

博士（農 学） 中 井 太 郎

学 位 論 文 題 名

背の高い植物群落が風下農耕地の微気象に及ぼす影響と
その評価手法に関する研究

学位論文内容の要旨

要 旨

地域の微気象は、地表面の植生などの土地利用形態によって支配される。したがって利用形態が異なる土地が隣接している条件で風が吹くと、風上で形成された大気中の熱、水蒸気などが移流によって風下に運ばれ、風下の微気象は複雑に変化する。特に土地利用の境界付近では、移流により風下側の熱や水蒸気などの鉛直輸送（フラックス）が変化し、それが地表面からの水損失や作物の水分生理に影響を与えることが知られている。我が国では農耕地の面積が比較的小さく、様々な条件の土地が複雑に混在しているため、風下の農耕地の微気象は風上の土地利用に強く影響される。したがって、移流現象を詳細に把握することは、農耕地の栽培管理や水管理計画を策定するうえで重要である。

移流の研究は、これまで風上と風下で植物群落や構造物の高さに差がない平坦な条件で行われてきた。このような条件下では、風速の鉛直成分が無視できる場合が多く、風下への影響評価は比較的簡単であった。しかし、農耕地が森林などの背の高い植物群落や市街地等と接している場合に関しては、風速分布の観測が困難であることなどによりその評価が難しく、現在まではほとんど研究されていない。

本研究は、実測値を組み込んで移流拡散方程式を解く新しい手法を開発し、風上に背の高い植物群落が隣接する場合の移流現象をより正確に評価することを目的とした。この目的達成のため、トウモロコシ畠に隣接した牧草地上の厚さ 3.5m の接地気層を対象に、気温分布の観測と風速分布の数値計算を行った。また、それらの結果をもとに観測値と数値計算を組み合わせた独自の手法を用いて、風上の土地利用が風下の微気象に及ぼす影響を評価した。

1. 顯熱移流条件下の気温分布の解析

背の高い植物群落が風下の気層の気温分布に及ぼす影響を明らかにするため、トウモロコシ畠の風下に隣接する牧草地で気温分布を詳細に観測し、気象要素との関係を検討した。その結果、気温の水平分布は正味放射量の大きさによって変化することがわかった。すなわち、正味放射量が大きい（小さい）ときは、牧草地上の気層全体で風上のトウモロコシ群落を熱源（冷熱源）とした気温の水平勾配が形成され、また境界の地表面付近では、他の点より気温が高い（低い）領域が形成された。

上述の現象と気象要素との関係をさらに詳しく調べるため、高さ 0.5m の境界(0m)と風下側 30m 地点との水平気温差を高温（低温）部形成の指標として、また高さ 1.5m の水平気温差を水平方向気温勾配の指標として、それら気温差と正味放射量および風速との関係を調べた。その結果、正味放射量が正のとき、いずれの気温差も正味放射量に支配され、風速の影響は小さいことがわかった。しかし、正味放射量が負のときは、放射量の変化が

小さいにもかかわらず、両気温差はどちらもばらつきが大きく、そのばらつきは特に風速が小さいときに顕著であった。またこのとき、気温差は風速の増加にともなって複雑に変化した。この変化は、風速に対する気温の鉛直分布がトウモロコシ畠とその風下の牧草地で異なるため、移流によりその影響が風下の気温分布に現れたものと推察された。

2. 風上の群落構造が風下の風速分布に及ぼす影響

風上に背の高い植物群落があるときの風速分布を把握するため、風速分布の観測と数値計算を行った。観測は気温分布の観測と同じトウモロコシ畠に隣接する牧草地で実施した。その結果、トウモロコシ畠から牧草地へ風が吹く南風のとき、牧草地上の風速は境界からの距離にともなって増加した。また、風下側30m地点の風速を基準とした各点の相対風速は、風速の大きさによらず一定であることがわかった。しかし、風上の影響を強く受ける境界付近の風速分布の詳細は観測からは明らかにされなかつた。そこで、この観測結果を数値計算で再現し、詳細な風速分布を検討した。計算に使用したモデルは、植生の障害物による抵抗項を付加した2次元、中立、非圧縮の Reynolds 方程式を基礎方程式とする $k-\epsilon$ モデルである。計算に必要なトウモロコシ群落の葉面積密度 PAD (Plant Area Density) は実測値を用いた。その結果、抵抗係数を0.20とした場合、計算結果は実測した風速分布と良く一致した。これにより、実測では困難だった鉛直分布など細かい風速分布が明らかになった。すなわち、気層全体では下降流が卓越し、境界付近にわずかに上昇流が存在すること、また拡散係数も水平方向に一様ではなく、境界付近で小さいことがわかつた。

次に、計算過程で得られた抵抗係数 (=0.2) を用い、PAD の大きさと群落の高さを変えて数値実験を行い、風上の群落構造が異なる場合の風速分布を検討した。その結果、PAD の増加および群落の高さの増加により、対象気層の上層で下降流が強まり、また下層では鉛直風速がより風下まで現れることがわかつた。また、下層の境界付近の上昇流は、風上群落の高さが 2.0m 以上のときにみられた。この高さは水平風速の水平分布が単調増加から極小値を持つ分布に変化した高さと一致したため、この高さ以上で境界付近に渦が生じたことが示唆された。以上のことから、風上に背の高い植物群落が隣接する場合、風下の風速分布は複雑であるため、熱の流れを評価するためには観測だけではなく数値計算を組み込むことが有効であることが判明した。

3. 草高が異なる群落間の顯熱移流の評価

草高が異なる群落間の移流現象を詳細に評価することを目的に、複雑な気温分布と風速分布をともなう気層において移流拡散方程式を解く新しい手法を開発し、移流現象の評価を試みた。本研究で開発した方法は、実測が困難な風速分布を数値計算で求め、気温の実測値を境界条件として与えて移流拡散方程式を解くという手法である。この手法は、従来の数値計算だけの方法に比べて実測値に忠実な熱の流れを評価できるのが利点である。

この手法を、晴天でトウモロコシ畠から牧草地へ向かって安定した風が吹いたときのデータに適用して、風下の牧草地における顯熱移流を評価した結果、牧草地の顯熱フラックスは高さとともに増加していたことがわかつた。対象領域（境界から30mまで）の気層全体に対しては、おむね水平移流は加熱する方向に、垂直移流は冷却する方向に働いており、顯熱フラックスの変化に対する影響は水平移流が卓越していた。しかし、境界から約20mまでの範囲では鉛直移流の影響が強く、この領域では群落の高さの違いによる影響が現れることがわかつた。またその影響範囲は境界から20mまでであり、それより風下では小さく、特に地表面付近では無視できることがわかつた。

実測値と数値計算を組み合わせた新しい手法により、トウモロコシ群落が風下の牧草地の気温分布など微気象に及ぼす影響を評価した結果、気温分布に及ぼす移流の影響は全体としては水平移流の影響が卓越するが、境界付近では垂直移流の影響が強く現れることがわかつた。このような結果は、観測だけでも、また数値計算だけでも得られなかつたもの

であり、したがって本研究で開発した数値計算と実測値を組み合わせた手法は、草高が異なる群落間の移流現象など複雑な風速分布をともなう現象解明にとって、ひとつの有力な方法になり得ることが示された。

学位論文審査の要旨

主査 教授 浦野慎一
副査 教授 長澤徹明
副査 助教授 谷 宏
副査 助教授 平野高司

学位論文題名

背の高い植物群落が風下農耕地の微気象に及ぼす影響と その評価手法に関する研究

本論文は5章からなる130頁数の和文論文で、図59、表6、引用文献88を含んでいる。他に参考論文4編が添えられている。

農耕地の微気象は、風上で形成された大気中の熱、水蒸気などが移流によって風下に運ばれることで微妙に変化する。したがって、農耕地の栽培管理や水管理計画をより精密に策定するためには、移流による微気象の変化を把握することが重要である。移流の研究はこれまで地表が平坦な条件で行われ、農耕地が背の高い植物群落等と隣接している場合については、風速分布の観測が困難であることなどにより、今までほとんど行われていない。本研究は、風速分布を数値計算で与え、実測値を境界条件として与えて移流拡散方程式を解くという新しい手法を用いて、風上に背の高い植物群落が隣接する場合の風下牧草地の微気象を詳細に明らかにしたものである。

1. 顕熱移流条件下の気温分布の解析

トウモロコシ畑の風下に隣接する牧草地で気温分布を観測し、気象要素との関係を検討した。その結果、正味放射量が大きい（小さい）ときは、牧草地上では風上のトウモロコシ群落を熱源（冷熱源）とした気温の水平勾配が形成され、また境界の地表面付近では高温（低温）部が形成されることがわかった。また、境界(0m)と風下側30m地点との水平気温差を指標として、正味放射量と風速が高温部の形成（高さ0.5m）と水平気温勾配（高さ1.5m）に及ぼす影響を調べた結果、正味放射量が正のとき、いずれも正味放射量との関係が強く、風速の影響は小さいことがわかった。しかし正味放射量が負のとき、気温差は風速の増加に対して複雑に変化した。この変化は、トウモロコシ畑と牧草地で風速に対する気温の鉛直分布が異なるため、その影響が現れたものと推察された。

2. 風上の群落構造が風下の風速分布に及ぼす影響

牧草地の風速分布を把握するため、気温分布の観測を行った牧草地を対象に風速分布の観測と数値計算を行った。観測から、トウモロコシ畠から牧草地へ風が吹く南風のとき、牧草地上の風速は境界からの距離とともに増加し、また風下側30m地点の風速を基準とした各点の相対風速が風速の大きさによらず一定であることがわかった。この観測結果を植生の影響を考慮した2次元、中立、非圧縮の Reynolds 方程式を基礎方程式とする $k-\epsilon$ モデルによって数値計算で再現した結果、葉面積密度 PAD (Plant Area Density) にトウモロコシ群落の実測値を用い、抵抗係数を0.2とした場合、風速分布は実測値と良く一致した。これにより、気層全体では下降流が卓越し、境界付近に上昇流が存在すること、また拡散係数も水平方向に一様ではなく、境界付近で小さいことがわかった。計算で得られた抵抗係数を用い、PAD と群落の高さを変えて数値実験を行った結果、PAD と群落の高さが増加すると、対象気層の上層では下降流が強まり、また下層では鉛直風速がより風下まで現れることがわかった。また、風上群落の高さが2.0m以上のとき、境界付近に渦が生じることが示唆された。

3. 草高が異なる群落間の顯熱移流の評価

草高が異なる群落間の熱の流れを精度よく評価するため、実測が困難な風速分布を数値計算で与え、また気温の実測値を境界条件として与えて移流拡散方程式を解くという新しい手法を使って、牧草地上の気温分布、フラックスの変化等を検討した。この手法により、晴天日にトウモロコシ畠から牧草地へ安定した風が吹いていたときのデータを使って計算した結果、対象領域（境界から30m、厚さ3.5m）の気層全体では、水平移流の影響が卓越していること、また水平移流は加熱する方向に、垂直移流は冷却する方向に働いていることがわかった。また、これにより顯熱フラックスは高さとともに増加していることがわかった。しかし境界付近では、鉛直移流の影響が強く現れること、またその影響範囲は境界から20mまでであり、それより風下では小さく、特に地表面付近では無視できることが明らかになった。本研究で得られたこのような結果は、観測だけでも、また数値計算だけでも得られなかつたものであり、したがって本研究で開発した実測値と数値計算を組み合わせた手法は、草高が異なる群落間の移流現象など複雑な風速分布をともなう微気象の解明にとって、ひとつの有力な手法になり得ることが示された。

以上のように本研究は、背の高い植物群落が風下農耕地の微気象に及ぼす影響を詳細に把握することを目的に、実測値と数値計算を組み合わせて移流拡散方程式を解くという新しい手法を開発して、背の高いトウモロコシ群落の風下牧草地の微気象を明らかにしたものであり、その成果は学術上、応用上高く評価される。よって審査員一同は、中井太郎が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があると認めた。