のような形状の素子に水が供給された場合の流れを考えてみます。供給口より供給された水は、主ノズルから渦室を横切って流出口から噴出します。流出口の幅は噴流の幅よりわずかに広くしてありますので、噴流は左か右どちらかの流出口の先端に当たり、粘性により流出口の側壁に付着し、大きく広がって流出します。この場合、もし左側に付着したとしますと、噴流の右側に接した右側の渦室の空気は、噴流に誘われて噴流とともに排出され、右側の渦室の圧力は下がります。

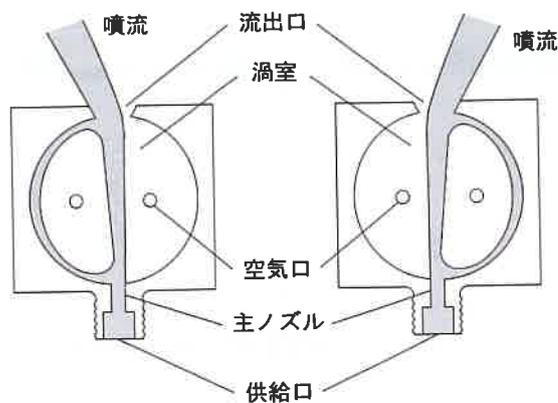


図14 渦室発振素子の原理

この圧力差によって、噴流は右側に曲げられます。このような動作が繰り返されて安定した発信が得られます。

この渦室発信を利用した渦室発信素子が開発され、散水装置として利用されています。冬季の日本の北部では多量の降雪があるため、新幹線では散水によって速やかに融雪して除雪することが考えられ、渦室発信素子が散水装置として採用され、線路の両側に6mおきに設置され大変良い結果が得られています。写真(図15、16)は、散水により消雪された新幹線線路を示します。

この素子は食品ケースや機械部品の洗浄装置、お尻の洗浄ノズルにも使われております。また、この素子は農園の散水装置としても活用しようと研究が行なわれております。

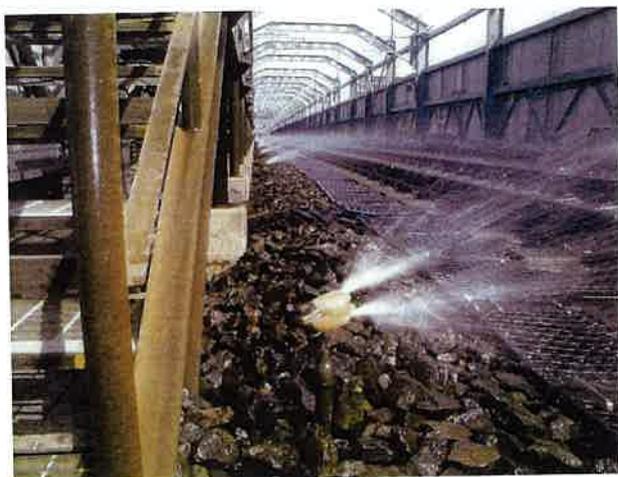


図15 線路に散水中の渦室発振素子



図16 渦室発振素子で融雪され雪がなくなった新幹線線路

15. おわりに

「研究は一日にして成らず」と思います。研究者は自分の研究について絶えず考えていることが必要であります。いや、考えようと努力しないでも自然に考えられるようにならなければ一人前の研究者とはいえません。時に応じて思い出すことができれば一寸したチャンスにもヒントが得られることが多いと思います。

しかし、これには一つの条件が必要であります。それは考える下地が大切であるということです。良い畑でないと実りの多い収穫は望めないと同じように、我々の頭も絶えずポテンシャルアップしてベストコンディションにしておかないと、よいアイデアは浮かばないし、優れた研究はできません。

それには、たゆまず努力しなくてはならず、苦勞が伴います。この苦勞を苦痛と思わず楽しくやるためには自分の研究に興味を持つことが必要であります。

私はかねがね職業と趣味が一致することがよいことで、その人にとって最も幸福であると考えておりますが、研究者にとっても研究と趣味が一致することが理想であり、そうでないと素晴らしい研究は生まれないと思います。

今回、研究の足跡を振り返るに当たり、改めて、恩師の先生方をはじめ、ご指導、ご鞭撻をいただいた多くの皆様、また共に研究に勤しんだ同僚の方々、学生の方々への感謝の念を強く感じずにはおられません。いずれの研究も私一人の力で達成できるものではなく、同志の皆様のご理解とご協力の賜物であると実感しております。紙面の都合から、お一人おひとりのお名前を記させていただくことは叶いませんが、心から御礼を申し上げたいと存じます。本当にありがとうございました。文末をお借りして、家族にも感謝の思いを伝えて筆を置くことといたします。

なかやま・やすき 早稲田大学理工学部機械工
学科卒業。工学博士。技術士。鉄道技術研究所
計測センター室長、東海大学教授、イギリス・
サウサンプトン大学客員教授、日本機械学会理
事、可視化情報学会会長を歴任。学術論文約
285 編、著書 15 編。紫綬褒章受章、FLUCOME
Award 受賞。