

積雪域における融雪期の 植生活動と気候因子の解析

ANALYSIS OF RELATIONSHIPS BETWEEN VEGETATION ACTIVITY AND CLIMATE FACTORS IN SNOWMELT SEASON

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6-6-06)

²正会員 博士 (工学) 東北大学大学院 環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

³フェロー 工博 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6-6-06)

Effect of snow on vegetation activity in snowmelt season and after disappearance of snow is analyzed using climate data, snow accumulation-snowmelt model and distributed hydrological model. Vegetation activity is evaluated with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from AVHRR/NOAA data. The Snow accumulation-snowmelt model can estimate snow water equivalence and snowmelt. The distributed hydrological model, which consists of 2 layers (snow and surface) and 2 tanks (soil and ground water), can estimate runoff, soil moisture and so forth.

It is shown that firstly, vegetation activity decreases if the snow water equivalence is higher than 500 mm, secondly, accumulated snowmelt for 10 days is estimated 15 days before from observed day and vegetation is more active if the snowmelt is higher than 20mm, finally, vegetation is more active if the soil wetness index is higher than 70%.

Key Words : NDVI, snow water equivalence, snowmelt, distributed hydrological model, soil moisture

1. はじめに

温暖化の影響により積雪量の減少が確実視されている。水資源・水循環の観点において、積雪量の減少は流域の貯留効果を軽減させ、また温暖化の進行は融雪出水を早めると同時に、融雪速度を促進するため、最終的に流域の流況を大きく変えるであろう¹⁾。最近では流出の変化と積雪量の減少による2次的影響が注目されつつある。その代表例として挙げられるのが、森林の植生活動である。水循環の観点において積雪は貯留の役割を果たすため、その水分供給が植生活動に与える影響は複雑である。植生活動は蒸発散と深く関わっているため、この点においても直接的に水資源・水循環と関わりがあると言える。つまり、温暖化による森林域の水資源予測を行うためには積雪域の植生活動の把握を行い、積雪を含めた気候因子に対する植生の応答を予測することが必要である。

これまで様々なスケールで気候因子と植生活動の解析が行われてきたが、日本のような湿潤気候下では植生活動は主に温度・放射に依存することが報告されている²⁾³⁾⁴⁾。積雪の存在する地域およびその影響を受ける流域

の植生活動は気温・放射に加えて降水の影響をも受けることも指摘されつつある⁵⁾⁶⁾⁷⁾。ところが、冬季の降水は降雪、堆積、融雪、流出という複雑過程を経るため、実際には降雪がいつ、どのような形態で植物に水分供給されているかを把握することは難しい。

本研究は、衛星観測から得られる植生指標の1つであるNDVIを用いて、積雪域における融雪期の植生活動と気候因子の解析を行い、融雪期における植生活動は、温度、放射以外に水分依存の影響を受けていることを明らかにする。そのために、積雪・融雪モデルおよび土壌水分を考慮した分布型水文モデルを用いて、融雪期から消雪後1ヶ月程度における積雪水量、融雪水および土壌水分量の変動と植生活動の関わりについて評価した。

2. 対象地域およびデータセット

(1) 対象地域

対象地域は岩手県北上川水系湯田ダム集水域である。湯田ダムは北緯39° 17' 55", 東経140° 53' 17" に位置し、集水面積は530km²である。この地域は奥羽山脈の太

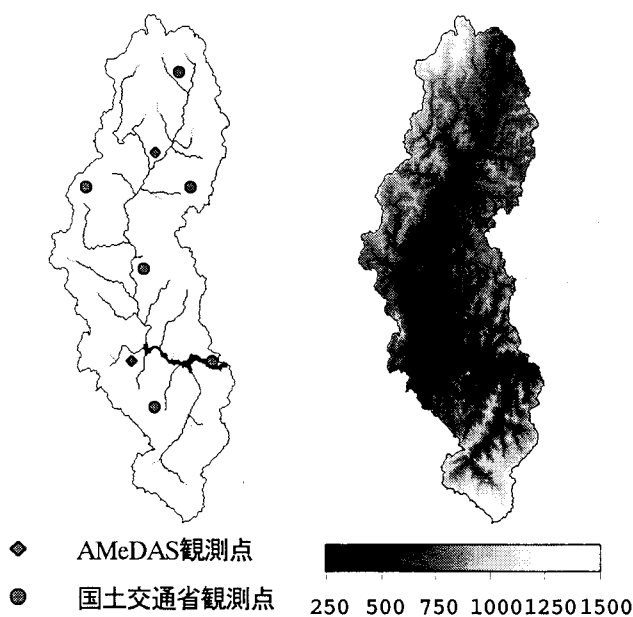


図-1 湯田ダム集水域の概要
(左) 気象観測点, (右) 標高分布(m)

平洋側に位置し、標高分布は最下流点で230m、最上流点で1545mである。流域は森林域が大部分を示しており、一部が水田、都市域などに開発されている。集水面積における各樹種の割合はそれぞれ高山植物帯が3%、落葉樹林帯が47%、常緑樹林帯10%、針葉樹林帯38%である。

(2) データセット

気象データは集水域内のAMeDAS観測点2点と国土交通省東北地方整備局が観測している6点を用いた。湯田ダム集水域および気象観測点を図-1に示す。

衛星データとしてAVHRR/NOAAを使用した。著者ら⁹⁾は衛星データから積雪域判別画像を月単位で作成しており、この画像を用いて融雪モデルのパラメータを決定した。

また、衛星画像から植生指標の1つとして知られるNDVI(Normalized Difference Vegetation Index, 正規化植生指標)を作成した。本研究では雲の影響を除去するために各月を前半と後半に分け、約15日間のNDVIの最大値合成を行った。このデータを用いて分布型流出モデルで必要とされる蒸発散の空間分布を推定した。多田ら⁹⁾は過去にNDVIから月単位の蒸発散分布を推定する方法を開発しており、対象地域に適用している。本研究でも同様の方法を用いて湯田ダム集水域の蒸発散分布を求めた。

(3) 降雪量・積雪水量・融雪量の算定

積雪水量については、式(1)に示すように、日降雪量・日融雪量の逐次計算を行い、降雪量があった場合には積雪水量に累加し、融雪があった場合には積雪水量から差し引き日単位で積雪水量を推定する。

$$SWE = SWE_0 + (SF - SM) \quad (1)$$

SWE : 積雪水量(mm), SWE_0 : 前日の積雪水量(mm),
 SF : 日降雪量(mm), SM : 日融雪量(mm)である。

(a) 降雪量

各画素の降水形態を気温 2°C 以上で「降雨」、 2°C 未満で「降雪」として、降水形態が「降雪」である場合、観測点の降水データと降雪量の標高依存性を考慮し、式(2)を用いて降雪量を補正した。各画素の気温は観測所のデータと気温逓減率 $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ を用いて補正した。降雪量の標高補正係数については、近藤ら¹⁰⁾にならい標高の増加が 1000m で降雪量が2倍になるように設定した。

$$SF = [1 + C_{SF} (elv - elv_{obs})] \times SF_{obs} \quad (2)$$

C_{SF} : 降雪量の標高補正係数, elv : 任意の標高, elv_{obs} : 観測点の標高, SF_{obs} : 観測点の降水量。

(b) 融雪量

日融雪量は底面融雪量と表面融雪量の和として算出される。底面融雪は各種知見¹¹⁾¹²⁾に基づき1日1mmとした。表面融雪量は式 Degree-Day法を用いて推定した。融雪係数については、戸塚ら¹³⁾は衛星から得られる積雪面情報と積雪モデルから得られる積雪域が最も一致する最適な融雪係数を求めており、この値を用いた。

(4) 積雪水量の検証

積雪水量の検証をする必要がある。著者ら¹⁴⁾¹⁵⁾は湯田ダム集水域を対象としてダム流入量データと水収支式を用いて融雪期における流域全体の積雪水量について算出している。その結果、1999年4月20日の集水域の総積雪水量は積雪・融雪モデルの場合 0.21km^3 、流量データと水収支式を用いた場合は 0.25km^3 であった。この結果から、融雪期のモデルの推定結果はおおむね良好な結果であるといえる。また、融雪期以前の積雪水量・融雪量の検証については3.章で言及する。

3. 分布型流出モデル

土壌水分の時空間分布について定量的に把握するために、本研究では積雪層、表面流出層、表面土壌層、基底流出層の4層を考慮した分布型流出モデル(図-2)を用いて、流出および土壌水分の計算を行った。以下に表面流出層、表面土壌層、基底流出層の計算法について概説する。また、本研究で示す土壌水分量とは表面土壌層のタンク内の水分量を意味する。

(1) 表面流出層

表面流出はDEMより擬河道網を作成して、最急勾配方向に伝播するように設定した。河道追跡法についてはKinematic Wave法を用いた。基礎式を式(3)に示す。

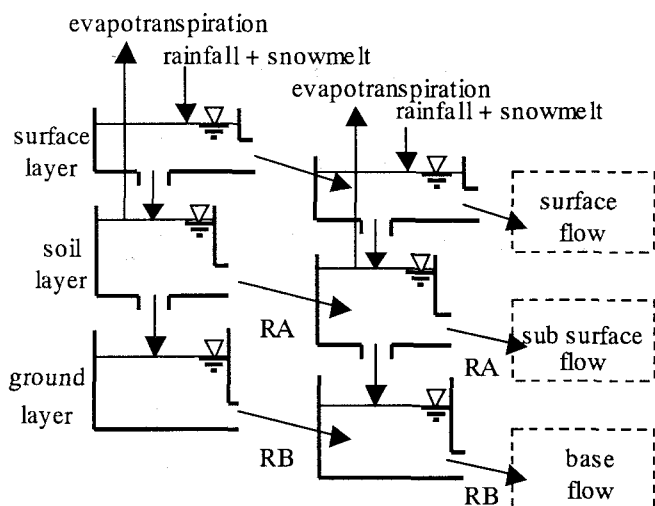


図-2 分布型流出モデルの概要

$$Qdt + (PR + SM - dWA - dWB)dxBdt$$

$$- (Q + \frac{\partial Q}{\partial t} dx)dt = (\frac{\partial A}{\partial t} dt)dx \quad (3)$$

A : 流水断面積, B : 水面幅, Q : 流量, t : 時間, x : 流下方向の距離, PR : 降雨量, SM : 融雪量.

dWA , dWB についてはそれぞれ表面土壌層, 基底流出層の水分量変化であり, この和が降雨と融雪のうち, 土壌に浸透する量である. dWA , dWB の求め方は後に概説する. 流入流量, 流出流量については水深とマニング則を用いて計算した. 計算メッシュ間隔 $\Delta x=500\text{m}$, 計算時間間隔 $\Delta t=60\text{s}$ として, 水深変化の計算を行った.

(2) 表面土壌層

表面土壌層は水平方向および鉛直方向の流れを考慮したタンクモデルを用いた. ここで, 鉛直方向の浸透および水分量の計算には近藤¹⁶⁾の新バケツモデルの概念を導入した. このモデルではある深さのバケツを想定し, 表層と土壌層との相互作用をあらわすモデルである. 表層から降雨, 融雪の浸透があった場合, その量がタンクの深さ以下であれば式 (4) (5) の関係を用いてタンクへの浸透および流出が決定する.

$$dWA = (WA_{\max} - WA_0) \tanh\left(\frac{PR + SM}{WA_{\max}}\right) \quad (4)$$

$$WA = WA_0 + dWA - E \quad (5)$$

WA : 表層タンクの含水量, WA_0 : 前日の表層タンク含水量, $WA_{\max}$: 表層タンクの高さ, E : 蒸発散量.

水平方向の流出のやりとりは式 (6) のとおりである.

$$RA = KA \times WA_0 \quad (6)$$

RA : 表層タンクからの水平方向の流出.

水平方向の流出流出は最急勾配方向の画素の表面土壌層タンクに流入する.

(3) 基底流出層

基底流出層についても表面土壌層と同様にタンクを想定し水平方向の流出および水分量の計算を行った. 計算方法は式 (7) (8) (9) (10) のとおりである.

$$FB = PR + SM - dWA \quad (7)$$

$$dWB = (WB_{\max} - WB_0) \tanh\left(\frac{FB}{WB_{\max}}\right) \quad (8)$$

$$WB = WB_0 + dWB_b \quad (9)$$

$$RB = KB \times WB_0 \quad (10)$$

WB : 地下水タンクの含水量, WB_0 : 前日の地下水タンクの含水量, $WB_{\max}$: 地下水タンクの高さ.

水平方向の流出流量は最急勾配方向の画素の基底流出層タンクに流入する. 以上の方法より湯田ダム集水域の流出, 表面土壌層タンク, 基底流出層タンクの水分量の計算を行った. パラメータとなる $WA_{\max}$, $WB_{\max}$, k_a , k_b , については各種文献¹⁰⁾¹⁶⁾¹⁷⁾に基づき, また観測ダム流入量と一致するように決定し, それぞれ $WA_{\max}=300$, $WB_{\max}=500$, $k_a=0.1$, $k_b=0.005$ とした.

(3) 検証

以上の方法を用いて, 湯田ダムへの流入量の計算結果を図-3 に示す. 2月, 3月を除いては概ね計算結果は良好であることが確認できる. 2月, 3月についてはモデルの計算値が実測値をおおきく下回る結果となった. この期間の降雪量・融雪量の推定に問題があると言える. 特に融雪量の計算についてはDegree-day法を用いているが, この方法は日射が卓越する融雪期には実用的であるが, それ以外の気象要素が融雪熱を支配する降雪期および堆積期には必ずしも実用的であるとは言えない面がある. 特に, 2月, 3月は季節風による強風の影響が, 熱収支に大きく影響するはずである. また, 別の原因としてモデル上では降水形態を降雪と判別していても, 実際には降雨であったと考えられる. 実際に2月に観測値には数回, 急激な出水が見られるが, モデルはこの出水に応答していない. 4月中旬以降については, 計算値と実測値がよく一致していることが確認でき, 融雪量の計算は問題ない.

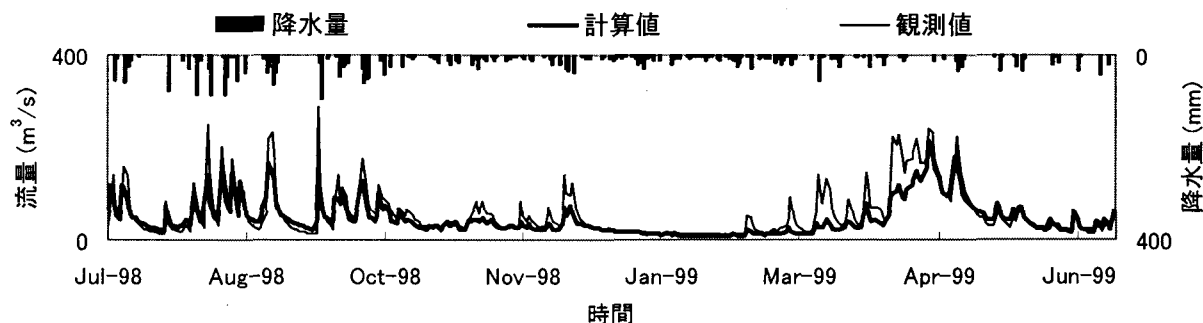


図-3 流出モデルの計算結果（湯田ダム流入量）

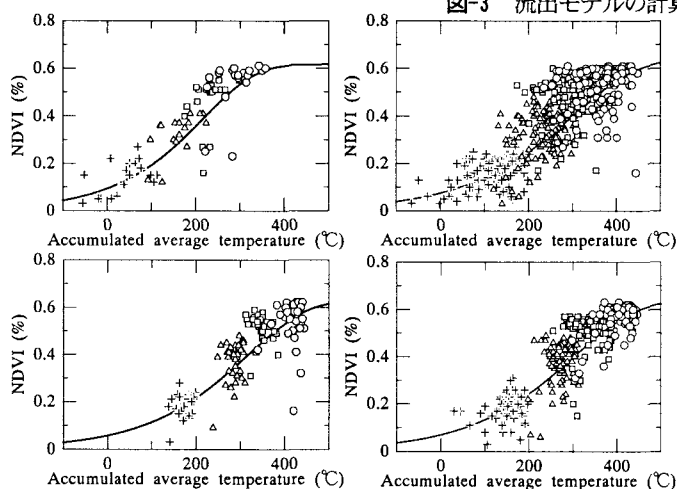


図-4 30日間積算気温とNDVIの関係

左上：高山植物帯，右上：落葉樹林帯

左下：常緑樹林帯，右下：針葉樹林帯

＋：4月下旬，△：5月上旬，□5月下旬，○：6月上旬

4. 結果および考察

石原・田村¹⁸⁾はNDVIは約30日前からの日平均気温の積算値と良い相関があると報告している。そこで、晴天日のNDVIが得られている4月下旬，5月上旬，同下旬，6月上旬のNDVIと30日間の日平均気温の積算値との関係を高山植物帯，落葉樹林帯，常緑樹林帯，針葉樹林帯に分類して図-4に示す。ここでの30日間の積算気温は，15日間のNDVIを最大値合成する際に，最大値が得られた日から30日前の積算気温を用いている。各植物において気温の積算値とNDVIの関係について正の相関が見られる。それぞれの相関係数は高山植物が $R^2 = 0.77$ ，落葉樹林が $R^2 = 0.68$ ，常緑樹林が $R^2 = 0.80$ ，針葉樹林が $R^2 = 0.80$ であった。6月上旬のNDVIデータについて，高い積算気温に関わらず，低いNDVIを示している点があるが，これらは雲の影響を除去しきれなかったことが原因である。落葉樹林帯の相関係数が低いがこの理由として，高山植物帯や常緑樹林帯と比較して，面積が大きいこと，また，落葉樹林帯は脊梁山脈に属する集水域の西側に位置しており，積雪の影響を東側よりも強く受けるためであると考えられる。実際に，東側よりも西側の方

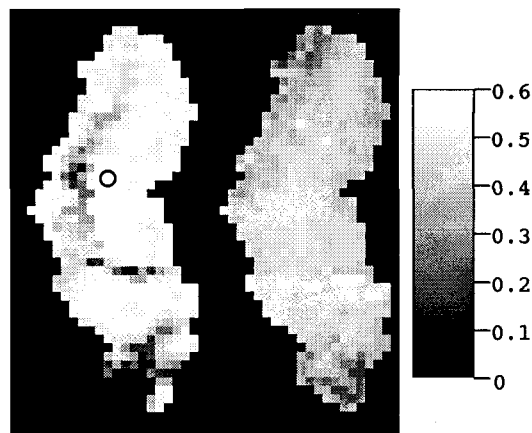


図-5 (左)衛星観測によるNDVI，(右)気温による推定値NDVI

が積雪量は多く，消雪日も遅いことが衛星観測および積雪・融雪モデルより確認されている。

積雪が植生活動に与える影響を抽出するために，まず，気温データを用いて気温により決定されるNDVIを推定する。石原・田村¹⁸⁾は30日間の積算気温を用いて時系列のNDVIデータを推定するモデルを構築している。モデル式は式(11)のとおりである。

$$NDVI = a \exp(-\exp(b - cT)) + v \quad (11)$$

a, b, c ：回帰係数， T ：30日前からの日平均気温の積算値， v ：NDVIの最低値。

回帰係数については図-4のデータを基に最小二乗法を用いて樹種ごとに決定した（以降，30日間の積算気温より推定されたNDVIを「推定値NDVI」と記述し，気温により決定する潜在的なNDVIとして扱う）。図-5に1999年5月下旬における衛星から得られたNDVI分布と気温により得られた推定値NDVIの分布を示す。また，図-6に衛星観測によるNDVIと推定値NDVIの差の分布を示す。この図では推定値NDVIが過大評価している地域と過小評価している地域に分類してそれぞれ示す。この図によって気温以外の気候因子が植生活動に与える影響を抽出できると考えられる。また，積雪との関係を考察するために30日前と15日前の積雪水量分布を図-7に，

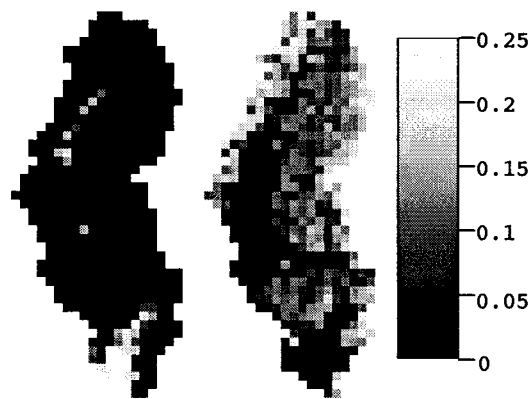


図-6 衛星観測によるNDVIと推定値NDVIの差
左：過大評価の地域，右：過小評価の地域

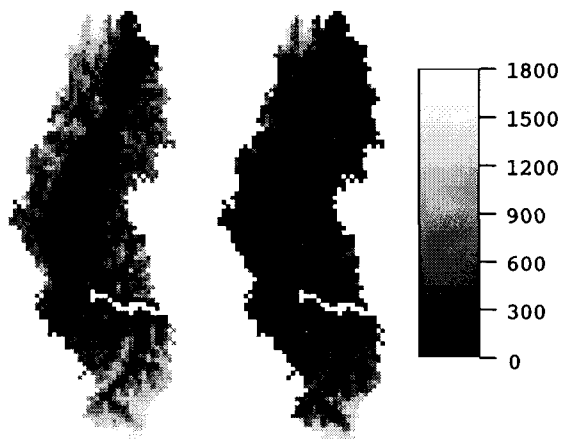


図-7 積雪水量(mm)
左：4月20日（30日前），右：5月7日（15日前）

30日前および15日前の10日間積算融雪量分布を図-8 にそれぞれ示す。ここで、30日前の10日間積算融雪量とはNDVI観測日から40日前から30日前までの10日間の融雪量の和を意味している。また、15日前、30日前の積雪水量、積算融雪量に注目している理由は、植生バイオマスは当日の気象条件で決定するのではなく、ある程度前の期間からの平均的な気象条件に依存するからである。図-6で推定値NDVIが過大評価している地域は南端の高山域の地域である。これらの地域は図-7の積雪モデルの出力結果で観測15日前の場合、約500mm以上の積雪水量が存在していることが確認できる。このことから、積雪の影響により植生活動が抑制されてしまうことと、地表面が積雪に覆われてしまい、観測のNDVIが低くなってしまうことの2つの原因が考えられる。次に推定値NDVIが過小評価する場合については、北西部と東部の地域で顕著である。これらの地域では15日前から積雪水量は存在しないが、図-8より15日前までの10日間積算融雪量が豊富な地域と対応していることが確認できる。この地域では、10日間の積算融雪量が20mm以上である。つまり、観測15日前には積雪水量がほぼ存在しないため、植生活動は開始しており、更に、融雪による水分供給が

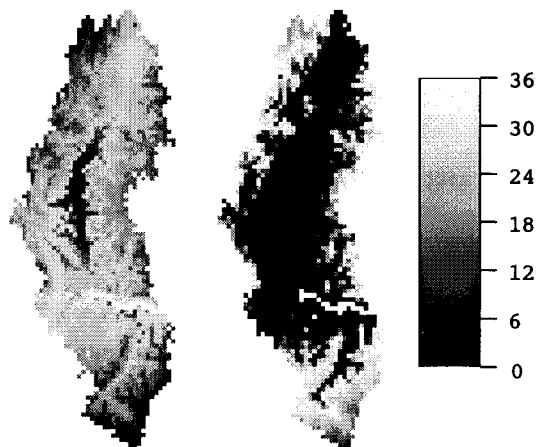


図-8 10日間積算融雪量(mm)
左：4月20日（30日前），右：5月7日（15日前）

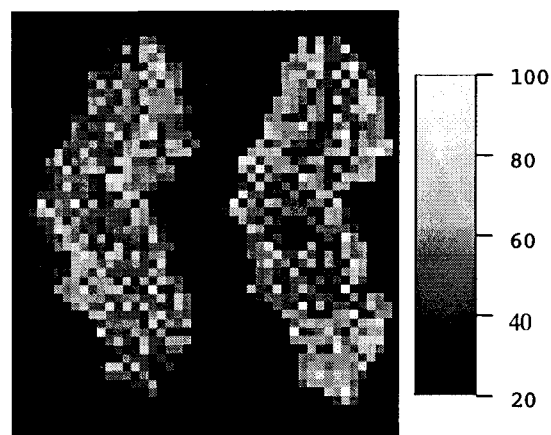


図-9 表層タンク(深さ300mm)の土壌水分率(%)
左：4月20日(30日前)，右：5月7日（15日前）

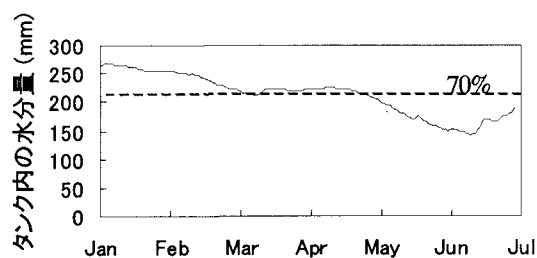


図-10 土壌水分量の季節変化
(点線は表層土壌タンク内の水分率70%を示す)

豊富なために気温による推定値NDVIよりも実際に観測されたNDVIの方が大きくなったと考えられる。次に、集水域中央部でやや過小評価されている。ただし、前述した融雪量が豊富な地域ほど過小評価の度合いは大きくない。この地域では15日前の積雪水量もなく、かつ15日前までの10日間積算融雪量もほぼ存在しない。この地域の過少推定の原因を考察するために、観測日から30日前および15日前の分布型流出モデルによる土壌水分率の分布出力結果を図-9に示す。この結果から、このような地域では融雪量はないが15日前には土壌水分率が70%以上ある

地域であることが確認できる。つまり、上流側から融雪水が地表流および地中流として流入してくることにより、土壌水分が豊富に存在するため、気温の影響以外に水分の影響を受けて植生活動が活性化され、NDVIが大きくなると考えることができる。このことを確認するために、図-5 の丸印地点での土壌水分量（表層土壌タンク内の水分量）の時系列変化を、図-10 に示す。この図からNDVIが観測された5月22日から15日前まではおおよそ土壌水分量が70%程度に保たれていることが確認できる。

5. おわりに

本研究では湯田ダム集水域を対象として、積雪の影響を受ける地域において、融雪期における植生活動と気候因子の関係について気候データ、積雪・融雪モデルおよび分布型流出モデルの出力結果を利用して解析した。結果、以下の知見が示唆された。

- ・ 植物の成長開始時期には植生活動は気温・放射の気候因子以外に水分にも依存する。
- ・ 15日前の積雪水量が500mm程度ある場合、植生活動は抑制される。
- ・ 消雪した場合でも15日前までの10日間積算融雪量が10mm以上の場合には植生活動は気温の影響以外に融雪量の影響を受け、より活性化する。
- ・ 15日前の積算融雪量がない場合でも、土壌水分率がおおよそ70%以上ある場合にも植生活動は気温の影響以外に土壌水分の影響を受け、やや活性化する。

上記の結果は積雪の存在する地域での植生活動モデルの精度の向上に対する知見となる可能性を有している。また、このような積雪域に適応可能な植生活動モデルを構築することで、温暖化による積雪量の減少に対する植生活動、水循環・水資源の応答を予測することも可能になるであろう。

謝辞：本研究は「独立行政法人森林総合研究所」、「科学研究費補助金（代表：澤本正樹）」ならびに「財団法人建設工学研究振興会」の助成を受けました。また、国土交通省東北地方整備局北上川ダム統合管理事務所には観測データを提供して頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Cess, R. D., G. K. Potter, N. H. Zhang, J.-P. Blanchet, S. Chelita, et al.: Interpretation of snow – climate feedback as produced by 17 general circulation model, *Science*, 253, pp.888-892, 1991.
- 2) R. R. Nemani, D. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, C. J. Tucker, R. B. Myneni, S. W. Running.: Climate-driven

increase in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science*, 300, pp.1560-1563, 2003.

- 3) A. Kondoh: Relationship between the global vegetation index and the evapotranspiration derived from climatological estimation method, *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.12, pp.1569-1587, 1998.
- 4) A. Kawabata, K. Ichii, Y. Yamaguchi: Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.22, pp.1377-1382, 2001.
- 5) 朝岡良浩, 風間聡, 沢本正樹: 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—, 水工学論文集, No. 47, pp. 163-168, 2003.
- 6) 梶本卓也, 大丸祐武, 杉田久志編著: 雪山の生態学 東北地方の山と森から, 東海大学出版会, 2002.
- 7) Danny Marks, John Kimball, Dave Tingey, Tim Link: The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood, *Hydrological Processes*, Vol.12, pp.1569-1587, 1998.
- 8) 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・気象依存特性水文・水資源学会誌, Vol. 15.No. 3, pp. 481-491, 2002.
- 9) 多田毅, 風間聡, 沢本正樹: NDVIを用いた蒸発散推定, 水工学論文集, No. 38, pp. 155-160, 1994.
- 10) 近藤純正, 本谷研, 松島大: 新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量, 流出量, 積雪水当量, 及び河川水温の研究, 天気, Vol. 42.No. 3, pp. 821-83, 1995.
- 11) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 12) 新井正: 雪氷水文現象, 基礎雪氷講座VI, 第3章, 融雪量と融雪出水, 古今書院, pp. 49-91, 1994.
- 13) 戸塚岳大, 風間聡, 朝岡良浩, 沢本正樹: 積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪係数の解析, 水文・水資源学会誌, Vol. 17.No. 5, pp.493-502.
- 14) 風間聡, 沢本正樹, Jirayyot Kittiong: 滝ダム流域における融雪期の積雪深モデル, 水工学論文集, No. 36, pp. 611-616, 1992.
- 15) 朝岡良浩, 風間聡, 沢本正樹: 東北地方の積雪深分布推定と水収支式による検証, 平成14年度土木学会東北支部技術発表会講演概要, pp. 132-133, 2003.
- 16) 近藤純正: 表層土壌水分量予測用の簡単な新バケツモデル, 水文・水資源学会誌, Vol. 6.No. 4, pp. 344-349, 1993.
- 17) 近藤純正, 中島建雄, 渡辺力: 森林流域貯留水量の蒸発散抑制の考察, 水文・水資源学会誌, Vol. 7.No. 5, pp. 402-410, 1994.
- 18) 石原光則, 田村正行: 日本における気象条件を用いたNDVIの推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 24.No. 3, pp. 255-266, 2004.

(2004. 9. 30 受付)