

課題名 A-1003 北極高緯度土壌圏における近未来温暖化影響予測の高精度化に向けた観測及びモデル開発研究

課題代表者名 内田 昌男（独立行政法人国立環境研究所環境計測研究センター同位体・無機計測研究室 主任研究員）

研究実施期間 平成22～24年度

累計予算額 116,688千円（うち24年度35,568千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード（5～10個 積雪、凍結深、土壌炭素動態モデル
以下程度）

研究体制

- (1)土壌有機炭素分解の実態把握と生物地球化学的メカニズムの解明に関する研究（(独)国立環境研究所）
- (2)微気象・物理・水文プロセスの総合観測と変動量評価に関する研究（国立極地研究所）
- (3)温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究（筑波大学）
- (4)土壌炭素動態モデルの開発および高精度化に関する研究（兵庫県立大学）

研究協力機関

(独)農業環境技術研究所
米国アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター(IARC)
米国アラスカ大学フェアバンクス校水環境研究センター

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

近年の地球温暖化に伴う気候変動が自然界のフィードバックを介して最も顕著に現れるのが、北極圏およびその周極地域である。北極海では、IPCCでのモデル予測を超えたスピードで海氷面積が減少し、熱エネルギーを駆動する水循環がダイナミックに変動している。このような水循環の変動は、海洋とつながる陸上生態系の環境にも重大な影響を及ぼしており、北極海における集中観測と合わせて陸域生態系における観測の必要性が強く求められている¹⁾。陸域モデル分野では、温暖化が特に顕著に生じると予測されている北極域を中心に、土壌有機物分解応答の偏差が将来予測における不確実性の原因の一つとなっていることがモデル間相互比較プロジェクトから示唆されており、それを低減して信頼性を向上させるための研究が求められている。このように、陸域炭素循環モデルにおける将来予測を行う上で、北極高緯度土壌圏の温暖化に対する応答性に関し、信頼出来る観測データに基づいた観測ネットワークの構築が早急に求められている。アラスカの積雪期間の短期化や夏季の気温上昇は、ここ数年顕著になる一方で、永久凍土の融解が年々拡大している。しかし、永久凍土融解の進行とCO₂放出並びに温度依存性については、観測に基づいたメカニズムの包括的な理解は十分に得られていない。温暖化は、永久凍土の融解を引き起こし、微生物による永久凍土中に保存されていた古炭素の分解を促進する。この古炭素の分解は、大気-土壌間の炭素収支のバランスを崩し、温暖化に対して正のフィードバック効果を引き起こすとして強く懸念されている。したがって、北極高緯度域において土壌からのCO₂放出をモニタリングし、解析結果をモデル化することは、温暖化などの環境変動に脆弱な北極高緯度陸域生態系の温暖化影響メカニズムを解明し将来予測に活かすためにも重要である。

2. 研究開発目的

本研究では、近年温暖化影響が顕在化している北極域における、温暖化による土壌炭素蓄積量の変化とそのメカニズム解明のための観測とそれらのデータを用いた北極土壌炭素動態モデルの開発と高精度化を目指す。具体的には、北極高緯度域を代表する生態系(タイガ・ツンドラ)を縦断する観測ラインを設定し、各観測点で炭

素分解をコントロールする土壌温度、水分量等の土壌の物理状態を把握するとともに、土壌の化学組成、有機炭素現存量、平均滞留時間(分解率)、土壌から温室効果ガス放出速度(CO_2 や CH_4)などを観測し、炭素動態モデルの開発を行う。また開発したモデルの検証・改良を行うため、放射性炭素(^{14}C)を用いて土壌有機炭素の平均滞留時間を実測する。土壌有機炭素の滞留時間は、温度などの環境条件や有機炭素の質によって変動すると考えられているが、北極域における平均滞留時間実測データは皆無である。さらに、北極域土壌炭素特有の炭素動態を考慮にいれた観測とそのモデル化にも取り組む。具体的には、北極域に特有の永久凍土・融解に伴う物理プロセスや、凍土土壌中の炭素の活性化といった化学プロセスの導入である。凍土融解とそれに伴う古土壌の有機物分解の活性化を評価するために、土壌有機物、土壌内 CO_2 、土壌内微生物脂質レベルの ^{14}C 測定を行い、温暖化に伴い土壌有機物の滞留時間(分解率)がどのように変化していくのか、滞留時間の異なるプール有機物の形態も考慮にいれた最先端のモデルのさらなる高精度化を進める。また、fossil carbon(古炭素)分解の活性化のメカニズムの解明においては、土壌有機物の ^{14}C 測定と微生物代謝活性、微生物群集構造の関係を解析し、微生物生態学的視点からの考察も行う。加えて、自然火災によって土壌炭素の一部が焼失したタイガでも他の観測点と同様の観測を行い、自然火災によって、土壌炭素蓄積・分解のプロセスがどのような影響を受けうるのかについても、 ^{14}C を指標に用いて検討し、その結果をモデルに反映させる。

3. 研究開発の方法

(1) 土壌有機炭素分解の実態把握と生物地球化学的メカニズムの解明に関する研究

本研究では、土壌炭素動態モデル構築のためのデータ取得を念頭に、高緯度域特有の土壌炭素の蓄積・分解のメカニズムを解明するための精査サイトを、アラスカ大学フェアバンクス校が管理する2つの CO_2 フラックス観測サイト、フェアバンクス校校内のタイガ林(UAF)およびフェアバンクス校から北東に約50km程度離れた森林火災跡地(PF)に設定した。高頻度で観測実施する精査サイトでは、植生への負荷最小限に防ぐための木道の整備を行い、観測環境を整備した。また、より広域的なデータを得るために、フェアバンクスを起点に、ユーコン川、ブルックス山脈を越えて北極海の町Deadhorseまで、アラスカを南北に縦断する総延長約600kmの間で石油パイプラインに沿って整備されたダルトンハイウェイ沿いに、upland tundra (UT)、subalpine tundra (SaT、ブルックス山脈北斜面)、ecotone (TZ、tundra と boreal forestの移行帯)の定点観測サイトを3カ所設定した。さらに、多地点で土壌炭素蓄積に関する基礎データを構築するために、定点観測サイト以外にも、ツンドラ生態系、北方林の火災跡地で土壌採取を行う。核実験起源の ^{14}C (Bomb carbon)は、短期期間に突発的に生成されたため、核実験起源の ^{14}C は、土壌有機炭素の滞留時間、分解率、炭素蓄積量を実測するためのトレーサーとして有効である。このような、従来の ^{14}C の半減期を利用した年代測定と、この核実験由来の大気 $^{14}\text{CO}_2$ 濃度の変動を利用することにより、時間スケールが長い(数百年～数千年)現象から、時間スケールが短い(数年から百年)から現象を再現することが可能であり、炭素循環研究への利用が可能である。本研究では、この特性を利用し、土壌有機炭素の分解速度を知る指標である平均滞留時間(有る炭素プールの中にある有機炭素がすべて入れ替わるまでにかかる時間、分解率の逆数)の推定や、 CO_2 の発生源の特定を試みる。加えて、土壌炭素分解の温度特性を明らかにするための培養実験を行うものとする。アラスカを初めとする高緯度北極圏では、温暖化による自然火災の頻度と強度の増加がツンドラ、タイガ生態系に及ぼす影響が懸念されている。しかしながら、その影響を定量化する方法は確立していない。そこで、自然火災による表層土壌の炭素消失量を推定するために、自然火災跡地(PF)と火災の影響を受けていない場所で土壌コア試料を採取し、これらについて詳細な ^{14}C 分析を行い相互比較することで、消失量を定量化することが可能かどうか検討を行う。土壌コアの ^{14}C の鉛直プロファイルを作成し、火災の影響を受けていない場所の結果と比較し、火災によって失われた表層土壌の深度を求め、消失した表層土壌中の炭素量を火災による消失量として算出する。

(2) 微気象・物理・水文プロセスの総合観測と変動量評価に関する研究

本サブテーマでは、変動する北極圏の気候に関して、その実態や影響プロセスを調べるアプローチとして、気温、地温、雪温、土壌水分の観測を行ない、地表面の温度変化、積雪との関連を探ることを目的とした。ここで得られる物理情報を温暖化影響予測の高精度化に向けたモデル開発を実現するための検証データ、また土壌観測計画の立案・最適化のための情報として利用した。

観測対象域は、アラスカ北部、フェアバンクスより北極海沿岸のプルードベイ周辺までの700kmの南北トランセクトで行った。これらの地域には、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ(ツンドラ)が分布し、地形、植生、気候のコントラストがあり、効率よく北極圏の代表的な地域のデータを得ることが出来る。アラスカを南北に縦断するトランセクトに沿った年間モニタリングサイトにおける年間の地表付近の気象・積雪状態(積雪深・積雪内温度プロファイル・熱伝導)・土温プロファイル・土壌水分・凍結深の時間変化を計測し、これによって広域の物理環境の時間変化をモニターした。アラスカ北部では冬期の積雪の多寡が、地面の冷却、凍結状態に影響し、融雪後の昇温に影響する。また融雪水は土壌水分にとっても重要な影響を持つ。これらの地域差、季節変化の特

徴を観測した。

また、冬期積雪状態の観測データ解析を行うため、鉛直方向の詳細な地温・水分プロファイルの季節変化を知るための縦断観測を実施し、定期観測サイトでのデータを取得および、その土壌分解に与える影響情報を収集した。

アラスカ大学と共同で、アラスカ北部7地点において、気温、雪温、地温、土壌水分の通年観測を行った。地中5cm、10cm、20cm、30cm、40cm、50cmに地温計を設置し、1時間インターバルで通年の温度モニターを行なった。地上では気温測定のほか、高さ10cm 間隔で温度センサーを固定し、冬期の積雪中の温度分布や温度勾配を見ている。得られたデータはサブテーマ4のモデル計算の検証に使用されている。衛星や地形データから観測地域の特徴、地域性を検討した。定点気象データとともにサブテーマ1や3のサンプリング地点の気候条件にもかかわる。

また、総観規模気象情報・地球観測衛星による広域大気・地表面状態の観測結果から土壌分解に与える影響情報の収集、およびこれら現場長期モニター、縦断観測、広域情報はGIS上で地形情報と併せて整備、利用出来る体制の整備を進めた。

アラスカの地温、水温分布に影響する冬季の積雪深、初冬の凍結開始、春の融雪開始と融雪終了(積雪消滅)について、観測地点の情報を集計したが、点在する観測地点以外の広域傾向についても確認する必要がある。そこで2つの手法により広域傾向を調査した。一つは衛星観測による凍結、融解、の観測である。もう一つは、全球地形情報ETOPO5によるアラスカ・観測域の地形情報を利用し、積雪分布と傾斜方向の比較を行った。これにより観測地点を含むアラスカ北部各地域の状況と、観測点周辺の変動の地域性が検討できる。また、観測地点の周辺での不均一性は、観測、分析、モデリングと発展していく研究成果にとって不確定要素を与えるものである。観測地周辺の変動幅についても観察を行った。

(3) 温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究

2010年夏の現地調査開始時に、地質図および植生図と予備的に実施した調査結果を参照に、本研究で継続的に観測を実施するための定点調査点をアラスカ北極圏の気候植生区に対応させ決定した。定点調査点として、アラスカ州立大学フェアバンクス校校内(UAFサイト)、フェアバンクスより北東に60 km離れた森林火災跡地観測サイト(PFサイト)、フェアバンクスからデッドホースまで延びるダルトンハイウェイ沿いを植生区分に応じて設定したタイガ森林(GCサイト)、森林限界(TZサイト)、山岳ツンドラ(SATサイト)、アップランドツンドラ(UTサイト)である。また、ダルトンハイウェイから分岐するエリオットハイウェイ沿いのタイガ森林火災跡地(2010年に森林火災発生)について観測点(EH)を設け、2011年夏期に現地調査を実施した。

2010年、2011年、2012年の夏期に現地調査を実施した。決定した定点調査点において、多測点での土壌呼吸測定、チャンバー法による土壌ガス採取(真空バイアルビンによるCO₂およびCH₄ flux測定用試料採取)、土壌物性および微生物群集構造解析用の深度別土壌試料採取を継続的に行なった。土壌物性測定用試料、微生物群集構造解析用試料、をそれぞれ深度別に採取した。現地調査で採取した各試料は、冷蔵もしくは冷凍状態を保持し日本に持ち帰った。2011年夏には、土壌中の微生物代謝活性を明らかにするため、UAF、PF、GC、TZ、SAT、UTの各サイトセルロース分解活性測定用の綿布を垂直挿入設置し、2012年夏の現地調査時に回収し、洗浄・乾燥後日本に持ち帰り実験に供した。

持ち帰った真空バイアルビンガス採取試料はGC-FID、TCDを用いてCO₂およびCH₄濃度測定を行い、時間経過に伴うチャンバー内ガス濃度変化より各調査点のCO₂およびCH₄ fluxを算出した。5cm間隔で採取した土壌試料を用い、volume water content、solid phase content、total dry weight、bulk densityで表される土壌物性を求めた。深度別(0-1 cm、5-6 cm、10-11 cm、15-16 cm、20-21 cm)に採取し冷凍保存して持ち帰った土壌試料からDNAを抽出し、各定点調査点の土壌中微生物群集構造情報を得ることを目的にT-RFLP(Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism Analysis: 末端断片長多型)解析を行った。

(4) 土壌炭素動態モデルの開発および高精度化に関する研究

劇的な変動環境下にある北極高緯度域の土壌有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化のための研究開発方法は以下のとおりである。まず、本サブテーマにおける研究の基盤となる土壌物理過程モデルおよび極域土壌炭素動態モデルの開発とその挙動の検証を行った。既存の土壌物理過程モデルや土壌炭素動態モデルの多くは温帯などの比較的温かな環境条件下で開発・適用されてきた。そのため、北極域に特有の永久凍土と活動層に関する物理プロセスや、有機質土壌のダイナミクスと土壌物理過程のフィードバックが欠如しており、気候変動下での影響評価や予測を的確に行うには不十分であった。たとえば、永久凍土や地下水位の動態は、土壌炭素の蓄積・分解やメタンの生成・酸化を決定する根本的な要因であるが、これらの動態をメカニスティックに扱い予測研究に応用するには、土壌温度と水分量を物理的に精密にシミュレーションすることが肝要である。

そこで本サブテーマでは、先行研究に用いられた陸域生態系モデルをベースに極域土壤炭素動態モデルを開発し、再現されたアラスカの炭素動態が観測結果を再現できるか検証した。さらに、既存の土壤物理過程モデルと極域土壤炭素動態モデルを結合し、長期間に渡る将来予測を的確に行うためのプラットフォームを構築することとした。そのモデルはPhysical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM)と呼び、先行研究であるNoah LSMおよびSDMに基づいている。

4. 結果及び考察

(1) 土壤有機炭素分解の実態把握と生物地球化学的メカニズムの解明に関する研究

2010年、2011年、2012年、フェアバンクスから北極海まで南北に総延長600kmの間で、ツンドラ生態系、森林限界移行帯、北方林、湿地、火災跡地の合計20カ所で凍土試料の採取を実施した。土壤炭素動態の変動量を実測するため、各生態系で得られた土壤コアについて、有機炭素量、土壤物理データ、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の深度プロファイルデータを下に、北方林(a:PF)、遷移帯(b:TZ)、ツンドラ(c:SaT)における土壤炭素蓄積速度を試算した。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の結果から、0‰以上(1950年以降に堆積)の有機物層、有機物層と鉱物層(1950年以前に堆積分も含める)に区分して供給量(I)と分解率(k)を推定した。また、 I と k 、平均滞留時間(RT)、1年当たりの分解量(微生物呼吸量、 R_h)および炭素収支(dC/dt)も求めた。炭素蓄積量は、PFで 17.6 kgC m^{-2} 、TZで 11.5 kgC m^{-2} 、SaTで 11.0 kgC m^{-2} に対して、 I と k は、PFで $0.031 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.0061 yr^{-1} 、TZで $0.13 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.013 yr^{-1} 、SaTで $0.13 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.012 yr^{-1} であった。RTは、PFで617年、TZで83年、SaTで85年と計算された。ただし、TZとSaTは、土壤の厚さが薄く、最下部の ^{14}C 年代は新しく、永久凍土層を含むPFに比べて土壤形成年代が短い。最北で最も冷涼なCTで、深さ80cmまでのデータを用いて同様の方法で計算すると、炭素蓄積量は 36.7 kgC m^{-2} で最も多く、 I 、 k ともに最も低い値を示し、RTは4536年と最も長かった。これらの結果から、ツンドラでは長時間未分解の有機物が、北方林と比べて約1.5倍蓄積されている一方、RTは7倍近く長いことが分かった。また、 k が求められたことで、対象とする期間の微生物分解量(R_h)の平均値が求められることから、土壤炭素収支(dC/dt)の試算を行った。凍土土壤呼吸 CO_2 の発生源を検討するため大気 CO_2 、土壤 CO_2 および土壤呼吸 CO_2 の採取を行った。

$\Delta^{14}\text{C}_{\text{SR}}$ は、北方林(UAF)で129‰(1980年代年のバックグラウンド大気 $^{14}\text{CO}_2$ に相当)、遷移帯(TZ)で95‰(1990年代のバックグラウンド大気 $^{14}\text{CO}_2$ に相当)であることがわかった。土壤有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ と比較すると、 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{SR}}$ は、UAFでは0-5cm深、TZでは0-3cm深の有機物の値と一致する。すなわち、遷移帯の方が活動層のより上部の有機物が分解されていることを示しており、遷移帯の有機物分解活性の高いことがわかった。

これらの土壤内 CO_2 の起源が、深層に堆積する古炭素か、表層から深層に移動してきた可溶性炭素であるか知るために、土壤内 CO_2 の ^{14}C 測定を行った。土壤内 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、北方林UAFサイトの深さ30cmで67‰、火災跡地PFサイトの深さ40cmで35‰であった。1960年の核実験以降の大気 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の経年変化と比較すると、PFサイトで分解される有機物の起源は1960年よりも古いことがわかった。PFサイトの火災地と未火災地の土壤コアの ^{14}C プロファイルと比較して、火災地では表層10cm分に相当する炭素の蓄積が消失していることがわかった。これらの結果から森林火災による焼失炭素量を計算すると、2004年の火災によって、過去60年間の蓄積量に相当する有機層 4.4 kgC m^{-2} が焼失していることが求められた。本研究で開発された核実験起源 $^{14}\text{CO}_2$ をトレーサーに土壤有機物の堆積状況を復元する方法は、これまで火災焼失量の定量的に求める手法としてブレークスルーとなるものである。このような定量的な手法は、アラスカを含めた北極土壤圏における自然火災における炭素消失量を試算する方法として高い確度を持つものであり、モデル開発の上で重要である。

本研究では、 ^{14}C をトレーサーに用いて、過去数十年から数千年までの様々な時間スケールでの土壤炭素動態を明らかにすることができ、本研究のサブテーマ4で進められているモデル開発において、重要で定量性の高いデータ提供が可能となった。

(2) 微気象・物理・水文プロセスの総合観測と変動量評価に関する研究

フェアバンクスより北極海沿岸のプルードベイ周辺までの700kmの間に自動気象観測器を設置した。また、積雪時期の確認のため、インターバルカメラを設置し、年間の積雪、植生変化についても記録した。設置地点はアラスカ大学(UAF)、BC-1、TZの3か所であった。

各地では、地表面付近(表面~10cm深)は夏季に $10\sim 20^\circ\text{C}$ まで昇温する。20cm深では上限は 5°C 程度である。土壤水分計は誘電率を測定しているため、土壤凍結時には測定不能となる。

北方森林帯では隣接した数m以内の場所でも林床の水分差がコケ(Sphagnum>Feather)の種類によりみられる(BC-1)。Featherでは低い値が続いている。これは融雪後でも同様であった。Sphagnumでは変動が大きい。

土壤水分は春季の融雪水によるものが大半を占め、夏季の降水に短期変動が重なる。秋季の土壤の凍結開始は深さによって時間差があるが、春季の凍結土壤の融解は、異なった深さでも短い時間の間に連続して起きる。表面からの積雪融解水の浸透が急速に温度を均一化していく。

フェアバンクスのアラスカ大学(UAF)サイトでも、同様の結果が得られたが、北方森林帯の気温年較差は大きく、

また冬季の短期変動も大きい。冬季に2週間の間に40°C近い変化が記録されている。特に12月の昇温では、積雪や地温が一気に0°Cまで増加し、土壤水分の記録が上がっていることも示されている。冬季の昇温は気温変化としては認識されやすいが、それが積雪や土壤中にも影響していることがわかる。積雪・土壤の温度勾配の消滅、積雪や土壤の融解が起きている。

各地の記録を比較した結果、冬季温度は南方であるが内陸域にある森林域の方が北方のツンドラより低温であり、高度の高い山岳域ではかえって温暖であった。低地に発生する接地逆転層のせいであり、この形成と頻度が冬期の土壤の凍結に影響する。一方で積雪は土壤の冷却を妨げるため雪の状態が春の凍結状態に重要である。積雪については、森林>ツンドラであり、また積雪期間は200~230日である。しかし凍結期間は逆にツンドラ>森林であり、210~270日の幅があった。地面の冷却状況については、積雪の多寡の影響も受け、森林域の深い積雪下では冷却は-10°C程度までであるが、ツンドラ域の浅い積雪下では冷却は-20°C程度まで進んだ。沿岸ツンドラ域では土壤水分が多いため、凍結開始期の0°C滞留期間が2ヶ月に及んだ。

広域の積雪状況について、衛星データをもとに積雪開始、終了、誘電率の変化に見られるような地表面凍結開始を調べた。衛星AQUAのマイクロ波放射計AMSR-Eデータを用いて、10年間の衛星観測期間について変動性を確認した。

年々の変動を調べたところ、アラスカ南部では融雪日が早まり、アラスカ中部・北部では消雪日が早まっている。これらにより積雪期間が短くなっていることがわかった。短くなった積雪期間により地表面の加熱が増え、土壤温度の上昇に影響することが予想される。

衛星による広域の特徴を見ることが出来るが、一方で衛星の観測スケールより細かな空間スケールでの不均一性が問題になる。特に、森林帯では複雑な地形により、局所的な積雪変化がありうる。そこで、定点観測点の代表性と地形の関係を調べるため、地形の向きと傾斜に対する積雪深の変化について調べたが、傾斜方向は積雪深と相関がみられることがわかった。森林域では北向きの斜面で積雪が多く出た。山岳域及びツンドラ域では南向斜面で積雪が多く出たが、これはブルックス山脈の南側では南方からの水蒸気流入があるためと考えられる。ブルックス山脈の北側では、ツンドラ域になっているが積雪が少ないことから、より広域の気候条件を解釈するうえで、積雪に関しても傾斜方向は重要な要素であることがわかった。

(3) 温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究

2010年夏の初めての現地調査において、安全に十分な配慮を配りつつ現地調査を計画・実施した結果、各定点調査点での現地測定および試料採取に成功した。観測点の土壤物性は典型的な寒帯土壤の特性である浅い有機土壌層を示した。また、火災跡地であるPF調査点土壤は、火災による表層土壌有機物の消失と灰分たい積効果により、植生のない表層(0-5 cm)および植生の有無にかかわらず5-10 cm深度のsolid phase contentが他の調査点(UAF、GC、TZ、SAT)よりも高い値を示した。

各定点調査点の土壤呼吸速度(CO₂ flux)は、同じ調査点でもチャンパー内の植生や地表面環境の違いに伴い大きく変化したが、火災跡地の土壤呼吸速度は、森林植生(GCサイト)と比較して小さく、同一地点内の場所によるばらつきも小さかった。観測点全体としては、縦断観測での調査地点間では表面植生の違いによるばらつきはあるものの、地下5 cm地温と土壤呼吸速度との間に正の相関関係が認められた。一方、火災跡地の土壤呼吸速度と地下5 cm地温の間には明確な相関は認められなかった。また、CH₄ flux測定結果より、火災跡地土壤が一般的な寒帯森林土壤よりも大きなCH₄のシンクとして作用している可能性を強く示す結果を得た。

土壌中のセルロース分解活性については、UAFサイトでは0-10 cmのセルロース分解活性がそれ以深の活性に較べ高いこと、5-15 cm深度では夏期にセルロース分解活性が上昇することが判明した。また、火災跡地(PFサイト)では、生きていくコケ内のセルロース分解活性は低いコケ下のセルロース分解活性は高く、5 cm以深では夏期にセルロース分解活性が上昇することが判明した。その他、タイガ林(GCサイト)および森林限界(TZサイト)の土壌表層セルロース分解活性は高いが、高山ツンドラ(SATサイト)および極域ツンドラ(UTサイト)の分解活性は土壌全層で低いことが明らかとなった。

土壌微生物群集構造を明らかにするために行ったT-RFLP解析からは、真正細菌群集については、特定の微生物種が存在し土壌深度により群集構造が異なること、また、温帯や熱帯土壌と比較し微生物多様性が低いこと、が明らかになった。古細菌群集については、特定の微生物種が存在し土壌深度により群集構造が異なること、温帯や熱帯土壌と比較し微生物多様性が低い火災跡地(PFサイトおよびEHサイト)の土壌表層のみ多様性が高い傾向が認められるが表層以外の多様性は極端に低く、土壌全体の多様性は湿地域(UAFサイト、UTサイト)より低いことが判明した。

(4) 土壌炭素動態モデルの開発および高精度化に関する研究

完成したPB-SDMを用い、アラスカ州フェアバンクス付近の北方林における気象データと土壌データを使用したシミュレーションを行った。モデルを定常状態にするための2000年間のシミュレーション(スピンアップ)の後、2003

年から2010年までの気象データを用いたシミュレーションを行った。シミュレーション結果とフィールド観測結果との比較検証により、PB-SDMは土壤の物理環境および土壤炭素の蓄積を適切に再現できることが分かった。さらに、温暖化の影響による土壤有機炭素の減少を予測するため、シミュレーションで2000年の土壤有機炭素蓄積期間の後に気温が3°C上昇するシミュレーションを行ったところ、アラスカ内陸域だけで 2×10^{12} kgC (2ギガトン)の炭素が放出され、この地域が現在保持している土壤有機炭素量の28.3%が失われると推定された。

本サブテーマの研究成果によって、アラスカ北方林地帯での土壤有機炭素の広域シミュレーションの信頼性を向上させ、より確かな将来予測を行えるようになった。フィールド観測に基づくパラメーターやプロセスを新たに取り入れ、実態との整合性もより良くなった。有機質土壤では土壤炭素が層状に蓄積されていくため、土壤深度によって層の形成時期や、その層の置かれている温度・水分環境、そしてその層に含まれる土壤有機炭素の量と質が大きく異なることを定量的に表現した。これらの時間発展をコンピュータ上でシミュレーションすることにより、長い期間をかけて形成される有機質土壤のダイナミクスを再現することに成功した。アラスカ中部における非連続な永久凍土分布地帯における永久凍土の有無を物理的な熱・水収支からの積み上げで推定することも可能となった。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究では、凍土土壤からなる北極高緯度土壤圏における土壤炭素の温暖化による気候変動による脆弱性評価の為のモデル開発にとって重要なパラメーターとなる土壤炭素の平均滞留時間の実測に成功した。得られた滞留時間は、北方林、遷移帯、ツンドラ生態系毎に実測され、炭素蓄積量の試算と相まって、過去数千年以降の炭素蓄積量と平均滞留時間が明らかとなった。平均滞留時間の長い、ツンドラには、生産量が低い環境であるにもかかわらず、分解量が小さいことから北方林よりも多くの有機炭素が存在していることがわかり、北極土壤圏の温暖化による影響評価の調査研究の重要性を示すものとなった。また北方林における自然火災による炭素焼失量の推定からは、一度の火災により失われる炭素量を実測するための手法開発に成功し、自然火災の多発する北極地域における炭素動態モデルの開発にいて重要な定量的データを提供することに成功した。さらにサブテーマ1-3の観測データを下に、土壤圏の炭素動態・蓄積・分解のメカニズムを解明するための観測研究と連動する生物地球化学的プロセスと気候へのフィードバックを含めた土壤炭素動態モデルの開発研究実施することにより、実態に即したシミュレーションモデルの開発を行うことが可能となった。その結果、アラスカ北方林地帯での土壤有機炭素の広域シミュレーションの信頼性を向上させ、将来予測を行うことができるようになった。時間発展をコンピュータ上でシミュレーションすることにより、長い期間をかけて形成される有機質土壤のダイナミクスを再現することに成功した。アラスカ中部における非連続な永久凍土分布地帯における永久凍土の有無を物理的な熱・水収支からの積み上げで推定することも可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、北極土壤圏の温暖化影響を予測するためのモデル開発において、特に実用とされている北極土壤特有のパラメータとメカニズムの多くに関する知見を得た。特に土壤炭素の平均滞留時間により得られる土壤炭素の分解率の試算は、世界初の試みで有り、開発されるモデルの精度検証において重要な知見を提供するものとなる。また凍土という低温環境下での有機物分解の温度特性を評価するための培養実験を行った。これらの知見は、モデル開発の精度向上において極めて重要なデータとなる。また本研究で構築された観測網は、アラスカ大学北極環境センターとの共同で実施したものであるが、今後、国内外の研究機関による長期モニタリング等の実施において重要な研究インフラへと発展して行く基盤作りに貢献できたといえる。加えて、複雑な地表面プロセスが相互作用を起こしているため将来予測が困難であった北極高緯度地域の気候変動への影響・気候変動から受ける影響の双方を定量予測するための重要なステップとなるシミュレーション研究への取り組みを行った。特に、土壤有機炭素蓄積を的確に再現するために欠かせない土壤の垂直構造の明示化と土壤物理条件と土壤炭素ダイナミクスの結合によりシミュレーションモデルの性能を格段に向上させることに成功した。アラスカ中部における非連続な永久凍土分布地帯における永久凍土の有無を物理的な熱・水収支からの積み上げで推定できたことから見られるとおり、定量的な将来予測において世界的にも注目されるべきものである。

6. 研究成果の主な発表状況(別添作成要領参照)

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) H. IWATA, M. UHEYAMA, Y. HARAZONO, S. TSUYUZAKI, M. KONDO, and M. UCHIDA: SOLA, 7, 105–108, (2011)

“Quick Recovery of Carbon Dioxide Exchanges in a Burned Black Spruce Forest in Interior Alaska”

- 2) M. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO and M. UCHIDA: Open Journal of Ecology 2, 2, 90–95, (2012)

“The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics” (in press)

- 3) Y. KIM, S-D. KIM, H. ENOMOTO, K. KUSHIDA, M. KONODO, M. UCHIDA: Alaska, Polar Science, 7, (2013)

“Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway”(in press)

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 近藤美由紀, 内田昌男, 金龍元, 高橋善幸, 内海真生, 篠崎鉄哉, 榎本浩之, 柴田康行: 日本地球惑星科学連合 2010年大会 (2010)

「放射炭素同位体を用いたアラスカツンドラ・タイガ生態系における土壌有機炭素の滞留時間の推定」

- 2) M. KONDO, M. UCHIDA, H. ENOMOTO, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, Y. KIM, Y. SHIBATA: Int. Symp. Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, Sapporo, Japan, 2010

“Snow conditions in Northern Alaska and possible influences on soil-carbon-dynamic-related carbon assimilation and CO₂ emission.”

- 3) M. UCHIDA, M. UCHIDA, M. KONDO, Y. SHIBATA: Organic matter stabilization and ecosystem functions SOM 2010, France, 2010

“Heterotrophic microbial decomposition of soil ancient carbon in Norway Arctic; First evidence from molecular level natural radiocarbon analysis.”

- 4) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, Y. TAKAHASHI, T. SHINOZAKI, M. UTSUMI, Y. SHIBATA: Environ. Radioact. 2010, Roma, Italy, 2010

“Radiocarbon constraints for soil carbon accumulation and carbon release of boreal forests and tundra ecosystem in Alaska.”

- 5) M. UCHIDA, M. UCHIDA, M. UTSUMI, M. KONDO, Y. TAKAHASHI, Y. SHIBATA: 2nd Int. Symp. Arctic Res., Tokyo, Japan, 2010

“The heterotrophic respiration using old carbon in arctic soil: Insights from compound-specific radiocarbon analysis.”

- 6) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, Y. SHIBATA: 2nd Int. Symp. Arctic Res., Tokyo, Japan, 2010

“Constraining radiocarbon signature of soil organic matter in tundra and boreal forests, Alaska.”

- 7) M. UCHIDA, M. UTSUMI, M. KONDO, Y. TAKATASHI, M. UCHIDA: AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010

“Evidence of heterotrophic microbial decomposition of preaged carbon in Arctic soil; Insights from molecular level natural radiocarbon analysis.”

- 8) M. KONDO, U. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, Y. SSHIBATA: AGU 2010 Fall Meet., San Francisco, USA, 2010

“Radiocarbon-based estimates of residence times for soil organic carbon of Tundra and Boreal forests in Alaska.”

- 9) 中村文彬, 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明: 日本雪氷学会北海道支部発表会, 札幌, 2010

「アラスカにおける冬季地表面の冷却過程の観測結果」

- 10) 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明, 舘山一孝, 谷川朋範, 木村しずか, 門崎学, 斉藤佳彦, ヌアスムグリ アリマス, 中村文彬: 雪氷研究大会, 仙台, 2010.

「北極圏ツンドラ・森林域の広域積雪調査ーアラスカにおける積雪データの収集とマイクロ波観測実験ー」

- 11) 中村文彬, 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明: 雪氷研究大会, 仙台, 2010.

「アラスカにおける冬季地表面の冷却過程の観測」

- 12) 中村文彬, 榎本浩之, 茂手木勇紀, ヌアスムグリ アリマス, 金龍元, 館山一孝: 第33回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010.
「北極圏における融雪時期の解析 ~アラスカ観測より~」
- 13) 榎本浩之, 佐々木孔明, 金龍元, ヌアスムグリ アリマス, 中村文彬: 第33回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010.
「北極圏の積雪分布の広域調査および衛星観測」
- 14) H. ENOMOTO, K. SASAKI, Y. KIM, K. TATEYAMA, S. KIMURA, N. ALIMASI, F. NAKAMURA, T. TAMIKAWA, G. KADOSAKI, Y. SAITO, S. TAKAHASHI: The 2nd International Symposium of Arctic Research, Tokyo, 2010.
“Field Survey and AMSR-E Retrieval of Snow in the Forest and Tundra in Alaska”
- 15) H. ENOMOTO, K. TATEYAMA, H. SHIBATA, K. SASAKI, Y. TANAKA, Y. KIM, N. ALIMASI, F. NAKAMURA, S. TAKAKAHASHI: The 2nd International Symposium of Arctic Research, Tokyo, 2010.
“Land-Sea Connection of Snow and Ice Conditions in the Arctic”
- 16) 伊勢武史: 若手生態学者モデル勉強会 (2010)
「泥炭地のシミュレーションと気候変動-生態学と物理学の接点」
- 17) T. ISE: Ecological Society of America Annual Meeting, Pittsburg, U.S.A., 2010
“Construct a size- and age-structured dynamic global vegetation model: simulation of global carbon budget”
- 18) 伊勢武史: 日本気象学会秋季大会 (2010)
「陸域生態系モデルの今後の発展の方向性と応用の可能性」
- 19) 伊勢武史: GCOE公開講演会、横浜国立大学 (2010)
「泥炭地のシミュレーションと気候変動-生態学と物理学の接点」
- 20) T. ISE: Second International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2010
“A physics-based, depth structured simulation of soil organic carbon: Study in Alaska with ALIMASI C data”
- 21) T. ISE, N. KATO, H. ENOMOTO, M. KONDO, M. UCHIDA: American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2010
“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: dynamics of past, current, and future accumulation and decomposition”
- 22) Y. HARAZONO, H. IWATA, M. UEYAMA, S. TSYUZAKI, M. UCHIDAMA, M. KONODO, Y. TAKAHASHI, M. UTSUMI: ISAM2011, Kagoshima, Japan, 2011
“Vegetation recovery, changes in fluxes and micrometeorology after wildfire of a black spruce forest on permafrost in Alaska.”
- 23) M. KONODO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZIKI, Y. TAKAHASHI, M. ADACHI, Y. SHIBATA: Arctic Sci.Summit Week 2011, Seoul, Korea, 2011
“Constraining radiocarbon signature of soil organic matter in Alaskan Arctic soil: Implication for importance basis examining the impact of climate warming on CO₂ release.”
- 24) M. KONDO, A. HOSHINO, S. MURAYAMA, T. SHINOZAKI, R. WAGAI, Y. SHIBATA, M. UCHIDA: AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA (2011)
“Investigation of carbon turnover and CO₂ evolution in soil organic carbon from forest soils: Insight from radiocarbon analysis of soil density fractions and soil respired CO₂”
- 25) T. SHINOZAKI, M. UCHIDA, M. KONDO, K. YOSHIKAWA, S. NOMOTO, M. UTSUMI: AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA (2011)
“Reconstruction of Alaskan Arctic environmental changes for past 1 ka using $\delta^{13}\text{C}$ of peat cellulose and their ^{14}C wiggle-match dating”
- 26) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, M. ADACHI, Y. SHIBATA: The 4th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium, Tokyo, Japan (2011)
“Radiocarbon Signature of Soil Organic Carbon in Tundra and Boreal Forests, Northern Alaska”
- 27) 伊勢武史: 国立極地研究所 平成22年度研究集会「北極環境研究の課題と展望」(2011)
「土壌階層モデルによる土壌物理と炭素循環のシステムシミュレーション: アラスカにおけるケーススタディ」
- 28) 伊勢武史: 第58回 日本生態学会大会 (2011)
「土壌炭素モデルの垂直構造化と放射性炭素データによる検証」
- 29) T. ISE, N. KATO, H. ENOMOTO, M. KONDO, M. UCHIDA: AMS-12 Conference, New Zealand, 2011

“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: a brand-new, integrated ecosystem model with radiocarbon tracking”

30) 伊勢武史: 日本生態学会近畿地区会 (2011)

「泥炭地のシミュレーションと気候変動－生態学と地球環境」

31) T. ISE, N. KATO, H. ENOMOTO, M. KONDO, M. UCHIDA: The 4th East Asia AMS Symposium, Tokyo, Japan, 2011

“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: dynamics of past, current, and future accumulation and decomposition”

32) 内海真生、近藤美由紀、安立美奈子、内田昌男: 第45回日本水環境学会年会 (2011)

「アラスカ北極圏の湿原土壌環境特性の解析 I—土壌呼吸について—」

33) 秋山昇平、近藤美由紀、安立美奈子、内田昌男、内海真生: 第45回日本水環境学会年会 (2011)

「アラスカ北極圏の湿原土壌環境特性の解析 II—微生物群集構造について—」

34) 内海真生、近藤美由紀、安立美奈子、天野(佐藤)千恵、内田昌男: 第59回日本生態学会 (2012)

「アラスカ北極圏陸上生態系の土壌呼吸特性解析」

35) 榎本浩之、内海真生、内田昌男、伊勢武史、森健介、近藤美由紀、ヌアスムグリ アリマス、佐々木文彬、金龍元: 第3回極域科学シンポジウム (2012)

「アラスカ広域の積雪および土壌温度・水分の季節変化、-土壌分解とモデリングのための基礎物理情報取得-」

36) H. Y. AZUMA, H. HAYASAKA, M. HIRABAYASHI, K. GOTO-AZUMA, T. KADOTA, H. YABUKI, T. OHATA, S. TAKAHASHI, R. KUSAKA, T. SHIRAKAWA, N. ALIMASI, T. AOKI, S. SUGIYAMA, K. TATEYAMA, K. SHIMADA, M. UTSUMI and M. UCHIDA: the 3rd symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2011.

“Arctic weather in 2012 summer and influences on Arctic Environment”

37) M. UTSUMI, M. UCHIDA, M. KONDO, M. ADACHI, T. YAMAMOTO: 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012

“CO₂, CH₄ fluxes and bacterial diversities at terrestrial ecosystem along the trans-Alaska pipeline in tundra and boreal forest, Alaska.”

38) S.F. RELLA, and M. UCHIDA: 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012

“Sedimentary organic matter and carbonate variations in the Chukchi Borderland in association with ice sheet and ocean-atmosphere dynamics over the last 155 kyr.”

39) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. SHIBATA, H. IWATA, Y. HARAZONO: 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012

“Estimation of Carbon loss by fire in a burned black spruce forest in interior Alaska using radiocarbon”

40) 伊勢武史: 第59回 日本生態学会大会 (2012)

「物質循環シミュレーションモデルにおける土壌生態系: 新たなフロンティアとその課題」

41) 伊勢武史: 日本土壌肥料学会 (2012)

「物質循環シミュレーションモデルにおける土壌生態系: 新たなフロンティアとその課題」

42) K. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. Kim, H. ENOMOTO, M. UCHIDA: Third International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2013

“The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics.”

43) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. SHIBATA, H. IWATA, Y. HARAZONO: Third International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2013

“Estimation of C loss by fire in a burned black spruce forest in interior Alaska using radiocarbon”

44) 伊勢武史: 第60回 日本生態学会大会 (2013)

「気候変動下の土壌炭素モデルのあるべき姿-- ここに気づけばもっと良くなる」

7. 研究者略歴

課題代表者:内田 昌男

東京農工大学大学院連合農学研究科卒業、博士(農学)、現在独立行政法人国立環境研究所主任研究員

研究参画者

(1):内田 昌男 (同上)

(2):榎本 浩之

チューリッヒ工科大学大学院卒業、北見工業大学教授、現在、国立極地研究所教授、同北極観測センター長および総合研究大学院教授

(3):内海 真生

筑波大学大学院生物学研究科卒業、現在、筑波大学生命環境科学研究科准教授

(4):伊勢 武史

ハーバード大学大学院進化個体生物学科卒業、現在、兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科准教授

A-1003 北極高緯度土壌圏における近未来温暖化影響予測の高精度化に向けた観測及びモデル開発研究

(1) 土壌有機炭素分解の実態把握と生物地球化学的メカニズムの解明に関する研究

(独) 国立環境研究所

環境計測研究センター 同位体・無機計測研究室 内田昌男
 <研究協力者>

(独) 国立環境研究所

環境計測研究センター 有機計測研究室 近藤美由紀

(独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域 米村正一郎

米国アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター (IARC)

Larry Hinzman・原菌芳信・岩田拓記、岩花剛・Kim Yongwon

米国アラスカ大学フェアバンクス校水環境研究センター 吉川謙二

平成22～24年度累計予算額：91,638千円

(うち、平成24年度予算額：28,292千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、北極高緯度域の土壌圏を対象に、凍土土壌炭素の温暖化影響を予測する為のモデルパラメーターの取得並びに凍土土壌炭素の分解・蓄積に関する知見を得るため、アラスカフェアバンクスより北極海に至る、タイガ、ツンドラ生態系にまたがるおよそ650kmに調査区を設け、1 m深までの土壌炭素蓄積量、放射性炭素 (^{14}C) を用いた土壌有機炭素の分解率 (k)、平均滞留時間 (RT)、および1年当たりの供給量 (I) の実測を行った。RTは、北方林で27年、ツンドラで69年と求められた。この k と I から、北方林における従属栄養呼吸量 (R_h) が $0.195 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、土壌における炭素収支は $0.052 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定された。CO₂フラックス観測結果と比較すると、生態系呼吸に占める R_h の割合は54%、純生態系生産 (NEP) のうち土壌圏に分配される割合は約40%と試算された。これらの試算は、世界初の試みで有り、北極生態系における炭素の分配を正確に把握する上で重要となる。北極生態系におけるこれら土壌炭素の時間軸を含めた炭素の蓄積・分解に関するパラメーターの実測は、世界で始めて実施され、方法論の確立と相まって、今後さらに同様のデータ取得が可能となり、関連分野への貢献が極めて高いものと期待される。また、土壌呼吸の温度特性を明らかにするため、凍土土壌を用いた土壌培養実験の開発を行い、低温条件下での培養法を確立し、低温下における温度特性 (Q_{10} 値) を得ることに成功した。得られた Q_{10} 値は、低温下で最大50以上と特に大きな値を持つことが確認され、温暖化による凍土土壌有機物分解の応答性の高さが証明された。低温環境下での観測は、極めて制限が大きいことから、培養実験の確立は、今後の北極土壌炭素の分解特性のメカニズム解明の重要な鍵となることが期待される。凍土土壌において初めて得られた Q_{10} 値並びに、上記のRTの実測値は、土壌炭素動態モデルの開発において極めて重要なパラメーターを提供するもので有り、本研究のサブテーマ4で実施された北極土壌特有の物理化学特性を考慮に入れた土壌炭素モデル開発に対して観測データと重要

な知見が得られた。

[キーワード]

炭素循環、土壌炭素動態、気候変動、極域温暖化、温室効果気体

1. はじめに

近年の地球温暖化に伴う気候変動が自然界のフィードバックを介して最も顕著に現れるのが、北極圏およびその周極地域である。北極海では、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）でのモデル予測を超えたスピードで海氷面積が減少し、熱エネルギーを駆動する水循環がダイナミックに変動している。このような水循環の変動は、海洋とつながる陸上生態系の環境にも重大な影響を及ぼしており、北極海における集中観測と合わせて陸域生態系における観測の必要性が強く求められている¹⁾。陸域モデル分野では、温暖化が特に顕著に生じると予測されている北極域を中心に、土壌有機物分解応答の偏差が将来予測における不確実性の原因の一つとなっていることがモデル間相互比較プロジェクトから示唆されており、それを低減して信頼性を向上させるための研究が求められている。このように、陸域炭素循環モデルにおける将来予測を行う上で、北極高緯度土壌圏の温暖化に対する応答性に関し、信頼出来る観測データに基づいた観測ネットワークの構築が早急に求められている。アラスカの積雪期間の短期化や夏季の気温上昇は、ここ数年顕著になる一方で、永久凍土の融解が年々拡大している。しかし、永久凍土融解の進行とCO₂放出並びに温度依存性については、観測に基づいたメカニズムの包括的な理解は十分に得られていない。温暖化は、永久凍土の融解を引き起こし、微生物による永久凍土中に保存されていた古炭素の分解を促進する。この古炭素の分解は、大気-土壌間の炭素収支のバランスを崩し、温暖化に対して正のフィードバック効果を引き起こすとして強く懸念されている。したがって、北極高緯度域において土壌からのCO₂放出をモニタリングし、解析結果をモデル化することは、温暖化などの環境変動に脆弱な北極高緯度陸域生態系の温暖化影響メカニズムを解明し将来予測に活かすためにも重要である。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、北極高緯度域における土壌有機炭素蓄積の実態把握と生物地球化学的手法による北極域特有の炭素分解メカニズムの解明をめざす。このため、放射性炭素同位体¹⁴Cを指標に用いて、土壌有機炭素の滞留時間を評価し、有機物の蓄積と分解に関する定量的なデータの取得を行う。これらのデータを、サブテーマ4の北極土壌炭素動態モデルの開発と検証のために提供する。加えて、土壌CO₂、土壌から放出するCO₂および微生物膜脂質の¹⁴C分析から土壌から発生するCO₂の起源を明らかにし、古土壌の有機物分解等の北極高緯度域特有の土壌有機炭素分解メカニズムを解明することを目的とする。

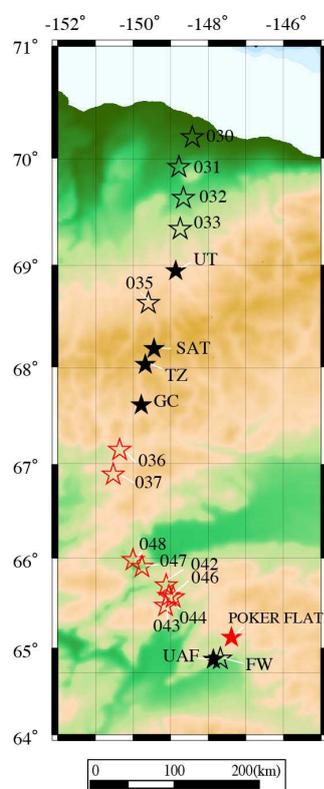
3. 研究開発方法

(1) 観測サイト

本研究にて現地調査開始するにあたり、地質図および植生図と予備的に実施した調査結果を参照に、今後継続的に観測を実施するための定点調査点をアラスカ北極圏の気候植生区に対応させ決定した（図(1)-1、表(1)-1）。北部アラスカの代表的な植生は、北極海から南に灌木と矮生低木

が優占するツンドラヤスゲと矮生低木が優占するツンドラが広がり、ブルックス山脈付近では北斜面にはワタスゲのタソクが優占するツンドラヤスゲとコケのツンドラが、ブルックス山脈の山頂付近には、亜高山帯ツンドラの植生である匍匐性の矮生低木とイネ科型草本が優占する。さらにブルックス山脈より南に位置するタタナ川及びユーコン川下流に位置する平地および低地には北方林が、谷部の末端に位置する低地には湿地が広がる。これらの植生に対応する場所を選定し、各調査を実施した。詳細は以下に記す。

本研究では、土壤炭素動態モデル構築のためのデータ取得を念頭に、高緯度域特有の土壤炭素の蓄積・分解のメカニズムを解明するための精査サイトを、アラスカ大学フェアバンクス校が管理する2つのCO₂フラックス観測サイト、フェアバンクス校校内の北方林（UAF）およびフェアバンクス校から北東に約50km程度離れた森林火災跡地（PF）に設定した。高頻度で観測実施する精査サイトでは、植生への負荷最小限に防ぐための木道の整備を行い、観測環境を整備した。また、より広域的なデータを得るために、フェアバンクスを起点に、ユーコン川、ブルックス山脈を越えて北極海の町Deadhorseまで、アラスカを南北に縦断する総延長約600kmの間で石油パイプラインに沿って整備されたダルトンハイウェイ沿いに、upland tundra (UT)、subalpine tundra (SaT, ブルックス山脈北斜面)、ecotone (TZ, tundra と boreal forestの移行帯)の定点観測サイトを3カ所設定した。さらに、多地点で土壤炭素蓄積に関する基礎データを構築するために、定点観測サイト以外にも、ツンドラ生態系5カ所（031～033、035、050）、北方林の火災跡地9カ所（036、037、042～048）で土壤採取を行った。



図(1)-1 アラスカ北部における観測サイト。UAF：アラスカ州立大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト（北方林、クロトウヒ林）、PF：ポーカーフラットフラックス観測サイト（2004年森林火災跡地）、GC：北方林（シロトウヒ林）サイト、TZ：北方林-ツンドラ遷移サイト（エクトーン）、SaT：山岳ツンドラサイト、UT：アップランドツンドラサイト、030～033・035～039・042～044・046～048：土壤採取地点。☆（036・037・042～044・046～048）は森林火災跡地を示す。

表(1)-1 精査サイトと土壌採取場所の位置情報および植生²⁾

サイト名	緯度	経度	標高	斜面方位	斜度	植生	優占種
UT	68°54'N	148°52'W	440	S60E	3	Subarctic upland tundra	<i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Betula glandulosa</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
SaT	68°10'N	149°26'W	1110	N60E	5	Alpine tundra	<i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>Dryas integrifolia</i> , <i>Carex bigelowii</i> , <i>Salix reticulata</i>
TZ	67°59'N	149°45'W	740	N80W	10	Forest-tundra ecotone	<i>Picea glauca</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Empetrum nigrum</i>
UAF	65°38'N	147°28'W	240	S80E	4	Boreal forest (Black spruce forest)	<i>Picea mariana</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i>
PF	65°08' N	147°26' W	491			Burned black spruce forest in 2004	white birch, trembling aspen, Labrador tea, bog blueberry, sedge, fireweed, and mosses

(2) 試料採取方法

精査サイトおよび定点観測サイトにおいて、¹⁴C分析に用いる大気CO₂、土壌呼吸CO₂、土壌CO₂、および土壌試料、土壌培養実験用の土壌試料採取を実施した。土壌から放出するCO₂の発生源を検討するために用いた、土壌呼吸CO₂および土壌CO₂の採取は、精査サイト（UAFおよびPF）では、2011年5月下旬から6月上旬、7月中旬、8月中旬から9月上旬の合計3回採取を実施した。また、定点観測サイト（UT、SaT、TZ）では、2011年8月中旬から9月上旬に行った。採取方法については、以下に記す。

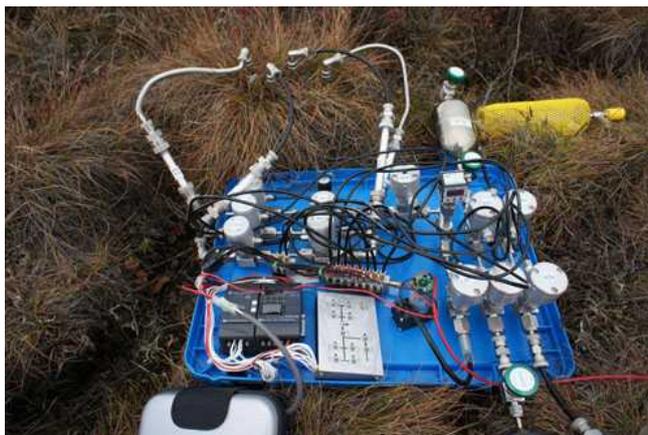
1) 土壌試料

活動層までの土壌試料は、融解が最も進む2011年8～9月にスコップでブロック状に採取した。採取した土壌は、チャック付きの袋に入れて形が崩れないよう細心の注意を払って日本に持ち帰った。さらに、永久凍土を含む土壌試料を、土壌層位を崩さずに採取するために、活動層まですべて凍結する厳冬期の2012年2月に採取を行った。採取には、John machine shop社（米国）の小型エンジン付きの永久凍土採取用コアラー（直径10cm）を用いた。

2) 土壌CO₂および土壌呼吸CO₂

土壌呼吸CO₂は、金属製のベースおよびプラスチック製のチャンバー（直径52cm、高さ25cm）を用いて、密閉法で採取した。真空引きした1Lのガラスボトルを、ニードルバルブを介してチャンバーと接続し、60分から120分間隔で2～3回採取した。また、土壌CO₂の採取は、深さ10、15、20、30cmに埋設したステンレス製の採気管（直径6mm）に土壌ガス採取ラインを接続し、真空引きした500mlのボトルに採取した。本サブテーマでは、CO₂の発生源、特に古炭素の分解を明らかにするために、土壌深度別に土壌中の小さい空壁に溜まるCO₂を採取する必要がある。しかし、従来の方法では、土壌に埋設した採気管から真空状態のガラスボトルへ採取する流量をごく少量

に調整することが難しかった。特に、低温で微生物活性が低く、CO₂生成が少ないアラスカの土壌では、目的の深度以外からもCO₂を引き込んでしまうことが懸念された。そこで、乾電池やリチウムバッテリーを電源に用いて、ガス拡散の原理を利用して非常にゆっくり（数cc/min.程度）ガスを採取できる装置を新たに作成し（写真(1)-1）使用した。



写真(1)-1 同位体分析用土壌CO₂採取装置

（3）¹⁴C分析のための前処理および¹⁴C分析

アラスカで採取した試料は、日本に持ち帰った後、大気CO₂、土壌呼吸CO₂および土壌CO₂は、CO₂濃度測定と同位体（¹³Cおよび¹⁴C）分析を行った。また、土壌試料は、仮比重、炭素含有率、窒素含有率、同位体（¹³Cおよび¹⁴C）分析を行った。

土壌呼吸CO₂および土壌CO₂は、実験室にて真空の精製ラインを用いてCO₂のみに精製され、マノメータを用いて炭素量を定量する。その後、¹⁴C分析のための前処理として、グラファイト試料となる。精製済みの試料を専用のグラファイト作成ライン³⁾にて、鉄と水素を触媒に反応させて、グラファイトを作成した。

土壌試料は、土壌炭素蓄積にかかる時間をより高分解で得るために、厚さ1~2cm毎にスライスし、根などの植物体を取り除き、乾燥・粉砕した。粉砕後の試料うち、有機物層以外は、HCl処理をおこなった。これら試料は、還元銅、酸化銅とともに石英管に入れて封管し、燃焼させ、ガス化させる。ガス化した試料は、グラファイトラインにてグラファイト試料にされる。

作成されたグラファイト試料は、専用の金属製のカソードにプレスされ、国立環境研究所が所有する米国NEC社製タンデム型加速器質量計（AMS, NIES-TERRA）にて、¹⁴C分析を実施した。

（4）¹⁴Cをトレーサーに用いた土壌炭素動態メカニズムの解明

環境中の放射性炭素同位体（¹⁴C）は、安定な¹²Cおよび¹³Cと共に様々な炭素リザーバーに分布する。炭素が各リザーバー間を循環するプロセスを解析する上で、¹⁴Cは化学トレーサーとしてきわめて有効である。また、これまで考古学や地質学で使用されてきたように年代測定法として¹⁴Cの利用が可能である。大気中のCO₂は光合成により植物体に取り込まれ、¹⁴Cも一定の割合で取り込まれる。植物体が枯死すると、¹⁴Cは新たに取り込まれなくなるため、枯死体に含まれる¹⁴Cは、時間経過に従って規則正しく減少する（¹⁴Cの半減期：約5730年）。この減少の割合を正確に測定することで、植物が枯死してからの経過時間が推定出来るため、¹⁴Cを使った年代測定法として、考古学や地質学で利用されてきた。また、1950年代末から1960年代初期に盛んに実施された核実験により¹⁴Cが生成され、大気中の¹⁴C濃度は元の10倍に近くになったといわれる。核実験起源の¹⁴C（Bomb carbon）は、短期期間に突発的に生成されたため、核実験起源の¹⁴Cは炭素リザーバー間を循環するプロセスを解析するトレーサーとして有効である。このような、従来の¹⁴Cの半減期を利用した年代測定と、この核実験由来の大気¹⁴CO₂濃度の変動を利用することにより、時間スケールが長い（数百年~数千年）現象から、時間スケールが短い（数年から百年）から現象を再現することが可能であり、炭素循環研究への利用が期待される。本研究では、この特性を利用し、土壌

有機炭素の分解速度を知る指標である平均滞留時間（有る炭素プールの中にある有機炭素がすべて入れ替わるまでにかかる時間、分解率の逆数）の推定や、CO₂の発生源の特定を試みた。詳細な方法は、以下に記す。

1) 土壌有機炭素の平均滞留時間 (RT) の推定

平均滞留時間 (RT) の推定には、Trunmbore & Harden (1997) が提唱した¹⁴Cモデル式⁴⁾を応用した。1年あたりの土壌炭素収支 (dC/dt) は、炭素供給 (I ; $\text{kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) と分解率 (RTの逆数、 k ; yr^{-1}) と、ある年 (t) の土壌炭素蓄積量 ($C(t)$) で表される。

$$dC/dt = I - kC(t) \quad (1)$$

初期の炭素蓄積量を0と仮定すると、式 (1) は、以下のよう書き換えられる。

$$C(t) = (I/k) \times (1 - \exp^{-kt}) \quad (2)$$

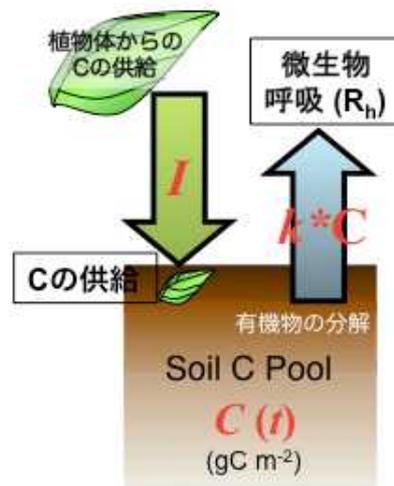
土壌試料の分析から得た仮比重および炭素含有率から推定された累積炭素蓄積量と、¹⁴C濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$) から得た有機炭素の生成年代 (t) をプロットさせ、式(2)に当てはめ、1年あたりの土壌への炭素供給 (I) と分解率 (k) を推定した。さらに、累積炭素蓄積量と k から1年間に分解される有機物量 (微生物呼吸量、 R_h) を求め、 I と R_h の差 (式 (1)) から土壌圈における炭素収支 dC/dt を求めた。

2) ¹⁴Cを用いたCO₂の発生源の特定

地質時代 (5 万年以上前) の生物活動により形成された有機炭素、CO₂、メタン (化石炭素、fossil carbon) には、¹⁴Cの半減期に比較して十分な時間が経過しているために¹⁴C が含まれない ($\Delta^{14}\text{C} = -1000\%$) のに対し、現代の大気CO₂を炭素源とする植物由来の有機炭素には核実験由来の高濃度の¹⁴Cが含まれる (2012年のバックグラウンド大気CO₂の¹⁴C濃度: $\Delta^{14}\text{C} = +30\%$ 前後⁵⁾)。この性質を利用して、土壌呼吸CO₂、土壌内CO₂について¹⁴C分析を行うことにより、微生物による古炭素の分解の実態把握を試みた。

3) ¹⁴Cを用いた自然火災による炭素消失量の推定

アラスカを初めとする高緯度北極圏では、温暖化による自然火災の頻度と強度の増加がツンドラ、タイガ生態系に及ぼす影響が懸念されている。しかしながら、その影響を定量化する方法は確立していない。そこで、自然火災による表層土壌の炭素消失量を推定するために、自然火災跡地 (PF) と火災の影響を受けていない場所で土壌コア試料を採取し、これらについて詳細な¹⁴C分析を行い相互比較することで、消失量を定量化することが可能かどうか検討を行った。本研究では、2004年の6月から8月にアラスカ州フェアバンクスから北に約50kmのPoker Flat Research Rangeで発生した自然火災跡地 (PF) で2010年に採取した土壌試料を用いた。土壌コアの¹⁴Cの鉛直プロフィールを作成し、火災の影響を受けていない場所の結果と比較し、火災によって失われた表層土壌の深度を求め、消失した表層土壌中の炭素量を火災による消失量として算出した。



図(1)-2 土壌圈における炭素収支の模式図

(5) 活動層土壌及び凍土土壌中SOC分解に関する温度依存性の検討

北極土壌における最も特徴的なのが、低温下における土壌有機炭素の分解特性についての不確実性がある。特に温度依存性に関する知見は、温暖化による影響下での土壌有機炭素の分解量を推定する上で重要である。一般に土壌呼吸と温度との関係（温度依存性）は、 Q_{10} 値（温度が 10°C 上昇したときの土壌呼吸速度の変化率）という指標が用いられている。これは、土壌呼吸が従属栄養生物による土壌有機物の分解と根の呼吸に由来し、地温に依存して CO_2 の放出量が増加することによる。一般的に温帯域における土壌呼吸と地温の間には指数的な関係が仮定され、経験的に Q_{10} 値は2前後とされている（Raich et al. Davidson et al.）。 Q_{10} 値は、フィールドにおける土壌呼吸の季節変化の観測に基づき経験的に試算されるものである。本研究では、サブテーマ3において土壌呼吸の観測が実施されているが、北極域に関しては、本研究で実施したような通年及び遠隔地での観測インフラの構築が難しく、観測期間が特に夏季に限定される。そのため、 10°C 以上の地温変化の下での観測は難しく、 Q_{10} 値の算出が困難な状況にあった。本研究では、サイト間で Q_{10} 値の対比を行うため、凍土の培養を行った。そこで、現地から凍土の状態を試料を国内へ持ち帰り、培養による Q_{10} 値の算出に関する実験の検討を行った。

活動層、凍土土壌中の土壌有機炭素を分解する微生物の活性の温度依存性、特に低温域での特性については、国内外においてほとんど知見が得られていない。一般的には、凍土が融解し、活動層が増加し、活動層の有機物が微生物活動の結果、分解され、放出される二酸化炭素は、さらに温暖化を加速させるという正のフィードバックを引き起こすと考えられている。この現象の理解は、北方林であれば、不連続凍土帯から連続凍土帯が広がるアラスカ中央部からツンドラにかけての遷移帯において、また連続凍土帯が存在しているツンドラにおいて重要な物理化学プロセスである。これらの環境では、永久凍土の融解は急激な土壌有機炭素の分解を引き起こすことになると考えられているが、凍土土壌の物理化学的プロセスを説明する観測データが十分ではない。これらの知見は、モデル開発に必須な検証データとなる。本研究で検討を開始した Q_{10} 値の培養は、温暖化による凍土土壌有機物の分解特性を理解する上で最も重要な対象の一つである。サブテーマ4の土壌炭素動態モデルとその将来予測において重要なパラメーターと知見を提供することができることから、本研究の観測・生物地球化学研究とモデル開発の同時進行の重要性を端的に示すものであり、火を見るよりも明らかである。

以下に、本研究で実施した土壌ガス交換量自動測定システムを用いたアラスカ凍土のガス交換量測定の詳細について説明する。

1) 通気法を利用した土壌ガス交換量自動測定システムによるガス交換量測定

凍土のガス交換量の経時的な変化を捉えるために、通気式を採用したシステムを利用した（図(1)-3）。4つのチャンバーを温度制御可能（ -20°C ～ 80°C ）な培養器内に入れた。室外から空気をコンプレッサーにより室内に導き水蒸気を取り除いた後に CO_2 をソーダライムで除去後、それぞれのチャンバーには流量 180ml min^{-1} 程度でマスフローコントローラで一定流量に制御し通気させた。培養機の制御温度が氷点下になる実験があり培養機内のバブラーが使えないので、チャンバーに供給する空気としては、乾燥空気（露点 -40°C 程度）をチャンバーに導入した。そして、電磁弁で各チャンバーからの空気を分析し、ベース（チャンバー供給空気）との濃度差を求めることにより二酸化炭素ガスの発生量を求めた。

チャンバーとしては、温度伝達性を考えて、小型のチャンバー（日本、コールベル製特注、内

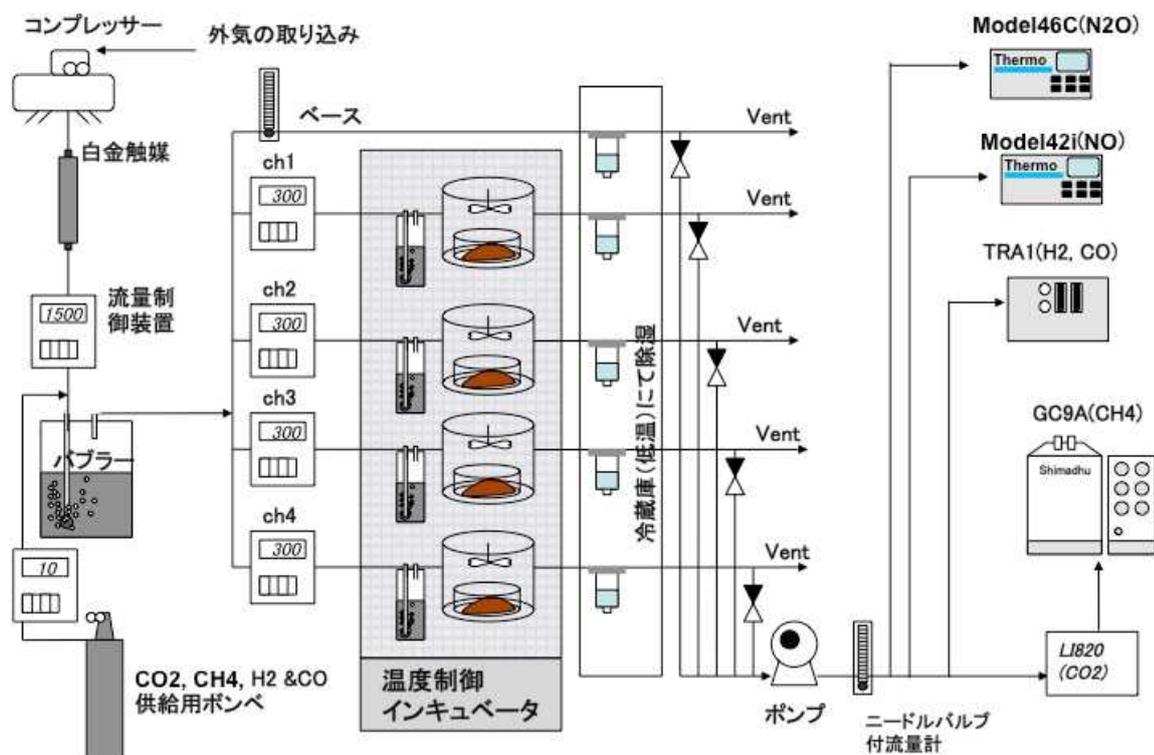
径95mm, チャンバー内高95mm、体積673ml) を用いた。このチャンバーは上部の蓋部分にファンがついており、チャンバー内の空気を一様にする事が出来て、発生・吸収量測定の精度を上げている。土壌サンプルはシャーレ上に載せ、このチャンバーの中のシャーレを出し入れすることにより、サンプルを交換した。同時にチャンバー土壌温度などをモニタリングした。CO₂の測定はLI-COR社(米国)のLI-820を用いた。

2) 培養に用いた凍土土壌試料

培養に用いた試料は、本研究で実施しているトランクセット観測点で採取した深さ1mまでの柱状凍土コア試料を用いた。採取されたコアから、活動層、凍土層に相当する層準から、直径5-8cmの柱状コアの半割試料から、長さ5-10cmの試料を分割して用いた。使用した土壌コア試料のうち、凍土試料は、融解させることなく、日本に持ち帰り実験まで-20℃で保管していたものを使用した。それぞれの土壌は100cc円筒コアで持ち帰ったものであり、この土壌を培養器内で融解させた後(1℃)に実験に供した。

3) 培養条件の検討

凍土でのガス交換量測定は初めての経験であり、まず温度をどの程度の時間制御すれば一定の温度になるかのテストを行った。凍土は水分ごと凍った場合が多く、温度制御に時間がかかることがわかったが、このため、温度制御は12時間ごとに制御を行った。実験の基本温度は5℃とした。土壌が凍結した場合の土壌呼吸量の変化を調べるため、以下の要領で温度制御を行った。5℃→-5℃→5℃では、凍結融解を伴うために温度制御に時間がかかり、制御は24時間ごとに変えた。また、土壌が融解している条件での温度特性がどうなるかを調べるため、以下のプラス温度での上げ下げを行った。5℃→15℃→5℃→15℃→25℃→15℃→5℃と凍結融解を伴わないので1段階12時間で制御を行った。

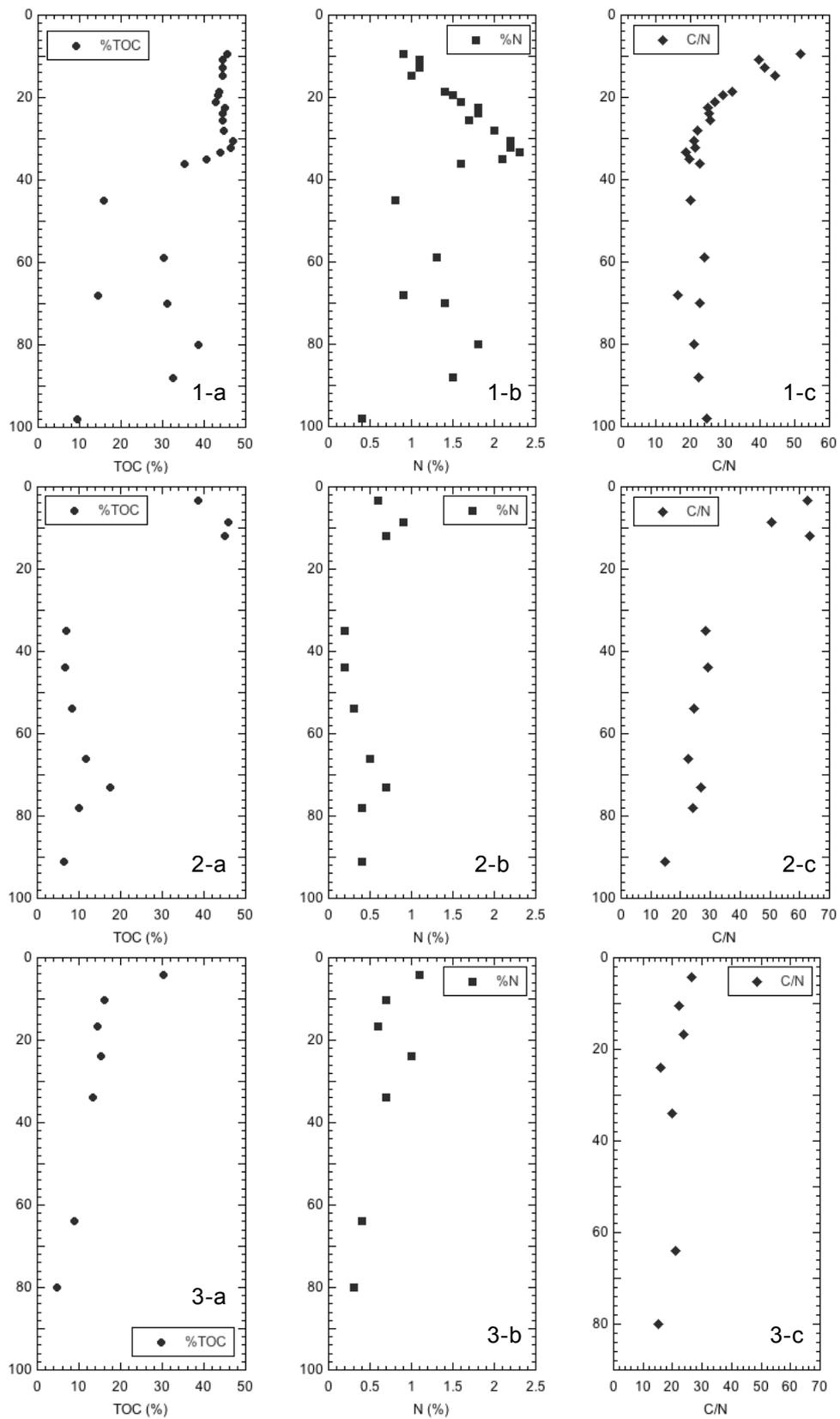


図(1)-3 Q_{10} の算出で用いられた土壌ガス交換量自動測定システム（農環研米村氏協力）

4. 結果及び考察

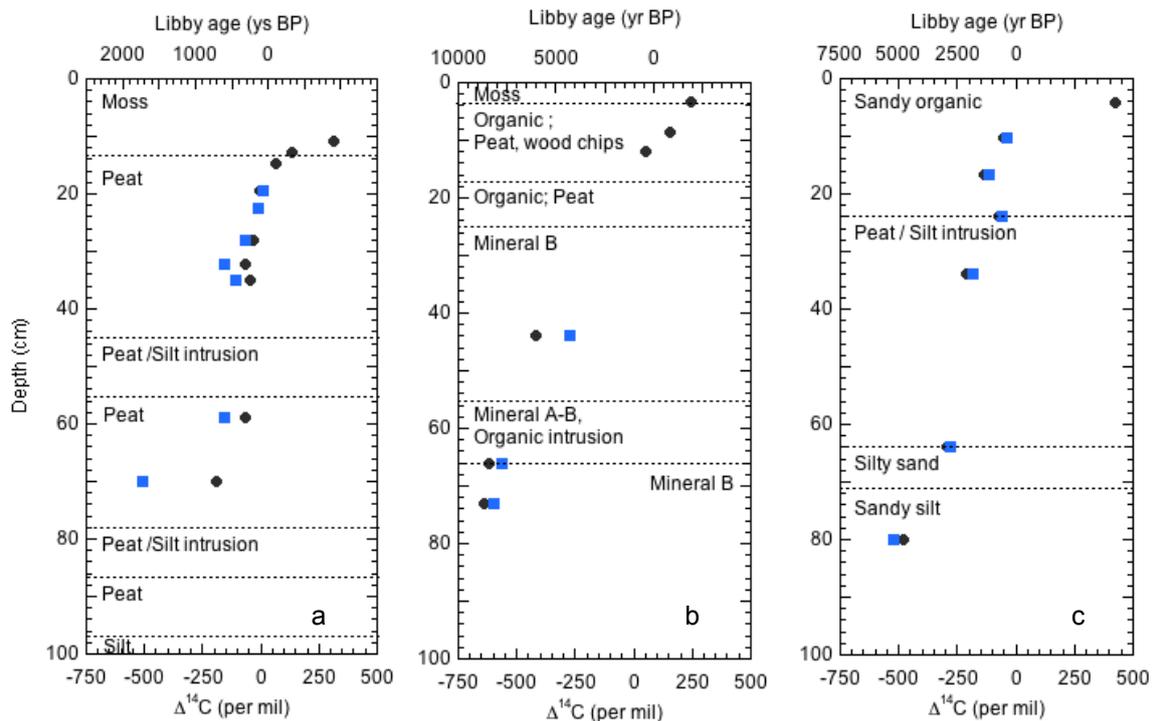
(1) 土壌有機物の蓄積と分解に関する定量的なデータの取得

2010年8月から9月の観測において、フェアバンクスから北極海まで南北に総延長650kmの間で、ツンドラ生態系7カ所、森林限界移行帯1カ所、北方林2カ所、湿地1カ所、火災跡地9カ所合計20カ所で土壌試料の採取を実施した。さらに、厳冬期の2012年2月に凍土採取用の小型エンジン付きのコアサンプラーを用いた試料採取を実施し、ツンドラ生態系2カ所、北方林3カ所、湿地1カ所での試料採取に成功した。これら試料を日本に持ち帰り、各種分析を行った。図(1)-4に、北方林 (PF)、ツンドラ2カ所 (UT、CT) における深さ1mまでの有機炭素・窒素含有率、CN比を示す。北方林 (PF、図(1)-4のa) では、クロトウヒの林床にはミズコケが優占し、深さ60cm程度に永久凍土層が存在する。土壌の環境は、湿潤かつ冷涼な環境のため微生物による有機物の分解は遅く、表層は全有機炭素 (TOC) が20%以上の有機層が厚く (深さ90cm) 堆積している。一方、ツンドラ生態系 (UT、図(1)-4のb) では、ツガを初めとする草本植物やコケが優占し、タソクが点在する。PFサイトよりも薄いものの、TOCが20%以上の有機層が深さ26cmほど堆積していた。もっとも最北のツンドラ生態系 (Coastal Tundra ;CT、図(1)-4のc) では、UTより有機物層は厚く堆積しており、TOCが20%以上の有機層の厚さは64cmほどであった。またブルックス山脈北斜面に位置するツンドラ (Alpine tundra、SaT) や、北方林とツンドラが遷移するエコトーン (Forest-tundra ecotone) では、土壌の厚さは薄く、礫が深さ20~25cm程度で見られるようになり、有機層の厚さはそれぞれ19cmと20cm程度であった。



図(1)-4 アラスカ北方林 (1) およびツンドラ (2、3) における土壌有機炭素含有率 (a)、窒素含有率 (b) およびCN比 (c) の分布

土壤有機炭素堆積の特徴を調べるために、これら土壤試料の ^{14}C 分析を行った。図(1)-5は、北方林(PF)、ツンドラ生態系2カ所(UT、CT)における深さ1mまでの ^{14}C 濃度($\Delta^{14}\text{C}$ 、‰)の分布を示す。土壤水分が高く林床にコケが優占する北方林PFサイト(図(1)-5のa)では、表層15cmまでは $\Delta^{14}\text{C}$ が0‰以上と比較的年代が新しい炭素で、深さ20cm以深は $\Delta^{14}\text{C}$ が0‰以下の古い炭素であった。PFサイトでは、深さ60cm付近もTOCが20%以上と高い値を示す炭素が蓄積しているが、 ^{14}C 年代(Libby age)は約2000年と古いものであった。同じ北方林のUAFサイトでは、土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ は、深さ8cmで528‰と極大となり、核実験に由来するBomb-Cのピークを示した。このBomb-Cのピークから、深さ8cm以上の炭素は1960年以降に蓄積した炭素と言える。深さ17cm以深では、 ^{14}C 濃度が0‰以下になり、これらの炭素は、Bomb-Cの影響を受けておらず、表層土壤よりも滞留時間が長い炭素と推定される。一方、ツンドラ生態系(図(1)-5のbおよびc)は、 $\Delta^{14}\text{C}$ が0‰以上と1960年代に行われた核実験に由来するBomb-Cの影響を受けた層は、北方林PFサイトに比べて薄く、深さ30cm以深で ^{14}C 年代が2000年以上と古かった。これらの ^{14}C データから、ツンドラ生態系にくらべて、永久凍土上に発達した北方林では土壤有機物の堆積速度が速いことが示された。これら以外に、森林限界移行帯にあるエコトーン(TZ)やブルックス山脈北斜面のツンドラ(SaT)サイトでも、～深さ5cmでBomb-Cピークが検出され、同様の傾向が見られた。これらのアラスカの土壤では、低温条件下で分解が進まないまま長期間保存されてきた易分解性炭素が、夏期には融解する活動層に存在していることが分かった。また、ツンドラ生態系のいくつかのサイトでは、堆積環境に何らかの攪乱があったことが読み取れた。炭素含有率の減少が見られる表層5cm以深で、 $\Delta^{14}\text{C}$ も急激に低下していた。 ^{14}C 年代で見ると、表層5cmまでは過去60年以内であるが、深さ9cmで3000年以上と急に古くなり、この間に蓄積していたはずの土壤が存在しない。このような層位学的な予想と異なる年代の逆転現象を説明する原因の一つとして、永久凍土層を持つ周氷河気候地域に特有の土壤現象である、クリオターベーション(凍結擾乱作用)の影響と考えられた。クリオターベーションが起こると、地下2～3mまでの堆積物の層理が波状～不規則に褶曲することがわかっている。しかしながらその分布や生成のメカニズムについてはいまだ十分に明らかではない。このように過去に低温かつ嫌気状態で未分解のまま土壤深層に保管されてきた有機物が、クリオターベーションにより表層に現れるような場所では、温暖化の進行に伴いこれらの分解が促進され、温暖化のホットスポットとなることが懸念される。ツンドラ地帯の土壤炭素動態を解明するために、土壤有機物の質を評価する手法と ^{14}C 年代の測定と組み合わせた評価を進める必要があると言える。



図(1)-5 アラスカ北方林 (a) およびツンドラ生態系 (b, c) における ^{14}C 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$ 、‰) の分布

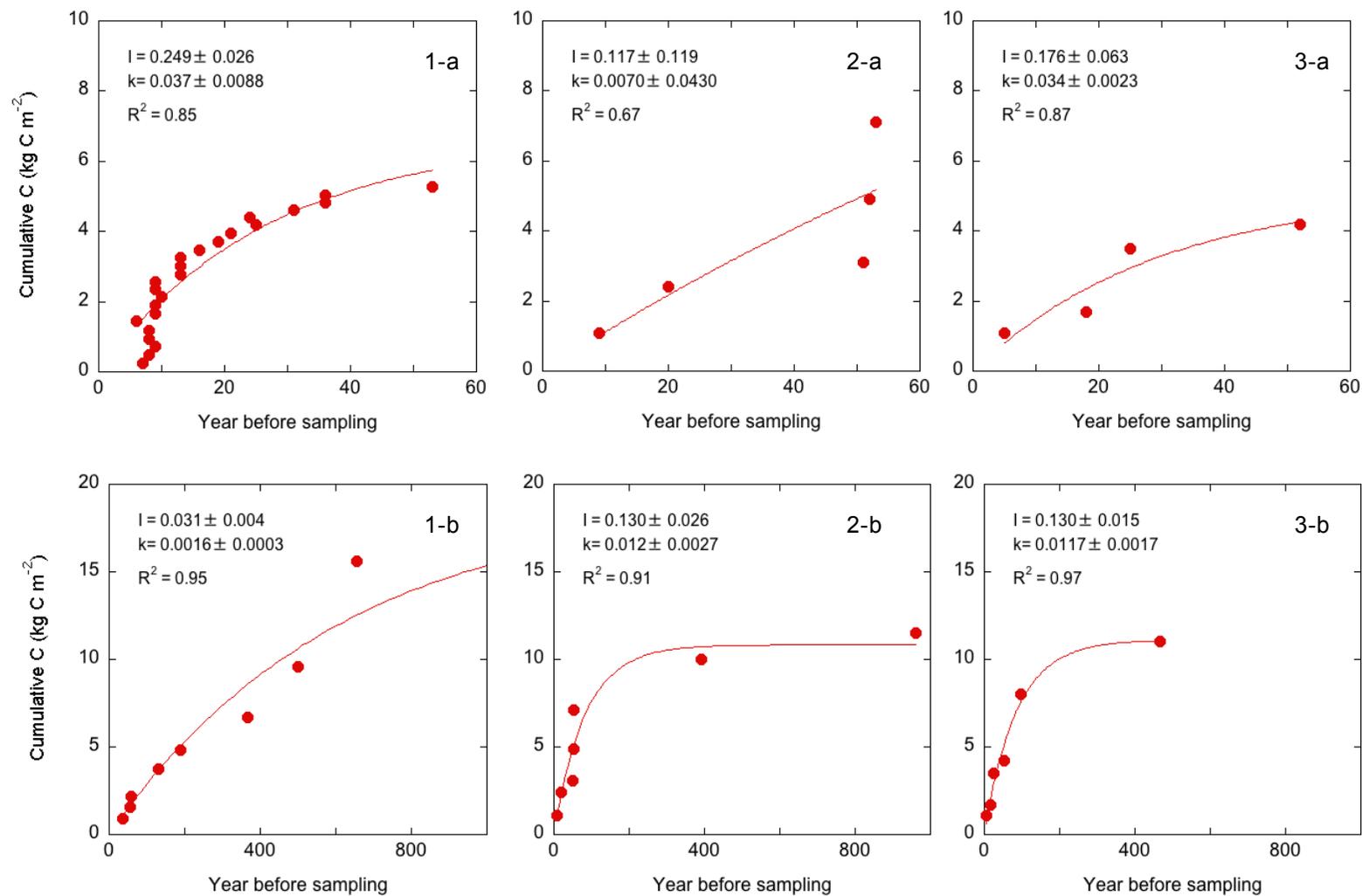
図(1)-6に、北方林(a:PF)、遷移帯 (b:TZ)、ツンドラ(c:SaT) における土壌炭素蓄積速度の検証結果を示す。上図は $\Delta^{14}\text{C}$ が0‰以上 (1950年以降に堆積) の有機物層、下図は有機物層と鉱物層 (1950年以前に堆積分も含める) を併せて行った。X軸にあたる試料採取日からの経過年数は、土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ を基に推定させている。これらのデータを前出の式 (2) に回帰させ、得られた係数から供給量 (I) と分解率 (k) を推定した。また、表(1)-2にこの手法で求めた、 I と k 、平均滞留時間 (RT)、1年当たりの分解量 (微生物呼吸量、 R_h) および炭素収支 (dC/dt) の結果を示す。表層の有機物層の累積炭素蓄積量は、PFで 5.3 kgC m^{-2} 、TZで 7.1 kgC m^{-2} 、SaTで 4.2 kgC m^{-2} に対して、 I と k は、PFで $0.249 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.037 yr^{-1} 、TZで $0.117 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.014 yr^{-1} 、SaTで $0.176 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.034 yr^{-1} と推定された。 k から計算されるRTは、PFで27年、TZで73年、SaTで29年と計算され、過去50~60年程度の期間では、TZで最もRTが長く、PFとSaTの間で大きな違いは見られなかった。

一方、鉱物層を含めた結果を見てみると、炭素蓄積量は、PFで 17.6 kgC m^{-2} 、TZで 11.5 kgC m^{-2} 、SaTで 11.0 kgC m^{-2} に対して、 I と k は、PFで $0.031 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.0061 yr^{-1} 、TZで $0.13 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.013 yr^{-1} 、SaTで $0.13 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と 0.012 yr^{-1} であった。RTは、PFで617年、TZで83年、SaTで85年と計算された。ただし、TZとSaTは、土壌の厚さが薄く、最下部の ^{14}C 年代は新しいため、永久凍土層を含むPFに比べて土壌形成年代が短い。 I と k の結果も、TZとSaTでは表層の有機物層の結果とほとんど変わらない。このため、PFと同様にこれらを単純には比較出来ない可能性がある。最北で最も冷涼なCTで深さ80cmまでのデータを用いて同様の方法で計算すると、炭素蓄積量は 36.7 kgC m^{-2} で

最も多く、 I 、 k ともに最も低い値を示し、 RT は4536年と最も長かった。これらの結果から、ツンドラでは長時間未分解の有機物が、北方林と比べて約1.5倍蓄積されている一方、 RT は7倍近く長いことが分かった。これは、ツンドラ生態系が長期的に蓄積した有機物を北方林よりも多く有していることを示しており、これらのツンドラ有機物の温暖化を含めた気候変動による脆弱性評価の必要性を強く示すものである。一つの例として、1950年以前に蓄積した土壌が現在（1950年以降）の分解率（滞留時間の逆数）で分解した場合、すべての有機炭素が分解するまでにかかる時間は、北方林（ 19.2 kgC m^{-2} ）は98年、ツンドラ（ 36.4 kgC m^{-2} ）は590年と計算される。

また、 k が求められたことで、対象とする期間の微生物分解量（ R_h ）の平均値が求められ、土壌における炭素収支（ dC/dt ）も推定可能となる。PFを例にすると、表層の有機物層の R_h は $0.195 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、 dC/dt は $0.052 \text{ kgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と計算された。アラスカ大フェアバンクス校内の北方林（樹齢約120年の mature black spruce forest）において報告されている渦相関法による CO_2 フラックス観測の結果⁶⁾では、5月から9月までの総一次生産量（GPP）は $1824 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ （ 0.497 kgC m^{-2} ）、生態系呼吸（RE）は $1346 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ （ 0.367 kgC m^{-2} ）、生態系交換量（NEE）は $-477 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2}$ （ $-0.130 \text{ kgC m}^{-2}$ ）と推定されている。この結果と比較すると、REに占める R_h は約54%と計算される。また、 $NEE \approx -NEP$ であるから、NEPのうち土壌圏に蓄積される割合は約40%と見積もられる。一方、永久凍土層を含む鉍物層を含めた場合には、PF、CTともに dC/dt はほぼ0に近いと推定された。

本研究で得られた I や k は、従来の方法では得られなかった炭素プールへの分配（ dC/dt ）と RT を求めるものであり、これまでブラックボックスとされていた土壌圏における炭素動態をブレークスルーするものである。生態学的なバイオメトリック法と微気象学的手法を併用した炭素循環研究より、生態系内への炭素吸収量の正確な推定やその変動が明らかになった一方で、土壌圏を初めとする非生物的炭素プールへの炭素蓄積の定量化とその機構の解明は残された課題である⁷⁾。温暖化を初めとする中・長期的な環境変化に対するフィードバックは、炭素プール毎に異なるため、単なる収支としての炭素吸収量の評価でなく、生態系の「どこ」に「どのように」炭素が蓄積されるかをきちんと理解することが不可欠である。



図(1)-6 アラスカ北方林 (1)、ツンドラ-北方林遷移帯 (2:TZ) およびツンドラ生態系 (3:SaT) における土壌有機物蓄積の経時変化。上図 (a) は表層の有機物層 (1-a: 深さ24cmまで、2-a: 深さ14cmまで、3-a: 深さ6cmまで)、下図 (b) は表層の有機物層と鉱物層 (1-b: 深さ70cmまで、2-b: 深さ22cmまで、3-b: 深さ17cmまで) の堆積量を示す。これらのデータを式(2)に回帰させて、 I (C Input) と k (分解率) を求めた。

表(1)-2 図(1)-5と式(2)から得られた I (炭素供給量)、 k (分解率)、滞留時間 (RT)、微生物呼吸 (R_h) および土壌炭素収支 (dC/dt)

	C (t) (kgCm ⁻²)	I^* (kgCm ⁻² yr ⁻¹)	k^* (yr ⁻¹)	RT (yr)	R_h	dC/dt (kgCm ⁻² yr ⁻¹)
Soil surface Organic layer						
Boreal forest	5.3	0.355±0.037	0.037±0.089	27	0.196	0.052
Forest-tundra ecotone	7.1	0.192±0.016	0.014±0.016	73	0.097	0.095
Alpine tundra	4.2	0.176±0.063	0.034±0.023	29	0.144	0.032
Soil surface Organic layer + mineral soil						
Boreal forest	17.6	0.031±0.004	0.0016±0.003	617	0.028	0.003
Forest-tundra ecotone	11.5	0.130±0.026	0.0120±0.003	83	0.138	-0.008
Alpine tundra	11.0	0.130±0.015	0.0117±0.002	85	0.129	0.001
Coastal Tundra	36.4	0.011±0.003	0.0002±0.001	4536	0.008	0.003

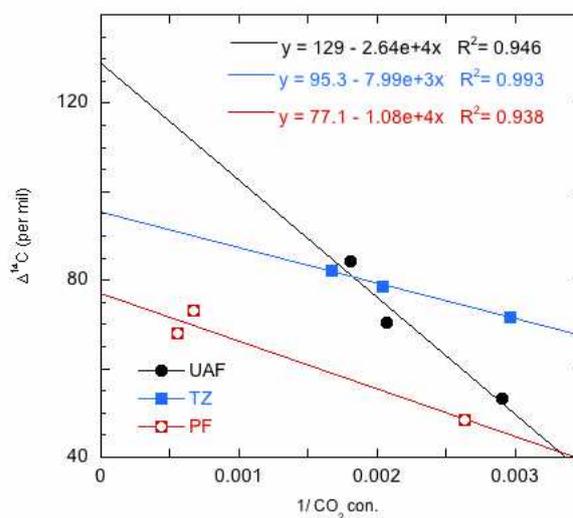
*式(2)に回帰して得られた値± (切片もしくは傾き) 誤差

(2) ¹⁴Cを用いた土壌からのCO₂の発生源の特定

土壌から放出するCO₂の発生源を検討するために用いる大気CO₂、土壌CO₂および土壌呼吸CO₂の採取を、2011年5月下旬から6月上旬、7月中旬、8月中旬から9月上旬の合計3回採取を実施した。加えて、新たにエリオットハイウェイ沿いで2010年に起こった火災の跡地 (EH) を定点観測点に追加し、2011年7月中旬、8月中旬から9月上旬に土壌CO₂および土壌呼吸CO₂の採取を実施した。また、アラスカ北部の3サイト (TZ、SAT、UT) では、2011年8月中旬から9月上旬に1回実施した。

図(1)-7は、北方林 (UAF) と遷移帯 (TZ) における土壌呼吸CO₂のCO₂濃度の逆数と¹⁴C濃度との関係を示している。土壌チャンバー中に溜まるCO₂は、大気CO₂と土壌から放出するCO₂の¹⁴C濃度の異なる2成分からなり、その¹⁴C濃度は2成分の混合比によって決まる。このため、CO₂濃度の逆数と¹⁴C濃度の間には、直前回帰の関係があり、回帰曲線の切片が呼吸CO₂の¹⁴C濃度 ($\Delta^{14}C_{SR}$) を示す。その結果、 $\Delta^{14}C_{SR}$ は、北方林 (UAF) で129 ‰ (1980年代年のバックグラウンド大気¹⁴CO₂に相当)、遷移帯 (TZ) で95 ‰ (1990年代年のバックグラウンド大気¹⁴CO₂に相当) であることがわかった。土壌有機物の $\Delta^{14}C$ と比較すると、 $\Delta^{14}C_{SR}$ は、UAFでは0-5cm深、TZでは0-3cm深の有機物の値と一致する。すなわち、遷移帯の方が活動層のより上部の有機物が分解されていることを示しており、遷移帯の有機物分解活性の高いことを示す結果となった。

図(1)-8左に、2011年8月に、UT、TZ、GC (北方林、シロトウヒ林) で採取された土壌CO₂の濃度プロファイルを示す。永久凍土直上で地温が0℃に近い土壌深層でも3000~6600ppmと高濃度CO₂が採取されており、土壌深層でも微生物による有機物の分解が進んでいることが予想される。

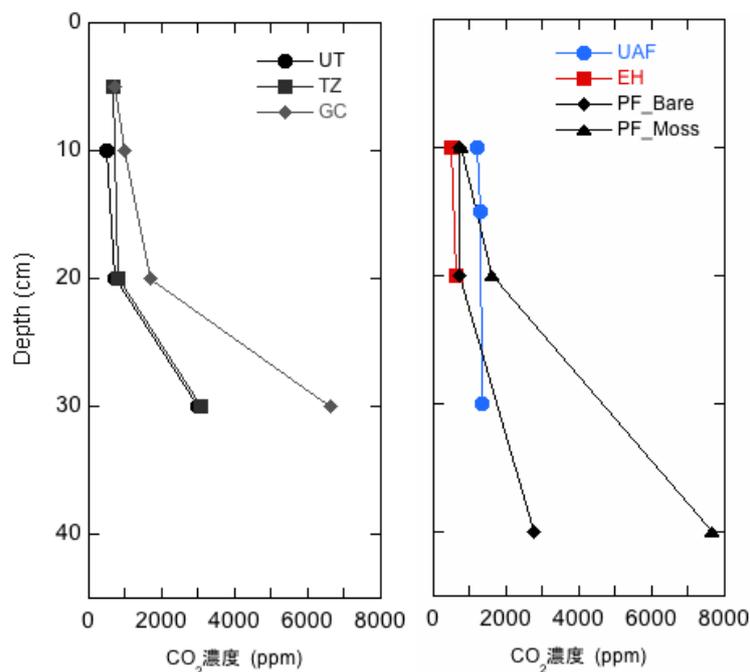


図(1)-7 土壌呼吸CO₂の放射性炭素量とCO₂濃度の逆数との関係 (回帰曲線の切片)

また、2011年7月にEHおよびPFサイトの火災跡地で採取された土壌内CO₂の濃度プロファイルを図(1)-8右に示す。火災後1年目のEHサイトでは土壌内CO₂濃度は、深さ20cmで600ppmと低かった。土壌表面は黒く、表面付近の地温は北方林サイト（UAFやGC）と比べると高いものの、乾燥しており、微生物の活性は低く、有機物の分解が進んでいないと予想される。

一方、火災後7年経過したPFサイトでは、植生が回復し始めており、土壌表面をコケが覆う場所での土壌内CO₂濃度は、深さ20cmで1600ppm、深さ40cmでは7660ppmと、EHサイトやPFサイトの裸地よりも高かった。土壌表面をコケが覆う場所では、裸地に比べて、土壌含水率が高いため、微生物の活性も高くなり、有機物の分解が進んでいると予想される。どちらの火災跡地でも、永久凍土は見られず、またリターの堆積が他にサイトと比較して少ないため、太陽光の熱が伝わりやすいと予想される。このような場所では、古炭素を含む有機物の分解が促進される可能性がある。

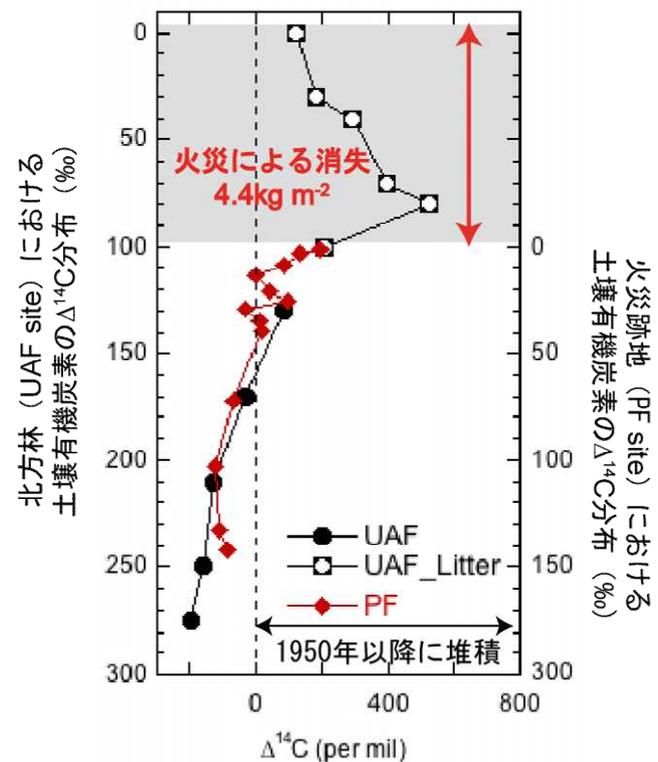
これらの土壌内CO₂の起源が、深層に堆積する古炭素か、表層から深層に移動してきた可溶性炭素であるか知るために、土壌内CO₂の¹⁴C測定を行った。2010年7月に採取した土壌内CO₂の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、北方林UAFサイトの深さ30cmで67%、火災跡地PFサイトの深さ40cmで35%であった。1960年の核実験以降の大気CO₂の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の経年変化と比較すると、PFサイトで分解される有機物の起源は1960年よりも古いと予想される。



図(1)-8 2011年8月にアラスカ北部のツンドラ (UT)、遷移帯 (TZ)、北方林 (シロトウヒ林、GC) で採取された土壌CO₂の濃度プロファイル (左)、および2011年7月に北方林 (UAF) と火災跡地 (EH: 火災後1年後、PF:火災後7年後) で採取された土壌内CO₂の濃度プロ

(3) ^{14}C を用いた自然火災による土壤炭素消失量の推定

図(1)-9は、フェアバンクス郊外の森林火災跡地 (PF) と北方林 (未火災地、UAF) で採取した表層土壤試料の ^{14}C 濃度の深度分布を示している。未火災地における ^{14}C 分布は、深さ8cmに核実験由来のBomb-Cピークが検出されており、深さ8cmまでは1960年以降に蓄積した炭素である。一方、火災地で採取したコアの ^{14}C プロファイルを見ると、未火災地のプロファイルと比較して、表層10cm分に相当する炭素の蓄積が欠けている。また、1950年以降のバックグラウンド大気 $^{14}\text{CO}_2$ の経年変化⁵⁾を対比させると、火災跡地の表層最上部の ^{14}C 濃度は1950年頃の大気 $^{14}\text{CO}_2$ の値と一致する。これらの結果から森林火災による焼失炭素量を計算すると、2004年の火災によって、過去60年間の蓄積量に相当する有機層 4.4kg C m^{-2} が火災により焼失したと推察される。



図(1)-9 フェアバンクス郊外の森林火災地と未火災地で採取した表層土壤の ^{14}C 濃度の深度分布

本研究で開発された核実験起源 $^{14}\text{CO}_2$ をトレーサーに土壤有機物の堆積状況を復元する方法は、これまで火災焼失量の定量的に求める手法としてブレイクスルーとなるものである。このような定量的な手法は、アラスカを含めた北極圏における自然火災における炭素消失量を試算する方法として高い確度を持つものであり、モデル開発の上で重要である。本研究では、 ^{14}C をトレーサーに用いて、過去数十年から数千年までの様々な時間スケールでの土壤炭素動態を明らかにすることができ、本研究のサブテーマ4で進められているモデル開発において、重要で定量的性の高いデータ提供が可能となった。

(4) 土壤培養実験による Q_{10} の算出

使用した土壤コア試料のサイト情報、深度、試料長、土壤層位、含水率、有機炭素含有量、全窒素、バルク密度、有機炭素の年代、 Q_{10} 値については、表(1)-3にまとめた。また $-5 \rightarrow 5^\circ\text{C}$ 、 $5 \rightarrow 15^\circ\text{C}$ 、 $15 \rightarrow 25^\circ\text{C}$ の Q_{10} 値の結果は、図(1)-10に示した。図(1)-10より、 $-5 \rightarrow 5^\circ\text{C}$ の Q_{10} 値は、生態系、活動層、凍土によらず、変動が大きく、 $4.5 \sim 58.4$ を示した。まずは北方林について詳しく見ると、BS1、BS2の活動層、凍土層では、それぞれ、 18.9 と 13.6 、および 7.3 と 4.5 であった。北方林では、凍土層に比べて活動層の Q_{10} 値が有意に高い傾向を示した。これらの土壤は、ともに活動層が有機質土壤、凍土層が鉱質土壤の違いがあった。さらにツンドラ土壤について、UT (高地ツンドラ)、LT (低地ツンドラ)、CT (沿岸ツンドラ) についてみると、活動層が、UT: 5.6 、LT: 9.1 、CT: 9.6 であった。また凍土層については、同じくUT: 58.4 、LT: 9 、CT: 33.8 であった。LTでは、活動層、凍土層ともに有意な際は認められなかったのに対し、UTとCTでは、ともに凍土層で極めて大きな値

が得られた。それぞれの土壌タイプについてみると、LT、UTは、ともに鈳質土壌、CTは活動層、凍土層ともに有機質土壌であった。

表(1)-3 培養試料の詳細と-5°C→5°C、5°C→15°C、15°C→25°CのQ₁₀値の計測結果

	BS1		BS2	
	Active layer	Permafrost	Active layer	Permafrost
Active layer depth (cm)	40-50		30	
Depth of sample (cm)	21-28	-65	16-36	80-90
Horizon designation	organic	mineral	organic	mineral
Volumetric moisture (%)			81.6	59.6
Organic carbon contents (%)	44.2	1.6	36.2	5.6
Total Nitrogen contents (%)	0.69	0.08	1.7	0.3
Bulk density (g cm ⁻³)	-	-	0.13	0.75
¹⁴ C age of SOM	Modern	4500±40	4090±35	1620±30
Q ₁₀ (-5-5°C)	18.9	7.3	13.6	4.5
Q ₁₀ (5-15°C)	2.2	2.5	2.5	2.3
Q ₁₀ (15-25°C)	2.1	2.1	2.2	2.3

	LT		CT	
	Active layer	Permafrost	Active layer	Permafrost
Active layer depth (cm)	28		28	
Depth of sample(cm)	20-30	52-62	24-34	52-64
Horizon designation	mineral/sandy	sandy	organic	mineral
Volumetric moisture (%)	47.2	27.2	40.9	74.8
Organic carbon contents (%)	3.8	0.1	13.4	8.8
Total Nitrogen contents (%)	0.13	2.5	0.7	0.4
Bulk density (g cm ⁻³)	1.3	1.6	0.75	0.42
¹⁴ C age of SOM	11520±50	12620±90	1870±30	2830±30
Q ₁₀ (-5-5°C)	9.1	9	9.6	33.8
Q ₁₀ (5-15°C)	1.9	2.7	2.8	2.1
Q ₁₀ (15-25°C)	1.7	2.6	2.2	2.3

	UT	
	Active layer	Permafrost
Active layer depth (cm)	30	
Depth of sample(cm)	25-35	55-66
Horizon designation	mineral	mineral/organic intrusion
Volumetric moisture (%)	33.7	66.7
Organic carbon contents (%)	6.9	11.6
Total Nitrogen contents (%)	0.2	0.5
Bulk density (g cm ⁻³)	1.2	0.6
¹⁴ C age of SOM	4330 ± 30	7800 ± 45
Q ₁₀ (-5-5°C)	5.6	58.4
Q ₁₀ (5-15°C)	2.1	2.7
Q ₁₀ (15-25°C)	2.4	2.6

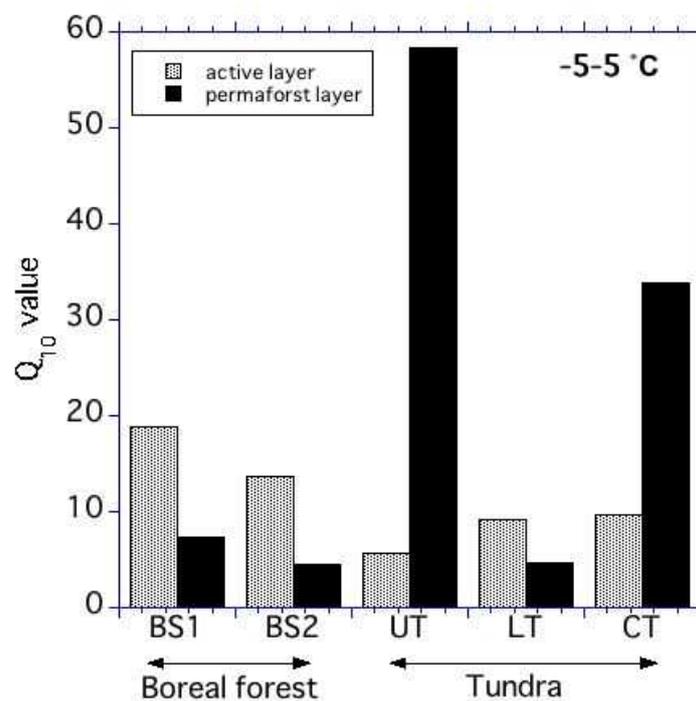
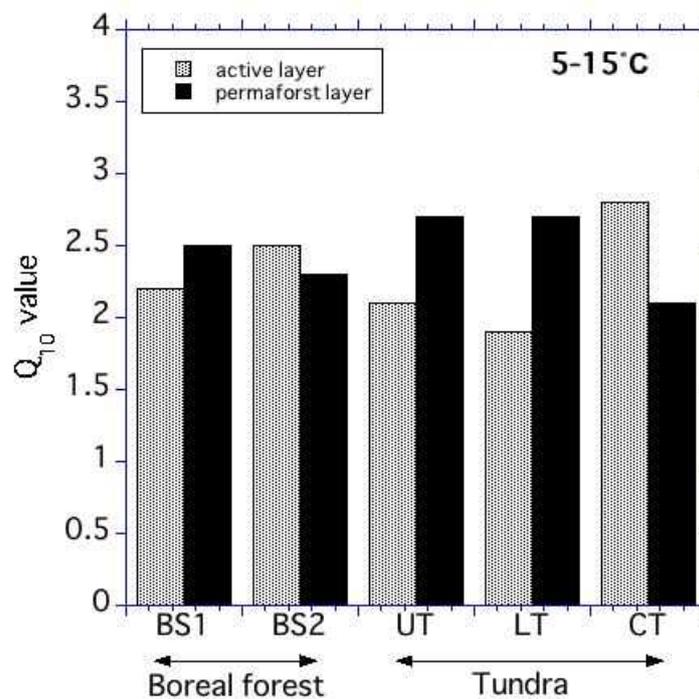
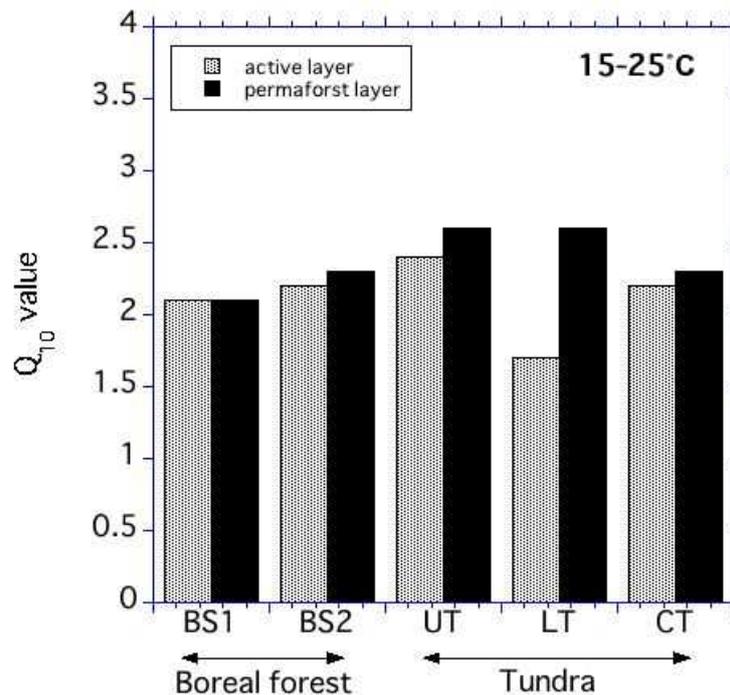


図 (1)-10-a 北方林 (BS1, BS2)、ツンドラ生態系 (UT, LT, CT) における-5- 5°Cの Q_{10} 値



図(1)-10-b 北方林 (BS1, BS2)、ツンドラ生態系 (UT, LT, CT) における5- 15°Cの Q_{10} 値



図(1)-10-c 北方林 (BS1, BS2)、ツンドラ生態系 (UT, LT, CT) における15- 25°CのQ₁₀値

以上から、UT、LT、CTにおいて、Q₁₀値の変動を説明する明確な理由は得られていないが、バルク有機物の年代結果から推定すると、UTは4300年から7800年、LTは、11500年から12600年と極めて古いのに対し、CTは、1800年から2800年と最も新しい有機物であった。CTは、沿岸ツンドラであることから、海水準の変動や海洋性プランクトンなども含めた堆積有機物の差異などの影響があるのかもしれない。しかしながら、現段階では明確な理由は不明であるが、ツンドラ生態系では、北方林に比べてQ₁₀値の変動幅が極めて大きいということである。これは温暖化による分解影響の実態把握において重要な示唆を示していることになり、今後さらに検討する必要があることが確認された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、凍土土壌からなる北極高緯度土壌圏における土壌炭素の温暖化による気候変動による脆弱性評価の為にモデル開発にとって重要なパラメーターとなる土壌炭素の平均滞留時間の実測に成功した。得られた滞留時間は、北方林、遷移帯、ツンドラ生態系毎に実測され、炭素蓄積量の試算と相まって、過去数千年以降の炭素蓄積量と平均滞留時間が明らかとなった。平均滞留時間の長いツンドラには、生産量が低い環境であるにもかかわらず、分解量が小さいことから北方林よりも多くの有機炭素が存在していることがわかり、北極土壌圏の温暖化によ

る影響評価の調査研究の重要性を示すものとなった。また北方林における自然火災による炭素焼失量の推定からは、一度の火災により失われる炭素量を実測するための手法開発に成功し、自然火災の多発する北極地域における炭素動態モデルの開発において重要な定量的データを提供することが可能となり、今後開発されるモデルへの重要な実測データとなることはまちがいないといえる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

CO₂など温室効果ガスの削減に対する国際的な取り組みが進められている中、ポスト京都の枠組について国際交渉がすでに始まり、その主要な議題は「大気中の温室効果ガスの長期的な安定化目標の設定」である。その決定を理論的に裏付けるため、陸域生態系ごとの温室効果ガスの排出・吸収量の算定とその変動性に関する科学的知見の整備が急務である。温暖化をはじめとする環境変動が北極圏陸域生態系の土壌炭素蓄積に及ぼす影響の解明と将来予測は、将来の気候変動予測における不確実性の軽減の点からも、重要な地球環境研究の課題であり、今回得られる知見は、まさに第6次IPCC評価報告書においても高い貢献が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで実施されている野外観測については、米国アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター (IARC) のLarry Hinzman所長、原菌芳信氏、岩田拓記氏の協力により、アラスカ大学が管理・運営するフラックス観測サイトでの試料採取等を実施している。本研究の成果である土壌炭素蓄積量およびCO₂の発生源に関するデータを提供することで、彼らの研究テーマである微気象観測に基づく北方森林生態系および火災跡地における炭素収支の研究に貢献する。また、同校IARCの岩花剛研究員および同校水環境研究センター吉川謙二教授には、永久凍土までの試料採取、および湿地における試料採取、同校School of Agriculture and Land Resource Management・Chien-Lu Ping教授にはツンドラ生態系における試料採取に協力いただいた。加えて、同校IARCのKim Yongwon 助教授の協力を得て、アラスカ縦断観測を実施に関する協力を頂いた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) H. IWATA, M. UEYAMA, Y. HARAZONO, S. TSUYAZAKI, M. KONDO, and M. UCHIDA: SOLA, 7, 105- 108, (2011)
 “Quick Recovery of Carbon Dioxide Exchanges in a Burned Black Spruce Forest in Interior Alaska”
- 2) M. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO and M. UCHIDA: Open Journal of Ecology 2, 2, 90-95, (2012)
 ”The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal

dynamics”

- 3) Y. KIM, S-D. KIM, H. ENOMOTO, K. KUSHIDA, M. KONDO, M. and UCHIDA: Alaska, Polar Science, 7, (2013)

“Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway” (in press)

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 近藤美由紀, 内田昌男, 金龍元, 高橋善幸, 内海真生, 篠崎鉄哉, 榎本浩之, 柴田康行: 日本地球惑星科学連合 2010年大会 (2010)
「放射炭素同位体を用いたアラスカツンドラ・タイガ生態系における土壌有機炭素の滞留時間の推定」
- 2) M. KONDO, M. UCHIDA, H. ENOMOTO, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, Y. KIM, and Y. SHIBATA: Int. Symp. Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, Sapporo, Japan, 2010
“Snow conditions in Northern Alaska and possible influences on soil-carbon-dynamic-related carbon assimilation and CO₂ emission.”
- 3) M. UCHIDA, M. UCHIDA, M. KONDO, and Y. SHIBATA: Organic matter stabilization and ecosystem functions SOM 2010, France, 2010
“Heterotrophic microbial decomposition of soil ancient carbon in Norway Arctic; First evidence from molecular level natural radiocarbon analysis.”
- 4) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, Y. TAKAHASHI, T. SHINOZAKI, M. UTSUMI, and Y. SHIBATA: Environ. Radioact. 2010, Roma, Italy, 2010
“Radiocarbon constraints for soil carbon accumulation and carbon release of boreal forests and tundra ecosystem in Alaska. “
- 5) M. UCHIDA, M. UCHIDA, M. UTSUMI, M. KONDO, Y. TAKAHASHI, Y. SHIBATA: 2nd Int. Symp. Arctic Res., Tokyo, Japan, 2010
“ The heterotrophic respiration using old carbon in arctic soil: Insights from compound-specific radiocarbon analysis.”
- 6) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, and Y. SHIBATA: 2nd Int. Symp. Arctic Res., Tokyo, Japan, 2010
“ Constraining radiocarbon signature of soil organic matter in tundra and boreal forests, Alaska.”
- 7) M. UCHIDA, M. UTSUMI, M. KONDO, Y. TAKAHASHI, and M. UCHIDA: AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010
“Evidence of heterotrophic microbial decomposition of preaged carbon in Arctic soil; Insights from molecular level natural radiocarbon analysis.”
- 8) M. KONDO, U. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, and Y. SHIBATA: AGU 2010 Fall Meet., San Francisco, USA, 2010
“Radiocarbon-based estimates of residence times for soil organic carbon of Tundra and Boreal forests in Alaska.”

- 9) Y. HARAZONO, H. IWATA, M. UEYAMA, S. TSUYUZAKI, M. UCHIDA, M. KONDO, Y. TAKAHASHI, M. UTSUMI: ISAM2011, Kagoshima, Japan, 2011
 “Vegetation recovery, changes in fluxes and micrometeorology after wildfire of a black spruce forest on permafrost in Alaska. “
- 10) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI., T. SHINOZAKI, Y. TAKAHASHI, M. ADACHI, and Y. SHIBATA: Arctic Sci.Summit Week 2011, Seoul, Korea, 2011
 “Constraining radiocarbon signature of soil organic matter in Alaskan Arctic soil: Implication for importance basis examining the impact of climate warming on CO₂ release.”
- 11) M. KONDO, A. HOSHINO, S. MURAYAMA, T. SHINOZAKI, R. WAGAI, Y. SHIBATA, and M. UCHIDA: AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA (2011)
 “Investigation of carbon turnover and CO₂ evolution in soil organic carbon from forest soils: Insight from radiocarbon analysis of soil density fractions and soil respired CO₂”
- 12) T. SHINOZAKI, M. UCHIDA, M. KONDO, K. YOSHIKAWA, S. NOMOTO, and M. UTSUMI: AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA (2011)
 “Reconstruction of Alaskan Arctic environmental changes for past 1 ka using $\delta^{13}\text{C}$ of peat cellulose and their ^{14}C wiggle-match dating”
- 13) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, M. ADACHI, Y. and SHIBATA: The 4th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium, Tokyo, Japan (2011)
 “Radiocarbon Signature of Soil Organic Carbon in Tundra and Boreal Forests, Northern Alaska”
- 14) 内海真生、近藤美由紀、安立美奈子、天野(佐藤)千恵、内田昌男: 第59回日本生態学会 (2012)
 「アラスカ北極圏陸上生態系の土壌呼吸特性解析」
- 15) 榎本浩之、内海真生、内田昌男、伊勢武史、森健介、近藤美由紀、Nuerasimuguli Alimasi、佐々木文彬、Younwon Kim: 第3回極域科学シンポジウム (2012)
 「アラスカ広域の積雪および土壌温度・水分の季節変化、- 土壌分解とモデリングのための基礎物理情報取得 - 」
- 16) H. ENOMOTO, Y. AUZUMA, H. HAYASAKA, M. HIRABAYASHI, K. G.-AZUMA, T. KADOTA, H. YABUKI, T. OHATA, S. TAKAHASHI, R. KUSAKA, T. SHIROKAWA, N. ALIMASI, T. AOKI, S. SUGIYAMA, K. TATEYAMA, K. SHIMADA, M. UTSUMI and M. UCHIDA : the 3rd symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2012.
 “Arctic weather in 2012 summer and influences on Arctic Environment”
- 17) C. AMANO, M. UTSUMI, M. UCHIDA, M. KONDO, M. ADACHI, and T. YAMAMOTO : 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012
 “CO₂, CH₄ fluxes and bacterial diversities at terrestrial ecosystem along the trans-Alaska pipeline in tundra and boreal forest, Alaska.”
- 18) S.F. RELLA, and M. UCHIDA : 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012
 “Sedimentary organic matter and carbonate variations in the Chukchi Borderland in association with ice sheet and ocean-atmosphere dynamics over the last 155 kyr.”
- 19) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. SHIBATA, H. IWATA, and Y. HARAZONO : 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012

“Estimation of Carbon loss by fire in a burned black spruce forest in interior Alaska using radiocarbon”

- 20) K. MORI, T. ISE T, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO, and M.UCHIDA: Third International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2013

“The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics.”

- 21) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. SHIBATA, H. IWATA, and Y. HARAZONO : Third International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2013

“Estimation of C loss by fire in a burned black spruce forest in interior Alaska using radiocarbon”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Arctic Climate Impact Assessment, 2005, Cambridge Univ. Press.
- 2) Y. KIM, S-D. KIM, H. ENOMOTO, K. KUSHIDA, M. KONDO, M. and UCHIDA: Polar Science, 7, (2013)
“Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway, Alaska” (in press)
- 3) M. UCHIDA, Y. SHIBATA, M. YONEDA, T. KOBAYASHI, and M. MORITA: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 223–224, 313–317 (2004)
“Technical progress in AMS microscale radiocarbon analysis”
- 4) S.E. TRUMBORE, J.W. HARADEN: Journal of Geophysical Research, 102, 28817–28830. (1997)
“Accumulation and turnover of carbon in organic and mineral soils of the BOREAS northern study area.”
- 5) I. LEVIN, B. KROMER, S. HAMMER: Tellus B, 65, 20092 (2013)
“Atmospheric $\Delta^{14}\text{CO}_2$ trend in Western European background air from 2000 to 2012”
- 6) H. IWATA, M. UEYAMA, Y. HARAZONO, S. TSUYAZAKI, M. KONDO, and M. UCHIDA: SOLA, 7, 105– 108, (2011)
“Quick Recovery of Carbon Dioxide Exchanges in a Burned Black Spruce Forest in Interior Alaska ”

7) 大塚俊之：日本生態学会誌, 62, 31-44 (2012)

「森林生態系の炭素循環：Takayama Forestでの10年間で分かったことと、分からなかったこと」

(2) 微気象・物理・水文プロセスの総合観測と変動量評価に関する研究

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構

国立極地研究所 北極観測センター

榎本浩之

平成22～24年度累計予算額：6,093千円

(うち、平成24年度予算額：1,201千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

北極高緯度域の土壤有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化のための検証作業には、代表的な土壤における温度、水分量などの測定データが必要である。アラスカを南北に縦断するトランセクトに沿った年間モニタリングサイトにおける年間の地表付近の気象・積雪状態（積雪深・積雪内温度プロファイル・熱伝導）・地温プロファイル・土壤水分・凍結深の時間変化を計測し、これによって広域の物理環境の時間変化を通年にわたりモニターした。アラスカ北部では冬期の積雪の多寡が、地面の冷却、凍結状態に影響し、融雪後の昇温に影響する。また融雪水は土壤水分にとっても重要な影響を持つ。各地に配置した観測機器の通年のデータから、これらの地域差、季節変化の特徴を明らかにすることが出来る。ここで得られる物理情報を温暖化影響予測の高精度化に向けたモデル開発を実現するための検証データ、また土壤観測計画の立案・最適化のための情報として活用するための観測を行なった。また、凍土地域に見られる地表面状態の不均一性についての検討を行い、斜面の方向と傾斜による積雪深の違いについて地理情報及び現場広域観測データより分類し、主に斜面方向の影響の違いが現れることを確認した。斜面方向が、モデル化にとっても基本的な条件として重要であることがわかった。

【キーワード】 寒冷圏、積雪、冬季冷却、凍結融解、土壤水分、気候変動。

1. はじめに

高緯度域の土壤における炭素分解の変化は温暖化による炭素循環の変化を考える上で重要なプロセスであり、その解明が気候変動研究に大きく寄与する。寒冷地の炭素分解をコントロールする土壤温度、水分量の状態を明らかにすることにより、土壤の物理状態の把握、さらにその再現モデル^{1), 2)}の高精度化のための検証として使用することが出来る。変動する北極圏の気候に関して地表面の温度変化、積雪との関連を探ることを目的として気象および積雪状況の現地観測を実施した。その実態や影響プロセスを調べるアプローチとして、気温、地温、雪温、土壤水分の観測を行なった。観測対象域として、アラスカ北部を選んでいる。アラスカ北部にはフェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ（ツンドラ）が分布し、地形、植生、気候のコントラストがある。

このアラスカ北部では冬期の積雪の多寡が、地面の冷却、凍結状態に影響し、融雪後の昇温に影響する。また融雪水は土壤水分にとっても重要な影響を持つ。アラスカ北部の永久凍土帯はシベリアと同様、夏季の気温は高い。しかし、冬季の低温が著しく、また低温期間が長い。土壤が

凍結していない期間はいつ始まり、いつ終わるのかといった基本サイクルの確認と、その中での雪や融雪水と凍土の融解水の季節サイクルにおける役割を確認することが必要である。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、変動する北極圏の気候に関して地表面の温度変化、積雪との関連を探ることを目的として、土壌温度、水分量の地域差、季節変化の特徴を調査した。ここで得られる物理情報を温暖化影響予測の高精度化に向けたモデル開発を実現するための検証データ、また土壌観測計画の立案・最適化のための情報として活用するための観測を行なう。

ツンドラ、森林帯と植生の大きなコントラストを持つ地域における、気温、積雪、凍結・融解の基本サイクルの違いを確認することは、広大な凍土域の現場観測では、観測地域の空間代表性も問題になる。本サブテーマでは多点観測と移動観測により、地域性の違いを観察する。

また、凍土地域に見られる地表面状態の不均一性の影響についての検討を行い、モデル化にとっても基本的な条件の確認を行った。また、積雪分布のアラスカの広域及び地形による違いについても検討を行う。

3. 研究開発方法

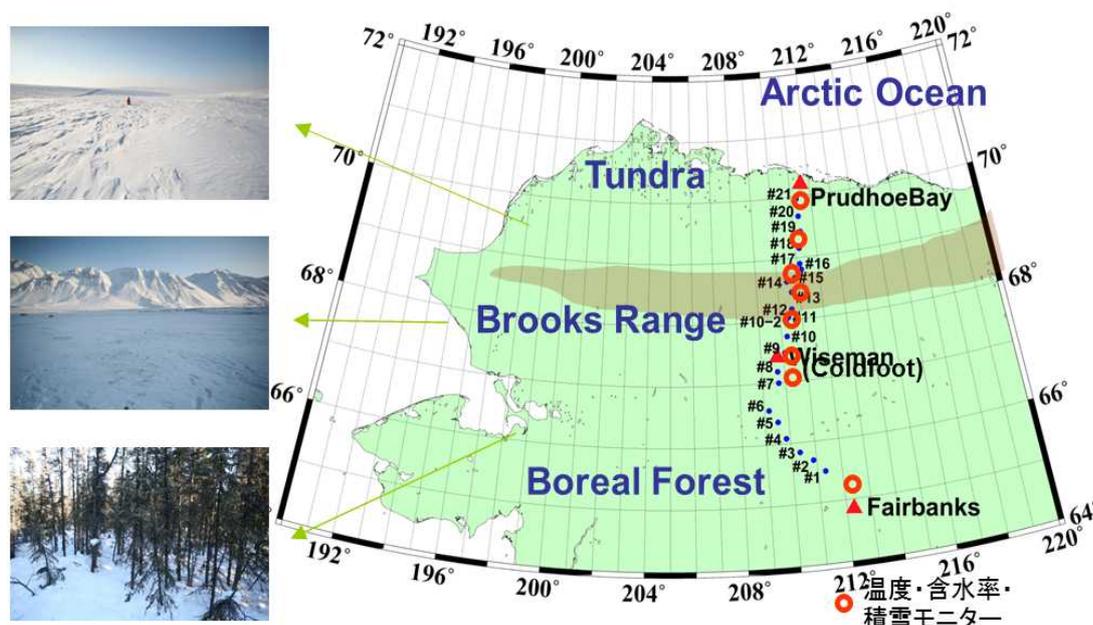
(1) アラスカ北部における観測の展開

アラスカ大学との共同研究により温度記録ロガーをアラスカ北部7地点に設置して、気温、雪温、地温、土壌水分の観測を維持してきている(図(2)-1)。地中5cm、10cm、20cm、30cm、40cm、50cmなどに地温計を設置し、1時間インターバルで通年の温度モニターを行なった。地上では気温測定のほか、高さ10cm間隔で温度センサーを固定し、冬期の積雪中の温度分布や温度勾配を見た。この観測データを整備し地中の温度、水分に関する特徴を明らかにする。

この研究では、地域的な違いを検討できる広域データを得るために、フェアバンクスを起点に北極海沿岸に位置する油田基地の町Deadhorseまで、アラスカを南北に縦断する総延長約700kmの間で石油パイプラインに沿って整備されたダルトンハイウェイ沿いにアラスカの代表的な植生を選び、定点観測サイト(図(2)-1赤丸: UT(#19)、SAT(#13)、TZ(#11)、BC(#7、#9))、UAF(Fairbanks上))を設定した。

観測地点の分布。フェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ(ツンドラ)が分布し、地形、植生、気候のコントラストがある。本研究における定点観測は、北から、CT(Coastal Tundra)、UT(Upland Tundra)、SaT(Subarctic Tundra)、TZ(Transfer Zone of Ecotone)、BC(Boreal Forest)、UAF(University of Alaska: Boreal Forest)である。

これらの地域に、データロガーに接続した温度計および水分計、インターバルカメラなどを設置した。冬季にはマイナス40℃以下に温度が下がるため低温耐性に注意しながら、機器の選択と設置を行なった。また、凍土帯の問題は夏季の水にもある。いたるところ融解水で覆われるので、防水にも注意して設置した。さらに、アラスカ特有の問題である野生動物によるセンサーやケーブルの破壊がある。動物からセンサー類を守るため、埋設やケーブルの保護カバーの利用などをおこなった。



図(2)-1 観測地点の分布。フェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ（ツンドラ）が分布し、地形、植生、気候のコントラストがある。北から、CT(Coastal Tundra, #21)、 UT(Upland Tundra, #19)、 SaT(Subarctic Tundra、#13)、 TZ(Transfer Zone of Ecotone、 #11)、 BC-1(Boreal Open Forest、 #9)、 BC-1(Boreal Compacted Forest、 #7)、 UAF(University of Alaska: Boreal Forest、 Fairbanks上赤丸)という観測点がある。

(2) 長期温度、土壌水分データの整備および解析

アラスカの観測点における微気象を観測しデータロガーに蓄積する。各観測点の気温、積雪、凍結に関する観測結果から年間の気温変化、水分変化、凍結融解のタイミング、土壌の冷却度などを調べた。

北極高緯度域の土壌有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化のための検証作業には、代表的な土壌における温度、水分量などの測定データが必要である。アラスカを南北に縦断するトランセクトに沿った年間モニタリングサイトにおける年間の地表付近の地温・土壌水分・凍結深の時間変化を計測した。アラスカ北部では融雪の早期化が報告されているが、冬期にみられる大きな気温変化幅は土壌の凍結状態にも影響する。融雪水は土壌水分にとっても重要な影響を持つ。これらの地域差、季節変化の特徴を明らかにすることが出来る。ここで得られる物理情報を温暖化影響予測の高精度化に向けたモデル開発を実現するための検証データ、また土壌観測計画の立案・最適化のための情報として活用するための観測を行なった。

アラスカ北部にはフェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ（ツンドラ）が分布し、地形、植生、気候のコントラストがある。このアラスカ北部では冬期の積雪の多寡が、地面の冷却、凍結状態に影響し、融雪後の昇温に影響する。また融雪水は土壌水分にとっても重要な影響を持つ。図(2)-1中の観測地点で、これらの特徴を調査した。

(3) 積雪広域分布と地表面凍結状況

1) 冬期積雪状態の広域観測

アラスカ北部にはフェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ（ツンドラ）が分布し、地形、植生、気候のコントラストがある。このアラスカ北部では冬期の積雪の多寡が、地面の冷却、凍結状態に影響する。この地域の広域縦断観測を実施し、積雪分布を明らかにした。

積雪開始、融雪開始、積雪（融雪）終了、土壌凍結開始は衛星観測によっても推定できる。衛星データと組み合わせることにより水平分布の把握が可能であり、広域代表性も確認できる。また、現地観測データは観測年が短期であるが、衛星データと組み合わせることにより、長期の評価が可能となる。また、凍土地域に見られる地表面状態の不均一性についての検討を行い、斜面の方向と傾斜による積雪深の違いについて地理情報及び現場広域観測データより分類し、その特徴を探った。

4. 結果及び考察

(1) アラスカ北部における観測の展開

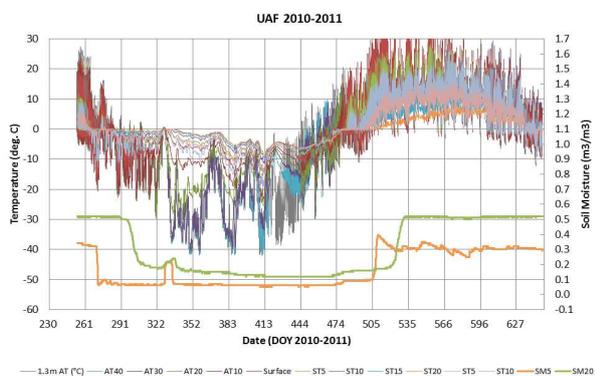
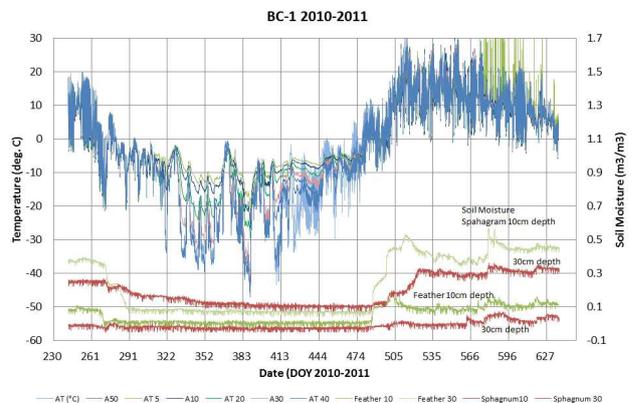
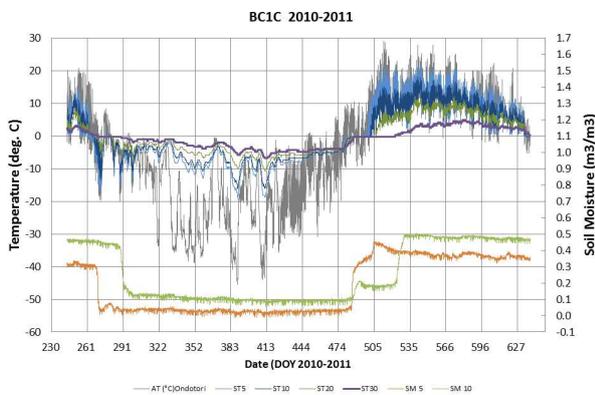
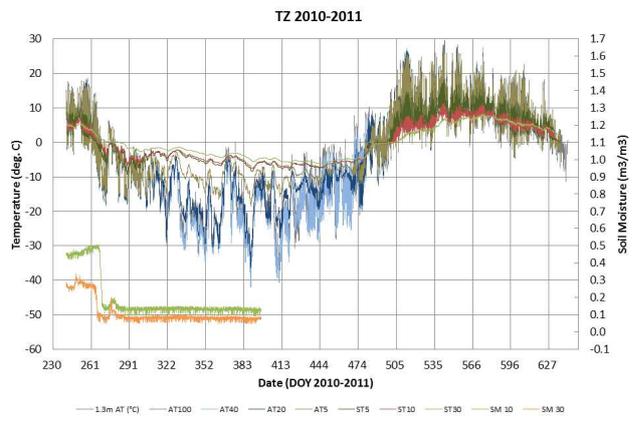
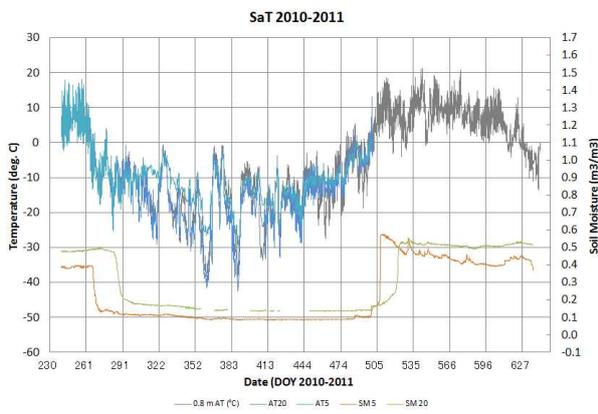
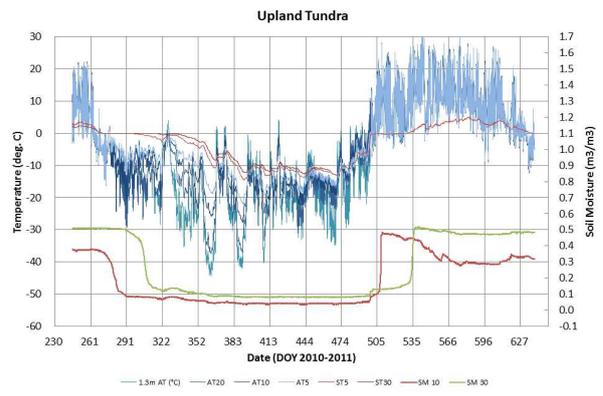
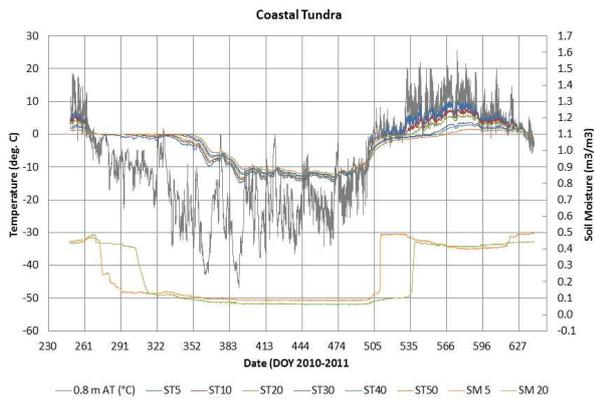
アラスカ大学との共同研究により温度記録ロガーをアラスカ北部7地点に設置して、気温、雪温、地温、土壌水分の観測を維持した。地中5cm、10cm、20cm、30cm、40cm、50cmなどに地温計を設置し、1時間インターバルで通年の温度モニターを行なった。北部ツンドラ域では多い土壌水分やタソク植生のために地表面形状が複雑である、このため地中の熱流の違いをみるために観測機を設置した。

フェアバンクスより北極海沿岸のプルドベイ周辺までの700kmの間に自動気象観測器を設置した。図(2)-2にはルート上に設置した7か所の観測データを示す。地表面付近（表面～10cm深）は夏季に10～20℃まで昇温する。20cm深では上限は5℃程度である。

北方森林帯では隣接した数m以内の場所でも林床の水分差がコケ（Sphagnum>Feather）の種類によりみられる（BC-1）。Feather では低い値が続いている。これは融雪後でも同様であった。Sphagnum では変動が大きい。

土壌水分は春季の融雪水によるものが大半を占め、夏季の降水に短期変動が重なる。秋季の土壌の凍結開始は深さによって時間差があるが、春季の凍結土壌の融解は、異なった深さでも短い時間の間に連続して起きる。表面からの積雪融解水の浸透が急速に温度を均一化する。

フェアバンクスのアラスカ大学（UAF）サイトでも、同様の結果が得られたが、北方森林帯の気温年較差は大きく、また冬季の短期変動も大きい。冬季に2週間の間に -40℃以下から0℃まで昇温するなど、40℃近い変化が記録されている。特に12月の昇温では、積雪や地温が一気に0℃まで増加し、土壌水分の記録が上がっていることも示されている。



図(2)-2 2010-11年の観測データ。フェアバンクスより北極海沿岸のブルードベイ周辺までの間の7地点のデータを示す。上より、北方の、CT(Coastal Tundra), UT(Upland Tundra), SaT(Subarctic Tundra), TZ(Transfer Zone of Ecotone), BC-1(Boreal Open Forest), BC-1(Boreal Compacted Forest), UAF(University of Alaska: Boreal Forest)。

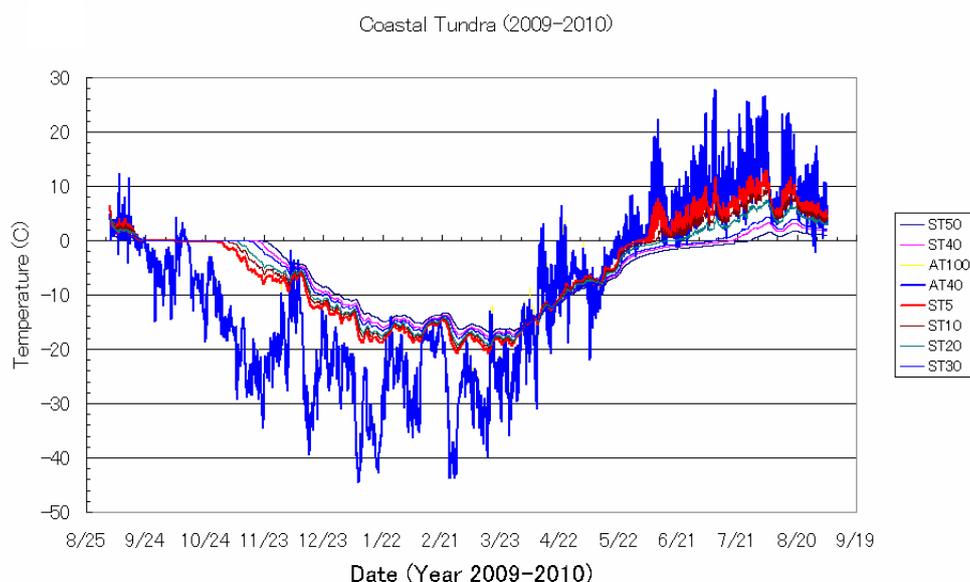
冬季の昇温は気温変化としては認識されやすいが、それが積雪や土壌中にも影響していることは驚きである。冬期間といえども、積雪内や土壌内の気温が成層して変化が少なくなっている訳でなく、大きな変化が起こりうることを示している。積雪・土壌の温度勾配の消滅、積雪や土壌の融解が起きている。このようなイベントは短期間であるが、冬季の積雪、土壌中にどのような影響を起こすか興味深い。なお、これらの変動は短期間で起きるため、月平均気温では冬季の気温変動性は見出すことはできない。

これらの地点毎の観測結果より、詳細な鉛直プロファイルとともに、積雪の開始、融雪の開始・終了、土壌凍結開始と終了がわかる。積雪の開始は地表付近センサーの温度記録の日較差の減衰よりわかる。融雪開始終了は、気温および雪温度の 0°C 以上への上昇、融解水の移動は雪層温度の均一化、土壌の凍結・融解は土壌水分センサーの急降下により判別できる。

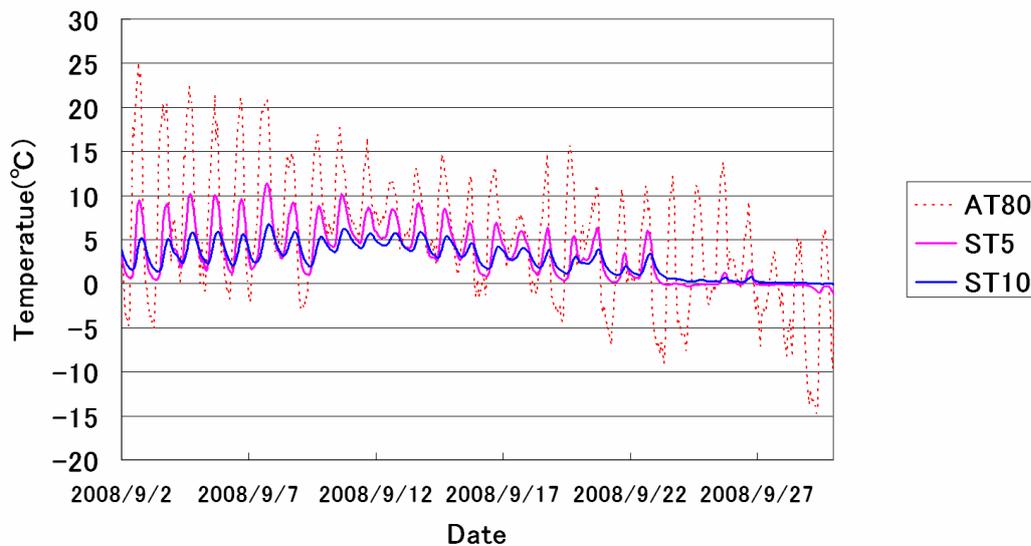
(2) 長期温度、土壌水分データの整備および解析

アラスカ北部の温度・水分変化状況についてデータを整理した。各観測点の気温、積雪、凍結に関する観測結果から、北方森林の方がツンドラより低温であるが、高度の高い山岳ではかえって温暖であることがわかった。これは高緯度域の強力な接地逆転層の存在によるためであり、冬期現場観測などでもしばしば蜃気楼が観察されることから強い温度成層の存在を知ることが出来る。このような強力な接地逆転層の形成と頻度が冬期の土壌の凍結に影響する。一方で積雪は土壌の冷却を妨げるため雪の状態が春の凍結状態に重要である。

土壌水分は海岸ツンドラとツンドラには15~20%の差がある。UAFサイトは地面一面をコケで覆われており土壌水分が多くなっている。



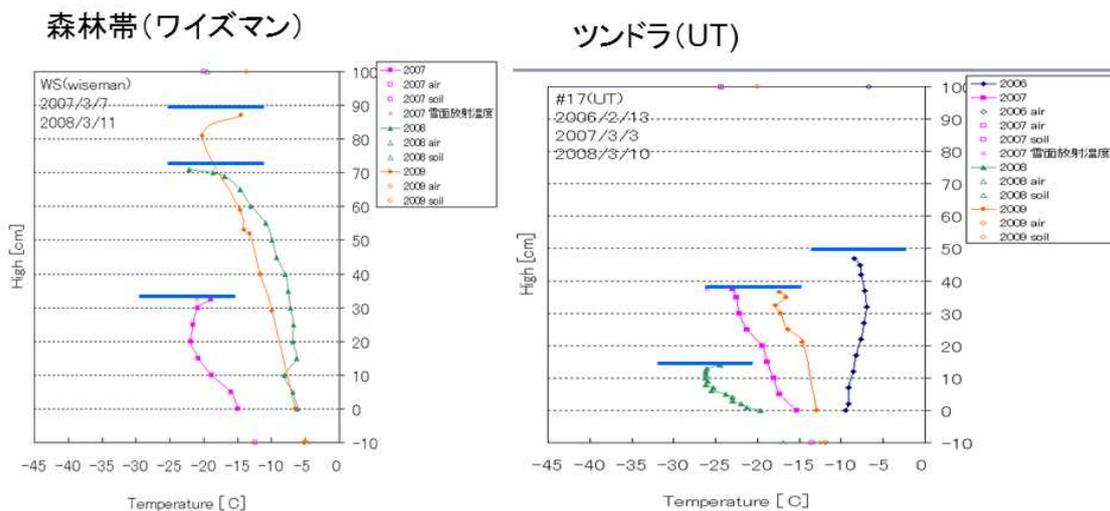
図(2)-3 アラスカ北部ツンドラにおける温度変化の季節サイクル。



図(2)-4 アラスカ北部北方森林（アラスカ大学）における夏期の土壌温度上昇と下降、凍結開始の様子。（AT80:気温80cm高さ、ST5：地温5cm深、ST10：地温10cm深）

（3）積雪広域分布と地表面凍結状況

アラスカ北部の積雪分布は、北方森林では1 m近くあるが、ツンドラでは20～30 cm程度である。また、また積雪期間は200～230日である。凍結期間はツンドラのほうが長い。また地域により差が大きく、210～270日の幅があった。地面の冷却状況については、積雪の多少の影響を受け、森林域の深い積雪下では冷却は -10°C 程度までであるが、ツンドラ域の浅い積雪下では冷却は -20°C 程度まで進んだ(図(2)-5)。



地表面：森林域の深い積雪下では
冷却は -10°C 程度まで

ツンドラ域の浅い積雪下では
冷却は -20°C 程度まで

図(2)-5 アラスカ北部北方森林およびツンドラにおける積雪下の地表面冷却.

表(2)-1 各観測点の気温、積雪、凍結に関する観測結果

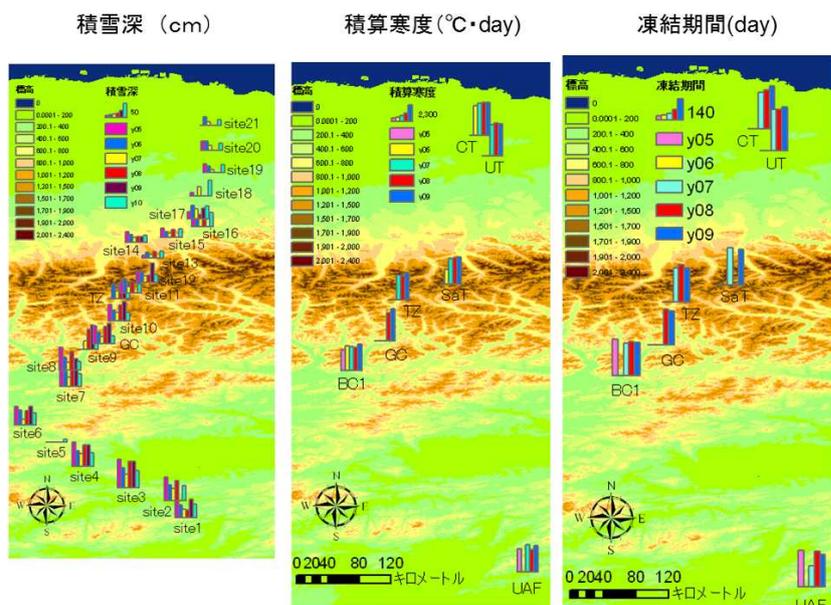
2009年	北方森林帯				ツンドラ帯		
	UAF	BC1	GC	TZ	SAT	UT	CT
標高(m)	247	348	433	692	1060	424	40
最低気温(°C)	-49.1	-43.1	-46.0	-39.6	-42.1	-45.4	-43.2
積算寒度(°C・day)	3731	3729	4594	3866	3866	4624	4573
最大積雪深(cm)	66*	110以上	72*	93	66*	36.5*	25
積雪時期	2008/9/22	2008/9/30	2008/10/4	2008/9/30	2008/10/2	2008/10/1	2008/10/5
積雪期間(日間)	201	231	211	228	207		206
凍結時期(日)	2008/9/25	2008/9/28	2008/9/30	2008/9/27	2008/9/19	2008/9/15	2008/9/27
融解時期(日)	2009/4/24	2009/4/27	2009/5/6	2009/4/28	2009/4/30	2009/6/2	2009/6/16
凍結期間(日間)	208	211	218	215	223	270	272
地温最低温度(°C)	-9.9	-5.7	-8.1	-7.9	-8.2		-19
停滞期間(凍結時)	38	19	4	14	39	32	56
停滞期間(融解時)	11	23	15	22	16		19

*は断面間即時の積雪深
#は仮の値(平均値)

低温：森林>ツンドラ>山岳
積雪：森林>ツンドラ
凍結期間：ツンドラ>森林
地面冷却：-1.9(沿岸ツンドラ)~-6°C
凍結開始期(0°C滞留期間)：~2ヶ月
積雪期間：200~230日
210~270日

沿岸ツンドラ域では凍結開始期の0°C滞留期間が2ヶ月に及んだがこれは土壌水分のためである。積雪が少ないため、積雪の断熱効果がなく、その後の冷却は急速に進む。ツンドラでは融雪開始は遅いが、積雪が少ないため融雪期間は短い。各地の温度状況、積雪、凍結については表(2)-1の様になる。

各地の積雪深、気温記録から積算寒度、また地表面の温度が0°C以下の凍結期間について観測経路上に並べると図(2)-6のようになる。積雪深はツンドラで少なく、森林域では多い。積算感度はツンドラで大きい。アラスカ北部では4000°C・dayとなっており、北海道の東部の2倍以上である。アラスカ内陸域など最高気温は北海道と変わらないので、季節コントラストの大きさと冷却の大きさが特徴的である。夏季の昇温も長くは続かず、8月には冷却が始まり、山間部や北部では降雪も起きている。



図(2)-6 アラスカ北部ダルトンハイウェイに沿った積雪深、積算寒度、凍結期間の状況。

(4) 森林・山岳・ツンドラの地表面温度・雪氷特性

積雪開始、融雪開始、積雪（融雪）終了、土壌凍結開始は衛星観測によっても推定できる。衛星データと組み合わせることにより水平分布の把握が可能であり、広域代表性も確認できる。また、現地観測データは観測年が短期であるが、衛星データと組み合わせることにより、長期の評価が可能となる。衛星データは宇宙航空研究開発機構（JAXA）のマイクロ波放射計データが、全天候性であり、過去約10年近いデータを蓄積している。マイクロ波による融雪検出方法は、木村ら（2006）³⁾により提案されている。これを用いて、アラスカの南北の融雪開始、終了時期の特徴を調べた（図(2)-7）。南から太平洋沿岸、アラスカ山脈、北方森林帯、ブルックス山脈、ノーススロープ（ツンドラ）によって、冬季の積雪の多寡、融解開始および終了の早晚、初冬の凍結開始の早晚といったマクロな地域差が確認できる。このうち冬季積雪は、地表冷却を押さえ、融解終了から凍結開始は、土壌水分の増加（不凍結水の存在）と昇温が起きており、土壌中の生物活動ともかかわる。

アラスカ南部

アラスカ南部では融雪開始は早いものの太平洋空の水蒸気の流入により積雪が多いこととアラスカ山脈という山岳域が存在するため、消雪まで時間がかかる。また高山のため初冬の降雪も早く、高山域を多く持つアラスカ南部では、積雪で覆われている期間が長い。しかし、冬季も温暖であるため、頻繁な融解も生じる。

中央部北方森林

中部の北方森林帯では、昇温も早くおこり積雪融解も早く進む。インターバルカメラによる観察では、樹木の存在と起伏に富む地形のために、広域融雪が進行する前に樹木周辺の融雪がすすみ、パッチ上の無雪域が春に存在する。これらの場所では地表面温度上昇や融雪水の浸透、蒸発

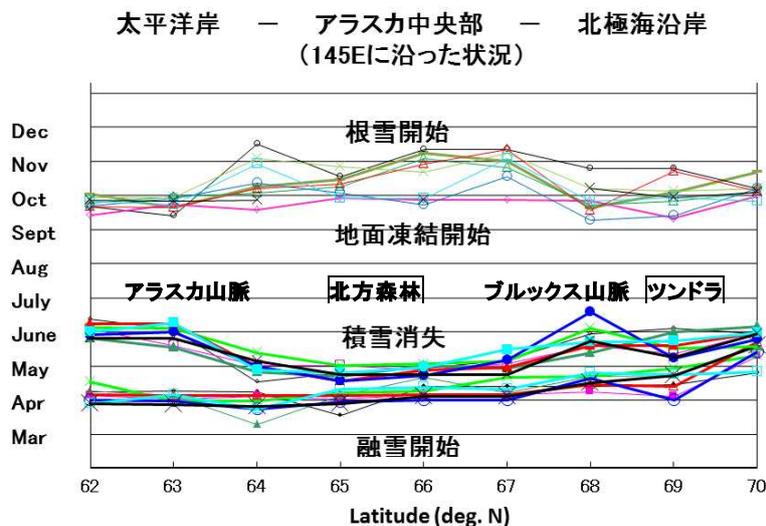
なども早めに進行していく。この地域は内陸であるため夏季の昇温も起こり、無雪地表面が長く存在できる。初冬には積雪期が始まる前に、地表面の凍結のほうが先に進行する。現地の地表面観測記録からも、積雪期が始まる前から地表面の冷却が進んでいくことがわかる。

ツンドラ

北部のツンドラでは融雪開始は遅いが、積雪が少ないため融解が始まると早期に消雪する。また、現地での観測から、ツンドラ域では融雪開始は遅いものの、春には少ない積雪を通して、日射が地表に至り、積雪内部や地表面を温め始めており、内部昇温によるものと思われる積雪内部の蒸発と空隙の生成が生じている。ここで昇華した水蒸気は、低温な表面で凝結し氷膜を作る。このため積雪表面にできた透明な氷膜の内部では温室のような状態となって、地表の加熱を速めている可能性がある。

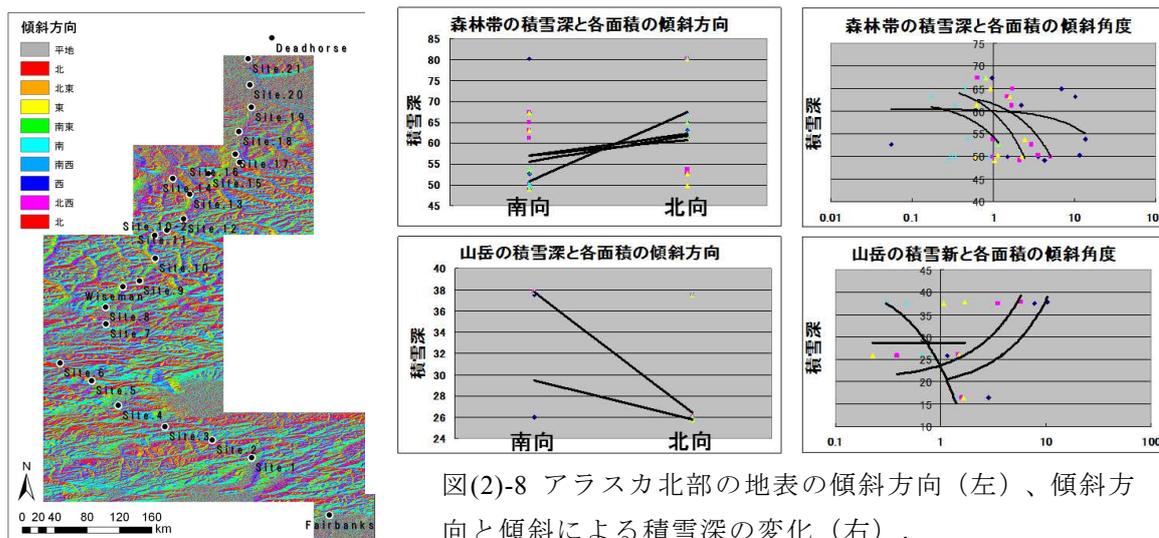
ツンドラ域では8月中にも降雪が起こり、9月後半からは根雪、地表面の凍結も開始する。衛星からはこういったことが判別できるが、沿岸ツンドラ域に設置した地温記録からは、多くの水分のため水分が凍結しきるまで1か月の期間を要する。この間の凍結の潜熱のため、地温の冷却が停滞する。凍結後、この停滞はなくなり、初冬から急速な地表面冷却が進むことが可能になる。

初冬において、森林域では積雪がなくても凍結が進んでいくのに対し、ツンドラ域では積雪期が始まっても地表面内部の水分の凍結のために時間を要しているといえる。



図(2)-7 アラスカ南北縦断
(145° E)における積雪・凍結期間と無雪期間の比較。衛星マイクロ観測(衛星Aqua、AMSR-Eセンサー)による。色の違いは年度の違いを示す。

アラスカの広域における土壌の物理状態の季節変化とかわる積雪・凍結の影響をマクロに解析したが、一方で、微小地形による不均一性の問題が生じる。これは現地観測の地点の選択や得られたデータの評価、モデルの検証や広域代表性の問題ともかかわってくる。ここでは、特に積雪深の分布に対する地形の影響について、斜面方向と傾斜といった地理情報と現地観測で得られた積雪分布のデータより、特徴を調べた。積雪分布は森林帯では北向き斜面、傾斜角度が緩やかな所で雪が多く積もり、山岳帯、ツンドラではその逆になる。

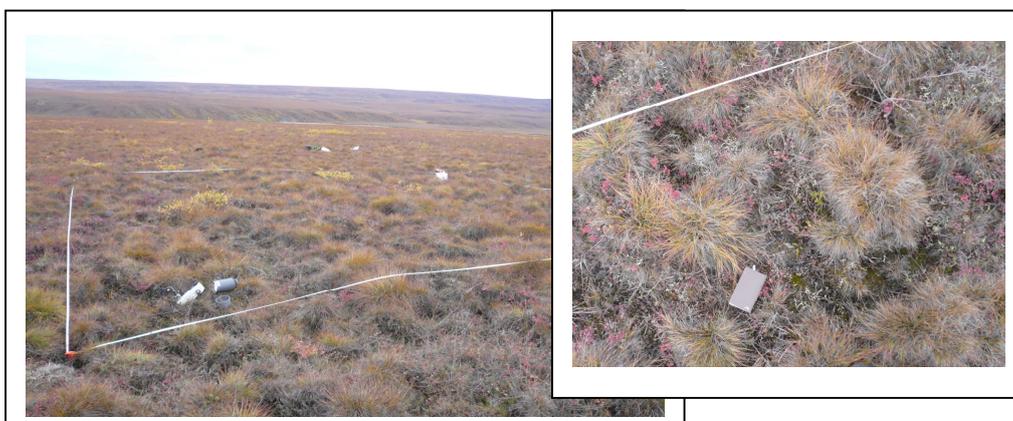


図(2)-8 アラスカ北部の地表の傾斜方向（左）、傾斜方向と傾斜による積雪深の変化（右）。

さらに、ツンドラ域で20m四方のなかに20か所の地表面温度、水分の観測をおこなって、不均一性を見た。ツンドラ域であるため、表面はほとんどタソクにおおわれ、タソクであるところとその間の部分という構成になっている。

どちらも地表面5cmまでの地温は、場所によるばらつきが大きかったが、10cm深になると場所による変動が少なくなった。しかし、水分はタソクであるかないかに関わらず、不均一性が多かった。地温は1~2°Cの標準偏差であるのに対し、土壌水分のほうは多いときには標準偏差が20%以上にもなる。値の不均一性が大きい。図(2)-9にマイクロスケールの比較観測の場所と地表面の状態を示す。

このような不均一性の問題を解消するために、20m四方、50m四方といった小領域での多点観測の平均や分散の評価が有効であるが、その限界もあるため、この不均一性の問題の解決は課題として残る。



図(2)-9 アラスカ北部ノーススロープのツンドラ域における観測風景（Oil Spill Hill）（左）、表面を覆うタソクの状況（右）。比較的均一な混在状態が広がる。

観測全体について

本研究では、モデル計算やサンプル分析のために有効な情報を現地の観測から取り出すことにあった。アラスカ北部は、森林、山岳、ツンドラの気候帯を持ち、ブルックス山脈周辺ではわずか100kmのあいだにそれらが存在していること、さらにダルトンハイウェイの存在によりそれらの間のアクセスが容易であることなどの観測の利点があった。気候帯は森林、山岳、ツンドラの3つとそれらの遷移帯などにわけられ、それぞれの特徴的な情報を取り出すことが出来た。

モデル計算の入力や検証に利用できる、長期データが得られ、土壌サンプルも実施された。このような詳細観測点でプロセスのモデル再現が行われているため、その点での再現評価が得られている⁴⁾。これをどう広い領域にスケールアップするか、長時間サンプリングデータの空間情報もカバーできる手法の採用など、観測点数を増やさずに広域変化を解析する方法の開発が望まれる。衛星観測は直接、広域特性の観測が出来る手法である。今度は樹木の存在による鉛直方法の不可視性が問題になる。フェアバンクス森林域に最近設置されたタワーやアラスで活発に民間利用され、利用の容易な航空機などの利用が期待される。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・本サブテーマによる観測から、高緯度地域の土壌温度の年間サイクル、また地域差が明らかになった。
- ・土壌の凍結融解には冬期の積雪の多寡が影響しており、気温とともに積雪によって冬期の冷却が抑制される、また積雪融解による水分供給が春の土壌水分に影響する。土中温度のプロファイルによる冷却の進行、各深さでの凍結開始と終了が確認できた。
- ・積雪内の温度センサーからは融解の開始、進行、終了が判別できた。冬期内陸の北方森林域の方が低温になるが、北方森林では積雪が多いため、土壌の冷却は抑制される、森林域のほうがツンドラより低緯度であるため春の気温の上昇により融解開始も早い。
- ・一方、北部のツンドラでは初冬の気温低下は早くから始まるが、多い土壌水分により初冬に0℃の状態が1ヵ月半に及び冷却が進行しない状態が確認された。凍結後、急速に冷却が深部に進行するがこれは低温であるとともに積雪が少ないためである。
- ・春の融解は遅くから始まるが、積雪が少ないため積雪の消失は早い。森林域とツンドラでの土壌温度分布、土壌水分の季節サイクルに積雪が関わっていることが確認できた。

これらは、土壌物理のプロセスを正確にシミュレーションするための検証データとして有効である。また、マクロおよびミクロに見た積雪分布の地域差は、永久凍土帯での凍結・融解現象の地域性や不均一性を示しており、広域での検討の際には、多点での観測から平均的な状態を取得することが必要であることを示している。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマの目的は複雑に変化する高緯度の森林域、ツンドラ域の土壌温度年間サイクルを精密に観測し、積雪との関係、土壌水分への影響を確認することである、これにより高緯度域での気候変動下での土壌圏の炭素ダイナミクスを知る上で、多様な気候帯が南北約1000kmの間に存在しているアラスカを観測及び実験フィールドとして、北極圏広域に応用できる基礎情報とモデル化への貢献ができる。北極圏の代表的な気候、地表面状態を効果的に観測することにより、北極圏、凍土域に対する正確な情報の提供とその変動の進行の仕方、実態の情報を提供することが出来る。

温暖化予測における気温変動だけでなく、積雪の高精度化の必要性など、将来気候予測の高精度化に観測サイドからの提案と、精度検証、不確定性の確認をおこなうことができる。

観測活動を行なったアラスカ北部のダルトンハイウェイはアラスカパイプラインにそって設置された、北極海につながる幹線道路である。この道路の維持と周辺の開発や、環境への影響などはアラスカ州では監視されており、気象、雪氷条件は価値がある。また、長期環境モニタリングサイトとしてツンドラ域に Toolik Lake 気候観測ステーションがあるが、本研究の資料はその周辺での広域特性を表すことができ、モニタリングサイトの代表性確認にもつながる。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで実施されているアラスカ北部の温度環境・土壌水分・積雪深の観測は、アラスカ大学との共同研究により実施されている。また、他の地域での広域積雪観測を実施している米国CREEL(Cold Regions Environment and Engineering Laboratory)のStrum博士、カナダ環境局(Environmental Canada)のDarkson博士との観測活動情報の交換と効果的なデータ取得の方策の意見交換をおこなった。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO and M. UCHIDA: Open Journal of Ecology 2, 2, 90-95, (2012)
” The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics”
- 2) Y. KIM, S-D. KIM, H. ENOMOTO, K. KUSHIDA, M. KONDO, and M. UCHIDA: Alaska, Polar Science, 7, (2013) “Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway” (in press)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 中村文彬, 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明:北海道の雪氷, 第29号, 49-52. (2010)
「アラスカにおける冬季地表面の冷却過程の観測結果」
- 2) N. ALIMASI, 高橋修平, 榎本浩之, 金龍元:北海道の雪氷, 第29号, 57-60. (2010) 「アラス

カにおける凍結路面の光学的特性観測」

- 3) 榎本浩之, ヌアスムグリ アリマス, 柴田啓貴, 田中康弘, 舘山一孝, 高橋修平: 環境科学会誌 25(6),469-476. (2012)
「変動の季節性と変調および環北極域の環境への影響」

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 中村文彬, 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明: 日本雪氷学会北海道支部発表会, 札幌, 2010
「アラスカにおける冬季地表面の冷却過程の観測結果」
- 2) 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明, 舘山一孝, 谷川朋範, 木村しずか, 門崎学, 斉藤佳彦, ヌアスムグリ アリマス, 中村文彬: 雪氷研究大会, 仙台, 2010.
「北極圏ツンドラ・森林域の広域積雪調査－アラスカにおける積雪データの収集とマイクロ波観測実験－」
- 3) 中村文彬, 榎本浩之, 金龍元, 佐々木孔明: 雪氷研究大会, 仙台, 2010.
「アラスカにおける冬季地表面の冷却過程の観測」
- 4) 中村文彬, 榎本浩之, 茂手木勇紀, Nuerasimuguli Alimasi, 金龍元, 舘山一孝: 第33回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010.
「北極圏における融雪時期の解析 ～アラスカ観測より～」
- 5) 榎本浩之, 佐々木孔明, 金龍元, ヌアスムグリ アリマス, 中村文彬: 第33回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010.
「北極圏の積雪分布の広域調査および衛星観測」
- 6) H. ENOMOTO, K. SASAKI, Y. KIM, K. TATEYAMA, S. KIMURA, N. ALIMASI, F. NAKAMURA, T. TANIKAWA, G. KADOSAKI, Y. SAITO, S. TAKAHASHI: The 2nd International Symposium of Arctic Research, Tokyo, 2010.
“Field Survey and AMSR-E Retrieval of Snow in the Forest and Tundra in Alaska”
- 7) H. ENOMOTO, K. TATEYAMA, H. SHIBATA, K. SASAKI, Y. TANAKA, Y. KIM, N. ALIMASI, F. NAKAMURA, S. TAKAHASHI: The 2nd International Symposium of Arctic Research, Tokyo, 2010.
“Land－Sea Connection of Snow and Ice Conditions in the Arctic”
- 8) 榎本浩之, 内海真生, 内田昌男, 伊勢武史, 森健介, 近藤美由紀, ヌアスムグリ アリマス, 佐々木文彬, 金龍元: 第3回極域科学シンポジウム, 東京, 2012.
「アラスカ広域の積雪および土壌温度・水分の季節変化 - 土壌分解とモデリングのための基礎物理情報取得 - 」
- 9) T. ISE, N. KATO, H. ENOMOTO, M. KONOD, and M. UCHIDA: American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, United States, 2010,
“Constructing a Depth-Structured Model for Soil Organic Carbon: Dynamics of Past, Current, and Future Accumulation and Decomposition”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム,セミナー等の開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) T. ISE, A.L. DUNN, S.C. WOFSY, and P.R. MOORCROFT : Nature Geoscience 1, 763-766 (2008)

“High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback.”

- 2) T. ISE, A.L. DUNN, S.C. WOFSY, and P.R. MOORCROFT. In: S.W. SIMARD and M.E. AUSTIN, eds, Climate Change and Variability, Croatia, Sciyo (2010)

“ Simulating peatland methane dynamics coupled to a mechanistic model of biogeochemistry, hydrology, and energy: Implications to climate change. “

- 3) 木村しずか, 榎本浩之, 戸城 亮, 金龍元, 斉藤佳彦 : 北海道の雪氷, No.25, 36-39 (2006)
「AMSR-E を用いたアラスカの融雪の観測」

- 4) M. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO and M. UCHIDA: Open Journal of Ecology 2, 2, 90-95, (2012)

”The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics”

(3) 温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究

筑波大学

生命環境系 内海真生

平成22～24年度累計予算額：6,900千円（うち、平成24年度予算額：2,000千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

北半球高緯度に多く存在する湿地など土壌含水率が高く有機物が豊富な環境は嫌気環境下になりやすく、嫌気環境下で有機物の最終分解産物として産生されるメタンも二酸化炭素と同様に温暖化現象への影響が無視できない。アラスカ北極高緯度地域は、これまで冷涼な気候の影響を受け土壌中に大量の有機炭素が蓄積されてきた。生物活動は一次的に温度に大きく影響を受けることから、モデル計算から予測される急激な温度上昇が同地域で生じた場合、炭素循環の様相が大きく変化することが懸念される。従って、現在の気候区分や植生毎の二酸化炭素（土壌呼吸）やメタンのフラックス、土壌中の微生物群集構造をまず明らかにし、今後の気候変動でそれらがどのように変化するかをモデルに組み込む作業も重要な研究課題である。本サブテーマでは、北極高緯度域の土壌有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化に資するデータ収集を目的に、アラスカ北極域陸上生態系の現地観測を行い、気候区や植生の違いに対する二酸化炭素およびメタンフラックスの変化と各調査点での土壌微生物群集構造を明らかにするための調査を行った。2010年、2011年、および2012年の夏期に植生区分等を基準に設定した定点調査点をアラスカ北極圏の気候植生区に対応させ決定した。次に各調査点で現地調査を実施し、土壌呼吸、メタンフラックス、土壌物性、土壌微生物群集構造の測定および解析を行った。3年間の調査研究から、アラスカ北極高緯度地域は温帯森林などと比較して夏期土壌呼吸速度は小さいこと、土壌呼吸速度と土壌温度に正の相関関係が認められること、比較的新しい火災跡地が高いメタンシンクとなっていること、土壌微生物群集は調査点によらず特定の細菌種が存在し、同一点でも深度に応じ群集構造が変化していること、などが判明した。

[キーワード] アラスカ北極域、炭素循環、土壌呼吸、メタンフラックス、土壌微生物群集構造

1. はじめに

地球温暖化に伴う気候変動が自然界のフィードバックを介して最も顕著に現れるのが、北極圏およびその周辺地域であると報告されている¹⁾。北極・高緯度域土壌圏における炭素動態解明に関する観測研究は、アラスカ、シベリア永久凍土地帯ともにスナップショット的な事例が多く、温暖化による北極高緯度の環境変化に関する研究必要性が高まる中、継続的な炭素循環研究の実施が強く求められている。低温および嫌气的条件によって分解が抑制され、大量の炭素ストックを抱えた北極土壌圏は、近未来に著しい気温上昇が生じた際には、土壌微生物群集の代謝活性増加に伴う活発な有機物分解により温室効果ガス放出のホットスポットとして機能する可能性が高

いことが指摘されている²⁾し、気候と炭素循環との関係の中で高いフィードバックを与える環境になる可能性は非常に大きく、その炭素動態モデルの開発は緊急かつ極めて重要な課題である。しかしながら、広範囲の現地観測研究例は乏しい。また、土壌呼吸やメタンフラックスに大きく影響を与える土壌微生物群集構造についてはほとんどわかっていない。

そこで、本サブテーマは、北極高緯度域の土壌有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化に資するデータ収集を目的に、アラスカ北極圏陸上生態系の現地観測から、気候区や植生の違いに対する二酸化炭素およびメタンフラックスの測定と、各観測点での土壌微生物群集構造を明らかにすることを目標に掲げ実施した。

2. 研究開発目的

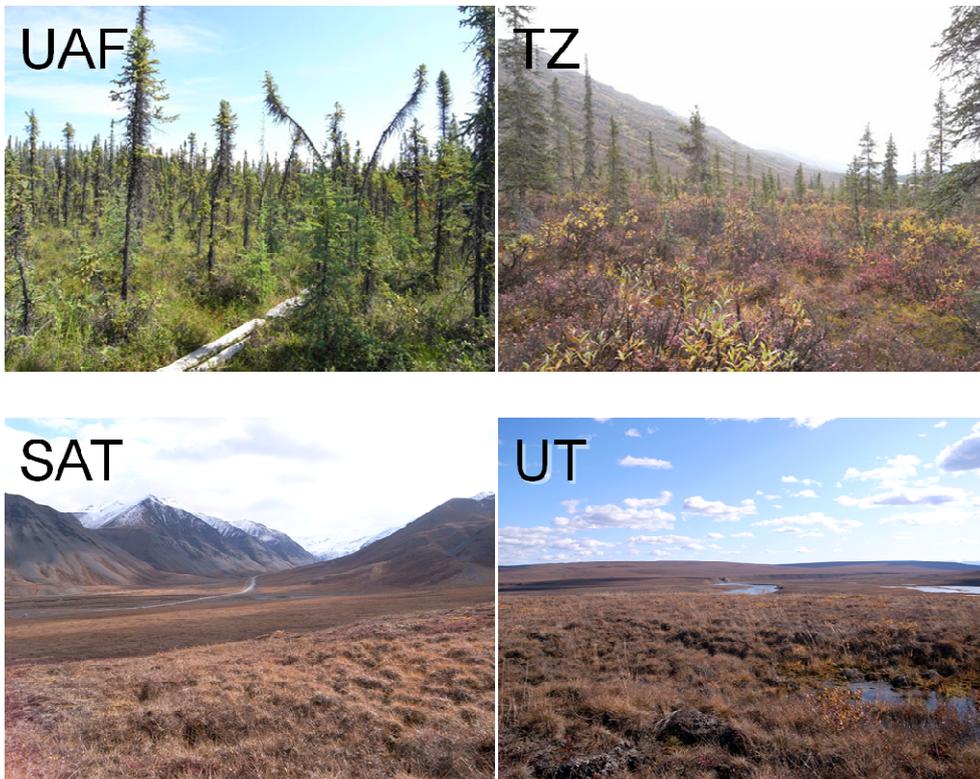
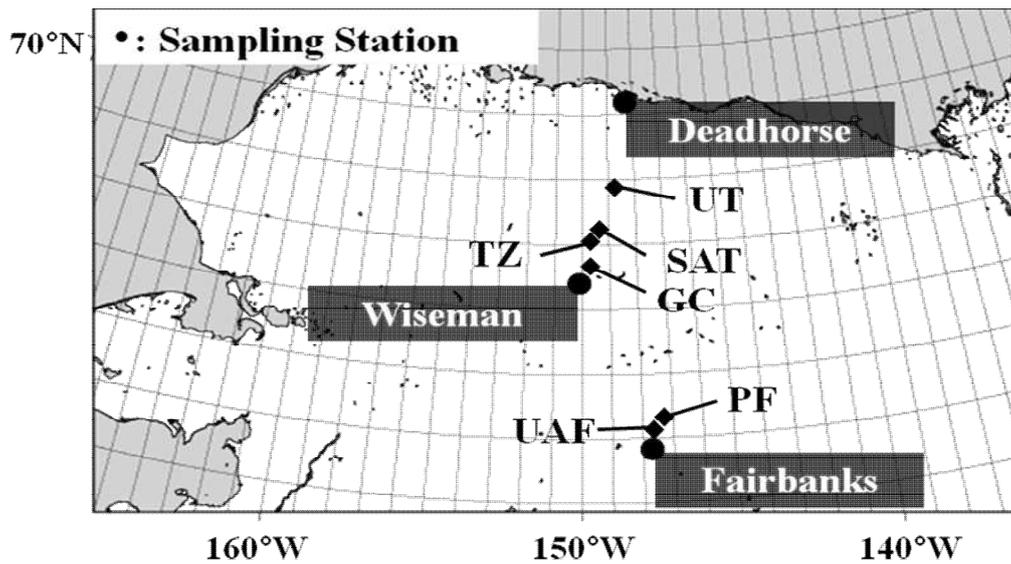
北極土壌炭素動態モデルの開発に資するデータを取得することを目的に、特にメタンに注目し植生毎のメタンフラックスおよび土壌中のメタン生成古細菌およびメタン酸化細菌群集を含む微生物群集構造を明らかにし、土壌の有機物組成や微生物膜脂質情報などと比較解析を行うことで、高緯度の各種土壌生態系におけるメタン起源の定量化に資する研究を行う。その目的達成のため、アラスカ北極域の研究対象観測地点において現地調査および観測を行い、構築する炭素動態モデルの基礎となる重要な北極圏土壌における炭素動態に関する知見を得る。

3. 研究開発方法

(1) アラスカの研究対象地での観測点の決定

研究題目にある北極高緯度土壌圏での観測に際し、アラスカ北極圏を研究地として設定した。北極高緯度域土壌圏は、タイガ林から北極海に面するツンドラまで植生が緯度の増加に伴い変遷している。気候区および植生の違いは土壌圏に大きく影響を与え違いを生じることから、北極高緯度域を対象とする調査研究では調査地の選定は重要な項目となる。アラスカ北極圏は、北極海油田開発に伴い、北極海に面したデッドホースから石油輸送用パイプラインがフェアバンクスを経由し建設された際、パイプライン沿いにパイプラインメンテナンスおよびデッドホースへの資材運搬用にダルトンハイウェイが建設されており、本研究課題を実施するに当たり最適な候補地であった。

2010年夏の現地調査開始時に、地質図および植生図と予備的に実施した調査結果を参照に、本研究で継続的に観測を実施するための定点調査点をアラスカ北極圏の気候植生区に対応させ決定した(図(3)-1)。調査点は、フェアバンクス周辺部のアラスカ大学が保有する観測サイト2点(フェアバンクス校校内のフラックス観測サイト(UAF)およびフェアバンクス校から北東に60 km離れた森林火災跡地にあるポーカーフラットフラックス観測サイト(PF))および北極圏の気候植生区分に対応した観測のためフェアバンクスからデッドホースまで延びるダルトンハイウェイ沿いを植生区分に応じて設定した(ホワイトスプルース森林サイト(GC)、森林限界植生サイト(TZ)、山岳(ブルックスレンジ) ツンドラサイト(SAT)、アップランドツンドラサイト(UT))。また、ダルトンハイウェイから分岐するエリオットハイウェイ沿いのタイガ林火災跡地(2010年に森林火災発生)について観測点(EH)を設け、2011年夏期に現地調査を実施した。



図(3)-1.アラスカ北極圏定点調査点の地図と写真.

地質図および植生図と予備調査結果を元に決定した。Fairbanks、Wiseman、Deadhorseは都市、集落名。UAF：アラスカ大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト、PF：アラスカ大学フェアバンクス校所有ポーカーフラットフラックス観測サイト、GC：森林サイト（シロトウヒ林）、TZ：森林限界サイト、SAT：山岳ツンドラサイト、UT：アップランドツンドラサイト。この他に、エリオットハイウェイ沿いの森林火災跡地にEH：火災跡地サイト（ $65^{\circ} 23.26N$ 、 $148^{\circ} 56.30W$ ）で2011年現地観測を実施。

(2) 温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究

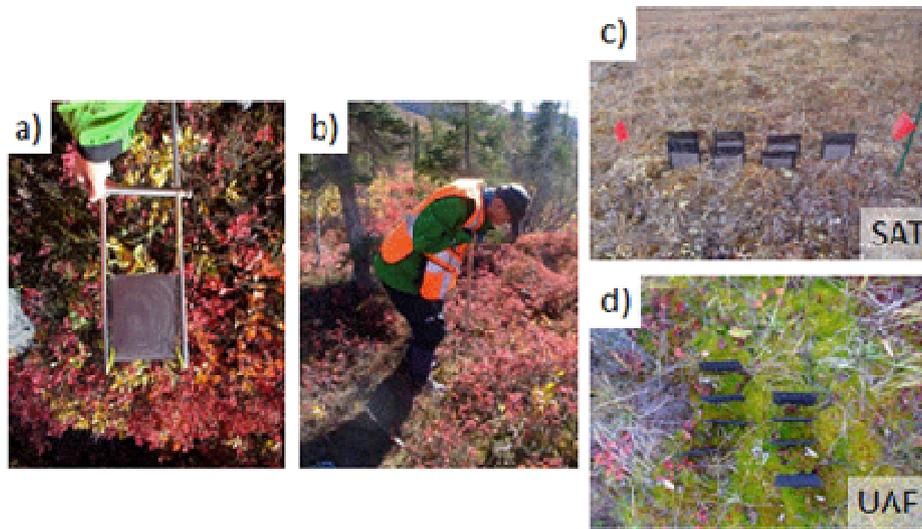
2010年8月27日から9月13日、2011年8月26日から9月11日、2012年8月25日から9月11日のそれぞれの期間、アラスカ州フェアバンクスにあるアラスカ大学フェアバンクス校を起点とするアラスカ北極圏現地調査を実施した。

3年間の現地調査期間中、決定した定点調査点において、空間的ばらつきを考慮した多測点（1調査地点で最低10点の測定）での土壌呼吸（CO₂ flux）測定（ポータブル型土壌呼吸測定装置（EGM-4）による測定）、チャンバー法を利用した土壌フラックスガス同位体濃度測定用試料採取および真空バイアルビンによるCO₂およびCH₄ flux測定用試料採取、土壌物性および微生物群集構造解析用の深度別土壌試料採取を継続的に行った。

CO₂およびCH₄ flux測定用試料採取用10 mL容量バイアルビンは、日本にて真空引き（5 psu以下）したものを用いた。チャンバー法によるflux測定では、測定開始時（0 min）、15 min、30 min、60 minの各時間にチャンバー内ガス試料をシリンジで採取し、3本の真空バイアルビンにそれぞれ加圧状態になるよう分注した。土壌物性測定用試料は、5 cmのステンレス採土缶を使用し、各調査点の代表点3点程度の土壌を垂直方向に2もしくは3深度分採取し、採土缶上下をステンレス製フタで密封して保管した。微生物群集構造解析用の深度別土壌試料は、土壌試料採取の為に各調査点にてシャベルを使用して穴を掘った後、1面の土壌断面を整形した後、定規で深度を確認しながら滅菌したエッペンドルフチューブ（2 mL容量）に一定量の土壌を採取し、直ちに核酸安定剤を添加してから冷凍保存した。現地調査で採取した土壌、微生物群集構造解析用の深度別土壌試料、真空バイアルビン等の各試料については、保存状態に気を配りながら冷蔵もしくは冷凍状態を保持し日本の実験室に持ち帰った。

2011年夏の現地調査時に、土壌中の微生物代謝活性を明らかにすることを目的に開発された Cotton strip assay法を行うため、定点調査点（UAF、PF、GC、TZ、SAT、UT）に日本で準備しておいたセルロース分解活性測定用の綿布を動物補食保護用のプラスチックシートでカバーした状態で各調査点土壌に環境を乱さないように工夫した方法を用い垂直挿入設置した（図(3)-2）。1年後の2012年夏の現地調査時に、1年間埋設させた綿布を各調査点より回収した。回収した綿布は、現地にて丁寧に洗浄し付着している土壌等をきれいに取り除いた後、乾燥させた状態にして日本に持ち帰った。

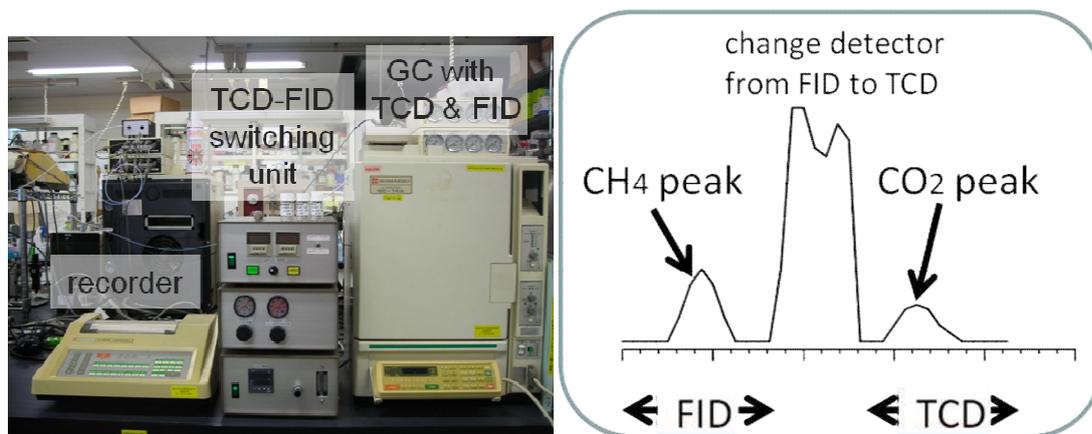
土壌微生物活性測定：セルロース分解活性



図(3)-2. Cotton strip assay法の為の綿布試料埋設作業

a) 独自作成した埋設用器具に装着されたカバー付綿布、b) 現地での布埋設作業、c) 埋設された綿布試料の状態写真（SATサイト）、d) 埋設された綿布試料の状態写真（UAFサイト）。

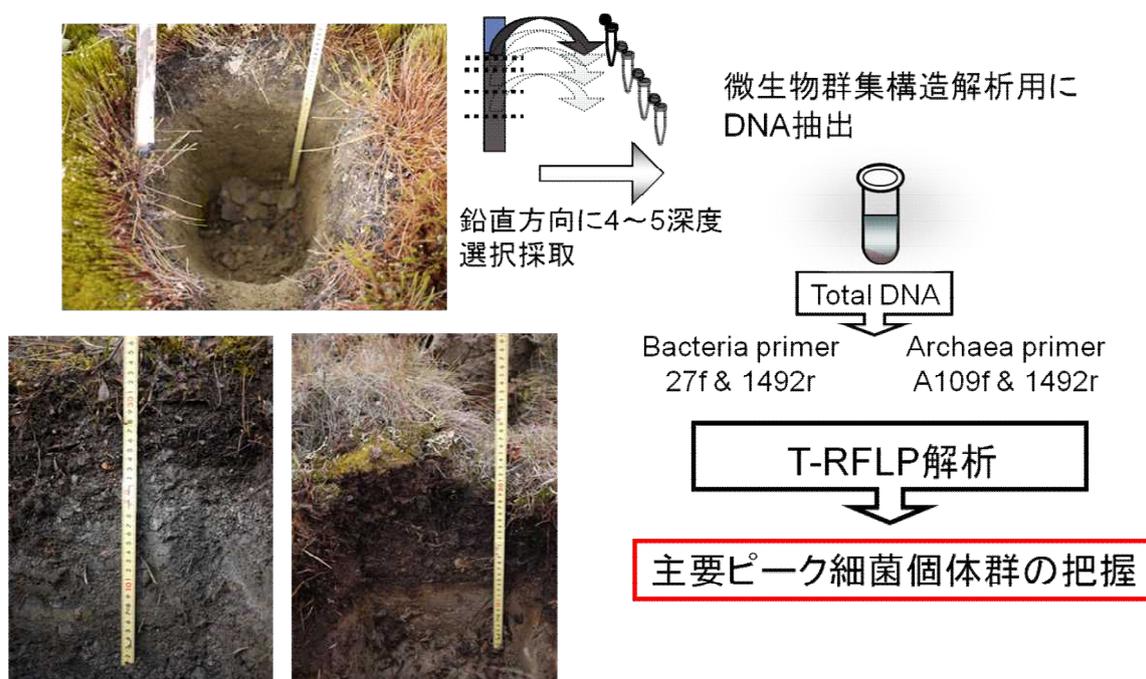
持ち帰った土壌呼吸 (CO_2 flux) および CH_4 flux 測定用真空バイアルビンガス採取試料について、ガスクロマトグラフ (GC-FID, TCD) を用いて CO_2 および CH_4 濃度測定を行い、時間経過に伴うチャンバー内ガス濃度変化より各調査点の CO_2 および CH_4 flux を算出した。測定に使用した GC-FID、TCD は大気レベルの CO_2 および CH_4 を 1 回の少量試料 (0.5-1.0 mL) 注入で測定出来る様に、FID 検出器と TCD 検出器の 2 つの検出器が備わっている GC の測定ラインに改良を加えた (図(3)-3)。



図(3)-3. 大気レベル濃度 CO_2 、 CH_4 同時測定システム

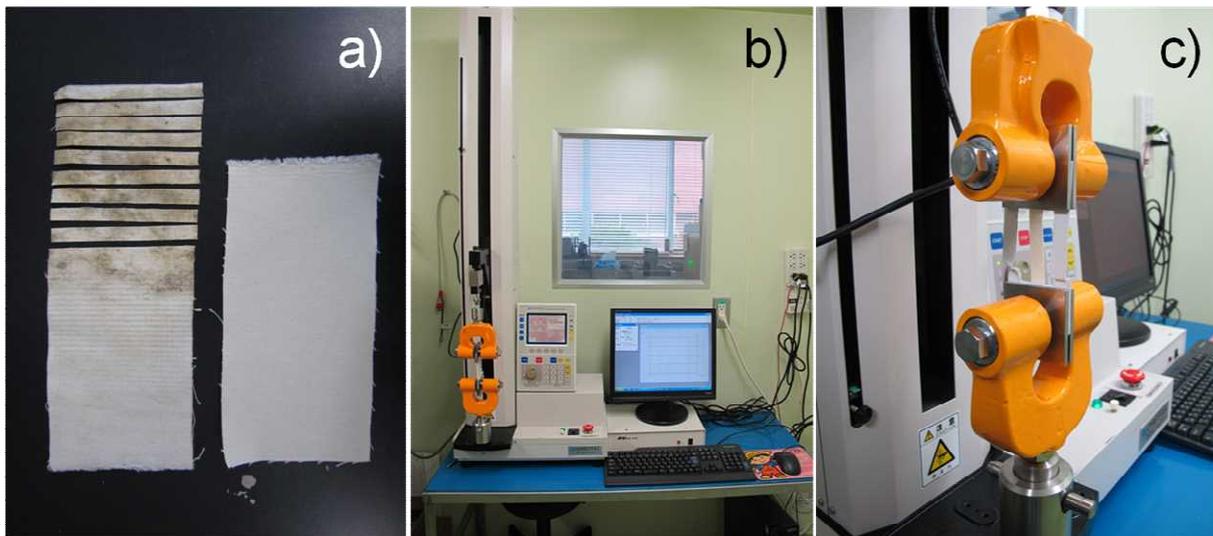
CH_4 と CO_2 のリテンションタイム差を利用し、FID 検出器で CH_4 を、TCD 検出器で CO_2 を検出する様に配管ライン変更を自動で行うことが出来る GC システム。

各調査点採取土壌に関して、5cm間隔でvolume water content (%), solid phase content (%), total dry weight (%), bulk density (g cm^{-3})で表される土壌物性を求めた。また、深度別 (0-1 cm、5-6 cm、10-11 cm、15-16 cm、20-21 cm) に採取し冷凍保存して持ち帰った土壌試料からDNAを抽出し、各定点調査点の土壌中微生物群集構造情報を得ることを目的にT-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism Analysis: 末端断片長多型) 解析を行った。土壌からの微生物DNA抽出には土壌中DNA抽出キット (ISOIL for Beads Beating) を使用し、マニュアルに従って作業を行った。抽出したDNA試料について、真正細菌については27fFAM-1492rプライマーセット、古細菌についてはA109fFAM-1492rプライマーセットを用いてPCRにより16S rDNAを増幅させた後、PCR産物のみ精製した。精製した各PCR産物について、制限酵素処理を行い断片化し、シーケンサーを用いて電気泳動処理を行った。



図(3)-4. 微生物群集構造解析手法のフローチャート

2012年夏の現地調査時に回収し、洗浄・乾燥後日本に持ち帰った綿布試料については、深度方向に土壌表面から1cm間隔の短冊布試料を作成した後、恒温 (25°C) 恒湿 (湿度59%) に設定された環境制御室に1日間静置した後、環境制御室内に設置されている引張・圧縮試験機 (オリエンテック、STA-1225) を使用して引っ張り強度試験 (引張速度: 5 mm min^{-1}) を行い (図(3)-5)、未挿入の綿布試料に対する引っ張り強度の減少率を利用して各深度の1年間の相対的なセルロース分解活性を求めた。



図(3)-5. 綿布試料引っ張り強度試験

a) : 土壌表面から1 cm間隔でカットされた綿布試料 右は未使用の綿布 b) : 環境制御室内の引張・圧縮試験機（オリエンテック、STA-1225） c) : 引っ張り強度試験の様子

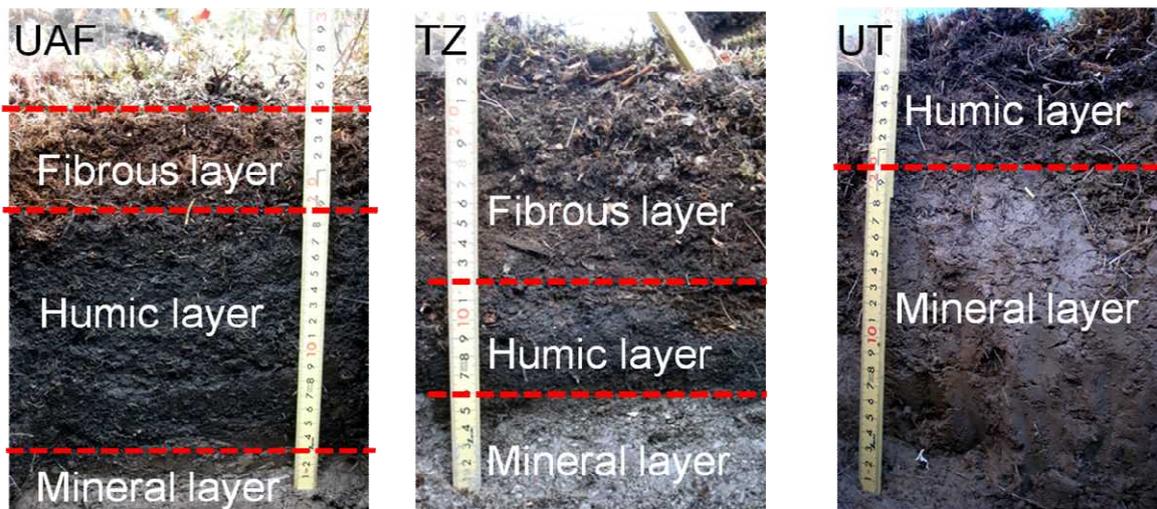
4. 結果及び考察

(1) アラスカの研究対象観測地点において現地調査および観測の実施

2010年夏の初めての現地調査において、安全に十分な配慮を配りつつ現地調査を計画・実施した結果、各定点調査点での現地測定および試料採取に成功した。研究初年度である2010年には、現地調査と同時並行して、ダルトンハイウェイの道路状況、ネイチャーセンターなどの情報収集可能箇所および給油地点についても確認し、以降2年間の研究期間中の現地調査を安全でスムーズに実施可能となる体制を構築した。フェアバンクスおよびダルトンハイウェイ中間地点のWisemanを中間基地とすることで縦断観測を計画的に行うことが可能となった。

(2) 温室効果ガスのフラックス観測とその起源の定量的評価に関する研究

UAF、TZおよびUTの土壌断面写真について図(3)-6に、各定点調査点の表層土壌物性測定結果を表(3)-1に示す。火災跡地であるPF調査点土壌は、火災による表層土壌有機物の消失と灰分たい積効果により、植生のない表層（0-5 cm）および植生の有無にかかわらず5-10 cm深度の固相率（solid phase content）が他の調査点（UAF、GC、TZ、SAT）よりも高い値を示した。GC、TZおよびSATの各地点の有機土壌層はいずれも浅く15 cm以下であった。PFおよびGCでは、有機土壌層の下層には砂および礫層が存在し、UAF、TZおよびSATではシルト層が確認された。また、UAFおよびSATでは地下水位が深度20 cm程度に存在していた。



図(3)-6. 調査点 (UAF、TZ、UT) の土壌断面写真

Humic layerの下層深度は、土壌表面よりUAF : ca.21 cm、TZ : ca.15 cm、UT : ca.7 cm

表(3)-1. 2010年夏期アラスカ調査で採取した各調査地点の表層土壌物性

site	soil depth (cm)	volume water content (%)	solid phase content (%)	total dry weight (g)	bulk density (g cm ⁻³)
UAF	0 - 5	72	11.03	11.57	0.12
PF (moss)	0 - 5	37	58.28	44.47	0.44
	5 - 10	38	72.68	86.49	0.86
PF (bare)	0 - 5	23	30.75	28.62	0.29
	5 - 10	31	70.88	107.71	1.08
GC	0 - 5	36	14.18	28.88	0.29
	5 - 10	59	19.29	39.37	0.39
	10 - 15	61	29.74	70.75	0.71
TZ	0 - 5	34	9.65	27.37	0.27
	5 - 10	28	34.79	71.70	0.72
SAT	0 - 5	74	13.12	22.75	0.23
	5 - 10	69	17.25	30.49	0.30

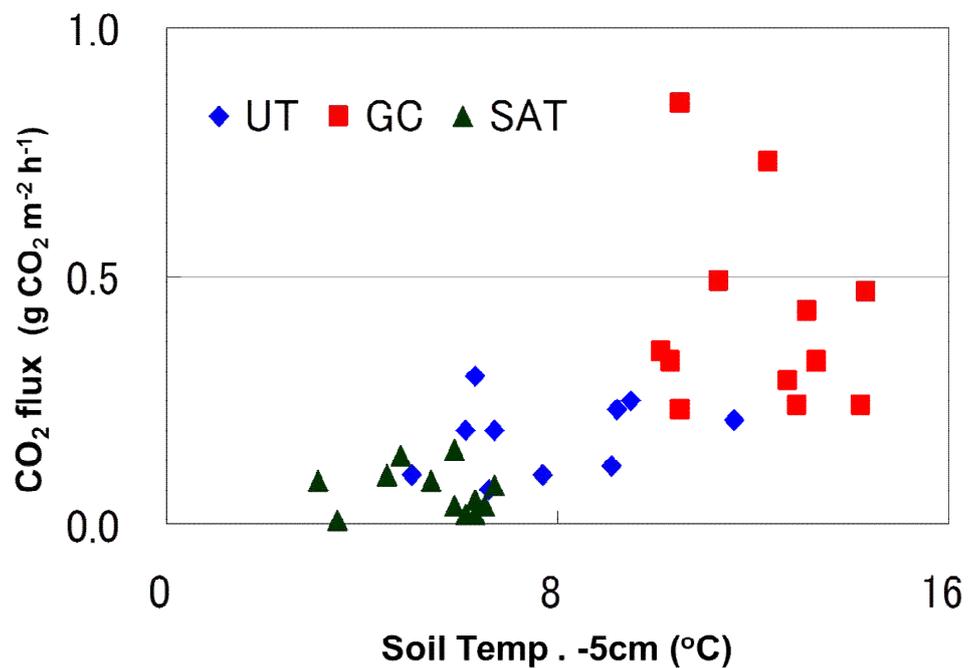
※1. 値は全て2~4試料の平均値。

※2. UAF : アラスカ大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト、PF (moss):アラスカ大学フェアバンクス校ポーカークラット火災跡地フラックス観測サイトの優占植生コケの地点、PF (bare): アラスカ大学フェアバンクス校ポーカークラット火災後地フラックス観測サイトの地表植生無しの地点、GC : 森林サイト (シロトウヒ林)、TZ : 森林限界サイト、SAT : 山岳ツンドラサイト。

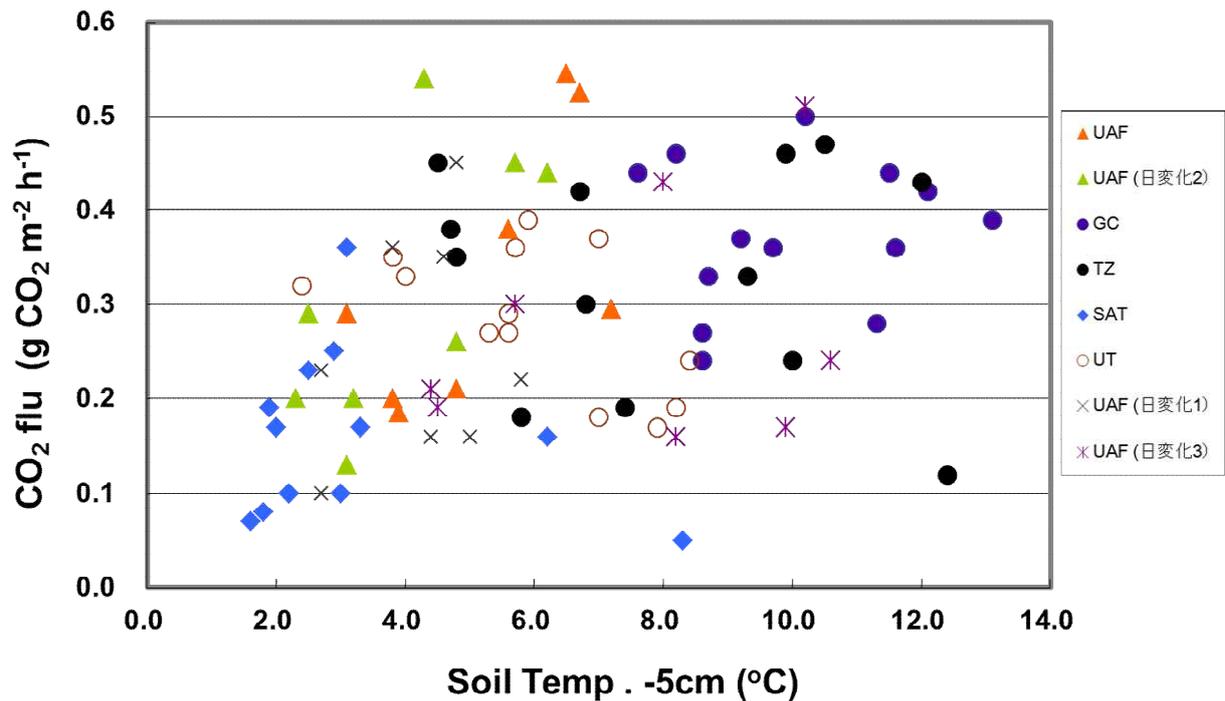
各定点調査点で測定した土壌呼吸速度(CO₂ flux)は、同じ調査地点でもチャンバー内の植生や地表面環境の違いに伴い大きく変化していた (例えばUAFでは0.04から0.66 g CO₂ m⁻² h⁻¹) (図(3)-7, 8)。また、PF、EHの火災跡地の土壌呼吸速度は、森林植生のあるGCと比較して小さく、同一地点内の場所によるばらつきも小さかった (EH : 0.04から0.35 g CO₂ m⁻² h⁻¹)。日中に測定した縦断

観測点に関しては、山岳ツンドラ（SATサイト）の土壤呼吸速度が他の観測点と比較して低い値を示したこと、比較的標高の高い森林限界（TZサイト）で比較的高い（0.1から0.5 g CO₂ m⁻² h⁻¹）土壤呼吸速度が観測された。

観測点全体としては、特に縦断観測での調査地点間では表面植生の違いによるばらつきはあるものの、地下5 cm地温と土壤呼吸速度との間に正の相関関係が認められた。一方、火災跡地（PFサイトおよびEHサイト）の土壤呼吸速度と地下5 cm地温との間には明確な相関は認められなかった。



図(3)-7. 2010年夏期アラスカ調査で測定した土壤呼吸速度と土壤温度（深度5cm）の関係
GC：森林サイト（シロトウヒ林）、SAT：山岳ツンドラサイト、UT：アップランドツンドラサイト。



図(3)-8. 2011年夏期アラスカ調査で測定した土壌呼吸速度と土壌温度（深度5cm）の関係

UAF：アラスカ大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト、PF：アラスカ大学フェアバンクス校所有ポーカーフラットフラックス観測サイト、GC：森林サイト（シロトウヒ林）、TZ：森林限界サイト、SAT：山岳ツンドラサイト、UT：アップランドツンドラサイト。

各定点調査点のCH₄ fluxを表(3)-2および表(3)-3に示す。黄色のマーカは、火災跡での結果を示している。2010年および2011年のどちらの年の現地調査においても、火災跡地であるPFおよびEHでの測定ではほぼ全ての測定でマイナスの値を示した。また、大気CH₄のシンクとして文献報告のある寒帯森林土壌（本研究ではGCサイトが該当）でもマイナスの値を得たが、火災跡地の数値を比較し小さいものであった。これらの結果から、火災跡地土壌が一般的な寒帯森林土壌（GC）よりも大きなCH₄のシンクとして作用している可能性を強く示しているものである。従って、火災発生後の植生回復とCH₄ flux変化との関係を明らかにするなど、森林火災後の経年変化観測を今後推進していく必要がある。

表(3)-2. 2011年夏期アラスカ調査時の各調査地点のCH₄ flux

sampling date	site	CH ₄ flux (mg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹)	
		min.	max.
2010.07	UAF	-0.003	0.003
	PF	-0.043	-0.001
2010.08	PF	-0.101	-0.044
	UAF	-0.047	0.492
2010.09	PF	-0.082	0.004
	GC	-0.001 (n=1)	
	TZ	-0.030 (n=1)	
	SAT	0.036 (n=1)	
	UT	0.484 (n=1)	

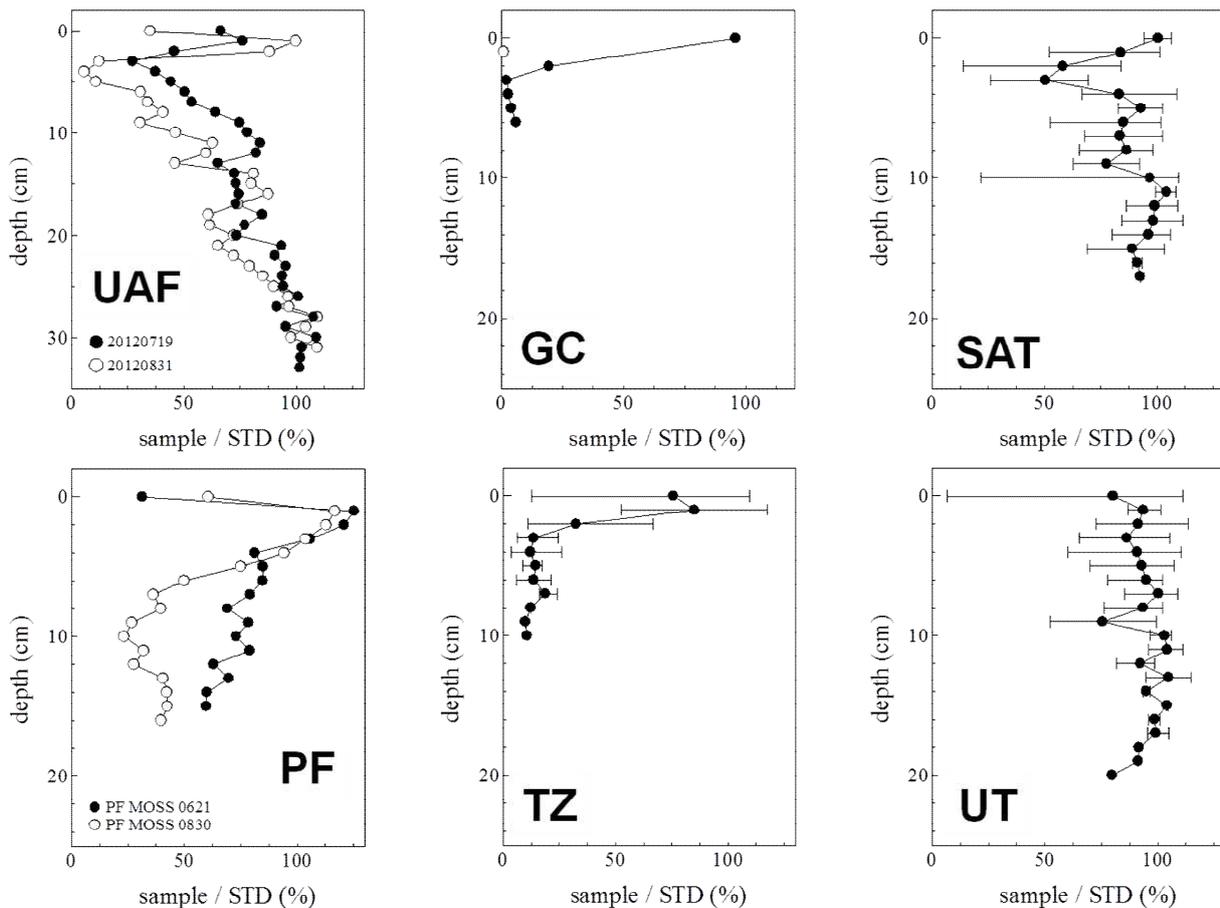
UAF : アラスカ大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト、PF : アラスカ大学フェアバンクス校所有ポーカーフラットフラックス観測サイト、GC : 森林サイト (シロトウヒ林)、TZ : 森林限界サイト、SAT : 山岳ツンドラサイト、UT : アップランドツンドラサイト.

表(3)-3. 2011年夏期アラスカ調査時の各調査地点のCH₄ flux

sampling date	site	CH ₄ flux (mg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹)	
		min.	max.
2011.06	UAF2	0.004 (n=1)	
	PF (moss)	-0.040 (n=1)	
	PF (bare area)	-0.041 (n=1)	
2011.07	UAF2	0.022 (n=1)	
	PF (moss)	-0.066 (n=1)	
	PF (bare area)	-0.120 (n=1)	
	EH1 (bare area)	-0.022 (n=1)	
2011.09	UAF1	-0.015 (n=1)	
	UAF2	0.156 (n=1)	
	GC	-0.004 (n=1)	
	TZ	0.027 (n=1)	
	SAT	0.029 (n=1)	
	UT	0.220 (n=1)	
	PF (moss)	-0.028	-0.016
	PF (bare area)	-0.109	-0.097
	EH1 (bare area)	-0.014	0.012
EH2 (bare area)	0	0.058	

UAF : アラスカ大学フェアバンクス校内フラックス観測サイト、PF : アラスカ大学フェアバンクス校所有ポーカフラットフラックス観測サイト、GC : 森林サイト (シロトウヒ林)、TZ : 森林限界サイト、SAT : 山岳ツンドラサイト、UT : アップランドツンドラサイト、EH : エルトンハイウェイ火災跡地サイト。

セルロース分解活性について、回収した各布試料を1 cm間隔で切断し張力試験を行った結果を図(3)-9に示す。UAFサイトでは、表層 (0-10 cm)のセルロース分解活性は、それ以深の活性に較べ高い、15 cm以深のセルロース分解活性は低い、5-15 cm深度では夏期にセルロース分解活性が上昇する、ことが判明した。また、PFサイトでは、生きているコケ内のセルロース分解活性は低い、コケ下のセルロース分解活性は布が挿入できた範囲の深度ではほぼ同じレベルにある、5 cm以深では夏期にセルロース分解活性が上昇する、ことが判明した。縦断観測サイト (GC、TZ、SAT、UT) では、タイガ林 (GCサイト)および森林限界域(TZサイト)の土壌表層セルロース分解活性は高い、高山ツンドラ(SATサイト)および極域ツンドラ (UTサイト) のセルロース分解活性は土壌全層で低い、ことが判明した。

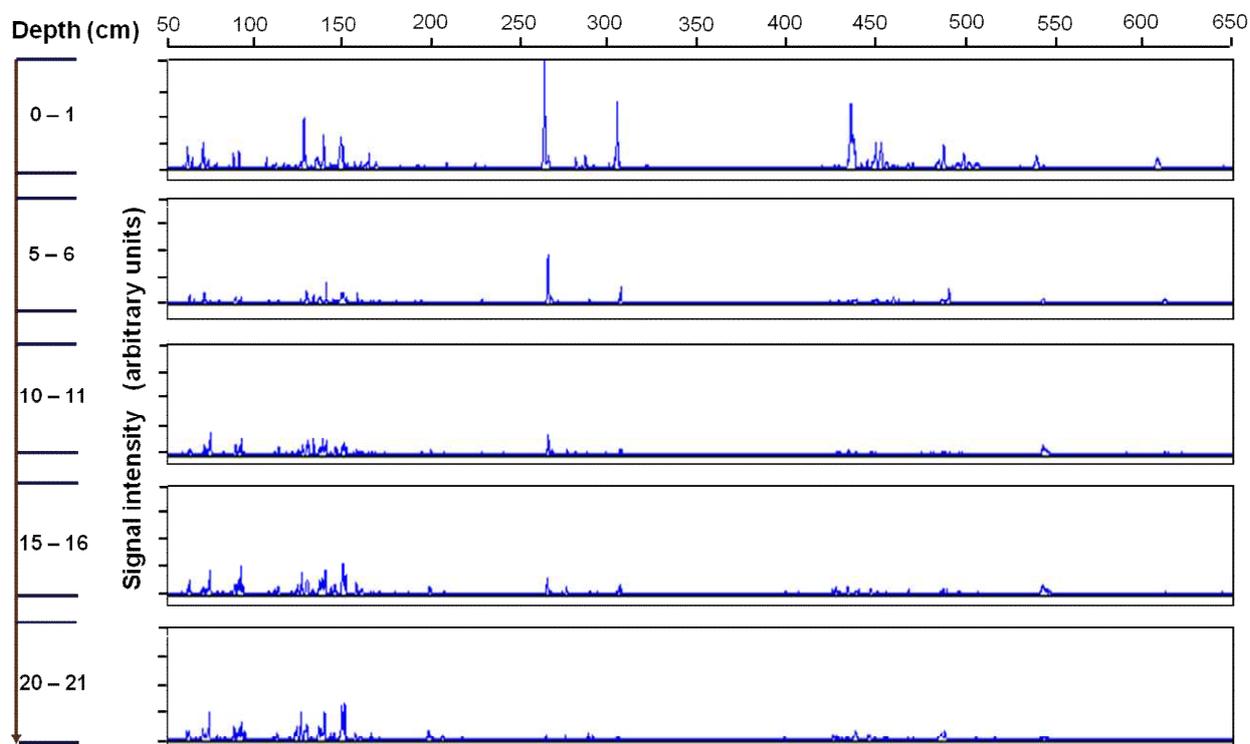


図(3)-9. アラスカ北極圏各調査地点の深度別セルロース分解活性 (Cotton Strip Assay)
 ○および●は各深度の埋設綿布/コントロール (未埋設綿布) の引っ張り強度減少率を、横棒 (バー) が無い場合は1もしくは2枚の試料平均値、ある場合は3枚の試料の平均値および1標準偏差を示す。

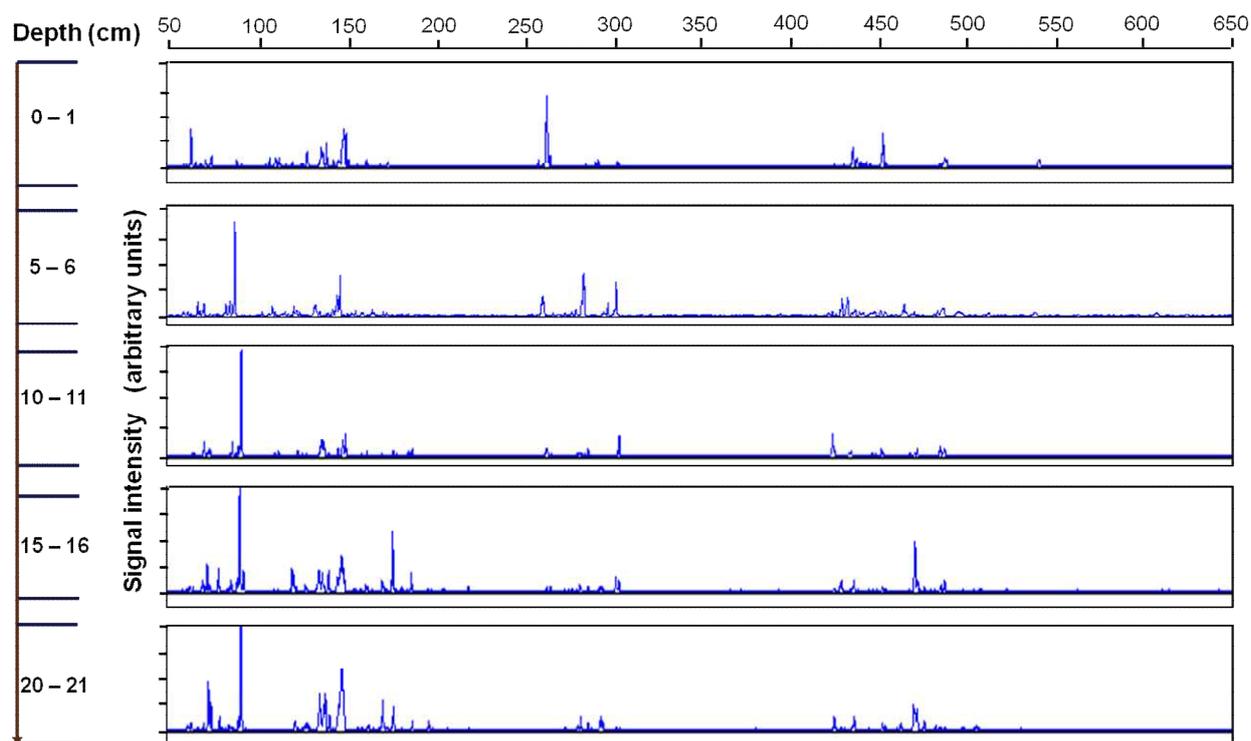
定点調査点土壌各深度 (0-1 cm、5-6 cm、10-11 cm、15-16 cm、20-21 cm) の真正細菌群集T-RFLP解析結果を図(3)-10(a)~(g)に示す。このT-RFLP解析より、調査点の違いにかかわらずほぼすべての地点の土壌中に共通して出現する種の存在が確認された。また、地点や土壌深度にかかわらず主要なピークとして検出される種の存在が示唆された。TZサイトの0-1 cmのみ、他の地点や土壌深度では出現していない特有の優占種の存在が確認され他、TZサイトおよびUTサイトでは土壌深度に応じて真正細菌群集構造や優占種に違いがあることが判明した。一方、UAFサイト、GCサイトおよびSATサイトでは土壌深度による真正細菌群集構造の変化はほとんど認められなかった。これらの結果から、真正細菌群集については、特定の微生物種が存在し土壌深度により群集構造が異なる、温帯や熱帯土壌と比較し微生物多様性が低い、ことが判明した。

定点調査点土壌各深度 (0-1 cm、5-6 cm、10-11 cm、15-16 cm、20-21 cm) の古細菌群集T-RFLP解析結果を図(3)-11(a)~(d)に示す。古細菌群集構造に関しては、全ての観測点において群集構造と優占種が土壌深度により変化していること、すなわち調査地点よりも土壌深度に依存し群集構造

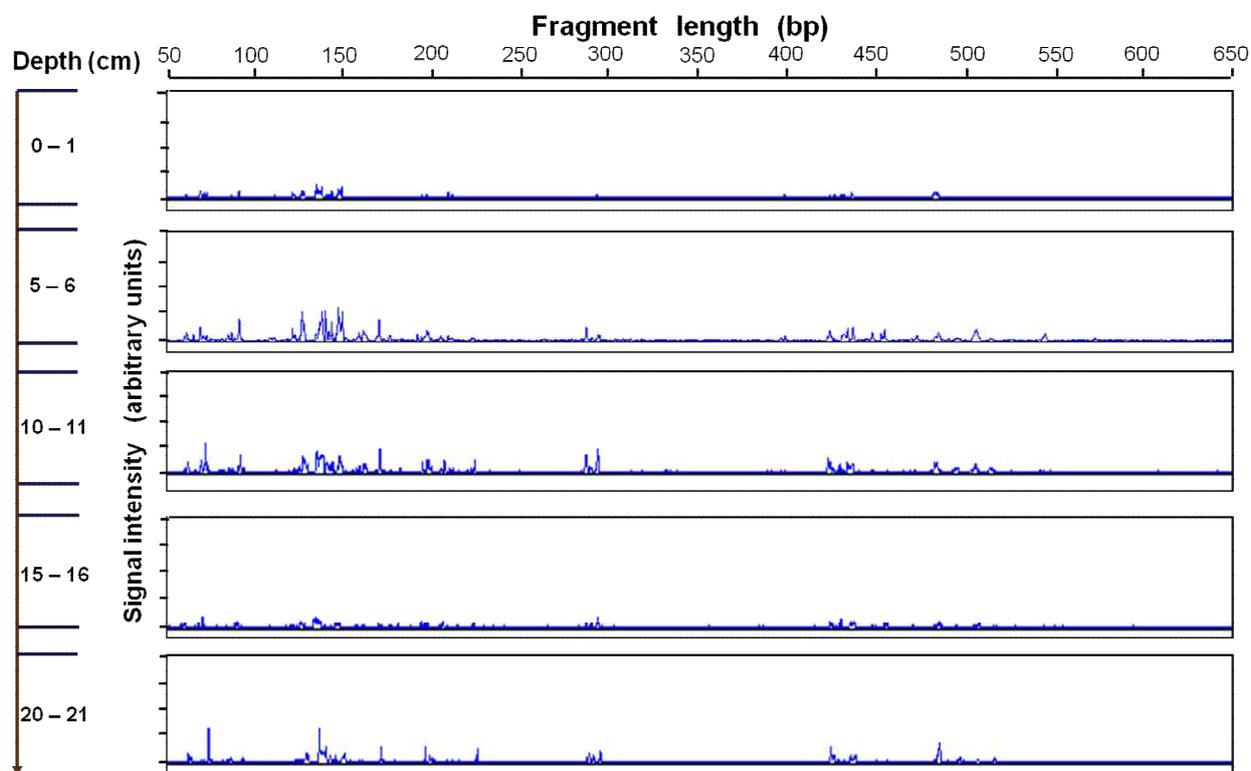
が変化しているが認められた。但し、得られたピーク数は真正細菌群集のT-RFLP解析結果と比較して少なく、全ての調査点の古細菌群集の多様性は高くないことが強く考えられる。特に、TZサイトでは深さごとに優占種の顕著な変化が認められた。また、GCとSATでは土壌深度毎の群集構造および優占種が類似していた。これらの結果から、古細菌群集については、特定の微生物種が存在し土壌深度により群集構造が異なる、温帯や熱帯土壌と比較し微生物多様性が低い火災跡地（PFサイトおよびEHサイト）の土壌表層のみ多様性が高い傾向が認められる、火災跡地の多様性は湿地域（UAFサイト、UTサイト）より低い、火災跡地の表層を除く多様性は特に低い、ことが判明した。



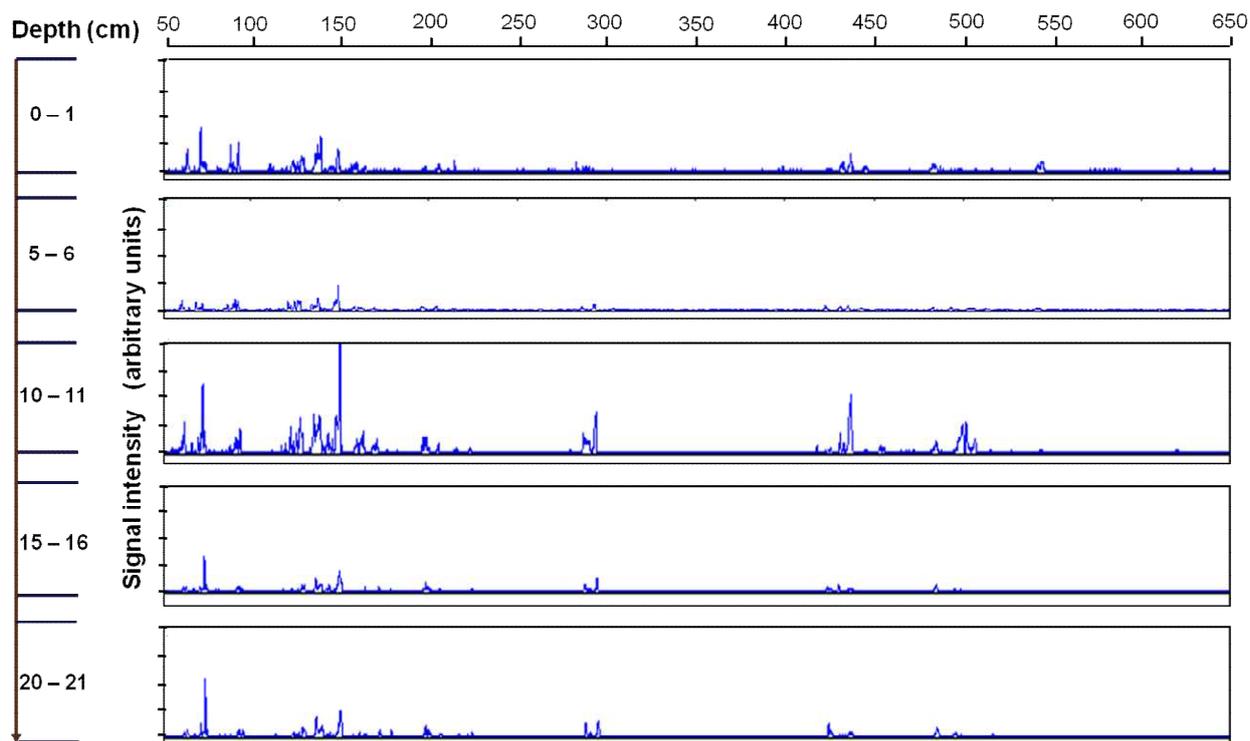
図(3)-10(a). UAFサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



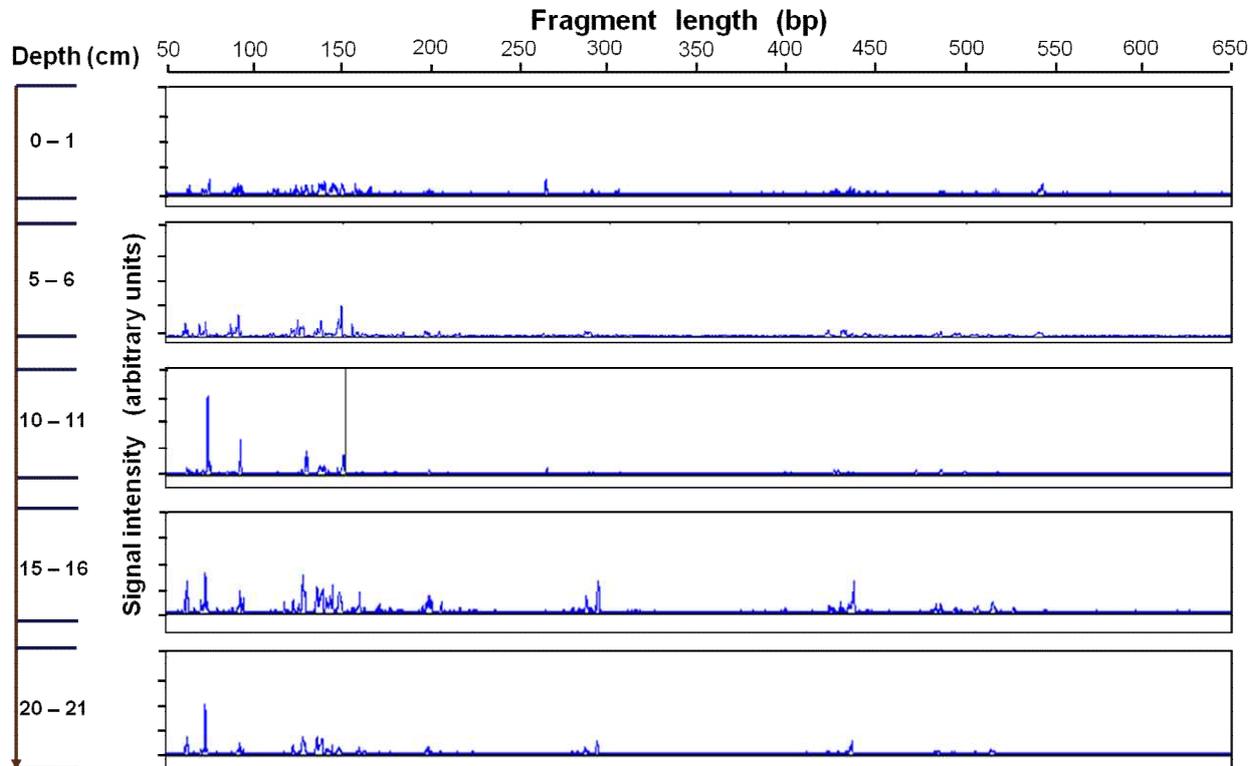
図(3)-10(b). PFサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



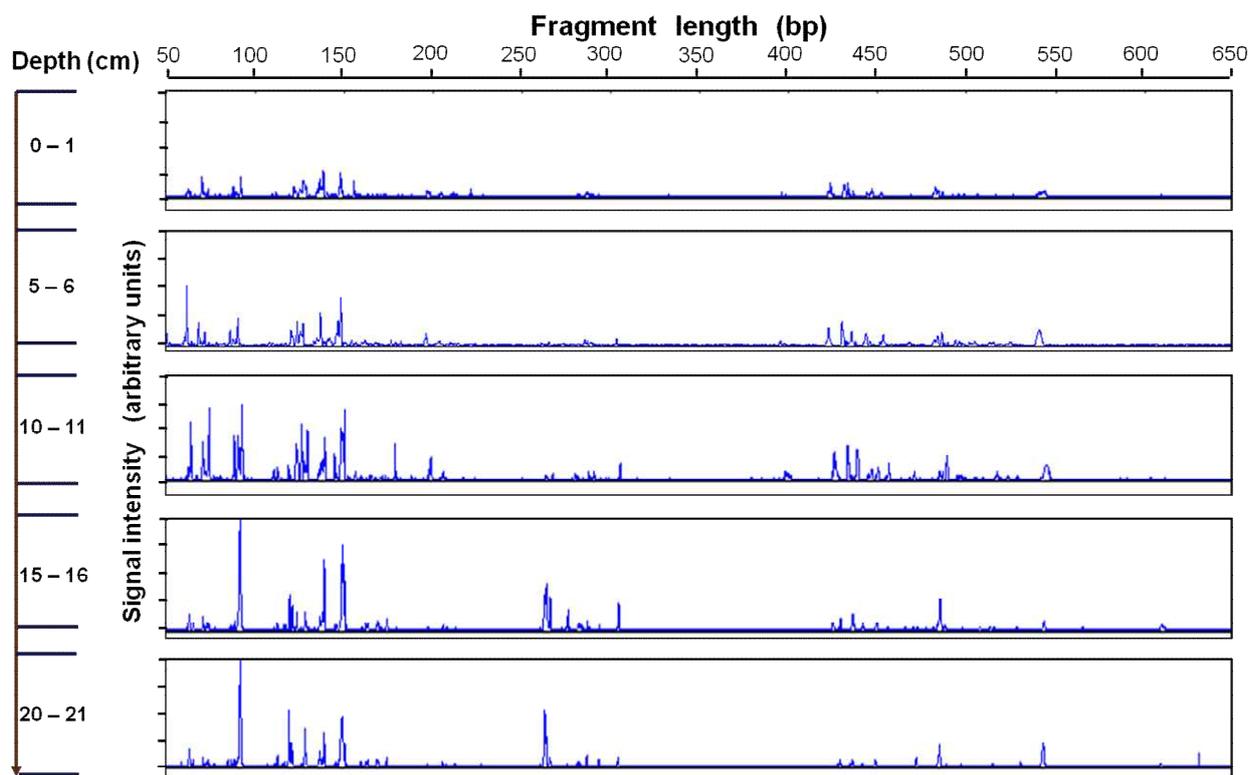
図(3)-10(c). GCサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



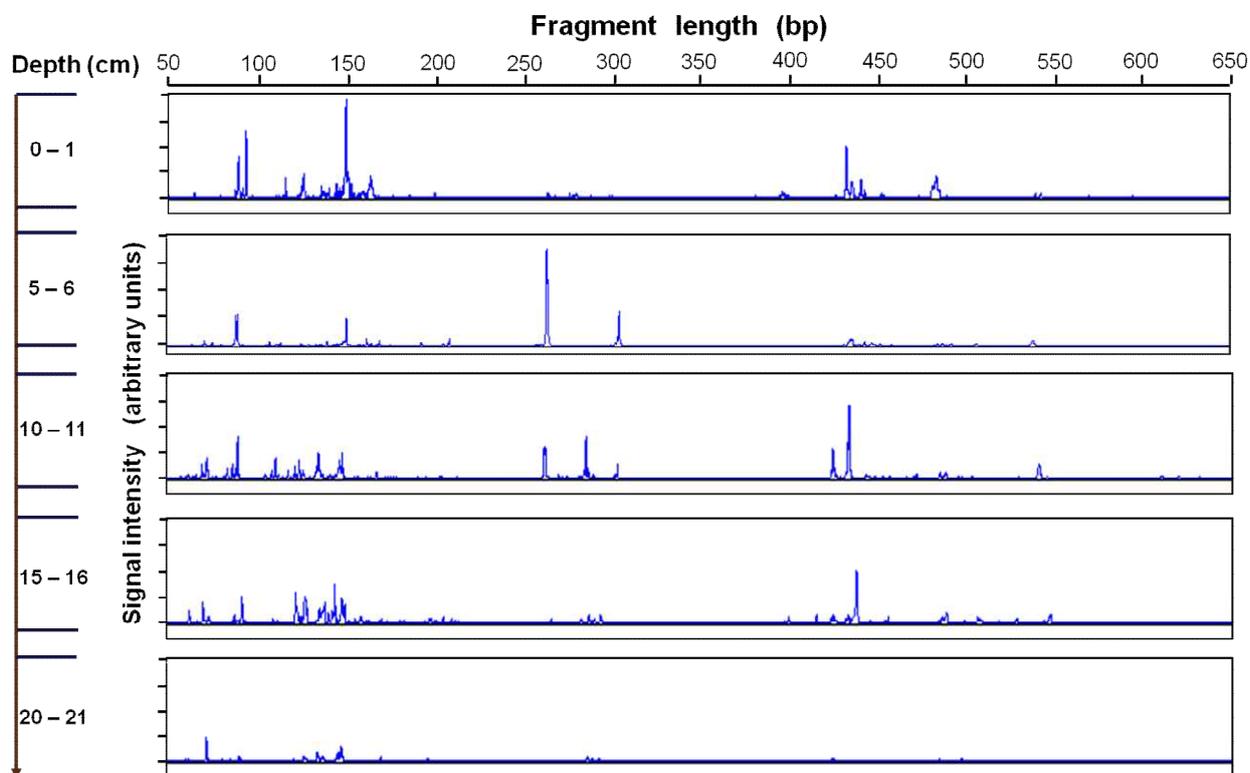
図(3)-10(d). TZサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



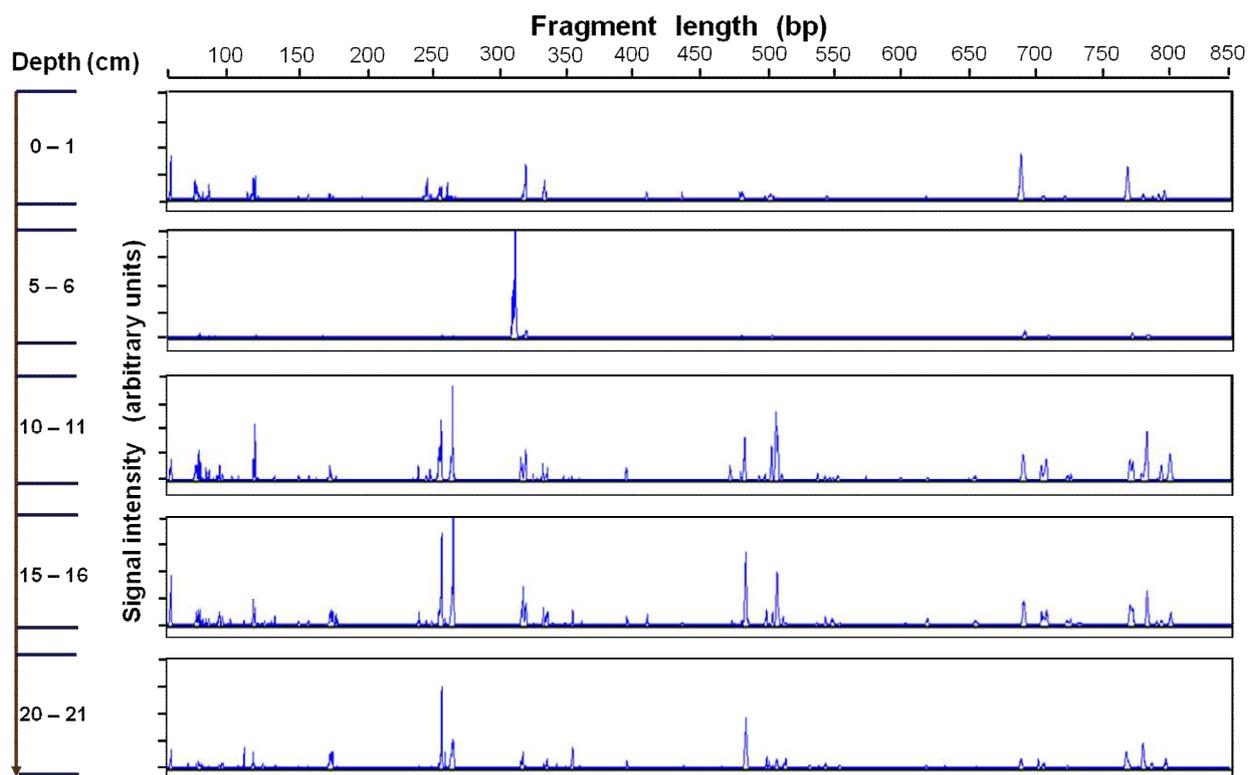
図(3)-10(e). SATサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



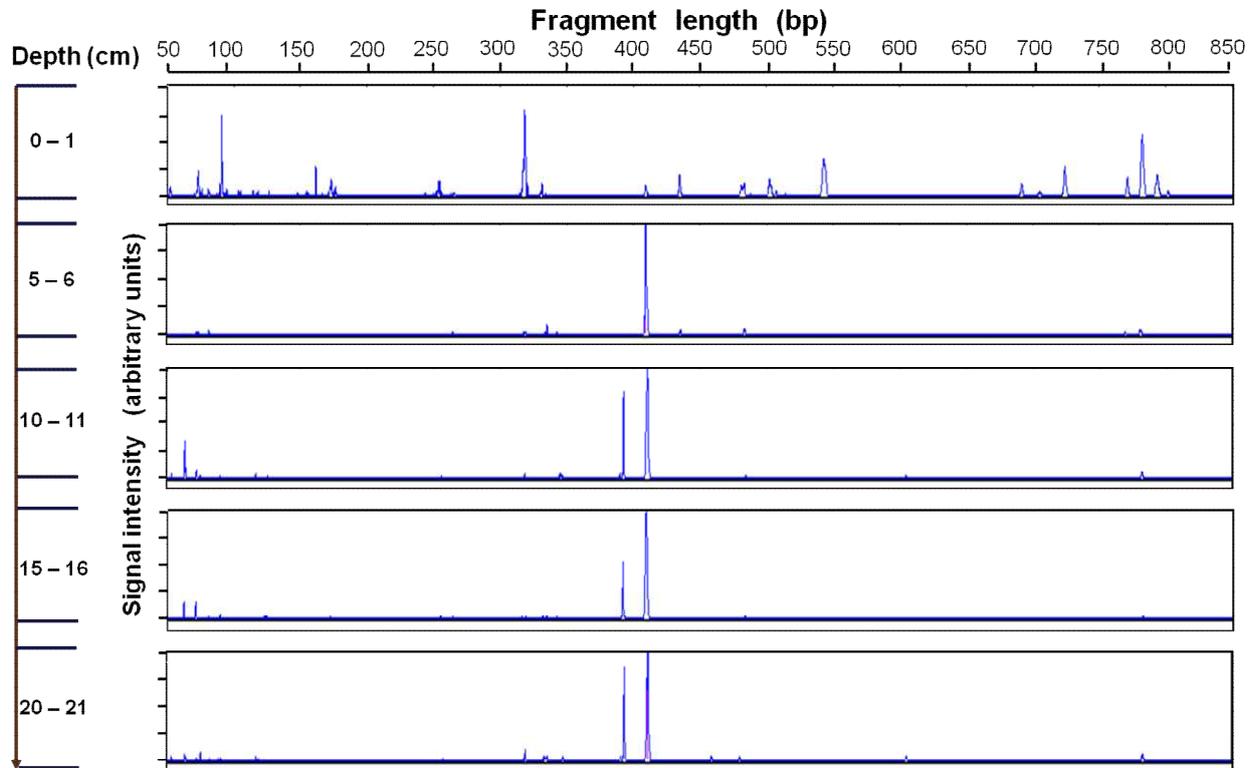
図(3)-10(f). UTサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



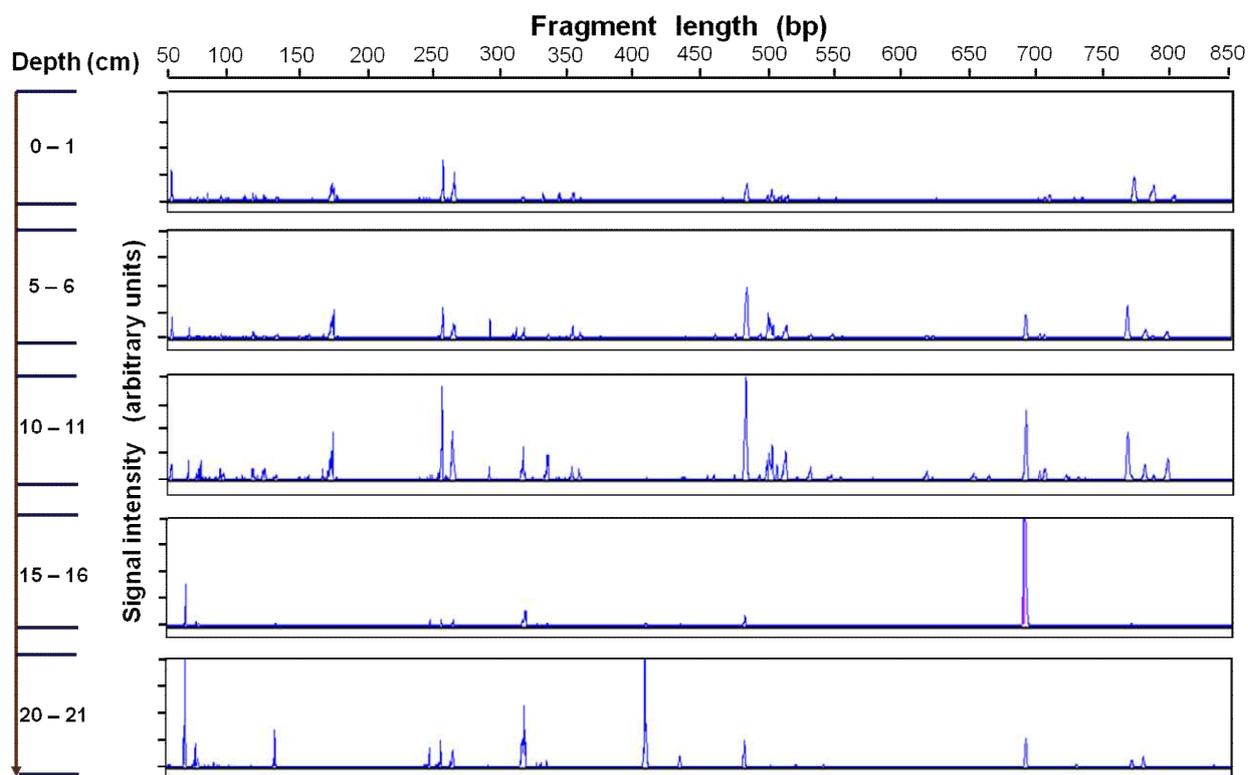
図(3)-10(g). EHサイトの真正細菌群集T-RFLP解析結果



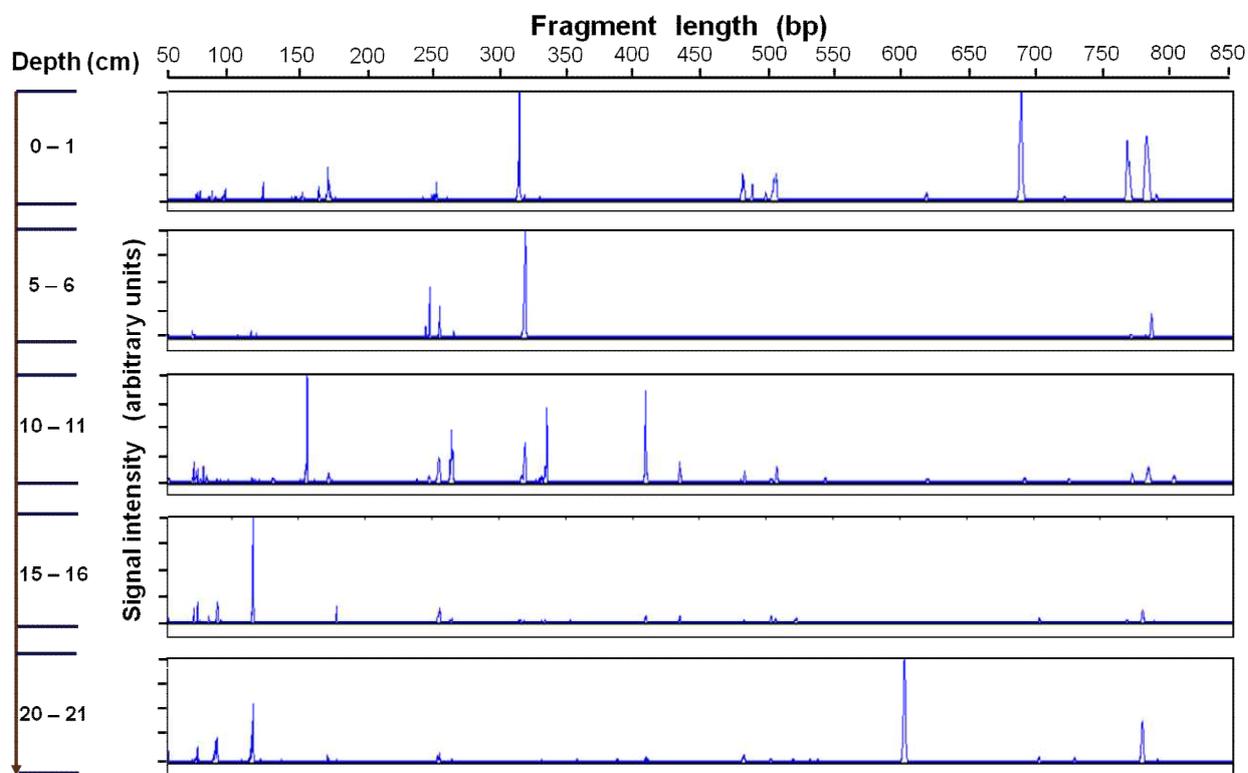
図(3)-11(a). UAFサイトの古細菌群集T-RFLP解析結果



図(3)-11(b). PFサイトの古細菌群集T-RFLP解析結果



図(3)-11(c). UTサイトの古細菌群集T-RFLP解析結果



図(3)-11(d). EHサイトの古細菌群集T-RFLP解析結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

凍土土壤中の微生物代謝活性、微生物群集構造の関係を詳細に解析した研究例はほとんど無く、本研究が初めての試みである。またセルロース分解活性の評価手法の応用は、凍土内微生物代謝活性の詳細を知る手法となるばかりでなく、地球化学的な炭素などの元素の物質循環を研究する上での非常に有効な手法であることから、微生物生態学研究に大きく寄与するものであると言える。夏季の森林火災跡地が北方森林土壌と同様に大気中CH₄ガスのシンクとして働いていることを示す測定データが得られていることから、森林火災跡地での継続的な測定調査研究および全球のCH₄ fluxへの定量的寄与率の推定など、今後要求される研究課題の芽を見いだしたと言える。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

土壌環境因子測定において、生物因子の定量的測定方法は、従来の最確率法（MPN法）などの選択的培養法から、土壌微生物群集構造を網羅的・定量的に把握可能な分子生物学的手法を適用する方向にシフトしつつある。本推進費研究では、従来法に先端の分子生物学的手法を加え生物因子を含む土壌環境因子を定量的に評価する方法を構築することを視野に置いており、他の気候区土壌環境調査にも十分適用可能なものである。従って、本研究の実施で得られた結果は、将来の対策等の基礎データとして重要な知見を提供するばかりでなく、他の地域での研究推進にも十分貢献できるものと考えられる。

また、森林火災跡地からのCO₂およびCH₄ flux、特にCH₄ についてシンクとして働いていることを示すデータが得られていることは、今後、火災跡地土壌の継続モニタリングの必要性に言及するものといえる。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで実施されている野外観測については、米国アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター（IARC）のLarry Hinzman所長、原菌芳信氏、岩田拓記氏の協力により、アラスカ大学が管理・運営するフラックス観測サイトでの試料採取等を実施した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) M. KONDO, M. UCHIDA, H. ENOMOTO, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, Y. KIM, and Y. SHIBATA: : International Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, Sapporo, Hokkaido, 2010 June
 “Snow Conditions in Northern Alaska and Possible Influences on Soil-carbon-dynamic-related Carbon Assimilation and CO₂ Emission”
- 2) M. UCHIDA, M. UCHIDA, M. UTSUMI, M. KONDO, Y. TAKAHASHI, and Y. SHIBATA : Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2), Tokyo Japan, 2010 Dec.
 “The heterotrophic respiration using old carbon in arctic soil: insights from compound-specific radiocarbon analysis”
- 3) M. KONDO, M. UCHIDA, Y. KIM, M. UTSUMI, T. SHINOZAKI, and Y. SHIBATA : Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2), Tokyo Japan, 2010 Dec.
 “Constraining radiocarbon signature of soil organic matter in tundra and boreal forests, Araska”
- 4) 内海真生、近藤美由紀、安立美奈子、内田昌男 : 第 45 回日本水環境学会年会 (2011)
 「アラスカ北極圏の湿原土壌環境特性の解析 I —土壌呼吸について—」
- 5) 秋山昇平、近藤美由紀、安立美奈子、内田昌男、内海真生 : 第 45 回日本水環境学会年会 (2011)
 「アラスカ北極圏の湿原土壌環境特性の解析 II —微生物群集構造について—」
- 6) 内海真生、近藤美由紀、安立美奈子、天野 (佐藤) 千恵、内田昌男 : 日本生態学会第 59 回大会、滋賀県大津市、2012 年 3 月 20 日
 「アラスカ北極圏陸上生態系の土壌呼吸特性解析」
- 7) H. ENOMOTO, Y. AUZUMA, H. HAYASAKA, M. HIRABAYASHI, K. G-AZUMA, T. KADOTA, H. YABUKI, T. OHATA, S. TAKAHASHI, R. KUSAKA, T. SHIROKAWA, N. ALIMASI, T. AOKI, S. SUGIYAMA, K. TATEYAMA, K. SHIMADA, M. UTSUMI and M. UCHIDA : the 3rd symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2012.
 “Arctic weather in 2012 summer and influences on Arctic Environment”
- 8) M. UTSUMI, M. UCHIDA, M. KONDO, M. ADACHI, and T. YAMAMOTO : 2012 AGU Fall Meeting, Dec. 04-09, San Francisco, USA
 “CO₂, CH₄ fluxes and bacterial diversities at terrestrial ecosystem along the trans-Alaska pipeline in tundra and boreal forest, Alaska”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催 (主催のもの)

- 1) 手賀沼から地球の水環境を診る (2011 年 10 月 17・27 日、2011 年 11 月 14・17 日 : 千葉県立柏高等学校) SSH 事業の一環として、柏高校 1 年生 (計 120 人) 2 年生 (計 120 人) に地球の水環境の現状を講義した。その際、アラスカ北極圏の現状についても紹介した。
- 2) 茨城県の水道水の現状と世界の水環境 (2012 年 2 月 28 日 : つくば安全安心子育てネット推進協議会 (主催者に筑波大学が含まれる)) 茨城県、特につくば市の水道水に関する情報を提

示し、世界の水環境の現状を紹介する際、アラスカ北極圏の現状についても紹介した。

- 3) 手賀沼から地球の水環境を診る（2012年11月6, 13日：千葉県立柏高等学校、観客100人）SSH事業の一環として、柏高校1年生（理数科および普通科 計100人）に地球の水環境の現状を講義した。その際、アラスカ北極圏の現状について本推進費で得られた結果の一部と共に紹介した。
- 4) キッチンの微生物学（2013年2月14日：つくば安全安心子育てネット推進協議会（主催者に筑波大学が含まれる）つくば市子育て支援センター、観客20人）微生物と人間との関わりについて、キッチンから見えてくることを提示し、低温環境である北極圏での食品保存や現地の人々の食生活の工夫を紹介した他、北極圏の現状についても紹介した。

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

（6）その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.
- 2) M.P. WALDROP, K.P. WICKLAND, R. WHITE, A.A. BERHE, J. W. HARDEN and V. E. ROMANOVSKY.: Global Change Biology 16, 2543- 2554. 2010.
“Molecular investigations into a globally important carbon pool: permafrost-protected carbon in Alaskan soils.”

(4) 土壌炭素動態モデルの開発および高精度化に関する研究

兵庫県立大学大学院
シミュレーション学研究科

伊勢 武史

平成22～24年度累計予算額：12,057千円

(うち、平成24年度予算額：4,075千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本サブテーマでは、激変の予想される北極高緯度地域の土壌における、炭素循環と地表面物理を統合したシミュレーションモデルを構築し、これを用いて北極高緯度土壌圏の炭素収支のシミュレーション再現と将来予測を行うことを目的とした。シミュレーションモデルの構築においては、ほかのサブテーマによって観測されたデータを積極的に用いることとし、現実に即したモデル構築に重点を置いた。その結果、完成したシミュレーションモデルは、アラスカ州フェアバンクス付近における土壌有機炭素の長期にわたる蓄積を適切に再現することができた。特記すべき成果として、有機質土壌における土壌炭素および地表面物理の垂直構造を明示的に再現したことが挙げられる。これにより、土壌中の詳細な観測データとの直接比較とシミュレーション精度の向上が見込めることとなった。

[キーワード]

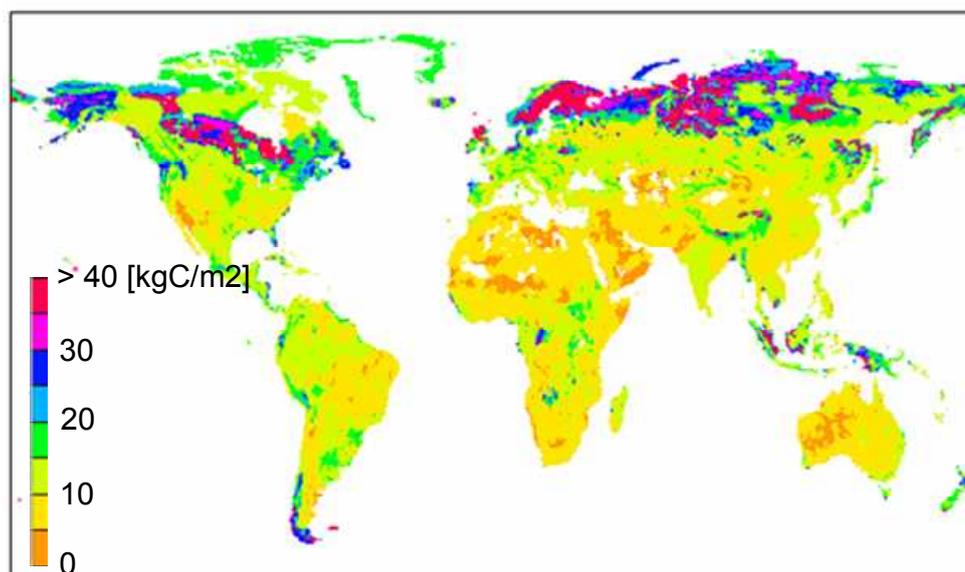
地球温暖化、将来予測、土壌物質循環、地表面物理、シミュレーション実験

1. はじめに

地球温暖化の影響が特に大きくなると予測されている北極高緯度地域の土壤には、ほかの気候帯と比較して特に大量の土壤有機炭素が蓄積されている。地球温暖化によって土壤温度が上昇し、また土壤の乾燥が進むこととなれば、この土壤有機炭素を分解する微生物の活性が上昇することとなり、その結果として放出される二酸化炭素は、さらに温暖化を加速させるという正のフィードバックを引き起こすこととなる。この現象は特に地下に永久凍土の存在する土壤において顕著で、永久凍土の融解は急激な土壤有機炭素の分解を引き起こすことになるであろう。このような可能性については従来から複数の研究者が指摘していて、国際的に認知されてきた。しかし、そのフィードバックが、いつ・どの程度生じるかは、これまで十分に研究されてこなかった。土壤の炭素循環と、土壤物理過程が複雑に相互作用する現象を包括的に再現するシミュレーションの枠組みが存在していなかったからである。

(1) 北極高緯度地域における炭素循環研究の重要性

土壤炭素循環と土壤物理過程の複雑な相互作用は、特に北極高緯度地域で顕著である。カナダ・アラスカ・シベリアなどの北極高緯度地域には特に泥炭地などの低湿地に大量の土壤有機炭素が蓄積されているが（図(4)-1）、それは北極高緯度地域の低湿地における土壤物理条件の特徴による。その場所は高緯度にあるため土壤温度が低く微生物による有機物の分解速度が遅いことに加え、土壤の排水性が悪く地下水位が高いため、好気性の微生物の活動が阻害されているのが理由として挙げられる。さらに、永久凍土が存在する場所では分解速度は極端に遅くなり、土壤炭素はほとんど分解されずに長期間安定した状態で保存されている。



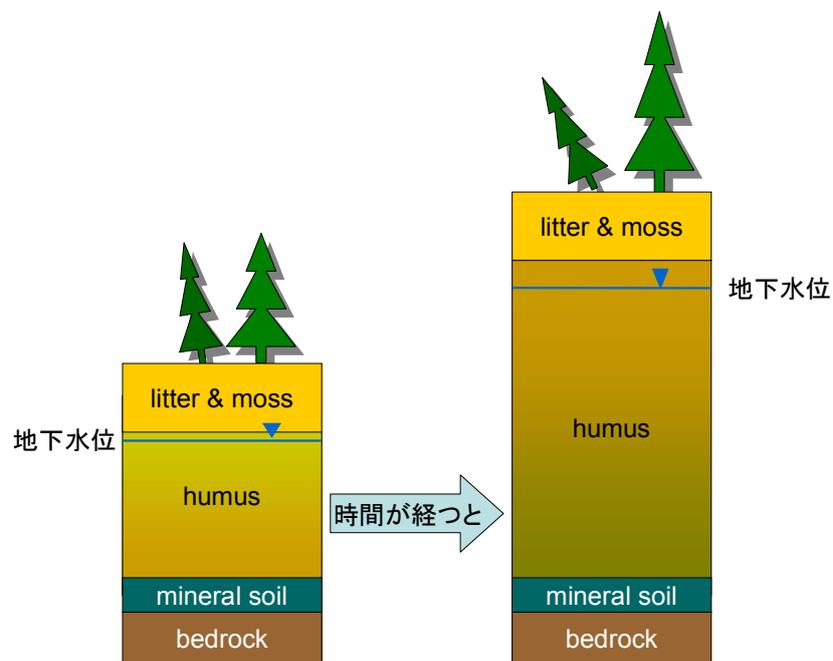
図(4)-1 土壤有機炭素の全球分布。北極高緯度地域には特に大量の土壤有機炭素の蓄積が見られる。図表は Ise and Moorcroft (2006)のデータにより作成。

このように、地球規模で見ても北方高緯度地域は極めて重要な炭素のリザーバーであるが、地

球温暖化によるこの地域の気温上昇は、ほかの地域と比べて特に大きくなると予測されている。特に気候の変化が激しくなると予想される場所に大量の炭素が眠っているわけだから、高緯度地域の温暖化が大量の土壌炭素の分解を招き、大きな二酸化炭素のソースとなることが懸念されている。加えて、温暖化による土壌の温度の上昇に起因して、永久凍土の融解などの劇的な変化が起こることも考えられる¹⁾。今世紀末までに90%以上の永久凍土が失われると結論づけた気候シミュレーションもある²⁾。温度の上がった土壌では微生物の活動が活発になり、土壌炭素の分解による二酸化炭素の発生や、メタンの生成量の増加など、温室効果ガスを放出する可能性を持っている。ひとたび永久凍土が溶けてしまうと、土壌炭素の分解は急激に進むと考えられている。これは、土壌温度が上がり微生物が活性化されること、排水性が良くなることで地下水位が下がり、好気性の微生物が活発に分解を始めることなどによる。これらは、気候変動を加速させる正のフィードバックである。このような正のフィードバックの引き金が引かれると、眠っている炭素の量が甚大なだけにその影響はきわめて深刻になるかもしれない。

(2) 北極高緯度地域の土壌に見られる複雑性

北極高緯度地域に多く見られる有機質土壌の典型例は泥炭である。鉱物質の土壌と違い、泥炭地では土壌炭素の蓄積によって土壌の厚さという物理条件が変わる。土壌そのものが蓄積された植物由来の有機物によって成り立っているからだ。土壌炭素が多く蓄積すれば泥炭が分厚くなる。泥炭土壌は排水性が極端に悪いため地下水位が高くなる。これにより土壌が嫌気的な環境に支配されるようになり、炭素分解速度が落ちることでさらに土壌炭素の蓄積が促される(図(4)-2)。正のフィードバックである。逆に、気候変動によって土壌炭素の分解が促されると、泥炭層の厚さが減少し排水性がよくなることで、さらに好気性微生物による活発な分解作用が進む。この、土壌炭素の分解と地下水位の低下の相互作用も正のフィードバックであり、土壌炭素の分解はさらなる地下水位の低下を引き起こす。



図(4)-2 泥炭地の形成に関する炭素循環（泥炭の厚さに関連）と、土壌物理（地下水位に関連）のフィードバックの模式図。泥炭地の形成後、時間の経過につれて、土壌有機炭素の蓄積に伴い泥炭の厚みが増大する。泥炭は高い保水力を持つため、泥炭の蓄積は地下水位の上昇をうながす。すると、土壌環境は以前にも増して嫌氣的になり、微生物による土壌有機炭素の分解が抑制され、さらに泥炭の厚みが増大することになる。

泥炭地の炭素の蓄積や分解は、土壌の温度と水分量によってコントロールされている。とくに地下水位は、好気性と嫌気性の環境を分ける境界線として土壌炭素のダイナミクスに重要な役割を担っている。地下水位の上と下のどちらに位置するかによって、土壌炭素の分解速度は大きく変わるからだ。では、温暖化による地下水位の変化はどのようなものになるのだろうか。それには、場所・温暖化の程度・過渡的变化などの多様な要素が複雑に絡み合うため、北方泥炭地に共通する単純な答えを出すことはできない。たとえば、カナダ中部の泥炭地では、永久凍土の融解が土壌の崩壊を促進し、地表面が陥没するため土壌が湿潤化するというメカニズムが報告されている³⁾。一方、永久凍土の融解により土壌に水がしみこみやすくなるため、水の流出を招き土壌が乾燥化するというメカニズムも存在する。

（3）先行研究事例と問題点

このような土壌中の物理変化と土壌炭素のフィードバックとそのダイナミクスを高精度で予測し将来予測に反映させるため、土壌物理モデルと炭素循環モデルのカップリングが近年注目されているが、その成果は現状では多くは見られない。本サブテーマの先行研究⁴⁾がその数少ない一例である。この先行研究でカップリングを行った土壌物理モデルは、気温・日射量や降水量などの気象条件をインプットとして土壌の温度や水分量を推定するモデルであり、土壌炭素循環モデルは、土壌の深さごとの環境条件に基づいて分解速度を決定するモデルである。これらのモデルは

個別には開発・発展が進められているが、それぞれをリアルタイムでカップリングして長期予測を行うには、さまざまな科学的・技術的障壁がある。そこで本サブテーマでは、先行研究に見られた問題点を克服し、土壌炭素循環と土壌物理過程を適切にカップリングして将来予測につなげるための研究を行った。

2. 研究開発目的

本サブテーマの研究開発目的は、北極高緯度土壌圏における炭素循環を定量的に再現し、また将来予測を行うことで、地球温暖化研究の進展に貢献することである。そのため本サブテーマでは、北極高緯度土壌圏の炭素循環と土壌物理過程のシミュレーションを高精度化し、それぞれの要素間でみられるフィードバックを定量的に再現するための炭素循環－土壌物理過程結合モデルを構築する。複雑な土壌過程を明示的に表現するために必要なモデルの条件として、炭素蓄積と土壌物理過程双方の垂直構造をモデル内に再現することとする。この一連のシミュレーションモデル開発は世界初の試みであり、その成果は北極高緯度土壌圏における炭素循環の定量評価と将来予測に大きく貢献する。

3. 研究開発方法

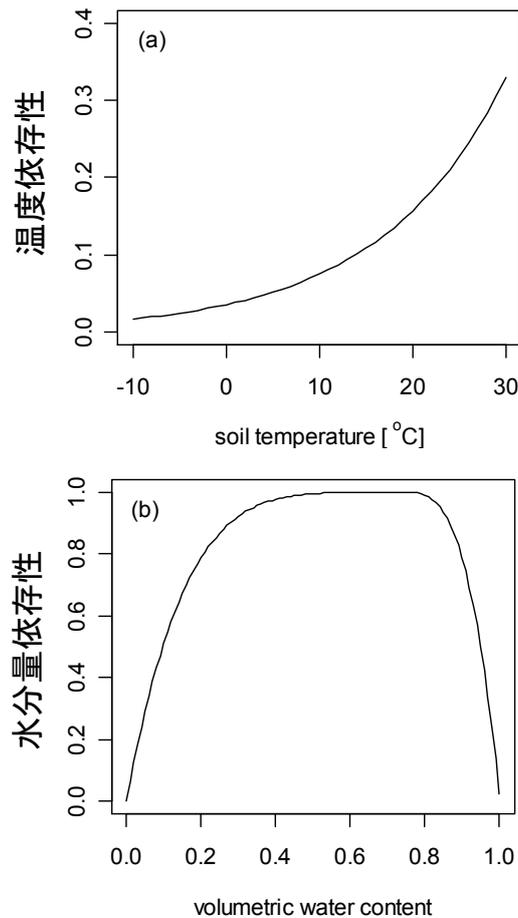
劇的な変動環境下にある北極高緯度域の土壌有機炭素の中・長期的な動態を再現するモデルの開発とその高精度化のための研究開発方法は以下のとおりである。まず、本サブテーマにおける研究の基盤となる土壌物理過程モデルおよび極域土壌炭素動態モデルの開発とその挙動の検証を行った。既存の土壌物理過程モデルや土壌炭素動態モデルの多くは温帯などの比較的温和な環境条件下で開発・適用されてきた。そのため、北極域に特有の永久凍土と活動層に関する物理プロセスや、有機質土壌のダイナミクスと土壌物理過程のフィードバックが欠如しており、気候変動下での影響評価や予測を的確に行うには不十分であった。たとえば、永久凍土や地下水位の動態は、土壌炭素の蓄積・分解やメタンの生成・酸化を決定する根本的な要因であるが、これらの動態をメカニスティックに扱い予測研究に応用するには、土壌温度と水分量を物理的に精密にシミュレーションすることが肝要である。

そこで本サブテーマでは、先行研究に用いられた陸域生態系モデルをベースに極域土壌炭素動態モデルを開発し、再現されたアラスカの炭素動態が観測結果を再現できるか検証した。さらに、既存の土壌物理過程モデルと極域土壌炭素動態モデルを結合し、長期間に渡る将来予測を的確に行うためのプラットフォームを構築することとした。

(1) 極域土壌炭素動態モデルの構築

先行研究^{4,5)}に用いられた陸域生態系モデルをベースに極域土壌炭素動態モデルを構築した。先行研究はカナダの北方林に適用され高精度なモデル再現性を示したが、このモデルが凍土が点在するアラスカ域でも同様の再現性を持つことを確認し、また必要な改変を加えアラスカ域の過去・現在・将来の炭素動態を適切にシミュレーションするプラットフォームとして研究の中心に位置するモデルを作り上げた。炭素動態モデルを構築する上で重要な要素は、土壌炭素を分解する微生物活性の環境依存性の定量化である。本サブテーマでは先行研究で用いた環境依存性を詳細に検討し、その妥当性を確かめた(図(4)-3)。シミュレーションに用いられた環境依存性は、

土壌温度依存性および土壌水分量依存性である。土壌温度依存性は、土壌炭素動態のシミュレーション研究に多く使われている $Q_{10}=2.0$ を使用することとした。土壌水分量依存性については、既存の土壌炭素動態のシミュレーション研究のデータをそのまま援用することができなかった。泥炭地などの北極高緯度地域の低湿地の微生物活性を適切に再現するには、土壌の水飽和によって生じる還元環境下での活性低下を明示的に示す必要があるからである。本サブテーマでは検討の結果、水飽和状態では微生物活性が最適環境と比較して5%まで低下するという仮定を用いることとした。



図(4)-3 土壌微生物活性の環境依存性。(a)土壌温度依存性。(b)土壌水分量依存性。bにおいて、微生物活性は土壌水分量が土壌の空隙の75%を満たした状態が最適で、100%を満たした状態は嫌気環境に起因して活性が最適状態の5%に低下するものとした。

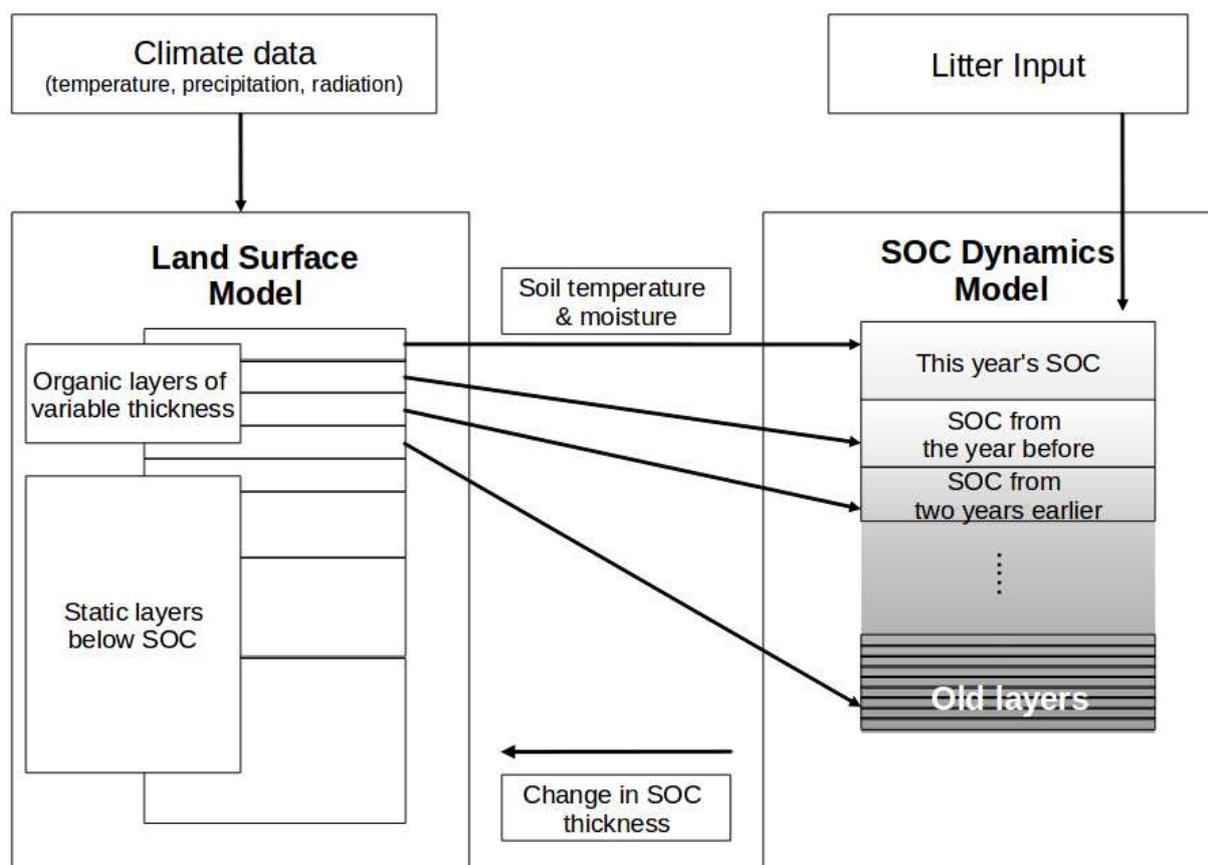
以上のように構築されたモデルは、フィールドデータを元にパラメーターにチューニングを施し、再現性を高めた。アラスカの北方林地帯での放射性炭素同位体のフィールドデータをもとに、中・長期的な炭素蓄積と分解のダイナミクスを再現する数理モデルを開発した。これにより、詳細な土壌有機炭素蓄積の垂直構造観測データとシミュレーション結果を直接比較することができるようになった。さらには、観測点における気候や地質・地形的要因が炭素ダイナミクスにおよぼす影響を考察した。シミュレーションによる予測は、アラスカ州フェアバンクスにおける現地観測データと比較され、モデルの再現性を検証した。

(2) 土壌物理過程モデルの導入と検証

北極高緯度圏の土壌では、土壌炭素が蓄積することで土壌中の水容量が増加し、これによる水飽和の増大がさらなる還元的環境の生成を進めることで、土壌炭素の蓄積がさらに進むという正のフィードバックが起こっている。また、泥炭などの有機質土壌の蓄積は土壌の断熱効果を高めるため、夏季の土壌温度は有機質土壌の厚さが増加するにつれて低下するという特徴がある。この現象は夏季の微生物活性の低下を進め、これがさらなる有機質土壌の蓄積を促進するのである。これらの現象は以前から定性的には理解されていたが、これを定量的に再現するシミュレーションモデルはこれまで存在していなかった。それは、土壌物理過程モデルと土壌炭素動態モデルを結合して研究するという発展が行われていなかったことに加え、土壌物理過程モデルのほうでも、土壌の厚さがダイナミックに変化するという現象を取り扱っていなかったためである。このような正のフィードバックはその特性故に不安定であり、たとえば温度の上昇による土壌有機炭素の分解促進は、断熱効果・保水力の減少によりさらなる土壌有機炭素の分解を促すこととなる。

そこで本課題では、この相互作用を再現するため、土壌物理モデルNoah Land Surface Model⁶⁾ (Noah LSM) と土壌炭素分解モデルED2.0-peat⁴⁾ (SDM)を統合した、Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM)を開発した。このモデルでは、土壌有機炭素の分解速度を土壌物理過程モデルで算出されたそれぞれの地中深度ごとの温度および水分量から算定し、それによって起こる土壌炭素の蓄積・分解を計算する。土壌炭素蓄積量の変化は有機質土壌の厚さの変化につながり、さらにその厚さの変化は次の時間ステップの土壌物理過程に影響を与えるという相互作用を再現した。

LSMでは、気候のデータを元に土壌の温度や水分量などを深さによる層ごとに計算する。LSMには8層の土壌層が考慮されており、有機土壌層の蓄積や分解に伴い上4層の厚みが増加する。SDMでは、年ごとのリターからの土壌炭素の加入を明示的に再現するため、前年の有機土壌層の上に当年の層が形成されるというプロセスが毎年繰り返される。各層の土壌炭素は、それぞれの深さごとの物理条件に応じて算出される分解速度に応じて徐々に分解されていく。これにより、シミュレーション年数に応じた数の有機土壌層が形成され、古い層ほど土壌下部に存在し、また分解が進んでいるというリアルな垂直構造を再現することができた(図(4)-4)。また本モデルでは、各層に土壌炭素の易分解性・難分解性の画分プールを持っている。そのため新しい層は易分解性の画分が主体で、古い層では難分解性の画分が主体の腐植を多く含むという状態を再現することができた。



図(4)-4 Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM)のモデル構成。PB-SDMは、土壌物理モジュール(LSM)と炭素循環モジュール(SDM)によって構成される。SDM内での土壌炭素分解速度は、LSMによって算出される深さごとの土壌温度と水分量によって推定される。SDMの土壌炭素蓄積量は、炭素の質量率および土壌密度によって有機土壌の厚みに変換され、それはLSMで用いられる土壌プロパティに反映される。図中のSOCはsoil organic carbon(土壌有機炭素)の略。

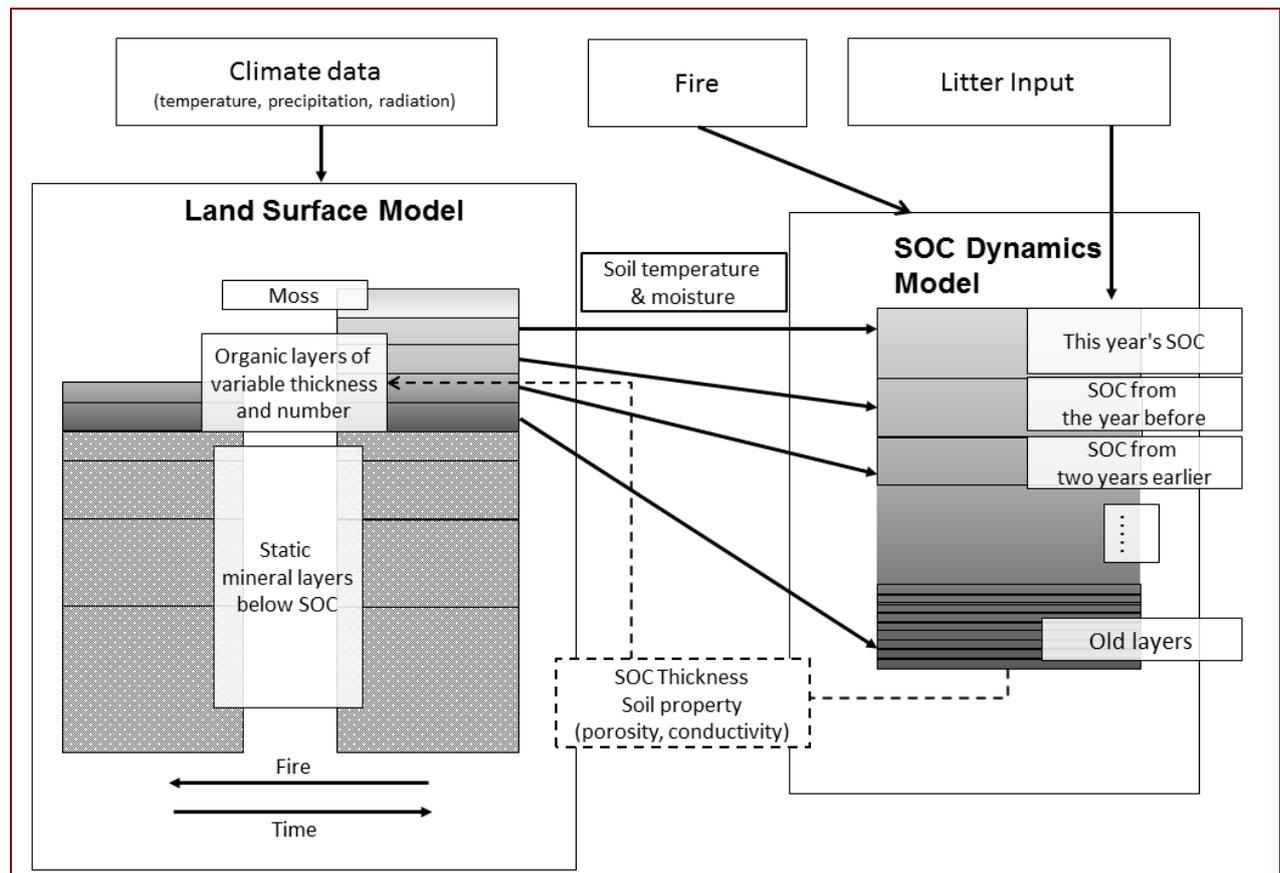
(3) 土壌炭素循環－土壌物理過程結合モデルの改良

完成したPB-SDMにみられたいくつかの課題を解決し、そのモデルを使ってアラスカにおける広域の土壌炭素動態と将来予測を行った。このモデルを用いてフェアバンクス近郊で観測された土壌有機炭素の動態を再現することに成功した。

フィールド調査により、モデルが再現しているアラスカ内陸部の北方森林帯は、地表の大部分を厚いコケ類が覆いその下の土壌に対してさらなる断熱効果を与え、大量に水を含むスポンジ状の性質により土壌の保水力を上げていることが分かっている。また頻繁に森林火災が自然発生し、多くの土壌有機炭素やコケ類が消失し、その影響によりコケ層や有機質土壌層の断熱効果が失われ、その影響はその後何年にもおよぶことが分かっている。これらの要素は土壌の炭素循環に対し大きく影響していると考えられているが、PB-SDMには明確に再現されてはいなかった。PB-SDMの土壌物理過程部分はNoah LSMに基づいているが、Noah LSMは土壌の性質が垂直軸に沿って違うことを想定していなかった。しかし上記にあるように、コケ類や有機質土壌の層は、その下にあ

る鉱物質の土壌より熱の伝導率が低く多くの水を含む。さらに、アラスカの地域全体で見ると同じ北方森林帯でも、場所によって土壌有機炭素量に大きく違いがあることが分かっているが、PB-SDMでは一地点でのシミュレーションしかできず、このままでは広域における評価を行うことができなかった。

そこで本サブテーマでは、上記の問題点を改善しアラスカの広域でのシミュレーションによる温暖化予測をすることを試みた。PB-SDMにコケ類の層を加え、さらに森林火災を定期的もしくはある程度のランダム性によって発生させた。コケ類の層と有機質土壌層にそれぞれ特有の性質を持たせることで北極高緯度土壌圏の垂直構造を明示的に再現し、土壌有機炭素蓄積によるフィードバックの影響を適切に表現することとした（図(4)-5）。さらに、アラスカ広域のシミュレーションを行うため、GIS（地理情報システム）ソフトウェアを用いて対象地域を地形により分類し、各地でのデータでシミュレーションを検証した。GISを用いてアラスカ内陸域でのこれらの土地を識別し面積を計算し、それぞれの土地での温暖化の影響をシミュレーションすることにより広域での温暖化の効果を計算した。



図(4)-5 北極高緯度土壌圏に特有のプロセスを加えることで改良されたPhysical and Biogeochemical Soil Dynamics Model version 2.0 (PB-SDM v2.0)のモデル構成。図中のSOCはsoil organic carbon（土壌有機炭素）の略。火災によりコケ類が消滅し地中の土壌有機炭素の量が減少し、再び時間をかけて蓄積するようになった。また、土壌有機炭素の分解の程度によりその土壌の性質が変わり熱伝導率や保水力に影響が表れるために必要な改良を施した。

本研究で構築されたPB-SDM v.2.0では、コケ類はその土地の植生による生産力に比例して一定の速度で成長し、コケ類の堆積に比例して死滅していくようにした。コケ類の成長と死滅の速度はCarrasco et al.⁷⁾が用いたパラメーターを参考にした。森林火災が起こるとそれまで存在していたコケ類は全て消滅し、また地表からの成長になる。そのため森林火災の直後は急激に成長するが、十数年ほどで平衡状態に達する。

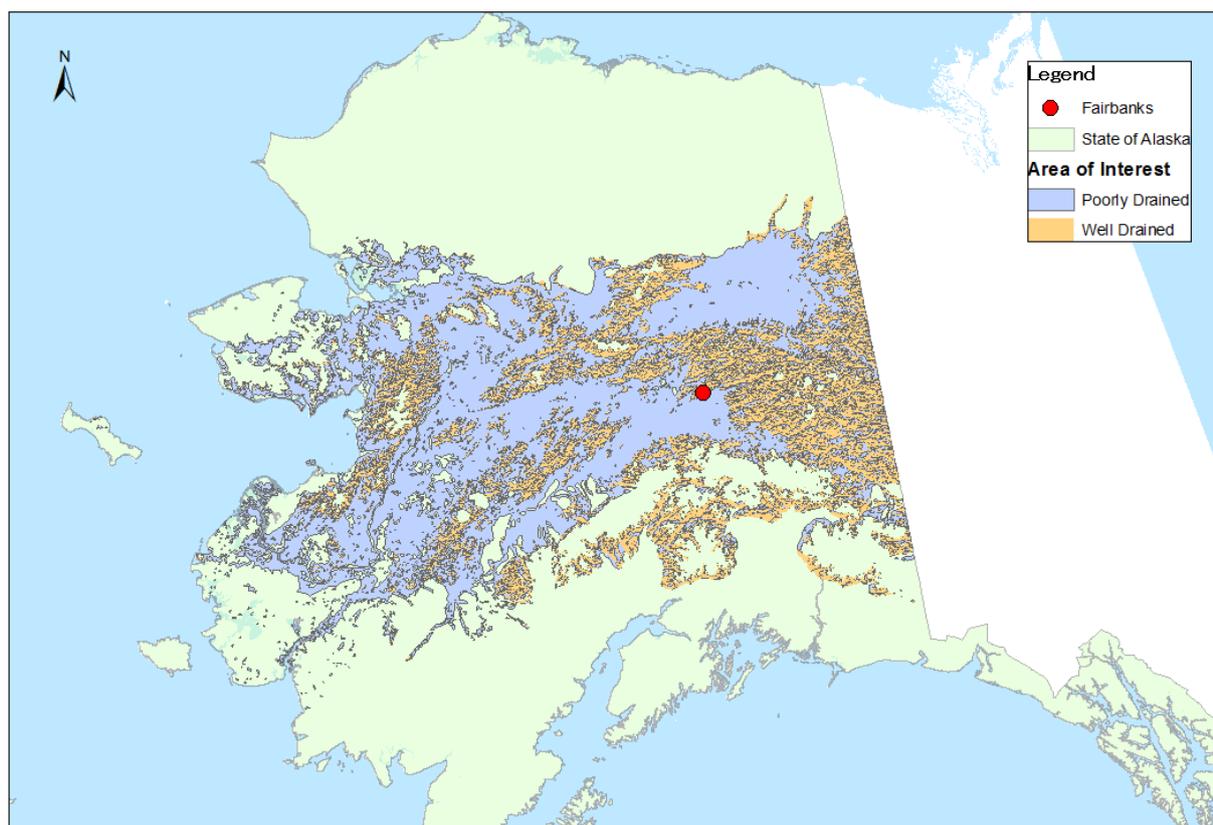
森林火災は定期的に発生させるかランダムに発生させるか選ぶことができるようにし、定期的に発生させた場合は200年に一度、ランダム発生の場合は200年を平均とした50年から350年の一様分布で発生するようにした^{7,8)}。火災の発生時にはコケ類を全て消滅させ、3.66kgの土壤有機炭素を消滅させるようにした⁹⁾。また火災によるコケ類や土壤有機炭素の層の動態とその影響を反映させるため、LSMの層の変動をより融通の利くものに変えた。その数を最低でミネラルの4層のみの状態から、コケ類の1層と土壤有機炭素が25層を合わせた30層まで変動させ、土壤有機炭素の厚みは1層につき0cmから5cmまで対応し全体で0mから1.25mまで変動できるようにした。

コケ類と高緯度の土壤にある土壤有機炭素の性質は他の地域の土壤にある有機土壌と比べ非常に高い保水力と空隙率および非常に低い熱伝導率を有しており、Noah LSMには該当するパラメーターが存在していなかった。これをより現実的なものにするため、O' Donnell et al.¹⁰⁾に記載されているデータやフィールドでの調査を元にパラメーターを設定し、熱伝導率を計算するように変更した。本研究で用いた主要なパラメーターは表(4)-1のとおりである。

表(4)-1 本研究で用いた主要なパラメーター。本文中に特に記載のないものについては、Ise et al. (2008)に基づく。

パラメーター名	単位	値
リター供給量	kg C m ⁻² y ⁻¹	0.358
土壌層の厚さ（初期値）	m	0.1, 0.3, 0.6, 1
土壌層の厚さ（最小値）	m	0.025
土壌層の厚さ（最大値）	m	0.1
土壌有機炭素分解率（metabolic画分）	y ⁻¹	11
土壌有機炭素分解率（structural画分）	y ⁻¹	4.5
土壌有機炭素分解率（humified画分）	y ⁻¹	0.20
炭素含有率（fibrous層）	kgC kgSoil ⁻¹	0.4
炭素含有率（humic層）	kgC kgSoil ⁻¹	0.3
透水速度（fibrous層）	m s ⁻¹	6.8
透水速度（humic層）	m s ⁻¹	8.0

土壌有機炭素蓄積量の地域多様性を計算するために、排水性の性質が違う2種類を想定した¹¹⁾。前述のKane et al.⁹⁾に基づき、北向き斜面と低地を排水性の悪い土地、南向き斜面を排水性の良い土地とし、PB-SDM-v2.0へ入力される日光量を調整することで再現した。次に、アラスカの内陸北方樹林域を排水性で分類するにあたり、地理情報システム（GIS）を用いて植生と永久凍土の地図から、北方樹林であり永久凍土が少なくとも断続的に発生している地域を指定し、標高図から低地、北向きの斜面、南向きの斜面へと分類した(図(4)-6)。GISを用いて分類された排水性の良い土地と悪い土地の面積は、それぞれを排水性の良い土地の面積を106283.7km²、排水性の悪い土地は394723.5km²と推定した。この面積比を用い、最終的なアラスカ北方林地帯における土壌炭素収支のダイナミクスの解明と将来予測を行った。



図(4)-6 排水性により分類されたアラスカ内陸域。山岳地帯、ツンドラ地帯、永久凍土の可能性が低い地域はモデルから除外されている。

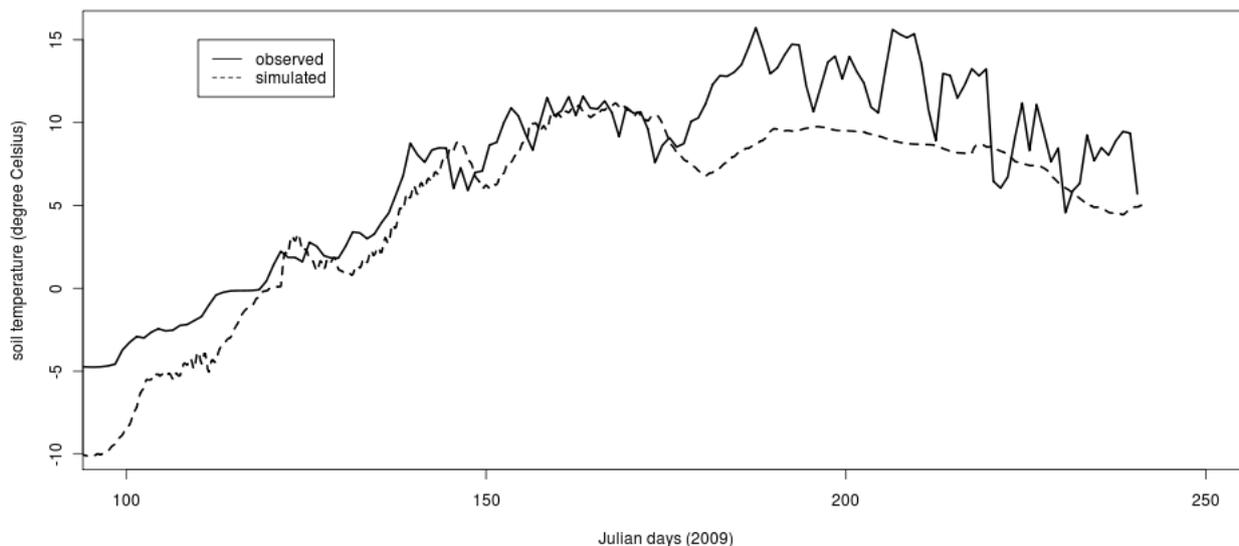
4. 結果及び考察

完成したPB-SDMを用い、アラスカ州フェアバンクス付近の北方林における気象データと土壌データを使用したシミュレーションを行った。モデルを定常状態にするための2000年間のシミュレーション（スピンアップ）の後、2003年から2010年までの気象データを用いたシミュレーションを行った。シミュレーション結果の検証により、PB-SDMは土壌の物理環境および土壌炭素の蓄積を適切に再現できることが分かった。

(1) 土壌炭素循環および土壌物理過程の再現性の検証

アラスカ州フェアバンクス付近の該当サイトにおける気象および地表面物理データ（気温・降水量・湿度・風向・風速・短波放射・長波放射）を入力データとしてPB-SDMの土壌物理モジュールによるスピンアップを行った結果、永久凍土の深さの推定値は29.4cmとなった。これは観測値である29cmにきわめて近かった。土壌炭素分解が盛んに行われる夏季の土壌温度の変化と、春先の雪解けのタイミングは観測結果とよく一致した(図(4)-7)。これにより、PB-SDMは該当サイトにおける地表面物理過程を的確に再現していることが分かった。先行研究では、永久凍土の存在の有無を再現すること自体が挑戦となるレベルの研究が多いなかで、本サブテーマによって構築されたシミュレーションモデルの精密性が浮き彫りとなった。また、永久凍土より上に存在する層に蓄積された土壌有機炭素量は観測によると25.06kgC m⁻²と推定されたのに対し、PB-SDMは

28.470kgC m⁻²であった。このことは、土壤有機炭素の蓄積と分解というダイナミクスを該当サイトの気象および地表面物理データから首尾よく推定できたことを意味し、ここで使用した土壤炭素循環モデルが気候変動下における土壤炭素動態を的確に推測できる可能性についての期待を抱かせることとなった。

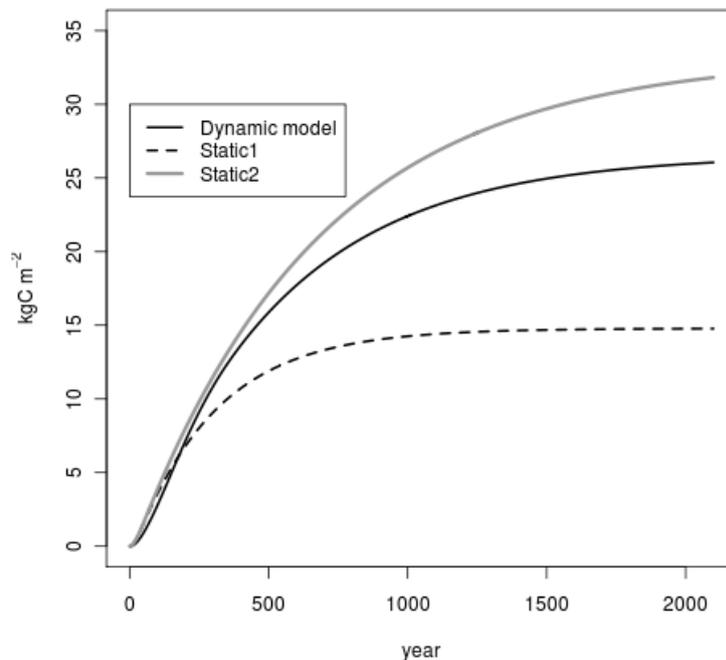


図(4)-7 2009年の春から夏にかけての土壤温度のシミュレーション結果(破線)と観測データ(実線)の比較。

(2) 土壤炭素循環－土壤物理過程結合モデルの理論的振る舞い

次に、土壤物理プロセスと土壤炭素動態の相互作用の大きさを定量化するため、本課題で開発されたPB-SDMをDynamicモデル（相互作用を含んだモデル）とし、これに対して、PB-SDMを改造し土壤物理プロセスと土壤炭素動態の相互作用を持たないようにしたモデルをStaticモデルとし、両者の挙動を比較した。なお、Dynamicモデル内の有機土壌層の厚さはリター加入量と分解量のバランスによって決定され、環境の変化に応じて増減するのに対し、Staticモデルでは有機土壌層の厚さを初期条件として与える必要がある。そこで、有機土壌層の厚さを地表から10cmに固定したモデル(Static1)と、30cmに固定したモデル(Static2)の2種類を用いることにした。

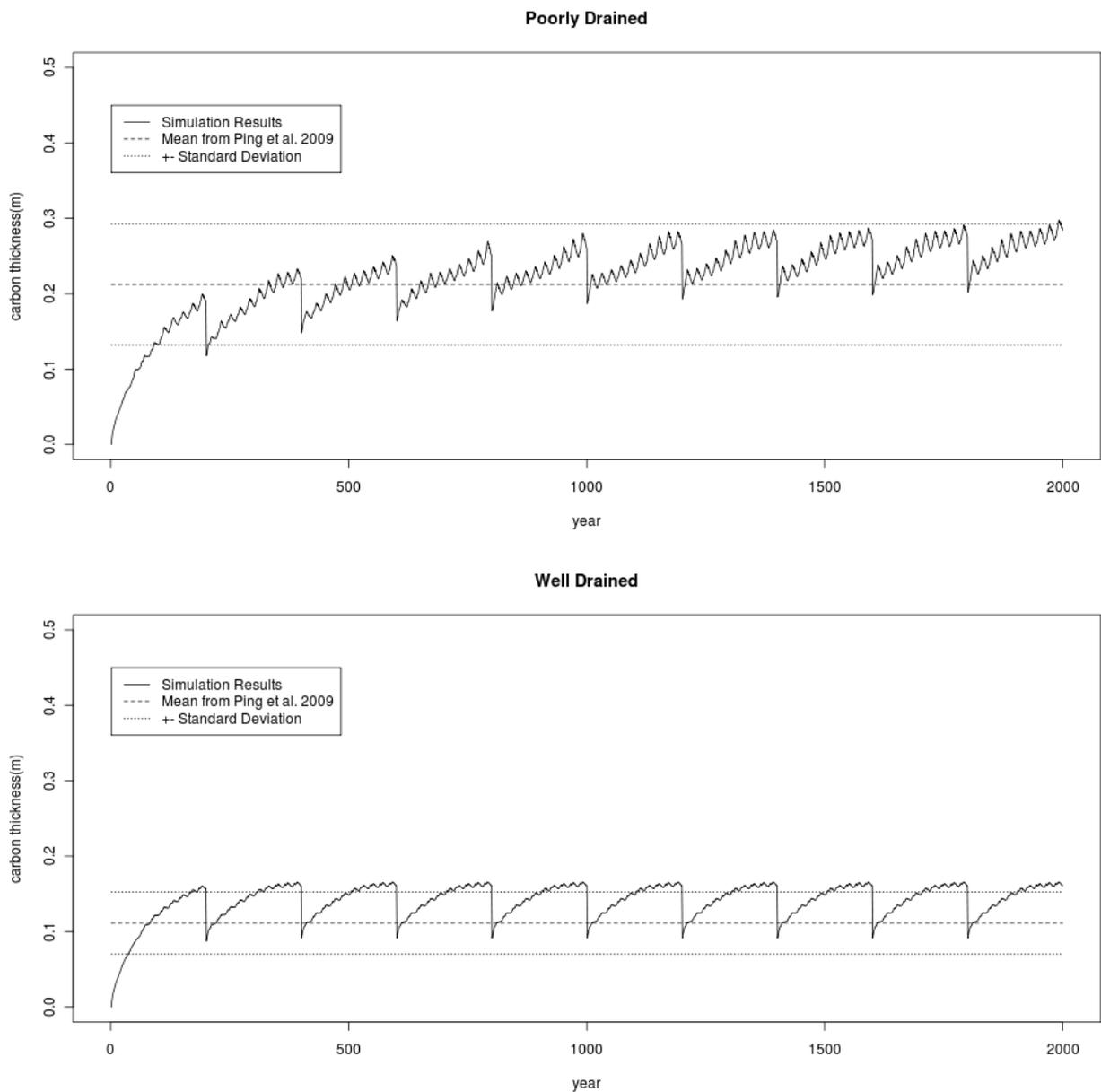
比較の結果、DynamicモデルとStaticモデルでは土壤炭素動態に大きな違いがあることが分かった(図(4)-8)。Static1による土壤炭素蓄積量はDynamicの50%ほどであったのに対し、Static2の蓄積量は120%を超えていた。まったく同じ気象条件下での実験であったにもかかわらず、土壤の深さを初期条件として与える従来型のStaticモデルでは、シミュレーション結果は初期条件に大きく左右されることが分かった。これにより、従来型のモデルの問題点が明らかにされたとともに、有機土壌層の厚さを客観的かつダイナミックに決定するPB-SDMの優越性が強調されることとなった。



図(4)-8 DynamicモデルとStaticモデルによる土壌炭素蓄積動態の比較。Dynamicモデルは本サブテーマで開発したPB-SDMであり、有機土壌層の厚さが土壌炭素の蓄積と分解にリアルタイムで対応して変動する。Staticモデルは有機土壌層の厚さを変化させないモデルであり、これによりPB-SDMの理論的振る舞いを検証した。有機土壌層の厚さを有機土壌層の厚さを地表から10cmに固定したモデル(Static1)と、30cmに固定したモデル(Static2)の2種類がある。

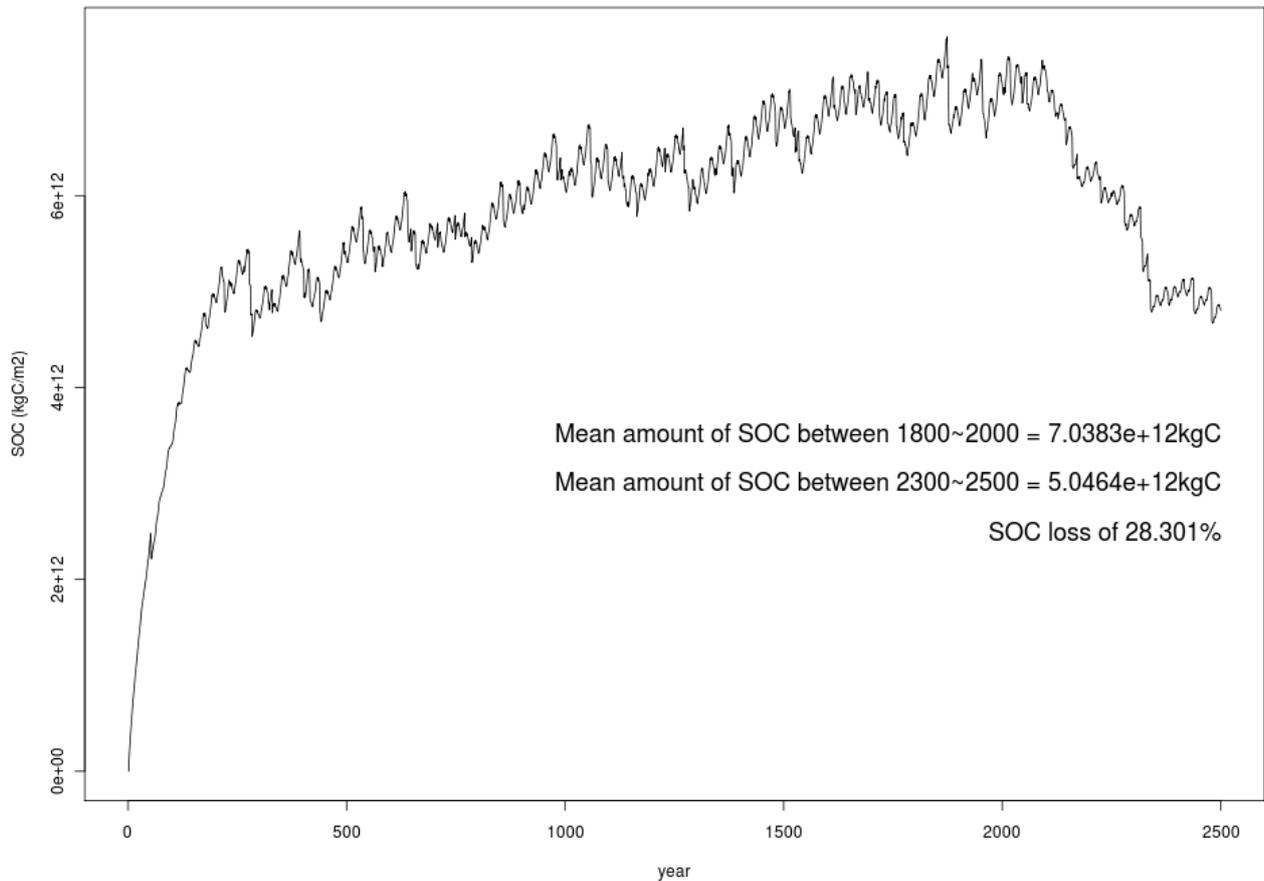
(3) 土壌炭素循環－土壌物理過程結合モデルによる将来予測

北極高緯度土壌圏に特有な物理プロセス・物質循環プロセスを明示的に扱うことによって改良を施したPB-SDM v2.0を用いてシミュレーション実験を行い、またその結果を土地の排水性により分類して土壌有機炭素量を記録していたPing et al.¹²⁾のデータを用いて検証した(図(4)-9)。その結果、PB-SDM-v2.0によるシミュレーションはPoorly drained及びWell drainedのふたつの排水性タイプを持つ地形それぞれにおける土壌有機炭素蓄積量の観測データを適切に再現していることが分かった。この検証結果からPB-SDM v2.0はアラスカ内陸北方樹林広域でのシミュレーションを行うのに十分な信頼性があると判断した。



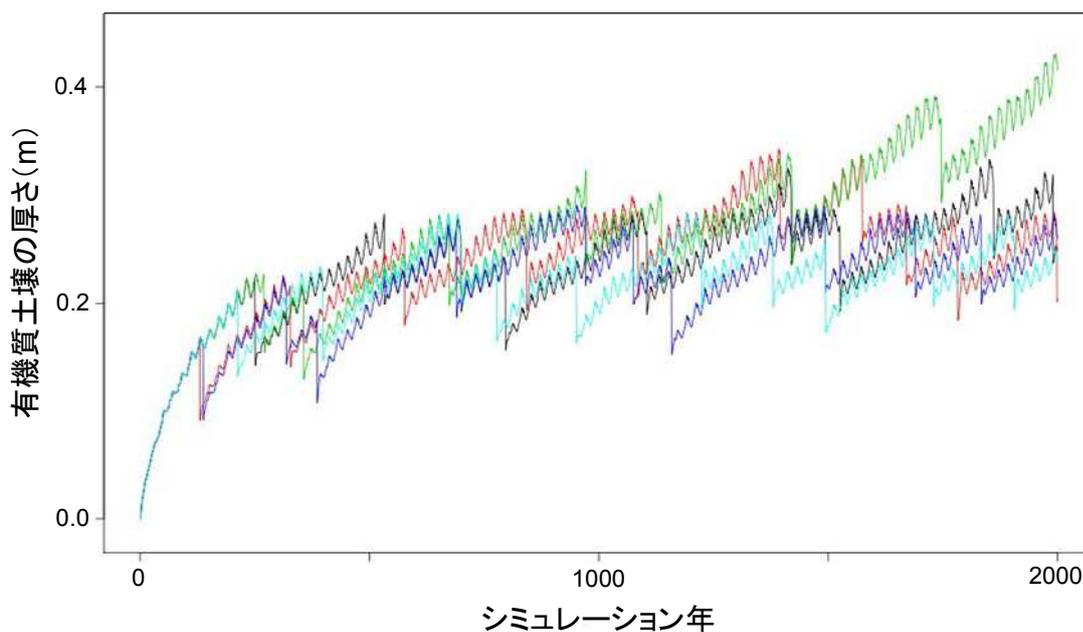
図(4)-9 シミュレーション結果と観測の検証。アラスカ内陸北方樹林域を排水性により大きく2種類に分け、排水性の低い土地(Poorly Drained)と高い土地(Well Drained)それぞれでPing et al. 2010のデータ(平均値と上下1平均偏差値)と検証した。火災は200年周期で定期的に発生する。

温暖化の影響による土壌有機炭素の減少を予測するため、シミュレーションで2000年の土壌有機炭素蓄積期間の後に気温が3℃上昇するシミュレーションを行った。広域でのパターンをある程度再現するため、森林火災を乱数に基づく周期によって発生させ、排水性の高い土地と低い土地でそれぞれ5回のシミュレーションを実行した。合計10回分のシミュレーション結果を、GISモデルで計算された面積に当てはめた結果が図(4)-10である。シミュレーションの結果から算出すると、気候変動によってこの地域の気温が3℃上昇することにより、アラスカ内陸域だけで 2×10^{12} kg(2ギガトン)の炭素が放出され、地域の土壌有機炭素量が28.3%失われると推定されることとなった。



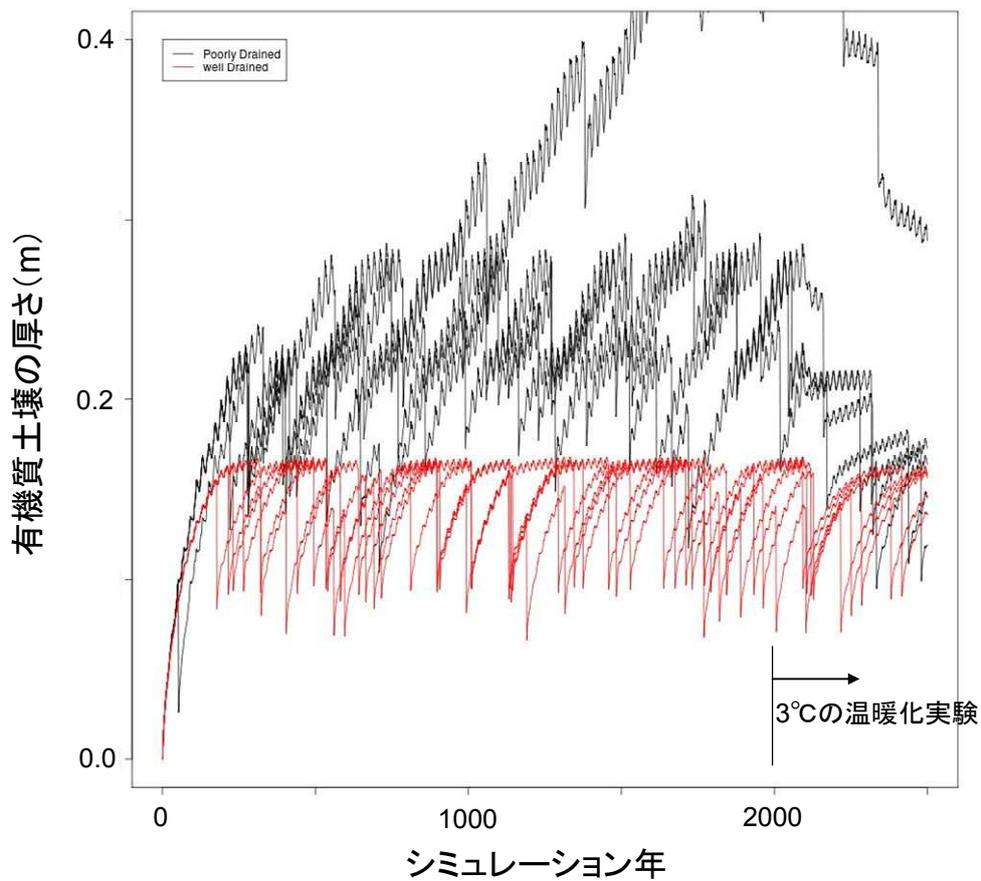
図(4)-10 温暖化による土壌有機炭素への影響を予測したシミュレーション。排水性の悪い土地のほうが温暖化の影響を強く受けたことにより、対象地域全域での炭素蓄積量は気候変動によって大きく減少することが分かった。

火災発生時期の不確実性について検証するためのシミュレーション実験を行った（図(4)-11）。5回の試行を行った結果、火災発生時期が異なるシミュレーション間には土壌有機炭素蓄積量の差異が見られたが、平衡状態における蓄積量はおおむね一定の範囲に収まることが確かめられた。このことから、本サブテーマによる将来予測結果の不確実性については、結果に大幅な影響を与える可能性は少ないことが示唆される。ただし、5試行のうち1試行においては、他の4試行とある程度異なる蓄積傾向も見られた。そのため、不確実性についての検証は今後も行う必要があることも示された。



図(4)-11 乱数を用いて火災を発生させた場合の有機質土壌の厚さ変化のシミュレーション結果。2000年分のシミュレーションを5回試行し、それぞれのばらつきを検討した。

さらに、コンピュータ内部で発生させた乱数を利用した火災発生を考慮した土壌有機炭素ダイナミクスシミュレーションにおいて、地形による排水性の違いも同時に考慮した一連のシミュレーション実験も実施した（図(4)-12）。この実験の結果から、排水性の高い地形では有機質土壌の厚さの平衡状態はどのシミュレーション試行でもほぼ一定となったが、排水性の低い地形における平衡状態はシミュレーション試行によって大きなばらつきを持つことが分かった。



図(4)-12 乱数を用いて火災を発生させた場合の有機質土壌の厚さ変化のシミュレーション結果。排水性の高い地形（well drained）と低い地形（poorly drained）それぞれでシミュレーションを5回試行し、乱数の使用によって生じるばらつきを検討した。シミュレーションは2500年分を実行したが、そのうち初期の2000年分は現在の気候データを用いたもので、その後500年分は温暖化の影響を仮想的に実験するために3°Cの温度上昇を与えた。

この原因として以下の状況が考えられる。すなわち、アラスカ州中部フェアバンクス付近は discontinuous permafrost zone（非連続な永久凍土が分布した地域）に位置している。排水性の高い地形では永久凍土はあまりみられないが、泥炭地などの排水性の低い地形では永久凍土が広く分布している。PB-SDMはこの状況を的確に再現することができている。永久凍土のない排水性の高い地形では、火災によって土壌有機炭素が消失しても、比較的短期間（100年から200年ほど）で土壌有機炭素量が平衡状態に達する。これは、排水性の高い地形では土壌有機層が薄いため、土壌有機層の増加による土壌物理条件の変化というフィードバックが小さいためである。一方、排水性の低い地形では永久凍土が広く見られる。本実験では、火災による土壌有機層の厚さの低下により土壌物理条件が変化し永久凍土層が後退すること、その後数百年以上かけて永久凍土が徐々に形成され厚さを増していくことを適切に再現しているため、排水性の低い地形における火災後の回復にはばらつきが大きくなった。

(4) 土壤炭素循環－土壤物理過程結合モデルに関する考察

本研究によりアラスカ内陸での土壤有機炭素の広域シミュレーションの信頼性を向上させ、将来予測を行うことができるようになった。多くのフィールドデータを新たに取り入れ、排水性の良い土地、悪い土地でのフィールド観測との整合性もより良くなった。

また本研究により今後のフィールドでの調査の課題がより明らかになった。現在の地理情報システム (GIS) によるアラスカを分類するモデルはまだフィールドでの検証が必要であり、どのような要素が排水性や土壤有機炭素蓄積の違いを作っているのかを調べればより正確な広域予測が行えるようになるだろう。アラスカ内陸部のシミュレーションしか行っていないが、このモデルをツンドラ地域へと拡大することによりシミュレーション予測の結果は全球規模の気候変動研究にとってより重要なものになるだろう。

PB-SDM v2.0はコケ類や有機物の性質をより正確に取り入れることにより、有機層の蓄積による正のフィードバックの効果がより強く表れるようになった。そのためモデルの感度解析では非常に感度が高く、パラメーターの設定で予測される数値が大きく違う結果が出ている。例えば温度による土壤有機炭素の分解速度を決定するにあたって、低温での Q_{10} 値が高いという観測があるが、これを反映させると結果が大きく違った。少しの積雪量の違いにより永久凍土が形成されるかどうかの違いができ、結果土壤有機炭素の蓄積量に大きな影響を与えている結果も出ている。これらは、より正確な観測の必要性を示しており、さらなる調査が期待される。

(5) 土壤炭素循環－土壤物理過程結合モデルの感度実験に関する予備的考察

1) Q_{10}

土壤炭素の温度による分解速度にはまだ不明な点が多い。土壤炭素の分解速度の計算には一般的には Q_{10} を2-3と設定することが多いが、低温の状態では Q_{10} 値が大きく変化するという実験結果が報告されている。このモデルでは Q_{10} ではなくLloyd and Taylor (1994) の計算式を用いているが、 Q_{10} による計算式を用いたシミュレーション、また Q_{10} が低温で大きく上昇した場合でのシミュレーションを行った (図4-(13))。

これらのシミュレーションを行った結果、低温での Q_{10} の数値設定はシミュレーション結果に大きく影響を与えることが分かった (図4-(14))。正確な土壤炭素分解速度の解明は、今後シミュレーションの精度を上げるために必要になると考えられる。

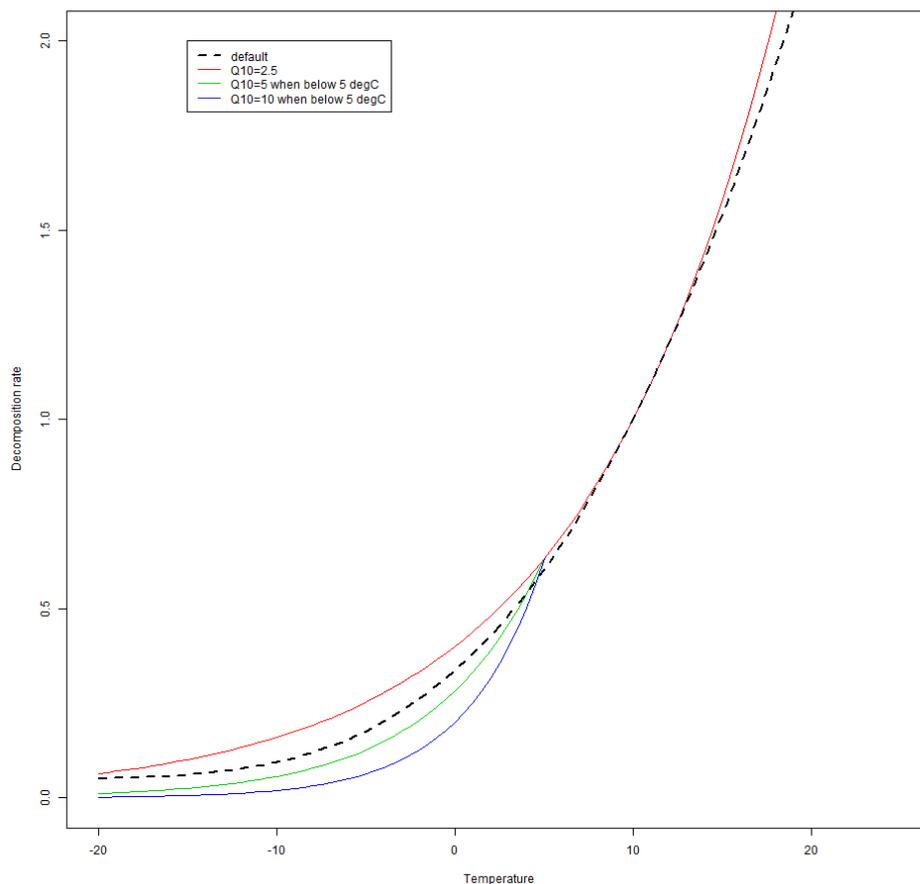


図4-(13) 温度の変化に対する土壤炭素の相対的分解速度。点線がLloyd and Taylor (1994)を元にしたモデルのデフォルト、赤線が Q_{10} を2.5にしたもの。5°C以下で Q_{10} が5に変化する場合（緑線）と10に変化した場合（青線）。

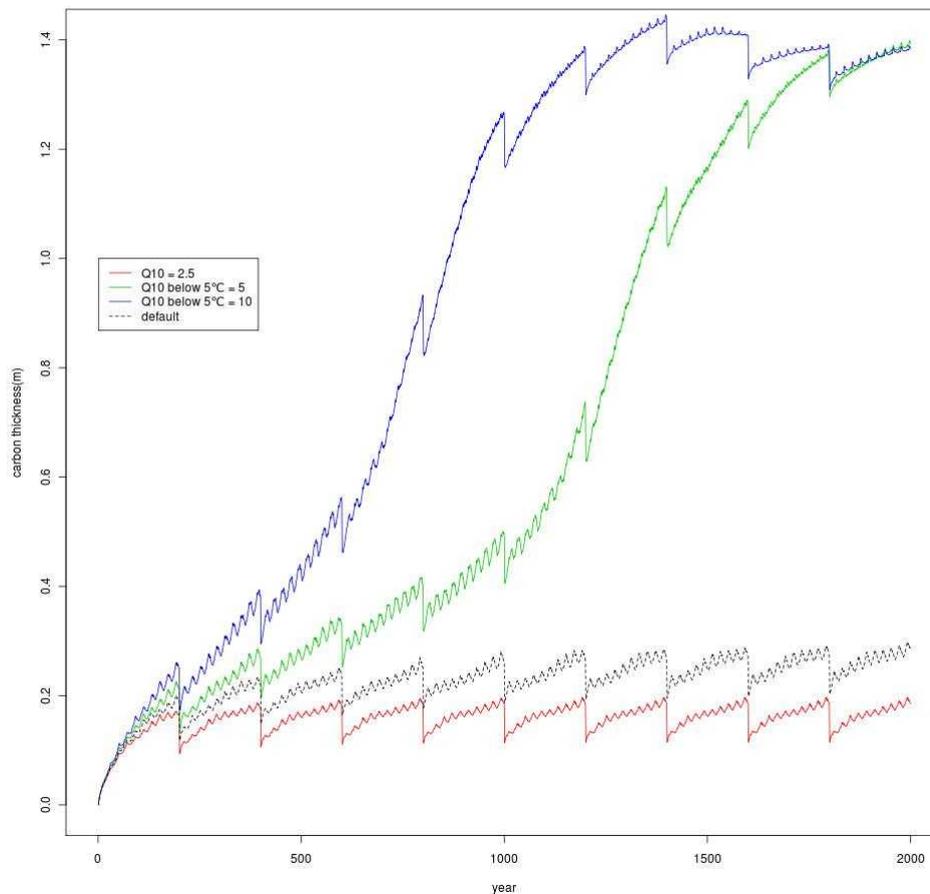
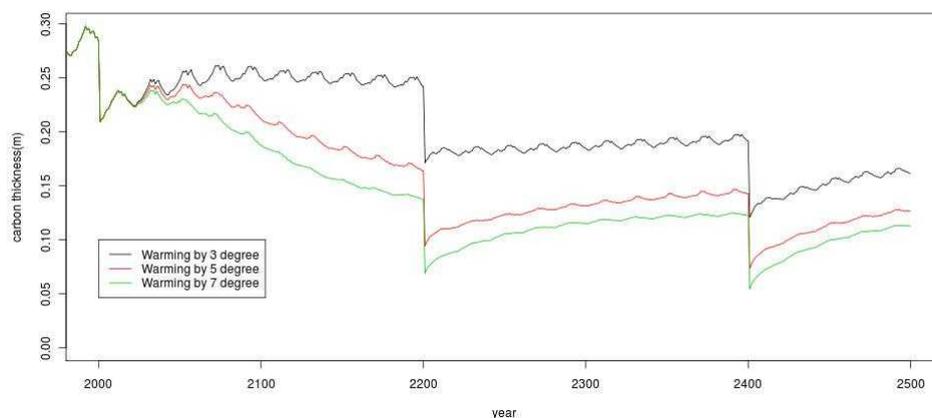


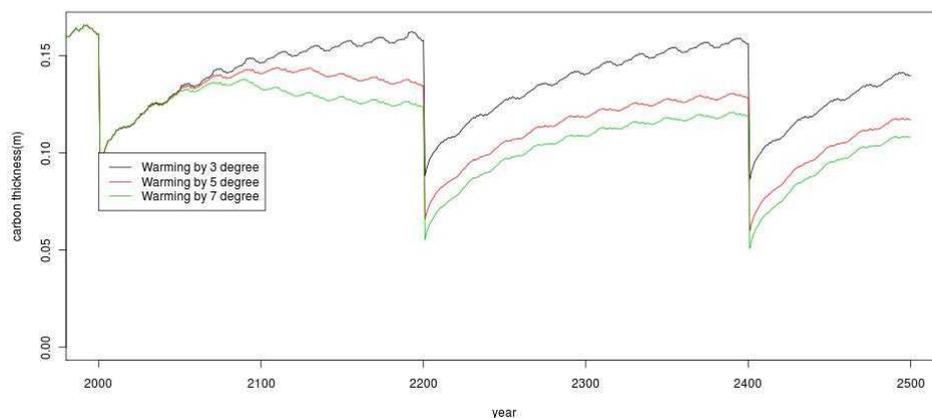
図4-(14) Q_{10} によるシミュレーションの感度実験結果。低温において Q_{10} が上昇すると、最終的に炭素の蓄積量が大きく変わる。点線がデフォルトの分解速度を用いたもの、赤線が Q_{10} を2.5にしてシミュレーションを行ったもの。緑線、青線はそれぞれを Q_{10} が5°C以下において5と10になるシミュレーション。

2) 温暖化

温暖化によって上昇する気温を3度と設定し実験を行ったが、全球気候シミュレーションにおいてアラスカは上昇気温がより高く予測される。想定される上昇温度が上がった場合のシミュレーションを行い結果を比較してみた(図4-(15))。やはり上昇する温度が高いほど消失する土壌炭素量は増えるが、3°Cの上昇ではあまり土壌炭素の減少が見られなかった排水性の高い土地でも5°C 7°Cと気温が上昇する場合は炭素量に目立った違いが出ている。気候変動による上昇温度によって、単純な線形ではない反応が見られ、今後の予測の重要性が見られる。



1)



2)

図4-(15) 温暖化による上昇気温を3℃（黒線）、5℃（赤線）、7℃（緑線）と想定したシミュレーション結果。（1）排水性の低い土地。（2）排水性の高い土地。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

本サブテーマでは、土壌圏の炭素動態・蓄積・分解のメカニズムを解明するための観測研究と連動する生物地球化学的プロセスと気候へのフィードバックを含めた土壌炭素動態モデルの開発研究実施することにより、実態に即したシミュレーションモデルの開発を行うことが可能となった。その結果、アラスカ北方林地帯での土壌有機炭素の広域シミュレーションの信頼性を向上させ、将来予測を行うことができるようになった。多くのフィールドデータを新たに取り入れ、フィールド観測との整合性もより良くなった。コケ類や有機物の性質をより正確に取り入れることにより、有機層の蓄積による正のフィードバックの効果がより強く表れるようになった。有機質土壌では土壌炭素が層状に蓄積されていくため、土壌深度によって層の形成時期や、その層の置かれている温度・水分環境、そしてその層に含まれる土壌有機炭素の量と質が大きく異なる

ることを定量的に表現した。これらの時間発展をコンピュータ上でシミュレーションすることにより、長い期間をかけて形成される有機質土壌のダイナミクスを再現することに成功した。アラスカ中部における非連続な永久凍土分布地帯における永久凍土の有無を物理的な熱・水収支からの積み上げで推定することも可能となった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマでは、複雑な地表面プロセスが相互作用を起こしているため将来予測が困難であった北極高緯度地域の気候変動への影響・気候変動から受ける影響の双方を定量予測するための重要なステップとなるシミュレーション研究を行った。特に、土壌有機炭素蓄積を的確に再現するために欠かせない土壌の垂直構造の明示化と土壌物理条件と土壌炭素ダイナミクスの結合を行った。このシミュレーションモデルの性能は、アラスカ中部における非連続な永久凍土分布地帯における永久凍土の有無を物理的な熱・水収支からの積み上げで推定できたことから見られるとおり、定量的な将来予測において世界的にも注目されるべきものである。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) M. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO, M. UCHIDA: Open J. Ecol. 2, 90-95 (2012)

“The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics”

<その他誌上発表(査読なし)>

1) 月刊理科の探検(2012年2月号、株式会社文理、「地球温暖化—研究の最前線—分かってきたこと・まだ分かっていないこと」)

2) 月刊パリティ(2012年3月号、丸善出版株式会社、「地球温暖化は事実なのか? —よくある誤解と分かりやすい答え」)

3) 日本土壌肥料学雑誌(2012年12月号、日本土壌肥料学会、「セミナー報告 第5回 モニタリングと広域評価を考える会 広域評価を目指したモニタリングとモデリングの相互フィードバック」)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 伊勢武史：若手生態学者モデル勉強会 (2010)
「泥炭地のシミュレーションと気候変動－生態学と物理学の接点」
- 2) T. ISE : Ecological Society of America Annual Meeting, Pittsburg, U.S.A., 2010
“Construct a size- and age-structured dynamic global vegetation model: simulation of global carbon budget”
- 3) 伊勢武史：日本気象学会秋季大会 (2010)
「陸域生態系モデルの今後の発展の方向性と応用の可能性」
- 4) 伊勢武史：GCOE公開講演会、横浜国立大学 (2010)
「泥炭地のシミュレーションと気候変動－生態学と物理学の接点」
- 5) T. ISE : Second International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2010
“A physics-based, depth structured simulation of soil organic carbon: Study in Alaska with 14C data”
- 6) T. ISE : American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2010
“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: dynamics of past, current, and future accumulation and decomposition”
- 7) 伊勢武史：国立極地研究所 平成22年度研究集会「北極環境研究の課題と展望」 (2011)
「土壌階層モデルによる土壌物理と炭素循環のシステムシミュレーション：アラスカにおけるケーススタディ」
- 8) 伊勢武史：第58回 日本生態学会大会 (2011)
「土壌炭素モデルの垂直構造化と放射性炭素データによる検証」
- 9) T. ISE, N. KATI, H. ENOMOTO, M. KONDO, M. UCHIDA : AMS-12 Conference, New Zealand, 2011
“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: a brand-new, integrated ecosystem model with radiocarbon tracking”
- 10) 伊勢武史：日本生態学会近畿地区会 (2011)
「泥炭地のシミュレーションと気候変動－生態学と地球環境」
- 11) T. ISE, N. KATO, H. ENOMOTO, M. KONDO, M. UCHIDA : The 4th East Asia AMS Symposium, Tokyo, Japan, 2011
“Constructing a depth-stratified model for soil organic carbon: dynamics of past, current, and future accumulation and decomposition”
- 12) 伊勢武史：第59回 日本生態学会大会 (2012)
「物質循環シミュレーションモデルにおける土壌生態系：新たなフロンティアとその課題」
- 13) K. MORI, T. ISE, M. KONDO, Y. KIM, H. ENOMOTO, and M. UCHIDA : Third International Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Japan, 2013
“The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics”
- 14) 伊勢武史：日本土壌肥料学会 (2012)
「物質循環シミュレーションモデルにおける土壌生態系：新たなフロンティアとその課題」
- 15) 伊勢武史：第60回 日本生態学会大会 (2013)
「気候変動下の土壌炭素モデルのあるべき姿-- ここに気づけばもっと良くなる」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 一緒に学ぼう！生態学のシミュレーション体験（2013年3月5日、第60回日本生態学会、静岡県コンベンションアーツセンター、参加者約120名）
- 2) 地球規模の気候変動メカニズム（2012年3月5日、第20回自然史標本情報の発信に関する研究会、兵庫県立大学、参加者約30名）
- 3) サイエンスカフェ：陸域生態系とシミュレーション（2011年10月20日、兵庫県立大学、参加者約18名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

- 1) 学んでみると生態学はおもしろい（2013年1月17日、ベレ出版、単著、一般書籍出版）

8. 引用文献

- 1) S.A. ZIMOV, E.A.G. SCHUUR, F.S. CHAPIN III: Science 312, 1612-1613 (2006)
“Permafrost and the global carbon budget”
- 2) D.M. LAWRENCE, A.G. SLATER: Geophys. Res. Lett 32(24) DOI:10.1029/2005GL025080 (2005)
“A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century”
- 3) P. CAMILL, J.S. CLARK: Ecosystems 3, 534-544 (2000)
“Long-term perspectives on lagged ecosystem responses to climate change: Permafrost in boreal peatlands and the Grassland/Woodland boundary”
- 4) T. ISE, A.L. DUNN, S.C. WOFSY, and P.R. MOORCROFY: Nature Geoscience 1, 763-766 (2008)
“High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback”
- 5) T. ISE T, P.R. MOORCROFY: Biogeochemistry 80, 217-231 (2006)
“The global-scale temperature and moisture dependencies of soil organic carbon decomposition: an analysis using a mechanistic decomposition model”
- 6) B. LIVNEH, Y. XIA, K.E. MITCHELL, M.B. EK, D.P. LETTEBMAIER: J. Hydrometeor. 11, 721-738 (2010)
“Noah LSM Snow Model Diagnostics and Enhancements”
- 7) J.J. CARRASCO, J.C. NEFF, J.W. HARDEN: J. Geophys. Res. 111, G02004, doi:10.1029/2005JG000087 (2006)
“Modeling physical and biogeochemical control over carbon accumulation in a boreal forest soil”
- 8) K. YOSHIKAWA, W.R. BOLTON, V.E. ROMANOVSKY, M. FUKUDA, L.D. HINZMAN: J. Geophys. Res. 107(D1), 8148, doi:10.1029/2001JD000438 (2002)

“Impacts of wildfire on the permafrost in the boreal forests of Interior Alaska”

9) E.S. KANE, E.S. KASISCHKE, D.W. VALENTINE, M.R. TURETSKY, and A.D. MCGUIRE: *J. Geophys. Res.* 112, G03017, doi:10.1029/2007JG000458 (2007)

“Topographic influences on wildfire consumption of soil organic carbon in interior Alaska: Implications for black carbon accumulation”

10) J.A. O’DONNELL, V.E. ROMANOVSKY, J.W. HARDEN, A.D. MCGUIRE: *Soil Sci.* 174(12), 646-651 (2009)

“The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in Interior Alaska”

11) S. YI, K. MANIES, and J. HARDEN, and A.D. MCGUIRE: *Geophys. Res. Lett.* 36, L05501, doi:10.1029/2008GL037014 (2009)

“Characteristics of organic soil in black spruce forests: Implications for the application of land surface and ecosystem models in cold regions”

12) C.L. PING, G.J. MICHAELSON, E.S. KANE, E.C. PACKEE, C.A. STILES, D.K. SWANSON, and N.D. ZAMAN: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 969-978 (2010)

“Carbon stores and biogeochemical properties of: soils under black spruce forest, Alaska”

Observational Arctic Terrestrial Soil Carbon Dynamics Research and Development of their Modeling for Predicting Arctic Climate Change Under Global Warming

Principal Investigator: Masao UCHIDA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan
Tel: +81-029-850-2877 / Fax: +81-29-850-2573
E-mail: uchidama@nies.go.jp

Cooperated by: National Institute of Polar Research, University of Tsukuba, University of Hyogo

[Abstract]

Key Words: Arctic terrestrial ecosystem, Climate change, Soil carbon dynamics, Global warming, Alaska

Boreal forest and tundra in the Arctic are vulnerable to the Arctic climate change. Accompanying the shrinkage of sea ice in the Arctic, the water vapor and heat fluxes in the Arctic sea are increasing. Part of this heat flux does impact the terrestrial ecosystem and decomposition of the soil organic carbon of boreal forest and tundra in permafrost, releasing soil-originated CO₂ to the atmosphere. Therefore, the Arctic system may contribute to the positive feedback. Accumulation and decomposition of soil organic carbon (SOC) have significant impacts on global carbon cycling. Especially, high-latitude regions, where a particularly strong warming is expected, currently store large amounts of SOC, and vulnerability against environmental changes are hotly discussed. To test this hypothesis, we investigated biogeochemical process in the permafrost environments using various geochemical and biological approaches, as well as meteorological observations and developed the simulation model for soil carbon dynamics under changing Arctic climate. This study was carried out in representative stations at three tundra sites, a tundra-boreal forest ecotone site, and four boreal forest sites along the Alaska pipeline (1000km long). In summer and winter seasons in 2010, 2011 and 2012, observations were carried out in stations for the distinct vegetation distribution. Soil physical and chemical properties, ¹⁴C of SOC, soil CO₂ and methane flux, and meteorological observation were carried out. Obtained observational and analytical data was also used for simultaneous development of model for soil dynamics in this study. By using high precision analysis of ¹⁴C of SOC, we got the residence time in representative ecosystems in studied site. Additionally, we developed the incubation protocols soil to get the Q₁₀ values of the permafrost soil. This provides useful information to test the developing model for soil carbon dynamics under changing Arctic

climate. In this study, an integrated simulation model Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM) was constructed by coupling soil biogeochemical dynamics and land surface physical dynamics. This model has a depth structure, where soil organic carbon dynamics of certain depth are predicted by soil temperature and soil moisture of that depth. This may sound simple, but this was the first study that explicitly treated the depth structure of soil biogeochemistry and land surface physics simultaneously. By using this model, we successfully reproduced current observations taken around Fairbanks, Alaska. We also explicitly included wildfire, which can largely change terrestrial carbon balance, in the model by using random numbers generated during the simulation. We found that the interior Alaska region can be a significant carbon source under the climate change, and ca. 28% of soil organic carbon stored in this region can be lost due to warming.

A-1003 北極高緯度土壤圏における近未来温暖化影響予測の高精度化に向けた観測及びモデル開発研究（独立行政法人国立環境研究所）



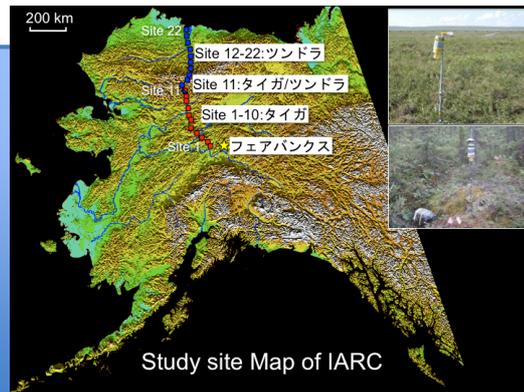
- 近未来温暖化により高い炭素循環フィードバック? → その予測精度は**不十分**
- 将来予測の高精度化に向けたモデル開発のための観測データの積み上げと検証可能な**モデル開発が必要!**

目的・目標

北極高緯度土壤圏における土壤有機炭素動態を中長期的に予測するための観測とモデル開発

土壤圏の炭素動態・蓄積・分解のメカニズムを解明するためのデータ取得と生物地球化学的プロセスと気候へのフィードバックを含めた土壤炭素動態モデルの開発

観測地：米国アラスカ州、北緯 60～75 度(南北約 1000km)、タイガ・ツンドラ凍土帯、自然火災跡地
観測協力：アラスカ大、北極圏研究センター (IARC)



【サブテーマ 1,2,3】

北極域土壤圏における有機炭素動態の実態解明のための陸域総合観測

①開発（基礎データ）

仮比重、炭素・窒素含有量、土壤呼吸速度測定、温度依存性 (Q_{10})、環境要因 (地温・水分)、熱伝導率

②検証データ

土壤有機炭素の炭素蓄積量と分解率、滞留時間
→ 土壤有機炭素の ¹⁴C 分析

③高精度化（プロセス解明データ）

- ・ 土壤呼吸 CO₂ の炭素源の特定
- ・ Fossil carbon 分解の割合の定量化

→ 土壤 CO₂、土壤呼吸、微生物脂質の ¹⁴C 測定

【サブテーマ 4】

北極域における土壤有機炭素動態を中長期的に解析するためのモデル高度化

①北極土壤圏炭素動態モデルの開発 (ED2.0-peat をベース)

② 検証・改良

・ 炭素動態 (平均滞留時間、CO₂ 放出速度) を再現性確認

③ 高精度化

・ 北極圏特有の未解決プロセスを考慮 (永久凍土の融解と fossil carbon 分解の活性化、自然火災による有機炭素の消失 etc...)

北極生態系土壤圏における温暖化影響予測の高精度化

土壤物理との炭素循環のフィードバックにより、気候変動下にある高緯度北極土壤炭素の蓄積と分解を再現