

氏名・(本籍)	X u 徐	Jian 健	Qing 青
学位の種類	博士(理学)		
学位記番号	理博第1525号		
学位授与年月日	平成9年3月25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	Seasonal Variations in the Heat and Water Balances for Non-Vegetated Surfaces (裸地面の熱収支・水収支の季節変化)		
論文審査委員	(主査)教授 近藤 純正 教授 安田 延壽, 教授 花輪 公雄 助教授 山崎 剛		

論 文 目 次

Chapter 1.	Introduction
Chapter 2.	Method of calculation
2. 1	Soil model
2. 2	Boundary and initial conditions
2. 3	Data set
2. 3. 1	Air temperature
2. 3. 2	Solar radiation
2. 3. 3	Longwave radiation
2. 3. 4	Precipitation
Chapter 3.	Parameters
3. 1	Soil-water potential Ψ
3. 2	Evaporation efficiency β^*
3. 3	Albedo
3. 4	Physical thermal coefficients
3. 5	Exchange speed $C_H U$
3. 6	Snow melting process
Chapter 4.	Verification of the method of calculation
Chapter 5.	Seasonal variations
5. 1	Lanzhou
5. 2	Turpan
5. 3	Altay
Chapter 6.	Climatological relationship
6. 1	Heat balance
6. 2	Water balance

6. 3	Soil-water content
Chapter 7.	Index of climatological wetness
7. 1	Radiation
7. 2	Potential evaporation
7. 3	Application
Chapter 8.	Summary and conclusion
	Acknowledgments
	Appendix A. Tables of monthly heat and water balances
	Appendix B. Notation
	References

論文内容要旨

この研究の目的は、各地の裸地面における熱収支・水収支の季節変化を求めることである。蒸発は熱・水収支に関わる最も重要な過程の一つである。しかし、乾燥・半乾燥域では蒸発量が少なく接地境界層内の水蒸気量の鉛直勾配が小さく、また日中の大気は非常に不安定となり、従来の方法「傾度法」、「ボーエン比法」、「渦相関法」などでは蒸発量の正しい測定は困難である。Kondo and Saigusa (1994) によれば、湿っている裸地面からの蒸発量は風速、日射、大気温度と湿度に左右されるが、地表面が乾燥していくと、蒸発量は土壌含水率と大気湿度に依存する。様々な気候帯に適用できる裸地面蒸発量の評価手法の開発は重要であることから、本研究では土壌のパラメータを含む具体的な評価方法を開発した。乾燥域では、蒸発は地表面で起こらず、土壌内の小さな間隙内で発生するため、気象条件よりも土壌パラメータに支配される。裸地面は様々な土壌で構成されており、土壌の種類によって蒸発の振る舞いも様々である。代表性のある4種類の土壌の裸地面について、標高の違いと積雪過程も考えて、熱収支・水収支量を算定した。

第2章では計算方法を示す。これは Kondo and Saigusa (1994) のモデルを簡略化し、ルーチン気象データを適用するために実用化された方法である。また、乾燥域に適用するため、土壌全層に水蒸気の輸送を考えている。土壌中の液体水の輸送は透水係数と水分ポテンシャルで表す。積雪、融雪過程も考慮している。使用する気象ルーチンデータは①日平均気温、最高と最低気温の差から気温の日変化を周期関数で表す、②日照時間から日平均日射量を計算し、周期関数で日変化を表す。大気放射量は日平均日射量から求める。③日降水量から降雨量の時間変化を与える、気温が低い場合の降水は雪として扱う。このとき、雨量計の「捕捉率」を考え、降雪量を修正する。④日平均風速、⑤日平均水蒸気圧から空気の比湿を求める。⑥地表面気圧を利用して、日照時間から推定した日射量と大気放射量の標高による違いを補正する。

第3章では、計算に使用したパラメータについて述べる。地球上の裸地面はさまざまである。大規模な砂漠から各地に散在している小規模の土壌面まで存在している。同じ土壌面でも場所によって土質が違う。同じ場所でも深さによって土壌層の構造が異なる。本研究では各地点について代表性のある4種類の土壌について計算を行う。地表面から深さ0.7m（計算を行う深さ）までの土壌の種類は同じとする。4種類の土壌は Soil 1 : クロボク土 (volcanic ash soil, 通称関東ローム, つくばで採集), Soil 2 : 粘土 (clay loam, 中国蘭州の気象観測場の土), Soil 3 : 成田砂土 (silty sand, 粒子の細かい砂, 千葉で採集), Soil 4 : 砂 (sand, 粒子の粗い砂, 仙台の海岸で採集) である。そのうち, Soil 1 と Soil 2 はローム質土壌で, Soil 3 と Soil 4 は砂質土壌である。土壌ごとの透水係数は室内あるいは圃場実験で求めた。各種土

壤の水分ポテンシャルと体積含水率の関係は実験で決めた。蒸発効率は表層土壤の含水率の関数で表す、これも実験データに基づく。アルベードは土壤含水率によって変わることから、本研究では室内実験と野外観測の結果に基づいてアルベードを土壤表層 2 cm の含水率の関数として扱う。積雪の場合、アルベードは「新雪日」に最大とし、気温と日数の関数とする。土壤の熱物理係数を地中温度の年変化の振幅と位相の遅れから求めたうえ、土壤水分量の関数として扱う。

第 4 章では、計算方法と土壤パラメータの検証を行う。ローム質土壤についてはつくば市にあるクロボク土 (Soil 1) の裸地での観測データと計算結果を比較した。砂質土壤については鳥取砂丘の観測値と比較した。計算方法と土壤パラメータを地表面温度と土壤含水率の両方から検証した。いずれもよい対応がみられた。

第 5 章では、中国の気象ルーチンデータを利用し、30地点について熱・水収支量を評価する。中国の気候条件を調べた結果、乾燥、半乾燥域ではポテンシャル蒸発量の年間値は1000~2500mmで、年降水量の5倍以上である。湿潤域の日本においてはこの割合は0.3~0.5倍程度である。吐魯番、蘭州、阿勒泰を中国の乾燥、半乾燥、降雪域の代表地点として、それぞれの計算結果を示した。この計算方法では地表面温度も同時に計算されるので、地表面温度の平均、最高、最低の観測値との比較により検証を行った。半乾燥域では土壤表層の含水率は小さいが、全体的な傾向としては下層で含水率が増加している。熱収支的には乾期には顕熱輸送量が大きいが、雨期には潜熱輸送量が大きくなる。乾燥域では雨の日を除けば、土壤含水率は全体的に小さい。顕熱は年間を通して日射量のように正弦カーブ的に変化している。土壤表層の水分は日中蒸発し、夜間になると空気中の水分は土壤の表層に凝結する。土壤の月平均含水率は大気の月平均比湿と平衡している。乾燥域では、土壤内部での水分の輸送はほとんど水蒸気輸送である。大気と違って、土壤は温度が高いほど水分を多く含むことができないことから、乾燥域の土壤内部の水蒸気輸送は夏は下向きで、冬は上向きである。水蒸気輸送は緩慢であるため、砂漠の深層の含水率は10~100年昔の気候状況を記憶することができる。

降雪域では春先に雪が融けるため、土壤含水率は全層で増加する。そのため、同じ乾燥域でも、雪の積もる場所での流出量が相対的に大きい。これは「雪効果」である。

第 6 章では、中国の気象ルーチン観測所30点の計算結果に基づいて、気候学的な熱・水収支の関係について述べる。チベット高原では大気が薄く、乾燥しているため日射量が多く、顕熱輸送量が多い。チベット高原の北に広がる砂漠域では降水量は極めて少なく、土壤が乾燥し、地表面温度が高温になり、正味放射量は比較的少ない。その大部分が顕熱輸送量となる。チベットをはじめ、アルタイ山脈の近くまで広がっている乾燥・半乾燥域は気候学的には顕熱の供給源になっている。中国東南部の湿潤域では降水量が多く、土壤が湿っているため、潜熱輸送量は大きい。裸地面からの年間蒸発量は土壤の最大保水量と関係する。土壤の保水量は土壤の種類によって違う。ローム質の土壤は保水性がよく、土壤は湿潤で、蒸発量が多い。砂質の土壤は排水がよく、蒸発量が少ない。乾燥域では、年蒸発量は年降雨量に等しく、流出量はゼロである。半乾燥・半湿潤域では、流出量は土壤の種類による。砂質の土壤での流出量はローム質より多い。また、「雪効果」あるいは集中的な降雨のある地域では、流出量が多くなる。湿潤域では、降雨量が豊富なため、土壤パラメータで決まる蒸発量を上回る分が流出量になる。雨の少ない季節について調べてみると、土壤含水率は湿潤域では圃場容水量に近い値を持つのに対して、乾燥域では空気の湿度に平衡した値になる。変動の少ない時期の土壤含水率の大きさはこの区域の年降雨量に関係する。数の少ない貴重な乾燥域の土壤水分量を入手し、年降雨量と土壤水分量の関係を検証した。

第 7 章では、中国の日射量と大気放射量の地理的分布図を作成した。晴天日の多い乾燥域では、水蒸気量が少ないため、日射量が多いが大気放射量は少ない。地表面温度が高くなるので、有効大気放射量は大きくなる。チベット高原では正味放射量が多い。

本研究では、ポテンシャル蒸発量の定義を「土壌は毎日飽和含水率の状態にあり、地表面温度が日平均熱収支で決まる熱収支的平衡値にあるとしたときの蒸発量」とした。これは乾燥気候の度合いを見るのに適したパラメータである。30地点におけるポテンシャル蒸発量は日々の気象条件を入力して計算した。一方、中国の多くの観測所では、小型蒸発計蒸発量も観測されている。それゆえ、小型蒸発計蒸発量と最高、最低地表面温度（あるいは気温）の差を利用し、中国195ヶ所のポテンシャル蒸発量を推定し、年降雨量とポテンシャル蒸発量の比で気候の湿潤度を表した。年降雨量とポテンシャル蒸発量の比が1.0を超える区域は湿潤域、0.5～1.0は半湿潤域、0.2～0.5は半乾燥域、0.2以下は乾燥域と定義した。1981年、東南部は湿潤域、東北部及び黄河と揚子江にはさまれた地域は半湿潤域、華北から黄河の上流を通過してチベット高原までは半乾燥域、チベット高原の北の砂漠地帯からモンゴルの西方は乾燥域になっている。ある地点での湿潤度の年々変動は渇水あるいは洪水と関係すると考えられる。

第8章では、本研究によって得られた主な結果をまとめた。広域の熱・水収支を理解するためのこの研究は中国を例として行った。乾燥域と湿潤域における蒸発機構を物理的に定量的に解明した。地表面温度の観測値を利用して熱収支的な検証を行った。

論文審査の結果の要旨

気候変動や水資源問題から、陸地面における水収支・熱収支の定量的把握を行うことは、最近の重要課題となっている。陸地面のうち裸地面については、土壌が乾燥し蒸発量が少なくなった状態では大気中の水蒸気量の鉛直勾配が小さくなり、また、水の気化が土壌内部で生じるようになるため、従来の方法では水収支・熱収支量が正しく評価出来ない状況にあった。

徐健青の研究では、土壌内部の水蒸気と液体水の輸送過程をパラメータ化し、裸地面の熱収支・水収支を求める方法を完成し、中国の乾燥域から湿潤域に応用し、熱収支・水収支量や土壌水分の日変化・季節変化に及ぼす土壌の種類や気候条件の影響を明らかにしている。具体的には以下の結果を得ている。(1)半乾燥域では、土壌含水率は表層から深層まで増加しており、顕熱輸送量は乾期に大きく、潜熱輸送量は雨期に多い。(2)乾燥域では、正味放射量のほとんどが顕熱輸送量となる。土壌含水率は大気比湿とほぼ平衡した値で季節変化を行う。年蒸発量は土壌の種類にほとんど依存しない。(3)湿潤域では、年蒸発量の上限は土壌の種類ごとに異なり、保水性のよい土壌では、年蒸発量は年ポテンシャル蒸発量にほぼ等しいが、排水のよい砂質土壌ではその3分の1程度となる。(4)チベット高原から砂漠域にかけての広い乾燥地域では、顕熱輸送量が大きく、大気を大きく加熱している。(5)熱収支と水収支の総合的な効果を表すための新しい湿潤度インデックスを導入し、地理的な気候の湿潤度分布を作成した。

以上の結果は、本人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いる。よって、徐健青提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。