

平成 21 年 4 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19500882
研究課題名 (和文) 代替燃料用作物の栽培の有無によるバルゼアの熱収支・二酸化炭素吸収量の比較研究
研究課題名 (英文) A comparative study of heat balance and CO <sub>2</sub> uptake between a varzea covered with plants for biodiesel and a varzea with no vegetation
研究代表者 土谷 彰男 (TSUCHIYA AKIO) 広島大学・大学院総合科学研究科・助教 研究者番号：00263632

## 研究成果の概要：

中部アマゾンのバルゼアとテラフィルメで観測を行った。前者の土壤水分は深さ 10 cm で  $0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 、30 cm で  $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  と高かった。前者は潜熱が正味放射の 60～80% を占め、日蒸発量は  $3.12 \pm 6.00 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  と、平均値・振幅とも高かった。この値は森林よりも小さいが、結露は林冠上では見られない。バルゼア林の樹木の蒸散は飽差依存で、一日に数十リットル以上の水を吸引し、昼間の樹幹周囲長は夜間より 1～2 mm 縮小していた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：中部アマゾン、バルゼア、浸水、熱収支、蒸発、蒸散流

## 1. 研究開始当初の背景

アマゾン川は、中流域のマナウスでネグロ川とソリモンエス川に分かれている。両河川には無数の河川が合流し、約 1,200 Km 西のペルー国境まで平坦なアマゾン盆地を形成する。盆地が広大であるため、水位の季節差は 10 メートル以上に達する。半年間浸水するエリアをバルゼアと呼ぶ。低水位期は、インディオの時代から、自給用の農耕がおこなわれてきた。19 世紀後半から 20 世紀初頭にゴムブームが起こった。20 世紀前半から中ごろにかけて日本人がジュート栽培を行った。入植者は商業的漁業か牧畜に転向した。一方、ブラジルは、1970 年代にサトウキ

ビからエタノールを抽出する技術確立し、エタノール車を生産してきた。昨今では、ガソリンとエタノールの比率を変えられるフレックス車が普及している。さらに、マモーナ (*Ricinus communis*)・デンデー (*Elaeis guianensis*)・カウアエ (*Elaeis oleifera*)・ミリチ (*Mauritia flexuosa*) などからメチルエステルを抽出し、バイオディーゼルを生産しようとしている。これらは、穀物相場の高騰を引き起こさない。マモーナはバルゼア低水位期で収穫でき、ヘクタールあたり 1,200 kg、デンデーからは 5,000 kg の油脂が採れる (Miranda *et al.*, 2001; Ribeiro *et al.*, 1999; Rodrigues, 1989)。こうしたバルゼア作

物の栽培は、地域住民の新たな収入源になる可能性がある。幹線道路の敷設・ダム建設・木材伐採・牧場開発などで環境問題を引き起こす (Farella *et al.*, 2001; Fearnside, 1995) ことはなく、カーボンニュートラルとして評価される。

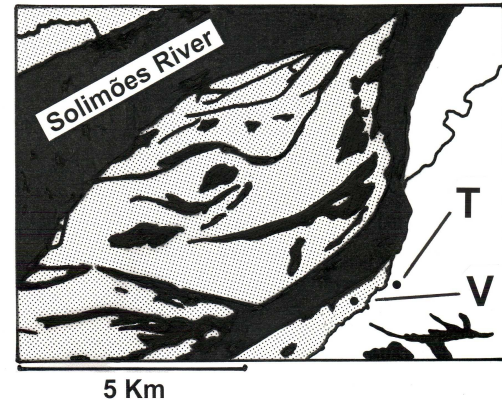
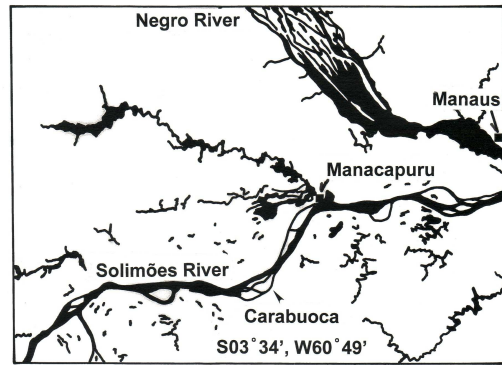
## 2. 研究の目的

広大なアマゾン中流域では、衛星による冠水面積の季節変化や流出解析が多い (Alsdorf *et al.*, 2000; Costa and Foley, 1999; Sippel *et al.*, 1994)。現地調査では、浮遊物質の沈殿 (Mertes, 1994)、溶存栄養塩の伐採による変化 (Martinelli *et al.*, 1993; Richey *et al.*, 2001)、水塊・川底からの温暖化ガスの放出 (Crill *et al.*, 1988; Richey *et al.*, 1988)、水生プランクトン・藻の役割 (Doyle and Fisher, 1994; Engle and Sarnelle, 1990)、草本・樹木群落に関するもの (Piedade *et al.*, 1994; Salo, 1986) がある。これらは、20 世紀半ば以後のバルゼアでの牧畜が、浸水林を衰退させ、温暖化ガスの放出を増やしている点で、密接に関連している (Goulding *et al.*, 1996)。熱収支・蒸発散に関しては、1980 年代以後、さまざまなテラフィルメ林・牧場を対象として、乱流変動法で計測され (Hölscher *et al.*, 1997; Klinge *et al.*, 2001; Malhi *et al.*, 2002; Shuttleworth, *et al.*, 1991)、湿潤林の蒸発散は正味放射に依存し、サバンナ林の蒸発散は土壌水分に規定されるとされている (Rocha *et al.*, 2009)。林内の鉛直分布 (Shuttleworth *et al.*, 1984)、植物体の蓄熱 (Moore and Fisch, 1986)、根の深さと蒸発散 (Hodnett *et al.*, 1995; Nepstad *et al.*, 1994; Wright *et al.*, 1992)、森林消失による降水量・蒸発散の減少も予測されている (Lean and Rowntree, 1993; Nobre *et al.*, 1991)。最近、バルゼアでの蒸発散も報告されたが、タワー観測の値であるため、バルゼア林・氾濫原・水面を含んでいる (Borma *et al.*, 2009)。そこで、本研究では、浸水するバルゼアと浸水しないテラフィルメで地表面熱収支を観測し、水分条件の違いが両地の微気象 (蒸発と凝結) に及ぼす影響を調べることにした。あわせて、バルゼア林の蒸散を樹幹蒸散流から計測し、大気の飽差や樹幹周囲長と比較する。

## 3. 研究の方法

調査はマナウスから約 80 Km ソリモンエス川を上ったマナカプルから小型船で 4 時間ほどのカーラボッカ集落で行った (図上)。カーラボッカ島は、上流からの粘土が堆積した中洲で、高水位期には島全体が水没する (図下ハッチ)。

2007 年 9 月 18 日 10:00 に転倒ます式雨量計と気圧センサーを稼働させ、正午からバルゼア (図下: V) の地表面で熱収支の観測を、16:00 からテラフィルメ (T) で熱収支の観測を始めた。テラフィルメはわずかに草が生えているが、



バルゼアは裸地に近い。後者の地中はヘドロのように軟弱である。長さ 2 m の枝を支柱にして、地表 1.5 m と 0.3 m の高さにサーミスター・静電容量式温湿度センサーを設置し、気温 T と相対湿度 RH を測定した。4 成分放射収支計は地上 1.5 m に固定し、下向き短波 SWd、上向き短波 SWu、下向き長波 LWd、上向き長波 LWu を計測した。地中熱流量 G を計測する熱流板は 2 枚平行にして地表面に固定した。地表面温度 SST は赤外線放射温度計で計測した。白金抵抗温度センサーを地中 10 cm と 30 cm に埋設し、地温 ST の計測に用いた。体積含水率 SW を計測する誘電率土壌水分センサーも同じ深さに埋設した。2 深度の土壌試料をコアサンプラーで採取し、土壌三相計で液相率を計測した。降水量 R はパルスロガー、大気圧 AP は電圧データロガー、長短波放射量・地中熱流量は微電圧データロガー、温湿度・放射温度・地温・誘電率はそれぞれ専用のロガーに記録した。降水量 (1 時間値) を除き、他は 10 分間隔で計測した。計測は 9 月 27 日まで行い、PC カードを経由してパソコンに転送した。

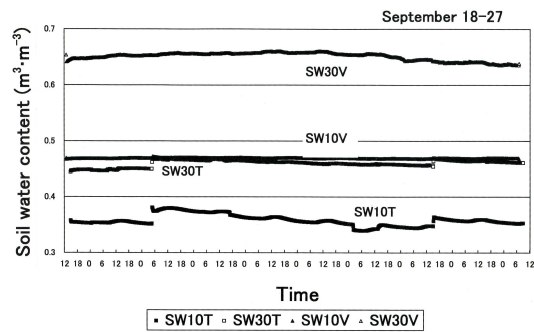
次年度の観測は、2008 年 8 月末から 9 月下旬にかけて行った。熱収支の観測はバルゼア裸地面上のみとし、高水位期に冠水するバルゼア林の軟材種 (Araliaceae の *Schefflera morototoni*, 俗名: Morototo (モロトト)) を対象に、樹幹の蒸散流量 (3 本) と周囲長変化 (1 本) の計測を行った。樹幹内蒸散流量はグラニエセンサーで計測した。これは、樹幹の上下 2 点間の温位の変化率から透水係数を近似する。幹の上下に穴をあけて、通導

組織である辺材部に熱電対を差し込み、上側のプローブに3ボルトの電圧を供給して温め、下側との温度差(温位)の変化率を透水係数  $K$  とし、吸水速度  $V$ 、蒸散流  $SF$  を推定する。熱帯材のほとんどは樹幹横断面における導管配列に規則性のない散孔材で、熱電対プローブは必ず導管と接触する。夜間に吸引が止まっていると、温位は大きい。昼間は水の流れがあるので、温位は小さい。透水係数  $K$  は無次元で、 $K = (dT_m - dT) / dT$  ( $dT_m$ : 最大温位, 夜間~早朝に出現,  $dT$ : 測定間隔中の平均温位) で表わされる。 $K$  から吸引速度  $V$  を出し ( $V = 0.119 \cdot K^{1.231}$ ,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )、それに水分の通導を行っている辺材の面積  $SA$  ( $\text{cm}^2$ ) をかけて、1時間あたりの蒸散流  $SF$  ( $\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ ) にする ( $SF = SA \cdot V \cdot 3,600 / 1,000$ )。モロトトには芯材が形成されるような樹齢の個体はなく、樹幹の断面積が辺材部面積に等しい。また、蒸散流が停止している夜間は水分が蓄積して肥大し、蒸散で水分が放出される日中は収縮するという周囲長変化  $VC$  ( $\mu\text{m}$ ) を、樹幹に巻き付けたインバー線(デンドロバンド)のテンションの変化を次式から計測した:  $VC = 2 \pi r \cdot CF \cdot \Omega / (r + 2.53 \cdot CF \cdot \Omega / 10,000)$  (ここで、 $r$ : 樹幹半径  $\text{cm}$ ,  $CF$ : 供試したデンドロバンド固有の変換係数  $0.243$ ,  $\Omega$ : 圧力センサーの電圧信号から変換した抵抗値 ( $0.25 \text{ V} = 0.50, 000 \Omega$ ),  $2.53$ : 定数)。

#### 4. 研究成果

観測期間(9月18~27日)の天気は20日まではやや雲が多く、21~23日が好天日、24日以後は曇りがちであった。降雨は10日間に4回起こった。20日の日の出前に17 mm、24日の午後1時に7 mm、25日の午後2~3時台に14 mm、26日の午後4時に1 mmで、いずれも降雨時間の短いスコールであった。

地表面温度  $SST$  は日の出前に最低(約  $23^\circ\text{C}$ )、午後2時ごろ最高(約  $48^\circ\text{C}$ )になった。朝6:00~午前10:00までの上昇は両サイトとも同時であったが、それ以後、正午の最大値までは  $T > V$  で差が開いた(差:  $7 \sim 8^\circ\text{C}$ )。午後は低下を始め、15:00頃には同値になり、18:00の日没時は両者とも  $30^\circ\text{C}$ 程度であった。夜間はテラフィルムの低下はバルゼアよりも緩慢で、翌朝には  $1^\circ\text{C}$ ほどの差になった。地温  $ST$  のテラフィルムの10 cm部位は、朝7:00頃最低、14:00頃最高、バルゼアの10 cm部位はテラフィルムより遅れて、朝8:00頃に最低、16:00~17:00頃に最高になった。その振幅は日によって異なるが、テラフィルムで  $27 \sim 37^\circ\text{C}$ 、バルゼアでは  $26 \sim 33^\circ\text{C}$ で、 $T$ は  $V$ よりも最高温度で  $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 高く、最低温度も  $1^\circ\text{C}$ 以下ではあるが  $T > V$ であった。30 cm部位では、最高温度は21:00頃、最低温度は11:00頃に出現し、 $T$ と  $V$ のピークとボトムの出時刻の差ははっきりしなかった。テラフィルムで  $28 \sim 31^\circ\text{C}$ 、バルゼアで  $28 \sim 30^\circ\text{C}$ 程度の日振幅で、



期間を通して  $T > V$  で、その差は昼夜ともに  $1^\circ\text{C}$ 程度であった。スコールが起こると、サイト間の10 cm部位の温度差は縮小したが、30 cm部位では変わらなかった。10 cmも30 cmも観測中盤の好天日は高く、その他は低かった。土壌水分  $SW$ は、バルゼアでは10 cmでは  $0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 、30 cmでは  $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 付近で、日変化がなく、ほぼ一定の値であった(図)。後者はほぼ飽和状態にあった。一方、テラフィルムの  $SW$ は低く、 $T$ の  $SW30$ は  $V$ の  $SW10$ よりも低かった。スコールの影響として、20日、24日、25日のスコールに対して、 $SW10$ は一時的に上昇し、 $SW30$ も20日と25日に上昇した。上昇幅は  $0.01 \sim 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  ( $1 \sim 3\%$ )であった。26日は降水量が少なく、 $SW$ の変化は起こらなかった。晴天日は2深度ともゆるやかに減少した。

地上1.5 mの気温  $T$ の日最大値は、好天日の21~23日は高く、曇天日やスコールの起こった日は低かった。サイト間では、日の出後は同じ値で上昇したが、10:00頃から差が生じ、最高気温は  $T > V$ で、最大で  $2^\circ\text{C}$ ほどの差になった。午後の低下は日没まではほぼ同じ値で下がったが、その後はわずかに  $T$ が早く、早朝の最低気温はわずかに  $T < V$ であった(差は  $0.5^\circ\text{C}$ 以下)。両サイトとも、日較差は  $10 \sim 15^\circ\text{C}$ あった。1.5 mの相対湿度  $RH$ は、朝の低下は両サイトとも同時刻に始まったが、8:00~10:00以後は  $T < V$ になった。21~23日の正午過ぎにはテラフィルムで40%台まで低下した。15:00以後は急速に上昇し、日によって異なるが、日没時には90%に達し、18:00~0:00の間に両サイトとも100%になった。24日昼のスコールでは、一時的に70%台まで跳ね上がり、25日の事例では、スコールの到来とともに、両地点とも100%に到達した。露点温度  $DP$ は両サイトとも約  $22 \sim 27^\circ\text{C}$ のレンジで変化し、午前の上昇、午後の低下、夕方の上昇と夜間の低下というパターンを示した。すなわち、日の出とともに  $T$ の上昇と蒸発の開始で  $DP$ が上昇する。10:00頃まではほとんど  $DP = T$ であったが、その後も  $T$ は上昇し、蒸発は続くが、移流によって  $V$ は低下し、 $T - DP$ は15:00頃に最大になる。夕方、 $T$ の低下で  $DP$ は急激に上昇し、日没後18:00から深夜0:00の間に  $DP = T$ になる。そして、翌朝にかけて  $DP = T$ を維持しながら、なだらかに低下し、その間、結露が起こる。その夜間の  $DP$ は  $T < V$ であった。水蒸気圧  $V$ は  $26 \sim 36 \text{ hPa}$ のレンジ



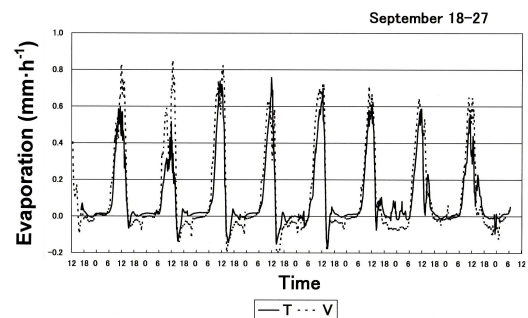
で、昼夜の変化は DP と同じであった。絶対湿度 AH はおよそ  $19\sim 26 \text{ g m}^{-3}$  のレンジで変化した。乾き空気  $1 \text{ kg}$  中に含まれる水蒸気を示す混合比、湿り空気  $1 \text{ kg}$  中の水蒸気質量を示す比湿 SH とともに  $16\sim 23 \text{ g}$  のレンジで日変化し、時間変化は、V、DP、AH と同位相であった。

正味放射量 Rn の昼間の値はほぼ SWd に規定された。2 地点とも 21~23 日の好天日は最大値が  $800 \text{ W m}^{-2}$  前後になったが、早朝にスコールのあった 20 日は  $700 \text{ W m}^{-2}$  に達しなかった。サイト間に差は見られなかった。夜間は短波放射収支がゼロであるため、長波放射に規定され、 $T (-50 \text{ W m}^{-2}) > V (-80 \text{ W m}^{-2})$  であった。両サイトとも 16:00 頃には  $Rn < 0$  になり、日没後に最小値、夜間はゆっくり上昇して日の出を迎えた。配分項の一つである地中熱流量 G は、 $-50 \text{ W m}^{-2} \sim 300 \text{ W m}^{-2}$  で日変化を示した。日中は下向きで、地温 ST の上昇に使われたが、スコールのときは上向き(放熱)になった。午前の上昇は温まりやすいテラフィルムが急で、午前 8:00~9:00 以後、差は一気に拡大し、その差は正午前後に  $70\sim 100 \text{ W m}^{-2}$  ほどに達した。16:00 頃にはすでにマイナスに転じ、日没時に  $-50 \text{ W m}^{-2}$  で最小値となり、翌朝の日の出前には  $-40 \text{ W m}^{-2}$  程度に縮小した。この間、放熱で、Rn と同等(テラフィルム)かそれよりわずかに大きい程度(バルゼア)であった。地上 0.3 m と 1.5 m の気層中の顕熱 S フラックスは、テラフィルムでは最大で  $150 \text{ W m}^{-2}$  程度と G 以下で、ピークは正午前に出現した。午後は 15:00 頃にゼロ以下に急低下し、気温 T の低下をもたらした。夜間はほぼゼロで、一貫してマイナスの G より大きかったが、深夜 0:00 まではマイナス、それ以後はプラスの傾向を示した。バルゼアサイトでは、日中の S はテラフィルムを下回った日 ( $100 \text{ W m}^{-2}$  以下) も上回った日 ( $200 \text{ W m}^{-2}$  近辺) もあり、G とほぼ同値であった。夜間はゼロ近辺で、翌朝までマイナスの G より大きかった。0:00 頃までがプラスで、それ以後マイナスになった日が多かった。潜熱 IE の昼間のピークは、テラフィルムが  $350\sim 500 \text{ W m}^{-2}$ 、バルゼアが  $400\sim 550 \text{ W m}^{-2}$  で、バルゼアは蒸発(プラス)の時間も長かった。しかし、両サイトとも 15:00 頃には SWd の急低下で Rn が急減し、G・S とともに IE はマイナスに転じた。ただ、日付が変わるまでは  $T > V$  で、バルゼアの結露が大きく、その後は差が縮小して、両サイトの IE はゼロに収束する傾向があった。テラフィルムのパラメーターを比べると、昼間は  $IE > G > S$  で、IE は Rn の 50% 以上を占めた。S のピークは正午前で、IE と G は少し遅れてピークに達した。午後に Rn が急減したが、G の低下がわずかに遅く、S と IE は一時的に大きくマイナスに振れた。日没時には Rn、G、S、IE のすべてがマイナスになった。夜間はマイナスの値の Rn はほぼ G によって支えられ、 $G < Rn < 0$  で、S と IE はゼロかゼロに近いマイナスで推移した。バルゼアサイトのパラメーターは、昼間は G と S の値が近く、IE が Rn の 60~80% を占めた。

15:00 過ぎに Rn が急減したときに、S と IE がマイナス、G はプラスにとどまったが、日没時にはすべてマイナスになったのはテラフィルムと同じであった。夜間はおよそ  $Rn < G = IE < 0$ ,  $S = 0$  で、G の上向き放出と結露が優占した。

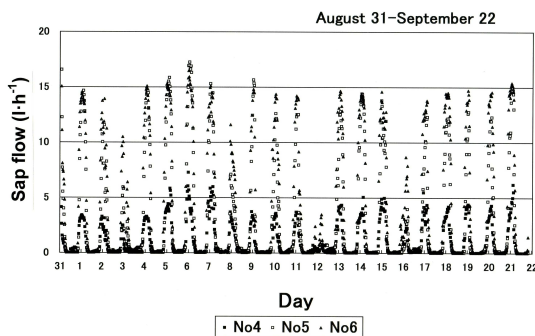
バルゼアでは蒸発の起こる時間が長く、ピークも高い(図)。横幅が広く、背の高いパターンとなる。バルゼアのピークが  $0.8 \text{ mm h}^{-1}$  になった日はテラフィルムでは  $0.5\sim 0.7 \text{ mm h}^{-1}$  であった。22 日だけはピークは  $T > V$  であったが、蒸発発生時間はバルゼアのほうが長かった。午後 15:00 頃には最小値になった。この結露はバルゼアの値が低く、 $-0.2 \text{ mm h}^{-1}$  まで下がった日もあった。その後の夜間の変化は、夜 21:00~0.00 頃までとそれ以後でパターンが異なり、前者はバルゼアの結露が多い時間帯で、後者はそれが弱まり、両サイトの差が縮小した。19~26 日の日蒸発量にするとテラフィルムが  $2.64 \text{ mm d}^{-1}$ 、バルゼアが  $3.12 \text{ mm d}^{-1}$  で大差はないが、振幅の差は明確であった(標準偏差: T: 4.56, V:  $6.00 \text{ mm d}^{-1}$ )。夜間の結露に関して、上向き長波 LWu が  $0 > T > V$  であったことが、夜間の正味放射 Rn が  $0 > T > V$  になった原因である。本来、LWu は放射する側の SST に規定されるが、実際は、受感部温度の 4 乗に規定される。SST の夜間の勾配は  $T > V$  であるため、LWu は  $T < V < 0$  になるべきであるが、受感部温度の勾配 ( $T < V$ ) に左右され、LWu、Rn ともに  $0 > T > V$  になった。これはバルゼアサイトは結露によって大気温度の低下が弱められたためと考えられる。昼間の蒸発量 EV は  $T < V$  で、気温の上昇へのエネルギーの消費はテラフィルムに比べて少なかった。この結果、バルゼアの EV の日振幅は大きくなった。

従来、アマゾンの湿潤林の林冠上で、 $\text{H}_2\text{O}$  フラックスが計測されてきた。同じ乾期の値としては、 $3.45 \text{ mm d}^{-1}$  (Shuttleworth *et al.*, 1984)、 $4.5 \text{ mm d}^{-1}$  (Wright *et al.*, 1992)、 $3.5 \text{ mm d}^{-1}$  (Hodnett *et al.*, 1995)、 $4.7 \text{ mm d}^{-1}$  (Sommer *et al.*, 2002)、 $3.96 \text{ mm d}^{-1}$  (Rocha *et al.*, 2004) が報告されている。森林では葉層からの蒸散が中心である。乾期であっても、地下 4~8 m に達する深根による Hydraulic lift が樹木の蒸散活動を支えている (Caldwell *et al.*, 1998; Roberts *et al.*, 1990)。昼間の蒸散で土壌水分が低下しても、夜間に復元する現象である。牧場の ET は深根からの補充がないため森林より少なく、牧草は乾期に枯れてしまうことがある (1.9



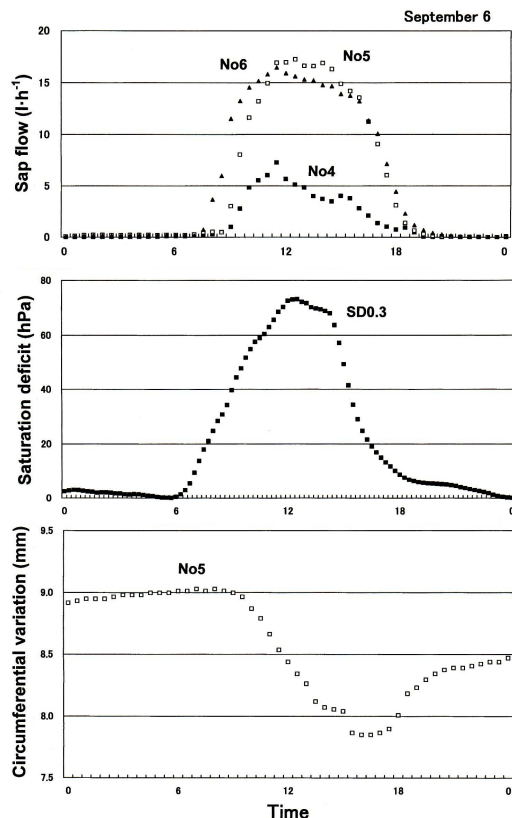
mm d<sup>-1</sup>: Sakai *et al.*, 2004)。森林であっても、疎林(サバンナ林)は Hydraulic lift が弱く、乾期の ET が減る(1.6 mm d<sup>-1</sup>: Quesada *et al.*, 2004)。本研究は裸地表面の潜熱フラックス IE からの推定で手法が異なるが、林冠上の値より小さい。テラフィルムもバルゼアも Hydraulic lift はない。冠水によって土壌水分が高いバルゼアで単純に EV が多い。同じバルゼアでの計測例として、Borma *et al.*(2009)は乾期の ET を 3.7 mm d<sup>-1</sup>と発表した。この値は 40 m のタワーの H<sub>2</sub>O フラックスからの値で、氾濫原だけの EV ではなく、バルゼア林・川の水面を含んでいる。実際、雨期の ET が 4.1 mm に増えたのは、高水位になって水面が拡大したためとされている。林冠上の IE がバルゼアと大きく異なるのは、夜間の IE がゼロである点である(Rocha *et al.*, 2004)。数十メートル上空では気温 T が露点温度 DP まで低下することはなく、IE・ET がマイナスになることはない。

図に 2008 年 8 月 31 日から 9 月 21 日まで、30 分ごとに計測した 3 個体の蒸散流を示す。個体 No4 は樹幹直径 15.3 cm, 樹高 12 m, 同様に No5 は 24.0 cm, 17 m, No6 は 35.4 cm, 19 m である。個体サイズによって時間当たりの吸水量は数リットルから 15 リットル以上と異なるが、正午前後をピークに午前から夕方までに吸引されている。夜間はほぼ吸引は停止している。降雨のあった日は吸引は弱く、朝から昼過ぎまで雨の続いた 12 日のピークは 3 個体とも 3 リットル以下であった。一日当たりの吸引量では個体サイズの大きい No6 が最大で 250 リットルを超え、次いで No5、最小の No4 は 50 リットル前後であった。天気は左右され、3 日、12 日、16 日は共通して少なかった。蒸散流は気孔からの蒸散に起因する。日の出後、蒸散が始まると、地表面と葉面高度の間に水ポテンシャル勾配が生じ、根・茎(幹)・葉の順に下から上へ水分が送られる。蒸散 T は、 $T=(C_p \cdot \rho / \gamma \cdot l) \cdot (SV(T_f) - V) / (r_s + r_a)$  で表される。T= $(AH(T_f) - AH) / (r_s + r_a)$  と気孔と外気の絶対湿度差で表しても同じである。この式の SV(T<sub>f</sub>)-V や AH(T<sub>f</sub>)-AH は葉面飽差のことで、大気の飽差(SD, VPD)と同義である。ペンマンの可能蒸発量  $E_o = ((R_n/l) \cdot \Delta + \gamma \cdot E_a) / (\Delta + \gamma)$  における E<sub>a</sub> は、地上 2 m の風速 u<sub>2</sub> と飽差できている。群落上



の潜熱フラックスを推定するペンマン・モンテイス法  $IE = ((R_n - G) \cdot \Delta + C_p \cdot \rho \cdot (SV - V) / r_E) / (\Delta + \gamma \cdot (r_E + r_c) / r_E)$  にも飽差が存在する。これが蒸散のプロモーターである。晴天日の事例として 9 月 6 日、雨天日の事例として 12 日を選んで時間変化を追跡すると、6 日は 11:30 頃最大値を出し、No4 が 7 リットル、No5 と No6 が 17 リットルであった(図)。蒸散流が始まったのは 8:00 頃、夕方は 19:00 頃まで継続したが、実際は 10:00~16:00 の間に集中していた。日合計では 74 リットル (No4) ~ 270 リットル (No6) が吸引された。6:00~13:00 まで 21 mm の降雨のあった 12 日は、No6 の個体で最大 3 リットルの吸引が見られたが、他の個体はそれ以下で、日合計でも 12 リットル (No4) ~ 29 (No6) リットルの吸引にとどまった。一方、大気の飽差 SD は、6 日は 6:00 頃に 0 hPa から上昇し、正午頃、73.2 hPa で最大値、日の入り時に 10 hPa を下回るといふ正規分布のパターンを示したが、12 日は終日 0 hPa であった。デンドロバンドで計測した 6 日(晴天日)の周囲長変化 CV は、9:00 頃から収縮し、16:00 頃最小値になり、日没後、膨張するパターンであった。夜間はゆっくりと膨張し、水分(サップ)が蓄積された。したがって、日中の収縮は水蒸気の放出の結果であるとみなすことができる。サップは下から補充されるが、葉面での放出と根の吸引との間でポテンシャル勾配が拡大し、1~2 mm の収縮になる。しかし、12 日の降雨日は収縮がまったく起こらず、逆に、雨がやむ 13:00 にかけてゆっくりと膨張する傾向を示した。本来、夜間に起こる現象である。午後以後は夜も含めて VC は一定であった。こうした昼夜の周囲長のわずかな変化は、蒸散流と逆位相で、天気の変化に影響された。

個葉レベルでの蒸散は携帯型ポロメーターでアマゾンでも多数計測されている(Huc and Guehl, 1989, Roberts *et al.*, 1990, Dolman *et al.*, 1991, Meinzer *et al.*, 1993, Grace *et al.*, 1995)が、巨大な樹木のどの葉で計測するかで、蒸散量は大きく変わってしまう。Granier ほか(1996)は、仏領ギアナの高木個体を対象に、樹幹内蒸散流と葉面の蒸散を調べ、蒸散流は気孔開度とともに午前中に最大になり、午後は気孔抵抗の増加で頭打ちになるとしている。本研究は半年間冠水するバルゼアでの事例で、真昼の気孔閉鎖が起こることはない。むしろ、雨天の飽差の低下が蒸散を抑制し、蒸散流を低下させている現象が目立った。日本のアカマツでも年間のピークは晴天の多い 5 月と 8 月にあり、6~7 月の梅雨シーズンは低下する(Tsuchiya, 2008)。本研究は低水位期の計測であるが、高水位期にバルゼアは浸水する。浸水初期は、根の CO<sub>2</sub> はサップに溶解、幹呼吸として放出され



(Horna and Zimmermann, 2000)、生理活動は継続される。一部の樹種は軟弱な地盤に対応するため板根を形成し、膝根・気根を発達させて、根の酸素不足を解消する。しかし、一般には浸水はストレスであり、水位が深くなると休眠する (Tsuchiya *et al.*, 2002; Worbes, 1985)。雨期に生長し、乾期に鈍化する陸上種と異なる。蒸散流を計測した 3 個体はサイズが異なる。樹幹半径や辺材部面積が大きくなると、サップの吸引が増えるため、蒸散流は多くなる。20 日間の平均蒸散流 SF と樹幹半径 R の関係は、 $SF=6.8R-21.8$  ( $r^2=0.93$ ) で回帰された。供試木が少ないため、この式に他個体のサイズを当てはめて蒸散流を推定することは無理があるが、樹種や生育型を考慮して経験式を導出すれば、単位面積あたりの蒸散流、つまり蒸発散を推定することができる。たとえば、アカマツの多い林分では、 $64.4 \text{ 万 } \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、アカマツの枯死の目立つ林分では、 $14.6 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  と推定されている (Tsuchiya, 2008) が、枯死の代わりに広葉樹が生育してきているので、その蒸散流を評価する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) Tsuchiya, A., A. Tanaka (2008): Micrometeorological environments and

biodiversity in a closed forest and at a tree-fall gap in central Amazonia. *Ciência Florestal* 18-4, 415-425. 2008 年, 査読有  
 (2) Tsuchiya, A. (2008): Sap flow measurements of red pines: Developments on a horizontal scale. *日本生気象学会誌* 45-2, 57-71. 2008 年, 日本生気象学会, 査読有  
 (3) Tsuchiya, A., A. Tanaka (2007): Difference in soil CO<sub>2</sub> fluxes at surface layers between a cutover area and a secondary forest during rainy and dry seasons in central Amazonia. *生態環境研究* 14-1, 1-12. 2007 年, 国際生態学センター, 査読無  
 (4) Tsuchiya, A., A. Tanaka, N. Higuchi, P.B. Lisboa (2007): Growth of trees and microclimates in a gap dependent forest in central Amazonia. *Ciências Naturais* 1-2, 47-63. 2007 年, エミリオゲルジ博物館 (ブラジル・ベレン), 査読無

[学会発表] (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土谷 彰男 (TSUCHIYA AKIO)

広島大学・大学院総合科学研究科・助教

研究者番号: 00263632

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者