

特別共同研究

「寒冷圏における水・エネルギー・CO₂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）

粟田 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）

加藤京子（北海道大学・低温科学研究所）

中井太郎（JST/CREST）

山田雅仁（北海道大学・低温科学研究所）

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/北海道大学・低温科学研究所）

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・CO₂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。本共同研究では、「雪氷」や「北方林」が関与する水・エネルギー・CO₂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。

観測サイト

母子里

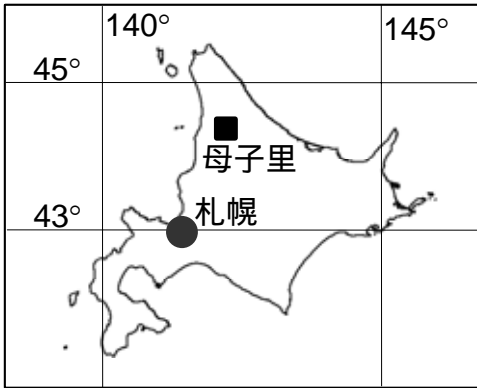


図1 母子里の位置

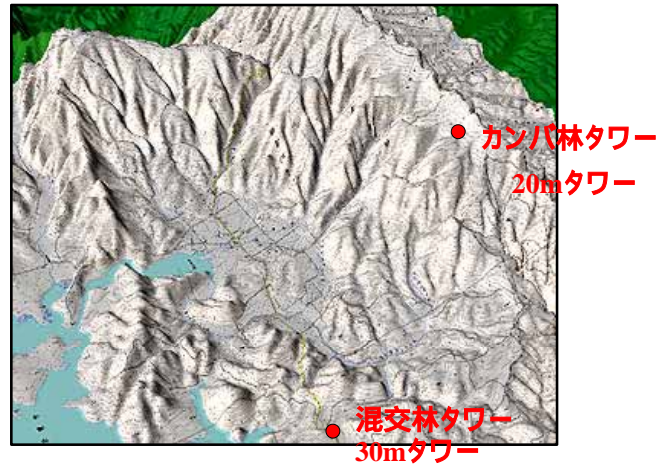


図2 混交林サイトカンバ林サイト

観測は主に北海道大学北方生物圏フィールド科学センター雨龍研究林内で行われた（図1）。この地域は北方森林帯の南限であり、冬期には積雪が多く寒冷な気候を示すが、シベリアほど寒冷ではなく、冬期過程の観測に適している。下層植生（ささ）が一様に繁茂していることが特徴的である。また、研究林内にあるためアクセス・ロジスティクスが容易あること、低温研水文気象グループや原研究室による長年のデータの蓄積があり、それらが利用できることなどの利点がある。

2003年に二つの森林気象観測タワーが、一つはカンバ林（タワー高20m）、もう一つは針広混交林（タワー高30m）に設置された（図2）。カンバ林のサイトは標高630m、そのプロット内の立木密度は2585本/ha、平均樹高は5.11m、平均胸高直径は5.9cmである（図3）。このサイトは1973年択伐後、地表の植生（主にササ）を掻き起こして除去、放置したところである。1998年より毎木調査を開始し、ササを除去したプロットも設定した。2003年に通年の気象観測を開始し、2005年からは樹液流量の観測も行っている。針広混交林のサイト（図2）は標高320m、そのプロット内の立木密度は4384本/ha、平均樹高は9.79m、平均胸高直径は7.6cmである（図4）。

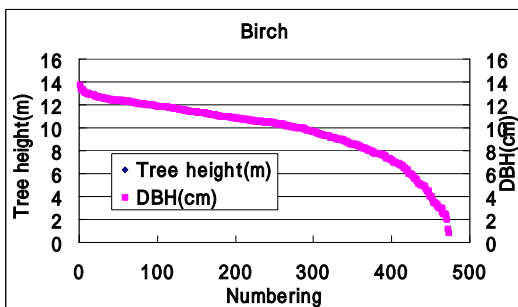


図3 カンバ林の樹高と胸高直径分布

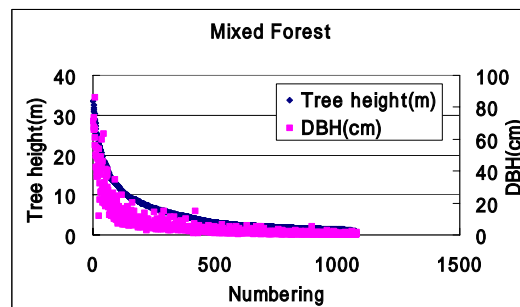


図4 針広混交林の樹高と胸高直径分布

これまでの成果

これまでの成果をまとめると以下ようになる。

1. 大気-森林相互作用
 - 1.1 森林構造と空気力学的パラメータ* 中井、隅田、兒玉
 - 1.2 空気力学的平均樹高* 中井、隅田、兒玉
 - 1.3 Surface Renewal Analysis による森林内乱流構造の解析 中井
 - 1.4 超音波風速計の angle of attack 補正とそのフラックスへの影響評価* 中井、兒玉
2. 大気 - 雪氷圏相互作用
 - 2.1 雪面からのCO₂フラックス* 粟田、兒玉
 - 2.2 降雪遮断に関する研究* 鈴木、津滝、兒玉
3. 大気 - 生物圏相互作用
 - 3.1 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 加藤京子、隅田、原
 - 3.2 蒸発散* 山田雅仁、原
4. モデル研究
 - 4.1 北方森林動態の将来予測に向けた陸面モデルの開発 - 落葉樹
戸田求、原
 - 4.2 降雪遮断モデル* 鈴木

今回は*印をつけたものについて概略をまとめる。

1) 森林における空気力学的特性のパラメータ化

ロシア・ヤクーツクのカラマツ林(YL), アカマツ林(YP), 北海道幌加内町母子里のダケカンバ林(MB), 針広混交林(MM), 愛知県瀬戸市の常緑落葉広葉樹混交林(SM)を対象に, 地面修正量 d , 粗度長 z_0 を観測した。樹高 h で標準化した $d/h, z_0/h$ にはサイト間で見られる相違と, 各サイトで見られる季節変化の 2 種類の変動が存在することが分かった。サイト間で見られる相違は立木密度に支配され(図 5), 各サイトの季節変化はPAIに支配された(図 6)。

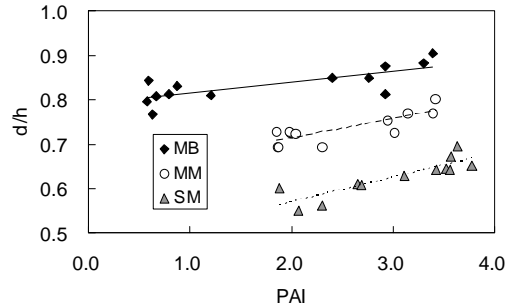
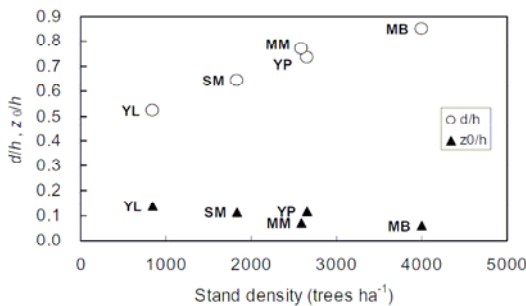


図5 $d/h, z_0/h$ の夏季代表値と立木密度の関係 図6 d/h の季節変化とPAIとの関係

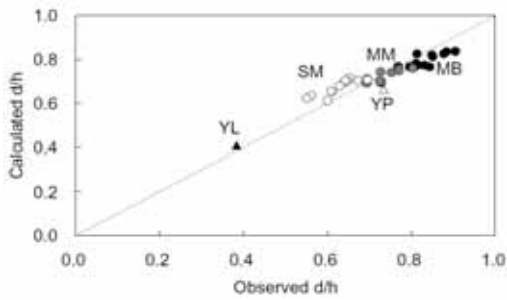


図7 d/hの実測値に対するモデルの計算結果

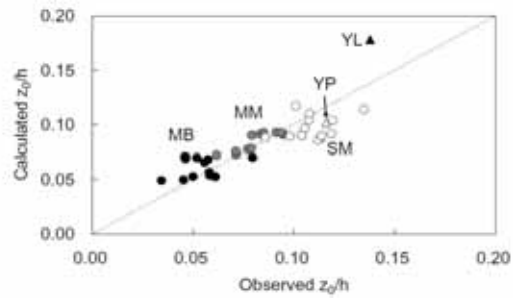


図8 z_0/h の実測値に対するモデルの計算結果

観測結果に基づき、空気力学的特性に対する森林構造の寄与を非同化部（幹，枝）と同化部（葉）に分ける考え方を提案した。すなわち、各森林が持つ基本的な空気力学的特性は非同化部の密度に支配され、季節変化は同化部に支配されると考えた。この考え方に基づき、立木密度（非同化部）とPAI（同化部）を用いたモデルを構築した結果、異なる森林サイト間の相違と各サイトにおける季節変化の実測値をおおむね統一的に説明できた（図7，8）。

Reference

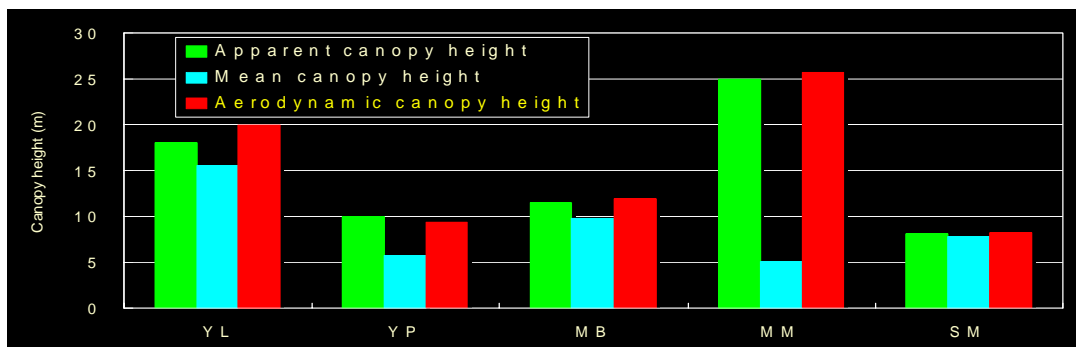
Nakai, T., Kuwada, T., Kodama, Y., Ohta, T. and Maximov, T.C., 2005. Comparison of aerodynamic characteristics among boreal, cool-temperate and warm-temperate forests. *J. Agric. Meteorol.*, **60**(5), 689–692.

2) 空気力学的平均樹高

図3および図4に示してあるように、林分によって樹高分布は異なる特徴を示し、平均樹高が持つ意味合いも異なり、また見かけの平均的な樹高と異なることが多い。前節の空気力学的パラメータ z_0, d を求める時にそれらを平均樹高で規格化しているのので、空気力学的パラメータ z_0 と d の間に何らかの関係があれば、平均樹高 h を決定することができる。Thom (1971) は次の関係式を提案している。

$$z_0 = (h-d)$$

ここで k は定数である。前節では観測から z_0 と d を独立に求めることができるので、上式図



9 各サイトの見かけの樹高、平均樹高、空気力学的樹高。

の関係から h を求めることができる。これを h_a で表し、空気力学的群落高(Aerodynamic canopy height)と呼ぶことにする。図 9 にその結果を見かけの樹高と平均樹高とともに示す。空気力学的群落高は平均樹高よりも見かけの樹高に近いことが判る。

3) 超音波風速計の angle of attack 依存誤差補正とそのフラックスへの影響評価



図 10 実測および補正後の風速ベクトルと angle of attack の説明図

超音波風速計で測定される風速は、風速計に当たる風が水平面となす角(angle of attack, 以下 AoA)に依存して誤差を生じる。我々は、Gill の R2, R3-50 を対象にした van der Molen et al. (2004) の風洞実験結果に基づき、より信頼性の高い補正方法を提案した(Nakai et al., 2006)。その方法とは、超音波風速計で得られる実測風速が AoA 依存誤差を伴っているため、実測風速ベクトルから計算される「見かけの」AoA(a')から、非線形方程式を解いて「実際の」AoA(a)を導きだし、それを用いて AoA 依存誤差を補正するというものである。幌加内町母子里のダケカンバ林および針広混交林を対象に、乱流フラックスの計算にこの補正を適用した結果、顕熱、潜熱、CO2 フラックスが補正前に比べて大きく増加した。その結果、熱収支のクロージャも改善した(図)。これらの結果から、熱収支のインバランス問題の大部分が、超音波風速計の Angle of attack 依存誤差によって説明できることが分かった。

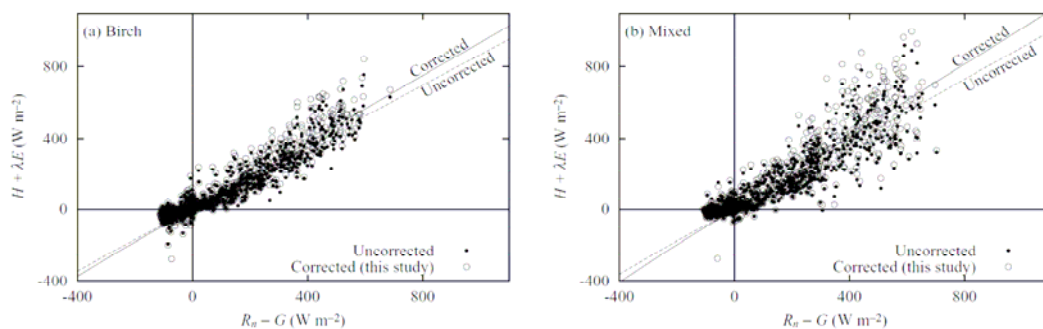


図 11 $(R_n - G)$ と $(H + \lambda E)$ との間の熱収支クロージャ。(a) ダケカンバ林, (b) 針広混交林。

Reference

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

4) 雪面からのCO₂フラックス

CO₂は温暖化効果気体の一つであるが、森林のCO₂収支は大気中のCO₂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。特に北方林は大気中のCO₂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CO₂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CO₂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。

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、自動開閉チャンパー（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CO₂濃度の測定を行った。

冬期の雪面からのCO₂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（図12）。11月から4月まで総CO₂フラックスはトウヒ林で114gCm⁻²、混交林で133gCm⁻²となった。チャンパーによる雪面でのCO₂フラックスと雪面と積雪下面でのCO₂濃度から見かけの拡散係数が計算された。乾雪期のCO₂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（図13）。融雪期のCO₂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CO₂フラックスは地表面からの年間総CO₂フラックスの約23%であった（図14）。

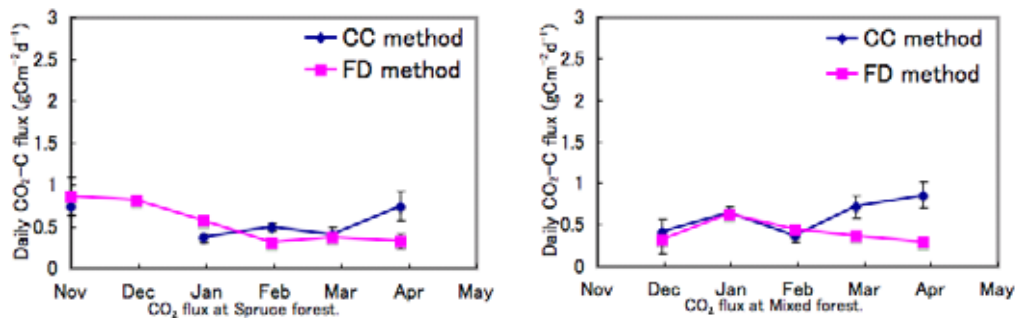


図12 二つの方法による積雪表面CO₂フラックス(左図トウヒ林、右図混交林)

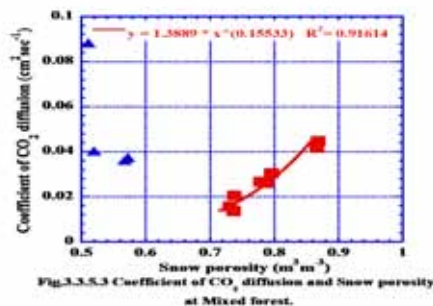


図13 混交林における空隙率との関係

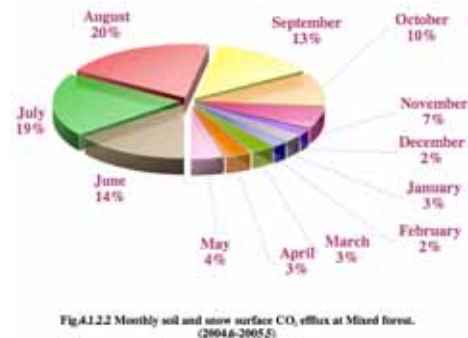


図14 月別CO₂フラックス

5) 森林での降雪遮断

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。

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（図15）、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。

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、降雪遮断はおおよそ20-30%であることがわかった（図16）。また、混交林内のグリッドでの積雪水量の観測から、遮断率の分布が求められた（図17）。その変動は大きく、主に開空率で説明できることがわかった。



図 15 重量式ライシメータ

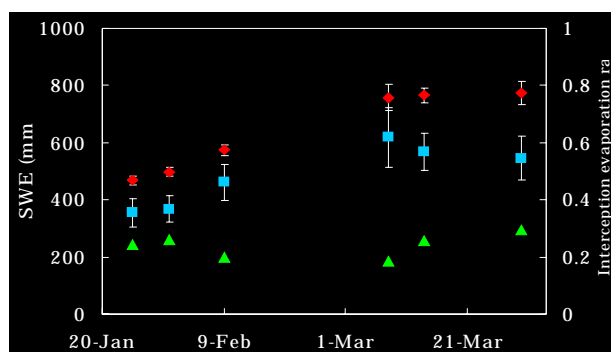


図 16 混交林における開地と林内の積雪水量と比

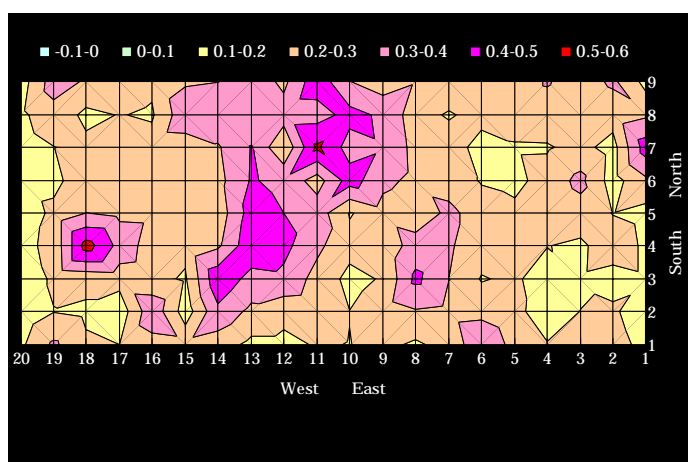


図 17 混交林内の遮断率分布

6) 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

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壤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

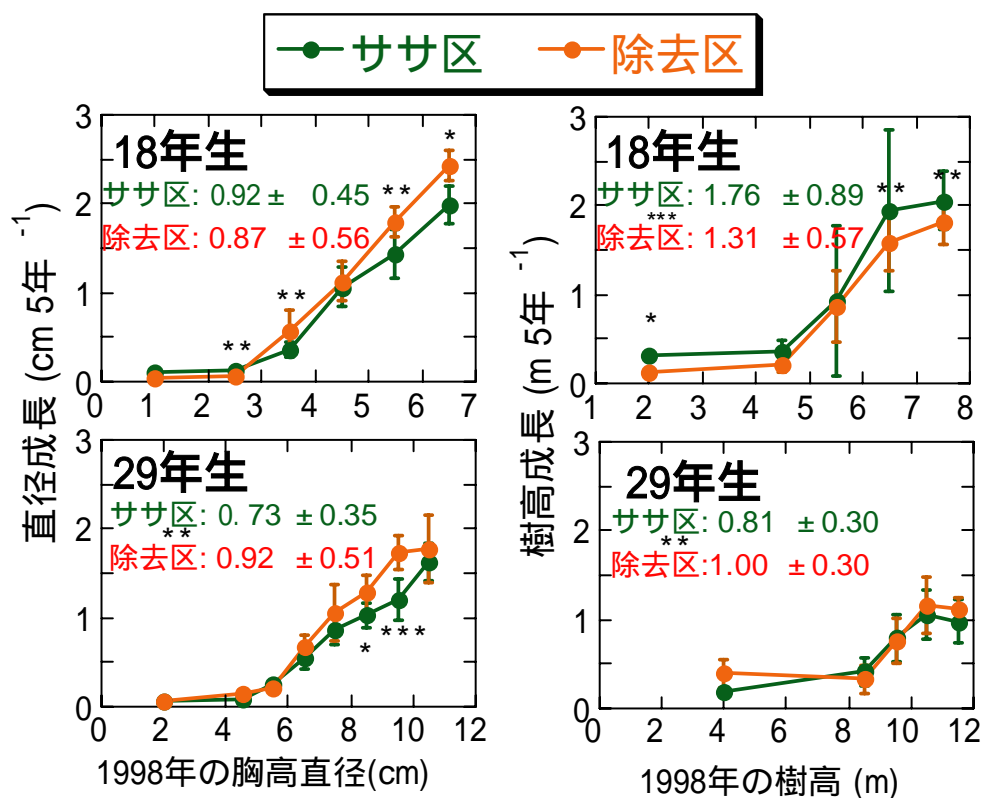


図18 カンバ林のササ区とササ除去区の胸高直径成長と樹高成長。上の図は18年生、下の図は29年生。

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。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。

7) 蒸発散

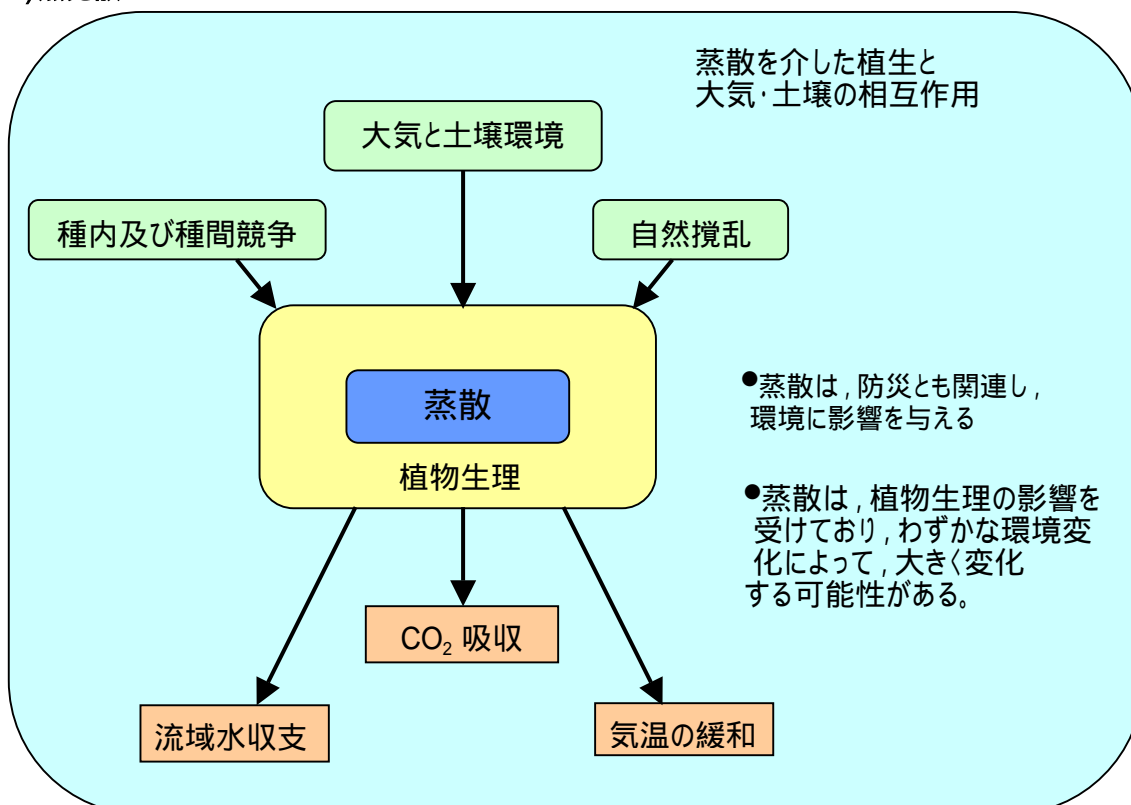


図 19 蒸散を基点とした植生及び大気・土壤との相互作用

植物の蒸散は、大気・土壌環境の影響、自然撈乱及び近隣の種内・種間競争の影響を受ける。そして蒸散は、気温の緩和、流域水収支、二酸化炭素吸収などを通して環境に影響を与える。このように蒸散は、環境に大きな影響を与え、防災とも関連する（図 19）。

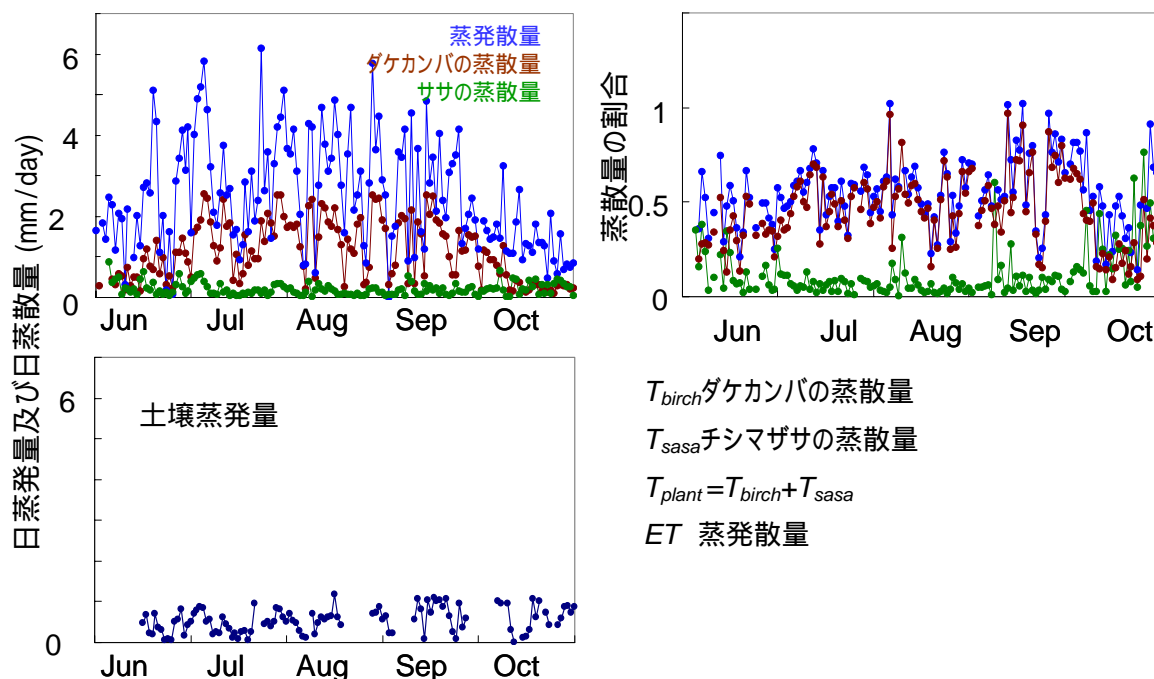


図 20 カンバ林における各蒸発散量

図 20 は林分スケールの日蒸発散量，ダケカンバの日蒸散量，ササの日蒸散量を示している。日蒸発散量は，6月，7月に高い値が得られたが，傾向として8月に最も大きくなった。ダケカンバの日蒸散量の最大値は 2.5mm/day、ササの日蒸散量は，6月から10月にかけてほぼ 0.2mm/day だった。左下図に土壌の日蒸散量を示す。土壌の日蒸散量は，6月から10月にかけてほぼ 1mm/day 以下だった。図 20 の右上図に林分スケールの日蒸発散量に対するダケカンバの日蒸散量，ササの日蒸散量及びダケカンバ+ササの日蒸散量を示す。植物からの蒸散量は，6月上旬と10月中旬以降を除いて大部分がダケカンバで占められた。蒸発散量に対する植物の蒸散量はおよそ 50%で，過去の先行研究とほぼ同じレベルだった。ダケカンバの日蒸散量は，6月から9月にかけて徐々に増加し，10月になると急激に低下した。

8) 北方森林動態の将来予測に向けた陸面モデルの開発 - 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

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。

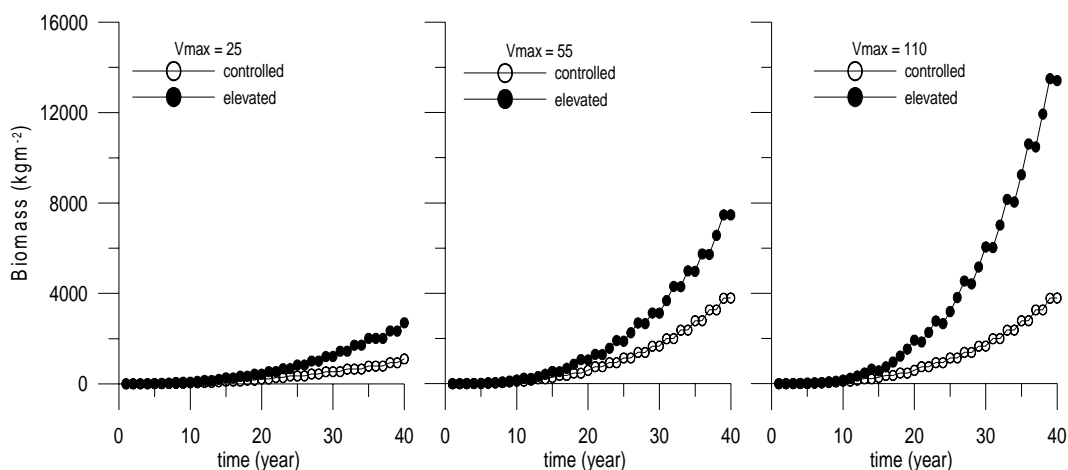


図21 バイオマス（現存量）の時系列

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400m²）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400m²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/m²の初

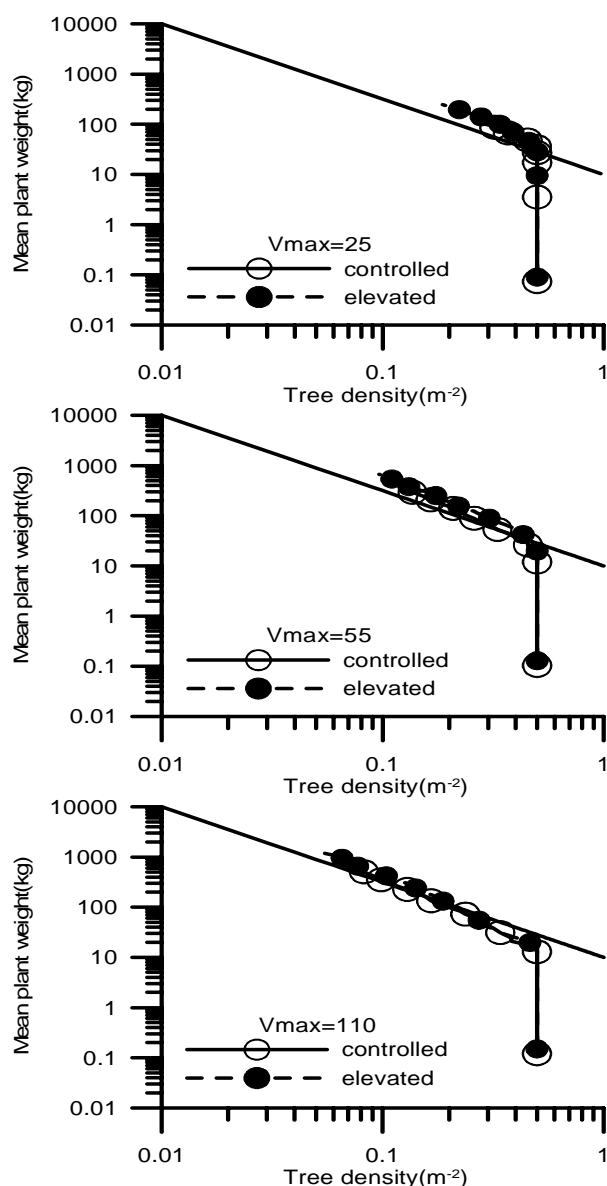


図22 森林密度に対する平均個体重量の変化

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、CO₂濃度については現在と同じ（controlled）

と現在の2倍のCO₂濃度 (elevated)、葉内窒素濃度指標値(V_{max})については普通(V_{max}=55)、その約半分 (V_{max}=25) とその2倍 (V_{max}=110) である。葉内窒素濃度指標値(V_{max})は土壌中の窒素濃度の程度と考えるとよい(図21)。

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_{max}が大きく高CO₂環境) 時ほどバイオマスの増加量は大きく、高V_{max}とともに、高CO₂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、同一種同齡の森林においては、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(図22)。成長が早い環境 (V_{max}が大きく高CO₂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。

8) 遮断率のモデル化

降雪遮断のモデル化のためには、樹体が蓄積しうる最大の積雪水量を知ることが重要である。ここでは、独立行政法人防災科学技術研究所の雪氷防災実験棟の人工降雪装置を利用し、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(図23)。着雪量は時間とともに増加するが、ある時に落下し、また増加する。YamazakiとAstonのモデルを図に加えた。Yamazakiモデルは立ち上がり早く、早く定常状態に達する時とまったく立ち上がらない時がある。Astonモデルは立ち上がりも定常状態も概ねよく着雪量を再現している。この人工降雪実験で、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。

あとがき

3年間特別共同研究をさせていただいたことを低温研共同利用委員会の方々には心から感謝致します。また、メンバーに加わっていただいた皆様には大変感謝致します。さらに研究に便宜を図っていただいた北方生物圏フィールド科学センター雨龍研究林の方々、低温研技

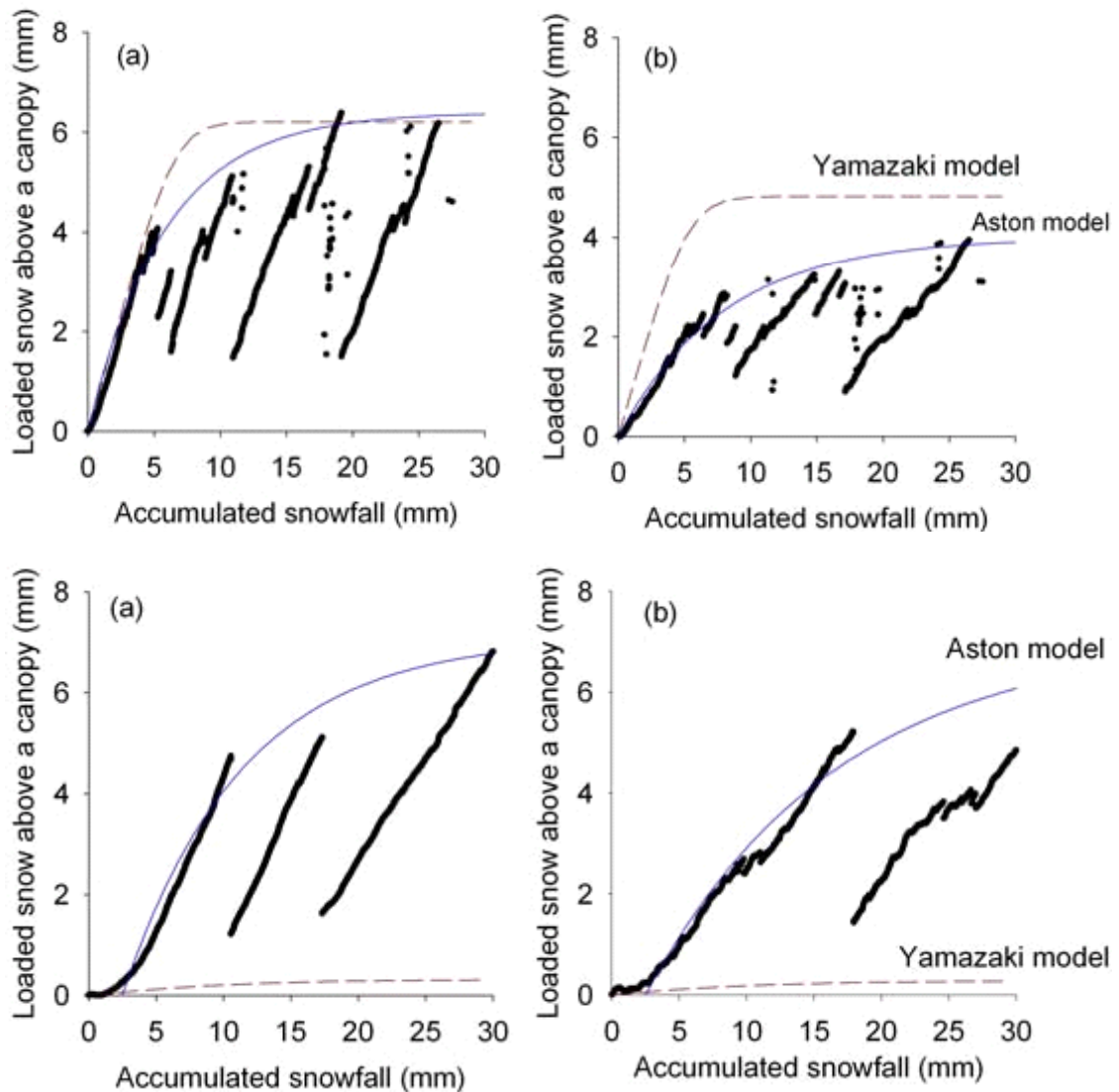


図 23 異なる LAI の樹木における、積算降雪量に対する着雪量の変化

術部の方々にお礼申し上げます。まだ、遣り残していることはたくさんあります。例えば以下のようなことが上げられます。1)降雪遮断のup-scalingおよびモデル化、2)雪面からのCO₂フラックスと積雪下のCO₂フラックス、3)積雪モデル(2次元)の開発、4)北方林での蒸発散と土壌地温・水分との関係、5)MINoSGIと土壌中炭素・窒素モデルの結合、などなど。これらは積雪-森林-大気相互作用の理解の上で大変重要な課題であり、今後とも取り組みたいと考えます。