

氏名・(本籍)	たか はし まさ と 高 橋 雅 人
学位の種類	博 士(理 学)
学位記番号	理博第1726号
学位授与年月日	平成11年4月21日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Studies on the Evapotranspiration from the Land Surfaces with Scattered Wet Ranges of Various Scales and the Plant Leaves (大小の湿潤面が散在する陸面および葉面からの蒸発散の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 安田 延 壽 教授 岩崎 俊 樹, 花輪 公 雄, 中澤 高 清 助教授 山崎 剛

## 論 文 目 次

1. Introduction
2. Model
  - 2.1 Diffusion equation
  - 2.2 Model for the atmosphere
    - 2.2.1 Two-layer model
    - 2.2.2 Three-layer model
  - 2.3 Method of calculation
3. Estimation of the transpiration from the plant leaves
  - 3.1 Characteristics of evaporation from a single wet area
  - 3.2 Evaporation from the surface with scattered many wet areas
    - 3.2.1 Characteristics of evaporation from scattered wet areas
    - 3.2.2 Relation of evaporation loss between a couple of wet areas
    - 3.2.3 Computation of evaporation loss from many wet areas
  - 3.3 Application to estimation of the transpiration from plant leaves
    - 3.3.1 Model leaves
    - 3.3.2 Variation of the leaf transpiration with wind direction
    - 3.3.3 Efficiency of transpiration for plant leaves
4. Evaporation from the land surface with scattered wet ranges

- 4.1 Continuous land surface model
- 4.2 Evaporation from wet areas with regular arrangement
  - 4.2.1 Distribution of local evaporation rate at wet area
  - 4.2.2 Magnitude of advective enhancement for a wet range
- 4.3 Evaporation from wet areas with various arrangements
  - 4.3.1 Enhancement of evaporation by scattering wet areas
  - 4.3.2 Local evaporation loss for each wet area
- 4.4 Evaporation efficiency of land surface
  - 4.4.1 Surface resistance
  - 4.4.2 Evaporation efficiency

## 5. Summary

## Acknowledgments

## Appendix

### A. Introduction to three-layer model

### B. Numerical methods of solution for the diffusion equation

#### B.1 Implicit scheme (for chapter 3)

#### B.2 Explicit scheme with matrix analysis (for chapter 4)

## References

# 論文内容要旨

地球上のさまざまな気象現象は大気と海洋の複雑な運動によるものである。日射を原動力として、大気や海洋の大循環、あるいはこれよりも小さなスケールの運動が生じている。大気陸面（海面）相互作用は、これらの運動に影響を及ぼす物理過程の中で最も重要なものの一つで、大きく分けて水循環過程と熱交換過程とからなる。ここで、本研究が対象とする蒸発現象は、この二つの過程に深くかかわっている。蒸発の際、水分が水蒸気の形で地表から大気中へと運ばれるとともに、地表面から気化熱を奪うことで熱エネルギーも大気中へ運ばれるからである。

この蒸発現象については昔から数多くの研究が行われてきた。その結果、単一地表面からの蒸発については、それぞれの種類に応じて量的評価のためのモデル化が行われた。現在問題となっているのは、さまざまな種類の面が混在している地表面からの蒸発量の評価である。単一地表面の場合の蒸発量を面積率で重み付けして加算する方法では、この地域の総蒸発量を正しく推定できない。これは、各種地表面から発生した水蒸気が風によって運ばれることで、まわりの大気中の水蒸気量を変え、その結果、単一地表面の場合とは違った水蒸気フラックスが得られるからである。この効果は、異なる種類の地表面

が接する境界付近で特に大きく現れる。本研究ではこの効果を縁辺移流効果と呼ぶ。

縁辺移流効果は蒸発のほか顕熱輸送についても生じるが、顕熱輸送に対するものはそれほど大きくない。温度差の非常に大きい2つの地表面が接していることはほとんどないからである。これに対して地球上の地表面の湿潤度は、砂漠から森林、海洋までさまざま、湿潤度の大きく異なる地表面が接している場合には、蒸発現象に対する縁辺移流効果は大きい。たとえば、大陸には広大な砂漠があるが、この中に点在するオアシスからの蒸発には縁辺移流効果が大きく作用し、オアシスの占める面積の割に非常に大きな蒸発量が得られることが知られている。コンクリートで覆われた都市域の中での森林公園や街路樹からの蒸発量についても同様なことが言える。このように、乾燥気候や都市気候での蒸発現象に対する縁辺移流効果は重要である。

この縁辺移流効果を考慮に入れて、さまざまな地域での蒸発量のよりよい評価ができれば、他の過程に対するモデルと併せ、大気陸面相互作用の精度よい量的評価が可能になる。これはまた、気候解析や数値予報のための数値モデルにおけるパラメタリゼーションの改良にもつながる。

本研究では、この縁辺移流効果の量的評価を目的とし、大小の湿潤面が散在した陸面における蒸発現象について、数値計算による解析を行った。計算では、湿潤面と乾燥面の極端な水分条件をもつ2種類の面で構成される単純な地表面モデルを想定した。解析対象の地表面スケールは数m～数千kmで、この中に2種類の面の1次元配列があるが、計算上はこの全体の地表面が繰り返し連続分布している場合を取り扱い、定常的な水蒸気分布を求めている。時間スケールは1週間から1ヶ月程度での平均状態を考える。本研究で導かれる経験式は、日変化など短周期変化が無視できる、ほぼ一定の気候状態での蒸発現象の記述のために利用されることを目的とする。

従って、比湿に関する拡散方程式の数値計算では、風速と拡散係数に対して一定の鉛直分布を与え、水蒸気分布を求めている。風速・拡散係数の分布を決める大気条件は、それぞれ実際の大気に近い特徴を持つ3つの層（下から層流底層、接地気層、エクマン層）からなるモデルを想定して与えた。層流底層では分子粘性が卓越している。層流底層の厚さは数cm、代表的な接地気層の上端の高さは50mである。なお、本研究の解析対象は水蒸気輸送に関するものだけで、蒸発に伴う熱輸送は扱っていない。

縁辺移流効果は地表面状態が不連続的に変わる付近で大きいので、数値計算の格子間隔は非常に小さくとらなければならない。このことは、この種の研究が今まであまり行われてこなかった理由の一つである。そこで本研究では、いわゆる「マトリックス法」を用いてこの問題を解決した。

湿潤面の中での蒸発速度分布は、風上から風下に向けて単調減少の形をとる。これは、縁辺移流効果が風上端に近いほど大きく作用するためである。分布曲線の特徴から、湿潤面の風上側約10cm以内では分子拡散が蒸発現象を支配していることが分かる。これより風下の部分では、乱流の影響で蒸発速度の減少は緩やかになるが、湿潤面のスケールが10kmを超えると、エクマン層まで十分に水蒸気が輸送され、蒸発量にこの層の影響が現れる。

有限湿潤面では、縁辺移流効果によって、全面湿潤面の場合よりも単位面積あたりの蒸発量は大きくなる。この効果の大きさは湿潤面のスケール、および全体の地表面スケールに対して湿潤面の占める面積率に依存する。ここでは、湿潤面散在地での蒸発現象に対する縁辺移流効果の大きさを示すパラメータを導入し、各変数への依存性を調べた。この中で、全体の地表面に対して湿潤面の占める割合が概ね1%以下の場合には、縁辺移流効果の大きさは湿潤面自体の大きさのみに依存する。計算上は湿潤面が無数散在しているものとして扱っているが、この場合には、移流による湿潤面同士の相互作用は無視でき、単独の有限湿潤面と見なすことができる。

単独の有限湿潤面からの蒸発については、バルク式を用いた推定法が開発されてきた。これは、湿潤面での比湿、およびある高度での風速・比湿を用いて蒸発量を推定する方法である。この式で用いるバ

ルク係数には有限湿潤面の大きさが関係するはずであるが、これまでは単純に全面湿潤面の場合の値、もしくは簡易なスケール依存の関係式による値を用いていた。これに対して本研究では、連続地表面に対する計算結果のうち、湿潤面の面積率が1%以下のものからこのバルク係数を量的に算定した。

一般には縁辺移流効果による蒸発促進の効果によって、有限湿潤面に対するバルク係数は、全面湿潤面の場合よりも大きな値をとるが、約10km以上のスケールの湿潤面に対しては、この大小関係は逆転する結果となった。大きな湿潤面では、総蒸発量に対する縁辺移流効果が小さくなるとともに、上空の大気中に含まれる水蒸気量も減ってしまうためである。そこで、大陸上に存在する大きな湖水の蒸発量をこの方法で推定する際には、バルク係数の与え方に注意しなければならない。

地表面に対する湿潤面の割合が比較的大きい場合には、湿潤面間の影響が存在し、各湿潤面を単独なものとして扱うことはできない。このような場合も含め湿潤面散在地からの蒸発をモデル化できるよう、蒸発抵抗の概念を用いて地表の配列条件に対する量的評価・定式化を行った。蒸発抵抗の関係式を用いれば、気象要素および地表の湿潤面の配列パターンから蒸発量の推定をすることができる。

なお、湿潤面の配列の様子について、各面の大小や配列の間隔を変えて蒸発量の違いを調べた結果、同じ大きさの湿潤面が等間隔で並ぶ規則的分布のとき総蒸発量は最大となることが分かった。しかも、一つの湿潤面の大きさを小さくして総数を増やすほうが蒸発の効率は大きくなる。都市気候では、緑地からの蒸発がヒートアイランドを和らげると言われているが、この結果は、蒸発量と緑地の配置の関係について一定の量的評価を与えるものである。(以上第4章)

植生地からの蒸発においては、葉からの蒸散がその大きな割合を占めている。この植生地からの蒸発についても一定のモデル化が達成されているが、葉面蒸散量の評価が残された大きな課題となっている。蒸散もまたバルク式によって表現されるが、その中で葉の大きさや気孔の分布等に依存する葉面蒸散係数の値を、本研究で想定した湿潤・乾燥混在地からの蒸発に対する数値モデルを応用して算定した。この際、葉面を多数の微小水面(気孔)が散在している地表面とみなす。現実には日光や水分の条件によって気孔の開閉度が変化するが、計算では平均的なスケールを与え、また風向は絶えず変化しているとして全風向に対する平均値を求めた。

その結果、一般的な葉の大きさ1cm~10cmにおいて葉面蒸散係数の値は約0.002であった。気孔の面積率0.01に対して、総蒸散量の葉全面が濡れているときの蒸発量に対する比は0.1~0.2程度であり、非常に大きな蒸散効率が得られた。(以上第3章)

本研究では、乾燥気候や都市気候での蒸発現象に大きく作用する縁辺移流効果の量的評価のため、大小の湿潤面が散在する地表面からの蒸発について数値計算を行った。計算の結果から、蒸発の特徴を捉えるとともに、さまざまな地表面での蒸発量を簡易推定するためのモデル化・定式化を行った。また、植物の葉面蒸散量の推定についても一方法を与えた。本研究は、地球上の多様な地表面における水循環・熱交換過程をよりよく量的評価するための基礎となると考える。

## 論文審査の結果の要旨

複雑な被覆を持つ陸面からの蒸発量を精度良く算定することは、地球環境問題において重要な課題である。近年、砂漠化が進行し、残ったわずかなオアシスや森林地域の消長は焦眉の地球環境問題となっている。都市域の中の池や森林公園などが、都市環境にどのような効果をもたらすかということも重要な課題である。これらは規模の差があるが、いずれも乾燥陸面内の湿潤地からの蒸発量の評価の問題となる。この場合、縁辺移流効果が働き、蒸発量が大きくなり、近年まで、オアシス効果とも呼ばれていた。

この縁辺移流効果は、湿潤地内において、乾燥陸面との境界付近に大きく現れるのが特徴であり、不連続的現象である。水蒸気の拡散係数が鉛直方向に一定な場合は、解析解があるが、実際の大气では拡散係数は高さ $z$ に比例して大きくなるので、その解析解をそのまま用いることが出来ず、従来は、推論などによって、縁辺移流効果を取り入れてきた。近年、計算機資源が非常に豊かになってきたので、不連続的な縁辺移流効果を直接数値計算で精度良く求め、様々な状態に利用できる定式を作成することが本研究の目的である。しかし、利用できる最大の計算機を用いても、すぐには所期の目的を達するに至らず、著者は「マトリックス法」という高速で精度の良い計算方式を開発し、縁辺移流効果を数値計算で求めることに成功し、様々な湿潤面の配置に対して、普遍関数を提示した。

縁辺移流効果は、湿潤地の占める割合が概ね1%以下の場合のみ、湿潤地の大きさだけで決まる。また、縁辺移流効果によって、有限湿潤地に対するバルク係数は、湿潤面の大きさが小さいほど大きくなる。有限湿潤面の大きさがおよそ10kmを越えると、むしろ、バルク係数は、無限湿潤面に対するものより小さくなり始める。大陸上の広大な乾燥域内の大きな湿潤地からの蒸発量を、評価する場合はこの事に注意を払う必要がある。

得られた定式を葉の気孔からの蒸散にも応用した。従来、葉面蒸散係数は、植生地全体の蒸散量の測定値などから、推定してきたが、本研究では、物理的に厳密な蒸散過程の数値計算によって、葉面蒸散係数を決定した。

以上の研究は、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示しており、高橋雅人提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。