

課題名 4RF-1301 阿蘇を構成する植生の蒸発散の比較研究：草原の維持は水資源涵養に寄与するか？

課題代表者名 宮沢 良行（国立大学法人九州大学 東アジア環境研究機構 研究支援室）

研究実施期間 平成25～26年度

累計予算額 19,793千円（うち26年度10,417千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 灌木林、蒸発散、草原、土地利用形態、水資源

研究体制

- (1) 草原の蒸発散量の実測とその環境応答の解明（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構）
- (2) 森林の遮断蒸発および関連する林分構造の解明（公立大学法人熊本県立大学）
- (3) 森林植生による蒸散の実測と増減を生むメカニズムの解明（国立大学法人九州大学）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

雄大な草原を有する阿蘇は、人々の利用管理とその自然条件が生み出した二次的自然環境であり、日本を代表する「社会生態学的ランドスケープ」である。これまで草原は、肥料の採取、そして近代からは畜産業での需要から、野焼きを通じて人為的に森林化を防ぐことで維持されてきた。しかし戦後、日本全国で針葉樹人工林の植栽が進む中、阿蘇でも多くの草原に針葉樹人工林が成立した。また肥料の入手先の多様化、国内での畜産業の衰退、そして野焼きを主体的に実施する牧野組合の高齢化により、こうした産業での草原保全が困難となってきている。野焼きが行われずに管理されなくなった草原には灌木が侵入するようになった。進行する樹林化による草原面積の減少に対して、景観および生物多様性の保全を目的に、様々な取組がなされている。しかしその活動は主に募金を通じて維持されており、公的な財政支援も恒久的な財源もないという問題を抱えている。

一方、阿蘇を集水域とする白川の下流に位置し、世界有数の地下水利用都市の熊本市では、地下水位が長期的に低下傾向を示しており問題となっている。熊本県および市では地下水保全条例の制定やくまもと地下水財団の設立、および財団による保全活動が実施されるなど、独自の地下水保全活動が行われている。

草原の植林に伴う生態系による水資源の消費：蒸発散(ET)の増加と、降水量とETの差である水資源（河川流出量や地下水への流入量）の減少、との関係は多くの海外の研究により報告されている。阿蘇の草原の減少と熊本市周辺での地下水位減少との関係が学術的に支持されれば、その成果は、阿蘇の草原再生を取組の一つとして位置づけた、一体的な地下水保全体制の構築に強く寄与すると期待されている。

しかしこれまで草原の減少とETを調べた多くの研究と阿蘇とでは、ETに強く影響を及ぼす気象条件が大きく異なり、結果の安易な適用は危険である。阿蘇は中央の山岳部を中心に、日本でも降水量の高い地域であるが、草原と森林のETの比較をした研究の多くがより降水量の低い地域を対象としている。また草原でのETが森林よりも低いと既存研究が挙げた現象および水文過程のいくつかが阿蘇では成立しない可能性もある。こうした点を明確にするには、現場での野外計測および広域でのET評価を可能にする情報の収集が不可欠である。

2. 研究開発目的

本研究では、現在進行する森林化に伴う草原の減少が阿蘇のETを増加させ、水資源を減少させている、という仮説の検証を目的に、阿蘇カルデラ内白川流域の広域での、構成植生のETの推定、そのための推定法の確立と推定に必要なデータの現場での採取、を目的としている。活動を通じて構築されたET推定法を用いて、これまでの草原の森林化、そして今後予想される草原の森林化によるETの減

少を評価する。最後に、仮説の通りに草原の森林化がETの増加をもたらすという結果が得られた場合、こうしたETの増加を食い止める手段としての草原保全活動の経済性を評価する。草原保全に必要なとされる費用を、同量のET削減に寄与すると考えられる他の活動に要する費用と比較することで、水資源涵養の手段としての草原保全活動の経済的な妥当性の検討を行う。

目的としているET推定法の構築には、阿蘇での主要植生、および面積は小さいものの拡大とその防止への関心の高い植生について、種特異的な生物物理学的な諸特性を得る必要がある。そのために、各植生に適した計測法を用いて、ETに関連する諸特性の現場での実測：渦相関法によるフラックス観測、樹液流観測など、を実施する。またETの広域推定には、阿蘇の広域での植生分布と気象条件のデータおよび解析が必要となるため、既に収集されて公開されているデータを活用する。

これまで、そして今後の草原減少が阿蘇各地のETに及ぼす影響を評価するには、草原減少の経緯、そしてその知見に基づいた今後の草原面積減少の予測が必要となる。関連機関への聞き取りと植生図の解析を通じて、草原現象の実態解明を目指す。

3. 研究開発の方法

(1) 草原の蒸発散量の実測とその環境応答の解明

阿蘇草原の蒸発散量の季節変化を明らかにするため、阿蘇西麓台地の草原において牧草(イタリアンライグラス)の出芽期から収穫期にかけて渦相関法による蒸発散量(潜熱フラックス)の長期観測を行った。同時に測定期間中の草原の群落構造を把握するため、牧草の出芽期から収穫期にかけて2~3週間ごとに群落高と葉面積指数(LAI)の生体調査を行った。収集された0.1秒毎の乱流データをもとに、統計量の計算と座標変換、周波数応答補正、蜜変動補正などの処理を行い、30分毎のフラックスを計算した。得られたフラックスについてエラーとノイズを除去した上で、日毎の蒸発散量および各種気象要素のデータセットを作成した。

得られたデータセットについて、降雨後の遮断蒸発と通常の蒸発散を個別に解析するため、はじめに日データを降雨日(0.5mm以上の降水量が記録された日およびその翌日)と無降雨日(降雨日以外の日)に分類した。無降雨日について、蒸発散量および各気象要素の観測値をもとに、Big-leaf型の蒸発散モデル(Penman-Monteith式)を用いて気孔コンダクタンス(g_s)を算出した。

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + c_p \rho (e_s - e_a) r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (\text{式1})$$

ここで、 λ は水の気化熱(0°C で $2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$)、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の勾配(hPa K^{-1})、 γ は乾湿計定数(hPa K^{-1})、 R_n は正味放射量(W m^{-2})、 G は地中熱フラックス(W m^{-2})、 $c_p \rho$ は空気の体積熱容量($\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$)、 e_s は気温に対する飽和水蒸気圧(hPa)、 e_a は水蒸気圧(hPa)、 r_s は気孔抵抗(または表面抵抗: s m^{-1})、 r_a は空気力学的抵抗(s m^{-1})である。式1を用いることで、水蒸気圧 e_a とET、 R_n 、 G 、 r_a の観測値から逆算によって r_s (気孔コンダクタンス g_s の逆数)を算出することができる。 r_a は実測値を基に、超音波風速計による4m高度での風速と摩擦速度の観測値から計算した。

次に降雨日について、各日の気象条件から作成された蒸発散モデルを用いて式1により蒸発散量を計算した。ここで計算される値は、雨の影響で葉が濡れていない場合の通常の蒸発散量に相当するため、この計算値と実際の蒸発散量の観測値との差を遮断蒸発量と仮定した。推定された各時期の遮断蒸発量について、降水量や降水強度ならびに牧草のLAIとの関係を調べた。最終的には、降水量に対する遮断蒸発量の割合を決定することで、一般的な気象データから通常の蒸発散と同時に遮断蒸発量を推定できるモデルを作成した。

(2) 森林の遮断蒸発および関連する林分構造の解明

ETに関連する現象およびETを構成する遮断蒸発も蒸散も、森林の構造に強い影響を受ける。遮断蒸発は降雨後に生態系地上部に付着した水の蒸発量であるが、葉の現存量である葉面積指数に強く影響を受ける。蒸散もまた、水の出口である葉の量である葉面積指数に強く影響されるし、通導機能を持つ材(辺材)の面積あたりの計測値である樹液流速度を基に蒸散速度を推定するには、森林構造の指標である辺材面積を知る必要がある。阿蘇一帯には様々な構造の森林があり、こうした森林構造の変異がETの推定にどれほどの影響を及ぼすかを把握しないと、一試験地で得られた各森林植生の計測データを基にしたETの広域推定をすることは出来ない。

本サブテーマでは、遮断蒸発の計測を実施するとともに、阿蘇一帯の森林、とりわけ最大の面積を擁する針葉樹人工林を対象に、阿蘇付近の森林構造の現状の把握、そして森林構造の変異がETの推定に及ぼす影響の評価、を実施した。

樹液流計測値を基にした蒸散速度の推定に使用する辺材面積については、過去の研究を参考に、入手が容易な樹木の胸高直径を用いた回帰式の作成を行った。一方、遮断蒸発については、やはり既存研究を基に

した、針葉樹林における立木本数と遮断率との関係式を用いて推定できる。すなわち、林分の立木本数を独立変数とした回帰式を用いて遮断率を推定し、その遮断率に年間降雨量を乗じることによって、年間の遮断蒸発量を推定した。なお、既存研究で得られた回帰式の阿蘇地方のスギ・ヒノキ林への適合性については、永野ら(未発表)によって確認できている。以上のように、何らかの方法によって、平均胸高直径と立木本数が推定できれば、蒸散量と遮断蒸発量が推定でき、これらの和として蒸発散量が求められる。その際に必要となるパラメータは、スギ・ヒノキ人工林の齢級別面積構成のような林業統計情報と平均樹液流速ならびに年間降雨量の値のみである。したがって、このモデルは、様々な地域のスギ・ヒノキ人工林に適用できる実用的なモデルであると言える。

熊本県林業統計要覧によると、阿蘇郡市における全森林面積に占める民有林の割合は、1970年～2010年にかけて、93.4～95.0%の範囲でわずかに変動しながら推移しており、阿蘇地方において国有林の占める割合は極めて低いものと考えられた。したがって、民有林のみをシミュレーションの対象とした。阿蘇郡市のうち、外輪山の内側に位置する阿蘇市(旧:一の宮町、阿蘇町、波野村)、高森町および南阿蘇村(旧:白水村、久木野村、長陽村)の3市町村をシミュレーションの対象とした。

開発したシミュレーションモデルでは、対象地域におけるスギ・ヒノキ人工林の齢級別面積の集計・熊本県スギ・ヒノキ林分施業体系図にしたがい、植栽と間伐を行った場合における林分密度と平均胸高直径の推定・推定された齢級ごとの林分密度と平均胸高直径を基にした年間蒸発散量の推定を実施した。なおこうした推定において、間伐の実施および無間伐状態も考慮している。

(3) 森林植生による蒸散の実測と増減を生むメカニズムの解明

森林のETの現場実測および広域推定のためのデータ収集を目的に、サブテーマ(2)で計測された遮断蒸発とともにETを構成する要素:蒸散速度の測定を実施した。樹液流計測および現場実測データを基としたモデル解析を用いて、対象とした森林4植生の蒸散速度の推定および得られたデータの補正を実施した。計測には熱消散式センサーの一つであるGranier式センサーを使用し、連続的に通水材部である辺材を通過する水の流速を計測した。既存研究で計測値および森林スケールでの推定に誤差を生じさせることが知られている要素である、計測値の樹幹内周囲・深度方向の変動、樹液流速の個体間差、夜間の樹液流発生時の計算補正、および葉からの蒸散と樹液流速との時間差について、計測値および広域推定過程で影響が出ない実験設定を構築した。

実測された蒸散速度を用いて、各植生の種特異的な生物学的要素のうち、蒸散速度に強い影響を及ぼす特性である気孔コンダクタンスを計算した。同時に計測された気象データとの比較を通じて、気孔コンダクタンスの環境変化への応答を植生ごとに解明することで、あらゆる環境条件での気孔コンダクタンスの推定および既存研究との比較を可能にした。

計測地点の環境条件を色濃く反映する樹液流速は、環境条件の大きく異なる地点を含む広域の蒸散速度の推定には適さない。そのため、推定を実施する地点の気象データと各植生の面積、そして各植生の気孔コンダクタンスおよびその環境変化への応答のデータを基に、阿蘇カルデラ内の白川流域内各地点の蒸散速度を推定した。各地点の気象条件については、農業環境情報データセンター(農業環境技術研究所、<http://agrienv.dc.affrc.go.jp/>)によってほぼ1km四方に区分けされたグリッドごとに計算されたデータを使用した。気象データで使用したグリッド内の植生ごとの面積については、環境省の植生図(自然環境保全基礎調査 植生調査情報提供、<http://www.vegetation.biodic.go.jp/>)のデータを用いて計算した。これらのデータの解析ではArcGIS10.1(ESRI, Redlands, CA)を使用した。

また阿蘇の草原の減少の基本情報である森林面積の移行およびその詳細について、熊本県阿蘇地域振興局に問い合わせ、その実態の解明に努めた。

森林植生の蒸散に加え、遮断蒸発、および草原と水田のETについても、サブテーマ1および2で得られた結果を用いて、同様の解析を行った。現在分布している草原について、各グリッドで現在拡大を続ける森林植生に置き換わった場合の年間ETの増減を調べることで、草原の減少と森林化が阿蘇の水資源に及ぼす影響の評価を行った。

また水資源の減少およびETの増加として他に考えられる原因である、近年の地球温暖化に伴うETの増加について、熊本平野での地下水減少が報告される前の25年前の気象条件でのETとの比較を通じてその影響を検証した。農業環境情報データセンターの気象データの1982年の数値を用いて、各グリッドの植生ごとおよび全体のETを計算し、各地点のETの増加の有無および程度を解明した。

4. 結果及び考察

(1) 草原の蒸発散量の実測とその環境応答の解明

相關法によって計測された蒸発散量の日値は牧草の生育期間(10月～4月)は概ね0～5mm day⁻¹の範囲で、

夏季の値に換算するとこれまで九州の水田や畑地など低群落の植生で得られている蒸発散量とほぼ同程度の値であった。また、草原の生育が旺盛な2~4月の蒸発散量は平均で2~3mm day⁻¹で、これまでに冬型の作物で得られている蒸発散量と比較すると若干大きな値を示した。これには、草原のLAIの比較的大きいことが影響しているものと推察された。

観測データからPenman-Monteith式の逆算によって得られた気孔コンダクタンス g_s の値は0~0.025 m s⁻¹の範囲で季節変化し、葉面積指数(LAI)の小さい冬季に低く、LAIの大きい春季に高い傾向がみられた(図(1)-1)。春季における g_s の最大値は0.02 m s⁻¹を超えており、これは過去の研究における森林の値よりも大きく、また過去に乾燥地の草原で得られた g_s の最大値0.01~0.015 m s⁻¹よりも若干大きい。一方で、この値は九州の水田(イネ)で出穂期に得られた値とほぼ一致しており、阿蘇の草原(イタリアンライグラス)における蒸発散量が森林よりも大きく作物と同程度であることが伺える。また、11~12月の g_s が(LAIが小さいにも関わらず)1月よりも高く、これには生理的活性が関わっている可能性がある。観測期間中のイタリアンライグラスのサンプルから得られた窒素濃度の季節変化からは、生育初期に窒素濃度が高い傾向をみられ、上記の11~12月の g_s が1月よりも高い結果と整合していた。

気孔コンダクタンス g_s の値は日射量が大い日ほど g_s も高い傾向がみられた(図(1)-2)。一方で、飽差については、一般には乾燥条件で気孔の閉じることが知られているが、0~10hPaの範囲では g_s の明確な低下傾向がみられなかった。両環境要素の観測値から g_s を計算できるようにするため、以下のようにモデル化した。

$$g_s = g_{smax} \times f_1(S_d) \times f_2(VPD) = g_{smax} \times \frac{S_d}{S_d + S_{dh}} \times \left(1 - \frac{VPD}{VPD_0}\right) \quad (式2)$$

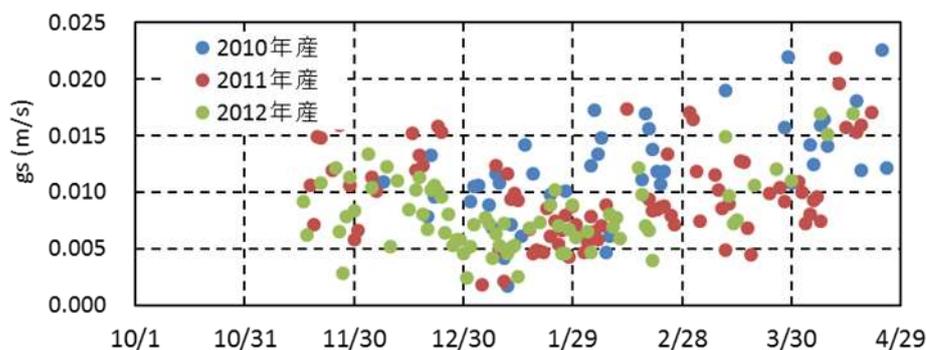
ここで、 g_{smax} は気孔コンダクタンスの最大値、 S_{dh} は g_s が g_{smax} の半分となる時の日射量、 VPD_0 は g_s が0となる時のVPDで、本研究から実験的に得られた値は、 $g_{smax} = 0.025 \text{ m s}^{-1}$ 、 $S_{dh} = 196 \text{ W m}^{-2}$ 、 $VPD_0 = 51.4 \text{ hPa}$ であった。これらパラメータの値を利用し、式1と式2を用いることで気象条件から草原の蒸発散量を計算することができる。この方法で気象条件から蒸発散量を推定した結果、観測値に対する推定値の二乗平均平方根誤差はRMSE = 0.37mm day⁻¹と比較的小さく、実用上十分な精度と考えられた。

降雨日を対象に求められた遮断蒸発量について、一回の降雨イベントに対する遮断蒸発量は最大で5mm程度であった。また、降雨量が多いときほど遮断蒸発量の最大値も大きくなる傾向がみられた。毎月の降水量Pの分配について水収支成分を調べたところ、流出量と貯水量変化と合わせた成分Q+dSは季節変化が大きくマイナスの値(すなわち貯水量が減少)となる月もみられた。一方で、遮断蒸発量 E_i の季節変化は安定しており、月あたり0~20mmの範囲で蒸発散量の大きい月ほど多くなる傾向がみられた。また、年ごとの水収支成分をまとめた結果、生育期間中の総降水量に対する遮断蒸発量の割合 E_i/P は、2010年産が7.3%、2011年産が8.8%、2012年産が3.3%であった(図(1)-3)。この結果から、草原の平均的な E_i/P を6%とし、降水量から遮断蒸発量を推定する以下のモデルを作成した。

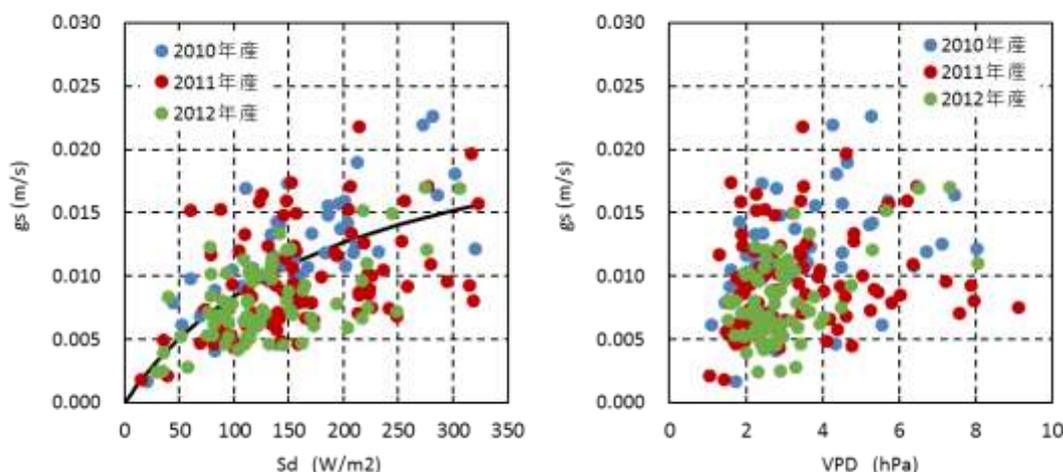
$$E_i = 0.06 \times P \quad (式3)$$

ここで、Pは対象期間中における降水量の合計値(mm)である。森林における E_i/P は通常20~40%程度であり、この結果からは草原の遮断蒸発量が森林と比べて少ないことが分かる。

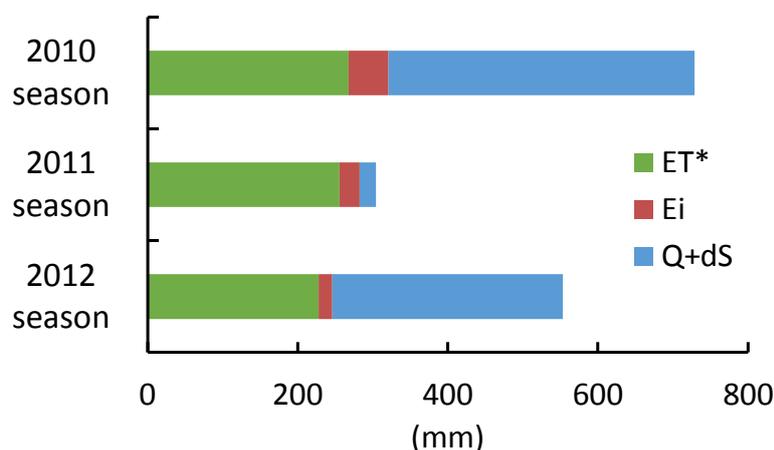
以上により、阿蘇草原の蒸発散量の時間的・空間的分布の評価、ならびに森林の蒸発散との比較解析を行うために必要な、任意の気象条件から草原の蒸発散量を遮断蒸発も含めて推定できるモデル(式1~式3)を開発することができた。



図(1)-1 草原における気孔コンダクタンス(g_s)の季節変化



図(1)-2 草原における気孔コンダクタンス(g_s)の日射量(S_d)と飽差(VPD)への依存性



図(1)-3 草原における年ごとの水収支成分の比較
(Q+dS: 流出量+貯水量変化、 E_i : 遮断蒸発量、 ET^* : 遮断蒸発を除いた蒸発散量)

(2) 森林の遮断蒸発および関連する林分構造の解明

様々な地域で得られた結果を解析した結果、胸高直径と辺材面積とのアロメトリ指数は、スギとヒノキでほぼ1.6となった。他の地域、種、広葉樹を含めた既存研究でもこの数値はほぼ1.6を採っており、胸高直径と辺材面積との関係については、樹種の違いを超えて成り立つ「1.6乗則」が存在する可能性が示唆された。

一方、既存研究により、過密林分における立木本数は断面平均直径(胸高直径の幾何平均)の -1.6 乗に比例して変化することが示されている。胸高直径と辺材面積との間の1.6乗則とを組み合わせることで(計算式から平均胸高直径を消去する)、平均辺材面積が本数密度の逆数に比例することがわかる。このことは、本数密度によらず、過密林分における辺材面積合計は一定となる:「辺材面積の保存則」を意味する。

林分スケールでの蒸散量は、辺材面積合計と平均樹液流速との積によって与えられる。また、平均樹液流速については、林分の成長や密度、間伐の有無などの要因によらずほぼ一定とみなすことができる。したがって、過密林分において辺材面積の保存則が成り立つならば、過密林分における蒸散量は本数密度によらず一定であり、また、最大となっていることが示唆される。この知見は、造林学や森林計画学の分野において精力的に研究されてきた人工林の自己間引きに関する知見と森林水文学の分野において近年活発な研究が行われている樹液流計測の知見とを結びつけたものであり、森林の構造と蒸発散との関係をモデル化する際にきわめて重要な知見だと言って良い。

対象地全域における年間蒸発散量の年々推移を調べたところ、人工林が施業体系図に示された通りに管理された場合、スギ人工林からの蒸発散量は1990年から2010年にかけて徐々に減少することが分かった。このことは、対象地におけるスギ人工林の面積が減ったことよりも、むしろ蒸発散量の小さい高齢級へと年齢構成がシフトしたことによる影響が考えられる。一方、対象地のすべての人工林においてまったく間伐が行われなかった場合、スギ人工林からの蒸発散量は年代の進行にともなって微増した。これは、無間伐林分における林分蒸発散量が高齢になるにつれて徐々に頭打ちになることが影響しているものと考えられる。

この結果から、阿蘇に様々な分布する森林構造の異なる森林では、胸高直径などの指標の大きな違いは予想されるものの、間伐が広く実施されていない限り、辺材面積の変動はきわめて限定的であることが分かった。今回試験が行われた南阿蘇VC試験地の森林構造の数値、そして樹液流計測値を基にしたETの推定への影響は大きくなく、サブテーマ(3)での広域推定の結果を大きく覆すほどの影響はないことが示唆された。

(3) 森林植生による蒸散の実測と増減を生むメカニズムの解明

各森林で蒸散速度は開葉した5月はじめから落葉がほぼ完了した10月末が全体の9割以上を占め、どの植生も同様の季節変化パターンを示した。常緑の針葉樹人工林でも冬の計測値が低く、年間蒸散量への寄与は限定的だった。阿蘇の低温環境では葉の光合成活動は酵素反応の温度依存性のために低く抑制され、光合成に必要なとされる気孔の開放に伴う蒸散も抑制されたためだと考えられる。

他の森林植生と比べて、針葉樹人工林の蒸散速度は高く、クヌギ林で低かった。針葉樹林で蒸散速度が高かった生物学的な原因は、単位地上面積あたりに保有する葉の量(正確には面積):葉面積指数が高く、また幹の通水部分である辺材面積も他植生よりも高かったことである。個葉スケールでの計測から求められた森林スケールの蒸散速度は、その日々変化については樹液流計測で計測された蒸散速度と相関があったが、数値は約1.5-2.3倍であった。この違いは、近年多く指摘される樹液流センサーによる計測値の過小評価が原因であるとして、樹液流計測によって計測された蒸散速度の補正を行った。

聞き取りにより、阿蘇では戦後の草原の減少と森林の拡大は二つの流れの中で進んだことが明らかになった。戦後、豪雨災害による草原の放棄と放棄された場所を含む各地で進んだ針葉樹人工林の植栽が1960年代まで続いた。しかしその後は木材価格の下落などを背景とした林業を取り巻く環境の悪化に伴い、既植人工林の間伐など必要施業すらも行政による支援が求められている現状では、急速な人工林の拡大は報告されていない。こうした植生を取り巻く経緯は、サブテーマ2で調べたこの地域の林齢構成からも確認することが出来る。もう一つの流れが、草原の管理放棄と放棄された草原への灌木林の侵入であり、こちらは現在も進行している。背景には、畜産を取り巻く環境の悪化に加え、草原保全に不可欠な「火入れ」の実施主体でもある牧野組合の高齢化により、現在存在する全ての草原の管理が困難になってきている現状がある。明治時代および戦後まもなくのデータに基づいた草原マップで草原と区分けされていた地域であっても、とりわけ高標高で林道から遠く傾斜が急な地域(五岳東部の根子岳など)では灌木林の群落を観察することが出来る。

阿蘇カルデラ内の白川流域内では、草原がほぼ全域に分布していたのに対し、針葉樹人工林はカルデラ底部および阿蘇五岳の中心部を除く地点(グリッド)に分布していた。針葉樹人工林の見られないカルデラ底部には水田が分布し、これらの三植生が白川流域の大半を占めていた。一方、拡大を続ける灌木林については、面積は阿蘇カルデラ内の白川流域の3.8%に過ぎず、草原と比べても7分の1に過ぎない。また灌木林の成立している地点の多くが阿蘇五岳山頂付近、またはそこから東に連なる高標高地域であり、どの植生でも白川流域内で最も降水量は多いものの冷涼な地域に分布していた。このことは、潜在的には、遮断蒸発は高いものの蒸散は低く抑制される地域で灌木林の拡大が進んでいることを意味する。

各植生が阿蘇カルデラの白川流域内の各グリッドで取りうるET(植生の蒸散量/植生面積。各植生内での単位地上面積あたりのET。対象植生のグリッド内における面積には影響されない)を調べると、標高の低いカルデラ底部(阿蘇谷と南郷谷)ではどの植生でも高いETが観測された。一方、カルデラ中部の阿蘇五岳付近、そしてカルデラを取り囲む外輪山などの高標高地域のグリッドではETが低かった。こうした地域では降水量が大きく、降水量と比例関係にある遮断蒸発量は大きかったものの、気温が低いために蒸散速度が低かったことが原因であった。なお日射量については、流域内で明確な違いは観察されなかった。いずれの地点にも各植生が分布していた場合に予想されるETは、どのグリッドでも針葉樹人工林が一番高く、水田、草原の順であった。拡大を続ける灌木林ではETは他の植生と比較して高くなかった。

各グリッドでの植生のET(植生の総蒸散量/グリッド面積、グリッド内の植生面積とともに増加)は、カルデラ底部の周辺と外輪山に分布する針葉樹人工林で広範囲かつ高く、またカルデラ底部に分布する水田でも高かった。一方、五岳およびその東部に分布する灌木林では、グリッドの数は少なく、グリッドあたりのETも低かった。限られた地域、しかももともと潜在的にETの低い環境条件に疎に分布、という灌木林を取り巻く水文学的な境遇が明らかになった。

その結果、全てのグリッドについて、分布する草原が全て灌木林に置き換わった場合、どのグリッドでもETは低

下するという、本課題の開始当初の予想とは正反対の結果が得られた。またこれまでに草原から移行したと考えられる現在の灌木林について、そのETが阿蘇カルデラ内の白川流域のETに占める割合は2.8%であり、それが草原に変化した場合(灌木林の拡大がなかったと仮定した場合)のETの変化量はさらに小さい。現在の灌木林の全てのグリッドについて、昔あった草原が急に灌木林に置き換わったとしても、河川流量などの水資源に及ぼす影響は検出できないほど小さいと考えられる。このため、近年進行する灌木林の拡大そのものは、この地域のETの増大、そしておそらく下流域の地下水位の低下に対して直接的に寄与していない、あるいはその寄与は極めて限定的である、ことが明らかとなった。

ここで留意されるべきことは、本研究で森林植生との比較対象で用いられた草原とは、阿蘇の一般的な草原を代表する特性をもつわけではなく、そのETは草原で予想される上限値であること、である。草本植物の中でも成長が早い(ETも高いことが予想される)牧草用の種からなる群落でありながら、牧草としての利用および家畜による採食もされない本試験地では、この地域の草原として採りうる最大のETが期待される。阿蘇の現場では、管理放棄された牧草地、あるいはその牧草地から天然草原に分布を拡大した牧草群落、に該当する。こうした草原が、実際にどれほどの面積を占めているのか、および草原全体のETにどれほど寄与しているのか、といった問題についての定量的な評価およびその寄与を考慮したETの広域推定については、本研究の視野および技術を超える内容であるため、これ以上の議論は行わない。本研究の草原試験地のこうした特性を考慮すると、草原のETが森林と同程度あるいはより高いという本研究の結果は、成長の早い牧草地では特に、現状維持と森林化を阻止だけに頼った活動は、水資源涵養には寄与しないことを明らかにした。逆に言えば、特に潜在的なETの高い低標高地域に広がる現状の草原の利用と管理は、一帯のETを低く抑制する水資源涵養の活動であることも示唆している。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

日本に特有の気象条件、植生そして景観における草原およびその代替植生を対象に、実際にETの実態を解明し、世界的な傾向：草原の森林化はETの増加をもたらす、流域内の河川の流量を減少させる、との違いを明確にした。ともすれば、世界的な調査データを基にしたZhang et al. (2001, Water Resource Research)などの結果を基にして、草原の減少と河川流量や地下水位の低下を安易に関連づけがちになる中、そうした違いを考慮した実験設定を持ち、これまでの傾向と違う結果についても生物学および物理学的に説明をすることが出来た。草原で森林よりETが大きかった原因は、(1)草原のETが日本の代表的な森林植生である針葉樹人工林のETと比べても小さくないこと、(2)現在進行中の草原の森林化に寄与する森林植生が灌木林に限られ、灌木林のETが同じ地域の針葉樹人工林と比べて低いこと、(3)森林で草原よりも大きいと期待されたETの成分の遮断蒸発が灌木林で特に小さかったこと、が挙げられる。(1)については、むしろ他の地域で草原のETが低い理由が、根系が浅い土壌に限定して発達するために土壌乾燥により蒸散が抑制される時期が多いことが挙げられてきた。サバンナなど雨季と乾季が明瞭にある地域では、乾季を種子の状態ですぐ草が発達するため、世界的な研究でETが草原で小さいという傾向が得られやすいが、こうした条件が当てはまる気候を持つ地点は日本には多くない。むしろ蒸散を規定する要素である葉の光合成特性などは草本植物で木本植物よりも高いため、土壌乾燥が軽度で発生頻度も高くない日本の多くの地点では蒸散およびETは草原で高いことが示唆される。(2)については、灌木林がまだ成長途中であり、また灌木林自体が遷移過程の植生であることが一因だと考えられるが、その場合には草原減少のET増加は草原消失の数十年後の現象であり、その影響評価は本課題および多くの環境行政の視野外である。(3)については阿蘇で発生しやすい霧の影響が大きいと考えられ、他の地域では観察されない可能性もある。ETに関係する諸過程を踏まえた本解析によれば、この結果は、この地域で予想される気象変動の年々変動など、幅広い気象条件においても、大きく変わらないと考えられる。また同様の環境条件での草原の減少、あるいは森林の草原化についても適用が可能出ると期待される。

草原で比較的高いETが得られた本研究の結果が変わりうるとすれば、草原の牧草採取地としての利用、および放牧による採食などの管理による、葉面積の低下や、生育初期のET抑制、であろう。サブグループ1では草原の発達に伴うETの増加、そして発達後の高いETが明らかとなっており、刈り取りや家畜による採食がETに及ぼす影響の大きさを示唆している。景観保全や生物多様性の維持など、ともすると森林の拡大ばかりに焦点が当てられてきた阿蘇の草原減少問題について、既存草原での人為的活動の重要性をあぶり出したことは、人為的景観の水文過程研究の立ち上げおよび発展に重要な役割を果たしていると言える。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究により、阿蘇で拡大を続ける灌木林のETが、刈り取りや家畜による採食がなされない環境下の草原とほぼ同程度か、それよりも低いことが明らかとなった。留意すべき点は、この結果は必ずしも草原のETが森林のETよりも常に大きいということを示唆してはいないことである。本研究で比較した森林植生は阿蘇一帯の森林植生を代表する状態(サイズ、種組成、気象条件)であったのとは対照的に、調べた草原では、構成種が家畜飼育目的の生産性の高いイタリアンライグラスでありながら、採食も刈り取りも行われなかった群落であった。すなわち本研究の草原試験地とは、牧草地の種が分布を拡大した、また管理されることなく放棄された状態の植生であり、そのETは草原植生が取り得る上限値、を代表する。実際の草原は、同様に生産性が高いが生育期間の途中で採食や刈り取りがされる牧草地帯;より生産性の低い野草からなる草原;生産性は高いが光合成回路が大きく異なるススキ群落、からなると考えられる。これらの植生は本研究の草原試験地と比べ、それぞれ、ETの高い期間が短く刈り取り後にETが低下する;各時期のETが低い;ことが考えられる。では実際の阿蘇の草原のETが、本研究の草原でのETよりどれほど低いのか、については、草原管理の実態の情報と、野草のETの実測が不可欠である。後者については、草原のET観測に最適な渦相関法の実施例もないため、新たな観測の立ち上げが必要となろう。

一方で、これまでの研究で草原と森林のETの差を生み出す要素として考えられてきた、森林の高い遮断蒸発、および土壌乾燥による草原のETの抑制、は霧が多く発生して湿潤な阿蘇では発生しない、あるいは希であることは確かである。ETの要素の一つである蒸散についても、群落あたりの葉面積(葉面積指数)および葉面積あたりの蒸散速度のいずれについても、刈り取りなどの管理のされない草原では森林と同程度あるいは森林よりも高く、水資源涵養の視点ではこうした草原の価値は森林よりも低いほどである。

本研究で明らかになったことは、湿潤な日本で水資源涵養を目的とした草原管理を政策として推進するならば、灌木林の除去やその拡大阻止と言った現状維持だけでは不十分であり、残った草原の管理利用が重要かつ不可欠な事業として実施されるべきだと考える。

6. 研究成果の主な発表状況(別添.報告書作成要領参照)

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 井上昭夫・永野美穂, 三小田憲史・高木正博・大槻恭一:九州森林研究第68号(2015)印刷中「阿蘇地方のヒノキ人工林における遮断率の観測(I)試験地の設定」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) A. Maruyama, T. Kuwagata and K. Ono: 11th AsiaFlux Workshop, Seoul, Korea, August 2013 “Seasonal variation of stomatal conductance at canopy-scale in relation to crop phenology”
- 2) 井上昭夫・鶴田健二・篠原慶規・宮沢良行・高木正博・大槻恭一: 第69回日本森林学会九州支部大会、201310月「辺材面積に基づく間伐率の提案」
- 3) 井上昭夫・西園朋広: 第125回日本森林学会大会、さいたま市、20144月「樹幹表面積一定の法則。」
- 4) 井上昭夫・鶴田健二・篠原慶規・宮沢良行・高木正博・大槻恭一: 第69回九州森林学会大会(2013)「辺材面積に基づく間伐率の提案」
- 5) 井上昭夫・西園朋広: 第125回日本森林学会大会(2014)「樹幹表面積一定の法則」
- 6) 井上昭夫・永野美穂・三小田憲史・高木正博・大槻恭一: 第70回九州森林学会大会(2014)「阿蘇地方のヒノキ人工林における遮断率の観測(I)試験地の設定」
- 7) 井上昭夫・宮沢良行・丸山篤志: 森林計画・計測における統計理論の応用に係わる若手研究集会(2014)「阿蘇地方の針葉樹人工林における蒸発散のシミュレーション」
- 8) A. Maruyama, Y. Miyazawa and A. Inoue: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2014, 23S-05.

“Estimation of rainfall interception in grassland using eddy flux measurements”

7. 研究者略歴

課題代表者: 宮沢 良行

京都大学農学部卒業、博士(農学)、現在、ハワイ大学マノア校 Research Fellow

研究分担者

1) 丸山 篤志

千葉大学園芸学部卒業、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業研究センター情報利用研究領域

2) 井上 昭夫

高知大学農学部卒業、熊本県立大学環境共生学部准教授

4RF-1301 阿蘇を構成する植生の蒸発散の比較研究：草原の維持は水資源涵養に寄与するか？

(1) 草原の蒸発散量の実測とその環境応答の解明

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

中央農業総合研究センター 情報利用研究領域 丸山 篤志

平成25～26年度累計予算額：4,525千円（うち、平成26年度予算額：1,788千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

阿蘇草原における水資源涵養に関わる蒸発散の実態を明らかにするため、渦相関法による潜熱フラックスの現地観測に基づいて、草原における遮断蒸発を含めた蒸発散の気象応答特性を解析した。観測期間中（3年間）の日蒸発散量は0～5mm day⁻¹の範囲であった。無降雨日における草原の気孔コンダクタンスは最大で約0.025m s⁻¹の値を示し、過去に九州の水田や畑地で得られた値と同程度であった。また、気孔コンダクタンスは日射量と共に増加する傾向がみられたが、飽差との関係（乾燥による気孔閉鎖の傾向など）は明確ではなかった。気孔コンダクタンスの両環境要因への依存性をパラメータ化することで、無降雨日の蒸発散量を推定するモデルを作成した。次に、降雨日について作成したモデルによる蒸発散量の推定値と観測された潜熱フラックスのデータに基づいて遮断蒸発量を求めた。遮断蒸発量は降水量の多いときほど増える傾向がみられ、一回の降雨イベントにつき最大で約5mmの値を示した。牧草生育期間を通じた降水量の合計値に対する遮断蒸発量の合計値の割合は3～9%（平均は6%）であった。これらの結果をもとに、阿蘇広域における草原の蒸発散量を（遮断蒸発を含めて）精度よく推定できるモデルを開発した。

[キーワード]

気孔コンダクタンス、空気力学的コンダクタンス、遮断蒸発、蒸発散、牧草

1. はじめに

阿蘇は、世界最大級のカルデラ地形の上に広がる雄大な草原であり、わが国を代表する風景地として阿蘇くじゅう国立公園にも指定される。日本最大の二次草原には、希少な植物や昆虫が多く生息し、生物多様性上極めて重要な地域である。また、この地域では平安時代から採草、放牧、野焼きなどが行われ、長い年月の間、地域の人々の営みによって草原が維持されてきた。しかし、国内の他の里山と同様、阿蘇でも近年の畜産業の衰退や生活様式の変化により、草原の減少や樹林化が進んでいる。一方、阿蘇を水源とする白川下流では地下水位の長期的な低下傾向が問題となっており、中流域での水田冬期湛水、上流域での水源涵養林の整備等による地下水の保全が取り組まれている。一般に森林は、その主要な生態系サービスの一つとして水源涵養機能を持つとされているが、草原における水涵養機能の実態は明らかにされていない。草原では、森林と比較して雨水の遮断蒸発量が少ないと考えられることから、無降雨時の蒸発散量：ETが同程度であれば地表下への水涵養量は比較的多いことが予想される。

植生の遮断蒸発量は降雨量や降雨強度にも依存し、森林では一般に葉面積が大きいほど降雨量に対する遮断蒸発量の比率 (E_i/P) が大きくなることが知られている (Gash, 1979¹⁾)。過去に観測から得られた森林の E_i/P として、概ね20~40%の値が得られている (Komatsu et al., 2008²⁾)。しかしながら、草原や作物のような低本の (かつ密生した) 群落において遮断蒸発がどのような特性を示すのか知られておらず、 E_i/P がどの程度の値であるのかも明らかでない。また、蒸発散量についても草原における長期間の観測例は限られており (例えば、Wever et al., 2002³⁾) 標高や気象条件の空間的変動が大きい阿蘇広域の蒸発散量を推定するには、その気象応答特性を明らかにする必要がある。

そこで、本サブテーマ課題では、草原の減少が進む阿蘇において、雨水の遮断蒸発を含めた草原群落の蒸発散量について実測を行い、その気象応答特性を解明することで、サブテーマ課題3における過去の気候変動に対する阿蘇広域のETの変化について、定量的な評価を可能にすることをねらいとする。

2. 研究開発目的

阿蘇の草原において牧草の幅広い生育ステージに対して連続的なETの計測を行い、その変化特性を明らかにした上で、日射、飽差、降水量等の気象条件に対する応答特性を定量化する。はじめに、草原のETの季節変化と日々の気象条件をもとに、植物群落の蒸発しやすさを表す気孔コンダクタンス: g_s の値を見積もり、草原におけるその季節変化を明らかにする。得られた気孔コンダクタンスについて気象条件 (特に日射および飽差) との関係を解析し、両者の関係を定量化する。次に、これまで観測例のない草原の遮断蒸発について、実測データをもとに降水量との関係を解析する。両者の関係を定量化することで、最終的に気温、日射量、降水量等の気象条件から g_s や E_i を見積もり、阿蘇の草原におけるETを E_i も含めて精度よく推定できるETモデルを作成する。

3. 研究開発方法

(1) 蒸発散計測の概要

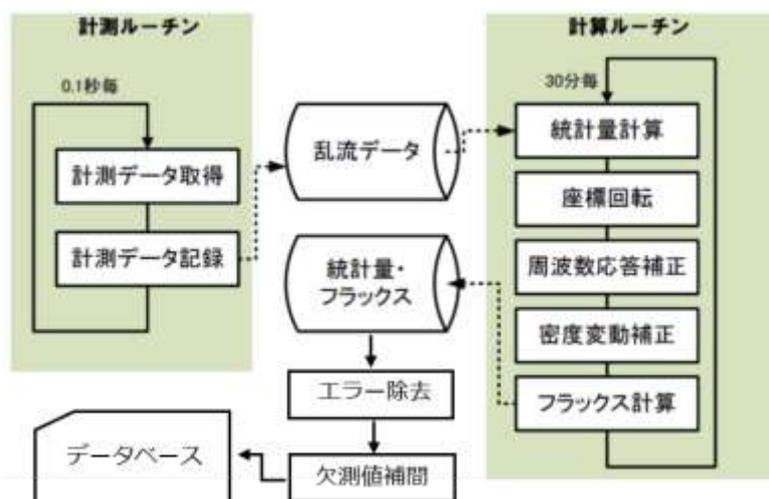
阿蘇草原のETの季節変化を明らかにするため、比較的平坦な阿蘇西麓台地の草原において、牧草 (イタリアンライグラス) の出芽期から収穫期にかけて渦相関法によるET (潜熱フラックス) の長期観測を行った (図(1)-1)。渦相関法による潜熱フラックスの算出に必要な水蒸気濃度および風速の変動成分は、地上4m高におけるオープンパス型 CO_2/H_2O 変動計 (Licor, Lincoln, NE, LI-7500) および3次元超音波風速計 (CSAT-3, Campbell Sci., Logan, UT) を用いて測定し、0.1秒毎 (10Hz) の瞬時値をデータロガー (CR1000, Campbell Sci.) に記録した。同時に、蒸ETに影響を及ぼす環境要因 (気温、相対湿度、日射量、長波放射量、純放射量、地中熱流量、土壤水分) についても計測を行った。気温と相対湿度の計測には温湿度キャップ (HMP45a, Vaisala, Helsinki, Finland) を用いた。日射量と長波放射量、正味放射量は4成分放射収支計 (CNR-1, Kipp&Zonen, Delft, Netherland)、地中熱流量は熱流版 (HFT-3 REBS, Campbell Sci.)、土壤水分はADR土壤水分計 (CS-616, Campbell Sci.) を用いて測定を行った。これらの環境要因は30秒毎に瞬時値を計測し、30分間の平均値をデータロガー (CR23X, Campbell Sci.) に記録した。また、測定期間中の草原の群落構造を把握するため、牧草の出芽期から収穫期にかけて、2~3週間ごとに群落高、草丈、葉面積指数 (LAI) の生体調査を行った。

収集された0.1秒毎の乱流データをもとに、図(1)-2の手順に従ってETおよび g_s 解析用のデータベースを作成した。初めに、温度・気圧・水蒸気濃度と3次元風速の統計量（平均値・共分散）から、鉛直風速算出のための座標回転、0.1秒以下（10Hz以上）の高周波領域における乱流の寄与を推定するための高周波応答補正、水蒸気濃度と気圧の変動による密度補正、を順次行い30分毎の水蒸気フラックス（ETに相当）を計算した。これらの計算処理にはデータロガー上で作動する乱流フラックスの自動計算プログラム（Ono and Maruyama, 2015⁴⁾）を使用した。次に得られた30分毎のフラックス並びに同時に計測された環境要因のデータについて各種統計量および変動傾向を図示化して品質評価を行いエラーとノイズを除去した。このとき、測器の故障等による明確なエラーについては手作業で除去し、その他のノイズはPapale et al. (2006)⁵⁾の検出手順に従って除去を行った。最後に、短時間の欠測値についてはReichstein et al. (2005)⁶⁾のOnline Gap Filling toolを用いて補間を行い、日毎のETおよび各種気象要素のデータセットを作成した。

このようにして作成したETおよび各種気象要素のデータをもとに、次節に述べるよう気孔コンダクタンスを算出した。



図(1)-1 草原における渦相関法による蒸発散測定の様子（左：生育初期、右：生育後期）



図(1)-2 計測生データの処理方法とデータベース作成のフローチャート

(2) 気孔コンダクタンスの算出

降雨後の遮断蒸発と通常の蒸発散を個別に解析するため、はじめに日データを降雨日（0.5mm以上の降水量が記録された日およびその翌日）と無降雨日（降雨日以外の日）に分類した。無降雨日について、前節で得られたETおよび各種気象要素の観測値をもとに、以下のBig-leaf型の蒸発散モデル（Penman-Monteith式）を用いて、 g_s (m s^{-1})を算出した。

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + c_p \rho (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (\text{式1})$$

ここで、 λ は水の気化熱（0℃で $2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ）、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の勾配（ hPa K^{-1} ）、 γ は乾湿計定数（ hPa K^{-1} ） R_n は正味放射量（ W m^{-2} ）、 G は地中熱フラックス（ W m^{-2} ）、 $c_p \rho$ は空気の体積熱容量（ $\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ）、 e_s は気温に対する飽和水蒸気圧（hPa）、 e_a は水蒸気圧（hPa）、 r_s は気孔抵抗（または表面抵抗： s m^{-1} ）、 r_a は空気力学的抵抗（ s m^{-1} ）である。式1を用いることで、水蒸気圧 e_a とET、 R_n 、 G 、 r_a の観測値から逆算によって r_s （ g_s の逆数）を算出することができる。ETと e_a の値には、前節で得られた4m高度での渦相関法による潜熱フラックスの観測値と温度・相対湿度から計算される水蒸気圧の値を用いた。 R_n と G の値にはそれぞれ、4成分放射収支計と熱流板による観測値を用いた。ただし、蒸発散モデルによる逆解析では熱収支を閉じる必要があるため、ここでは便宜的に $R_n - G$ の代わりとして顕熱フラックスと潜熱フラックスの合計値を用いた。 r_a はKosugi (2005)⁷⁾に従って、超音波風速計による4m高度での風速 U_r と摩擦速度 u^* の観測値を用いて以下のように求めた。

$$r_a = \frac{U_r}{(u^*)^2} \quad (\text{式2})$$

以上の計算から2008～2010年産の3年間のデータに対して各時系列（日単位）の g_s を求めた。次に、得られた g_s について日射量など気象条件への環境応答をモデル化およびパラメタリゼーションすることで、最終的にPenman-Monteith式によって草原の広域の蒸発散量を推定できるモデルを作成した。作成されたモデルの詳細は結果および考察で後述する。

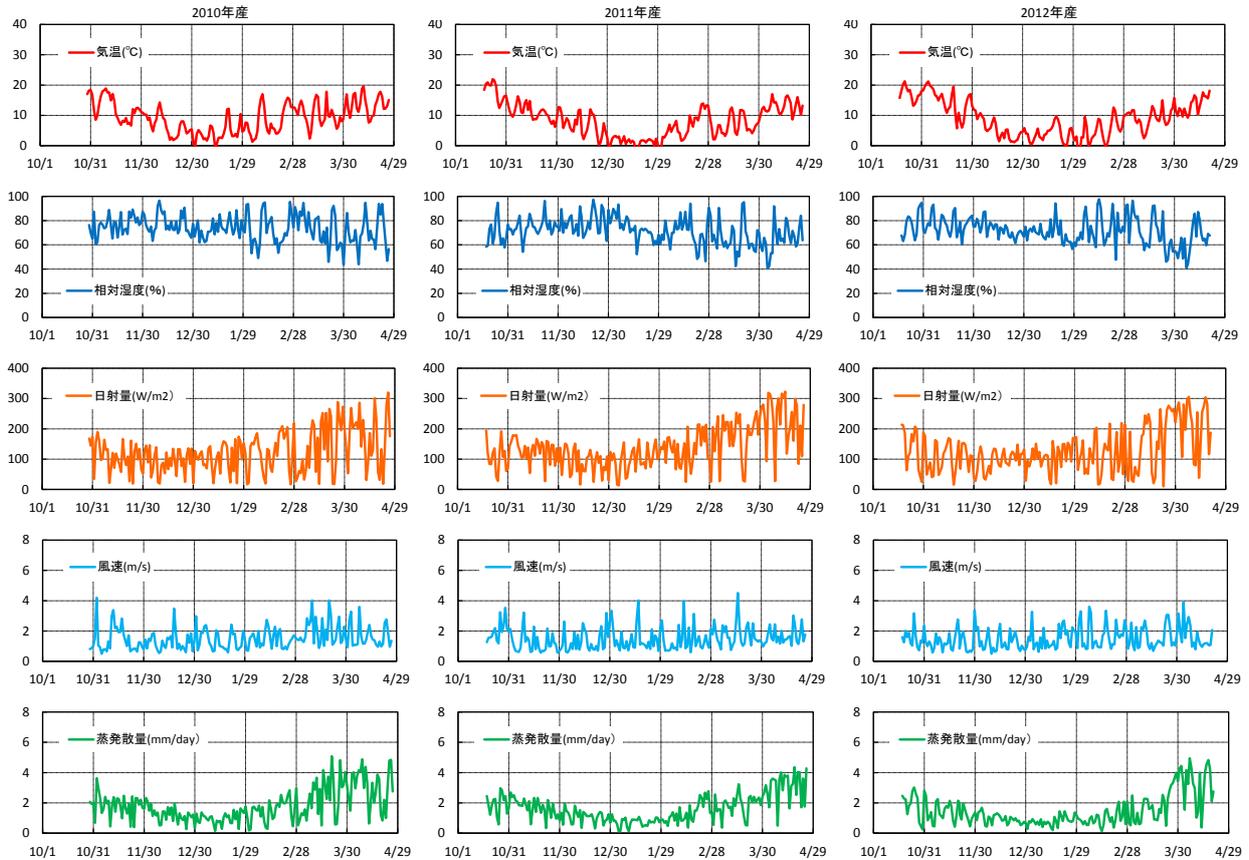
4. 結果及び考察

(1) 蒸発散量の季節変化

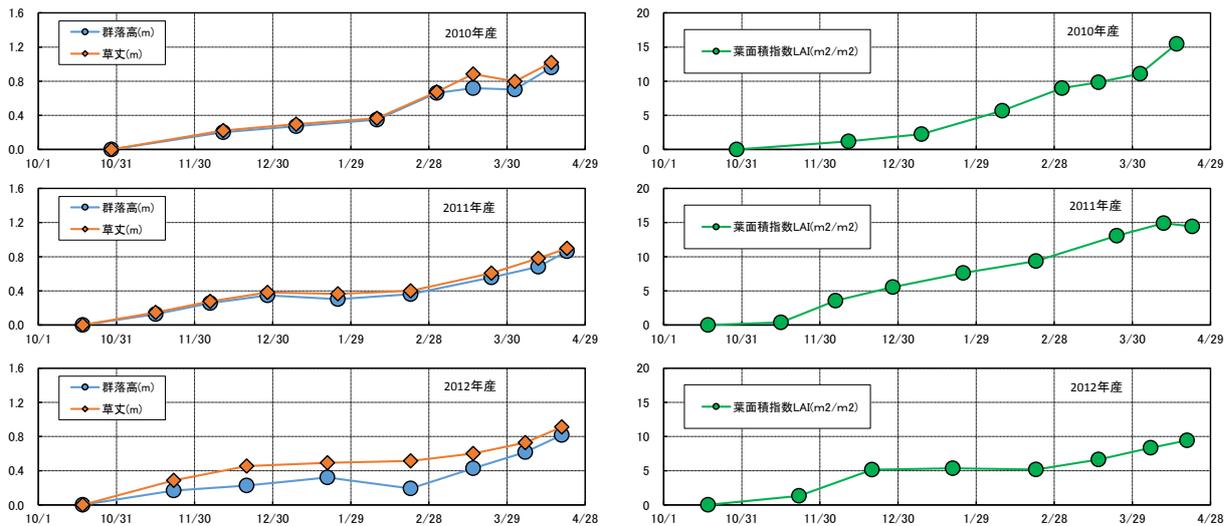
渦相関法によって計測された後に各種補正・補間を行った草原の蒸発散量と環境要因のデータについて、その季節変化を図(1)-3に示す。ここで、それぞれの年産は牧草の収穫時の年で表しており、実際の生育時期は2010年産が2009年10月～2010年4月、2011年産が2010年10月～2011年4月、2012年産が2011年10月～2012年4月である。気温はおおむね0～20℃の範囲で、秋季から冬季にかけて単調に下降、冬季から春季にかけて単調に上昇であった。草原のLAIが大きく増加する2～4月の気温の変動が比較的大きくおおむね0～20℃の範囲で、ETの環境応答について幅広い温度範囲でのデータを得ることができた。蒸発散量の日値は、生育期間を通じると概ね0～5mm day⁻¹の範囲で、夏季の値に換算するとこれまで九州の水田や畑地など低群落の植生で得られているET

(Maruyama and Kuwagata, 2010⁸⁾; Ohba, 1988⁹⁾) とほぼ同程度の値であった。また、草原の生育が旺盛な2～4月の蒸発散量は平均で2～3mm day⁻¹で、これまでに冬型の作物（コムギ、イグサ等）で得られている同時期のET（例えばMaruyama et al., 2004¹⁰⁾）と比較すると若干大きな値を示した。これには、2～4月の気温の変動が大きかったこと、および後述するよう草原のLAIの比較的大きい

この両方が影響しているものと推察される。



図(1-3) 渦相関法によって計測された草原の蒸発散量および気象要素の季節変化



図(1-4) 観測期間中の群落構造の季節変化 (左：群落高・草丈、右：葉面積指数)

生体調査から得られた草原の群落構造の季節変化を図(1-4)に示す。草原の群落高と草丈は、出

芽後すぐに増加したのち、冬季は0.5m以下でほぼ横ばいであったが、2~4月に大きく増加し最大で約1mに達した。また、LAIは年によっては最大で15以上にも達し、同様に低群落であるイネ、ダイズ、トウモロコシ等のLAIと比較するとかなり大きな値であった。また、草原の群落構造が年によって大きく異なり、例えば2012年産では、冬季の草丈やLAIが他年産より大きいにも関わらず群落高は逆に低かった。この理由として、観察からは地上部の重みによって倒伏していたことが挙げられる。あるいは、地上部/地下部のバランスが影響していることも考えられる。いずれにしても、同じ草原でも群落構造が変化することから、適切な蒸発散量の広域評価のためには、モデルの推定値に対するこれら群落高やLAIの影響を評価する必要があるものと考えられた。

(2) 気孔コンダクタンスの季節変化

草原における3年間の観測データから得られた空気力学的コンダクタンス g_a および g_s の季節変化を図(1)-5に示す。ここで、 g_a および g_s はそれぞれ式1のPenman-Monteith式における r_a および r_s の逆数に相当する。

摩擦速度の観測値から式3によって得られた g_a の値は $0 \sim 0.05 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で、牧草の生育にとまなう明確な変化傾向は見られなかった。なお、ここで得た g_a について、以下の群落高 h に対するFAOの経験式(Allen et al., 1998¹¹)に照らすと、草原の g_a は生育期間を通じておおむね $h = 1.0\text{m}$ の群落高のときの計算値に相当していた。

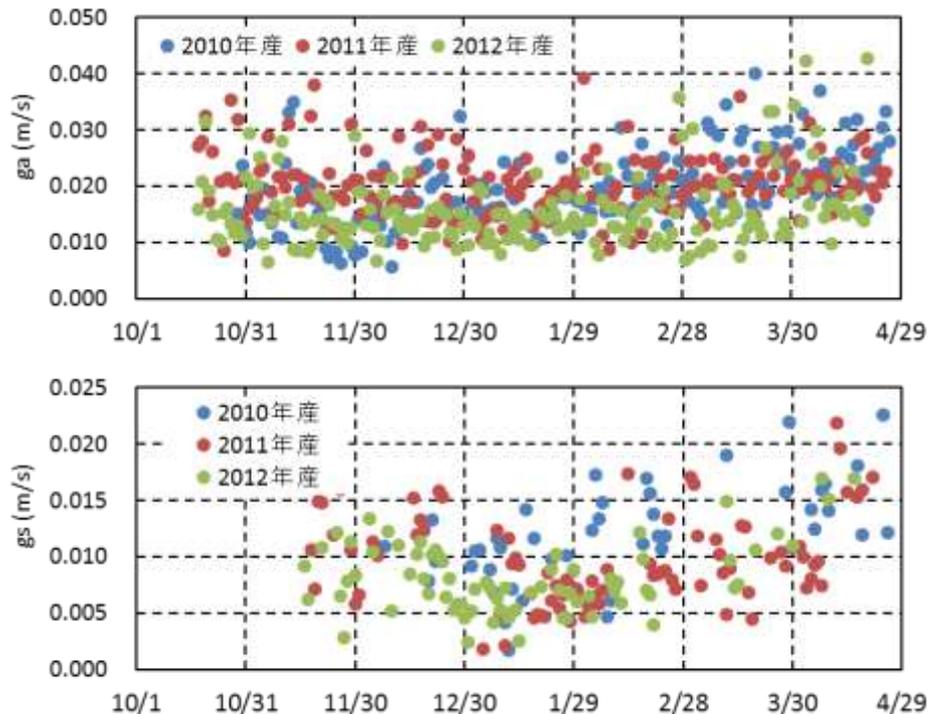
$$r_a = g_a^{-1} = \frac{\ln\left[\frac{(z-d)/z_{0m}}{z_{0h}}\right] \ln\left[\frac{(z-d)/z_{0h}}{z_{0m}}\right]}{k^2 U_z} \quad (\text{式4})$$

$$d = 0.67h, \quad z_{0m} = 0.123h, \quad z_{0h} = 0.1z_{0m}$$

ここで、 k はカルマン定数(=0.4)、 U_z は高さ z における風速(m s^{-1})、 z は風速の観測高度(m)、 d は地面修正量(m)、 z_{0m} は運動量に対する粗度長(m)、 z_{0h} は顕熱に対する粗度長(m)、 h は群落高(m)である。実際の牧草の群落高は図(1)-4に示すよう冬季は0.4m以下で推移し、3月から徐々に増加して4月下旬に0.8m前後に達しているが、この値を式4に代入して求めた g_s の値は図(1)-5における観測値と(特に冬季に)大きく乖離していた。この理由として、牧草の葉面積指数が冬季でもLAI=5前後と比較的大きいことから、比較的疎な群落を対象としている式4の当てはまりがよくないものと推察される。そのため、本研究において草原の蒸発散量の広域評価を行う上での r_a については、式4において群落高を $h=1.0\text{m}$ と一定にして求めることとした。

一方、 g_s の値は $0 \sim 0.025 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で、葉面積指数(LAI)の小さい冬季に低く、LAIの大きい春季に高い傾向がみられた。Ryu et al. (2008)¹²は同様に、カリフォルニアの草原での渦相関法による観測から g_s が冬季に小さく夏季に大きくなる季節変化を得ている。ただし、本結果における g_s の最大値は 0.02 m s^{-1} を超えており、Ryu et al. (2008)¹²の得た g_s の最大値 $0.01 \sim 0.015 \text{ m s}^{-1}$ よりも若干大きい。これには、 g_s の算出方法の違いに加えて気候条件の違いが関わっていることが示唆される。一方で、Maruyama and Kuwagata (2008)¹³が阿蘇の水田で得た g_s の値は出穂期で約 0.02 m s^{-1} であり、本結果とほぼ同程度であった。また、本研究の結果では11~12月の g_s が(LAIが小さいにも関わらず)1月よりも高く、これにはイタリアンライグラスの生理的活性が関わっている可能性がある。観測期間中のイタリアンライグラスのサンプルから得られた窒素濃度の季節変化からは、生育初期に窒素濃度が高い傾向を示しており(データ略)、上記の11~12月の g_s が1月よりも高い

結果と整合している。また、一般的には、日射量が大きいほど光合成のため気孔が開くため g_s も高くなることが知られており、図(1)-3に示すよう日射量も同様に冬季に小さい季節変化を示すことから、上記の g_s の季節変化には、植物の繁茂状況や生理的活性以上に、次節で述べる g_s の日射や飽差などへの環境応答が反映されているものと考えられる。



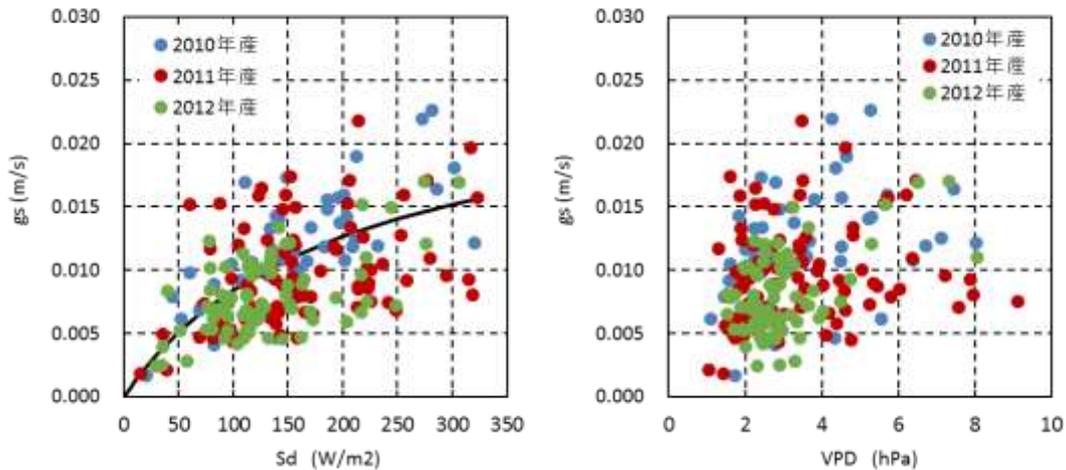
図(1)-5 草原における空気力学的コンダクタンス (g_a) と気孔コンダクタンス (g_s) の季節変化

(3) 気孔コンダクタンスの環境応答とモデル化

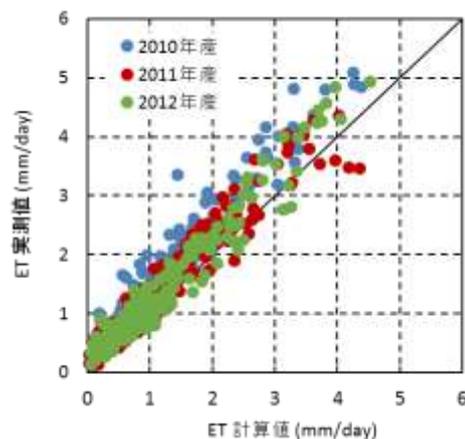
図(1)-6には、観測期間中の日射量 S_d および飽差VPDと g_s との関係を示した。日射量が高い日ほど g_s も高い傾向がみられた。一方で、飽差については、一般には乾燥条件で気孔の閉じることが知られているが、0~10hPaの範囲では g_s の明確な低下傾向がみられなかった。ここでは、両要素の観測値から g_s を計算できるようにするため、以下のようにモデル化した。

$$g_s = g_{smax} \times f_1(S_d) \times f_2(VPD) = g_{smax} \times \frac{S_d}{S_d + S_{dh}} \times \left(1 - \frac{VPD}{VPD_0} \right) \quad (式5)$$

ここで、 g_{smax} は気孔コンダクタンスの最大値、 S_{dh} は g_s が g_{smax} の半分となる時の日射量、 VPD_0 は g_s が0となる時のVPDで、本研究から実験的に得られた値は、 $g_{smax} = 0.025 \text{ m s}^{-1}$ 、 $S_{dh} = 196 \text{ W m}^{-2}$ 、 $VPD_0 = 51.4 \text{ hPa}$ であった。これらパラメータの値を利用し、最終的に式1、式4、式5を用いることで、気象条件から草原の蒸発散量を推定することができる。以上の方法で気象条件から推定した蒸発散量を観測値と比較した結果を図(1)-7に示す。蒸発散量の観測値に対する推定値の二乗平均平方根誤差は $RMSE = 0.37 \text{ mm day}^{-1}$ と比較的小さく、実用上十分な精度と考えられた。



図(1)-6 草原における気孔コンダクタンス (g_s) の日射量 (S_d) および飽差 (VPD) への依存性



図(1)-7 開発されたモデルによって計算された草原の蒸発散量 (ET) と実測値との比較

(4) 遮断蒸発のモデル化

降雨日を対象に式3によって推定された遮断蒸発量について、降雨イベントごとに降水量との関係をみたのが図(1)-8である。降雨イベントの区切りは、降雨日・無降雨日の判別と同様に、0.5mm以上の降水量が記録された翌日までを（遮断蒸発が続いている可能性があるため）含めた。すなわち、降雨のあった翌日が降水量ゼロでその翌日が再び降雨があった場合は、これをひとつの降雨イベントとして扱った。一回の降雨イベントに対する遮断蒸発量は最大で5mm程度で、降雨量が多いときほど遮断蒸発量の最大値も大きくなる傾向がみられた。また、図には遮断蒸発量がマイナスの値となっているデータも見られるが、これは遮断蒸発量を計算する式3において、遮断蒸発を除いた蒸発散量 ET^* の推定誤差に起因するものである。

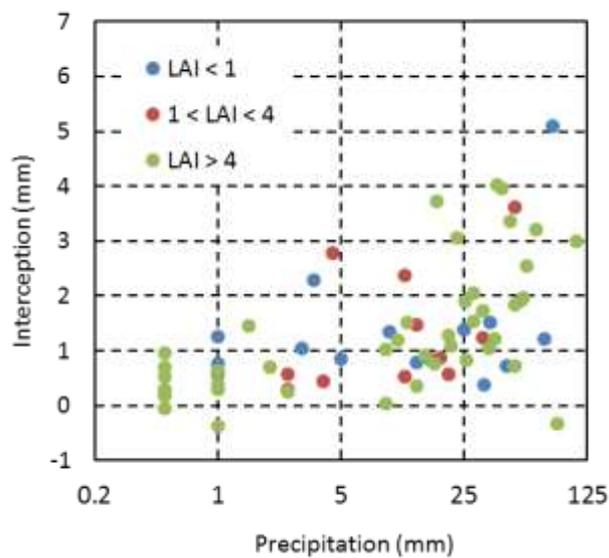
次に観測期間中の毎月の降水量の分配について、遮断蒸発を含めた水収支成分を比較したのが図(1)-9である。流出量と貯水量変化と合わせた成分 $Q+dS$ は、月あるいは年による変動が大きく、マイナスの値（すなわち貯水量が減少）となる月もみられた。一方で、蒸発散量 ET^* （遮断蒸発は除く）の季節変化は安定しており、最小が1月で25mm程度、最大が4月で70mm程度であった。遮断蒸発量 E_i の季節変化も同様に安定しており、月あたり0~20mmの範囲で ET^* の大きいときほど多

くなる傾向がみられた。図(1)-10には各年の水収支成分をまとめたが、生育期間中の総降水量に対する遮断蒸発量の割合 E_i/P は、2010年産が7.3%、2011年産が8.8%、2012年産が3.3%であった。この結果から、草原の平均的な E_i/P を6%とし、降水量から遮断蒸発量を推定するモデルを作成した。

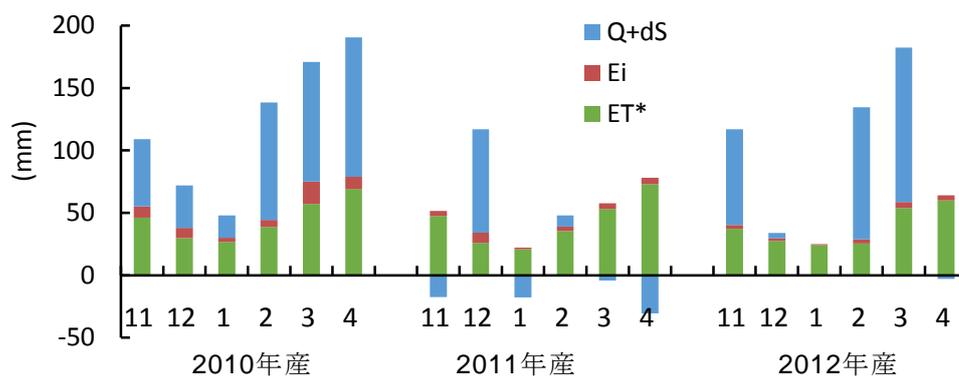
$$E_i = 0.06 \times P \quad (\text{式6})$$

ここで、 P は対象期間中における降水量の合計値 (mm) である。森林における E_i/P は通常20~40%程度であり、この結果からは草原の遮断蒸発量が森林と比べて少ないことが分かる。

以上により、本研究課題全体 (特にサブテーマ3) において、気候変動による草原の蒸発散量の変化と空間的分布の評価、ならびに森林の蒸発散量との比較解析を行うため、任意の気象条件から草原の蒸発散量 (遮断蒸発を除く) を推定するモデル (式1、式4、式5) および遮断蒸発量を推定するモデル (式6) を開発することができた。

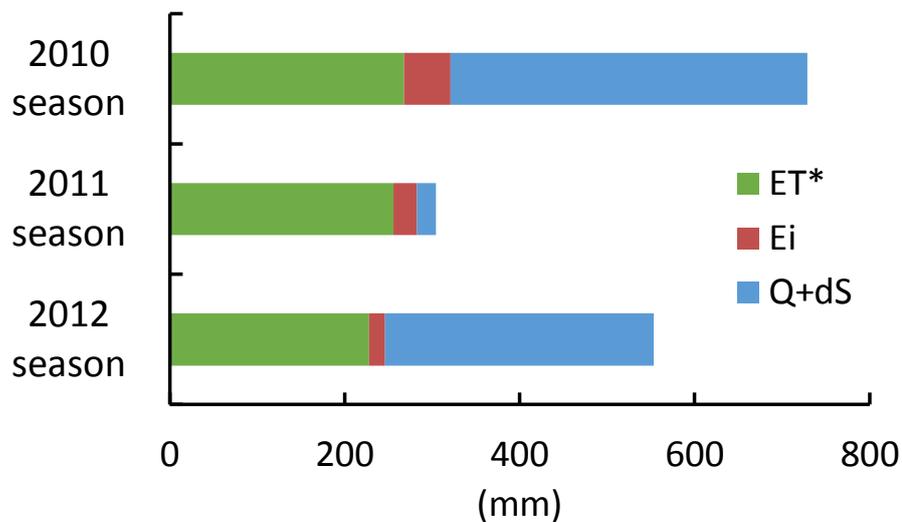


図(1)-8 草原における降雨イベントごとの降水量と遮断量の関係



図(1)-9 草原における月ごとの水収支成分の比較

($Q+dS$: 流出量 + 貯水量変化、 E_i : 遮断蒸発量、 ET^* : 遮断蒸発を除いた蒸発散量)



図(1)-10 草原における年ごとの水収支成分の比較

(Q+dS : 流出量+貯水量変化、 E_i : 遮断蒸発量、 ET^* : 遮断蒸発を除いた蒸発散量)

5. 本研究により得られた成果

これまでに直接測定することができなかつた低木の群落における遮断蒸発量について、渦相関法による潜熱フラックスの観測値から降雨日と無降雨日を分けて解析することで、遮断蒸発量を合理的に見積もることが可能になった。また、この新たな解析手法によって、これまでに観測事例のない草原の遮断蒸発量について、降水量との関係を定量化することが可能となり、森林と比較することのできる総合的な蒸発散モデルを作成することができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

阿蘇くじゅう国立公園における草原の水資源涵養機能の実態として、遮断蒸発量が森林に比べて少なく、草原の維持は、降雨時には地下貯留もしくは河川流出に寄与することを示唆する結果が示された。一方で、無降雨時と乾燥時には草原の蒸発能が森林よりも高く、水資源涵養の機能は相対的に低くなると考えられた。ただし、草原の形態（寒地型牧草、採草地、放牧地）によって蒸発能が異なることを示唆する結果が得られ、今後の草原維持（あるいは草地改良）に関して牧草種の選択が生態系サービスを変化させる可能性が示された。本研究で得られた草原の蒸発散に対する各種変数（パラメータ）の値は、今後の草原に関わる各種施策において生態系サービスの定量的な評価に活用されることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

1) A. Maruyama, T. Kuwagata and K. Ono: 11th AsiaFlux Workshop, Seoul, Korea, August 2013

“Seasonal variation of stomatal conductance at canopy-scale in relation to crop phenology”

2) A. Maruyama, Y. Miyazawa and A. Inoue : AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2014, 23S-05.

“Estimation of rainfall interception in grassland using eddy flux measurements”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 105, 43–55.
- 2) Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., Otsuki, K., 2008. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan. *For. Ecol. Manag.* 256, 1189–1197.
- 3) Wever, L.A., Flanagan, L.B., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. *Agric. For. Meteorol.* 112, 31–49.
- 4) Ono, K, Maruyama A., 2015. Development of an onsite computation scheme of eddy-covariance fluxes. *J. Agric. Meteorol.* Submitted.
- 5) Papale, D., M. Reichstein, M. Aubinet, E. Canfora, C. Bernhofer, W. Kutsch, B. Longdoz, S. Rambal, R. Valentini, T. Vesala, D. Yakir. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange

- measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3, 571–583
- 6) Reichstein M, Falge E, Baldocchi D et al., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Glob. Change Biol.* 11, 1424–1439.
 - 7) Kosugi, Y., H. Tanaka, S. Takanashi, N. Matsuo, N. Ohte, S. Shibata, M. Tani, 2005. Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest. *Agric. For. Meteorol.* 132, 329–343.
 - 8) Maruyama, A., Kuwagata, T., 2010. Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agric. For. Meteorol.* 150, 919–930.
 - 9) Ohba, K., 1988. Evapotranspiration from a sweet potato field in the southern part of Kyushu. *J. Agric. Meteorol.* 44, 91–99.
 - 10) Maruyama, A., Ohba, K., Kurose, Y., Miyamoto, T., 2004. Seasonal variation in evapotranspiration from mat rush grown in paddy field. *J. Agric. Meteorol.* 60, 1–15.
 - 11) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
 - 12) Ryu, Y., D.D. Baldocchi, S. Ma, T. Hehn, 2008. Interannual variability of evapotranspiration and energy exchange over an annual grassland in California. *J. Geophys. Res.* 113, 1–16.
 - 13) Maruyama, A., Kuwagata, T., 2008. Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1161–1173.

(2) 森林の遮断蒸発および関連する林分構造の解明

環境共生学部 環境資源学科

井上昭夫

平成25～26年度累計予算額：1,467千円（うち、平成26年度予算額：1,153千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

森林の構造と蒸発散との関係を明らかにすることは、森林の管理方法の違いが水資源に及ぼす影響を評価する上で重要である。本研究では、スギ・ヒノキ人工林を対象として、森林の構造と蒸発散との関係をモデル化した。そして、作成したモデルと既存の林業統計資料をもとに、阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林における蒸発散量をシミュレートした。

まず、蒸散量の主要な決定因子である辺材面積合計について、林分の成長と管理にともなう変化をモデル化した。スギとヒノキにおける辺材面積は、樹種や樹齢、地域の違いとは無関係に胸高直径の1.6乗に比例することがわかった（1.6乗則）。また、過密林分の場合、立木本数は平均胸高直径の -1.6 乗に比例することが知られている。これら2つの事実より、過密林分における辺材面積合計は、林分密度によらず一定かつ上限となる「辺材面積の保存則」を発見した。

次いで、スギ・ヒノキ人工林における蒸発散量の推定モデルを開発した。このモデルと既存のシステム収穫表ならびに林業統計資料をもとに、阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林における蒸発散量をシミュレートした。シミュレーションの結果より、齢級構成の変化と森林管理の有無が、阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林からの蒸発散量に影響していることを示した。

[キーワード]

1.6乗則、システム収穫表、蒸発散、スギ・ヒノキ人工林、辺材面積の保存則

1. はじめに

森林の構造と蒸発散との関係を明らかにすることは、森林の管理方法の違いが水資源に及ぼす影響を評価する上で重要である。例えば、間伐のような森林管理を実施した場合、立木密度が低下するだけでなく、その後の林分成長にも影響を及ぼすことで、将来の林分構造を変化させる。その結果、林分からの蒸発散量も変化することが予想されるが、その変化を精度良く予測できれば、水資源の保全のための森林管理について議論することが可能となる。

これまで森林管理の違いが林分成長に及ぼす影響については、造林学や森林計画学（森林経理学）の分野において積極的に議論されてきた。一方、水資源に対する森林管理の影響については、森林水文学の分野において研究が行われてきた。このような異なる分野における知見を統合し、森林の構造と蒸発散との関係をモデル化することは、学術的な意義はもちろんのこと、上述のように水資源保全のための森林管理について議論する材料を提供するという実務上の利点も大きい。しかし、現在のところ、このような学際的な試みは少なく、これからの研究が求められている。

本研究において対象とする阿蘇地方では、主に戦後の牧野造林（原野造林）によって造成されたスギ・ヒノキの人工林が多く存在する。これらの人工林の面積は年々拡大し、また、林分が徐々

に成長することで、蒸発散量を増加させ、下流域の熊本市における水資源を減少させている可能性がある。しかし、このような人工林が、①どのくらい蒸発散量を増加させているのか？、②その影響は面積の拡大によるものと、林分の成長によるもののどちらが大きいのか？、③森林の管理による影響はどのくらいなのか？といった疑問に対する定量的な回答は存在しない。これらの疑問に答える上でも、森林の構造と蒸発散との関係を明らかにする意義は大きいと考える。

2. 研究開発目的

本研究では、森林の構造と蒸発散との関係を明らかにすること、そして、阿蘇地方におけるスギ・ヒノキ人工林が水資源に及ぼす影響を予想することを目的として、以下の3つの項目について研究を行った。

1. 蒸散量の主要な決定要因である辺材面積合計について、林分の成長と管理による変化を予測するモデルを開発する。
2. 1の結果をもとに、森林の構造から蒸発散量をシミュレートするためのモデルを開発する。
3. 開発したモデルと既存の林業統計資料を組み合わせることにより、阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林からの蒸発散量の推移をシミュレートする。
4. サブグループ(3)によるETの広域推定に必要な遮断蒸発に関連するモデルおよびモデルに必要な計測値を、対象とする森林植生ごとに収集する。

3. 研究開発方法

(1) 辺材面積のモデリング

鶴田ら(2011¹⁹⁾)によって整理されたスギとヒノキにおける胸高直径と辺材面積との関係のデータセットを解析に供した。このデータは、日本各地のスギ6林分、ヒノキ9林分において収集されており、総サンプル数はスギで81本、ヒノキで109本である。サンプルの概要を表(2)-1に示す。

表(2)-1 サンプルの概要

樹種/地域	サンプル数	林齢(年)	胸高直径(cm)*	辺材面積(cm ²)*
スギ (n = 81)				
千葉	6	19	8.1±2.2	36.4±25.4
千葉	6	19	8.6±3.3	51.1±32.8
千葉	6	19	11.6±3.8	74.9±34.8
石川	18	50	48.5±12.7	612.8±259.6
福岡	25	50	30.3±5.6	269.8±98.0
福岡	20	69	35.8±7.5	388.7±144.5
ヒノキ (n = 109)				
福岡	21	18	13.5±1.3	97.0±19.9
福岡	3	23	10.1±2.2	64.9±25.1
福岡	3	26	18.5±1.3	141.2±20.9
茨城	6	31	18.3±3.6	134.2±39.3
埼玉	11	42	22.6±5.7	149.3±80.9
福岡	20	47	20.2±5.1	143.3±66.1
福岡	17	49	21.2±5.8	129.0±62.9
福岡	17	49	14.9±5.0	99.0±60.5
福岡	11	98	45.4±5.5	482.7±134.2

* 平均±標準偏差

スギとヒノキそれぞれのデータについて、RMA回帰を用いて、胸高直径と辺材面積との関係に相対成長式をあてはめた。解析には、統計解析ソフトR (ver. 3.1.1) を使用した。

(2) 蒸発散量のモデリング

スギ・ヒノキ人工林における蒸発散量のシミュレーションモデルを開発した。まず、森林からの蒸発散は、蒸散、遮断蒸発および林床面蒸発の3つに大別でき、これらのうち林床面蒸発の占める割合は蒸散と遮断蒸発に比べて一般に低いとされる。そこで、蒸発散の構成要素として、蒸散と遮断蒸発を取り上げ、これらを以下のようにして個別に推定し、推定された値の和をもって蒸発散量とすることにした。

林分スケールでの蒸散量は、辺材面積合計と平均樹液流速との積として求められる場合が多い。辺材面積合計については、平均胸高直径の値から先に求めたアロメトリ式によって平均辺材面積を求め、その値に立木本数を乗じることによって求められる。また、平均樹液流速については、これまでに以下のようなことが明らかにされている。Granier (1987¹⁷⁾) は、ダグラスファーの間伐林分と無間伐林分において林分スケールでの蒸散量を観測し、両林分での蒸散量の比が辺材面積合計の比と同程度であったことを報告している。Alsheimer et al. (1998¹⁾) は立木本数と林齢の異なる6つのトウヒ林分において、樹木サイズと樹液流速との間に相関がみられないことを示した。Zimmermann et al. (2000²⁰⁾) は、28、67、204および383年生のスコットパイン林分を対象として、林分スケールでの蒸散量と辺材面積合計との間に正の相関がみられたとしている。Delzon and Loustau (2005²⁾) は、林齢10、54および91年生のフランスカイガンマツ林分において、平均樹液流速に有意な差はみられなかったとしている。Kumagai et al. (2007⁷⁾) は、50年生のスギ林分において、斜面傾度によって立木本数と立木サイズは異なるにも関わらず、平均樹液流速は斜面傾度によって変化しないことを示した。同様の結果は、ユーカリなどの広葉樹林でも認められている(例えば、Dunn and Connor, 1993³⁾; Roberts et al., 2001⁴⁾; Macfarlane et al., 2010⁵⁾)。以上のことより、平均樹液流速については、林分の成長や間伐の有無などの要因によって変化しないものと仮定した。なお、ここでは推定される平均胸高直径と立木本数が年単位の時間スケールであることに鑑み、平均樹液流速の時間スケールについても年単位とする。

一方、遮断蒸発については、小松 (2007⁶⁾) の求めた針葉樹林における立木本数と遮断率との関係式を用いて推定できる。すなわち、林分の立木本数を小松 (2007⁶⁾) の求めた回帰式に代入することで、遮断率を推定し、その遮断率に年間降雨量を乗じることによって、年間の遮断蒸発量を推定することとした。なお、小松 (2007⁶⁾) によって求められた回帰式の阿蘇地方のスギ・ヒノキ林への適合性については、永野ら (未発表) によって確認できている。以上のように、何らかの方法によって、平均胸高直径と立木本数が推定できれば、蒸散量と遮断蒸発量が推定でき、これらの和として蒸発散量が求められる。その際に必要となるパラメータは、スギ・ヒノキ人工林の齢級別面積構成のような林業統計情報と平均樹液流速ならびに年間降雨量の値のみである。したがって、このモデルは、様々な地域のスギ・ヒノキ人工林に適用できる実用的なモデルであると言って良い。

(3) 蒸発散量のシミュレーション

1) 対象地の選定

既存の林業統計資料をもとに、シミュレーションの対象を以下のようにして選定した。まず、熊本県林業統計要覧によると、阿蘇郡市における全森林面積に占める民有林の割合は、1970年～2010年にかけて、93.4～95.0%の範囲でわずかに変動しながら推移しており、阿蘇地方において国有林の占める割合は極めて低いものと考えられた。したがって、民有林のみをシミュレーションの対象とした。また、熊本県民有林資源調査書によると、阿蘇郡市における民有林面積に占めるスギ・ヒノキ人工林の割合は、1961年～2010年にかけて、73.2～84.2%の範囲で変動しながら推移していた。したがって、スギ・ヒノキ人工林のみをシミュレーションの対象とした。さらに、阿蘇郡市のうち、外輪山の内側に位置する阿蘇市（旧：一の宮町、阿蘇町、波野村）、高森町および南阿蘇村（旧：白水村、久木野村、長陽村）の3市町村をシミュレーションの対象とした。

2) シミュレーションの方法

開発したシミュレーションモデルを阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林に対し、以下のようにして適用した。まず、熊本県民有林資源調査書より、対象地域におけるスギ・ヒノキ人工林の齢級別面積を集計した（1齢級＝5年）。これにより、1990年～2010年までの対象地域におけるスギ・ヒノキ人工林の齢級別面積を復元できた。次いで、熊本県スギ・ヒノキ林分施業体系図にしたがい、植栽と間伐を行った場合における林分密度と平均胸高直径をシミュレートした（以下、間伐実施）。また、間伐実施と同じ本数で植栽し、その後、まったく間伐を行わなかった場合における林分密度と平均胸高直径もシミュレートした（以下、無間伐）。なお、シミュレーションには、森林総合研究所によって作成された「収穫表作成システム（LYCS）」を使用し、地位については平均的な値（スギ：3級、ヒノキ：2級）に設定した。そして、シミュレートされた齢級ごとの林分密度と平均胸高直径より、年間蒸発散量を推定した。その際、年間降水量を3,000 mm、年間平均樹液流速を 20 mm yr^{-1} に設定した。最後に、先に復元したスギ・ヒノキ人工林の齢級別面積に乘じ、得られた値をすべての齢級について合計することにより、阿蘇の外輪山内部におけるスギ・ヒノキ人工林における蒸発散量の推移をシミュレートした。

（4）森林による遮断蒸発の計測

本課題で対象とした森林4植生について、遮断蒸発の推定に必要な現場観測を実施した。遮断蒸発： E_i とは降雨後に枝葉および幹に付着した水のうち、土壌に到達することなくそのまま蒸発した水の量であり、その数値と蒸散 E との和が蒸発散 ET になる。降雨のうち、遮断蒸発されない水は、幹を伝う樹幹流、または葉の間を通過する林内雨として土壌に到達する。本サブグループでは林内雨と樹幹流を実測することで、各試験値の E_i を計測するとともに、降水量との関係を解明することにより、サブグループ(3)による E_i および ET の広域推定のためのモデルデータを提供する。

サブグループ(3)で計測を実施した南阿蘇 VC 試験地および仙酔峡試験地において林床に雨量計測用バケツを20-25個設置した。バケツのふたには漏斗(直径20cm)を設置することで、バケツが集水する開口部の面積を統一した。バケツに集水された水を定期的に収集して重量を計測することにより、その間の林内雨量を計測した。また樹液流観測の対象外となった草千里試験地(32°53'03.72"N, 131°03'21.958"E)にも E_i の計測を立ち上げた。

樹幹流については、幹にビニル製のカラーを巻き付け、カラーで補足された樹幹流は設置さ

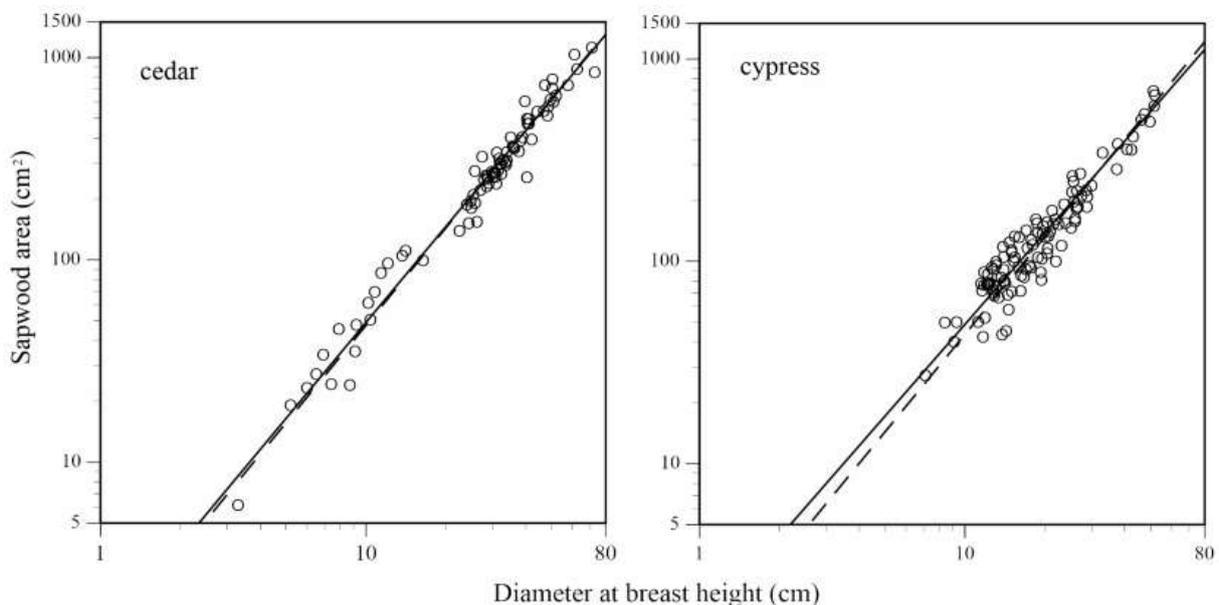
れたホースを伝って雨量計、あるいはバケツに貯留された。バケツを設置した草千里試験地については、定期的にバケツの雨量を採取計測し、樹幹流量の計測を行った。一方、南阿蘇 VC および仙酔峡試験地では雨量計に入った樹幹流量は自動的に記録された。記録には CR1000 (Campbell Sci.)を用いて、10 秒ごとに計測された樹幹流速の数値を 10 分間隔で記録した。

4. 結果及び考察

(1) 辺材面積のモデリング

スギとヒノキにおける胸高直径と辺材面積との関係を図(2)-1に示す。RMA回帰の結果、胸高直径と辺材面積とのアロメトリ指数は、スギで1.577、ヒノキで1.506となった(表(2)-2)。いずれの樹種においても、アロメトリ指数の値は1.6と有意に異ならなかった。

Delzon and Loustau (2005²⁾) は、フランスカイガンショウにおける胸高直径と辺材面積とのアロメトリ指数が1.6385であったことを報告している。また、Kumagai et al. (2007⁷⁾) は、斜面傾度の異なるスギ人工林において、同じくアロメトリ指数が1.55であったと述べている。さらに、Long and Dean (1986⁸⁾) は、ロジポールパイン、ダグラスファー、スコットパインおよびシトカスプルースを対象として、辺材面積合計が平均胸高直径の1.6乗と立木本数との積に比例することを示した。このことは、平均辺材面積が平均胸高直径の1.6乗に比例することとほぼ同義と考えて良い。以上の知見より、胸高直径と辺材面積との関係については、樹種の違いを超えて成り立つ「1.6乗則」が存在する可能性が示唆される。そして、この法則は、単木レベルと林分レベルの両方で成り立っていることも予想できる。



図(2)-1 スギとヒノキにおける胸高直径と辺材面積との関係

* 図中の実線はRMA回帰によって得られた相対成長式を示す。

表(2)-2 スギとヒノキにおける胸高直径と辺材面積との相対成長関係における係数

	スギ (n = 81)	ヒノキ (n = 109)
A	0.113±1.044 (0.026, 0.200)	0.182±0.063 (0.058, 0.306)
B	1.577±0.030 (1.517, 1.638)	1.506±0.049 (1.410, 1.603)

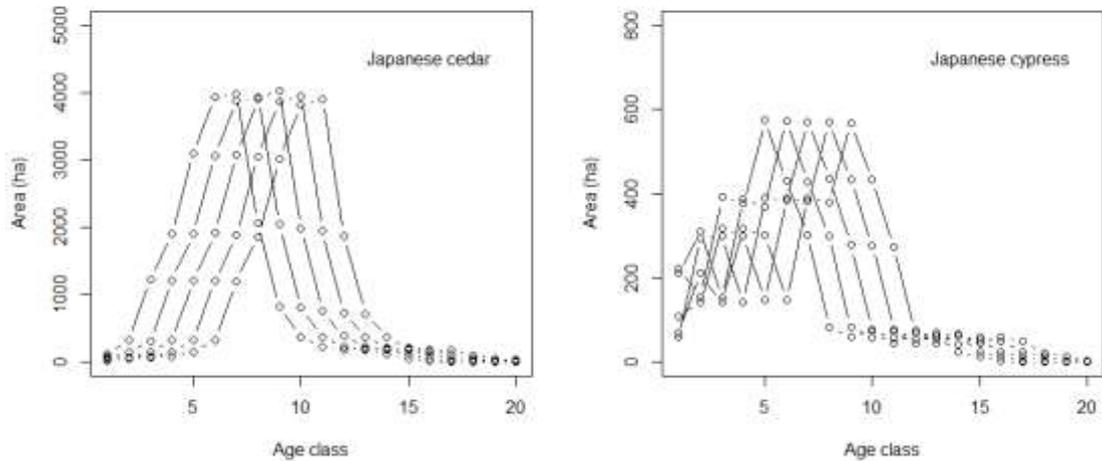
* 表中の値は係数±標準誤差を、また、括弧内の値は95%信頼区間をそれぞれ示す。

アメリカの様々な樹種について、Reineke (1933¹⁸) は過密林分における立木本数は断面積平均直径（胸高直径の幾何平均）の -1.6 乗に比例して変化することを示した。その後、数多くの研究によって、べき指数（ -1.6 乗）の普遍性が検証され、樹種や地域の違いとは無関係にべき指数はおおむね -1.6 前後の値となることが明らかにされている（例えば、Williams, 1996⁹；Inoue et al., 2004¹⁰；Pretzsch 2005¹¹；Pretzsch and Biber, 2005¹²；Solberg et al., 2009¹³；Zeide 2010¹⁴；Nishizono and Tanaka, 2012¹⁵）。いま、断面積直径と平均胸高直径との関係がアイソメトリーであると仮定すると、過密林分における立木本数は、平均胸高直径の -1.6 乗に比例すると考えられる。また、先に示したように、林分レベルでも胸高直径と辺材面積との間には 1.6 乗則が成り立つ。これら2つの関係式から平均胸高直径を消去すると、平均辺材面積が本数密度の逆数に比例することがわかる。このことは、本数密度によらず、過密林分における辺材面積合計は一定となることを意味する。したがって、この現象を「辺材面積の保存則」と名付ける。

上述したように、林分スケールでの蒸散量は、辺材面積合計と平均樹液流速との積によって与えられる。また、平均樹液流速については、林分の成長や密度、間伐の有無などの要因によらずほぼ一定とみなすことができる。したがって、過密林分において辺材面積の保存則が成り立つならば、過密林分における蒸散量は本数密度によらず一定であり、また、最大となっていることが示唆される。そして、過密林分において最大となる蒸散量は、間伐の実施によって減少するものと考えられる。この知見は、造林学や森林計画学の分野において精力的に研究されてきた人工林の自己間引きに関する知見と森林水文学の分野において近年活発な研究が行われている樹液流計測の知見とを結びつけたものであり、森林の構造と蒸発散との関係をモデル化する際にきわめて重要な知見だと言って良い。最近、Inoue and Nishizono (2015¹⁶) は、樹幹表面積についても同様の保存則が成り立つことを明らかにしている。樹幹表面積は林木の呼吸量と関係していることより、単位樹幹表面積あたり呼吸速度を一定と仮定すると、林分スケールでの呼吸量が過密林分において本数密度によらず一定かつ最大となることが示唆される。このように、辺材面積や樹幹表面積の保存則の成立が、林分の蒸散や呼吸のような機機能を規定している、あるいは機機能の制約によって保存則が成り立っているという事実は、きわめて重要かつ興味深い知見だと考える。

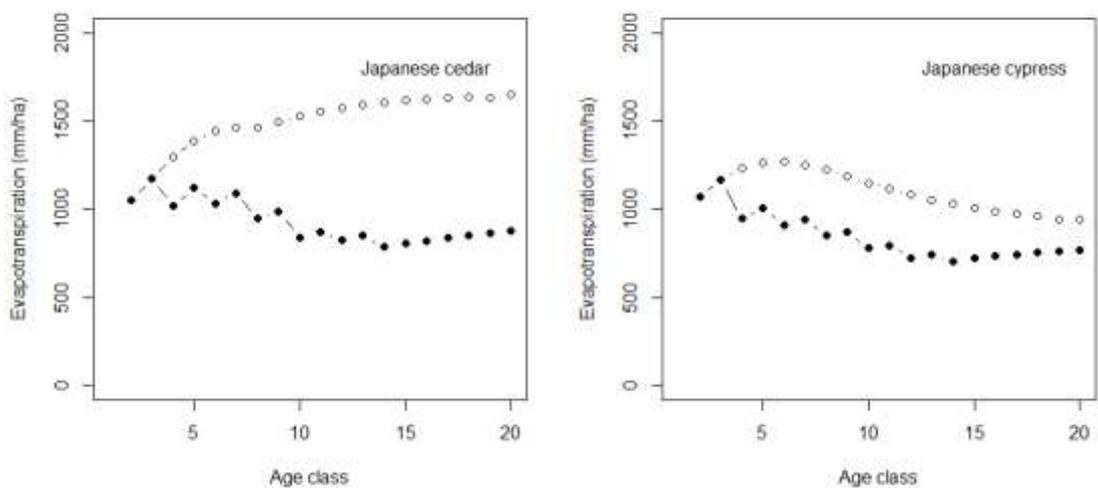
(2) 蒸発散量のシミュレーション

対象地におけるスギ・ヒノキ人工林における齢級別面積構成を図(2)-2に示す。1990年から2010年にかけて、スギとヒノキの人工林における齢級構成は、分布形を大きく変化させることなく高齢級へと推移した。このことは、対象地において、この期間、主伐があまり行われなかった結果であろうと予想される。しかし、1990年から2010年の間に、対象地域においてはヒノキ林の造成が行われた結果、若い齢級での面積構成の変動がみられた。



図(2)-2 対象地におけるスギとヒノキの齢級別面積構成

シミュレーションによって得られた林分蒸散量の齢級にもなう変化を図(2)-3に示す。なお、図中の白丸は無間伐林分、黒丸は間伐林分の値を示している。スギとヒノキのいずれにおいても、3齢級までは間伐林分と無間伐林分との間で蒸散量に違いはみられなかった。しかし、齢級が高まるにつれて、無間伐林分における蒸散量が、間伐林分における蒸散量よりも大きい値を示すようになった。この傾向は、ヒノキよりもスギにおいて顕著であった。無間伐林分において蒸散量が大きかった理由としては、間伐が行われないことにより本数密度が高いまま推移することで遮断蒸発量が間伐林分よりも大きくなることに加え、間伐による辺材面積の減少も起こらないことで、蒸散量も間伐林分よりも大きくなることによると考える。



図(2)-3 齢級にもなう林分蒸散量の変化

* 図中の○と●は、無間伐の場合と間伐実施の場合をそれぞれ示す。

対象地全域における年間蒸発散量の推移を図(2)-4に示す。対象地のすべての人工林が施業体系図に示された通りに管理された場合、スギ人工林からの蒸発散量は1990年から2010年にかけて徐々に減少した。このことは、対象地におけるスギ人工林の面積が減ったことよりも、むしろ蒸発散量の小さい高齢級へと年齢構成がシフトしたことによる影響が考えられる。一方、対象地のすべての人工林においてまったく間伐が行われなかった場合、スギ人工林からの蒸発散量は年代の進行にともなって微増した。これは、図(2)-3に示すように、無間伐林分における林分蒸発散量が高齢になるにつれて徐々に頭打ちになることが影響しているものと考えられる。

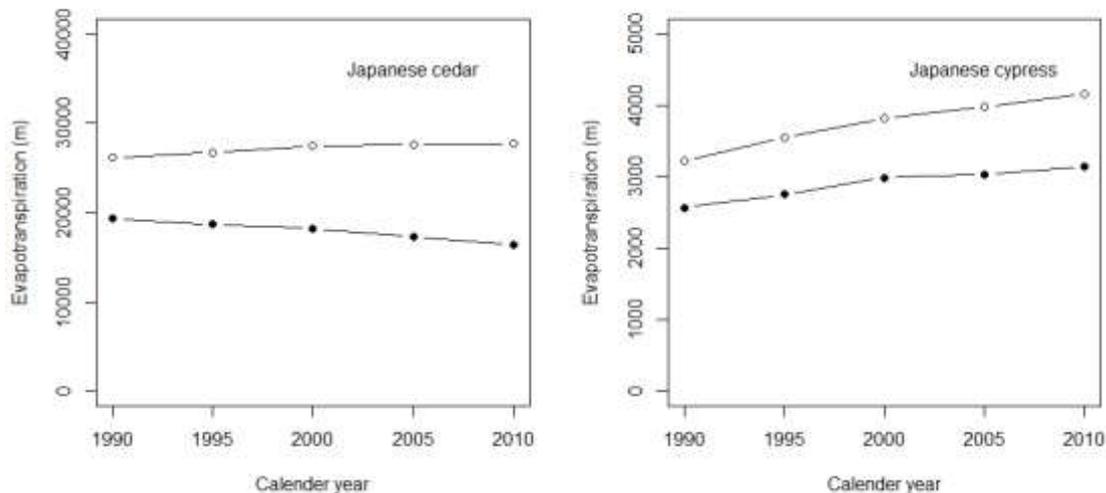
ヒノキ人工林についてみると、対象地のすべての人工林が施業体系図に示された通りに管理された場合でも、ヒノキ人工林からの蒸発散量は徐々に増加した。増加の理由としては、図(2)-3に示すように、林分蒸発散量は年齢が高まるにつれて低下しているため、対象地におけるヒノキ人工林の面積増加が影響していると言っている。また、対象地のすべての人工林においてまったく間伐が行われなかった場合でも、ヒノキ人工林からの蒸発散量は年代の進行にともなって増加した。このことも、ヒノキ人工林の面積増加による影響であろうと考える。

以上のように、阿蘇地域の森林からの年間蒸発散量の推移をシミュレートした結果、ヒノキ人工林の面積の拡大による蒸発散量の増加が認められた。また、スギ人工林についても、間伐を行った場合と行わなかった場合との比較から、間伐を実施しないことがスギ人工林からの蒸発散量の増加をもたらすことが予想された。以上のことより、阿蘇地域における森林からの蒸発散量の増加を抑え、下流域における水資源を保全するためにも、森林の適切な間伐が必要であることが考えられた。

本研究において開発した蒸発散のシミュレーションモデルは汎用性の高いモデルだと考える。まず、蒸散量の推定に用いた辺材面積推定のための相対成長式は、日本全国から収集された試料に基づくものである。また、平均樹液流速を一定とする仮定についても、先行研究によって十分に科学的な裏付けがとられたものである。そして、遮断率を推定するための小松(2007⁶⁾)によって示された回帰式も、わが国の様々な地域の針葉樹林において得たデータに基づいており、阿蘇地方以外の地域にも十分に適用できるものと予想される。さらに、林分の成長シミュレーションに使用したシステム収穫表についても、わが国の様々な地域についてパラメータが調整されている。以上のことより、このシミュレーションモデルを他の地域におけるスギとヒノキの人工林に適用することは容易かつ妥当なものと考えられる。

本研究のシミュレーションでは、年間降雨量と平均樹液流速を一定と仮定した。これは気象条件の年変動による影響を除去し、まずは森林の構造と面積の変化による蒸発散への影響をシミュレートしようとしたためである。いま、気象庁のホームページに掲載されている過去の気象条件を参照するものとする、遮断蒸発量の気象条件(降雨量)に依存した年次変動をシミュレートすることも可能であろう。また、平均樹液流速と気象条件との関係を定式化することができるならば、蒸散量の年次変動も推定できるようになる。このためには、より多くの環境ならびに気象条件での樹液流計測が必要となるが、この関係式に関する簡単な仮定を設け(例えば、気温と降雨量に依存して平均樹液流速が変化するなど)、そのパラメータを変化させながら、蒸散量あるいは蒸発散量が現実に即した値となるようなシミュレーションも可能かもしれない。以上のような気象条件の変動による影響については、今後の課題であるが、このようなシミュレーションが

可能になれば、本研究において提案するモデルの有効性はさらに高まるものとする。同時に、現時点でこのようなシミュレーションができないことは、決してこのモデルの有効性を否定するものでもない。「森林の構造と蒸発散との関係を解析する」という本サブテーマの目的は、このモデルの開発をもって十分に達成できたはずである。



図(2)-4 対象地全域における齢級にともなう年間蒸発散量の変化

* 凡例は図(2)-3と同じ。

遮断蒸発量はクヌギ林、ヤシブシ林およびウツギ林において負の数値を採る、すなわち樹幹流量と林内雨量が林外の降水量を上回る結果が多く得られた。針葉樹人工林については正の数値を採っていたが、これまでの研究と比べて非常に低い数値を採っていた。計測結果の解釈、およびその広域推定については、サブグループ(3)において議論しているので、そちらを参照されたい。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマにおいて得られた成果の科学的意義は、以下の通りである。

まず、胸高直径と辺材面積との間にアロメトリ関係ならびに過密林分における本数密度と平均胸高直径の関係式(Reineke式)より、単位面積あたりの辺材面積合計が過密林分の場合、本数密度によらず一定となる「辺材面積の保存則」を発見した。この保存則は、蒸散量の推定を可能にするだけでなく、森林の構造と機能との関係に関する新たな仮説を生起させる。

また、システム収穫表と林業統計資料を組み合わせ、流域スケールでの蒸発散量をシミュレートする方法を開発した。この方法は、普遍性の高いモデルを用いていることと、地域ごとで整備されている林業統計資料しか必要としないことから、阿蘇地方はもとより、他の地域にも転用できる。したがって、この方法は、森林の管理(コスト)と水資源の保全(ベネフィット)との関係について研究していく上での有効なツールの1つになりうる可能性が高い。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究において提案した蒸発散量のシミュレーション手法は普遍性の高いものである。また、シミュレーションに必要となる資料も地域あるいは樹種ごとに整備されている場合が多いため、わが国の様々な地域におけるスギ・ヒノキ人工林に適用できる。このような特長により、このシミュレーション方法は、間伐のような森林管理が水資源に及ぼす影響を議論する上での材料を提供することが期待できる。例えば、森林環境税のような目的税の投入による森林整備が、水資源保全の観点からみて、どのような効果をどのくらい生み出しているのかを定量的に評価するような行政面での活用が見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 井上昭夫・永野美穂・三小田憲史・高木正博・大槻恭一：九州森林研究、68、印刷中（2015）
「阿蘇地方のヒノキ高齢林における遮断率の観測（I）試験地の設定」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 井上昭夫、鶴田健二、篠原慶規、宮沢良行、高木正博、大槻恭一：第69回九州森林学会大会（2013）
「辺材面積に基づく間伐率の提案」
- 2) 井上昭夫、永野美穂、三小田憲史、高木正博、大槻恭一：第70回九州森林学会大会（2014）
「阿蘇地方のヒノキ高齢林における遮断率の観測（I）試験地の設定」
- 3) 井上昭夫、宮沢良行、丸山篤志：森林計画・計測における統計理論の応用に係わる若手研究集会（2014）
「阿蘇地方の針葉樹人工林における蒸発散のシミュレーション」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Alsheimer, M., Kostner, B., Falge, E., Tenhunen, J.D., 1998. Temporal and spatial variation in transpiration of Norway spruce stands within a forested catchment of the Fichtelgebirge, Germany. *Ann. For. Sci.* 55, 103–123.
- 2) Delzon, S., Loustau, D., 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agric. For. Meteorol.* 129, 105–119.
- 3) Dunn, G.M., Connor, D.J., 1993. An analysis of sap flow in mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forests of different age. *Tree Physiol.* 13, 321–336.
- 4) Roberts, S., Vertessy, R., Grayson, R., 2001. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *For. Ecol. Manag.* 143, 153–161.
- 5) Macfarlane, C., Bond, C., White, D.A., Grigg, A.H., Ogden, G.N., Silberstein, R., 2010. Transpiration and hydraulic traits of old and regrowth eucalypt forest in southern Australia. *For. Ecol. Manag.* 260, 96–105.
- 6) 小松 光, 2007. 日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係. *日林誌* 89, 217–220.
- 7) Kumagai, T., Aoki, S., Shimizu, T., Otsuki, K., 2007. Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Tree Physiol.* 27, 161–168.
- 8) Long, J.N., Dean, T.J., 1986. Sapwood area of *Pinus contorta* stands as a function of mean size and density. *Oecologia* 68, 410–412.
- 9) Williams, R.A., 1996. Stand density index for loblolly pine plantations in north Louisiana. *South J. Appl. For.* 20, 110–113.
- 10) Inoue, A., Miyake, M., Nishizono, T., 2004. Allometric model of the Reineke equation for Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) and red pine (*Pinus densiflora*) stands. *J. For. Res.* 9, 319–324.
- 11) Pretzsch, H., 2005. Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. *Eur. J. For. Res.* 124, 193–205.
- 12) Pretzsch, H., Biber, P., 2005. A re-evaluation of Reineke's rule and stand density index. *For. Sci.* 51, 304–320.
- 13) Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P.G., Hildingsson, A., de Vries, W., 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *For. Ecol. Manag.* 258, 1735–1750.
- 14) Zeide, B., 2010. Comparison of self-thinning models: an exercise in reasoning. *Trees* 24, 1117–1126.

- 15) Nishizono, T., Tanaka, K., 2012. Does the relationship between quadratic mean diameter and stem density in old thinned and unthinned *Cryptomeria japonica* forests deviate from a power function? J. For. Plann. 18, 63–76.
- 16) Inoue, A., Nishizono, T., 2015. Conservation rule of stem surface area: a hypothesis. Eur. J. For. Res. 134, in press.
- 17) Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiol. 3, 309–320.
- 18) Reineke, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. J. Agric. Res. 46, 627–638.
- 19) 鶴田健二、小松 光、篠原慶規、久米朋宣、市橋隆自、大槻恭一, 2011. 樹液流計測に基づいたスギとヒノキの林分蒸散量算定のための辺材面積推定式. 水文学会誌 24, 261–270.
- 20) Zimmermann, R., Schulze, E.D., Wirth, C., Schulze, E.E., McDonald, K.C., Vygodskaya, N.N., Ziegler, W., 2000. Canopy transpiration in a chronosequence of Central Siberian pine forests. Glob. Change Biol. 6, 25–37.

(3) 森林植生による蒸散の実測と増減を生むメカニズムの解明

九州大学

宮沢 良行

平成25～26年度累計予算額：13,791千円（うち、平成26年度予算額：7,462千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

阿蘇では草原がこの100年間減少し続け、代わりに森林が植林または侵入して分布を拡大している。森林植生と草原とでは、構成する植物種の生理特性および植生の物理的特性が大きく異なることから、生態系による降雨の消費：蒸発散(ET)が大きくなることが報告されている。このうちETの要素である蒸散(E)は種ごとに特異的な生理特性を強く反映し、植生間のETの差を生み出す主要因だと考えられるが、地域的な変動も大きく、現場での実測が必要とされる。本課題では、森林植生のETを樹液流計測またはモデルシミュレーションにより計算し、阿蘇を水源とする白川流域のEの広域推定のための基盤構築を実施した。また他サブグループの成果を統括して、白川流域のETの広域推定を行い、草原の減少がETの増加をもたらすか検証した。草原のEは針葉樹人工林より小さいものの、灌木林より高く、また針葉樹人工林を除く植生間でEの環境応答および季節性に明確な違いは見られなかった。

[キーワード]

針葉樹人工林、灌木林、蒸散、樹液流、スケールアップ、気象条件

1. はじめに

阿蘇では戦後の植林に加え、社会構造の変化に伴い、草原の面積が減少している。一方、近年では阿蘇を集水域とする熊本市周辺において、地下水位の減少も報告されている。草原の森林化については、河川流量の消失あるいは減少が多く報告されており(Brown et al., 2005¹); Bosch and Hewlett, 1982²); Farley et al., 2005³)、これらの現象の関連を示唆する。

しかしこれらの研究の対象地と阿蘇とでは気象条件および構成する植生に大きな違いがあるため、既存研究の結果をそのまま阿蘇に適用することには問題がある。まず阿蘇は本来ならば森林植生になる気象条件において、人為的な活動により草原が維持されている生態系であり、強烈な乾季を種子の状態でやり過ごす草本植物で構成される(逆に、休眠などでやり過ごすことの出来ない樹木が生存できない)季節性気候の生態系とは異なる(Buytaert et al., 2007⁴)。こうした草本植生だった地域に侵入定着した樹種には、深根性の外来樹種や材生産を目的とした植林向けの樹種であるなど、森林化の諸過程がETを増加させる要素を含んでいることがある(南アフリカにおける植林への規制はこうした事態を想定している、Dye and Versfeld, 2007⁵)。こうした草原の森林化は阿蘇で進行する森林化とは大きく異なるものであり、森林化がETに及ぼす影響は質的にも量的にも異なると考えられる。実際に、阿蘇と同様に明確な乾季や土壌乾燥の影響がない環境で実施された研究では、森林と草原とでETに違いが見られていない(Robert and Roiser 2005⁶)。阿蘇の草原のETが本当に森林よりも低いのかどうかは、実際に阿蘇で森林と草原のETを比較するまでは

分からないのが実態である。

草原の減少がETの増加をもたらすという仮説を検証する上で、以下の作業が不可欠である。

(1) 阿蘇を構成する植生の実態の理解と、これまでの草原の森林化の経緯を解明する、(2) 阿蘇を構成する主要植生、そして社会的な関心の高い植生について、実態に即したETの推定を実施する、その推定に必要な諸過程について理解し、必要な計測を実施する、(3) ETに植生間の違いが見られた場合には、その生物および物理学的な理由を解明する、(4) 草原の森林化シナリオを想定し、その場合のETの変化を2で得られたETの推定法を用いて評価する。

(1)について、そもそも阿蘇には様々な森林植生が存在し、それらが戦後に大きく増えたことは分かっているが(阿蘇草原再生協議会, 2014)、いつどの植生が増えたのか、また現在ほどの森林植生が増えて問題となっているのかは報告されていない。

(2)を実施する必要がある背景には、既存データを適用することで得られたETは本研究の課題遂行にはそぐわないことがある。これまで草原および森林について、様々な場所および様々な種についてETおよびETに関連する研究が実施されてきた。しかしどの数値を選ぶか明確な基準がなく、また選んだ数値によって結果は大きく変わることが予想される。選んだ数値について、その選定基準を科学的に説明することが出来なければ、行政の推薦課題でもある本課題の遂行に対して、結果ありきでその結果を導くような解析を実施したのではないかと、との批判を受ける可能性すらある。またETの推定について、FAOにある推定法が多く用いられるが、そもそも作物の適切な灌漑量の推定を目的の一つとして発達した推定法は、乾燥地の植物を対象とした計算法を多く用いているため、年間を通して湿潤な阿蘇の気象条件に適応馴化した樹木および草本植物のETの推定には向かないと思われる。

(3)について、草原と森林のET比較について、既存研究の結果が大きく分かれている以上、その根拠を示さずに得られた結果の違いを強調したところで、ある年のある地点での一事例としての評価を免れないだろう。またプロット(20×20~100×100 m²)スケールの数値を元に阿蘇全域に広がる各植生のETを推定するには、その推定法が生物学および物理学的に妥当であること、特に植生間の差を詳細に描き出すことに成功している、という根拠が必要である。

上記の(1)-(4)に加えて、草原の保全が阿蘇のET増加の抑制に効果がある、という結果が得られた場合であっても、その経済性の評価が必要とされる。既に日本では様々な水資源および地下水涵養の取り組みが知られており(冬季の水田の湛水化や森林間伐)、草原は阿蘇の水資源涵養の選択肢の一つであり、唯一実現性のある手段ではない。またその経済性も他の選択肢と比べて優れているとは限らないからである。公的資金を用いた草原保全の経済性を評価するには、草原の保全活動に必要とされる公的資金と、草原の減少に伴うETの増加を代替手段である人工林の間伐でまかなう場合に、間伐に必要とされる資金との比較が有効だと考えられる。

2. 研究開発目的

本サブテーマは、草原よりも森林でETが高いという本課題の仮説検証において、ETの要素である蒸散速度(E)を、対象とする森林4植生について計測し、計測結果を用いたEの広域推定法を確立することにある。また森林ごとにEに違いが見られた場合には、Eに寄与する諸過程について、どの過程が違いを生み出していたのか、それぞれの過程により生み出された植生間の差は地点ごとの環境、植生の状態、そして気象条件の年々変動があった場合でも見られるのか、検証を実施

する。

またサブテーマ(1)-(3)の統括活動として、得られた成果を基に、阿蘇全域の各植生のETの推定法を確立し、実際に阿蘇カルデラ内全域において各植生のETを推定する。推定に必要な諸情報の収集（植生の分布、面積、そして気象条件）を推定すると共に、複数年度についてETの推定を実施し、得られたETの推定値および植生間の違いの年々変動の大きさを推定値の不確実性として評価することを目的とする。

また仮説の通り、ETが草原で小さいという結果が得られた場合には、これまで、そして今後の草原減少に伴う阿蘇カルデラ全域のETの増加を推定する。そのための草原減少のこれまで、そして今後のシナリオを、かつての草原から置き換わった現在の森林植生の面積および空間分布を基に作成する。最後に、草原の今後の減少シナリオについて、予想されるETの増大を森林間伐により相殺する場合に必要とされる間伐費用を推定し、これまでの草原保全活動で必要とされる公的支援と比較することで、草原保全の水源涵養の保全機能の経済性を評価する。

3. 研究開発方法

3.1 蒸散速度の計測とその広域推定法の確立

3.1.1. 計測対象の森林植生

本研究では3.3.で紹介するように、阿蘇を構成する主要な4つの森林植生のうち、3つの森林植生(阿蘇でもっとも面積の大きいスギヒノキからなる針葉樹人工林；森林政策により植栽が推進されているクヌギ人工林；放棄された草原に侵入定着し、分布を拡大するヤシャブシ灌木林)を樹液流計測の対象植生とする。ヤシャブシ灌木林と同様、放棄草原で分布を拡大するウツギ灌木林については、幹が空洞であり樹液流計測による長期間の計測が困難である。そこで、3.2.で紹介する多層群落型の熱ガス交換モデルを用いた推定を実施した。

試験地は、仙酔峡試験地(熊本県阿蘇市蔵原付近、32°54'02", 131°06'05", 標高905m)および南阿蘇VC試験地(同高森町高森3219、32°50'35", 131°08'46", 標高660m)に設置された。それぞれの気象条件は、表(3)-1の通りである。

表(3)-1 各試験地の気象条件。

	標高 (m)	日平均気温 (°C)	年降水量 (mm)	日射量 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	主要植生
仙酔峡試験地	905	12.3	2598	11.8	ヤシャブシ
南阿蘇VC試験地	660	13.1	2294	12.2	スギ、ヒノキ、クヌギ

仙酔峡試験地のヤシャブシ林では、2012年から2013年にかけて、アジア航測株式会社により雨水配分の観測が実施されており(アジア航測, 2013⁷⁾)、本試験ではその試験地を引き続き使用することになった。このヤシャブシ灌木林は長さ約120m、幅約50mであり、道路からのアクセスのよいヤシャブシ灌木林としては阿蘇の同植生の中でも大きい群落である。群落を構成する樹木個体のサイズ、樹高、そして葉量の指数である葉面積指数(LAI)についてはサブグループ(2)で紹介されている。ヤシャブシの開葉は4月下旬から5月はじめであり、落葉は11月中旬にはほぼ完了する。ヤシャブシ林は周囲を草原に囲まれており、林道沿いなどには様々な草本植物も見られるものの、林内には他にノリウツギが共存している以外には下層植生も共存樹種もない。

阿蘇中岳(1506 m)と高岳(1592 m)の中腹に位置する仙酔峡試験地は、中岳方面から伸びる尾根とそれを囲む浅い谷にまたがるように分布している。活動の活発な阿蘇の中岳火口から2kmと近いこともあり、土壌は火山性土壌で、透水性が高い。試験地では12月から頻繁に降雪があり、2月は深い雪に閉ざされる。この地域では霧の発生が多く見られ、降雨以外の降水要因となっている。透水性の高い土壌ではあるものの、頻繁に降雨が観察されることもあり、計測で現場を訪れた際には常に土壌の表層は湿った状態であった。降水が比較的少なかった2013年の8月に土壌を掘ってみたところ、表層30cmまでは湿っており、この試験地の樹木でも草本植物でも、土壌水分含量の低下による乾燥が成長、生存そして蒸散を抑制することはなかったと考えられる。

3.3.2. 樹液流計測とその解析

本研究では熱消散方式(Heat dissipation method)のGranier式樹液流センサーを使用した(Granier, 1987⁸⁾)。樹木の幹の横断面のうち、通道部分(辺材)にセンサーを設置することで、Granierセンサーはある期間(通常10-30分間)にセンサー周辺を流れた樹液流速(F_d , $\text{gH}_2\text{O m}^{-2}\text{sapwood s}^{-1}$, 日積算量の場合は $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$)の平均値を計測することが可能である。設置に際して、通道機能を持たない樹皮の除去と、センサー設置のための穴をドリルで開ける必要があるが(直径2 mm、深さはセンサーによって1 cmまたは2 cm)、こうした損傷の影響は限定的であり、その後は非破壊的かつ安定的に樹液流速を計測することが出来る。近年、センサーを設置し続けることでセンサー周辺の幹の熱伝導特性や樹液流速が変化し、計測される樹液流速の数値が低下することが報告されている(Wullschlegel et al. 2014⁹⁾)。本研究では、そうした影響は今回計測を実施した1年半(落葉樹については1年未満)では限定的だと思われる。またセンサーは計測途中にしばしば故障するが、その場合にはセンサーが付け替えられるために、Wullschlegelらが報告するような自体が発生した可能性は低いと考えられる。

簡単にGranier式センサーの計測の仕組みおよび内在する計測誤差の危険性について説明をする。Granier式センサーは、内部に温度を測る熱電対を内包する二つのプローブ(針型部品、直径2.2 mm、長さは2 cm)からなる。一つのプローブは内部のヒーターにより0.2 Wで一定の熱量を常に放出する(Heater sensor, HS)一方、もう一つのセンサー(Reference sensor, RS)は温度のみを計測する。幹の胸高(地上高1.3 m)で約 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の範囲の樹皮を剥ぎ、剥皮した部位にドリルで穴を開け、HSを設置した。その約15 cm下でも同様に剥皮して穴を開け、RSを設置した。HSとRSの熱電対から伸びる導線を延長ケーブル(4本の導線からなる)につなぎ、その導線を電圧の記録媒体であるデータロガー(CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT)につなぐことで、HSとRSの温度差を計測した。センサーの数がCR1000で記録できる数を上回っていたため、計測数を増やすための外付け機器であるMultiplexer(AM16/32, Campbell Sci.)をCR1000につなぎ、AM16/32経由で全てのセンサーのHSとRSの温度差の計測を行った。温度差の記録は30秒間隔で行い、そのデータの10分間の平均値を記録した。

本研究で使用したGranier式センサーは、針葉樹人工林およびヤシヤブシ林についてはGranier et al. (1987)にあるのと同じ2 cmのプローブを使用している。Granier et al. (1987)⁸⁾では、切り倒した枝の切り口を水に浸し、その吸い上げ量から推定された F_d と、枝に設置したセンサーで計測された F_d とを比較し、計算式を用いて精度良く F_d を計算できることを報告している。

$$F_d = 1.19 [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231} \quad (3-1)$$

ここで、 ΔT は二つのセンサー間の温度差（℃）、 ΔT_{\max} は一日に観測される ΔT の最大値である。同様に、様々な微孔性素材をチューブに詰め、その流量とチューブに設置したセンサーでの F_d の計測値とを比較し、様々な微孔性素材(または材質)についても式(3-1)が適用可能であることを報告している。本研究で使用する材はGranier (1987)⁸⁾または他の同様の検証研究で使用された樹種および材質とは異なるが、上記の理由から式(3-1)およびそこにある諸係数を F_d の計算に使用することにする。

計測される F_d は材の内部で一様ではなく、センサーの設置の仕方によっては特定の場所の F_d ばかりが反映された偏った蒸散速度を得る危険性が大きくなる。これまでの研究で、 F_d の異質性を生み出す要素が、周囲変動(Schafer et al., 2000⁹⁾)、材の深さ方向(Phillips et al., 1996¹⁹⁾)、そして個体間(Ford et al., 2007¹¹⁾)であることが知られている。そこで、センサーを各個体2方向に設置すると共に、設置方向を個体ごとにずらすことで、特定の方向の F_d ばかりの計測を避けた。また各植生について、4-6個体では、幹の表面から深さ0-2 cmに加え、2-4 cmにもセンサーを設置した。これより深い部位には辺材がない、すなわち樹液流速はないことは、採取した材のサンプルから心材の存在を確認しているため、センサーを設置していない。個体間の F_d の変動を考慮した計測個体の繰り返しについても、人工林および広葉樹林で計測された研究を基に(Ford et al. 2007¹¹⁾; Kume et al. 2011¹²⁾)、各サイトで12-14個体を対象に F_d の計測を行った。

針葉樹林の材が仮導管、そしてヤシャブシが放射孔材という解剖学的特性を持つのに対し、クヌギは環孔材と呼ばれる解剖学的な性質を持つ。環孔材では辺材が極めて小さいことが知られており(Phillips et al., 1996¹⁰⁾; Umebayashi et al., 2010¹³⁾)、Granier et al. (1987)⁸⁾で使用した2 cmのセンサーを設置すると、センサーの一部が通道機能を持たない材：心材、に接することになる。こうした条件で計測を行うと、得られた数値が本来の樹液流速を大幅に過小評価することが知られている(Sun et al., 2012¹⁴⁾)。こうした場合の補正式は存在するが(Clearwater et al., 1999¹⁵⁾)、この式ではセンサーの接する部分(長さ)に占める心材の割合の正確な数値が入力情報として必要となる。クヌギでこの数値を得るには、木を一旦伐倒し、切り口から色素の入った水を吸い上げさせることで心材と辺材の境界を明確にする、といった破壊的な計測が必要となるが、本試験地では伐倒は許可されておらず、また当サブグループにも大木で伐倒試験をするだけの余裕がなかった。そこで、センサーが心材に到達しないように設置できるように、より短い長さ1 cmのセンサー(James et al., 2002¹⁶⁾)を独自に作成し、1 cmセンサーを用いてクヌギの F_d の計測を実施した。ただ作成した1 cmセンサーはJames et al. (2002)とは作成法が異なる上、このセンサーでは正確に樹液流速を計測できるという裏付けが取られていないという問題も指摘されている(久米朋徳 国立台湾大准教授、私信)。こうした計測データの定量的な補正については、後述する。

得られた F_d および材のサンプリングにより求められた辺材の面積を用いて、各樹種(i)について森林全体の蒸散速度の推定を行った(Kumagai et al., 2007¹⁷⁾)。

$$J_{sj} = \frac{\sum_{i=1}^7 A_{si,j} \cdot F_{dji}}{\sum_{i=1}^7 A_{sj,i}} \quad (3-2)$$

ここで J_{si} は種 i の辺材面積を考慮して重み付けした樹液流速、 $A_{si,j}$ は種 i の個体 j の辺材面積(m^2)、そして $F_{dj,i}$ は種 i 個体 j で計算された平均的な F_d である。群落スケールの蒸散速度 E ($mm\ day^{-1}$)は J_{si} (ただし日あたり、 $10^3\ m^3\ m^{-2}\ day^{-1}$)と、単位地上面積あたりの総辺材面積 A_s ($m^2\ m^{-2}$)の積である。

樹液流計測で直接計測された E および J_s に加え、個葉スケールでの計測結果との比較で用いる(3.2.2.)、また阿蘇カルデラ全域での ET の推定の際に用いる指標である気孔コンダクタンス(G_s , $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)の算出を行った。蒸散速度と G_s の関係を表現したPenman-Monteith式(Monteith, 1995¹⁸)を用いて、 E とその他気象条件を元に逆算することで、 G_s の算出を行った。なお葉からの E と蒸散速度 J_s および J_s から推定される E の数値には、幹の貯留水の問題からタイムラグがある(Goldstein et al., 1998¹⁹)。そのため、 G_s は特に昼には本来の数値よりも過大評価となり、午前には過小評価されるという問題がある。しかし貯留水の変動に起因するタイムラグは、一日あたりの E ($mm\ day^{-1}$)ではなくなる事が分かっている(Phillips and Oren, 1998²⁰)。そこで本研究では G_s の計算を一日あたりの E を用いて行った。

3.2. 個葉スケールの生理特性の収集

根から吸水された水は、幹を通った後に葉を通して蒸散により大気に戻っていく。この葉での E の推定を樹液流計測とは独立して実施することで、樹液流計測およびサブグループ1で実施された渦相関法で得られた計測値を比較・補正することが出来る。また計測法の違いに起因する計測値のbiasを統一した計測数値を用いて補正することで、計測法の異なる計測値の比較が可能となる。このことは、様々な計測法を ET の推定で用いる、またその数値を用いて広域での ET 推定を実施する本研究においては、計測法ごとに特有の ET 誤差の影響を抑制する上でも有効な手段だと言える(Wilson et al., 2001²²); Wullschlegel et al., 1998²³)。また、個葉スケールでの蒸散および関連諸現象を、連続観測の可能な気象データや、可塑性が比較的乏しい形質については定期的な計測によって、特定の数値および数式に制約をかける(それよりもかけ離れた数値および各過程について異なる数式を採らないようにする: constraint)することが出来れば、上記計測が出来ない生態系であるウツギ林についても蒸散速度を精度よく推定することが可能だと考えられる(Baldocchi and Harley, 1995²⁴); Kumagai et al., 2006²⁵); Miyazawa et al., 2014²⁶)。

本研究では、樹液流計測の対象とした3森林植生について、群落スケールの蒸散速度の再現に必要とされる個葉スケールの生理特性の計測を行うとともに、樹液流計測が困難なウツギ林について個葉スケールの生理特性を用いた E の推定を実施した。なお渦相関法を用いた草原については、既に多くの研究で渦相関法と個葉スケールの生理特性(正確には群落多層モデルでの蒸散速度の推定値)との合致が報告されているため、本研究での個葉スケールでの計測は行わなかった(Williams et al., 2001²⁷); Baldocchi and Meyers, 1998²⁸); Kumagai et al., 2013²⁹)。

3.2.1. 個葉の生理特性の計測

個葉スケールの生理特性のうち、本研究で対象とした項目はガス交換速度: 純光合成速度(A , $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)、気孔コンダクタンス(個葉スケールで得られた数値は小文字で表記、 g_s , $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)および暗呼吸速度(R_d , $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)、である。計測にはLi-6400光合成蒸散計測装置(Li-cor, Lincoln, NE)を使用した。各調査地において、手に届く高さにある林外に面した枝を対象とした。高さによる違いはあるが、こうした葉は林冠上部の葉のガス交換速度を代表していると仮定した。また他の葉によって被陰されている枝を林内から選び、林冠下部の葉の代表として計測を行った。各植生について、個体あたり4枚、2-3個体についてガス交換速度の計測を行った。

まず葉を計測用のチャンバーに挟んだのち、強光条件(PAR = 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)で数値が安定するまで待ち、その後にガス交換速度の各数値を記録した。次に、チャンバー内のCO₂濃度を400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 以下で6段階で変化させ、ガス交換速度が安定し次第計測した。こうして得られた、光合成速度と葉内CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)関係(A-C_i関係)を基にして、計測時の気象条件の影響が排除された葉の特性である光合成能力の代替値であるRuBP carboxylation rateの最大値V_{cmax25}($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、25°Cの数値に標準化)を計算した。計測後、葉をアルミニウムを表面に張った厚紙で挟んで暗黒条件に20分おいた後、CO₂濃度を外気と同じ400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ にしたチャンバーでガス交換速度を計測し、暗呼吸速度を計測した。

こうして計測した葉のうち、7枚について、環境条件を外気と同じ条件に保ったチャンバー内でのガス交換速度を9時、12時、14時に計測した。計測には外光を利用し、林内に設置した温湿度計(UX100 Temp/RH 3.5% Data Logger - UX100-003)を用いて気温および湿度を調整した。こうして得られたガス交換速度を基に、気孔コンダクタンスの推定に用いる下記数式の係数(mとb)を算出した(Ball et al., 1987³⁰)。

$$g_s = m A \text{ rh } C_s^{-1} + b \quad (3-2)$$

このうちmは、生理学で用いられる植物のintrinsic leaf water use efficiency ($i\text{WUE} = C_a/1.56(1-C_i/C_a)$, $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 。C_aは外気CO₂濃度)と関係があることが知られており、iWUEが高い葉ほどmが小さく、また他の生理特性が同じであるならばmが小さい葉でEおよびg_sは小さい(Collatz et al., 1991³¹)。この計測を、各植生について2-6回実施することで、様々な環境条件でのg_sの数値を収集した。

3.2.2. 群落多層モデルを用いた、生理特性の個葉から群落へのスケールアップ

3.2.1で得られた数値はいずれも個葉スケールであり、群落スケールのEの推定や、その補正をするには限界がある。また計測値は限られた気象条件で得られた数値であり、様々な環境条件で得られた樹液流計測の計測数値との比較は困難である。

そこで本研究では、これらの知見の群落スケールへのスケールアップを目的に、モデル解析を実施した。本研究で使用するモデルはLeuning et al., (1995³²)を基にした多層群落型の熱・ガス交換モデルである。群落を5つの葉群層に分割し、各層の生理特性および気象条件、そして全葉面積指数LAIを基に層ごとにガス交換速度(単位地上面積あたり)を計算する。各層の葉群の生理特性について、最上層の葉群および最下層の葉群のV_{cmax25}およびR_dにそれぞれ林冠外部および内部のV_{cmax25}(R_d)の数値を用いて、他の層のV_{cmax25}を既存の関数を用いて推定した。各層のmは同じと仮定した。光-光合成関係については、針葉樹については近傍のすぎで得られたデータを(Kumagai et al., 2014³³)、また広葉樹については他の広葉樹のデータ(Miyazawa et al., 2004³⁴)を用いた。なお光-光合成関係を既存研究の範囲内で変化させたところ(Singsaas et al., 2001³⁵)、群落全体のEおよびG_sのモデル推定値には大きな変化は見られなかったため、それぞれのV_{cmax25}で引用した研究の数値を使用した。

ウツギについて、近傍の気象データを基に(阿蘇山頂气象台)、群落多層モデルを用いてEを計算した。個葉スケールのガス交換速度を実施した時期以外については、前後の計測数値を直線的に変化すると仮定して、その間の数値を内挿した。

また他の植生については、群落多層モデルを用いたEの推定値を、樹液流計測を基に計算され

たEの実測値を用いて回帰して、回帰式を基にEの実測値の数値を補正した。補正に使用したEの推定値は、個葉スケールのガス交換速度の計測日の前後10日間の推定値を用いて、同日時に樹液流速の計測で得られたEの実測値を用いて回帰式を計算した。回帰式の構築において、Eの推定値の切片が0を通るように計算した。回帰式が、(Eの推定値) $=\alpha \times$ (Eの実測値)、の場合、(補正後のE)=(Eの実測値) $\times \alpha$ 、とした。

3.3. 阿蘇全域でのETの推定と草原と森林とのETの比較

阿蘇各地の植生について、環境省植生図(<http://www.vegetation.biodic.go.jp/>)を基に各植生の面積を算出した。本職製図では、約10 km四方に区切られた地域の植生の面積および緯度経度を得ることが可能である。各地の気象データが、約1km四方について得られているため(後述)、対応するグリッドごとに各植生の面積および種構成を算出した。解析にはArcGIS10.1(ESRI, Redlands, CA)を使用した。国土地理院の地図情報と組み合わせることで(道路情報(国土地理院、<http://fgd.gsi.go.jp/download/>)、各地点の緯度経度、標高および間近の道路からの距離を算出し、以下の解析に用いた。

各植生の分布するグリッドの気象データの解析には、農業環境情報センター 農業環境研究所の

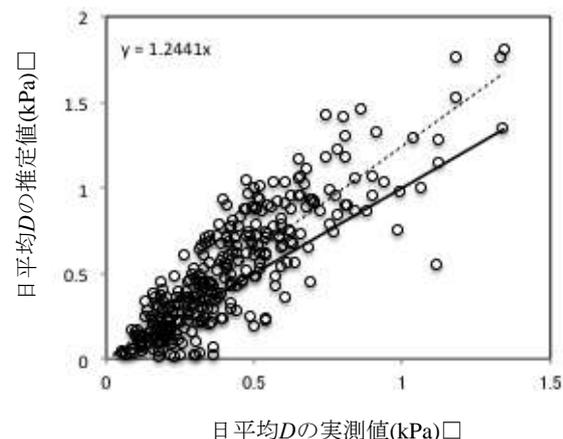
website(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>)を利用した。本websiteで使用したデータは、

利用可能なデータのうち、最近の10年間(1999-2009年)および比較対象で解析を実施した1982年のデータで、日平均および日最低気温($^{\circ}\text{C}$)、日降水量(mm day^{-1})、日射量($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)である。ETの推定に必要な飽差D(飽和水蒸気圧と水蒸気圧の日平均値の差)については、飽和水蒸気圧は日平均気温での数値、水蒸気圧は日最低気温での数値(夜明け前に湿度が100%で、その後は水蒸気の移流出入もないし、結露もなかった)として算出した。

この計算は、降雨後の水蒸気圧の上昇および結露時の水蒸気圧の増加を考慮しておらず、全体的にVPDを過大評価している(図(3)-1)。

そのため、この方法で全てのグリッドの期間中のVPDを計算し、図(3)-1で得られた回帰式を用いて補正されたVPDを広域推定に使用

した。なお飽和水蒸気圧(kPa)の計算にはTitensの式(Campbell and Norman, 1998³⁶)を使用した。



図(3)-1 阿蘇カルデラの白川流域の各グリッドの飽差Dの推定で使用した方法でのDの日に平均値の推定値(縦軸)と、実測値(横軸)。破線は推定値-実測値関係の回帰直線、実線は1:1の直線。データには仙酔峡および南阿蘇VC試験地の観測地を使用している。右上の数式は、切片=0として計算された回帰式。

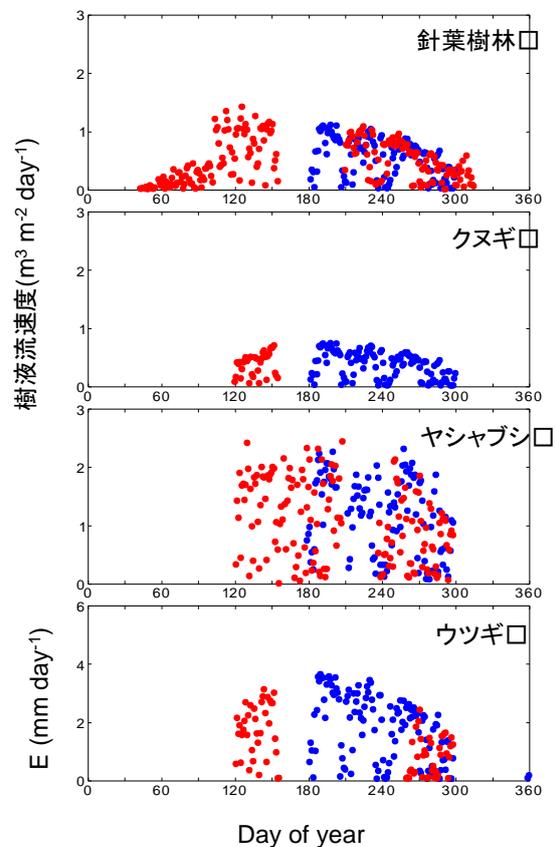
4. 結果及び考察

4.1. 蒸散速度の植生間の比較

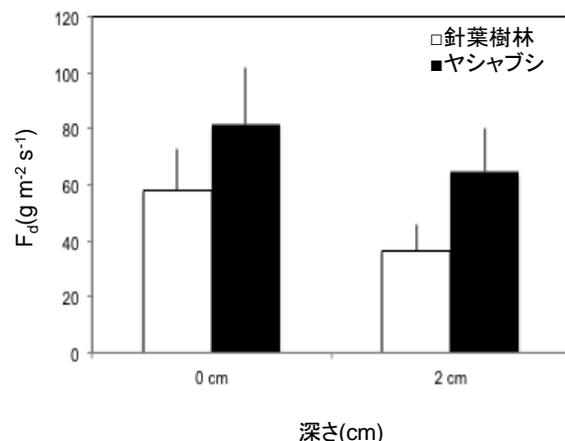
4.1.1. 樹液流計測の結果とEの広域推定に向けた環境応答の数式化

どの植生でも、 J_s は春に増加した後、安定し、秋に低下することが明らかとなった(図(3)-2)。計測では、夏の雷雨時の落雷によると思われる電力の中断、そして計器の故障などによりいくつも欠測が発生したが、Eおよび G_s の環境応答の解明をする上で必要とされる、様々な気象環境での計測データを得ることが出来た。落葉樹であるヤシャブシとクヌギについては、開葉直後から J_s は高い数値をとり、また落葉の直前まで高い数値を維持していたことが明らかとなった。針葉樹林や、光合成計測から推定されたウツギ林と比べ、ヤシャブシ灌木林ではEの秋の低下が急速に進行していることが示されているが、これは落葉直前の葉の生理的な活性(光合成能力)の低下が急速に進行したためと考えられる。光合成能力の落葉直前の低下はその時期および年間Eの低下をもたらすと考えられるが、ヤシャブシ灌木林についてはそうした急速な低下が観察されたのは落葉の約15日前であり、年間Eおよびその数値を用いた計算の結果に及ぼす影響は限定的だと考えられる。同様の低下はクヌギ林でも観察されたが、元々 J_s の数値が低いためヤシャブシ林で見られるほど明確な傾向は観察されなかった。

これまでの研究でも観察されたように、樹幹内の F_d には明確な傾向が見られ、樹幹内部では同じ個体であっても F_d は低かった(図(3)-3)。樹幹の内部で F_d が低いことの原因には、解剖学的特性の違い(Tateishi et al., 2010³⁷)や、内部の辺材は暗く蒸散の低い葉、または枯死した枝に水を供給する(Dye, 1996³⁸; Jimenez et al., 2000³⁹)ことが挙げられている。樹幹内の深さに起因する F_d の違いを考慮しない場合、DBHの大きい針葉樹については J_s およびEの推定を10-20%過大評価する(季節により変動)ことも明らかとなった。一方ヤシャブシについては各個体のDBHが小さいこと、ま



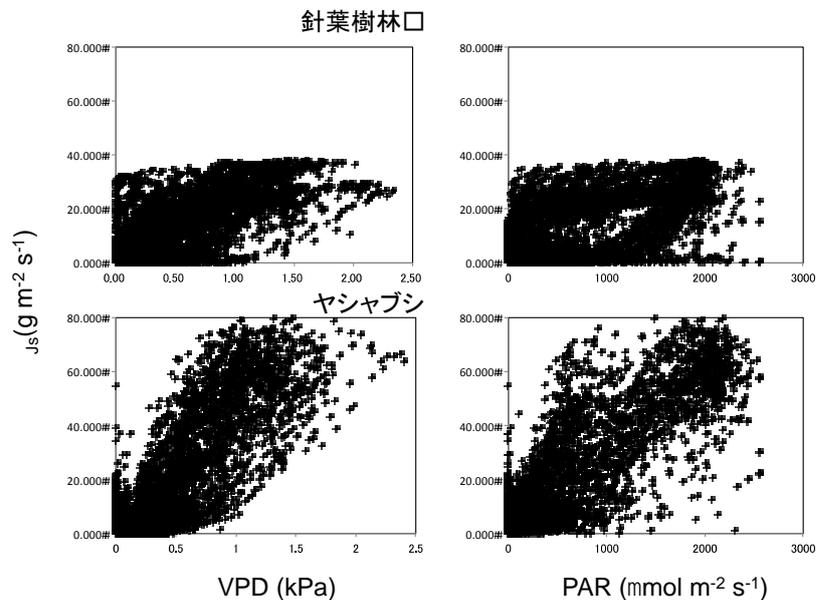
図(3)-2各森林植生で計測された樹液流速度、または推定された(ウツギ林)蒸散速度。青色は2013年、赤色は2014年の数値を示す。□



図(3)-3 深さ方向の F_d の変化。グラフの F_d は6-9月の日中(10-14時)の強光環境(PAR \square 20 \square μ mol \square m \square s \square)の数値の平均値と標準偏差。□

た大きい個体について4-6cmのセンサーで計測された F_d がきわめて小さかったこともあり、 F_d の樹幹深度に伴う変動が E の推定に及ぼす影響はきわめて小さかった。

計測された J_s は式(3-1)で挙げた気象要因であるVPDおよび R_s (あるいはPAR)と明確な傾向を持っていた(図(3)-4)。季節により勾配に違いは見られたものの、同時期であってもばらつきが大きいため、その勾配には月間で有意な差が検出されなかった(ANCOCA, $p > 0.05$)。ヤシヤブシではPARおよびDに対して J_s の飽和は明確には観察されなかった。このことは、気象条件の変動によって E がさらに増加しうることを示している。個葉スケールでは、ヤシヤブシでは光合成能力が高く、水利用率効率も高いことが示されている(後述)。個葉スケールでは高いPARで光合成が飽和せず、また高いVPDでも G_s を維持していたためだと考えられる。



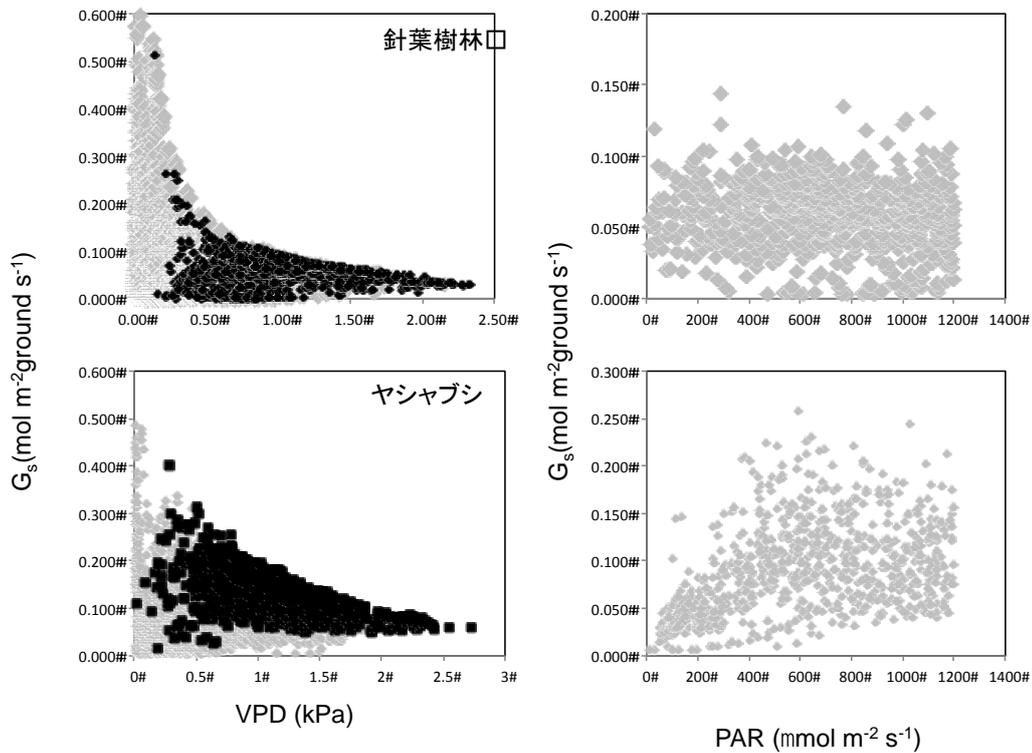
図(3)-4 樹液流速の飽差(D)と日射(PAR)への応答。データは6-10月の無降雨期間。□

蒸散速度の環境応答を規定する気孔コンダクタンス(G_s)はVPDと共に低下することが明らかとなった(図(3)-5)。グラフからはヤシヤブシ灌木林で G_s の低下が急、すなわち大気が乾燥した状態で気孔を急に閉じることが示されている。この結果は、 J_s がVPDおよびPARに対して飽和しなかった結果とは対照的である。 E とDの関係については、以下の式にある G_{ref} とその勾配 m との関係が重要になる。

$$G_s = G_{sref}[1 - m_g \ln(\text{VPD})] \quad (\text{式3-4})$$

ここで G_{sref} は比較的蒸発要求能が低いVPD = 1kPaでの数値、 m_g はVPDの対数の増加に伴う G_s の低下を表現する指標である。これまでの研究により、 G_{ref} が低くて m_g/G_{ref} が大きい種では E -VPD関係が低いVPDで飽和することが知られている(Oren et al., 1999⁴⁰)。本研究ではヤシヤブシ林でも針葉樹林でも m/G_{ref} は約0.6であり、他の環境に生息する多くの樹種とほぼ同じ数値を採った(Oren et al.,

1999⁴⁰⁾。一方、 G_{ref} はヤシヤブシで高かったことから、同じ環境においても、 E は針葉樹林ではVPDの増加に伴う増加が飽和してもヤシヤブシ灌木林では増加し続けたのだと考えられる。式にある m_g と G_{ref} については、表(3)-2に示した。参考までに、Maruyama and Kuwagata (2010)で得られた水田での数値(G_{ref} 、 m_g は $0.6G_{ref}$ として推定)および群落多層型の熱ガス交換モデルで推定されたウツギ林のデータを表示してある。



図(3)-5 群落スケールの気孔コンダクタンス ($G_{s_ground} = LA \cdot G_s$)と飽差(D)との関係式。光強度 (PAR)に応じて、 $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下 (灰色)と以上(黒色)ごとに表示した。□

表(3)-2 計測に使用した、林分構造の数値 (LAI)、樹液流速への補正の数値、1kPaでの個葉面積あたりの気孔コンダクタンスおよびそのVPDへの応答の数値、降雨に占める遮断蒸発の割合。

	LAI	補正値	G_{s_ref}	m_g	IE
針葉樹林	4.71	2.341	0.0843	0.044	0.138
クヌギ林	2.88	9.313	0.0366	0.006	0.051
ヤシヤブシ林	2.48	1.548	0.1066	0.0706	0.050
ウツギ林	3.21	1	0.0966	0.0506	0.050
草原	4	1	0.25	0.15	0.080
水田	4.5	1	0.204	0.123	0.080

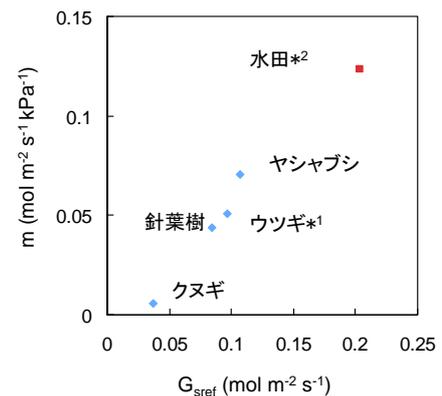
図(3)-4にある G_s -D関係はこれまでの研究で多く調べられてきたIsohydicな気孔応答をする種とほ

ぼ同じ傾向が見られる(Oren et al., 1999)。Isohydicな種では、大気環境条件、とりわけVPDの時間変化に対して、 G_s を細かく調整することで葉の水分状態の指標である水ポテンシャルを一定の数値以上に保つことが知られている。本研究では、計測されたVPDの範囲が狭いために、 G_s -VPD関係のばらつきが計算結果に大きく反映されるなど、本解析に最適な条件だったとは言いがたいが、調べた3植生では特段他植生と異なる気孔調節(m_g および G_{ref})を採っていないことが明らかとなった。

気象条件の変化により、 m_g および G_{ref} は季節ごとに違う数値を採ることが知られている。阿蘇の場合は、春先の葉の成熟過程、夏の乾燥と秋の葉の老化が予想されたが、5-10月については月ごとにプロットされた G_s -VPD関係には明確な違いが観察されず、これら数値の変化もないことが示唆された。各樹種は、比較的柔軟性の低い生理特性(幹の通道特性、葉の光合成能力やLAI: G_{ref} および m_g に關係)を大きく変えることなく、柔軟性の高い生理特性(水利用効率や G_s)のみを変化させることで環境条件に対して応答していたと考えられる。阿蘇の気象条件の地理的変異よりも大きな季節間変異の中でも生理特性の多くが変化しなかったことから、阿蘇の各地で生理特性には大きな違いがなく、各試験地で得られた生理的な数値(式1-5)を阿蘇カルデラ内の白川流域内の全域に適用することの問題は比較的小さいと考えられる。ただし、短期的な環境変化への応答が小さいことは、必ずしも生息地の異なる植物間で生理特性の違いがないことを意味しない。葉の発達期間の温度条件は、短期的な温度変化では変化することのない光合成速度の温度依存性に強く影響することが知られているし(Medlyn et al., 2002⁴²; Yamori et al., 2005⁴³)、水利用効率など蒸散に関わる特性も生息地の水環境の状態を反映することが知られている(Palmroth et al., 1999⁴⁴)。少ない試験地で得られた生理学的な数値を広域の植生に当てはめることの危険性は大きく、それが広域のEおよびET推定に及ぼす影響の評価は極めて重要だが、それは今後の研究の課題として、本課題では扱わない。

4.1.2. 個葉スケールでの生理特性の計測結果と樹液流計測の数値の補正

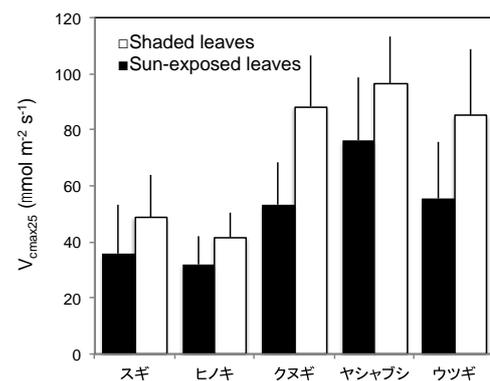
今回対象とした植生間では、光合成および蒸散に関わる特性の数値には大きな違いが見られた。落葉広葉樹の3種で高い数値を示したのに対して、針葉樹の



図(3)-6 気孔コンダクタンス m への応答(m)と G_{sref} との関係式。数値は樹液流計測から求められたもので、個葉スケールでの計測に基づいた補正はかけていない。□

*1 ウツギについては樹液流計測ではなく、個葉の整理特性から群落多層モデルによって推定された数値を使用□

*2 水田はMaruyama⁴⁵とKuawagata⁴⁶(010)の数値を計算して使用。□



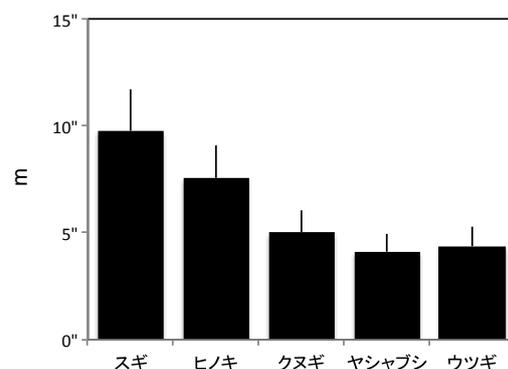
図(3)-7 葉の光合成能力の指標である、Rubiscoのarboxylation速度の最大値(V_{cmax25} , 25°Cの数値に補正)。バーは標準誤差。□

スギヒノキでは低い数値が観察された(図(3)-7)。これまでの研究でも落葉広葉樹では比較的高い光合成能力($V_{\text{cmax}25}$)が観察されているが(Medlyn et al., 2002a⁴⁴); Wilson et al., 2000⁴⁵); Kattge et al., 2009⁴⁶)、本研究で対象とした種はそこでも高い数値を持つことが分かった。

生理学的には $V_{\text{cmax}25}$ は葉の酵素Rubiscoの含量、そしてRubisco含量に寄与する葉の窒素濃度と関係がある。林冠に $V_{\text{cmax}25}$ の高い葉を多量に保有するには、保有する窒素を効率的に利用すること(落葉前に葉から回収するなど)、葉の窒素濃度あたりのRubisco含量を高く維持すること、そして根から窒素を多量に吸収することが重要となる。ヤシヤブシとウツギの分布域は火山灰土の地域に多いが、火山灰土の窒素濃度は低いことが知られている(Vitousek, 1982⁴⁸); Hughes and Denslow, 2005⁴⁹)。ヤシヤブシは根に根粒菌を共生させることで、窒素を大気中から吸収して固定する能力を持ち、施肥木として知られる。ヤシヤブシで $V_{\text{cmax}25}$ が高かった背景にはこうした窒素固定能力があったと考えられ、水利用可能量が生育を制約しない阿蘇で草原に旺盛に進出している生理学的な背景であると考えられる。一方、ウツギがどのようにして高い $V_{\text{cmax}25}$ またそこそこのLAIを維持できているのか、現段階では仕組みは不明である。逆に、阿蘇でウツギが侵入できない地点もその分布域の周辺に多くあるが、その制約もまた不明である。

群落スケールの蒸散速度 E は、 $V_{\text{cmax}25}$ と水利用効率の指標である m 、そしてLAIの関数であるが、 m は針葉樹で比較的高いのに対し、広葉樹ではこれまでの研究と比較しても極めて低い数値を採っていることが明らかとなった(図(3)-8)。今回クヌギで観察された m は暖温帯常緑広葉樹(Miyazawa et al., 2011⁵⁰)、熱帯常緑広葉樹(Kumagai et al., 2006²⁸); Miyazawa et al., 2014²⁹)や熱帯落葉広葉樹(Kumagai et al., 2013³²)と比べても低く、熱帯季節林の樹種の乾季の数値と同程度かそれよりも低い数値であった。世界的なガス交換を調べたモデルシミュレーション研究では、広葉樹の m は9が用いられている(Sellers et al. 1997⁶¹)。 $V_{\text{cmax}25}$ が高いこともあり、クヌギの個葉スケールの気孔コンダクタンス g_s はこれまでの研究の他樹種と比べて同程度か比較的高い数値を採っていた。ヤシヤブシやウツギでは m はさらに低かった。

多くの研究で、 m の低い樹種は乾燥地において観測されており、また同一個体であっても乾燥条件で m を低くすることが知られている(Baldocchi, 1997⁵²); Sala and Tenhunen, 1996⁵¹); Baldocchi and Meyers, 1998²⁸)。この m と負の相関にある水利用効率、そして葉に含まれる炭素同位体 ^{13}C の含量は、生育環境あるいは生育地の水利用条件を強く反映し、乾燥地ほど ^{13}C が高い(m が低い)ことが知られている(Orchard et al., 2010⁵³); Palmroth et al., 1999⁴⁴)。また m あるいは水利用効率に関連する指標について、 m を低くするような生理特性を持つことが、炭素獲得(純光合成)と水消費(蒸散)の比を改善し、また m を低くして蒸散速度を抑制することが乾燥に伴う通道器官の損傷を回避することに重要であることが理論的に検証されている(Jones and Sutherland, 1991⁵⁴); Katul et al., 2003⁵⁵); Katul et al., 2010⁵⁶)。ではなぜ降水量が高く大気による蒸発も緩やかな

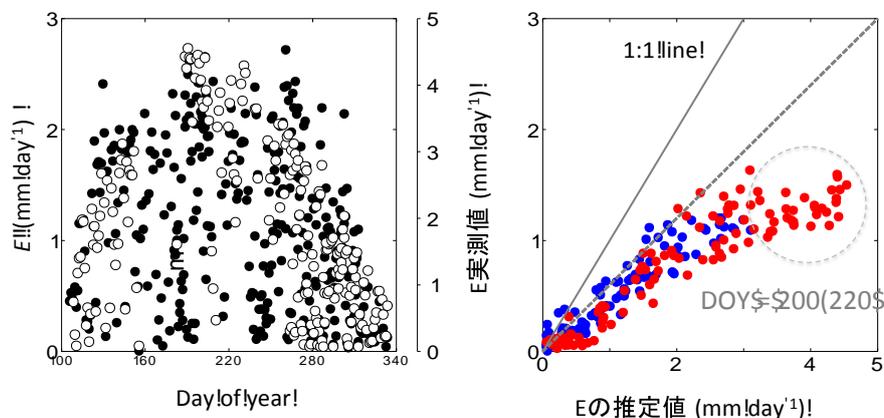


図(3)-8 葉の水利用効率に関する指標、Ball-Berryの m 。バーは標準誤差。□

阿蘇において、特に広葉樹が低い m を持っていたのだろうか？

ウツギとヤシャブシでの低い m の原因として、やはり火山灰土が考えられる。火山灰土は透水性が極めて高く(アジア航測株式会社2013⁷⁾)、また地点によっては土壌深度も浅い。本課題の遂行期間では目立った乾燥期間はなかったが、無降雨期間が特に夏に続いた場合、深層への流出に起因する土壌水分欠乏およびそれに伴う落葉や通道器官の損傷、さらには枯死が発生する可能性がある。その回避のために、湿潤な時期であっても m を低くすることで光合成生産と成長を犠牲にしても E を抑制し、乾燥の発生時の過度の蒸散および土壌水分の低下を回避しているのだと考えられる。土壌水分の欠乏が発生する環境では、 V_{cmax25} やLAIを変化させることなく m のみを E の調整弁として変化させる報告も(Miyazawa et al. 2014²⁶; Sala and Tenhunen 1996⁵¹; Baldocchi 1997⁵²)、 m を変化させずに低い数値で維持する(Miyazawa et al., unpublished, Miyazawa and Du, unpublished)報告もある。いずれの研究も、砂質土壌や年降水量が極めて低い地域での結果であり、阿蘇で m が年中低い葉を持ち続ける種がいたという本研究の結果は、当初予想できなかった。本研究で採用した方法ではなく、個葉スケールの生理情報を用いた広域の蒸散推定モデルを使用する場合(Sellers et al., 1997⁵⁷)、入力値の m に他の湿潤地域で得られた典型的な数値を使用することは、この地域の E を過大評価する恐れがある。

樹液流計測で得られた E (群落あたり)と、それとは独立に計測計算された E には強い正の相関が見られた(図(3)-9)。この勾配は、いずれの森林植生でも1以下(実測値が推定値よりも低い)であったため、以下の解析では補正された E ($E = \text{勾配} \times \text{実測値}$; 個葉スケールの実測データを基にしたモデル推定が実際の数値を近似しており、実測値が本来の数値を過小評価している)を使用する。

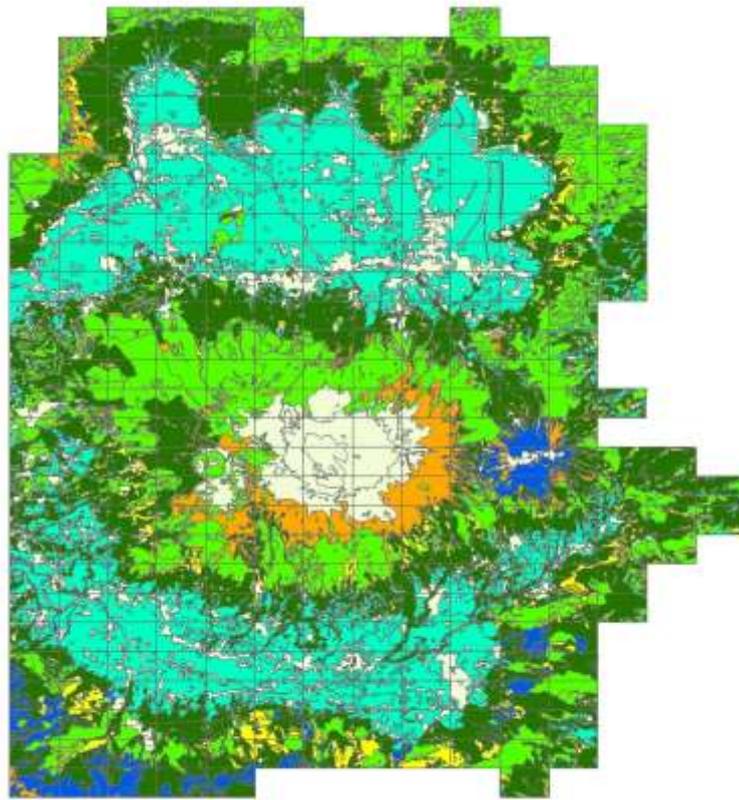


図(3)-9 (左) ヤシャブシ林での E の推定値(●)と実測値(○)。(右) 推定値と実測値の関係。丸で囲んだ時期は夏で、他の時期と比べて回帰直線よりも低くなっている。□

4.2.各地の植生変化の実態

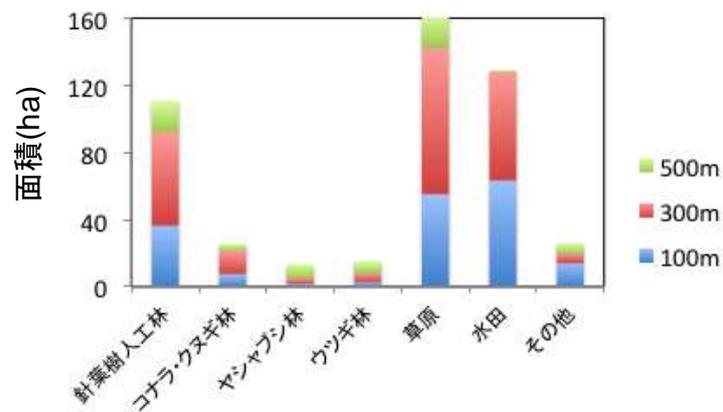
阿蘇では異なる要素に駆動されて、二度にわたって森林化が進行したことが分かった。第一の森林化は、戦後に進行した、針葉樹林の拡大造林である。特に南郷谷(カルデラ南部、阿蘇五岳の南の低地)では、昭和29年の白川水害により草原が土石流などに破壊された後に大規模な植林がされた(図(3)-10)。ただし、植林されたのは主に昭和30年代までで、その後は針葉樹人工林の

植栽は小規模になる。この傾向は、阿蘇の人工林の林齢分布によっても支持されている(サブグループ2を参照)。一方針葉樹人工林の減少については、材価格の低迷などもあって小さく、その草原への転換は無視できる水準である。このため、現在の草原減少に伴う水資源問題を考える際、人工林増減の影響を考える必要はないと言える。



(緑)針葉樹人工林、(黄色)クヌギ林、(オレンジ)灌木林、(黄緑)草原、(水色)水田、(青色)落葉および常緑天然林□

図(3)-10 阿蘇の白川流域を構成する植生図。クヌギについてはナラ系の天然林も含まれる。□



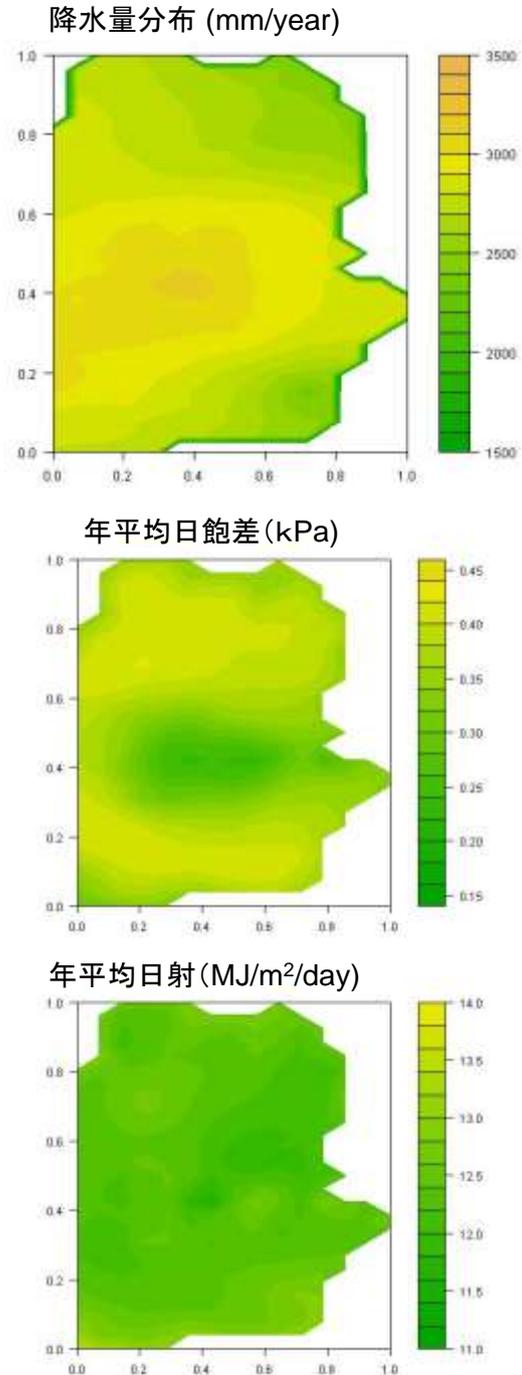
図(3)-11 阿蘇の白川流域を構成する植生の、道路からの距離と面積の関係。□

同じ人工林でも、クヌギに代表される広葉樹人工林は近傍の大分県などで面積が広いが、阿蘇の白川流域についてはその面積が大きくないことも明らかとなった。

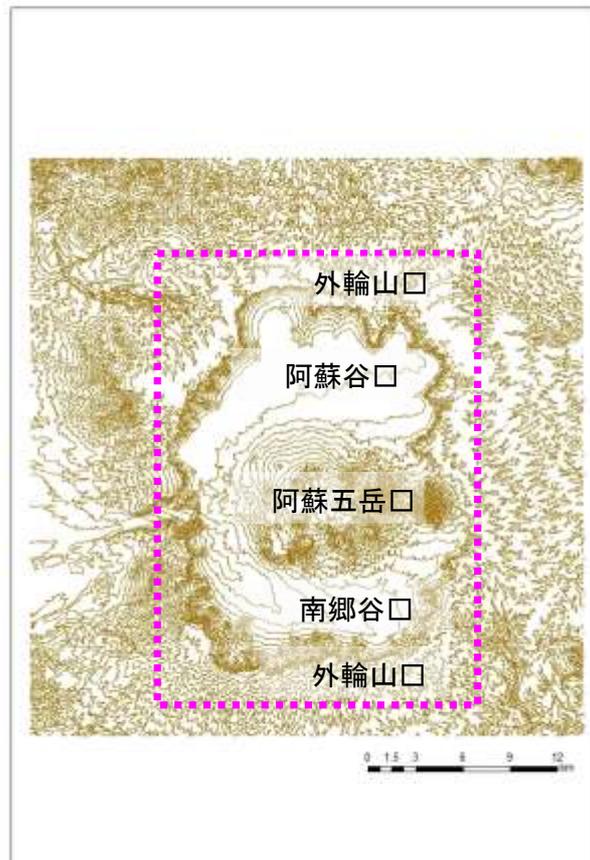
現在進行するのは、第二の森林化、すなわち放棄された草原への灌木林侵入と拡大である。草原の分布図で昭和20年代に草原だった阿蘇五岳山頂付近には現在ヤシャブシおよびウツギ、そしてミヤマキリシマの灌木林が広がっている。この付近は高標高かつアクセスする農林道も少ない地点である。道路から100m、300m、500m離れた植生の面積を調べたところ、灌木林では多くが道路から300m以上離れていることが明らかになった(図(3)-11)。また現状でもこうした道路から離れた草原の面積は全体の半分以上を占めており、今後も草原の灌木林化は進行する可能性がある。

こうした結果を基に、以降は草原の減少に伴う森林の増加について、灌木林(ヤシャブシとウツギ)の増加のみに焦点を絞り、草原とのETの比較は主に灌木林に注目して実施する。

阿蘇の白川流域を区分けする全てのグリッドでは、気象条件が大きく異なることが明らかとなった(図(3)-12)。降水量は中央の阿蘇五岳付近で高いのに対して、気温と湿度の関数で大気蒸発要求能であるVPDは標高の低い阿蘇谷と南郷谷で高く、阿蘇五岳や外輪山では低いことが分かった。日射については、降水量の違いを反映した空間分布が期待されたが、地点間変異は観察されなかった。標高および気象条件の違いを反映して(図(3)-13)、阿蘇では植生ごとに地理的分布も大きく異なった(図(3)-14)。白川流域で最大の面積を有する針葉樹人工林は、阿蘇谷と南郷谷を取り巻く山岳部で大きいのに対し、水田はそれぞれの谷の低地に広がる。草原はほぼ全域にまんべんなく広がる。分布拡大が懸念される灌木林については、阿蘇五岳およびその東部に広がり、面積も他の植生と比べて小さいことが明らかとなった(図(3)-15)。クヌギ林で面積が大きいのは、落葉広葉樹林のうち、クヌギ、コナラ、ミズナラなど生理生態的な特性の類似



図(3)-12 阿蘇の各地の気象条件(年平均値または年積算値)の地理的分布。□



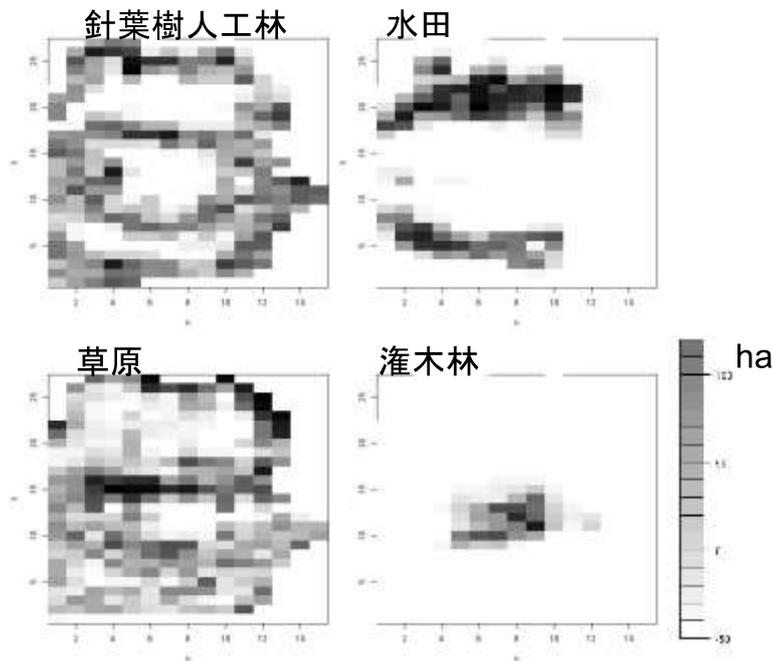
図(3)-13 阿蘇の白川流域の標高および白川流域で対象とする地域の大まかな位置図。□

した種を同じクヌギ林として評価しているからであり、クヌギ林の人工林の面積はより小さい。

4.3.草原のETは森林よりも低いのか？

この地域の気象データ図(3)-12および表(3)-2を基に、各植生が植栽されていた場合に予想される単位面積あたりのET(mm year^{-1})を全グリッドについてプロットした(図(3)-16)。どの植生についても、標高の低い地域でETは最大値となった。こうした傾向は、標高の低い地域での高いVPDに起因した高いEのためだと考えられる。一方、高標高の阿蘇五岳付近では、Eは高くないものの降水量が高いために、遮断蒸発が高かった。そのため、気温およびVPDの差に見られるほど顕著なETの標高間の差は検出されなかった。植生によってETに関連する諸特性には違いが観察されたが(表(3)-2)、地理的分布の傾向には大きな違いが見られなかった。

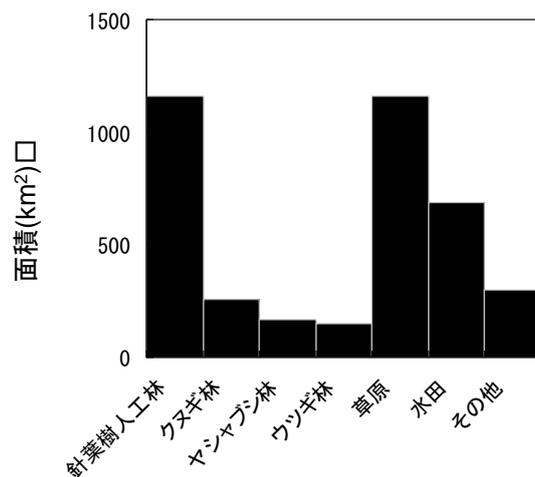
同じ地点でETを比較すると、針葉樹人工林で最も高く、水田の順に高かった。草原は灌木林やクヌギ林より中央値および全地点での最高値のいずれでもETが高いことが明らかとなった。実



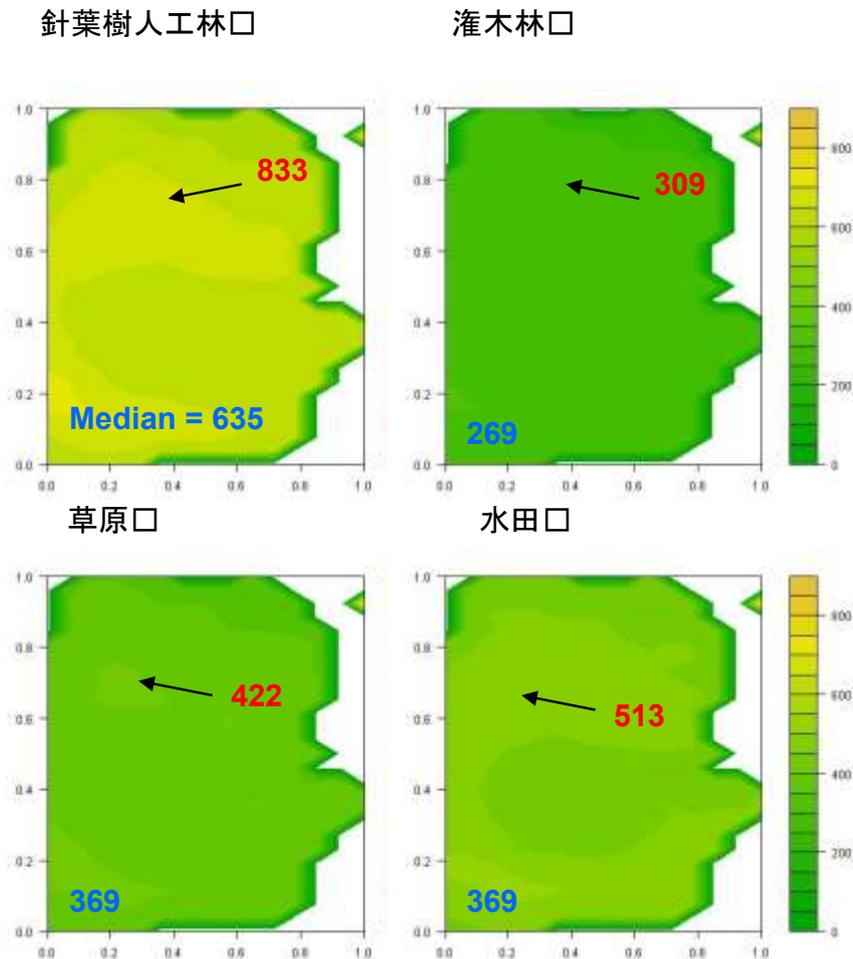
図(3)-14 阿蘇の白川流域の植生図。枠は図(3)-10の枠に該当。

際のグリッドにおける各植生の面積割合を考慮したET(植生の単位地上面積あたりのET×グリッド内のその植生の総面積/グリッド面積、 mm year^{-1})をプロットした(図(3)-17)。

ここで極端な例として、(図(3)-17)の全ての草原が灌木林(ここではウツギ林)に移行したと想定してそのETの変化をプロットしたところ(図(3)-17d)、全てのグリッドでETが減少した。この結果は、当初の仮説とは全く逆で、現在進行している草原の灌木林化は、各グリッドでのETを低下させていることを示している。減少は 0.6 mm year^{-1} から 154 mm year^{-1} (移行後の灌木林のETは 353 mm year^{-1} から 199 mm year^{-1})にもおよんだ。



図(3)-15 阿蘇の白川流域の各植生の総面積。□



図(3)-16 阿蘇の白川流域の気象データを基に、各植生があった場合の単位地上面積あたりのET。青色の数字は全グリッドのETの中央値、赤色は全グリッドでのETの最大値と最大値を採るグリッドの場所。□

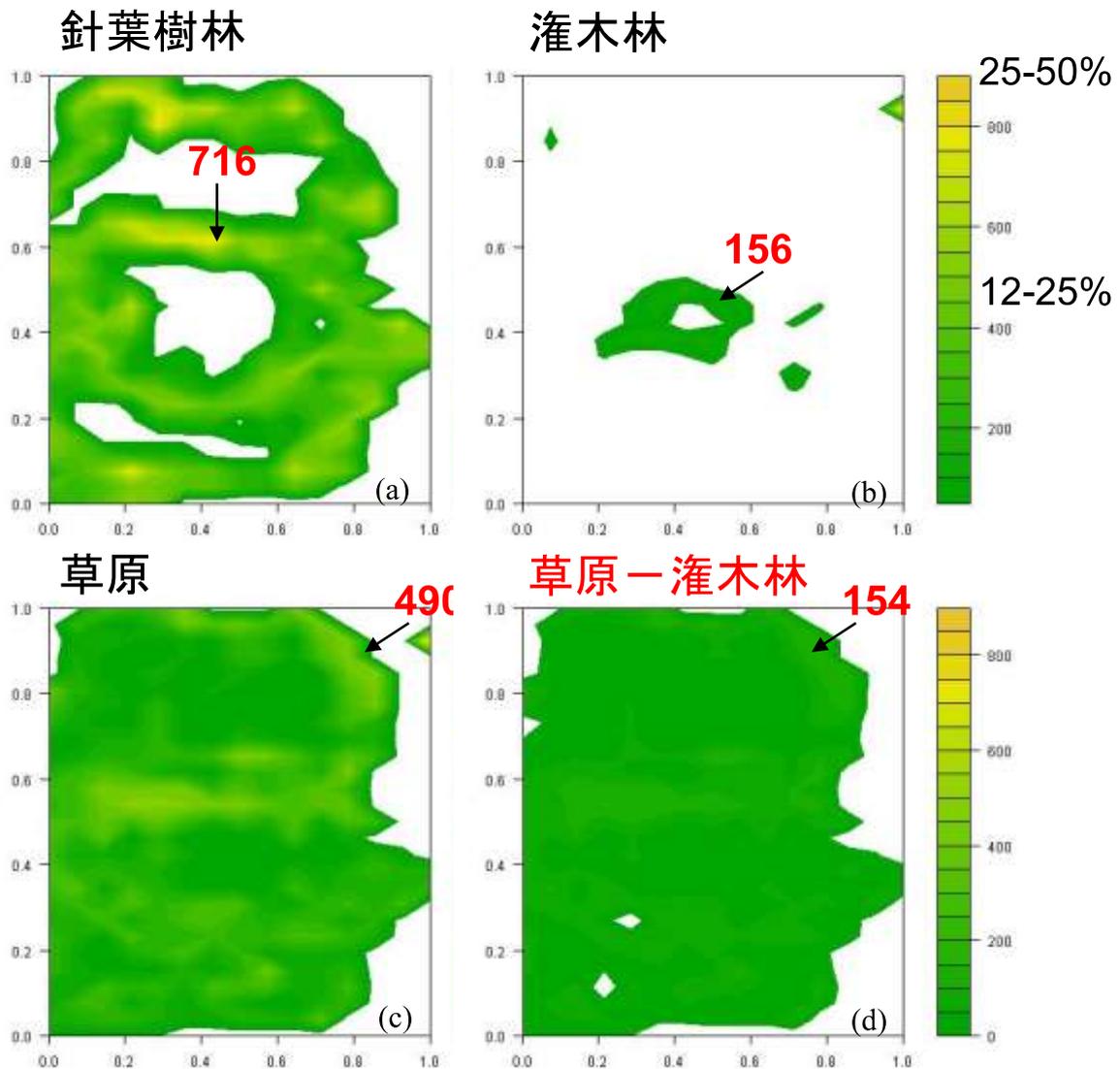
灌木林よりも草原でETが高いという結果は、推定の際の入力値の誤差あるいは気象条件の違いによって覆りうるものだろうか？それぞれの計測では、計測値が実際の数値を過小評価することが知られているが、本研究ではそうした影響を考慮することで、草原で灌木林よりも高いETという結果を覆すことはないと思われる。ヤシヤブシについては過小評価が疑われていたため、その補正がなされた数値を使用して計算が実施された。ウツギについてはむしろ過大評価をする設定で計算を行っており、本来は春に低いはずのLAIについて、年間を通して年最高の夏の数値をとり続ける。草原については、フラックス計測でのエネルギー収支の補正はかけられているため過小評価は考えにくい。このエネルギー収支の数値は他の研究と比べても高いため、その補正が過度にETを押し上げているとは考えにくい。また阿蘇の冷涼な気候では G_s のVPDに伴う低下が不明瞭であったが、広域推定のためにVPDに伴う減少率を $0.6G_{ref}$ にするという、ETの過小評価を招きうる

設定で計算を実施している。従って計測法に起因する灌木林のETの過小評価および草原のETの過大評価は考えにくい。

本研究での計測値、およびこれまでの研究での数値から、当初想定していなか

表(3)-4 環境省植生図の分類と、本研究の植生の分類の対応表

本研究の分類	環境省植生図の分類
スギヒノキ針葉樹	スギ・ヒノキ・サワラ植林 スギ巨木林
クスギ林	クスギ植林
ヤシャブシ林	ヤシャブシ群落 ヤマハンノキ群落
ウツギ林	ニシキウツギーノリウツギ群落 ヤマヤナギーツクシャブウツギ群団
草原	ススキ群団 (V) ススキ群団 (V I I) チガヤーススキ群落 ネザサーズスキ群集 ミヤマキリシマーススキ群落
水田	牧草地 水田雑草群落
その他草原	ツルヨシ群集 ヨシクラス 畑雑草群落 貧養地小型植物群落 放棄畑雑草群落
shrub	ヒメウワバミソウケヤキ群集 マイヅルソウミヤマキリシマ群集
その他森林	アカガシ二次林 アカマツ群落 (V) アカマツ群落 (V I I) アカマツ植林 アカメガシワーカーラスザンショウ群落 イスノキーウラジロガン群集 イスノキーウラジロガン群集 ウリノキーミズキ群落 カシワ群落 (V) カラマツ植林 クスギーコナラ群集 クロマツ植林 ケクロモジーコナラ群集 コナラ群落 (V I I) シイ・カシ二次林 シキミーモミ群集 シラキーブナ群集 その他植林 タブノキーヤブニッケイ二次林 ツシマママコナーアセビ群集 ニセアカシア群落 ヒカゲツツジーヤマグルマ群落 ヒメウワバミソウケヤキ群集 ヒメウワバミソウケヤキ群集 ムサシアブミータブノキ群集 ヤナギ高木群落 (V I) リョウブミズナラ群集 外国産樹種植林 竹林



図(3)-17 阿蘇の白川流域の各グリッドについて、各植生の分布面積を考慮してETを算出。ここで使用するETは(単位地上面積あたりのET×グリッド内のその植生の総面積/グリッド面積、 mm year^{-1})である。右の尺度の%表示は、全グリッドの降水量の平均値に占める割合を尺度に示している。

った草原での相対的に高いET、特に高いEについていくつかの示唆が得られる。まず個葉スケールについて、灌木林では思ったほどに g_s が高くなかった。この原因は、 g_s を規定する生理特性のうち(Collatz et al., 1991³¹)、 V_{cmax25} は高いものの、 m が極めて低い数値を採っていたことが関係する。牧草に用いられる草原については、C4光合成経路を持つススキを除き、多くの研究で高い V_{cmax25} が報告されており(Kattge and Knorr, 2007²¹)、また m も草本植物については高い数値を採ることが知られている(Sellers et al., 1997⁵⁷)。この環境に適応馴化した灌木林での低い m がこの地域での短期的かつ突発

的な乾燥に起因するのであれば、同様の馴化適応があったと考えられる草原でも m が低い可能性はある。しかし、生育期間のまっただ中に落葉や幹のcavitationを回避しなければならない樹木が乾燥耐性を高くする(低い m)必要に駆られるのとは対照的に、乾燥を種子で回避するという戦略を採りうる草本植物では(Levitt, 1980⁵⁸)必ずしも m を低くする必要はない。湿潤な状況で m を高くして光合成生産も増加させるという可塑性が灌木林の樹種にない以上(cf. Miyazawa et al. 2014²⁶)、草原の E が灌木林の E を上回ることは、決して世界的に見て決して不自然な現象ではない。

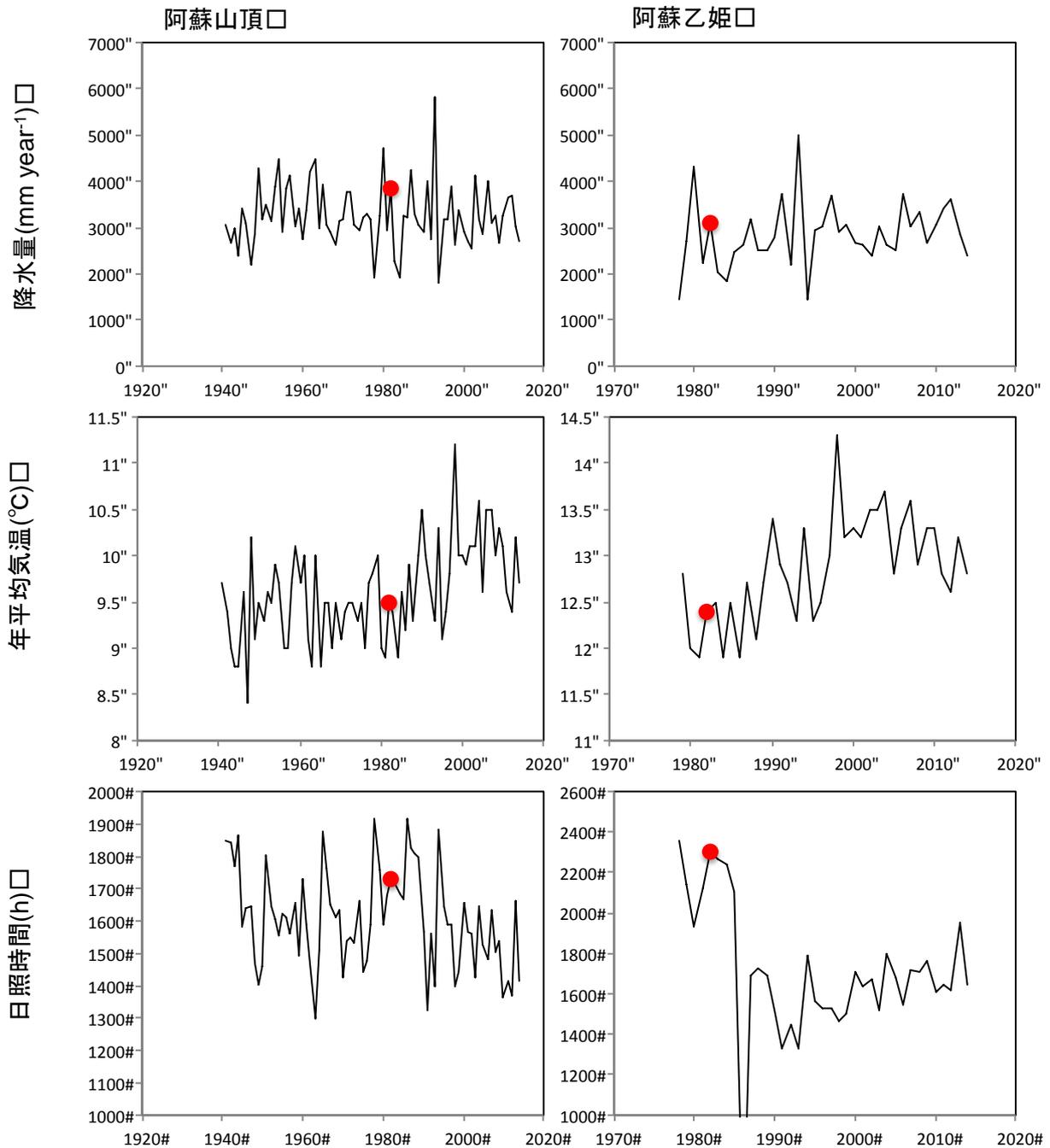
草原で ET が過大評価されているとする可能性としてあげられるのが、阿蘇に多く分布するススキが本研究では計測対象となっていないことである。ススキは今回対象とした他の草本植物や樹種と異なり、光合成回路として $C4$ 回路を保有する。詳細は割愛するが、 $C4$ 植物は光合成速度が高いという特徴に加え、水利用効率(純光合成速度/蒸散速度または g_s)が低いという特徴を持つ。本研究でも個葉スケールで計測した m は、他の $C4$ 植物では灌木よりも低い3.5を採ることもあり(Collatz et al., 1992⁵⁹)、より m の高いイタリアンライグラスなどよりも E および ET が低い可能性がある。ただ、 E は m と共に V_{cmax25} (正確には純光合成速度: $C3$ 植物と $C4$ 植物では純光合成速度と V_{cmax25} との関係が大きく異なる)の関数でどちらも正の相関を持つが、ススキを含む $C4$ 植物の純光合成速度は $C4$ 回路特有の生理特性により $C3$ 植物よりも高いことが知られている。 $C4$ 植物で m が低いことは、本研究が草原の ET を過大評価している可能性を示唆はするが、 E および ET がススキで灌木林よりも低いことを保証はしないことは述べておく。

本研究で観察された森林の遮断蒸発は、日本の様々な人工林での観測結果を記載したKomatsu et al., (2007⁶⁰)と比較して、いずれも低い数値を示した。この原因として、霧の発生しやすい阿蘇の気象条件、そして森林による霧の捕捉(Fog interception, Holwerda et al., 2011⁶¹)の存在が挙げられる。サブグループ(2)では、林内に設置した雨量計測用バケツに貯まった水の量を定期的に計測することで、林内の通過雨量を計測した。この貯まった水には、降雨イベントでの降雨と、無降雨および降雨時期に林冠からしたたった捕捉霧水が含まれる。一方、林外に設置された雨量計では、霧水の捕捉は極めて限定的であり、降雨のみを計測していると考えられる。このため遮断蒸発の計算値である(林外雨量-林内雨量-樹冠流量)/林外雨量は、正確には(林外雨量-林内雨量-樹冠流量+霧水捕捉量)/林外雨量、となり、本来の遮断蒸発量を過小評価している可能性がある。

捕捉された霧水が林内雨量に及ぼす影響は、林外雨量がない時期の林内雨量の有無を検証することで検出可能である。霧水捕捉が林冠からの水滴したたりや樹幹流を引き起こさないほど微量であったとしても、林冠を濡らすことが出来れば、通常は林内雨や樹幹流を引き起こさないようなごく微量の降水量であっても、樹幹流や林内雨が発生すると考えられる。降雨後に林内雨が開始されるまでのタイムラグ、あるいは林内雨量-林外雨量関係の林外雨量切片(林内雨を引き起こす最小雨量)を異なる環境にある構造の類似した森林と比較することで評価することが可能だと考えられる。本研究の開始時には、Fog interceptionの影響について考慮しておらず、今回採用した計測法ではいずれの方法についても検証することが難しかった。なお樹幹流については、無降雨期間の発生は観察されず、またそもそも発生した時期が少ないこともあり、Fog interceptionの重要性を評価することが出来なかった。

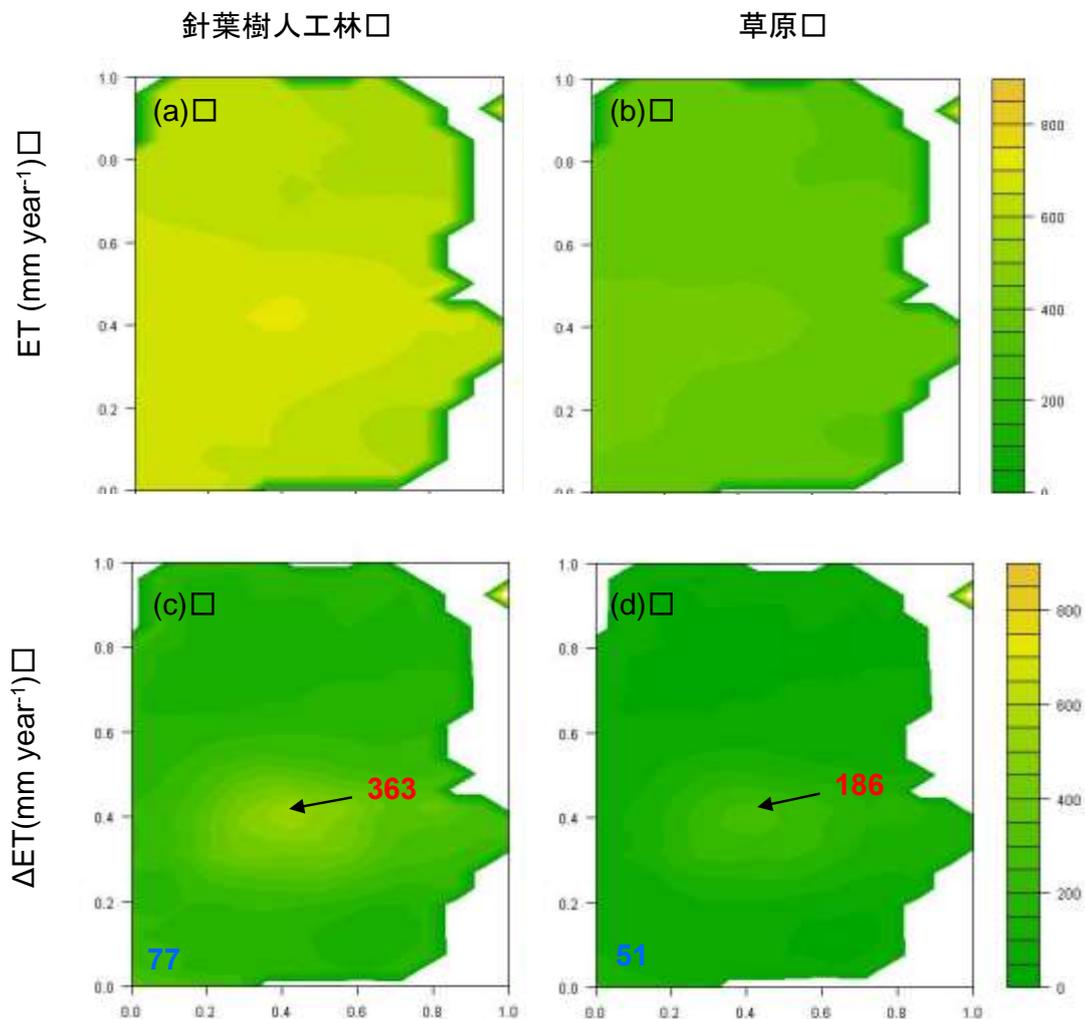
4.4.なぜ地下水は減った？阿蘇の白川流域のETに何が起こったのか？

草原の減少と灌木林への移行は、阿蘇全域の白川流域内のETを減らすことはあっても増やすことはないことが示唆されたが、それではなぜ白川下流域の熊本平野において地下水位が低下したのだろうか？本課題の成果を用いて、その上流域でのETの変化をもう少し掘り下げて調べる。



図(3)-18 阿蘇山頂および阿蘇乙姫(カルデラ底部)での気象条件の年々変動。●は今回過去の気象条件でのET推定に使用した1982年の数値(気象庁ホームページ<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>)。□

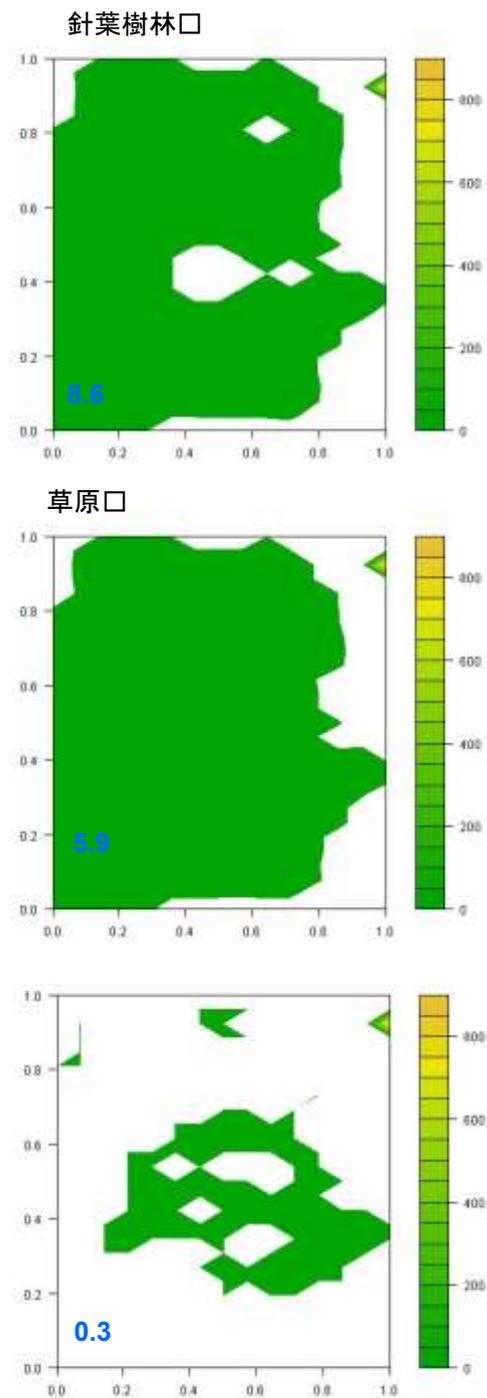
本研究で使用したETの推定法と、地下水の低下が観察された時期のさらに5年前(くまもと地下水財団、未発表)の気象条件を基に、白川流域の各グリッドのETをプロットした(図(3)-18)。なおこの年はエルニーニョ現象が観測された時期であるが、前後数年間の変動と比較して、各気象条件について特段大きな違いは観察されなかった。現在から20-25年前については、日照時間が長く、日射量は現在よりも大きかった。阿蘇カルデラの高標高および低標高地点のいずれにおいても共通するのは、気温が25年前には年々変動を伴いながら上昇傾向にあることである。阿蘇乙姫のデータについては、周辺の都市化が引き起こした風速の低下に起因する気温増加など、人為的な影響も考えられるが(近藤純正, 2000⁶²)、阿蘇山頂についてはその影響は考えにくく、地球温暖化の影響が阿蘇では顕著に見られていた。降水量には明確な長期的傾向が観察されなかった。



図(3)-19 阿蘇の白川流域の各グリッドについて、1982年のET(a, b)および2008年と1982年のETの差(Δ ET)をプロット(c, d)。(c, d)の赤色は、全グリッド中で最大の Δ ETが観測された地点とその数値、青色は中央値を示す。□

全てのグリッドで1982年から2009年までに、ETでは17-186mm year⁻¹(草原)および62-363 mm year⁻¹(針葉樹人工林)の増加が観察された。この傾向は高標高地域で特に大きかった(図(3)-19)。阿蘇五岳を中心とする高標高の多雨冷涼地域では遮断蒸発の寄与が大きいが、遮断蒸発の計算で使用する降水量には25年間で大きな変化は見られない(図(3)-18)。これら地域では、25年間の日照時間の減少は見られたものの、気温増加が顕著であり、蒸散の増加に伴うETの増加が引き起こされていた。この増加(針葉樹人工林の場合には白川流域内で平均143 mm year⁻¹)は水資源にどれほどの影響を及ぼすと言えるのだろうか？

阿蘇の現在のETの全グリッドでの平均値は625 mm year⁻¹であるから、ETが25年間で22.9%増加したことになる。阿蘇の1999-2008年の全グリッドの平均降水量は2825 mm year⁻¹であり、25年間のETの増加は降水量のわずか5%である。ただし、降水に占めるETの増加量が小さいからETの増加が地下水低下に及ぼす影響が微小である、という結論を下すことは出来ない。降水のうち地下水となる割合は必ずしも高くなく、豪雨時に発生する表層流は降水量に占める割合は大きいものの、地下水への流入は限定的である。蒸散は地下水に流入する可能性の高い、土壌に流入して保持された水を消費する。これ以上の考察は、本研究の目的ではなく、また考察をするには知見が不足しているが、ETの増加は確かに発生しており、地球温暖化に伴うと思われる阿蘇の気温上昇とETの増加が地下水位の低下を引き起こした原因である可能性は否定できない。現時点では他に地下水位が減少した原因は特定できず、地上部での水文学的な現象の中では今回計算されたETの長期的な増加がその原因として挙げられる。



図(3)-20 各植生の1999-2008年のETの標準偏差。青色は全グリッドを対象としたETの中央値。□

こうした長期的な傾向とは対照的に、この10年間のETの年々変動は極めて限定的であった(図(3)-20)。図(3)-18でも示されたとおり、この10年間には洪水などの大きな気象イベントはあったものの、年平均値には降水量、日射量、そして気温について目立った変化が見られない。そのため、2009年の気象データを用いて解析された本課題の結果の大半は近傍の他の年についても適用することができる、逆に言えば気象の年々変動によって結果が覆ることはないことが明らかとなった。

4.5. 草原の高いETと水資源涵養の活動

本研究の開始時の目的である、草原が森林に置き換わった場合のETの変化は、図(3)-19にあるように、むしろETが減少すること、そしてこれまで灌木林化が進んできた地点とは、元々白川流域内でのETの寄与も小さい冷涼な、また限られた面積に分布していることが明らかとなった。地下水位の低下、すなわち水資源に関する懸念が顕在化したのはこの20年だが、その間に目立って進行した草原の灌木林化は、水資源問題の直接の原因であるという主張は、本研究の結果によって支持されなかった。後述するように、本課題で扱った草原は必ずしも阿蘇に広がる草原を代表する性質を持つわけではないが、その上で今回の対象植生の中で最もETの低い灌木林の拡大が水資源を脅かすという議論は学術的に難しいと考える。

草原植生の最大の変化は、戦後から約20年間にわたって実施された針葉樹人工林の植栽、そしておそらくより長い期間をかけて拡大した水田の成立であり、草原を上回るETをもつこれら植生の拡大は白川流域一帯のETに強い影響を及ぼしたと考えられる。だが、その上で十分な水資源が確保されていたため(河川流量や地下水位などの水資源問題への関心が低かったせいかもしれない)、植生変化や水資源は社会的な問題として取り上げられなかった。

今回試験地に使用した草原とは、牧草種からなり、実験目的であるために刈り取りや家畜による採食が行われなかった草原である。阿蘇を始め牧草が植栽されるのは、牧草は成長が早く、また刈り取りまでに飼料(地上部現存量)を大きく蓄積する生理的な特性を有すからである(他にも栄養や食べやすさなども重要だろう)。特定の種が選ばれ、労力を投じて牧草地の整備が行われるのは、天然草原の種がこうした生理特性を必ずしも有さないからであろう。つまり、牧草種を扱ったサブグループ1の結果とは、阿蘇に広がる様々な草原のうち、牧草地については適用可能であっても、他の天然草原については現存量の蓄積およびそれに伴う蒸散Eを過大評価している可能性がある。繰り返し、ススキについては牧草並みの成長が期待されるが、Eも関与するその光合成の仕組みに牧草などとは大きく異なるC4経路をもつため、Eは抑制気味になると予想される。なお同じC4植物のサトウキビの場合、その炭素吸収速度は森林の2-3倍であり、森林をやや上回るETも観察されている(宮沢、未発表)。

もう一つ、「刈り取られず採食もされない牧草地」とは一帯どのような植生を代表するのであろうか。牧草地とは刈り取られ家畜を飼育するための草原であり、サブグループ1の結果に照らせ合わせれば図(1)-4の葉面積指数(LAI)が生育期間途中で突然低下する植生である。遮断蒸発 E_i については不明瞭だが、 g_s はLAIと共に増加することが示されており(図(1)-5)、草原の利用に伴うLAIの低下はETの低下をもたらすと考えられる。

草原の管理放棄に伴う灌木林の拡大が、もしも畜産業の衰退や担い手の高齢化であるならば、現状の草原についても利用が滞っている可能性がある。夏の採食や家畜による踏圧、定期的な刈り取りによるLAIの低下は、こうした利用の時期によるものの、草原全体のETを押し下げると思われ

る。逆に、こうした利用がこの10-20年間に低下したのであれば、白川流域全体へのETへの影響は無視できないだろう。草原は灌木林よりも面積が広い上、低標高で白川流域へのETの寄与が大きい地域にも広がっている。ただし草原の利用状況については本課題では調査の対象としていないため、これ以上の議論は難しい。

LAIの低下によるET抑制という観点からは、草原の利用は他の植生で行われる人為的な水源涵養(のうちETの削減)の取り組みと比べて有効だと考えられる。森林の場合、間伐が挙げられるが、本数で20-30%以下の間伐が一般的であり、草原のような劇的なLAIの低下は期待されない。皆伐が実施される場合でも、直後に苗木を植えることが推奨されている上、皆伐は伐採適齢期の40年生以上になるまでは実施されず、それまでは旺盛な成長をする若齢期も含めて高いETを維持し続ける。阿蘇カルデラ内の白川流域内のET抑制を目指す上では、生物物理学的に、かつ現実的には、現状の草原の利用率の向上こそ最も有効な取り組みだということを本課題は示唆している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

元々森林が成立する環境に成立していた草原が森林に遷移することに伴うETの推移についてはこれまで知見が限られていたが、本研究は乾季のある地域で多く得られてきた知見と異なりETが増加するという事実を明らかにした。また既存の知見と異なる結果が得られた物理的、生物的な原因を議論し、今回得られた結果が日本の同様の草原および森林への遷移移行地域でも見られる可能性が高いことを明らかにした。

本結果により、世界的な計測データを基にした結果であるとは言え、既存研究の知見をそのまま日本の土地利用形式の移行やその水資源への影響の評価に適用することの危険性が浮き彫りにされた。生態系保全や森林管理の大義として水資源の保全は多く謳われるが、水文過程のうち生態系や気象条件の特性を色濃く反映する過程(降雨、土壌水分特性、植物生理)が既存研究とは異なり、その適用に対して科学的な懸念がある場合、そうした懸念を払拭できる一連の学術研究が必要であろう。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特になし

<行政が活用することが見込まれる成果>

水資源の涵養を謳った活動および政策は多くあるが、こうした活動を計画するに当たり、現場での事前調査が必要であるという経験は、今後の他の活動の意義の評価において活用が見込まれる。本研究でも、既存研究を基にすれば、草原の森林化の防止は水資源涵養への寄与が大きいET削減につながると期待された。しかし実際には、いくつかの前提が既存研究とは異なり、結果的に灌木林の拡大はET増加をもたらさないという結果になった。

水資源涵養上の重要な要素として本研究の結果が焦点を当てたのは、管理放棄によって刈り取りも家畜による採食もされなくなった草原の拡大に対する懸念と適切な対処の必要性である。草原、とりわけ刈り取り採食のない牧草地とは、そのETが森林に匹敵し灌木林を上回る生態系であり、現在進行する温暖化によってそのETが増加することが示された。管理されずに伸び放題の

牧草地とは、景観上は管理された草原とは見分けがつかない豊かな緑の海であっても、水資源涵養上は一帯のETを増加させる全くの生態系である可能性が高い。草原の灌木林化が数十年を要すのとは対照的に、牧草地の刈り取り放棄やその拡大は短期間で進行し、また阿蘇全域に広がる草原の多くの地点で起こりうる現象である。森林化の防止や、そのための火入れに代表される目に見える活動のサポートに加え、これまで阿蘇で営まれてきた草原の利用活動の重要性が本研究により示唆された。もしもこうした管理放棄が草原の多くの地点で進行するようであれば、草原の灌木林化防止と一体化したサポートを通じた管理維持が必要とされると考えられる。

阿蘇の草原の減少については知見があるものの、刈り取りの実施面積の推移、および牧草地の天然草原への拡大といった、草原の管理放棄がもたらすと思われる見えにくい現象については、現場に携わる人々の感触以上の知見は得られていない。また既存草原の刈り取りに伴う葉の現存量(葉面積指数)の抑制および関連過程についても、本研究で得られた傍証によって間接的に示されたに過ぎず、実際に観測されたわけではない。これまで得られたデータを活用した、生物物理過程を踏まえたモデルの構築およびモデルによる解析、リモートセンシング技術を用いた現状の把握とモデル解析の向上、あるいは現場での観測を通じた実態の解明が求められる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 宮沢良行：東アジア環境研究機構ニューズレター No. 6、2013年 6月「研究課題採択草原の水資源涵養機能の解明」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1)井上昭夫・鶴田健二・篠原慶規・宮沢良行・高木正博・大槻恭一：第 69回日本森林学会九州支部大会、201310月「辺材面積に基づく間伐率の提案」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

- 1) Y. Miyazawa, A. Inoue, and A. Maruyama: AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, December 2013“Transpiration characteristics of forests and shrubland under land cover change within the large caldera of Mt. Aso, Japan.”
- 2) Y. Miyazawa, A. Maruyama and A. Inoue :The 7th International Conference on the Global Water and Energy Cycle, Hague, Netherland, 2014, “Impacts of conversion from grassland into woodland in a caldera of Mt. Aso, Japan ”
- 3) Y. Miyazawa, A. Maruyama and A. Inoue : AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2014, H31G-0688. “Transpiration of shrub species, *Alnus firma* under changing atmospheric environments in montane area, Japan”

8. 引用文献

- 1) Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. J. Hydrol. 310(1-4), 28-61.
- 2) Bosch, J.M., Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapo-transpiration. J. Hydrol. 55(1-4), 3-23.
- 3) Farley, K.A., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. Glob. Change Biol. 11(10), 1565-1576.
- 4) Buytaert, W., Iniguez, V., De Bievre, B., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo. Forest Ecol. Manag. 251(1-2), 22-30.
- 5) Dye, P., Versfeld, D., 2007. Managing the hydrological impacts of South African plantation forests: An overview. Forest Ecol. Manag. 251(1-2), 121-128.
- 6) Roberts, J., Rosier, P., Smith, D.M., 2005. The impact of broadleaved woodland on water resources in lowland UK: II. Evaporation estimates from sensible heat flux measurements over beech woodland and grass on chalk sites in Hampshire. Hydrol. and Earth Syst. Sci. 9(6), 607-613.
- 7) アジア航測株式会社 2013 平成 24 年度阿蘇地域の草原の樹林化による河川流量等に関する影響調査業務報告書
- 8) Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiol. 3(4), 309-319.
- 9) Schafer, K.V.R., Oren, R., Tenhunen, J.D., 2000. The effect of tree height on crown level stomatal conductance. Plant Cell Environ. 23(4), 365-375.
- 10) Phillips, N., Oren, R., Zimmermann, R., 1996. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. Plant Cell Environ. 19(8), 983-990.
- 11) Ford, C.R., Hubbard, R.M., Kloeppel, B.D., Vose, J.M., 2007. A comparison of sap flux-based

- evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. *Agric. For. Meteorol.* 145(3-4), 176-185.
- 12) Kume, T., Tsuruta, K., Komatsu, H., Kumagai, T., Higashi, N., Shinohara, Y., Otsuki, K., 2010. Effects of sample size on sap flux-based stand-scale transpiration estimates. *Tree Physiol.* 30, 129-138.
 - 13) Umebayashi, T., Utsumi, Y., Koga, S., Inoue, S., Matsumura, J., Oda, K., Fujikawa, S., Arakawa, K., Otsuki, K., 2010. Xylem water-conducting patterns of 34 broadleaved evergreen trees in southern Japan. *Trees-Struct. Funct.* 24(3), 571-583.
 - 14) Sun, H.Z., Aubrey, D.P., Teskey, R.O., 2012. A simple calibration improved the accuracy of the thermal dissipation technique for sap flow measurements in juvenile trees of six species. *Trees-Struct. Funct.* 26(2), 631-640.
 - 15) Clearwater, M.J., Meinzer, F.C., Andrade, J.L., Goldstein, G., Holbrook, N.M., 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiol.* 19(10), 681-687.
 - 16) James, S.A., Clearwater, M.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G., 2002. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiol.* 22(4), 277-283.
 - 17) Kumagai, T., Aoki, S., Shimizu, T., Otsuki, K., 2007. Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Tree Physiol* 27(2), 161-168.
 - 18) Monteith, J.L., 1995. A Reinterpretation of Stomatal Responses to Humidity. *Plant Cell Environ* 18(4), 357-364.
 - 19) Goldstein, G., Andrade, J.L., Meinzer, F.C., Holbrook, N.M., Cavelier, J., Jackson, P., Celis, A., 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environ* 21(4), 397-406.
 - 20) Phillips, N., Oren, R., 1998. A comparison of daily representations of canopy conductance based on two conditional time-averaging methods and the dependence of daily conductance on environmental factors. *Annales Des Sciences Forestieres* 55(1-2), 217-235.
 - 21) Kattge, J., Knorr, W., 2007. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. *Plant, Cell Environ.* 30(9), 1176-1190.
 - 22) Wilson, K.B., Hanson, P.J., Mulholland, P.J., Baldocchi, D.D., Wullschleger, S.D., 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agric. For. Meteorol.* 106(2), 153-168.
 - 23) Wullschleger, S.D., Meinzer, F.C., Vertessy, R.A., 1998. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiol.* 18(8-9), 499-512.
 - 24) Baldocchi, D.D., Harley, P.C., 1995. Scaling carbon-dioxide and water-vapor exchange from leaf to canopy in a deciduous forest .2. Model testing and application. *Plant Cell Environ.* 18(10), 1157-1173.
 - 25) Kumagai, T. et al., 2006. Modeling CO₂ exchange over a Bornean tropical rain forest using measured vertical and horizontal variations in leaf-level physiological parameters and leaf area

- densities. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 111(D10107).
- 26) Miyazawa, Y., Tateishi, M., Komatsu, H., Iwanaga, F., Mizoue, N., Ma, V., Sokh, H., Kumagai, T., 2014. Implications of leaf-scale physiology for the tree transpiration characteristics under seasonal flooding and drought in central Cambodia. *Agric. For. Meteorol.* 198–199, 221–231.
 - 27) Williams, M., Bond, B.J., Ryan, M.G., 2001. Evaluating different soil and plant hydraulic constraints on tree function using a model and sap flow data from ponderosa pine. *Plant Cell Environ.* 24(7), 679-690.
 - 28) Baldocchi, D., Meyers, T., 1998. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. *Agric. For. Meteorol.* 90(1-2), 1-25.
 - 29) Kumagai, T. et al., 2013. Simulation of canopy CO₂/H₂O fluxes for a rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in central Cambodia: the effect of the regular spacing of planted trees. *Ecol. Model.* 265, 124-135.
 - 30) Ball, J.T., Woodrow, L.E., Berry, J.A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: L. Biggens (Editor), *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 221-224.
 - 31) Collatz, G.J., Ball, J.T., Grivet, C., Berry, J.A., 1991. Physiological and environmental-regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration - a model that includes a laminar boundary-layer. *Agric. For. Meteorol.* 54(2-4), 107-136.
 - 32) Leuning, R., Kelliher, F.M., de Pury, D.G.G., Schulze, E.D., 1995. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration - scaling from leaves to canopies. *Plant Cell Environ.* 18, 1183-1200.
 - 33) Kumagai, T., Tateishi, M., Miyazawa, Y., Kobayashi, M., Yoshifuji, N., Komatsu, H., Shimizu, T., 2014. Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (1): Water use components in Japanese cedar stands. *J. Hydrol.* 508, 66-76.
 - 34) Miyazawa, S.I., Suzuki, A.A., Sone, K., Terashima, I., 2004. Relationship between light, leaf nitrogen and nitrogen remobilization in the crowns of mature evergreen *Quercus glauca* trees. *Tree Physiol.* 24(10), 1157-1164.
 - 35) Singaas, E.L., Ort, D.R., DeLucia, E.H., 2001. Variation in measured values of photosynthetic quantum yield in ecophysiological studies. *Oecologia* 128(1), 15-23.
 - 36) Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. *An introduction to environmental biophysics*. Springer, New York.
 - 37) Tateishi, M., Kumagai, T., Suyama, Y., Hiura, T., 2010. Differences in transpiration characteristics of Japanese beech trees, *Fagus crenata*, in Japan. *Tree Physiol.* 30(6), 748-760.
 - 38) Dye, P.J., 1991. Dye, P.J., Olbrich, B.W., Poulter, A.G., 1991. The Influence of Growth Rings in *Pinus-Patula* on Heat Pulse Velocity and Sap Flow Measurement. *J. Exp. Bot.*, 42, 867-870.
 - 39) Jimenez, M.S., Nadezhdina, N., Cermak, J., Morales, D., 2000. Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree Physiol.* 20(17), 1149-1156.
 - 40) Oren, R., Sperry, J.S., Katul, G.G., Pataki, D.E., Ewers, B.E., Phillips, N., Schafer, K.V.R., 1999.

- Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ.* 22(12), 1515-1526.
- 41) Maruyama, A., Kuwagata, T., 2010. Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agric. For. Meteorol.* 150(7-8), 919-930.
 - 42) Medlyn, B.E., Loustau, D., Delzon, S., 2002a. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. I. Seasonal changes in mature maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Plant Cell Environ.* 25(9), 1155-1165.
 - 43) Yamori, W., Noguchi, K., Terashima, I., 2005. Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analyses of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions. *Plant Cell Environ.* 28(4), 536-547.
 - 44) Palmroth, S., Berninger, F., Nikinmaa, E., Lloyd, J., Pulkkinen, P., Hari, P., 1999. Structural adaptation rather than water conservation was observed in Scots pine over a range of wet to dry climates. *Oecologia* 121(3), 302-309.
 - 45) Medlyn, B.E. et al., 2002b. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant Cell Environ.* 25(9), 1167-1179.
 - 46) Wilson, K.B., Baldocchi, D.D., Hanson, P.J., 2000. Quantifying stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation resulting from leaf aging and drought in mature deciduous tree species. *Tree Physiol.* 20(12), 787-797.
 - 47) Kattge, J., Knorr, W., Raddatz, T., Wirth, C., 2009. Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global-scale terrestrial biosphere models. *Glob. Change Biol.* 15(4), 976-991.
 - 48) Vitousek, P., 1982. Nutrient Cycling and Nutrient Use Efficiency. *Am Nat* 119(4), 553-572.
 - 49) Hughes, R.F., Denslow, J.S., 2005. Invasion by a N-2-fixing tree alters function and structure in wet lowland forests of Hawaii. *Ecol. Appl.* 15(5), 1615-1628.
 - 50) Miyazawa, Y., Tateishi, M., Komatsu, H., Kumagai, T., Otsuki, K., 2011. Are measurements from excised leaves suitable for modeling diurnal patterns of gas exchange of intact leaves? *Hydrol. Process.* 25, 2924-2930.
 - 51) Sala, A., Tenhunen, J.D., 1996. Simulations of canopy net photosynthesis and transpiration in *Quercus ilex* L under the influence of seasonal drought. *Agric. For. Meteorol.* 78(3-4), 203-222.
 - 52) Baldocchi, D., 1997. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant Cell Environ.* 20(9), 1108-1122.
 - 53) Orchard, K.A., Cernusak, L.A., Hutley, L.B., 2010. Photosynthesis and water-use efficiency of seedlings from northern Australian monsoon forest, savanna and swamp habitats grown in a common garden. *Funct. Plant. Biol.* 37(11), 1050-1060.
 - 54) Jones, H.G., Sutherland, R.A., 1991. Stomatal control of xylem embolism. *Plant Cell Environ.* 14(6), 607-612.
 - 55) Katul, G., Leuning, R., Oren, R., 2003. Relationship between plant hydraulic and biochemical

- properties derived from a steady-state coupled water and carbon transport model. *Plant Cell Environ* 26(3), 339-350.
- 56) Katul, G., Manzoni, S., Palmroth, S., Oren, R., 2010. A stomatal optimization theory to describe the effects of atmospheric CO₂ on leaf photosynthesis and transpiration. *Ann. Bot.-London* 105(3), 431-442.
- 57) Sellers, P.J. et al., 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science* 275(5299), 502-509.
- 58) Levitt, J., 1980. Responses of plants to environmental stresses, vol 2. Academic Press, New York.
- 59) Collatz, G.J., Ribas-Carbo, M., Berry, J.A., 1992. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Aust. J. Plant. Physiol.* 19, 519-538.
- 60) Komatsu, H., Tanaka, N., Kume, T., 2007. Do coniferous forests evaporate more water than broad-leaved forests in Japan? *J. Hydrol.* 336(3-4), 361-375.
- 61) Holwerda, F., Bruijnzeel, L.A., Scatena, F.N., 2011. Comparison of passive fog gauges for determining fog duration and fog interception by a Puerto Rican elfin cloud forest. *Hydrol. Process.* 25(3), 367-373.
- 62) 近藤純正, 2000. 地表面に近い大気の科学—理解と応用. 東京大学出版会, 東京.

Comparison of evapotranspiration from forests and grasslands in Mt. Aso caldera: consequence of land cover change in local water resources

Principal Investigator: Yoshiyuki MIYAZAWA

Institution: Kyushu University
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku Fukuoka, 812-8581, JAPAN
Tel: +81-92-802-2566 / Fax: +81-92-802-2563
E-mail: sclerophyll@gmail.com

Cooperated by: National Agricultural Research Organization, Prefectural University of Kumamoto

[Abstract]

Key Words: Mt. Aso, Evapotranspiration, Forest, Grassland, Land use change, Watershed

The area of grassland on Mt. Aso is decreasing due to the conversion into woodlands, partly as a result of the decline in livestock raising activities, which maintained the grassland. To protect the grassland, activities have been undertaken supported mainly by donations. On the other hand, downstream of Mt. Aso caldera in the Shirakawa river watershed, the Kumamoto plain has experienced lowering of its groundwater table. Governments in Kumamoto established an organization to support activities for the conservation of groundwater, independent from the grassland conservation activities.

Past hydrological studies have reported the relationship between forest expansion and the reduction in streamflow due to the higher evapotranspiration (ET) of forests. To examine the hypothesis that grassland has lower ET than forests on Mt. Aso and the possible link between land cover change and streamflow, we evaluated the impacts of conversion of grassland into forests on the ET of the whole watershed inside Mt. Aso caldera.

During 70 years, grassland conversion into forests proceeded in two phases: expansion of conifer plantation in 1950-1960's, and recent ongoing encroachment of shrublands. Because the planting of conifer trees is not active today, the reduction in grassland area was attributed to the encroachment of shrublands, which occurred in high altitude areas, distant from accessible roads.

Among the five investigated vegetation types (two plantations, two shrublands and one grassland) and another type (paddy field), annual ET was the highest in conifer plantation, followed by the paddy field, and grassland. Conifer plantation had not only longer periods for ET than other deciduous vegetation types, but also had the highest daily

ET among the vegetation types, due to the high transpiration rates and the interception evaporation rates. On the other hand, shrubland had lower transpiration rates due to the high water use efficiency and moderate leaf area ratio, which are closely linked to the transpiration rates together with the photosynthetic capacity.

At the watershed scale, we found a high contribution by conifer plantation, paddy field and grassland to the total ET, due to the large area of these land cover types, high ET per unit ground area and the evaporative environments of their spatial distributions. Contribution of shrublands and the grassland surrounding the shrublands to the total ET of the watershed was small, suggesting that the ongoing conversion of grassland into shrubland does not have remarkable impacts on the watershed-scale ET and hydrological processes on Mt. Aso.