

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500999

研究課題名（和文）中部アマゾンにおける再生林と裸地の蒸発散に関する研究

研究課題名（英文）Evapotranspiration at a secondary forest and a bare land in Central Amazonia

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（和文）：2009年乾期～2011年乾期の間に5回にわたってアマゾンの天然林・再生林・牧場の3箇所では微気象観測と幹内蒸散流計測を行った。再生林・天然林のサップフローとその個体の辺材部面積との関係から、蒸散量は再生林では8.1～17.2 t/ha/day、天然林では10.9～24.3 t/ha/dayであった。牧場の蒸発量は8.2～28.7 t/ha/day、降水量は16.1～112.7 t/ha/dayであった。牧場が牧草に覆われていると蒸発が森林の蒸散を上回ったが、家畜が牧草を喫食すると乾期は裸地化し、蒸発＜蒸散となった。後者では地表付近の温度上昇や土壌の気相率の上昇が蒸発の進行とともに起こった。牧畜の中止、再生林化がアマゾンの乾燥化を食い止めるのに有効である。

研究成果の概要（英文）：Micro-meteorological and stem sap flow measurements were repeated five times from 2009 to 2011 at a primary forest, a secondary forest, and a pasture in central Amazonia. The evapotranspiration was estimated to be 8.1-17.2 t/ha/day for the secondary forest, and that for the primary forest was 10.9-24.3 t/ha/day, respectively. The daily evaporation at the pasture was calculated to be 8.2-28.7 t/ha, and that of precipitation was 16.1-112.7 t/ha. When the pasture was covered with grass, the evaporation was larger than the evapotranspiration at forests, while when the livestock had eaten the grass, the evaporation fell below the evapotranspiration. In the latter case, temperatures increased near the ground surface and the air-filled porosity expanded with the progress of evaporation. The cancellation of grazing expansion policies and conversion to secondary forests will be important steps to stopping the drying and warming of Amazonia.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：自然地理学

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：アマゾン，再生林，天然林，牧場，蒸散，蒸発，土壌水分，水収支

## 1. 研究開始当初の背景

アマゾンの開発の歴史は1960年代に始まった。それまでは南部のサンパウロ・リオデジャネイロにとってアマゾンは遠く離れた

異国であった。それが、60年代半ばから国家への統合を目指して、BR230号、BR163号、BR364号、BR174号、BR10号、BR158号が敷設され、北東部の土地なき人を入植させた。

70年代後半からのポラマゾニア計画、80年代前半のボロノロエステ計画ではカラジャス鉄鉱山の開発、ツクルイ発電所の建設が行われた。牧場開発が奨励され、税制上の恩典が与えられた。こうしたインフラ整備、拠点開発、牧場の造成が森林伐採を助長した。80年代後半から世界各国からの批判が起こる。新憲法に環境条項が盛り込まれ、1992年に地球サミットが開催された。1995年からの「法定アマゾン国家総合政策」で環境面への配慮を打ち出した。その一方で、アマゾン南部のセラード地域では保全是建前で、農地開発と輸出回廊の建設が強力に推し進められた。西部アマゾンの場合、BR364号～ポルトベリヨ港～マデイラ川～イタコアチアラ港で輸出する。中部アマゾンの場合、BR163号～サンタレン港経由で出す。東部アマゾンの場合、BR158号～南北鉄道・カラジャス鉄道～サンルイス港で輸出する。こうして2000年代後半にはダイズの生産は世界第一位に、肉牛の飼育頭数は4,700万頭になった。その代償として法定アマゾンの伐採面積は15%を超えてしまった。アマゾナス州でのダイズ栽培は2008年秋に全面禁止された。諸外国に対して環境保護に努力していることをアピールするためである。しかし、牧畜は野放しである。牧場は労働力を吸収しない。伐採も栽培も禁止では、数百万人の現地住民は仕事がない。

天然林の減少が止まらないなかで、放棄された牧場を再生する技術や再生林を再評価することが不可避となっている。アマゾンの降水量は $12 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ 、蒸発散量は $6.48 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ 、流出量は $5.52 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ である。アマゾン熱帯林の蒸発散量は乾期の天然林で3.45 mm/dayが最初に報告された。南東部のサバンナでの季節変化は雨期>乾期であると報告された。潜熱フラックスも雨期>乾期とされる。牧場地帯で雨期>乾期という報告もある。マナウス北方の天然林では雨期>乾期であった。逆に、蒸発散量がわずかに乾期>雨期であるという報告もある。乾期>雨期の結果は、樹木の根が深く、乾期でも水分を吸引できるためである。年間レベルでは1,421 mm、1,364 mm、1,350 mm、1,319 mm、1,123 mm、日レベルでは3.6 mm/day、4.1 mm/dayなどのデータが報告されている。熱帯林がすべて牧場になった場合、降水量が0.43 mm/day減少し、蒸発散量も0.35 mm/day減る。高温化は上向き長波放射を助長し、正味放射は減少する。結果として潜熱も減るため蒸発散量は減少し、乾期が長期化する。植物バイオマスの減少で保持する水分が減ると洪水・干ばつの頻度が高まるなどである。牧場の拡大が乾燥化を引き起こすことに疑いの余地はない。不完全な林分であるが再生林の水循環は天然林に近いのか、牧場を再生林に変換するにはどうすればよいかを考察する必要がある。

## 2. 研究の目的

アマゾンで増える再生林は裸地・牧場・農耕地に比べると水分を多く貯留し、その放出を遅らせる効果があることを再生林の樹幹内蒸散流・葉面蒸散流の計測と再生林・裸地での微気象観測から示す。最初に、主要幹線道路沿いでランドサットのTM画像を抽出し、人為改変率を算定する。山焼きのデータを用いて、乾期に行われる火入れの発生地点とその移動を解析する。天然林と再生林の毎木調査を行う。アロメトリー式からバイオマスを推定する。デンドロメーターを用いて成長の季節変化を読み取り、蒸散による収縮・リチャージによる膨張の日変化を観察する。サップフローセンサーを樹幹に埋設することによって蒸散の絶対量を計測する。牧場の地表面で微気象観測を行い、潜熱フラックスから蒸発量を推定する。こうして、天然林・再生林・裸地の蒸散量・蒸発量を比較する。

## 3. 研究の方法

①衛星画像：国立宇宙航空研究所の山焼きデータバンクがブラジル全土の衛星画像をTMマップにして公開している。1画像約7,500  $\text{Km}^2$ を抽出してJPEG形式でセーブして、一般画像処理ソフトで自動補正処理する。画像はペルー・ボリビア国境からアマゾン川河口にいたる主要幹線を網羅する。専用画像処理ソフトでオープンし、スケールの設定、モノクロ化、二値化、総面積・面積率を計算する。

②毎木調査・バイオマス：再生林・天然林それぞれ2,500  $\text{m}^2$ のコードラートでDBH $\geq 5$  cmの個体を対象にDBHを計測し、樹種を鑑定する。地上部乾燥重量にはDBHでバイオマス(DW)を推定するアロメトリー式を用いる(5 $\leq$ DBH<20のときは $\ln(\text{DW})=-1.754+2.665 \cdot \ln(\text{DBH})$ 、DBH $\geq 20$ のときは $\ln(\text{DW})=-0.151+2.170 \cdot \ln(\text{DBH})$ )。

③年間成長量：DBH $\geq 5$  cmの全個体について、樹幹を標識テープで巻いて、その周囲長をデジタル巻尺で0.01 mmの精度で計測し、1年後に再度計測して、両者の差から直径レベルの成長量( $\Delta D$ )を算出する。

④微気象パラメーター：降水量、大気圧、気温・相対湿度(牧場と天然林、2高度、h:1.5 m、l:0.3 m)、地表面温度、短波長波放射量、地中熱流量、地温(地下10 cmと80 cm)、土壌水分・気相率(同深度)、を計測する。降水量は1時間値、他は15分間隔で収集する。

⑤樹幹内蒸散流：再生林・天然林各6個体の樹幹にグラニエセンサーを埋設し、上側のプローブを加温して、下側のプローブとの温位をモニタリングする。一日の最大温位dTmを探し(未明)、実際の温位dTとの差から変化率K(透水係数:(dTm-dT)/dT)を求める。60Aのバッテリーで約一週間もつ。データ回収とバッテリー交換を繰り返す。Kと辺材部面積(SA  $\text{cm}^2$ )から蒸散流量(SF: l/h)を推定す

る ( $SF=SA \cdot V \cdot 3,600/1,000$ ,  $V=0.0119 \cdot K^{1.231}$  cm/s)。細い個体は直接コアを採取し、大個体は製材所の丸太を計測することで、さまざまな太さの樹木の DBH か半径 (R) から辺材率

(S) や心材率 (H) を推定する経験式を得る。  
⑥ 樹幹周囲長：サップフローと同じ個体に設置する。ポテンシオメーターに巻きつけたインバー線が 120 mm の変化を電圧 5 ボルトに換算する。インバー線は樹幹を一周するステンレスバンドの一方に穴を開けて結わえてある。バンドは片方を幹に固定し、反対側はフリーでインバー線と結線している。ポテンシオメーターは角電池 2 個が電源である。データロガーはプレヒート機能で計測の 0.5 秒前に稼働させ、計測可能期間は 30 分間隔で、半年以上稼働する。

#### 4. 研究成果

##### ① 幹線道路と改変率

47 箇所の TM 画像の一例として、西部アマゾンホンドニア州、クイアバ～ポルトベリヨ道路 (BR364) 沿いのエリアを解析したところ、面積比で 62.8%、面積で 4,584 Km<sup>2</sup> が改変地域 (牧場) と推定された。中部アマゾンの例としてマトグロッソ州の改変地域を調べたところ、46.5% (3,392 Km<sup>2</sup>) であった。東部アマゾンの一例では 7,500 Km<sup>2</sup> のうち 4,988 Km<sup>2</sup> が改変を受けていた (68.3%)。BR230 沿いパラ州西部では改変率は 20.6% であった (1,501 Km<sup>2</sup>)。

恣意的に抽出した 47 箇所の TM 画像の改変率は現在のアマゾン全域の伐採率 15% より高い地点が多い。西部アマゾン・東部アマゾンでは 40～60% 台に達する。ホンドニア州の BR364、パラ州の BR153、BR158、BR10 が高い。大河川で分断されないサバンナ地域で、道路の敷設が早かった場所である。中央アマゾンはマトグロッソまでは高いが、アマゾン横断道路 BR230 以北の改変率はまだ低い。ただ、それに交差する南北方向の道路に沿って北上するのは時間の問題である。

##### ② 乾期の山焼き

天気予報気候研究センターが公開する山焼きデータバンクには、NOAA の AVHRR センサーが検出したホットピクセルが登録されている (1992 年～)。ブラジル全土の日別ホットピクセル数は 9 月が 5 万地点を越え、8 月・10 月が 3 万地点以上とこの 3 カ月が年間の観測数の大半を占める。雨期の 12 月から 4 月は、月に 1,000 地点に及ばない。

最終的に、年間ベースで 20 万地点を越える山焼き発生地点が伐採アークに集中する。年ごとに地点数に変動はあるが、高頻度の地点はほぼ変わらない。伐採アークに比べてアマゾナス州は少ないが、アマゾン横断道路沿いは頻度が高い。パラ州では横断道路の南側に多発地域が広がる。

##### ③ バイオマス、蒸発散量

DBH $\geq$ 5 cm の樹木個体は、再生林で 189 本・27 種、天然林で 211 本・27 種が確認された。互いに隣接する林分で、共通する樹種が多い。焼き払ったときに生き残った個体だけでなく、その後、発芽・定着した個体もある。再生林に特徴的な樹種は *Vismia* sp と *Bombax munguba* である。天然林に特徴的な樹種は、*Pouteria oblanceolata*、*Chrysophyllum sanguinolentum* ssp. *balata*、*Protium* sp、*Scleronema micranthum*、*Inga umbratica*、*Minusops huberi*、*Eschweilera amazoniciformis*、*Couma utilis*、*Andira micranth*、*Tachigalia* cf. *mymercophyla* である。胸高直径 (DBH cm) でバイオマス (DW Kg) を推定したところ、再生林は平均で 395 $\pm$ 1,147 Kg、コドラートで 74.6 t、天然林は平均で 441 $\pm$ 1,017 Kg、93.1 t であった。平均値では大差はないが、個体数の違いを反映してコドラート全体では再生林<天然林になる。

サップフロー (SF) の観測を 2009 年乾期、2010 年雨期・乾期、2011 年雨期・乾期の 5 回、基本的に毎回同じ 6 個体を対象に実施し、観測ごとに再生林と天然林の計測個体の辺材面積 SA (cm<sup>2</sup>) と SF (l/day) の関係式を求めた。一例として 2009 年乾期の再生林では両者は  $SF=0.0516 \cdot SA$  ( $r^2=0.97$ ) で近似され、天然林では  $SF=0.0555 \cdot SA$  ( $r^2=0.98$ ) で回帰された。サップフローの時系列変化は、再生林では樹齢も樹種も単純なため、SA の個体差が小さく、サップフローは日最大値で 10 l/h 以下、天然林には 40 l/h 程度に達する個体もあれば、再生林と変わらないほど少ない個体もある。樹高の高い・太い樹木は大量の水分を必要とするため、透水係数 K が大きく、通導効率が高い。

辺材面積 SA を回帰式に挿入し、個体別の日蒸散量 ET を計算した。再生林の 2009 年乾期は 10.7 l/day、2010 年雨期は 22.7 l/day、2010 年乾期は 22.2 l/day、2011 年雨期は 22.6 l/day、2011 年乾期は 18.6 l/day で、季節間ではやや乾期<雨期であった。雨期の晴天日は日射が乾期と変わらないほど強く、水分条件が良好 (土壌水分が多い) で水分を吸引しやすい。乾期は土壌水分が低いいため、根が深い個体、つまりサイズの大きな個体でないと十分な量を吸引できない。根の浅い再生林の樹木は乾期に落葉することがある。天然林の ET は、2009 年乾期が 12.9 l/day、2010 年雨期が 21.0 l/day、2010 年乾期が 28.8 l/day、2011 年雨期が 19.6 l/day、2011 年乾期が 23.5 l/day であった。天然林は土壌水分が比較的高く保たれ、根の深い個体は乾期であっても地下深くから水分を吸い上げられるため、蒸散流は多い。しかし、ほとんどの個体は林冠内の中層木・低層木である。前掲の図では No.102 と No.236 はサップフローが多いが、他個体は再生林の値と大差はない。季節差は再生林と同様、乾

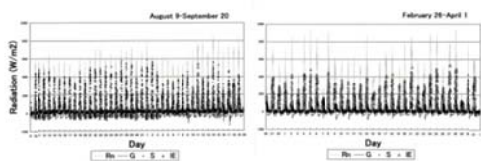
期く雨期であった。

蒸散量・蒸発量・降水量

	2009D	2010R	2010D	2011R	2011D
Capoeira	8.1	17.2	16.8	17.1	14.1
Mato	10.9	17.7	24.3	16.5	19.8
Campo	28.7	18.7	8.2	27.6	10.2
Prec	30.7	93.4	19.4	112.7	16.1

t/ha/day

両林分の ET を表に示す。雨期・乾期とも再生林より天然林の ET が同等かやや多い。2010 年乾期の天然林>再生林は顕著であった。雨期は両者の差は小さい。土壌水分が高く、吸引に差が現れない。Campo は牧場の蒸発量 EV である。EV は地表面の潜熱フラックス IE と地表面温度 SST から計算した。2009 年乾期は牧場の EV が森林の ET を大きく上回った。この期間の Prec は 30.7 t/ha/day と少なかったが、牛の飼育が中止されて草丈 40 cm ほどの牧草が生い茂っていたために、草本由来の蒸散で潜熱フラックスが高くなり、EV が多く見積もられた。2010 年雨期の EV は 18.7 t/ha で、森林の ET (天然林: 17.7 t、再生林: 17.2 t) よりもわずかに多い程度で、3 者に大差はなかった。2010 年乾期は牧場の EV は 8.2 t で、再生林 (16.8 t)・天然林 (24.3 t) の ET よりかなり少ない。天然林の大サイズの樹木個体は深い根を持つため乾期であっても土壌水分を吸引でき、無降雨期間でも晴天による葉面飽差の上昇が蒸散を促進する。この年は牧場に家畜が放たれ、牧草が食べつくされていた。裸地は長期にわたって蒸発が継続し、地表表層の土壌水分が低下していたことから、潜熱配分が少なく、EV は少なくなった (図左)。乾期であっても 24.3 t や 16.8 t の蒸散が起こる天然林や再生林はそれだけ土壌中に水分が蓄えられている。2011 年雨期は降雨が多かった (112.7 t) こともあり、牧場からの蒸発は 27.6 t と多く、天然林 (16.5 t) や再生林 (17.1 t) からの蒸散を上回った。牧草は家畜によって常に喫食されていた。雨期であっても Rn は乾期と大差はなく、S の配分より IE への配分が圧倒的である (図右)。夜間は気温の低下が弱い凝結 (IE<0) は弱い。これが 2011 年乾期になると、裸地では土壌水分がすでに十分減少しているため、蒸発が少なく見積もられ (10.2 t)、天然林 (19.8 t) や再生林 (14.1 t) からの蒸散より少なくなった。

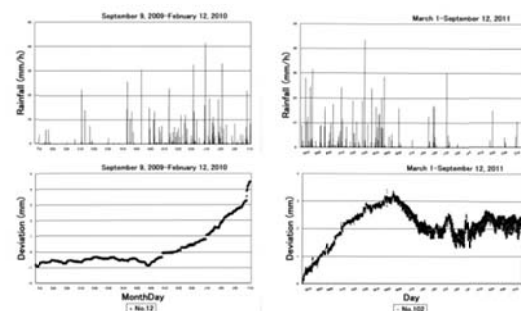


2010 年乾期 (左) と 2011 年雨期 (右) の正味放射 (Rn)、地中熱流量 (G)、蒸散 (E)、潜熱 (IE)

#### ④年間成長と季節成長

再生林と天然林の樹木について、直径変化 ( $\Delta D$ ) を計測した。再生林の  $\Delta D$  は DBH の 3 次式で回帰され、直径が大きい個体は  $\Delta D$  が狭くなり、頭打ちのパターンになる。周囲長 ( $2\pi \cdot R$ ) も  $\Delta D$  と同じである。天然林も  $\Delta D$  は頭打ちになる。 $\Delta D$  をバイオマス増加量に換算すると、再生林では 25.72 t/ha/yr、天然林では 20.74 t/ha/yr になった。

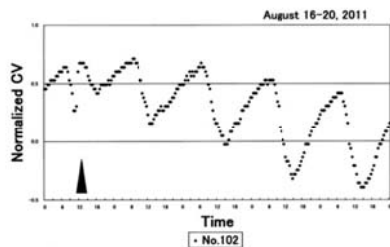
サップフローと同じ個体にデンドロバンドを設置し、昼夜・季節の樹幹変化を計測した。図左は 2009 年 9 月から 2010 年 2 月の半年間の降水量と再生林の No.12 試料 (*Vismia* sp) の周囲長偏差 (9 月上旬からの偏差: mm) である。11 月末までは乾期の後半で、12 月 1 日からほぼ毎日雨が降るようになった。時間降水量は乾期のスコールよりやや少ないが、継続時間は長い。一日に 2~3 回降ることも多い。周囲長偏差は 11 月終わりまではマイナス領域で推移し、その後、2 月上旬にかけて約 4.5 mm 拡大した。乾期のうちは肥大成長は止まっていた。周囲長が収縮した個体もある。蒸散過多・土壌水分の吸引不十分の結果である。しかし、雨期の到来で土壌水分が改善し、形成層の細胞分裂で二次木部の形成で肥大成長が起こった。図右は 2011 年 3 月から 9 月 (乾期から雨期) の降水量と天然林の No.102 試料 (*Tachigalia cf. mymercophyla*) の周囲長偏差である。5 月中旬までほぼ毎日雨が降った。時間降雨 20 mm 前後が多かった。5 月中旬以後突然降水量が減った。6 月中旬から 7 月初旬にまとまった雨が降ったが、あくまでも散發的で、8 月後半まで一ヶ月雨の降らない期間もあった。9 月になっても雨天は数回しかない。周囲長は 3 月 1 日の計測開始から 5 月下旬までは右上がり 3 mm ほど拡大した。5 月末から収縮が始まった。乾期になって蒸散>吸引になって木部の水分が減少したためである。



乾期から雨期の降水量と樹幹周囲長偏差 (左) と雨期から乾期の降水量と樹幹周囲長偏差 (右)

季節レベルの肥大成長とは別に、樹幹は昼間に蒸散で水分を放出してわずかに収縮し、夜間にリチャージして膨張する。蒸散は朝始まり、水分の放出は夕方まで続く。葉面飽差が出現する時間に起こるので、樹木の高さや日当たりによる。サップフローも夜明けと

もに始まり、正午前後に吸引は最大に達し、夕方にかけて低下する。葉面蒸散>サップフローで周囲長は朝から収縮し、正午前後に最も収縮するが、それ以後は翌朝にかけてゆっくり回復する。回復するのは放出<吸引の結果である。夜間は蒸散が停止し、翌朝の蒸散に備えて葉層まで水分をリチャージする。下図は8月の周囲長変化の規準化曲線(生データから計測期間の平均値を差し引いて、標準偏差で割った)である。周囲長は朝から低下して午後で最小になり、その後は翌朝にかけて上昇する。蒸散由来のサップフローは朝から夕方まで起こっているが、収縮(放出>吸引)は午後2~3時までで、それ以後は放出<吸引で膨張に転じ、夜間は吸引のみで膨張する。乾期の真っ只中で、5日間を通して下降トレンドであった。16日14:00に4.5mmのスコールがあり(矢印)、周囲長は一時的に拡大した。雨で葉面飽差が低下して蒸散が鈍化し、放出<吸引になった結果である。



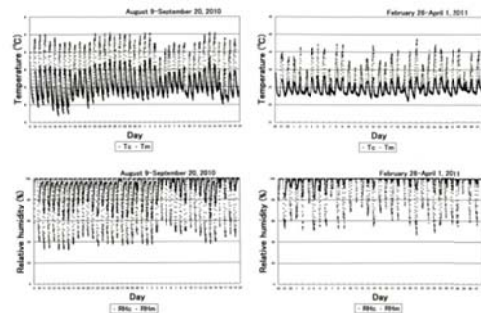
乾期の樹幹周囲長規準化曲線

### ⑤森林と牧場の二酸化炭素の放出と固定

森林から牧場への土地利用の変化は地表面の微気象を大きく変える。乾期(2010年8~9月)と雨期(2011年2~4月)の降水量を比べると、前者は43日間で降雨日はわずか9日間(日平均:1.9mm)、後者は37日間のうち降雨日は25日間であった(日平均:11.3mm)。乾期の降雨は数ミリ程度であった。雨期は未明にも午前にも昼にも午後にも夕方にも夜にも深夜にも降り、一日に2回降ることもあった。継続時間は半日程度続くこともあった。このように晴天続きの乾期と際限なく雨の続く雨期とでは森林・牧場双方の微気象環境が大きく変わる。

地上1.5mの気温(図上段)を比べると、牧場(c)の乾期は最小最大レンジが16.9~40.5°C、平均が28.0±6.3°C、雨期はレンジが21.2~38.7°C、平均が26.6±3.9°Cと変化の幅・平均ともに乾期>雨期であった。林内(m)もレンジ・平均値ともに乾期>雨期であった。相対湿度は牧場の乾期のレンジが32.8~100.0%、平均が82.4±22.8%、雨期のレンジは46.8~100.0%、平均が91.0±14.0%、乾期の林内はレンジが59.9~100.0%、平均が90.7±9.6%、雨期のレンジは80.9~100.0%、平均は98.5±3.3%と牧場・林内ともに乾期<

雨期の関係にあった(下段)。気温は太陽起源の気象要素で乾期のオープンスペースに日振幅が大きく、平均が高くなり、湿度は雨起源の気象要素で雨期に高く、林内で振幅が抑制される。気温に近いのは地表面温度(SST)である。飽差(VPD)も乾期>雨期と牧場>林内がはっきりしている。下向き短波放射SWd、反射日射SWu、正味放射Rn、地中熱流量Gも太陽起源のパラメーターであり、乾期・雨期とも牧場>林内である。水蒸気関連のパラメーター(水蒸気圧VP、露点温度DP、絶対湿度AH、混合比MR、比湿SH)は標準偏差が乾期>雨期で、乾期に振幅が大きくなる。熱収支関係のパラメーターは牧場でしか計算していない。Sは乾期>雨期で乾期に配分、IEはその逆で雨期に配分される。蒸発量EVもIEと同じパターンになる。



2010年乾期の気温(T:左上)と相対湿度(RH:左下)、2011年雨期の気温(T:右上)と相対湿度(RH:右下)。c:牧場、m:天然林。

地下の土壌の気相率aは乾期の牧場で際立って高く、蒸発と寡雨で空隙が多い。それと逆で地下10cmの土壌水分SM10は雨期の林内で高い。地下80cmのSM80は年間を通して変化が小さい。場所の違いも季節の違いも現れにくい。地温ST10とST80は太陽起源で乾期も雨期も牧場>林内の関係にある。大気圧APは地点差も季節差もないが、およそ9:00と21:00に最大、15:00と3:00に最小というツインピーク・ツインボトムの日振幅がある。地下の土壌二酸化炭素濃度SC10とSC80については、牧場も林内も生物活性の増す雨期に上昇する。乾期は牧場>林内の関係になっている。絶対濃度AC(mgCO<sub>2</sub>/cm<sup>3</sup>)に変換しても同様である。また、濃度は気圧と逆位相で、朝と夜の高压時に低濃度に、午後と未明の低压時に高濃度になる。ただ、これは土壌水分の高くなる雨期の林内の地下80cmでは見られない。また、降雨が浸透してくると高濃度になり、水分が下方に通過すると濃度は元に戻る。最終的に地下2深度間の二酸化炭素フラックスをMD、AC、a、ペンマンの屈曲率を組み合わせたFickの法則で計算した。フラックスは濃度と似て、樹木の光合成・根の呼吸、微生物活性の高まる雨期に多くなるが、乾期の牧場で高い。10cm部位の濃度は気圧と逆位相で変動するが、80cm部位は高濃度安定で気圧の時間変化の影

響を受けにくい。そのためフラックスは高圧時に拡大し、低圧時に縮小する。また、降雨の浸透で一時的に高濃度になると SC80 との濃度差が縮小するためフラックスは低下し、水分が通過すると SC80 との濃度差が拡大してフラックスも増加する。

2009 年乾期から 2011 年乾期までのフラックスは、乾期は牧場 > 天然林、雨期は牧場 < 天然林であった (表)。絶対量は乾期よりも雨期のほうが大きい。乾期は水ストレスで樹木の成長は鈍化する。森林に依存する土壤微生物も同様である。乾期は牧場からの放出が大きい。2009 年乾期は牧草に覆われていた。2010 年乾期、2011 年乾期は裸地化していた。裸地化で太陽短波放射が地表面に直接当たり、土壌水分が低下して気相率が高まり、ガスが放出しやすい環境になったためである。結果として、森林が牧場が変わると乾期にはより多くの二酸化炭素が放出されることになる。このフラックスは地下 80 cm と 10 cm の間の移動量である。主要な根の深さは地下 1 m 程度までで、封入空気存在でそれ以下の土壌の濃度変化は小さい。ただ、地表面の土壌呼吸は計測していない。

牧場と天然林の地下 80 cm と 10 cm の間の二酸化炭素フラックス

	2009D	2010R	2010D	2011R	2011D
Campo	0.378	0.812	0.496	0.446	0.517
Mato	0.271	1.022	0.186	0.581	0.155

gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/h

1 年間の直径成長から推定した天然林プロットの成長量 (20.74 t/ha/yr) は 30.4 tCO<sub>2</sub>/ha/yr の吸収固定に相当する。再生林の成長量 (25.72 t/ha/yr) は 37.7 tCO<sub>2</sub>/ha/yr に相当する。この値と土壌二酸化炭素フラックスを比較する。表の値を KgCO<sub>2</sub>/ha/day にし、年間のフラックスを 6~11 月の半年間を乾期の値で、12~5 月を雨期の値で換算した。2009 乾期から 2010 年雨期を 1 年間とした場合、天然林では 56.6 tCO<sub>2</sub>/ha/yr、2010 年雨期から乾期の 1 年間の場合、52.9 tCO<sub>2</sub>/ha/yr、2010 年乾期から 2011 年雨期の 1 年の場合、33.6 tCO<sub>2</sub>/ha/yr、2011 年雨期から 2011 年乾期の 1 年の場合、32.2 tCO<sub>2</sub>/ha/yr になる。再生林ではそれぞれ 52.1 tCO<sub>2</sub>、57.3 tCO<sub>2</sub>、41.2 tCO<sub>2</sub>、42.2 tCO<sub>2</sub> になる。天然林のフラックスが 32.2~56.6 tCO<sub>2</sub> であるのに対し、吸収量は 30.4 tCO<sub>2</sub> である。土壌から大気に放出する二酸化炭素ガスの多くが地上部の樹木に吸収される。一方、牧場からの放出は 41.2~57.3 tCO<sub>2</sub> ha/yr になる。牧草または裸地では二酸化炭素の固定はほとんどないため、すべてが大気側の純増になってしまう。再生林のフラックスは未計測であるが、バイオマスの増加で 37.7 tCO<sub>2</sub> が吸収される。乾期に牧草が裸地化すると、牧草に覆われているときより多くの二酸化炭素が

出ていることは重大である。牧場開発による森林の伐採・焼却、喫食、荒廃地化という負の連鎖が起こっている。これが土壌水分の減少、乾期の長期化、降水量の減少温度・放射パラメーターの日振幅の拡大などを引き起こす。幹線道路沿いには 4 割から 6 割の土地が牧場化している場所がある。法的に規制されているアマゾン州以外のアマゾン西部・東部諸州では、このエリアがさらに北方に拡大する可能性がある。アマゾン盆地スケールで温暖化ガスの放出が増える可能性は否定できない。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Tsuchiya Akio, Changes in evapotranspiration and CO<sub>2</sub> flux accompanying the land use change from forests to pastures in central Amazonia. Papers of the Applied Geography Conference 35, 査読有, 2012 (掲載頁未定)

[学会発表] (計 1 件)

1. Tsuchiya Akio, Soil CO<sub>2</sub> flux between a pasture and a forest floor in Novo Aripuanã along the Madeira River, AM., Seminário de Pós-graduação em mudanças climáticas diante das alternativas florestais e ambientes de preservação dos recursos naturais, Universidade do Estado do Amazonas, August 7, 2011, Manaus, Brazil.

#### 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