

## 特別共同研究

「寒冷圏における水・エネルギー・CO<sub>2</sub>循環と植生・雪氷がそれに果たす役割の研究」

研究代表者：兒玉 裕二

研究分担者：

原登志彦（北海道大学・低温科学研究所）

田中歩（北海道大学・低温科学研究所）

隅田明洋（北海道大学・低温科学研究所）

小野清美（北海道大学・低温科学研究所）

戸田 求（北海道大学・低温科学研究所）

石井吉之（北海道大学・低温科学研究所）

石川信敬（北海道大学・低温科学研究所）

鈴木和良（JAMSTEC・観測研究センター）

栗田 孝（北海道大学・低温科学研究所）

津滝 俊（北海道大学・低温科学研究所）

中井太郎（JST/CREST）

植村 滋（北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター）

小林 剛（香川大学農学部）

横沢正幸（農業環境技術研究所）

高田久美子（地球フロンティア研究システム）

渡辺 力（森林総合研究所）

### 研究目的

高緯度陸域における雪氷を含む水循環やエネルギー・CO<sub>2</sub>循環に関する解析が進み、各観測点においてそれらの特性が明らかにされつつある。しかしながら、寒冷圏での現象は様々な時間および空間スケールでおこっており、雪氷や寒冷地特性を持つ植生に強く影響を受けていて、未解決な問題が多い。本共同研究で「雪氷」や「北方林」が関与する水・エネルギー・CO<sub>2</sub>循環の特性を明らかにし、関連する分野との統合をめざし、相互作用系の研究を行う。すなわち、平成15年度まで続けられてきた特別共同研究「寒冷圏における大気－雪氷－植生相互作用の解明」（代表 原登志彦）をさらに継続発展させるとともに、気候システムにおいて寒冷圏陸域の雪氷や植生が果たす役割の研究を推進する。

## (1) 超音波風速計のAngle of Attack誤差

はじめに

超音波風速計はそれ自身の影響を受けた風速を測定している。特に水平からの角度 (Angle of Attack、以後AoAと省略する) が大きい風ほど、超音波風速計自身の影響を受ける。母子里の二つの境界層観測タワーで使用しているGill Instruments社 (UK) のSolent R3はAoAが $\pm 20^\circ$  の範囲内しか保証していない。草地などのような比較的平坦なところではこの範囲内の風がほとんどであるが、森林の樹冠上などではこの範囲外の風も多い。例えばカンバ林のタワーでは約16%、混交林では46%が $\pm 20^\circ$  の範囲外であった。

データ

データはvan der Molenら(2004)の論文で紹介されている風洞実験でのデータを使ってAoA誤差の補正式を改善し、その式を使って北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの雨龍研究林内にあるダケカンバ林のサイトと混交林のサイトのタワー観測で得られたデータを補正し、顕熱、潜熱、CO<sub>2</sub>フラックスを再計算した。

結果と考察

ここで得られた補正式はvan der Molenら(2004)のものの問題点を解決し、より使い易いものとなった。フラックスの再計算の結果、熱収支のclosure rateがカンバ林では6.5%、混交林では10.4%改善された。

これらのさらに詳しい結果は以下の論文にまとめられている。

Nakai, T., M.K. van der Molen, J.H.C. Gash, Y. Kodama: Correction of sonic anemometer angle of attack errors. *Agr. Fore. Meteorol.* 136, 19-30. (2006).

## (2) 森林構造と空気力学的パラメータ

はじめに

中立状態の水平風速の鉛直分布を表すのたために対数分布則が使われる。その中でdとz<sub>0</sub>で表される空気力学的パラメータと呼ばれるものがあり、それぞれ、地面修正量と粗度長と呼ばれる。これらのパラメータは森林の空気力学抵抗を計算する時などに必要で水循環の把握に重要な要素である。これらの空気力学的パラメータは森林構造を表す生態学的パラメータ (樹高、立木密度、葉面積指数 (LAI) など) と関係があると言われているが、その関係は明らかではない。これまで、dとz<sub>0</sub>を月ごとの平均的なLAIの変化と比較したところ、落葉によりLAIが大きく変化した10月から12月にかけて空気力学的パラメータdとz<sub>0</sub>は大きく変化しないことがわかった。森林を考慮した陸面モデルではdとz<sub>0</sub>はLAIの変化に強く依存している。そこでdとz<sub>0</sub>が着葉や落葉に対してなぜ強く反応しないのか、dやz<sub>0</sub>に対して葉よりも枝の構造が強く効いているのか、それとももっと別な森林構造が重要なのかを調べた。

## データ

北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの雨龍研究林内にあるダケカンバ林のサイトと混交林のサイトでタワー観測を行っている。ダケカンバ林のサイトは標高580mでおよそ南北にのびる尾根付近にある。ダケカンバは林齢約30年、樹高は約10mである。タワーの高さは20mで、タワートップに超音波風速計、16m、12mの高さに三杯風速計がある。混交林はトドマツとアカエゾマツの常緑針葉樹とカンバなどの落葉広葉樹が混交した林である。タワーの高さは30mで、カンバ林のタワーと同じようにタワートップに超音波風速計、25m、16mの高さに三杯風速計がある。

これら母子里のサイトのデータに加えてCRESTで観測を行っているヤクーツクのカラマツ林とアカマツ林でのデータも解析し、季節変化や樹種や地域の違いを総合的に表せるパラメータ化を目指した。

## 結果と考察

空気力学的パラメータ $d$ と $z0$ はLAIのみでは表すことが出来ないことが判った。また、立木密度と良い関係があることが判ったが、立木密度のみでは季節変化を表せない。そこで立木密度とLAIを組み合わせたパラメタラゼーションを行ったところ、母子里やヤクーツクといった地域の違いと季節変化をうまく表せることがわかった。今後は衛星データでは得ることの難しい立木密度を如何にして広域に見積もるかが課題である。

## (3)雪面からのCO<sub>2</sub>フラックス

### はじめに

CO<sub>2</sub>は温暖化効果気体の一つであるが、森林のCO<sub>2</sub>収支は大気のCO<sub>2</sub>濃度に大きな影響を与える事がわかっている。最近その量的な見積もりが求められている。特に北方林は大気CO<sub>2</sub>に対してsinkとなっているといわれているが、冬期の雪面からのCO<sub>2</sub>フラックスについてはあまり観測されてこなかった。この研究では雪面からのCO<sub>2</sub>フラックスを測定し、季節内変化や年間の収支に対する割合を求めることを目的としている。

## データ

北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの雨龍研究林内にある混交林のサイトと融雪観測そばのトウヒ林で、自動開閉チャンバー（技術部で作成していただいた）を使って雪面からのフラックスを測定し、また積雪下面と雪面の2ヶ所でCO<sub>2</sub>濃度の測定を行った。

## 結果と考察

冬期の雪面からのCO<sub>2</sub>フラックスは乾雪期には積雪の増加とともに減少し、融雪期になると大きく変動した。11月から4月まで総CO<sub>2</sub>フラックスはトウヒ林で114gCm<sup>-2</sup>、混交林で133gCm<sup>-2</sup>となった。チャンバーによる雪面でのCO<sub>2</sub>フラックスと雪面と積雪下面でのCO<sub>2</sub>濃度から見かけの拡散係数が計算された。乾雪期のCO<sub>2</sub>の拡散係数は積雪の空隙率と良い相関があったが、融雪期には無相関となった。融雪期のCO<sub>2</sub>の拡散係数は積雪表面の

含水率と良い関係にあり、融雪水との関わりが示唆された。混交林での積雪表面からのCO<sub>2</sub>フラックスは地表面からの年間総CO<sub>2</sub>フラックスの約23%であった。

#### (4)北海道のダケカンバ二次林に対する林床チシマザサ除去の影響 —ダケカンバの成長パターン—

はじめに

北方林は複雑な階層構造をもつ熱帯林とは異なり、林冠層と稚樹層からなる単純な構造であり、また林床植物が繁茂しているのが特徴である。特に二次林は構成樹種も少なく、単純である。多くの北海道の森林では、林床はササ類におおわれている。林床に密生するササ類の樹木に対する影響は、実生の定着を妨げることと、実生・稚樹・成木に供給されるべき水分や栄養塩を奪い取ることなどが考えられる。ササ類が樹木の実生の定着を直接左右することは数多く研究されてきたが、林床におけるササの繁茂が林冠木の生育状態にどのような影響を持っているかについては未知の点が極めて多い。とくに、ササと樹木の間の水や栄養塩などの競合は、林冠木の資源獲得の機構を変化させている可能性がある。

当グループはこれまでにササの除去実験により、ササの除去が 1) 林内における夏季の土壌水ポテンシャルを上昇させる（除去後1~2年目）、2) ダケカンバ林冠木の肥大成長、通導コンダクタンス、当年枝の伸長量・展葉数を増加させる（除去後3年目）、3) 土壌中の植物が利用可能な窒素を増加させる（除去後4年目）ことなどを明らかにしてきた。ササを除去することによって、ササとの競合が無くなり、ダケカンバ内の競争に変化をもたらすと考えられるので、ダケカンバ林冠木の成長、枯死といった動態を解析することは重要である。

本研究では、北海道北部のダケカンバ林（北海道大学 雨龍研究林）の林床に優占するチシマザサ群落の刈取りによる除去がダケカンバの個体群レベルで影響を与えているかを明らかにするために、1998~2004年の成長期後に胸高直径、樹高、生死の調査を行い、成長や枯死率などの個体群動態パラメータをササあり区とササ除去区で比較した。

#### 結果と考察

5年間で全てのプロットで密度が減少し、胸高断面積合計が増加した。全てのプロットは自然間引きをしながら、林分として成熟している最中の林分であるといえる。密度と死亡率の減少や増加の割合は18年生林分で顕著であり、処理間の差は顕著ではなかった。しかしながら、胸高断面積合計はササ区よりも除去区のほうが大きく、ササの除去は林冠木の生長パターンに影響を与えていることが示唆された。そこで5年間の直径成長と樹高成長を調べてみた。老齢林、若齢林ともに直径生長はササ区よりも除去区のほうが大きかったが、樹高成長は若齢林ではササ区が除去区よりも大きく、老齢林ではその差がほとんどなかった。このことからチシマザサを除去することによってダケカンバの成長パターンが異なることが判った。今後はこの差の要因について調査する予定である。

(5)北方森林動態の将来予測に向けた陸面モデルの開発 (II) 環境変化が百年後における森林の群落動態・物質収支に及ぼす影響

はじめに

北方林は地球全土の森林面積のおよそ3割を占める。今後、激変が予想される環境変化が高緯度を中心とした陸上生態系、特に北方林の分布域に与える影響は最も深刻であると指摘されている。その一方で、環境変化による北方林の分布の変化は、大気との熱・水・物質交換を通して大気環境へ影響を与えるフィードバック要因として働くと考えられる。したがって、北方林が気候変化に与える影響を定量的に評価し将来予測を行うため、植生動態を考慮した新しい大気-陸面モデルが必要である。このような背景の下、植生動態と陸域→大気へのフィードバックプロセスを加味した新しい大気-陸面モデル MINoSGI ( Multilayered Integrated Numerical Model of Surface Physics-Growing Plants Interaction, 開発者：渡辺力、横沢正幸、江守正多、高田久美子、隅田明洋、原登志彦) が開発された。現在、当研究室ではMINoSGI の北方森林群落への適用に向け、さらなるモデル開発を手がけている。

本報告書(2)でも記されているように、北海道大学雨龍研究林内に設置されたダケカンバ林分プロットでは、1998年より森林動態、ダケカンバの生理活性調査および気象観測が実施されている。これらの観測データを用いて、モデル中に含まれるパラメータを決定することができる。亜寒帯に特徴的な低温や乾燥などの環境条件に伴う北方森林群落の動態変化を定量的に記述し、また林床植物(ササ)が樹木の成長に及ぼす影響について評価することを目指している。MINoSGI ではまた、数百年後の森林動態や物質収支の定量的な評価を行うため、長時間スケール解析に対処可能なモデル開発が並行に行われている。今回は後者についての研究報告を行う。MINoSGI を用いて、常緑針葉樹であるスギ人工林を対象に幾つかの環境条件を想定した温暖化実験を行い、環境変化が40年後の森林群落の群落動態及び熱・物質収支に及ぼす影響についての結果・考察を記載する。しかしながら、現在開発中のMINoSGI には長期間への適用にあたり改良すべき点がなお残されており、また長期間の森林動態における未解明な生物過程についての定式化は暫定的なものである。したがって、本報告ではこれらの不確定性を認めながら上記の解析と考察を行うこととする。

計算条件

本研究ではWatanabe et al.(2004)と同様に名古屋大学稲武演習林の常緑樹(スギ)林分(対象面積400m<sup>2</sup>)を対象に20年間の数値実験を行った。使用したデータは名古屋大学稲武演習林の毎木データで勝野(1990)氏のご好意による。気象データは稲武のアメダスデータ(1980-1989)で、本解析ではこの気象データを繰り返して使用した。仮想群落の初期条件は400m<sup>2</sup>の敷地に最小樹高で平均個体重は0.03kg/本の苗木が0.5本/m<sup>2</sup>の初期密度で植栽されたこととする。初期条件で導入された個体以外の新規実生の定着によ

る更新は考慮されないと仮定した。モデルは20年後の毎木データに合うように調整された。

ここで取り上げる環境条件の違いは、CO<sub>2</sub>濃度については現在と同じ (controlled) と現在の2倍のCO<sub>2</sub>濃度 (elevated)、葉内窒素濃度指標値(V<sub>max</sub>)については普通 (V<sub>max</sub>=55)、その約半分 (V<sub>max</sub>=25) とその2倍 (V<sub>max</sub>=110) である。葉内窒素濃度指標値 (V<sub>max</sub>)は土壌中の窒素濃度の程度と考えてよい。

## 結果と考察

### (1) バイオマス (現存量) の変化

ここではバイオマスの計算結果の一例を示す。成長が早い環境 (V<sub>max</sub>が大きく高CO<sub>2</sub>環境) 時ほどバイオマスの増加量は大きく、高V<sub>max</sub>とともに、高CO<sub>2</sub>の影響が大きいことがわかる。

一般に森林においては、構成する各個体の成長とともに、光や水などの資源をめぐる競争が熾烈になり、競争に敗れた個体が枯死する「間引き」がおこるようになる。そのような状態のとき、同一種同齢の森林においては、森林全体の平均的な1個体あたりの重さが立木密度 (単位土地面積あたりの個体数) のおよそ $3/2$  乗に比例するという一定関係が樹種によらずに見られることが知られている (Yoda et al., 1963)。この関係を異なる環境条件下でモデルで再現できるか確かめてみた。成長が早い環境 (V<sub>max</sub>が大きく高CO<sub>2</sub>環境) 時は、群落全体の個体重量が小さい段階で自己間引きが始まり、環境条件の違いによらず、競争-密度効果の原則(自己間引きの法則)に従うことがわかった。

このように森林動態を取り入れた陸面モデルによって、“環境変化が起きた場合森林はどのように影響され、変化していくのか”を予測することができることが判った。しかしながら、モデルの出力はモデル設定に大きく依存してしまうので、モデル確からしさを検証できるデータセットの構築が重要である。つまり、稲武の演習林で得られたような長期のデータの集積がひつようである。また、北方林の20-50%は落葉林であり、今後はMINoSGIの落葉版の開発がふうようであり、そのためのパラメータの決定に寄与するデータの取得も重要である。また、この陸面モデルを完全にするためには土壌のモジュールも加えてリターの附加や土壌呼吸などの土壌の動態を記述できるようにしたい。

### (6) 森林での降雪遮断

#### はじめに

寒冷圏では、積雪の存在を無視できない。また、ロシアの東シベリアの大部分を覆う北方林が陸面状態として重要な要素であることが広く認知されている。寒冷圏の特徴として、北方林と積雪が混在する状態が一年の半分以上にわたり、北方林と積雪が水・エネルギー循環に与える影響を定量的に観測することが、寒冷圏での陸面モデルの改良やGCMモデルの精密化にとって重要となる。そこで、本研究では積雪期の北方林における降

雪遮断観測と風洞実験を行った。

#### データ

北海道北部に位置する北海道大学北方生物圏フィールド科学センター雨竜研究林の混交林の林内とその近くの開地にサイトを設け、それぞれに4mx4mの秤量型ライシメータを設置し、また2週間に一度積雪水量調査を行った。また、独立行政法人防災科学技術研究所の雪氷防災実験棟を利用し、定常条件下での樹体に付着する着雪量と降雪量の精密測定を行った。

#### 結果と考察

ライシメータのデータは現在解析中である。森林内と近くの開地の積雪水量の観測から、降雪遮断はおよそ20-30%であることがわかった。また、人工降雪実験で、樹冠に積もる雪の量はLAIの関数になることがわかった。今後、この結果を遮断モデルへの適用することを試みる。