

積雪環境が流域植生の季節変化に与える影響 -阿賀野川水系, 滝ダム流域の事例-

THE INFLUENCE OF SNOW CONDITION ON SEASONAL VARIATION OF BASIN VEGETATION - A CASE STUDY IN THE TAKI DAM BASIN OF THE AGANO RIVER -

朝岡良浩¹・風間聡²・沢本正樹³

Yoshihiro ASAOKA, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 修士(工学) 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 博士(工学) 東北大学大学院 工学研究科 (同上)

³フェロー 工博 東北大学大学院 工学研究科 (同上)

The influences of snow condition on the seasonal variation of vegetation are investigated in little snow year (1998), normal snow year (1999) and heavy snow year (2000) in the Taki Dam basin of the Agano River. At first, the relationships among NDVI, WI, evapotranspiration and snow covered area are evaluated. The area of snow cover is proportional to mean basin NDVI in snowmelt season. Evapotranspiration in April is 36mm/month in little snow year and 15mm/month in heavy snow year. Secondly, the distribution of vegetation growth ratio to temperature is calculated with a proposed new index. As the results, vegetation growth ratio is faster in the low elevation area (0-1300m), slower in the middle elevation area (1300-1700m) and faster in high elevation area (over 1700m), as temperature increase, respectively. This is related to snow condition and vegetation kinds.

Key Words : Snow condition , Vegetation growth, NDVI, Warm index, Satellite remote sensing

1. はじめに

温暖化や気候変動に伴う降水量分布の変動が進行している。特に気温の上昇は積雪域の積雪過程に大きな影響を与える。小川・野上¹⁾, 横山・井上²⁾はメッシュ気候値を基に複数の地球環境変化シナリオに応じた降雪量分布の変動を予測している。その積雪過程の変動は様々な面で周辺地域に影響を及ぼす。例えば、降雪量やそれにより貯留される積雪水当量の減少は水資源の観点ではマイナスの面が大きく、井上³⁾は国内主要河川の流域降雪量・降雨量、流況特性の変動について検討した。また、流出による直接的な影響だけでなく、積雪量や堆積期間など積雪環境の変化は流域内の植生活動、ひいては水資源量に影響すると予測できる。積雪が植物に及ぼす影響には害を及ぼす面と保護に作用する両面がある⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。害を及ぼす面として、積雪の動的作用による雪害だけでなく、積雪があることによって生長低下する生理的雪害がある。一方で、有利な面では寒冷地において気温が氷点下になる際も、積雪層下では約0℃に保温され、湿度も100%に保たれる。風の強い地域では低温や乾燥から

植物を守る効果をもつ。また、多雪域では年間降水量でみても水分に恵まれた地域である。植物の生育期には大量の融雪水が長期間に渡って供給される。少雪域では春に土壤水分が不足する場合があるが、多雪域では融雪水により植物の生育する季節に水分が不足することは少ない。

積雪環境が変化した際の流域内の植生活動への影響を定量的に明らかにすれば、温暖化にともなう植生・蒸発散・炭素循環の問題を考える上で重要な知見を得られることが期待される。しかし、積雪環境の変化が植生に与える影響はあまり明らかにされていない。本研究では寒侯期の積雪量が異なる年を対象に、冬期の積雪環境が後の植生活動の季節変化に与える影響について議論することを目的とする。

2. 対象地域, 期間およびデータセット

(1) 対象流域

対象流域は福島県阿賀野川水系只見川上流の滝ダム流域である(図-1(a)(b))。燧ヶ岳(標高2346m)を筆頭に

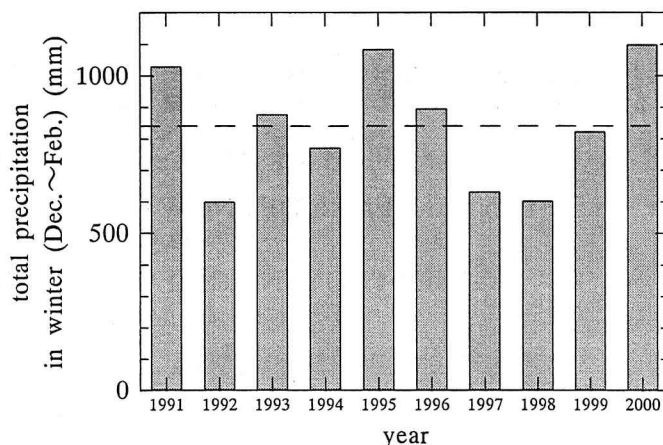
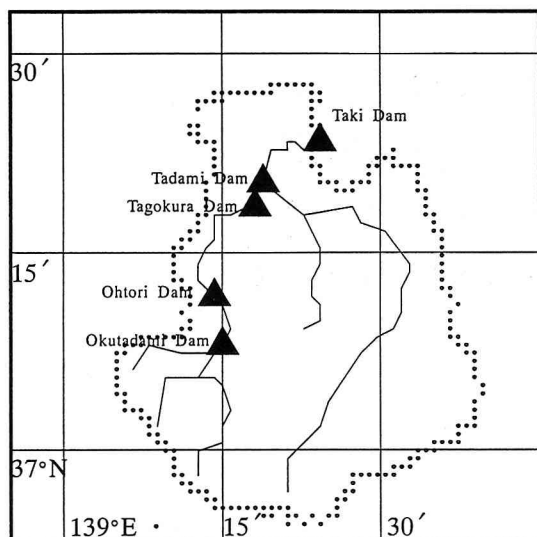


図-2 只見観測点の冬期降水量の変動
棒グラフ：冬期降水量，点線：10年間の平均値

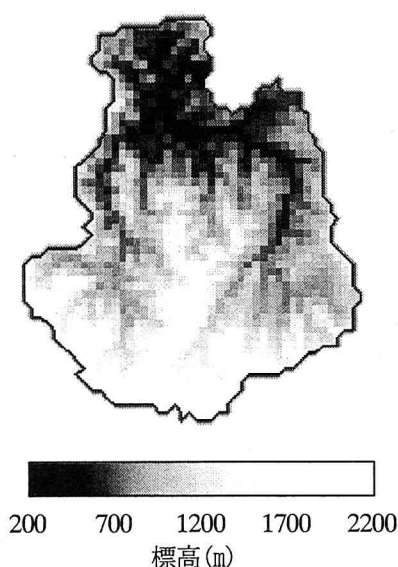


図-1 滝ダム流域図（上）と標高分布（下）

会津駒ヶ岳，越後が岳，帝釈山などの高峰が並ぶ日本有数の豪雪地帯で，初夏まで残雪が見られることもある。流域内には集落は少なく，広葉樹樹林帯89.1%，針葉樹9.1%，その他1.4%となっている。滝ダム流域内には下流から滝，只見，田子倉，大鳥，奥只見，大津岐ダムの6つダムが連なっている。流域面積は1991.4km²，標高差は300mから2300mで，平均標高は1010mである。

(2) 対象期間

対象期間は1998年から2000年の3年間とした。本研究では積雪環境が植生の季節変化に与える影響を調査することを目的としているため，「多雪年」，「標準年」，「少雪年」の情報を入手したい。図-2 に滝ダム流域に隣接する只見観測点（北緯34° 20.4′，東経139° 19.0′，標高377m）における過去10年間の冬期（12月から2月）降水量の変動を示す。過去10年間の冬期降水量の平均値は

841mmであった。この結果から1998年の降水量は平均値の71.5%，同様に1999年は97%，2000年は130%である。これらの点を考慮し，本研究では冬期降水量に応じて，対象期間中の1998年が少雪年，1999年が標準年，2000年が多雪年を代表すると考える。

(3) データセット

本研究では衛星データとしてNOAA/AVHRRデータを用いた。東北大学東北アジア研究センターではNOAA衛星から受信したデータに幾何・輝度・輝度温度補正を行い，日本画像データベースJAIDAS (JAPANESE Image DataSe) としてWeb上で公開している。NOAA/AVHRRデータの回帰日数は2回/日，地上分解能は約1.1km，物理分解能は可視光のアルベド輝度値で0.1%，輝度温度値で0.2Kである。滝ダム流域のNOAA/AVHRRデータの総画素数は1657個である。

標高データは国土地理院が発行している国土数値情報の標高ファイル「KS110」を用いた。空間分解能は250mであるため，衛星画像の空間分解能（1.1km）のサイズに平均化したデータを作成した。

気温データは流域内の観測所で観測された月平均気温のデータを使用し，流域内の月平均気温分布データを作成した。この際，気温通減率は100mにつき0.6℃とした。

3. 植生活動の季節変化について

積雪環境が消雪後の植生活動の季節変化に与える影響を調査するために，実際の植生活動を時空間的にモニタリングする必要がある。また，植物の生長は積雪よりも気候に強く影響をうけるため，気候値による潜在的な植生指標を評価する必要がある。この2点を解決するためにNDVIと温量指数の2つの指標を用いる。図-3 にデータセットと利用する指標の関係を示す。

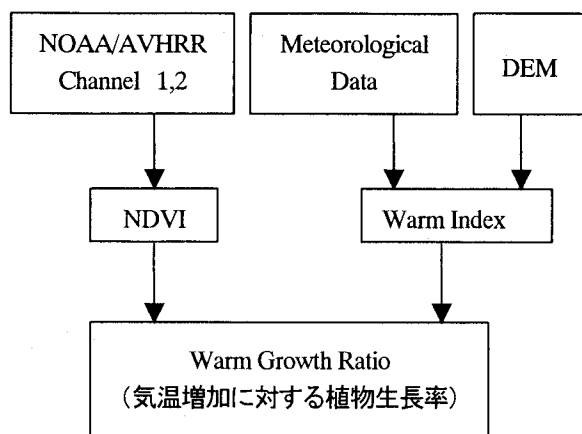


図-3 使用データと用いる指標の流れ

(1) NDVIについて

流域内の植生活動を時空間的にモニタリングするために、NOAA/AVHRRデータから得られる正規化差植生指標NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を用いる。NDVIはNOAA/AVHRRのChannel1 (0.58~0.68 μ m, 可視)とChannel2 (0.75~1.10 μ m, 近赤外)の波長域のアルベド輝度値を用いて式(1)で計算される。

$$NDVI(\%) = \frac{Channel2 - Channel1}{Channel2 + Channel1} \times 100 \quad (1)$$

NOAA衛星から毎日のデータを得ることは可能であるが実際には大部分日数が雲の影響を受け、NDVIは過小に観測されてしまうために正確な観測値を得ることはできない。そこで、本研究では月単位でNDVIの最大値合成を行い4月から9月までの6ヶ月間の月単位のデータを作成した。同時にこのデータを基に、年間の最大値合成を行うことにより年間最大値のNDVIデータを作成した。

(2) 温量指数について

植物の分布と温度環境は密接な関係に有る。植物が生存しつづけるためにはある一定以上の温度環境を持続する必要がある。ある温度以上での気温の積算値の大小がその環境での生存環境、すなわち、潜在植生を表す。吉良⁹⁾が考案した温量指数WI(Warm index)は積算温度の1つであり、式(2)のように与えられる。

$$WI = \sum_{m=1}^n (T_m - 5) \quad (2)$$

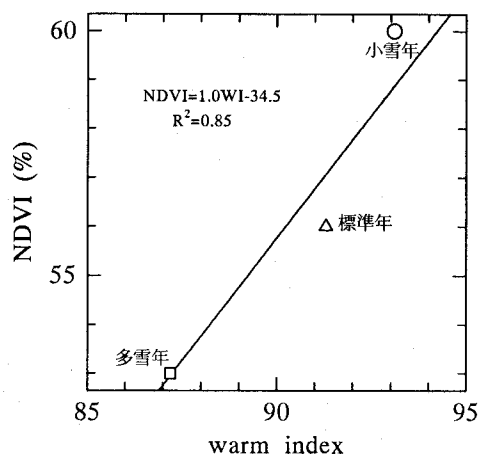


図-4 流域平均のNDVIと温量指数の関係

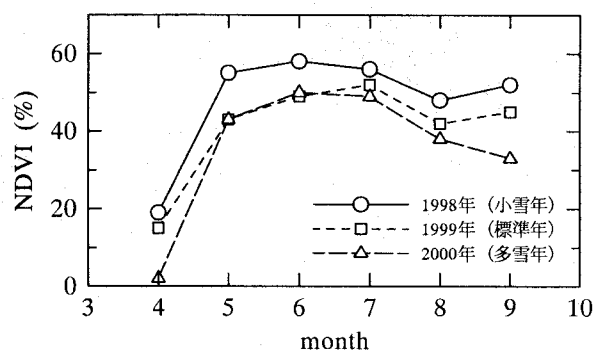


図-5 流域平均NDVIの季節変化

ただし、 n は月平均気温 T_m が5.0℃以上の月

ここで、 WI : 温量指数, T_m : 月平均気温 (℃)

一般的に植物が最も生長するのは夏季であることを考慮して、本研究では、前年の10月から9月までの12ヶ月のうち、月平均気温が5℃以上の月を積算し、温量指数とした。

(3) 流域内の植生活動について

従来、植物の生長に最も影響を与えるのは前年秋からの積算気温であると言われている⁹⁾。そこで、積算気温の1つである温量指数が流域植生にどれだけ影響を与えているか確認するために、流域平均の温量指数と年間最大NDVIの関係を図-4に示す。温量指数の平均値と年間最大NDVIの平均値には正の相関が見られ、相関係数も $R^2=0.85$ と高い値を示している。この点から気候が温暖であれば植物はよく生長し、寒冷であれば植物はあまり生長しないことになる。結果として、流域全体の植生を考えた場合、気温が植物の生長に大きな影響を与えていると確認できた。

次に、1998年(少雪年)、1999年(標準年)、2000年(多雪年)の流域平均のNDVIの季節変化を図-5に示す。

表-1 4月下旬の残雪面積

year	snow(pixel)	land(pixel)
1998	985	612
1999	1005	592
2000	1015	582

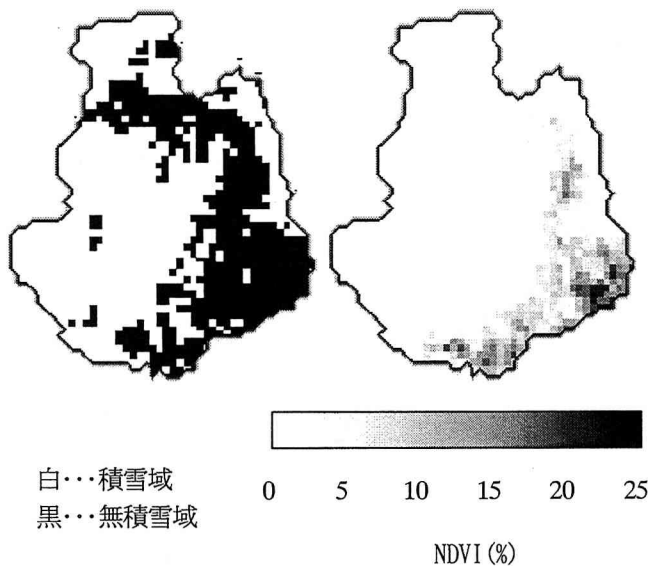
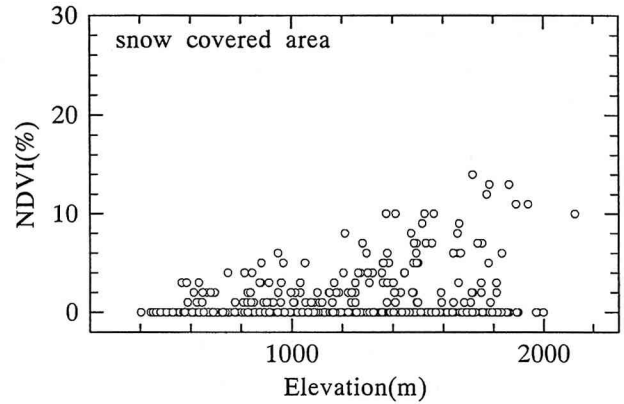
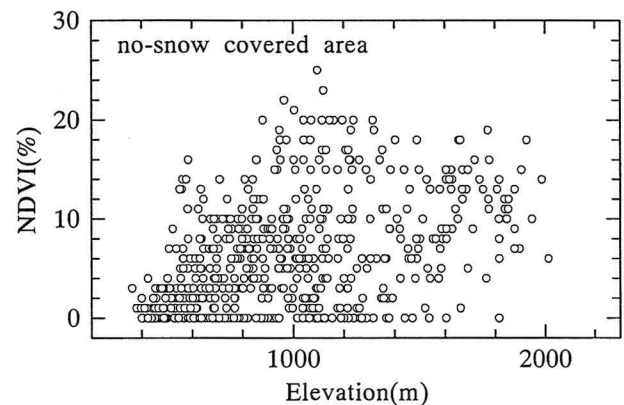


図-6 2000年4月の(左)積雪域と(右)NDVIの分布

NDVIの季節変化の特徴として少雪年である1998年はNDVI値が最も大きく、多雪年の2000年はNDVI値が小さい傾向を示している。積雪量の少ない年は植物活動が盛んであり、積雪量の多い年は盛んではないと読み取ることができる。この点は前述した結果と一致しているといえることができる。次に、各年のNDVIの季節変化はともに春先から夏にかけて急激に生長し、9月に減少する傾向が見られる。4月のNDVIの値は残雪面積と大きく関係していると考えられる。著者ら¹⁰⁾はNOAA/AVHRRデータから東日本の積雪域を月単位で推定している。その結果を用いて表-1に4月下旬の滝ダム流域の残雪面積を示す。2000年の4月は流域の大部分が積雪域に覆われており、残雪面積と流域植生は負の相関が見られる。これは、ある程度の積雪が植物を覆う場合、植物は生長できず、積雪が植物の生長の再開を抑制していると考えられる。この現象を確認するために2000年4月の積雪域画像とNDVI分布図を図-6に示す。また標高とNDVIの関係を図-7に示す。積雪が存在する画素上の多くではNDVI値が0に近い値を示している。これは、地表面が積雪に覆われているためである。また、NDVIが0でない値でも標高の増加に対して、NDVIの増加する割合は少ない。一方で、積雪が存在しない画素では、積雪が存在する画素よりも全体的にNDVIが大きな値を示し、標高の増加に対してNDVIの増加する割合も大きい。この点からも消雪の



(a) 積雪域



(b) 無積雪域

図-7 2000年4月の標高とNDVIの関係

開始とともに植物が生長を始めると確認でき、将来、積雪量が減少した場合、植生の生長の開始が早くなると予測できる。多田¹¹⁾らは滝ダム流域におけるNDVIと蒸発散量の関係を明らかにし、NDVI分布に基づいて蒸発散量分布を推定する手法を開発している。この手法を用いて、4月における流域平均の月蒸発散量を推定した結果、少雪年(1998年)では36mm/month、標準年(1999年)では31mm/month、多雪年(2000年)では15mm/monthとなった。多雪年と少雪年を比較するとその差は21mm/monthである。水資源の観点からすると少雪年は単に降雪量の減少ばかりでなく、植物の生長を促進させてしまうために、融雪期の4月に蒸発散として水資源を損失するマイナスの面があると言える。

4. 積雪環境と植生活動の分布について

前章では流域全体に着目して積雪環境と気候条件が与える影響を調査した。しかし、実際には流域内では複数の種類の樹木が存在し、また、地理・気候条件も異なるため、植物の活動は地域によって異なると思われることが

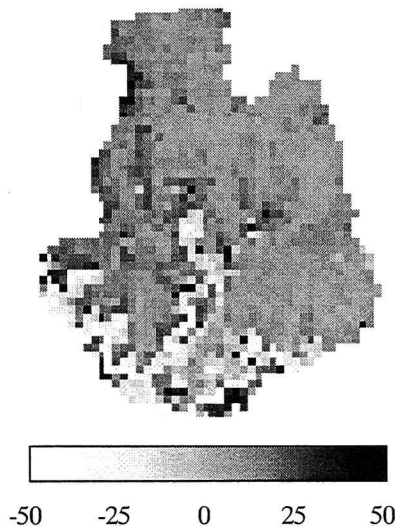


図-8 温量指数の上昇に対する植生の成長率(温量成長率, WGR)

できる。ここでは、潜在植生を示す温量指数と実際の植物の生長を示す年間最大NDVIのそれぞれの特性を利用して、積雪環境が植物の生長に与える影響を評価する。ここで、温量指数値の高い年（1998年）と低い年（2000年）を比較し、温量指数の変動に対して植生が生長している比率を示す指標を式(3)に提案する。本研究ではこの指標を温量生長比WGR (Warm Growth Ratio)と呼ぶ。

$$WGR = \frac{\frac{d(NDVI)}{d(NDVI)_{\max}}}{\frac{d(WI)}{d(WI)_{\max}}} \quad (3)$$

$d(NDVI)$ と $d(WI)$ は以下の式(4)、(5)で表す。

$$d(WI) = WI_h - WI_l \quad (4)$$

$$d(NDVI) = NDVI_h - NDVI_l \quad (5)$$

ここで、添字 h, l は流域平均の温量指数が大きい年（1998年）、低い年（2000年）を表す。

式(4)の左辺は植物の生長度が高い1998年の温量指数から植物の生長が低い2000年の差を示す。同様に式(5)は1998年の年間最大値NDVIから2000年の年間最大値NDVIの差を示す。この2つの値をそれぞれの最大値で正規化し、正規化した年間最大値NDVI差を、正規化した温量指数で割った値がWGRである。これは、温量指数の増加に対してどれだけ最大値NDVIが増加するかを示す指標と考えることができる。例えば、指数が負であることは温量指数の増加に比してNDVIの増加率が減少し、一方で、指数が正の値が増加するにつれて温量指数に比してNDVIが

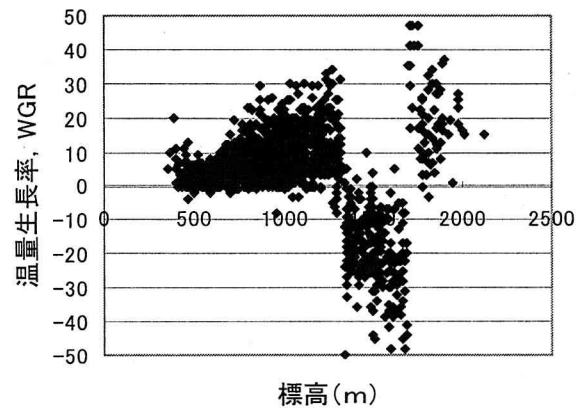


図-9 標高と温量生長率の関係

増加することを意味する。この指数を滝ダム流域に適用した結果を図-8に示す。地域によって指数が負の値を示す地域と正の値を示す地域に分かれている。この傾向を調査するために標高と指数の関係を図-9に示す。標高が(1)1300mまでの地域、(2)1300mから1700mの地域、(3)1700m以上の地域の3つのグループに分かれている。これら3つのグループについて考えてみたい。

(1) 標高0～1300mまでの地域

この地域では指標が主に0から40の間に分布しており、標高の増加に伴い、指標は増加する傾向にある。気温上昇に比して植生の生長が盛んになる地域で、主に落葉広葉樹林帯であると考えることができる。この結果からこの樹林帯では寒侯期の積雪・融雪期の水分供給量に対する依存度は低く、伏流水等により十分な水供給があると考えられる。

(2) 標高1300m～1700mまでの地域

この地域では指標が主に-40から0の間に分布して、標高の増加に伴い指標は減少する傾向にある。これは、気温上昇に比して植物が生長しないことを示している。これらの地域は流域の南部と山地の中腹域であり、また、NDVIの変動パターンから落葉樹林帯であるといえる。本来、植物は気温の上昇に比して生長する性質がある。この性質を抑制する要因として積雪環境が関係していると考えられる。積雪量が減少すれば、融雪期から初夏まで高山域から融雪水として安定供給される土壤水分が減少し、植物の生長・活性化が抑制されてしまうと考えることができる。つまり、中腹域の植物の生長は融雪水による土壤水分に依存し、少雪の場合、融雪水による水分供給が制限されてしまい活性化しないと考えられる。

(3) 標高が1700m以上の地域

この地域では再び指標が0から40の間に分布している。このような地域は主に高山域であり、高山植物帯である

と考えることができる。この場合、少雪年であっても高山域では積雪は豊富に存在するため、高山植物の生長に必要な水分量は十分に供給されていると考えることができる。したがって、気温の上昇が植物の生長に影響する。

5. おわりに

寒侯期の積雪環境が異なる年を対象として、積雪環境が植生に与える影響について調査した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 融雪期における残雪面積は流域平均の植生活動に影響を与える。少雪年（1998年）と多雪年（2000年）の4月の流域蒸発散量の差は21mm/monthであった。
- ・ 温量指数の増加に対して、植生の生長する割合を示す指標として温量生長比WGRを提案した。
- ・ 対象流域において、温量指数の増加に対して、標高1300m以下の地域と標高1700m以上の地域では植物は生長し、一方で、1300mから1700mの中腹域では植物はあまり生長しないという結果が得られた。これは、寒侯期の積雪環境、融雪水の供給および樹種が植物の生長に関係している可能性がある。

課題として、今回は潜在植生の評価をする際、気象要素として気温のみを用いたが、今後は降水量、日射量、日照時間などの気象要素を加えて潜在植生を評価する必要がある。次に、得られた知見の検証として、分布型融雪・流出モデルを使用し、融雪期以降に積雪・融雪が土壌に供給する水分量と植物の生長との相互作用について解析する予定である。さらに、対象スケールを流域レベルから東北地方の森林域に拡大し、積雪が植生活動に果たす役割について議論していく予定である。

謝辞：本研究は独立法人森林総合研究所ならびに河川環境管理財団から研究費の助成を受けました。滝ダム流域のデータを電源開発株式会社から提供して頂きました。NOAA/AVHRRデータの利用について東北大学東北アジア研究センター工藤純一教授から適切な助言を頂きました。併せて謝意を表します。

参考文献

- 1) 小川真由美, 野上道男: 温暖化が冬期の降水量に与える影響, 水文・水資源学会誌, Vol.10, No.1, pp.79-86, 1997.
- 2) 井上聡, 横山宏太郎: 地球環境変化時における降積雪の変動予測, 雪氷, Vol.60, No.5, pp.367-378, 1998.
- 3) 井上聡, 横山宏太郎, 大野広之, 川島茂人: 地球環境変化時における降積雪の変動予測 (続報), 雪氷, Vol.63, No.6, pp.489-49, 2001.11.
- 4) 石塚和雄: 高山・山頂における地形と植生, 「群落の分布と環境」(石塚和雄編), 朝倉書店, pp.219-231, 1977.
- 5) 石塚和雄: 雪と植生 - 植物群落の大分布を中心として -, 地理, Vol.24, No.12, pp.39-48, 1979.
- 6) 酒井昭: 植物の積雪に対する適応, 低温科学 (生物編), Vol.34, pp.47-76, 1976.
- 7) 酒井昭: 「植物の耐凍性と寒冷適応」, 学会出版センター, 1982.
- 8) 吉良竜夫: 日本の森林帯 (林業解説シリーズ), 日本林業技術協会, 1949.
- 9) 吉良竜夫: 生態学から見た自然, 河出書房新社, 1971.
- 10) 朝岡良浩, 風間聡, 沢本正樹: 広域積雪水資源量の変動特性とその地理・気候依存性, 水文・水資源学会誌, Vol.15, No.3, pp.481-491, 2002.
- 11) 多田毅, 風間聡, 沢本正樹: NDVIを用いた広葉樹林帯の蒸発散量分布推定, 水文・水資源学会誌, Vol.7, No.2, pp.114-119, 1994.

(2002. 9. 30受付)