

ソリトンと気象現象*

辻村 豊**

世はまさに情報化時代。数値予報の予想天気図やレーダー=アメダス合成図なども、新アメダスのワークステーションの前に座ればたちどころに見ることができるようになった。しかも動画にすることが可能になっているので、天気現象の刻々の変化を目の当たりにできることの意義は大きい。この様なことが可能になったのは計算機の小型化・高速化と共に、情報通信網の発達に依るところが大である。ものの本に依れば、現在実用化されている最速の光通信ケーブルは 1.6 Gbps(毎秒 16 億ビット)というすさまじい量の情報を転送できるという。しかし、これとても大量の画像情報を送るにはまだ十分ではなく、更なる高速化への努力がなされている。一昨年、新聞にこれを 100 Gbps (毎秒 1,000 億ビット)にする事が可能という記事が掲載された。憶えておられる方もいると思うが、それには次の様に書かれていた。

「……光ソリトンを利用して……」

1. ソリトン

「ソリトン soliton」とは、孤立して安定な波(孤立波 solitary wave)につけられた名前である。ふつう、波という \sin や \cos の三角関数で表現される山と谷が周期的に繰り返しながら無限に続くもの(正弦波)を思い浮かべるだろうが、ソリトンは山だけ(または谷だけ)が一つ孤立して存在するものである。波高の異なる典型的なソリトンの姿は第1図に示した通りで、ふつうの正弦波形の波とは大きく異なることが良くわかるだろう。むしろパルスと言った方がイメージに合うかもしれない。デジタル通信ではパルス信号の ON/OFF で情報を遠距離に送るわけであるから、ソリトンのような安定な波こそ、うってつけの存在と言えるだろう。

はじめに光ソリトンを例に挙げたので、ソリトンは光



第1図 波高の異なるソリトンの波形

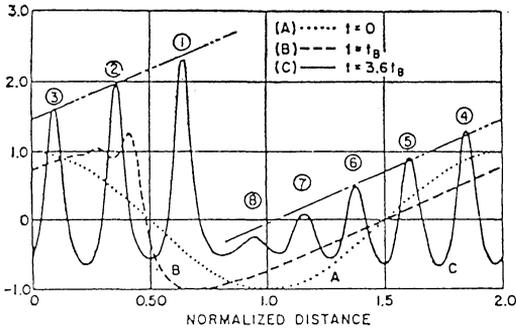
ファイバーに特有のものと言った印象を与えたかもしれないが、ソリトンは物理の様々な分野(流体、プラズマ、結晶格子、電子回路、素粒子、ブラックホール、更には神経パルス、遺伝子の担い手である DNA、筋肉などの生体に関する分野、また火山のマグマ上昇のモデルなど)で登場し、盛んに研究が進められている。ソリトンは様々な分野を結ぶ架け橋と言った存在になっているわけである。この様なソリトン研究の分野の中で最も歴史があるのは流体力学の分野で、150年以上も前に研究が始まった。

2. 孤立波の発見

われわれが「波」と聞いたときにまず思い浮かべるのはおそらく「水の波」であろう。水面は実に様々な波の姿を見せてくれる。ソリトン研究の出発もやはり水の波であった。1834年、英国の物理学者ラッセル Russell は、グラスゴー=エディンバラ運河の脇を馬で散歩していた時に偶然、止まった船の舳先から一山の巨大な波(彼はこれを great wave of translation と呼んでいる)が生まれるのを見つけた。このソリトン(この時代ではまだ孤立波と言った方が良かったらうが)を馬で追いかけたラッセルは、波が数マイルも形を変化させず、安定に伝播したことにたいへん驚いた。彼が偉大だったのは単に観察しただけにとどめず、実験室で水槽実験に取り組み、

* Some Phenomena relevant to "Solitons" in atmospheres.

** Yutaka N. Tsujimura (気象大学校).



第2図 ザブスキー&クラスカルの数値実験 [Zabusky & Kruskal (1965)]

なお、 t_B とは分散項がない場合に砕波が生じる時刻である。

孤立波の性質を当時としては徹底的に調べた点にある。彼は10年に及ぶ研究の成果を1844年に“Report on Waves”としてまとめ、孤立波の進む速度が波の高さに依存する* ことを指摘した。波の水平スケールが水の深さに比べて十分大きい浅水の場合には、通常の正弦波の伝播速度は波の高さに関係なく $c = \sqrt{gh}$ で与えられるが、孤立波は波の高さに依存する点で大きく異なる。この様な波の高さに依って伝播速度が違う波は「非線形 nonlinear な波」と呼ばれる（これに対して通常の正弦波は「線形 linear な波」である）。ソリトンは代表的な非線形波動である。

その後、孤立波の研究は進み、ラッセルの報告から50年後（と言っても今から100年近く前）の1895年にオランダのコルテヴェーグ Korteweg とドゥ・フリース de Vries によって孤立波の時間発展を記述する方程式、今日 KdV 方程式 (Korteweg=de Vries 方程式†) と呼ばれているものが導かれ、その孤立波解も解析的に求められて古典的ソリトン研究は一段落つくことになった。

KdV 方程式のおかげで、われわれは何故孤立波が形

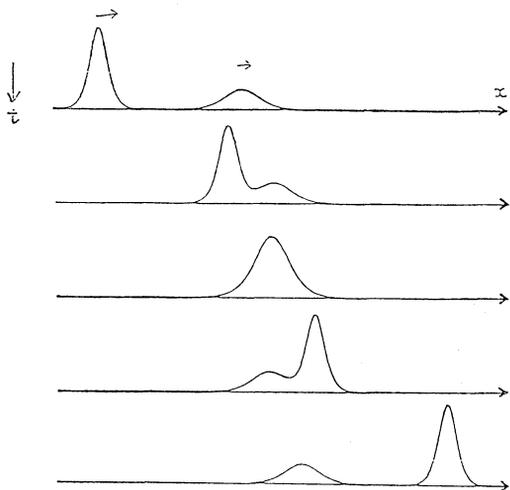
を変えずに存在できるのかを理解し得るようになった。KdV 方程式は3つの項（時間微分項、非線形項、分散項）から成る。分散項が無い場合には、波は非線形項のために次第に急峻化（非線形性による波の突立ち）していく。これは海岸でよく見る「波の砕け」である。一方、非線形項が無ければ、波は分散項のために次第に広がって行ってしまう。両方が共存している故に、うまくバランスがとれて形を変えずに伝播できるのである。逆に言えば、孤立波は非線形項による突立ち効果があって初めて存在できる波と言うことになる。孤立波は本質的に非線形な波なのである。

3. ソリトンの発見

前世紀末の KdV 方程式の発見以後、孤立波の基本的メカニズムが理解できてしまった為か、孤立波の研究はあまり進展しなくなり、孤立波は教科書でも簡単に触れるだけの存在として忘れ去られようとしていた。KdV 方程式の発見から70年後（だいたい近づいたが、それでも四半世紀前）の1965年、米国のザブスキー Zabusky とクラスカル Kruskal はコンピューターを用いた数値実験で KdV 方程式に取り組み、大発見をした。彼らの結果を第2図に示す。彼らは初めに正弦波（図中の点線）から出発した。暫くすると波の突立ち（非線形効果）が顕著になったが、KdV 方程式の分散項のおかげで砕波には至らず（図中の破線）、孤立波が次々と出現した（図中の実線）。正弦波がいくつかの孤立波に分裂したことだけでもたいへん面白い発見であったが、更に時間経過を追ったところ、孤立波同士が互いに衝突しても壊れず、あたかも粒子のように個性を保存して振舞うことを見いだした。第3図はザブスキーらのものではないが、孤立波同士の衝突がよりハッキリする2つの孤立波の衝突を描いたものである。波高の高いものがより速く進んで追いつき、波高の低いものを抜き去ってしまう。ザブスキーらは、この様な振舞いをする孤立波に「ソリトン」という名前をつけた。このザブスキーらの数値実験は、現在では16ビットパソコンで十分実行可能であるが、当時としては大型計算機を駆使した巨大計算で、様々な工夫が必要であったと聞く。彼らの努力は「数値実験」の有効性を明らかにした点で歴史に残るものとなった。このザブスキーらの実験以後、ソリトン研究は爆発的な進展を見せて今日の隆盛に至っている。現在では、KdV 方程式を始めとする多くのソリトン方程式で任意の初期条件に対する時間発展を数式で記述することが可

* より正確には $c = \sqrt{g(h+a)}$
 ここで c : 孤立波の伝播速度, g : 重力加速度,
 h : 水の深さ, a : 波高
 † 数式を使わないと言う「気象談話室」のルールに反するが、興味ある読者のために KdV 方程式を示しておく。
 $u = u(x, t)$ として

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \alpha u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0$$
 ここで α は定数。第2項が非線形項, 第3項が分散項である。



第3図 2つのソリトンの衝突 [KdV 方程式]

波高8と波高2のソリトンの追越し衝突。2つのソリトンが融合した状態は波高6で、単純な重ね合わせになっていないことに注意。

能となっている。ソリトンは、複雑な振舞いをするのが常の非線形現象の中では時間発展の解析解を得ることができると言う点で大変性質の良いものなのである。

ただ、この様な良い性質をもつと言うことは、反面で実現にかなり厳しい条件がつくことになる。例えば、KdV 方程式で記述されるのは空間1次元の波である。運河の様なほぼ1次元と見なせる状況で見つかった孤立波を、KdV 方程式で理解できることはそれほど不思議でもない。しかし、われわれが関心のある大気・海洋のような空間3次元の世界においてはどうかだろうか？

もう一つの厳しい条件として、きちんとした解析解が得られているのは定常な基本状態の場合だということ

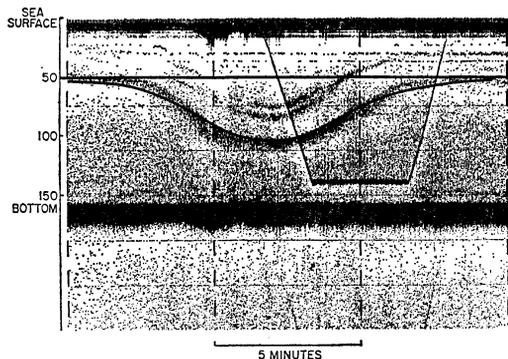
† 例えば第3図に示した2つのソリトンの時間発展は、前出の KdV 方程式で $\alpha=6$ とした場合に次の様に書かれる。

$$u(x, t) = \frac{12\{3 + 4 \cosh(2x - 8t) + \cosh(4x - 64t)\}}{\{3 \cosh(x - 28t) + \cosh(3x - 36t)\}^2}$$

ここで

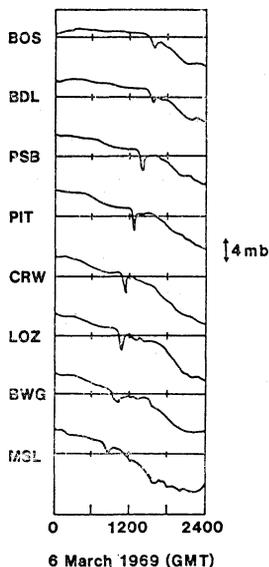
$$\cosh x \equiv \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

波高8と2の2つのソリトンが $t=0$ で波高6の状態に融合し、 $t \geq 0$ で再び2つに分裂する。パソコンが手近にある人は、例えば $t = -0.5$ から 0.1 刻みで $t=0.5$ まで描かせてみてはいかがだろうか。なお、この様な解を求める手法は逆散乱法と呼ばれる。



第4図 海洋の内部波ソリトン [Sandstrom & Elliot (1984)]

サウンダーのエコー記録。実線は KdV ソリトンの波形を当てはめたもの。右側の台形状の線は測器の軌跡である。

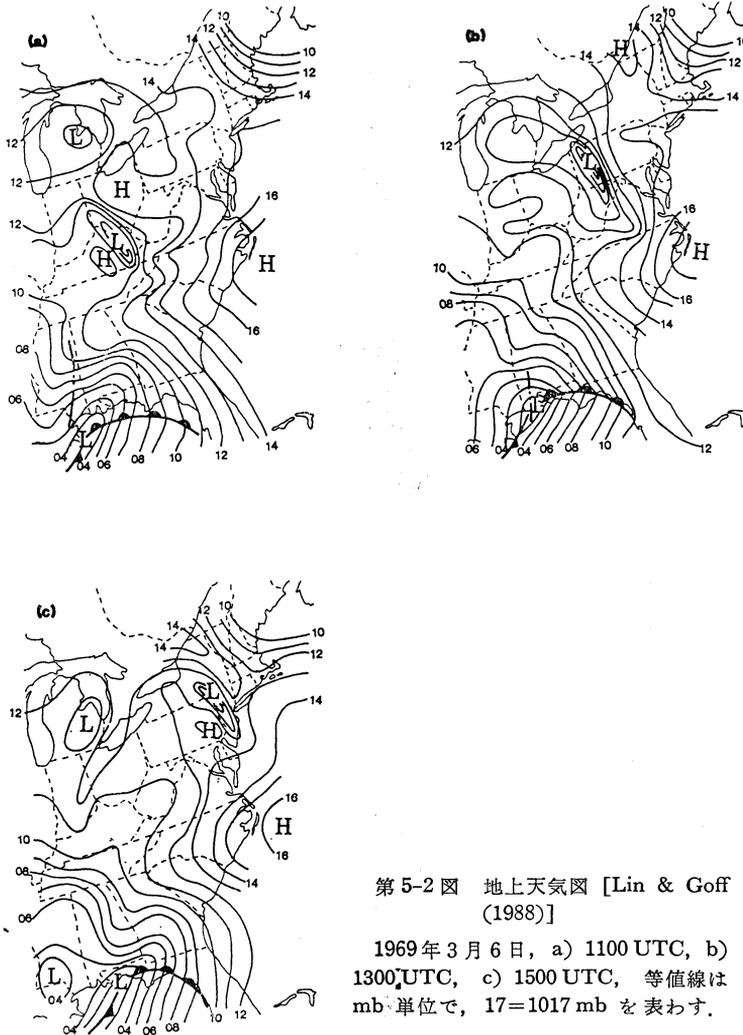


第5-1図 気圧計の記録 [Lin & Goff 1988]

BOS-Boston, MA BDL-Hartford, CT
 PSB-Philipsburg, PA PIT-Pittsburgh, PA
 CRW-Charleston, WV LOZ-London, KY
 BWG-Bowling Green, KY MSL-Muscle Shoals, AL

ある。物理学実験や工業製品の光ファイバーなどの様に一定の基本状態を設定してやる事が可能な場合はともかく、刻々変化する大気の中ではどうかだろうか？

ソリトンと気象現象の議論を行なう上でいろいろ心配



第5-2図 地上天気図 [Lin & Goff (1988)]

1969年3月6日, a) 1100 UTC, b) 1300 UTC, c) 1500 UTC, 等値線は mb 単位で, 17=1017 mb を表わす.

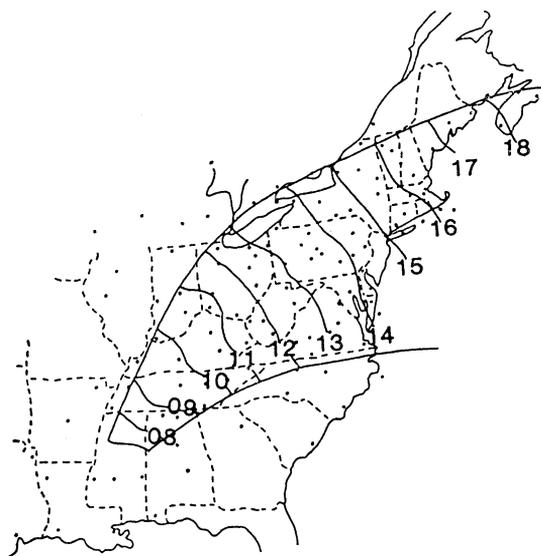
の種が出てきたわけだが、大丈夫。ソリトンはちゃんと見つかっている。次節で、その具体的な観測例をお見せすることにしよう。

4. ソリトンと気象現象

大気中の現象に話を進める前に海洋での観測例を一つだけ紹介しておこう。海の波と聞けば誰もが海面で見られる波を思い浮かべるだろうが、海には温度躍層（サーモクライン）と呼ばれる表層水と深層水を分ける「第2の海面」とでも呼ぶべき層があり、ここを伝わる波がしばしば観測されている。第4図は、その様な波の観測で

見つかったソリトンである。有名な図なので既にご覧になった方も多いと思うが、場所はカナダの大西洋岸ノバスコチア半島沖の大陸棚で、12 kHz のサウンダーによる観測結果である。ソリトンの姿が実に見事に捉えられている。

さて大気に移ろう。第5-1図から第5-3図にメソスケールのソリトンの観測例を示す。1969年3月6日、米国東部を南から北東へ伝播して行ったソリトンで、Lin & Goff (1988) による解析である。第5-1図は気圧計の記録で、V字形のくびれが南部の観測点(図の下の方)から次第に北部の観測点へと伝播して行くのが良くわかる。

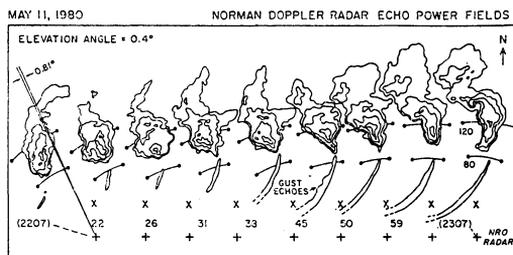


第5-3図 孤立波の等時線と波の境界 [Lin & Goff (1988)]

記入されている時刻は波のトラフの通過時刻 (UTC).

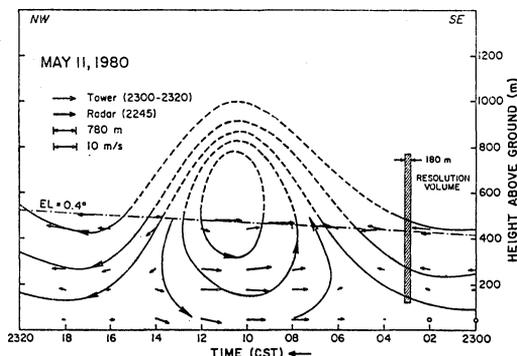
第5-2図は解析された地上天気図で、横長の孤立した低気圧が北東方向に進む姿が描き出されている。第5-3図はトラフの移動をまとめたもので、1,000 km 以上の距離を安定に伝播して行く姿はまさにソリトンである。丁度、この日は対流圏中層に逆転層が形成されており、ソリトンが水平に伝播し易い状況が整っていたと考えられる。また第5-3図からソリトンの発生地点は概ねアラバマからミシシッピ付近と推定されるが、第5-2図を見てわかるように、メキシコ湾の低気圧に伴う活発な対流活動がその原因と考えられる。

それでは次にもう少しスケールの小さなソリトンを紹介しよう。第6-1図から第6-3図は1980年5月11日に米国オクラホマで観測された「ガスト Gust」で、Doviak & Ge (1984) による解析結果である。この地域には、NSSL のドップラーレーダー、観測測器が備え付けられた高さ 444 m のテレビ塔、地上観測ネットワークなどが整備されており、多角的にガストを観測することができるようになっている。雷雲からは、その激しい対流活動に伴って内部重力波が発せられることがしばしば報告されているが、この観測もその様な内部重力波を捉えたものである。第6-1図は雷雲から発せられた線状のガストの動きをドップラーレーダーのエコーの重ね合わせ

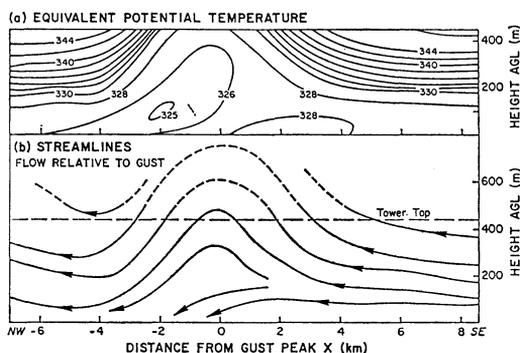


第6-1図 ドップラーレーダーエコーの時系列 [Doviak & Ge (1984)]

雷雲と孤立ガストのエコー (2207 CST~2307 CST) を重ね合わせたもの。+記号がレーダーサイトの位置、×記号がテレビ塔の位置を表わしている。80, 120と書き込まれた孤は、それぞれ 80 km, 120 km の距離の所を示している。



第6-2図 解析された風の間 [Doviak & Ge (1984)]



第6-3図 解析された相当温位及び流線 [Doviak & Ge (1984)]

流線はガストの移動速度で動く系から見たもの。

で示したもので、観測点に向かってくるガストの様子がよくわかるだろう。Doviak & Ge によれば、雷雲までの距離は約 100 km で、雷雲は北東の方向へ約 23 m/sec で移動して行き、一方、雷雲から発せられたガストは南東の方向へ約 13 m/sec で進み、ちょうど観測点に向かって来たわけである。この線状のガストが観測点を通り過ぎた時の解析結果を第 6-2 図（風）と第 6-3 図（相当温位）に示してある。ガストの断面の構造は、既に見慣れたソリトンのものである。

これまで見てきたメソスケールでのソリトン、ガストのソリトン、そして初めにみた海洋の温度躍層のソリトン、いずれも重力を復原力とする波動（重力波）の変種と考えられており、そういう点ではラッセルが運河で見つけたソリトンと基本的に同じで、大気中の現象としては比較的長時間スケールの短い現象である。つまり、基本場の状態の変化の時間スケールが現象の時間スケールに比べて十分長い場合、ソリトンから見ればほぼ定常的な基本場が形成されていたわけである。

中小規模の現象として、これだけ様々なソリトンが見つかる以上、大規模現象にだけは存在しないと言う理由はない。しかし、残念ながら、上で見て来た様に見てソリトンとわかる現象は今のところ見つからない。これは、前節の終わりで述べた 2 つのことが大規模スケールの現象で特に問題になってくるためかもしれない。前者の 1 次元性の問題を理論モデルでは、東西方向と、南北・上下方向とに分けて考え、東西方向のみがソリトンの形をしていると扱っている。また、ソリトンの様にきちんとした時間発展を記述できるわけではないが、孤立して安定な 2 次元の秩序構造としてモドン Modon と呼ばれる高気圧と低気圧がペアになった双極子型の孤立渦も注目されている。後者の問題は大変厄介で、理論的な扱いには成功していない。従って、大規模スケールでのソリトンが今のところ見つからないというのは、これまでに理論的に調べられた範囲においてソリトンと考えられるものが見つからないと言うべきだろう。

この様な理論的未成熟さは承知の上で、ソリトンの一つの特徴である孤立して安定という面に着目し、大規模スケールの孤立して安定な現象との関連を探る研究が現在活発に進められている。その様な大気現象としては、地球対流圏のブロッキングと木星の大赤斑を挙げることができるだろう。

ブロッキングは 1 週間から 3 週間程度安定に持続し、

名前の通りジェット気流をブロックして総観規模の高低気圧の動きに大きな影響を与え、天候不順や干ばつを引き起こす凶凶となるものである。中・長期予報に大きな影響を与える存在だけにかかなり以前からデータ解析が行なわれてはいるが、現象自身の複雑さのためか、ブロッキング現象自身の複雑さのためか、ブロッキング現象の本質的なところがなかなか見えてこないという困った点がある。研究者の中には、同じブロッキング現象と呼んでいる現象も、実は成因の全く異なる別個の現象が入り交じっているのではないかと考えている人もいる。ブロッキングの理論モデルの歴史を振り返れば、1980年代前半には一世を風靡した多重平衡解とその間のカオス的遷移と言う考え方が主流であった。しかし、研究が進められた結果、初めの楽観的な見通し程にはブロッキングの多重平衡解モデルは満足の行くものでないことが明らかにされた。ソリトンやモドンでブロッキングを説明しようという立場は、ブロッキングを局所的な存在として認識し、局所的な安定性の理由を波自身の安定性に帰着させているわけである。ただし、ソリトンモデル・モドンモデルとは言っても上で述べた孤立波動が伝播して行くといった単純な描像ではなく、総観規模擾乱や地形との相互作用の入った、強制系での非線形応答として捉えられている点で純粋なソリトン・モドンとは異なることを注意しておく。ブロッキングについては、上でも述べた様に現象自身についての認識が千差万別の状態にあり、データ解析がもっと進められる必要がある。

木星の大赤斑 Great Red Spot は、17 世紀に発見されて以来、実に 300 年に亘って存在し続けていると言う、まさに孤立・安定な大気現象の王者である。大赤斑に関しては、米国の惑星探査機ボイジャーの観測によって、その基本場がほぼ定常であることが明らかにされており、比較的単純な理論モデルの適用が可能であると思われる。従って、地球流体力学での様々な孤立渦の理論が大赤斑モデルとして登場している。ただ、木星については、理論モデルの束縛条件となる大気的基本的な状態パラメーター（特に対流圏の雲層以下の所）に関する情報が殆ど無く、どの様な枠組みで理論を作るべきかという点が未だに定まっていない。米国のガリレオ計画が実施され、探査機が木星大気圏に突入して観測すれば、この点もある程度ははっきりするだろう。それまではソリトン・モドンを中心とした孤立渦の理論モデルの戦国時代が続きそうである。

以上、駆け足でソリトンと気象現象の関わりについて

見てきた。冒頭で述べたように光通信でのソリトンの実用化も目前に迫り、河や海、大気中でもソリトンは動き回っている。ソリトンは、案外身近な存在であることを知って頂ければ幸いである。

文 献

ソリトンに興味を持った方のために、いくつか文献を紹介して置く。

- 日本語の教科書としては
渡辺慎介：「ソリトン物理入門」培風館
非線形格子を中心に話が進められているので気象屋には読みにくい点もあるが、丁寧に書かれている。
- 英語であればたいへん優れた教科書がある。気象力学を学んだ人には Charney-Drazin の非加速定理でおなじみの Drazin による

Drazin & Johnson (1989) "Solitons: an introduction" Cambridge University Press
クノイダル波から逆散乱法に至るまで簡潔・明晰に書かれている。

- 本文中で引用した文献は
Daviak & Ge (1984): J. Atmos. Sci. 41, 2559-2573.
Lin & Goff (1988): J. Atmos. Sci. 45, 194-205.
Sandstrom & Elliot (1984): J. Geophys. Res. 89, C4, 6415-6426.
Zabusky & Kruscal (1965): Phys. Rev. Lett. 15, 240-243.

なお、ソリトンやモドンと気象現象をテーマとした気象研究ノートの編集が現在進められている。本稿よりもっと詳細に議論が展開される予定なので、興味のある方はぜひこちらをお読み頂きたい。

第11回学術講演会開催案内

記

- | | |
|---|---|
| 1. 日 時：1991年11月28日（木）、29日（金） | 1991年10月15日（火） |
| 2. 場 所：中央大学駿河台記念館
〒101 千代田区神田駿河台 3-11-5
Tel. 03-3292-3911 | 5. 申し込先：
〒101 千代田区神田小川町2-8-6 三恵ビル
日本リモートセンシング学会事務局
Tel. 03-3293-0514 |
| 3. 講演申し込み締切：
1991年9月13日（金） | 6. 参加費：1,000円
予稿集代：4,000円（参加費免除） |
| 4. 予稿締切： | |

地球惑星科学関連学会連絡会の発足

昨夏の地球物理金沢会議（WPGM）をきっかけとして、地球惑星科学関連の諸学会が互に学会活動状況の情報交換を行なうため、去る4月に表記の連絡会が発足致しました。参加学会は、地震学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、日本海洋学会、日本火山学会、日本岩石鉱物鉱床学会、日本気象学会、日本鉱物学会、日本測地学会、日本地球化学会、日本地質学会らの10学会である。

連絡会は季刊のニューズレターを発行することになり、その1号が7月に発刊され、各学会の会長挨拶と学会概要が掲載されました。残念ながら配布部数が極めて少数ですので、関心ある方は学会事務室にて閲覧してください。ただし、主だった情報がある場合には天気誌に転載致します。（総合計画担当）