

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」
平成10年度採択研究代表者

福田 正己

(北海道大学低温科学研究所 教授)

「温暖化効果ガスにかかわる永久凍土攪乱の制御技術開発」

1. 研究実施の概要

平成14年の夏季は調査地域では森林火災が多発した。推定でシベリア全域で焼失面積は約1,000万ヘクタールに達した。このため観測地域では火災の攪乱による二酸化炭素の放出量を定量的に把握することが出来た。またタワ-観測によっても、森林が攪乱を受けると、二酸化炭素は吸収から放出に変化することが確認出来た。火災抑制の技術開発として、延焼モデルを構築しそれを実際に発生した火災現場に適用することが出来た。リモートセンシング班はNOAA衛星画像解析から夏季の焼失面積を算出し、それが14300平方キロメートルであることを確認した。

森林班が推定したバイオマス増減から夏季の火災による直接的な二酸化炭素の放出量は約7000万トンであった。この地域の森林への吸収量は3500-7000万トンであり、火災の影響を考慮するとシベリアタイガはもはや二酸化炭素の放出源であることが判明した。これは従来にない新たな知見である。

2. 研究実施内容

タワ-観測班：

2002年は4月上旬から10月上旬の期間、ヤクーツク郊外・ネレゲルのカラマツ林および伐採跡地において、①春季の積雪深およびボーリング調査、②熱・水収支長期観測、③生態系二酸化炭素収支および土壌呼吸長期観測、④焼損がカラマツ樹の水分生理に及ぼす影響調査を実施した。2002年5月～7月の期間は記録的な少雨であり、シベリアの広範な地区で森林火災が発生した。

◆熱・水収支長期観測

渦相関法により、カラマツ林と伐採跡地の熱・水収支を長期観測した。カラマツ林では、観測期間を通して正味放射量の大部分が顕熱フラックスに分配されていた。2002年は土壌水分が少ない上に少雨であったためカラマツからの蒸散が抑制され、潜熱フラックスが減少し、その補償として顕熱フラックスが増大したと考えられる。伐採跡地では、2001年同様に地中熱流量がカラマツ林に比べて明らかに大きかった。なお湛水面からの蒸発によって、5月は伐採跡地の潜熱フラックスがカラマツ林を大きく上回った。6月～9月のカ

ラマツの成長期における両サイトの水収支を評価した。カラマツ林では蒸発散量が100mm、林内雨が51mm、土壌水分の減少量が22mmであった。また、下向きの潜熱フラックスとして13mmの水供給を考慮すると、残差は14mm、蒸発散量の15%弱であった。伐採跡地では蒸発散量が112mm、降水量が72mm、土壌水分の減少量が22mmであった。下向き潜熱フラックスとして16mmの水供給を考慮すると、残差は3mmであった。種々の不確定要因を考慮すれば、2002年の両サイトにおける水収支は観測項目によってよく説明されている。

◆生態系二酸化炭素収支および土壌呼吸長期観測

カラマツ林と伐採跡地において、渦相関法による生態系二酸化炭素収支とチャンバー方による土壌呼吸量の長期観測をおこなった。カラマツ林では乾燥のため光合成、呼吸ともに減少したが、両者の減少量が均衡したため、夏季の二酸化炭素収支は115 gC m⁻²の吸収と例年と大差なかった。伐採跡地の夏季の二酸化炭素収支は192 gC m⁻²の放出で、地表植生回復に伴う光合成によって前年よりも放出量が30%減少した。土壌呼吸量は地温に強く依存したほか、乾燥日に小さく、降雨後数日間には高かった。乾燥日には夜間の結露による土壌への水分供給のため、土壌呼吸速度の日変化は特徴的パターンを示した。夏季の土壌呼吸量はカラマツ林が205 gC m⁻²、伐採跡地が179 gC m⁻²で、カラマツ林の方が大きかった。しかしカラマツ林の土壌呼吸の36%は根呼吸と推定されたため、微生物呼吸は伐採跡地の方が大きく、伐採前に蓄積した土壌有機物の分解が進んでいることがわかる。

月別CO₂吸収・放出量

単位: gC m⁻²

月	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
	伐採前	伐採後		森林	
	2000年	2001年	2002年	2001年	2002年
5	(+16)*	+50	+35	+20	+31
6	-82	+75	+53	-87	-82
7	-51	+94	+61	-36	-52
8	-28	+66	+50	-29	-24
9	+44	+39	+28	+13	+43
6-9合計	-117	+274	+192	-139	-115

*月後半のみ CO₂吸収 CO₂放出 CO₂放出 CO₂吸収 CO₂吸収

表1 二酸化炭素フラックス測定結果

森林機能班:

◆森林火災による炭素放出量の見積もり

ビリュイ街道沿い、ヤクーツクから52kmと62km地点の50年生前後のカラマツ林で火災によるバイオマスの変動を測定した。火災強度強とした林分でも表層有機物の焼失はL層で止まっており、強度中ではL層の38%しか焼失していない。立木は両区とも全て枯死しており、これが全て分解するとして、放出炭素量は強区で37tC/ha、うち林床有機物の占める割合は33%、立木バイオマスが強区より大きい中区では34tC/haで地表有機物はわずか

に6%弱であった。(表2)

◆カラマツ樹冠の光合成の日中低下

カラマツ林の二酸化炭素収支に関わるパラメタリゼーションを行うため、樹冠の光合成速度及び光合成速度を律速する環境要因の日変化をネレゲルおよびスパスカヤパッドで調べた。

カラマツ樹冠における光合成速度(炭素吸収)は午前8時ごろに最大となり、5-6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。しかし、光合成速度はすぐに低下を起こしだし、午後には光合成速度が1-2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで低下した。このように、カラマツ樹冠ではカラマツ自身の持つ光合成能力を十分に発揮できていないことがわかった。その原因として、日中における高温と空気の乾燥が考えられた。

火災強度		下層植生 (g m^{-2})	粗大有機物 (g m^{-2})	L層 (g m^{-2})	(F+H)層 (g m^{-2})	有機物合計 (g m^{-2})	林床炭素量 (g C m^{-2})	樹木炭素量 (g C m^{-2})	放出炭素量 (g C m^{-2})
強	焼失量	171	845	1194	179	2389	1246	2484	3730
	(焼失率)	(100)	(93)	(95)	(9)	(56)	(68)	(100)*	
中	焼失量	174	129	493	0	551	188	3199	3387
	(焼失率)	(100)	(78)	(38)	(0)	(16)	(15)	(100)*	

*火災で直接焼失した部分は24%であるが、立木は全て枯れているので全て分解するとして計算した

表2 火災による二酸化炭素放出見積もり

森林土壌班：

森林火災の前後および火災中の温室効果ガス(CO₂、CH₄、N₂O)フラックスを比較することを目的とした。ヤクーツク近郊Viluy (62° 02' N、128° 49' E)の森林において、火災をうけていない地点を対照区に、燃焼中区、数日前に火災にあった燃焼直後区、2ヶ月前に燃焼した燃焼区の4地点においてチャンバー法でCO₂、CH₄、N₂Oフラックスを測定した。この4地点は100×100m内に互いに近接している。対照区と燃焼区で深度別の温度と水分率の測定、層位別の土壌理化学性を分析した。

燃焼区では対照区に比べ表層でpH、EC、交換性のCa²⁺が高く、これは火災によって灰が供給されたためであると考えられる(表3)。また対照区より燃焼区で融解深度が増し、土壌温度、水分率ともに高かった。これは植物による水吸収が低下し地中熱流が増えたことと、火災後の降雨が土壌表層に保持されたためかもしれない。燃焼中区のガスフラックスは対象よりCO₂で千倍、CH₄で10万倍に増加し、N₂Oでは吸収されていたものが著しい増加に転じた(表4)。燃焼直後、CO₂フラックスは1/5に低下したが、2ヶ月で60%程度回復した。CH₄フラックスは燃焼直後には放出に転じたものの、2ヶ月で再び吸収を示した。N₂Oフラックスは燃焼直後は放出に転じ、2ヶ月たってもその傾向は続いていた。これらは燃焼による根の焼失と、土壌微生物の死滅、微生物相の変化により生じると思われる。今後の課題である。

表3 対照区土壌断面

深さ 上端 下端	層位	土性	固相	液相	気相	pH (H ₂ O)	EC	交換性陽イオン				CEC	BS	C	N	C/N	
						1:2.5	1:5	Na	K	Ca	Mg	%	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		
cm			%				mS m ⁻¹	cmol(+) kg ⁻¹									
-6	-4	L				4.79*	19.95*	0.38	2.30	17.4	7.0	100	27	472	9	55	
-4	0	F				4.95*	37.7*	0.66	4.72	23.0	7.4	119	30	425	15	29	
0	3	HA	S	7	3	90	5.24	17.6	0.84	1.16	17.3	4.0	110	21	174	6	30
3	7	AB	S	30	14	56	6.16	6.7	0.59	0.32	6.1	1.7	39	23	27	1.1	25
7	25	BC1	S	59	11	30	6.77	1.8	0.14	0.18	2.3	0.9	16	21	6	0.5	10
25	60	BC2	S	62	15	23	6.99	1.5	0.12	0.15	1.4	0.6	9	25	3	0.4	7
60+		凍土															

*) 1 : 20

表4 土壌からのCO₂、CH₄、N₂Oフラックス

	CO ₂ flux			CH ₄ flux			N ₂ O flux		
	ave	min	max	ave	min	max	ave	min	max
	mg C m ⁻² h ⁻¹			ug C m ⁻² h ⁻¹			ug N m ⁻² h ⁻¹		
対照区	115	87	136	-15	-28	-8	-0.5	-2.6	1.1
燃焼区	79	62	99	-13	-16	-11	4.4	0.2	6.4
燃焼直後	20	0	66	1	-15	11	5.6	1.3	16.0
	g C m ⁻² h ⁻¹			g C m ⁻² h ⁻¹			mg N m ⁻² h ⁻¹		
燃焼中	184	35	286	1.4	0.4	2.3	100	2	291

シミュレーション班：

◆調査と森林火災のモデルの構築

【目的】現地調査に基づく森林火災シミュレーションモデルの構築と炭素放出量の評価

【調査地】ネレゲルの北緯62度17分59秒、東経129度30分12秒に位置するカラマツ林

【結果】100m x 100m区画にある立木の本数・胸高直径・燃焼度および倒木の本数・長さ・方向・燃焼度を測定し、セル・オートマトン法の確率モデルを用いて、森林火災の発生する前の森林を計算機上に再現した（図1）。つぎに、有機層の火災モデルを構築し、風による倒木モデルを作成し、森林火災のシミュレーションを行なった（図2）。その結果、燃焼度をパラメータとした胸高直径分布の測定値（図3(a)）とシミュレーション結果（図3(b)）との良い一致をみた。さらに、有機層火災モデルのシミュレーション後の炭素固定量変化およびその後の森林火災による炭素固定量の変化を調べたのが、図4である。これより、大気に放出した二酸化炭素の量は、約5.1 [t/ha] となることが示され、森林班による測定データに基づく結果と一致することが分かる。

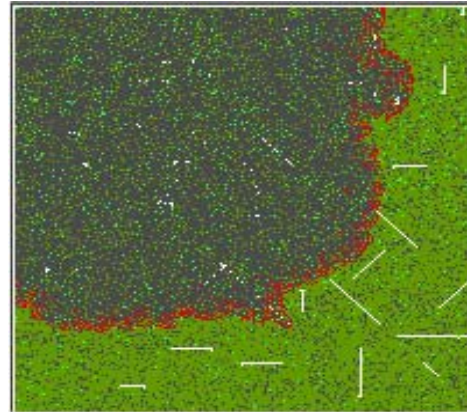
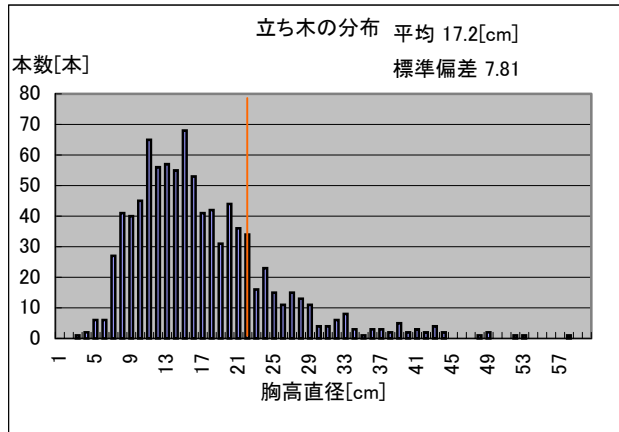


図1 測定データ(立ち木の本数)

図2 延焼シミュレーション結果

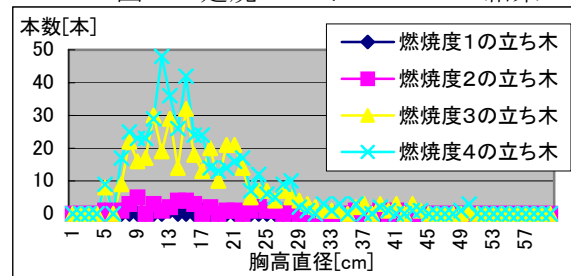
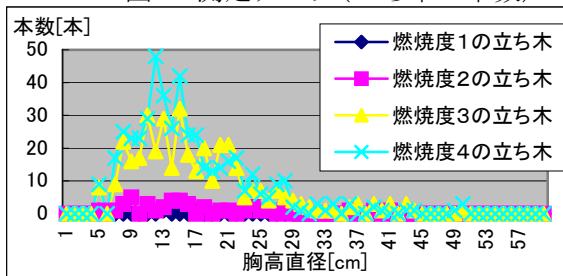


図3 (a) 燃焼度分布 測定データ

図3(b) シミュレーション結果

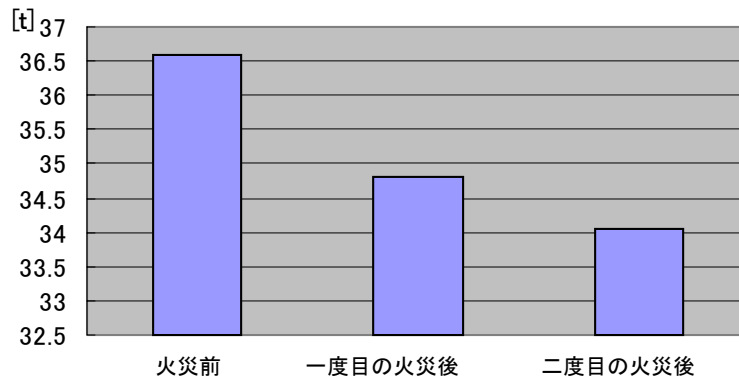


図4 火災による炭素固定量の変化

インフラグループ:

アラスカサイトでのパイプライン挙動観測の主な内容は以下の通りである。

- 1) 新規追加計測項目の計測実施 (パイプ埋設深度、埋戻し土飽和度計測等)
- 2) 既往計測データの精度 (信頼度) 精査 (温度計埋設深度計測、ひずみデータの温度・圧力ドリフト検定等)
- 3) 実挙動を踏まえた永久凍土とガスパイプラインの相互作用の検討 (永久凍土表面の深度分布実測、活動層内温度分布計測、室内凍土試験等の実施、およびパイプ境界部に発生するパイプ内分布加重の評価およびこれに対抗するパイプの浮き上がり抵抗算定法の検討)

上記1)、2)は基本的にはパイプライン埋設時の施行記録の誤記載および施行管理の不備により発生した追加作業である。すなわち、実験設備の建設管理における施行記録に示された諸計測項目の初期値や初期条件が不正確であったために発生したものである。このため、3)の作業を一時中断し、独自に実験開始時点の様々な状況を類推し、現地でアラスカ大学の協力の基その確認作業を実施した。この結果、一応実験開始時点の初期条件の多くは今後の検討に耐える信頼性を確保できたと考える。しかしながら、施工管理の不完全さから発生した、1)パイプの埋設深度の誤り、2)パイプの埋設土の保水状況の誤り、3)温度計埋設深度の誤りの3点は実験の品質および解析精度への悪影響を完全に払拭することは困難と考える。

検討事項3)に関しては、1)、2)作業により遅れたが、地盤の凍上によるパイプ凍上量評価法およびこれによるパイプに発生する分布加重の評価法を提案するに至った。

3. 研究実施体制

永久凍土攪乱影響観測グループ

- ①-(1) 永久凍土班 福田 正己 北海道大学低温科学研究所 教授
- ①-(2) タワー観測班 町村 尚 大阪大学工学研究科 教授
- ①-(3) 森林動態班 高橋 邦秀 北海道大学農学研究科 教授
- ①-(4) 大気化学班 井上 元 環境庁国立環境研究所 総括研究官

②研究項目

- ・永久凍土の動的な変化についての現地観測
- ・森林火災による森林の炭素吸収機能の変化観測
- ・森林火災及びその他の攪乱による温暖化ガスの放出観測
- ・永久凍土（地中過程）－森林植生（地表面過程）－大気組成（大気過程）の相互作用の解明

予測技術グループ

- ①-(1) リモートセンシング班 鷹尾 元 森林総合研究所北海道支所 主任研究官
- ①-(2) 予測モデル班 山崎 孝治 北海道大学地球環境科学研究科 教授

②研究項目

- ・リモートセンシング手法による現象の空間的・時間的なスケールアップ作業
- ・現地での相互作用と陸面過程の掌握
- ・将来予測のための大気動力学のモデルの開発
- ・将来予測のための炭素循環収支モデルの開発
- ・上記モデルの結合による将来への影響予測と抑制技術適用効果の事前評価

森林保全技術開発グループ

- ①-(1) 社会評価システム班 工藤 一彦 北海道大学工学研究科 教授
- ①-(2) 森林火災班 早坂 洋史 北海道大学工学研究科 教授
- ①-(3) シミュレーション班 本間 利久 北海道大学工学研究科 教授

②研究項目

- ・森林火災の影響とその発生抑制のための早期警戒システム開発
- ・ライフサイクルに基づく抑制効果の事前評価方法の開発

インフラ保全技術開発グループ

①大橋 一彦 新日鐵エネルギーエンジニアリング事業部 営業担当部長

②研究項目

- ・合理的で安定したパイプライン敷設技術開発
- ・廃タイヤを応用した地下パイプラインの安定処理技術開発

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- Brouchkov A. and Fukuda M. (Hokkaido Univ.) : Preliminary Measurements on Methane Content in Permafrost, Central Yakutia, and some Experimental Data. Brouchkov A. and Fukuda M. Permafrost and Periglacial Processes. Volume 13, Issue 3, 2002, pp. 187-197.
- Iwahana, G. (Hokkaido Univ.), Machimura, T. (Osaka Univ.), Kobayashi, Y. (JST), Fukuda, M. (Hokkaido Univ.) and Fedorov, A. N., Comparison of the surface energy balance conditions in different stages after forest disturbance in Yakutsk region, eastern Siberia. *Proceedings of the Tenth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2001*, in press, 2003.
- Kobayashi, Y. (JST), Saito, H., Fukuda, M. (Hokkaido Univ.) and Fedorov, A. N. (2003). Comparisons of hydraulic conductivity between intact, watered and slightly burnt larch trees in Eastern Siberia. *Proceedings of the Tenth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2001*, in press, 2003.
- Machimura, T., Kobayashi, Y., Iwahana, G., Fukuda, M., Goto, K. and Fedorov, A. N., Seasonal variation of ecosystem carbon dioxide exchange over intact, cut and burnt larch forests in east Siberia. *Proceedings of the Tenth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2001*, in press, 2003.
- 早坂洋史(北海道大学)、地球規模のバイオマス火災と地球温暖化、安全工学、Vol. 41, No. 3, pp.163-169, 2002.
- 近久武美、菱沼孝夫、長岡宏和、シベリアの炭酸ガス収支に及ぼす森林火災の影響評価モデルと基礎データ、エネルギー資源学会誌研究論文、Vol. 23, No. 3, pp.307-312, 2002.
- 近久 武美（北海道大学）、森林の二酸化炭素吸収と森林火災影響のモデリング、エ

エネルギー・資源学会誌、Vol.24, No.2, pp.19-23, 2003.

- S. Akagawa, S. Huang, T. Ono, T. Tanaka, A. Oba, K. O'hashi, and M. Fukuda, Sudden Up-Lift of Buried Chilled Gas Pipeline Monitored at the Boundary of Permafrost and Non-permafrost, Proceedings the 5th International Symposium on Permafrost Engineering, Vol.1, pp.125-129, 2002. 9, Yakutsk.

(2) 特許出願

該当なし