研究論文

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

Modeling of Forest Fire Effect on CO_2 Cycle in Siberia and Basic Data for the Analysis

近久武美* ・菱沼孝夫** ・長岡宏和***
Takemi Chikahisa Yukio Hishinuma Hirokazu Nagaoka

（原稿受付日2001年４月６日，受理日2001年10月18日）

Abstract

Forest in Siberia plays important role for absorbing carbon dioxide. However resent increase in forest fires, due to both human negligence and global warming, appears to cause significant damage on the forest. The present research tries to establish simulation model, which enables to predict forest fire effect on the long-term balance of the land types and on the carbon budget over thousand years. The paper presents basic idea of the model, and data necessary for the analysis are also summarized. Then the paper shows an example of simulation result for the scenario of doubled fire rate and increased temperature by 2.4 deg. C in 100 years. The result shows significance of forest fire on the net carbon flux, which stays at the present level with sensitive balance of large positive and negative fluxes. It was also shown that the forest area keeps decreasing over a thousand of years even after the fire rate and temperature become constant. This implies that the change of land feature is quite slow and it can be irreparable situation when the change is anticipated.

１．はじめに

シベリアの年降水量は砂漠地帯に相当するわずか200mm程度であるが，永久凍土によって土壌水分が維持され，世界有数の森林帯（シベリアタイガ）が成立している．ここでは土壌有機成分の分解が低温で遅いため，熱帯林に比べ炭酸ガス吸収に大きな役割を果たしていると言われている．しかし，近年，地球温暖化に加えて人為活動に伴う森林火災が急激に増加し，永久凍土が撹乱を受けて，シベリアタイガは炭酸ガスの放出源に転じつつあると危惧されはじめている．

本研究は科学技術振興事業団による永久凍土撹乱の影響調査に関するプロジェクトの一環として，森林火災の影響評価モデルを作成しようとするものである．まず本報では，その基本モデルとなる地目別面積変化モデルと炭酸ガス収支モデルの概要を報告するほか，これまでに収集した主要な基礎データを紹介する．

本論に先立ちシベリアの概況を述べると，旧ロシアの森林面積は1996年において７億6,400万haで，世界の全森林面積の22%を占めている[1]．また旧ロシアは大きく４つの地域に分かれており，レナ川流域以東を極東，エニセイ川流域を東シベリア，オビ川流域を西シベリア，さらにウラル山脈以西をヨーロッパロシアと呼ぶ．このうち本研究では比較的森林面積の広い極東地域に焦点を当て評価を行った．

シベリアでは森林火災により，多い年には年間200万ha以上の面積が焼失している．FAO（国際連合食糧農業機関）によると過去30年間（1964年～1994年）でロシアの森林は９億1,300万haから８億1,008万haへと11.3%減少した

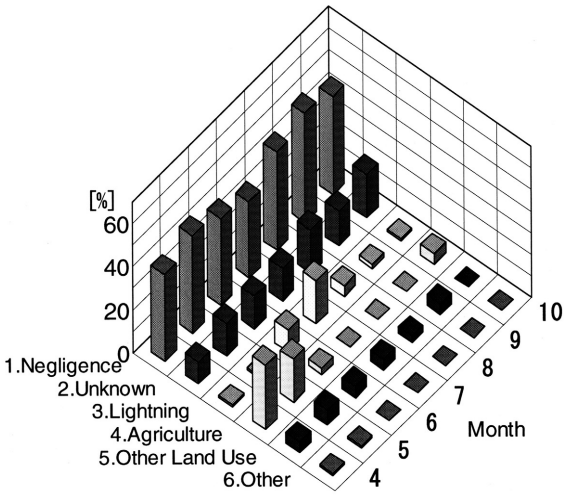

図１ 旧ロシア全体における森林火災原因割合[3]

*北海道大学工学研究科機械科学専攻助教授
** 〃 〃 教授
*** 〃 〃 修士課程
〒060-8628 札幌市北区北13条西８
E-mail：takemi@eng.hokudai.ac.jp

エネルギー・資源学会第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2001年１月25～26日）にて発表

と報告されており，これは日本の国土面積（3,770万ha）の約2.7倍にも達する[2]．森林破壊が顕著といわれている熱帯南アメリカでの減少は1.3%に過ぎないことから，ロシアでの森林破壊の深刻さがわかる．**図1**はシベリアにおける火災の原因別頻度を月ごとに示したものである[3]．自然火災は森林の更新に有用であることは既に知られているが，シベリアでは落雷などの自然要因による森林火災に比べ，火の不始末などによる人為的森林火災が著しく多いことがわかる．火災の頻度が多くなり過ぎると，森林の更新の前に永久凍土層が撹乱を受け，湿地や草地化する頻度が高くなると言われている．

2．モデルの概要

2.1 地目別面積変化モデル

森林火災は樹木構成，風向き，気象条件などにより様々に変化し，厳密なモデリングを行う事は容易ではない．しかし個々の風向き等の局所的な因子は，年間の総森林火災統計には通常大きく影響しない．そこで本研究では，個別地域の厳密なモデリングを行う代わりに，**図2**に示すように極東地域面積を森林，火災跡地，草地・疎林，沼地の地目に分け，その統計上の空間で炭素収支や火災頻度などを扱うものとした．なお，森林は林齢別にさらに7つのカテゴリーに分割した．これは林齢によって葉の茂り状態，光合成能力，樹木数密度あるいは土壌状態などが異なるが，同一林齢では諸条件が類似しており，一括して扱い得ると考えたためである．

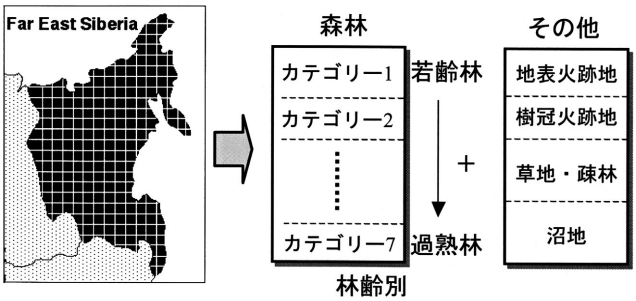

図2　林齢および地目面積に基づく統計解析コンセプト

図3は本モデルにおけるカテゴリーごとの面積移動経路を表したものであり，それぞれ所定の年間確率で変化が生じるものとした．火災はその強度により林床のコケ類や潅木が燃える地表火と，森林全体が燃える樹冠火に分けた．森林面積に対して一年当たりに火災が発生する面積確率をP1として与え，このうち樹冠火となる確率をP4，地表火となる確率を（1-P4）として与えた．この各確率は林齢ごとに与えられるように設定したが，統計データの不足から今回はいずれも同一な確率を与えた．この火災跡地はその後数年間同様な状態に保たれた後，それぞれの火災状態に応じて次の変化確率が与えられるものとした．地表火ではダメージが弱いため火災前の林齢カテゴリーに戻る場合が多く，その確率をP5とした．一方，樹冠火では全て焼失するため，P6の確率で更新するものは全て最若年のカテゴリーに移動するものとした．

森林が更新しなかったものは草地・疎林になるか，または凍土に含まれていた氷が融けて大地が沈下し，融解水が集積して沼や湖になる．この間のそれぞれの変化ルートの確率を**図3**のように与えた．また一旦，沼地あるいは湖となった土地はアルカリ性土壌となるため森林が更新しづらく，その確率をP8，P9とした．

一方，それぞれの森林は成長により林齢カテゴリーを若齢から過熟林へ順次移動するほか，一部は確率P3で枯死する．枯死したものは通常そのまま更新できる場合が多いので，全て若齢林に移動させた．各カテゴリー間の移動は，事例発生件数が十分多いと考えられるので，確率に比例して各カテゴリーの面積を振り分けた．

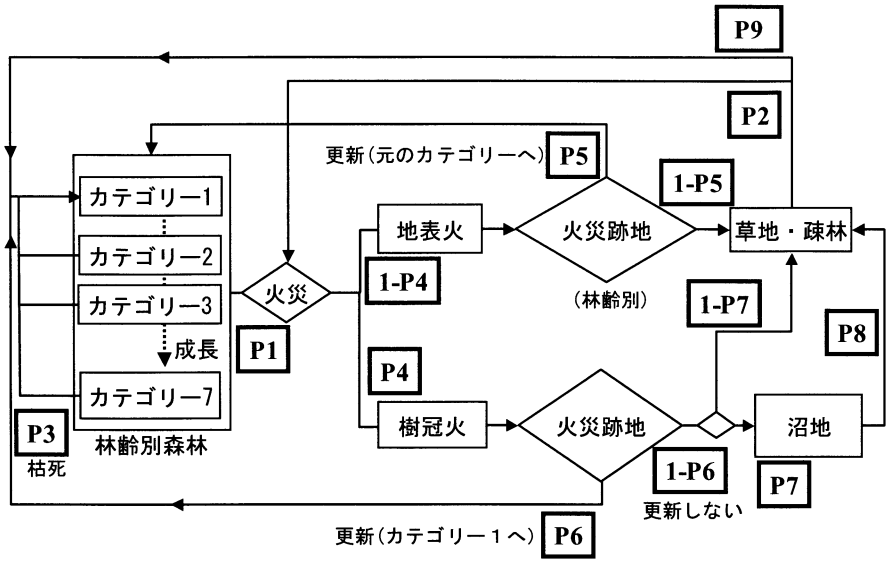

図3　本モデルにおけるカテゴリー間の面積移動変化

各確率は気温，降水量，林床植生厚さ，土壌含水率等の関数となるが，今回は現状に最も適合する結果を与える値を探索することから始めた．

2.2 単位面積あたりの炭素収支モデル

シベリア全土における炭酸ガス放出量を求めるため，各地目別カテゴリーの単位面積（ha）あたりの炭素バランスモデルを作成した．**図4**は森林における炭素バランスの経路を示したものであり，光合成と呼吸により大気中と炭素交換を行っている．また，葉や枝あるいは枯死した樹木が堆積したリターと呼ばれる地表層やその下の土壌層では，微生物によって有機物が分解され，呼吸として大気中に炭酸ガスが放出される．これらの収支により森林部の大気の炭素増加率［tC/ha/year］は式（1）のように表せる．

$$\dot{g}_a = -\left(\dot{g}_f\right)_p + \left(\dot{g}_f\right)_{rm} + \left(\dot{g}_f\right)_{rg} + \left(\dot{g}_{lt}\right)_r + \left(\dot{g}_s\right)_r + \left(\dot{g}_b\right) + \left(\dot{g}_i\right) \quad \cdots (1)$$

記号の説明は**表1**に示した通りである．右辺の$(\dot{g}_f)_p$は樹木の光合成による吸収量を表しており，$(\dot{g}_f)_{rm}$および$(\dot{g}_f)_{rg}$は樹木の維持呼吸および成長呼吸による放出量，$(\dot{g}_{lt})_r$はリター層からの微生物呼吸による放出，$(\dot{g}_s)_r$は土壌層からの微生物による呼吸，$(\dot{g}_b)$は森林火災による大気への直接放出，$(\dot{g}_i)$は永久凍土融解によるメタンおよび炭酸ガス放出量を表している．このうち，光合成による吸収量$(\dot{g}_f)_p$，樹木の維持呼吸量$(\dot{g}_f)_{rm}$および成長呼吸量$(\dot{g}_f)_{rg}$は次式により与えた[4)5)6)]．

$$\left(\dot{g}_f\right)_p = C_p \times f_1(Ye) \times f_2(T_a) \times f_3(\alpha_w) \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\left(\dot{g}_f\right)_{rm} = C_m \times f_4(m_f) \times f_5(T_g) \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\left(\dot{g}_f\right)_{rg} = C_g \times \left[\left(\dot{g}_f\right)_p - \left(\dot{g}_f\right)_{rg}\right] \quad \cdots\cdots (4)$$

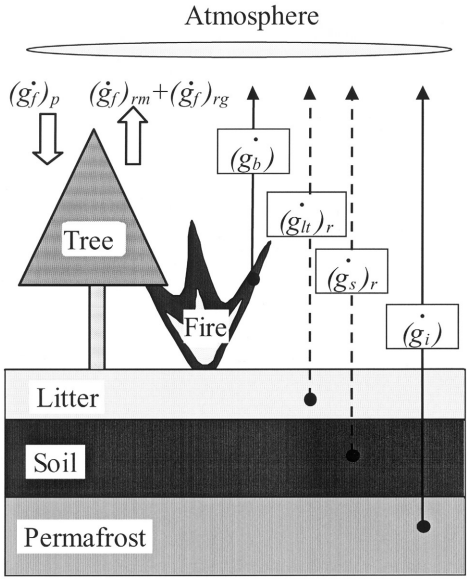

図4 森林における炭素収支モデル

表1 本モデル式における記号説明

$\dot{g}_a$	: Carbon balance in atmosphere in year	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_f)_p$	: Forest photosynthesis	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_f)_{rm}$	: Forest maintenance respiration	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_f)_{rg}$	: Forest growth respiration	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_{lt})_r$	: Respiration in litter	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_s)_r$	: Respiration in soil	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_b)$	: Direct fire emission	[tC/ha/year]
$(\dot{g}_i)$	: Carbon emitted from the permafrost	[tC/ha/year]
Ye	: Age of Trees	[year]
T_a	: Atmospheric temperature	[℃]
T_g	: Soil temperature	[℃]
α_w	: Mean water content in soil	[%]
m_f	: Mass of trees	[t/ha]
C_p, C_g, C_m	: Coefficients	

式（2）は森林の光合成を表したものであり，林齢Y_e，気温T_aおよび土壌水分量α_wの独立関数積として表現した．すなわち，単位面積当たりの樹木数密度や葉量は林齢によりほぼ決まるので，それらの影響を全て$f_1(Y_e)$とした．関数f_1には林齢60年で最大となった後，若干低下し，以後一定となるような関数を，f_2やf_3にはそれぞれ光合成が最大となる気温や水分量があるので，上に凸となるような関数を与えた．いずれの関数も最大値が1となる無次元関数であり，C_pは最大光合成条件の炭素吸収量を意味している．一方，日射量の影響等は同一の地域を対象としていることから一定と考え，係数に含めた．他方，維持呼吸量は式（3）のように単位面積あたりの森林炭素量m_fならびに土壌温度T_gの関数となる．また，成長呼吸量は実質的な成長量，すなわち光合成と成長呼吸の差に比例するので，式（4）を与えた．以上の関数形は文献4)，5）等を参考に決定した．

同様な手法により，リターならびに土壌中の呼吸量は蓄積されている有機物量に比例する一方，地温および水分含有率の関数として与えた[4)5)6)]．

3．基礎統計データ

3.1 地目別面積

モデルの初期値ならびに確率を決定するために基礎統計データを文献より収集した．**図5**は極東における地目別面積を表したデータである[7)]．森林面積を表す立木地が274百万haあり，草地・疎林カテゴリーに相当する疎林木地（立木密度が10%程度以下の土地）と裸・荒廃地は合わせて55百万haある．また，山火事跡地は19百万haで，これは東西シベリアと極東を合わせた山火事跡地の約70%を占める．モデルでは伐採跡地を加えたものを火災跡地として扱った．また，湿地と内水面を合わせた44.2百万haがモデ

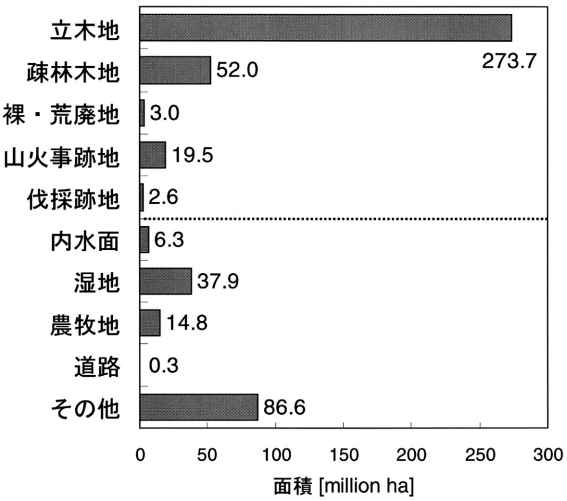

図 5　極東シベリアにおける地目別面積[7]

ルにおける沼地に相当するものとして扱った．

表 2 は森林の林齢区分を示す[7]．1 林齢区分の長さは樹種ごとに定められており，極東では約60%が林齢100～120年生で成熟するカラマツであるため[7]，1林齢区分を20年とした．**図 6** は極東における森林面積に対する火災面積比である[7]．極東における年間火災面積は旧ロシアの公式統計によると31万haとされているが，多くの西側森林火災研究者はこの数値を過小評価としており，極東全体の火災面積は森林面積の0.75%にあたる205万haと推定している．

永久凍土地帯では，地表面の植生は地衣類や潅木が多く，乾燥しているため火がつきやすいが，火力が弱く樹冠まで燃えてしまう事は少ない．これら森林火災の約77%が地表火，約22%が樹冠火，残りが地中火である[8]．火災後の森林への更新の成否は，その地域の種子生産，稚樹群の芽生えと成長の状態でおよそ決まり，火災により地表のリター

表 2　森林の林齢区分[7]

	若齢		中齢	成熟移行林	成熟		過熟林
林齢区分	1	2	3	4	5	6	7

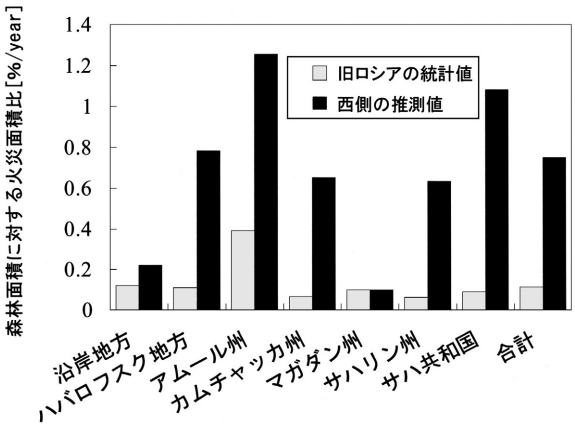

図 6　極東シベリアにおける年間の森林火災面積比率[7]

表 3　火災の有無による炭素バランスの比較[11]

地点	NPP	Soil respiration			NEP
		total	root	microbe	
	a	b(=c+d)	c	d	e(=a-d)
未撹乱カラマツ林	1.67	2.89	2.51	0.38	1.29
カラマツ林焼失地	0.3	1.18	0	1.18	-0.88

tC / ha / year

表 4　火災による炭酸ガス直接放出量の年平均値(1988－1992)[12]

	Area [million ha]	Emission [million tC/year]	Emission in unit area [tc/ha/year]
Crown fire	0.24	5.1	21.3
On-ground fire	1.16	13.0	11.2
Total	1.40	18.1	12.9

層が鉱質土層に達するまで完全に焼失した方が更新樹が良く芽生える．さらに，芽生えには十分な土壌水分も必要である[9]．なお，森林が焼失し，凍土の融解がはじまってからアラスと呼ばれる窪地が形成されるまでの年月は数十年から1000年を超えるオーダーと言われている[10]．

3.2 単位面積あたりの炭素収支

森林の光合成と呼吸量の差で表される正味吸収量はNPP（Net Primary Production，純一次総生産）と呼ばれ，森林資源の増加量を表す．そこからさらに土壌の微生物による呼吸を差し引いた値はNEP（Net Ecosystem Production，生態系純生産）と呼ばれ，土壌－植物系が大気から吸収する年炭素量を表す．**表 3** はヤクーツク市において，火災により撹乱を受けたカラマツ林と未撹乱のカラマツ林のNPP（純一次総生産）および土壌呼吸量を推定した値である[11]．土壌呼吸量は未撹乱カラマツ林の方が大きいが，これは森林の根による呼吸が大きく寄与しているためであり，森林の根による呼吸と土壌の微生物による呼吸との割合は87：13程度となっている．NEPは未撹乱カラマツ林で＋1.29tC/ha/yearで吸収が多く，一方，カラマツ燃焼林では－0.88tC/ha/yearで放出が多いと報告されている[11]．

表 4 は1988年～1992年のシベリア全土における火災により直接放出された年間平均炭素量を示したものである[12]．樹冠火により21.3tC/ha，地表火により11.2tC/haの炭素が放出されている．また，この期間の樹冠火対地表火の面積割合は17：83となっている．

4．解析結果の一例

現状の地目別面積は数百年以上に及ぶ長い期間のバランスの結果であり，さらに火災頻度や温暖化に対する人為的な影響はまだ初期段階であると考えられるので，**図 3** に示

した確率を調整し，現在の面積比率に収束する確率セットを求めた．**図7**はシベリアでの森林，沼地，草地，火災跡地面積の統計値と，特定の確率セットを与えた場合のモデル収束値との比較結果であり，**表5**中の「収束値」はその際の各確率値である．この確率セットにより，現状と一致した地目面積が得られることがわかる．各確率のうち統計から特定できるもの（**表5**中の下線を付した値で，＝は確度の高いデータ，－はやや確度の低いデータ）は優先的にその数値を与え，不確定なものは結果が現状とバランスする様に数値を与えた．なお，火災跡地に留まる年数は，10年とした場合に最も統計と一致した．

次にこの確率の確からしさを確認するために，それぞれの確率を10%上昇させて感度解析を行った．その結果を**表5**に示す．比較的大きな数字である確率P5を10%変化させた際に草地面積が大きく変化している以外は，いずれも小量の変化にとどまっており，感度はそれほど高くはない．したがって，上記の確率の組み合わせが正解から多少ずれていたとしても，解析結果はそれほど的外れなものとはならないと推定される．また，解の多価性については下線を付した確率を比較的確かなものとして先に与えているので，この近傍には多価性はなかった．

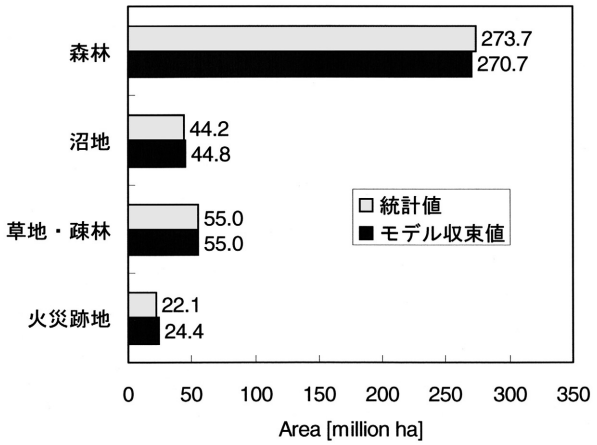

図7　統計値とモデル収束値との比較

表5　確率変数リストと感度解析結果

地目別面積 [million ha]							
				森林	沼地	草地・疎林	火災跡地
			統計値	273.7	44.2	55.0	22.1
			モデル収束値	270.7	44.8	55.0	24.4
確率	収束値[%]		変更値[%]	地目別面積変化率			
P1	0.75	→	0.825	-3%(↓)	+5%(↑)	+7%(↑)	+7%(↑)
P2	0.75	→	0.825	+1%(↑)	+1%(↑)	-5%(↓)	+1%(↑)
P3	0.35	→	0.385	0%	0%	0%	0%
P4	22	→	24.2	-2%(↓)	+6%(↑)	+4%(↑)	-1%(↓)
P5	88	→	96.8	+6%(↑)	0%	-29%(↓)	0%
P6	35	→	38.5	+1%(↑)	-3%(↓)	-3%(↓)	0%
P7	13	→	14.3	-1%(↓)	+6%(↑)	-1%(↓)	-1%(↓)
P8	0.1	→	0.11	+1%(↑)	-6%(↓)	+1%(↑)	+1%(↑)
P9	0.3	→	0.33	+1%(↑)	0%	-3%(↓)	0%

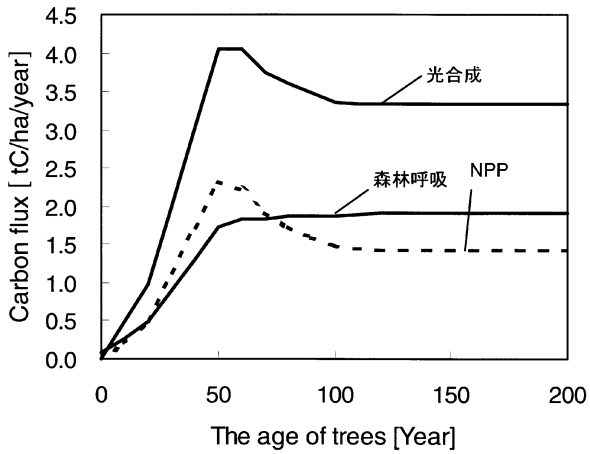

図8　林齢に対するNPPの計算結果の一例

図8は本モデル式に現状の平均気温を与えた際の，林齢別光合成量および森林呼吸量を示したものである．なお，平均気温には光合成が活発に行われる5月から9月までの値を与えた．林齢が成熟する100年以前に最大光合成能力を持つほか，中齢林のNPPは約2.5tC/ha/year前後と言われており[11]，また過熟林のNPPは葉量1.27tC/ha/year[11]に近いと推定されることから，光合成カーブおよび式（3）のC_mを調整し**図8**のような結果を得た．

以上のモデル条件を整えた上で，一例として火災確率の増加や気温の上昇が地目面積や炭素収支に対して及ぼす影響について解析を行った．**図9**は現在から100年後に火災確率が次第に増大しはじめ，200年後までの100年間で現状の2倍に火災確率が直線的に上昇し，以後一定となった場合のシナリオについて解析を行った結果である．なお，気候変化による気温や土壌水分量の影響を加味することは可能であるが，今回は一定とした．さらに，実際には種々の確率が複合的に変化するのが通例であるが，今回は第一段階として単一の要素の影響のみを抽出して，その効果の特徴を捉えるものとした．図では100年後から200年後にかけて急速に森林が減少する一方，火災跡地が増大している．しかし，その影響は沼地や草地にすぐには現れず，1000年以上にわたって徐々に沼地や草地が増大し，森林が減少することがわかる．したがって火災増加の影響が収束するには，数千年の年月がかかる特徴があると言える．

一方，**図10**は上記の火災増加シナリオに加えて，現在から100年後に気温が上昇し始め，その後100年間で2.4℃上昇した後，一定温度となった場合のシベリア全土における炭素収支バランスである．ただし，気温が変化すると土中水分量も通常変化するが，その効果は含めていない．なお，図では吸収項と放出項のいずれも正側にプロットした．正味吸収量からわかるように，現状ではシベリア全土で，森林は光合成により炭素を大量に吸収しているが，100年以

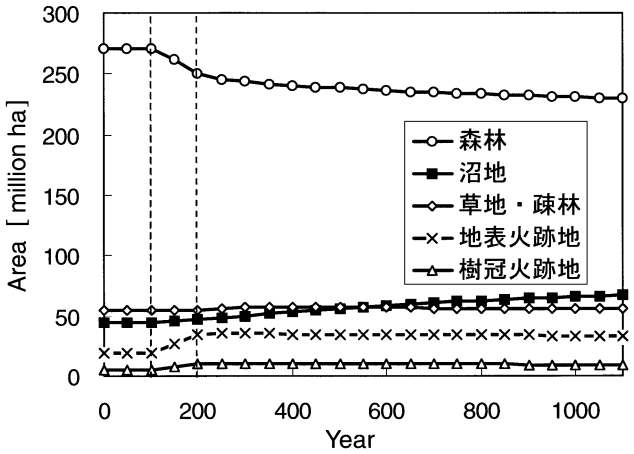

図 9　火災確率が100～200年後の100年間に直線的に現状の２倍となるシナリオに対する地目別面積変化

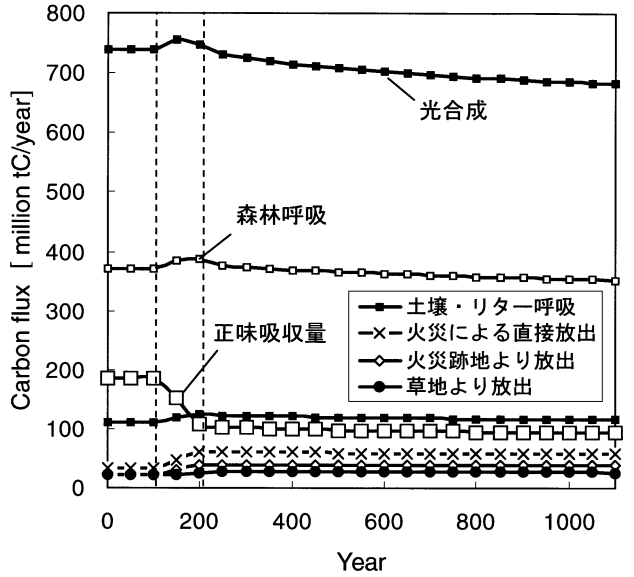

図10　100～200年後の100年間に火災確率が２倍，気温上昇が2.4℃となるシナリオにおける，極東シベリア全体の炭素収支バランス

降火災の増加による森林減少に加えて，火災による炭酸ガスの直接放出や，土壌呼吸および草地からの放出が増加して，全体的な正味の吸収量は大幅に低下することがわかる．火災確率や気温が一定となった200年以降はほぼ一定の炭素吸収量となっており，長期にわたって徐々に進行する森林減少の影響はそれほど大きく現れていない．ただし，本計算では徐々に増加する沼地からの炭素放出量が不明なため，計算に含めておらず，この値が大きければさらに炭酸ガス吸収量が減少することになる．

以上，炭素収支は大きな放出と吸収のバランスの上に成り立っており，わずかな火災による撹乱が収支バランスを大きく変え得る可能性が示された．

5．結　論

本研究において，シベリアにおける森林火災や永久凍土の変化が炭素バランスに及ぼす影響を評価するための基本モデルを作成した．また，解析に必要な基礎データを紹介したほか，火災確率や気温上昇の影響を解析した一例を示した．本モデルは局所的なモデリングをする代わりに，林齢を基本とした統計的な解析を行い，火災後の草地や沼地への面積変化を確率的に取り扱う点に特徴がある．計算負荷は極めて軽く，さらに種々の相互影響を含んだ関連解析が可能である．

今回一例として，火災確率が現状の0.75％から２倍の1.5％に増加し，同時に気温が2.4℃上昇する場合について解析を行った．その結果，炭酸ガス吸収量は現在の約半分となり，またその影響が千年以上にわたり沼地の増加という形で現れることが示された．すなわち，シベリアの炭素収支は大きな放出と吸収のバランスの上で成立しており，わずかな火災による撹乱が収支バランスを大きく変え得ること，またその影響は長期にわたって徐々に現れる特徴があることが示された．

以上，正確な予測を行うためにはさらに詳細なデータとモデリングが必要であるが，人為的な森林火災が自然のバランスを大きく崩す可能性があることを示したものと言える．

本研究は科学技術振興事業団の「温暖化ガスにかかわる永久凍土撹乱の制御技術」（主査福田正己）の一部として行った．

参 考 文 献

1）野口栄一郎；タイガ　生命溢れる奇跡の森－その破壊，(2000) 11，地球の友ジャパン．
2）福田正巳；シベリア永久凍土地域の森林破壊と温暖化ガス，北海道の林木育種，42-1 (1999)，4-9.
3）J.G. Goldammer et al.; Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia, (1996), Kluwer Academic Publishers.
4）T. Oikawa, et al.; Modeling carbon dynamics of a lucidophyll forest under monsoon climates, Global Environ.Res., (1998), 25-33.
5）A. Ito and T. Oikawa; A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970-1997, Climate Research, 15 (2000), 161-183.
6）長岡宏和，他２名;シベリアの二酸化炭素収支に及ぼす森林火災の影響評価モデル，第37回日本伝熱シンポジウム，１(2000)，179-180.
7）シベリア・極東地域　森林・林業協力指針策定調査報告書，日本林業協会，(1995).
8）高橋邦秀；シベリアタイガの森林は壊れているか，しゃりばり，㈳北海道開発問題研究調査会 (1999)，40-43.
9）ソ連科学アカデミーシベリア支部ヤクーツク生物学研究，ヤクーチアにおける山火事とその森林生態への影響，ナウカ，(訳高橋研究室)，(1979).
10）福田正巳；極地の科学，北海道大学図書刊行会，(1997)
11）高橋邦秀；森林火災が北方ユーラシアの生物圏・凍土圏の生物多様性と炭素循環に与える影響の研究，科学研究費補助金研究成果報告書，(2000).
12）J. Gordon, et al.; Full Carbon Account for Russia, IIASA, IR-00-021, (2000).