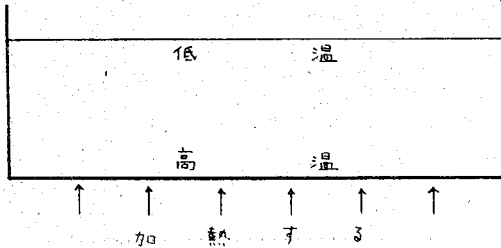


# 熱対流について (I)

山口七郎\*

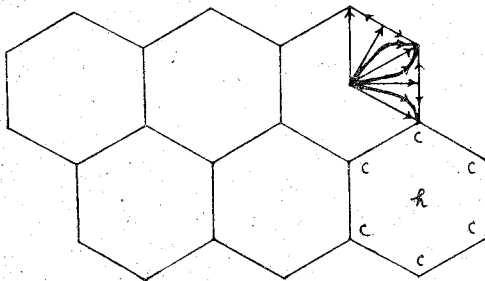


第1図 熱対流は容器に入れた流体を下から加熱するか、または、上面を冷却するとき生じる。

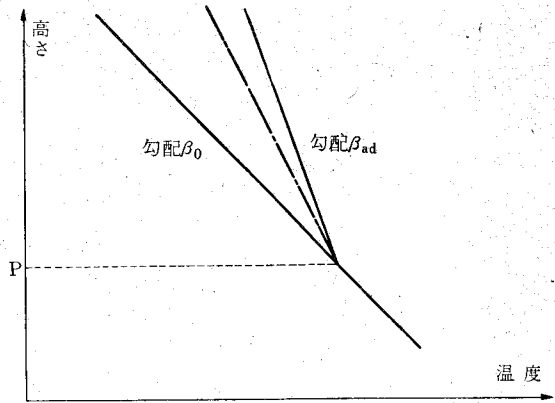
## § 1. 熱対流のいろいろな例

### a) 実験室の熱対流

熱対流は、水などの流体を鍋（容器）に入れて火にかける時に見られるように、日常によく起きている現象である。第1図のように、流体の下部分が熱せられると、流体の層は下の方ほど高温になり、熱は温度の低い上層の方へ流れて行く（熱伝導）。しかし固体とちがって、流体が下から熱せられる場合には、熱伝導だけで、熱が運ばれるのではない。高温な下層は上層より一般に密度が軽くなり、冷たい上層の流体は重くなる。そこで、熱い流体の塊りは上方へ浮き上り、上の冷たい流体の塊りは下へ沈む。これは結局、熱が上方へ運ばれていることであり、流体の大きな塊りによる運搬であるから、熱伝導（分子）による運搬より、ずっと熱を運ぶ効率が高い。これが、熱対流（thermal convection）と呼ばれる現象である。Convection なる語は、*convectio*（一緒に運ぶ）から造った由来が、チャンドラセカールの教科書（1）にのっている。



第2図 対流細胞の一部分。矢印は表面における流線。hの部分は熱い流体がわき出て来る所。cの部分は冷たい流体が沈んで行く所。



第3図 大気中のある点Pからガス塊が上昇をはじめたとき（ $\beta_{ad}$ に近い——に沿って）周囲より熱くなる場合。

そうして、対流の生じている流体層を上から見ると、浮き上る部分と沈む部分が交代に分布し、対流細胞と呼ばれる多角形の模様が生ずる（第2図）。なお日常においてもっともこの対流細胞にお目にかかれるのは、お椀につがれた味噌汁であることを、もの珍らしいことの好きな読者の方のためにつけ加えておく。

### b) 地球大気における熱対流

熱対流の現象は自然界にもしばしば起っている。上へのべたように、液体や気体の層において温度が下へ行くほど高くなっている（この割合—温度勾配を $\beta_0$ とする）場合には、この熱対流の現象が起こる可能性がある。気体の場合には、下層の熱いガスの塊が上昇して行く時に膨張するので温度が下がる。この下がり方は断熱的にガス塊が上昇する場合がもっともゆるやかである（この場合の温度の下がる割合を $\beta_{ad}$ とする）。したがってこのガス塊が上昇するためには、周囲の温度の下がり方 $\beta_0$ よりも、ガス塊の温度の下がり方（ $\geq \beta_{ad}$ ）の方がゆるやかでなければならない。すなわち少なくとも、 $\beta_0 > \beta_{ad}$ でなければならない。逆に $\beta_0 < \beta_{ad}$ ならば、そこでは対流は発生しない。この不等式を、天体物理学の方ではシュワルツシルドの判定条件と呼んでいる（第3図）。

ある種の雲（積雲または対流雲）は、地面が広い範囲にわたって熱せられ、水蒸気を含んだ空気が上昇し、上層に達して冷却するために生じる。この場合、空気が下降する部分もなければならぬので雲は一定の間隔をおいて生じ、やはり対流細胞に似た模様が見られる。

\* 京大理  
S. Yamaguchi; On Thermal Convection.

また台風は、赤道付近（北緯5~20度）の海面が熱せられるために、上昇気流が起こり、地球の自転のために水平な渦となることによって生ずるといわれている。

### c) 太陽における熱対流

星はすべて内部ほど高温でなければならないので、熱対流の発生する可能性がある。星の中でもっともわれわれに近い太陽についてはどうであろうか、太陽の表面をシーイングのよい時、望遠鏡で見たり写真にとったりすると、米粒状の粒のようなもの（granule）が、一面に分布していることが以前（19世紀後半）から知られていた。理論的な研究から、太陽の表面近くで対流が発生し得ること（ $\beta_0 > \beta_{ad}$ ）がわかって、この米粒状の模様（granulation）は、太陽面上に実在する対流細胞から成っていることが推定された。また実際に、この模様の各部分が上下運動をしていることが、スペクトル線のドップラー変位からわかった。とくに米国では1957年から、望遠鏡を気球にのせ成層圏から太陽の写真を撮るといふ画期的な観測がはじめられた。この写真には、鮮やかに多角形状の対流細胞がうつっている。この対流細胞は直径も小さいものは300 kmから大きいものは2000 kmまでいろいろある。形も不規則な多角形をしており多角形の辺に当たる部分が暗く写っている。そうして数分の間しか同じ細胞は存在しない。写真上の模様として写っている明暗は、太陽面上のこの対流細胞における温度の変動によるもので、その平均の振幅は100°K以内と推定されている。

またレイトン（2）は、線スペクトルの光で観測して、太陽面上のガス塊の視線方向の運動を写真上の明暗（近づいている部分が明るく、遠ざかっている部分が暗くなる）の模様としてとらえることに成功した。この場合、線スペクトルの光を使っているので、上にのべた granula-

tion（連続スペクトルの光で観測した）の存在している所よりも少し上層のガス塊の運動を観測していることになる。この観測の結果、太陽の上層部に大きさ数千 kmの模様があり（速度場）、約300秒の周期で振動している（明暗が変化していってもとの明暗の模様に戻る）という重要な結果がわかった。これは音波の場と解釈され、下層の対流運動によって発生し、上層へ伝播して彩層、コロナをエネルギー的に支えていると考えられる点で重要な観測事実である。しかし熱対流そのものではなく、熱対流から派生した二次的な運動である。

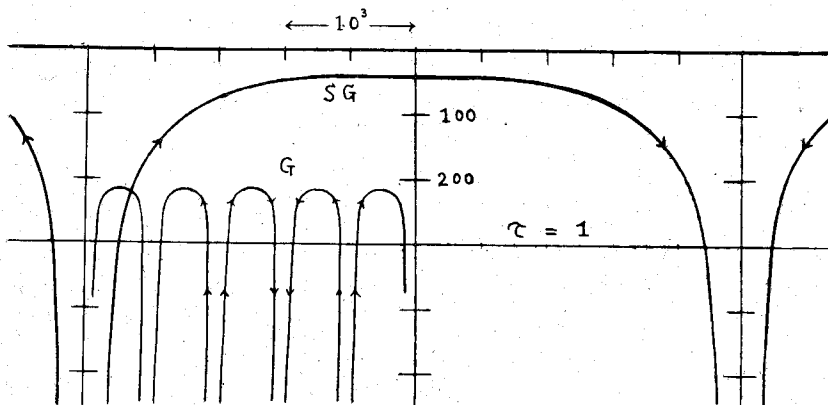
またレイトンは、上にのべた短い周期の振動的な運動は消えるように工夫してもう一度太陽面のガス塊の運動を模様としてとると、寿命の長い（20時間）大きな（35000 km）模様（速度場）が存在することがわかった。これは太陽面において水平方向の運動であることがわかり、大きな対流細胞の上端であると解釈され super granulation と名づけられた（第4図）。

### d) 星における熱対流

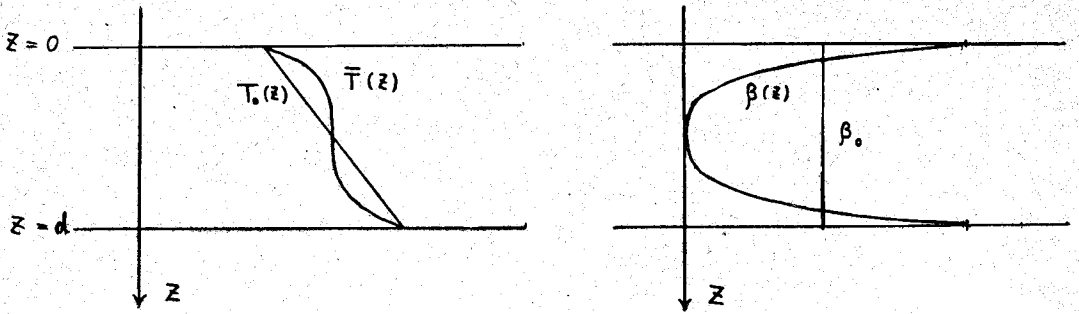
太陽面でも、こまかい模様が見分けられないように望遠鏡の分解能を下げたおいて、太陽面の線スペクトルを調べると、線スペクトルは、分子の熱運動以外に、ガス塊としての運動のために、広げられている。このようにして、間接的にも、太陽面上にガス塊の運動があることが推測される。その他、速度場と温度場の相関によって、線スペクトルは紫方変位および線のリンククの左右非対称を生ずる。

星については、太陽のように、中心付近から端の部分と分けて観察できず、星のわれわれの方に見えている半球の全面の光を観測することになる。そうして、すべての星は自転している可能性があるが、自転軸の向きはわからない。この自転によるスペクトル線の広がりも考慮しなければならない。このように星の線スペクトルの分析はむづかしくなるが、種々の型の星の線スペクトルの分析が行なわれ、ガス塊の運動によってスペクトル線が広げられていることが推測され、その平均の速度（乱流速度と呼んでいる）も測定されている。

H-R 図上のおのおのの星に対する乱流速度の観測値を説明するには、この各種の星に、ガス塊の運動源としての熱対流がどの程度生じているか、またこの熱



第4図 太陽における Granulation G と Supergranulation SG の想像断面図。ただし、Gの直径は10<sup>3</sup> km、SGはGの10倍（実際は35倍）としてある。縦方向は横方向にくらべて5倍ひきのぼして画いてある。



第5図 a. (左) 対流の実験における初期の温度分布  $T_0(z)$  と対流が生じた後の温度分布  $\bar{T}(z)$   
 b. (右) a に対応する温度勾配

対流から乱流、音波などの2次的な運動がどの程度生じるか、を理論的に知る必要がある。逆にこれによって線スペクトルの分析による星の大気の状態の推測も、一層正確になることであろう。また星の彩層、コロナの構造を知る上にも、上にのべたような熱対流の理論的研究は意義がある。

§ 2. 実験室の熱対流

a) 実験結果

対流の実験は、第5図のように、二枚の水平な板（真ちゅう、銅）の間に流体を入れ、上下の板の間かく  $d$ 、および温度差  $\Delta T$  をいろいろかえて、対流の様子（平均の速度、平均の温度変動、平均温度分布  $\bar{T}(z)$ 、熱流量  $H$ ）を見る。とくに熱流量は、簡単に測定できるというだけでなく、重要な量である。

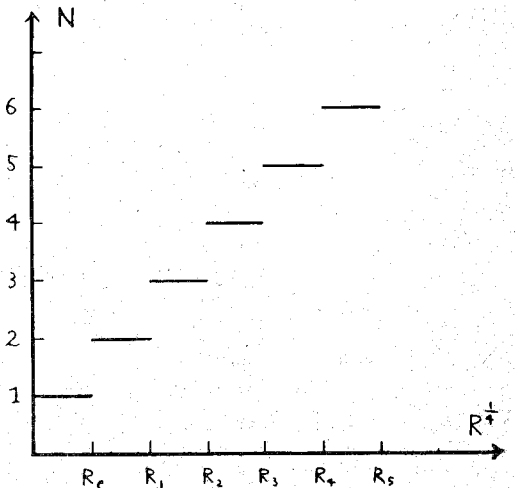
熱対流の問題を無次元の形にする（方程式一後出—を無次元化する）と、与えられる量は、レーリー数  $R(\propto \Delta T \cdot d^3)$  とプラントル数  $P$ （粘性係数と熱伝導係数の比で、流体の種類で定まる。気体では1に近い。）の二つである。熱流量  $H$  を無次元化したものが Nusselt 数  $N$  で、熱伝導による熱流量  $H_0(\propto \Delta T/d)$  を単位として  $H$  を測ったものである。この無次元化した  $N$  は  $N(R, P)$  となっているはずである。問題はこの関係を決定することである。

対流についての実験結果を要約すると、つぎのようになる。

- (1)  $R=R_c(\approx 10^3)$  で対流がはじまる。  
 $R_c$  は境界条件（上の板の有無）によって異なる。 $R_c$  は  $P$  に無関係である。
- (2)  $R=R_c$  において、 $N(R)$  が不連続に増加する。
- (3) 対流細胞は  $R \geq R_c$  では正六角形で、その大きさは深さ  $d$  に対して、きまった大きさとなる。
- (4)  $N(R)$  の不連続な増加は、 $R_c < R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5(\approx 10^6)$  の6個の  $R$  の値に対して観測されている。（実際は、 $d$  を固定して  $\Delta T$  を増

して行くと  $H$  の増加の割合— $H(\Delta T)$  の勾配—が不連続に増加する現象が観測されている。 $N$  は  $H$  を  $H_0(\propto \Delta T)$  で割ったものであるから第6図のようになる。 $H_0 \propto \Delta T/d$  を固定して  $R \propto \Delta T \cdot d^3$  を増加させると  $H$  自身が不連続に増加するはずである。）

- (5)  $\bar{T}(z)$  は第5図に示したように、温度を固定した両板の近くで勾配がきつくなり、真中付近では、ほとんど一定になる。これは  $R$  が大きいほどその傾向を増す。これらの間の領域での  $\bar{T}(z)$  の形は双曲線である。
- (6)  $N=0.069 P^{0.074} \cdot R^{\frac{1}{2}}$  ( $P > 0.04$ , 水銀.  $R < 10^{10}$ ) しかし  $R < 10^6$  では、 $N \propto R^{\frac{1}{2}}$ 、という観測もある。上の式は、多くの観測を実験式としてまとめたものである。
- つぎに非定常性に関する性質。
- (7)  $N$  における2回目の変化の起こる  $R_1(\approx 1 \sim 3 \times$



第6図 無次元化した熱流量  $N$  の  $R$  に対する不連続な増加。横軸は  $R^{\frac{1}{4}}$  の尺度で目盛り。

10<sup>4</sup>)において、または  $R_c(\approx 5 \times 10^4)$  において、速度場が乱れて来る。これは水 ( $P=7$ ) の場合。

- (8)  $R$  が大きくなると、対流細胞の形は不規則多角形になり、大きさもいろいろある。そうして有限の寿命 ( $\approx$ 流れが1循環する時間) になる。
- (9) 光学的な方法で、温度場を観測していると、 $R \approx 4.5 \times 10^4$  で、時間的な変動がはじまる(水の場合)。空気 ( $P=0.77$ ) に対しては、 $R=5000$  である。 $R/P$  を計算してみると一定(6400)である。以上は一つの実験に関するもので、確かめられてはいない。

以上の三種の乱流性の出現する  $R$  が互いに一致するかどうか、またその値も確かめられていない。またこの  $R$  が  $P$  によるのかどうかははっきりしてない。 $R/P$  には熱伝導係数が入って来ず粘性係数のみが残るので、乱流の出現を決める量は  $R/P$  であるという説もある。しかし  $P$  が小さいと  $R=R_c$  でも  $R_c/P$  はいくらでも大きくなるのでこの説は一般には成り立たない。

- (10)  $R \approx 10^6$  で、 $N \propto R^{\frac{1}{2}}$  から  $\propto R^{\frac{1}{3}}$  に変わり、対流の性質も変わることが観測されている。

つぎに以上の事実を理論的な面から考察する。(次号に続く。)

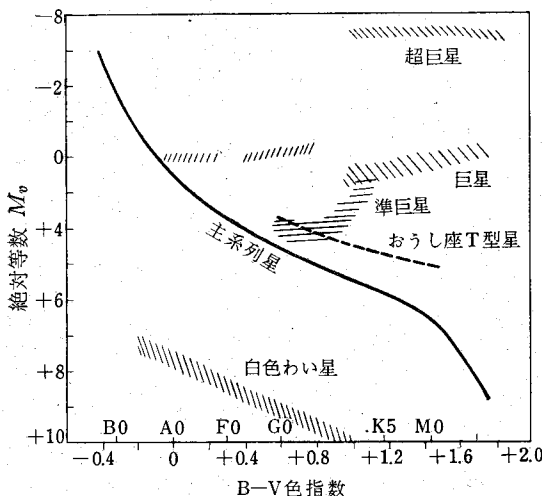
## お う し 座 T 型 星

橋 本 敬 造\*

### 1. はじめに

HR 図をみると主系列星とはほぼ平行でこれより 2~3 等級明るい一連の星がある。これがおうし座T型星である。これらの星はさまざまな興味ある現象を示す。これらの星の代表的なものは、この名の示すようにおうし座Tという星である、この星は 1852 年イギリスのヒンドが、これをとりまく星雲を観測しているときに変光星であることを発見した。その後、同じような性質をもつ多

くの星が発見されたが、これら一群の星の代表的なものというわけでおうし座T型星という名称が生じた。おうし座Tそのものは非常に不規則かつ迅速な変光を示す。これについて一角獣座のRとか南冠座のSが、同じく星雲の観測中に不規則な変光を示す星であることが発見されたが、この種の星の研究が本格的になされ始めたのは、1940 年代の A. H. ジョイの統一的な研究の後のことである。一連のおうし座T型星の研究はジョイ以降三つの段階を経たと考えることができる。まず、ジョイはこれらの星のスペクトルの様子と測光の結果から、つぎのような特長を示した。それは明るいにしろ暗いにしろ星雲を伴うものである。そのスペクトルに輝線をもつ変光星であるという点であった。40 年代後半になっておうし座Tの現象は、通常の星が星雲の中を通過するとき、周囲から物質を受けとって大気が物理的に変化をしこれに対応して起るのだと考えられるようになった。こ



第1図 HR 図におけるおうし座T型星の位置

表1 代表的なおうし座T型星

	実視等級	変光範囲	スペクトル型
駝駝座 RW	9.0-12.0	3.0等	G 5
"  SU	9.7-11.3	1.6	G 2
南冠座 S	10.8-12.5	1.7	G
狼 座 RU	9.3-13.2	3.9	G
一角獣座 R	10 -14	4	G
牡牛座 T	9.5-13.0	3.5	G 5
"  RY	9.3-12.3	3.0	G 0
"  UX	10.6-13.3	2.7	G 5

\* 京大理

K. Hashimoto; T Tauri-type stars.