

課題名 2-1304 温暖化予測に関わる北極域土壌圏の炭素収支の時空間変動

課題代表者名 串田 圭司 (日本大学生物資源科学部)

研究実施期間 平成25～27年度

累計予算額 124,656千円(うち平成27年度:37,178千円)  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 温暖化予測、北極域土壌圏、リモートセンシング、炭素年代測定、生態系モデル

#### 研究体制

- (1) リモートセンシングによる生態系と広域土壌有機物分解の評価(日本大学)
- (2) 凍土土壌中有機炭素の蓄積・分解の実態解明と変動量の把握(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (3) 北極域生態系炭素動態の季節・年々変動に及ぼす環境影響の要因解析(広島大学)

#### 研究概要

##### 1. はじめに(研究背景等)

近年の地球温暖化により、特に北半球高緯度帯の北極域に生育する陸域生態系へ及ぼす影響が危惧されている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(2013)によれば、温暖化による今世紀末までの気温の上昇は北極域において最も大きくなり、この上昇値は全球平均のほぼ2倍に相当することが予測されている。北極域には地下の広範囲に永久凍土が存在するが、この永久凍土の中には大量の炭素が蓄積されている。その量は全球地下部に存在する炭素蓄積量のおよそ半分である1700GtCに匹敵するといわれている。北極域は寒冷であるため、土壌有機物分解が抑えられる。また、永久凍土が不透水層となるため、夏期融解層の水分量が大きく嫌氣的であることも、土壌有機物が分解されにくいことにつながる。このため、現在の植物の落葉落枝や過去に生育した植物体の大量の有機炭素が分解されずに残っている。現在この地域では、1年に生態系が正味で吸収する量の2000～6000倍の有機炭素が土壌中に存在する(McGuire et al., 2009)。地球温暖化による温度上昇は、こうした土壌有機物の分解を促進する。土壌有機物分解は、一般に、温度に対して指数関数的に増加する。さらに、北極域では、温暖化に伴い原野・森林火災が増加している。原野・森林火災が起こると、土壌中に蓄えられている有機炭素の一部が燃焼してCO<sub>2</sub>として大気へ放出される。温暖化が進むと、土壌有機物分解が進み、さらなる温暖化をもたらすという、正のフィードバック効果を示す。北極域は、地球上で最も急速に温暖化が進んでいる。どの程度の北極圏の土壌有機物分解が、今後の環境変化の下で進むかは、温暖化予測に大きく関わるが、未だ解明されていない。図1に研究の概念図を示す。

1. 北極圏は、温暖化の影響を地球上で最も強く受ける。
2. 北極圏の土壌は、地球大気中の二酸化炭素全体の2倍の炭素を持つ土壌有機物を含む。
3. 土壌有機物の分解が進むと大気中の二酸化炭素濃度上昇をもたらす。
4. どの程度の北極圏の土壌有機物分解が、今後の環境変化の下で進むかは、温暖化予測に大きく関わるが、未だ解明されていない。

## 北極域土壤圏炭素収支の時空間変動

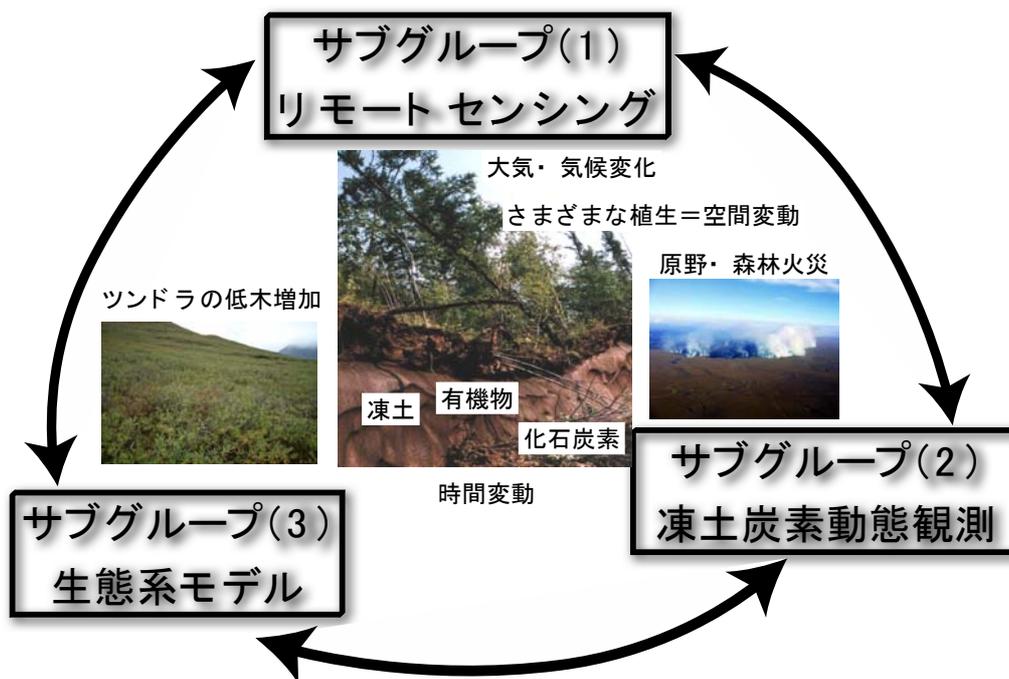


図1 研究の概念図

## 2. 研究開発目的

本研究の3年間の研究期間の研究開発目的は以下のである。北極域の土壤有機物分解を予測するモデルの開発に必要な観測・実験を行う(サブグループ2)。北極域の土壤有機物分解の時間変化をモデル化する(サブグループ3)。土壤有機物分解の観点から、リモートセンシングによる広域生態系区分を行う(サブグループ1)。これらを合わせて、北極域の土や植物は温暖化を加速するのかを明らかにする。

## 3. 研究開発の方法

## (1) リモートセンシングによる生態系と広域土壤有機物分解の評価

植生調査と生態系構成要素の分光測定を行う。北方森林林床およびツンドラでは、落葉性灌木、常緑性灌木、イネ・スゲ、草本といった植物機能型別の現存量と分光特性との対応を得る。超高解像度衛星画像World View-2(地上分解能0.5m)により、調査区の代表性を評価し、MODIS画像(毎日取得、地上分解能1km)による調査区での観測のスケールアップを行う。生態系の放射伝達モデルを用いて、アラスカ陸域の生態系区分を行う。土壤有機物分解に関わるリターフォール量と原野・森林火災の頻度の観点からのアラスカ陸域の生態系区分を定式化する。分光特性と灌木現存量との対応から、リモートセンシングによる灌木の抽出も定式化する。アラスカ陸域の生態系区分の定式化を、過去15年間のMODIS画像に適用し、リモートセンシングによるアラスカ陸域および北極圏陸域全体の土壤有機物分解の観点からの広域生態系区分を行う。北極圏の灌木の分布やリターフォール量の変化、火災による変化など植生変化とそれに伴う土壤有機物分解の変化を解析する。

## (2) 凍土土壤中有機炭素の蓄積・分解の実態解明と変動量の把握

土壤呼吸速度、メタン放出速度、環境因子(地温・水分量)の測定を行う。また、夏期融解層および永久凍土の深度別に、土壤サンプリングを行う。凍土サンプリングは、主に冬期に実施する。土壤有機炭素の分解基質を特定し、それぞれの基質について、炭素14年代測定を実施する。調査区では、永久凍土のボーリングを行い、土壤有機炭素の $^{14}\text{C}$ 測定を行い、有機炭素の平均滞留時間、分解率を実測する。また活動層土壤・永久凍土の室内培養実験を行い、有機炭素分解における温度依存性について知見を得る。サイト毎に土壤有機炭素の平均滞留時間、化石炭素の分解率を求める。火災や灌木の増加によって土壤炭素蓄積・分解プロセスに生じる影響を評価する。土壤分解の温度・水分・化学組成への応答性に関する新しいパラメタリゼーションを提案し、陸域モデルへの導入を図る。

### (3) 北極域生態系炭素動態の季節・年々変動に及ぼす環境影響の要因解析

本研究の先行研究で開発された最新の北極域土壌有機物分解モデルと生態系モデルとを統合した新たな生態系土壌有機物分解モデルをさらに発展させる。データセットの構築を行い、新たなモデルによる広域有機物土壌分解の推定精度を向上させる。構築したデータセットと生態系土壌炭素動態モデルを用いて、モデル中に含まれる炭素、水循環に関わるパラメータ変数の不確実性評価のモデル解析を行う。それぞれの調査区によって代表される生態系について、植物の生理生態特性および環境条件の特性を示すパラメータセットを算出した後、北極域の気候変動が生態系炭素動態に与える長期的影響をシミュレートし、その潜在的な気候フィードバックを解析する。

## 4. 結果及び考察

### (1) リモートセンシングによる生態系と広域土壌有機物分解の評価

新たに現地観測に基づいて開発した分光指標により、MODIS衛星データから、アラスカ周辺の北極域全体の植物から土壌への有機物の移動量、火災による有機物の燃焼量、2100年までのこれらの変化量を見積もった。MODISデータ解析の結果、2000年から2013年の植物から土壌への有機物の移動量は、ツンドラ、北方森林それぞれについて、94～95%の土地では変化が認められなかった。5～6%の土地では増加または減少していたが、ツンドラ、北方森林それぞれについて、面積、変化率ともに、増加しているところの方が減少しているところより大きかった。2100年までのリター増に伴う土壌有機物の増加は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、 $2\text{kgC}/\text{m}^2$ 、 $0.5\text{kgC}/\text{m}^2$ と見積もられた。

### (2) 凍土土壌中有機炭素の蓄積・分解の実態解明と変動量の把握

湿原が隆起し乾燥化が起きているパルササイトの永久凍土の夏期融解層では、 $-5^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ のQ10値が18.8と高かった。年中凍結している永久凍土層では $-5^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ のQ10値は、4.7であり、夏期融解層のものが顕著に高かった。 $5^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ の永久凍土層と夏期融解層のQ10値では明確な差が見られず、1.7から2.4であった。多量の炭素を蓄える湿原において、夏期融解層でQ10値の変動幅が極めて大きかった。夏期融解層では永久凍土層に比べて、近年堆積した易分解性の有機物が多いことも推測される。特に、永久凍土地域で現実には長い時間起こる温度域( $-5^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ )でQ10値が高かった。これは温暖化が進んだときの土壌有機物分解において重要な示唆を与えることになり、今後詳細に検討する必要があることが確認できた。

### (3) 北極域生態系炭素動態の季節・年々変動に及ぼす環境影響の要因解析

北極域の土壌有機物分解は、今後の地球温暖化を加速するおそれがある。その将来予測のための既往の数値モデル計算では、北極域内の生態系の違いが考慮されていない。このため、北極域の土壌有機物分解の正確な評価ができていない。衛星と地上の観測データに基づいて、北極域内の生態系の違いを考慮した実効性のある生態系土壌有機物分解モデルを開発し、その技術を提示した。新たに開発した生態系土壌有機物分解モデルにより、将来の北極域土壌有機物分解とその地球温暖化への影響の予測を行うことができた。これまでの全球気候モデルでは、この温暖化の加速は過小評価されている。環境政策において、一層の温暖化緩和のための技術開発が必要であることを示した。この予測には、IPCC AR5の温室効果ガス放出の4種のシナリオに基づいており、地球温暖化の軽減のための政策オプションを含めることができる。国際的な二酸化炭素放出の抑制対策や原野・森林火災抑制対策の実効性を予測することができる。このような知見と予測技術は、地球温暖化対策の提言に寄与する。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

各地の永久凍土と夏期融解層の土壌有機物の鉛直分布、土壌有機物の温度上昇による変化率を観測と実験で明らかにした。これまでに永久凍土の土壌有機物の温度上昇による変化率の測定による定量化はほとんどなかった。ツンドラの永久凍土の融解は大きな有機物分解をもたらすこと、北方林の夏期融解層の土壌有機物分解は世界の土壌の中でも大きいこと、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下の永久凍土中の有機物も分解していることを明らかにした。

土壌有機物分解モデルを新たに開発し、永久凍土、鉍質土層、鉛直移動、実測データを考慮して、2100年までの分解量を算出した。RCP2.6(低位安定化シナリオ)において、本研究で実測のパラメータを用いた場合、2100年までの土壌有機物分解量は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、 $5\text{kgC}/\text{m}^2$ 、 $2\text{kgC}/\text{m}^2$ であった。IPCC AR5の温室効果ガス放出の4種の異なるシナリオ、パラメータでの土壌有機物分解量の算出を行い、土壌有機物分解量の変動性を評価した。

新たに現地観測に基づいて開発した分光指標により、MODIS衛星データから、アラスカ周辺の北極域全体の植物から土壌への有機物の移動量、火災による有機物の燃焼量、2100年までのこれらの変化量を見積もった。

MODISデータ解析の結果、2000年から2013年の植物から土壌への有機物の移動量は、ツンドラ、北方森林それぞれについて、94～95%の土地では変化が認められなかった。5～6%の土地では増加または減少していたが、ツンドラ、北方森林それぞれについて、面積、変化率ともに、増加しているところの方が減少しているところより大きかった。2100年までのリター増に伴う土壌有機物の増加は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、2kgC/m<sup>2</sup>、0.5kgC/m<sup>2</sup>と見積もられた。

## (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>

世界の北方森林、ツンドラの面積は、それぞれ1249万km<sup>2</sup>、890万km<sup>2</sup>である(Apps et al., 1993)。RCP2.6(低位安定化シナリオ)の場合、2100年までの土壌有機物分解量は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、5kgC/m<sup>2</sup>、2kgC/m<sup>2</sup>であった。リター増に伴う土壌有機物の増加は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、2kgC/m<sup>2</sup>、0.5kgC/m<sup>2</sup>であった。これらに植生現存量の増加量を考慮すると、2100年までの二酸化炭素放出量は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、31GtC、9GtCであるが見積もられる。RCP2.6(低位安定化シナリオ)の場合、2100年までにツンドラで1kgC/m<sup>2</sup>、北方森林で2.5kgC/m<sup>2</sup>の二酸化炭素の放出が予測される。北極域全体でこの放出が起こるとすると、これまでに人為起源で放出された二酸化炭素の10%になる。原野・森林火災の増加の評価によってはもっと大きくなる。北極域の土や植物は温暖化を加速すると言える。これまでの全球気候モデルでは、この温暖化の加速は過小評価されている。環境政策において、一層の温暖化緩和のための技術開発が必要であることを示した。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) K. KUSHIDA, S. HOBARA, S. TSUYUZAKI, Y. KIM, M. WATANABE, Y. SETIAWAN, K. HARADA, G. R. SHAVER, M. FUKUDA: International Journal of Remote Sensing, 36(17), 4344-4362 (2015)  
Spectral indices for remote sensing of phytomass, deciduous shrubs, and productivity in Alaskan Arctic tundra.
- 2) G. IWAHANA, M. UCHIDA, L. LIU, W. GONG, F. MEYER, R. GURITZ, T. YAMANOKUCHI, L. HINZMAN: Remote Sensing, 8, 218 (2016)  
InSAR detection and field evidence for thermokarst after a tundra wildfire, using ALOS-PALSAR.

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 近藤美由紀,内田昌男,内海真生,柴田康行,原蘭芳信,岩田拓記(2013)  
「14Cを利用した北極高緯度域における自然火災による土壌炭素消失量の推定. 第26回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2013年7月, 山形
- 2) 岩花剛,内田昌男,近藤美由紀,吉川謙二,Hinzman L. (2013)  
「アラスカ・デナリハイウェイ沿いのパルサの形成と内部構造」雪氷研究大会, 2013年9月, 北見
- 3) Kondo M., Uchida M., Utsumi M., Iwahana G., Iwata H., Harazono Y., Nakai T., Tanabe K., Shibata Y. (2013)  
“The belowground C balances in Alaskan boreal and tundra ecosystems: Insights from radiocarbon-based C accumulation rates and turnover times.” 5th EAST ASIA AMS SYMPOSIUM, 2013年10月, Daejeon, Korea
- 4) Kondo M., Uchida M., Ustumi M., Iwahana G., Yoshikawa K., Iwata H., Harazono Y., Nakai T., Tanabe K., Shibata Y. (2013)  
“Turnovertime of soil organic carbon in permafrost using radiocarbon and their application for determining long and short therms carbon balances cas study in Alaskan tundra and boreal forest.” 19th International symposium on Poler Science, 2013年10月, Incheon, Korea

- 5) 串田圭司、内田昌男、戸田求 (2013)  
「温暖化予測に関わる北極域土壌圏の炭素収支の時空間変動。」第4回 極域科学シンポジウム。  
2013年11月, 立川
- 6) Kondo, M. Uchida, M. Utsumi, G. Iwahana, H. Iwata, Y. Harazono, T. Nakai, K. Tanabe, Y. Shibata  
(2013)  
“Estimate of permafrost organic carbon balance in Alaskan boreal and tundra ecosystems using  
natural level radiocarbon.” 第4回 極域科学シンポジウム。2013年11月, 立川
- 7) 米村正一郎、内田昌男、近藤美由紀(2013)  
「アラスカ凍土コアサンプルのガス交換特性実験。」第4回 極域科学シンポジウム。2013年11月, 立川
- 8) 佐々木正史、内田昌男、内海真生、中山恵介(2013)  
「アラスカ北極圏の湖沼におけるメタンフラックスと永久凍土融解の影響。」第4回 極域科学シンポジ  
ウム。2013年11月, 立川
- 9) 天野千恵、内海真生、高宇、近藤美由紀、内田昌男(2013)  
「アラスカ寒帯森林土壌及びツンドラにおける二酸化炭素・メタンフラックスと土壌微生物群集によるセ  
ルロース分解活性。」第4回 極域科学シンポジウム。2013年11月, 立川
- 10) 近藤美由紀、内田昌男、内海真生、岩花剛、吉川謙二、原菌芳信、岩田拓記、中井太郎、田邊潔、  
柴田康行(2013)  
「放射性炭素同位体を用いたアラスカ永久凍土における土壌炭素収支の推定。」日本生態学会第61  
回全国大会。2014年3月, 広島
- 11) 近藤美由紀(2013)  
「核実験起源放射性炭素同位体(<sup>14</sup>C)を用いた根・微生物呼吸の分離。」2014年3月, 広島
- 12) 近藤美由紀: 日本生態学会第61回全国大会(2014) 「核実  
験起源放射性炭素同位体(<sup>14</sup>C)を用いた根・微生物呼吸の分離」
- 13) 米村正一郎、内田昌男、近藤美由紀: 日本地球惑星科学連合2014年大会(2014)  
「自動測定システムによるアラスカ凍土コアサンプルの各種微量ガス交換量測定」
- 14) 近藤美由紀、内田昌男、内海真生、岩花剛、吉川謙二、岩田拓記、原菌芳信、中井太郎、田邊潔、  
柴田康行: 日本地球惑星科学連合2014年大会(2014)  
「放射性炭素同位体を用いたアラスカ永久凍土における土壌有機炭素収支の推定」
- 15) 岩花剛、内田昌男、近藤美由紀、吉川謙二: 日本地球惑星科学連合2014年大会(2014)  
「アラスカ・デナリハイウェイ沿いのパルサの発達史」
- 16) Kondo, M., M. Uchida, M. Utsumi, G. Iwahana, K. Yoshikawa, H. Iwata, Y. Harazono, T. Nakai, K. Tanabe,  
Y. Shibata: The Thirteenth of the AMS, Aix en Provence, France, 2014  
“Quantifying rates of soil organic carbon accumulation in black spruce and tundra ecosystems in  
Alaska using radiocarbon “
- 17) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2014)  
“Simulating effects of fire disturbance on soil carbon dynamics in black spruce forests of Alaska.”  
The 6th EAFES (East Asian Federation of Ecological Societies) Congress (Haikou, China April 2014)
- 18) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2014)  
“Simulating the role of fire on the soil carbon storage of boreal forest and tundra ecosystems in  
Alaska.” Japan Geoscience Union Meeting 2014日本地球惑星科学連合 (Yokohama, Japan  
April-May 2014)
- 19) 串田圭司・Yudi Setiawan (2014)  
「北極域土壌圏炭素収支の時空間解析のための植生リモートセンシング。」農業農村工学会大会講  
演会, 新潟市, 2014年8月
- 20) 王新, 戸田求, 横沢正幸, 荒木田葉月, 伊勢武史, 森健介, 近藤美由紀, 内田昌男, 串田圭司  
(2014)  
「北極域土壌炭素収支のモデル化」生物地球化学研究会2014京都大会(京都, 2014年10月)
- 21) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2015)  
“High risk of permafrost thaw.” 日本生態学会第62回全国大会(鹿児島, 2015年3月)
- 22) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2015)  
“Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems.” 日本農業気象学会2015年全  
国大会(つくば, 2015年3月)
- 23) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: The

- Fourth International Symposium on the Arctic Research (2015)  
 “Simulating the role of fire on the soil carbon storage of boreal forest and tundra ecosystems in Alaska” (富山, April 2015)
- 24) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: Japan Geoscience Union Meeting (2015)  
 “Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems” (千葉, May 2015)
- 25) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: Asia Oceania Geosciences Society (2015)  
 “Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems” (Singapore, August 2015)
- 26) 串田圭司: 農業農村工学会大会講演会 (2015)  
 「アラスカ黒トウヒ林の地表面燃焼面積率のリモートセンシング」(岡山, 2015年9月1日)
- 27) Setiawan, Y., Kushida, K.: Trilateral Scientific Meeting Indonesia-Thailand-France, Theme: Climate Change, Big Data Management and Health (2015)  
 “Temporal vegetation dynamics and global climate change: Characterizing temporal vegetation dynamics of Alaskan Tundra ecosystem” (Bogor, Indonesia, 27-31 October 2015)
- 28) Wang X., Yokozawa M., Kushida K., Toda M.: American Geophysical Union Fall Meeting (2015)  
 “Simulating soil carbon accumulation in an upland black spruce ecosystem of interior Alaska: implications for permafrost carbon dynamics to climate change” (San Francisco, December 2015)
- 29) Wang X., Yokozawa M., Kushida K., Toda M.: International Symposium on Agricultural Meteorology (2016)  
 “Simulating soil carbon accumulation in an upland black spruce ecosystem of interior Alaska: implications for permafrost carbon dynamics to climate change” (岡山, March 2016)
- 30) 近藤美由紀, 大塚俊之, 米村正一郎, 吉川謙二, 田邊潔, 内田昌男: 第63回日本生態学会仙台大会 (2016)  
 「自然レベル放射性炭素同位体を用いた北極永久凍土融解に伴う土壌炭素分解の実態解明」(仙台, 2016年3月20日～24日)

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 串田 圭司

東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了、博士(農学)、  
 平成28年3月31日現在、日本大学生物資源科学部准教授

研究分担者

1) 内田 昌男

東京農工大学大学院連合農学研究科博士課程修了、博士(農学)、  
 平成28年3月31日現在、国立環境研究所環境計測研究センター主任研究員

2) 戸田 求

京都大学大学院農学研究科博士課程修了、博士(農学)、  
 平成28年3月31日現在、広島大学大学院生物圏科学研究科専任講師

## 2-1304 温暖化予測に関わる北極域土壌圏の炭素収支の時空間変動

### (1) リモートセンシングによる生態系と広域土壌有機物分解の評価

日本大学生物資源科学部

串田 圭司

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：36,659千円（うち平成27年度：8,958千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

植生調査と生態系構成要素の分光測定を行った。北方森林林床およびツンドラでは、落葉性灌木、常緑性灌木、イネ・スゲ、草本といった植物機能型別の現存量と分光特性との対応を得た。生態系の放射伝達モデルを用いて、アラスカ陸域の生態系区分を行った。土壌有機物分解に関わるリターフォール量と原野・森林火災の頻度の観点からのアラスカ陸域の生態系区分を定式化した。分光特性と灌木現存量との対応から、リモートセンシングによる灌木の抽出も定式化した。アラスカ陸域の生態系区分の定式化を、過去15年間のMODIS画像に適用し、リモートセンシングによるアラスカ陸域および北極圏陸域全体の土壌有機物分解の観点からの広域生態系区分を行った。北極圏の灌木の分布やリターフォール量の変化、火災による変化など植生変化とそれに伴う土壌有機物分解の変化を解析した。

#### [キーワード]

リモートセンシング、温暖化予測、土壌有機物分解、北極圏、原野・森林火災

#### 1. はじめに

北方森林やツンドラなど北極域永久凍土地域の土壌中の有機炭素量は1700Gtであり、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の2倍の炭素量に相当する。この地域の面積は、地球の陸地の14%ほどであるが、地球の土壌中の有機炭素の半分を蓄えている。寒冷であるため、土壌有機物分解が抑えられる。また、永久凍土が不透水層となるため、夏期融解層の水分量が大きく嫌氣的であることも、土壌有機物が分解されにくいことにつながる。このため、現在の植物の落葉落枝や過去に生育した植物体の大量の有機炭素が分解されずに残っている。現在この地域では、1年に植物が生産する量の300～1000倍の有機炭素が土壌中に存在する。地球温暖化による温度上昇は、こうした土壌有機物の分解を促進する。土壌有機物分解は、一般に、温度に対して指数関数的に増加する。さらに、北極域では、温暖化に伴い原野・森林火災が増加している。原野・森林火災が起こると、土壌中に蓄えられている有機炭素の一部が燃焼してCO<sub>2</sub>として大気へ放出される。温暖化が進むと、土壌有機物分解が進み、さらなる温暖化をもたらすという、正のフィードバック効果を示す。北極域は、地球上で最も急速に温暖化が進んでいる。どの程度の北極圏の土壌有機物分解が、今後の環境変化の下で進むかは、温暖化予測に大きく関わるが、未だ解明されていない。それを明示する

ための一つの鍵は、同じ北極圏でも場所によって、土壌有機物の蓄積量や分解量が異なるという観点である。場所による土壌有機物の蓄積量や分解量の違いは、植生や地形や気象条件の違いに起因する生態系の違いの影響を大きく受ける。そこで、リモートセンシングによる生態系の広域評価を行う。

## 2. 研究開発目的

サブグループ1では、リモートセンシングによる土壌有機物分解の観点からの広域生態系区分を行う。サブグループ2、サブグループ3の成果を合わせて、北極圏の土壌有機炭素分解の時空間変動をモデル化する。サブグループ1の研究開発目的は、以下の3点である。(1) 植生調査と生態系構成要素の分光測定を行う。北方森林林床およびツンドラでは、落葉性灌木、常緑性灌木、イネ・スゲ、草本といった植物機能型別の現存量と分光特性との対応を得る。超高解像度衛星画像World View-2(地上分解能0.5m)により、調査区の代表性を評価し、MODIS画像(毎日取得、地上分解能1km)による調査区での観測のスケールアップを行う。(2) 生態系の放射伝達モデルを用いて、アラスカ陸域の生態系区分を行う。土壌有機物分解に関わるリターフォール量と原野・森林火災の頻度の観点からのアラスカ陸域の生態系区分を定式化する。分光特性と灌木現存量との対応から、リモートセンシングによる灌木の抽出も定式化する。(3) アラスカ陸域の生態系区分の定式化を、過去15年間のMODIS画像に適用し、リモートセンシングによるアラスカ陸域および北極圏陸域全体の土壌有機物分解の観点からの広域生態系区分を行う。北極圏の灌木の分布やリターフォール量の変化、火災による変化など植生変化とそれに伴う土壌有機物分解の変化を解析する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 植物機能型別の現存量、リターフォール量、灌木、火災後の地表面と分光特性

#### 1) 植物機能型別の現存量、リターフォール量、灌木と分光特性

アラスカツンドラの湿潤酸性ツンドラ(MAT)、湿潤非酸性ツンドラ(MNT)、ヒースツンドラ(HT)、スゲ灌木ツンドラ(SST)に、20cm×20cmのコドラートを設置し、分光測定と地上部の刈り取りを行った。これら4つのツンドラの種別はツンドラの代表的な種別である。分光測定は、GER-2600 スペクトロメータ(GER社製、米国)を用いて、350nmから2500nmの波長で行った。分光測定方法は既往の研究<sup>1)</sup>に従った。それぞれのコドラートについて、刈り取った植物は、落葉性灌木、常緑性灌木、イネ・スゲ、草本といった植物機能型別に、それぞれ光合成部位(緑色部)、非光合成部位ごとに区分し、それぞれの乾物重としての現存量を量った。分光指標と緑色植物現存量および落葉性灌木緑色部現存量との関係を解析した。それぞれの乾物重と既往の研究<sup>2)</sup>から、維管束植物地上部純一次生産量を算出した。分光指数と維管束植物地上部純一次生産量との対応から、維管束植物地上部純一次生産量を見積もるのに最適な分光指数を求める。維管束植物地上部純一次生産量と既往の研究<sup>2)</sup>から、根やコケの生産量を含めた純一次生産量を算出する。ツンドラの植生はほぼ極相であると考えられることから、純一次生産量はリターフォール量(植物から土壌への有機物の年間移動量)と等しいとした。このようにして、リターフォール量を見積もるのに最適な分光指数を求める。

植生指数NDVIとEVI2は以下のものである。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}}, \quad (1)$$

$$EVI2 = 2.5 \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + 2.4R_{red} + 1}, \quad (2)$$

$R_{red}$  (%) と  $R_{NIR}$  (%) はそれぞれ MODIS のバンド1 (0.62–0.67  $\mu\text{m}$ ) とバンド2 (0.841–0.876  $\mu\text{m}$ ) の反射係数を示す。新たに植生指数 WI と DSI を導入する。

$$WI = \frac{R_{blue} + R_{green} - R_{red}}{R_{blue} + R_{green} + R_{red}}, \quad (3)$$

$$DSI = (EVI2) \times (WI). \quad (4)$$

$R_{blue}$  (%) と  $R_{green}$  (%) はそれぞれ MODIS の青バンド (0.459  $\mu\text{m}$  – 0.479  $\mu\text{m}$ ) と緑バンド (0.545  $\mu\text{m}$  – 0.565  $\mu\text{m}$ ) の反射係数を示す。これらと、下記で表される分光指標：

$$SI = (B_x - B_y) / (B_x + B_y) \quad (5)$$

$$ESI = a \exp(b \cdot SI) \quad (6)$$

により、維管束植物緑色部現存量と分光指標との関係を見る。ただし、 $B_x$  と  $B_y$  は MODIS のバンド  $x$  ( $x = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \text{ and } 7$ ) とバンド  $y$  ( $y = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \text{ and } 7; y \neq x$ )。  $a$  と  $b$  は定数である。

## 2) 火災後の地表面と分光特性

米国アラスカ州の2004年6月～8月に森林火災で燃焼した、黒トウヒ林(65°12'N, 147°46'W, 650 m a.s.l.)を対象地域とした。林床のほとんどがミズゴケに覆われていたが、火災時にミズゴケの一部が燃焼し、火災後、林床は、燃焼した部分、損傷したミズゴケ、燃え残ったミズゴケがパッチ状に広がった。燃え残ったミズゴケの上には維管束植物があり、また火災後、燃えた林床には新たに更新した植物も見られた。こうした林床で156の分光測定を行った。分光測定は、ツンドラの分光測定と同様にして、GER-2600 スペクトロメータを用いて、350nm から 2500nmの波長で行った。分光測定データから、各種の分光指数およびアルベドを算出し、燃焼した部分、損傷したミズゴケ、燃え残ったミズゴケ、更新した植生による分光指数の違いを解析した。

分光指標としては、NDVI, 正規化燃焼率指数(Normalized Burn Ratio; *NBR*)、ほかの分光指標(*SI*)を考える。

$$NBR = (B_2 - B_7) / (B_2 + B_7). \quad (7)$$

$$NDMI = (B_5 - B_1) / (B_5 + B_1). \quad (8)$$

アルベドは以下のように計算を行った。MODISの可視から中間赤外の6つの波長帯の観測放射輝度に大気補正を加味して、各波長帯の地上での反射光強度を求め、それを各波長帯の大気補正を加味した地上での太陽放射強度で割り、各波長帯の地上の反射率を求めた。波長帯ごとの地上太陽光強度で重み付けした反射率の平均値を、アルベドとした。

## (2) リターフォール量と原野・森林火災の頻度のリモートセンシング

### 1) 北方森林のリターフォール量

ツンドラと同様に北方森林のリターフォール量を見積もるのに最適な分光指数を用いて、リターフォール量の地理的分布と2000年から2013年のリターフォール量の変化の地理的分布を見積もる。これらから2100年までのリターフォール量の変化を推定する。北方森林では、葉面積指数(LAI[m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>])を介して、植生指数 NDVI から常緑樹と落葉樹のリターフォール量(LF[gC/m<sup>2</sup>/年])を

算出する。

LAI から LF の算出については、常緑樹については、既往の研究<sup>1,3,4)</sup>による下記の式を用いた。

$$LF = 50.7LAI \quad (9)$$

落葉樹については、既往の研究<sup>5)</sup>による下記の式を用いた。

$$LF = 52.1LAI \quad (10)$$

NDVI から LAI の算出については、常緑樹については、既往の研究<sup>6)</sup>による下記の式を用いた。

$$LAI = 31.3NDVI - 19.8 \quad (11)$$

落葉樹については、既往の研究<sup>7)</sup>による下記の式を用いた。

$$LAI = 23.3NDVI - 13.2 \quad (12)$$

樹木のリターフォール量にコケのリターフォール量を加えて生態系のリターフォール量とした。コケのリターフォール量は樹木のリターフォール量の10%とした<sup>8)</sup>。混交林については、50%が常緑樹、50%が落葉樹から成ると仮定してリターフォール量を算出した。これらから2100年までのリターフォール量の変化を推定する。

## 2) 火災時の土壌有機物の燃焼の度合い

原野森林火災時の土壌有機物の燃焼の度合いを見積もるために、地上での燃焼、コケ、損傷コケ、回復植生の分光測定を基にして新たに開発した分光指数により、MODIS/Terra 衛星画像データから燃焼、コケ、損傷コケ、回復植生の面積率を見積もる方法を、0.5m×0.5m 地上解像度の Quickbird、WV-2、WV-3衛星により検証した。

アラスカ中央部の黒トウヒ林の火災跡地については、土壌有機物分解と大きく関わる林床のミズゴケ被覆の燃焼面積率を衛星画像から見積もる方式を提示した。その大気補正では、Erdas imagineのアドオンモジュールを用いた。この林床のミズゴケ被覆の燃焼面積率の検証のためには、空撮した写真から作成した、火災後のミズゴケ被覆分布図を用いた。その作成には、衛星画像解析ソフトErdas imagineのアドオンモジュールである植生パッチのフィーチャー抽出、合成開口レーダによるインターフェロメトリ、および位置情報入り地図出力を用いた。

### (3) 過去10～15年間の MODIS 画像への適用

#### 1) MODIS 画像のクラスター分類と植生

2000年から2012年に取得されたMODIS画像を用いたクラスター分類によって、植生タイプ及び2000年から2012年の植生変化に対応した植生分類を行った。得られた植生分類は、超高解像度衛星画像World View-2および調査地周辺の空撮写真を用いて区分植生ごとの特徴をまとめるとともに、土壌有機物分類の観点から植生区分の統合を行った。

#### 2) 過去15年間のリターフォール量の解析

現地観測で得られた関係は0.2mの地上分解能について成り立つものであるが、毎日画像を取得する地球観測衛星搭載センサーMODISは、地上分解能が250m～1kmである。そこで、超高解像度衛星画像World View-2（地上分解能0.5m）により、地上分解能が0.5mから1kmまで変化する際に、分光指標がどのように変化するか、アラスカのツンドラについて調べた。その分光指標の変動を考慮して、現地観測の分光指標と植物から土壌への炭素移動を表す指標との対応関係をMODIS画

像にスケールアップした。この関係を用いて、2000年から2012年の7月中旬8月中旬にアラスカツンドラについて取得されたMODISから、2000年から2012年の植物から土壌への炭素移動を表す指標の変化を見積もった。また、2000年から2012年のアラスカツンドラについて取得されたMODIS NDVIを用いたクラスター分類によって、植生タイプ及び2000年から2012年の植生変化に対応したアラスカツンドラの植生分類を行った。この植生区分は2001年に作成された米国の土地被覆分類データ(NLCD2001)と比較し、分類された植生区分ごとに、植生タイプ及び2000年から2012年の植生変化の観点から、それぞれの特徴を明らかにした。MODISデータは雲を取り除くように7日間ごとに合成されたものを用いた。また、米国地質調査所(USGS)の原野・森林火災のデータベースを用い、植生区分ごとの火災の周期を求めた。

解析対象地域を米国アラスカ州と隣接するカナダの一部とする。2000年から2013年の各年の7月24日から7月31日まで(閏年は7月23日から7月30日まで)の500m×500mの地上解像度のMODIS/Terra衛星画像データを用いた。この時期はツンドラの植生が1年で最大になる時期である。MODIS/Terraデータは毎日地球全体について取得されている。雲を除去する処理により、各年1シーンにまとめられる。リターフォール量を見積もるのに最適な分光指数を用いて、リターフォール量の地理的分布と2000年から2013年のリターフォール量の変化の地理的分布を見積もる。これらから2100年までのリターフォール量の変化を推定する。

### 3) 過去15年間の火災頻度と火災地の地表面変化の解析

土壌有機物の変化を考えるときには、土壌有機物分解量、リターフォール量のほかに原野・森林火災の周期を考慮しなければならない。原野・森林火災地の同定には、2001年から2015年のMODIS/TerraおよびMODIS/Aqua衛星画像データの火災検知プロダクトMOD14およびMYD14を用いた。これらは、主として4 $\mu$ mと11 $\mu$ mの熱赤外の波長を用いて、1km×1kmの地上分解能のピクセルごとに、毎日火災を検知したものである。それぞれの地域ごとにNational Land Cover Database 2011<sup>9)</sup>(NLCD 2011)による植生区分別に、土地面積を2001年から2015年の年平均火災面積で除し、火災の周期とした。NLCD 2011では、落葉樹、常緑樹、混交林、灌木、草地、コケ類、湿地などの植生区分がされている。

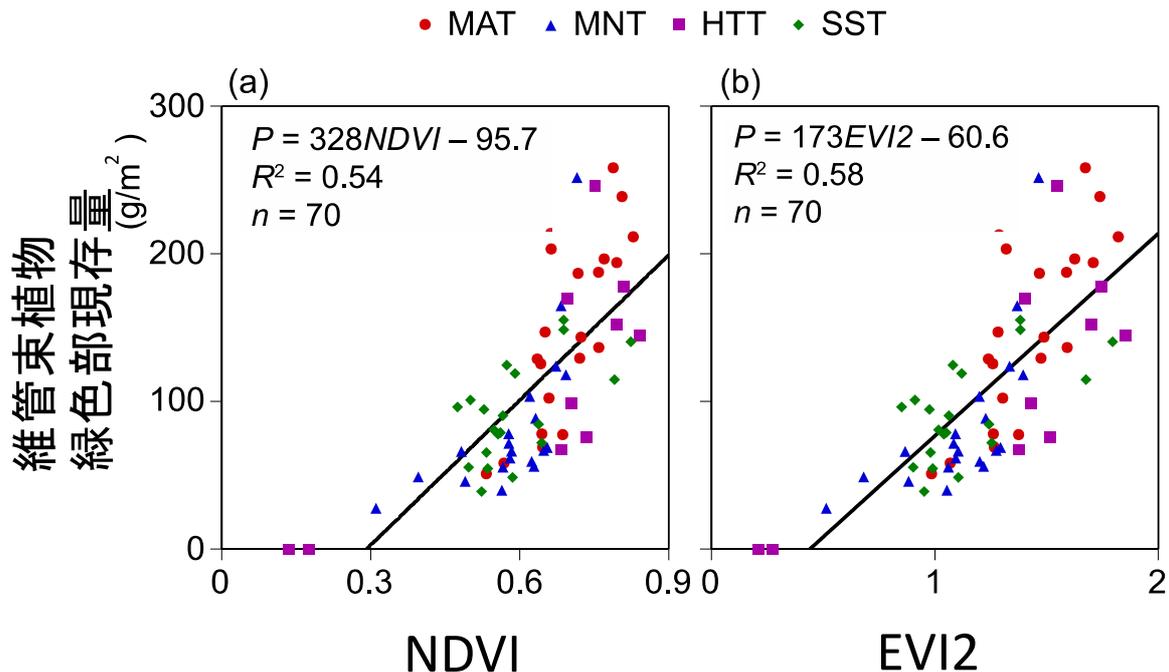
また、MODISデータによる火災後の地表面区分別面積率見積もり手法を、アラスカ全域で2001年から2015年の3月から7月までに燃えた火災地の火災直後のMODISデータに適用し、原野森林火災時の燃焼の度合いを解析した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 植物機能型別の現存量、リターフォール量、灌木、火災後の地表面と分光特性

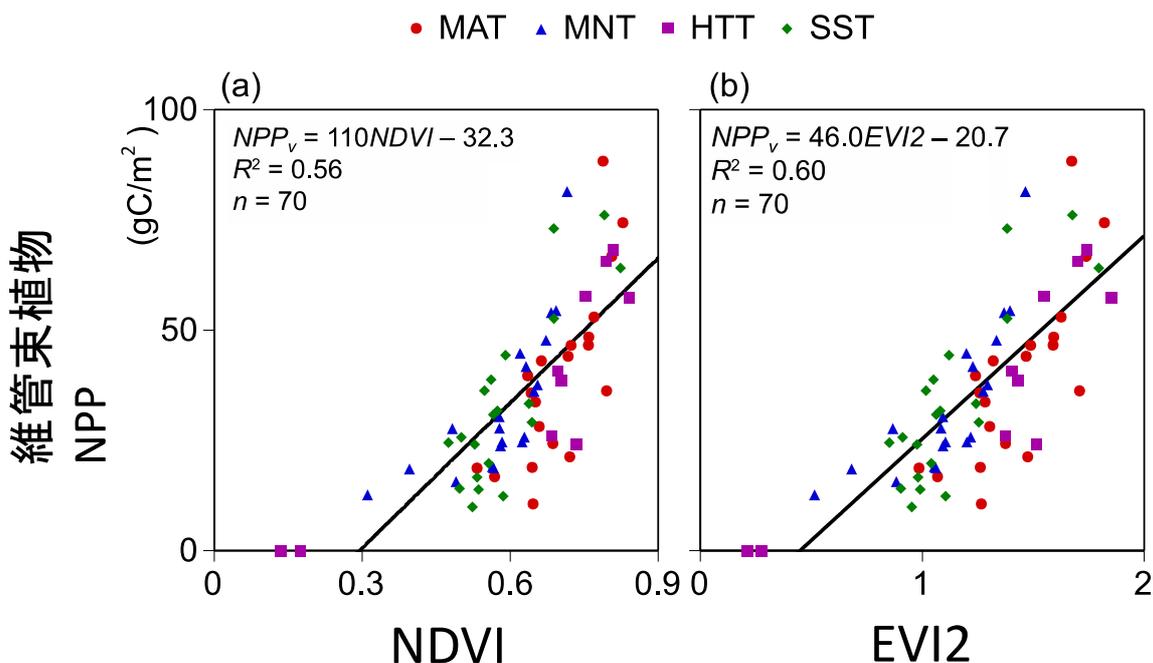
#### 1) 植物機能型別の現存量、リターフォール量、灌木と分光特性

現地観測による分光指数と維管束植物緑色部現存量( $g/m^2$ )との相関を見たところ、NDVIおよびEVI2が最も維管束植物緑色部現存量( $g/m^2$ )との相関が高かった。NDVI、EVI2と維管束植物緑色部現存量( $g/m^2$ )との関係を図(1)-1に示す。維管束植物緑色部現存量( $g/m^2$ )に非光合成部位を含めた地上部維管束植物現存量( $g/m^2$ )やそれにコケや地衣類も含めた地上部現存量( $g/m^2$ )と分光指標との相関も見たと、NDVI、EVI2と維管束植物緑色部現存量( $g/m^2$ )との相関が最も高かった。



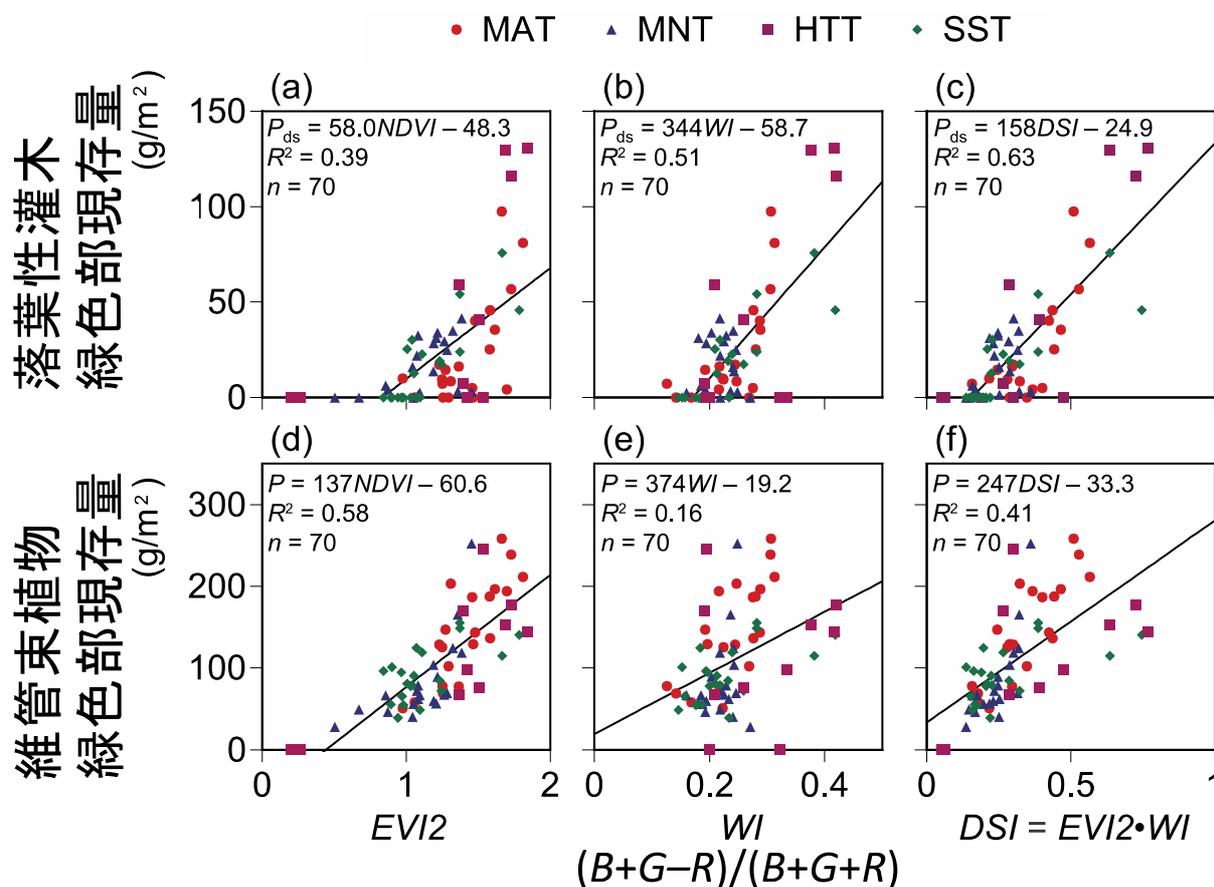
図(1)-1 ツンドラの分光指標(NDVI, EVI2)と維管束植物緑色部現存量との関係

落葉性灌木、常緑性灌木、イネ・スゲ、草本といった植物機能型別の植物緑色部現存量と文献データ<sup>2)</sup>から根の生産量を除く維管束植物純一次生産量(NPP)を見積もり、分光指標との相関を見たところ、NDVIおよびEVI2との相関が最も高かった。図(1)-2にツンドラの分光指標(NDVI, EVI2)と維管束植物NPPとの関係を示す。維管束植物NPPは植物から土壌への毎年の炭素の流入を示す。その地理的分布や年々変動は、土壌有機物分解の解析と広域見積もりに用いられる。



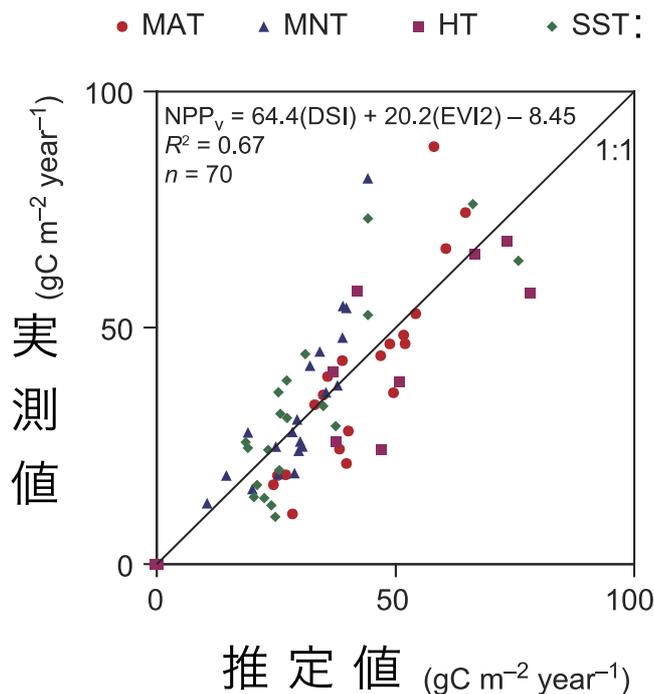
図(1)-2 ツンドラの分光指標(NDVI, EVI2)と維管束植物純一次生産量(NPP)との関係

アラスカツンドラの観測値における  $EVI2$ ,  $WI$ ,  $DSI$  と維管束植物緑色部現存量、落葉性灌木緑色部現存量の関係を図(1)-3に示す。維管束植物緑色部現存量は  $EVI2$  と相関が高く、落葉性灌木緑色部現存量は  $DSI$  と相関が高かった。これまで落葉性灌木緑色部現存量と相関の高い分光指標は知られていなかった。ツンドラでは、落葉性灌木のみ枝や幹が多く含まれており、こうした枝や幹と  $WI$  の相関が高いことが、植生構成要素の分光特性から説明できる。枝や幹は、葉によって覆われることが多いため、 $WI$  と葉の量と相関の高い  $EVI2$  との積が、落葉性灌木緑色部現存量との相関が高くなったと考えられる。落葉性灌木緑色部現存量は、植物から土壌への年々の炭素流入の大きな割合を占めており、MODISなど地球観測衛星の分光指標  $DSI$  による落葉性灌木緑色部現存量見積りは、土壌有機物の貯留と分解の評価の観点から重要である。



図(1)-3ツンドラの分光指標と維管束植物緑色部現存量、落葉性灌木緑色部現存量の関係

図(1)-4にツンドラの維管束植物地上部純一次生産量のMODISリモートセンシングデータによる推定値と刈り取りに基づく実測値との関係を示す。

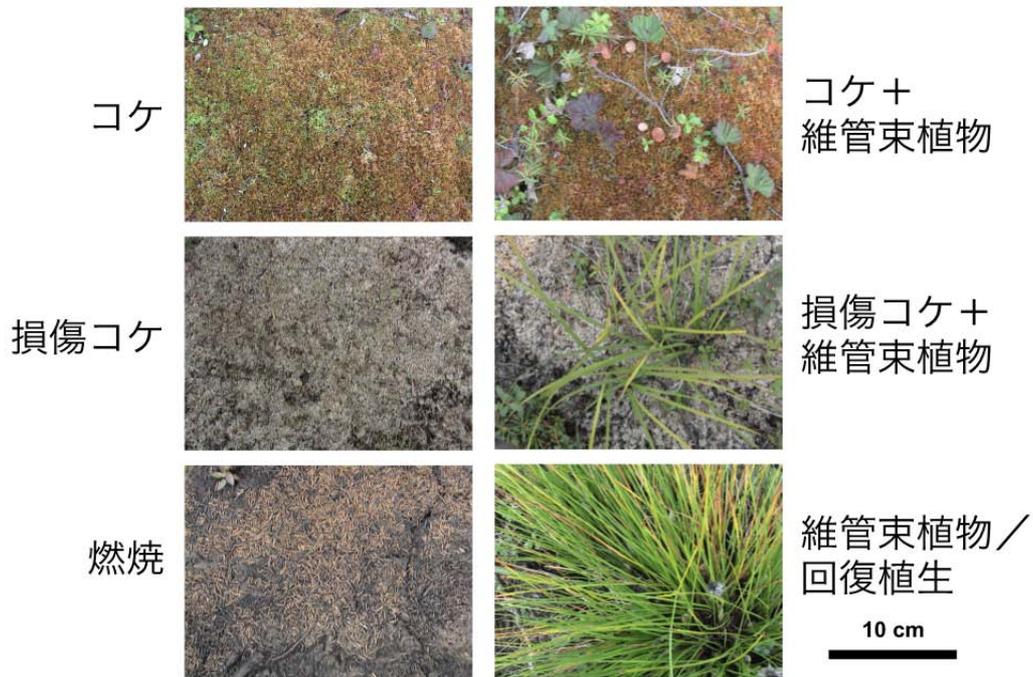


図(1)-4 ツンドラの維管束植物地上部純一次生産量のMODISリモートセンシングデータによる推定値と刈り取りに基づく実測値との関係。

## 2) 火災後の地表面と分光特性

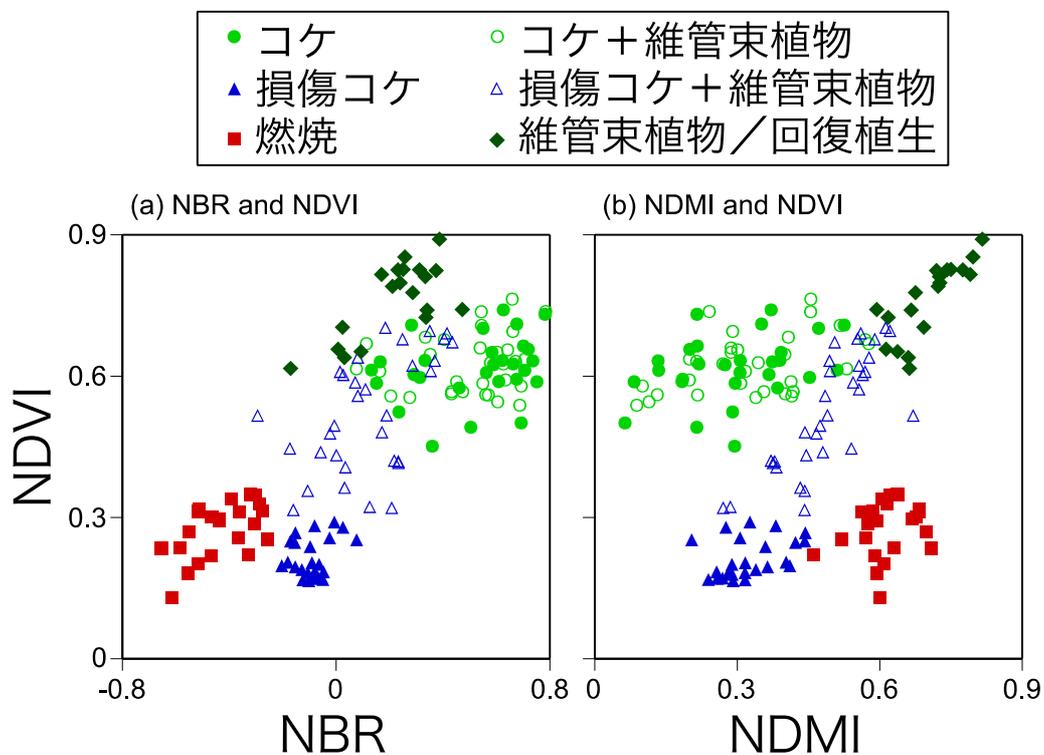
図(1)-5に火災後の地表面の区分を示す。図(1)-6に地上分光測定による分光指標の散布図（火災後1年）を示す。地上分光測定データの解析から、火災後の、燃焼した部分、損傷したミズゴケ、燃え残ったミズゴケ、更新した植生の4つの部分の区分には、*NDVI*, *NBR*, *NDMI*の3つが有効であることが分かった。これら4つの部分が、平面である地表面上に混在しているというモデルを仮定した。4つの部分それぞれの分光反射率は地上分光測定の平均値を用いた。モデル計算値と観測された*NDVI*, *NBR*, アルベドの値の残差の平方和が最小となるように、解析対象地域のそれぞれの画素の4つの部分それぞれの面積率を算出できる。林床の燃焼割合は、火災時の炭素放出量、火災後の森林の更新の仕方、さらには火災後の土壌有機物の蓄積・分解と大きく関わる。

## 火災後の地表面の区分



図(1)-5 火災後の地表面の区分。

## 地上分光測定による分光指標の散布図（火災後1年）

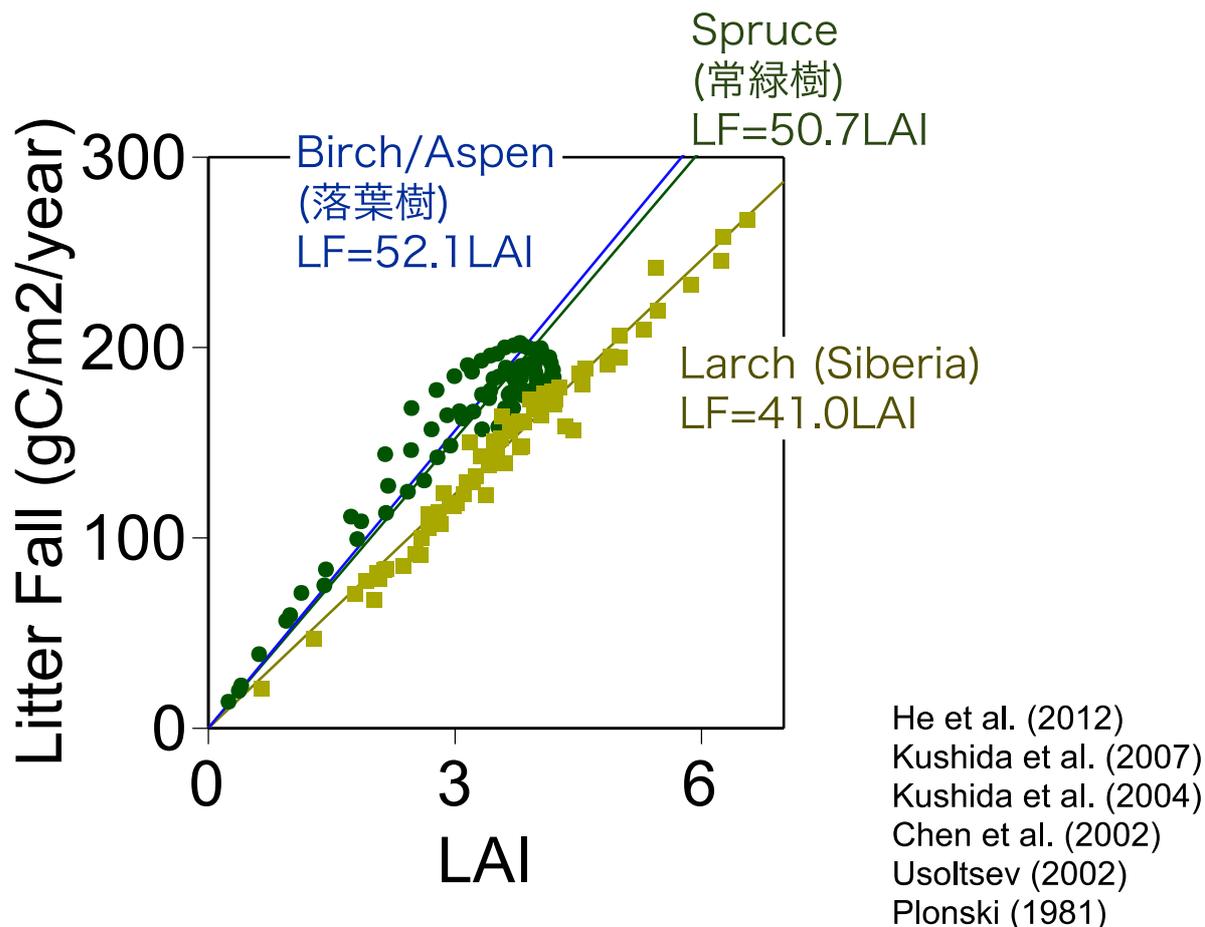


図(1)-6 地上分光測定による分光指標の散布図（火災後1年）。

## (2) リターフォール量と原野・森林火災の頻度のリモートセンシング

### 1) 北方森林のリターフォール量

図(1)-7に北方森林の葉面積指数(LAI)とリターフォール量との関係を示す。北方森林全般に渡って LAI とリターフォール量との関係は、樹種、地域による相違は小さかった。NDVI と LAI との関係については、広く知られているため、NDVI から LAI を介してリターフォール量を算出できる。



図(1)-7 北方森林の葉面積指数(LAI)とリターフォール量との関係

### 2) 火災時の土壌有機物の燃焼の度合い

アラスカ中央部で2004年7月下旬に、Boundary Fireと呼ばれる火災で燃えた、黒トウヒを主体とした森林について、Landsat衛星画像から林床のミズゴケ、火災で燃焼したミズゴケ、火災で損傷したミズゴケ、火災後に回復した維管束植物それぞれの面積率を算出した。算出にあたっては、現地でのそれぞれの分光測定結果から、これらを分離できる分光指標や太陽光分光領域の反射率であるアルベドを3種選定し、その3つの分光指標およびアルベドを用いた。

表(1)-1に火災前後の地表面区分の面積率変化の解析に用いた30m地上解像度Landsat画像のリストを示す。図(1)-8に火災直後のLandsat画像と解析範囲を示す。図(1)-9に解析対象地域の数値標高モデルを示す。図(1)-10に解析対象地域の陰影起伏背(太陽位置45°天頂角)を示す。図(1)-11に

火災直後、4年後、9年後の地表面区分ごとの面積率の変化（30m解像度Landsatによる。図(1)-8の画像全体）を示す。図(1)-12に火災直後、4年後、9年後の地表面区分ごとの面積率の変化（30m解像度Landsatによる。図(1)-8の点線で囲んだ部分）を示す。図(1)-13に火災直後のMODIS(2004年7月23～30日)による燃焼、コケ、損傷コケ、回復植生の面積率を示す。

これらの結果はこの見積もりは、0.5m×0.5m地上解像度のQuickbird、WV-2、WV-3衛星による見積もりと合っていた。アラスカの森林の半分以上はトウヒ林である。火災時の炭素放出の8から9割は林床のミズゴケの燃焼による放出であると言われている。また、トウヒ林の林床のミズゴケが燃えると、広葉樹が更新しやすく、燃えなければトウヒ林が更新しやすい。トウヒ林の林床のミズゴケの燃焼割合は、ミズゴケを含む土壤有機物が火災時にどれだけ燃焼したかを示すだけでなく、火災後の森林の更新の仕方については、火災後の土壤有機物の蓄積・分解と大きく関わる。

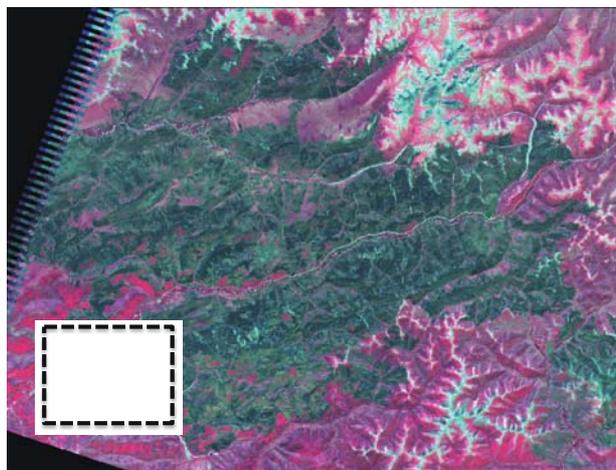
このように、地球観測衛星画像から、植生区分、ツンドラの落葉性灌木の量、北方森林およびツンドラの火災の頻度、強度、火災後の植生更新予測を行う方式を提示した。ツンドラの落葉性灌木の量、北方森林の火災の頻度は、植生から土壤への有機炭素の流入を説明する主要な部分を占める。これらによる見積もりは、生態系土壤有機物分解モデルと合わせれば、今後の温暖化に伴う土壤有機物分解の予測に用いることができる。

表(1)-1 火災前後の地表面区分の面積率変化の解析に用いた30m 地上解像度 Landsat 画像のリスト。

## 用いたLandsat画像

	Date	Satellite/Sensor	Path/Row
Before fire	2003-July-18	Landsat-5/TM	68/14
Just after fire	2004-August-5	Landsat-5/TM	68/14
4 years after fire	2008-August-23	Landsat-5/TM	69/14
9 years after fire	2013-July-13	Landsat-8/OLI	68/14

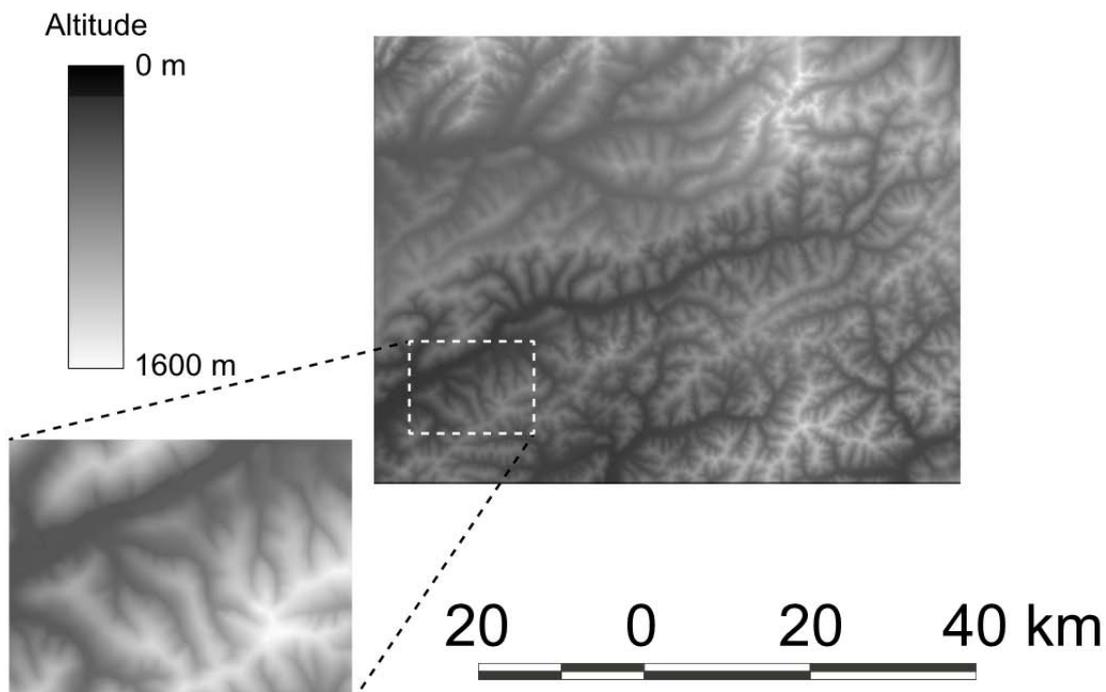
## Landsat-5/TM (2004.8.15: 火災直後, RGB:432)



20 0 20 40 km

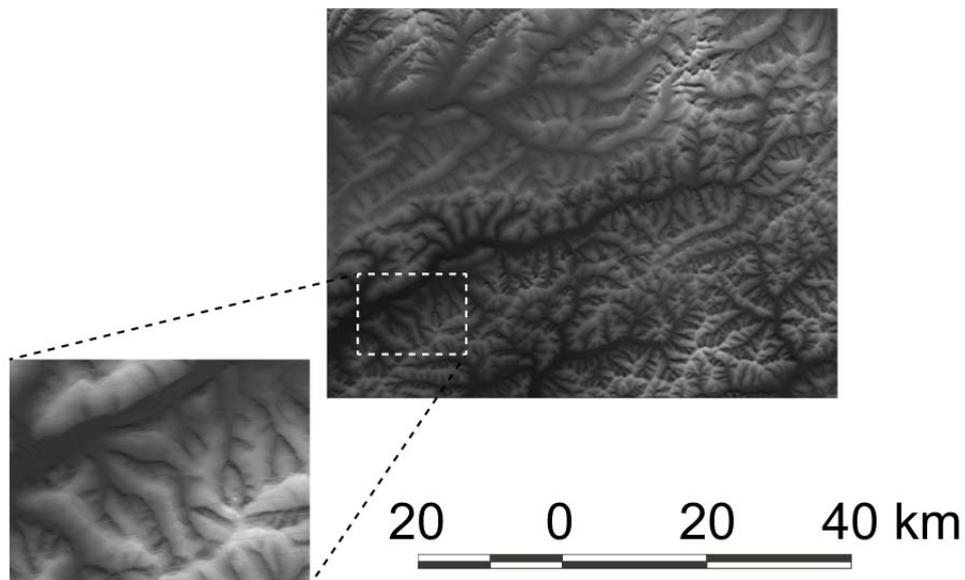
図(1)-8 火災直後のLandsat 画像と解析範囲（画像全体および点線で囲んだ範囲）。

## 対象地域の数値標高モデル

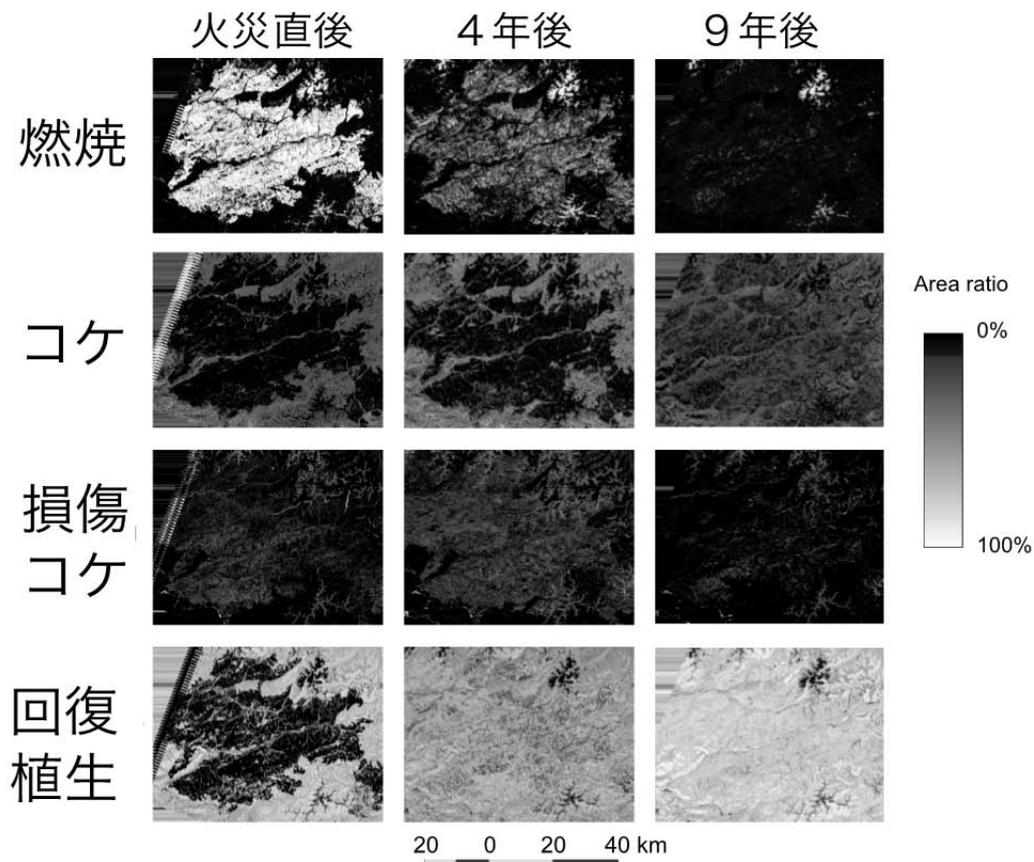


図(1)-9 解析対象地域の数値標高モデル。

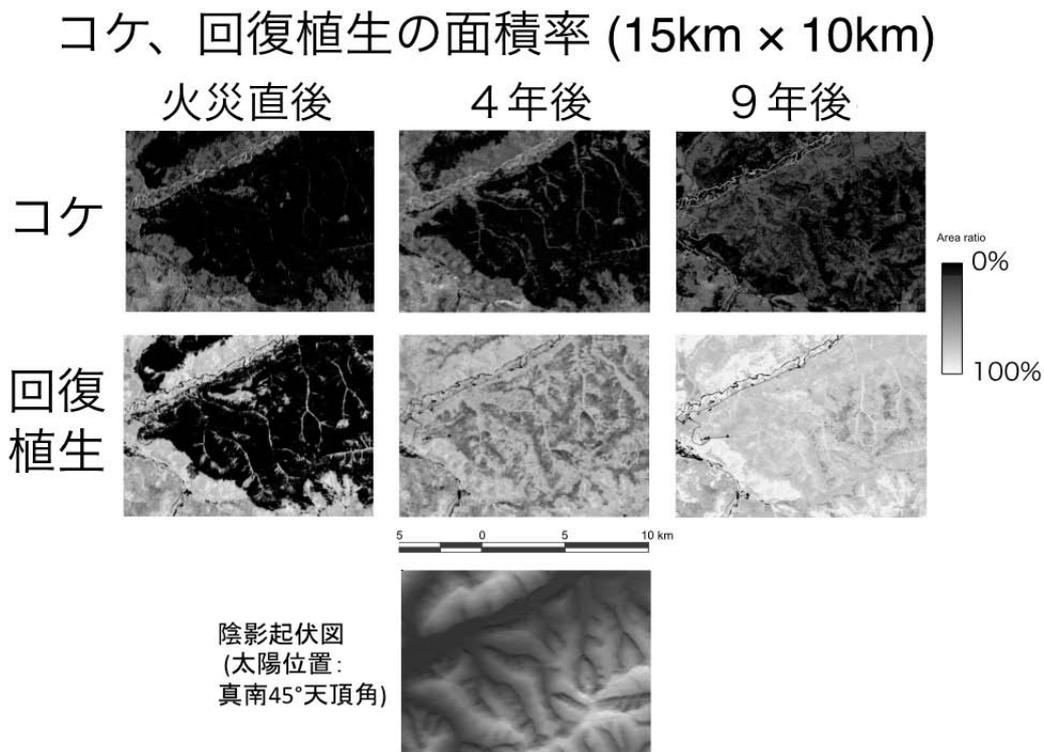
## 対象地域の陰影起伏図 (太陽位置：真南45°天頂角)



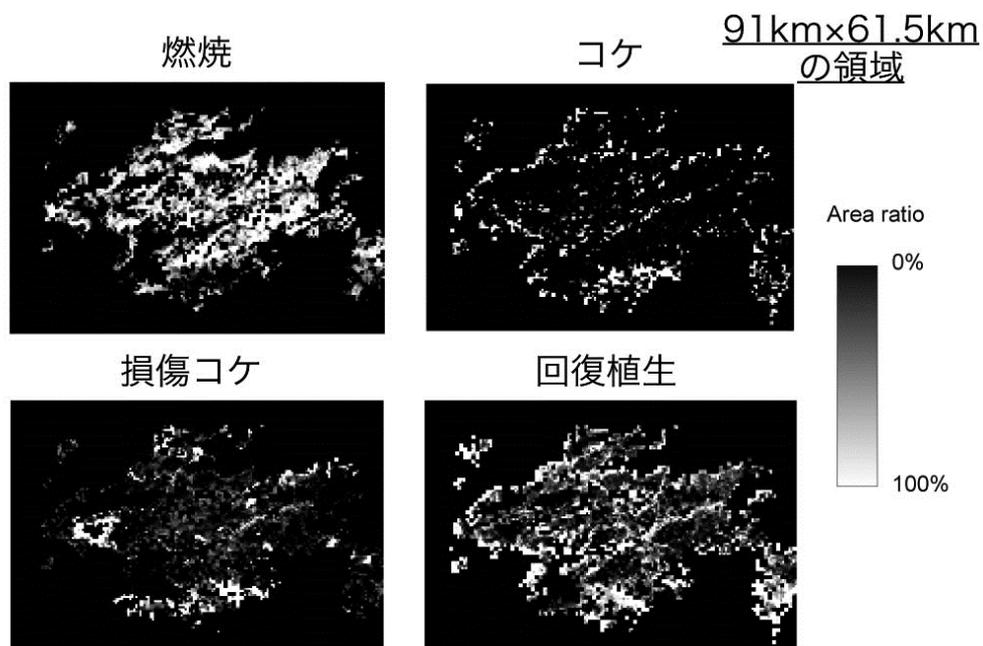
図(1)-10 解析対象地域の陰影起伏背 (太陽位置45° 天頂角)。



図(1)-11 火災直後、4年後、9年後の地表面区分ごとの面積率の変化 (30m解像度Landsatによる。画像全体)。



図(1)-12 火災直後、4年後、9年後の地表面区分ごとの面積率の変化（30m解像度Landsatによる。点線で囲んだ部分）。

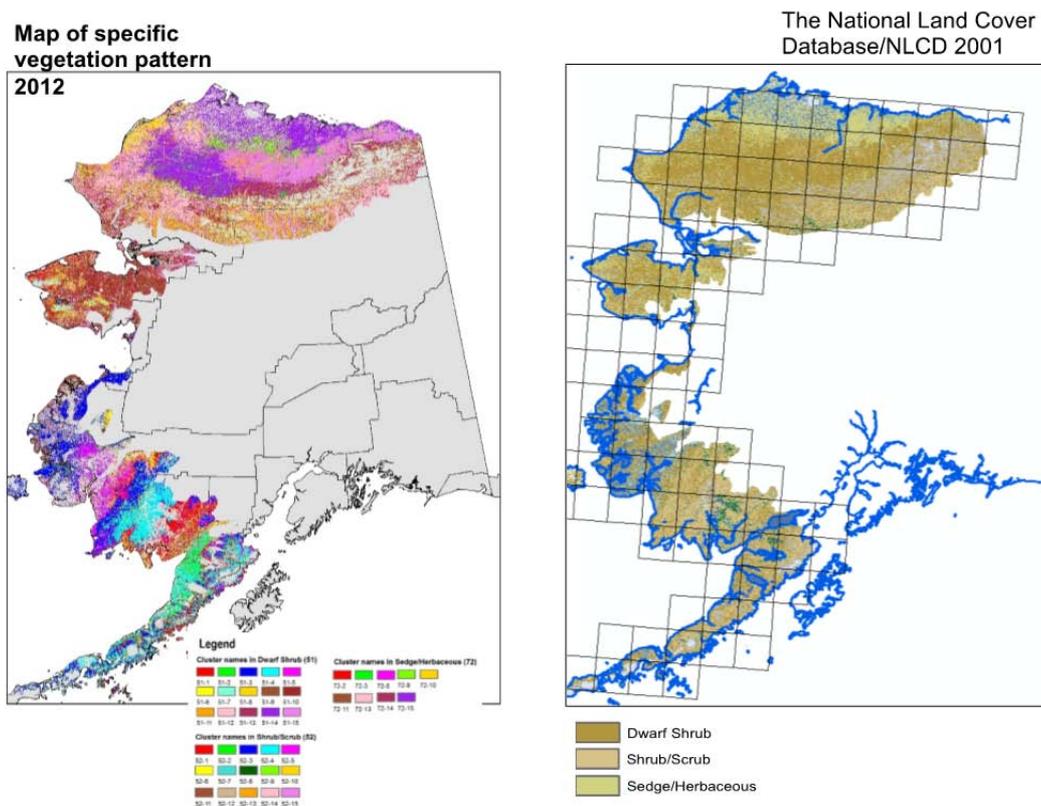


図(1)-13 火災直後のMODIS(2004年7月23～30日)による燃焼、コケ、損傷コケ、回復植生の面積率。

### (3) 過去10～15年間のMODIS画像への適用

#### 1) MODIS画像のクラスター分類と植生

図(1)-14は、2000年から2012年の期間のMODISデータによる植生区分（左）と2001年の米国土地被覆図(NLCD2001)による植生区分（右）を示す。このMODISによる植生区分は、植生の種類を示すだけでなく、2001年から2012年の植生変化の仕方も反映している。2001年のNLCD2001からの変化がいつ起こったかを調べ、それぞれの植生区分の特徴を明らかにした。USGUの原野・森林火災のデータベースと合わせて、植生区分ごとの火災の周期をデータベース化した。これは、植生の増加や原野森林火災の起こりやすさといった観点で、土壌有機物分解と対応している。今後、サブテーマ2やサブテーマ3の成果と合わせて、詳細な、土壌有機物分解の解析に用いることができる。

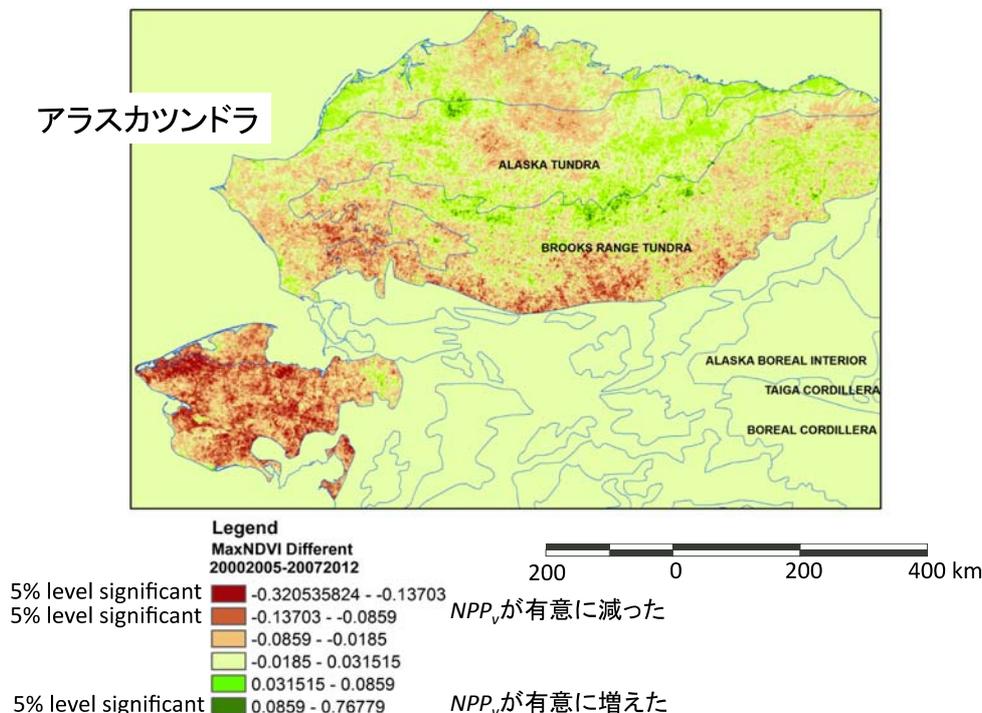


図(1)-14 2000年から2012年の期間のMODISデータによる植生区分（左）と2001年の米国土地被覆図(NLCD2001)による植生区分（右）

#### 2) 過去15年間のリターフォール量の解析

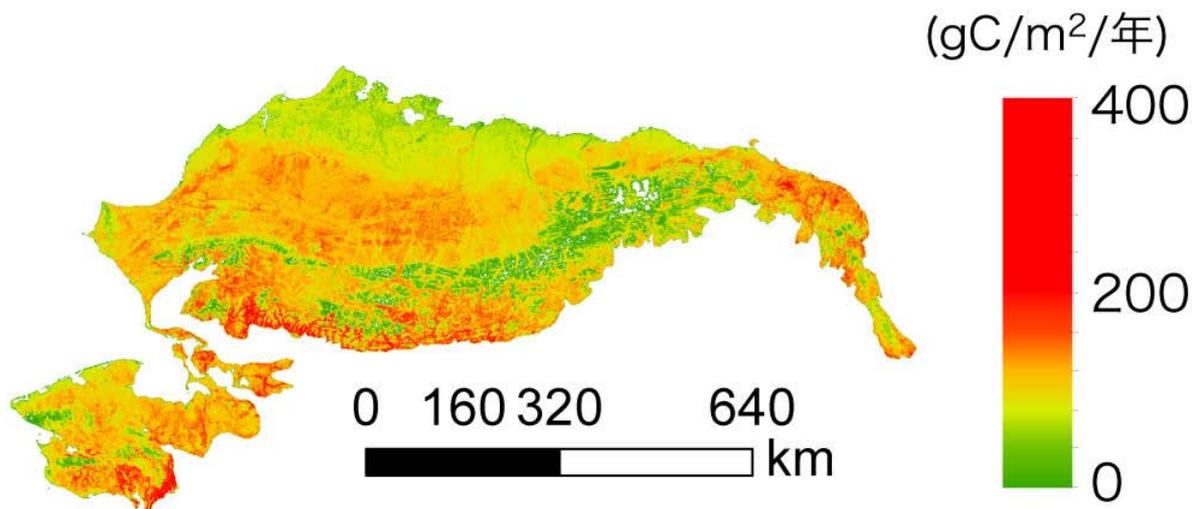
地上観測地を含む超高解像度衛星画像World View-2(地上分解能0.5m)により、地上分解能が0.5mから1kmまで変化する際に、分光指標がどのように変化するか調べたところ、対象地域では、NDVI、EVI2の標準偏差は地上分解能が低くなるに従い低下していた。線形混合モデルを仮定して、これら標準偏差からMODISの地上分解能に応じた維管束植物NPPの見積もり誤差の分布を推定した。図(1)-15に、維管束植物NPPの2000年から2005年の期間に対する2007年から2012年期間の変化を示す。推定した維管束植物NPPの見積もり誤差の分布から、5%水準で有意な増加と有意な減少した

地域を抽出した。先行研究ではアラスカツンドラ全域で近年、植生が増加傾向にあることが示されていたが、本成果により、Foothillsと呼ばれる地域で増加し、Seward半島では減少していることを示した。

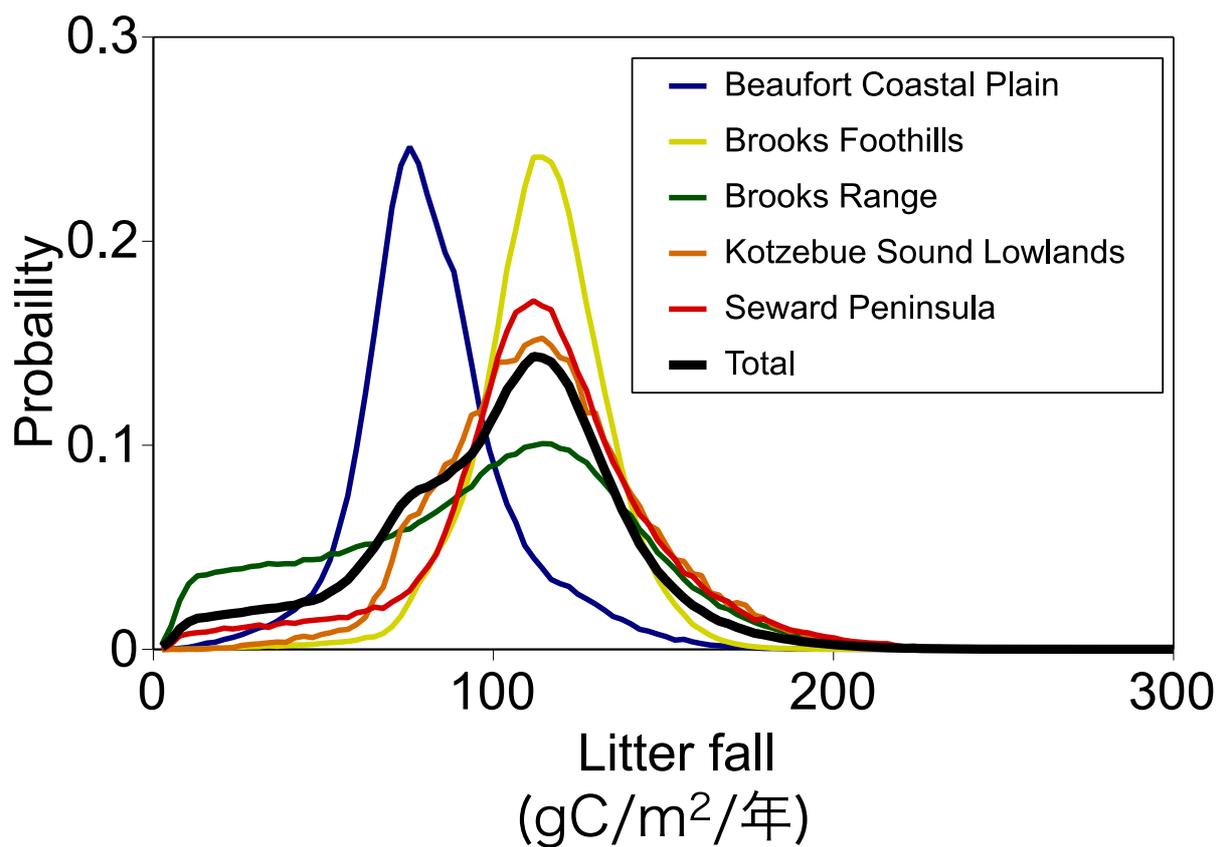


図(1)-15 維管束植物純一次生産量の2000年から2005年の期間に対する2007年から2012年期間の変化

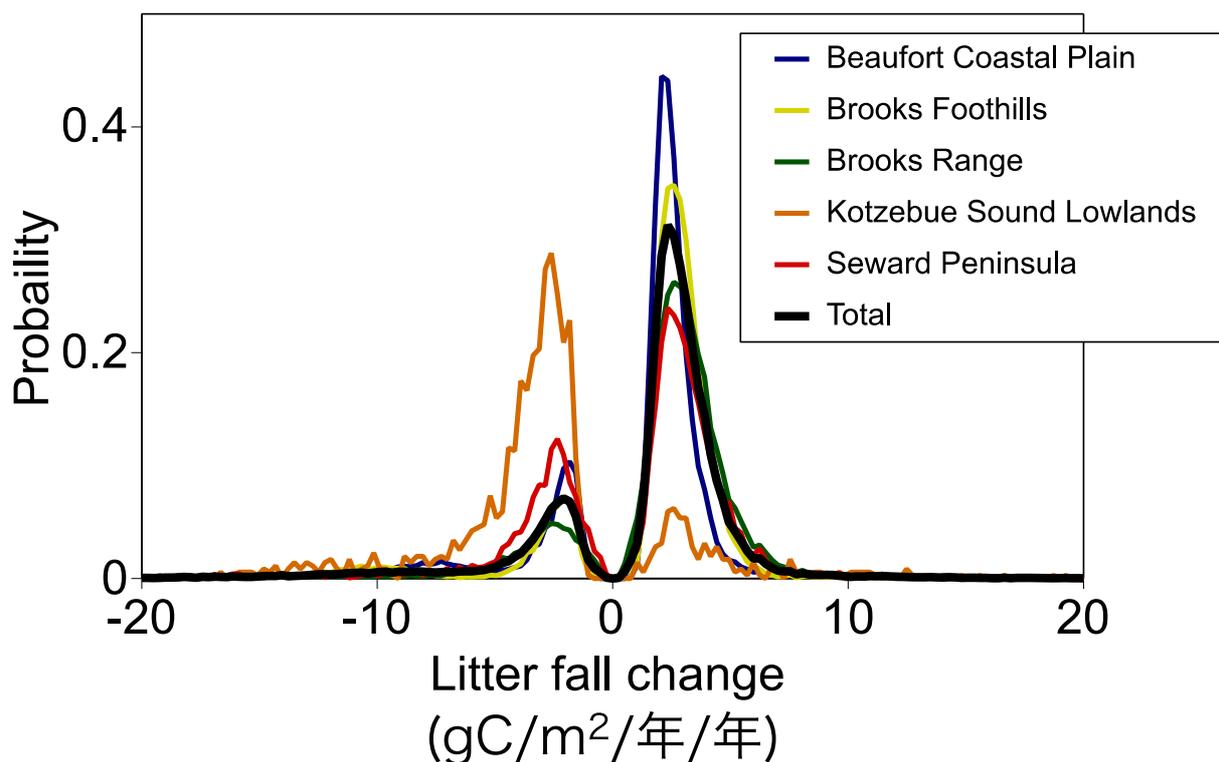
図(1)-16に2000年から2013年のMODISデータによるツンドラのリターフォール量の推定値を示す。図(1)-17にツンドラのリターフォール量の分布を示す。図(1)-18 ツンドラのリターフォール量の変化の分布を示す。リターフォール量の平均値は102 gC/m<sup>2</sup>/年、標準偏差は35 gC/m<sup>2</sup>/年であった。Coastal Plainでは、平均値82 gC/m<sup>2</sup>/年と小さかった。2000年から2013年のリターフォール量の変化については、95%の土地で変化なしで、4%の土地で増加、1%の土地で減少が見られた。増加している土地の平均増加率は2.5 gC/m<sup>2</sup>/年/年であり、減少している土地の平均減少率は1.0 gC/m<sup>2</sup>/年/年であった。増加の土地、減少の土地が、それぞれ同じ速さで増加、減少すると仮定すると、2100年には、解析対象地域全体のリターフォール量は、平均値102 gC/m<sup>2</sup>/年から111 gC/m<sup>2</sup>/年になると見積もられる。これは、2100年までに平均0.5kgC/m<sup>2</sup>の土壤有機物の増加に寄与する。



図(1)-16 2000年から2013年のMODISデータによるツンドラのリターフォール量の推定値。



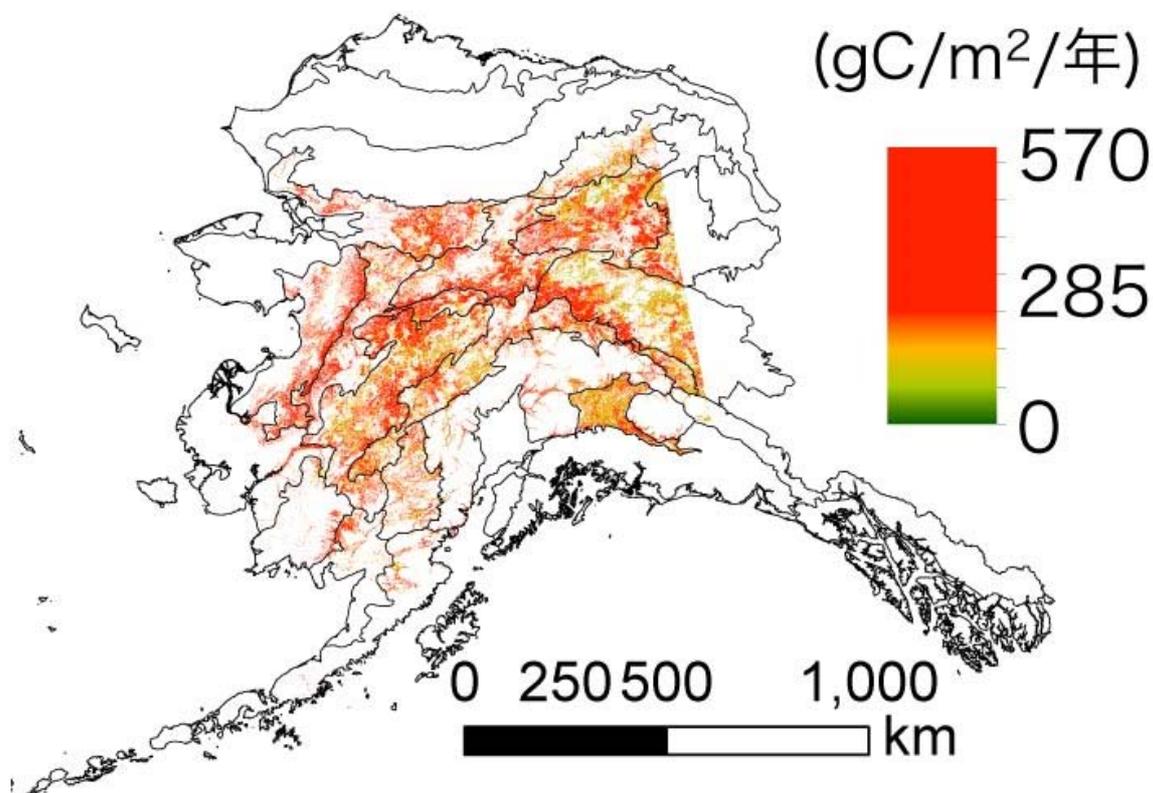
図(1)-17 ツンドラのリターフォール量の分布。



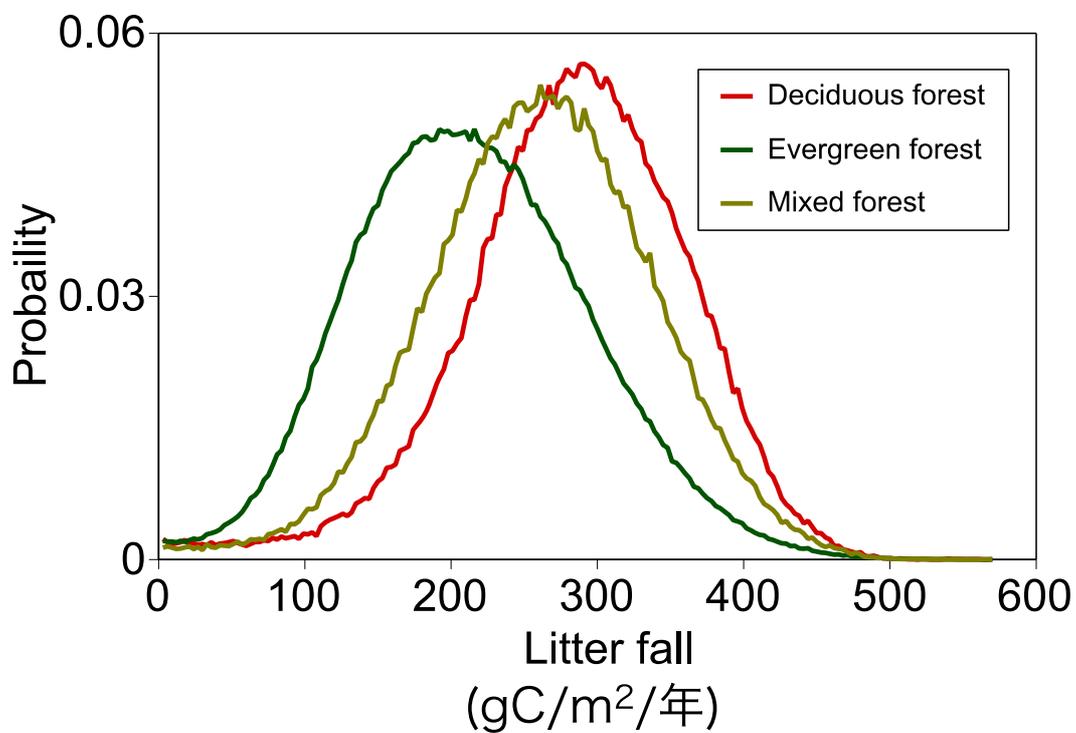
図(1)-18 ツンドラのリターフォール量の変化の分布。

図(1)-19に2000年から2013年のMODISデータによる北方森林のリターフォール量の推定値を示す。図(1)-20に北方森林のリターフォール量の分布を示す。図(1)-21に北方森林のリターフォール量の変化の分布を示す。常緑樹のリターフォール量は、平均値が214 gC/m<sup>2</sup>/年であり、標準偏差が79 gC/m<sup>2</sup>/年であった。落葉樹のリターフォール量は、平均値が284 gC/m<sup>2</sup>/年であり、標準偏差が76 gC/m<sup>2</sup>/年であった。混交林のリターフォール量は、平均値が260 gC/m<sup>2</sup>/年であり、標準偏差が76 gC/m<sup>2</sup>/年であった。常緑樹のリターフォール量の変化については、94%の土地で変化なしであり、4%の土地で増加、2%の土地で減少が見られた。増加している土地の平均増加率は14 gC/m<sup>2</sup>/年/年であり、減少している土地の平均減少率は5.7 gC/m<sup>2</sup>/年/年であった。増加の土地、減少の土地が、それぞれ同じ速さで増加、減少すると仮定すると、2100年には、この地域の常緑樹のリターフォール量は、平均値214 gC/m<sup>2</sup>/年から256 gC/m<sup>2</sup>/年になると見積もられる。落葉樹のリターフォール量の変化については、94%の土地で変化なしであり、3%の土地で増加、3%の土地で減少が見られた。増加している土地の平均増加率は12 gC/m<sup>2</sup>/年/年であり、減少している土地の平均減少率は5.8 gC/m<sup>2</sup>/年/年であった。増加の土地、減少の土地が、それぞれ同じ速さで増加、減少すると仮定すると、2100年には、この地域の常緑樹のリターフォール量は、平均値284 gC/m<sup>2</sup>/年から309 gC/m<sup>2</sup>/年になると見積もられる。混交林のリターフォール量の変化については、94%の土地で変化なしであり、4%の土地で増加、2%の土地で減少が見られた。増加している土地の平均増加率は16 gC/m<sup>2</sup>/年/年であり、減少している土地の平均減少率は4.3 gC/m<sup>2</sup>/年/年であった。増加の土地、減少の土地が、それぞれ同じ速さで増加、減少すると仮定すると、2100年には、この地域の常緑樹のリターフォール量は、平均値260 gC/m<sup>2</sup>/年から319 gC/m<sup>2</sup>/年になると見積もられる。こうしたリターフ

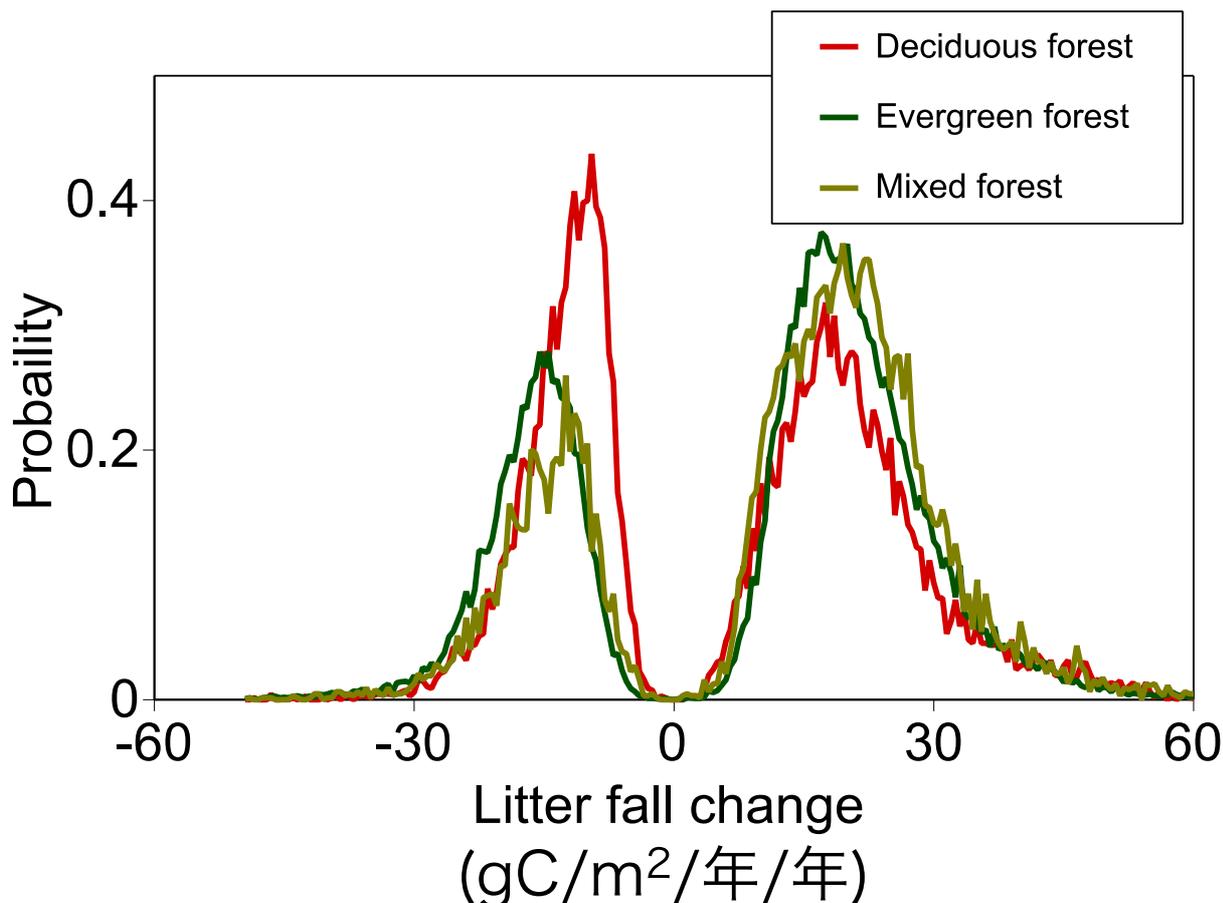
オール量の変化は、解析対象の北方森林全体では、2100年までに平均 $2 \text{ kgC/m}^2$ の土壌有機物の増加に寄与する。



図(1)-19 2000年から2013年のMODISデータによる北方森林のリターフォール量の推定値。



図(1)-20 北方森林のリターフォール量の分布。

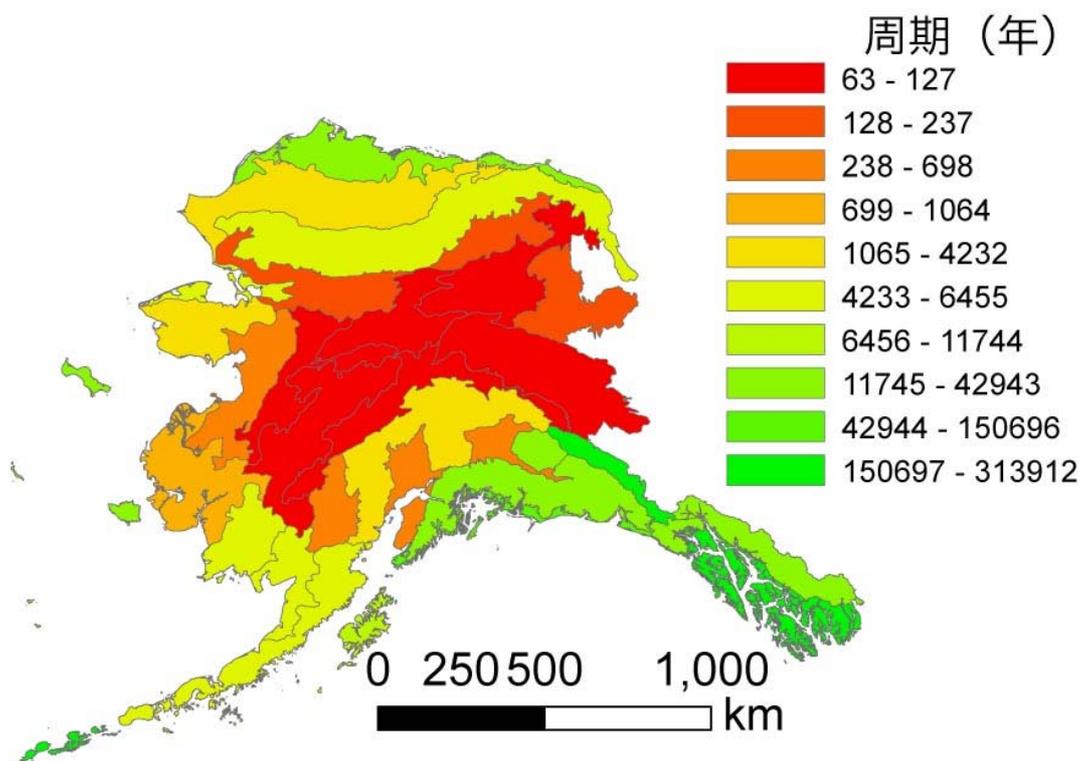


図(1)-21 北方森林のリターフォール量の変化の分布。

### 3) 過去15年間の火災頻度と火災地の地表面変化の解析

図(1)-22に2001年から2015年のMODISデータ解析による火災の周期を示す。ツンドラでは、平均3000年～5000年程度であり、北方森林での平均値は、常緑樹は160年、落葉樹は210年、混交林は210年であった。北方森林の中でも、内陸部北部のRay Mountains地域などの20,000km<sup>2</sup>の常緑樹では周期80年～100年と、火災の頻度が高かった。アラスカ南部の海岸林では火災の周期は10,000年程度であった。温暖化とそれに伴う雷の多発と極端な乾燥の頻度増は、火災の周期を短くする。常緑樹の火災周期160年がRay Mountains地域の常緑樹の火災周期80年～100年に変わった場合、既往の研究<sup>10)</sup>を基にすると、1kgC/m<sup>2</sup>の土壤有機物の消失が起こる。

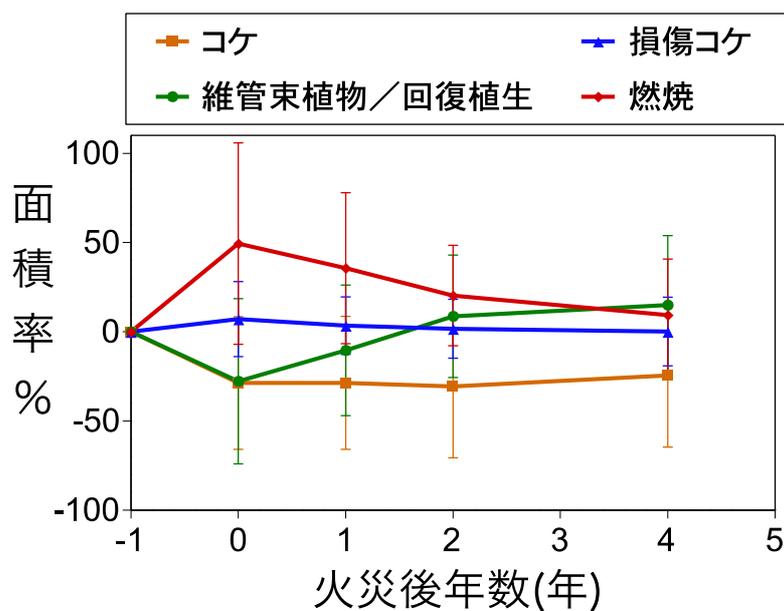
MODISデータによる本見積もり手法を、2001年から2015年の3月から7月までに燃えた火災地について、火災直後のMODISデータに適用したところ、地表面の平均燃焼面積率は50%、最も頻度が高かった燃焼面積率は70%であり、幅広い燃焼面積率の分布を示した。図(1)-23に2000年から2013年のMODISデータによる火災地の火災後年数と地表面区分ごとの面積率を示す。図(1)-24に2000年から2013年のMODISデータによる火災地の火災後年数と地表面区分ごとの面積率の変化を示す。



図(1)-22 2001年から2015年のMODISデータ解析による火災の周期。

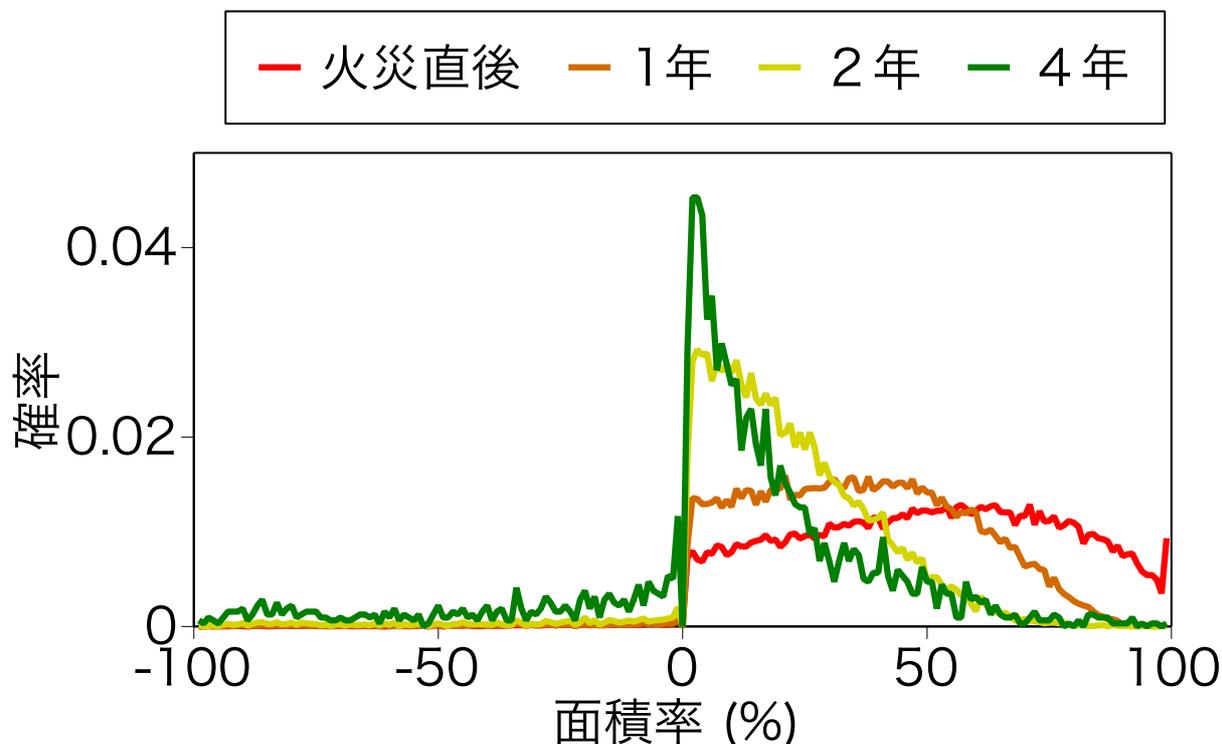
## 火災後の面積率の変化 (火災前に対して)

2000年～2015年のMODIS解析より



図(1)-23 2000年から2013年のMODISデータによる火災地の火災後年数と地表面区分ごとの面積率。

## 火災後の燃焼部分の面積率の変化 2000年～2015年のMODIS解析より



図(1)-24 2000年から2013年のMODISデータによる火災地の火災後年数と地表面区分ごとの面積率の変化。

### 5. 本研究により得られた成果

#### (1) 科学的意義

新たに現地観測に基づいて開発した分光指標により、MODIS衛星データから、アラスカ周辺の北極域全体の植物から土壌への有機物の移動量、火災による有機物の燃焼量、2100年までのこれらの変化量を見積もった。MODISデータ解析の結果、2000年から2013年の植物から土壌への有機物の移動量は、ツンドラ、北方森林それぞれについて、94～95%の土地では変化が認められなかった。5～6%の土地では増加または減少していたが、ツンドラ、北方森林それぞれについて、面積、変化率ともに、増加しているところの方が減少しているところより大きかった。2100年までのリター増に伴う土壌有機物の増加は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、 $2\text{kgC/m}^2$ 、 $0.5\text{kgC/m}^2$ と見積もられた。

#### (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>

世界の北方森林、ツンドラの面積は、それぞれ1249万km<sup>2</sup>、890万km<sup>2</sup>である<sup>11)</sup>。RCP2.6（低位安定化シナリオ）の場合、2100年までの土壌有機物分解量は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、5kgC/m<sup>2</sup>、2kgC/m<sup>2</sup>であった。リター増に伴う土壌有機物の増加は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、2kgC/m<sup>2</sup>、0.5kgC/m<sup>2</sup>であった。これらに植生現存量の増加量を考慮すると、2100年までの二酸化炭素放出量は、北方森林、ツンドラでそれぞれ、31GtC、9GtCであると見積もられる。RCP2.6（低位安定化シナリオ）の場合、2100年までにツンドラで1kgC/m<sup>2</sup>、北方森林で2.5kgC/m<sup>2</sup>の二酸化炭素の放出が予測される。北極域全体でこの放出が起こるとすると、これまでに人為起源で放出された二酸化炭素の10%になる。原野・森林火災の増加の評価によってはもっと大きくなる。北極域の土や植物は温暖化を加速すると言える。これまでの全球気候モデルでは、この温暖化の加速は過小評価されている。環境政策において、一層の温暖化緩和のための技術開発が必要であることを示した。

## 6. 国際共同研究等の状況

米国アラスカ大学国際北極圏研究センターのLarry D. Hinzman所長、Kenji Yoshikawa教授、Go Iwahana研究員との共同研究として、野外観測を行った。アラスカ大学国際北極圏研究センターは、北極域の環境変化の野外観測研究に大きな蓄積がある。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) K. KUSHIDA, S. HOBARA, S. TSUYUZAKI, Y. KIM, M. WATANABE, Y. SETIAWAN, K. HARADA, G. R. SHAVER, M. FUKUDA: International Journal of Remote Sensing, 36(17), 4344-4362 (2015), Spectral indices for remote sensing of phytomass, deciduous shrubs, and productivity in Alaskan Arctic tundra.

#### <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) 串田圭司、内田昌男、戸田求 (2013)  
「温暖化予測に関わる北極域土壌圏の炭素収支の時空間変動。」 第4回 極域科学シンポジウム. 2013年11月, 立川
- 2) 串田圭司・Yudi Setiawan (2014)  
「北極域土壌圏炭素収支の時空間解析のための植生リモートセンシング。」 農業農村工学会大会講演会, 新潟市, 2014年8月
- 3) 串田圭司 (2015)  
「アラスカ黒トウヒ林の地表面燃焼面積率のリモートセンシング」 農業農村工学会大会講演会 (岡山, 2015年9月1日)

- 4) Setiawan, Y., Kushida, K.: Trilateral Scientific Meeting Indonesia-Thailand-France, Theme: Climate Change, Big Data Management and Health (2015)  
“Temporal vegetation dynamics and global climate change: Characterizing temporal vegetation dynamics of Alaskan Tundra ecosystem” (Bogor, Indonesia, 27-31 October 2015)

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「地球温暖化と環境変化」（主催：日本大学生物資源科学部、環境省環境研究総合推進費、2016年1月12日、神奈川県藤沢市日本大学生物資源科学部大講堂、観客145名）にて講演

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) テレビ朝日系列 報道ステーション、2014年7月25日、北海道にシベリアから森林火災の煙が到達してPM2.5が大きくなったニュースで、シベリアの森林火災の季節である夏に大陸からの風が吹くことは通常は珍しいこと、温暖化とそれに伴う極端に乾燥した日の増加が森林火災の頻度を高くしていることを話した。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

末尾にサブグループ（1）、（2）、（3）それぞれの引用文献をまとめて掲載した。

## (2) 凍土土壌中有機炭素の蓄積・分解の実態解明と変動量の把握

国立研究開発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 内田 昌男

平成25～27年度累計予算額：69,223千円（うち平成27年度：21,962千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

土壌呼吸速度、メタン放出速度、環境因子（地温・水分量）の測定を行った。また、夏期融解層および永久凍土の深度別に、土壌サンプリングを行った。凍土サンプリングは、主に冬期に実施する。土壌有機炭素の分解基質を特定し、それぞれの基質について、炭素14年代測定を実施し、有機炭素の平均滞留時間、分解率を実測した。また活動層土壌・永久凍土の室内培養実験を行い、有機炭素分解における温度依存性について知見を得た。サイト毎に土壌有機炭素の平均滞留時間、化石炭素の分解率を求めた。火災や灌木の増加によって土壌炭素蓄積・分解プロセスに生じる影響を評価した。土壌分解の温度・水分・化学組成への応答性に関する新しいパラメタリゼーションを提案し、陸域モデルへ導入した。

### [キーワード]

永久凍土、土壌有機物、放射性炭素、安定同位体、土壌呼吸

### 1. はじめに

生態系土壌有機物分解モデル開発のための基礎データとなる、凍土中有機炭素の実態把握とその変動要因に関する知見を得ることを念頭に、調査地を選定し、野外調査および各種分析を実施した。永久凍土地域では、永久凍土の融解が起こると、土壌有機物の分解は急激に進むと懸念される。これは、地温の上昇によ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、温暖化を加速させる正のフィードバックとなる。このような正のフィードバックの引き金が引かれると、炭素蓄積量が甚大なだけにその影響はきわめて深刻なものになる可能性がある。

### 2. 研究開発目的

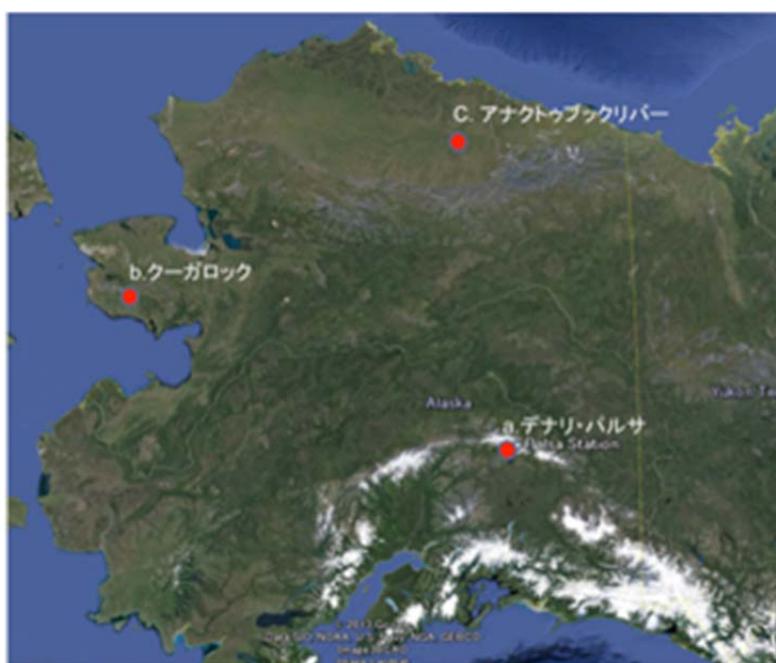
サブグループ2では、リモートセンシングによる土壌有機物分解の観点からの広域生態系区分を行う。サブグループ1、サブグループ3の成果を合わせて、北極圏の土壌有機炭素分解の時空間変動をモデル化する。サブグループ2の研究開発目的は、以下の3点である。(1) 土壌呼吸速度、メタン放出速度、環境因子（地温・水分量）の測定を行う。また、夏期融解層および永久凍土の深度別に、土壌サンプリングを行った。凍土サンプリングは、主に冬期に実施する。土壌有機炭素の分解基質を特定し、それぞれの基質について、炭素14年代測定を実施する。(2) 永久凍土における土壌有機炭素の蓄積量の時間変化に関する中長期的な知見を得るため、アラスカを中心に北極域での観測、調査活動を継続する。調査区では、永久凍土のボーリングを行い、土

壤有機炭素の $^{14}\text{C}$ 測定を行い、有機炭素の平均滞留時間、分解率を実測する。また活動層土壌・永久凍土の室内培養実験を行い、有機炭素分解における温度依存性について知見を得る。(3) サイト毎に土壌有機炭素の平均滞留時間、化石炭素の分解率を求める。火災や灌木の増加によって土壌炭素蓄積・分解プロセスに生じる影響を評価する。土壌分解の温度・水分・化学組成への応答性に関する新しいパラメタリゼーションを提案し、陸域モデルへの導入を図る。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 調査地

本研究では、凍土土壌炭素動態モデル開発のための基礎データとなる凍土中有機炭素の実態把握とその変動要因に関する知見を得るため、アラスカ地域に代表的な調査区を設け、凍土土壌コアの採取、土壌有機炭素の放射性炭素測定、安定同位体比分析、土壌呼吸速度の計測、凍土土壌中温室効果気体の計測、 $Q_{10}$ を試算するための凍土土壌を用いた温暖化実験、微気象観測等を行った。主な調査は、アラスカ・ノーススロープのツンドラ(アナクトゥブックリバー、火災跡地等)、スワード半島、クーガロック、デナリパルサにおいて実施した。本調査で実施した調査内容及び分析方法については、以下の通り。括弧内は、調査地を表す。図(2)-1 に調査地を示す。



図(2)-1 アラスカにおける調査地。赤丸が調査を行った場所を示す。

近年、極域ツンドラ地域では、乾燥化の影響による植生の変化、特に灌木の増加が指摘されている。植生の変化を伴う長期的な乾燥化の影響を調査するための精査サイトを、アラスカ山脈のツンドラ生態系のパルサに設定した(図(2)-1 a)。パルサとは、連続および不連続永久凍土地帯の泥炭湿原に分布する多年凍結丘であり、北極地域の代表的な構造地形の一つである。この場所は、地中が凍結する際に形成される層脈状の析出氷晶による凍上現象が主要因となって隆起したと考

えられる。この場所では、湿原が隆起することにより、土壌の排水性が良くなり、地温が上昇し、疑似的な温暖化環境下に曝され続けてきたと考えられる。このため、人工的な温暖化実験では検証できない、数十年から数百年スケールの長期的な温暖化影響を評価しうる知見が得られる可能性がある。ここでは、パルサ周囲の湿原に対象区を設定し、通年を通じた環境要因のデータ取得し、データ回収を行った。パルサ頂上部で実施したボーリングによる6.5mの掘削孔に、末端を閉じた塩ビパイプを挿入し、サーミスタ温計で深さ6.5mまでの地温を計測している。さらに、対象パルサには自動気象測定システムを構築し、気温、地温、土壌水分、地中熱流量、電気伝導度を連続的に測定した。

加えて、北極高緯度域に特徴的な現象である自然火災による永久凍土の融解が土壌の炭素循環に及ぼす影響を評価するため、アラスカ・ノーススロープ、およびクーガロック・スワード半島のツンドラに調査地を設けた。クーガロックエリアはアラスカ・スワード半島中央部、ノーム市から約140km北に位置する（図(2)-1b）。沿岸性のツンドラであり連続的あるいは不連続的な永久凍土が分布している。この地域では、2002年に原野火災が起こっており、調査対象地には原野火災の進行が車道によって食い止められ、連続した斜面上で火災跡地（BSサイト）と非火災地（USサイト）が隣接する場所を選定している（図2-2）。また、2007年夏、観測史上最大の原野火災が発生したアラスカ・ノーススロープのアナクトゥブック川沿いのツンドラにも調査区を設定した（図(2)-1c）。

さらに、フェアバンクス近郊の北方林においても調査を実施した。この場所では、植生や林床の有機物層を取り除くことで土壌を疑似的に温暖化させ、永久凍土融解の進行を約70年間にわたり観測してきた場所である。

## （2）現地観測項目

### 1）凍土土壌有機炭素の年代測定（デナリパルサ、クーガロック、アナクトゥブックリバー、ダルトンツンドラ、ダルトン北方林）

凍土コアの土壌有機炭素の放射性炭素年代測定を及び有機炭素量の計測を行った。得られた年代データ並びに炭素量のデータを用いて、滞留時間等の推定を行った。深さに対する有機物の生成年代及び累積炭素蓄積量プロットし、それらの指数回帰曲線（ $C(t) = (I/k) * (1 - \exp(-kt))$ ； $I=1$ 年当たりの炭素供給量、 $C$ ：炭素蓄積量、 $1/k$ ：平均滞留時間）に近似することにより求めた。得られた指数回帰曲線の係数から、平均滞留時間、炭素供給量を推定できるか検討を行った。さらに過去の自然火災による炭素焼失量の推定を行うため、火災地、未火災地の表層土壌コアを数mmレベルでサンプリングし、それらの有機炭素の放射性炭素含有量と1950年以降の大気中 $^{14}\text{CO}_2$ 量の経年変化とを対比させることによって、自然火災による焼失炭素量の算出を行えるかどうか検討を行った。これらの採取した試料は、日本に持ち帰った後、土壌試料は、仮比重、炭素・窒素含有率、同位体分析を行なった。持ち帰った試料は、実験室にて同位体分析のための各種前処理を施した。土壌コア試料は、土壌炭素蓄積速度、滞留時間、分解率を求めるため、表層では2～10mm毎、深層では1～2cm毎にスライスし、根などの植物体を取り除き、炭酸塩などの無機炭素を酸により除去した後、乾燥・粉碎した。粉碎後の試料は、グラファイト化の前段として二酸化炭素にする必要があるため、本研究で新たに製作した元素分設計と真空ラインからなるグラファイト生成装置を用いて処理を行った。作成されたグラファイト試料は、国立環境研究所等の加速器質量計（AMS）

を用いて、放射性炭素分析を実施した。今年度は、デナリパルサ、クーガロック、アナクトゥブック、ダルトンツンドラ、ダルトン北方林において採取された試料について、予備的分析を実施した。

## 2) 融解深測定・精密地形測量（クーガロック、アナクトゥブックリバー、デナリパルサ）

高精度ディファレンシャルGPS (GNSS RTK GPS, Leica)によって、選定エリアの地表面起伏を鉛直精度10-20mmで測定した。

## 3) 土壌サンプリングおよび含氷水分析の同位体分析、凍土の基礎データ（含氷率、含水率等）の分析（デナリパルサ、クーガロック、アナクトゥブックリバー、ダルトンツンドラ、ダルトン北方林）

エンジンオーガー(Tanaka TIA-350S)を用いて、凍結土を含む地表層土壌の試料を採取した。試料は縦（鉛直）方向に半分に切断し、有機物分析と体積含氷率や抽出水の電気伝導、安定同位体比などの物理化学分析をそれぞれ実施した。凍土試料中の水は、実験室で蒸発の影響を受けないように試料を融解させて上澄み水を採取した。上澄み水が得られない場合は、遠心分離器によって土中水を抽出し、酸素安定同位体比測定を行った。

デナリパルサでは、現地観測によって対象地の気象および地中の微気象要素を把握し、パルサの上下（湿地と乾燥した湿地）、およびタソックの上下における地中を含む微気象の違いを把握する。6.5mのボーリングコアの分析と地温測定、露頭の観察から対象パルサの発達史と内部構造を推定する。パルサは比高約6mで高層湿原に取り囲まれている（図(2)-2）。周辺には同様のパルサやピートプラトーがいくつも存在していると考えられる。このパルサ湿原は、数百m離れたところを流れるマクラレン川の支流の一部と考えられるが、水の流れは目視では確認できない。パルサ上部は、ヒメカンバなどの低灌木、地衣類、コケ類に覆われ、比高0.3-0.5mのタソックが分布する。10月から翌5月中旬は積雪期で、積雪は0.5m前後である（図(2)-3）。



図(2)-2 対象パルサ北側からの空撮

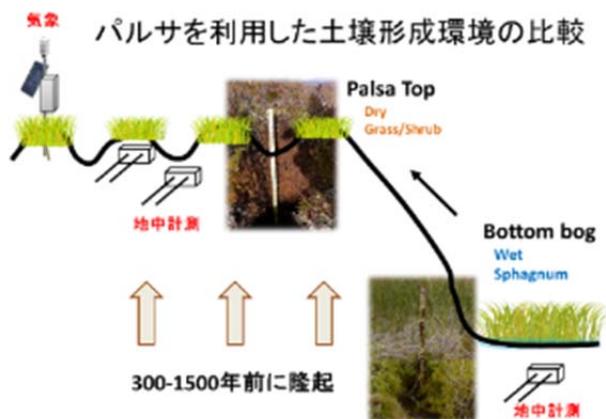


図(2)-3 (左) 残雪期, 5月上旬, (中) 無積雪期, 9月, (右) パルサ上部, 8月

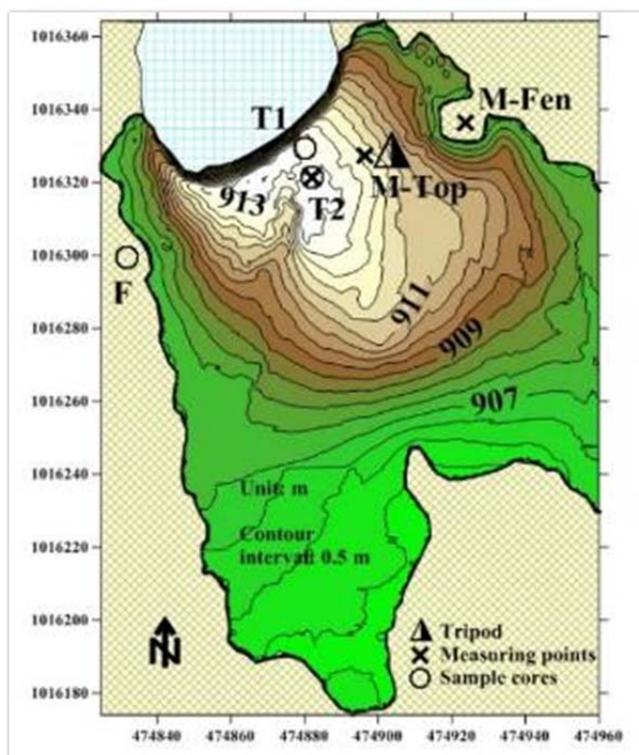
ボーリングコアは、エンジンオーガーを用いて2012年9月にパルサ頂上部で採取した。掘削孔には末端を閉じた塩ビパイプを挿入し、サーミスタ温計で深さ6.5mまでの地温を計測・記録した。サンプルコアは密封し、凍結したまま実験室に持ち帰った後、層相の変化に合わせて1–14cm毎に分割し、融解させた。それぞれのサンプル中の水は、過飽和のものは上澄み水を、不飽和であれば必要に応じて遠心分離機を用いて、蒸発の影響がないように回収した。抽出した水サンプルの酸素および水素の安定同位体比は、アラスカ大学においてそれぞれ0.5および3.0‰以下の精度で測定した。また、水サンプルの電気伝導度を測定した (B-173 ; Horiba)。各凍土サンプルについては、その体積を計測し、炉乾法によって乾燥密度と体積含水率を求めた。試料の<sup>14</sup>C年代測定は、国立環境研究所のタンデム加速器分析施設 (NIES-TERRA) において実施した。

対象パルサの中腹に自動測定システムを構築し、気象および地中の観測をパルサ上部タソック (M-TOP-U) およびタソック間 (M-TOP-D)、さらにパルサ周辺の湿地 (M-FEN) において実施した (図(2)-4)。気温および地表面温度は、サーミスタプローブ (109 ; Campbell Scientific Inc.)、地中の体積土壌含水率・温度・電気伝導度は、CS615プローブ (Campbell Scientific Inc.)、地中熱流量は、熱流板 (HukseFlux)、雨量は、転倒桁雨量計 (Young) を用いて自動計測記録器 (CR1000 ; Campbell Scientific Inc.) によって30分間隔で計測・記録した。気温用の109プローブは、自然通風管シェルターの中に設置し、地表面温度はM-TOP-UとM-FEN地点の0.01m深に109プローブを埋設して測定した。CS615プローブは、M-TOP-U地点で0.01-0.07m、0.10-0.30m深の平均が得られるように設置した。M-FENおよびM-TOP-D地点とM-TOP-U地点の深部には、M-TOP-D地表面を基準とした深度0.02および0.06mにCS615プローブを設置した。熱流板は、3地点の0.08m深およびM-TOP-U地点の深部のM-TOP-D地表面を基準とした深度0.08mに設置した (図5)。掘削孔 (T2) には末端を閉じた塩ビパイプを挿入し、サーミスタ温計 (TMC-HD ; Onset) で深さ6.5mまでの地温を12深度 (0.01, 0.3, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 6.5m深) において1時間毎にロガー (HOBO U12-008 ; Onset) で計測・記録した。

高精度GPS測量によって、パルサの形状を精密に計測した。GPS測量は、水平・鉛直方向ともに10cm以下の精度で計測し、計測点同士の間隔が0.5m以下になるまでパルサ全域にわたって計測した。得られた測定点は、等高線作成ソフト (Surfer 9.0 ; Golden Software) を用いて内挿し、地形図を作成した (図(2)-5)。



図(2)-4 対象パルサ上部および周辺湿原の地中観測概念図。



図(2)-5 対象パルサの地形図と試料採取地点および微気象観測地点。等高線の間隔は0.5m. 位置座標の単位はm.

#### 4) 土壌呼吸速度測定 (デナリパルサ)

パルサ上部20カ所で土壌呼吸速度の計測を行った。

#### 5) 凍土土壤中温室効果気体の計測及び凍土土壌の温暖化実験 (ダルトンツンドラ、ダルトン北方林)

ダルトンツンドラ、ダルトン北方林にて、凍土土壤中温室効果気体の計測及び凍土土壤の温暖化実験を行った。

## 6) 高解像可視衛星画像とALOS/PALSARのデータを用いたInSAR解析

原野火災後のサーモカルスト進行下での凍土炭素実態把握のための現場調査（アナクトゥブツクリバー）を行った。

### (3) 土壌試料採取方法

上記の観測サイトにおいて、各種化学・物理分析および土壌呼吸速度測定用の土壌試料採取を2014年5月および9月、2015年3月の3回実施した。2014年5月のノーススロープとアラスカ山脈にあるパルササイト、および2015年3月のフェアバンクス近郊の北方林で実施したサンプリングでは、小型エンジン付きの永久凍土採取用コアラー（Tanaka TIA-350S, 直径5~10cm）を用いた。採取した試料は、形状を崩さないように細心の注意を払い、真空パックし、凍結したまま実験室に持ち帰り、各種化学・物理分析および土壌培養実験を実施した。

### (4) 土壌試料の分析方法

土壌コア試料は、凍結したままで縦（鉛直）方向に半分に切断し、同位体比などの物理・化学分析を実施した。半割した土壌コア試料は、表層では2~10mm毎、深層では1~2cm毎にスライスし、根などの植物体を取り除き、無機炭素を酸により除去し、炭素・窒素含有率、および放射性炭素（ $^{14}\text{C}$ ）分析を行った。 $^{14}\text{C}$ 分析については、分析に必要な前処理（グラファイト化）を、国立環境研究所の元素分設計と真空ラインからなるグラファイト生成装置を用いて処理を行った。作成されたグラファイト試料は、国立環境研究所の加速器質量分析計（AMS）等で、 $^{14}\text{C}$ 測定を実施した。

### (5) 土壌培養実験を用いた微生物による有機炭素分解（微生物呼吸）の測定

本研究では、室内で土壌培養実験を実施し、凍土からの $\text{CO}_2$ 放出速度の測定を行った。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である。低温域における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、Q10値（温度が $10^\circ\text{C}$ 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。このQ10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ことが多いが、北極域に関しては、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、 $10^\circ\text{C}$ 以上の地温変化の下での観測は難しく、Q10値の算出が困難な状態ある。そこで、採取した土壌コア試料を用いて、培養によるQ10値の算出に関する凍土の培養実験を行った。実験に用いた試料は、北米のアラスカおよびカナダを代表する植生タイプから、ツンドラでは3地点、北方林では1地点、湿原では1地点で採取した土壌（活動層および永久凍土）を用いた（表(2)-1）。試料は、冬期に採取したコア試料を融解させることなく、日本に持ち帰り実験まで $-20^\circ\text{C}$ で保管していたものを用いた。培養条件は、以下のように行った。土壌が凍結した場合の土壌呼吸量の変化をより詳細に調べるため、 $-20^\circ\text{C} \rightarrow -15^\circ\text{C} \rightarrow -10^\circ\text{C} \rightarrow -5^\circ\text{C} \rightarrow -3^\circ\text{C} \rightarrow -1^\circ\text{C} \rightarrow -3^\circ\text{C} \rightarrow -5^\circ\text{C} \rightarrow -10^\circ\text{C} \rightarrow -15^\circ\text{C} \rightarrow$

-20℃で温度制御し、培養を行った。加えて、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、以下のプラス温度帯での上げ下げを行った。この場合は、+1℃ → +3℃ → +5℃ → +10℃ → +15℃ → +10℃ → +5℃ → +3℃ → +1℃で温度制御し、培養を行った。今回の実験では、温度制御は12時間毎に実施した。

表(2)-1 培養実験に使用した土壌試料に関する基礎情報

植生タイプ	採取深度 (cm)		炭素含有率 (%)	<sup>14</sup> C年代 ys BP
Palsa (PA)	0-34	活動層	21-42	Modern ~ 3780±40
	85-110	永久凍土	47	7510±40
Boreal forest (BF)	21-28	活動層	44	Modern
	65~	永久凍土	2	4500±40
Upland tundra1 (UT1)	31-45	活動層	7	4326±26
	59-82	永久凍土	12	7800±45
Upland tundra2 (UT2)	20-30	活動層	4	> 9830
	52-62	永久凍土	3	12620±90
Coastal tundra (CT2)	24-34	活動層	13	1870±30
	52-64	永久凍土	9	2830±30

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。4つのチャンバーを温度制御可能 (-20℃~80℃) 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<sub>2</sub>をソーダライムで除去後、それぞれのチャンバーには、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。チャンバーに供給する空気としては、乾燥空気（露点-40℃程度）を導入した。そして、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CO<sub>2</sub>ガスの発生量を求めた。チャンバーは、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。チャンバー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る。土壌サンプルはシャーレ上に載せ、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。CO<sub>2</sub>の測定は LI-COR社（米国）のLI-820を用いた。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 現地観測結果

主な調査地であるクーガロック、アナクトゥブックリバー、デナリパルサにおける結果をまとめた。

##### 1) クーガロック・スワード半島

クーガロックエリアはアラスカ・スワード半島中央部、ノーム市から約140km北に位置する。沿岸性のツンドラであり連続的あるいは不連続的な永久凍土が分布している。2002年に最近の原野火災が起これ、調査対象地には原野火災の進行が車道によって食い止められ、連続した斜面上で火災跡地（BSサイト）と非火災地（USサイト）が隣接していた。これらの対照区において、調査を行った。その結果、火災跡地では、永久凍土の融解が原因と考えられるサーモカルストが進行しており、高分解能の可視衛星画像からは、網目状の地形が確認された。現地の高精度GPS測量に

よってもこの網目状地形が実際に凹凸を持つ地形であることが確認され、原野火災による地表面の攪乱が引き起こしたサーモカルストであると結論した。また、BSサイトにおいては火災後に活動層の深化が起こり、それまでの永久凍土上層部が一部融解したために地中水が比較的新しい天水に置き換わった可能性がある。現在は深化した活動層厚は火災前のレベルへ戻りつつある。こうした凍土中の水の入替わりは永久凍土攪乱の履歴として水の安定同位体プロファイルの違いとして捉えることができた。

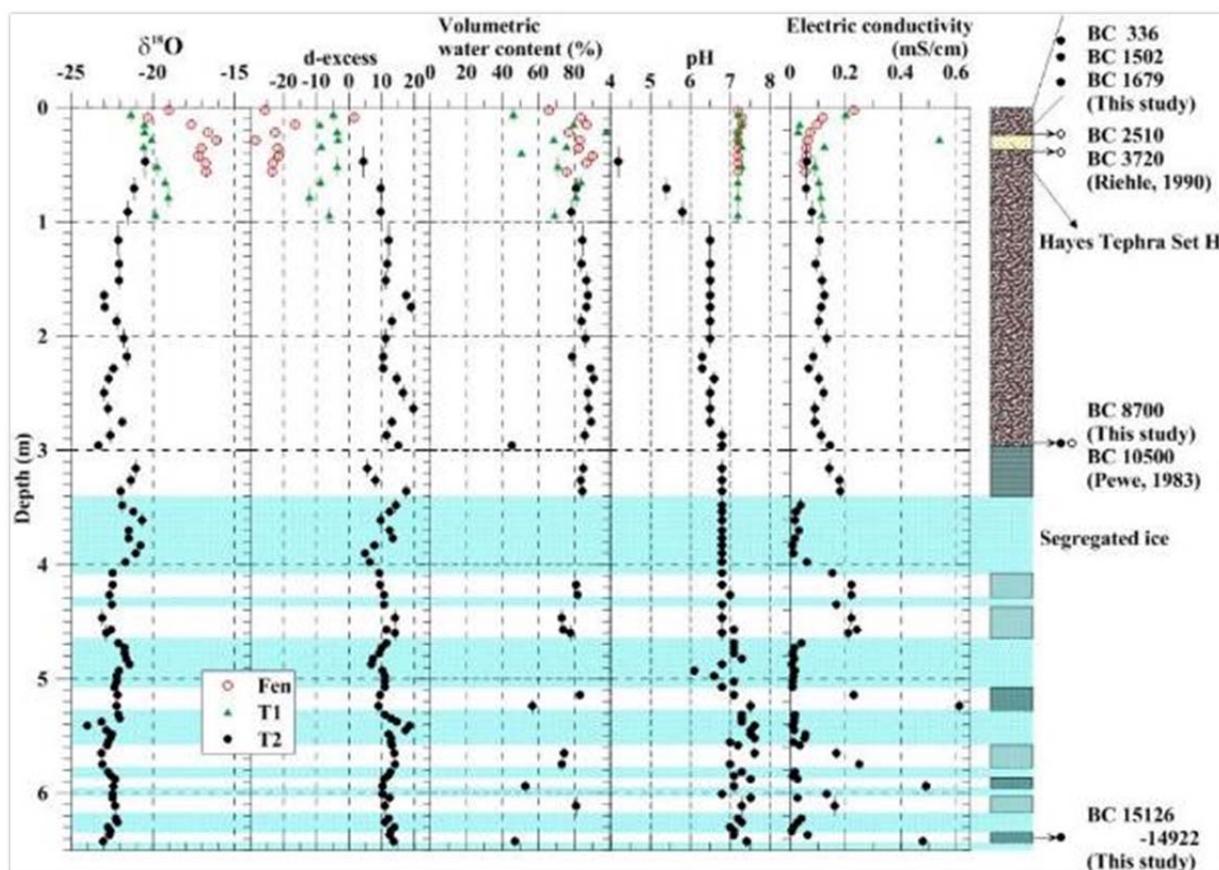
## 2) デナリパルサ・アラスカ中央部

パルサは、連続および不連続永久凍土地帯の泥炭湿原に分布する多年凍結丘であり、北極地域の代表的な構造地形の一つである。地中が凍結する際に形成される層脈状の析出氷晶による凍上現象が隆起の主要因となっていることが推定され、典型的な構造土であることが確認された。パルサ上部にて、約6mのボーリングを行い、層凍土の地球雪氷学的観点からパルサの内部構造について観察を行った結果、上層部3mはピートからなり、下層2mは鈹物土を含む層、さらにその下部は、マッシュピュアアイス3層構造からなっていることが確認された。さらに凍土の地温計測を行うため、ボーリング掘削孔には、末端を閉じた塩ビパイプを挿入し、サーミスタ温度計で深さ6.5mまでの地温計測を開始した。またパルサ上部には、自動気象測定システムを構築し、気温、地温、土壌水分の計測を開始した。高精度GPS測量によって、パルサの形状を精密に計測し、三次元マップの作成を行った。採取したコアの予備解析からは、氷層中の気泡の分布や鈹物土粒子の混入状況から被圧条件下で水の貫入があったことがわかった。一方、氷の安定同位体比プロファイルからは、パルサを形成した水文環境が概ね開式であったことが確認された。さらに予察的な年代測定の結果からは、BC8700年前後にパルサ上部のピートが形成された湿原の形成がはじまり、その後、徐々に水位を低下させながら（あるいは排水環境の悪化）、BC2500年以降にパルサの成長がはじまって現在に至ったことがわかった。図(2)-6に対象パルサ頂上部および周辺湿原で採取された凍土コア分析結果および年代測定結果のまとめを示す。

パルサ上から2.98m深までピート層が続き、以深は氷とシルト・粘土層の互層となっていた。氷層はほとんど不純物を含まず、その厚さは10cmから70cmにも達した。シルト・粘土層には数ミリから数センチの非平行アイスレンズや網目状氷脈がみられた。さらに、ピート層の水の電気伝導度が0.1 mS/cm前後であるのに対し、氷層とシルト・粘土層の値がそれぞれ0.05 mS/cmおよび0.2 mS/cmであることは、3m以深の凍結層が、ゆっくりとした凍結前線の移動に伴って氷晶分離が起こった結果であることを強く示唆している。以上の結果は、本凍結丘がパルサであることを支持しているが、氷層中の気泡の分布や鈹物土粒子の混入状況から被圧条件下で水の貫入があったことが伺われる。 $\delta^{18}\text{O}$ プロファイルに系統的な変化がみられないこと、d-excess値がco-isotope図（図(2)-7）においてほぼ天水線に乗っていることから、開放式パルサ（つまり、凍土を形成する水の供給が豊富であった）であることがわかる。T1地点の凍土コアの水安定同位体比は、図(2)-7において天水から右側へずれており、d-excess値も-10‰前後となっており、降水後に地表層に滞留して蒸発の影響を受けたと考えられる。T1とT2の地点で地表層1mの水安定同位体比の値が顕著に違うことから、タソック間の凹部の地表層は、タソック部分よりも深くまで季節融解し、年々の凍結融解の繰り返しの中、蒸発による同位体分別の影響を受けてきたと考えられる。周辺湿原F地点の凍土コア中の水安定同位体比は、天水線から大きく外れている（図(2)-7）。これも湿原の水が長

期間滞留して蒸発の影響を大きく受けていることを示し、パルサ周辺の湿原水の入れ替わり（水の流れ）が小さいことを意味する。 $\delta^{18}\text{O}$ が約-17‰でT1やT2における値よりも数‰高いことから、酸素同位体比の高い夏期の降水を多く含んだ水から構成されていることを示す。

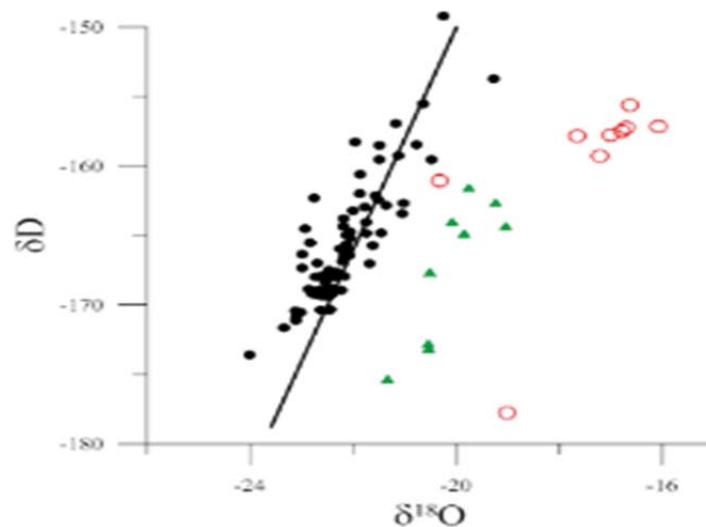
パルサ上の約30cm深には、テフラ層が数センチの厚みで堆積しており、約3750 yr B.P.のテフラ（Hayes Tephra Set H）と同定されている（Riehle, 1990）。また、Riehle (1990)によってこのテフラの直上・直下3cm厚のピート年代がそれぞれ2510±75 yr B.P.、3720±80 yr B.P.と報告されている。今回測定したピート層底面（2.93-2.94 m）のピート年代は8730- 8612 yr B.P. であり、5.96-5.99 m深のSOCの見かけ年代が 15126-14922 yr B.P.であった。また、ピート層の体積含水率は80-90%の値を取り、深くなるに従い含水率は増加し、乾燥密度は減少する傾向を示した。これらの情報を統合すると、BC8700年頃に湿原の形成がはじまり、徐々に水位を低下させながら（あるいは排水環境の悪化）ピートが堆積し、BC2500年以降にパルサの成長がはじまって現在に至ったと推測した。氷河が後退して湿原ができ始めたと考えられる年代がPeweの結果と千年以上違う点は今後議論していかなければならない。



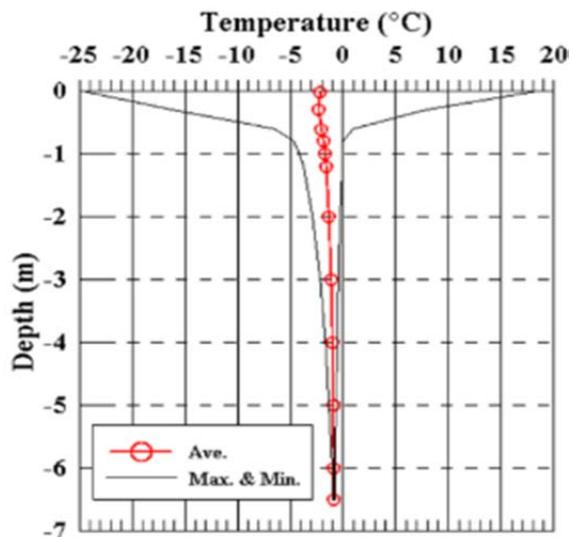
図(2)-6 対象パルサ頂上部および周辺湿原で採取された凍土コア分析結果および年代測定結果のまとめ。分析項目は図の左から凍土中の水の酸素安定同位体比、d-excess、体積水分率、pHおよび電気伝導度。図右端にT2コア柱状図および年代測定結果を示す。

図(2)-8にT2地点の6.5m地温測定孔における最高・平均・最低温度プロファイルを示す。月平均地温は、地表面において-25~18°Cの振幅で変動し、これまでの平均地温は地表層の-2.2°Cから6.5mの-0.9°Cまで一様に低下している。地温の振幅は、5m深において1°C以下となる。最深部の2深度の平均地温の外挿から、約18m深まで負の温度であることが推定される。これは、パルサの基準面からさらに12m程凍結状態にあることを示す。表層3mの泥炭層を除いて、約15mがアイスレンズを含む永久凍土の層であり、その約40%が析出氷の厚みによって持ち上げられていると考え、本研究で採取した凍土コアの3.0-6.5m深に含まれるアイスレンズ層の割合に良く一致する。

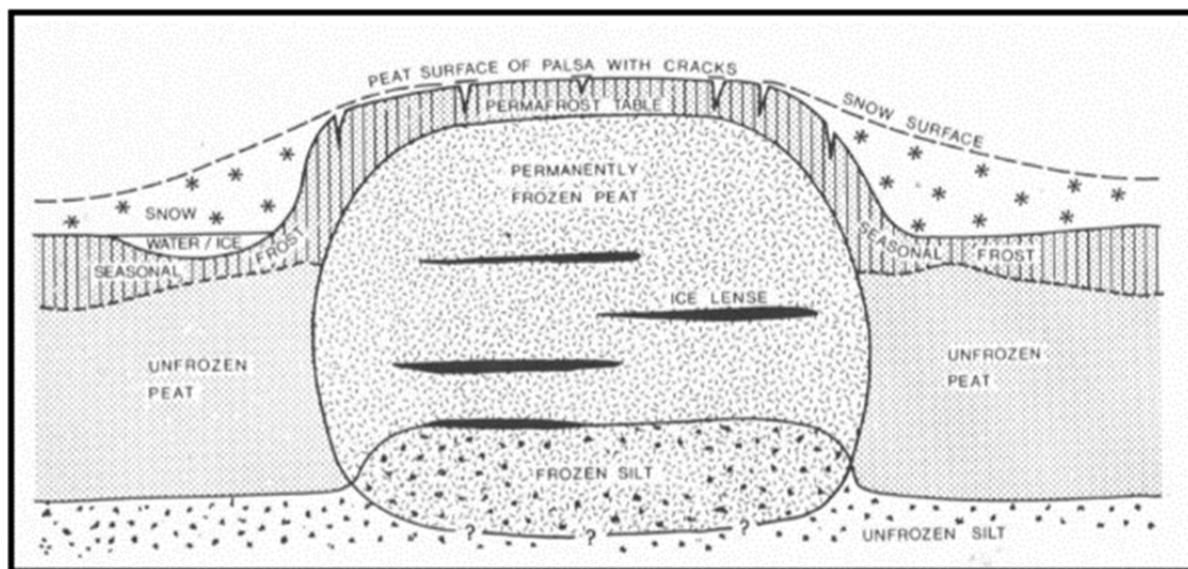
以上の結果から、本パルサの内部構造は図(2)-9に示すようにマウンドの下部にのみアイスレンズを多く含む永久凍土の核が存在し、周りは季節凍土に覆われていると推測される。ただし、我々の対象パルサでは凍結ピート層にはほとんどアイスレンズを含まず、3m以深のシルト・砂層に形成されたアイスレンズが隆起の主な原因である。



図(2)-7 凍土コアから抽出した水の水素安定同位体比と酸素安定同位体比の関係。マーカーは図(2)-6を参照。天水線（実線）からのずれの大きさによってサンプル水への蒸発の影響の大きさを示す。



図(2)-8 地温測定孔における最高 (Max.)，最低 (Min.) および平均 (Ave.) 温度プロフィール



図(2)-9 Seppala (1986)によるパルサ内部の推測図。

調査地周辺には公開されている気象データは存在しない。しかし、調査地から約2km西のマクラレーンロッジにおいて降水量が測定されており、2010-2012年の値から夏期（6-8月）の月平均降水量は約95mmである。本調査地は山岳ツンドラであり、年降水量が約100mmであるスワード半島内陸部（Kougarok）やBarrowのツンドラに比べると多雨で湿潤な環境であると言える。

パルサ中腹部のM-Top（図(2)-5）で2012年10月から2014年9月まで観測された気象と地中環境の変化を図(2)-10、図(2)-11に示す。気温は夏期には20℃近くまで上昇し、冬期の最低気温は-40℃を下回る。年平均気温は-5.2℃、またM-TopおよびM-Fenにおける地表面温度の年平均値はそれぞれ-0.4℃および1.6℃であった。このことからパルサ上では永久凍土が維持される気候条件である一方、周辺の湿原には永久凍土はなく、対象パルサは季節凍土に囲まれていることが示唆される。特に2013-2014年の冬期は積雪深が厚く、前冬に比べて気温と地表面温度の差が大きかった。M-Fenの地表面温度は冬期間を通じて0℃付近で変動しなかった。

地表層0.7m深までの地中環境を観測地点について比較する。地温の年較差は、topU > topD > bog > topU\_deepの順で大きくなる（図(2)-10）。パルサ上の地温年較差が約40℃である一方、周辺湿原では約15℃であった。夏期の平均地温は、topDとbogで大きな違いは見られず、約8℃であった。Bogの夏期地温は最も低く、約5℃であった。地中熱流量は、bogにおいて初夏に大きく（約35W/m<sup>2</sup>）、秋期にかけて徐々に低下する（図(2)-10）。U\_deepの地中熱流量は夏期を通じて大きい一方、topUとtopD地点では夏期の地中熱流量は比較的小さかった。

図(2)-11に、2013年4月から2014年9月までのa気温、地温および降水量、b土壌含水率、c電気伝導度のデータを示す。topUの土壌水分は低く、年間を通じて乾燥状態である一方、topU\_deepは、凍土面に近いため、飽和状態に近く推移した（図(2)-11）。topDも同様に飽和状態に近く推移した。topU\_deepとtopDの土壌水分を比較すると測定深までの融解がより速いtopDでより早い夏期の土壌水分の上昇がみられるが、夏期全体の値としてはtopU\_deepのほうが高く推移し、より湿潤であったことが分かる。また、topU\_deepでは地温がより低いことから、凍土面に近く、タソック内部のほうがタソック間よりも融解深が浅いことを示す。bog地点は水位の変化によって変動が激しい。この水位の変化は降雨によってもたらされた。2013年夏は特に変動が激しく、表面が乾燥する時期もあることがわかる。これらの事から、基本的にtopU以外は湿潤から飽和環境である。電気伝導度（EC）の大小関係は土壌水分に準じた。

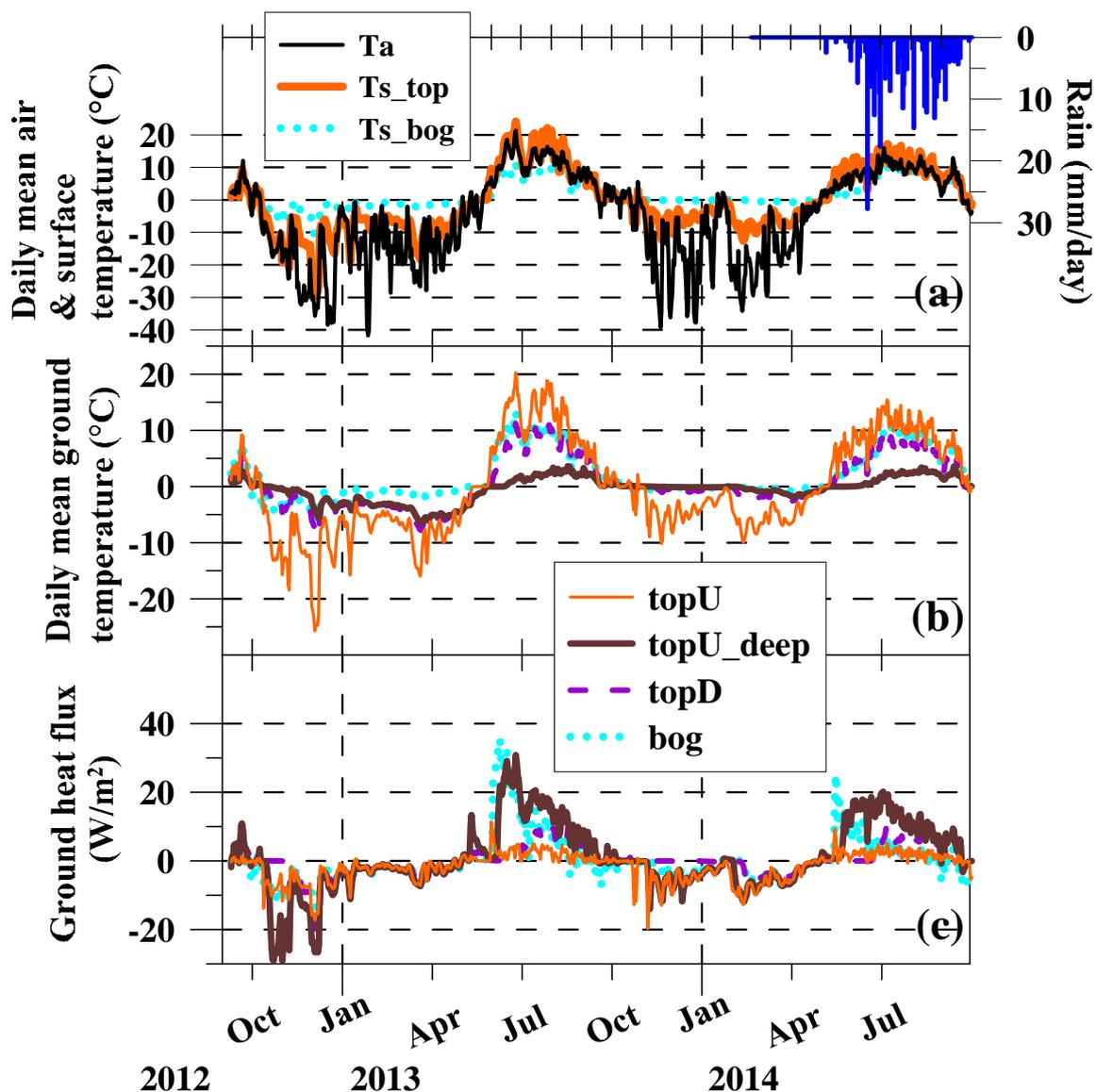
デナリサイトでは、前年度に実施した高精度GPS測量結果の解析によって、周囲の湿原よりも6mほど隆起していることが分かった。夏期の平均地温は、湿原（bog）では5℃程度であるのに対して、隆起したパルサ上部の表層（深さ5cm）の地温は湿地よりも高く、その変動は大きかった（図(2)-11 a）。また、パルサ上部は、土壌含水率は低く、特に表層付近（深さ5cm）では年間を通して10%以下で非常に乾燥した環境になっていた（図(2)-11 b）。

ボーリング調査で採取した土壌コアの分析結果から、パルサ上部で採取した土壌コアは、厚さ5cm程度のコケの層の下に深さ3mまで泥炭層が存在し、3m以深からは鈹物層となり、氷とシルト・粘土層の互層であった。泥炭層は、概ね仮比重も軽く、炭素含有率は非常に高い傾向にあった。仮比重と炭素含有率から泥炭層に蓄積する炭素蓄積量は、深さ0～1mに54.9 kg m<sup>-2</sup>、深さ1m～2mに38.4 kg m<sup>-2</sup>、深さ2m～3mに32.7kg m<sup>-2</sup>と試算された。14C年代測定から推定される土壌有機炭素の見かけの生成年代は、深さ1mでBC6400年、深さ2mでBC7570年、深さ3mでBC8670年、深さ6mでBC14940年であった。この結果から、泥炭層のなかでも、深さ1mまでに堆積する有機炭素は他の層よりも堆積速度が遅くなっていることがうかがえる。

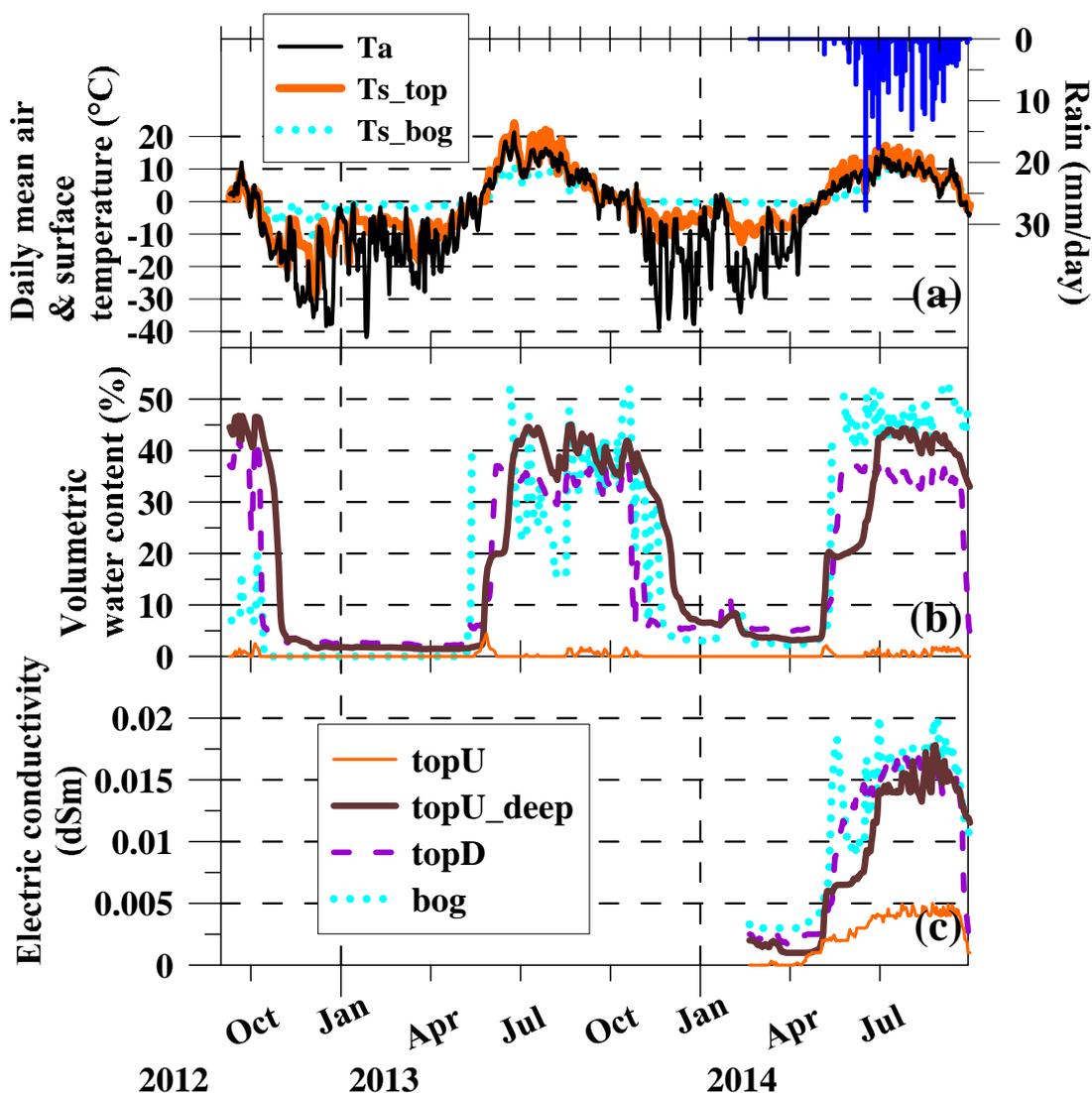
表層0-20cmについて詳細な分析を行った結果、深さ10～20cmでは、深さ方向に炭素含有率が減少する傾向があり、同時にCNも減少していた。一方、隆起前の地温や水分環境と同じであると予想されるパルサ周辺の湿地（Bog）では、パルサ上部で確認された炭素含有率の減少傾向は見られ

なかった。また、 $\Delta 14C$ は、同深度ではPalsaよりもBogのほうが高くなっており、表層20cmまでに堆積している有機炭素の生成年代は若く、見かけの堆積速度が速いことを示している。このことは、パルサ表層では土壤有機物の分解が進み、土壤化が進んでいると予想される。14C年代測定結果を利用し、見かけの堆積速度を求めた。この結果、深さ10cm~100cmまでの見かけの堆積速度は0.2~1.6 cm /100 yrで、これより深い泥炭層の堆積速度の1/6~1/50程度であった。今回の結果から、パルサおよび周辺の湿原における、気象データと土壤コアの分析データと合わせて解析を進める事で、地温や土壤水分環境の変化によって、土壤有機炭素の蓄積や分解にどのような影響を与えたのか、定量的な評価することが可能なデータを取得することが期待される。

調査対象の多年凍結丘は、準開式パルサである。対象パルサ周辺のピート層厚は1m程度で、その下部は液相の水で満たされており、地表面のフローティングピートランドを形成している。パルサの形成史からアラスカ山脈南東部の氷河後退以降の環境変化の一部を復元した。パルサのコア氷の安定同位体比の変化と今後のピート分析によって、対象湿地の水・物質循環過程の変遷史解明が期待される。凍結泥炭より下部のパルサ氷の同位体比プロファイルから得られる情報は以下のものである。全体のトレンドから数百年間の湿地水同位体比の変化（氷河後退速度との関係）が推定される。細かい変化は凍結様式（開式と閉式のサイクル）を示している。



図(2)-10 調査地における気象および地中観測項目の変化。(a)日平均気温( $T_a$ )、パルサ頂上部の日平均地表面温度 ( $Ts_{top}$ )、周辺湿原の日平均地表面温度( $Ts_{bog}$ )および日降水量(Rain)の変化；パルサ上タソック上部 ( $topU$ )、パルサ上タソック深部 ( $topU\_deep$ )、パルサ上タソック間 ( $topD$ ) および周辺湿原における地表層 (7cm深までの平均) 地温(b) および地中熱流量(c)の変化



図(2)-11 調査地における気象および地中観測項目の変化。(a)日平均気温( $T_a$ )、パルサ頂上部の日平均地表面温度( $T_{s\_top}$ )、周辺湿原の日平均地表面温度( $T_{s\_bog}$ )および日降水量(Rain)の変化；(b)パルサ上タソック上部 (topU)、パルサ上タソック深部 (topU\_deep)、パルサ上タソック間 (topD) および周辺湿原における地表層 (7cm深までの平均) 体積土壌水分の変化；(c) (b)と同測定場所における電気伝導度の変化

### 3) アナクトゥブックリバー・ノーススロープ

2007年夏、アラスカ・ノーススロープのアナクトゥブック川沿いのツンドラ域において観測史上最大の原野火災が発生した。現地での調査を行った結果、火災発生地の大部分は、エドマ層と呼ばれる高含水率・高有機物含有量の永久凍土が分布していると考えられた。この原野火災による炭素量を推定するため、土壌コアの採取を行った。また火災跡地における永久凍土融解による地盤沈下 (サーモカルスト) と火災による凍土土壌の地盤沈下の関連性を調べるため、可視衛星画像を元に現地調査区を設定した。LバンドSARセンサーデータを利用したSARインターフェロメ

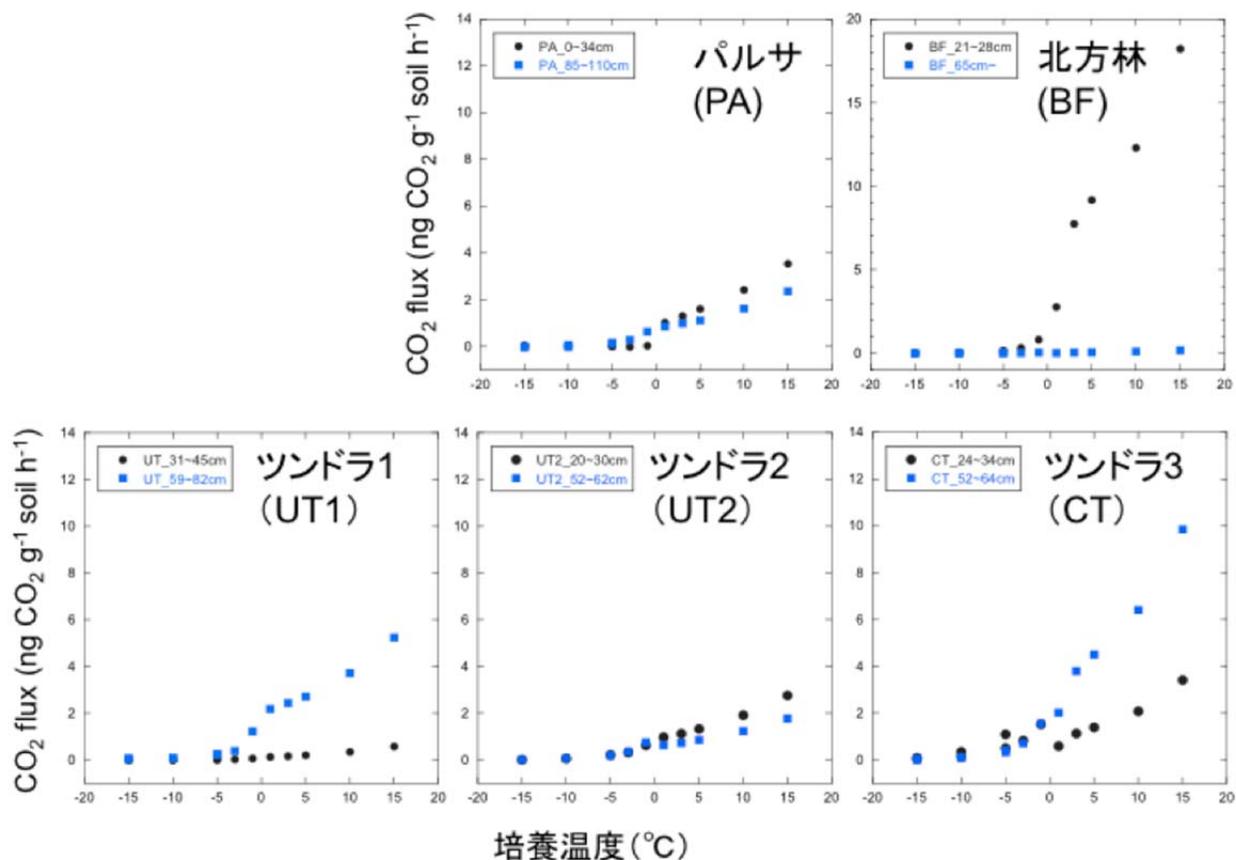
トリによってサーモカルストの強度を判定し、現地調査を実施するサイトを3プロット選定し、高精度ディファレンシャルGPS (GNSS RTK GPS, Leica)によって、選定エリアの地表面起伏を鉛直精度10-20mmで測定を行った。

その結果、対象地域の高解像可視衛星画像 (Google Earth) とALOS/PALSARのデータを用いたInSAR解析によって原野火災後のサーモカルスト進行の可能性があるエリアを選定することができた選定したエリアでは、火災後に顕著なポリゴン状の地形が可視画像で確認され、火災を免れたエリアでは変化が見られなかった。また、InSAR解析の結果においても非火災地における変化シグナルが検出されない一方、火災跡地では地盤沈下を含むなんらかの地表面変化が起こっていることを示す結果を得た。

こうした衛星画像による地表面変化のシグナルは、現地調査によって確認された。衛星画像から推定した火災境界は、現地のGPS精密測定の結果とほぼ一致し、火災跡地においてサーモカルストが進行していることを確認した。サーモカルストによる地盤沈下は地下氷の分布に影響を受けて網目状に起こるが、調査地全体の地盤沈下を火災前の地表面地形を仮定することによって推定した結果、選定エリアA, B, Cそれぞれで24, 20, 102 mm/year という空間平均沈下速度 (2007年から2013年の6年平均)。ただし、エリアCは、2007年の原野火災前からサーモカルストが進行しており、沈下速度が見かけ上ほかの2エリアよりも大きくなっていった。

## (2) 室内での土壌培養実験で得られた結果

室内での土壌培養実験で得られた結果を、図(2)-12およびに表(2)-2示す。5つの植生タイプの土壌を用いて、通気法によって-15℃～+15℃までの微生物呼吸量を測定した結果、CO<sub>2</sub>放出量は異なる



図(2)-12 温度に伴う微生物による有機炭素分解 (微生物呼吸) 活性の変化

るものの、マイナスの温度域でもCO<sub>2</sub>放出が確認された（図(2)-12）。また、パルサ、およびツンドラでは、永久凍土層からも活動層と同程度からそれ以上のCO<sub>2</sub>の放出量が認められた。これらの結果を用いて、4つの温度域（-15℃～-5℃、-10℃～0℃、0℃～+10℃、+5℃～+15℃）によって微生物呼吸の温度依存性を求めた(表(2)-2)。今回得られた結果では、10℃以下の3つの温度域では、土壤炭素動態モデルED-RAMSで使われているQ<sub>10</sub>（2.0）より高く、マイナス側はとくに高い結果が得られた。Q<sub>10</sub>値の変動を説明する明確な理由は得られていないが、微生物組成や活性の違いが関係しているかもしれない。しかしながら、現段階では明確な理由は不明であるが、多量の炭素をストックする凍土土壤において、特に現実的な温度域（-5℃～5℃）において、Q<sub>10</sub>値が高く、そ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。

表(2)-2 微生物呼吸速度の比で求めたQ<sub>10</sub>の比較

植生タイプ	採取深度	Q <sub>10</sub>			
		-15～-5℃	-10～0℃	0～+10℃	+5～+15℃
Palsa (PA)	0-34cm	0.36	2.18	2.65	2.20
	85-110cm	124.60	12.98	2.09	2.11
Boreal forest (BF)	21-28cm	21.19	61.26	5.52	1.99
	65cm	-	-	5.25	2.73
Upland tundra1 (UT1)	31-45cm	7.22	32.54	3.03	2.78
	59-82cm	2.97	22.39	1.84	1.93
Upland tundra2 (UT2)	20-30cm	23.63	13.66	2.15	2.08
	52-62cm	14.04	18.00	2.16	2.07
Coastal tundra (CT2)	24-34cm	10.56	14.18	4.16	2.45
	52-64cm	8.19	17.37	3.64	2.19

表(2)-3に、土壤培養実験に用いた凍土試料の土壤特性を示す。今回実験に用いた北方林1 (BS)の活動層は、炭素含有率が38%と高い有機物層であった。<sup>14</sup>C分析から植物に固定された年代（見かけの生成年代）は1950年以降と比較的若かった。一方、北方林1の永久凍土は、炭素含有率が非常に低く(0.1%)、生成年代は4500年程度であった。北方林1に対して、ツンドラ生態系の凍土試料は、活動層、永久凍土共に鉱物層で、生成年代はより古かった。ツンドラ2と3では、活動層より永久凍土のほうが炭素含有率は高かった。これらは、凍土の凍結融解によって、土壤表層にある炭素含有率が高い土壤が下層にもぐりこみ下層の土壤が表層に現れるクライオターベーションによる可能性が考えられる。また、ツンドラ2のみが、pHが低めの酸性土壤であった。土性区分は、北方林1よりもツンドラ1,2,3のほうが、シルトや粘土の割合が高い土壤であった。過去に湿地が隆起したパルサでは、炭素含有率が活動層で19%、永久凍土41%と、共に高い有機物層であった。しかしながら、永久凍土にある有機炭素の生成年代は7500年と古いものであった。

表(2)-4に、室内土壤培養実験で得られた、異なる温度条件下（-5℃～+15℃）でのCO<sub>2</sub>放出速度を示す。通気法を使った培養実験から、土壤の凍結融解に伴うCO<sub>2</sub>放出のダイナミックが確認出来た。特にツンドラ生態系で採取した凍土では、0℃以下の温度条件下でも、CO<sub>2</sub>の放出が確認された。最も北のcoastal tundraで採取したツンドラ3で、0℃以下の温度域でもCO<sub>2</sub>放出量が高かった。

土壌の土性違いや塩濃度によって、0°C以下であっても完全凍結せず、土壌中の水分が凍結しない場合あると言われている。CO<sub>2</sub>放出が確認された土壌では、凍結しないまま微生物の活動に利用出来る水分があった可能性がある。また、これらcoastal tundraでは、冬期の積雪深度が浅く、より土壌が低温化に曝される。ツンドラ地域地域では、より低温の環境に適応する微生物が、0°C以下でも活動し、CO<sub>2</sub>の放出が確認された可能性が考えられる。一方、内陸部に位置する北方林1では、ツンドラ地域よりも積雪深度は深く、雪による保温がより高いと予想される。

一方、0°C以上の温度域では、北方林1の活動層で最も高いCO<sub>2</sub>放出量(53~150μgC g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)が認められた。一方、北方林1では、永久凍土からのCO<sub>2</sub>放出量は低かった。同様の傾向がツンドラ1では確認されたが、ツンドラ2, 3では、活動層よりも永久凍土からのCO<sub>2</sub>放出が高い傾向が見られた。特に、ツンドラ3では、北方林1の活動層と同じ程度のCO<sub>2</sub>放出量(27~94μgC g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)が確認された。環境データの連続測定結果から、周辺の湿地と比較して温暖化および乾燥化が認められるパルササイトでは、CO<sub>2</sub>放出量は、活動層で7~26μgC g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>、永久凍土からは6~18μgC g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>であった。パルササイトでは、表層の有機物層は植物遺体の状態をとどめ、さほど土壌化が進んでいない。冬期の低温下かつ乾燥条件下で、表層有機物層は凍結乾燥に近く、現段階では微生物の活動も活発にならずCO<sub>2</sub>の放出が進んでいない可能性があるとして予測される。

培養実験で得られた結果から、各培養土壌の温度-呼吸曲線 ( $F_c=R_0 \times e^{kT_s}$ ) を求め、この結果を基に $Q_{10}$ を計算した(表(2)-5)。ここで、 $F_c$ は微生物呼吸速度、 $T_s$ は地温である。北方林1の永久凍土を除いて、 $T_s$ と $F_c$ の間には高い相関関係が認められた。プラスの温度域で得られた $Q_{10}$ は、1.919~2.633であった。ツンドラ1,2,3で、 $Q_{10}$ が活動層のほうが永久凍土より高くなる傾向が見られた。一方、マイナスの温度域では、得られた $Q_{10}$ にはプラスの温度域より高く、大きなばらつきが見られた。先行研究で報告させている密閉法を利用した培養実験の結果でも、本研究と同様にマイナス温度範囲で $Q_{10}$ が高くなる傾向が報告されている。しかしながら、計算される $Q_{10}$ は、CO<sub>2</sub>放出量が少なく、0に近いほど無限大に近づくため、ばらつきにはCO<sub>2</sub>の検出限界も関係する。このため、今回マイナス域で得られた $Q_{10}$ の解釈には、注意が必要である。

北方林1およびツンドラ3について、温暖化した場合どの程度CO<sub>2</sub>放出量が増加するか、現地取得させた地温データおよび今回得られた温度-呼吸曲線を元に、年間のCO<sub>2</sub>放出量を計算した。地温データは、先行研究で2008年~2009年に取得された結果(榎本ら未発表データ)を用いた。北方林1では、年平均気温は-4.8±18.2°C、地温(深さ10cmの年平均は0.7±5.2°Cであった。一方、ツンドラ3では、年平均気温は-8.0±13.8°C、地温(深さ10cmの年平均は-3.5±7.7°Cであった。今回温暖化の程度は+3°Cとして計算させた。これは、1980年代初頭から2000年代中頃に永久凍土の温度が、北アラスカの一部で最大で3°C上昇したという報告に基づいて計算させた(図(2)-13)。この結果、地温が3°C上昇した場合、CO<sub>2</sub>放出量は北方林1の活動層で1.6倍、ツンドラ3では、活動層で1.4倍、永久凍土で1.8倍となると計算された。今回の結果から、将来起こりうる温暖化に対して、ツンドラ生態系の永久凍土層では活動層よりも増加の割合が高いと予測され、温暖化に対する脆弱性が高いため、今後もさらなるデータの取得が必要である。

表(2)-3 土壌培養実験に用いた各試料の土壌特性

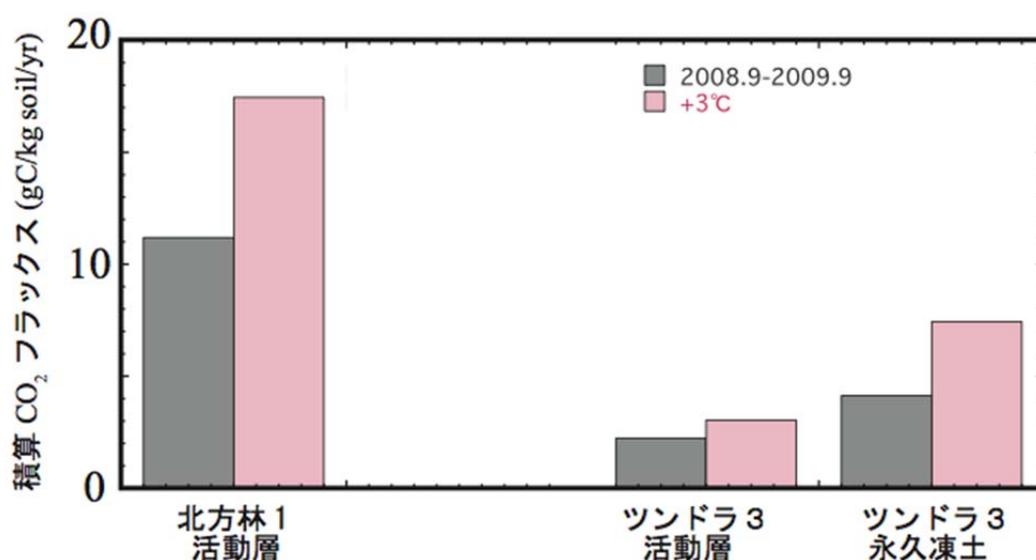
植生		深度	含水率	%N	%C	CN	pH
		cm	%				
北方林 (BS)	活動層	21-28	231	1.5	38.6	25.9	
	永久凍土	65	14	0.1	0.8	13.8	6.3
パルサ	活動層	0-34	179	1.2	19.0	15.2	
	永久凍土	85-110	442	1.4	41.0	28.3	
ツンドラ1 (UT1)	活動層	20-30	17	0.1	5.1	39.3	7.9
	永久凍土	52-62	22	0.1	3.9	31.1	8.1
ツンドラ2 (UT2)	活動層	31-45	28	0.3	7.1	27.4	4.9
	永久凍土	59-82	219	0.8	12.8	16.8	
ツンドラ3 (CT)	活動層	24-34	35	0.5	7.6	14.6	
	永久凍土	52-64	44	0.4	8.7	21.2	7.3

表(2)-4 アラスカの北方林、ツンドラ、パルサで採取した  
活動層および永久凍土からのCO<sub>2</sub>放出速度

植生		CO <sub>2</sub> emission ( $\mu\text{gC g}^{-1} \text{d}^{-1}$ )						
		-5°C	-3°C	-1°C	1°C	5°C	10°C	15°C
北方林 (BS)	活動層	1	2	6	53	73	107	150
	永久凍土	0	0	0	0	0	1	1
パルサ	活動層	0	0	0	7	12	18	26
	永久凍土	1	2	5	6	8	12	18
ツンドラ1 (UT1)	活動層	2	2	4	7	9	13	19
	永久凍土	1	2	5	4	6	8	12
ツンドラ2 (UT2)	活動層	0	0	0	1	1	2	4
	永久凍土	2	3	9	15	19	26	37
ツンドラ3 (CT)	活動層	4	7	12	8	12	21	34
	永久凍土	3	5	12	27	38	59	94

表(2)-5 アラスカの北方林、ツンドラ、パルサで採取した活動層および永久凍土の培養結果から得られた温度-呼吸曲線 ( $F_c=R_0 \times e^{kT_s}$ ) と温度依存性 ( $Q_{10}$ )。  $F_c$ は微生物呼吸速度、 $T_s$ は地温。

植生	層	温度範囲	$R_0$	k	$R^2$	$Q_{10}$
北方林 (BS)	活動層	-15°C~-1°C	9.462	0.4615	0.9995	100.998
		+1°C~+15°C	50.414	0.0730	0.9989	2.076
	永久凍土	-15°C~-1°C				
		+1°C~+15°C				
パルサ	活動層	-15°C~-1°C	0.965	0.3319	0.9957	27.633
		+1°C~+15°C	5.367	0.0652	0.9988	1.919
	永久凍土	-15°C~-1°C	0.583	0.6501	0.9183	665.607
		+1°C~+15°C	2.635	0.0822	0.9978	2.275
ツンドラ1 (UT1)	活動層	-15°C~-1°C	5.825	0.2881	0.9944	17.837
		+1°C~+15°C	6.391	0.0743	0.9999	2.102
	永久凍土	-15°C~-1°C	6.938	0.3474	0.9957	32.262
		+1°C~+15°C	3.891	0.0736	0.9999	2.087
ツンドラ2 (UT2)	活動層	-15°C~-1°C	0.595	0.3657	0.9968	38.737
		+1°C~+15°C	0.811	0.1035	0.9997	2.815
	永久凍土	-15°C~-1°C	13.935	0.4936	0.9778	139.212
		+1°C~+15°C	10.107	0.0899	0.9158	2.457
ツンドラ3 (CT)	活動層	-15°C~-1°C	15.705	0.2798	0.9982	16.418
		+1°C~+15°C	7.940	0.0968	0.9659	2.633
	永久凍土	-15°C~-1°C	16.340	0.3414	0.9943	30.384
		+1°C~+15°C	24.101	0.0905	1.0000	2.472



図(2)-13 北方林およびツンドラの活動層および永久凍土からの年積算CO<sub>2</sub>放出量。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

土壌培養実験により、土壌有機物分解速度(土壌呼吸速度)の測定を行った。北極域の土壌有機物分解で注目しなければならないものは、低温下における土壌有機炭素の分解である。低温域における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、Q10値(温度が10℃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。一般に、温帯域における土壌呼吸と地温との間には指数的な関係が仮定され、経験的にQ10値は2前後とされている。Q10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。しかし、北極域に関しては、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℃以上の地温変化の下での観測は難しく、Q10値の算出が困難な状態であった。そこで、採取した土壌コア試料を用いて、広い温度域のQ10値の算出のために凍土の培養実験を行った。

その結果、湿原が隆起し乾燥化が起きているパルササイトの永久凍土の夏期融解層では、-5℃～5℃のQ10値が18.8と高かった。年中凍結している永久凍土層では-5℃～5℃のQ10値は、4.7であり、夏期融解層のものが顕著に高かった。5℃～15℃、15℃～25℃の永久凍土層と夏期融解層のQ10値では明確な差が見られず、1.7から2.4であった。多量の炭素を蓄える湿原において、夏期融解層でQ10値の変動幅が極めて大きかった。夏期融解層では永久凍土層に比べて、近年堆積した易分解性の有機物が多いことも推測される。特に、永久凍土地域で現実に長い時間起こる温度域(-5℃～5℃)でQ10値が高かった。これは温暖化が進んだときの土壌有機物分解において重要な示唆を与えることになり、今後詳細に検討する必要があることが確認できた。

### (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>

乾燥化している湿原、原野・森林火災を受けたツンドラといった土壌有機物分解が急速に進むおそれがある場所で、永久凍土環境を観測するとともに、土壌・凍土コア採取を行った。土壌・凍土中の有機物の蓄積量を得るとともに、炭素14年代測定により、過去の土壌有機物の蓄積・分解速度を得た。これらは北極域の土壌有機物分解の予測を行う上で、新しい知見を与える。ツンドラと北方森林の区分された生態系ごとの土壌・凍土中の有機物の蓄積量、過去の土壌有機物の蓄積・分解速度と合わせて、生態系土壌有機物分解モデルに必要な観測データを与える。土壌培養実験により、永久凍土で現実に起こり得る温度領域の土壌有機物分解速度を測定した。凍結温度近くの永久凍土の土壌有機物分解速度は、これまでほとんど分かっていないため、本測定結果は、土壌有機物分解の将来予測に新たな知見を与える。

RCP2.6(低位安定化シナリオ)の場合、2100年までにツンドラで1kgC/m<sup>2</sup>、北方森林で2.5kgC/m<sup>2</sup>の二酸化炭素の放出が予測される。北極域全体でこの放出が起こるとすると、これまでに人為起源で放出された二酸化炭素の10%になる。原野・森林火災の増加の評価によってはもっと大きくな

る。北極域の土や植物は温暖化を加速すると言える。これまでの全球気候モデルでは、この温暖化の加速は過小評価されている。環境政策において、一層の温暖化緩和のための技術開発が必要であることを示した。

## 6. 国際共同研究等の状況

米国アラスカ大学国際北極圏研究センターのLarry D. Hinzman所長、Kenji Yoshikawa教授、Go Iwahana研究員との共同研究として、野外観測を行った。アラスカ大学国際北極圏研究センターは、北極域の環境変化の野外観測研究に大きな蓄積がある。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) G. IWAHANA, M. UCHIDA, L. LIU, W. GONG, F. MEYER, R. GURITZ, T. YAMANOKUCHI, L. HINZMAN: Remote Sensing, 8, 218 (2016), InSAR detection and field evidence for thermokarst after a tundra wildfire, using ALOS-PALSAR.

#### <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,内海真生,柴田康行,原菌芳信,岩田拓記(2013)  
「14Cを利用した北極高緯度域における自然火災による土壌炭素消失量の推定. 第26回タ  
ンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2013年7月, 山形
- 2) 岩花剛,内田昌男,近藤美由紀,吉川謙二,Hinzman L.(2013)  
「アラスカ・デナリハイウェイ沿いのパルサの形成と内部構造.」 雪氷研究大会, 2013年9  
月, 北見
- 3) Kondo M., Uchida M., Utsumi M., Iwahana G., Iwata H., Harazono Y., Nakai T., Tanabe K.,  
Shibata Y. (2013)  
“The belowground C balances in Alaskan boreal and tundra ecosystems: Insights from  
radiocarbon-based C accumulation rates and turnover times.” 5th EAST ASIA AMS  
SYMPOSIUM, 2013年10月, Daejeon, Korea
- 4) Kondo M., Uchida M., Ustumi M., Iwahana G., Yoshikawa K., Iwata H., Harazono Y., Nakai T.,  
Tanabe K., Shibata Y. (2013)  
“Turnovertime of soil organic carbon in permafrost using radiocarbon and their application for  
determining long and short therms carbon balances cas study in Alaskan tundra and boreal forest.”  
19th International symposium on Poler Science, 2013年10月, Incheon, Korea
- 5) Kondo, M. Uchida, M. Utsumi, G. Iwahana, H. Iwata, Y. Harazono, T. Nakai, K. Tanabe, Y.  
Shibata (2013)  
“Estimate of permafrost organic carbon balance in Alaskan boreal and tundra ecosystems using

- natural level radiocarbon.” 第4回 極域科学シンポジウム. 2013年11月, 立川
- 6) 米村正一郎、内田昌男、近藤美由紀(2013)  
「アラスカ凍土コアサンプルのガス交換特性実験。」 第4回 極域科学シンポジウム. 2013年11月, 立川
  - 7) 佐々木正史、内田昌男、内海真生、中山恵介(2013)  
「アラスカ北極圏の湖沼におけるメタンフラックスと永久凍土融解の影響。」 第4回 極域科学シンポジウム. 2013年11月, 立川
  - 8) 天野千恵、内海真生、高宇、近藤美由紀、内田昌男(2013)  
「アラスカ寒帯森林土壌及びツンドラにおける二酸化炭素・メタンフラックスと土壌微生物群集によるセルロース分解活性。」 第4回 極域科学シンポジウム. 2013年11月, 立川
  - 9) 近藤美由紀、内田昌男、内海真生、岩花剛、吉川謙二、原菌芳信、岩田拓記、中井太郎、田邊潔、柴田康行(2013)  
「放射性炭素同位体を用いたアラスカ永久凍土における土壌炭素収支の推定。」 日本生態学会第61回全国大会. 2014年3月, 広島
  - 10) 近藤美由紀(2013)  
「核実験起源放射性炭素同位体( $^{14}\text{C}$ )を用いた根・微生物呼吸の分離。」 2014年3月, 広島
  - 11) 近藤美由紀：日本生態学会第61回全国大会 (2014)  
「核実験起源放射性炭素同位体( $^{14}\text{C}$ )を用いた根・微生物呼吸の分離」
  - 12) 米村正一郎、内田昌男、近藤美由紀：日本地球惑星科学連合2014年大会 (2014)  
「自動測定システムによるアラスカ凍土コアサンプルの各種微量ガス交換量測定」
  - 13) 近藤美由紀、内田昌男、内海真生、岩花剛、吉川謙二、岩田拓記、原菌芳信、中井太郎、田邊潔、柴田康行：日本地球惑星科学連合2014年大会 (2014)  
「放射性炭素同位体を用いたアラスカ永久凍土における土壌有機炭素収支の推定」
  - 14) 岩花剛、内田昌男、近藤美由紀、吉川謙二：日本地球惑星科学連合2014年大会 (2014)  
「アラスカ・デナリハイウェイ沿いのパルサの発達史」
  - 15) Kondo, M., M. Uchida, M. Utsumi, G. Iwahana, K. Yoshikawa, H. Iwata, Y. Harazono, T. Nakai, K. Tanabe, Y. Shibata: The Thirteenth of the AMS, Aix en Provence, France, 2014  
“Quantifying rates of soil organic carbon accumulation in black spruce and tundra ecosystems in Alaska using radiocarbon “
  - 16) 近藤美由紀、大塚俊之、米村正一郎、吉川謙二、田邊潔、内田昌男：第63回日本生態学会仙台大会 (2016)  
「自然レベル放射性炭素同位体を用いた北極永久凍土融解に伴う土壌炭素分解の実態解明」(仙台, 2016年3月20日～24日)

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「地球温暖化と環境変化」(主催：日本大学生物資源科学部、環境

省環境研究総合推進費、2016年1月12日、神奈川県藤沢市日本大学生物資源科学部大講堂、観客145名)にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHK BS1 スペースシップアースの未来 第3回「“客室維持装置”に異変あり」、2014年11月20日、北極高緯度域における永久凍土融解と温室効果ガス放出の実状を紹介した。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

末尾にサブグループ(1)、(2)、(3)それぞれの引用文献をまとめて掲載した。

### (3) 北極域生態系炭素動態の季節・年々変動に及ぼす環境影響の要因解析

広島大学大学院生物圏科学研究科

戸田 求

平成25～27年度累計予算額：18,774千円（うち平成27年度：6,258千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本研究の先行研究で開発された最新の北極域土壌有機物分解モデルと生態系モデルとを統合した新たな生態系土壌有機物分解モデルをさらに発展させ、推定精度を向上させた。構築したデータセットと生態系土壌炭素動態モデルを用いて、モデル中に含まれる炭素、水循環に関わるパラメータ変数の不確実性評価のモデル解析を行った。それぞれの調査区によって代表される生態系について、植物の生理生態特性および環境条件の特性を示すパラメータセットを算出した後、北極域の気候変動が生態系炭素動態に与える長期的影響をシミュレートし、その潜在的な気候フィードバックを解析した。

#### [キーワード]

地球温暖化、北極域、生態系、土壌炭素動態モデル、土壌有機物分解

#### 1. はじめに

近年の地球温暖化により、特に北半球高緯度帯の北極域に生育する陸域生態系へ及ぼす影響が危惧されている。IPCC第五次評価報告書によれば、温暖化による今世紀末までの気温の上昇は北極域において最も大きくなり、この上昇値は全球平均のほぼ2倍に相当することが予測されている。北極域には地下の広範囲に永久凍土が存在するが、この永久凍土の中には大量の炭素が蓄積されている。その量は全球地下部に存在する炭素蓄積量のおよそ半分に匹敵するといわれている。今後の温暖化の影響によって生じる自然火災はこれまでに生じていたものと比べて強度も頻度も増加することが指摘されているが、そのような事態が頻発すると、例えば、直達日射量の増加、表層の熱伝導率の低い有機物層の焼失、焼け跡後に見られるアルベドの減少といった地表面におけるエネルギー・水収支が変わりそれによって地下部の永久凍土の融解が促進されることになる。この融解は、土壌中に含まれる炭素の分解と放出を加速させることにつながり、その結果さらなる温暖化の傾向を加速する正のフィードバック効果が働くことになる。

このような気候変化に伴う北極域の陸域変化の影響が危惧される中、想定される変化を考慮した陸域生態系の応答評価、特に炭素循環に着目した生態系モデルの開発が盛んに行われている。近年での数値モデル研究の結果によると、急激に進む温暖化は自然火災の状況を変化させ、永久凍土に多大な影響を与える結果が多く報告されている。さらに、土壌炭素蓄積量に影響する要因：リターの供給量、土壌炭素の温度依存性、土壌炭素分解係数等については、将来温暖化した時にどう変化するのはいろんな可能性が報告されている<sup>12, 13)</sup>。これらの影響する要因を総合的に考慮して、北極域の気候変動が生態系炭素動態に与える長期的影響をシミュレートし、温暖化予測に伴う不確実性を定量的に評価することは非常に重要である。数値モデルを用いたこれまでの研究

では、永久凍土中の地下炭素循環を扱ったものは単純化されたものに限られておりより詳細に土壌内プロセスを取り扱ったモデル研究は未だ少ない。

## 2. 研究開発目的

サブグループ3では、リモートセンシングによる土壌有機物分解の観点からの広域生態系区分を行う。サブグループ1、サブグループ2の成果を合わせて、北極圏の土壌有機炭素分解の時空間変動をモデル化する。サブグループ3の研究開発目的は、以下の3点である。(1) 本研究の先行研究で開発された最新の北極域土壌有機物分解モデル<sup>14)</sup>(伊勢武史(京都大学准教授)開発)と生態系モデルとを統合した新たな生態系土壌有機物分解モデルをさらに発展させる。データセットの構築を行い、新たなモデルによる広域有機物土壌分解の推定精度を向上させる。(2) 構築したデータセットと生態系土壌炭素動態モデルを用いて、モデル中に含まれる炭素、水循環に関わるパラメータ変数の不確実性評価のモデル解析を行う。(3) それぞれの調査区によって代表される生態系について、植物の生理生態特性および環境条件の特性を示すパラメータセットを算出した後、北極域の気候変動が生態系炭素動態に与える長期的影響をシミュレートし、その潜在的な気候フィードバックを解析する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 土壌炭素動態モデルと改良

使用した土壌炭素動態モデル(Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model)<sup>15)</sup>は、土壌物理モデル(Land surface model, LSM)と土壌有機物分解モデル(SOC dynamics model, SDM; ここで、SOCはsoil organic carbon(土壌有機炭素)の略である。)によって構成される<sup>15)</sup>(図(3)-1)。LSMでは、NCEPの客観解析データを入力値として、土壌深度各層の土壌温度と土壌水分が診断される。これらの診断変数がSDMに渡され、各土壌層の土壌炭素蓄積量が計算される。現在の数値モデルの枠組みにおいては、土壌に地上部から一定のリターが供給され、炭素の質量率および土壌密度から有機炭素の深さが計算される。そして、これが再びLSMで用いられ、次段階の土壌物理変数の計算に利用されるという流れである。土壌表層に蓄積された地上部からのリターは微生物に分解され、一部は大気中にCO<sub>2</sub>として放出され、残りは難分解成分として有機物層に蓄積されていく。各土壌の分解速度は土壌を構成する層によって異なるように与えられ、サブグループ2によるアラスカの代表的植生地での観測データを参考にして決定した。このように、野外で得られた貴重な観測データに基づき数値モデル内の係数が決定される。ここでは、黒トウヒ(Black spruce)が優占する森林サイトであるUAFとコケモモ(*Vaccinium vitis-idaea*)が優占する草本灌木の植生地であるUTサイトを想定したシミュレーションを行った。

モデルへの入力気象データについて、アラスカ州フェアバンクス(UAF)付近およびアップランドツンドラ(UT)付近で観測された1950年から2010年までの61年間の気象データ(気温、降水量、湿度、風向、風速、短波放射、長波放射)を利用した。ここでの計算期間は2000年と設定した。また、表(3)-1に各サイトで行った計算に使用する入力データをまとめた。

モデルは以下の観点から、改良を行った。

#### 1) 土壌有機炭素分解プロセス

土壌炭素動態モデルの改良において重要となる点は、リター量と土壌有機炭素分解プロセスで

ある。リター量は UAF サイト付近の炭素含有量<sup>14</sup>C から推定したデータを利用した。ここで、UT サイトにおけるリター値は既往の研究<sup>16)</sup>から引用した。土壤有機炭素分解の推定精度を向上させるため、土壤炭素動態モデルから計算される土壤各層の炭素含有量<sup>14</sup>C の鉛直勾配を実測データと比較することを検討した。

先行研究の土壤炭素分解モデルでは、土壤の温度依存性及び水分依存性を考慮することで有機炭素分解を計算した。また、土壤の温度依存性については既往の研究<sup>17)</sup>の地温による計算式が用いられた。一方で、近年の土壤炭素動態モデルでは土壤炭素の分解速度の計算に  $Q_{10}$  を採用した。その値の範囲は一般に、 $Q_{10}=2\sim 3$  で設定されている場合が多い。しかし、低温度条件では  $Q_{10}$  値がこれらの数値よりも大きく変化するという実験結果が報告されている<sup>18)</sup>。そこで本研究では、 $Q_{10}$  の違いによる土壤炭素動態の敏感度を調べるため、 $Q_{10}$  による計算式を用いたシミュレーションを行った。 $Q_{10}$  データは地温 (Tsl) が  $5^{\circ}\text{C}$  以上では  $Q_{10}$  の値は  $Q_{10}=2.2$  を、また  $5^{\circ}\text{C}$  以下では  $Q_{10}$ ,  $Q_{10}=18.9$  を用いた(表(3)-2)。

2013年度は改良した (Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model) PB-SDM を用いて、アラスカ州フェアバンクス近郊の黒トウヒ (*Picea mariana*) が優占する北方林サイト UAF サイトおよびより高緯度に位置するツンドラ優占の UT サイトを対象として、各気象・土壤データを用いたシミュレーション実験が行われた。シミュレーション結果の検証から、PB-SDM は両サイトにおける土壤炭素蓄積過程を適切に再現した。また、2000年間のシミュレーションラン (スピンアップ) を行った後、温暖化影響の予測にむけた、温暖化予備実験を行った。2014年度は、この改良した PB-SDM を用いて UAF を対象に、気候変動を想定したシナリオのもとで次の係数変化、すなわち、リターの供給量、土壤炭素の温度依存性、土壤炭素分解係数の変化に伴う土壤炭素動態の将来予測変動を推定する。

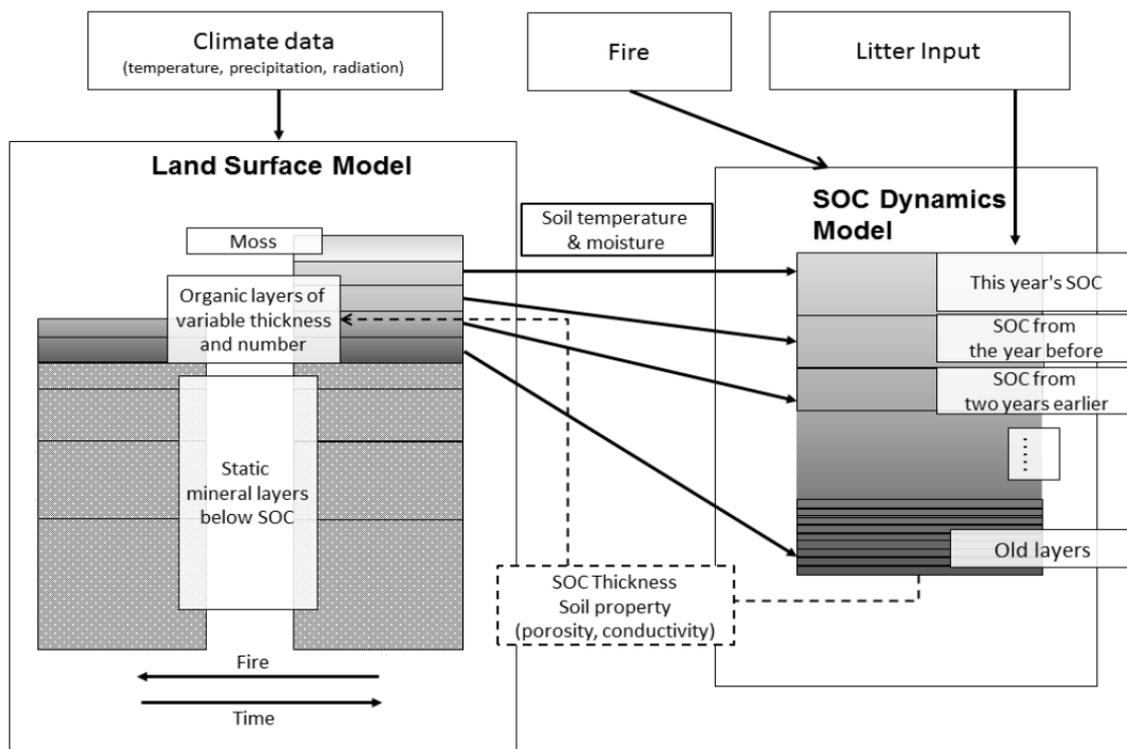
## 2) 自然火災

自然火災が土壤炭素動態に及ぼす影響について評価する際、火災の頻度および強度の差異を考慮することが重要である。本研究では火災の頻度に着目し、火災の頻度の違いが土壤炭素分解過程に及ぼす影響について調べるシミュレーションを行った。

## 3) 永久凍土の土壤有機炭素分解プロセス

永久凍土の取り扱いに関して、本研究では LSM で計算された地温が二年以上連続して  $0^{\circ}\text{C}$  以下になった土壤を永久凍土と定義して、永久凍土の季節・年々変動を考慮した土壤有機炭素の分解プロセスに着目した。永久凍土については観測調査が実施されてきており、ミネラル層に存在することが多いことがわかっている。そのため、ミネラル層の土壤炭素分解プロセスを土壤有機炭素動態モデルに導入した。更に、改良として有機物層間の有機炭素の流れ (フロー) をモデル化した(図(3)-2)。このようなより複雑で現実的な土壤有機炭素分解プロセスの追加によって、炭素循環フィードバックの性質や観測結果による気候応答の制約に関して新しい情報が得られると考えられる。

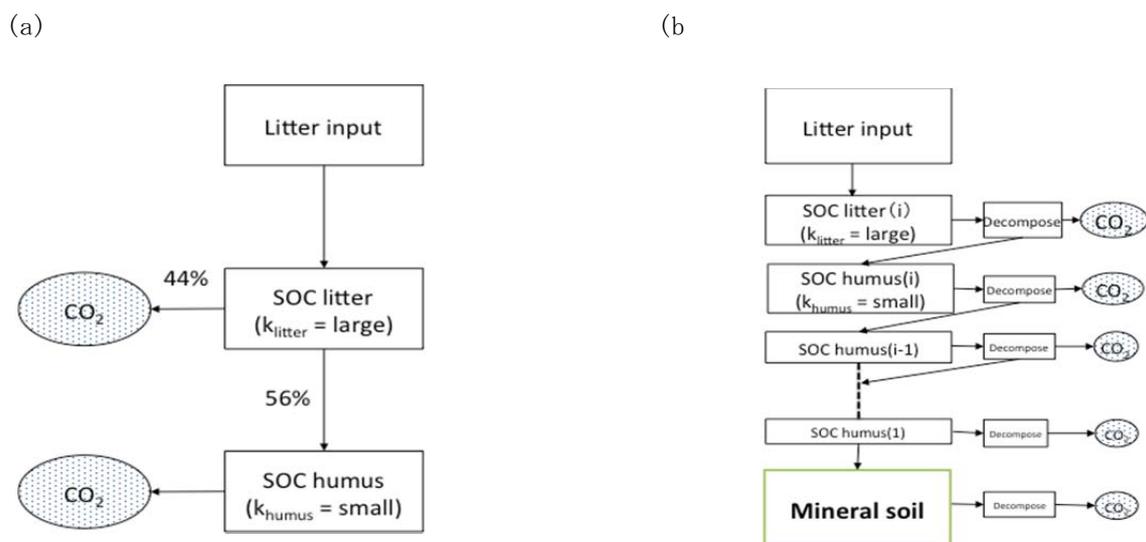
本研究の対象地域はアラスカ州フェアバンクス近郊の黒トウヒ (*Picea mariana*) が優占する北方林サイト (UAF) と North of Toolik lake 付近のコケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) と草本灌木が優占するアップランドツンドラサイト (UT) である。



図(3)-1 土壤炭素動態モデル (Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model version 2.0, PB-SDM v2.0) の概要図 (Mori et al. (2012)<sup>15</sup>より引用)。

表(3)-1 本研究で用いた主要なパラメータ

パラメータ名	単位	北方林サイト (UAF)	ツンドラサイト (UT)
リター供給量	kg C m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup>	0.135	0.065
リター層分解された炭素腐植層に供給する割合		0.45	0.40
腐植層分解された炭素ミネラル層に供給する割合		0.01	0.01
土壤層の厚さ (最大値)	m	0.05	0.05
炭素含有率 (腐植層)	kg C kg soil <sup>-1</sup>	0.4	0.3
炭素率含有率 (リター層)	kg C kg soil <sup>-1</sup>	0.4152	0.4
土壤バルク密度 (腐植層)	kg m <sup>-3</sup>	159	380
土壤バルク密度 (リター層)	kg m <sup>-3</sup>	70	80
植生タイプ		常緑針葉樹林	混合ツンドラ
土壤タイプ		Loam	Loam
火災時の土壤炭素放出量	kg C m <sup>-2</sup>	4.4 · 2.2	1.66 · 0.83



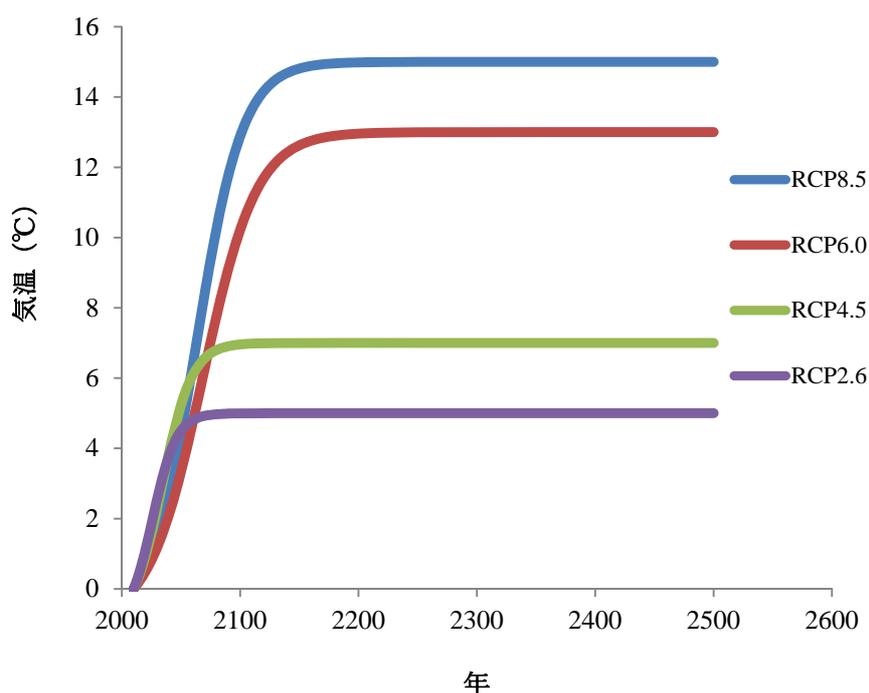
図(3)-2 (a) 改良前の土壌炭素動態プロセス； (b) 改良後の土壌炭素動態プロセス

表(3)-2 培養実験の結果

		$Q_{10}$	
		-5~5°C	5~15°C
北方林サイト (UAF)	活動層	18.9	2.2
	永久凍土層	7.3	2.5
ツンドラサイト (UT)	活動層	5.6	2.7
	永久凍土層	58.4	2.1

## (2) 気候シナリオデータの準備

本研究で使用する気候シナリオデータは地球システム統合モデル Model for Interdisciplinary Research on Climate-Earth System Model (MIROC-ESM) による長期気候変動予測の気象データである。全球の気象データはT42グリッド(128\*64)を0.5度Equirectangular projectionグリッドに線形内挿法によって変換されたものであり、本研究の対象地域UAFが存在するグリッドの気象データが切り取られた。さらに、これらのデータをPB-SDMで使用できるように、15分毎のdaily データに変換した。MIROC-ESMによる長期気候変動予測の気象データは2100年までである。そのため、2500年間の計算を行う際には、2100年以降では気温が変動しないことを想定し、気象データセットが整備された(図(3)-3)。



図(3)-3 フェアバンクスにおける地球システム統合モデルMIROC-ESMによる地上気温予測

気候変動が起きた時のパラメータ評価は以下のように行った。

#### 1) リターの供給量

温暖化した際に、高CO<sub>2</sub>濃度、積雪期間の短縮などが原因で森林が成長促進する可能性が報告されている。一方、温暖化と乾燥化が進化すると森林火災が多発し大規模に森林が失われ、その結果、リター供給量が減少する。また、北極海の海氷の顕著な減少に伴う気候変化によって、降雪量・降雨量が増加して永久凍土の融解が進むとともに、森林の生育に適さない過剰な湿潤状態が拡大すると、森林の枯死・荒廃が進むことが報告されている。このような将来の予測を念頭に、本研究ではアラスカの北方林地域のリター供給量を三段階 (0.078 kg C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>; 0.155 kg C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>; 0.31 kg C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>) 設けたシミュレーションを実施した。

#### 2) 土壌炭素の温度依存性 ( $Q_{10}$ )

凍土の熱の性質は、凍結土の構成要素である土粒子・不凍結水・氷・空気それぞれの熱の性質の組み合わせで決まる。本研究では、永久凍土の温度依存性について先行研究のデータに基づいて3段階を設定した。

A:  $Q_{10 (T_s < 5^\circ\text{C})} = 9.0$ ;  $Q_{10 (T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.9$

B:  $Q_{10 (T_s < 5^\circ\text{C})} = 5.3$ ;  $Q_{10 (T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.2$

C:  $Q_{10 (T_s < 5^\circ\text{C})} = 2.0$ ;  $Q_{10 (T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.0$

#### 3) 永久凍土融解に伴う土壌炭素分解係数 ( $k_t$ )

土壌有機物分解は、微生物酵素によって起こる化学反応である。永久凍土における分解係数は

$\Delta^{14}\text{C}$ のデータから推定された。この分解係数は将来の温暖化のもとでは永久凍土の融解に伴う土壌微生物活性化を反映して大きくなると考えられる。本研究では、永久凍土融解時の土壌炭素分解係数 ( $k_t$ ) を2段階に設定したシミュレーションを実施した。

#### 4. 結果及び考察

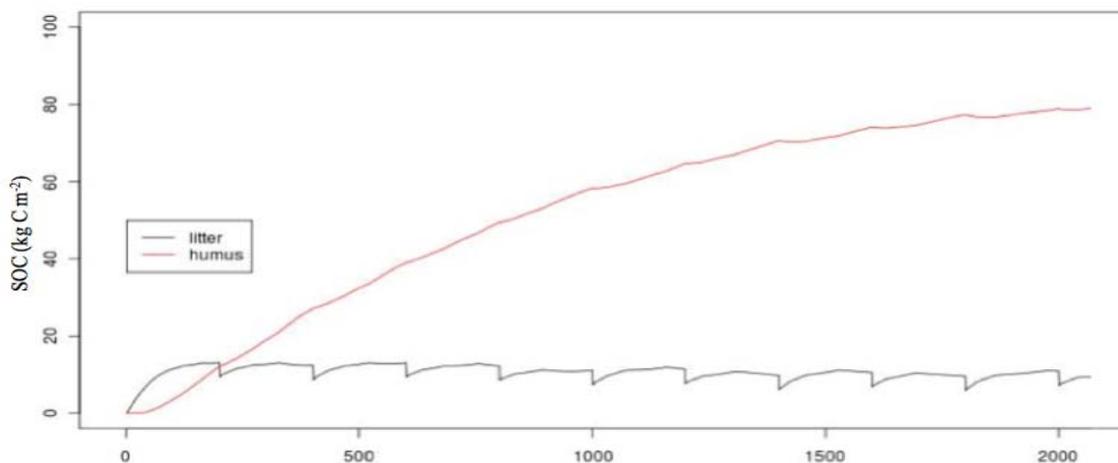
##### (1) モデル計算の結果

UAFおよびUTサイトを想定した、リター層および腐植層における土壌有機炭素 (SOC) 蓄積量に関するシミュレーションの結果を示した (それぞれ、図(3)-4と図(3)-5)。ここで図(3)-4および図(3)-5の(a)は既往の研究の計算式<sup>17)</sup>を用いて計算した結果であり、図(3)-4および図(3)-5の(b)は $Q_{10}=2.5$ を考慮した結果である。本実験において、火災の頻度は200年周期に設定された。

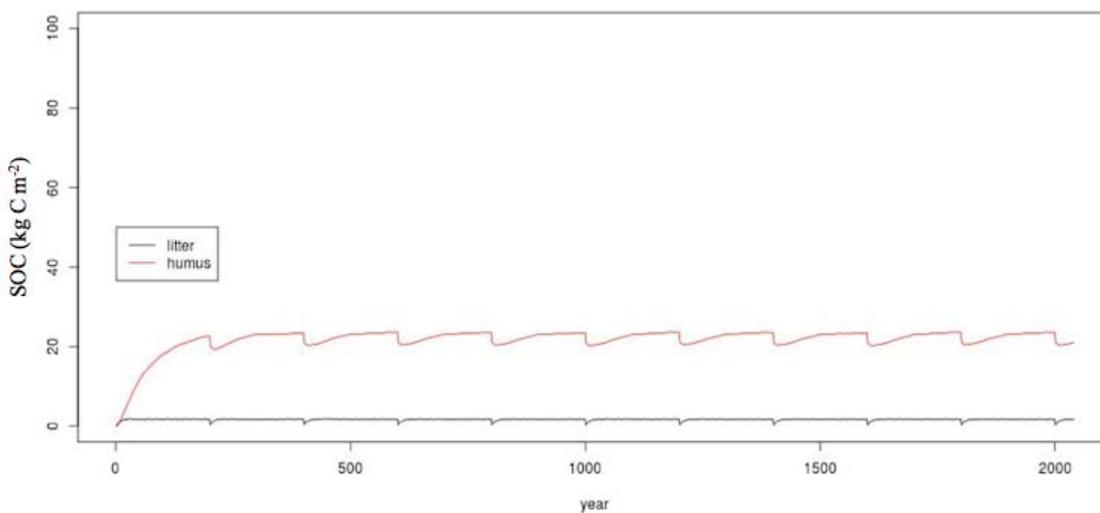
計算式<sup>17)</sup>を用いて計算した結果では、リター層が時間とともに増加していた。火災が起った時にリター層だけが燃えたため、UAFサイトの土壌有機炭素の蓄積量は2000年時には $97 \text{ kg C m}^{-2}$ に達した (図(3)-4(a))。一方で、 $Q_{10}=2.5$ を用いたシミュレーションでは、火災の影響はリター層だけでなく腐植層にも影響し、UAFサイトの土壌炭素の蓄積量は $24.5 \text{ kg C m}^{-2}$ に達した (図(3)-4(b))。

UAFサイトで実測によって得られた土壌炭素の蓄積量は $25.1 \text{ kg C m}^{-2}$ であった。この値と比較すると、 $Q_{10}=2.5$ による計算式を用いたシミュレーションは計算式<sup>17)</sup>を用いて得られた結果に比べて、観測された有機炭素蓄積量に近い値を示した。

(a)



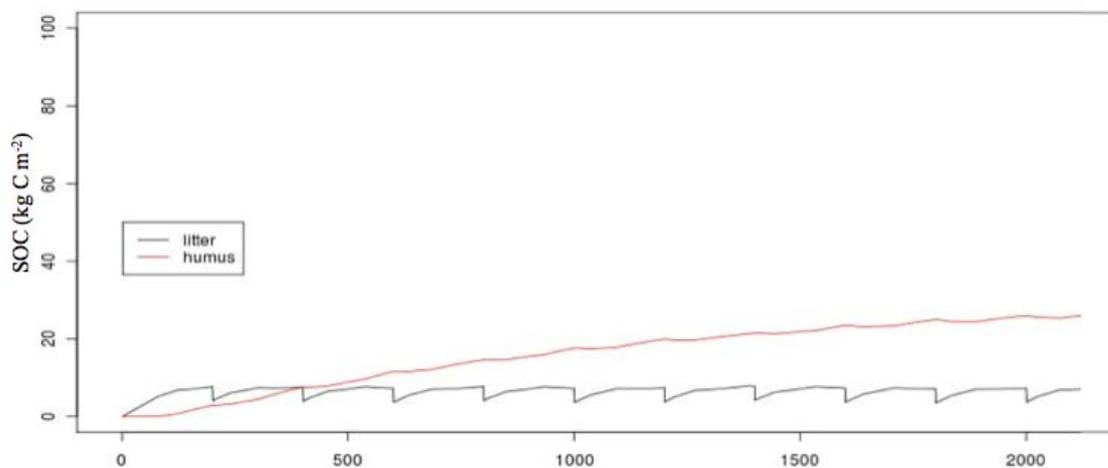
(b)



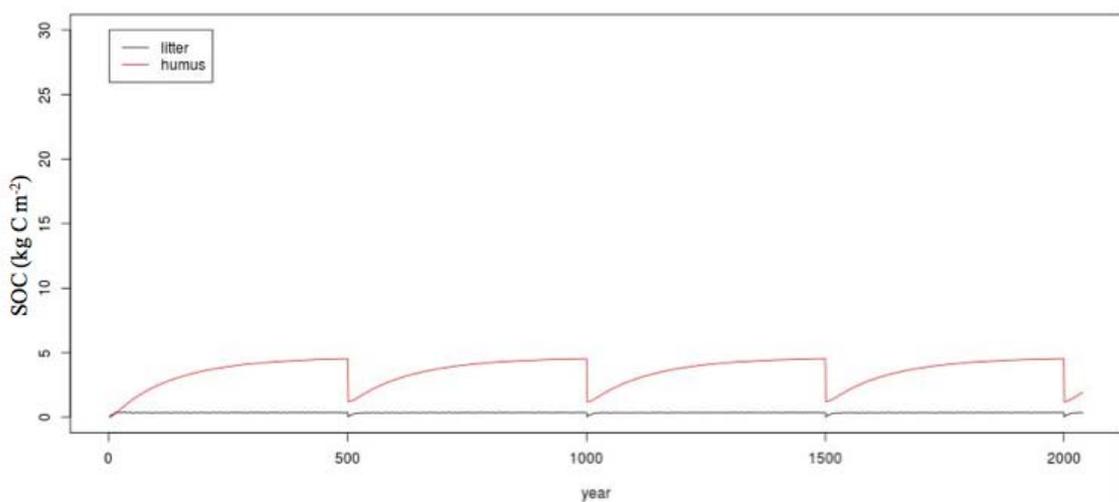
図(3)-4 UAFサイトにおけるリター層および腐植層における有機炭素蓄積量 (SOC) に関するシミュレーションの結果。黒線はリター層、赤線は土壌有機物層の腐植層の有機炭素蓄積量を表す。

次に、UTサイトにおけるリター層および腐植層における有機炭素蓄積量 (SOC) に関するシミュレーションを行い。実測のデータと比較してシミュレーションの値は小さくなった。これまでの北極高緯度域の自然火災に関する研究によれば、ツンドラの火災頻度は北方林より低い。そのため、火災の頻度は200年とした場合、SOCの量を下回る可能性は考えられる。そこで火災の頻度を700年周期設定した計算を実施したところ現実的に再現なふるまいを再現することができた。

(a)



(b)

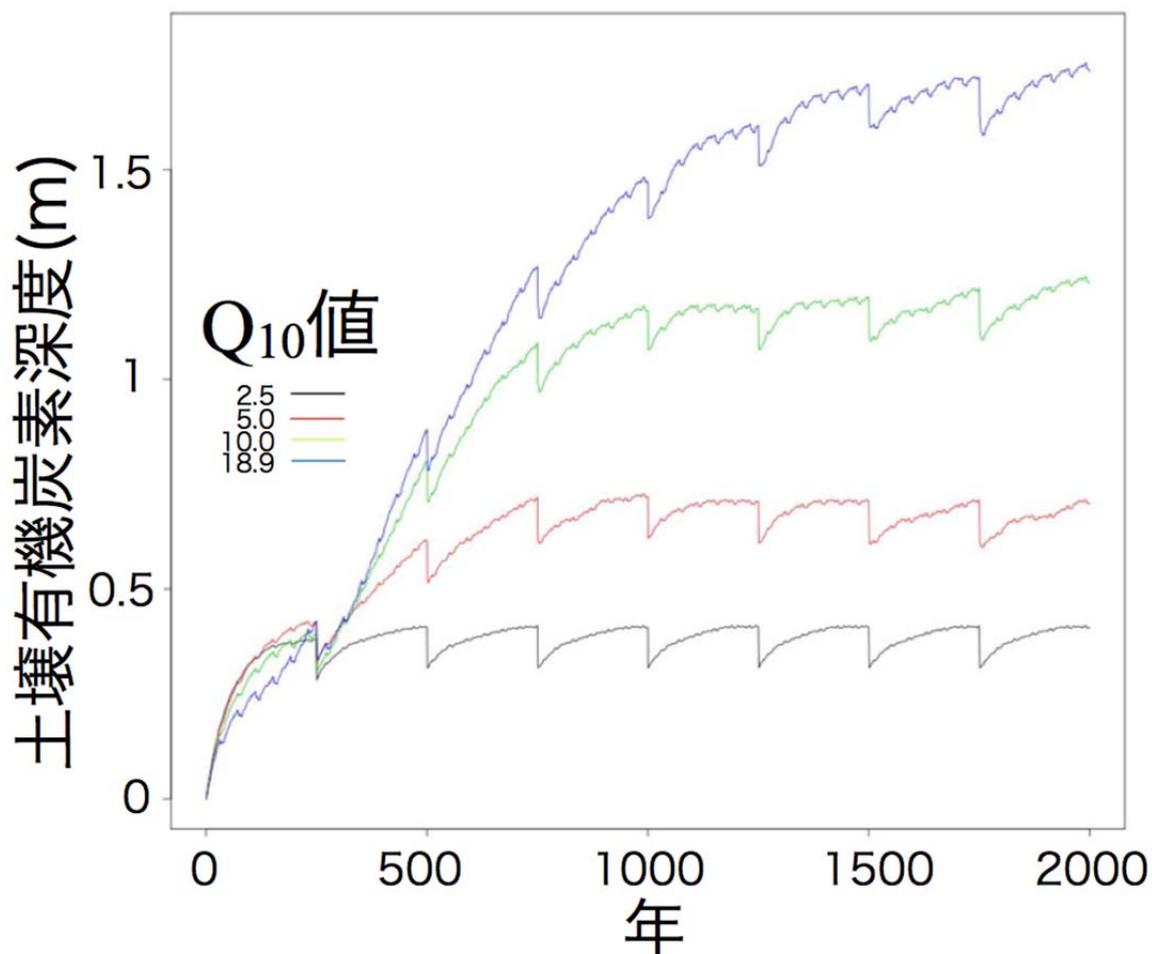


図(3)-5 UTサイトにおけるリター層および腐植層における有機炭素蓄積量 (SOC) に関するシミュレーションの結果。黒線はリター層、赤線は土壌有機物層の腐植層の有機炭素蓄積量を表す。

## (2) 感度実験に関する予備実験の結果

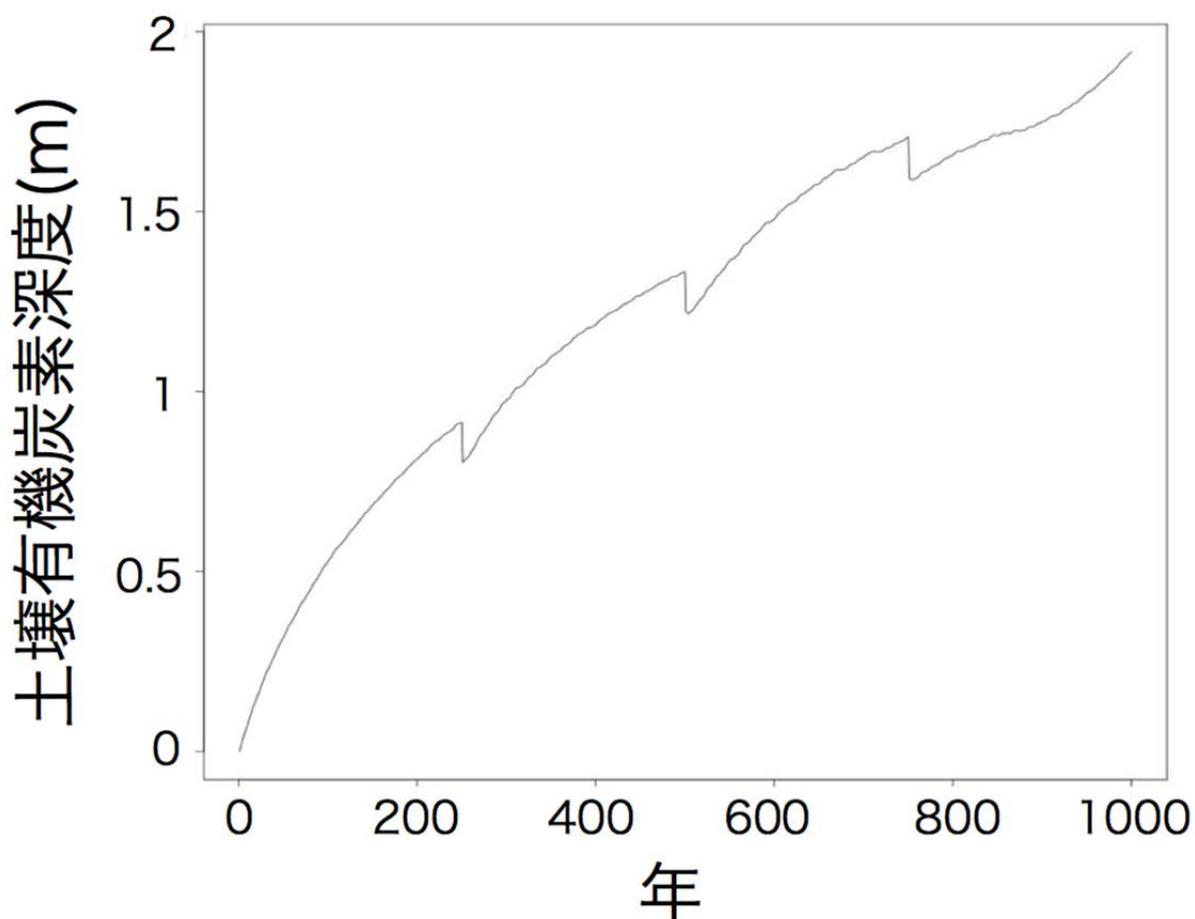
### 1) $Q_{10}$

ここでは、 $Q_{10}$ の数值を変えて感度解析のシミュレーションを行った。これらのシミュレーションを行った結果、 $Q_{10}$ の数值設定の違いがシミュレーション結果を大きく変化させていることが分かった (図(3)-6)。



図(3)-6 UAFサイトの $Q_{10}$ による土壌有機炭素のシミュレーションの結果。 $Q_{10}$ の増加に伴い土壌有機炭素の深度が増加することを示す。火災の頻度は250年周期に設定された。

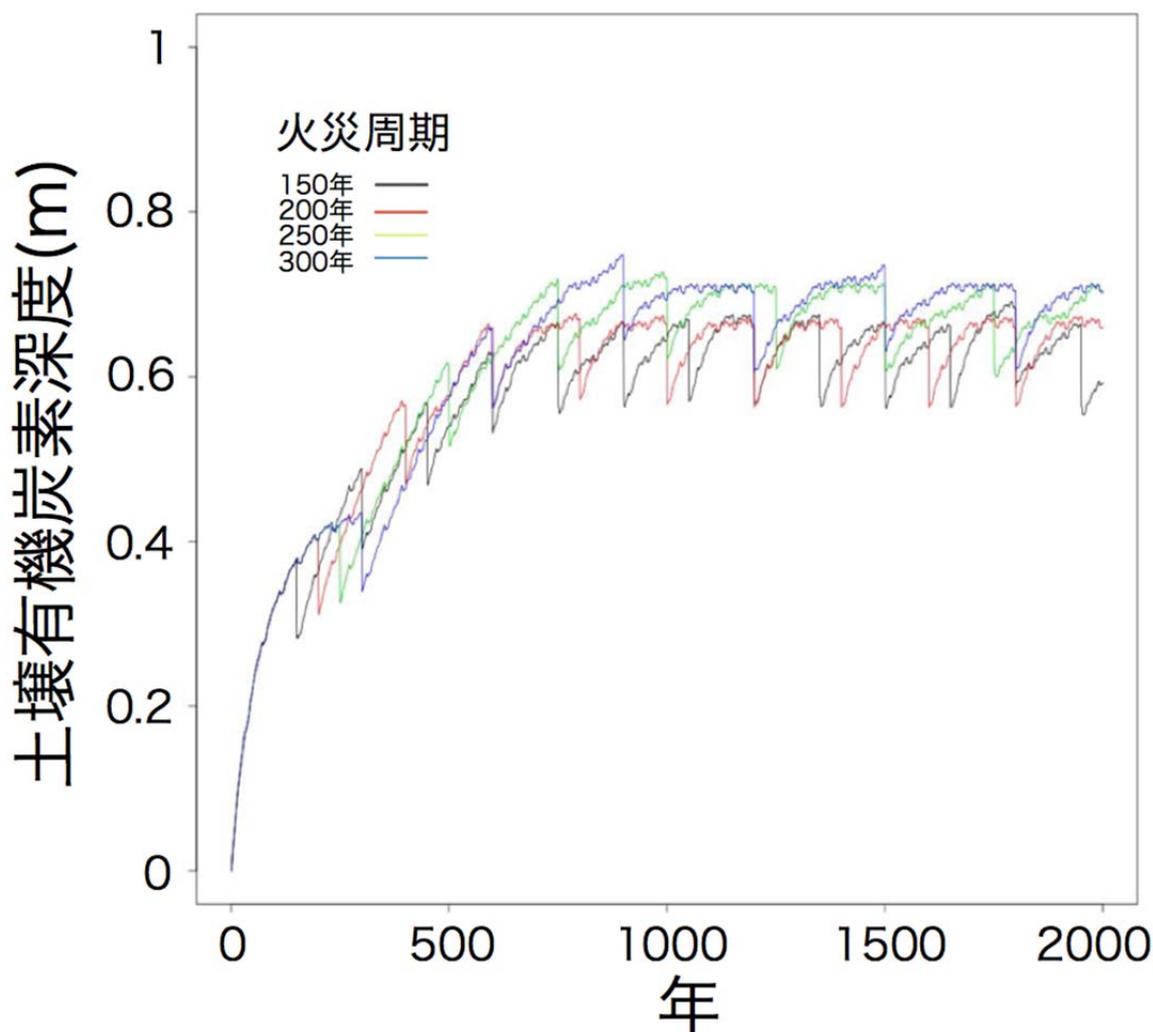
次に、UAFサイトについて、 $Q_{10}=2.2$  ( $T_{sl}>5^{\circ}\text{C}$ )、 $Q_{10}=18.9$  ( $T_{sl}<5^{\circ}\text{C}$ ) を用いたシミュレーションを行った (図(3)-7)。これらのシミュレーションの結果、1000年の時に土壌有機炭素の深度は2 mに達することが分かった。しかし、UAFサイトで実測によって得られた土壌有機炭素の深度は0.29 mであった。この値と比較すると、計算値は大幅に実測値を上回る。この原因にはリターの供給の仕方に関連しており、土壌層へのリター供給速度が土壌分解速度よりも速いため、土壌有機炭素の蓄積量が観測値に比べて大きくなる傾向にある。そのため、リター供給の方法を変更する必要がある。季節変化を考慮することや火災後の回復変化を動的に捉えるための改良の検討が必要になる。



図(3)-7 UAF の  $Q_{10}=2.2$  ( $T_{sl}>5^{\circ}\text{C}$ )、 $Q_{10}=18.9$  ( $T_{sl}<5^{\circ}\text{C}$ ) を用いたシミュレーションの結果。

## 2) 火災頻度

さらに、UAF サイトで異なる火災周期を設定したシミュレーション実験を行った (図(3)-8)。この結果、火災の頻度を変えたとしても、土壌有機炭素深度に大きな違いが見られなかった。その原因として、現実には火災が生じた場合には植生の種構成や土壌の熱および水文特性が変わり、その結果として土壌有機炭素の深度が変わると考えられる。しかし、この一連のプロセスが現行のモデルには考慮されていないため、土壌有機炭素深度を正しく評価できていない可能性が考えられる。したがって、今後においては、火災に伴い変化する植生変化や土壌の熱および水文特性の変化のプロセスを加味したモデルの改良を検討することが重要である。なお、この実験で用いた  $Q_{10}$  の数値は  $Q_{10}=5.0$  であった。そのため、1) と同様、土壌有機炭素深度の計算値は UAF サイトでの実測値を上回ることとなった。



図(3)-8 UAFサイトの火災頻度によるシミュレーション感度の実験結果。火災の頻度は150, 200, 250, 250年周期にそれぞれ設定された。平衡状態を見ると、大きな差異は見られない。なお、本実験において、 $Q_{10}$ の数値は5.0に設定された。

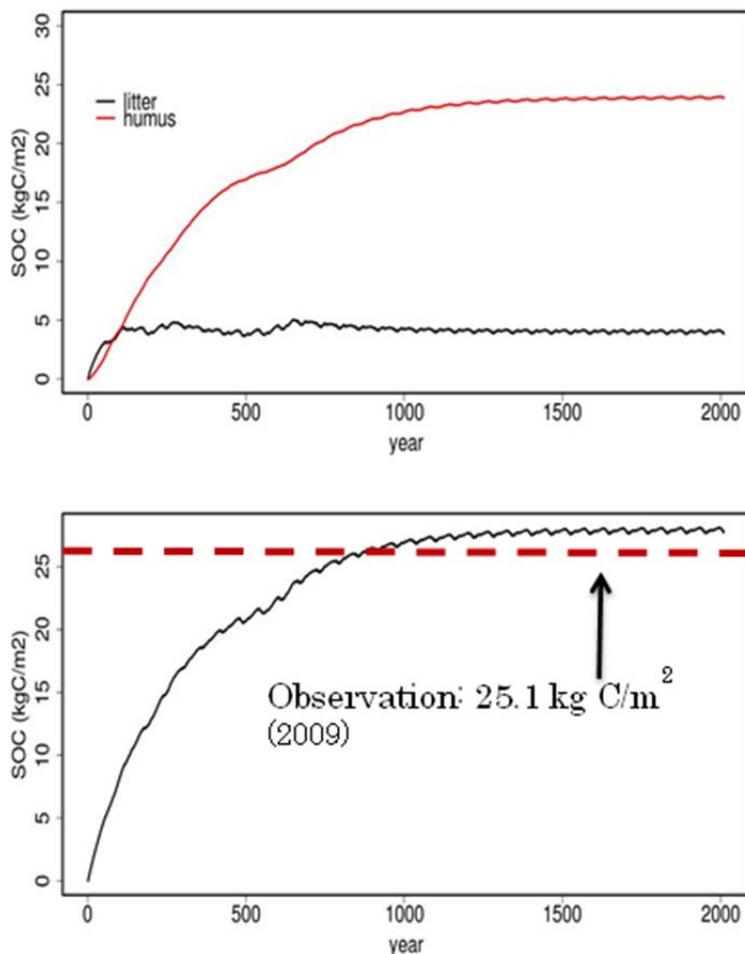
改良したPB-SDMを用いて、UAFおよびUTを対象として、各気象・土壌データを用いたシミュレーション実験が行われた。シミュレーション結果の検証から、PB-SDMは両サイトにおける土壌炭素蓄積過程を適切に再現した。また、2000年間のシミュレーションラン（スピニングアップ）を行った後、温暖化影響の予測にむけた、温暖化予備実験を行った。

### 3) 土壌炭素蓄積の再現性の検証

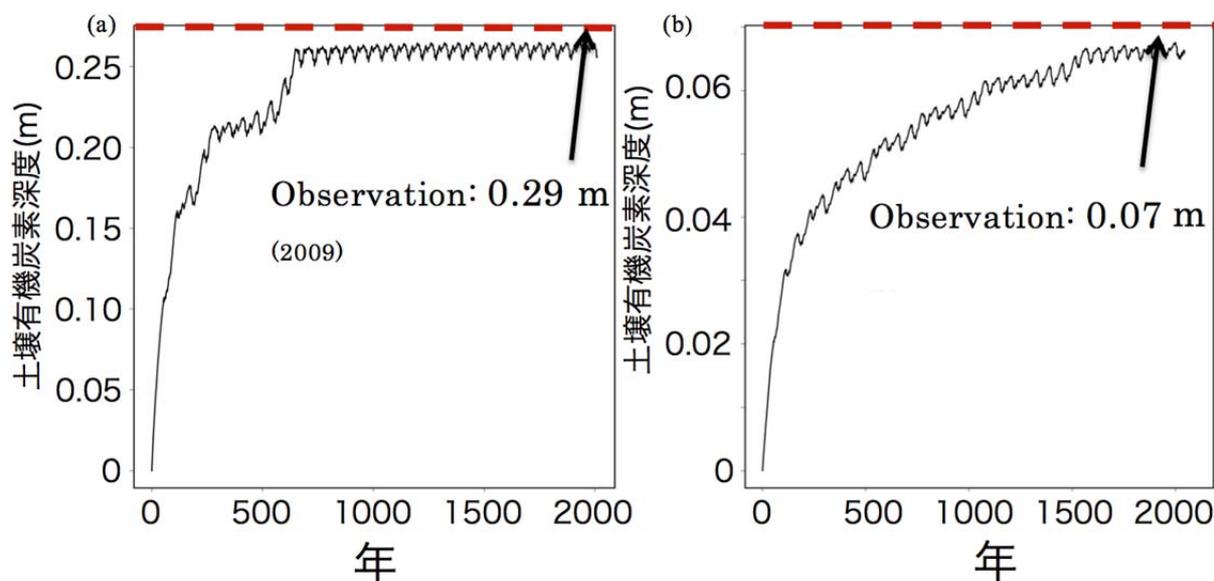
UAFサイトを想定した土壌有機炭素（SOC）蓄積量、土壌有機炭素深度のシミュレーションを行った。（図(3)-9）にはリター層および腐植層におけるSOCのシミュレーション結果を示した。パラメータ調整の結果、シミュレーションによって得られたUAFサイトの土壌炭素の蓄積量は $26.5 \text{ kg C m}^{-2}$ に達した（図(3)-9）。一方、実測によって得られた土壌炭素の蓄積量は $25.1 \text{ kg C m}^{-2}$ であった。両者の結果、実測値とシミュレーションで得られた結果は非常に近くなり、モデル計算が

適切に行われていることが示された。

図(3)-10(a)と(b)はそれぞれ、UAFサイトおよびUTサイトにおける有機物層の深さに関するシミュレーション結果を示した。シミュレーションの結果としてUAFサイトの土壌有機炭素の深さは27 cmに達した。UAFサイトで実測によって得られた土壌有機炭素の深さは29cmであった。これらの結果から、シミュレーションは現地における土壌炭素動態の振舞を再現できることが示された。



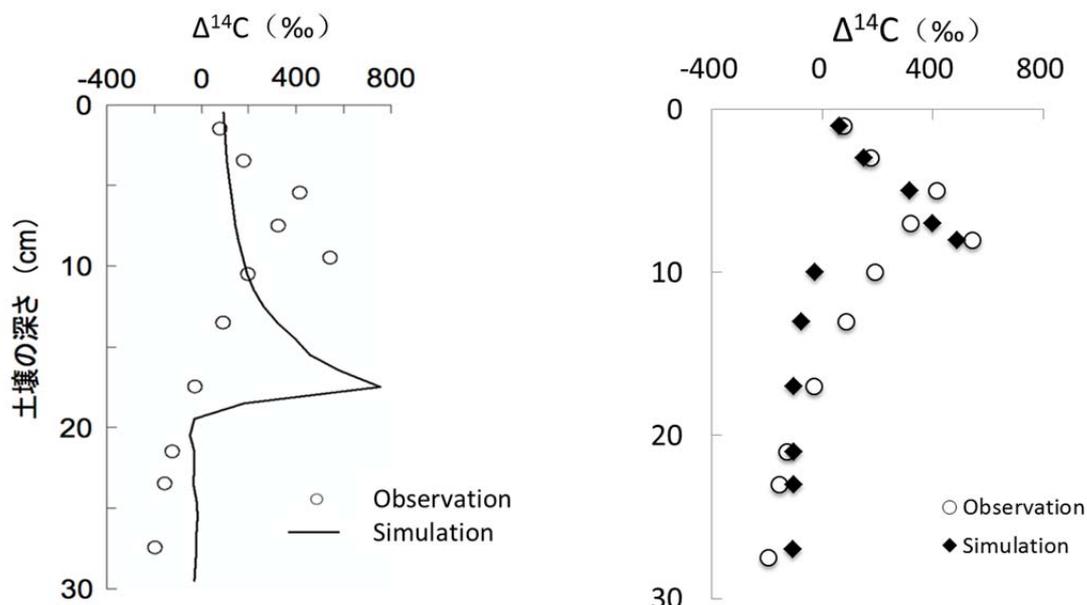
図(3)-9 UAFサイトにおけるリター層および腐植層における有機炭素蓄積量 (SOC) に関するシミュレーションの結果。上図の黒線はリター層、赤線は土壌有機物層の腐植層の有機炭素 (SOC) 蓄積量を表す。下図の黒線はリター層と腐植層と総量を、赤点線は観測値を表す。



図(3)-10 UAF (a) とUT (b) サイトを想定した、有機物層の深さに関するシミュレーションの結果。黒線はシミュレーションの結果、赤点線は観測値を表す。

次に、UTサイトにおいても同様のシミュレーションが行われた(図(3)-4(b))。その結果、UTサイトの土壌有機炭素深は6.8 cmに達し、一方で実測値の土壌有機炭素深は7cmであった。この結果から、UTサイトにおいてもUAFサイト同様にシミュレーションは有機炭素深を良好に再現できた。

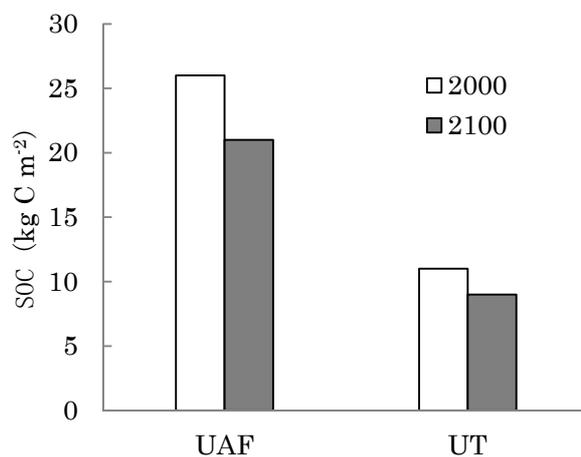
さらに、土壌炭素蓄積の特徴を再現するため $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直勾配に関するシミュレーション結果と観測結果を比較した。図(3)-11は、UAFサイトにおける有機物層の $\Delta^{14}\text{C}$ の分布を示す。観測値では深さ7 cmで542‰と極大となり、核実験に由来するBomb-Cのピークを示した(図中の $\Delta^{14}\text{C}$ が最大値をとる箇所)。このBomb-Cのピークから深さ7 cm以上の炭素は1960年以降に蓄積されたと考えられる。改良前のモデルで得られたシミュレーションでは、Bomb-Cのピーク位置を的確に再現できていなかった。一方、今回の改良されたモデルによるシミュレーションの結果は観測データのBomb-Cのピークの位置をよく再現し、各層の炭素蓄積速度を良好に再現することができた。



図(3)-11 UAFサイトを想定した、改良前のモデル(a)と改良後のモデル(b)を用いて、 $\Delta^{14}\text{C}$ の鉛直勾配に関するシミュレーションの結果と観測値。○は観測値、(a) 黒線と(b) ◆はシミュレ

#### 4) 温暖化影響評価にむけた予備数値実験の結果

気温上昇の影響を考量したシミュレーション実験

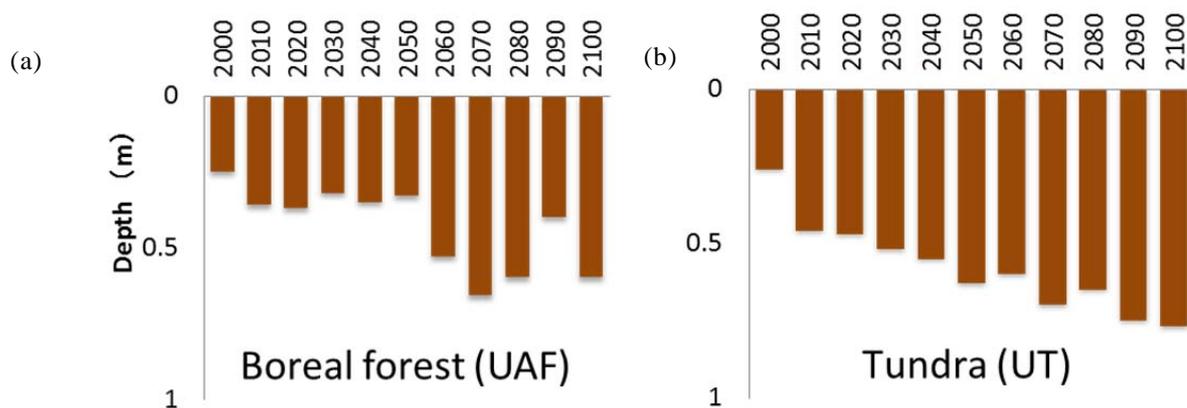


図(3)-12 気温が4.8°Cを上昇させた後リター層

気温上昇による同対象域の土壤炭素動態に及ぼす影響を調べるため、2000年から2100年における100年間の間に気温を各年あたり0.048°Cの上昇、すなわち100年間で4.8°Cの上昇をモデルのインプットデータとして使用し、100年間の有機物層の炭素蓄積量、永久凍土深及びミネラル層の炭素

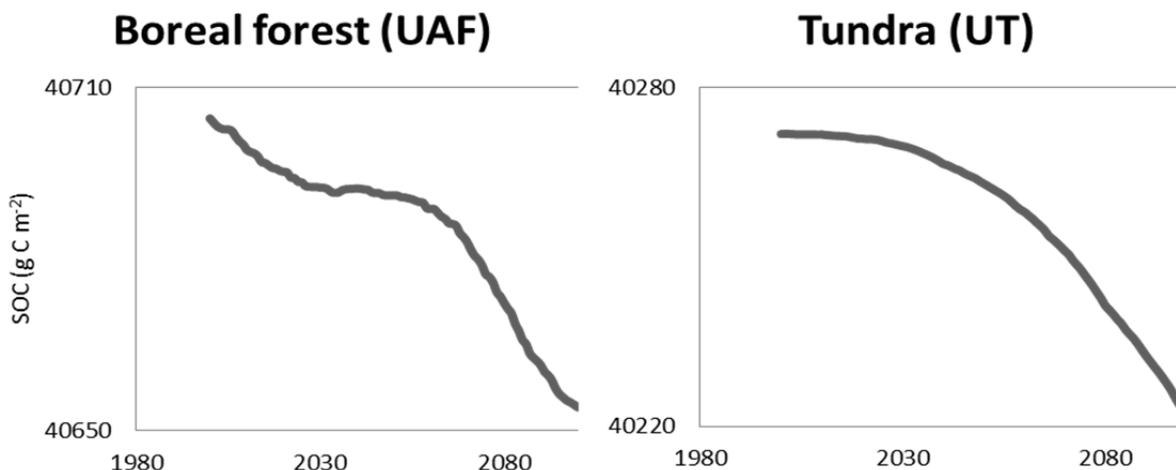
蓄積量に注目したシミュレーションを実施した。

図(3)-12は気温上昇する前の2000年と上昇後の2100年におけるリター層および腐植層の炭素蓄積量を示す。UAFサイトでは兩年の差から、 $5 \text{ kg C m}^{-2}$ の炭素がリター層と腐植層の中から放出されたことがわかった。一方、UTサイトではリター層と腐植層の中に蓄積した炭素の量は $2 \text{ kg C m}^{-2}$ のみが減少した。この違いはモデルで使用している活動層中の地温 ( $T_{sl}$ )  $5^\circ\text{C}$ 以下での $Q_{10}$ 値が、北方林 (18.9) よりもツンドラ (5.6) で大きく小さいことと関係しており、このことは北方林の活動層がツンドラに比べて温度に対する高い敏感性を有しているためと考えられる。



図(3)-13 気温が $4.8^\circ\text{C}$ を上昇させた後UAF (a) とUT (b) サイト永久凍土深さの変化

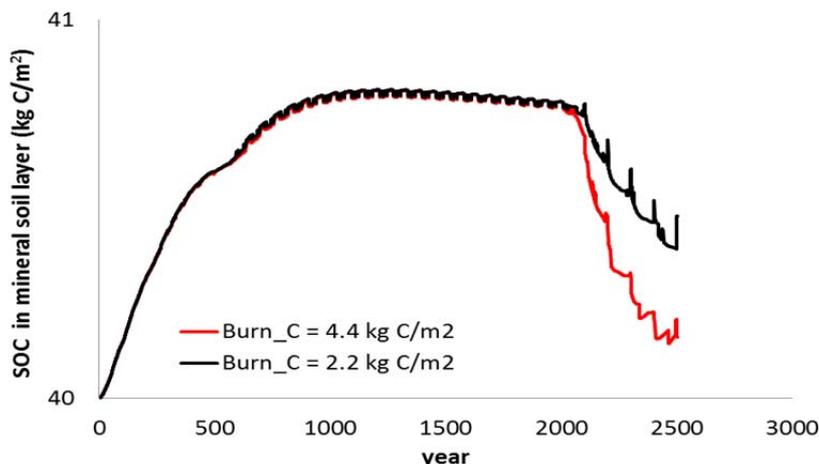
また、気温の $4.8^\circ\text{C}$ 上昇後、UAF (a) と UT (b) の両サイトで永久凍土深は深くなる傾向が見られた(図(3)-13)。UAF サイトでは2050年までの永久凍土深の変化はあまり見られなかった。その理由として、北方林では、熱伝導率が低い腐植層が厚く堆積しており、上昇した気温は永久凍土に対する影響が微小であったと考えられる。一方、腐植層が分解してなくなる部分は永久凍土の融解により深くなる部分とほぼ同じであると考えられる。ツンドラでは、腐植層が薄いため、上



図(3)-14 気温が $4.8^\circ\text{C}$ を上昇させた後UAF (a) とUT (b) サイトミネラル層の中の土壤炭素蓄

昇した気温は永久凍土の融解を促進するため、永久凍土深が段階的に深くなっていったものと判断される。さらに、新たに永久凍土を含むミネラル層の炭素動態プロセスを加えたことで、4.8℃の気温上昇後におけるミネラル層の炭素動態が見られる(図(3)-14)。UAF (a) と UT (b) サイトではミネラル層中に蓄積した炭素の量が気温の上昇と共に減少する傾向が見られる。

火災の影響について



図(3)-15 UAFサイトミネラル層の中の土壌炭素蓄積量の経年変化、赤線は強い火災、黒線は弱い火災の影響を表す。

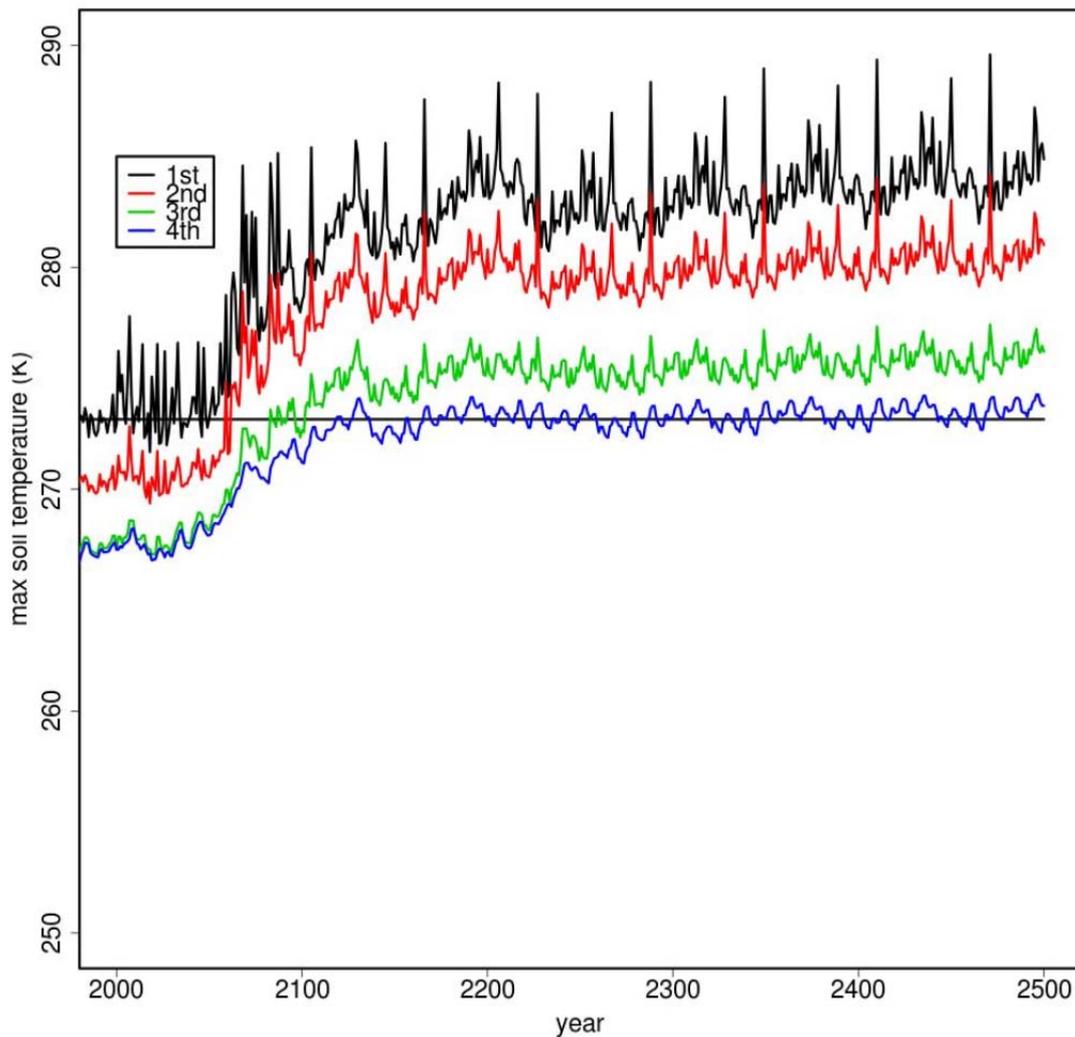
ここでは自然火災が土壌炭素動態へ及ぼす影響を調べる予測実験の報告を行った。UAF サイトを想定した2500年のシミュレーションを行った。2000年以降、気温上昇に加えて100年に1度の頻度で火災を生じさせ、ミネラル層中の土壌炭素蓄積量にどのような影響を与えるかについて調べた。ここで、火災の強さを2段階に設定したシミュレーションを行い、強火災が起きた場合には1回において消失した炭素量を4.4 kg C m<sup>-2</sup>、一方で、弱火災では2.2 kg C m<sup>-2</sup>とした。

図(3)-15ではUAFサイトミネラル層の中の土壌炭素蓄積量の経年変化を示している。火災が強いとミネラル層の中に消失した炭素の量が増えていくが、弱火災では、火災直後にミネラル層の土壌炭素蓄積量は増える傾向が見られた。この違いの原因については未解明であり、今後の課題とする。

### (3) 各種シナリオ下でのモデル計算の結果

#### 1) 永久凍土の変化

今シミュレーション結果から、シナリオRCP8.5の場合、アラスカフェアバンクスの気温が今世紀末までに現在の気温より15℃高くなるあることがわかった(図(3)-3)。そのため、2070年までに一部の永久凍土が溶け始める可能性がある(図(3)-16)。2130年までに地下2mまでの永久凍土はほぼ融解する可能性がある事がわかった(図(3)-16)。

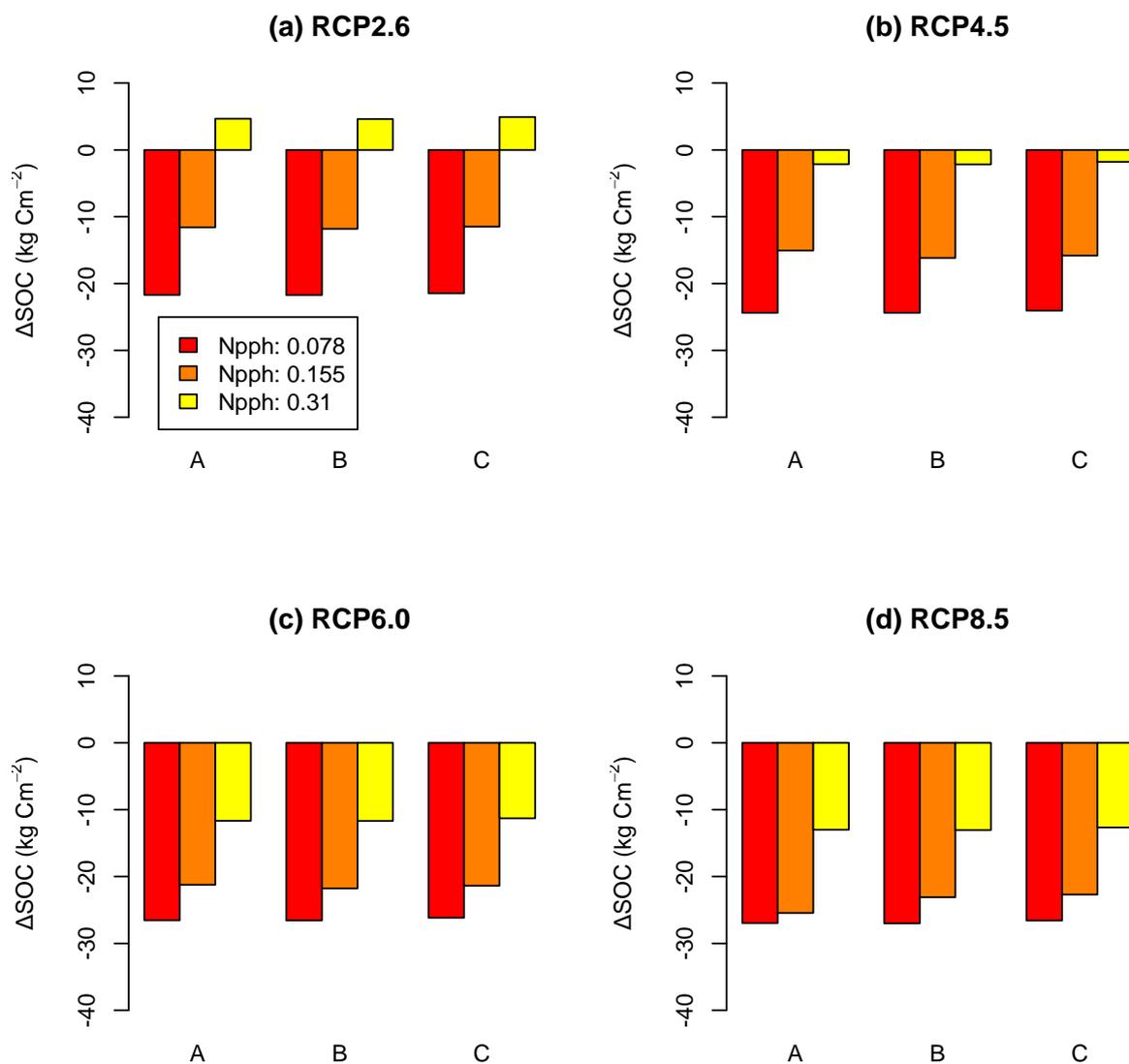


図(3)-16 気候シナリオRCP8.5の気象データを用いたシミュレーションの結果。

ミネラル層各層の地温の経年変化。図中線は地温0°C (273 K) を表す。

## 2) 有機物層の土壤炭素蓄積量の変化

図(3)-17は2000年および2500年の各年時に有機物層に蓄積された土壤炭素量の差を示す。この図より、シナリオRCP2.6でリターの供給量 (Npph) が $0.31 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ の場合、有機物層は炭素の吸収源となるが、それ以外のケースでは有機物層は炭素の放出源になることがわかった。

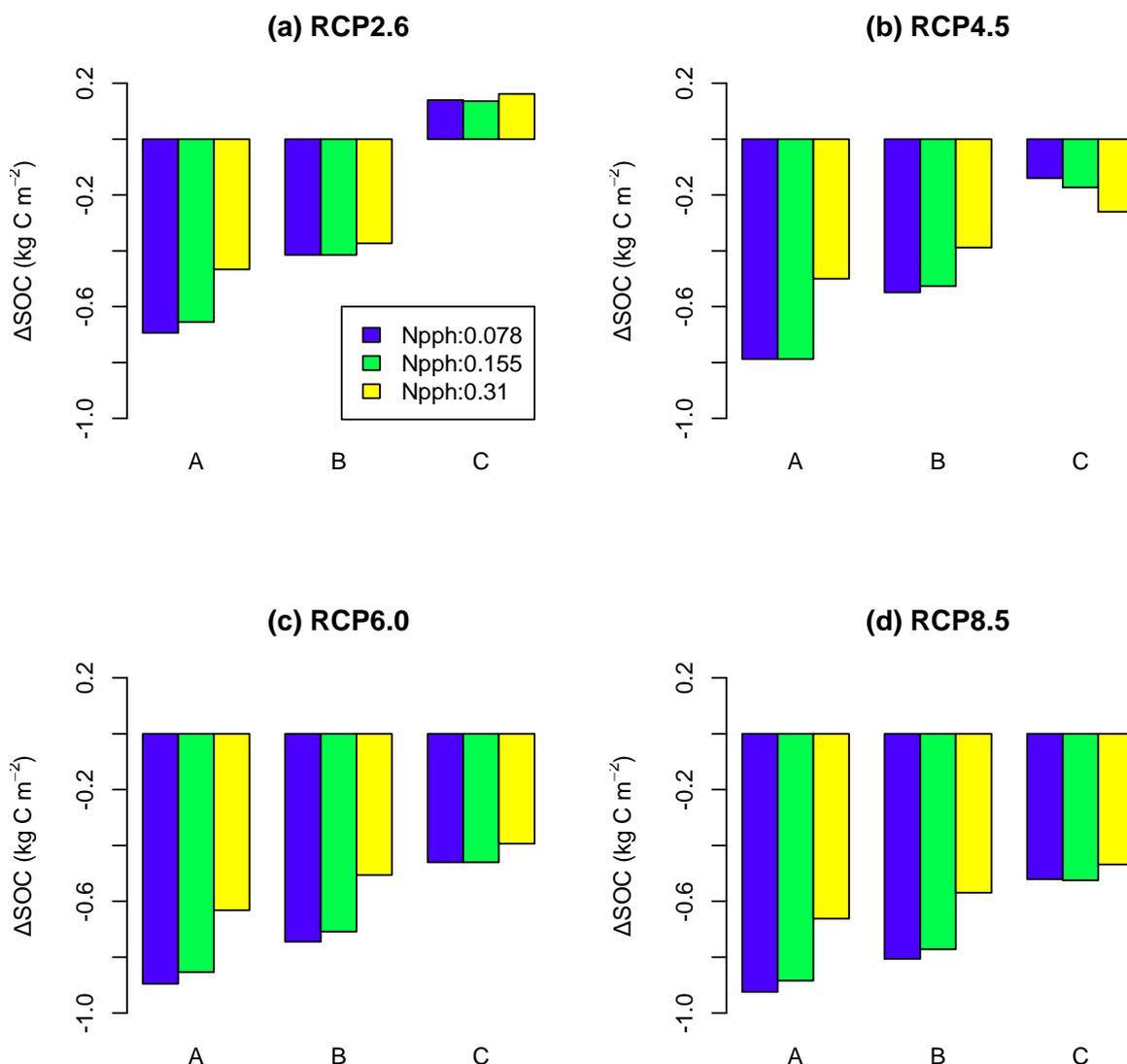


図(3)-17 2000年と2500年有機物層の土壤炭素蓄積量の差。

A:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 9.0$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.9$  ; B:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 5.3$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.2$  ; C:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 2.0$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.0$

### 3) ミネラル層の土壤炭素蓄積量の変化

図(3)-18には、2000年と2500年でのミネラル層の土壤炭素蓄積量の差を示す。ここでは、永久凍土が溶けた後にも、永久凍土中の土壤炭素分解係数  $k$  は変化しないとして計算をした。この計算のもとでは、土壤炭素蓄積量変化の絶対値は小さく、約+0.18 ~ -0.93 Kg C m<sup>-2</sup>であった。これは  $\Delta^{14}\text{C}$  のデータから推定された永久凍土の分解係数  $k$  は極めて小さいことによる。また、シナリオ RCP2.6、永久凍土の温度依存性  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 2.0$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.0$  の場合以外、ミネラル層は炭素の放出源になることがわかった。

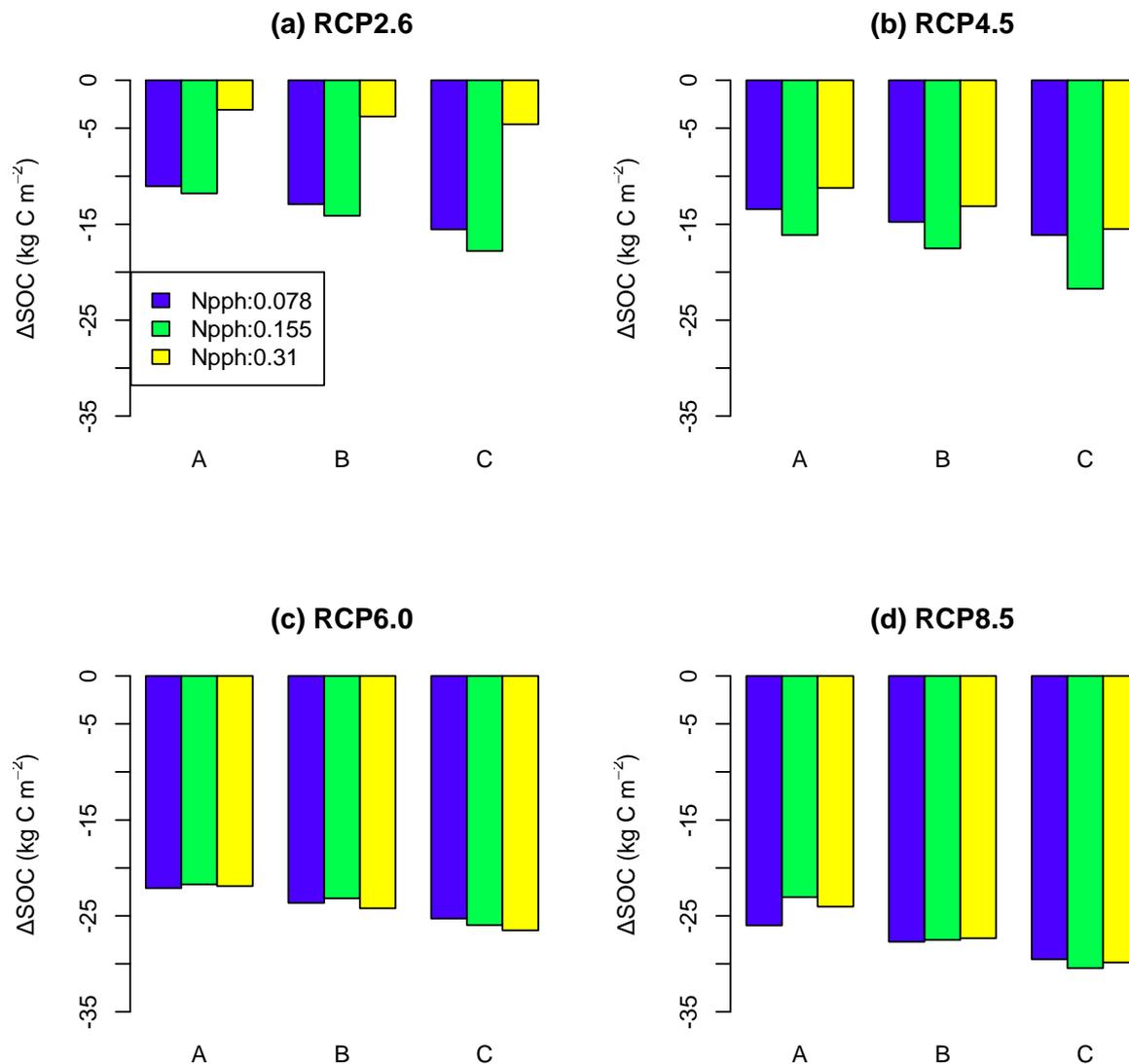


図(3)-18 2000年と2500年のミネラル層の土壤炭素蓄積量の差。

ここで、永久凍土における土壤炭素分解係数値は永久凍土が融解しない以前の値と同様のものを扱う。A:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 9.0$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.9$ ; B:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 5.3$ ;  $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.2$ ; C:  $Q_{10(T_s < 5^\circ\text{C})} = 2.0$ ;  
 $Q_{10(T_s > 5^\circ\text{C})} = 2.0$

一方、図(3)-19は永久凍土の土壤炭素分解係数  $k$  を  $k_t$  にした場合の計算結果である。この計算結果より、全ての計算でミネラル層は炭素の放出源になった。シナリオRCP2.6とRCP4.5の場合、ミネラル層の炭素蓄積量はリター供給量の増加に伴い非線形的に変化した。この原因は、ミネラル層一番上の層の土壤水分の急激な変化が土壤炭素分解に影響を及ぼしたと考えられる。また、この図からミネラル層中に蓄積した炭素の量が気温の上昇とともに減少する傾向が見られる。さらに、 $Q_{10}$ 値が小さいとミネラル層中に蓄積した炭素の量が更に減少する傾向が見られる。この現象はモデルで計算されたミネラル層の地温、排出量が少ないシナリオの場合ほぼ5°C以下であること

は原因だと考えられる。



図(3)-19 永久凍土が溶けた後の分解係数  $k$  を有機物層の分解係数  $K$  に変化した場合、2000年と比べ2500年ミネラル層の土壤炭素蓄積量の変化。

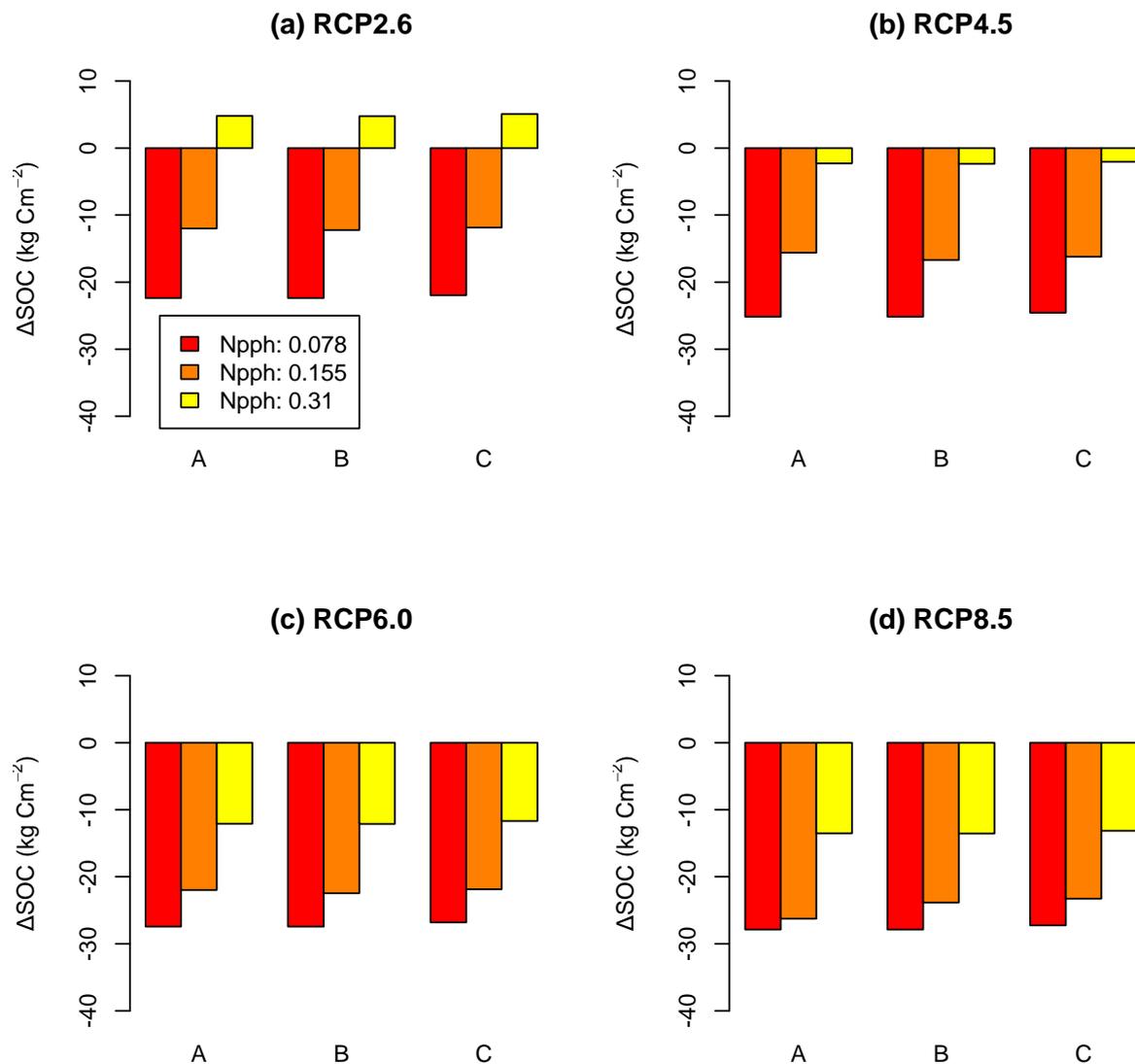
A:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}C)} = 9.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}C)} = 2.9$  ; B:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}C)} = 5.3$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}C)} = 2.2$  ; C:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}C)} = 2.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}C)} = 2.0$

#### 4) 土壤炭素蓄積量の変化

図(3)-20は、永久凍土が溶けた後の分解係数  $k$  が変化しない場合、また図(3)-21は、土壤分解係数  $k_i$  に変化した場合の2000年と比べ2500年の3 m までの土壤炭素蓄積量の差を表す。これらの図から、2500年までにアラスカの北方林の土壤炭素蓄積量は約 +4.8 ~ -57.4 Kg C m<sup>-2</sup> の変化が予測されることがわかった。

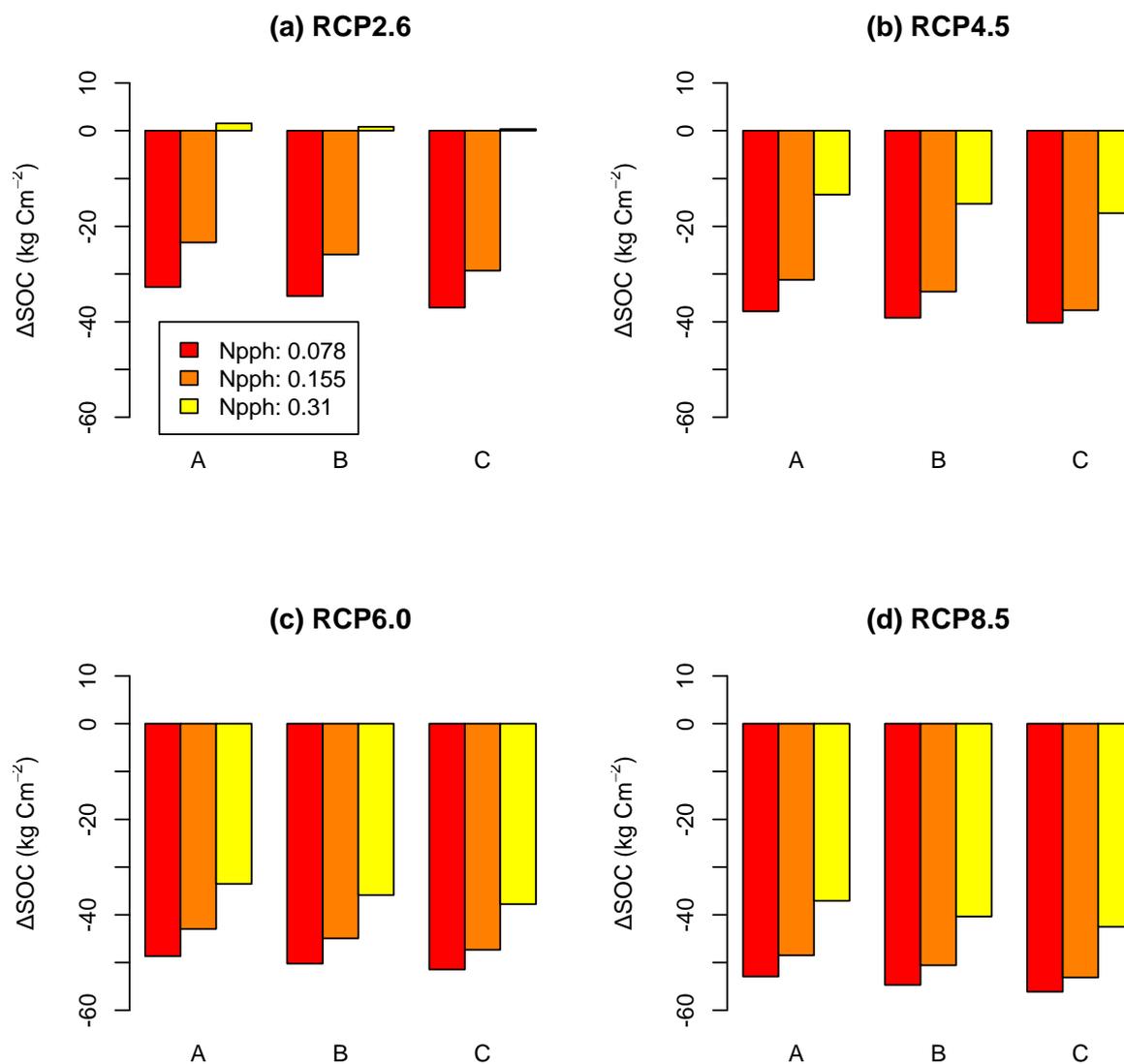
本研究では、アラスカ北極域の二つの代表的な植生地を対象に、土壤炭素動態モデルを用いた

数値解析を実施し、特にミネラル層及び土壌炭素分解プロセスを陽に取り扱うようにした。このことにより従来のモデルでは解決できなかった土壌有機炭素の分解プロセスの観測結果を良好に再現することが出来るようになり、 $Q_{10}$ の取り扱いが土壌炭素動態を考える上で重要であることが示唆された。



図(3)-20 永久凍土を溶けた後の分解係数  $k$  を変化しない場合、  
2000年と比べ2500年土壌炭素蓄積量の変化。

A:  $Q_{10(Ts < 5^\circ\text{C})} = 9.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^\circ\text{C})} = 2.9$  ; B:  $Q_{10(Ts < 5^\circ\text{C})} = 5.3$ ;  $Q_{10(Ts > 5^\circ\text{C})} = 2.2$  ; C:  $Q_{10(Ts < 5^\circ\text{C})} = 2.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^\circ\text{C})} = 2.0$



図(3)-21 永久凍土を溶けた後の分解係数  $k$  を有機物層の分解係数  $k$  に変化した場合、2000年と比べ2500年土壤炭素蓄積量の変化。

A:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}\text{C})} = 9.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}\text{C})} = 2.9$  ; B:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}\text{C})} = 5.3$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}\text{C})} = 2.2$  ; C:  $Q_{10(Ts < 5^{\circ}\text{C})} = 2.0$ ;  $Q_{10(Ts > 5^{\circ}\text{C})} = 2.0$

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

北極域の土壤有機物分解は、今後の地球温暖化を加速するおそれがある。その将来予測のための既往の数値モデル計算では、北極域内の生態系の違いが考慮されていない。このため、北極域の土壤有機物分解の正確な評価ができていない。衛星と地上の観測データに基づいて、北極域内の生態系の違いを考慮した実効性のある生態系土壤有機物分解モデルを開発し、その技術を提示した。新たに開発した生態系土壤有機物分解モデルにより、将来の北極域土壤有機物分解とその

地球温暖化への影響の予測を行うことができた。

## (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>

RCP2.6 (低位安定化シナリオ) の場合、2100年までにツンドラで $1\text{kgC}/\text{m}^2$ 、北方森林で $2.5\text{kgC}/\text{m}^2$ の二酸化炭素の放出が予測される。北極域全体でこの放出が起こるとすると、これまでに人為起源で放出された二酸化炭素の10%になる。原野・森林火災の増加の評価によってはもっと大きくなる。北極域の土や植物は温暖化を加速すると言える。これまでの全球気候モデルでは、この温暖化の加速は過小評価されている。環境政策において、一層の温暖化緩和のための技術開発が必要であることを示した。この予測には、IPCC AR5の温室効果ガス放出のシナリオに基づいており、地球温暖化の軽減のための政策オプションを含めることができる。国際的な二酸化炭素放出の抑制対策や原野・森林火災抑制対策の実効性を予測することができる。このような知見と予測技術は、地球温暖化対策の提言に寄与する。

## 6. 国際共同研究等の状況

米国アラスカ大学国際北極圏研究センターのLarry D. Hinzman所長、Kenji Yoshikawa教授、Go Iwahana研究員との共同研究として行った野外観測の成果を用いて解析した。アラスカ大学国際北極圏研究センターは、北極域の環境変化の野外観測研究に大きな蓄積がある。

## 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) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2014) "Simulating effects of fire disturbance on soil carbon dynamics in black spruce forests of Alaska." The 6th EAFES (East Asian Federation of Ecological Societies) Congress (Haikou, China April 2014)
- 2) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2014) "Simulating the role of fire on the soil carbon storage of boreal forest and tundra ecosystems in Alaska." Japan Geoscience Union Meeting 2014日本地球惑星科学連会 (Yokohama, Japan April-May 2014)

- 3) 王新, 戸田求, 横沢正幸, 荒木田葉月, 伊勢武史, 森健介, 近藤美由紀, 内田昌男, 串田圭司(2014)  
「北極域土壤炭素収支のモデル化」 生物地球化学研究会2014京都大会 (京都, 2014年10月)
- 4) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2015) “High risk of permafrost thaw.” 日本生態学会第62回全国大会 (鹿児島, 2015年3月)
- 5) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M. (2015) “Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems.” 日本農業気象学会2015年全国大会 (つくば, 2015年3月)
- 6) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: The Fourth International Symposium on the Arctic Research (2015)  
“Simulating the role of fire on the soil carbon storage of boreal forest and tundra ecosystems in Alaska” (富山, April 2015)
- 7) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: Japan Geoscience Union Meeting (2015)  
“Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems” (千葉, May 2015)
- 8) Wang X., Yokozawa M., Arakida H., Mori K., Ise T., Kondo M., Uchida M., Kushida K., Toda M.: Asia Oceania Geosciences Society (2015)  
“Simulating soil carbon dynamics in Alaskan terrestrial ecosystems” (Singapore, August 2015)
- 9) Wang X., Yokozawa M., Kushida K., Toda M.: American Geophysical Union Fall Meeting (2015) “Simulating soil carbon accumulation in an upland black spruce ecosystem of interior Alaska: implications for permafrost carbon dynamics to climate change” (San Francisco, December 2015)
- 10) Wang X., Yokozawa M., Kushida K., Toda M.: International Symposium on Agricultural Meteorology (2016)  
“Simulating soil carbon accumulation in an upland black spruce ecosystem of interior Alaska: implications for permafrost carbon dynamics to climate change” (岡山, March 2016)

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「地球温暖化と環境変化」(主催: 日本大学生物資源科学部、環境省環境研究総合推進費、2016年1月12日、神奈川県藤沢市日本大学生物資源科学部大講堂、観客145名)にて講演

### (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

末尾にサブグループ (1)、(2)、(3) それぞれの引用文献をまとめて掲載した。

- 1) K. Kushida, Y. Kim, N. Tanaka, and M. Fukuda, "Remote sensing of net ecosystem productivity based on component spectrum and soil respiration observation in a boreal forest, interior Alaska," *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 109, doi: 10.1029/2003jd003858, 2004.
- 2) G. R. Shaver and F. S. Chapin, "Production: Biomass relationships and element cycling in contrasting arctic vegetation types," *Ecological Monographs*, vol. 61, 1-31, 1991.
- 3) W. J. Chen, J. M. Chen, D. T. Price, and J. Cihlar, "Effects of stand age on net primary productivity of boreal black spruce forests in Ontario, Canada," *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, vol. 32, 833-842, May 2002.
- 4) W. L. Plonski, "Normal yield tables (metric) for majour forest species of Ontario," *Ont. Min. of Nat. Resour., Sault Ste. Marie, Ont., Canada.*, 1981.
- 5) L. He, J. M. Chen, Y. Pan, R. Birdsey, and J. Kattge, "Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 26, GB3009, 2012.
- 6) J. M. Chen, "Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 80, 135-163, Jul 1996.
- 7) Q. Wang, S. Adiku, J. Tenhunen, and A. Granier, "On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site," *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, 244-255, 2005.
- 8) M. R. Turetsky, B. Bond-Lamberty, E. Euskirchen, J. Talbot, S. Frohling, A. D. McGuire, and E. S. Tuittila, "The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems," *New Phytologist*, vol. 196, 49-67, 2012.
- 9) C. G. Homer, Dewitz, J.A., Yang, L., Jin, S., Danielson, P., Xian, G., Coulston, J., Herold, N.D., Wickham, J.D., Megown, K., "Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States-Representing a decade of land cover change information," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 81, 345-354, 2015.
- 10) E. S. Kasischke, N. L. Christensen, and B. J. Stocks, "Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests," *Ecological Applications*, vol. 5, 437-451, May 1995.
- 11) M. J. Apps, W. A. Kurz, R. J. Luxmoore, L. O. Nilsson, R. A. Sedjo, R. Schmidt, L. G. Simpson, and T. S. Vinson, "Boreal forests and tundra," *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 70, 39-53, 1993.
- 12) C. Moni, T. Z. Lerch, K. Knoth de Zarruk, L. T. Strand, C. Forte, G. Certini, and D. P. Rasse, "Temperature response of soil organic matter mineralisation in arctic soil profiles," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 88, 236-246, 2015.
- 13) E. A. G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schadel, G. Grosse, J. W. Harden, D. J. Hayes, G. Hugelius, C. D. Koven, P. Kuhry, D. M. Lawrence, S. M. Natali, D. Olefeldt, V. E. Romanovsky, K. Schaefer,

- M. R. Turetsky, C. C. Treat, and J. E. Vonk, "Climate change and the permafrost carbon feedback," *Nature*, vol. 520, 171-179, 2015.
- 14) T. Ise, A. L. Dunn, S. C. Wofsy, and P. R. Moorcroft, "High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback," *Nature Geosci*, vol. 1, 763-766, 2008.
- 15) K. Mori, Ise, T. , Kondo, M. , Kim, Y. and Enomoto, H., "The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics," *Open Journal of Ecology*, vol. 2, 90-95, 2012.
- 16) S. E. Hobbie and L. Gough, "Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories," *Oecologia*, vol. 140, 113-124, 2004.
- 17) J. Lloyd and J. A. Taylor, "On the Temperature Dependence of Soil Respiration," *Functional Ecology*, vol. 8, 315-323, 1994.
- 18) M. P. Waldrop, K. P. Wickland, R. White Iii, A. A. Berhe, J. W. Harden, and V. E. Romanovsky, "Molecular investigations into a globally important carbon pool: permafrost-protected carbon in Alaskan soils," *Global Change Biology*, vol. 16, 2543-2554, 2010.

## **Spatiotemporal variation of carbon budget in arctic pedosphere concerned with the prediction of global climate change**

Principal Investigator: Keiji KUSHIDA

Institution: College of Bioresource Sciences, Nihon University  
1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, JAPAN  
Tel: +81-466-84-3694 / Fax: +81-466-84-3694  
E-mail: kushida.keiji@nihon-u.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, Hiroshima University

[Abstract]

**Key Words:** Global warming prediction, Arctic pedosphere, Remote sensing, Carbon dating, Ecosystem model

The arctic ecosystem holds a large amount of soil carbon and has experienced the greatest temperature increase in the world. Recent global warming has altered the arctic ecosystem and its balance of carbon, heat, and water, further influencing the global climate. Whether this change accelerates global warming depends on interactions between the ecosystem and climate. Climate warming may accelerate the decomposition of soil organic matter (SOM), resulting in C loss from the arctic ecosystem. In this study, we obtained the spatiotemporal distribution of the SOM decomposition based on remote sensing, field observations, and ecosystem modeling. The SOM decomposition is influenced by vegetation types, litter falls and shrub distributions, and wildfire intervals and intensities. We showed the techniques that evaluate these factors from remotely sensed data. We analyzed core samples and observed permafrost environment in tundra and boreal forest sites including a wetland site under drying process and a tundra site affected by wildfire. In the core sample analyses, we obtained SOM accumulations and historical accumulation rate by  $^{14}\text{C}$  dating. Soil incubation experiments with the core samples clarified the SOM decomposition rate in the realistic temperature range of the permafrost and unfrozen layers. The results revealed novel knowledge for the prediction of the arctic SOM decomposition. These observation data and geographical vegetation classification by remote sensing provided parameters of the SOM decomposition modeling of the ecosystem for the future prediction. The novel SOM decomposition model with these parameters predicted the SOM decomposition and the carbon release from the arctic ecosystem under the IPCC AR5 future scenario of the greenhouse gas emissions.