

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成 14 年度採択研究代表者

太田 岳史

(名古屋大学大学院生命農学研究科 教授)

「北方林地帯における水循環特性と植物生態生理のパラメータ化」

## 1. 研究実施の概要

【研究のねらい】森林は全陸域の約1/3を占めており、その中で北方林は30%を占める。また北方林の成立範囲は、温暖化が最も顕在化すると予測されている地域と一致している。対象とする地域は寡雨、寒冷な気候条件で代表されるが、気候条件の時間的、空間的な変動は大きい。その一方で、成立している森林は中低緯度地帯と比較して樹種、構造ともに比較的単純である。このような条件下に成立している北方林の水循環に対する環境応答特性は、不明の点が多い。本研究チームでは、第1に北方林—北方林南限—中緯度帯にいたる地域における森林の水循環に関わる環境応答特性を明らかにすることを目的としている。そしてこの結果に基づいて、北方林地帯における林分から大陸河川スケールでの水循環の現況を把握し、将来予測される環境変動下での水循環特性の変動を予測することを目的としている。

【これまでの研究の概要と進捗状況】個葉スケールでの環境応答特性に関する観測と実験を東シベリア—中部日本の間での4地域で実施してきたほか、平成 18 年度には観測サイト以外に国内8箇所、のべ17樹種について既存データ取得および新規の測定を行った。また、群落スケールにおける水循環の素過程と群落スケールでの環境応答特性に関する観測を東シベリア—中部日本の間での3地域5観測サイトで実施してきた。再検討の結果、群落スケールでの表面コンダクタンスの“潜在的”応答特性の概念の導出のため、環境因子に対する表面コンダクタンスの応答特性に改良を加えた。また、シベリアにおける大河川の流量データの収集を行い、レナ河の流出特性を解析した。モデリンググループは個葉、群落両スケールでの研究結果を基礎として陸面過程モデルの改良を進め、各サイトの流出成分も含めた水循環素過程の再現の向上をおこなった。そして、同モデルを東シベリアから中部日本の広域へ適用し、蒸発散の時空間分布の推定を行った。同時に陸面過程モデルと分布型流出モデルのカップリングを行い、過去のレナ川流量を再現した。

【研究成果】H17 年度に、「森林は、気候帯、森林タイプを越えてひとつの応答特性に収束している」、すなわち最適(あるいは同一の条件に置かれたときに)条件に置かれたときに、森林が示す反応は類似するという概念を提示し、これを“潜在的”応答特性と呼んだ。本年度は、この概念の妥当性の検証を中心に行った。個葉・群落スケールでの観測結果は、いずれも上記の概念を支持する結果を示した。また、陸面モデルによる感度実験により、“潜在的”応答特性の概念に立脚するパ

ラメータセットでもフラックスの再現ができる理由を考察した。最大気孔コンダクタンスと土壤水分抑制の効果が相殺することが示され、このパラメータセットによる現象の理解は、各サイトで得られるパラメータセットによる説明よりも実際の現象を無理なく説明することが分かった。また、同陸面過程モデルを空間的に拡張して、1986–2000年のレナ川流域の蒸発散量を求めた。得られた蒸発散量の年々変動は降水量と流出量の実測値から水収支的に求められた結果とよく対応した。そして、本モデルにより推定された蒸発散量は、過去に GCM によって計算された年間蒸発散量よりも流域水収支により求められた蒸発散量に近い値を示した。また、陸面過程モデルにより得られた夏季の蒸発散量は降水量とは負の関係、気温とは正の関係を示した。陸面モデルからの流出成分を分布型流出モデルに入力して、レナ川最下流地点と支流流域ごとの流出量を考察した。Aldan 川流域では実測流出とほぼ一致したが、Lena 川上流域ではモデルによる計算値が過小、Vilui 川では過大となった。Vilui 川流域はダムの影響があること、気象データが不足していることから Vilui 川のみ実測流量を与え再計算を行った。その結果、全体としての日流量を再現できた。融雪期に関しては河川の結氷厚、解氷時期の空間分布を推定するとともに、結氷を考慮した河道追跡を行う必要がある。この他、以下の北方森林圏の水循環素過程に関する検討を加えた。空気力学的特性に対する森林構造の評価のための同化部・非同化部を区別した新しい解析手法の開発と、それによる開葉期から落葉期までの葉面積指数の季節変化の再現可能性の確認、根系の伸長特性に土壤水分が大きく影響しているという新たな仮説の提唱、上層・下層植生の水循環における競合の実態と生態的特徴に与える影響、実測 LAI と ASTER 画像から算出した NDVI との間の全観測域にわたる比較的高い相関関係の存在の発見、冬期過程(特に樹冠着雪能)に対する森林構造の影響、北方林における長期水収支特性など、北方林特有の新しい注目すべき知見が得られてきている。

【今後の見通し】個葉データの蓄積と群落スケールでの既存データセットの収集・解析を進めつつ、個葉、群落スケールの観測から提唱された“潜在的”応答特性の妥当性の検証および適用範囲に関する詳細な吟味をおこない、論文投稿の段階へ研究を進める。また、陸面過程モデルと既公開データを用いて、“潜在的”応答特性の適用範囲の検討をあわせて行っていく。そして、この概念を陸面過程モデルに反映させ、流出モデルとのカップリングにより北方林地帯における群落スケールから大陸河川スケールでの水循環特性を明らかにすることを目指す。また、既存の GCM による環境変動に伴う気候変動予測結果を利用して、50–100年スケール(植生に大きな変動を与えないと考えられる時間スケール)での北方林地帯での水循環変動を予測する。

## 2. 研究実施内容

### (1) “潜在的”応答特性の提唱と立証

#### 1) 研究目的

H17年度に提示した「森林は、気候帯、森林タイプを越えてひとつの応答特性に収束している」、すなわち最適(あるいは同一の条件に置かれたときに)条件に置かれたときに、森林が示す反応は

類似するという“潜在的”応答特性の概念の妥当性の検証を目的として、解析を進めた。

## 2) 研究方法

観測地域は、シベリア・ヤクーツク、カムチャッカ・エツソ（個葉のみ）、北海道・母子里、愛知・瀬戸の4地域である。個葉スケールの観測ではH18年度ではさらに、国内8箇所、のべ17樹種について既存データ取得および新規の測定を行った。個葉スケールの観測では、自然状態における環境応答特性と環境を人為的に制御した条件下での環境応答特性を各地域において求めた。群落スケールでは、平成17年度に取得されたデータも含め、各観測サイトの植物生長期の表面コンダクタンスと環境因子の関係を調べ、その地域性を検討した。そして、陸面過程モデルにより、“潜在的”応答特性の概念に立脚する共通の応答特性により、水・エネルギー交換特性の地域間差が再現できる意味を考察した。

## 3) 結果

図1は、カンバ属樹種に対する国内4カ所、ロシア2カ所で取得した個葉の環境応答特性に関する再解析を行った結果を示す。全データを単純にプールしてJarvis型気孔コンダクタンスモデルを適用すると(図1a)、共通のパラメータで概ね再現できた地域(MOS・SAP・AOK)と、過小(ESO)あるいは過大評価(YKS)される地域があった(図1b)。また、環境制御条件下で得られた最大気孔コ

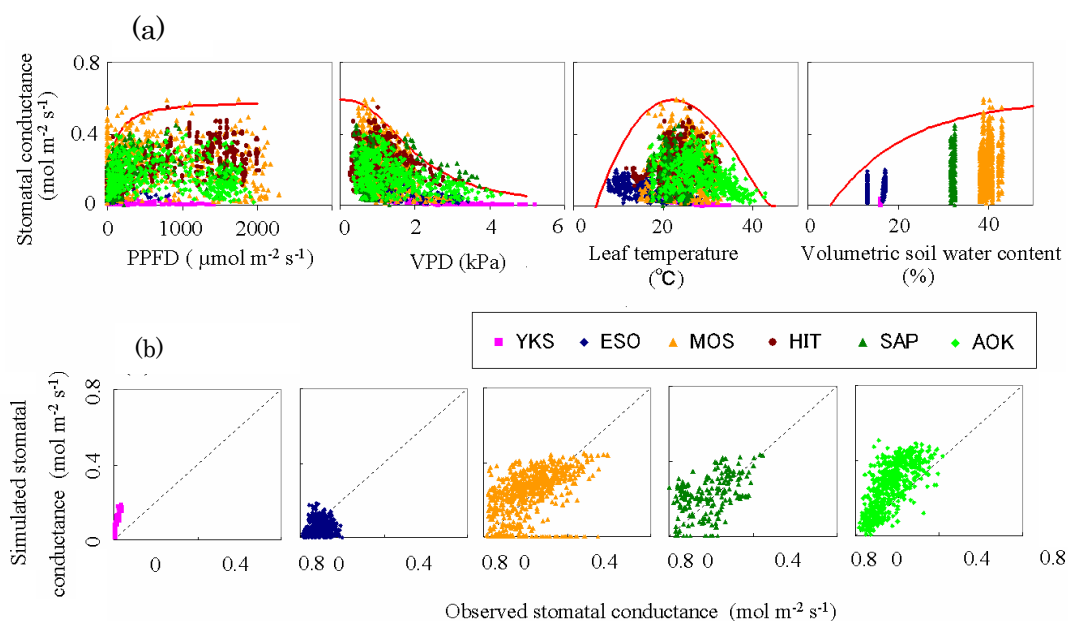


図1. ヤクーツク、エツソおよび日本国内のカンバ属3樹種データに対してJarvis型関数を適用した結果(a)と、モデルの適合度(b)。

ンダクタンスの地域による相違は、自然条件下で求められた最大気孔コンダクタンスの地域間差より非常に小さい結果を示した。これらの結果から、個葉スケールでの潜在的応答特性はある程度の範囲までは適用可能であることが示される一方、個葉スケールでは葉の窒素濃度など植物体側の

他の要因の影響を検討する必要性が指摘された。

群落スケールでは、H17 年度の現地観測結果を加えることにより、より広範な土壌水分条件下での森林の環境応答特性が検討可能となった。H17 年夏期はヤクーツクでは多雨で非常に湿潤な土壌環境におかれたため、蒸発散量、蒸発散比とも H16 年までに得られた値よりも非常に高い値を示し、国内3サイトと大きく異なる値を示した。このことは、ヤクーツクにおける森林も条件を整えば、国内の森林と大きく異なる蒸発散活動を行うことができることを示している。そして、H17 年度までの結果をプールして得られる“潜在的”応答特性に立脚するサイト共通の応答関数にLAIによる最大表面コンダクタンスの補正を加え、より広範囲の環境条件下での適応が可能になった。

また、陸面過程モデルによりサイト共通のパラメータによっても、陸面フラックスが再現可能である意味についての考察を加えた。その結果、ヤクーツクのデータだけでパラメータを決めると土壌水分による抑制が弱く、最大コンダクタンスが小さいために蒸発散が少ないと解析される。一方、データをプールすると、最大コンダクタンスは大きいと土壌水分の抑制が効くようになり、やはり小さな蒸発散が計算されることがわかった(図2)。後者の解釈は、個葉スケールでの自然環境下で得られた最大気孔コンダクタンスと環境制御条件下で得られた最大気孔コンダクタンスの振る舞い、群落スケールでの H15, 16 年度と H17 年度の蒸発散量、蒸発散比の年々変動と土壌水分の年々変動の関係に一致する。

上記の個葉、群落スケールにおける観測・実験結果の解析、陸面過程モデルによる各サイトでの

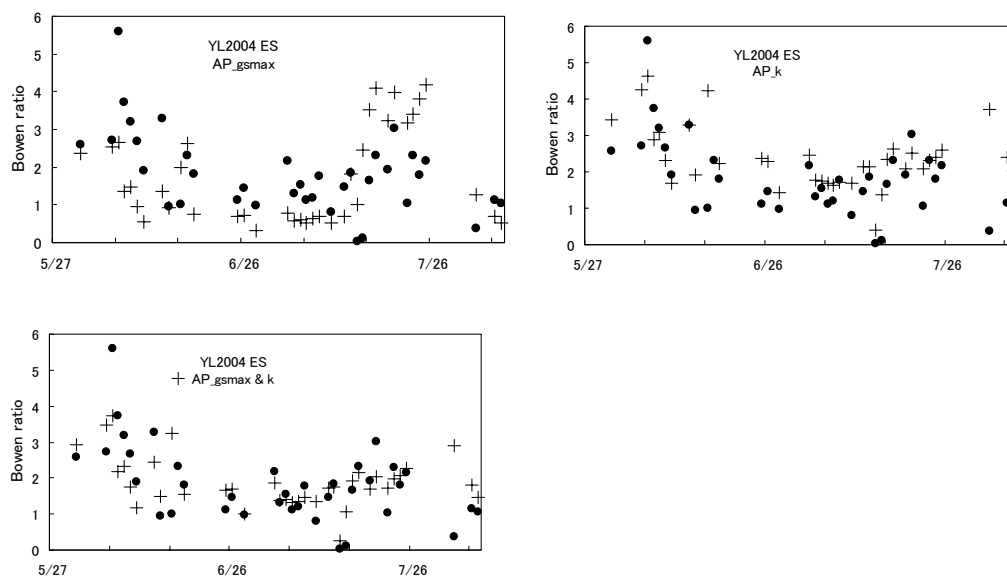


図2 “現地の”応答と特性におけるパラメータのうちあるパラメータのみを”潜在的”特性に立脚するサイト共通の特性に置き換えたときのボーエン比(ヤクーツク)。最大コンダクタンス  $g_{smax}$  (左上)、土壌水分の係数  $k$ ,  $g_{smax}$  (右上)および  $k$ (左下)を変えた場合。●: 観測, +: モデル計算。  $g_{smax}$  のみを変えると6月から7月上旬に過小, 7月下旬に過大となる。  $k$ のみを変えると6月から7月上旬が過大となる。  $g_{smax}$ および  $k$ を変えると元と同様な再現性を示す。

陸面フラックスの再現性と感度分析によるパラメータの解釈などの結果は、いずれも“潜在的”応答特性の概念で植物の応答を把握した方が、現象をより現実に近く解釈できることを示している。

## (2) レナ川流域を対象とした水循環特性の解析

### 1) 研究目的

対象地域での水・エネルギー交換過程の時空間変動の実態把握と環境変動によるその変化を予測するために、これまでに北方林地帯で適用実績の豊富な陸面過程モデル(2LM)の精度の向上が必要であり、同モデルの精度向上を行う。また、同モデルを広域への拡張と分布型流出モデルとのカップリングを行い、対象領域の水・エネルギー交換特性の時空間分布の現況を理解する。そして、将来予測される環境変動による水循環変動の予測に資する。

### 2) 研究方法

1980-2004年の流量データにより、レナ川流域の流況を解析した。そして、“潜在的”応答特性の概念に立脚した陸面過程モデル(2LM)を対象領域全域に拡張し、水・エネルギー交換特性の空間分布を検討した。そして、得られた蒸発散量について、降水量・流出量の実測値から求めた値やGCMによる既存の計算結果などと多角的に比較、検討した。また、分布型流出モデルとのカップリングを行い、同流域の流出の現況(1986-1995年)の再現を行った。

### 3) 結果

1980-2004年の流量データにより、レナ川流域の流況を解析し、レナ川流域での流出は多くは

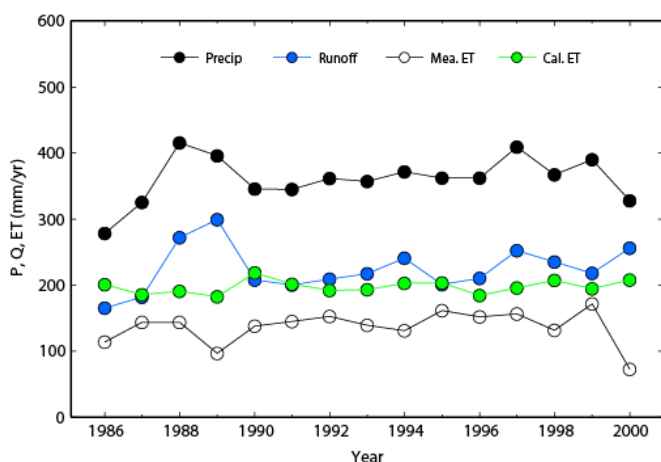


図3 レナ川流域での降水量，流出量，蒸発散量．黒：降水量実測値，青：流出量実測値，白：降水量・流出量の実測値の差から求めた蒸発散量，緑：2LMによる蒸発散量．

融雪に起因するが、年流出量の大小には夏の降雨出水の多いか少ないかが効いていることが示された。これは、以下に示すモデルによる解析からも推定されている。

広域に拡張された2LMにより計算されたレナ川流域の蒸発散量は、降水量と流出量の実測値の差により求められた蒸発散量と比較を行ったところ、両者には量的な差は認められたが、年々変動はよく一致することを確認した(図3)。15年間(1986-2000)の陸面過程モデルによる計算から求められたレナ流域の

年蒸発散量は177mmであり、GCMにより計算された182mm(Serreze et al., 2003)と良く一致している。蒸発散量は5月から9月に多く、7月に最大値を示した。また、蒸発散量を構成する各成分(蒸散量，遮断蒸発量，下層植生蒸散量)の時空間変動を推定した。

2LMの解析結果から得られたレナ流域での夏季の蒸発散量は同時期の降水量とは負の関係、気温とは正の関係を示している(図4)。北ユーラシアでは常に厳しい水分環境に置かれているた

め、夏期に降水量が増加していたとしても水分環境を急激に向上させるわけではない。むしろ、降水量の増加は日射量と気温の低下に相関があり、植物の生態生理的活動を減少させる原因になると考えられる。北ユーラシアでの蒸発散

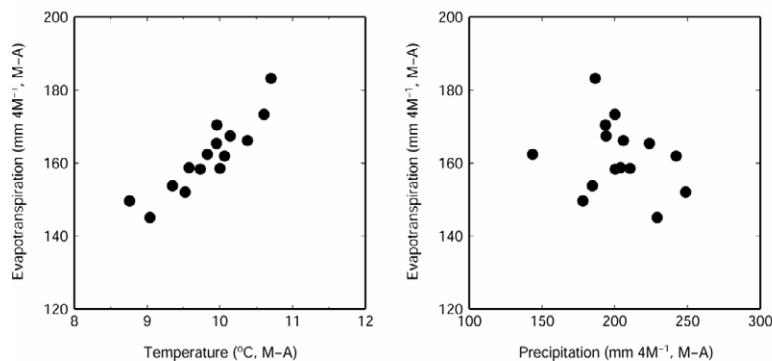


図4 2LMによるレナ流域の夏季蒸発散量と気温、降水量との関係。

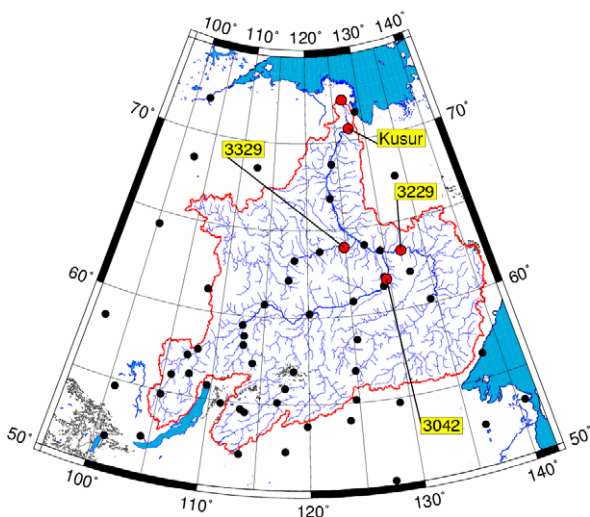


図5 Lena 川流域の概要(数字は支流の流量観測点, 黒丸は気象観測点を表す)

Aldan 川流域・Vilui 川流域・Lena 川上流域の 3 流域を設定した。3 つの支流の最下流の流量観測点はそれぞれ図5中の 3229, 3329, 3042 の観測地点番号に対応している。

図6は、陸面モデルを 1986 年から 1996 年の 10 年間に適用し、計算されたメッシュ流出量を Lena 川の支流ごとに流域平均値(年値)を求め、観測されている各流域の年間流出量と比較したものである。Aldan 川流域では、陸面モデルによる流出量と河川流出量はほぼ一致しているのに対し、Lena 川上流域では陸面モデルによる計算値が  $40\sim 50\text{mm yr}^{-1}$  程度小さく、Vilui 川では  $20\sim 50\text{mm yr}^{-1}$  程度実測流出量を上回っている。この原因として、特に Vilui 川流域で、入力値となる気象データが流域面積に対して非常に少ないこと、更に流域面積の 1/3 を占めるダム流域の影響が原因と考えられる。

量と気温との高い相関は Suzuki and Masuda(2004)でも報告されている。さらに、夏の蒸発散量は冬の北極振動(AO)と正の関係を示した。例えば、高い AO は気温の増加に影響する。そのため、融雪が早まり、植物の生理活動も早まると同時に蒸発散量も増加すると考えられる。

植生・積雪・土壌の熱・水交換を考慮できる陸面モデル 2LM と、河道網上の洪水追跡による流出モデルを組み合わせた分布型水文モデルにより図5に示す Lena 川流域の流出量の算定を試みた。なお、本研究では、Kusur 地点(流域面積 243 万  $\text{km}^2$ )を最下流とし、内部の支流として、Aldan 川

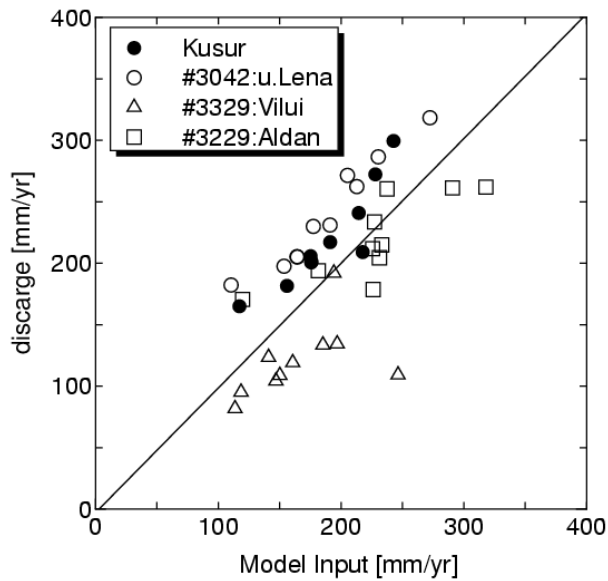


図6 陸面モデルによる流域平均流出量と河川流出量の比較 (1986-1995)

以上のことから、流出量の算定に当たっては、Vilui 川流域で観測されている流量を入力値として与え、それ以外の部分は陸面モデルで計算される流出量を河道網モデルの入力として与え計算を行うこととした。図7はこのようにして得られた 1986 年から 1995 年までの 10 年間の日流出量を算定した結果を示している。図より、計算対象期間では全体として流出量を再現できていることがわかる。しかしながら、現在のところ河道の結氷効果を考慮していないため、融雪出水の開始する時期に、計算流出量のほうが実測流出量よりも早く現れる傾向を有する。

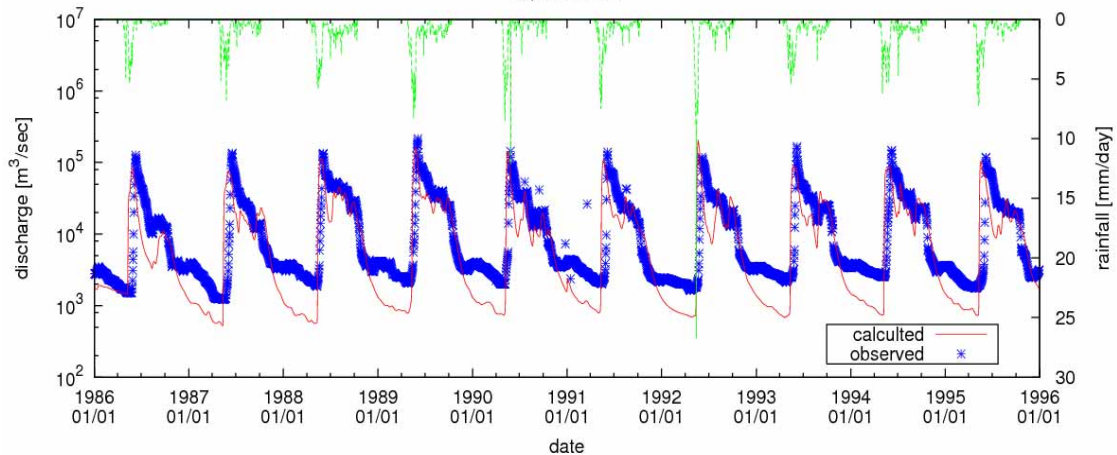


図7 陸面モデルによる流域平均流出量と河川流出量の比較(1986-1995)図-3 Vilui 流域にのみ実測流量を与えた場合の流出量の算定結果(Kusur 地点)

今後は、河川の結氷厚、解氷時期の空間分布を推定するとともに、結氷を考慮した河道追跡を行う必要がある。

### (3) 北方林地帯の水循環素過程の理解

#### 1) 研究目的

寒冷域には、低・中緯度帯には見られない特有の水循環素過程が存在する。これらの現象のすべてが、現段階で以下に示すすべての現象が上記のモデルに組み込まれているわけではないが、北方林における水循環を理解して行くには、これらの理解が重要である。

## 2) 研究項目

各研究課題を詳記するには、多くの紙面を要するため、ここではH18年度に解析を行った項目を以下に列挙することと定める。

- ・ 樹体貯留積雪量と森林構造の関係の定量化
- ・ 森林の空気力学的特性と森林構造の定量化
- ・ 土壌水分の変動と根系生理特性
- ・ 下層植生あるいは林床面からの蒸発散特性
- ・ 各気候帯における炭素固定量の相違と規定要因の抽出
- ・ 広域で見た森林における水・エネルギー循環の規定要因の抽出
- ・ ASTER, MODIS を用いた LAI 推定のアルゴリズム開発

## 3. 研究実施体制

### (1)「陸面水循環解析」グループ

#### ①研究者名

太田 岳史(名古屋大学大学院生命農学研究科 教授)

#### ②研究項目

- ・ 群落コンダクタンスと環境応答特性の時空間分布
- ・ 空気力学的特性と森林構造
- ・ 水・エネルギー・炭素循環に関する冬期過程(降雪遮断特性, 雪面からの CO<sub>2</sub> フラックスなど)
- ・ 下層植生が森林における水循環に果たす役割(ヤクーツク・カラマツサイト, 母子里・混交林サイト)
- ・ 根系の生理特性
- ・ 北方林での水収支の年々変動
- ・ レナ川流域での流出生起場と季節変動
- ・ 地球規模で見た森林の水循環の規定要因

### (2)「森林動態解析」グループ

#### ①研究者名

隅田 明洋(北海道大学低温科学研究所 助教授)

#### ②研究項目

- ・ 個葉スケールでの植物生理生態解析
- ・ 林冠構造解析評価法の開発
- ・ 空気力学的特性と森林構造との関連(陸面水循環解析グループと共同)
- ・ MODIS データの取得と Aster 衛星データの取得・解析とグラントトゥルス



(3)「水循環-森林動態モデリング」グループ

①研究者名

山崎 剛(東北大学大学院理学研究科 助教授)

②研究項目

- ・ 陸面過程モデルの基礎に関する研究
- ・ 水・エネルギー交換の時空間分布に関する研究
- ・ 流出モデルに関する研究

#### 4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- Suzuki, K., Kubota, J., Zhang, Y., Kadota, T., Ohata, T. and Vuglinsky, V. Snow ablation in an open field and larch forest of the southern mountainous region of eastern Siberia. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques 51(3), p465-480, 2006
- Iida, S., Tanaka, T., Sugita, M. Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. Journal of Hydrology 326, p166-180, 2006
- Suzuki, K., Konohira, E., Yamazaki, Y., Kubota, J., Ohata, T. and Vuglinsky, V. Transport of organic carbon from the Mogot Experimental Watershed in the southern mountainous taiga of eastern Siberia. Nordic Hydrology 37(3), p303-312, 2006

(2)特許出願

平成 18年度特許出願:0 件(CREST 研究期間累積件数:3 件)