海の研究四十年 ： 考楽不知飽

増田, 章
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/1526158

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.1-47, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

海の研究四十年　考楽不知飽

増田　章*1
（2014年1月27日受理）

Life as a physical oceanographer for 40 years – never failing joy of thinking –

Akira MASUDA
E-mail of corresponding author: *masuda@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

My life as a physical oceanographer is outlined at the time of retirement from Kyushu University, in the hope that a trivial experience of mine may give a bit of encouragement or stimulation to young students and researchers as future scientists. For these 40 years, I have been engaged in the research into a wide variety of subjects in physical oceanography: mixing of stratified fluids, double diffusive convection, nonlinear stochastic wind-waves, air-sea interaction, Rossby waves/modes and their completeness theorem, Kuroshio meander, mesoscale eddies of the ocean, thermohaline deep ocean circulation, climate variability, spontaneous generation of organized structure in geophysical fluids, and so on. I have been interested in and fascinated by each subject. I have enjoyed fully the study of the sea, though such scattered concern of mine has prevented me from accumulated achievements in a particular research field. Such a variety of research areas, however, has often provided me with surprise at and joy in the fact that similar mechanism or mathematics plays a key role in seemingly quite different fields of physical oceanography. Surveying my life as a physical oceanographer, I feel that my concern has been on the mechanism or mathematics of the sea, rather than the reality of the sea itself. To conclude, I have been happy to be a physical oceanographer. I have had and will have never failing joy of thinking not only about the ocean dynamics.

Key words : *physical oceanography, geophysical fluid dynamics, wind-waves and Rossby waves, ocean eddies and turbulence, mid- and deep- ocean circulation, mechanism and mathematics*

1.　はじめに

前書きに相当することから始めます．本稿は私の最終講義録です．拙い研究人生の一例というか体験をお伝えしたいという趣旨です．

第二節で私の研究人生を要訳した文章を出します．第三節で第二節を敷衍します．想い出深い話を時系列風に並べます．第四節は趣が違います．とにかく考えることを楽しんで来ました．その辺りがお伝えできればと思い，海洋学から「考楽」の題材を用意しました．ご一緒に楽しんで頂きたいという趣旨です．第五節は要約とご挨拶です．

どれもほぼ独立しています．堅苦しい話ではありません．図面や研究内容の出典は省きます．

私の研究者人生を要訳したものとしては第二節と第五節で充分です．また，最終講義の折のスライドを選んで図版として織り込んでいます(一部本文に，残余を付録に)．それをご覧になるだけでも話のあらましはお分かり頂けるかと思います．第三節と第四節は海洋物理にある程度馴染みのある方でないと分かりにくいかもしれません．私の経験してきた海洋物理研究の一端を疑似体験したい方には読んで頂ければ幸いです．もっとも，誰方にも分かるよう説明したところもあれば，面倒になってさらりと要点のみ述べたところもあります．ご容赦ください．何ならご自分で読み解いてください．面白い発見があるかもしれません．

なお，最終講義録といっても，かなりの加筆修正があります．また，既に書いたり話してある程度まとまっている材料を継ぎはぎしています．そのため重複が多くなっています．

以上お断りしておきます．それでは次節から最終講義に入ります．

*1　九州大学応用力学研究所

2. 若手会の概要より

皆さま，今日は，ようこそおいで下さいました．最終講義らしい話になりますかどうかはともかく拙い体験話を聞いて頂きます．「堅苦しい場ではなし，お好きなことを」と言われました．お言葉に甘えて自分にとって印象深かったことをお話していきます．

ただどういう方を対象にどういう話をしたら良いのかよく分かりません．若手研究者の皆さんのご参考になればと思いまして，一応若い方を想定していますがどうなりますか．これまで学会でもどこでも，結局は自分を聞き手にお話してきたような気がします．これで通しましょう．

あれこれお話しするつもりです．どこにいくか分かりませんし，どこで終るかもわかりません．それでも構わないように，自分なりに要約しておきます．これさえ済ませておけば後はどうなろうと時間までお話すればよいだけですから．

というわけですので，2009 年の夏に九重でありました海洋学会若手会での講演概要のご紹介から始めましょう．次のものです．

スライドの文章を読んで頂きたいと思って用意しましたが，折角ですのでお出での方お二人に音読して頂きます．前半を笠井さん (京都大学農学部) に，後半を水田さん (北海道大学地球環境研究科) にお願いします．笠井さんは私が東京大学海洋研究所に在籍していた頃からの知り合いです．水産系の杉本教授の研究室の院生でしたが (私のいた) 海洋物理研究室にやってきては，海洋物理の院生や私と学問研究の話をしていきました．私も楽しみにしていました．水田さんは，その頃の，そして私としては最初期の院生です．後ほど出てくるかもしれませんが海洋深層循環を一緒に研究した仲間の一人です (最終講義当日はご本人から自己紹介がありました．ここは便宜上私からの紹介としておきます)．

(若手会講演)**『あれやこれやの研究人生』**

「学会若手会夏の学校で何か話をという。学問研究の中身より年寄りの経験を若手に伝えるという趣旨らしい。そこで恥や後悔を含め自分の海洋研究人生を有り体にお話しすることにした。個人の狭い経験で恐縮だがそこから海洋学が垣間見えれば良しとしよう。教訓じみ説教くさくても自慢や法螺があってもそこは歳に免じて頂こう。

この世界に入って早や四十年が経つ。文系志望だったのに地球物理に入った。挙げ句に終の仕事が海洋学とはどういう巡り合わせだったか。修士で成層流体の貫入を調べ博士課程では熱塩対流で学位をと計画した。混合層やロスビー波など何やかや囓っていたので専門が成層流体、余技が地球流体力学と自称する。運良く博士課程中途で九大応用力学研究所に就職できた。ここは風波研究の一大中心だったので自然と風波研究に染まる。

学位は不規則非線形風波の研究で取った。その後海流に興味が移っていった。黒潮蛇行の数理模型とその再現水槽実験はよく覚えている。世界中が中規模渦に湧いていた頃でその研究もした。テニスに明け暮れた独身の日々でもあった。

海洋研究所 (現東大大気海洋研究所) に移ると、大循環とくに深層循環を考えるようになった (研究所と理学部に同学の士が多かった)。院生時代から考えていたロスビー基準振動の完全性定理に一応の区切りをつけたのもこの頃である。

九大に戻るとしばらく学内行政に時間を取られる。反面中深層循環やレーダー・海流監視の研究仲間が増えた。ようやく定年間際になって少し学問研究の時間ができるようになった。今は中規模渦 (乱流) や気候変動が面白い。ただ好みは変わった。一過性で直ぐ書き換えられる研究より、不変・普遍の真理に興味が移った。また教育を大事に考えるようになった。

定年後は中深層循環や中規模渦の問題でまだ試していない着想にけりを付けたいと思っている。風波と乱流をもう少し調べ確かめたい。わけのわからないことだらけなので。

なお，若手会では，講義として海洋学と数学の関わりを少しだけお話しする予定である。最後に，自分の研究人生で得た所感を幾つか脈絡無く並べてお仕舞いにしよう。研究していると思いがけない関係でつながる現象を発見して嬉しい体験をすることがある。但し関係があっても見えない人には見えない。出会いは実力なのである。何事も基礎が大事である。力学や数学・統計のような基盤は若い内に養っておくとよい。もう一つ、したくないこと、余計なことはしないに超したことはない。人生は短いのだから。」

話すと冗長でも文章だと簡潔ですね．本日の最終講義もこの要約に尽きます．これっきりです．少し立ち入って繰り返しお話しするだけです．実は，若手会講演も早めの最終講義と思って引き受けました．ユリウス・カエサルは何事も単一の目的のためにはしない男だったとか．気持ちだけでも見倣います．

3.　海の研究と人生と 関わってきた海洋研究とこれまで

さて，これから自分の研究を時期で区分し，人生とも重ね合わせて時系列風にお話しします．研究内容やお世話になった方々のお話も出てくるでしょう．

その前に今日の話全般のご注意を少し．

- 雑談なのでお気楽に．ゆっくり話します．成功体験・失敗体験 (自己評価)，挿話とあります．
- 個別研究の詳細は殆どしません．考え方のみにします．
- 耳慣れないことが出てきてもそんなものかで結構です．例えば説明なしに固有名詞が出てくるかもしれませんが，そこは聞き流してください．
- 若いころの話や写真を主にします．若手向けのつもりです．昔のことをという意味でもそうします．その方が皆さまご存知の最近の話より興味をもっていただけるでしょうから，
- その中でお世話になりお付き合いして頂いた方々をちらちら言及します．感謝の言葉を述べなくても感謝しています．
- 自分に良いこと楽しいことの方を良く覚えています．(良い性格でしょうか悪い性格でしょうか)．そういう話が多くなります．
- 散漫になるでしょうからどこで終ってもよい．いつでも終わります．(話の筋と概要は前に出しています)
- (詳細な質問や議論は後で個人的にお願いしますが) 詳細すぎない質問があれば随時どうぞ．何の話ですか，ぐらいの質問でしたら即，追加説明します．
- ご意見などもございましたらお願いします．私からお話するだけより対話のある方を歓迎します．
- 途中で休みをとらせてもらうことがあるでしょう．加齢で集中力がもたなくなってきましたし，あちこち跳び，さまよい出す話を本筋に戻す意味でも．
- これ以後，学問研究に関わる話が中心になってきます．その体験 (教訓) をお話しするのですが，成功体験を○で，失敗ないし反省点を×で示しておきます．なお，忘れてしまったことが多いので，記憶に残っていることだけです．ただし記憶にあるといっても正確さの程は保証しません．

3.1　大学，大学院時代

(東京大学理学部地球物理学科，年齢 20-26)

[1] 学部まで

小さい頃から歴史が好きでした．六人兄弟の末っ子で他の兄弟が文系なので，自分も文系だろうと思います．因果や成り立ち (縁起)，語源などに興味があります．これが歴史好きにつながります．なのに海洋物理で飯を食うことになりました．自分でもよく分かりません．

「成り立ち (歴史)」と似た「仕組み (物理)」に向かう関心が理系と重なるのかもしれません．工学や農学には向かいそうにありません．また黒白と論理の明快な数学が割に好きでした．納得したがる方でしたからでしょう．数学の成績がまあ悪くないという理由だけで教師の勧めるまま理系に進んだのだろうと思います．

実際，高校で物理を面白いと思ったことはありません．現象の羅列に近いという印象でした．転機は大学教養部です．ここで物理と数学・論理の絡みを学びました．物理を面白く感じるようになりました．それでも教養部から学部に進む折り，文学部史学科に移ることを真面目に考えました．どうも根っからの理系人間とは思えません．ですから目標があって海洋物理に進んだわけではありません．成り行きですね．地球物理を選んだのも，進む範囲が広く時間を掛けて専門が決められるというのが良かったからでしょう．ただ，海洋物理に進んで良かったと今では思っています．図や数式で物事を明らかにしていくのが性にあっています．文系だと必要になるらしい修辞は苦手で口下手ときていますから．また，好きな歴史などは趣味で楽しめますしね．

[2] 大学学部，大学院の時期

1) ○: 特異点近傍の数値積分

学部・大学院と寮に住んでいました，その寮の食堂で食事しながらある先輩の話を聞きました．数値積分をしているのだが，特異点がありうまく収束しないので困っているということでした．積分はできるのですかと尋ねたところ特異性が弱いので収束する筈とのこと．今思いついた手順ですがこういうのは

どうですかと提案しました．単純にいえば「機械的数値処理で扱いかねる特異点近傍を単純化して分離し，解析的に求める，つまり人間が面倒をみる．残りの雑多な部分は機械に数値処理を任せても良い精度で結果が得られるだろう」というものです．殊更難しくも新しくもありません．しかし，次に寮の食堂で会ったとき，その先輩が嬉しそうに寄ってきてうまくいったよと話してくれました．お手伝いできたというのと，何でも自分で考えてみれば面白いという嬉しさを味わいました．これが理系として最初の成功経験でしたでしょうか．

ですが，これは単に，人のお役にたったとか気分が良いというのにとどまりませんでした．このときの成功体験が後に学位論文を書くときに随分役に立ったのです．「情け?は人のためならず」をずっと後で実感するものでした．

さて次の例で確かめてください．単純ですが効果は保障します．$x=0$ に特異点があるがそれは $1/\sqrt{x}$ で近似できるとします． $f(x)$ を複雑ではあるがまあ滑らかな関数として，次の積分を計算しましょう．

$$
\begin{aligned}
&\int_0^1 \frac{f(x)}{\sqrt{x}}\,dx \\
&= \int_0^1 \frac{f(0)}{\sqrt{x}}\,dx + \int_0^1 \frac{f(x)-f(0)}{\sqrt{x}}\,dx \\
&= 2f(0) + \int_0^1 \frac{f(x)-f(0)}{\sqrt{x}}\,dx
\end{aligned}
$$

ここで $f(x)-f(0)=\dfrac{df}{dx}(0)\cdot x+O(x^2)$ に注意しましょう．特異点 $x=0$ に近づくと分母が 0 に近づきますが，分子 $f(x)-f(0)$ も 0 に近づきます．そのため被積分関数 $\dfrac{f(x)-f(0)}{\sqrt{x}}$ が無限大になることはなく，寧ろ小さくなります．だから機械的に数値積分してもすんなり滑らかに収束します．

2) ○: 今井先生から教わったこと　形式と意味

流体力学で有名な今井功先生の講義を受ける機会がありました．ご専門の流体力学でなく弾性体の力学でした．素晴らしい授業でした．聴いているだけで良くわかります．いやあ展開が実に自然で，当然のことを当然のように扱っているだけと，学生を分かった気にしてくれます．ノートをとるまでもないとじーっとただ聴きました．つけは後で来ました．全て忘れてしまったのです．今では弾性論を操れません．聴いただけで分かった気になっても身には付いておらず実地には使えないということです．何事も自分の手で扱い頭で考えないと身には付かず活用も出来ません．

その今井先生の講義で鮮明に残っていることが一つあります．「授業の内容と直接は関係ないことだけれども，みなさんラプラシアンというのに弾性論でも電磁気学でもよく出くわしたでしょう．どうしてラプラシアンがいろいろなところに顔を出すのか，またどんな意味を持っているか考えたことがありますか．ご存知ですか」というものです．そうして「ラプラシアンとは，その点での値が周りの値の平均値からどのくらいずれているかを表します」と説明されました．この弾性論の講義で，弾性論そのものより，形式にとどまらず意味を深く考えることの大事さ面白さを教わりました．

自分の講義でも今井先生のこの話をよく使わせてもらいました，自分なりの工夫を加えてですね．数式記号を定義だけで抽象的なものとして捉えるのでは浅いが，その意味あいを具体的に把握すれば，似たような他の状況にも直感が効くようになり物の見方が豊かになるということをです．

ラプラシアンの意味を数式で説明しましょう．f を滑らかな関数とします．

$$
\begin{aligned}
&-\nabla^2 f \qquad \text{一次元に単純化して考えれば} \\
&\sim -\frac{d^2 f}{dx^2} \quad \text{差分近似すれば} \\
&\sim -\frac{f(x-\Delta)-2f(x)+f(x+\Delta)}{\Delta^2} \\
&= \frac{1}{2\Delta^2}\left[f(x)-\frac{f(x-\Delta)+f(x+\Delta)}{2}\right]
\end{aligned}
$$

二次元でも三次元でも同じ考え方ができます．要するにラプラシアンとは曲線あるいは曲面の曲率 (直線や平面からのずれ具合) に相当するということです．拡散方程式で明らかなように，ラプラシアンが 0 となる状態は往々にして平穏無事なことを意味します．周りを見渡して平均的な意見を維持し振る舞えば主角が立たず穏やかな人と見られることが多いでしょう．日本社会の一側面を思わせますね，善し悪しは別として．実際に現実社会を変えていくのは主角のある人なのでしょうけれども．

3) ○: 西岸境界流ができる理由　　自分なりの考え方

太平洋には黒潮，大西洋には湾流という大海流があることが知られています．大洋の西側の岸にへばりつくような海流の存在は，昔から海洋物理学の大きな主題です．西岸境界流が存在するのはベータ効果によるということになっています．この考え方は半

世紀以上も前に Henry Stommel が提案したのです．説得力があり学生を魅了します．学部の授業で吉田耕造先生が紹介され，レポート課題を出されました．西岸境界流が生じる理由について述べよと．まあ格好のレポート・テーマというところでしょうね．

支配方程式を解けば β 効果を考慮したとき，西岸強化を表す解になることはすぐ分かります．しかし解いた結果 (解析的であろうと数値的であろうと) がそうだからそうだというのでは納得できません (今井先生の講義が効いています)．自分を納得させるために摂動論を考えました．$\beta = 0$ の解 (東西に対称な時計回りの循環) に，微小な $\beta > 0$ の摂動を考えるとどうなるでしょうか．西岸近くの北上流が強まり，東岸近くの南下流が弱まるという理屈が直ちに出てきます．我ながらうまくいったので，当時吉田研究室の助手でいろいろ指導を受け議論に付き合って頂いた宮田さんに話をしたところ，面白い，今度 Stommel が来たら話をしてみようと言ってくれました．私の指導教員だった永田先生にも茶飲み話として宮田さんから伝わったらしく興味をもって頂けたようでした．ずっと後になってですが，永田先生の著書に黒潮と西岸強化の仕組みとしてこのレポートでの考え方が記述してあって嬉しく思いました．

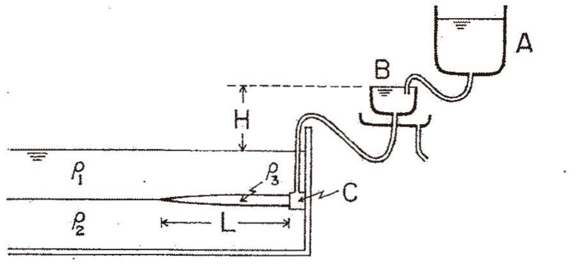
なお，このとき考えたのは摂動論です．特異摂動論からの説明もありますが，摂動論の方が自然で分かり易いでしょう．

4) 大学院時代の挿話

×: 学部に比べ大学院受験は難関でありません．当時も今もです．その大学院受験で危うく落ちそうになりましたが，何とか海洋物理研究室に入りました．他人はともかく自分が落ちるかも，などとは毛頭考えていませんでした．難しい (難しそうな) ことには力を入れる反面，易しい (易しそうな) ことでは緩んでしまいます．この欠点は若いころから自覚していますが直りません．例えば脱字・誤字類から逃れられません．大概分かるだろう，そのうち修正するからと思っていい加減になるからです．この原稿では，さていくつに収まるでしょうか．

×○: 指導教員を決めるという折，吉田先生 (教授)，永田先生 (助教授) との面談がありました．海洋で何をしたいんですかと問われて「海の中で運動量とエネルギーがどう運ばれ貯まるのかを知りたいんですが」と答えると「それは海洋学を全部やるということですよ」と言われました．大それたことなんだなと思いました．しかし時代が進んでくると荒唐

成層流体の貫入　水槽実験



$$L \propto t^{5/6} H^{2/3} (\Delta\rho)^{1/6} \quad (\nu^{-1/6})$$

Fig. 1 Setup of an experiment on the intrusion of mixed homogeneous water in stratified fluids (master thesis).

無稽でもなくなってきました．実際，最近の Thorp の "Turbulence of the Ocean" という本では，エネルギーが外部から海へどう注入され，どう流れてどう貯まるか，散逸するかというのが中心主題になっています．身の程知らずだったという反省もある半面，若い頃から海洋学の道筋がほの見えていたのでは，と自分の気分の良くなる方に解釈しています．

○: 吉田先生は研究室のセミナーでもあまり発言されませんでした．ただ，院生が分かりにくい数式表現や展開をくどくど説明していると「物理で言うとどういうことですか」とよく尋ねられました．式で分かるだけでは駄目で物理として実感できるようにという教えだったように思います．今井先生の教えに通じますね．ところで．私の大学院時代，海洋物理研究室には珍しく多数の院生 (先輩，同期，後輩) が在籍していました．しかしその頃の院生諸兄からこのような感想を聞いたことがあまりありません．こういうことを感じやすかった私の記憶に強く残ったのかもしれません．

5) ○: 修士論文 自分のしたいことをする

成層流体の貫入実験が修士論文でした．永田先生からもらったテーマは内部重力波に伴う等密度面の鉛直変位を光学式に計測する手法の開発でした．が，今一つ興味が持てません．ただ成層流体には馴染みも興味もありました．海洋内部の鉛直混合の実体は内部波の砕波だろうと，その頃から考えられていました．しかし内部波の砕波に伴い境界面に出来る均質水塊が等密度面に沿って広がる様子の見当がつきません．成層流体における混合としては極めて基本的な問題

なのに，です．重力流式の運動は調べられていましたが，粘性の効く領域の話は殆どありませんでした．その実験をしてみようというわけです (Fig. 1)．

実験装置も新しく作らねばならず，指導教員の永田先生にはあまりいい顔をされませんでした．粘性の効く遅い成層流体の運動を考えて何とかまとめました．あまり知られていませんが，この遅い成層流体運動は，ベータ面上の西岸強化理論 (水平粘性を基にする Munk 模型) と関係があります．

論文としてはいい出来でなかったかもしれません．しかし良い主題，発展性のある主題ではあったようです．その後，(最初いい顔をされなかった) 永田先生の指導で後輩数人がこのテーマを発展させる形の研究をしているからです．勿論，永田先生の度量の広さのおかげです．

6) ○: 熱塩対流 (二重拡散対流) の物理解釈

博士課程に進むころから熱塩対流に興味を持ちました．熱塩対流 (二重拡散対流) は風変わりな対流です．流体の密度は下の方が重くて安定そうに見える成層状態であるにもかかわらず不安定が生じる現象です．海水の密度が温度と塩分という二つの量で決まることに関係します．拡散係数は温度の方が塩分より 100 倍も大きいのです．拡散係数のこの違いが原因で不安定が生じるので二重拡散対流とも呼ばれます．この現象は当時発見されたばかりでした．先鞭をつけたのはまたしても Stommel でした．

熱塩対流には二種類あります．一つは上の方ほど塩分・温度が高い (密度としては上の方が小さい) 状態の不安定で salt finger (塩指) と言います．幅の割に背の高い対流なのでこう呼ばれています (Fig. 2)．運動が指数関数式に増大し普通の熱対流に近いものです．もう一つは上の方ほど塩分・温度が低い (密度としては上の方が小さい) 系の不安定で拡散型と呼ばれています．こちらは振動しながら振幅が増大するというもので通常の対流とは似ていません

前者は，例の拡散係数の違いから簡単に説明できるし納得できます．しかし，後者がどうしてそうなるかの説明は見聞きしたことがありませんでした．線形不安定論の解析結果によればそうであると提示されていました．これでは納得がいかずその理由・仕組みを分かりたいと思いました．そこでいろいろ考えて，ある説明に辿りつきました．この説明を永田先生にもお話したところ，シンポジウムで話してみないかと勧められました．

海洋研究所でだったと記憶します．諸先生を前に，

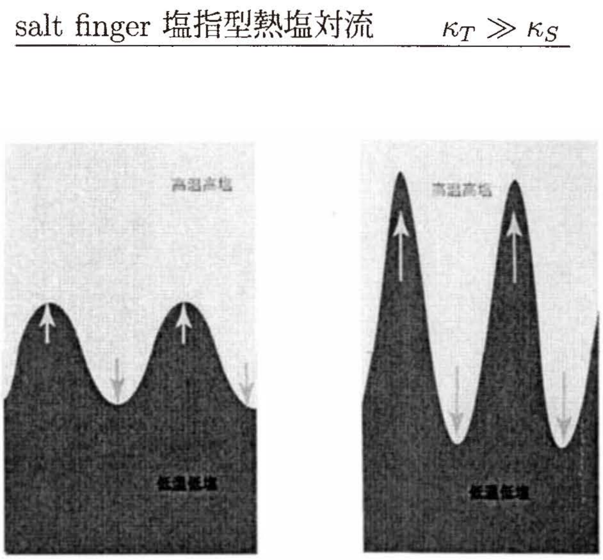


Fig. 2　Exponential growth of salt fingers: side views of the initial disturbanc (left) and its development (right).

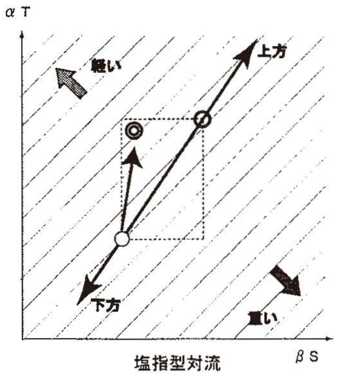
振動しながら拡散型熱塩対流が増幅していく理屈を図解して説明しました (Fig. 3)．そのとき前列に座っておられた海野先生 (隣の天文教室の教授; 当時，天文でも拡散係数の違いが起こす不安定が話題になっていたと聞く) が，「ああー，そうだったのかー」と声を出されました．自分なりに自信はありましたが，他分野の大家にも納得してもらえたので，大層心強く思い，また密かな自信になりました．

このことだけでも励みになりましたが，その後，この仕組みを説明する機会が何度があり，その都度どなたかに「へ―」と言われて気を良くしたものです．研究者人生で自信を得た最初の成功体験であり，想い出深いですね．なお．この説明を理想化して数式表現に乗せると拡散型二重拡散対流は負抵抗を有する振動として表現できます．思うに拡散型熱塩対流という呼び方が理解を妨げます．熱拡散が負抵抗の働きをする内部重力波と見る方が適切でしょう．一方，塩指対流は，熱拡散が正抵抗を与える指数増幅型単純不安定 (対流) です．

7) ○×: 二重拡散対流と学位論文

博士課程に進学しました．昨今とは違い，課程博士は希で多くは論文博士です．また，学位論文は主題選定から論文申請まで本人が決め達成するものでした．指導教員は博士課程院生に自由にやらせます．と言えば聞こえは良いが，要するに放置「放し飼い」

熱塩対流 (塩指型と拡散型) が起こる仕組み



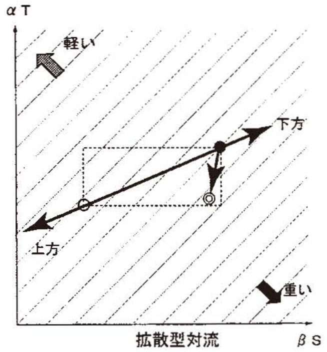


Fig. 3 Illustration of how instability grows in double diffusive convection: (top) convection of salt finger type and (bottom) convection of diffusive type.

というやつです．海洋物理ではとくにそうでした．悪いことではありません．これが最善の教育と思います．先達は，共に精進し時に議論し助言するだけです．ふんせずんば啓せずひせずんば発せず，ですね．

そこで「熱塩対流に及ぼす剪断流の効果，地球自転の効果」という主題を考えました．先ほど述べたように気を良くしていて，それなりに幾ばくかの自信もありました．三年で学位論文を仕上げるという年次計画をたて数値計算も始めました．

その頃 Cambridge 大学に Linden という研究者がいて，熱塩対流の実験と理論で論文を書いていました，同じ熱塩対流をテーマとしているので当然かもしれませんが，目の付けどころが似ているのです．私がこういうことだろうと当たりをつけ，調べ吟味して論文にしようとすると同じような結論を彼が先に書くということが二度ほどありました．熱塩対流ではどうも先に実験データを持ち，先に考え始める Linden に遅れを取るようだ，短期の話だとこれは拙いと気づきました．博士課程に進んで直ぐ九州大学に助手の口があったこともあります．(生きる上で幸いなことに？しかし研究者としては拙いだろうことに) 執念深い性格を持ち合わせていません．熱塩対流を学位論文にするのは止めにして九大に移り，やがて全く別の主題に取りかかることになります．結局，回転系における二重拡散対流線形不安定 (これは新分野の開拓としてそれなりに高く評価してもらっています) の論文を書いて終わりにしました．

この経験を半分○と評価しています．諸国の研究者にひけをとらない仕事を独力でできる，先端領域研究の着想を自分で得る (捻りだす) ことの自信がついたという意味でそうです．半分×という評価もします．着想はできるがデータがないとどうしても遅れます．集中してデータを取る，或いは中途半端でもとにかく論文にするという点では精力的でありません．先取権 (時間) 競争は性に合わないと気付きました．粘りがなく淡白ということです．何しろ「執着が人生と社会を難しくする」というのが持論ですし．

8) 解説記事など

此の頃は若かったし何も知らないという気持ちが強くいろいろ齧っていました．本業が密度成層流体，余技が地球流体という具合です．そのせいか，雑誌などに解説記事を執筆させて頂く機会が割にありました．時間はかかりましたが思い出も多いですね．

○: 専門を固定せず，やっておけば何でも面白い．直かにでなくても有用なことが多い．知らないことでも調べて文章にすると考え方の幅が広がり奥行きが深く柔軟になります．実際，異分野の知識や考え方はこの後も大いに有用で助かりました．

×: (未熟ですから何をするにも時間がかかり) 時間を取られるのが嫌で記事執筆を断るようになりました．しかし若いころの苦労は買ってでもしておくべきだったなと思います．自分の専門から遠めの領域でも自分で調べ考え整理し文章を書くというのは勉強になるし得難い経験になるからです．

×○: 今日の話でもそうですが，読者を想定してどう書けば理解しやすいかが当時から良く分かりません．つまりは自分と対話して自分を納得させるような書きぶりになってしまいます．自分では他の人より明快で分かり易い記述と思っているのですよ，本当に．しかし感性の違う読者もいらっしゃる (が多い) ので，なかなかそうはいきません．難しいですね．

学生時代から九大時代にかけての解説記事には熱塩対流の解説，海面混合層の解説 (成層流体の混合),

ロスビー波の解説，があります．

初期の論文でまあまあかと思うのは，一つは回転系熱塩対流の線形不安定論で，もう一つはロスビー波のエネルギー輸送と群速度の関係を論じたものです．前者では当初の予想と違う結果が面白かったし，後者では，群速度，位相速度，エネルギー輸送，運動量輸送の間にある美しい関係 (分散関係を介する) を見出して感動しました．この関係はロスビー波に限らず成り立つことが多いことも付記しておきます．興味のある方は本稿の付録をご覧下さい．

*) 閑話休題．大学院時代の写真を一枚ご覧頂きます．Fig. 4 です．この頃皆さんと一緒に映っている写真を探しましたが，意外にありませんでした．見つけ出したのがこの一枚です．鹿児島での秋季学会の折でしょう．場所は桜島のような気がします．ほぼ 40 年前です．皆さんお若いですね．後ろの方に離れて立っているのが岸さん (後輩)，その前が杉ノ原さん (当時助手，故人)，白シャツでピシッと立っているのが宮田さん (当時助手，故人)，その前に立っている痩せっぽちが私，ひげを生やして座っているのが竹内さん (同期)，私の右前に座っているのが村上さん (先輩) です，その隣の眼鏡を掛けた人はどなたでしょう．応用力学研究所の方も，体型からは想像がつかないかもしれません．尹さんです (同期．昨年まで応用力学研究所教授として同僚)．痩せてスマートでしたね．撮影は多分，韓国から来ていた安さんです (当然写っていません)．

大学院から九大に移ったばかりの頃までは駆け出しで助走の時代です．若かった分想い出も鮮明ですね．

3.2 風波の時期

(九州大学応用力学研究所，年齢 26-39)

博士課程に入ってすぐ，当初立てた学位計画がどうも拙いかなと思い始めた頃です．吉田先生から「助手の口があります，九州大学応用力学研究所の光易先生のところですよ．どうですか」と言われました．光易先生の講演は海洋研究所で開かれた波浪シンポジウムで拝聴したことがありました (波浪スペクトルのオーバーシュート現象のことだったと記憶します)．応用力学研究所が何をする研究所かはよく分からないまま (今でもよく分かりませんが)，波浪なら多少の馴染みがありましたし，九州なら喜んで行きます (郷里が久留米でした) とご返事しました．こうして博士課程二年で中途退学し．光易先生の沿岸海象部門の助手として就職しました．研究所の裏にはテニ

大学院の頃　鹿児島？にて

Fig. 4 A photo in the days of graduate course of physical oceanography with friends and colleagues. Probably at Sakurajima on a day in the fall meeting of the Japan Society of Oceanography.

スコートがありました．日没が東京より遅く，長いことテニスが楽しめるというのは嬉しい発見でしたね．

最初は風洞水槽に温度成層した気流を送り込むための熱量計算とかそういう仕事がありました．が，実際には自由な環境を与えて頂きました．研究なら何をしてもいいですよ，好きに進めてくださいとおっしゃった光易先生には本当に感謝しています．学位も自分で取って下さいということでした．学位をさてどうしようかとのんびり思案していました．根拠もなく何とかなると楽天を決め込むのは得意技ですしね．ところで，当時から光易研究室は風波研究について世界の一大中心でした．風波の話題を研究室で常々聞いているうちに自分の脳と思考も自ずと波浪研究に染まっていきました．

1) 波力に対する応答　非線形解析

水中に立てた円柱に波が当たると円柱が振動します．波が円柱に及ぼす力とその力で起こる円柱の振動は海岸工学の主題でした．その実験を光易先生と本多さん (当時助手) がしておられました．普通には考えにくい振動数で顕著な応答が見られるがどう考えたらよいか分からないという話を研究室のお茶の時間 (懐かしいですね，無駄でない無駄話も随分聞かせてもらいました) に聞きました．沿岸海象研究室の一員になった最初の頃のことです．

○: 既存の考え方と実験結果を調べて考えてみたところ，非線形性が起こす共鳴だろうと見当がつき

風波の分散関係

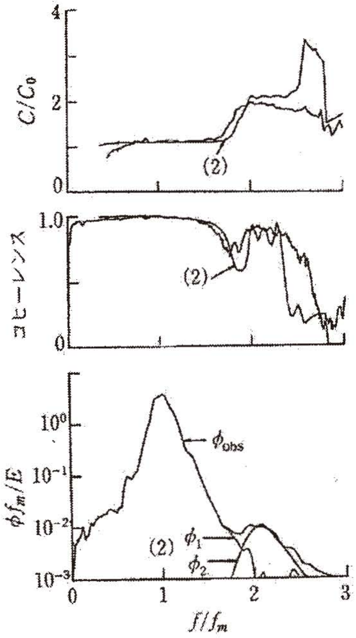


Fig. 5 Dispersion relation of wind-waves in the decay area: (top) phase velocity c normalized by that due to the linear theory c_0 (observation and theory), (middle) frequency-dependence of the correlation between two locations at a small distance (observation and theory), and (bottom) observed wave spectrum and its decomposition into free-wave spectrum and bound-wave spectrum.

ました．その理屈で解析すると実験結果をうまく説明します．この経験で以前より波浪に馴染むようになりました．

×: この時期までは風波研究に取り組む気が薄かったように思います．まとめようという気が皆無でした．しかし，この頃から光易先生と本多さんに少しは信用してもらえるようになったようです．

2) 風波の分散関係

これは学位論文につながった研究です．当時波浪研究者の間で大きな問題になっていた実験事実に関係します．風波の基本描像は線形で独立な波がてんでバラバラに伝播しているというものです．ところが，観測した位相速度が線形論の位相速度に一致しないという論文が出ました．伝播方向に場所を少しずらして置いた二本の波高計で計測し同一周波数の波の位相差から位相速度を求めた結果です．寧ろ，ピーク周波数における線形位相速度で殆どの周波数の波が伝播しているというものでした．従来の描像は間違いでしょうか．この問題で，一工夫した実験，無風域波浪の実験，をされていたのが光易先生です．実験資料の解析は台湾からの留学生郭一羽さんが担当していました．やはり最近言われているような結果が出るが出方が周波数で違い一様でないということでした．その結果と問題の重大性はお茶の時間に光易先生から何度かうかがいました．

郭さんに解析結果を見せてもらいしばらく考えました．非線形規則波であるストークス波を不規則波に焼き直したものだろうという見当がつきました．ただしその描像を記述する仕方が漠然としていました．確率過程を基礎から学び始めともかくも一つの理論形式にまとめました．そうすると，検証するための解析手順はすんなり出てきます．

Fig. 5 をご覧ください．要するに，(1) ピーク周波数近傍の自由波の作る拘束波のせいで，線形論に乗らない分散関係が観測で見られること (拘束波が自由波より大きい振動数域では拘束波の基になる周波数域の位相速度が観測されること)，(2) 自由波も線形でなく弱非線形分散関係に従うがその非線形分散関係を観測したスペクトルから近似計算できることを示したわけです．

○: 光易先生の実験，郭さんの解析をうまく説明することができました．自分なりの描像と解析法を得，実験・解析とも合うということで満足しました．大抵は独立な線形波の重畳というので悪くない．この記述が粗雑過ぎることもあるが，(一般化した) 不規則ストークス波の集合と考えれば風波の良い近似描像になるということです．

○: この結果を国際会議で光易先生が講演されたところ，好評だったそうです．実験・解析・理論が実によくかみ合っているとも言われたそうです．この折のようにうまく協力できると良い成果が出るのでしょう．各自が得意技を持ち寄る共同研究が実り多いことを実感しました．私は実験や解析を面倒がりますし上手くありません．理論・理解にこだわる気性というところで多少の貢献ができたかなとか思いますが．この折のようなチーム研究が理想です．実験なり理論が単独では薄っぺらですが，一緒になれば補完しあって厚味が出ますしね．

×: 理論と実験に分けて論文を書き投稿しました．しかし査読が遅れた上，査読者から見当はずれ (と私達が思う) の意見がきました．最たるものは，ある先行論文で説明できているではないか，何が新しいのかというものです．

この分野で名の知れた雑誌でしたが，これほど理

解の浅い人が査読をするのかと思いました．その先行論文が正しいと査読者が言うのなら，その論理を使って $1=0$ を証明できます．このことを附録として論文につけましょうかという返事を編集委員に送ってやっと受理されました．

私たちの結果は業界で受け入れらていたらしいのです．にもかかわらず査読が大幅に遅れた上に査読報告が否定的でした．このときの査読者の理解力・論理性の乏しさに驚きました．名のある雑誌の査読を依頼されるほどの研究者といっても分かっているとは限らないんですね．なお．先ほど出ていた先行論文からして，同じ雑誌に発表されていたものです．そちらの査読に関わった人はどうだったのでしょうね．物理研究者といっても，その論理性がいかほどかとなると大いに疑問です (自分を含め).

×: この理論と実験は日本海洋学会でも発表しました．が，殆ど反響はありません．何の役に立ちますかといったことを言う方もいらっしゃいました．ですが，後ほど光易先生が東北大学で同じ内容で講演された際は，鳥羽教授も納得し賛同されたそうです．私の説明で通じなかったのは私が話し下手ということでしょうね．ただ，最近はこう解釈しています．通じにくいことがあるのは多くの海洋研究者と私で感性・志向 (思考) に違いがあるからだと．

3) 風波の非線形伝達 (四波共鳴)

「風波の分散関係」は自信のある論文でした．が，一篇では学位にならないと自分で思っていました．分散関係研究の応用・継続になるバイスペクトル研究を二篇目にするといった手段も無いではありません．しかしここではこのような自然な (安直な?) 道を取らず思い切って向きを変えました．

同じ風波分野とはいえ異質な主題になります．それが風波成分波間の非線形エネルギー伝達の問題です．風波 (重力波) では三波共鳴が生じません．四波共鳴なら可能です．この四波共鳴で成分波間でエネルギーの授受が生じます (Fig. 6)．四波共鳴の理論枠組みを立てたのは風波研究の三巨人 Phillips, Longuet-Higgins, Hasselmann でした．ところが当時，風波成分波間の非線形エネルギー伝達に関し混乱した問題がありました．研究室のお茶の時間に，光易先生が国際会議での話題などをお話しなさる中で知りました．Phillips 著の Dynamics of the Upper Ocean にも書いてあります．

さて，連続スペクトルから非線形エネルギー伝達を計算する方法を定式化したのは Hasslemann で

水面波の四波共鳴条件　8 の字図式

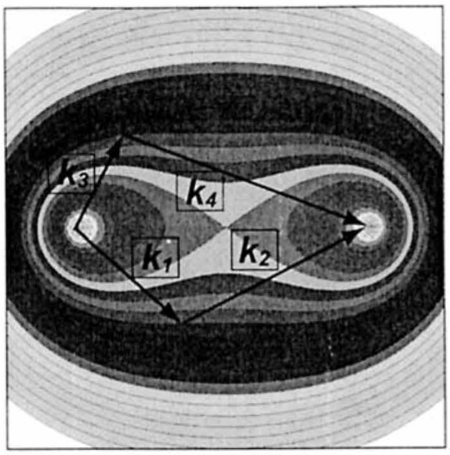


Fig. 6 Figure of 8, which illustrates the resonance condition of four wave numbers of gravity waves in deep water. Resonance occurs between the two pairs of wavenumbers $(\boldsymbol{k}_1, \boldsymbol{k}_2)$ and $(\boldsymbol{k}_3, \boldsymbol{k}_4)$ such that $\boldsymbol{k}_1+\boldsymbol{k}_2=\boldsymbol{k}_3+\boldsymbol{k}_4$ and $\omega(\boldsymbol{k}_1)+\omega(\boldsymbol{k}_2)=\omega(\boldsymbol{k}_3)+\omega(\boldsymbol{k}_4)$, where $\omega(\boldsymbol{k})$ is the frequency for $\boldsymbol{k}$ based on the linear theory.

す．極めて面倒な相互作用係数の計算を含みます．Hasselmann は Sell と一緒に数値計算をしてみました．最初の試みだから何でも許されますが，腕力計算で極めて粗っぽいものです．彼らは，スペクトル幅の広い Pierson-Moskowitz スペクトルとスペクトル幅の狭い JONSWAP スペクトルに対する非線形伝達関数計算結果を発表しておりよく知られていました．

発表された一次元非線形伝達関数は，ぎざぎざした分布になっており滑らかでありません．これは計算の粗雑さを思わせ信頼性を疑わせるものでした．更に奇妙なことがあり問題になりました．JONSWAP スペクトルのときは，ピーク周波数近傍の波がエネルギーを高周波と低周波に渡すという結果でいかにもありそうな形です．しかし Pierson-Moskowitz スペクトルではピーク周波数近傍がエネルギーをもらう形になっているのです．しかし，非線形エネルギー伝達というのは成分波間でエネルギーを均す筈のものでしょう．これは納得しがたいという論者が出てきます．Longuet-Higgins は，Sell and Hasselmann の結果に凸凹が大きく信用できないと考えたのでしょう．独自の計算方式を提案しました．それは Hasselmann の基礎式の近似を用いて複雑な数値処理に頼らないという

いくつかの方法で求めたエネルギー伝達関数

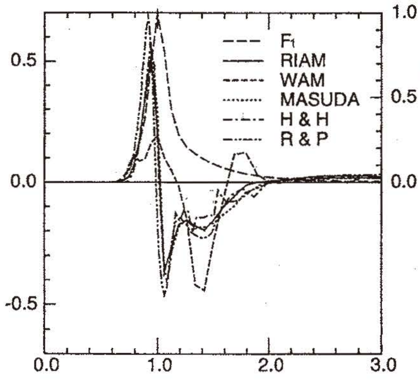


Fig. 7 JONSWAP frequency spectrum of wind-waves and its energy transfer functions obtained with several different methods.

ものです．Fox との共著論文によれば，ピーク周波数付近の波はエネルギーを失うということになります．Phillips は自著で物理的直観に合う Longuet-Higgins and Fox の結果が正しく Sell and Hasselmann は拙いだろうと述べています．業界では Longuet-Higgins and Fox 流が優勢のようでしたが，説得力は今一つです．もやもやしていました．

この混乱した状況に決着を付けることを目標に研究にとりかかりました．物理的直感の正否はともかくとして数値計算の信頼性が先ず問題です．Sell and Hasselmann のはぎざぎざしていて，いかにも怪しい．そんな結果になったのはなぜでしょうか．共鳴条件を満たす成分波間のエネルギー伝達ということで六重積分の被積分関数にデルタ関数が現れます．これを普通に三重積分に直して計算しようとすると特異点を生じます．特異点近傍では被積分関数が大きくなります．これが機械的な数値計算を不安定にし，その結果，非線形伝達関数がぎざぎざしたものにするのだろうと見当がつきます．

ほら，ここで往年の寮食堂での経験と結び付きます．特異点近傍は解析計算をして人が面倒を見て，残余の処理を機械に任せれば良いというものです．無論，学部時代の話として挙げた例のように簡単ではありません．しかし特異点分布とその特異性は解析表現が可能です．こうして計算不安定の原因となる特異点を解析的に処理したことにより，滑らかな結果が得られるようになりました (Fig. 7).

注意すべきは特異点処理をした計算でも非線形伝達関数には，ぎざぎざと言わないまでも，起伏は多いという性質です (その理由も後に明らかにできました).

風洞水槽で観測した非線形伝達関数との比較

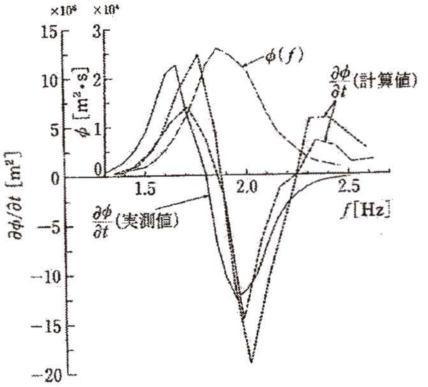


Fig. 8 Comparison of calculated energy transfer function with the observed temporal variation of the wind-wave spectrum in the decay area.

計算結果のぎざぎざさ，即ち見た目の不安定さを除けば，Sell and Hasselmann の結果を支持するものとなりました．では Longuet-Higgins and Fox は間違いだったのでしょうか．そこで Longuet-Higgins and Fox の近似を採用した上で私の半解析的計算方式を適用してみました．そうすると Longuet-Higgins and Fox とほぼ同じ結果が出てきました．Longuet-Higgin and Fox の計算はその近似内では間違いでない．しかし，その近似は実際の Pierson-Moskowitz スペクトル に対しては間違った結果を出してしまうということです．これは駄目押しのような確認作業でしたが説得力は十分でしたでしょう．

ところで無風域では，風から波への入力がなく，砕波も弱そうですから，スペクトルの発展変化は全て非線形伝達のみによると考えられます．その場合の水槽実験結果を一例ですが既に光易先生が発表してありました．その結果と私の非線形伝達関数は，関数形としても量的にも比較的良い一致を示しました (Fig. 8). こうして私の計算結果は広く認められました．

○: 当時の波浪研究界で Phillips, Hasselmann, Longuet-Higgins は衆目の一致する三大家と言ってよいでしょう．その間ですら意見が分かれ混乱していた問題に決着を付け解決しました．これは大きな自信になりました．また波浪予報には非線形伝達関数の計算が必要ですがその信頼できる厳密計算法を一つ確立したという技術開発という側面もあるでしょう．たったそれだけのことですが自分なりの達成感はあ

伝達関数はスペクトル幅に依存する

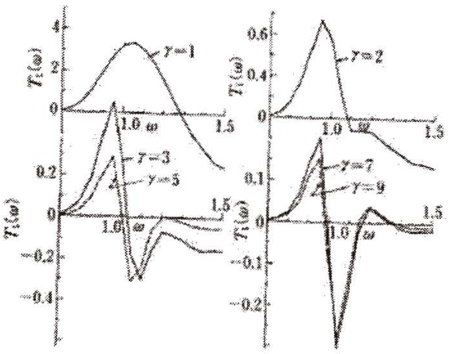


Fig. 9 Nonlinear energy transfer function heavily depends on γ, which is the index of the narrowness of the JONSWAP-type frequency spectra.

りました．この成果が学位論文の第二部を成します．

×: 私の手順で計算した非線形伝達関数が風洞水槽内無風域の波浪スペクトル変化と概ね一致し説得力を増したと述べました．しかし，詳しくは略しますが後日談があります．このときの一致は偶然だったのだろうと今では考えています．一例しかなかったといえ，これだけで「観測と計算が合う，従って実験結果も計算もこれで良い」という主張は乱暴です．吟味は慎重にする必要があるという教訓です．査読者を含め，他の研究者も，唯一例の実験で，計算および実験が非線形伝達を正しく表すと安易に認めてはいけなかったのです．

×: 波浪予報の精度向上のため，この研究を進めて下さい，計算機も自由に使って下さいといった有り難い申し出を気象庁から頂きました．が，自分の関心については納得の行く結果が出たのでこの分野から手を引きました．後に小松さんが加わって，もう一度この主題に戻ることになりはしましたけれど．

ところで．私の計算が正しいとすればスペクトル幅の広い Pierson-Moskowitz スペクトルではピーク周波数近傍の成分波がエネルギーをもらいます．Fig. 9 は私の方法で計算したものです，信頼できます．左上にある $\gamma = 1$ の場合が Pierson-Moskowitz スペクトルに対する非線形伝達関数です．確かにそうなっていますね．持っている所が更に集めるのです．今どきの資本主義格差社会のようですね．ピーク周波数近傍の成分波が非線形伝達でエネルギーをもらう筈がないという直観はどこが悪いのでしょうか．

直観は素朴ですが尤もです．しかし，風波スペト

エネルギー伝達関数　再分配の理屈

$$\frac{\partial n_4}{\partial t} = \iiint G \cdot \delta(\boldsymbol{k}_1, \cdots)\delta(\omega_1, \cdots) \times n_1 n_2 n_3 n_4 \left(\frac{1}{n_3} + \frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right) d\boldsymbol{k}_1 d\boldsymbol{k}_2 d\boldsymbol{k}_3$$

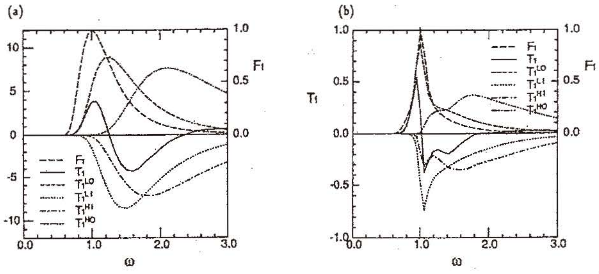


Fig. 10 Redistribution of energy in wind-waves for (a) Pierson-Moskowitz spectrum and (b) JONSWAP spectrum.

クルでは，非線形伝達のある性質のため，素朴な直感を修正しなければならないことが分かります．素朴な直感自体は正しいのです，が，非線形伝達関数は計算どおりになります．個々の側面では正しいことが，其れをそのまま敷衍すると全体として正しくない，そういうことの一例でしょうか．群盲撫象という言葉を想い出しませんか．部分部分を的確に見る目があっても，全体像を見る (推す) のは簡単でないということでしょう．

その理由を述べその理由を表す簡単な数理模型を提案しました．スペクトル幅が狭 (広) いと直観に合う (合わない) ことがヒントになっています．この投稿論文に対し，この数理模型は非線形伝達関数の近似でないという査読者の意見が来ました．WAM 模型では，一組の四波共鳴配置だけを取り出し，それのみで近似と称します．これが念頭にあっての否定的見解だったでしょう．近似計算法を出すという気は毛頭ありませんでした．直感に反するような結果が信頼できる計算では出てしまう，その理由を抽出し解明する「数理」模型です．近年ならば，このように抽象化した数理模型の有用性が良く知られていて問題なかっただろうと思います

物理を理解するために極めて重要な内容と思い私としては自信がありました．そこで別論文に潜り込ませる形でそっとこの結果を公表しました (Fig. 10)．しかし思うのです．この素朴な直感がおかしい理由を説明できる研究者は今でも殆どいないでしょうと．

半分○: 問題を自分なりに理解し統合する形で直

感と結果の矛盾を解決し，分かったつもりになれました．自信にもつながりました．

半分×: 問題意識・関心に大抵の海洋学者と大きなずれを感じました．結果も大事ですが，結果だけというよりその結果が出てくる理由を理解したいというのが私の原点です．しかし同業者多数はものごとの「理解」より，計算法など「実用」にずっと重きを置くようです．Longuet-Higgins や Philllips の疑問は多くの波浪研究者にとってどうでもよいことなのでしょうね．

3) バイスペクトルと三次統計

波浪を一般化したストークス波の集合とする観方の簡単な応用です．波浪のバイスペクトルや歪度をスペクトルから定量的に計算しある誤解を訂正したこと，バイスペクトル虚部の物理像の一端を明示したことの二つを除けば，大したものではありません．しかし不思議なことに引用は多い．また，それほどの内容とも思わないのに (逆にどうということない内容だからかも) 査読も簡単ですんなり受理されました．観測データがちらつく論文は却下しにくいという事情があるのでしょうか．

○×: 問題意識 (関心・重要性の感覚) が同業海洋研究者とずれていることを自覚するようになりました．この辺からですね．査読にしろ何にしろ同業研究者の見識というものをあまり信用しなくなったのは (自分の見識からして信用しません)．たび重なりましたからね，とんでもない主張を見ても，ああそうですか，放っておこう，という境地?に達しました．個々の科学論文は早晩忘れ去られる運命ですが，とりわけ間違った主張は急速に消え失せるのが普通です．

待てよ，消えない謬見というのもありますね．「通説」の中にあります．大抵は，数量で明示できるような具体的なことではなく，考え方や解釈・説明です．往々権威筋の箔が付いています．こうなると信心に近いようなものです．これは拙いと婉曲に告げようが，間違いだと主張しようが，業界の大勢は簡単に直りません．通説を鵜呑みにしますか．自分で納得していますか．納得しなければ疑う，それが科学者でしょう．

*) 風波研究期の写真を二枚ご覧頂きます．一枚目 (Fig. 11) は研究室での光易先生です．快適な研究環境だけでなく，波浪研究では終始適切な助言と指導を頂き本当に感謝しています．三十年?前ですがお若く颯爽としていらっしゃいます．あ，今日もおいで頂いていますが．相変わらず格好良いですね．

二枚目 (Fig. 12) は，研究室職員で九重に出かけた折のものです．後列の女性は ···· (伏せておきます) で，一番右が光易先生 (教授) です．前列には向かって右側から水野先生 (助教授)，石橋さん (技官)，草場さん (助手; 本多さんが改姓して草場さん)，そして私 (助手) が座っています．撮影は丸林さん (技官) です．上手く撮ってあるのはさすがです．楽しかったですね．

光易恒先生

光　易　　恒　博士

Fig. 11　Professor Hisashi Mitsuyasu

(箱崎時代) 沿岸海象研究室　久住にて

Fig. 12　Colleagues of Mitsuyasu Laboratory, near Mt. Kujyu, Oita.

3.3　海流と中規模渦の時期

(九州大学応用力学研究所，年齢 29-39)

1) GFD summer seminar (WHOI) に参加

吉田先生から「ウッズホール海洋研究所 (WHOI; ボストン近く) で毎年開催されている GFD 夏のセミナーに行く気があれば学生として推薦します」とのお手紙を頂きました.

旅好きな方でなく初めての，しかも三カ月の滞在を含む海外旅行，英会話は全く，というのでかなり緊張しましたが，光易先生のお勧めもあって参加しました.

GFD (Geophysical Fluid Dynamics; 地球流体力学) とは惑星の自転や密度成層の効果が重要となる流体力学のことです．自然界では海洋だけでなく気象や天文も GFD 研究の対象です．錚々たる GFD 研究者が夏休みにウッズホールに来ますので，その意味でも得難い機会でした.

この時期は MODE 観測など海洋中規模渦研究の最盛期でした．この年の主題は乱流だったと思います．この折り，講師ではありませんでしたが Rhines が海洋の中規模渦について講演をしました．渦位の乱流輸送とか何とかで，怪しげな話と思った記憶があります.

二週間ほど続く講師の講義を聞き，毎回の講義ノート原稿を作るのが聴講学生の仕事です．学生は二人が組になって，その原稿を作ります．私の場合英語を聞き洩らすことは多かったのですが，内容は把握できました．とくに目新しい内容ではありませんでしたし，万国に通じる表記である数式を見ればほぼ分かりますから.

学生のもうひとつの義務は，セミナーが終わるまでにその夏の自分の研究成果 (たかがしれていますが) を発表し論文にすることでした．また多士済済たる研究者の誰かと相談し指導してもらうということでした.

私の研究歴を知っていたのかもしれません．自分が指導し装置作成も大丈夫だから熱塩対流の実験をしてみないかと Whitehead (WHOI の研究員) が誘ってくれました．ところが，その Whitehead が「来週から西海岸の方へ行く，あとは別の人に指導してもらえばいいよ」と来ました．セミナー期間の半ばに突然でした.

日本では考えられないまさかの事態でした．幸いなことに，いよいよのときはこれでという研究主題を一つ渡米前から用意していました．二か月では未知の主題に目処が立てられないかも，と想定してです．「海底地形によるロスビー波の反射・透過」という主題です．急遽この主題に切り替え指導員 (supervisor) を Veronis に替えました．Veronis は頼まれ指導員で名目だけでした．全て自分でしなければいけません．理論でしたので夏の学校半ばからの短期間でも何とか形が付きました.

このとき初めて，英語で講演 (発表) しました．聴きとりはともかく，話す方は何とかでき，発表の折の joke も通じました．ところで，加齢とともに，とみに難聴が進んできました．聴きとるのは無理でもしゃべるのはできます．同じような.

帰国後，吉田先生に報告しました.「渦の一次量の議論ばかりで二次量が全然無い．不思議ですね」という報告をしたのを覚えています．ずっと後になってようやく二次統計研究が出てくるようになりました.

また急遽切り替えた Rossby 波の透過・反射はまあ良い主題だったと思います．帰国後の学会発表で反響がありましたが，まとめていません．幸い，このテーマを下さいという院生の方がいらっしゃったのでお任せしてすっかり忘れました.

○: まさかはあるものです．まさかはあると備えておくことが大事という教訓でしたね.

半分×: 海洋中規模渦の二次統計量をやればという着想がありました (波浪をやっていたので二次統計量どころか三次統計量にも馴染みがあった) が，着手しませんてした．まだ着目されていないようだから後でしようと．波浪研究にかまけていたこともありますが，手間暇を惜しむところは相変わらずでした.

半分○: 方向性が見えるというか先見えするという自信にはなりました．また，違った分野の知識は糧になるということも感じました.

2) 黒潮流路の数理模型 (流路方程式) と
その水槽再現実験 (盥実験)

黒潮や湾流は世界最強・最大規模の海流です．同じ西岸境界流です．性質が似ています．しかし黒潮には湾流にない特異な性質が一つあることが知られていました．黒潮大蛇行と呼ばれる現象です．Fig. 13 をご覧下さい．黒潮は日本南岸に沿って東流し房総沖で太平洋に流れ去るというのが常態と考えられています．ではありますが，紀伊半島から東海で日本から大きく離れ，伊豆の東で再び日本付近に近づくという流路 (大蛇行流路) もあります．この流路は一時的に遷移過程として現れるものでなく，安定で数年続くことが多いとされています．発見当初思われ

黒潮の代表流路　観測

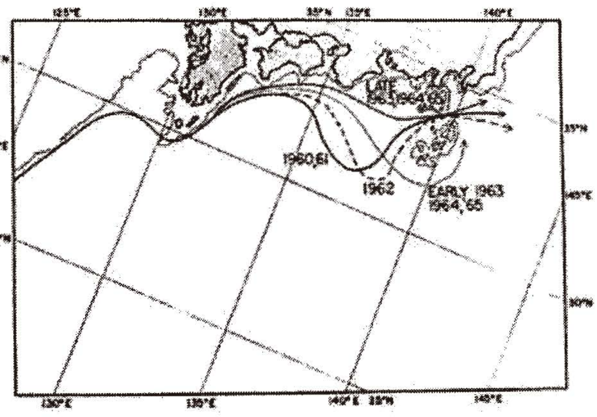


Fig. 13 Typical observed paths of the Kuroshio south of Japan. Note that the Kuroshio passes through narrow passages, one close to Tanegashima and the other off the Izu Peninsula.

ていたほど特異な現象ではありません．その場所からいっても日本が解明すべき海洋研究課題と言われていました．吉田先生にはとくにその思いが強かったと聞いています．黒潮大蛇行に関するシンポジウムなども盛んでした．

そういうわけで黒潮定常蛇行の話を大学院時代から見聞きし面白い現象とは思っていました．ただその頃は関心が別にあり，傍で聞いているだけでした．黒潮蛇行を熱心にやっている方にお任せしますの心境です．流行に無頓着でじっくり進める方です．時間の競争は性に合いませんので (風波研究の頃は，学位取得を考えていたこともあり，当時の問題に割と敏感でしたか．これは光易先生のおかげです)．

ブームがひとしきり終わって蛇行研究が下火?になった後に黒潮蛇行の問題を自分で考え始めたと思います．丁度自分の風波研究主題に一区切りついて海流研究に関心が移りかけたことも一因です．

殆ど何もわかっていない時期のことでした．ちょっと目にはとてつもない問題に映ります．簡略化した準地衡系にしろプリミティブ系にしろ基礎方程式から論じるとすれば手に負えません．ともかく定性的にでも湾流にない黒潮流路の特性を掴めば良いと考えました．日本付近の海岸・海底地形が関与しているだろうことは予想されていましたし，東向流に定在ロスビー波がありうることはよく知られていました．

あとは，極端に単純化した定常流路方程式を持ち出すだけでした．これは座屈と同じ方程式になります．ベータ面上の質点の運動とも同等ですし非線形振子の運動とも同等です．違いは境界条件にあります．指定した二つの点 (種子島の傍と伊豆南方) を通らせる．これが流路方程式を用いた流路問題の味噌です．楕円関数の応用で諸量が求められます．こうして解析的に得た定常流路解の様子を基に多重性ほかを論じることができます (Fig. 14)．

定常黒潮流路の数理模型　分岐図式と流路形

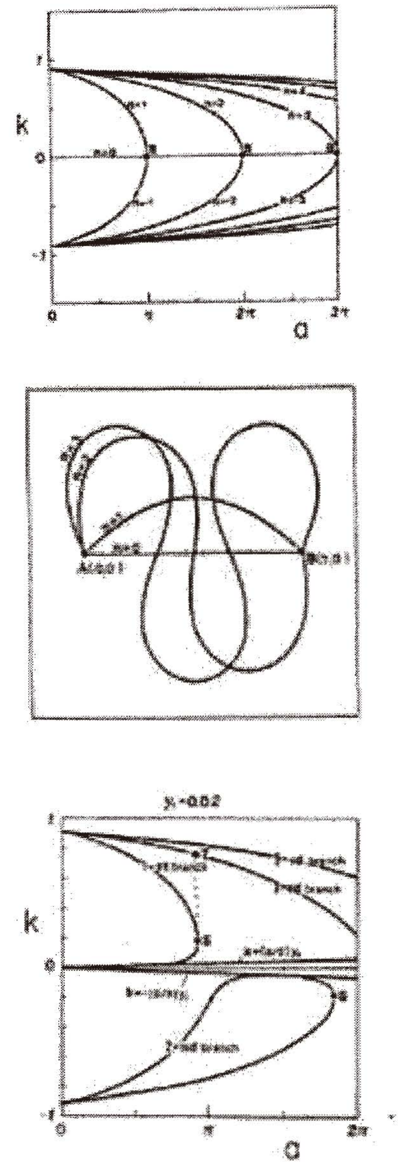
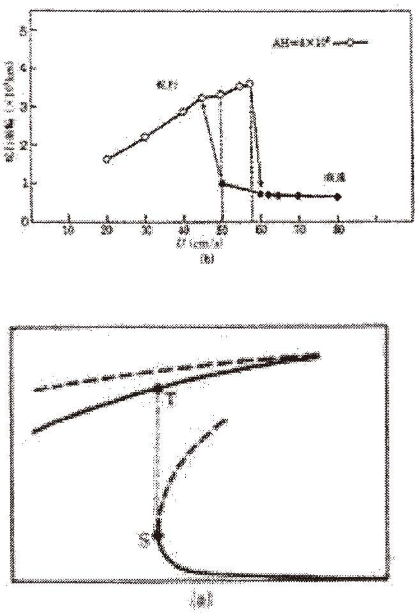


Fig. 14 Analytical model of the stationary Kuroshio paths: (top) bifurcation diagram for an idealized geometry, (middle) steady paths corresponding to the top panel, and (bottom) bifurcation diagram for a geometry just a little more realistic than the top panel.

ほぼ同時期に，伊豆海嶺の隘路を組み入れた数値

黒潮流路の分岐図　数値実験を数理模型で解析



横軸:流速，　縦軸: 流路の振幅　数理模型には不安定な定常流路 (波線) も見える

Fig. 15　Bifurcation diagrams: (top) based on the numerical simulation by Yoon. and (bottom) based on the analytical model of Masuda, which is the same as the bottom panel of Fig. 14 except that the left and right exchange,

模型を用いて尹さんが蛇行流路と直進流路の再現に成功し黒潮流路の多重性が模算 (数値実験のこと) でも確認されました．

ところで解析解 (理論模型) の良い所は次のようなところにもあります．模算の結果を結果としてその現象の力学過程の解明にも使えるのです．模算は観測に近い流れの再現に長けており，理解のための基礎になります．しかし模算のみで仕組みに迫るのは難しいでしょう．

さて，Fig. 15 をご覧下さい．上の図が尹さんの模算結果に基づく分岐図です．黒潮の特性速度 U (または流量) を横軸にとり日本からの離岸距離を縦軸にとっています．縦軸が直進路や蛇行路の振幅に対応します．振幅が小さければ直進路に近いものを表します．この図によれば U がある閾値 (~ 50) を越えたところだけ直進流路が存在するとなっています．また，直進路解の発生点 (U の閾値) からその右にかけてやや急に振幅が下がるように見えます．これは何でしょうか．どう理解したらよいのでしょうか．

盥実験で再現した二つの黒潮流路

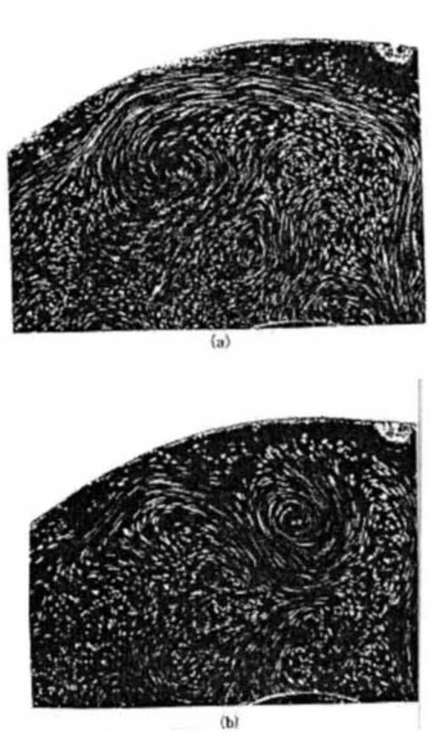


Fig. 16　Stationary Kuroshio paths simulated by tank experiment: (top) straight path and (bottom) meandering path.　Compare them with the observed paths in Fig. 13

注意すべきは，模算で見える定常流路が安定なものに限ることです．一方，可能な解析解には不安定流路も含まれます．私の解析解の分岐図 (Fig.14 下) では横軸を $\sqrt{\beta/U}$ に取っていますが，模算結果と比較のために左右を逆にしてみましょう (これで横軸が $\sqrt{U/\beta}$ になったと考えます)．この解析解に基づく振幅分布 (Fig. 15 下図) は，径数 U の敷値 (図の S という表示) において安定流路と不安定流路という二つの定常解が対発生 (消滅) を起こしていること，この閾値を境に左側で直進路が消え蛇行路しかないこと，を意味します．模算では安定解しか見えませんでした．解析解の分岐図を見れば，実現しない定常流路，即ち Fig. 15 下の破線で示される不安定流路，が隠れていることなどよく理解できるでしょう．

勿論，このような議論には当時盛んになりつつあった力学系の知識・知見が背景にあり黒潮蛇行研究の内容を深めることができました．

さて理論解と数値計算が出揃いました．駄目押しに回転水槽を用いた再現実験を考えました．解析解で設定した条件は極めて単純化したものです．それ

以前の研究者からみれば呆気ないほどの単純さでしたでしょう．以前には現実地形を模擬しようとする試みもあったようですが成功には至らなかったと聞いています．私の模型は本質というか力学が単純明快です．どういう条件があれば多重流路解が出るのかを考えやすいのです．こんな簡単なことでいいのかと言った方もいます．そうです．簡単なほど良いのです．惑星ベータは地形性ベータで代用し，亜熱帯循環の高圧部は湧き出しで代用します．陸岸・海底地形は盥の側壁と粘土細工で済ませます．

箱崎時代の応用力学研究所テニスコート横のプレファブ建屋に市販の洗濯盥を水槽とする回転台を作ってもらい実験を始めました．自分で機械を製作したり画像撮影する技術は備えていませんでした．丸林さん (技官) に水槽機械装置を，石橋さん (技官) に回転台での撮影装置を作ってもらいました．こういう意図でという，実験の着想のみをお話しました．

画像撮影もアルミ粉末法のみです．回転台に据え付けた写真機とビデオで撮影するという単純なものです．試行錯誤の後，ほぼ想定通りの直進蛇行流路の写真と動画 (8 mm フィルム) ができたときは嬉しかったですね (Fig. 16)．観測される流路の形 (Fig. 13) と比べてみて下さい．丸林さん，石橋さんという優れた技術職員の方の支援がなければ出来なかった回転水槽実験です．

ハンブルグであった会議で黒潮定常蛇行の講演をしました．多重流路解の理論と回転水槽実験の両方を話しました．持参した 8 mm の映写で盛り上がる筈でしたのに，不具合で 8 mm が動かなくなったのは失敗でした．しかしそのセッションが終わって休憩時間になった時，帰ろうとする私に話しかけ議論しようとする人が何人も寄ってきました．列ができていた，とでもいいましょうか．このようなことは最初で最後の経験でした．とにかく評価はしてもらえたようです，後ほど，この分野でも良い仕事をしている McCreary からあの講演は衝撃だったというような手紙をもらいましたしね．

○: 天の邪鬼が新しいことを考えるものだと思いました．自信にもなりました．

×: この二つの研究で，黒潮蛇行路問題の本質はまあ分かったという気になりました．詳細は今後の観測や模算にお任せと，その後の関心は別の主題に移っていきました．どうも同一主題を継続して深化させ広げていくということはしませんね．多くの研究者は継続・深化型だが，移り気型もいるそうです (Feynman でしたか)．私は後者です．あれこれやってみる方が楽しめるという気がします．

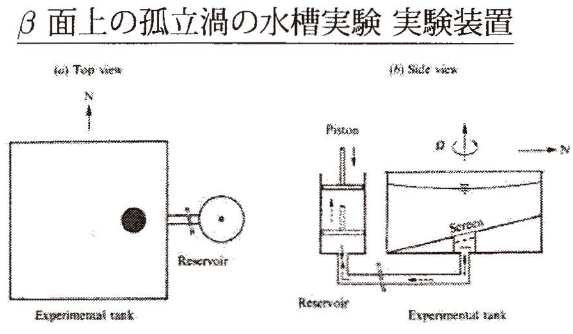


Fig. 17　Experiment of the behavior of an isolated eddy on a β-plane: (left) plan view and (right) side view of the setup.

黒潮流路に関するこの二つの研究は結構決定的な結果だと自分でも気に入っています．が，あまり引用されず若い方はご存じありません．不思議ですね．宣伝しない方ですし，同じ主題を繰り返しません．単発で終わらせるのでその一度の講演を聞き論文を読んだ人以外には伝わらないのでしょうか．明快な結果，当然と思われる (当然といっても後知恵なのですが) 結果は，忘れられるのが早いのかもしれません．今井先生の弾性論の講義が私にとってそうでした．

「人は単純で明瞭なことを喜ぶが直ぐに忘れてしまう．その一方で曖昧さの残る話の方が重要と思いがち」だそうです．同感します．別の本に「至って分かり易い話なのにみんな分からないという…，明るい道は暗いようにみえるものだ‥」とありました．これも同じでしょうか．ともかく，易しく言えることを難しく言うのはいただけませんね．

3) ベータ面上の孤立渦　模算と水槽実験

黒潮蛇行の水槽実験で気を良くし，ベータ面上での孤立渦の南北移動の問題にとりかかりました．振幅の小さい孤立渦はロスビー波の性質をもちその中心が西に伝播します．しかし振幅が大きいと，西方に伝播するだけでなく低圧渦は極側に，高圧渦は赤道側に幾分移動するという性質があります．この結果は既に知られていましたが，その解釈として奇妙な意見がありました．正味の渦度 (渦位) 生成が無いということ (正渦度の孤立渦を造る過程は遠方にこれを相殺すべき負の渦度を生む) が，非線形孤立渦の南北移動の仕組みになるというものです．GFD セミナーの折に出会った Firing などがそうだったようです．

私にはそう思えません．ただ，その説明はそれなり

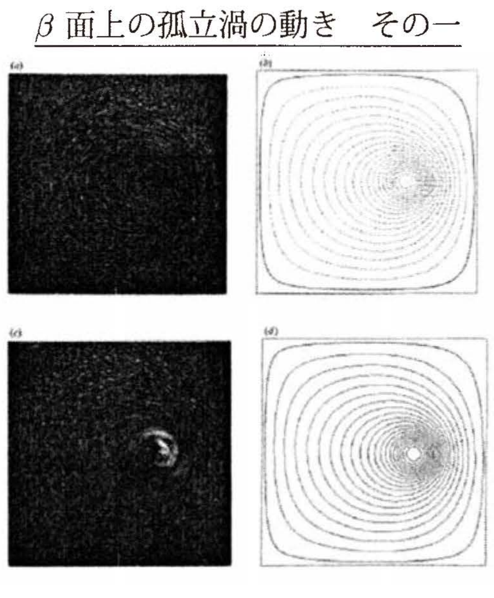


Fig. 18 Snapshots of the isolated eddy on a β-plane at an initial stage: (left) tank experiment, vs. (right) numerical simulation; (top) cyclonic initial eddy vs. (bottom) anticyclonic initial eddy .

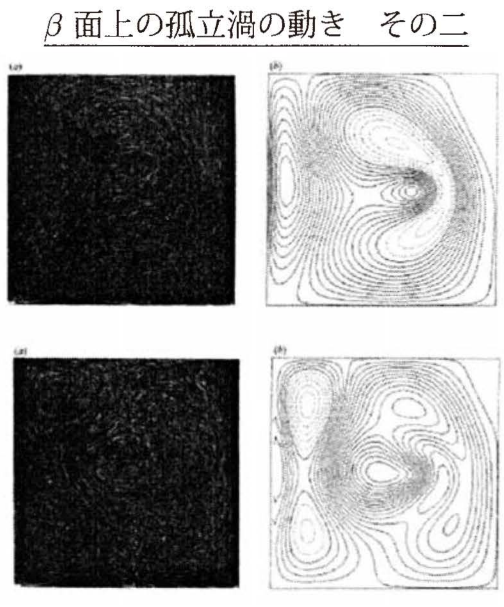


Fig. 19 Evolution of a linear, anticyclonic, and isolated eddy. : (top) at an earlier time and (b) at an later time. Since the eddy is almost linear, the eddy center moves almost westward.

に明確な言明なので妥当性を否定するのが割合に簡単です．正味の渦度 (渦位) 生成がある場合でも孤立渦の南北移動が生じることを示せばよいのです．要するに背理法ですね．物理も数学と同様，成り立たないことの証明は易しい．必ず成り立つことをいう方が難しいものです．統計にいう帰無仮説論法も一種の背理法です．「A でないということは，あり得ない (ありそうにない)．従って A である (あろう)」という理屈で，括弧の前が通常の背理法，括弧内が統計論の帰無仮説論法になります．

というわけで，正味の渦度生成をもった孤立渦を初期に生成する水槽実験 (Fig. 17) と，その模算をしました．水槽実験の方法は黒潮蛇行のときとほぼ同じです，盥で済ませず立派な矩形水槽になりました．初期に孤立渦を作り，その渦運動をアルミ粉で見ます．同時に対応する順圧準地衡の模算を行います．結果は Figs. 18-20 のとおりです．随分粗っぽい比較ですが，線形に近い場合は西に移動し (Fig. 19)，非線形になると高圧渦と低圧渦はそれぞれ赤道側，極側への移動が顕著になります (Fig. 20)．初期状態で正味の渦度があるにも関わらずです．求めていた答えが出ました．

○: 準地衡数値模型の結果と回転水槽実験の撮影写真は良く合っていて感動ものでした．回転水槽実験で見たものは数値上の幻ではありません．本当の流れという確かな実感が得られます．反面，設定を細かく替えるのが難しく大変です．回転水槽実験では，理解したいことだけを見極め，本質だけを抽出することが大事です．

なお，北太平洋で発生した台風は当初北西に向かい日本付近で向きを北東に転じます．大気の風系に乗って動くと説明するのが普通でしょう．が，風系がなくても，台風のような低圧渦は北西に移動するものです．ここで述べた非線形孤立渦の性質があるからです．

ところで，次のように説明したものを読んだことがあります．風系のない時の話です．「一様に回転している低圧渦 (反時計回り渦) に働くコリオリ力の強さを考えよう．高緯度側で極側に低緯度側で赤道側に働くコリオリ力の大きさに差が出る．ベータ効果のためである．従って正味の力が極向きになり孤立低圧渦は極側に動く」というものです．この説明は正しいでしょうか．

4) 孤立渦同士の相互作用，孤立渦に及ぼす壁の影響

先を急ぎます．数値実験です．二つの渦の間の相互作用や渦に及ぼす壁面の影響はいろんなところで顔を出します．その感覚が身に付きました．

5) 局所振動入力に対する二層海洋 (ベータ面) の応答

β 面上の孤立渦の動き その三

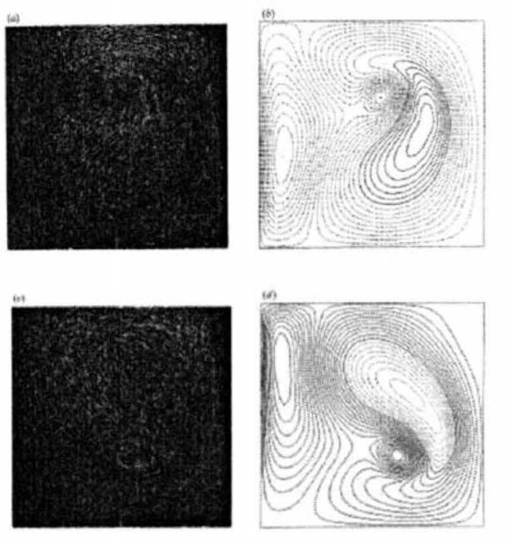


Fig. 20 The same as Fig.3.3 except at a later stage for nonlinear isolated eddies. The cyclonic eddy like a typhoon in the top panel has moved northwestward, while the anticyclonic one in the bottom panel has moved southwestwad.

黒潮が房総，東北沖に出たところでは黒潮本流に隣接して反流が現れます．これを再循環流 (recirculation; この訳語は正しいでしょうか) といいます．この問題に関連して，振動入力に対する応答として二次流を解析し，Holland and Rhines 流の渦成循環と殆ど同様の循環を作れることを示しました．ベータ効果・ロスビー波の性質が基礎になります．最近，水田さんがこの問題に集中して研究を進めており良い成果を出しています．

○×: 自分としては納得できました．しかし海洋研究所に移動する時期で四半世紀前のことです．水槽実験でだめ押しする計画もしていましたが完了できないうちに回転水槽実験のできる研究環境を離れました．そのうちにすっかり忘れてしまいました．

6) 風波の自己相似性と水面粗度

草場さんとの共同研究です．草場さんの学位論文の一部にもなりました．東北大学の鳥羽教授との論争がきっかけです．鳥羽教授の投稿論文を私が査読しました．観測データ整理の善し悪しは軽々に判断できませんが，推論の怪しさは分かります．納得できません，とこちらの名前を明かし，直かに著者と議論を交わしました．いい経験でした．

主題は海面粗度でした．海面粗度とは海面の抵抗係数と同値な量です．風が海面に渡す運動量を見積もる基本です．抵抗係数と言えば，測れば済みそうなことに聞こえます．しかし，ことは乱流ですし，波浪という可動境界面があるので簡単ではありません．

このときの議論で，風波の自己相似性を突き詰めます．自己相似性を前提にすれば，無次元粗雑が波風径数 (波齢の逆数) (および広くは風波の規模を表す径数の二つ) に依存しなければならないことを示しました．但しこの枠組みだけでは解決になりません．精密で信頼できる観測が決め手になります．とはいえ，私達の提出した枠組み (制約) 自体は今も妥当でしょう．海面粗度の波浪依存性はその後長きに亘り波浪研究界の一大主題であり続けました．実際，多数の論文が出ていますし本も出ています．但し決着はしていないと思います．

×: 枠組みは別として，海面粗度の波浪依存性が本当はどうなるのかについて不全感が残りました．今でも気持ちが悪いですね．乱流研究には根気が必要ですが，時間を掛けた割に到達度が低いと思います．乱流だけでも大変ですが，最大の難物は砕波でしょう．捉えどころが見つかりません．いつになったら光が射すのか分からないこれからの課題です．

○: 普通の乱流の難しさを学びました．的確な枠組みなしではデータの海で漂い彷徨ってしまいます．実際，多くの研究者が右往左往し，相反する主張・結果が同居し続けるという面白い研究領域ではあります．仮説が入り乱れていて，論理の怪しさは物理でも免れないということを再実感しました．

海面抵抗係数は古色蒼然たる問題です．哲学同様，古色蒼然たる問題は奥が深いと思います．よく知られたカルマン渦の問題も味があります．

*) この辺で一休みして集合写真を一枚見ましょう，WHOI での GFD 夏季セミナーで撮った写真です (Fig. 21)．著名な研究者の姿も見えます．

最前列で向かって右から三番目が講義をした Landahl (乱流) です．その左隣に傾圧不安定論で有名な Charney が坐っています．このとき既に余命いくばくという状態と聞きましたが，皆さんに大事にされていました．Charney の後ろの年配の女性がセミナーの切り盛りをしてくれていまして大変お世話になりました．その右隣の大柄なおじさんが Veronis，左隣のやや若いのが McWilliams です．最後列の右から二番目が Rhines，その左へ順に Whitehead，私，Rooth，四人おいて Spiegel (天文)，Bretherton と並んでいます．

WHOI GFD summer seminar にて

Fig. 21 Participating in WHOI GFD summer seminar, Woods Hole, Massachusetts.

この日に来ていた研究者と学生 (12 人) しか写っていません．ここには写っていませんが，この時のセミナーで Chraichnan (乱流)，Phillips, Stommel, Salmon らの顔を見ました．Phillips にはバイスペクトルに関する論文原稿の英文をみてもらいました．Stommel には奥さん (日本の草履を履いていました) とご一緒に昼飯をご馳走になりました．Kouzou (吉田耕造先生のこと) の学生だからと，もてなしてくれたわけです．余慶ですね．良い思い出です．

*) 話が飛びます．輪読会形式の週一回のセミナーのことです．その分野の基礎・論理・推論をじっくり学ぶ良い機会でした．

応用力学研究所ではセミナー参加者にも恵まれていました．参加者は時々に変わりましたが，ずっと続いた主要メンバは竹松先生 (海洋流体)，及川さん (流体力学とくに非線形波動)，船越さん (流体力学，現在京都大学) と私でした．研究所のテニス仲間でもありました．輪読題材で記憶にあるのは

・関数解析 (リュステルニク=ソボレフ; 訳本)
・連続群論 (ポントリャーギン; 訳本)
・力学系 (グッケンハイマー=ホームズ)

です．中年の時期，つまり，海洋研究所時代と応用力学研究所に戻ってからは学問以外に時間をとられセミナーの余裕がありませんでした．定年間近の時期に再開しました．こちらは研究室内のもので吉川さん (准教授) とその時々の院生が参加してくれました．この時期では院生教育という意味が強いですね．最初から最後まで読み終えたものには

・海洋熱塩循環 (van Aken)
・外洋の波，沿岸域の波 (Holthujisen)

があります．

○: 体系的な本の輪読会は仲間がいないと続けられません．とくに前半の題材はどれも骨のある内容で毎週やっても一年で終わりません．ともかくも読みとおしました．証明を要するものが多くて内容をこなすのに相当の時間を費やしますが相応の収穫はありました．例えば関数解析と力学系は自分の研究に生きました．連続群論の方は読んだというだけですが，目に見えない抽象的な対象を論理で扱う力を養うにはとても良い本でした．こういうものは若い時期に習得しなければどうにもなりません．抑も中年以降はエネルギーが続きません．集中する時間も足りません，やっていて良かったと思います．

この辺までの体験談が，これから学位を取ろうかという若い皆さんのご参考になるかもしれませんね．

3.4　深層循環・大循環の時期

(東京大学海洋研究所，年齢 39-42)

研究とテニスとちょっぴりのギターに明け暮れる日々が終わります．遅ればせながら私も世帯をもち娘が生まれました．大循環や海流に研究の重点を移しつつあった頃です．縁あって東大海洋研究所海洋物理部門に移りました．海洋研究所には海洋大循環，とくに深層循環，の研究を先導してきた歴史があります．また東大理学部では杉ノ原さんが深層循環の模算を始めていました．かくして，研究面では海洋大循環，とくに深層循環の時期になりました．なお，このときの海洋物理部門の教員構成は平教授，増田助教授，深沢助手，川辺助手でした．完全講座です．今から見ると贅沢ですね．

世相も転換期に入ります．中野の上高田住宅に引越してすぐ昭和が平成に変わりました．西新宿に東京都庁の建物が高くなっていく様子が中野にあった海洋研究所の屋上から良く見えました．一方，発展し続けているかに見えた日本経済のバブルが弾けようとしていました．平成とは「失われた?十年」と呼ばれる年月の代名詞になるかもしれません．

戻れない覚悟で東京に出ました．が，予想は外れます．海洋研究所時代はあっという間です．僅か二年ちょっとで九州大学に戻りました．短い期間でしたね．もっとも，私生活では海洋研究所時代前後が激動期でした．結婚，子供誕生，転勤，引越，家の購入など．長い独身生活の付けがきて事が集中した

のです．子育てには男親の体力も要りますしね．早いうちに身を固めておくに超したことはありません，いい伴侶が見つかればですが．

1) 拡散型換算重力模型に基づく深層循環の力学

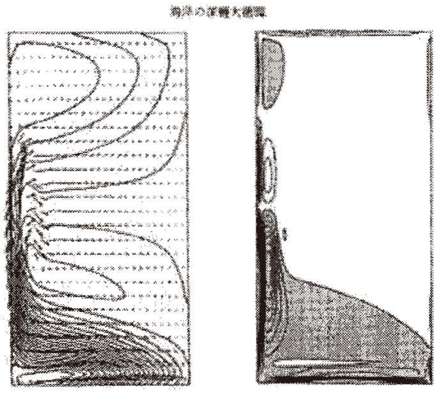
深層循環の基本概念は 1950 年代に出ていました (Stommel and Arons)．その力学を論じ得るような三次元大循環模算の始まったのはこの頃でしょう．既に出ていた Holland や杉ノ原さんの模算結果を見ると深層の内部領域ではどこも湧昇になっています．これは Stommel の言うとおりです．しかし深層の西岸近くで湧昇・沈降の奇妙な分布が見られます．でたらめではありません．ある規則に従っています．Fig. 22 は私たちの拡散型換算重力模型で計算した例ですが，三次元大循環模型の結果と同じです．極向き (赤道向き) の西岸境界層で沈降 (湧昇)，その沖側に湧昇 (沈降) という具合です．境界層の幅が極側ほど広い様子も見えます．赤道近くの境界層内で波打つ南北流が高緯度では消えています．いずれも表層循環にはないものです．大循環模算結果には以前からいつも現れていた顕著な特徴です．が，数値計算上の無意味なゴミとでも見なされていたのでしょうか．私の知る限り，言及する人すらいませんでした．この境界層構造はどうやって生じるのでしょうか．

この疑問に応えるべく拡散型換算重力模型を考えました．換算重力模型は既にありきたりでした．深層循環で重要になる密度の鉛直・拡散を考慮するところが味噌です．これは (深層のみを扱う) 二次元模型ですが，三次元海洋大循環模型の様相を的確に再現することが分かります．

詳細は略します．奇妙で規則性のある境界層が生じる理屈を一言で言えば「拡散性収縮・発散」の働きにあります．この理屈は高緯度ほど拡散の効きが大きいことも示唆します．要するに，西岸だけでなく東岸，北岸でも深層境界層の様子は密度の鉛直・水平拡散に依存するのです．

こうして密度の鉛直・水平拡散が効いて，順圧態循環とは性質の異なる境界層が現れることを明らかにしました．海底地形がある場合の深層循環に拡散型換算重力模型を適用すると様々な状況につき極めて良い描像を与えることも分かります (Figs. 23, 29)．また拡散型換算重力模型の研究は「拡散性伸縮・発散」という汎用性のある概念につながりました．驚くべきことですが，拡散性伸縮は傾圧不安定が平均流形成で果たす効果といったことにも関係します．一般化すると適用範囲が広がりますね．

深層循環の湧昇分布　拡散型換算重力模型



西岸境界層の奇妙な湧昇・沈降

その仕組みは

Fig. 22 Deep circulation based on our diffusive reduced-gravity model: (left) contours of pressure and current expressed by arrows and (right) contours of vertical velocity, where negative values (sinking) are shaded. What is the mechanism of a series of upwelling and sinking in the western boundary layers of the thermohaline circulation?

なお，拡散型換算重力模型に替えて拡散型準地衡模型を用いると表層を含む線形定常大循環の空間構造を包括的に論じることができます．但し赤道域は除きます，準地衡ですから．捕捉しますと，鉛直構造を見るには鉛直態展開を使うか，三次元をそのまま論じます．

こういった一連の深層循環論文は，当時院生だった上原さん，水田さんとの共同研究で生まれました．此の頃までは，表層循環と深層循環はばらばらに見えていました．この研究を境にして表層から深層までの全体像が，単純な抽象的描像に過ぎませんが，おぼろげに見え始めた感があります．実りがありました．

ところで深層境界層研究過程につき，一つ疑問に思うことがあります．表層循環に Sverdrup 平衡という概念があります．渦度方程式で β 項と渦度強制外力項 (あるいは伸縮項) の釣り合いを表します．西岸境界層を除く領域 (散逸項の効きが小さい領域で内部領域と呼ぶ) で成り立つことが知られています．つまり内部領域における基本平衡は既に Sverdrup が提出していました．Stommel は表層循環論において西岸境界層を β 効果と結び付けて提起しその働きと構造を論じた人なのです．輝かしい業績でした．その

海山、海谷の上の深層循環　拡散型換算重力模型

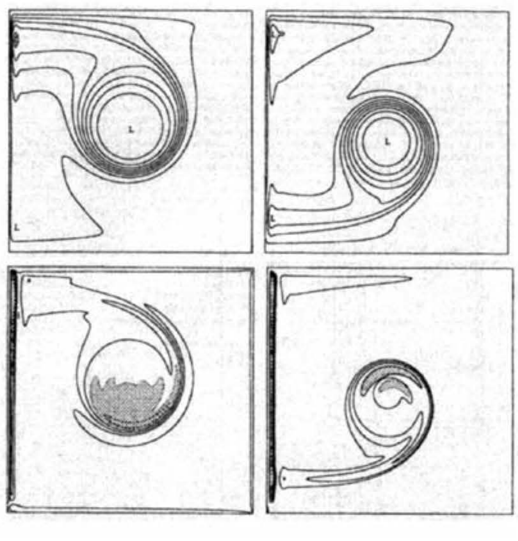


Fig. 23 Deep circulation over large-scale bottom topography based on our diffusive reduced-gravity model: (left) a sea mount and (right) a depression: (top) pressure and (bottom) vertical velocity. Note that the pressure is low either over a sea mount or a depression.

Stommel が深層循環標の標準模型も提出しています．内部領域では，渦度につき β 項と水平収束 (渦柱伸縮) 項が釣り合うというものです．しかし深層循環研究で Stommel が果たしたのは表層循環で Sverdrup が果たした役割にとどまっています．図式で示せば

表層循環 :Sverdrup (内部領域)
vs. Stommel (西岸境界層)
深層循環 : Stommel (内部領域)
vs. Masuda (各種境界層)

となります．西岸境界層の存在を要請はしていますが，その構造にまでは踏み込んでいません．それを Stommel が済ませていればここで述べた私達の研究は必要なかったでしょう．境界層の解析を素通りしたのはなぜでしょうか．

乱流粘性・拡散係数というものの胡散臭さを良く知っていたからでは，こう私は勝手に想像しています．それはそれで立派な見識と思いますが，本当のところはどうだったのでしょう．あの世で Stommel 御本人に尋ねてみたいですね．

2) ロスビー基準振動の完全性定理と展開定理

深層循環では議論しあう相手に事欠きませんでした．この時期のもう一つの研究主題には，議論する相手が全くいませんでした．一人で考えていたものです．ロスビー基準振動の完全性という主題です．

疑問は学部時代に遡ります．次の問題から始めましょう．例えば固定した枠に張り付けた弾性膜の振動運動は，膜の定在波，即ち膜の基準振動の線形和でいくらでも近似できます．従って，線形論の範囲では，どんな外力に対する膜の応答も基準振動の和として簡単に表せます．但し粘性，拡散といった散逸過程は無視しての話です．このうまい話は，膜の基準振動が完全直交系を成すおかげです．

さて本題となる海洋の問題に移ります．ベータ面中緯度の閉じた海盆内の準地衡運動を考えましょう，亜熱帯循環にしろ何にしろ大中規模運動としてよければまずは線形で記述できるでしょう．そう仮定してもよい．その場合，海盆にはロスビー基準振動が付随します．このとき全ての流れは，ロスビー基準振動の線形和で任意に近似できるでしょうか．即ち，ロスビー基準振動全体は完全直交系を成すかという問題です．完全直交系であれば，外力に対する時間応答問題の解など形式的に簡単に求められるはずです．

自転系でなければ大抵 Sturm-Liouville 型の固有値固有関数問題に帰着します．Sturm-Liouville 型ならその基準振動系は完全直交系を成します．古典的でよく知られてる話です．ところが，ロスビー基準振動は Sturm-Liouville 系になりません．どうなっているのでしょう．この疑問は私の胸の奥でずっと続いていました．

全く手がかりがありません．ロスビー基準振動系の直交関係をどう定義すればよいかも分かっていませんでした．実験して事例を積み重ねていって何とかなるという種類の問題ではありませんし．

ここで前に述べたセミナーが生きます．関数解析の基礎を学んだおかげで関数空間を抽象的に考えられるようになりました．成否は度外視しともかく自分の勉強にはなるだろうと，とりかかりました．本業とは別進行です．時折りこの問題について考えることを繰り返しました．道草遊びの感覚です．

最初は計算に頼る考え方でした．一次元に帰着できる簡単なものから始めました．そのうちに少しずつ関数空間をそれらしく扱えるようになってきました．力づくの方法には一般性がなく直ぐに行き詰まることも分かってきました．

紆余曲折はともかくとして最後は，ソボレフ空間において最大化列の収束を使う一般性のある方法に

辿りつきました．こうして，二次元の任意形状(それなりの滑らかさは必要ですが)をした海盆について成り立つ完全性定理/展開定理の導出と証明ができました．その結果の式表現を付録に載せています．説明すると面倒ですが明解な意味を持ちます．この論文をまとめたことで，一人で抱えてきた長年の疑問に一応のけりをつけました．未だ分からないことは残っていますが，それは若手の皆さんのこれからの研究を俟ちましょう．

○: この主題について書いた二つの論文(それ以前に書いた物を包括していますのでそれだけで充分です)は，薦められて，米数学会の雑誌に出しました．その折の査読報告には，著者は意図したとおりの結果を達成した，"The author should be commended for this work ...." といったことまで書いてありました．賞賛に近い好意的なものでこういう書き方もあるのかと思いました．海洋物理業界の査読報告ではそっけないものが多かったので，くすぐったかったですね．専門外であろう仕事をした海洋物理研究者に対するお愛想だったのかもしれません．嬉しかったのは，私の抱えていた問題意識が数学者にはすんなり通じるらしいと分かったことでした．同業者にはさっぱりでしたけれども．

×: その査読報告には(内容は文句なしだったようですが) style が数学式でないという指摘がありました．書式習慣の違いもあるでしょうし物理が入り過ぎるのかもしれません．けれども専門ではないので仕方ありませんよね．先行研究を適切に引用していないという指摘もありました．数学界の人ならご存知かもしれませんが海洋物理の研究者が知る筈はありません．逆に，先行研究の知識が殆どなくても自分一人で考えることはできた，という自信になりました(大抵のことは自分の気分が良くなるように取ります．楽しく生きるこつです)．

×○: 今思えば，この時期はまだ集中力があったようです．基準振動に関係したある命題に思い至り証明を得ました．いずれ整理して論文にと思っているうちに忘れました．海洋研究所から応用力学研究所に戻るのにかまけ，その後の学内政治にかまけているうちにです．ずっと経ち何かのきっかけで，あんなことがあったと思いだしました．が，具体的な事が何も出てきません．何のことだったかすら忘れてしまいました．明明白白の所まで進んで忘れる筈のないことまで忘れてしまう．愕然としました．この自覚以後，少しでも考察したこと，自分なりにまとめた知識体系(断片のつなぎ合わせ)を文書(もっぱらTeX)に記録しておくようになりました．公表するに足るところまで到達しなかったことも途中までの思考・試行を記録する習慣が出来たような気がします．学問研究は先人の肩に乗って進むと言います．であれば，自分の造った足台にも乗らないてはありません．お薦めします．

3.5 学内行政(政治)の時期

(九州大学応用力学研究所，年齢42-57)

九大総理工研究科に大気海洋システム学専攻ができ，応用力学研究所の研究員構成も変わり，応用力学研究所に戻ることができました．光易先生は定年退職される直前でした．

この時期は自分では好まない学内政治の時期に当たります．研究所の改組やら何やらで動ける適当な人も少なかったのでお鉢が回ってきました．せざるを得ません(こういう時期もあるでしょう)．貴重な時間と気力がそちらに吸い取られました．

×: 事業研究に直結すること以外，自分のやりたい学問研究が難しくなりました．無論，中年になり気力・集中力が続かなくなったこともあります．着想と手順の大筋だけ話して，大学院生にやってもらうことが増えました．それでも結構面白い結果が出ていると思います．ところで，面白く重要な主題ほど温めておく癖が私にはあります．後でじっくり整理しようと思うからです．ところが自分でやる時間はありませんでしたので，温めているうち，孵化する前に，次の課題に取りかかることが多くなりました．今思ってもあのときの時間は勿体ないですね．

此の頃から皆さんおそらくご存知の事が増えてきます．私自身，学問研究に集中できませず，踏み込み不足，駆け足気味でした．また，主題がやや偏し，専門化したもの技術的なことが増えます．体験談としては面白みが減りますでしょうね．というより，今日の話の時間がなくなってきましたし，集中力が途切れてきました．皆さんもおくたびれでしょう．少し飛ばします．えい，いっそ項目の羅列程度にしましょう．

*) 相次ぐ研究所・大学院の改組と事業:
力学シミュレーション研究センターの設立から
東アジア海洋大気海洋環境研究センターへ
とくに，対馬海峡監視海洋レーダー事業
(立ちあげから維持管理まで)
事業Ⅰ: 海洋レーダー(Fig. 24)は継続中
事業Ⅱ:海洋観測塔(Fig. 25)は撤去済み

海洋レーダー　対馬

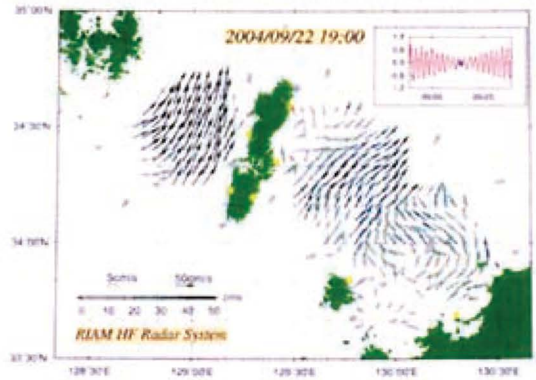


Fig. 24 Projec of DSRC I: (top) a system of ocean HF radar deployed at Tsushima, Iki, and Shikanoshima to monitor the Tsushima Straits, and (bottom) a snapshot map of the surface current of the Tsushima Straits measured by that radar system

×: 政治はある程度まで達成しないと無意味.
　途中で抜けるのが難しい.
　殆どが無に帰す疲労感・徒労感.
　無闇に時間がかかる. 空疎で不毛.
　尤も, 刻限がくれば大概は片付く.
　(研究は自分で達成しない限り片付かない)

○: 何でも (好きでない, 慣れないことも)
　やろうと思えばできるものだという自信
　(多くの方のお世話になり助けられながら)
　電波免許, 総務省・地権者・自治体交渉
　施設設備・維持費, センター棟建設‥

○: 学外へ世界が広がった (研究室の奮闘は勿論).
　お世話になりました, 感謝.
　藤井さん (現琉球大教授), 井先生, 田村さん,
　草場さん, 吉川さん, 丸林さん, 石橋さん
　油布さん, 池末さん.

海洋観測塔　津屋崎沖

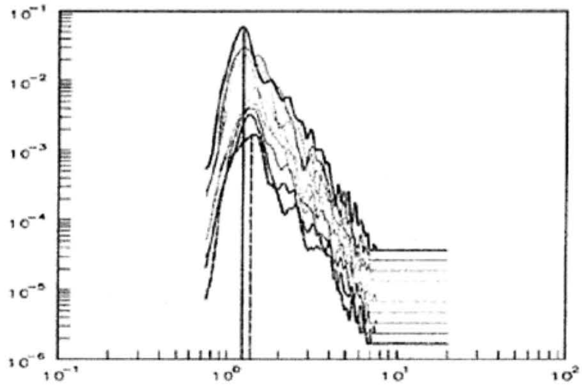


Fig. 25 Projec of DSRC II: (top) the sea observation tower off Tsuyazaki, Fukuoka, which monitors the wind and wind-waves over the east Tsushima Strait and (bottom) examples of wind-wave spectra measured at the Tsuyazaki sea observation tower.

1) 海洋レーダーに関する技術開発 (解析技術)

○: 特別設備費獲得.
　簡単な調和補間が有効.
　またまたラプラシアンが.

×: 事業として縛られる.
　当初は維持費の目処もなかった.

2) 海面粗度再論

○: 問題意識と設定枠組みが長期有効
　場当たりでなく深く考えたものだったから?

×: その分難しい. 解決に至らない. 長持ち?
　海上実験の時間, 自分の気力が続かない.

3) β 面準地衡乱流に対する海底地形の効果

○: 表層強化や西方伝播に対する影響など
　発展性のある成果を出した.

二次元乱流の時間発展

渦の規模が次第に拡大する　働勢糾合

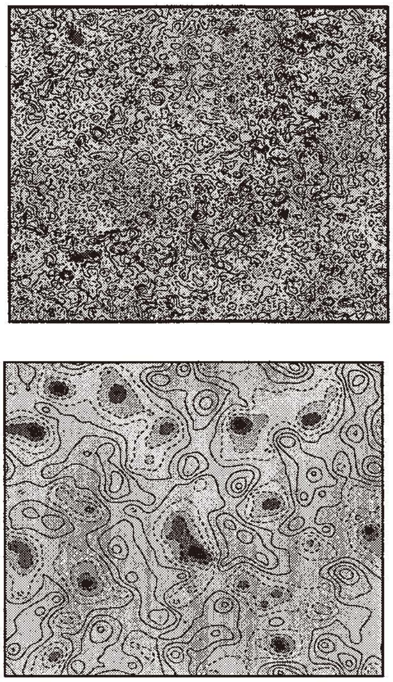


Fig. 26　A well-known property of 2D turbulence, i.e., the eddies of a small size at the initial stage as in the top panel are enlarged in size as in the bottom panel.

×: 院生が卒業すると放置.

4) 水平発散のある準地衡二次元乱流　(Figs. 26-27)

○: 水平発散を許しても理解できる (f 面)

発展動力学の定式化はうまい (我ながら)

×: 面白い問題，大きな問題ほど仕舞っておく.

直ぐには表に出さない (いずれきちんとと)

5) 深層循環と海底地形効果

ヒプソメトリー?と摂動論の比較

閉じた地衡線の内部の深層循環

三次元構造　とくに境界層の議論

○: 大規模斜面の効果 (3D 模算) を理論で解明

(Figs. 28-29; 3D 模算と 2D 理論)

深層循環三次元分布に関する理解を得た

概念模型 (拡散型換算重力模型) の有効性

×: 学問以外で忙しくなる時期で深く詰めなかった

6) 島法則: 深層循環から始めたが表層にも使える.

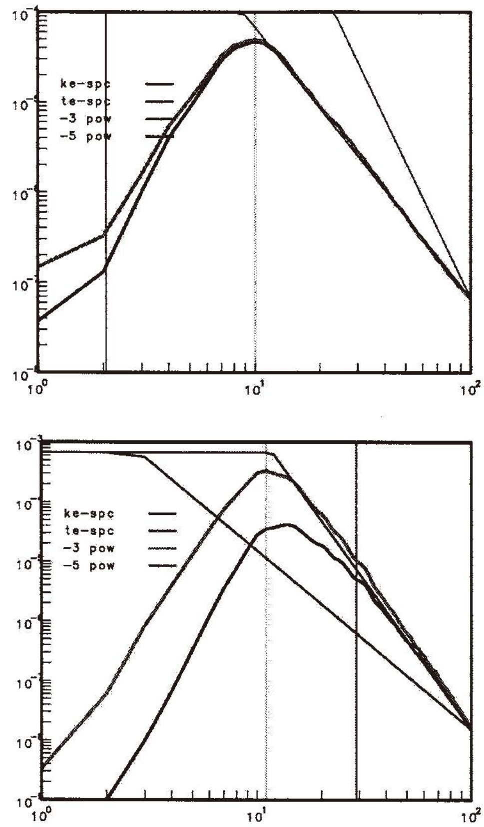
○: 局所情報に還元する定式化 (究極の形?)

Pedlosky にも見せた．彼は賛同.

(彼には深層循環島法則の論文があった)

後に多島海風成循環問題に応用し有効.

波数スペクトル形の違い　ー水平発散の効果



水平発散が小さい場合 (左) と大きい場合 (右)

Fig. 27　Effect of horizontal divergence F: 1D wavenumber spectra with a small F (top) and a large F (bottom).

3.6　最近

(応用力学研究所 年齢 57-64)

行政・学務などはするだけのことをしたつもりです．その後余計なことには関わらないようつとめました．そうさせてもらいました．そのせいか選択した主題に納得がいくようになってきます．加齢で記憶力・集中力は目に見えて衰えますが，反面年寄りの智慧は (目に見えず) 増すようです．判断力・総合力でしょうかね．加齢も棄てたものではありません．あれこれ考えては楽しんでいます．第 5.1 節に挙げた，海洋学の基礎的諸問題や海洋の基礎の項も併せてご覧下さい．その多くはこの時期の仕事です.

1) 秩序と乱流: ラインズ効果と海神効果

* ロスビー波の共鳴条件　一般化

鉛直態内・態間，三波・四波

* 東西流の縞模様を生む仕組みとは

2) 波浪統計　疑問: 波高統計で Rayleigh 分布?

海底斜面がある場合の深層循環

3D 大循環模算結果

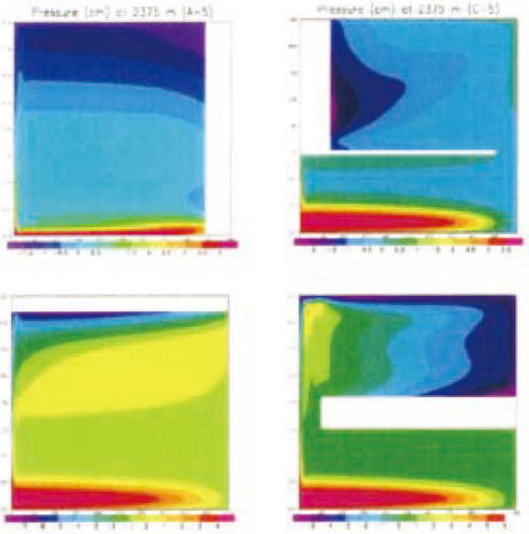


Fig. 28 Pressure distribution of deep thermohaline circulation in a basin with a uniform bottom slope based on 3D OGCM simulation made by Dr. Ishizaki: (upper left) eastward shoaling, (upper right) westward shoaling, (lower left) poleward shoaling and (lower right) equatorward shoaling, in the northern hemisphere.

3) 気候と長周期変動
　太平洋十年規模振動、氷期・間氷期振動

4) 海面付近の乱流　(空気と水)
　海面境界過程とくに粗度と砕波の不思議
　とくに鉛直方向の運動量輸送配分

5) 海洋における傾圧不安定の働き,
　傾圧捻りが傾圧不安定の仕組みか?
　拡散性伸縮と熱塩循環への応用

6) 高波数平衡スペクトルを維持する仕組み.
　深水域で ω^{-4} を非線形伝達から説明
　浅水域で ω^{-3} を非線形伝達から説明

7) 大気に対する傾圧海洋の応答
　地衡流調節，台風に対する応答
　湧昇応答，赤道波動・赤道域の線形力学

4. 考楽　「目から鱗の海洋学」‥ の一端

以前ほど普通の研究に関心がありません．一過性の研究論文より寧ろ，移ろわない普遍の真理とか学問の体系に惹かれます．人生の残り時間が僅かになってくるとそうなるものなのでしょうか.

斜面上の深層循環

2D 拡散型換算重力模型

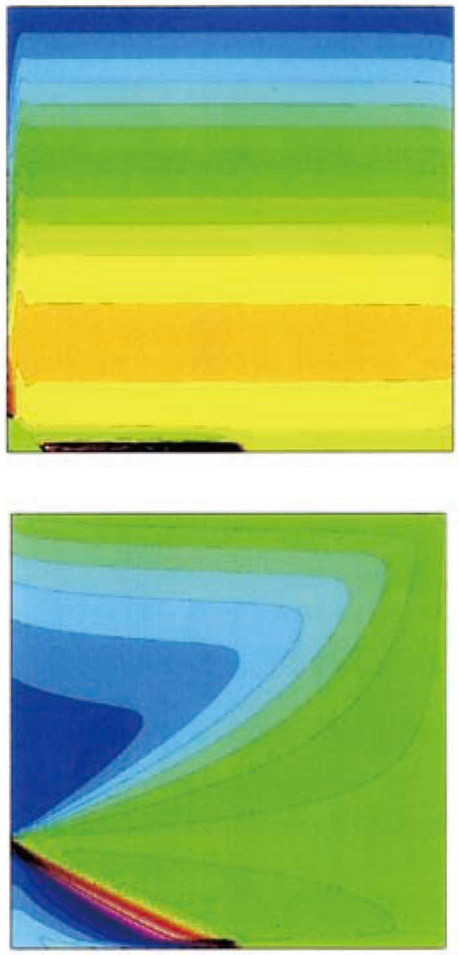


Fig. 29 The same as Fig. except that the result is based on our diffusive reduced-gravity model: (top) eastward shoaling slope and (bottom) westward shoaling slope.

教科書や総説の類を書いてみたい気もしています．しかし，ありきたりの本が一冊増えるだけではつまりません．自己満足でお終いでしょう．この考え方を抑えれば，難しそうなことも自然に見えてくる，そういうような (海洋学から取った) 話題を書きものにして残したいと思います．無精者を棚に上げ，どうなるかは別として，意欲だけでもですね．

実際，これまで海洋物理を学び研究してきて，考えたことがいろいろあります．従来の考え方 (通説) よりこちらが良いというようなことをですね．また，一見，無関係そうな事象の間に意外な共通性があり面白い発見があります．ほかで見聞きする機会が少ないと思われるものです．研究者仲間の世間話でこ

海洋レーダーの観測する流速ベクトル

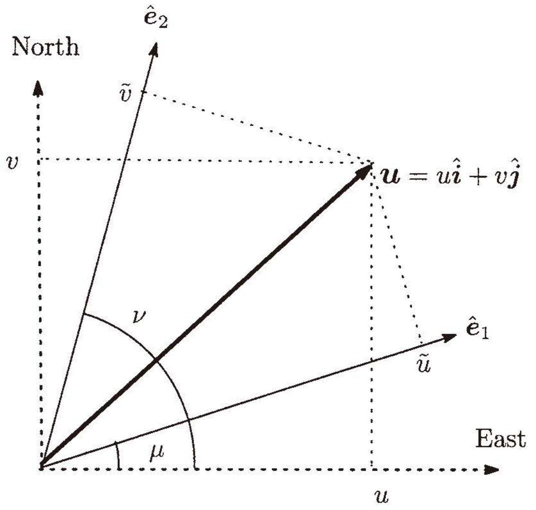


Fig. 30 Radar observes the radial component of the current vector. so that at least two such components are necessary to determine the current vector. In the figure two components $\tilde{u} = \boldsymbol{u} \cdot \hat{\boldsymbol{e}}_1$ and $\tilde{v} = \boldsymbol{u} \cdot \hat{\boldsymbol{e}}_2$ are measured by two radars in the direction of $\hat{\boldsymbol{e}}_1$ and $\hat{\boldsymbol{e}}_2$, respectively. Those components are used to synthesize the current vector , as is described in the text.

のようなことを話しましたら，ある人が，その本の題は「目から鱗の海洋学」がいいと言いました．

ところで，本最終講義に「考楽不知飽」と副題を付けました．そこで「目から鱗の海洋学」の一端，海洋学と数理の関わりの一端を，宜しければ皆様にも楽しんで頂こうという趣旨の話を用意しました．それがこの節です．前の若手会講演だと「海洋学と数学」に相応します．

ところが説明する時間も気力もありません．お聴きの皆さまの「考楽」する気力も尽きかけているでしょう．ここでは，三題噺というか五題噺というか，その項目を並べ図と簡単な説明を付けましょう．皆様に考えて頂く材料ということです．あとでお時間のある時ご覧頂き楽しんで頂けれは幸いです．

1. 海洋レーダーによる海流測定
2. T-S 図で三水塊混合比を決める
3. * GFDVN ベクトル記法　(+ 複素表現)
4. Lagrange 公式 (ベクトル三重積の公式)
5. 連立一次方程式の解法:
   クラメルの公式の意味

T-S 図で三水塊混合比を決める

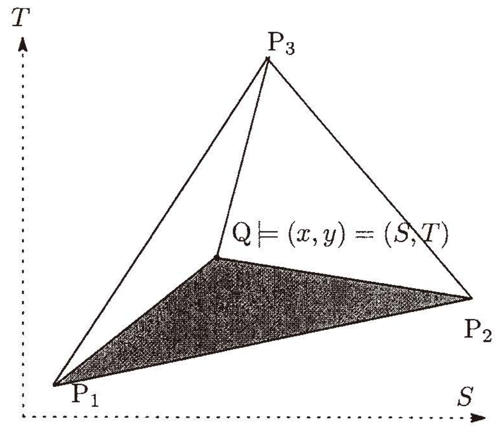


Fig. 31 Temperature-Salinity diagram (T-S diagram) and Lagrange's formula. Three water types designated by points P_j $(1 \leq j \leq 3)$ is mixed to produce an intermediate water type designated by point Q. This geometry of T-S diagram is related with a symmetric form of Lagrnage's formula.

うち 1, 2 は海洋の方しかご存じないでしょう．3 は私が自分用に使っている記号・記法です．地球流体力学では使い勝手が良く便利です．私にはもはや空気のようになっています．これを使うと 1,2,4,5 の関連が簡単に記述できます．説明は省きます．

4, 5 はどこにでもある話です．突き詰めれば線形代数の他愛ない問題です．しかし，抽象的な 4, 5 と海洋学で使う概念 1, 2 の関係と意味を更めて見出すのはきっと楽しいでしょう．但しそれなりに脳を働かさないと何も得られません．其の気のない方はどうぞ読み飛ばして下さい．

まず 1 から．地表に固定した海洋レーダーは HF 帯の電波を広範囲の沿岸域海面に放射し，海面から反射してくる電波を受信して表面海流 (水平流速) を測ります．但し視線方向成分のみです．従って水平流速ベクトルを求めるには少なくとも二基のレーダーを用いて，二方向の成分値を求める必要があります．さて，レーダーの視線方向単位ベクトル (既知) を $\hat{\boldsymbol{e}}_1$, $\hat{\boldsymbol{e}}_2$ とします．海流ベクトルを $\boldsymbol{u} = u\hat{\boldsymbol{i}} + v\hat{\boldsymbol{j}}$ と表しましょう．$\hat{\boldsymbol{i}}$, $\hat{\boldsymbol{j}}$ はそれぞれ東向き，北向きの単位ベクトルです．レーダー観測で $\tilde{u} \equiv \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{e}_1$, $\tilde{v} \equiv \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{e}_2$ という二つの数値を得ます．これから $\boldsymbol{u}$ 即ち (u, v) を求める手順が必要です (Fig. 30)．答えは

$$\boldsymbol{u} = \tilde{u}\boldsymbol{e}_{1\perp} + \tilde{v}\boldsymbol{e}_{2\perp}$$

とすればよいのです．但し $e_{1\perp} \equiv \neg e_2/(e_1 \times e_2)$, $e_{2\perp} \equiv \neg e_1/(e_2 \times e_1)$ で，$\neg$ は平面ベクトルを時計回りに直角だけ回転させる演算子を表します，また，$e_1 \times e_2$ は普通には外積ベクトルですが，ここでは平面ベクトル演算としてスカラーです．

次に 2 を説明します (Fig. 31)．海水の水質は温度 T と塩分 S で分かります．Fig. 31 が T-S 図と呼ばれるものです．P_j で表される (T, S) を持った三つの水塊がある比率で混合し，Q で表される (T, S) を持つ海水ができたとしましょう．その混合比は

$$p_1 : p_2 : p_3 := \triangle\,\mathrm{QP_2P_3} : \triangle\,\mathrm{QP_3P_1} : \triangle\,\mathrm{QP_1P_2}$$

になります．右辺は面積の比です．

4 はベクトル三重積の公式とも言います．次のものです．普通には三次元版を指します (わざわざ三次元版とも言いません)．二次元版 (増田版) はほかでは見ないでしょう．しかし三次元版と同等ですし，多分三次元版では理解できない (理解しにくい)，「公式の意味」が分かります．

$$\text{三次元版：}\quad {}^{\forall}\{\underline{\boldsymbol{a}}, \underline{\boldsymbol{b}}, \underline{\boldsymbol{c}}\} \subset \boldsymbol{R}^3,$$
$$\underline{\boldsymbol{a}} \times (\underline{\boldsymbol{b}} \times \underline{\boldsymbol{c}}) = (\underline{\boldsymbol{a}} \cdot \underline{\boldsymbol{c}})\underline{\boldsymbol{b}} - (\underline{\boldsymbol{a}} \cdot \underline{\boldsymbol{b}})\underline{\boldsymbol{c}}$$
$$\text{二次元版：}\ {}^{\forall}\{\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}\} \subset \boldsymbol{R}^2,$$
$$\begin{aligned} 0 &= (\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{c})\boldsymbol{b} - (\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b})\boldsymbol{c} - (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c})\neg\boldsymbol{a} \\ &\quad (\boldsymbol{a} \to \neg\boldsymbol{a}\ \text{として}) \\ &= (\neg\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{c})\boldsymbol{b} - (\neg\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b})\boldsymbol{c} - (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c})\neg\neg\boldsymbol{a} \\ &= (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{a})\boldsymbol{b} + (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{c})\boldsymbol{a} \\ &\quad (\text{二次元での外積はスカラー}) \end{aligned}$$

5 のクラメルの公式は次の物です．

設定 $\{\boldsymbol{x}, \boldsymbol{b}\} \cup \{\boldsymbol{a}_j\}_j \subset \boldsymbol{R}^n$： n 次列ベクトル全体
$A = (\boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{a}_2, \cdots, \boldsymbol{a}_n) \in (\boldsymbol{R}^n)^2$： (n, n) 次行列
$\det(A) \equiv$ “A の行列式” $\neq 0$　即ち
$\{\boldsymbol{a}_j\}_j$ は線形独立　とする．

◎　$\boldsymbol{b}$ を既知として　$A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}$　を満たす $\boldsymbol{x}$ を求めるには，

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{\det(\boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{a}_2, \cdots, \boldsymbol{a}_{i-1}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{a}_{i+1}, \cdots, \boldsymbol{a}_n)}{\det(\boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{a}_2, \cdots, \boldsymbol{a}_{i-1}, \boldsymbol{a}_i, \boldsymbol{a}_{i+1}, \cdots, \boldsymbol{a}_n)} \\ &= \frac{\det(\boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{a}_2, \cdots, \boldsymbol{a}_{i-1}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{a}_{i+1}, \cdots, \boldsymbol{a}_n)}{\det(A)} \end{aligned}$$

とすればよい．

但し　$\boldsymbol{x}$ の第 i 成分を x_i と書いた．

さて，三題噺の意味は分かったとして，どういう相互関連があるでしょうか．突き詰めれば線形代数の基本で他愛ない話です．宜しければご自分で考えて楽しんでみて下さい．なお，附録のスライドに，考樂 •• をメモしたものがあります．ご参考に．

5.　おわりに

5.1　研究を内容で分類しまとめると

第三節では研究生活を時間順に記述してきました．ここでは自分なりに内容で分類しまとめてみます．

1. 海洋波浪の研究
   (a) 水面重力波の非線形分散関数と二次スペクトル
   (b) 水面重力波間の非線形エネルギー伝達関数
   (c) 波浪バイスペクトル特性に関する研究
   (d) 海面粗度と波浪の自己相似性
2. ロスビー波，海流および大循環の研究
   (a) ロスビー波のエネルギー輸送と反射・透過
   (b) ロスビー基準振動に関する完全性定理・展開定理
   (c) 黒潮大蛇行の仕組み　数理模型と室内実験
   (d) 深層循環流の力学，拡散性伸縮．境界層，側壁・海底地形効果
   (e) 中規模渦の力学
3. 海洋乱流に関する研究
   (a) 海面粗度　考え方の枠組みと実験
   (b) 海面混合層の発展に及ぼす成層と自転の効果 (実験)
   (c) 回転系二重拡散対流
   (d) 二次元乱流，ベータ面乱流 (理論・数値実験) [水平発散の効果 (準平衡調節過程とベータ効果抑圧)]

そのほか，上の三枠に入れにくい事項を挙げましょう．記憶にある最近のものです (重複も)．

1. 海洋学の基礎的問題 (未発表)
   (a) 地衡流調節の一般的定式化　関数解析
   (b) ロスビー波の態内・態間 三波・四波共鳴の可能性とその計算法
   (c) 渦度発展の仕組み　渦度力の捻り

(d) プラントル=バチェラーの定理 (渦位一様化) の一般化・精密化

(e) 流体力学の剥離条件 (離岸条件)

(f) 傾圧不安定の仕組みと働き (輸送)

(g) 台風に対する上層海洋の応答，風応力に対する傾圧海洋の応答

(h) 高波数平衡スペクトルを維持する仕組み

ほかで聞けない面白い話題群

2. 海洋の基礎 (教科書用)

- GFDVN とその複素表現
  地球流体力学用のベクトル表記法
- 地衡流調節　地衡流空間と非地衡流空間
- 直交曲線座標の新しい表現
- 渦度力に基づく渦度発展の力学
- Prandtl-Batchelor の定理と最大原理
- 傾圧不安定の単純化した方程式
  (正準方程式)
- 鉛直態展開の定式化
- 傾圧海洋の風に対する応答の基本的仕組み
- 流れの剥離 (離岸)　新しい見方
- 波高分布　波浪統計再論
- 風波成長
  吹送距離則・吹送時間則の解析的統一表現

3. 海洋学ではないが関心があり考えてみたいもの

- 気候変動　氷期・間氷期振動、長周期変動
- 量子力学における観測の問題
- 本能の遺伝を司るもの
- 哲学・歴史 …
  (人類学・生物学が面白そう)
  (経済学　組み立てが疑わしい?)

自分の研究と人生を振り返り概観してみますと

たった，これだけか
しかし，今読んでも味があるかな

と思います．

時々の流行を追わず自分の好きなようにあれやこれやとやってきました．それが良かったようです．全く違いそうな分野間に意外な脈絡があり面白い発見をしました．こういう楽しみを味わうには，事象に通底・類似する数理・物理を見出す感性を養っておくことが大事でしょう.「出会いは実力」といいますから．今井先生に感謝ですね．また，まあ，楽天家です，しかも懲りない．一方，無精で継続していかないところが研究者として足りませんね．しかしその分あれこれ楽しめたのですから文句はありません.

広く深く楽しませてもらいました．概ね満足しています．これも皆様，世間様，先人・同僚・友人，家族のおかげと感謝しています.

さて，若い方の参考になりそうなことで年寄りの記憶を思いつくまま挙げてみます.

1. 海洋学には今までもいろいろ流行がありました．私が記憶している範囲で順不同に.

   (a) 地球流体，(b) 黒潮蛇行 (主に日本),
   (c) 中規模渦と係留観測，(d)ENSO,
   (e) 衛星高度計，(f) データ同化,
   (g) アルゴブイ,
   (h) 深層循環，(i) 温暖化，(j) 気候,
   (k) 北極振動等，(l) 長周期変動？
   (*) ソリトン，カタストロフィー,
   カオス，複雑系　(関連分野ですが)

   ※　新しい計測・解析手法が出てくるときが発展期．要するに論文が書きやすいから．慣れてくると陳腐化する.

2. 今後の海洋学で出てきそうな方向は

   長周期変動 (含気候)
   乱流 (非線形，含砕波)
   ※　実用　監視・予報 (工学・生物・水産)
   ※　若手と同様 年寄りを大事に

最近の動向はどうでしょうか．分野々々で突っついているが取り立てて言うほどのことはないという印象です．実学に近づき対象範囲が広がったためというのもあるでしょう．焦点がぼやけ分かりづらくなりました．物足りなく感じています．杞憂なら良いのですが.

5.2 終わりに

将来のある若い皆さんへ餞の言葉として．

1. 若いうちに鍛えておくこと，数物系は特にそう．積み重ねが大事な分野である．分からないことがあるとその先は霞む．いわば磨りガラスになってしまう．何枚も重なると全く見えなくなる．自分の頭で考え，判断する際の論理力がないと困る．間違うし，先に進めない．多岐亡羊と言うことになりかねない．

2. 表現は悪いが，ゴミのような研究もある (多いというべきか)．すぐ廃る流行より，ある程度時間を超えて (時間に耐えて) 残るような質の高いものを．

3. 生きていく手段としての研究 (政治?) もあれば，自分のための学問研究もある．選ぶのは自分．

   自分のやりたいことをやっていますか．やってて楽しいですか，やりがいを感じていますか．

4. 学問研究を志すならそれなりに取り組まないと (自戒を込めて)．要するに時間は短い．若いほど身に付く．先人の集積を我が物にし積み上げていくのは難しい．歴史ある分野ほどそうだろう．

5. 元気に楽しく．人生いろいろ．学問研究が全てではない．若い皆さんへの大きな期待を込めて．

5.3 ご挨拶

長いことお付き合いいただきましたが，時間がきました．お聴きの皆さんもでしょうが私の集中力も持ちません．ここらで終わりたいと思います．

最後に (締めに)，大学を退くに当たって寄稿した短い雑文をお見せします．今の心境のまとめというところですかね．前半は小松さん (東京大学大気海洋研究所)，後半は吉川さん (九州大学応用力学研究所) に音読をお願いします．小松さんは，九州大学総合理工学研究科大学院で私を指導教員にした最初の院生です．風波成分波間の非線形伝達につき優れた研究成果を上げられました．吉川さんは，海洋力学研究室 (私の属する研究室) の准教授です (本講演の後，現在は京都大学理学部)．海洋レーダーほか東アジア海洋大気環境研究センターの事業研究を一緒に進めてくれた仲間の一人で，その多大な献身・貢献に感謝しています．

『さようなら九州大学』

増田　章　(応用力学研究所　専門ー海洋物理学)

定年を迎え研究者気分のまま無給になる．昔，学生気分が抜けないまま有給になったのを想い出す．研究職につく見込みなど皆無の時代に運良く博士課程途中で本学応用力学研究所の職に就くことができた．久留米が郷里だし九大は御の字である．のんびりした時代，日本が経済発展し人口が増える時代だったおかげだろう．以来これといった大病もせずこの歳まで学問・研究を楽しんで生きてこられた．我がことながら目出度い．お世話になった方々と世間様に感謝する．

採用されたのは海洋波の研究で第一人者の光易恒先生の研究室である．光易先生には公私ともにお世話になり感謝している．爾来殆どを九大で過ごし海の学問・研究を好きなようにあれこれ楽しませて頂いた．

独身時代も長かったなあ．研究以外ではテニスに明け暮れ，連れ合いにも出会った．応用力学研究所の裏のたった一面のテニスコート，夏のかき氷と，箱崎時代は思い出が多い．若かったし楽しかった．学内外今のように世知辛くなく好きな研究に打ち込むことができた．研究者人生を友人・同僚・仲間と楽しんだ．世間話も研究も．波は勿論のこと，海の渦，海の流れ，などなど．

大学をめぐる環境も変わった．制度・組織の変更もいろいろ経験したが今想えば多くは虚しい．教養部廃止や大学院重点化など闇雲だった気がする．人のやることだから，まるっきり良い悪いはないだろう．多様な形でやってみればよいものを，出過ぎないよう遅れないよう併走したがる．「みんなで渡れば何とやら」を全国の大学でやった．これが日本人かなあとも思う．反省もなく同じ事を何度も繰り返しそうな気配である．自戒を込めてだが心したい．

最近は大学多難と言われる．とくにこたえるのは学生が減ることだろう．人口減の時代ゆえ若年人口が減るのは仕方無い．怪訝なのは，この事態が前もって分かっていたのに大学院重点化で学生定員数を増やしたことである．どうかしていた．質を言う前に数を揃えるのに大童という目に遭っている．

また品無くも金のことばかり言うようになったようだ．金のことを「おあし」ともいう．大学で大事にしてきた筈の「おつむ」と対極にあるものが遂にというかやはりというか一番大事になったということらしい．私たちが過ごした頃に比べるとどうも学問の香りが失せた気がする．これで溌剌とした若手が育つだろうか．抑も若人が研究者を目指すだろう

か．学問の進展には後進，若手が育つことが最も大事と思う．そのためには楽しんで学問研究をやっているところを若人に見せる，それが大学人にできる最善のことではないのだろうか．

定年を前に，成熟という言葉をより好ましく感じる歳になった．相応に執着が薄くなる．大抵のことは何をあくせくと思う．世の中しなきゃならないことをしないで悪くなるというより余計なことをして生き難くしている．実感するなあ．ひょっとしたらこれも加齢性妄想かもしれない．最後に月並みだが九州大学の発展を祈念すると言っておこう．派手に大きくなって欲しいわけではない．「上質を少々」世に送り出し残すことができれば十分である．では皆様息災で楽しい人生を．さようなら．

5.4　またまた 終わりに

さて，この歳まで四十年，海洋物理学の広い範囲の主題をあれやこれや研究してきました．成層流体の混合，熱塩対流，不規則非線形波浪，大気海洋相互作用，ロスビー波/固有振動と完全性定理，黒潮定常蛇行，海洋中規模渦 (孤立渦と渦群の統計)，海洋深層循環，気候変動，地球流体で不規則渦から組織だった流れが自発する仕組みといったものです．私にとってはどれも興味があり，魅了されてきました．これまで海の研究を楽しんでこられたことを感謝します．興味が散らばり過ぎて，特定分野で業績を積みあげるという型の研究者ではありません．しかし研究主題が広がっていることで得難い経験をしました．海洋物理学や地球流体学の見たところ全く異なる分野で，同一の仕組みが鍵となる役割を果たしていることを見出して，驚くとともに感動しました．楽しむことができました．

ところで，こうやって振り返ってみますと，実海洋のあり様に興味があったということではないようです．結果として実用とか予報に役立つことがあるとしても，進んでその方面の仕事をしようという気は薄い．寧ろ現象の背後にある仕組みやその仕組みを成り立たせる理屈の方に一層の関心があったような気がします．プラトン流イデア観でしょうか．同僚海洋研究者と話していて何か違和感を感じることが多かったのですが，その原因の一つはこの辺，性向・価値観の違い，にあったのかもしれません．

ともあれ皆さまに支えられ，海洋研究者として働き，生活し，定年を迎えられて幸せでした．これまで思索を楽しんできました．今後とも海洋に限らずいろいろ思索を楽しんでいきたいと思っています．研究であろうと執着する気はありませんが，研究や思索は死ぬまで尽きぬ喜びだろうと思います (犬も知性を働かすことを喜ぶと言っている人がいました．犬が喜んでいるとどうやって分かるのでしょうか．魚が嬉しそうに泳いでいるよ，人間の君にどうして分かるんだ，といった昔の対話もありましたね)．本日は，みなさま，有難うございました．

5.5　今度こそ本当に (言い訳気味の) 終わりに

九州大学応用力学研究所を退くにあたり，自分の海洋研究人生を振り返ってみました．一大学人のささやかな経験をお話しただけですが，将来の科学者たる学生や若手研究者の皆さんに何らかの刺激なり応援になればと思います．本稿は最終講義を基にしました，興に乗って話したことですので，話に濃淡・むらがあります．順序を整理していませんし重複もあります．雰囲気だけでも伝わりましたら幸いです．

なお，今回は講演もこの書き物も尻切れ蜻蛉です．前半で息切れし失速してしまいました．用意していた話を全て書きものに残す機会があれば，またその折に．きっと誤字以外に数式など間違いが残っているでしょう．その訂正も．

付　録

最終講義当日のスライドのうち主要なものは本文中に図版として入れました．ここには，話の筋書きをまとめておきます．ここのスライドだけでも前半の話は分かります．但し後半は箇条書きの形で本文に取り込みましたので筋書きを示すスライドは省きます．個別の話はつまみ食いでどうぞ．

また，短いがやや面倒な数式表現の類のスライドを適当に加筆・修正してここに残しています．

海の研究四十年　考楽不知飽

増田 章

I. はじめに
　「あれやこれやの研究人生」概要より

II. 海の研究と人生と　　時系列風に
　(海洋学会若手会での
　講演原稿に加筆) ‥

III. 考楽　「目から鱗の海洋学」　‥の一端

IV. おわりに
研究を内容で分類しまとめると
ご挨拶 「さようなら九州大学」より

I. はじめに

若手会での講演の概要から
内容 (私の研究と人生) の概観を
話を聞いて頂く方々？ 様々な方々
(自分に聞かせ自分と対話する癖あり)

概要: (若手会講演)
『あれやこれやの研究人生』

II. 海の研究と人生と

研究を時期で区分し人生と重ねて・・

研究内容とお世話になった方々・・

あれやこれやの海洋研究人生

1. 「概要」 はじめに
2. 関わってきた海洋研究とこれまで
   1) 学部・大学院時代
   (成層流体・熱塩対流・ロスビー波; 入門期)
   2) 九大応用力学研究所
   (風波・黒潮・孤立渦; 成長期)
   3) 東大海洋研究所時代
   (深層循環・完全性定理; 成熟期)
   4) 九大応用力学研究所
   (深層循環・準地衡乱流;[行政期])
   事業 – 日本海の監視・予測,
   対馬海峡海洋レーダー
   研究会 – 中深層循環・レーダー・
   日本海海況監視
   5) 近頃 (九大応研)
   (中規模渦・気候変動; 老成 [衰?] 期)
3. 海洋学と数学 * 今回は省く
4. 終わりに * 今回は省く

---

1. 文系志望?
(歴史，成り立ち;* 仕組み、分かる，納得する)
2. 大学・大学院の時期
(21-26 [年齢]; 東大地球物理学科)

0) ○成功体験: 寮で先輩の話を聞き数値積分のやり方を提示。感謝される。ややこしいところを暖純化して分離し解析的に求める。残りを数値処理すれば良い精度。

※ これは後の学位論文につながる。

0) ○: 今井先生の授業で
記憶に残ったことはただ一つ。
・「ラプラシアン」の意味
・形式に止まらず意味を深く考えることの大事さ面白さ

0) ○: 西岸強化流の考え方 (摂動論)
(レポート課題; 吉田先生)
宮田さんがこの話はうまいと
感心してくれる。
永田先生が高校の参考書に。
自分の授業でも

数式表現

・特異点を含む積分 単純化して言えば
$f \in C^1$ として

$$\int_0^1 \frac{f(x)}{\sqrt{x}}\,dx = 2f(0) + \int_0^1 \frac{f(x)-f(0)}{\sqrt{x}}\,dx$$

・ラプラシアンの意味
周りの平均からのずれ (∼ 曲率)

$$\nabla^2 f \sim \frac{d^2 f}{dx^2} \approx \frac{f(x-\Delta) - 2f(x) + f(x+\Delta)}{\Delta^2}$$

・西岸強化流

$$\beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = -R\nabla^2\psi - \sin\left(\frac{\pi y}{Y}\right)$$

β の意味 $\Rightarrow$

$$\begin{cases} \beta L \gg R & \text{(特異摂動)} \quad \text{vs.} \\ \beta L \ll R & \text{(摂動)} \end{cases}$$

$\beta = 0$ の解に $\beta \ll 1$ の摂動を加えると
西側の北上流が強まり、東側の南下流が弱まる。

---

*) ×: 失敗体験: 易しいと思うと手を抜く。
院試で危うく。
○: 難しそうなら手を抜かない。

*) 指導教員を決める時の話:
「海の中で運動量とエネルギーがどう流れ貯まるかを知りたいんですが」　「それは海洋学を全部やるってことですよ」

大それたこと? しかし，最近の海洋乱流の単行本 (Thorpe) にそんな絵が出ている。

---

1) ○: 「それは物理で言うと
どういう意味ですか」　吉田先生

2) (M 論) 成層流体の貫入
あまりいい顔をされなかったが。
○: 良い主題だったらしく
後輩数人が似たような研究
海の内部で起こる乱流混合に関係する話
(成層状態ひいては熱塩循環の維持機構;
この頃熱塩循環?)

3) 熱塩対流 (二重拡散対流)
○: 拡散型対流で振動しながら増幅する理屈
シンポジウム講演中に天文の海野先生が
「ああー，そうだったのかー」と。
その後，何度かいろんな人に
「へえー」と言われ気を良くする。

---

4) 熱塩対流に及ぼす剪断流の効果など　計画
同じ主題で Linden が先んずること　拙い

半分○: (対等の仕事を独力でできる。
自分で考えられる)
半分×: (着想はできるが
やはりデータがないと遅れる)

---

*) いろいろ囓っていた。
本業:成層流体, 余技:地球流体
○: やっておけば何でも面白いし有用。
×: 書くのに時間を取られるのがいやで
断るようになった。
×○: 自分を納得させるようにしか書けない。
読者の立場?
いくつかの解説記事
(学生時代から九大時代にかけて)
・熱塩対流の解説、
・海面混合層の解説、成層流体の混合
・ロスビー波の解説

---

*) 覚えている初期の論文
回転系における熱塩対流
(意外性)
ロスビー波の群速度と位相速度
(美しい関係)

---

3. 風波の時期 (九州大学応用力学研究所 26-39)

0) 波力に対する応答　非線形解析
○: 光易先生・本多さんの実験結果の解析
共鳴の理屈を提案。良くあった。
×: まとめようという気が無かった。

---

1) 風波の分散関係　学位論文その一
当時の大問題
実験・解析・理論　(光易先生、郭さん、増田)

○: 満足、自分なりの描像と解析法ができた。

×: 査読者と査読システムに不信感。

査読の遅れと理解力に乏しい査読者‥。

研究者の論理性に疑問?

×: 学会発表に反響無し

(説明下手。

光易先生の解説で鳥羽教授納得)

---

2) 風波の非線形伝達　　学位論文その二

Phillips, Hasselmann, Longuet-Higgins の

三大家の間で食い違い

精度? 物理 (非線形伝達の仕組み)?

◎: この混乱した問題を最終的に解決

[信頼できる厳密計算法の技術開発]

×: 吟味は慎重に。

実験と合うとして済ませたが，後で‥

※　物理は?　元々の意味，

問題意識はどうなったか

半分○: 問題を自分なりに

解決し分かったつもり。

半分×: 問題意識・関心にずれ

自分と同業多数と違う。

---

3) バイスペクトルと三次統計

ついでにやったもの。

たいしたことはないのだが、

引用は多いので不思議 (査読も簡単だった)。

○×: 問題意識 (興味・重要さの感覚) のずれ

エネルギー平衡方程式　波浪予報の基礎方程式

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{C}_g(\boldsymbol{k})F(\boldsymbol{k})) = S_{in} + \underline{S_{NL}} + S_{ds}$$

F : パワースペクトル密度,

$$n_j \equiv n(\boldsymbol{k}_j) \equiv \frac{F(\boldsymbol{k}_j)}{\omega_j \equiv \omega(\boldsymbol{k}_j)}$$: 作用密度

$$\frac{\partial n_4}{\partial t} = \iiint G(\boldsymbol{k}_1, \boldsymbol{k}_2, \boldsymbol{k}_3, \boldsymbol{k}_4)$$
$$\times\delta(\boldsymbol{k}_1 + \boldsymbol{k}_2 - \boldsymbol{k}_3 - \boldsymbol{k}_4)\delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)$$
$$\times[n_1 n_2(n_3 + n_4)] - n_3 n_4(n_1 + n_2)\, d\boldsymbol{k}_1 d\boldsymbol{k}_2 d\boldsymbol{k}_3$$

⇒ 六重積分だが共鳴条件より

⇒ 特異点を含む三重積分

---

4. 海流と中規模渦の時期 (応用力学研究所 29-39)

1) GFD summer seminar (WHOI):

MODE など中規模渦の話題が最盛期だった。

熱塩対流、ロスビー波を手がけた．熱塩対流の実験を指導してくれるはずの Whitehead がセミナー途中でいなくなった。急遽自分の主題 (ロスビー波) で。

(教訓: 備えはしておく)

帰国後吉田先生に報告: 「渦の一次量の議論ばかりで二次量が全然無い。不思議ですね」といっていたら大分後になって二次統計が出てきた。

半分×: アイディアはあったが着手せず。

面倒くさがる。

半分○: やれるし方向性が見えるという自信。

---

2) 黒潮流路の数理模型 (流路方程式)
と水槽再現実験 (盥)

流行と無縁。先ず理論模型 (流路方程式)

皆さんが蛇行をやらなくなって始めた。

実験装置を作ってくれる人がいたので成功。

模算も解釈できる。

※　当時勉強していた力学系の背景。

○: 天の邪鬼が新しいことを考える? 自信にも。

×: 同一 (類似) 主題を続けない。

研究者には型がある?

---

3) ベータ面上の孤立渦

模算と水槽実験

高圧性孤立渦は赤道側へ移動する。

その仕組みは?

※　奇妙な理屈 (渦度の総和が問題?)

4) 孤立渦同士、孤立渦と壁の相互作用 模算。

5) 局所振動入力に対する二層海洋の応答

最近も水田さんなどいろんな人がやっている。

渦位一様化?

---

6) 風波と水面粗度

鳥羽の解析?　水槽実験だとどうか

粗度の波浪依存 (水面状態依存)

局所平衡を突き詰めると

---

*) セミナー (輪読): 基礎・論理・推論

応用力学研究所時代 前期

・関数解析 (リュステルニク=ソボレフ)、

・連続群論 (ポントリャーギン)、

・力学系 (グッケンハイマー=ホームズ)

応用力学研究所時代 後期 (近頃)

・海洋熱塩循環 (van Aken)、

・外洋の波，沿岸域の波 (Holthujisen)

---

5. 深層循環・大循環の時期 (海洋研究所 40-42)

1) 拡散型換算重力模型に基づく力学

深層循環の力学

拡散性伸縮と境界層

2) ロスビー基準振動

完全性定理と展開定理

(学部時代の疑問)

・最初は腕力計算

・関数解析による導出と証明

・一次元形の …

・二次元、一般形状の …

◎: 問題意識を数学者と共有できる。

×: 数学者の書き方と合わないらしい

(物理が入りすぎる?)。

style, format が違うという。

専門でなく文献も知らず引用しない。

(逆に、そのような知識無しでも

考えられるという自信)

[The author should be commended

for this work ....]　(こそばゆい)

ロスビー基準振動　完全性定理

Sturm-Liouville-Rossby 型問題

Ψ: 順圧準地衡流線関数

$$\begin{cases} \text{PDE}: & \dfrac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi + \beta\dfrac{\partial\Psi}{\partial x} = \nabla\times\sigma \\ & (\sigma;\ \text{風応力}) \\ \text{b.c.}: & \Psi = 0 \quad \text{側壁上で} \\ \text{i.c.}: & \Psi = \Phi \quad \text{時刻 } t=0 \text{ で} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{PDE}: & \dfrac{\partial}{\partial t}\nabla^2 u_k + i\lambda_k\dfrac{\partial u_k}{\partial x} = 0 \qquad \text{領域内で} \\ \text{b.c.}: & u_k = 0 \qquad \text{側壁上で} \end{cases}$$

◎ (1): $\{u_k\}_k$ は完全正規直交系

(ソボレフ空間の計量で)。

(2): 次のような一般解表現が可能。

$$\Psi(\boldsymbol{x},t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(\boldsymbol{x}) \times \Big[\langle\Phi|u_k\rangle e^{-i\omega_k t} + \int_0^t d\tau \left(-\frac{\nabla\times\sigma}{\rho_0 h_k(0)}, u_k\right) e^{-i\omega_k(t-\tau)}\Big]$$

地衡流調節の関数解析 (表現と結果)

$\check{G}$: 所与の流れ $\tilde{\boldsymbol{u}}^T \equiv (\boldsymbol{u}^T, \eta)$ から

地衡流を抽出する演算子

$\check{G}(\tilde{\boldsymbol{u}})$

$$\equiv \int d\boldsymbol{x}_0 \begin{pmatrix} \lhd\boldsymbol{x} \\ -1 \end{pmatrix} G(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_0) \begin{pmatrix} \lhd\boldsymbol{x}_0 \\ +1 \end{pmatrix} \tilde{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{x})$$

$$= \int gh\zeta u\, dy$$

◎ (1)： $\bar{\tilde{\boldsymbol{u}}} = \check{G}[\tilde{\boldsymbol{u}}_I]$

(2)： $\check{G}^2 = \check{G}$

,　$\check{G}^\dagger = \check{G}$　　V における射影演算子

(3)： $\check{A}_g \equiv \check{G}_\perp \equiv I - \check{G}$　とすれば　$\check{A}_g\tilde{\boldsymbol{u}} \perp \check{G}\tilde{\boldsymbol{u}}$

即ち　最終地衡流状態と

初期値にあった残りの非地衡流は「直交する」。

(4)： 有限時間外力が加わるとき

地衡流調節で残る地衡流は

$$\tilde{\boldsymbol{u}}^{ge} = \check{G}\left[\tilde{\boldsymbol{u}}_I + \int \tilde{\boldsymbol{F}}\, dt\right]$$

(*)： 台風通過に対する海洋の応答

傾圧不安定　正準方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial(Ut)^2}(\nabla^2 - F)\varphi - \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\nabla^2 + F)\varphi = 0$$

傾圧不安定，但し

本質を失わない範囲で単純化

次のように書き換えられる．

$$\left(\frac{\partial}{\partial(Ut)} + \frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial}{\partial(Ut)} - \frac{\partial}{\partial x}\right)\nabla^2\varphi$$
$$= \left[\frac{\partial^2}{\partial(Ut)^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]\nabla^2\varphi$$
$$= \left[\frac{\partial^2}{\partial(Ut)^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]F\varphi$$
$$= \left(\frac{\partial}{\partial(Ut)} + i\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial}{\partial(Ut)} - i\frac{\partial}{\partial x}\right)F\varphi$$

$\left(\quad 0 \leftarrow \dfrac{\nabla^2}{F} \rightarrow \infty\quad \text{の振る舞い}\quad\right)$

波によるエネルギー・運動量輸送と波の分散関係との間に成り立つ関係

○ $$\frac{\partial\omega}{\partial k}\int\left[h\frac{u^2+v^2}{2} + g\frac{\eta^2}{2}\right]dy \quad (\text{陸棚波等})$$
$$= \frac{\omega}{k}\int\left[h\frac{u^2-v^2}{2} + g\frac{\eta^2}{2}\right]dy$$
$$= \frac{\omega}{k}\int [gh\eta u]\, dy$$

$h = h(y),\quad f = f(y)$ は任意

○ $$\frac{\partial\omega}{\partial k}\left(\int_{-h}^{0}\frac{u^2+w^2}{2}dz + g\frac{\eta^2}{2}\right) \quad (\text{水面波})$$
$$= \frac{\omega}{k}\left(\int_{-h}^{0}\frac{u^2-w^2}{2}dz + g\frac{\eta^2}{2}\right)$$
$$= \frac{\omega}{k}\int_{-h}^{0}u^2\, dz$$

※　真空中の電磁波 (波数 $\boldsymbol{k}$)．　でも成り立つ

$$\boldsymbol{c}_g \models c_{g;i} \equiv \frac{\partial\omega}{\partial k_i},\ c_{p;i} \equiv \frac{\omega}{k_i}.$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H} \equiv: \boldsymbol{P} = \underline{\dfrac{\boldsymbol{k}}{\|\boldsymbol{k}\|}U = \boldsymbol{c}_g U} : \text{エネルギー輸束}, \\ \qquad \text{但し}\quad U \equiv \dfrac{\boldsymbol{E}^2 + \boldsymbol{H}^2}{2} : \text{エネルギー密度}, \\ UI - \boldsymbol{E}\boldsymbol{E}^T - \boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^T \\ \qquad \equiv: \boldsymbol{M} = \underline{\dfrac{\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}^T}{\|\boldsymbol{k}\|^2}U \models c_{g;j}\dfrac{U}{c_{p;i}}} \\ \qquad\quad : \text{運動量輸送テンソル}\quad (\text{Maxwell}) \end{cases}$$

考楽　その一

電磁波のエネルギー・運動量輸送と分散関係が出たところで．これを題材に自然と数理の面白さを味わう．そこから何事かを．

{ 自然は素晴らしい，実に上手く出来ている
数学・物理は自然を見事に記述する
人間はこれ程のことを思いつき理解する

通底する数理は以下のよう．

○ $\{\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2, \boldsymbol{e}_3\} \in$ 正規直交基底 $(\boldsymbol{R}^3)$，

即ち　$(\boldsymbol{e}_j, \boldsymbol{e}_k) = \boldsymbol{e}_j^T\boldsymbol{e}_k = \delta_{j,k}$

$$\Rightarrow \sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{e}_j\boldsymbol{e}_j^T = I \models \delta_{i,j} \qquad I \text{ は単位行列.}$$

ここで電磁波の性質 ⇒

$$\left\{\frac{\boldsymbol{E}}{\sqrt{U}},\ \frac{\boldsymbol{H}}{\sqrt{U}},\ \frac{\boldsymbol{k}}{\|\boldsymbol{k}\|}\right\} \in \text{正規直交基底}\ (\boldsymbol{R}^3).$$

よって　$UI = \boldsymbol{E}\boldsymbol{E}^T + \boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^T + \dfrac{\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}^T}{\|\boldsymbol{k}\|^2}U$

◎ $\{e_j\}_j \in$ 正規直交基底 $(H) \Rightarrow {}^\forall h \in H$,

$$h = \sum_j (h, e_j)e_j \sim \sum_j (e_j^T h)e_j$$

$$= \sum_j e_j(e_j^T h) = \left(\sum_j e_j e_j^T\right) h \equiv: I\,h$$

完全正規直交基底，フーリエ変換，

デルタ関数 $\delta(\bullet)$

$\sim$ 単位行列 $\sim \delta_{i,j} =$ "クロネッカーのデルタ"

序に　(量子力学，関数解析，フーリエ解析で)

$$|\psi\rangle = \left(\sum_j |\psi_j\rangle\langle\psi_j|\right)|\psi\rangle = I\,|\psi\rangle$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-x') f(x')\,dx'$$
$$\sim (\Delta x)\sum_j \delta_{j,j'} f(x_{j'})$$

$$\begin{cases} \left(e^{ikx}, e^{ik'x}\right)_{x\,\text{空間}} \\ \quad = \dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} e^{i(k-k')x}\,dx = \delta(k-k'), \\ \qquad \Leftrightarrow e_k^T e_j = (e_j, e_k)_{x\,\text{空間}} = \delta_{j,k}. \\ \qquad \{e_j(\bullet)\}_j \in \text{正規直交系} \\ \left(e^{ikx}, e^{ikx'}\right)_{k\,\text{空間}} \\ \quad = \dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} e^{ik(x-x')}\,dk = \delta(x-x'), \\ \qquad \Leftrightarrow \displaystyle\sum_k e_k(i) e_k^T(i') = I_{i,i'}. \end{cases}$$

---

6. 学内政治の時期
(九州大学応用力学研究所 42-57)

これ以降，話の筋を示すスライドを省きます．用意した考楽用の題材を説明無しで示しておきます．

Lagrange 公式、 HF radar

3D 形	$\underline{a} \times (\underline{b} \times \underline{c}) = (\underline{a}\cdot\underline{c})\underline{b} - (\underline{a}\cdot\underline{b})\underline{c}$	(A1)
2D 形	$(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\neg\boldsymbol{a} = (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})\boldsymbol{b} - (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})\boldsymbol{c}$	(A2)
対称形	$(\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\boldsymbol{a} + (\boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a})\boldsymbol{b} = 0.$	(A3)

□　2D 対称形の導出 (複素表現)

$$(\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\boldsymbol{b} + (\boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a})\boldsymbol{c}$$

$$\models \frac{\bar{a}b - a\bar{b}}{2i}c + \frac{\bar{b}c - b\bar{c}}{2i}a + \frac{\bar{c}a - c\bar{a}}{2i}b = 0.$$

$$\because \quad \bar{a}\,b = (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}) + i(\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})$$
$$= (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}) + i(\boldsymbol{a}\cdot\neg\boldsymbol{b})$$

□　レーダー座標表現から 2D 形を導く
(共変・反変成分)

$$\boldsymbol{a} = (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})\boldsymbol{b}_\perp + (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})\boldsymbol{c}_\perp$$
$$= \frac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}}\neg\boldsymbol{c} - \frac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c}}{\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}}\neg\boldsymbol{b}.$$
$$\Rightarrow \neg \Rightarrow (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\neg\boldsymbol{a} = -(\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})\boldsymbol{b}.$$

T-S 図水塊混合比と一つの補間式

設定　$\mathrm{P}_i \models \boldsymbol{p}_i$,　$\mathrm{Q} \models \boldsymbol{q}$,

$$\boldsymbol{a} \equiv \boldsymbol{p}_1 - \boldsymbol{q}, \quad \boldsymbol{b} \equiv \boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{q}, \quad \boldsymbol{c} \equiv \boldsymbol{p}_3 - \boldsymbol{q}$$
$$0 = r_1\boldsymbol{a} + r_2\boldsymbol{b} + r_3\boldsymbol{c}, \quad r_1 + r_2 + r_3 = 1$$

□　$T-S$ 図水塊混合比から Lagarange 公式を導く

(1) 準備．位置ベクトルが所与の三点を頂点とする平面三角形の面積は次式で求められる．

$$2\triangle\,\mathrm{P_1P_2P_3}$$
$$= |(\boldsymbol{p}_1 - \boldsymbol{p}_3)\times(\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_3)|$$
$$= |\boldsymbol{p}_1\times\boldsymbol{p}_2 + \boldsymbol{p}_2\times\boldsymbol{p}_3 + \boldsymbol{p}_3\times\boldsymbol{p}_1|$$

(2) $r_3 = \dfrac{\triangle\,\mathrm{QP_1P_2}}{\triangle\,\mathrm{P_3P_1P_2}} = \dfrac{\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b} + \boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c} + \boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a}}$

$r_2 = \cdots$,　$r_3 = \cdots$.　$\Rightarrow$

$$0 = (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\boldsymbol{a} + (\boldsymbol{c}\times\boldsymbol{a})\boldsymbol{b} + (\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} \qquad \text{対称形}$$

$\boldsymbol{a}$ を $\neg\boldsymbol{a}$ に置き換えて

$$0 = (\neg\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\neg\boldsymbol{a} + (\boldsymbol{c}\times[\neg\boldsymbol{a}])\boldsymbol{b}$$
$$= (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} + (\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c})\neg\boldsymbol{a} - (\boldsymbol{c}\cdot\boldsymbol{a})\boldsymbol{b} \qquad \text{2D 形}$$

応用　補間式：三角格子分割したとき。

任意格子点上の値から　(平面近似)

$$f(\boldsymbol{q}) \approx r_1 f(\boldsymbol{p}_1) + r_2 f(\boldsymbol{p}_2) + r_3 f(\boldsymbol{p}_3)$$

※　$f(\boldsymbol{x}) = a + bx + cy$

調和補間．$\nabla^2 f = 0$ を満たす．

次元をあげても同様．

クラメルの公式

設定　$\{\boldsymbol{x}, \boldsymbol{b}\} \cup \{\boldsymbol{a}_j\}_j \subset n$ 次列ベクトル

$A=(\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\cdots,\boldsymbol{a}_n)\in(n,n)$ 次行列

$\det(A)\equiv$ “A の行列式” $\neq 0$　　即ち

$\{\boldsymbol{a}_j\}_j$ は線形独立.

◎　$\boldsymbol{b}$ を既知とし　$A\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}$　を満たす $\boldsymbol{x}$ を求める

$$\boldsymbol{x}\models x_i$$
$$=\frac{\det(\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\cdots,\boldsymbol{a}_{i-1},\boldsymbol{b},\boldsymbol{a}_{i+1},\cdots,\boldsymbol{a}_n)}{\det(A)}$$

□ (1)　行列式の意味 (大事) :

$\det(\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\cdots,\boldsymbol{a}_{i-1},\boldsymbol{a}_i,\boldsymbol{a}_{i+1},\cdots,\boldsymbol{a}_n)$

= “$\{\boldsymbol{a}_j\}_j$ の作る n 次元平行体の体積”

= “$\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}$ の作る $(n-1)$ 次元平行体の体積”

× “底面 $\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}$ に対し, $\boldsymbol{a}_i$ の作る「高さ」”

(2)　$\det(\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\cdots,\boldsymbol{a}_{i-1},\boldsymbol{b},\boldsymbol{a}_{i+1},\cdots,\boldsymbol{a}_n)$

= “$\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}\cup\{\boldsymbol{b}\}$ の作る平行体の体積”

= “$\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}$ の作る $(n-1)$ 次元平行体の体積”

× “底面 $\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}$ に対し, $\boldsymbol{b}$ の作る「高さ」”

(3)　$\boldsymbol{b}=x_i\boldsymbol{a}_i+\sum_{j\neq i}x_j\boldsymbol{a}_j$

右辺第二項は $\{\boldsymbol{a}_j\}_{j\neq i}$ の作る「底面」

の張る空間に属する.

$\boldsymbol{b}$ と $x_i\boldsymbol{a}_i$ が底面に対して作る高さは同じ.

(4)　(1), (2), (3)　よりクラメルの公式は自明.

※　$T-S$ 図三水塊混合比とクラメルの公式

$\mathrm{P}_j\models\boldsymbol{p}_j$　$(j=1,2,3)$　を三つの水型とする.

$\triangle\,\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3$ の内部の点 $\mathrm{Q}\models\boldsymbol{q}$

$$\boldsymbol{q}={}^{\sqcap\exists}p_1\boldsymbol{p}_1+{}^{\sqcap\exists}p_2\boldsymbol{p}_2+{}^{\sqcap\exists}p_3\boldsymbol{p}_3.$$

$(p_1+p_2+p_3=1)$　$\Rightarrow$

$$\tilde{\boldsymbol{q}}\equiv\boldsymbol{q}-\boldsymbol{p}_3=p_1(\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_3)+p_2(\boldsymbol{p}_2-\boldsymbol{p}_3)$$
$$=:p_1\tilde{\boldsymbol{p}}_1+p_2\tilde{\boldsymbol{p}}_2$$

(1) クラメルの式を使うなら

$$p_1=\frac{\det(\tilde{\boldsymbol{q}},\tilde{\boldsymbol{p}}_2)}{\det(\tilde{\boldsymbol{p}}_1,\tilde{\boldsymbol{p}}_2)}=\frac{\tilde{\boldsymbol{q}}\times\tilde{\boldsymbol{p}}_2}{\tilde{\boldsymbol{p}}_1\times\tilde{\boldsymbol{p}}_2}$$

(2) 三水塊混合比公式を使うなら

$$p_1=\frac{\triangle\,\mathrm{Q}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3}{\triangle\,\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3}=\frac{2\triangle\,\mathrm{Q}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3}{2\triangle\,\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3}$$
$$=\frac{\tilde{\boldsymbol{q}}\times\tilde{\boldsymbol{p}}_2}{\tilde{\boldsymbol{p}}_1\times\tilde{\boldsymbol{p}}_2}$$

以後は半分 joke というか洒落です.

熱力学, 積分 (, 経済?) の説明をある授業で‥

儲かるの—サイクル

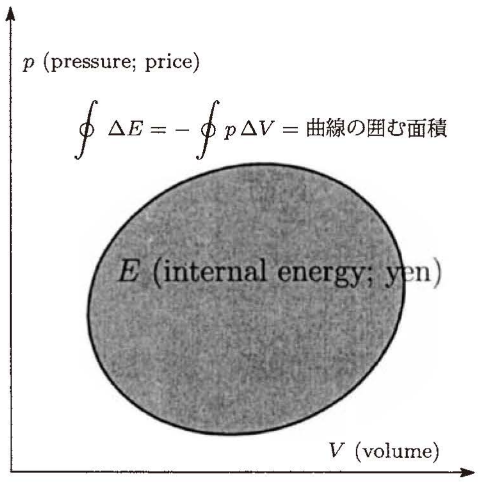


Fig. A1　Carnot cycle or Moukarunoh cycle ? The area surrounded by the curve is represented by the counterclockwise line integral.

算数で加減乗除の分からない子どもでも

「円」が後ろに付くと分かる, らしいと聞き考えた.

▽　まず準備.　熱力学第一法則では

$$dE=-p\,dV+T\,dS$$

但し　E : 内部エネルギー,　p : 圧力,

V : 体積,　T : 温度,　S : エントロピー.

$\left\{\begin{array}{ll}\text{体膨張のする仕事で} & E\text{ が減る}\\ \text{熱の獲得で} & E\text{ が増す}\end{array}\right.$　と読む.

▽　今. T, dS の意味は忘れよう. 語呂合わせだが,

E : 円 (yen, en?),　p : 価格 (price)

V : 量 (volume)　と読み替え.

$\Delta E=-p\,\Delta V$　とは

価格 p のものを ΔV 増やす (購入する) と

所持するお金 (円) E が減る, と読む.

○　売買で残る金額 :

$$\oint\Delta E=-\oint p\Delta V>0$$

if $\left\{\begin{array}{ll}p\text{ 低価格のとき購入し} & (\Delta V>0)\\ p\text{ 高価格のとき売り捌く} & (\Delta V<0)\end{array}\right.$

(このとき線積分は反時計回り)

こうすれば儲かる, 則ち　$\oint\Delta E>0$

「金取り基学 (かねとりきがく)」の
「儲かるの一サイクル」と呼ぶ.
時計回りの線積分は逆で，損するサイクルになる.
※ T, S についての読み替えはご自分でどうぞ.
良いのができましたらおしえて下さい.

雑: 思索は楽し　(数理・論理につき)

○「数学は違うものを同じと見る技術」
⇔「数理は違うものを同じと見る見方」
類比・類推，単純化・埋込み・一般化

○ パターン認識.　似ている・違う.
摂動・分岐・極端・特異点
近似法・近似解＋誤差　(似ている・違う)
(厳密解はまず見つからない; 近似が大事)

○ 疑問 (得たい答え) をはっきりさせる
まず定義を明確に　(できれば数式に)
物理の言葉で表す　⇔　数式で表す

○ 往々，数式は人 (の概念思考) より賢い

○「汝自身を知れ」の意味は?

○ 古くからある逆理. どう考え理解するか.
「あるクレタ人が言ったという
『クレタ人はみんな嘘つきだ』という文言は
本当か嘘か」

Most human history has not afforded men much chance to pursue their curiosity, except as a hobby of the rich or within the refuge of a monastery. We can count ourselves fortunate to live in a society and at a time when we are actually paid to explore the universe. (Henry Stommel, 1974)

Stommel が亡くなったことを知らせる
Oceanus の特集 (Oceanus vol,35, 1992)

茶話会

場所: 応用力学研究所二階小会議室
(ロビーから階段で上がったところ)
時間: この後 16:30? 頃から
※　参加して頂ける方はご自由にどうぞ

増田教授の主要論文リスト

1) A. Masuda and Y. Nagata : Water Wedge Advancing along the Interface between Two Homogeneous Layers, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol. 30, No.6, 289-297(1974)

2) A. Masuda : Double Diffusive Convection in a Rotating System, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol. 34, No.1, 8-16(1978)

3) A. Masuda : Group Velocity and Energy Transport by Rossby Waves, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.34, No.1, 1-7(1978)

4) H. Mitsuyasu, Y.-Y. Kuo and A. Masuda : On the dispersion relation of random gravity waves. Part II., Journal of Fluid Mechanics, Vol. 92, Part 4, 731-750(1979)

5) Masuda, Y.-Y. Kuo and H.Mituyasu : On the dispersion relation of random gravity waves. Part I., Journal of Fluid Mechanics, Vol.92, Part 4, 717-750(1979)

6) A. Masuda : Nonlinear Energy Transfer between Wind Waves, Journal of Physical Oceanography, Vol.10, NO.12, 2082-2093(1980)

7) A. Masuda and Y.-Y. Kuo : Bispectra for the surface displacement of random gravity waves, Deep-Sea Research, Vol.128, No.3, 223-237 (1981)

8) A. Masuda and Y.-Y. Kuo : A note on the imaginary part of bispectra, Deep Sea Research, Vol.29, No.3, 223-237(1981)

9) A. Masuda : An interpretation of the bimodal character of the stable Kuroshio path, Deep-Sear Research, Vol.29, No.4, 471-484(1982)

10) A. Masuda and T. Kusaba : On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.43, No.1, 28-36(1987)

11) A. Masuda : A proof and applications of the expansion theorem for the Rossby normal modes in a closed rectangular basin, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.43, No.4, 237-243(1987)

12) A. Masuda, K.Marubayashi and M. Ishibashi : Batchelor-modon type eddies and isolated eddies near the coast on an f-plane, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.43, No.6, 383-394(1987)

13) 草場忠夫、増田 章：局所平衡下の風と風波について, 第 35 回海岸工学論文集,217-221(1988)

14) T. Kusaba and A. Masuda : Wind-wave spectra based on the hypothesis of local equilibrium, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol. 45, No.1, 45-64(1988)

15) A. Masuda : A supplementary note on the completeness of Rossby normal modes in a rectangular basin, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.44, No.1, 40-45(1988)

16) T. Kusaba and A. Masuda : The roughness height and drag law over the water surface based on the hypothesis of local equilibrium, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.44, No.5(1988)

17) A.Masuda : A skewed eddy of Batchelor-modon type, Journal of Oceanographic Society of Japan, Vol.44,No.5, 200-211(1988)

18) A. Masuda : A laboratory experiment on the Kuroshio meander, Deep-Sea Research, Vol.36, No.7, 1967-1081, 1989.07(1989)

19) A. Masuda : On the completeness theorem and the expansion theorem for eigenfunctions of the Sturm-Liouville type, Quarterly of Applied Mathematics(1989)

20) 草場忠夫、増田 章、丸林賢次、石橋道芳、光易恒：三次統計量とバイスペクトル, 応用力学研究所所報, Vol. 69, 1-32, 1990.02(1990)

21) A. Masuda, K. Marubayashi and M. Ishibashi : A laboratory experiment and numerical simulation of an isolated eddy in a basin with topographic beta, Journal of Fluid Mechanics, Vol.213, No.3, 435-445(1990)

22) 増田 章：海洋学と数学, 海と空, Vol. 67, 163-1752(1991)

23) 三木邦子、増田 章：水平発散を持つ系における点渦列の安定性, 応用力学研究所所報, Vol. 74,117-131(1992)

24) A. Masuda and K. Uehara : A reduced-gravity model of the abyssal circulation with Newtonian cooling and horizontal diffusion, Deep-Sea Research, Vol.39, 1453-1479(1992)

25) 上原克人、増田 章：深層熱塩循環の研究における定常線型浅水方程式形の直接解法, 応用力学研究所所報, Vol. 74, 59-93(1992)

26) 水田元太、増田 章：孤立した海底地形周辺の深層循環, 応用力学研究所所報, Vol. 74, 23-44(1992)

27) A.Masuda : The completeness theorem for Rossby normal modes of a stably stratified flat ocean with an arbitrary form of side boundary, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 51, No.3, 425-439(1993)

28) 小松幸生、草場忠夫、増田 章：風波成分波間の非線形エネルギー伝達-新しく開発した効率的な計算法について-, 応用力学研究所所報,Vol.75, 121-143(1993)

29) K. Uehara, K. Taira and A. Masuda : Density field along 12°N and 13°N in the Philippine Sea, The Deep Western North Pacific, edited by T. Teramoto , Elsevier, 39-49(1993)

30) A. Masuda, T. Kusaba and K. Komatsu : Two recent topics of wind-wave research in RIAM, Proceedings: CREAMS'97 International Symposium, 25-28(1994)

31) A. Masuda and K. Uehara : Dynamics of thermohaline circulation based on the expansion in terms of diffusive reduced- gravity modes, Proceedings: CREAMS'97 International Symposium(1994)

32) 高橋 純、増田 章：地中海流出水に現れる渦Meddyの南進機構, 応用力学研究所所報, Vol. 76, 143-162(1994)

33) 阪井淳子、草場忠夫、増田 章：うねりと風波の相互作用に関する実験的研究 －うねりに乗った風波エネルギーの解析を中心として－, 応用力学研究所所報, Vol. 76, 123-142(1994)

34) A. Masuda and G. Mizuta : A study on the effects of bottom topography on deep circulation with a diffusive reduced-gravity model, Journal of Physical Oceanography, Vol.25, No.3, 374-390(1995)

35) A. Masuda and K. Yamazaki : On the stability of baroclinic vortex streets composed of quasi-geostrophic point eddies, Deep-Sea Research, Vol. 42, No. 4, 437-453(1995)

36) 増田 章：風波研究の最近の話題から, 数理解析研究所講究録, Vol. 908, 197-207(1995)

37) 杉原裕司、松永信博、増田 章、小松利光：乱れの拡散と散逸がバランスした乱流場に対する標準 k-ε モデルの有効性, 日本土木学会論文集 (1995)

38) D.-L. Zhao, K. Komatsu, T. Kusaba and A. Masuda : An experiment of wind waves in decay area in reference to the role of nonlinear energy transfer, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. 113, 1-16(1996)

39) 高瀬裕規、増田 章：不規則風応力が励起する中規模渦乱流に対する海底地形の影響, 応用力学研究所所報, Vol. 79, 23-38(1996)

40) 小松幸生、草場忠夫、増田 章：成分波間の非線形エネルギー伝達計算法の違いが風波スペクトルの時間発展に及ぼす影響, 応用力学研究所所報, Vol.79, 1-21(1996)

41) K. Komatsu and A. Masuda : A new scheme of nonlinear energy transfer among wind waves: RIAM method -Algorithm and performance -, Journal of Oceanography, Vol. 52, No, 4, 509-527(1996)

42) A. Masuda, H. Takase and A. Okuno : Turbulent mesoscale eddies over random bottom topography driven by random wind stress curl, Proceedings: The CREAMS'97 International Symposium, 229-232(1997)

43) K.M. Yamazaki and A. Masuda : Parameter dependence of linear and nonlinear instability of barotropic and baroclinic shear flows, Proceedings: The CREAMS'99 International Symposium, 225-288(1997)

44) A. Masuda, K. Komatsu and T. Kusaba : An intercomparison study of numerical schemes for the wave forecasting model of RIAM, Proceedings: The CREAMS'99 International Symposium, 205-208(1997)

45) 篠崎太郎、水田元太：東西に傾いた一様な海底斜面を持つ海盆における深層循環の力学 －ヒプソメトリー論と摂動論－, 応用力学研究所所報, Vol. 83, 19-28(1998)

46) D. L. Zhao and A. Masuda : Observations of directional spectra in a large wave flume, Proceedings: Hydrodynamics -Theory and Applications-, edited by H. Kim and S. H. Lee, 413-418(1998)

47) G. Mizuta and A. Masuda : Three-dimensional structure of thermohaline circulation steered by bottom topography, Journal of Physical Oceanography, Vol. 28, No. 10, 1979-1998(1998)

48) J. Takahashi and A. Masuda : Mechanisms of the southward translation of meddies, Journal of Oceanography, Vol. 54, N0.6, 669-680(1998)

49) A. Masuda and J. Takahashi : The pseudo-topographic beta effect on the northward and southwestward extension of the Mediterranean Outflow, Proceedings: The CREAMS'99 International Symposium, 176-179. (1999)

50) A.Masuda, A. Okuno and T.Shinozaki : Deep circulation in a square basin of a uniform bottom slope - comparison of analytical solutions with numerical solutions -,Proceedings: The CREAMS'99 International Symposium, 168-171(1999)

51) A. Masuda, T. Kusaba, K. Komatsu, K. Marubayashi and M. Ishibashi : Some statistical properties of wind and wind waves at the Tsuyazaki Station in the Eastern Tsushima Strait, Proceedings: The CREAMS'99 International Symposium, 164-167(1999)

52) A. Masuda, T. Kusaba, K. Marubayashi and M.Ishibashi : Statistics of wind and waves

off Tsuyazaki, Fukuoka, in the Eastern Tsushima Strait, Journal of Oceanography, Vol. 55, No.2, 289-305(1999)

53) H. Matsunaga, Y. Sugihara, T. Komatsu and A. Masuda : Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogeneous fluid, Fluid Dynamics Research, Vol. 25, 147-165(1999)

54) 増田 章、草場忠夫：対馬海峡東水道の海上風と有義波の変動特性, 第 49 回応用力学講演会講演論文集, 289-290(2000)

55) 増田 章：日本海の海洋変動・気象変動の解明に向けて, 第 49 回応用力学講演会講演論文集, 285-288. (2000)

56) 奥野 章、 増田 章：地衡流乱流における β 効果の水平発散による抑制, 応用力学研究所所報, Vol. 118, 31-39(2000)

57) A. Masuda, T. Kusaba and K. Komatsu : Nonlinear dispersion relation and the spectral forms in the saturated range of wind waves, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. 118, 1-8. (2000)

58) 草場忠夫、増田 章、小松幸生、高野洋雄、植野耕治：日本海中央部の海上風と有義波の変動特性, 総合理工学報告, Vol. 22, No.1, 35-41(2000)

59) 中嶋義信、増田 章：深層循環における島法則, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol. 22, No. 1, 35-41(2001)

60) 増田 章：海洋中規模渦の統計的特性, 数理解析研究所講究禄、「乱流構造の数理 －発生・動力学・統計・応用－」, Vol. 1226, 160-170(2001)

61) 小松幸生、増田 章：沿岸域における風波成分波間の非線形エネルギー伝達, 水産総合研究センター研究報告, Vol.1, No. 1, 7-21(2001)

62) 草場忠夫、増田 章、高野洋雄、植野耕治：琉球沖東シナ海および四国沖太平洋における海上風と有義波の変動特性, 応用力学研究所所報,Vol.122, 43-48(2002)

63) 草場忠夫、増田 章、丸林賢次、石橋道芳：津屋崎沖観測塔における海上風の計測, 応用力学研究所所報, Vol. 122, 37-42(2002)

64) 増田 章、奥野 章：黒潮前線渦の傾圧不安定としての側面, 応用力学研究所所報, Vol. 122, 25-36(2002)

65) 山本秀幸、増田 章、草場忠夫、丸林賢次、石橋道芳、奥野章、藤井智史、佐藤健治：HF レーダーを用いた対馬海峡表層海流の観測, 応用力学研究所所報, Vol. 122, 9-23(2002)

66) A. Masuda, M. Ishibashi, K. Ueno and D. Yokomizo : Experiment of side-band instability for surface waves generated mechanically - fine structure and amplitude vacillation, Proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 203-210(2002)

67) A. Masuda and A. Okuno : Quasi-geostrophic turbulence in a one-layer ocean affected by horizontal turbulence, Proceedings ”Statistical Theories and Computational Approaches to Turbulence: Modern Perspectives and Applications to Global- Scale Flows”, Springer Verlag, 327-340(2002)

68) 増田 章：水平発散のある f-面準地衡乱流の自己相似的発展, 数理解析研究所講究禄、「乱れの発生、維持機構および統計法則の数理」, Vol. 1285, 178-185(2002)

69) A. Masuda : Spectral evolution of quasi-geostrophic turbulence on f- and beta-planes affected by horizontal divergence, Proceedings: International Symposium ”Dynamics and Statistics of Coherent Structures in Turbulence: Roles of Elementary Vortices”, edited by S. Kida, 217-231, 2002.10(2002)

70) 津守博通、杉原裕司、増田 章：風波気液界面を通しての二酸化炭素交換量の測定, 海岸工学論文集, Vo.50, 101-105(2003)

71) A. Okuno and A. Masuda : Effect of horizontal divergence on the geostrophic turbulence on a beta-plane: suppression of the Rhines effect, Physics of Fluids, Vol. 15, 56-65 (2003)

72) G. Mizuta and A. Masuda : An application of a diffusive reduced-gravity model to deep circulation above various forms of bottom topography , Journal of Physical Oceanography, Vol.33, 451-464(2003)

73) 増田 章：対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム, 水路新技術講演集, No.16, 19-29 (2003)

74) 増田 章、吉川裕：回転系における一様成層一様剪断流の安定性および乱流状態に関する考察, 数理解析研究所講究録「乱流による輸送, 拡散, 混合の数理」, Vol. 1339, 120-128(2003)

75) 津守博通、杉原裕司、増田 章：風波気液界面における局所 CO2 交換速度の評価, 水工学論文集, Vol. 48, 511-516(2003)

76) 吉川 裕、増田 章、丸林賢次、石橋道芳、奥野章、山下義幸：HF レーダーによる対馬海峡表層海流観測, 沿岸海洋研究, Vol. 41, No.2, 109-117(2004)

77) 杉原裕司、津守博通、古寺大悟、吉岡洋、増田章：海面画像計測による白波被覆率の評価, 総合理工学報告, Vol. 25, 405-412(2004)

78) 増田 章、丸林賢次、石橋道芳、奥野 章：津屋崎沖観測塔で観測した海上風乱流　I. 計測法と予備解析, 九州大学応用力学研究所所報, Vol. 126, 23-39(2004)

79) 山下義幸、増田 章、丸林賢次、石橋道芳、奥野 章：海洋レーダー観測システムで用いる基線付近流速場の補間・推定手法, 応用力学研究所所報, Vol. 126, 47-56(2004)

80) 奥野 章、吉川 裕、増田 章、丸林賢次、石橋道芳：対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム, 応用力学研究所所報, Vol. 126, 57-67 (2004)

81) 古川那津恵、増田 章、丸林賢次、石橋道芳、奥野 章：慣性散逸法による海面風応力の測定について, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol. 26, No. 3, 357-364(2004)

82) 遙山 誠、増田 章、吉川 裕、奥野章：日本沿岸域における M2 潮汐振幅の季節変動および経年変動, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol. 26, No. 3, 365-372(2004)

83) Y. Sugihara, T. Tsumori, H. Yoshioka, S. Serizawa and A. Masuda : Imaging measurement of whitecaps at sea observation tower, Proceedings of the 29th International conference Coastal Engineering 2004, Vol. 1, 1082-1092(2005)

84) 吉川 裕、増田 章、丸林賢次、石橋道芳：対馬海峡に設置された HF レーダー の計測精度検証, 沿岸海洋研究, Vol. 43, No.1, 69-75(2005)

85) 津守博通、杉原裕司、増田 章：風波気液界面における二酸化炭素交換速度の評価に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.782/II-70, 101-116(2005)

86) H. Tsumori, Y. Sugihara and A. Masuda : Parameterization for CO2 transfer velocity at the surface of wind waves, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 23, No.1, 43-55(2005)

87) 奥野 章、吉川裕、増田 章、丸林賢次、石橋道芳：短波レーダーにより観測された対馬海峡の潮流, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol. 27, No. 1, 9-18.9-18(2005)

88) Y. Yoshikawa, A. Masuda, K. Marubayashi and M. Ishibashi : On the accuracy of HF radar measurement in the Tsushima Strait,

Journal of Geophysical Research , Vol. 1, 1082-1092 (2006)

89) 古川奈津恵、増田 章、石橋道芳：波浪統計ー低次の非線形性を有する純確率模型と風洞実験ー, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol.28, No.3, 349-353(2006)

90) 増田 章：表層流・潮汐に関する覚書 ー海洋レーダー観測に関連してー, 九州大学応用力学研究所所報, Vol. 132, 55-74(2007)

91) 増田 章：流軸の揺れで生じる流軸に平行な向きの渦成海水輸送 I. 計測法と予備解析, 九州大学応用力学研究所所報, Vol. 132, 37-53 (2007)

92) 石井大輔、柳 哲雄、吉川 裕、増田 章：漂流ブイと海洋レーダーを用いた対馬海峡における表層収束・発散場の評価 , 海の研究, Vol.16, No.3, 237-251(2007)

93) 増田 章：海況観測で使う補間・推定法に関する覚え書き ーとくに海洋レーダーについてー , 応用力学研究所所報, Vol. 134, 28-45 (2008)

94) 中園隆司、吉川 裕、増田章：対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性, 応用力学研究所所報, Vol. 134, 47-52(2008)

95) 増田 章：流体力学で使う直交曲線座標系 ーー一つの表現ー l, 応用力学研究所所報, Vol. 136,49-63(2009)

96) Y. Yoshikawa and A. Masuda : Seasonal variations in the speed factor and deflection angle of the wind-driven surface flow in the Tsushima Strait, Journal of Geophysical Research , Vol. 114, C12022. (2009)

97) A. Masuda : Vector notations suitable for geophysical fluid dynamics with examples and applications , Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. 138, 1-12(2010)

98) T. Wagawa, Y. Yoshikawa and A. Masuda : Bathymetric influences of the Emperor Seamounts upon the subarctic gyre of the North Pacific: Examining boundary current dynamics along the eastern side of the mountain ridge with idealized numerical model, Journal of Oceanography, Vol. 66, no.2, 223-232, 2010.04(2010)

99) Y. Yoshikawa, A. Masuda, K. Marubayashi and M.Ishibashi : Seasonal variations of the surface currents in the Tsushima Strait, Journal of Oceanography, Vol. 66,no.2, 223-232(2010)

100) 吉川 裕、増田 章、丸林賢次、石橋道芳：対馬海峡における表層海流変動, 海洋, Vol. 42, no.9, 534-541(2010)

101) A. Masuda : A supplementary note to GFDVN: Complex representation of two-dimensional vectors, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. 139, 85-94(2010)

102) A. Masuda : Analytical formulas representing the idealized growth of wind-waves, duration-limited and fetch-limited , Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. 140, 1-12 (2011)

103) A. Masuda : Vertical modes of quasi-geostrophic flows in an ocean with bottom topography - evolution equation and energetics - , Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol.140, 1-12(2011)

104) A. Masuda : Mechanism of baroclinic instability based on an idealized equation in a simplest situation , Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. 141, 35-53(2012)

105) 増田　章：渦度の時間発展をもたらす仕組み　－渦度力の捻り－　, 応用力学研究所所報, 143, 119-128(2012)

106) C.-H. Hong, A. Masuda and J.-H. Yoon : Upper Ocean Responses to typhoons in the Northwestern Pacific, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 143, 55-62(2012)