

## 気象学雑談集 Part II\*

廣 田 勇\*\*

昨年の本誌10月号に「譬え話あれこれ」の題で気象学に関連した雑談集を載せたところ、研究者仲間や学生諸君のみならず他分野の方々からも好意的な読後感想を聞かせていただき欣快の至りであった。加うるに、何人かの人々は、私の筆の及ばなかった部分を敷衍して、大変興味深い御指摘を下された。更にまた、モデル論の余波として、あるシンポジウムの席上、大気大循環モデルの成果に関する講演の冒頭に、モノリザの OHP を示す人さえ現われるに至った。

それやこれやで、いささか悪乗りの気味もあるが、今回は新企画の「気象談話室」に、雑談集の続編を書いてみることにした。この企画の主旨である「教科書には入りきらないような裏話」としてお楽しみいただければ幸いである。

### 1. 地球は円盤

気象学にとって地球の形は文字どおり球 (sphere) である。その効果は、たとえば自転に伴う昼と夜、太陽放射の受けとめ方が緯度によって異なるために生ずる熱帯・温帯・寒帯や極夜・白夜の出現など、中学生にも容易に理解できる。

気象力学としてもう少し高級な例を挙げるなら、コリオリ因子  $f=2\Omega \sin \theta$  の大きさが緯度  $\theta$  の関数であることに起因するロスビー波がある。昨年発刊された気象研究ノート 156 号の「ロスビー波」の第 1 章でロスビー波の系譜を解説したあと、私は結びの一句に「それもこれも、結局は地球がまるいからだ」と述べた。ロスビー波の大もとであるラプラスの潮汐論も、あるいはまたロスビー波の振舞いの一形態である冬期成層圏突然昇温現象も、地球が球体なればこそその好例と言えよう。実際、グ

ローバルな大気現象を考えるかぎり、頭の中に常に地球儀をぐるぐる回しておくことは、地球物理学者として当然のつとめである。

しかしながら、理屈と実感との間にギャップのあるのは世の中で常である。現実には、北半球中緯度に生まれ住んでいる我々にとって、長年の体験に基づく固定観念は仲々拭い切れない。地球のイメージは、球でありながら、一方ではどこかに「非等方性」を内在しているように思われる。

具体的にふたつの事柄を考えてみよう。ひとつは「上下」の問題、もうひとつは「回転の向き」に関することである。

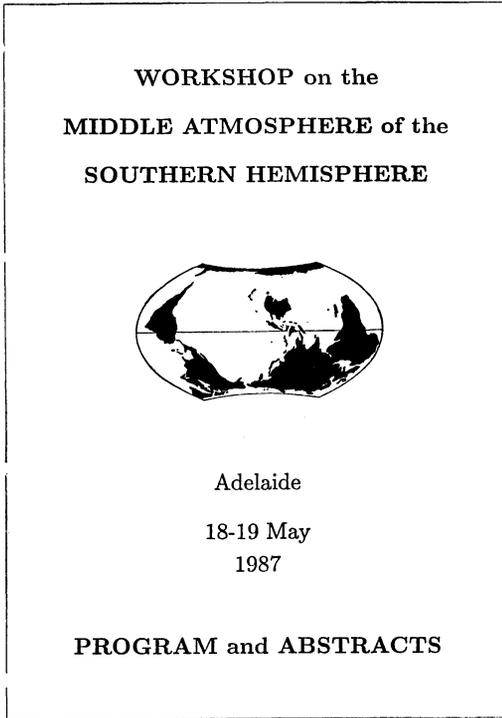
日本語では「北上・南下」と言う。これは言うまでもなく日頃見慣れた地図の描き方に対応している。机上に置かれた地球儀も北半球が上側である。従って、日本人が「地球の裏側」と言う場合、その殆どはイギリスあたりよりもオーストラリアなどを意味しているようである。

さて、このような「北が上」の感覚で南半球に行くかどうか。面白い例を紹介しよう。1979年の12月に、オーストラリアのキャンベラで第17回の IUGG 総会が開かれた。その会議の報告が天気27巻 (1980) の7月号に載っている。その中で瓜生道也氏は「天気予報といえば“明日は北風が吹いて暖くなるでしょう”などといったものもおもしろかった。しかし何よりも驚いたのは、オリオン座がさかさまに見えることであった」と述べておられる。同行した私自身も、太陽が右手から昇り左手に沈んでいくことが、理屈を越えて新鮮に感じられたことを憶えている。

昨年の5月、今度はアデレードで南半球中層大気のワークショップが開かれた。三度目の訪豪だったので異和感は薄れていたが、会場で配られたアブストラクト集の表紙は、やはり地球の裏側に来たことを実感させるに足るものであった (第1図)。

\* Gleanings of the lecture of meteorology.

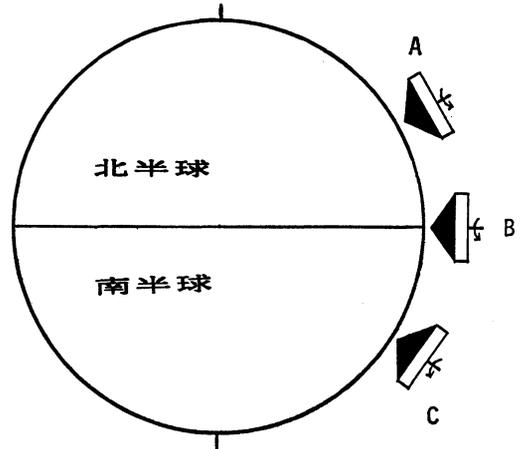
\*\* Isamu Hirota, 京都大学理学部.



第1図 アデレード会議要旨集の表紙

このような地球の上下の問題は、実は、次に述べる回転方向の問題と密接につながっているのだが、その前に余談のまた余談をひとつ：「北が上」の感覚はやはり中緯度固有のものらしい。高緯度ではまた違った見方があるようだ。あるとき（科学者でない）カナダ人の女性と雑談していて、話は米ソ両国間のミサイル核兵器戦争などという物騒な話題に及んだ。そのとき彼女は「カナダの上 (above) にソ連があるから云々」と言ったので、私は慌てて聞き返し、ようやくその意味を理解することができた。確かに、アメリカの上にカナダがあり、その上の北極海のまた上にソ連があるという見方は、ミサイルの弾道を考えれば当然である。私にとっては、不謹慎ながら、カナダ人の政治的危機感よりも、その地理の見方のほうが興味深く思えた。同様な地理的感覚は、南極大陸周辺でもきっとあるに違いない。昭和基地で観測をされたことのある気象学会員に是非一度おたずねしてみたいものである。

さて本論に戻ろう。北半球と南半球の気象の違いは、何と言ってもコリオリ効果が反対向きであることに尽きよう。熱帯性低気圧を例にとれば、北半球の台風やハリ



第2図 地球上のこまの移動 (A→B→C)

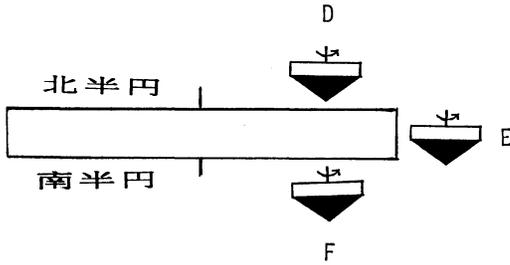
ケーンは反時計まわり（左まわり）、オーストラリア近海のウィリーウィリーは時計まわり（右まわり）に渦を巻いている。これは地衡風を教わった人なら誰でも知っていることである。もっとも、その知識を生半可に使って、「南半球では洗面台の栓を抜くと水は右まわりに渦を巻く」などという俗説が今もって通用しているようであるが、その事はすでに拙著「地球をめぐる風」の第三章で詳しく述べたので、ここでは繰返さない。

コリオリ効果に関連して、地衡風を教わった高校生相手にひとつ質問をしよう。いや、来年度の京都大学の入学試験に出題してもよい。

「フィリピン近海で発生した熱帯性低気圧が、何らかの理由で南下し、赤道を越えてオーストラリアまで進んできたとする。そのとき渦の回転方向はどうなるか？」

予想される答は、

- (1) 角運動量保存則で考えれば南半球に入ってもそのまま左まわりが保持される。（オヤオヤ、そうするとウィリーウィリーは熱帯性高気圧?）
- (2) 赤道上で一旦弱まり南半球に入ってから今度は右まわりの渦となって発達する。（ $f=0$  での解析接続?）
- (3) 上のふたつの答はどちらもおかしい。故に台風が赤道を越えることはない。（見事な開き直り!）
- (4) どうも良くわからないが、赤道附近の準地衡風運動に関しては、Matsuno とかいう偉い人の理論があるそうです。
- (5) エルニーニョは異常気象をもたらすからエルニーニョ年か否かによって回転の向きが異なる。（天国



第3図 円盤上のコマの移動 (D→E→F)

のビヤクネスも驚く)

冗談はとも角、(1)と(2)の答えはあながちナンセンスとばかりは言い切れまい。そこでいま台風をこまに見立て、球面の上をこまが回りながら動く状況を考えてみることにしよう。(雑談に飛躍はつきものである。解析力学におけるオイラーの方程式とかコヴァレフスカヤのこまなどという難しい話は忘れて下さい)

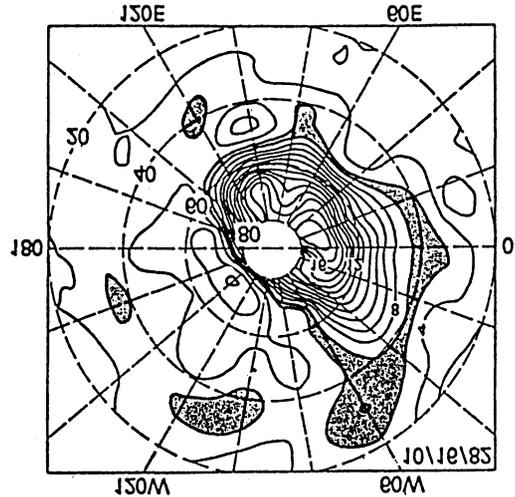
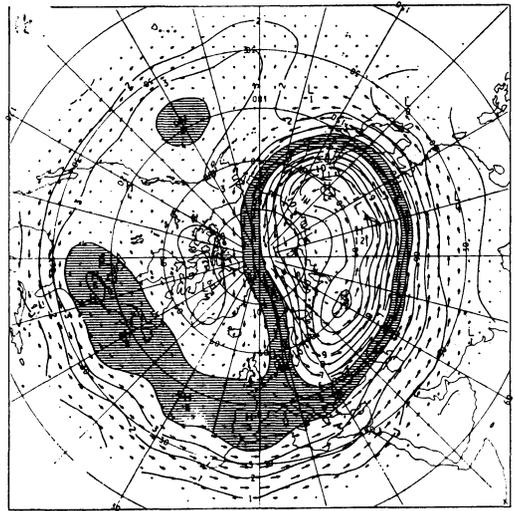
形態的に見て、上記(1)の答えは、第2図のような状況を想定したものと考えられる。これならば確かに北半球で左まわりだったコマの回転の向きが南半球に移ってもそのまま保持されている。地球が球であり、球面(大きさに言えば重力場の作るジオイド面)の上の一様な移動を考えれば、第2図はある意味でもっとものように思われる。

だがこのとき、地球上における「上下」という概念が二重の意味を持っていることに注意しなければならない。そのひとつは、北極が上、南極が下、の意味での上下であり、もうひとつはジオイド面に対する鉛直方向の上下である。

そもそも、水平面上での回転方向が右まわりか左まわりかは、もうひとつの方向、すなわち上下の向きを指定したとき初めて意味を持つ。(私は子供の頃から現在に至るまで、“アサガオのつるは左巻き”というのがどっちの方向から見ての話なのか悩んでいる)

第2図のこまについて見れば、AとCとでは回転軸の向きが、瓜生氏のオリオン座さながらに逆転している。これを「北極が上」の立場を固持して見直せば、Cのこまは南半球でちゃんと右まわりになっているのではないか!

AとCのこまが中緯度にあり、軸が中途半端に傾いているのが気に喰わなければ、いっそのこと、地球を平たく押しつぶし、第3図のように考えてみてはどうだろうか。球を押しつぶして円盤にした利点は、緯度を無視



第4図 北半球(上)と南半球(下)のQ-mapの比較(南半球のmapが裏がえしであることに注意)

するばかりでなく、ジオイド面という概念を消滅させ、従って重力に対する鉛直方向を考えなくて済むところにもある。

第3図では、こまはジャイロコンパスと同様に、回転軸を常に北向き(上向き)に保っている。このとき、南半球に立っている人から見て、第3図のこまFが右まわりなのは、第2図Cの場合よりもはるかに自然に感じられよう。第3図のイメージは、まさに先ほどの解答(2)に対応している。

ここまで説明すれば、結局私が何を言いたかったのか御賢察いただけるものと思う。そう、これはこまの力学の話ではなく、南北両半球の天気図の見方に関するひとつのヒントなのである。

南半球では低気圧のまわりを時計まわりに風が吹く云々、というのは要するに南半球天気図を南極側から見おろした場合の話であって、もし第3図の円盤を透明なガラスで作し、両半球の天気図をとともに北極側から重ねて見れば、気圧場に伴う渦回転の様子は、第3図のこまDとFのように、全く同じに見えるはずである。

アデレードでの会議の席上、英国気象局のO'Neillは、渦位の分布図(Q-map)を用いて南北両半球成層圏循環の比較を行った。そのときO'Neillは、南半球Q-mapのOHPをスッと裏返して見せた(第4図)。彼もまた、地球をガラスの円盤に見立てたのである。

## 2. 対称性とその破れ

何やらまた大げさな題であるが、素粒子論のパリティの話ではない。

上に述べた北半球と南半球の話は、3次元空間における対称性(あるいは反対称性)の見方についてであり、座標系に関する右手系左手系の話と結局は同じことであった。その発展として、今度は対称性が破れる話をしよう。

先ごろ、私の研究室で気象衛星ひまわりの全球写真を一年分つないだムービー・フィルムを入手し、早速上映してみた。この種の映画は何度見ても楽しいものだが、問題は上映後の話である。

映し終ったフィルムを、映写機のライトをつけたまま巻き戻すと、スクリーンには時間の反転した映像が動いてゆく。私は早速、傍らで一緒に見ていた院生諸君に質問した。「もしこの画像から地図を取り除き、上下さかさまにしたら、先ほどの通常の映写と同じに見えないだろうか?」(どうか皆さん、当世流行のイメージトレーニングよろしく、目を閉じて頭の中に反転映写を試みて下さい)

季節は問わない。通常の上映では、北半球が上。従って雲の動きは、南北両半球とも中高緯度の偏西風帯に沿って左から右に向う。熱帯域では逆に右から左に偏東風波動がITCZ上を進む。逆転映写でも上下さかさまに見るかぎりこの事情は変らない。その上、本来南半球で右まわりだった低気圧性渦が、今度は上側(みかけ上の北半球)でちゃんと左まわりに回転している。

もし、熱帯貿易風・中緯度偏西風・移動性高低気圧、と言ったテレビの天気予報解説程度の知識の人々にこの逆転映画を観せたら、多分そのまま騙し通せるに違いない。(ナチスドイツの宣伝相ゲッベルスといえども、これほどに大衆の眼を欺く映画は作れなかったろう)

種あかしはきわめて簡単である。最も単純化した運動方程式

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

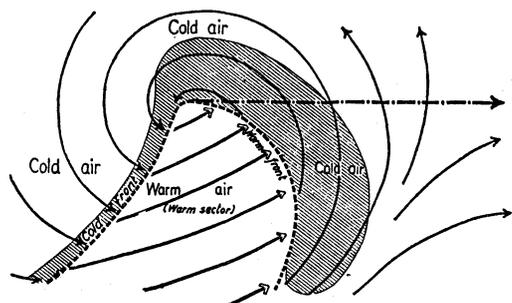
において、時間と空間の座標  $(t, x)$  を  $(-t, -x)$  に反転しても(1)式は依然として成り立つ、というだけの話である。フィルムの逆まわしが  $t \rightarrow -t$ , 上下さかさまに見ることが  $x \rightarrow -x$  を意味することは言うまでもなからう。

しかしながら、ひととおり気象学を学んだことのある人がこの逆転映画を見れば、何かおかしいことに気づくかも知れない。順転と逆転とはどこが違うのか。その違いこそ、大気現象の本質的な特徴を表わしているに相違ない。(プロ中のプロが心眼をこらして赤道域を見れば、東進するケルビンモードと西進する混合ロスビー重力波モードの結合した Gill パターンが逆転映画では全く反対に見えるが、いまはそれほど高級な話をしているわけではない)

比較的容易に気付く相違点のひとつは、熱帯性擾乱の極向き運動(つまり台風の北上)とかプラネタリースケールの波の谷の東側にあるストームトラックなどであろう。個々の低気圧をもう少し細かく見れば、逆転映画では、(本来 warm advection であるはずの)トラフの前面の雲は薄く、寒気団中の雲のほうが濃い。

もし、大気中のあらゆる現象が波動(またはその集合体)として完全に記述できるのであれば、このようなことは起らないはずである。単純化して言えば、 $\cos(kx - \omega t)$  で  $(t, x) \rightarrow (-t, -x)$  としても  $\cos(-kx + \omega t) = \cos(kx - \omega t)$  であり、 $\sin$  の場合も位相を  $90^\circ$  ずらせば同じことである。つまり、理想化された波ではプラスとマイナスが常に対等なのである。

ところが、雲を伴う現象は、かならずしもプラスとマイナスが対等ではない。温暖上昇域には雲が生ずる(プラス)が、寒冷下降域は雲がない(ゼロ)。早い話が、マイナスの雲量などというものは存在しない。レイリー・ペナル対流では、線型で考えるかぎり上昇と下降のプラスマイナスは対等であるが、雲を伴う対流では上昇と下降が非対称になっている。古典的なノルウェー学派の低気圧模式図の意義はまさにこの点にあると言って



第5図 ノルウェー学派の低気圧模式図

良い(第5図)。それに比べれば、傾度風を考慮した高気圧と低気圧の非対称性などは些細な差異にすぎない。

上昇下降と雲の問題は地球全体で考えるとき、更に別の興味ある観点を与える。ひまわり全球写真に見られる地球上の全雲量 (cloud coverage) が常にほぼ一定 (50%) であるのは何故か? 単純に質量保存則で考えれば、上昇域と下降域の面積が等しいからだ、とも言えそうだが、それなら雲量 100% の金星や木星ではどうなっているのか、地球のアルベドの値 (0.3) を決めていた最大の因子は雲である。その総量を規定しているメカニズムを説明できないかぎり、とても気候など理解できるはずがない。

いずれにせよ、雲を伴う現象の持つ時間空間の非対称性は気象学にとって本質的な問題である。類似の現象についてはまた後に触れよう。

対称性の破れとして、ひまわり逆転映画に見られるもうひとつの特徴は、不可逆過程である。その昔、私がまだ大学院生だった頃、気象庁数値予報関係者を中心とした NP グループというのがあった。その月例会の中で、こんな質問を聞いたことがある。「もし、きょう現在の初期値 (観測値) が十分精度良く与えられたとして、昨日の天気予報ができるか?」

不可逆過程の代表例は拡散現象である。エントロピー増大則も同じこと。単純な例として(1)式に拡散項を加えた式

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \kappa \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

を考えれば、これは時空の反転  $(t, x) \rightarrow (-t, -x)$  に対してもはや成り立たない。強いて(2)式を用いて過去に遡ろうとするならば、(2)式右辺第2項において拡散係数を  $\kappa \rightarrow -\kappa$  としてやらなければならない。

だがしかし、拡散係数 (或いは粘性係数) を負にするとは一体どういうことか。ここで1950年代の大気大循環論を思い出してほしい。対流圏中緯度ジェットの角運動量が、強い水平シアにもかかわらず、南北に拡散せずむしろ集中化傾向を持つことの説明として、Starr は "negative viscosity" という概念を提出した。その意味するところは、傾圧不安定波動に伴う水平運動量輸送  $\overline{u'v'}$  が counter gradient であることの言い換えである。だがこれは、 $\overline{u'v'}$  と  $\partial \bar{u} / \partial y$  が同符号であるという観測事実の指摘であって、本来傾圧波がそのような作用を持っているはずであるという説明とはちがう。(この事情は、拙著「大気大循環と気候」(東大出版会, 1981) の64~65ページに詳しく述べてある)

「負粘性」が大規模波動のもたらす結果的作用である以上、それをもとの方程式に立ち返って(2)式の  $\kappa$  をマイナスに置きかえるだけでは表現できない。つまり、予報方程式系を時間に関し逆方向に積分して今日の初期値から昨日の天気を決めることは出来ない相談だということになる。逆転映画が幾分か不自然に見えることの一端は、雲の生成・消滅がこれと同様な意味で不可逆であることに起因しているといえよう。

ここに述べたような時間の非対称性 (不可逆過程) の現象例は、ひまわり雲写真のみならず、たとえば中層大気における内部重力波の砕波・減衰に伴う波動平均流相互作用とか、プラネタリー波の breaking によるオゾンの極向き輸送等々、現代的な問題の中にも数多く存在しているのである。

私はこれまでに、あちこちの機会を利用して「気候モデルとか気候変動とかの言葉があまりにも安易に使われすぎている」と批判し続けてきた。大気科学にとって「時間」という概念をより深く考えねばならないことの警鐘として、この節で述べたひまわり逆転映画の話はひとつのヒントになるものと思われる。

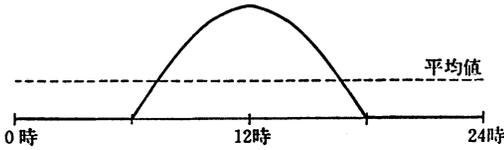
### 3. 三角函数の片割れ

再びプラスとマイナスが非対称である場合の話に戻ろう。

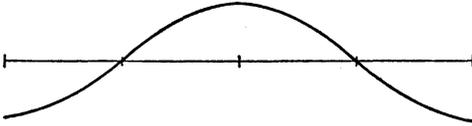
$f(x) = \sin x$  をフーリエ展開せよ、と言われたら、この式自身が答えですと言えば良い。ところが、先に述べたように、大気に関連した事柄の中には、すべてが  $\sin x$  (或いは  $\sin t$ ) だけで表わせるとはかぎらないものが多い。

そのひとつの例は、地球の自転と太陽放射加熱の問題

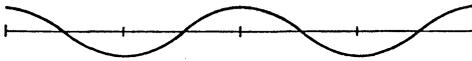
## a 太陽の加熱



## b 24時間周期



## c 12時間周期



第6図 太陽加熱の平均値からのずれが24時間周期成分と12時間周期成分の和で近似されることの模式図

である。自転のため、地球上には昼と夜が生ずるが、昼と夜は決して単なる裏返しではない。昼の加熱はプラスだが、夜のそれはマイナスではなくゼロである（いま長波放射冷却は考えていない）。

そこで今度は

$$h(t) = \begin{cases} \sin t & (0 \leq t < \pi) \\ 0 & (-\pi \leq t < 0) \end{cases} \quad (3)$$

のフーリエ展開は？ の質問が意味を持つてくる（第6図）。

計算以前の問題として、まず、プラスとゼロの和だから、平均してプラスの成分があることはすぐわかる。同様に、たとえ昼間だけにせよ、加熱が1日1回最大値を持つただから24時間周期成分（すなわち  $\sin t$  に比例する部分）があることも間違いない。問題はその残りの部分である。

(3)式のフーリエ展開はそれを勉強した初心者にとって恰好の練習問題であるが、答を書いてしまうと、

$$h(t) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin t - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nt}{4n^2 - 1} \quad (4)$$

である。

すなわち、直流成分は最大値(=1)の約3割(1/π), 第1成分(24時間周期)は丁度5割(1/2)であることが

わかる。

第2成分(12時間周期)の振幅は  $2/3\pi$  だから2割程度。その次はずっと小さくなって  $2/15\pi$  ( $\approx 0.04$ )。つまり、第6図に見られるとおり、この  $h(t)$  の変動部分は1日周期と半日周期の和だけで非常に良く近似される。

このような「サイン関数の片割れ現象」は、すでに述べた雲の有無や昼夜の非対称のみならず、他にもいろいろと考えられる。地軸と公転面の傾きに起因する高緯度日射の白夜と極夜、大循環の下端境界条件としての大陸と海洋、突然昇温のような波の伝播と臨界層吸収、マイクロ過程としては境界層でのプルームによる顕熱輸送とか雨滴の併合落下、等々枚挙にいとまがない。

大気物理学にとって最も重要なものは、(4)式で表わされるフーリエ展開を、単なる数学的な表現形式と見るか、それとも展開の各成分に物理現象としての意味を持たせ得るか、という点にある。同じことは、ある種の流体運動の振舞いを知るために行う数値実験において、格子点を用いた差分法のかわりにフーリエ展開を使う所謂スペクトルモデルを、単なる計算上の便法と見るか否か、についても言える。さらにまた、時系列データにスペクトル解析を施したとき、結果的に現われてくる卓越周期をどう解釈するかという問題とも共通している。

「片割れ三角関数」が物理的に意味を持つ最も良い例は大気中に見られる一日潮と半日潮の話である。歴史的に見て、大気潮汐論は熱帯地域における地上気圧の半日周期振動の発見に始まった。基本的には1日1回の太陽加熱がどうして1日2回の振動のほうをよりよく励起させるのか、1966年に Kato と Lindzen によってこの問題に見事な解答が与えられたいきさつは、すでに拙著「地球をめぐる風」の第九章に詳しく述べた。半日潮の本質が、第6図に見られるとおり、太陽加熱の昼夜の非対称性にあることはもはや繰返すまでもなからう。

## 4. むすび

ここまで書き進んできて気がつく、最初は「肩の凝らない話」だったはずの雑談が、ついつい力んでしまい、書き手のほうの肩もいささか凝ってきた。それでこの雑文の最後に、私の好きなあるエピソードを書きとめておこうと思う。

昨年暮に急逝した将棋の芹沢博文九段は名うての酒豪だったが、あるとき将棋連盟近くの酒場でへべれけに酔っているところへその日負けた若手棋士が入ってき

て、これこれこういう将棋でしたと語ったところ、芹沢九段は一瞬にしてその敗着を指摘したという。

気象学も同じことではないかと思う。四角四面の学会発表や印刷論文よりも、私は酒を飲みながらの雑談の中にキラリと光る言葉を見つけることのほうが好きである。私にとって、地球と大気は、いつどんな角度から眺めても、旨い酒の肴のように遊びごころを楽しませてくれる。そしてそのような遊びごころの中にこそ本当の学

問があるのではないかと考えている。

これは決して教科書的な勉強を否定しているのではない。テキストに書かれている事実や知識を正しく理解することは学生にとってのイロハである。問題はそれをどう活用するかである。この気象談話室シリーズが、そのような意味で気象の世界の翼を自由にひろげるひとつのきっかけとなることを願っている。

日本気象学会誌 気象集誌

第II輯 第66巻 第1号 1988年2月

野田 彰：一般座標系における GLM (一般化されたラグランジ平均) 記述

田平 誠：大気中におけるインフラソニック波の長距離伝播に関する研究

(I) 熱圏ダクト内を伝播する火山性インフラソニック波の観測

田平 誠：大気中におけるインフラソニック波の長距離伝播に関する研究

(II) 熱圏ダクトの伝播における波形変化の数値的研究

斎藤 定・田中 浩：前線付近に発生する帯状降雨域の形成メカニズムとしての条件付対称傾圧不安定の数値実験 第II部 水蒸気補給の効果

大西外史・板東 聡：相模平野における冬の海陸風について 2. 三次元モデル

鬼頭昭雄・山崎孝治・時岡達志：アフリカ熱帯多雨林の土壌水分及び地面アルベドの変化が夏季気候に及ぼす影響 —MRI・GCM-1 による数値実験

児玉安正・浅井富雄：GMS 赤外雲画像を用いた雲の広域分布とその季節変化の解析

Ramasamy Suppiah：インド洋の海面水温とスリランカの降水量との関係

住 明正・豊田威信：チベット高原付近の大気の流れの観測的研究

菊地勝弘・堀江成人・播磨屋敏生・近野好文：北海道オロフレ山系の山岳性降雨

山本 晋・蒲生 稔・横山長之：混合層上部における比湿の鉛直分布および水蒸気交換過程の飛行機観測

伍 培明・小野 晃：都市大気における個々の硝酸イオンを含むエアロゾル粒子の特性X線分光分析

荒生公雄・田中正之：太陽周辺光の測光学的特性と色度特性

要報と質疑

Richard S. Lindzen・Ka-Kit Tung：高橋正明：過剰反射のないシアア不安定について

(気象集誌64巻793-80ページ) へのコメント

高橋正明：回答 (Lindzen and Tung のコメントに対して)

斎藤和雄・馬場 厚：GMS 観測に基づく相対湿度と雲量の統計的關係

榑原 均・石原正仁・柳沢善次：1984年1月の豪雪期間に北陸西部で観測された中規模降雪系の分類