

研究生活を振り返って Retrospect of my research life

関西大学・システム理工学部 杉本 信正
Nobumasa SUGIMOTO
Faculty of Engineering Science, Kansai University

1. はじめに

私は平成 26 年 3 月末に大阪大学を退職し、4 月より現在所属しています関西大学に移りました。早速、研究代表者の田中光宏教授より標題の特別講演のご依頼を頂きました。このような話をしますと個人的な内容にも触れざるを得ませんので、内心忸怩たる思いもあり躊躇しましたが、紹介することによって皆様に少しでもヒントや、特に若い方には何かメッセージや刺激が伝わればよいと考え、講演をお受けし内容を講究録にも留めさせて頂くことに致しました。

2. 先生との出会い

昭和 47 (1972) 年 3 月に大阪大学・基礎工学部・機械工学科を卒業し大学院に進学して以来、40 年以上にわたり同じ大学で波動や振動の研究を続けてきました。非線形波動や非線形力学の研究が世界的に大きく進展した時代に研究生活を送ることができましたのは、幸運であったと思っています。当時、我が国には世界をリードするこの分野の研究者が多くおられましたので、後に続く者にとっては先達のご業績の恩恵にあずかることもできました。

最初にこの分野に足を踏み入れましたのは、やはり大学 4 年生の卒業研究からです。基礎工学部は、当時の工学部では技術を主に教育していたのに対し、技術より基盤である力学や数学に力点をおいたカリキュラムを提供していました。力学は質点・剛体・連続体の古典力学を中心としたものでしたが、量子力学もありカリキュラムは他の機械系のものと比べて斬新でした。私は力学全般においてその考え方が性に合いましたので、研究室を選ぶときには流体力学にするか固体力学かでかなり迷いました。最終的に、気体力学と振動論の授業を担当されておられました森岡茂樹先生（後に筑波大学教授、京都大学教授をご歴任）と井上良紀先生（後に助教授を経て北海道大学教授をご歴任）の研究室に所属することになりました。

森岡先生から何を研究したいのかと尋ねられたときに気体力学と申し上げますと、難しい問題ばかりしか残ってないとのことで、当時流行していました電磁流体力学はどうかということになりました。一方、研究室のセミナーは井上先生のご担当で、ランダウとリフシツの流体力学の英語版を週 1 回輪講しました。4 年生には全く歯が立たない箇所が随所にありました。大学 1 年生の昭和 43 (1968) 年秋頃から 44 (1969) 年にかけて全国的に拡がりました大学紛争のため、1 月末から 10 ヶ月の間授業がなく、授業が始まってもクラス討論などで 2 年生の 1 年間近く何もありませんでした。大学側はそれでも何とか予定通りに卒業をさせようとしたので、毎日の授業は多くまた春・夏の休暇も殆どなく、ゆっくり考える時間のない慌ただしい日々が続きました。4 年生には確か 6 月頃に進級し、9 月には大学院の入学試験がありました。このため卒業研究を秋から始めましたので、研究というよりむしろ電磁流体の勉強をしたというのが実態でした。

大学院に進学しました昭和47(1972)年4月には、京都大学理学部から角谷典彦先生が教授にご着任されまして、プラズマ中の非線形波動を研究することになりました。角谷先生はご着任時弱冠39歳の若さで日本の非線形波動研究の第一人者であり、日本物理学会誌に「分散性媒質中の非線形波動—KdV方程式を中心に—」と題する解説を掲載しておられました。KdV方程式は、1834年のScott-Russellの孤立波の発見を疑問視する論争に終止符をつけた、Kortewegとde Vriesが1895年に発表した方程式です。論争の決着を見た後はこの方程式は殆ど関心を集めませんでした。60年代にプラズマ波に対して改めて導かれ、しかも逆散乱法という巧妙な方法で初期値問題が解析的に解けるといふことで大いに関心が盛り上がりました。一方では計算機が普及し始めた頃でしたので、数値計算による研究も盛んになりつつありました。

大学院に進学した当時には既に角谷先生の解説がありますように、KdV方程式のような分散性が弱い場合は大体分かってきており、むしろ分散性が強い場合の非線形自己変調を記述する非線形シュレディンガー方程式(NS方程式)が注目を集めていました。この方程式は摂動論的にはかなり高い高次項まで計算しないと正しく求めることができず、当時は半ば経験的に導出されていました。それを確実にしたのが名大の谷内俊弥先生のグループが開発された逐減摂動法でした。これに対し、角谷先生から非線形振動を扱うKrylov-Bogoliubov-Mitropolsky (KBM)による摂動法の応用を考えてみたらどうかとのテーマと関連論文を頂きました。当時京大の川原琢治先生も同じ問題に対し、多重尺度法(Multiple Scale Method)の適用をご研究されていました。逐減摂動法や多重尺度法は独立変数を多く増やすのに対して、KBM法では元の独立変数のままでNS方程式が導けることを示しました[1]。これが修士論文になりました。方法の違いについて川原先生とも議論を重ね、両方法は等価な結果を導くことから多重尺度法の便利さや信頼性が分かってきました。またNS方程式が殆どどんな分散系でも導出できることが井上先生のご研究により分かりました。

しかし例外的な場合があります。それは2倍高調波共鳴が起きる場合や長波と短波の相互作用が起きるときは、自己変調よりも先にこうした共鳴相互作用が出現します。他にも、非線形光学の分野で知られていました3波相互作用が起きる場合があり、多重尺度法を用いてプラズマ波や水の波の相互作用を研究しました。上で述べた摂動法は微小パラメータによる素直な正則摂動法に対して、特異摂動法と呼ばれています。正則摂動法では、展開した各係数とそのパラメータを含むということはありませんが、特異摂動法では多重スケールを通して含んでいます。特異摂動法にはこの他にも色々あり、修士課程ではこうした摂動法も勉強しました。

博士課程に進学しました昭和49(1974)年4月に角谷先生が突然入院され、数ヶ月にわたり療養されることになりました。このため自分でテーマを見つけて研究を進めざるを得なくなりました。4年生の研究室選びで迷った固体力学、特に弾性力学において非線形がどのように出現するのかに興味に移り角谷先生に相談に伺いますと、奨めて頂くと同時に自己責任を覚悟でせよと釘を刺されました。学部の時代に習いました材料力学や弾性力学は全て線形ですから、全く役には立ちません。色々調べると有理力学(Rational Mechanics)と呼ばれる分野があることが分かってきました。これは変形の幾何学とニュートンの運動法則や質量やエネルギーの保存則、そしてエントロピー増大則を用いて、応力とひずみとの間のいわゆる構成式を数学的にいかに決定するのが目的の学問です。調べるうちに有理力学の本が色々見付き、中でもEringen著のNonlinear Theory of Continuous Media (McGraw Hill, 1962)は数ヶ月間毎日読み続けました。

そのうち固体力学の研究室から、円形断面のワイヤー導波管を伝播する弾性波の二つのモードが、同じ波数、同じ周波数を持つとき、すなわち二つのモードの分散曲線が交わる点で強いカッ

プリングを起し波形が崩れるがメカニズムが分からないと伺いました。線形理論ではエネルギー交換はしませんので説明できません。話を聞いた途端、非線形の共鳴相互作用を考えると説明可能ではないかと直感し、少し考えると方程式はイメージできました。ところが、実際に計算を始めると、流体力学の場合とは比べようもない複雑で面倒な計算になり、「花は見えているのに手が届かない」という、まどろこしい状態が続きました。しかし、学位がこれにかかっていると思えば前に進むしかなく、必死で大計算をやり遂げ予想通りの結果 [2] を得ることができました。

大学院の間は非線形波動の相互作用を色々調べてきましたので、学位論文にはそれらを全て纏めてもよかったのですが、やはり自力で行った弾性波のモードカップリングの研究に絞りました。これには、角谷先生より過去の研究の纏めに時間をかけるより、新しい研究に精力を注ぐべきだとの助言を頂いたこともあります。こうして学位は頂けたものの就職先がなく、昭和52(1977)年4月から研究生をしながら企業への就職も考えた時期がありました。暫くして井上先生の外国出張を契機に助手に採用して頂きまして、研究者として何とかスタートをきることができました。

3. 学生から研究者へ—知識と視野を広げる

生活の基盤はできましたが、これから一体何を研究していけばよいか見えません。有理力学を勉強して、構成式を複雑な材料について構築する意義は十分理解しました。しかし、有理力学は体系作りが目的で、一步踏み込んで現実の問題の解決にそれを適用するという視点が欠けているように感じました。そこで、プラズマや流体の非線形波動で学んだ知識をそのまま固体力学に適用してみようと考えました。例えば、棒を伝播する圧縮波に対して KdV 方程式を導出することはできます。しかし導出される条件を調べると実際の材料ではかなり大きなひずみになることが分かってきました。NSL 方程式も導出はできますが、これを追求する気にはなりません。

非線形性が本質的な現象がないかを探してみますと、薄い平板の大変形の問題が思いつきます。ところが既に Föppl-von Kármán 方程式があり、多くの研究がなされていました。この方程式は直感的に導出されているように見えたので、有理力学の定式化に基づき漸近法で導出を試みました。確かに同じ方程式が得られましたが、これを論文にするのは無理であろうと思いました。Kármán の論文には細かいオーダー評価などは書かれておらず、直感的に導出されたように見えます。実際はしっかり確認されていると想像します。一方、こちらは泥臭い計算をして何とか同じ方程式を得ましたが、詳細を書かないところに Kármán の偉大さを感じました。

平板の研究も先が塞がり何を研究すればよいか悩みました。一つは水波からの連想で、弾性体の表面波であるレイリー波を研究しようかと思いました。変形が表面に限られるため非線形性が現れやすいからです。もう一つは、KdV 方程式が導出される状況では粘弾性効果や塑性変形がむしろ重要になりますので、その効果を調べてみてはと思いました。どちらの道を選ぶか暫く迷いましたが後者を選びました。前者の非線形弾性表面波はその後、SAW フィルターと呼ばれ表面波エレクトロニクスデバイスとして大発展しました。振り返って、電子デバイスに応用するという発想は当時の自分には全くありません。奇抜なアイデアに感心します。

固体の粘性はどのように表れるかをまず勉強しました。粘弾性はバネ・ダッシュポットを組み合わせたモデルで説明される場合が多く、Kelvin-Voigt モデルや標準モデルが固体のモデルとして知られています。流体の粘性とは明らかに違いますが、粘弾性は流体にも出現し Maxwell モデルがあります。粘弾性固体と粘弾性流体の取り扱いの大きな違いは、変形前の基準状態が設定できるかどうかにあります。弾性体の応力はひずみの値によって瞬時に決定されるのに対し、粘弾性

体ではひずみの過去の履歴に依存する、言い換えればひずみの時間に関する汎関数（積分形）で与えらると有理力学では一般化されます。バネ・ダッシュポットモデルもこの形に表現できます。この簡単なモデルは定性的にはよいのですが、定量的にはよくないときがあります。特に大変形しやすいポリマーではよくありません。

粘弾性は弾性応力が緩和する現象ですから、緩和時間が問題になります。上のバネ・ダッシュポットモデルではこの時間が一つしかありません。バネ・ダッシュポットを幾つか組み合わせるとその数だけ緩和時間は増えます。しかし多くの巨大分子からできあがっているポリマーでは各分子の緩和時間が無数にあり、しかも連続的に分布している、いまで言うマルチスケールになっています。応力の緩和関数を緩和時間の連続スペクトルで表し、特に緩和時間の代数べきで与えられるとすると、応力とひずみとの関係が微分方程式に帰着できない、本質的に積分形で与えられることになります。この例として、粘弾性応力成分 σ がひずみ e の次の積分に比例する場合が考えられます：

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{de(\tau)}{d\tau} d\tau. \quad (1)$$

ここで、 t は現在の時刻で、 τ は過去の時刻です。これは、現在の応力がひずみの過去の増分 de に重み $1/\sqrt{t-\tau}$ を掛けて加え合わせるによって決定されることを示しています。弾性体の場合には、応力はひずみの現在の値だけで決定されますので、過去のひずみ増分への重みは 1 になる一方、(1) では $1/\sqrt{t-\tau}$ の重みによって記憶が薄れていくことになります。この積分はアーベル型の積分であり、以前セミナーで読んだランダウとリフシツの流体力学の熱伝導の章に、同じ形の積分があったことを思い出しました。

セミナーでこれを最初に見たときには不思議な魅力のある積分に見えましたが、その後すっかり忘れていました。粘弾性の研究がきっかけでこの積分が $1/2$ 階の微分であることを知り、さらにこれを拡張した非整数階微積分法なるものがあることを知りました。驚きましたのは、これがライブニッツの時代に既に考えられており、その後も多くの高名な数学者が研究してきたことです。なのにあまり普及していないのは不思議です。粘弾性の研究を学会で発表したことから、東大の神部勉先生のご推薦で非整数階微積分法についての解説 [3] を書かせて頂くことになりました。

粘弾性媒質を伝播する縦波では、バーガス方程式の 2 階微分が非整数の ν 階微分 ($0 < \nu < 1$) で置き換わった次の方程式が得られますので、一般化されたバーガス方程式と呼びました [4]¹：

$$\frac{\partial m}{\partial x} - m \frac{\partial m}{\partial t} = \beta \frac{\partial^{1+\nu} m}{\partial t^{1+\nu}}. \quad (2)$$

ここで、 m は変位勾配であり、非整数 ν 階微分は次の Riemann-Liouville 積分

$$\frac{\partial^\nu m}{\partial t^\nu} \equiv \frac{1}{\Gamma(1-\nu)} \int_{-\infty}^t \frac{1}{(t-\tau)^\nu} \frac{\partial m(x,\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (3)$$

で定義され、 $\Gamma(1-\nu)$ はガンマ関数です。また、 x と t はそれぞれ、位置と時間に相当する変数です。固体に特有な横波であるせん断波では、有限せん断変形が縦波である圧縮波を 2 次のオーダーでまず誘起し、これがせん断波と相互作用しますから、非線形性は 3 次になります。粘弾性効果と非線形性の次数の違いが波動伝播にどのように影響するのかを研究しました。

¹一般化されたバーガス方程式とは、現在では円筒波や球面波、さらには一般に Ray Tube が幾何学的に変化する場合のバーガス方程式を指すようになり、このとき 2 階微分の係数が座標の関数になります。

このような研究の傍ら流体も研究していました。非線形発展方程式を導出して厳密解を求めるのが当時盛んに行われていましたが、全て境界のない場合です。例外的に水波の直立壁での反射は調べられていました。これには鏡像の原理が使えますので、反射が双方向に伝播する波の相互作用で置き換えることができるからです。非線形波が境界に入射した場合、例えば傾いた岸や、大陸棚や海嶺のような段差や障壁に浅水波ソリトンが入射した場合の非線形波動の観点からの研究はありませんでした。もちろん土木や海岸工学では実験的な研究は多くありました。

傾いた岸があるとその近傍では浅水波近似が破綻します。近似が破綻することは、背後に何らかの物理的な理由があることを示唆しています。例えば、粘性を無視したポテンシャル流れが物体上の境界条件を満たすことができず破綻するのは、境界近傍では粘性が小さくても無視できないことから生じています。この破綻は境界層という考え方を導入して解決できます。浅水波近似の破綻は、粘性を無視したこととに起因するわけではありませんが、破綻自体は境界層の場合と似ているように思われました。そこで気がついたのは、波のモードには伝播モードに加え、エヴァネッセントモードがあることです。エヴァネッセントモードは境界や物体の周りに現れ、それから離れるにつれ指数関数的に急速に減衰するモードです。水波の場合には水平方向に水深程度の広がりを持ちます。このモードを考えると遠方の浅水波近似できる領域と固体壁とを接続でき、破綻をうまく修復できることが期待されます。

この層をエッジ層と名付けて接続漸近展開を適用しますと、接続条件より遠方の浅水波を記述する Boussinesq 方程式に対する等価境界条件が導出できます。この境界条件を用いると、浅水波ソリトンが境界との相互作用によってどう分裂するかを調べることができます [5]。岸の場合の結果を JFM に投稿しましたところ、レフェリーより境界要素法で結果を検証せよとのコメントを頂きました。次の論文で行うと返事をして、この論文の中で検証しないと掲載しないとの厳しいコメントが来ました。目の前が一瞬真っ暗になりました。何とか気を取り直し2年がかりで数値計算を行い、エッジ層理論の正当性を示しやっとな採択され掲載に至りました。

こうした研究をしつつも、非整数階微分で表される粘弾性モデルが実際に定量的によい結果を与えたとしても所詮仮定したモデルであり、第一原理的には導かれていないことが気になっていました。履歴現象というのは果たしてニュートン流体にも存在するのかを考えました。角谷先生と当時の大学院生の松内一雄氏による浅水波に及ぼす境界層の影響を調べた論文がありました。KdV 方程式に積分項がついた方程式が導かれています [6]。積分は Riemann-Liouville の $1/2$ 階の微分ではなく、Wyle の形をしています [3]。形は違っても履歴が現れることは同じです。そこで管路内を伝播する音の場合にはどうなるかと思い論文を探しましたところ、既に Chester が似た積分形の式を大分前に導いていることを知りました。

ニュートン流体でも境界層が履歴を発生させることが分かってきました。この積分は粘性流体中を非定常運動する球の抵抗に関して Basset [7] によって示されており、古くから Basset 項と呼ばれています。流体が履歴を示す例として、閉じた容器内の非圧縮性の非粘性流体の運動を考えましょう。容器が静止状態から運動を始め、ある時刻で静止したとしますと、流体の運動は渦なしのポテンシャル流です。ラプラス方程式で記述されるポテンシャル流では、境界が静止した瞬間には流体も静止しなければなりません。しかし、現実には流体は容器が止まっても暫く動き続けるでしょう。慣性によると言うてしまうこともできますが、慣性はこのモデルではベルヌーイの定理によって取り込まれています。そこで固体壁近傍に境界層を考えますと履歴が現れ、容器が静止してもしばらくの間流体に応力を与え続けるからと説明できます。

粘弾性の研究を進めても固体力学ならではの充実感を感じることはありませんでした。ある日図書館で雑誌を見ていて、海底パイプラインで発生する座屈の伝播現象を知りました。北海油田等でパイプライン敷設時（中は空）に、パイプに何らかの原因で局所的な折れが発生するとそれが伝播し、敷設し終わったパイプラインを破壊してしまう問題が起きると報告されていました。ストローを曲げたときに生じる折れと同じです。もしストローに張力をかけると、ひょっとして折れが伝播するのではと思いました。これはまた、長年探していた非線形波動の格好のテーマであるとも直感しました。

現象は最終的にはパイプラインの塑性破壊で終わりますが、その全てを包括するようなモデルの構築は難しいと思われます。そこで、折れが生じて伝播する側面と、折れの伝播に伴い塑性破壊する側面の二つに現象を分けて取り扱ったらどうかと考えました。前者の挙動は平板の場合と同様に、大変形してもフック弾性体であると仮定しました。式の導出は既に平板での練習のお陰で方針は立ちます。面倒な計算の結果、張力 T と水圧 p の下で曲げを受けるパイプラインのたわみ $A(z, t)$ (z は軸座標で、 t は時刻) と、曲げによる断面の楕円化を表す $B'(z, t)$ とが連成した次の非線形波動方程式を導き出しました [8] :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[\frac{Ea^2}{2} \left(1 + \frac{3}{2} B' + \frac{1}{16} B'^2 \right) \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right] = T_e \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}, \quad (4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 B'}{\partial t^2} + \frac{3Eh^*2}{5a^4} \left(1 - \frac{p}{p_c} \right) B' - \bar{T}_e \frac{\partial^2 B'}{\partial z^2} + \frac{Ea^2}{20} \frac{\partial^4 B'}{\partial z^4} = -\frac{3E}{5} \left(1 + \frac{5}{6} B' \right) \left(\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right)^2. \quad (5)$$

ここで、 ρ_0 はパイプの密度、 a はパイプの半径、 h はその肉厚、 E はヤング率、 σ はポワソン比であり、 B' は楕円の短（長）軸の変位を半径で割った量であり、絶対値が1より小さい量の変数です。また、 $h^* = h/\sqrt{1-\sigma^2}$ であり、 p_c は円形パイプの水圧による座屈圧力 $E(h/a)^3/[4(1-\sigma^2)]$ です。水圧の張力への寄与を加えて $T_e = T + pa/2h$ 、 $\bar{T}_e = T + pa/5h$ です。方程式 (5) において左辺第2項と右辺の非線形項とが大体釣り合うとして B' を求め、さらに (4) で B'^2 を無視すると、以下のように単純化された方程式が得られます :

$$\rho_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left\{ \frac{Ea^2}{2} \left[1 - \frac{3}{2} \alpha \left(\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right\} = T_e \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}. \quad (6)$$

ここで、 $\alpha = (1-\sigma^2)(a^4/h^2)/(1-p/p_c)$ です。

この方程式で張力や水圧が無い静的な場合を考えますと、曲げモーメント ((6) の $\{\dots\}$ の中) とパイプラインの曲率 $\partial^2 A/\partial z^2$ とが断面の楕円化により比例しなくなり、 $B' = -2/9$ で最大値をとりそこで Limit-Point Bifurcation が起きることが分かります。モーメントがこの値より大きくなるとパイプに折れが生じます。こうした現象は Brazier が既にエネルギー法によって説明しており Brazier 効果と呼ばれていますが、(6) によって波動方程式の動的な枠組みで説明することができます。ストローが折れると落ち着き先がなくなり大きく変形します。しかし張力があると大きく動かせませんし、特に重要なことは波が伝播できるようになることです。このため折れが隣を巻き込んで移動するのではないかと予想しました。実際、張力や水圧を考慮して方程式の動的な解を求めますと、たわみの微係数が不連続になるキंक解が得られます [9]。キंकが伝播しても弾性変形を仮定していますのでパイプラインは元の状態に戻ります。このため最終的に生じる破壊現象は説明できませんが、実際にはキंकの伝播によりひずみが弾性域を超えると、塑性変形が

その後起きると考えています。なお、折れが動きその後弾性的に戻る現象は、コンベックス・メジャーの曲げで見ることができます。

キंक解は、方程式(4)で見られるように、最高階の微分係数が定数でない場合によく存在します。キंक内の滑らかな構造を知るには方程式(5)を近似せずに解かねばなりません。これまで研究されてきた非線形波動方程式の最高階微分項の係数は普通定数です。最高階の微分項の係数が定数ではない場合にはキंकの他カスプも出現しピーコンやカスポンと呼ばれています。流体系でこのような解のある例は浅水波の Camassa-Holm 方程式がありますが少ないと思います。固体系では上の例の他にもあると思います。

座屈伝播の結果は論文誌には掲載しておりません。昭和60(1985)年に東京で開催されました固体の衝撃の IUTAM シンポジウムで発表し、プロシーディングスに詳しく内容を発表してしまいました[8]。当時は気がつかなかったのですが、著作権の問題で同じ内容を新たに論文にすることが難しいことが後で分かってきました。論文を投稿してから学会で発表し、後でプロシーディングスに発表すれば問題は無かったでしょう。順序が逆でした。注意すべきことです。

学生や助手の時代にはこのように興味の赴くまま研究を進めていました。若いときは実際的な研究をするより基礎的な知識を増やして基盤を固めるのがいいと考えていたからです。かといって、全くでたために研究を進めていた訳ではありません。力学を勉強するうちに古典力学は一体どのような体系になっているのか知りたいという興味がわいてきました。本を最初から順次読んで勉強しては埒があきません。むしろ研究をしながら学べないかと考えました。まさに Problem-Based Learning です。研究の観点から本を読みますと、本質や問題箇所が浮き上がって見えよく理解できます。

しかし、基盤ばかり一生固めていても仕方ないことも分かっていました。大学紛争が起きるまではエンジニアになることを考えていましたので、いくら学問であっても現実の問題解決に繋がらなければ意味がないとも考えていました。この点で工学部の学生でした。学問の世界に入っても、やはり知識を実際に応用したいと思っていました。と同時に、将来それによって力学の体系に僅かでも何らかの寄与をしてみたいとも思うようになりました。

力学はその性格上現象の後追いをしているように見えます。確かに、ニュートンが生まれる前からリングは落下していたでしょう。世の中にはよく「物事」があると言いますが、力学は「物」ではなくむしろ「事」を考えるフィロソフィーです。力学の良いところは、普遍的な原理に基づき現象のメカニズムを明らかにし、違った条件下でも定量的に予測できることです。皆ここに惹かれるわけです。かと言って、現実に「こういうことが起きますよ」と先に理屈で示しても、「あーそうですか」程度で世間はあまり関心をもってくれません。事が起きて初めて大騒ぎして研究しようかということになります。残念なことです。

4. 基礎から応用へ、そして応用から基礎へ

三十歳台の中頃には外国に行かないかとのお話を二、三頂きましたが、うまく進みませんでした。そこで、文部省の在外研究員に応募しましたところ、幸い採択して頂きました。こちらの費用ですので、滞在先は先方の受け入がOKであれば自由に選ぶことができます。そこで、それまでに交流のありました先生の中から、ケンブリッジ大学の応用数学・理論物理教室(DAMTP)のクライトン(Crighton)教授に受け入れを打診をしましたところご快諾を頂きまして、平成元年(1989)年の2月より10ヶ月間滞在しました。

クライトン教授とは、昭和57(1982)年に当時のソ連邦のエストニア共和国で開催されました非線形波動のIUTAMシンポジウムで知り合いました。ともに緩和現象の非線形波動に及ぼす影響を調べていましたので話が合い、それ以後論文の交換やまた国際会議で顔を合わせるうちに次第に親しくなりました。ちなみに、エストニアの会議に出席する切っ掛けは、助手になり立ての頃にシカゴで開催予定の弾性波のIUTAMシンポジウムの案内を頂きまして、当時自信もお金もなかったのですが自分を試すつもりで学位論文の内容を発表しに参加したことです。これがエストニアの会議に繋がっています。

ケンブリッジに行ったときには、管路内の非線形音波に及ぼす境界層の影響と座屈伝播の二つの研究をしていました。到着して暫くするとセミナーのローテーションに組み入れられ、夏休み明けの順番になりました。それまで時間はありますが、結果を出さねばなりません。メンバーには流体の人が多く、非線形音波の研究をとりあえず進めました。境界層による1/2階微分はバーガス方程式の2階微分と違い、衝撃波の不連続構造を滑らかにすることができないことが分かってきました。確かに1/2階は2階より低階ですので効きが悪いと言えます。しかし履歴は蓄積しますので、波形全体にわたって大きな影響を与えることが分かってきました。

結果は求まったのですが、セミナーでは研究の動機に繋がる噺の枕が必要だと思いました。履歴の影響を調べることが本来の動機なのですが、これでは物足りません。研究がトンネルに高速で突入する列車による圧力波の伝播に関係すると思いついたのは、夏にドーバー海峡を渡ってフランスに行った時のことです。トンネルに列車が突入することにより出口側で発生する破裂音と振動問題(トンネル微気圧波問題)は、弱い非線形波の遠方場の理論が適用できる格好の問題であることが分かってきました。衝撃波というすぐ超音速を連想しますが、亜音速でも発生します。この場合、非線形性による波形変形が必要ですので、物体近傍ではなくそれが蓄積する遠方場で衝撃波が発生します。破裂音は衝撃波が外に放射されるときに発生し、その大きさは出口での圧力波形の時間微分に比例します。列車の突入により最初に発生する圧力の大きさは速度の自乗に大体比例して大きくなりますので、リニア新幹線では大きな問題になることが懸念されます。

衝撃波が発生するのは音速が周波数によらない、すなわち音波に分散性がないことが原因です。そこで衝撃波の発生防止に分散性を利用することができないかと考え、ヘルムホルツ共鳴器列の取り付けを思いつきました。ヘルムホルツ共鳴器は、以前にそのスロートでの境界層による摩擦の影響²を調べていたことから思いつきました。分散性は圧力波が各共鳴器で反射と透過を繰り返すことによって発生します。共鳴器列に連続体近似を施し、次の連立方程式を導出しました [10]:

$$\frac{\partial f}{\partial X} - f \frac{\partial f}{\partial \theta} = -\delta_R \frac{\partial^{\frac{1}{2}} f}{\partial \theta^{\frac{1}{2}}} + \beta \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} - K \frac{\partial g}{\partial \theta}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial \theta^2} + \delta_r \frac{\partial^{\frac{3}{2}} g}{\partial \theta^{\frac{3}{2}}} + \Omega g = \Omega f. \quad (8)$$

ここで、 f, g はそれぞれトンネル内と空洞内の超過圧であり、 X, θ は遠方場の空間座標と音速で動く系での遅延時間です。また、 δ_R, δ_r はそれぞれトンネル壁面での摩擦係数、共鳴器スロート部での摩擦係数であり、 β は音の拡散係数です。共鳴器列の効果は、空洞の大きさを表すパラメータ K と共鳴器の固有周波数の高さを表すパラメータ Ω を通して現れます。摩擦や音の拡散の影響は

²この影響は(8)の3/2階微分で表せます。同じような例はU字管内の振動でも起きると思います。

局所的には小さいので無視し、 Ω の値を大きく設定すると次のKdV方程式が直ぐに得られます：

$$\frac{\partial f}{\partial X} + K \frac{\partial f}{\partial \theta} - f \frac{\partial f}{\partial \theta} = \frac{K}{\Omega} \frac{\partial^3 f}{\partial \theta^3}. \quad (9)$$

これにより、空気ではこれまで考えられなかった音響ソリトンの発生が予想されます。またソリトンを含む音響孤立波も存在することが分かり、その中でソリトンはピーク圧が小さい場合であることが分かってきました。音響孤立波の伝播速度が亜音速であり、音速に近づくと孤立波の指数的に減衰する裾野が狭くなり、極限では有限区間に限られることも分かりました。

ここまで来ればどうしても実験で確認してみたくになります。実験は全くの素人でしたが、子供の頃に工作が好きでしたので何とかなるだろうと楽観的に考え始めることにしました。ただ、実験費用の確保が一番のハードルでした。鹿島財団と三菱財団の研究助成が大きな助けになりました。実験によっても衝撃波の発生が抑制できて、音響孤立波の伝播も確認できました。PRLに結果の速報を発表しましたところ、アメリカ物理学会のPhysical Review FocusやScience誌などでも紹介して頂きまして予想外の出来事でした。音響孤立波にまつわる話は既に紹介させて頂いていますので、そちらをご覧ください[10]。PRLに掲載した後も実験装置を改良して再度実験し直し、数値計算も行い綿密に検討した結果をJFMに発表しました[11]。

実験装置では共鳴器を管の両側に千鳥に配置しています。この理由は、共鳴器を対面して取り付けると予期せぬ現象が起きることを懸念したからです。共鳴器を対面して取り付けると、線形の局在モードが発生することを後に明らかにしました[12]。この局在（捕捉）モードは伝播モードの連続スペクトルに対して、点スペクトルとして現れます。このようなモードの存在は、Ursellが水面下に置いた物体の周りで最初に示していましたが、散逸を無視した場合であり現実に存在するのか疑問視されていました。しかし、後年実験でこのモードを考えると説明が見つかり、実際にも意味があることが分かってきました。共鳴器を取り付けた場合でも実際に起きることを期待しています。

共鳴器列を取り付けた空間的な周期構造をもつ管路では様々な興味有る現象が起きます。共鳴器の固有周波数に近い周波数や、共鳴器の取り付け間隔が半波長に等しくなるブラッグ反射が起きる周波数付近では、分散曲線に周波数のストップバンド（虚部）が発生します。ストップバンドではギャップソリトンの可能性があります。また固有周波数がブラッグ周波数と一致する場合には、ストップバンドが広がるだけでなく、その中に減衰が抑えられる周波数帯が現れることも分かってきました。最近では、共鳴器列を取り付けた水中超音波の導波管をメタマテリアルとして用いる研究も行われています。

また共鳴器列がトンネル内を走行する列車に及ぼす影響についても調べました。円形断面の弾性はり円形断面のトンネルの中心軸上を走行し、左右にたわみ変動する場合を考えました。列車が軸上を浮いて走行するのは非現実的であるのご意見を頂きましたが、鏡像を考えると半円のトンネル・列車の場合を考えていることになります。線形の解析から、負のエネルギー波が発生することが分かってきました[13]。波のエネルギーは正であるのが普通ですが、流れがある（列車から見て）ときにはエネルギーが負になる場合があります。負のエネルギー波において散逸を考慮すると、散逸によりエネルギーがさらに減少することになります。これは波の振幅が実質増加することに相当しますので、不安定化が起きることを意味します。散逸を入れて計算をすれば不安定が確認できますが、そうしなくてもエネルギーの正負だけで安定性が特定できるので簡単です。

列車がトンネル外を走行中には大体1Hz程度で振動するのですが、トンネル内ではその高調波

の2Hzの振動が発生します。原因は現在でも研究されており、渦によるものと考えられています。気になるのは、列車の慣性（見かけの）質量です。自由空間内の非圧縮性流体中に置かれた円柱の見かけの質量は、単位長さ当たり円柱が排除した空気の質量です。ところが圧縮性を考慮して、周囲にトンネル壁が存在する場合には、慣性質量は定数ではなく非線形性を示します[14]。また、円柱がトンネル中心から偏り壁に近くなると慣性質量は大きくなります。空気ですからこの質量は小さいと思われませんが、高調波の発生は説明できるかもしれません。

上の解析では列車を連結部のない連続的な様な弾性はりで近似しました。実際は有限長さの車両が多数連結されています。しかし、有限長さの剛体を回転バネで連結した接続系において長波を考えますと、その挙動は様な連続はりで近似できます。一方、有限長さの剛体を非線形バネで接続した場合には、いわゆるILM (Intrinsic Localized Mode) またはDB (Discrete Breather) と呼ばれる非線形の局在モードが発生することが分かってきました[15]。ILMは元来、無限に長いFPU- β 格子の縦波で知られていますが、有限な長さの接続剛体系の横波でも発生することが分かりました。ILMがひょっとして実際の列車の振動で何かの影響を与えているかもしれません。

音響孤立波は系の固有状態であり、発生できる最大の孤立波は系のパラメータで決定されます。孤立波が発生しても実際には減衰しますので、増幅させる方法がないかを考えていたときに熱音響現象を知りました。これには色々ありますが、最近熱機関への応用に関心を集めています熱音響現象は、温度勾配のある固体壁に接する気体が粘性や熱伝導性の散逸によって不安定化し、もし気体を取り囲む系に固有周波数があれば共鳴が起こり系全体が自励振動するというものです。この原点はいまから約60年前に液体ヘリウムのデュワー瓶で観測されたタコニス振動です。デュワー瓶に一端が閉じた細長い管を挿入し、開口端をヘリウムの液面に近づけますと管の中のヘリウムが自励的に振動します。このとき管に沿って室温の閉端との間に大きな温度勾配が発生しています。この不安定化をWKB法のKramersが、細管（長波）近似と境界層近似を用いて説明を試みましたがうまく行きませんでした。そこでRottは境界層近似を用いずに細管近似だけを用いて定式化を行い、拡散層厚さによる摂動展開を高次項まで取り込むことによって不安定化の臨界条件を何とか導出しました。しかし解析を簡単化するために、ステップ関数の壁面温度分布を熱伝導性があるにも拘わらず仮定しました。

ステップ近傍では細管近似が破綻しますし、ステップ分布はデュワー瓶内ではあり得ないでしょう。しかしステップに近い分布を与えた実験で臨界条件を検証すると、よく一致することからRottの理論が支持されるようになりました。実験と一致しても理論としては問題ですので、滑らかな温度分布に対して臨界条件を求めることができないものかと考えました。またKramersが用いたのは正則摂動展開であることもうまく行かない原因でないかと考えました。そこで温度に滑らかな放物線分布を仮定し、特異摂動法を用いますと境界層の最低次近似でも解析的に臨界条件が求まることを示しました。結果はステップの場合の臨界条件と定性的に似ていますが、両者は温度分布が異なりますので定量的には一致はしません。

Rottが導いた式は温度分布の仮定以外には問題はなく、時間フーリエ分解した線形の方程式です。これによって現象のメカニズムが理解できるかということ、それにはほど遠い式です。Rottの式は時空間では一体どのような式に対応しているのかを調べて見ました。これが熱音響波動方程式であり、ここでも履歴が本質的な役目を担っていることが分かります。また、壁面応力は速度分布だけで決まりますが、壁面での熱流には温度勾配があるとなぜか応力が関与することも分かってきました。導いた式はRottの式に比べよい見通しを与えるのですがまだ複雑ですので、拡散層

の厚さ（すなわち拡散時間の長短）で近似しました。薄い場合には境界層理論の結果と一致しますし、拡散層が厚い場合には拡散・波動方程式に帰着することが分かりました。特に後者の場合、不思議なことに温度勾配が波を伝播させることが明らかになりました。熱音響現象は総じて拡散層の厚さの両極限の挙動で定性的のみならず定量的にもかなりうまく説明できますし、さらに非線形への拡張もできます。詳細は解説 [16] に書かせて頂いていますのでそちらをご覧ください。

ところで、この章の題目を「基礎から応用へ、そして応用から基礎へ」としました。基礎研究を応用するということはよく分かります。しかし基礎研究は一体どうして生まれるのだろうかと思います。我が国では科学の歴史は長くはありませんので、欧米の研究を勉強しこれを基礎として応用を考えることが過去多かったと思います。しかし、幾何学が測量術から生まれてきたように、基礎研究はむしろ実際の研究から生まれてきたものが多いのではないのでしょうか。英国でのセミナーでは、研究の動機が実際的なものが多かったように思います。しかし、内容はむしろ逆に基礎的なものが多かったことです。我が国では実際的な動機の研究は格調が低いと見なされる傾向が強いように感じます。これは科学の歴史が短いことによるのかもしれませんが、実際的な問題を煮詰め上げて基礎研究を作り出し、これが新しい応用を生み出す、このサイクルが本来の姿ではないのでしょうか？

5. 研究について

研究を長年行っていると何度もスランプに見舞われます。これは誰にでも必ずあります。上司の指示による研究であれば、見通しの甘さの責任は上司にありますので気分的には幾分楽です。ところが自分が考えた研究が不調になると厄介です。知恵を絞って何とか切り抜けることができればベストですが、それができずに研究を止めてしまうと自分の中に大きな挫折として凝りが残ります。また、学生を巻き込んだ研究では、卒業や学位の取得に向けた時間的な制約がありますので、研究の継続か、転向か、さらには中止かの判断はもっと難しくなります。失敗は学生の将来にも大きな影響を与えます。このときの判断は自分の経験に基づく、勘によるとしか言いようはありません。

研究者は山師に似たところがあります。自分の知識と経験による直感だけが頼りです。その直感はどうして養われるかですが、分かりません。恐らくこれまで得てきた知識をいかに自分のものにしていくかでしょう。研究の基本は面白いということですが、その過程は面倒で大抵は苦しいものです。しかし、自分で立てた目標に到達できれば何とも言えぬ充実感があります。この充実感が後日自信となって、次の目標に進む原動力になっていくのだと思います。まずは自分が納得することです。なお、自分の評価と他人の評価とは普通は一致はしないことを知っておくべきです。

スランプを軽減する方法として、できれば違った二つのテーマを常時持つことをお奨めします。若いときからこう考えて研究してきた訳ではありませんが、既にご紹介したように、流体と固体の二つのテーマを研究していましたので、結果的にはそうなっていました。一つのテーマを研究しているときでも、もう一つのテーマをいつも温めていることです。当面そのテーマに割く余裕はなくても、頭の中で考えているだけでいいのです。その間に想像が膨らんでくればしめたものです。当面の研究が一段落つき次第、温めていた研究に直ぐに取りかかりたくなります。一つのテーマだけですと焦げつく恐れがあります。こうなればどうしようもありません。これを防ぐには、論文がわりに書きやすいテーマと、もう一つは時間の制約に関係なく自分が研究したいテーマの二つもつのがいいと思います。戸田盛和先生も九大の応力研の研究会で同じ事を仰っています。

したので意を強くしました。

温めていた研究にいざ取りかかってみると思わない問題が発生するのが常です。苦勞せずに論文が書けたことなど一度もありません。テーマによって筋の通った書きやすいものとそうでないものがありますので、苦勞の度合いはそれにより違います。問題解決の一番良い方法は誰かと相談することですが、中でも学生と話をすることです。こちらのいい加減なアイデアを真剣に聞いてくれるのは、卒業がかかっている学生しかいません。学生に説明するには、やはりこちらの頭の中をまず整理する必要があります。その中で、誤りや誤解が見つかる場合が結構あります。優れた学生であれば、逆にそれを指摘されることもあるでしょう。学生の指導を嫌がる人がありますが、もったいないことをされていると思います。

最近の研究室の活動の大きな仕事の一つは研究費の獲得であり、論文数の業績主義がまかり通っていますので成果を出すことが必要以上に求められます。このため若い人が論文が書きやすく、人がしている研究に飛びつく傾向にあるように思われます。科研費も全員申請するのが義務になっています。自分が若いときには科研費の申請は研究費が必要な人がするものと思っていましたし、周囲の人からも応募したらどうかとの声もありませんでしたので、殆ど申請はしませんでした。申請して採択されますと、理論研究の場合には本やリプリント代金、旅費以外に使い道がなく、計算機を購入してはいけないという時期もありましたので、逆にお金の使途に苦勞するようなものでした。外国出張などに使うのはもっての他でした。

しかし、今や科研費の使途が大幅に認められるようになり、研究を支える補助金として機能しているように思います。良い時代になったと思います。今から思えば、それでも科研費には応募しておくべきであったと悔いています。応募するには自分の研究を専門家の人に理解して頂く必要がありますので、自分はこの努力を怠っていたことは否めません。この努力の中でいいアイデアが浮かぶこともあることが分かってきました。

研究支援があまり行き届くようになりますと不要な出張に行ったり、出張や研究に自費を使うということがないように思います。何も自費を使えと言っているわけではありません。しかし、お金がなければ出張しないのは問題だと思います。行かねばならない学会や会議というのが絶対あります。そのとき自費で参加するぐらいの心構えは持つべきだと思います。自分に投資する気持ちは必要です。若いときに参加した国際会議は殆ど自費でしたが、お金では得ることのできない人との出会いがありました。出会いが研究生生活を通して様々な形で連なり、人間関係の不思議さを感じることも屡々ありました。研究をするには本や論文を読んで勉強することは言うまでもありませんが、人と会って話をすることが様々な刺激になりますので不可欠です。研究はむしろ後者でできあがっていると言っても過言ではありません。

6. おわりに

これまで自分が進めてきた研究と考えていたことを率直に述べさせて頂きました。色々考えた二、三十歳代のことを多く述べました。学生時代はともかく、他の方の研究の真似をすることをせずに、面白いと思ったことを自分で考えて進めてきました。うまく行かず苦しい思いも多々経験してきましたが、概ね研究を楽しめたように思っています。こうした研究を通して人間の叡智が作り上げてきた力学の壮麗なる体系にも触れることもできました。定年を迎えたいま、しかし自分が触れたのはそのほんの一部に過ぎず、まだまだ知らないことが多いのを感じずにはいられません。講演では最後に若い方へのメッセージを紹介しました。何かのお役に立てばと思い、簡

条書きですがそのまま付録として記させていただきます。行間をお読みいただければ幸いです。

最後に特別講演の機会を与えて頂きました。研究代表者の岐阜大学教授・田中光宏博士には心より御礼申し上げます。また、恩師の角谷典彦先生をはじめ研究の手ほどきをして頂きました森岡茂樹先生、井上良紀先生、ならびに色々お世話になり研究にもご理解とご支援を頂きましたクライトン教授、これまで協力して頂きました研究室の多くの学生諸氏にも感謝しここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Kakutani, T. & Sugimoto, N., "Krylov-Bogoliubov-Mitropolsky method for nonlinear wave modulation," *Phys. Fluids*, **17** (1974) 1617-1625.
- [2] Sugimoto, N. & Hirao, H., "Nonlinear mode coupling of elastic waves," *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**(1) (1977) 23-32.
- [3] 杉本 信正, "非整数階微分・積分とその応用," *ながれ*, **4**(2) (1985) 110-120.
- [4] Sugimoto, N., "Generalized Burgers equations and fractional calculus," *Nonlinear Wave Motion* (Ed. Jeffrey, A.), Longmann, (1989) 162-179.
- [5] 杉本 信正, "浅水波ソリトンの伝播におけるエッジ層の考え方," *乱れと波の非線形現象* (井上良紀・木谷勝編), 朝倉書店 (1993) 2-25.
- [6] Kakutani, T. & Matsuuchi, K., "Effect of viscosity on long gravity waves," *J. Phys. Soc. Jpn.*, **39**(1) (1975) 237-246.
- [7] Basset, A. B., *A Treatise on Hydrodynamics Vol.2*, Dover (1961) 285-291 (原版は1888年にDeighton, Bell and Companyより出版).
- [8] Sugimoto, N., "Buckle Propagation in Elastic Pipelines," *Macro- and Micro-Mechanics of High Velocity Deformation and Fracture* (Eds. Kawata, K. & Shioiri, J.) Springer (1987) 347-360.
- [9] Sugimoto, N., "Steady Propagation of Buckle in Elastic Pipelines," *Elastic Wave Propagation* (Eds. McCarthy M. F. & Hayes, M. A.) Elsevier (1989) 265-272.
- [10] 杉本 信正, "管の中の空気における音響孤立波の発生と伝播の実験的検証," *ながれ*, **21**(3) (2002) 197-205.
- [11] Sugimoto, N., Masuda, M., Yamashita, K. & Horimoto, H., "Verification of acoustic solitary waves," *J. Fluid Mech.*, **504** (2004) 271-299.
- [12] Sugimoto, N. & Imahori, H., "Localized mode of sound in a waveguide with Helmholtz resonators," *J. Fluid Mech.*, **546** (2006) 89-111.
- [13] Sugimoto, N., "Aeroelastic stability of a beam traveling in a tunnel lined with resonators," *AIAA J.*, **34**(10) (1996) 2005-2013.
- [14] Sugimoto, N., Kugo, K. & Watanabe, Y., "Derivation of nonlinear wave equation for flexural motions of an elastic beam travelling in an air-filled tube," *J. Fluids Struct.*, **16**(5) (2002) 597-612.
- [15] Watanabe, Y., Hamada, K. & Sugimoto, N., "Localized oscillations of a spatially periodic and articulated structure," *Wave Motion*, **45** (2007) 100-117.
- [16] 杉本 信正, "熱流の不安定性と熱音響現象 第1回 一導入編一," *ながれ*, **33**(2) (2014) 181-194; "同 第2回 一線形理論編一," *ながれ*, **33**(3) (2014) 307-322; "同 第3回 一非線形現象編一," *ながれ*, **33**(4) (2014) 375-393.

付録 若い方へのメッセージ

1. 何のために研究をしますか？
 - 興味, 資格, 生活・昇進, 名誉, 一攫千金, 学問, 社会・人類のため
 - 面白くなければ研究でない (研究が苦にならなければ最初はOK)
2. 研究とは？
 - 基本は個人の着想
 - 様々な研究のタイプ (大学, 企業, 公的機関, 個人の研究の違い)
 - 大学での研究と大学の役割
 - 自分は何がしたいのか
 - 良いセンスの研究
3. 人の研究を評価できますか？
 - 良い点, 悪い点を見抜くには知識が必要
 - 自分なりの価値観や体系に照らす
 - 論文の査読 (日本の論文の査読は儀式?)
4. 研究は人にある
 - 最前線は極めて人間くさい (個人の趣味, レフェリー, 引用する・しない等)
 - 世界は広い 多様な見方や考え方
 - 直感 (自信) とやり抜く力 (執念) 最後は自分との戦い
5. 人の真似をしない
 - 真似から始まるが, ある所でその人なりの付加価値がつく
 - 特に外国人の研究に飛びつくな, 鵜呑みにするな
 - 先行研究の調査も必要だがあまりするのは無意味 自分で考える
 - 重箱の隅をつつくな
 - 決して他人の論文 (図, 内容のみならず文章も) を引用せずにコピーするな
6. 論文以外の日頃の勉強
 - 研究室での本読み等 スポーツ選手の日頃の体力強化を見習うべき
 - 知識の量より考える力の育成 試験はもうない 自信がつく
 - 専門分野の周辺の知識の幅を広げる (他分野のセミナー)
 - 無用の用 (直ぐに役立つものばかり追いかけるな) 意外と後に役立つ
7. 二つのテーマをもつ
 - 一つでは行き詰まる恐れ大
 - 論文の書きやすいテーマと息の長い (自分のしたい) テーマ
 - 自分の納得のいく論文を書くことを目指す
 - 分かりにくい所に良い物がある
8. 論文の投稿先をよく考え選ぼう
 - 雑誌によって評価が変わる
 - 引用回数の不思議 タイムリーな研究をすると多くなる
 - 時間の経過とともに価値が認められる論文もある
 - 著作権は大切
9. 自分の研究に投資できますか？
 - 研究費は全て大学が出すもの？
 - 大学は会社 (雇われ) ではない
10. チャンスは誰にでもやってくる
 - チャンスが来ているときには分からない
 - Publish or Perish