

ライシメーターを用いた人工降雨の浸透・蒸発にともなう土壌 CO₂ 濃度の 変動に関する実験的研究

広島大学 総合科学部 土谷彰男

概要: 土壌からの CO₂ 放出の昼夜の変化、天気との関係を調べるため、マサ土と腐葉土をライシメーターに充填し、乾燥条件と灌水条件で土壌 CO₂ 濃度、土壌水分、地温の鉛直分布を観測した。深さ 100 cm、50 cm の CO₂ 濃度は大気側の飽差と逆位相の関係にあり、午後から夕方にかけての高温・低湿の時間帯に高濃度が、夜間から早朝にかけての低温・高湿の時間帯に低濃度が観測された。蒸発が促進されると水分が前面に出る代わりに CO₂ ガスが内側に押し留められ、蒸発能が低下するとガスが前面に出やすくなると推察された。灌水によって表層の土壌水分が上昇すると、深さ 10 cm の CO₂ 濃度は上昇し、水が通過すると、しばらくして濃度は低下した。灌水は浸透水が到達する前の 30 cm や 50 cm のガス濃度も上昇させた。土壌間隙中のガスの上方への移動が一時的にシールドされ、マスフローが遮断された結果であると考えられる。

キーワード: ライシメーター, 土壌 CO₂, 飽差, 灌水, 浸透

はじめに

地球温暖化は化石燃料の消費や人工廃熱の放出、森林伐採など大気側での現象が注目されているが、土壌の CO₂ 濃度は大気の数倍から数百倍のオーダーである。何らかの理由で高濃度の土壌 CO₂ が大気に放出されるようになれば温暖化のペースは一気に加速する。ひとつのきっかけは熱帯林の森林伐採で、それまで日中でも日射が到達せず、温湿度の日変化が小さく保たれていた森林が伐採によってオープンスペースになると、地表の環境条件の日振幅が拡大する。林冠がなくなると昼間の蒸発が加速する一方で降雨は直接地表に届くようになる。乾期・雨期のある地域では蒸発・浸透はより明らかである。こうして土壌中の腐食層の分解が終わるまで CO₂ が放出される。

森林内外の大気中の CO₂ フラックスは渦相関法で計測されている。アマゾンでは 1990～94 年の ABRACOS プロジェクト・1995 年の MACOE プロジェクト・1999～2003 年の LBA プロジェクト (Fisch et al., 1998; Nobre et al., 2001) で天然林・牧場の CO₂ フラックスが計測され (Culf et al., 1999; Grace et al., 1999; Malhi & Grace, 2000; Botta et al., 2002)、牧場や荒廃地の拡大やエルニーニョ由来の森林火災が温暖化に及ぼす影響もシミュレーションされている (Phillips et al., 1998;

Prentice & Lloyd, 1998; Costa & Foley, 2000; Houghton et al., 2000; Potter et al., 2001(a), (b))。これらは天然林では CO₂ フラックスは吸収(シンク)になっているが、森林消失がそのまま進むと地域全体では放出(ソース)に変化するということで共通している。

地表における土壌呼吸の測定は赤外線吸収式 CO₂ アナライザー (IRGA) が開発され、計測例は枚挙に暇がないが、チャンバーを地表にかぶせて計測する方法が主流であるため、降雨時の雨滴がチャンバー内に入らず、晴天日でも長期間の計測では外気との環境条件が変わってしまう。表面だけを対象とするため、地中の濃度変化と蒸発浸透との関係はわからない。鉛直濃度は土壌間隙のガスを吸引して IRGA を通す (Davidson & Trumbore, 1995) か、化学反応で調べる (Hashimoto et al., 2004) が、どちらも連続測定はできない。それでも地下 1 m 以下からの CO₂ 発生量が 20 ~ 30% で無視できないこと、土壌水分の高い雨期に CO₂ 濃度が高いことが示されている。このように CO₂ 濃度の連続測定が難しいため、炭素含有量 (Buschbacher et al., 1988; Cerri et al., 1991; Nepstad et al., 1994; Davidson et al., 1995; Moraes et al., 1995; McGroddy & Silver, 2000; Silver et al., 2000; Bernoux et al., 2001; Johnson et al., 2001; Keller et al., 2001; McGrath et al., 2001; Schroth et al., 2002; Smith et al., 2002) や同位体比 (Trumbore et al., 1995; Camargo et al., 1999) から攪乱による土壌炭素の変化が調べられてきた。伐採による土壌栄養塩類の流出や牧場を放棄した後の植生回復のモニタリングである。

一方、NDIR (非分散赤外光) 単光波二波長原理に基づく CO₂ センサーが開発され、土壌中に埋設して計測した事例が報告された (中本ほか, 2001)。透水性のよい砂丘地で降雨が浸透すると地下の CO₂ 濃度が一時的に高くなり、透過すると CO₂ 濃度が低下する現象で、この短時間の上昇・低下は従来の手動計測では検出できなかったものである。そこで本研究では野外計測を念頭に置きつつ、ライシメーターを用いてガスの発生源の深さと降水条件を人為的に変えて土壌 CO₂ 濃度を計測することにした。実際のアマゾンでは黄色ラトソルの上に腐食層が薄く堆積しているほか、根が縦横に広がっている。雨期乾期の違いや植生の破壊もあるため、実験室レベルで単純化することにした。

方法

借用したライシメーター (ウイジン社) は内径 60 cm、深さ 150 cm のサイズで、下側 40 cm は砂利が敷き詰められ、下中央に排水用のドレンがついている。上側 110 cm に二度洗いしたマサ土と植物性腐葉土を入れて試験用の土壌とした。マサ土は園芸業者から搬入したままの状態、乾燥させていない。腐葉土は袋詰にされている。実験は 5 月 28 日 ~ 6 月 3 日、6 月 6 ~ 12 日、6 月 15 ~ 21 日、6 月 25 日 ~ 7 月 1 日、7 月 4 ~ 10 日の 5 回で、開始・終了とも朝 9 時で統一した。CO₂ の発生源を変えるために、マサ土と混ぜる腐葉土の深さを変えた。すなわち、5 月 28 日 ~ 6 月 3 日では腐葉土を深さ 90 ~ 100 cm に重点的に入れ (20 kg 使用)、6 月 6 ~ 12 日は深さ 40 ~

60 cm に、6 月 15～21 日は深さ 0～20 cm に同量入れ、6 月 25 日～7 月 1 日は全深度に 90 kg 投入し、7 月 4～10 日は腐葉土を入れなかった。観測終了後は土壌を取り出し、次の条件の土壌を入れた。各観測とも前半の 3 日間は灌水せず、後半の 3 日間は時間雨量 20 mm のスコールを想定して、1 時間かけて 5.6 リットルの水を撒いた。灌水は朝 7:00～9:00 の間を目途に行なったが、正確な時間は日によって異なる。

埋設したセンサーは NDIR-CO₂ センサー (バイサラ社, GMT221)、誘電率土壌水分計 (デカゴン社, EC10)、白金抵抗温度センサー (日本計量工業社, Pt100 A2) で、いずれも深さ 10 cm、30 cm、50 cm、100 cm に埋設した。CO₂ センサーは水に濡れると破損するため、内径 16 mm の塩ビパイプに通し、90 度に曲がった継ぎ手エルボで水平にし、センサーの先端が土壌に直接触れないようにミカンネットをはさんだ。塩ビパイプは中空にした。センサーのレンジは 10 cm は 2%、その他は 5% を用いたが、高濃度になる 6 月 25 日～7 月 1 日は全深度とも 5% にした。CO₂ 変換機の電源には 60 アンペアの自動車用バッテリーを直列配線して 24 ボルトを供給した。センサー 1 個につき 1 つの変換機を用いるため、バッテリーは 8 台使用し、観測終了後、充電した。CO₂ データは電圧 (フルスケール: 10 ボルト) でデータロガーに蓄積し (T&D, VR71)、濃度 (ppm) に換算した。土壌水分計は誘電率をログ (デカゴン, Em5) に蓄積する。別途、誘電率 (x) と体積含水率 (y) の関係性を求め、 $y=0.001x-0.336$ の経験式から含水率 (m³/m³) に換算した。白金抵抗温度センサーで計測した地温 () もログ (T&D, TR81) に蓄積した。このほか、ライシメーターのある実験室の温湿度を計測 (日置電機, No3641) し、気温からゴフグラッチェの式で飽和水蒸気圧 (mb) を求め、相対湿度と組み合わせて水蒸気圧 (mb) を推定し、両者の差から飽差 (mb) を求めた。これらすべてのサンプリングインターバルは 10 分とした。

結果

5 月 28 日～6 月 3 日の事例 (腐葉土: 最下部) では CO₂ 濃度は深い部位で高く、表層で低い値を示した (図 1)。100 cm の平均濃度 (C100) は 17,000 ppm 以上、10 cm (C10) は 6,500 ppm 程度であった。乾燥条件時の前半 3 日間は灌水した後半に比べて明らかに低く、最高でも 20,000 ppm 程度 (C100) であった。灌水後、C100 は 30,000 ppm 以上に上昇したが、浅い部位の上昇は小さかった。一日の変化では夜間から早朝にかけて濃度が上昇し、午後から夕方にかけて低下した。この日変化も深い部位でははっきりしていたが、浅い部位では不明瞭であった。また、5 月 31 日から 6 月 1 日にかけては日変化がなく、全深度とも のっぺりしたパターンであった。地温 (ST) は前半は 24 から 26 までゆるやかに上昇したが、灌水後は ST10 を除いて 24 内外に低下した (図 2)。日変化は浅い部位で明確で、ST10 は灌水前も灌水後も深夜から未明にかけて最大値、正午前後に最小値を出し、ST30 の最大最小値は数時間遅れて出現した。深い部位の日変化は不明瞭で、ST100 の標準偏差は 0.5 であった。大気側の気温は欠測であった。土壌水分 (SM)

は CO₂ 濃度と同様で、深い部位で高かった(図 3)。5 月 31 日朝、第一回目の灌水を行なうと、SM10 はそれまでの 0.03 m³/m³ から一時的に 0.07 m³/m³ に上昇し、その後ゆっくりと低下しながら 0.04 m³/m³ 台に落ち着いた。6 月 1 日朝、2 日朝の灌水でも同じような変化を示した。10 cm 部位を通過すると、30 cm 部位、50 cm 部位の値が上昇した。5 月 31 日はその時差が長かったが、翌日、翌々日は 1~2 時間と短くなり、SM100 の上昇・下降も見られた。排水量は 6 月 1 日にはわずか 50 cc であったが、2 日は 1,100 cc、3 日は 3,200 cc と増えた。

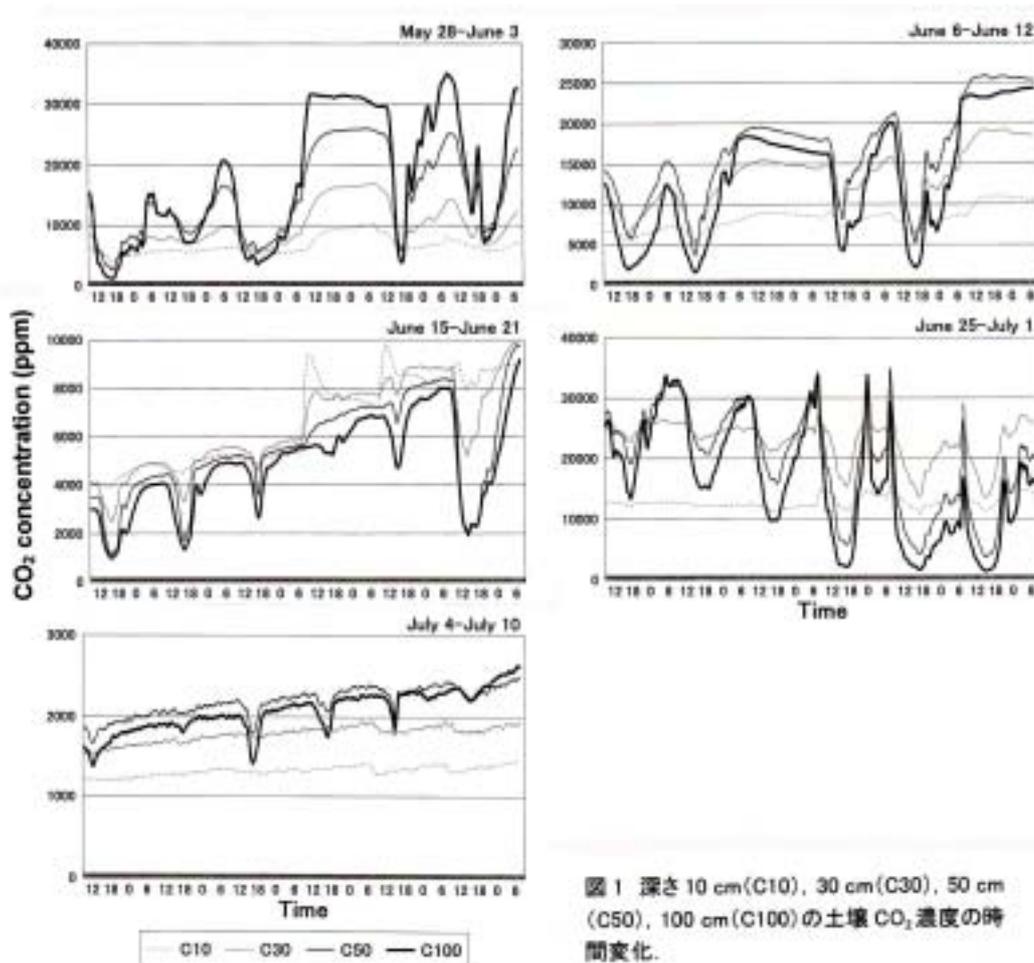


図 1 深さ 10 cm(C10)、30 cm(C30)、50 cm(C50)、100 cm(C100)の土壌 CO₂ 濃度の時間変化。

6 月 6~12 日は腐葉土をライシメーター中部に入れた場合で、C50 が最大(平均: 16,500 ppm)、次いで C100 と C30(13,000 ppm)、C10(8,100ppm)の濃度勾配であった。灌水後は腐葉土のある近辺で高くなった。濃度は 6 月 8~9 日と 11~12 日を除いて、夜間に高く、午後に低くなった。その日振幅は深い部位で大きく、10,000 ppm を越えた。地温は ST50 と ST30 が 25 台、ST10 が 24 台、ST100 が 23 台、標準偏差は浅い部位で高く(ST10:0.8)、ST50 と ST100 は 0.4 で

あった。日変化に時差があり、深くなるほど不明瞭であるのは5月28日～6月3日と同様であった。灌水によって全体的に低下する現象は認められなかった。気温(Th)は雨天の6月8日と11日を除いて、午後から夕方に最大値を出し、室内のため夜間の低下は弱かった。平均値(25.7)ではSTをやや上回ったが、標準偏差(2.1)はSTよりはるかに大きかった。灌水前の土壌水分は最低で0.04 m³/m³(SM100)、最高で0.08 m³/m³(SM50)と深さによって数%の差があったが、それぞれの日変化はなかった。6月9日の灌水によってSM10が0.10 m³/m³を越し、すぐにSM30も続いた。SM50は10日未明に上昇を始め、10日の灌水で一気に0.20 m³/m³を突破した。SM100が動いたのは10日午後からで、11日の灌水では他の深度の上昇に続いてピークを出した。そのため排水量は11日になって初めて観測され(80 cc)、終了日の12日に2,520 ccが排出された。

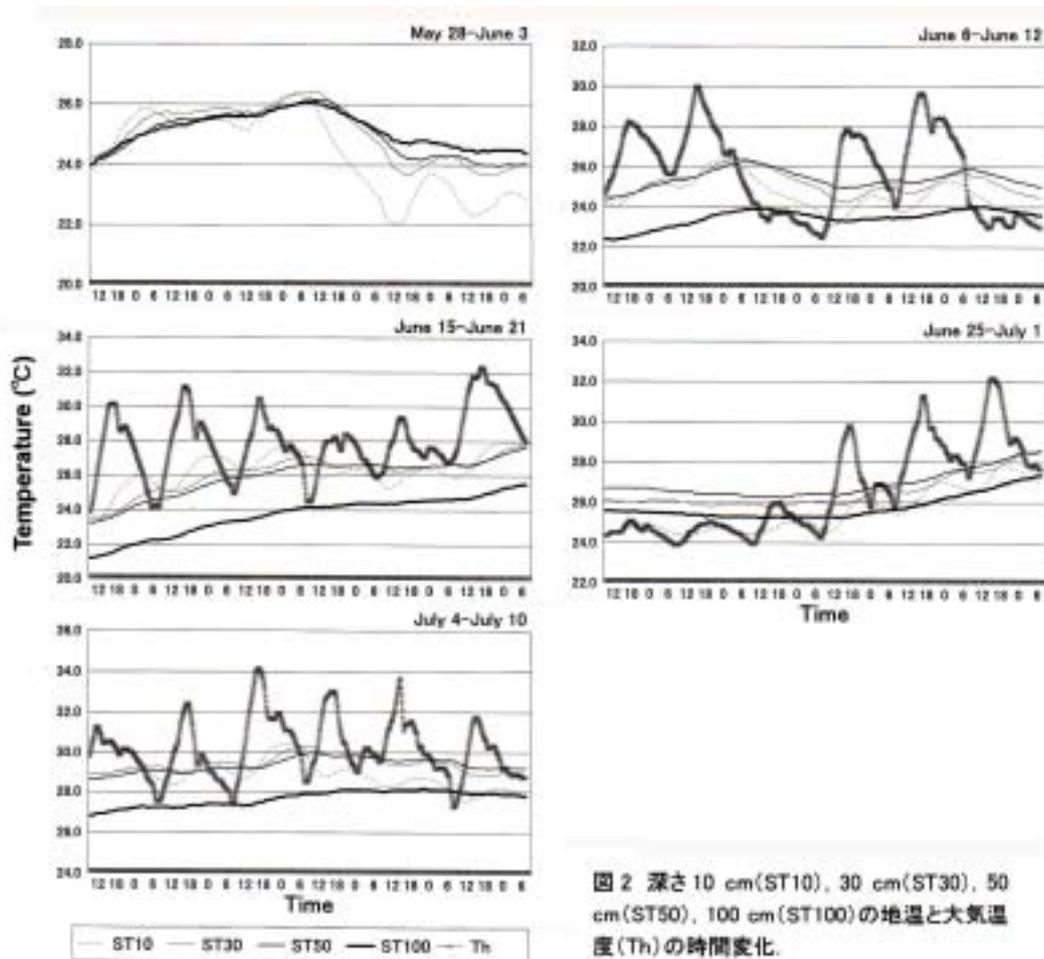


図2 深さ10 cm(ST10)、30 cm(ST30)、50 cm(ST50)、100 cm(ST100)の地温と大気温度(Th)の時間変化。

6月15～21日は腐葉土をライシメーター上部に入れた事例で、濃度勾配はC10 > C30 > C50

> C100であったが、最も高いC10でも期間平均で6,600 ppmと低かった。前述のような昼夜の濃度振幅はあるが、日を迫うごとに上昇傾向であった。灌水時にはC10は数1,000 ppm、C30は数100 ppm上昇したが、数時間で低下した。C50・C100は反応しなかった。地温も全体的に上昇傾向で、どの深さも一週間で4~5℃上昇した。灌水による低下は確認されなかった。温度勾配はCO₂の濃度勾配と同じで、ST10 > ST30 > ST50 > ST100であった。ST10とST30には日変化が見られたが、それより深い部位には確認されなかった。気温は前半の晴天日は昼夜の上昇と低下が明確で、早朝の最低気温は表層の地温より低下したが、18日・19日は曇天のため日振幅が縮小した。土壌水分は前半の乾燥条件のときはSM10(0.13~0.11 m³/m³) > SM30 = SM50 = SM100(0.05 m³/m³)で、SM10だけやや低下した。18日の灌水で一気に0.30 m³/m³近くまで上昇し、翌日の灌水までの間に0.20 m³/m³まで下がったが、灌水で再び上昇した。水の移動とともにSM30が反応し、19日にはSM50が、20日にはSM100も上昇した。排水は20日に100 cc、終了時の21日に2,750 ccあった。

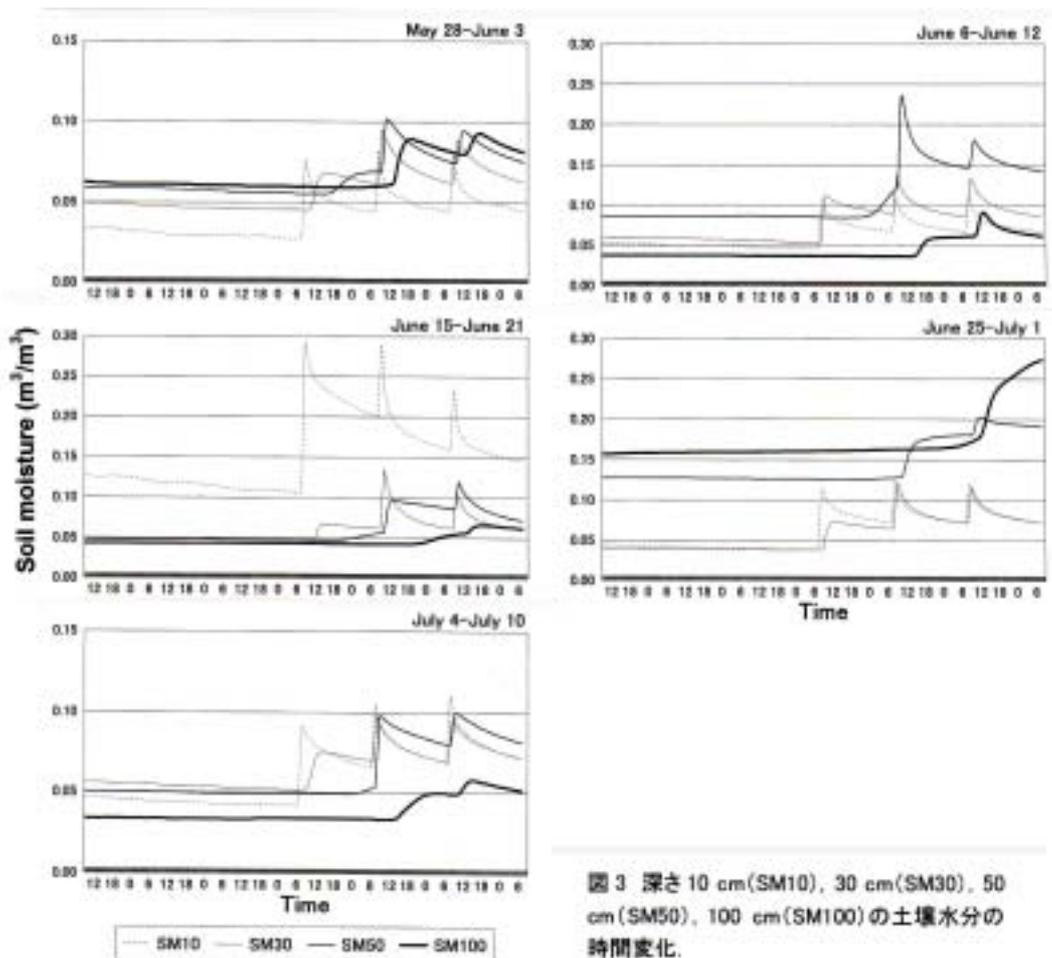


図3 深さ10 cm(SM10)、30 cm(SM30)、50 cm(SM50)、100 cm(SM100)の土壌水分の時間変化。

6月25日～7月1日は腐葉土をライシメーター全体に混ぜた事例で、CO₂濃度は全体的に高く、期間平均はC10で12,000 ppm以上、C30・C50では20,000 ppm程度であった。ただ、C50とC100は午後の低下と夜間の上昇が明瞭で、とくに灌水を行なった後半の日振幅が顕著であったのに対し、C10は灌水時の上昇が見られたものの、標準偏差は900 ppm台と日振幅は小さかった。地温は前半の雨天日は25～27℃で安定し、後半の晴天日に上昇した。灌水による低下は見られなかった。日振幅はST10に見られたが、ST30は不明瞭で、それより深い部位には見られなかった。気温も地温と同様で、前半の雨天日はTh < STであったが、好天の後半に振幅が拡大した。灌水前の土壌水分はSM10・SM30(0.04 m³/m³)とSM50(0.13 m³/m³)、SM100(0.16 m³/m³)で差があったが、日変化のない状態で推移した。灌水初日(6月28日)はSM10の一時的な上昇の後、数時間してSM30がゆっくりと上昇し、灌水2日目には両者はほとんど同時に上昇し、さらにSM50の上昇が午後になって起こり、灌水3日目にはSM100も急上昇を行なったのは他の事例と同じであった。SM100は終了時には0.27 m³/m³まで達した。排水は多量の腐葉土が吸収したため、終了時の7月1日にわずかに200 cc見られただけであった。

7月4～10日は腐葉土をまったく入れなかった事例で、CO₂濃度は腐葉土を90 kg投入した前回の値の10分の1程度であった。図ではゆっくりと右上がりの傾向にあるが、4深度とも1,000～2,000 ppm台の値である。C50とC100には午後から夕方に低下する現象が見られたが、夜間から早朝の上昇は明確ではなかった。灌水による浅い部位の上昇も不明瞭であった。地温は27～30℃台で、灌水直前の7月7日早朝にはST10とST30は30℃を越えていた。灌水によってST10は低下したが、逆にST100はわずかながら上昇し、28℃付近で推移した。気温は27～34℃で日変化を繰り返した。他の事例と同じで、午前から夜間にかけてのTh > STの温度差が数時間の時差の後にST10やST30を上昇させ、未明から早朝のTh < STが時差をともなってST10やST30を低下させていた。土壌水分は灌水前は0.03～0.06 m³/m³で各深度とも安定していたが、灌水後は浅い部位から反応し、7日の灌水初日はSM10とSM30が、2日目はSM50も反応し、3日目はSM100まで灌水とほぼ同時に上昇した。灌水後の土壌水分自体はSM10で0.10 m³/m³程度、SM100で0.06 m³/m³程度と他の事例に比べて低かった。排水量は9日で40 cc、終了時の10日は3,040 ccであった。

考察

5回の試験を通して、腐葉土の位置や灌水の有無に関わらずCO₂濃度に日振幅が確認された。深さ別では浅い部位はやや不鮮明であったが、C50やC100は例外を除いてはっきりしていた。図4は飽差(SD)の時間変化である。ある気温のもとで大気が保持し得る水蒸気分圧の最大値(飽和水蒸気圧)とそのときの実際の水蒸気分圧との差で、水が蒸発する能力を示す。5月28日～6月3日は温湿度データがなく、欠測である。午後から夕方にかけて気温の上昇と湿度の低下

で SD は上昇し、夜間から早朝にかけては気温の低下と湿度の上昇で SD は低下している。図 1 と比べると、SD が上昇する時間帯に CO₂ 濃度が低下し、SD が低下する時間帯に CO₂ 濃度は上昇しているという逆位相関係にある。これは蒸発の盛んな時間帯は地下の土壌の水分が前面に出て、CO₂ ガスは相対的にその奥に押し留められ、蒸発が少なくなる時間帯になると逆に CO₂ ガスの放出が前面に出ると考えられる。SD は天気によって変化する。雨天日は室内であっても気温の上昇は鈍く、相対湿度も高い。そのため午後から夕方にかけての SD 値は大きくならない。蒸発能力が低いと地下土壌では CO₂ ガスの放出が継続され、高濃度の CO₂ が観測される。6 月 8~9 日、11~12 日、18~19 日、25~27 日、7 月 5 日、9 日がそれに該当する。SD と CO₂ の逆位相関係は一週間の観測期間を通したトレンドにも見られ、図 1 が右上がりの場合、図 4 は右下がりの傾向を示した。ただし、浅い部位における両者の関係は不明瞭であった。浅い場所の地温は Th の影響を受けて変動しているため Th-ST の変化は小さい。深い部位の ST は昼夜の変化がほとんどなく、午後から夕方の温度差がはっきりと現れる。また、灌水前であっても土壌は湿っている。そのため深い部位は SD の影響を受けやすいと考えられる。SD と CO₂ の相関係数は 6 月 6~12 日の場合、100 cm で -0.83、50 cm で -0.81、30 cm で -0.79、10 cm で -0.72、6 月 15~21 日はそれぞれ -0.81、-0.75、-0.68、-0.55、6 月 25~7 月 1 日は 100 cm と 50 cm がともに -0.81、30 cm が -0.69、10 cm は有意な値に達しなかった。7 月 4~10 日は発生源である腐葉土を入れていないため、100 cm で -0.34、50 cm で -0.30 であったが、30 cm と 10 cm は有意に達しなかった。

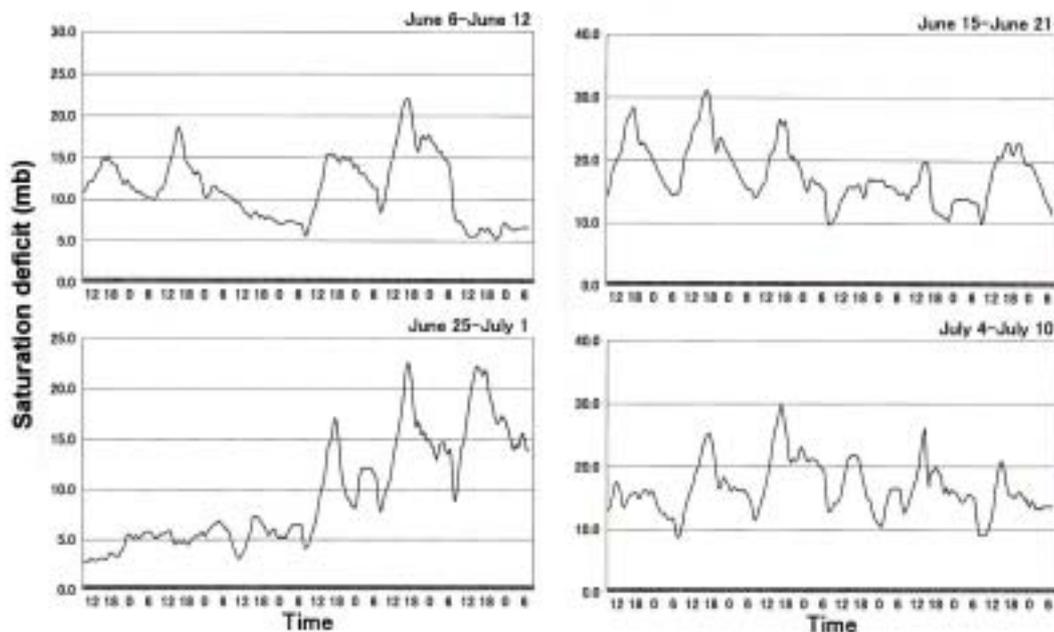


図 4 飽差の時間変化

浅い部位では灌水時に一時的にCO₂濃度が上昇した。6月18日と19日の灌水前後の濃度変化を土壤水分の変化とともに図5に示す。18日は6月15~21日の観測期間の灌水初日で、灌水は7:00~8:00にかけて行なった。7:30くらいからSM10は0.11 m³/m³から上昇を始め、8:50に0.29 m³/m³でピークに達し、その後は0.25 m³/m³まで逡減した。ピークまでの含水率の変化は18%であった。その他の深度の土壤水分に変化はなかった。一方、C10は灌水開始と同時に上昇を始め、7:30頃にはC30とC50もゆっくりと上昇を始めた。C10のピークはSM10のピークより1時間ほど遅い10:00に現れ、その後漸減したが、C30とC50は上昇を続けた。注目したいのは水が深さ10 cmに到達する前にCO₂濃度の上昇が開始している点である。土壤中では水とガスが土壤粒子の間隙を埋めていて、定常状態であればガスは高濃度場から低濃度場へゆっくりと拡散している(中野, 1991)。この事例では腐葉土の位置はライシメーター中部で、灌水前のC30やC50が高いことと一致し、したがってガスは表層に移動していたと考えられる。しかし、灌水によって地表面の土壤間隙がシールドされ、ガスの上方への拡散ができなくなると、10 cm部位に水が到達する前からC10が上昇を始めた。中本ほか(2001)はこれをマスフローの遮断と説明している。C10に続いてC30やC50も7:30頃から上昇を始めたのは、上方への移動が遮断され、行き場を失ったためである。SM10が8:50にピークに達した後、浸潤前線は深さ10 cmから30 cmの間に移動している。時差はあるが、10:00頃にC10はピーク(9,500 ppm)に達し、その後、減少に転じたのは間隙中の水のシェアが減少して、気相のシェアが回復したことを意味する。C10が減少に転じた後もC30とC50が上昇を続けたのは10 cmと30 cmの間にある浸潤前線が両者を分断したためである。結局12:00までの間にSM30が上昇することはなかった。図右側の灌水2日目の19日は8:15~9:15の1時間に灌水した。前日の灌水で既に土壤水分が20%に達していたため、SM10の上昇はすぐに始まった。ピークは9:40(29%)で、その後低下した。SM30・SM50とも前日の灌水で1~2%上昇しており、19日の灌水による上昇は早かった。SM30は9:20から上昇、10:30にピークを迎え、その後低下に転じた。SM50は10:30から上昇を始めた。これによって浸潤前線は50 cmまで到達したが、SM100は変わらなかった。灌水前のCO₂濃度は前日の灌水前より1,500~2,000 ppm程度増加していたが、灌水開始とともにC10は上昇し、9:00過ぎにはC30が少し上昇、11:00前になってわずかながらC50も上昇した。C10のピークは11:00過ぎに現れ、その後浸潤前線の通過とともに低下に転じたが、C30とC50はゆるやかに上昇を続けたように見える。一方、C100は逆に減少した。これは前述の飽差の影響かもしれない。このように浸潤前線がマスフローを遮断し、その下のCO₂濃度を一時的に押し上げ、水の通過とともに低下する現象は他の事例でも浅い部位に見られた。灌水実験は時間雨量20 mmの雨が1時間降ったことを想定して行なったが、実際には雨量強度・時間、降雨前の土壤水分によって異なる。腐葉土の位置によっても濃度勾配が異なるため、変数を一つにして他のファクターを固定し、繰り返し実験を続ける必要がある。

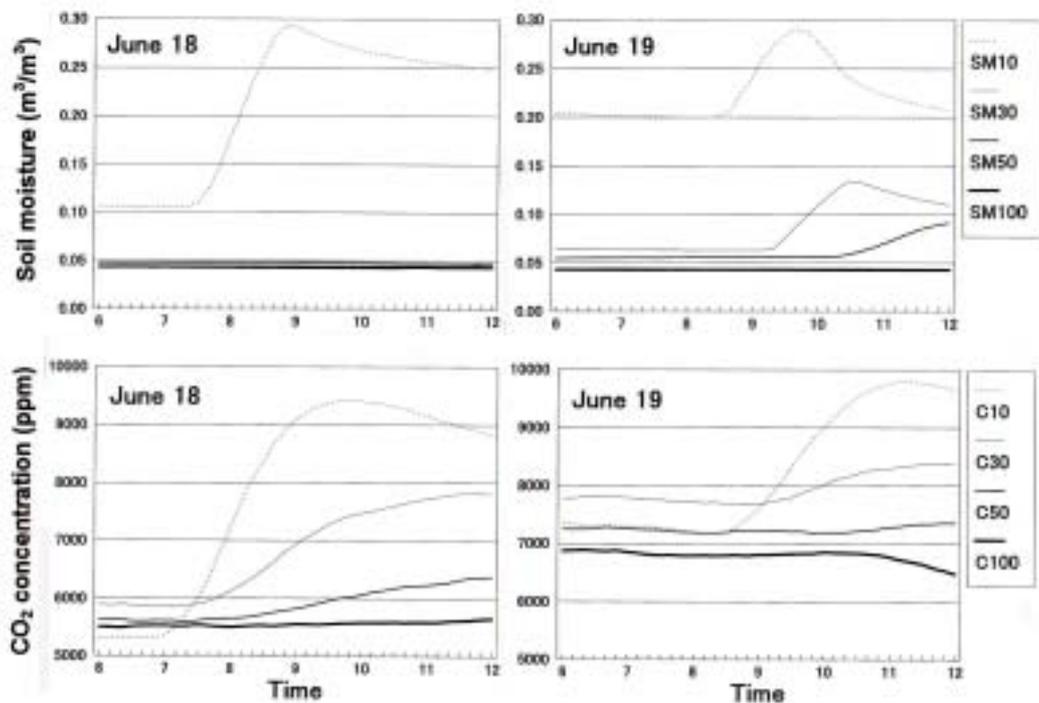


図5 灌水時(6月18日・19日)の土壌水分(上)と土壌CO₂濃度(下)の時間変化。

これまで蒸発によるゼロフラックス面や浸透による間隙空気の物理性は調べられ、水・空気・溶質・熱の同時移動現象を表す運動方程式は確立されている(茅根, 1980; 渡部, 1987; 中野, 1991)。本研究ではそれらの必要なマトリックポテンシャル、不飽和透水係数、気相率、熱伝導率、溶解量・放出量、比熱、浸漬熱などのパラメーターが計測できていないため、フラックスまで求められないが、CO₂濃度に関しては連続データが収集され、時間スケールの短い現象が捉えられた。その一つが蒸発が盛んに行なわれる時間帯はCO₂濃度が低下し、蒸発が少なくなる時間帯にCO₂濃度が高まる現象である。実験ではCO₂センサーを通した塩ビパイプの中が空洞になっている。本来、地下の土壌と大気が直接つながっていることはないため、大気側の飽差に連動することはないが、午後から夕方濃度低下は起こらないであろう。しかしながら、2003年8~9月(乾期)と2004年3月(雨期)にかけて、塩ビパイプを密閉して計測したアマゾン中部での事例で、蒸発とCO₂濃度の逆位相関係が確認されている(土谷, 印刷中)。すなわち、乾期のオープンスペース(草地)で土壌水分・地温・CO₂濃度を計測し、それぞれの単位時間あたりの変化量で比較すると、日中地温が上昇して土壌水分が地表に上がってくるときに地表付近のCO₂濃度が低下し、夕方から夜間にかけて放射冷却で地温が低下し、土壌水分の変化量がマイナスになるときにCO₂濃度が上昇する。この現象は直射日光の当たる草地の乾期に確認されたが、雨天の多い雨期や

直達日射の届かない森林土壌では見られなかったことから、本実験の飽差と CO₂ 濃度の逆位相関係と同じメカニズムと考えられる。ただし、これは地下 10 cm、30 cm の現象で、深い部位では見られなかったことが異なっている。しかし、地表近傍であっても 1 m の深さであっても、地表を覆う林冠がなくなり、気象要素の日振幅が増幅する環境になれば、地中からの CO₂ ガスの放出が増加することになる。実際、草地の地下 10 cm の CO₂ 濃度は雨期は乾期の 11.7 倍であったのに対し、林内では雨期は乾期の 1.8 倍と草地の季節差が大きく、乾期の草地の濃度は林内の 5 分の 1 であったこと、雨期の地下 1 m の濃度はどちらも数万 ppm で大差がなかったことから、オープンスペースでは乾期に浅層土壌の CO₂ ストックが極端に減少すると考えられる。本実験では水が浸透するときに CO₂ 濃度の上昇と低下が続いて起こることも追認された。既に中本ほか(2001)で指摘され、アマゾンでも土壌水分と CO₂ 濃度の時間変化量から確認されているが、従来の手動計測では浸潤前線の検出は難しい。降雨の浸透によってガス拡散が一時的にシールドされるという視点から見ると、降雨時に土壌呼吸速度が増大するという報告(Davidson et al., 2000)は理解できる。しかし、これは雨滴の入らない閉鎖チャンバー内では土壌呼吸が増加するということであり、通常の地表面は降雨の浸透で土壌呼吸は抑制されている。アマゾンでも降雨時には地表面直上の CO₂ 濃度が一時的に低下する現象が確認されている。シールドされて出口を失った地中の CO₂ ガスがシールドされていないチャンバー内に回り込んできていることも考えられる。

本実験では CO₂ 変換機の電力消費から一週間ごとにバッテリーを充電して用いたため、灌水後の乾燥過程の観測に十分な時間がとれなかった。AC 電源でも 24 ボルトに変換すれば計測可能なため、長期に計測したい。借用したライシメーターには人工降雨装置が着いているが、故障で運転できなかった。降雨強度や継続時間を変えて実行したい。野外での観測は高温・高湿、雨、動物、落雷などさまざまなトラブルが発生し、機材に支障が出る。今回の経験を野外観測に生かしたい。最後に、本実験の契機を与えてくださったエスベック地球環境研究・技術基金に感謝申し上げます。マサ土の搬入・搬出は広島大学生物圏科学研究科の周承進博士に尽力いただいた。アマゾンでの観測は国立アマゾン研究所の田中晃氏とともに行った。記して感謝申し上げます。

参考文献

- Bernoux, M.; Carvalho, M.C.S.; Volkoff, B.; Cerri, C.C. 2001. CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. *Global Change Biology* 7: 779-787.
- Botta, A.; Ramankutty, N.; Foley, J.A. 2002. Long-term variations of climate and carbon fluxes over the Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 29: 1319.
- Buschbacher, R.; Uhl, C.; Serrao, E.A.S. 1988. Abandoned pastures in eastern Amazonia. II nutrient stocks in the soil and vegetation. *Journal of Ecology* 76: 682-699.
- Camargo, P.B.; Trumbore, S.E.; Martinelli, L.A.; Davidson, E.A.; Nepstad, D.C.; Victoria, R.L. 1999.

- Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. *Global Change Biology*, 5: 693-702.
- Cerri, C.C.; Volkoff, B.; Andreux, F. 1991. Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. *Forest Ecology and Management* 38: 247-257.
- Costa, M.H.; Foley, J.A. 2000. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13: 18-34.
- Culf, A.D.; Fisch, G.; Malhi, Y.; Costa, R.C.; Nobre, C.A.; Marques, A.D.; Gash, J.H.C.; Grace, J. 1999. Carbon dioxide measurements in the nocturnal boundary layer over Amazonian forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3: 39-53.
- Davidson, E.A.; Nepstad, D.C.; Klink, C.A.; Trumbore, S.E. 1995. Pasture soils as carbon sink. *Nature* 376: 472-473.
- Davidson, E.A.; Trumbore, S.N. 1995. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. *Tellus* 47B: 550-565.
- Davidson, E.A.; Verchot, L.V.; Cattanio, J.H.; Ackerman, I.L.; Carvalho, J.M. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48: 53-69.
- Fisch, G.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. 1998. Uma revisao geral sobre o clima da Amazonia. *Acta Amazonica* 28: 101-126.
- Grace, J.; Lloyd, J.; McIntyre, J.; Miranda, A.; Meir, P.; Miranda, H.; Moncrieff, J.; Massheder, J.; Wright, I.; Gash, J. 1999. Fluxes of carbon dioxide and water vapor over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. *Global Change Biology*, 1: 1-12.
- Hashimoto, S.; Tanaka, N.; Suzuki, M.; Inoue, A.; Takizawa, H.; Kosaka, I.; Tanaka, K.; Tantasirin, C.; Tangtham, N. 2004. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, Thailand. *Journal of Forest Research* 9: 75-79.
- Houghton, R.A.; Skole, D.L.; Nobre, C.A.; Hackler, J.L.; Lawrence, K.T.; Chomentowski, W.H. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 403: 301-304.
- Johnson, C.M.; Vieira, I.C.G.; Zarin, D.J.; Frizano, J.; Johnson, A.H. 2001. Carbon and nutrient storage in primary and secondary forests in eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 147: 245-252.
- 茅根勇. 1980. 土壤水. 水文学, 自然地理学講座 3, p.135-179. 大明堂, 東京.
- Keller, M.; Rocha, H.; Trumbore, S.; Kruijt, B. 2001. Investigating the carbon cycle of the Amazon

- forests. *Global Change Newsletter*, 45: 15-19.
- 北宅善昭, 矢吹万寿. 1987. 土壌中のガス環境の測定. 渡部編農業環境実験法, p.214-225. サイエンスハウス, 東京.
- Malhi, Y.; Grace, J. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 15: 332-337.
- McGrath, D.A.; Smith, C.K.; Gholz, H.L.; Oliveira, F.A. 2001. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia. *Ecosystems* 4: 625-645.
- McGroddy, M.; Silver, W.L. 2000. Variations in belowground carbon storage and soil CO₂ flux rates along a wet tropical climate gradient. *Biotropica* 32: 614-624.
- Moraes, J.F.L.; Cerri, C.C.; Bernoux, M. 1995. Carbon stocks of the Brazilian Amazon Basin. *Soil Science Society of America Journal* 59: 244-247.
- 中本恭子, 神近牧男, 早川誠而. 2001. 砂丘地裸地圃場における土壌中 CO₂ 濃度のプロファイル. *中国・四国の農業気象* 14: 68-69.
- 中野政詩. 1991. 土の物質移動学. 189pp. 東京大学出版会, 東京.
- Nepstad, D.C.; Carvalho, C.R.; Davidson, E.A.; Jipp, P.H.; Lefebvre, P.A.; Negreiros, G.H.; Silva, E.D.; Stone, T.A.; Trumbore, S.E.; Vieira, S. 1994. The deep-soil link between water and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372: 666-669.
- Nobre, C.A.; Wickland, D.; Kabat, P.I. 2001. The large scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *Global Change Newsletter* 45: 2-4.
- Phillips, O.L.; Malhi, Y.; Higuchi, N.; Laurance, W.F.; Nunez, P.V.; Vasquez, R.M.; Laurance, S.G.; Ferreira, L.V.; Stern, M.; Brown, S.; Grace, J. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science* 282: 439-442.
- Potter, C.; Davidson, E.A.; Nepstad, D.; Carvalho, C.R. 2001(a). Ecosystem modeling and dynamic effects of deforestation on trace gas fluxes in Amazon tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 152: 97-117.
- Potter, C.; Genovesi, V.B.; Klooster, S.; Bobo, M.; Torregrosa, A. 2001(b). Biomass burning losses of carbon estimated from ecosystem modeling and satellite data analysis for the Brazilian Amazon region. *Atmospheric Environment*, 35: 1773-1781.
- Prentice, I.C.; Lloyd, J. 1998. C-quest in the Amazon basin. *Nature* 396: 619-620.
- Schroth, G.; D'Angelo, S.A.; Teixeira, W.G.; Haag, D.; Lieberei, R. 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163: 131-150.
- Silver, W.L.; Neff, J.; McGroddy, M.; Veldkamp, E.; Keller, M.; Cosme, R. 2000. Effects of soil

texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, 3: 193-209.

Smith, C.K.; Oliveira, F.D.; Gholz, H.L.; Baima, A. 2002. Soil carbon stocks after forest conversion to tree plantations in lowland Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 164: 257-263.

Trumbore, S.E.; Davidson, E.A.; Camargo, P.B.; Nepstad, D.C.; Martinelli, L.A. 1995. Below ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biochemical Cycles* 9: 515-528.

土谷彰男. 印刷中. アマゾン熱帯林の林床と開墾畑からの CO₂ 放出速度の比較研究. 第 29 回 日産科学振興財団研究成果報告書.