

# アマゾン熱帯林の林床と開墾畑からの CO<sub>2</sub> 放出速度の比較研究

Comparative study of soil CO<sub>2</sub> efflux between a capoeira and forest floor in Amazonian dense tropical moist forest

土谷彰男, 広島大学総合科学部, 助手

Akio Tsuchiya, Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University,  
Research Associate

要旨: 本研究では中部アマゾンの天然林と伐採・焼却後放棄された草地において土壌 CO<sub>2</sub> 濃度その他の微気象要素を乾期 (2003 年 8~9 月) と雨期 (2004 年 3 月) に計測し、降雨の浸潤・降下浸透、土壌水分の蒸発が両区の土壌 CO<sub>2</sub> に及ぼす影響を調べた。浸透する際には、CO<sub>2</sub> 濃度が一時的に上昇し、水が透過すると濃度は低下した。その後、この上昇と低下はより深い部位に移った。この現象は林内は乾期にも雨期にも見られ、草地では雨期に見られた。草地の乾期は昼間は地温の上昇で地表面付近の土壌水分の変化量がプラスになり、夜間は地表面の CO<sub>2</sub> 濃度の変化量が高くなるという逆位相が見られ、林冠がなく、昼夜の放射量の振幅が大きいことが原因であると推察された。乾期の草地では降雨があっても地下 1 m の CO<sub>2</sub> 濃度は上昇せず、地下 10 cm の CO<sub>2</sub> 濃度は雨期は両区の差は少ないが、乾期は草地は林内の約 5 分の 1 であった。このことから草地は乾期になると土壌から大気への CO<sub>2</sub> の放出が増加する可能性が示唆された。

Abstract: In this study, soil CO<sub>2</sub> concentration and micro-meteorological parameters were measured at a primary forest and grassland abandoned after felling and burning during the dry season (August to September 2003) and rainy season (March 2004). The CO<sub>2</sub> concentration temporally increased when rainfall percolated into soil, and the concentration decreased after the water passed down. Then, the changes moved into deeper places. This phenomenon was found in both dry and rainy seasons at forest and in rainy season at grassland. On the other hand, a reverse phase; the differential of soil moisture (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/30 min) at shallow depths became plus in daytime, while in nighttime the differential of CO<sub>2</sub> (ppm/10 min) became plus, was seen at grassland in dry season. The changes were brought about by a large fluctuation of radiation components due to the lack of forest canopy. The CO<sub>2</sub> at a depth of 1 m did not rise even after rainfall, but it was about one fifth of the forest at 10 cm, and there was no large difference in rainy season between the two sites. It was suggested from these findings that the CO<sub>2</sub> release from soil to atmosphere accelerates at grassland in dry season.

## 研究目的

本研究の目的は林内とオープンスペースの土壌 CO<sub>2</sub> を比較することである。降水が地表を覆うことで大気側の CO<sub>2</sub> は低下するのか、降雨の浸潤・降下によって土壌 CO<sub>2</sub> は上昇するのか、無降水日に蒸発で土壌水が上昇すると CO<sub>2</sub> 濃度は低下するのか、放射・温湿度の日振幅が異なる林内と草地、乾期と雨期ではどのような違いがあるか。土壌中には大気の数倍~数十倍の濃度の CO<sub>2</sub> ガスが蓄えられている。これまで土壌 CO<sub>2</sub> の連続測定はアマゾンではまだ行なわれていない。そこで森林消失によるもう一つ(地圏)の CO<sub>2</sub> の動態を主に降水との関連から調べる。

## 研究経過

調査はブラジル国アマゾナス州ノボアリアン市近郊で 2003 年 8~9 月(乾期)と 2004 年 3 月(雨期)に行った。通称カスカレイラと呼ばれる場所に 200 km<sup>2</sup> の天然林が保全され、1997 年に農地造成用に焼き払い、そのままになっている 2 km<sup>2</sup> のオープンスペース(カ

ポエイラ)がある。どちらも黄色ラトソルが地下 5~6 m まで達し、その下に赤い砂利層が続く。両区とも縦 50 cm・横 100 cm・深さ 120 cm の穴を掘り、地下 10 cm、30 cm、50 cm、100 cm に誘電率土壌水分センサー、白金抵抗温度センサー、CO<sub>2</sub> センサーを埋設した。地表では地上 10 cm と 150 cm に CO<sub>2</sub> センサーを設置した。電源は自動車バッテリーを直列 24 ボルトにして供給したが、消費・待機電力と安全率を考慮して、一週間ごとに回収して発電所で充電した。大気の高湿度はサーミスター・静電容量式センサーで地上 10 cm と 150 cm で計測した。気圧はパロカップセンサーを地上 150 cm に設置した。熱収支パラメーターは下向き短波・上向き短波・下向き長波・上向き長波を、地表面では地中熱流量を計測した。また、雨量計を設置し、時間雨量を 0.5 mm レベルでバルスロガーに収集した。林内区の天空率は魚眼レンズで撮影し、画像解析から推定した。

## 研究成果

乾期の観測期間中、10回降雨があった。いずれもスコールやにわか雨で、継続時間は2~3時間と短い。時間雨量は8月15日18時に草地区で46.5 mm、林内区で22.0 mmを記録した。9月2日以降は雨は観測されなかった。雨期は降雨日が15日、無降雨日は5日で、乾期に比べて圧倒的に降雨日数は多かった。時間降雨が20 mmを越えたのは草地区で4回、林内は1回あったが、30 mm以上の事例はなかった。ただし、継続時間は乾期よりも長く、4~5時間に及ぶ事例が目立った。

地上10 cmの気温(T1)は乾期の草地区の9月7~11日が29.5で最も高く、最低は雨期の林内区の3月3~6日(24.5)であった。日変化は乾期の草地、雨期の草地で高く、林内は雨期も乾期も1台であった。相対湿度(HI)は林内では100%、次いで雨期の草地区(91.6±13.7%)、乾期の草地区(85.4±20.1%、76.8±24.3%)で、平均が低くなると標準偏差は大きくなった。絶対湿度(Y1)には大差がなかった。蒸発力を示す飽差(EDI)は乾期の草地で高く(14.5 mb、7.8 mb)、次いで雨期の草地(4.4 mb)で、林内は乾期も雨期もほぼゼロであった。下向き短波(SWd)は草地区の乾期が186 W/m<sup>2</sup>、242 W/m<sup>2</sup>、雨期が173 W/m<sup>2</sup>であるのに対して、林内は乾期で11 W/m<sup>2</sup>、24 W/m<sup>2</sup>、雨期は6 W/m<sup>2</sup>、7 W/m<sup>2</sup>と大差があった。上向き短波(SWu)はSWdが高いとその絶対値は大きくなり、|SWu|の草地>林内の傾向は明瞭であった。下向き長波(LWd)は日平均にすると夜間の冷却の弱い林内で高く、林内>草地の傾向で、逆に、上向き長波(|LWu|)は林内<草地であった。長波放射の日収支(LWd-|LWu|)は全事例でマイナスであったが、その放熱は夜間の冷却効果の高い草地区の乾期で大きかった。正味放射(Rn)は草地>林内が明瞭であった。地中

熱流量(G)も同様で、林内ではわずかではあるが放熱した期間があった。また、これらの放射パラメーターの標準偏差は草地>林内であった。なお、林内の天空率は19.7±2.4%で、草地区は100%であった。

大気中のCO<sub>2</sub>の濃度差を絶対濃度に変換し、拡散速度との積でCO<sub>2</sub>フラックスになる。ただし、これには潜熱・顕熱の拡散速度がCO<sub>2</sub>の拡散速度(Dc)に等しいことが条件になるため、十分な吹走距離のない林内には適応できず、林冠上ではないため林分のCO<sub>2</sub>の吸収・放出を代表することにはならない。草地区の乾期の8月29日~9月4日の日平均値は-33.6±44.7 mgCO<sub>2</sub>/100 cm<sup>2</sup>/h、9月6~12日は+6.7±10.3、雨期の3月16~21日は+64.5±38.8であった。乾期<雨期であるのは、雨期に草本の成長でCO<sub>2</sub>が吸収されたことを意味する。しかし、時間レベルでは大きなばらつきが見られた。図1に8月30~31日のフラックス(上)とその拡散速度(Dc)、2高度の気温差、水蒸気圧差を示す。未明に気温差、水蒸気圧差がほぼゼロになったときにDcが異常な値を出し、夜間のフラックスが-1,000~-2,000 mgCO<sub>2</sub>/100 cm<sup>2</sup>/hになった。これはその時間だけDcの式の分母がゼロに近づき、DcとDh、Dwの等号関係が崩れたためである。3月19日は午前8時から11時にかけて降雨があった。正午に気温差がマイナスになり、プラスの水蒸気圧差と相殺したときにDcが大きくプラスにジャンプし、午後2時頃水蒸気圧差がプラスに転じるとき、その直後に気温差がプラスに転じるときにもDcはマイナス・プラスに振れてCO<sub>2</sub>フラックスがばらついた。このように熱収支法の拡散速度には気温差、水蒸気圧差が入っているため、2高度の温湿度が等質のときに異常なフラックスをもたらした。

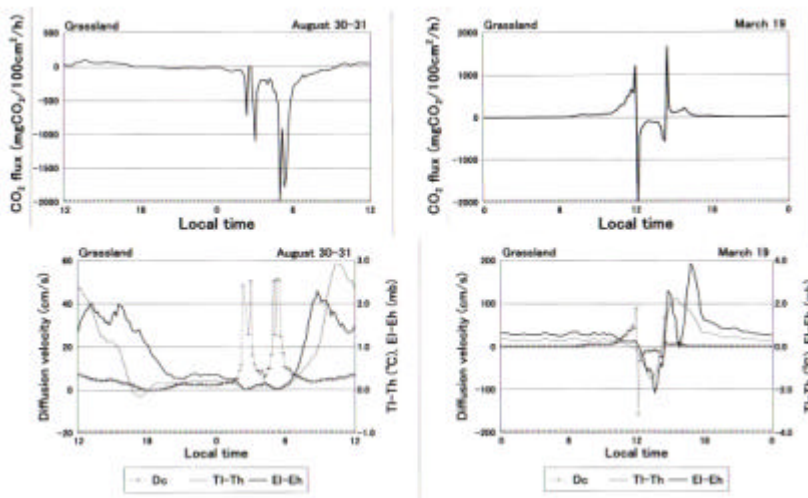


Figure 1. Diffusion velocity of CO<sub>2</sub> (Dc), temperature difference (T1-Th), and vapor pressure difference (E1-Eh) which caused irregularly unstable CO<sub>2</sub> flux.

土壌の間隙は水と空気で作られ、降下浸透・蒸発による鉛直方向の移動の際に両者はせめぎあう。図 2 は 3 月 5 日、12 日の土壌 CO<sub>2</sub> 濃度の 10 分変化量と土壌水分の 30 分変化量を示す。降雨が浸潤すると、まず 10 cm の土壌水分が 30 分前に比べて増加し、その次に 30 cm、その次に 50 cm、最後に 100 cm と深い部位に増加のピークがシフトする。透過後は変化量はマイナスになって土壌水分は減少する。これと平行して土壌 CO<sub>2</sub> も浅い部位が増加し、浸透水が透過すると深い部位が増加する。降雨は午前 7 時の 10 mm がピークであったが、午前 10 時には 1 m まで降下浸透が到達した。CC30 の 10 分変化量は午前 8 時台にはマイナスに転じ、濃度変化は 15 時に止ま

った。12 日の降雨も同じような時刻に起こった（午前 8~9 時に 10.5 mm）。土壌水分の変化量は SMC10、SMC30 の次に SMC50、その次に SMC100 が増加し、10 時以後は減少に転じた。CO<sub>2</sub> の変化量も浅いほうから深いほうへプラスになり、10 時以後はそれが減少に変わり、13 時ごろまでかけてゆっくりと元の状態に戻った。このように水とガスは同じ間隙を占有しているため、降雨の降下浸透によって水の占有率が高まると、シールドされて一時的にその直下のガスは高濃度になり、通過するとそれまでの状態に戻るという変化をしている。このシールド効果は林内・草地、乾期・雨期、降雨の時間帯を問わず見られた。

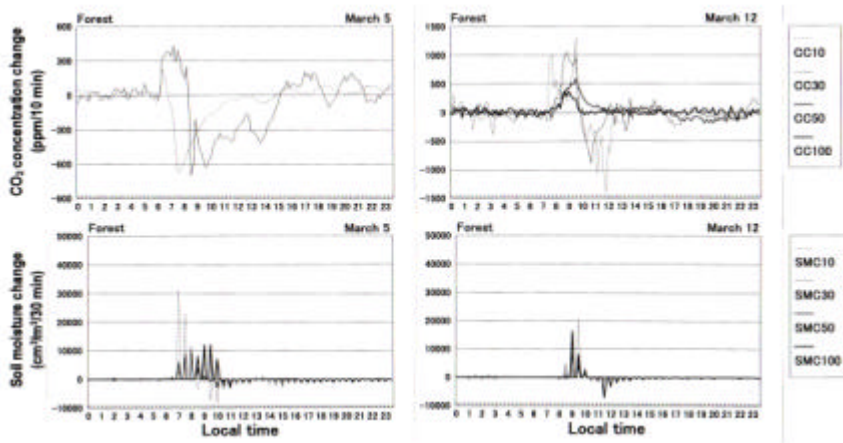


Figure 2. 10 minute difference of CO<sub>2</sub> (CC) and 30 minute difference of soil moisture (SMC) in the process of percolation.

図 3 は乾期の草地で一週間降雨のなかった 9 月 6~12 日の CO<sub>2</sub> 濃度の 10 分変化量、土壌水分の 30 分変化量、地温の 10 分変化量である。昼間は 10 cm と 30 cm の土壌水分の変化量がプラスで、夕方から夜間はマイナスになり、地温の変化量も同様の位相をもっている。日中の晴天で浅い部位の地温が上昇し、土壌水分が蒸発していた時間帯は CO<sub>2</sub> は相対的に下側に移動し、地温が下降を始めると蒸発が止まって、CO<sub>2</sub> が上側に移動すると考えられる。この現象は浅い部位の地温の変化がドライビングフォースで、地温の日振幅のない 50 cm や 1 m では土壌水分の上下移動は起こらなかった。結果として晴天日の夜間は浅い部位の CO<sub>2</sub> 濃度が高く、大気へ放出しやすい。ただし、降雨日には見られず、林内も乾期・雨期を通して見られなかった。日中の放射が地中熱流量として土壌中に入力され、夜間は上向き放射で冷却し、地温の日振幅が形成されてはじめて起こる現象である。乾期の林内と草地の決定的な違いはこの微気象パラメータの日振幅にある。林冠に覆われ、サンフ

レックの入射だけの林内は日振幅が形成されない。

本研究で計測した 7 週分の深さ 10 cm の CO<sub>2</sub> 濃度を林内・草地、乾期・雨期で比較すると、乾期の林内は  $9,631 \pm 1,386$  ppm、雨期は  $17,224 \pm 3,019$  ppm、乾期の草地は  $1,949 \pm 632$  ppm、雨期の草地は  $22,766 \pm 1,671$  ppm であった。それぞれわずか 1~2 週間の観測であるが、林内も草地も雨期に高く、両者の濃度差は小さいものの、草地の季節差は大きい。林内の乾期と雨期の差が 1.8 倍であるのに対して、草地は 11.7 倍になる。乾期の草地が低いのは大気中に放出したか、草本が枯死して呼吸が止まったか、もっと下方に移動したかである。雨期に度重なる降雨によって深い部位に高濃度の CO<sub>2</sub> ガスが蓄積するのは理解できる。実際、雨期の草地の 50 cm の濃度は 30,000 ppm 程度、1 m 部位はレンジオーバーであったことから 75,000 ppm 以上であったと推察される。林内も降雨のたびに深い部位の濃度が上昇するが、乾期の草地の 1 m は降雨があっても 20,000 ppm 程度で安定していた。

また、10 cm・30 cmと 50 cmの濃度が昼夜に逆位相を示したことから、下方への移動によって低濃度になったとは考えにくい。いずれにしても、乾期の草地の浅層土壌中の CO<sub>2</sub> ストックは林内の約 5 分の 1 で、これが大気への放出や草本の枯死によるものと考えれば森林伐採によって裸地面が露出することがもうひとつの温暖化要因になると危惧される。

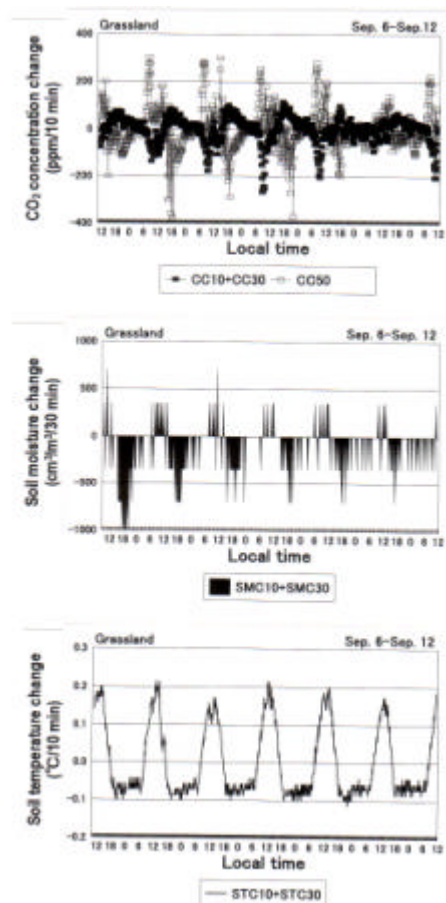


Figure 3 10 minute difference of CO<sub>2</sub>, 30 minute difference of soil moisture, and 10 minute difference of soil temperature during no rainfall week.

#### 今後の課題と発展

熱帯土壌が林冠に覆われている段階から裸地化すると、昼夜の微気象パラメーターの日振幅が拡大し、とくに乾期に昼間は蒸発が、夜間は CO<sub>2</sub> の放出が卓越するようになる。この結果は従来の生態学・土壌物理学では指摘されていないことで、今後の温暖化モデルに修正を迫ることになる可能性がある。その一方で、観測できない土壌パラメーターが多く、運動方程式や拡散フラックスまで算出できなかった。また、閉鎖チャンバー法による土壌呼吸の測定は降雨の影響を正確に把握できないことは示したが、そのために土壌呼吸そのものが測定できていない。大気側では拡散速度のばらつきがあり、CO<sub>2</sub> フラックスの測定には熱収支法以外の手法も考えなければならない。林内のフラックスも熱収支法の対象外になっている。こうした種々の問題点がある。今後、同じような観測の機会が得られれば、裸地表面のみを対象にして、熱帯土壌に特有の溶脱（白砂化）の進行と土壌 CO<sub>2</sub> について調べたい。

#### 発表論文リスト

- Tsuchiya, A., Tanaka, A., Higuchi, N. Responses of juvenile trees to treefall gaps and changes in microclimates in the Amazonian dense lowland rain forest. *Ecohabitat*, 11-1 (印刷中) .
- Tsuchiya, A., Tanaka, A., Higuchi, N. Growth of trees and microclimates in a gap dependent forest in central Amazonia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Botânica*, 20-2 (印刷中) .
- Tsuchiya, A., Tanaka, A., Higuchi, N. Site and seasonal differences of micro-meteorological parameters at primary forests and gaps in central Amazonia. *Acta Amazonia* (投稿中) .