

は、各ホロン間の調和が良くとれていることで生命体全体の秩序が保たれているのである。つまり、ホロンは全体を見ながら自らの振舞いを調節しており、個が全体と有機的に調和する機能を持つ。あるいは、部分の中に全体が刻まれているともいえる。生命体の本質はこうなのだ。しかもこれは何も有機体内部のみに限られたことではなくて、外部との間でもこうした有機的ヒエラルキー関係が成立しているのではないかといわれる。それは、種、属、生物圏、…と拡大されて有機的調和が成立しているのではないか。そして、グローバルに地球生命圏として我々の有機的一体性が成り立っているのではないかというのである。つまり、環境と生物進化は有機的に一体なのであり、地球の歴史を見る限り、またしても我々には、「生命はマイクロ進化のためにマクロ的進化の条件を創り出す」という先の Jantsch の言葉が生き生きとしてくるのである。

参考文献

- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae and S.G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, 655-661.
- Jantsch, E., 1980: *The self-organizing universe*. Pergamon, New York.
- Koestler, A., 1978: *Janus*. Hutchinson, London.
- Lovelock, J.E., 1986: Geophysics: A new look at earth science. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 392-397.
- , 1979: *Gaia. A new look at life on Earth*. Oxford U.P., New York.
- and L. Margulis, 1974: Atmospheric homeostasis by and for the biosphere. *Tellus*, 26, 1-10.
- and A.J. Watson, 1982: The regulation of carbon dioxide and climate: Gaia or geochemistry. *Planet. Space Sci.*, 30, 795-802.
- Nicolis, G. and I. Prigogine, 1977: *Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, New York.
- Owen, T., R.D. Cess and V. Ramanathan, 1979: Enhanced CO₂ greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth. *Nature*, 277, 640-642.
- Prigogine, I., 1980: *From being to becoming Time and complexity in the physical science*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Schrödinger, E., 1945: *What is life?*. Cambridge U.P., London.
- Watson A.J. and J.E. Lovelock, 1983: Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, 35 B, 284-289.

1091 (顕熱・潜熱輸送のパラメータ化)

2. 植生地の顕熱・潜熱輸送のパラメータ化*

近 藤 純 正**

地表面の蒸発散問題では、湿潤地と半乾燥地がある。湿潤地の部類の、水面と平坦地積雪面のパラメータ化はほぼ出来上がった状態にある。ここでは湿潤な植生地を対象とした熱収支のパラメータ化の問題を取り上げる。

1. 地表面の熱収支と水循環

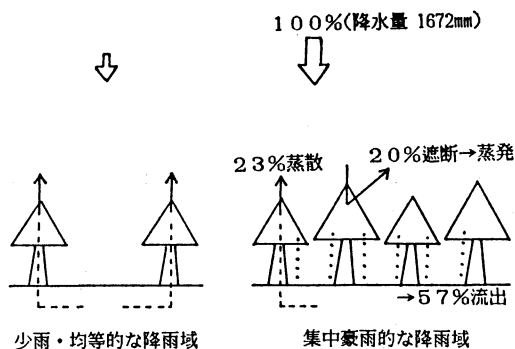
最初に、植物の働きは何かを考えてみよう。太陽光のもとでは、植物は気孔を開き、水蒸気を蒸散し、CO₂をとり込んでいる。植物の葉に入射した太陽エネルギーは赤外放射、顕熱、潜熱に変換される。この際、太陽光

の大部分は蒸散のエネルギーとなり、1%程度が光合成のエネルギーになる。蒸散は植物の体温が上がり過ぎないように冷やすことが一つの役目である。

植物が大気に及ぼす効果として(1)蒸発、(2)地表面のアルベード、(3)粗度、(4)地中の熱伝導係数、(5)その他の影響がある。これらの効果を地表面温度の日変化で調べてみる(近藤・内藤, 1969)。もしも蒸発がなかったとすると、気候は砂漠のようになる。具体的に中緯度の平均的な場合を想定し、境界層上端の条件を与えて地表面温度の日変化を計算し、蒸発がある場合と、ない場合について比較した。蒸発がないとすると、地表面温度は上昇し、日中で約12°Cも高くなる。つぎに、アルベードの影響として、地表面のアルベードが0から0.4になると、日射の吸収が減るので、正午の温度

* Parameterizations of the sensible and latent heat fluxes above vegetative canopies.

** Junsei Kondo, 東北大学理学部.



第1図 雨の降りかたと植生構造の違い。図中の数値は桐生流域における福島・鈴木(1987)の資料に基づく。

(右) 集中豪雨的な降雨域における植生の姿
(左) 少雨・均等的な降雨域における植生の姿

は 4°C 低くなる。同時に蒸発もなくなると 7°C 高くなる。こんどは、粗度だけが 0.1 cm から 0.01 cm に減少すると、熱交換が悪くなるので、 4°C も高くなる。さらに蒸発がなくなると、 18°C も高くなる。土壌の熱伝導係数は日変化の振幅をかえる効果があり、熱伝導係数が小さければ温度変化の振幅が大きくなる。

森林が伐採され、地表がコンクリートで覆われると、蒸発は減少し、粗度も変化する。それを事例で見てみる。東京の気温はこの100年間に約 2°C も高くなっている。都市では、多かれ少なかれ東京と似た傾向があると思われる。これらの例から分かるように、気候を支配する重要なものは蒸発で、森林における水循環を調べることが重要になってくる。

日本の森林における水循環の例を福島・鈴木(1987)のデータを用いて第1図に示した。琵琶湖南部の桐生流域では年間降水量 1672 mm の内、まず樹冠によって雨が 20% 捕捉される。樹冠では乱流が強いので、捕捉された水はすぐ蒸発してしまう。このことを樹冠による雨水の遮断蒸発とよんでいる。もしも、雨が毎日、均等に降るとすれば、雨の大部分は樹冠で捕捉され蒸発し、地面に到達しない。しかし、同じ雨量でも、集中豪雨的に雨が降れば余分の水はしずくとなって地面に落ちる。植物は、地中に浸透した水を吸い上げ、養分を摂って生きている。それゆえ、植物がうっそうと茂るのは集中豪雨的な降り方の地域と言うことになる。

これとは対照的に、雨が少なかったり均等的に降るような地域では、植生はまばらに分散していなければなら

ない。そうでないと、地中に浸透する水分がなくなり、植物は生存できない。このように雨量だけでなく、雨の降りかたが植生の構造をきめる。樹冠による雨滴の捕捉・蒸発は総降水量のおよそ 20% にも達する。雨が少ない地方では 50% にも達する。したがって、森林の伐採は河川流出を大きくする。気候・水文特性と植生の疎・密などとの関係が存在することになる。

2. パラメータ化の目的

以上のような諸過程を定量的に知るために、いろいろな人がパラメータ化の研究を進めている。また、いろいろな目的がある。

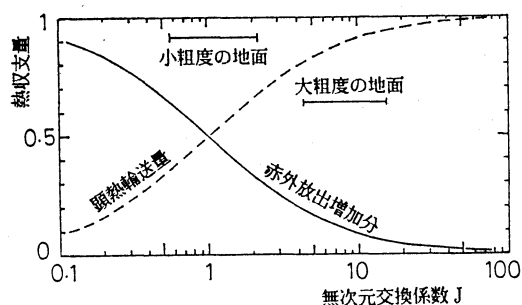
(1) 大気大循環に地表面過程のパラメータ化を取り入れるには、単純化したもので、しかも 100 km スケールの平均を表すものでなければならない。(2) 地域の気候・熱・水収支を知る場合のパラメータ化は、もう少し詳細なものである。将来、(1) と (2) をつなぐことを考えている。その際、最も重要なことは、現実の地表面は一樣でなく、さらに、いろいろな種類の地表面が混在しているので、その混在効果を取り入れなければならない。例えば、裸地のなかに植生地が混在する場合、地域平均の熱収支・水収支はそれぞれの場合の面積化に比例するというわけではない。

つぎに、なぜ地表面のパラメータ化が必要かの理由を述べよう。大気から地表面に輸送される風の運動量や、顕熱輸送量および蒸発量は、バルク式で表現される。バルク係数が既知であれば、地表面の各種フラックスは、風速と気温と比湿および地表面温度 T_{sfc} を観測すればもとまる。

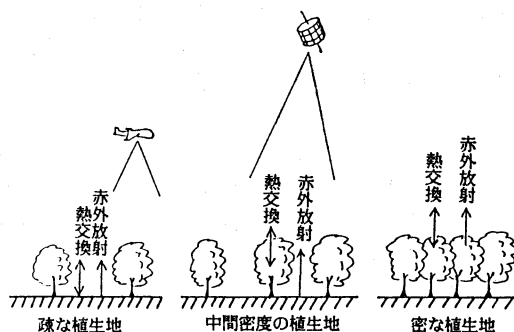
バルク係数は、このような観測上の目的のほかにも、もっと重要な意味をもつ。すなわち、バルク式を用いて熱収支式を解くと、その地域への入力放射量の関数として、地表面温度と顕熱と蒸発量が予知できる。つまり、バルク係数は気候支配のパラメータである。なお、実用的には、植生地の地表面温度 T_{sfc} は上向き赤外放射量で定義され、飛行機や人工衛星などリモートセンシングによって計測される温度を使う。

バルク係数は地表面におけるエネルギーの配分比を決定するパラメータであるが、その簡単な例として乾燥した地表面を想定する。その場合には、バルク係数の増加と共に顕熱輸送量は単調に増加するが、逆に、出ていく赤外放射は単調に減少する(第2図)。

地表面が湿っている場合は、この場合よりも複雑にな



第2図 乾燥した地表面における交換係数と熱収支量との関係。破線は顕熱輸送量、実線は赤外放射量の増加量、いずれも有効入力放射量で無次元化してある、横軸は交換係数の無次元量 J (近藤, 1984)。



第3図 植生地の熱交換のリモートセンシング模式図。

(左) 疎な植生地
(中) 中間密度の植生地
(右) 密な植生地

るが、いずれにしろ熱収支量の配分比はバルク係数で決まる。このように、バルク係数はその地域の気候支配のパラメータである。したがって、いろいろな地表面のバルク係数を決定したいわけである。

3. 植物群落の熱収支モデル

つぎに、植生地のモデル化の問題に話を進める。まず、一枚の植物の葉を考える。気孔の中は水蒸気飽和で、気孔の幅は数ミクロン、気孔と気孔の間隔は100ミクロン程度である。ここに風が吹くと、葉面上に内部境界層が発達し、蒸散が起る。この場合の蒸散量は、気孔の幅と風速と葉の大きさ、などの関数となる。

蒸散量と気孔の幅との関係は理論的にもとまる。その際のパラメータは風速である。たとえば、風速が秒速2mで気孔の数が面積1平方センチメートル当り1万個、葉の大きさが5cm×5cmとすると、気孔開度が1ミクロンのとき蒸散量は1日に約3グラムで、気孔開度が10ミクロンのとき蒸散量は1日に約13グラムになる(近藤, 1982)。

蒸散を決める気孔開度は植物の種類によるほか、日射量や、その他の条件によって変化する。土壌水分がなくなったり、また、日射が強くなり過ぎると、気孔は閉じることが知られている。気孔開度がいくらかになるかは非常に難しい問題である。しかし、気孔開度はコンダクタンス(気孔抵抗)と対応するので、一般には野外観測から間接的に決定できる。

植生地では一枚一枚の葉が集合し群落を形成する。群落全体と大気との間のエネルギー交換量を知るには、原

理的には、群落を多層に分割したモデルで計算する。この場合、群落の高さと単位体積内に含まれる葉面積密度が群落構造を表す主要なパラメータである(Kondo and Akashi, 1976; Kondo and Kawanaka, 1986)。

多層モデルの計算はかなりめんどうなので、いろいろな性質を調べる目的のためには単純化したモデルが適当である。単純化したモデルによって、全体をもっとも良く表現できるように工夫しなければならない。その工夫が研究テーマになっている。われわれは多層モデルと野外データを基本にして、精度の高い単純化モデルの研究を進めている。

群落全体のバルク係数と植生密度との関係について述べる。植物が少ない疎な群落では、風は群落内部まで入り、運動量や顕熱はほとんど元の地面で交換される。したがって、バルク係数は元の地面の値になる。しかし植生密度が大きくなると、交換が盛んになり、バルク係数も大きくなる。さらに、密な群落では、風が中に入れなくなり、バルク係数は却って小さくなる。つまり、適当な植生密度のところで運動量や熱交換が最も効率よく行われる。

バルク係数が最大になる植生密度の値が運動量と顕熱でずれる。その理由は、群落をつくっている物体の熱伝導が悪く物体温度が高さによって違うからである。もし、粗度物体が金属のようなもので作られていれば、運動量バルク係数 C_M と顕熱バルク係数 C_H はほとんど同じになる。風洞実験結果を実際に応用する際には、このことに注意しなければならない。

以上は、蒸発がない場合のことである。蒸発がある場

合は、状況が一変する。バルク係数が風速、湿度、放射量などによって複雑に変化する。バルク係数は植生密度とその幾何学的構造だけの関数で表すことが出来なくなる。

そこで、研究の方向として、2つの道がある。第1の道はモデルによって計算する方法、この場合は、モデルをいかに単純化するかが問題となる。先ほど述べた単純化モデルがその例である。

第2の道は、バルク係数をうまく定義し、ばらつかないようにすることである。前に説明したように、バルク係数を一たん決定しておけば、地表面におけるエネルギー配分比は理論的に予知できるので、バルク係数を決めたい。われわれはこの両方の道で研究している。

第2の道の場合を考える。従来の定義に従うと、バルク係数は気象条件によって変化する。しかし、大気の湿度が100%のときのバルク係数は特殊で、風速や入力放射量とほとんど無関係になる。

そこで、湿度が100%のときに決めたバルク係数を使って、湿度が100%でないときのフラックスを予知すると、大部分は真の値と一致するが、かなりずれる点もある。

ずれるのは植生密度が中程度のときである。

なぜ、ずれるかの理由について考えてみる。植生密度が疎な場合は熱交換の大部分は元の地面で行われ、リモートセンシングも元の地面の温度を強く感じるの、ちょうど良い。しかし、植生密度が中程度のときには、熱交換のかなりの量は群落上部で行われるにもかかわらず、リモートセンシングは、まだ元の地面を感じてしまう。それゆえ、リモートセンシングによって測った地表面温度はフラックスをよく表わさない(第3図)。

したがって、このような場合は、群落上部に重点をおくような温度計測をすればよいことが予想される。それには、真上から測るのではなく、斜め方向から測ればよい。その詳細は省略し、原理のみ説明した。

このような工夫をしたとき、フラックスの測定精度はどの程度改善されるかを調べた。多少のばらつきはあるものの、予測値と真値は1対1の線上にまとまる。なお、この比較は、植生密度、放射量、風速、湿度などいろいろな場合を含んでいる。

われわれが進めているパラメータ化の研究概要は以上のとおりである。引用文献は省略する。

1901 (蒸発散; キャノピ層; ダルトン数; パラメタリゼーション)

3. 森林草地, 半乾燥地からの蒸発散量*

三 上 正 男**・安 田 延 壽***

1. はじめに

4億年前植物は上陸した。全地球史からみれば十分の一の最近の事である。陸上植物はゆっくりと着実にその領土を広げ、極地、高山帯などを除き植物が一度も自生したことのない地域は次第に狭くなって行った。この様にして大規模化した森林、サバンナや草地は、非常に効率よく降水を大気に返す水循環ポンプの役割を果たしている。植物は進化と共に雨量の少ない地域にも大森林を造るようになり、そこでは、環境に適合した長い根が、地下深くの土壌水分さえも大気に返している。上陸した植物は、陸上においても炭素循環を行うようになっただけでなく、更に大量の水を「上陸」させたのである。

Budyko (1970, 1974) のデータに依れば、全球平均で考えたとき、海洋上では年間 1.26 m の水を蒸発するのに対して、陸上ではその三分の一、0.42 m である。しかし、降水量のほうは海洋上で 1.14 m、陸上で 0.73 m であり、蒸発量ほどの差はない。また ボーエン比 $\left(\frac{\text{顕熱flux}}{\text{潜熱flux}} \right)$ は海洋上では 0.1、陸上では 1 となっている。この数字を見る限り、平均としては海洋上で良く蒸発し、その一部は陸上に回り降水となるという図式が描けるのである。しかし、これはあくまでも、陸上全体の平均に関してでの事である。植物があるかないかで様子は大変異なるのである。

我々は、この様な水循環に関わる大気と陸上植物圏、地圏との相互作用を考えるに当たって、分からない分野に首を突っ込む方法の一つとしてしばしば用いられる次のような方法を試みた。即ち現象の極端なケースから攻めようということである。そこで次の二つの両極端なケ

* Evapotranspiration from the Forest, the Grass Field and the Non-saturated Surface.

** Masao Mikami, 気象研究所応用気象研究部.

*** Nobuhisa Yasuda, 気象大学校.