

論文の内容の要旨

生物・環境工学 専攻

平成21年度博士課程 進学

氏 名 加藤 千尋

指導教員名 宮崎 毅

論文題目 気候変動がベイドスゾーンの水・熱・CO₂動態に及ぼす影響に関する研究

1. はじめに

気候変動は自然生態系や農林水産業に深刻な影響を与えると予測されており¹⁾、近年、土壌が自然生態系や農業の基盤であることを念頭に、土壌に関わる気候変動研究が進められている。土壌水分量や地温など土壌物理環境については、水文学や気象学などで、面積で数百 km² 以上のスケールで気候変動に対する応答が検討されてきた。気候変動が農業や自然生態系に及ぼす影響を予測し適応策を立てるためには、このような大スケールの現象のみでなく、圃場スケールで、土壌・大気境界に位置するベイドスゾーン、すなわち地表面から地下水までの水分不飽和土壌領域における水・熱動態を検討する必要がある。

有機物分解速度や物質の移動係数など、土壌内の物質循環に関わる要素は、動的に変化する土壌水分量や地温の影響を受ける。したがって、連鎖的に生じる気候変動の影響を予測しその対策をたてるためには、実験や観測による現象把握だけでなく、地上部の気候変動と土壌内に生じる諸現象を関連付ける物理モデルによる検討が必要である。

本研究では、気候変動がベイドスゾーン的水分・熱動態に及ぼす影響、ベイドスゾーン的水分・熱環境の変化が、土壌中のCO₂動態に及ぼす影響を予測することを目的とした。

2. フィールドモニタリングによるデータ収集およびモデルの検証 (第3~5章)

将来のペイドスゾーンの水・熱・CO₂動態予測に際し、現状では気象現象とペイドスゾーンの水・熱・物質移動現象を関連付ける物理モデルは確立されていない。土壌中の水・熱・物質移動予測計算の汎用プログラム HYDRUS-1D²⁾は、気象サブモデルを含み、気象データを用いて熱収支式に基づき地表面境界条件を生成する。温暖湿潤でバイオマス生産力の高い、環太平洋地域の畑地に広く分布する火山灰土壌は団粒構造を有し、特異的な土壌水分・熱特性を持つ。そこで第3~5章では、温暖湿潤な地域の火山灰農地土壌中の水・熱・CO₂動態予測における HYDRUS-1D モデルの検証を行い、将来予測シミュレーションのためのパラメータとモデルの準備を行った。

本研究では、西東京市の本学農学生命科学研究科附属生態調和農学機構(以下、「田無農場」)内の圃場を対象地とした。現場では 10m 四方の裸地を整備し、地表面熱フラックス、深さ 3,5,7,10,20,30,50,80cm の体積含水率()と地温(T)、深さ 10,20,50cm の土壌中 CO₂濃度(C_{CO2})の連続測定を行った。また、地表面境界条件の算出には、田無農場で蓄積している気象データ及び東京府中または大手町のアメダスデータを用いた。

HYDRUS-1D は、土壌中の水分移動は液状水と水蒸気フラックスを考慮したリチャーズ式、熱移動は、顕熱の伝導及び液状水と水蒸気の顕熱、水蒸気の潜熱輸送を考慮した移流分散型の熱輸送式、CO₂移動は移流拡散型のガス輸送式に基づく。また、土壌中 CO₂移動予測では、土壌水分や地温などからある深さと時間における CO₂生成速度を算出する CO₂生成サブモデルを含む。

本研究では、各土壌の水分・熱移動特性関数を独立した要素試験を行うことで決定した。水分移動特性関数は、蒸発実験データを Durner-Mualem モデル³⁾で逆解析して決定した。熱移動特性関数のうち熱伝導率は、熱伝導プローブを用いて熱伝導率を実測し、Chung and Horton⁴⁾のモデルでフィッティングした。体積熱容量は、試料の三相や有機物含量の割合から決定した。CO₂生成・移動パラメータは文献値⁵⁾を用いた。

モデルの検証のため、現場でモニタリングした、T、C_{CO2}を、数値計算により再現を試みた。熱移動境界条件となる地表面熱フラックスの計算値は、実測値をよく再現した(図1)。また、モデルは現場土壌中の、T、C_{CO2}の変動を良く再現した(図2~図4)。ただし、モデルは冬季の地温を過小評価する傾向にあった。これはモデルが、冬季の地表面近傍における凍結現象を考慮していないためと考えられる。

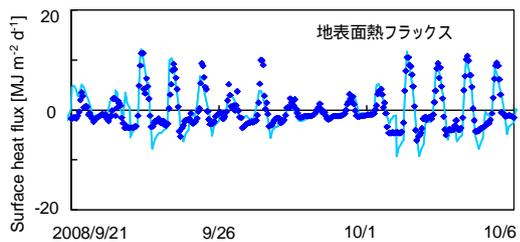


図1 地表面熱フラックスの実測値と計算値の比較

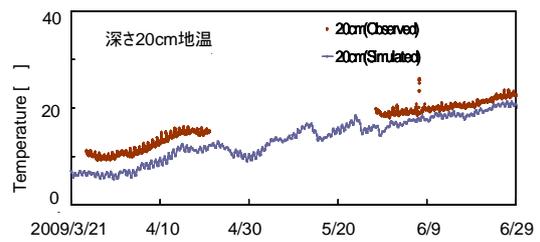


図2 深さ20cmの地温の実測値と計算値の比較

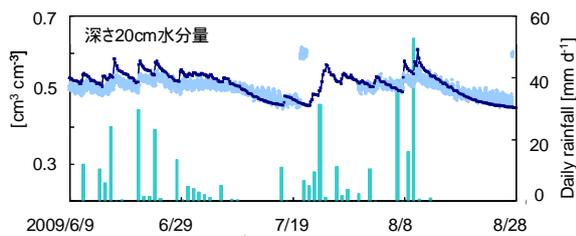


図3 深さ20cmの地温の実測値と計算値の比較

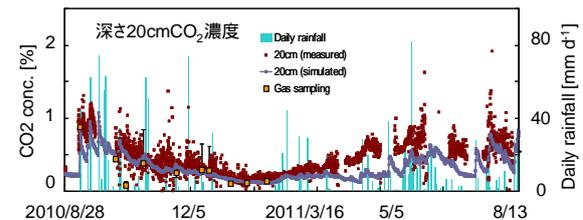


図4 深さ20cmの土壌中CO₂濃度の実測値と計算値の比較

3. 気候シナリオを用いた将来予測シミュレーション(第6～第8章)

近年、全球気候モデル(GCM; General Circulation Model / Global Climate Model)の発展が著しい。

GCM 予測値をペイドスゾーンの水・熱・物質動態予測に適用するためには、GCM 予測値と農地土壌で生じる現象の、空間・時間スケールの違いを補うダウンスケーリングが必要である。また、GCM 予測値を局地スケールの影響評価に利用する場合は一定期間の平均値を用いることが一般的であるが、この平均化のために異常気象の影響を評価しにくい。以上を踏まえ第6~8章では、GCM 予測値に基づいた気候シナリオを作成し、気候変動がペイドスゾーンの水・熱・CO₂ 動態に及ぼす影響の予測を行った。

本研究ではGCM 予測値に、本学気候システム研究センター、国立環境研究所、海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターが共同開発を進める MIROC ver3.2 の出力結果を用いた。このモデルは、IPCC SRES A1B シナリオに基づき、データは約 150km 四方メッシュで、1901/1/1 から二百年間の日データである。「現在」を 1971~2000 年、「将来」を 2071~2100 年の平均値とし、対象地の「現在値」には、同じ期間のアメダス府中または大手町の平年値を用いた。

空間ダウンスケーリングには、累積分布関数(CDF)法⁶⁾を用いた。その結果、「将来」は、日平均気温は一年を通じて3~5 の上昇、降雨量は4~6月に1.6~1.9倍に大幅増加、9月に0.8倍に減少すると予測された。

続いて、日別データを時別データに変換する時間ダウンスケーリングを施した。気温、湿度、風速、日射量は HYDRUS-1D の気象サブモデルを用いた。降雨量は、MIROC 予測値の日降雨量と日最大時間降雨強度を用い、田無農場の降雨特性に基づき、一つの降雨イベントについて、(1) イベント継続時間、(2) イベント開始時刻、(3) 最大強度の継続時間、(4) 最大強度の開始時刻を定めることで、平均的な強度と最大強度で降るよう近似した。時間ダウンスケーリングの例として、図6に10分間降雨強度と気温の連続変化の例を示す。以上のように MIROC 予測値に空間・時間ダウンスケーリングを施して作成したシナリオを”Future GCM”とする。

また、年々変動の大きい降雨について、MIROC 予測値の30年平均値を用いたことで平均化された現象を補うシナリオ”Future rainfall”を作成した。ここでは、MIROC 予測値の日降雨量と日最大時間降雨強度の関係の変化傾向に基づいて、2009年の降雨イベントごとに、最大時間降雨量(及びそれに準ずる時間降雨量)を1.14×1.21倍、それ以外の時間降雨量を1.14/1.21倍した。これによりイベントの総降雨量は1.14倍となり、イベントの中で平均強度に対して最大強度が増加する。

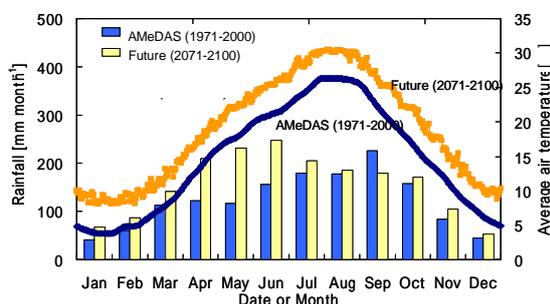


図5 空間ダウンスケーリングを施した GCM 予測値に基づく「現在」と「将来」の日平均気温と月降水量の比較

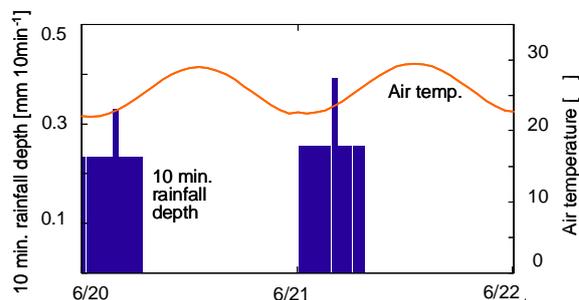


図6 時間ダウンスケーリングを施した GCM 予測値に基づく将来の10分間降雨強度と気温の連続変化

以上の気候シナリオを用いて、ベイドスゾーンの水・熱・CO₂ 移動予測を行った。"Future GCM" シナリオでは、熱収支に関して、純放射量の増加の有無に関わらず蒸発潜熱フラックスが増加すると予測された。水移動について、地表面から深さ 100cm までの領域では、降雨量が増加する 6 月は土層全体で土壌水分量が増加すると同時に、領域外への流出量も増加し、降雨量が減少する 9 月は、蒸発フラックスの微増で上層の乾燥が促進される(図 7)。熱移動については、蒸発量の増加も反映した、連続的な地温分布予測ができた(図 8)。CO₂ 生成移動について、一年を通して深さ 30cm 程度までの CO₂ 生成速度上昇、地表面からの CO₂ 放出フラックス増加が予測された。他方、土壌中 CO₂ 濃度は、深さ 20cm 以深で 1%以上の濃度増加が見られた(図 10)。すなわち CO₂ 生成速度の全増分が大気に放出されるのではなく、一部は下層に移動する。

"Future rainfall"シナリオでは、先行する降雨がない場合は、降雨量・強度増加に伴い、土壌水分量が増加する結果となった。他方、降雨が続くと、降雨量・強度の変化に伴う土壌水分量変化はほとんどなくなり、下方浸透フラックスが増加すると予測された。この結果は田無農場の高透水性を反映している。

4. まとめ

本研究では、気象サブモデルを含む HYDRUS-1D モデルの検証を行ったうえで、西東京を対象に、空間・時間ダウンスケーリングした GCM 予測値を適用し、農業や自然生態系の観点で必要な圃場スケールで、ベイドスゾーンの水・熱・CO₂ 動態を予測した。本研究の成果は、土壌や気象に関するデータベースを利用することで、他地域にも応用できると考える。また、今後の課題として、冬季の凍結や植生の考慮、GCM 予測値のダウンスケーリングについて他手法の検討、また CO₂ 生成速度予測について、基質分布や微生物多様性の変化の考慮などが挙げられる。

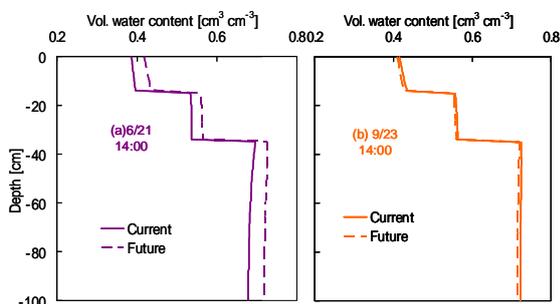


図 7 「現在」と「将来」の (a)6 月(b)9 月日中の体積含水率の鉛直分布の比較

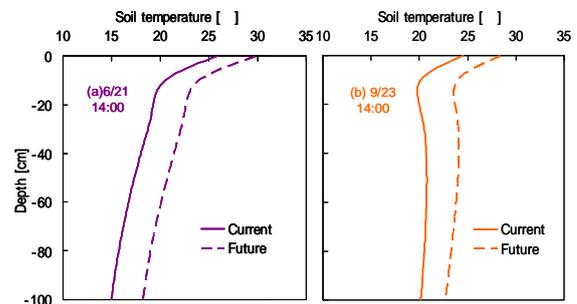


図 8 「現在」と「将来」の(a)6 月(b)9 月日中の地温の鉛直分布の比較

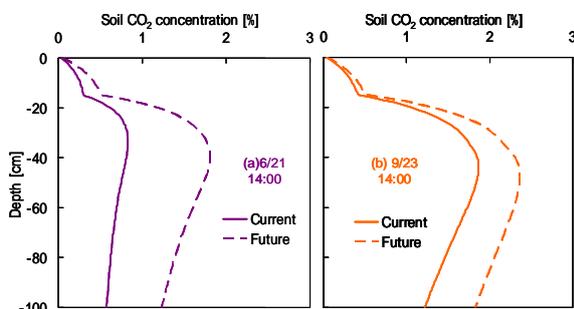


図 9 「現在」と「将来」の (a)6 月(b)9 月日中の土壌中 CO₂ 濃度の鉛直分布の比較

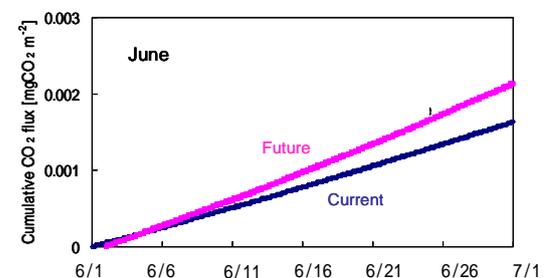


図 10 「現在」と「将来」における 6 月一ヶ月間の累積 CO₂ 放出フラックス

参考文献: 1) IPCC 第 4 次評価報告書,2007 2) Simunek et al., 2008, Vadose Zone J., 7, 587-600, 3) Durner, 1994, Water Resour. Res., 30, 211-223, 4) Chung and Horton, 1987, Water Resour. Res., 23, 2175-2186, 5) Buchner et al., 2008, J. of Hydrol., 361, 131-143, 6) 飯泉ら, 2010, 農業気象, 66(2), 131-143