

論文内容の要旨

論文題目 山地地形の森林における蒸発散量の定量化に関する研究

氏名 清水 貴範

本研究は、山地に生育する森林を対象に、渦相関法による水蒸気交換量の観測および解析方法に由来する誤差を定量的に評価し、その結果をわが国の森林小流域での長期観測データに適用するとともに、観測手法間の比較を通じて、森林の蒸発散量推定の高精度化を行うものである。

第1章では、渦相関法が森林の蒸発散量観測に広く用いられてきた経緯とともに、その測定原理とデータ解析上の問題点を整理し、他の観測手法との比較の意義について述べた。

渦相関法は、直接的かつ高時間分解能で、数ヘクタール以上の広がりを持つ地表面と大気との間の水蒸気交換量（フラックス）算出を可能とする、現時点でほぼ唯一の方法である。渦相関法での水蒸気フラックスの測定には、一般に超音波風速温度計（Sonic Anemo-Thermometer: SAT）と赤外線式ガスアナライザー（Infra-Red Gas Analyzer, IRGA）を用いる。SATはその構造上、機器自体が自然風を乱しながら測定値を得るため、機器の意匠ごとに異なる風速補正式が必要となる。また、水蒸気濃度の測定に閉光路型（クローズドパス型）のIRGAを採用すると、ノイズが少ないデータを取得できるが、測定地点での採取ガスをチューブでIRGAに導流するため、ガス流量の時間変動に対応したデータ補正法を設定する必要がある。さらに、渦相関法は元来、平坦一様な地表面での測定を前提とした方法であるため、これを複雑地形地に適用する場合、地形が風速場に与える影響によって

乱流輸送の主方向が重力方向から逸れることを考慮する必要がある。これらに関する検討は現状でも不足しているため、これを本研究の第一の課題とした。

森林の蒸発散量を観測から把握する方法としては、渦相関法の他に流域水収支法、および、遮断蒸発量・林床付近からの蒸発散量と樹液流速測定に基づく蒸散量の和による積上げ法が考えられる。渦相関法には「熱収支インバランス問題（熱フラックスの総和が放射量の測定値より小さくなる現象）」が存在するなど、観測手法ごとの利点と欠点は相互補完的であるが、三手法による蒸発散量の同時比較は世界で実例が無い。そこで、山地小流域を対象に、上記の検討結果に基づいて渦相関法を適用し、他の二手法による観測値とともに蒸発散量の比較検証を行うことを、本研究の第二の課題とした。

第 2 章では、具体的に検討対象となる観測地と、観測システム全般について詳述した。観測地である鹿北流域試験地（北緯 33 度 8 分，東経 130 度 43 分）は、複雑地形の山地に存する暖温帯のスギ・ヒノキ林小流域である。小流域の右岸側は緩斜面で、成長の良いスギ林分が大半を占める。一方、左岸側は急斜面が多く、ヒノキ林分が山腹中部から尾根に掛けて広範囲に分布するほか、斜面の裾部は原植生の常緑広葉樹が繁茂しており、両岸で明瞭な植生の違いがある。

第 3 章では、渦相関法の観測機器・システムに内在している誤差について、詳細に検討を行い、補正方法を確立した。

SAT の機器自体が風速を乱す現象を評価するために、観測に用いた SAT と同機種の機器について風洞実験を行った。実験対象の SAT は、互いに直交する 3 対のセンサーが 3 次元の直交座標方向の風速を測定する意匠のもので、センサーによる風の遮蔽が、風速誤差の最大の要因である。実験から、風速が小さい時ほど風速の減衰割合が大きくなることを確認し、この事象を組み込んだ風速補正式を開発した。その結果、風速 1ms^{-1} での最大の補正量は、旧来の研究結果による算出値よりも 7.6% 大きくなることが分かった。

採取ガスをクローズドパス型 IRGA に導流する際に生じる信号減衰については、水蒸気濃度と同時に測定している二酸化炭素濃度と対比しながら、誤差の検討を行った。その結果、二酸化炭素濃度では、チューブ内の流量が変動した場合でも、既存の補正式の組み合わせによって十分補正可能であると判明した。一方、水蒸気濃度は、ガス採取時の水蒸気圧が飽和水蒸気圧に近いほど、ガス採取から濃度変動検知までの時間が、二酸化炭素濃度に対して大きく遅れることが確認できた。例えば飽差 2.5hPa では、水蒸気の濃度変動を検知するまでの時間は、二酸化炭素濃度に対して 9.5 秒遅れとなった。そこで 2~6 秒の遅れ時間の範囲ごとに、チューブ流量以外の要因について既存の式で補正を行った水蒸気変動量と、信号減衰が小さい SAT の温度変動量とのコスペクトル比を算出し、チューブ内の流れに依存する信号減衰の定式化を行った。その結果、代表的な遅れ時間が 15, 17, 20, 26 秒のときに、当該観測システムで規格化されたコスペクトル比が $1/2$ になる周波数は、それぞれ 0.14, 0.084, 0.042, 0.0235Hz となった。この関係を定式化することで、観測地における水蒸気フラックス補正式とした。

上記の補正の影響を試算した結果、SAT 風速については、誤差補正を行わない場合と比べて、水蒸気フラックスの変化は 1.2%程度にとどまった。これは、水蒸気交換量の主方向は、複雑地形の影響下でも重力鉛直方向から大きく逸脱しないことに加え、野外観測では通常、鉛直風速よりも水平風速が卓越するため、当該 SAT の鉛直軸方向の測定風速はほとんど補正対象にならなかったことが原因である。一方、ガス濃度検知までの遅れ時間の変動を考慮して算出した水蒸気フラックス値は、これを考慮しない場合に比べて、平均で 20%以上の差異が生じることが判明し、補正の重要性が再確認された。

第 4 章では、複雑地形地で渦相関法を適用する際に必要となる、地表面－大気間の乱流輸送方向を規定するための座標変換法について検討した。2000 年まで最も普遍的に用いられてきた座標変換法は「ダブル・ローテーション (DR) 法」である。この方法は、フラックス算出の際の平均化時間（本研究では 30 分）ごとに、平均水平風向の風速 \bar{U} と平均鉛直風速 \bar{w} を得て、 \bar{U} ベクトルを含む鉛直面上で角度 $\arctan(\bar{w}/\bar{U})$ の回転を行った後にフラックスを算出する。一方、21 世紀初頭に提示された「プラナーフィット (PF) 法」では、平均化時間ごとの風向・風速の平均値を数週間以上集積した後、データの回帰から座標変換平面を設定する。この方法を経て、近年では、分割した風向ごとに PF 平面を決定する「セクターワイズ・プラナーフィット (SPF) 法」が、複雑地形地で最も合理的な座標変換法と考えられている。また、これらとは別に、数週間以上のデータを用いて風向ごとに鉛直面上の回転角を固定する方法が 3 種類提案されており、さらに新規に考案した座標変換法を加えて、計 7 種類の座標変換法を比較した。

DR 法を基準として、各座標変換法によるフラックス算出値を比較した結果、厳密なデータ品質管理後でも、SPF 法だけは熱フラックスを 5%程度過小評価した。このことは、渦相関法でしばしば生じる「熱収支インバランス問題」が、SPF 法の適用によって拡大されたことを意味する。一方、水・熱輸送量の小さい夜間では、SPF 法を用いた時に、温度・二酸化炭素の標準偏差を規格化した値が、平坦様な地形から得られた基準的な値に対して、最も誤差が小さいことが分かった。これらの結果とデータ品質管理基準を通過するデータ数から、観測地では、日中は SPF 法以外の方法の適用が望ましく、夜間は SPF 法の適用が推奨できると結論づけた。この結果は、今後も増え続けると考えられる複雑地形地の渦相関法観測地点での、データ解析指針となる。

第 5 章では、上記の検討結果を渦相関法でのデータ解析に反映して蒸発散量を算出し、水収支法および積上げ法による蒸発散量との詳細な比較を行った。

観測地の小流域では、晩秋以降の降雨 (P) が翌年始めの流量 (Q) に影響を及ぼすため、 $P-Q$ から蒸発散量を推定するためには、4~5 年の連続観測値を用いるべきであると分かった。2000 年~2008 年の $P-Q$ の平均は 897.5mm/年であり、この値が観測地での水収支法による蒸発散量の代表値として、妥当であると考えられた。

渦相関法による蒸発散量は、植生が異なる右岸と左岸とに分割して解析を行った。両岸での水蒸気フラックス値を熱収支インバランスの割合で除して補正した蒸発散量は、2007

年で 839.9mm、2008 年で 811.8mm となった。また、同様に算出した右岸の日中の蒸発散量は 2007 年 4 月～2008 年 3 月で 894.7mm となり、積上げ法によるスギ林分の蒸発散量 911.4mm に匹敵する値となった。これらより、渦相関法で得られた年蒸発散量は熱収支インバランスの補正によって良い推定値となること、小流域からの系外への流出は降雨量の 3%程度と見積もられること、および、渦相関法の値は風向ごとの蒸発散量推定にも適用できることが示された。また、蒸発散量の季節変動は放射量と強い相関があったが、年ごとの同月の蒸発散量の差は、右岸側では放射量の差と同期するのに対し、左岸側では、浅層の土壌含水率の変動との関連が示唆された。これにより近接した林分でも、地形や樹種によって蒸発散の変動に影響を及ぼす要素が異なることが明らかになった。

週および月ごとの蒸発散量を渦相関法と積上げ法とで比較したところ、大きな量の降雨後では、ほぼ必ず積上げ法の値の方が大きかった。一方、無降雨日の蒸発散量は、渦相関法の値が大きい場合が多かった。この不一致は、降雨中～降雨直後以外の時間帯での遮断蒸発の発生、もしくは、湿潤時での渦相関法の測定精度の低下のいずれか（あるいは両方）に依るものと推定された。

第 6 章では、これらの検討結果を総括するとともに、今後、森林で渦相関法を発展的に用いる際に、望ましい観測システムについて言及した。