

名取川流域における水資源評価

WATER RESOURCES EVALUATION IN THE NATORI RIVER BASIN

土田 恭平¹・風間 聡²・岡崎新太郎³・沢本 正樹⁴

Kyohei TSUCHIDA, So KAZAMA, Shintaro OKAZAKI, Masaki SAWAMOTO

¹ 学生員 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 工博 東北大学大学院助教授 工学研究科 (同上)

³ 正会員 東北地方整備局仙台工事事務所 (〒982-8566 宮城県仙台市太白区郡山五丁目 6-6)

⁴ フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

In order to evaluate water resources of the Natori river basin, a runoff model was developed considering evapotranspiration and snowmelt, which were estimated by satellite observation. It was discussed that land use and two dams reservoirs effects influence runoff with storage. As the results, lower plain region has much water resources, on the other hand, the mountainous forest region has the utilization difficulty of water resources.

Key words: Dynamic Wave, Remote sensing, Agricultural water, GIS

1. はじめに

近年、全世界で地球規模の環境問題について議論・研究^{1), 2)}されている。その中でも、人間活動によって大量に排出される CO₂ や CH₄ 等の温室効果ガスは地球温暖化を促し、ひいては、大規模な気候変動から陸域の水循環システムに多大な影響を及ぼすと考えられている。水循環システムの異常として、気候変動による小雨期間の長期化が最も懸念される問題の一つである。この渇水時にも水を安定的に利用できるような持続的水利用システムの構築を考慮した流域開発および水資源計画が必要となる。日本における降水量は時間的・空間的にかなり変動する。また河川が急峻で短く、流域面積が小さいため、降水量を水資源として十分に利用するのは難しい状況にある。

一方、雪は「白いダム」とも呼ばれるほど貯留性が高いため、融雪期から梅雨までの貴重な水資源としての利用が期待される。日本は世界でも希に見る豪雪地帯であり、流域の積雪量を把握することは水資源計画にあたり非常に重要である。広域の積雪を現地で観測する際、衛星リモートセンシングの有効性が指摘されている^{3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}。本研究では、NOAA/AVHRR データ、国土数値情報、AMeDAS データを用いて、東日本における積雪域を月 1 枚の割合で推定し、積雪域からの融雪量をモデルに組み込んだ。

また、地球規模の異常気象や環境破壊のメカニズムを

支配しているエネルギー収支、水収支を解明するためには、蒸発散量を把握することも不可欠である。本研究では蒸発散量とその地域の植生との相関に着目し、衛星データから計算される NDVI (Normalized Difference Vegetation Index : 植生指標) を用いて推定された蒸発散分布¹⁾を推定し流出モデルに組み込んだ。

本研究では名取川流域における融雪水と雨水流出を土地利用と蒸発散量を考慮した流出モデルを作成し、各月の流域に存在する水資源量や、名取頭首工における取水量と流量の関係から頭首工が名取川に与える影響について考察した。

2. 流域の概要とデータセット

(1) 流域の概要

対象地域は一級河川名取川水系(図 1)である。宮城県中央部に位置し、奥羽山脈から仙台湾へと注ぐ。幹線流路延長は 55km、流域面積は 939km²(山地 675.1km²、平地 245.1km²、河川区域 20.7km²)である。流域内には仙台市を代表とする都市圏、穀倉地帯である水田域、森林が広く分布し種々の土地利用が存在する。

(2) データセット

流出モデルのデータセットとして、国土数値情報をもとに流域内の標高、土地利用、河道マップを作成した。

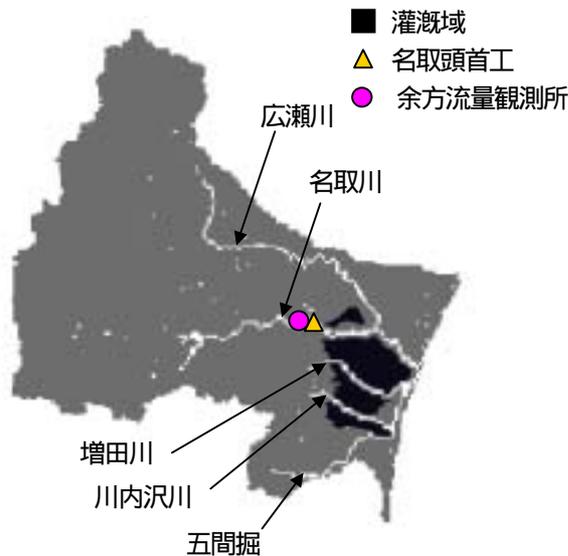


図 1 名取川流域概要図

降水量データは気象庁月報の1999年分より、また、積雪マップおよび蒸発散マップを人工衛星 NOAA/AVHRR の画像から作成した。

3. 積雪分布の推定

(1) 雲域判定

1枚のNOAA/AVHRRから積雪域を判断するには、雲域との区別が重要となるが、これは多波長のchannelを組み合わせることで可能となる。判定方法は以下のとおりである。縦軸にChannel.4輝度温度、横軸にChannel.1アルベドをとり、頻度分布を作成する。作成した頻度分布を目視により、アルベド値の高い塊、すなわち白く見える塊を雪、または雲と判定し、アルベド値の低い部分を無積雪域と判定する。

雲または雪と判定した部分のうち、高層の雲は温度が極端に低いのでChannel.4の輝度温度の情報によって判定できる。しかし、低層の雲についてはChannel.1の可視情報とChannel.4の熱情報だけでは判定できない。そこで、Channel.3の中間赤外温度を利用する。中間赤外の波長域が大気中の水粒に強く反射する性質を持つことから、水粒を多く含む高度の低い雲を判定することができる。

(2) 積雪マップの作成

前節の方法で得られた積雪域と雲域を区別した画像を毎日作成することは可能である。しかし、被雲率が50%以下の画像はほとんど得られない。そこで、ある程度晴れた画像をあらかじめ選んだ上でその日を中心とし、その画像の雲の部分のデータを前後1週間の観測の晴れた日のデータと入れ替えることで、1枚の晴天の画像、積雪マップ(積雪分布図)を作成した。図-2に1999年3月の東日本全域と名取川流域の積雪マップを示す。

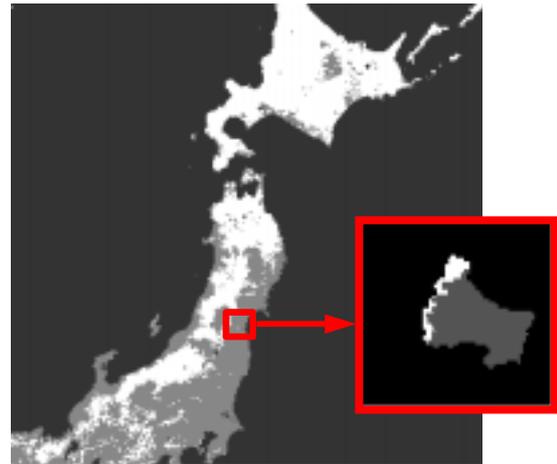


図 2 1999年3月の積雪マップ

4. NDVIを用いた蒸発散量推定

蒸発散量を支配する因子には、気温、地表面温度、日照時間、湿度、風速、土壌水分等があるが、これらは全てその地域の植生に影響を与えており、また植物自身も、蒸発散量に影響を与えていると考えられる。そこで、植生をパラメータとして蒸発散量を推定できることが考えられる。したがって、NDVIを用いることで蒸発散量を推定し得ると考えられる。

これまでの蒸発散量は、限られた地点の情報、または流域全体の水収支からしか算定されなかった。そのため広域面からの蒸発散や流域内での空間的分布の推定は困難であった。しかし、NDVIによる推定が可能であれば、広域の面的情報が得られ、蒸発散量の分布を容易に知ることが出来る。さらにNDVIだけを使った推定であれば、気象、水文情報の整備されていない地域についても蒸発散量を推定することが可能となる。そこで本章では、図-3に示す多田⁷⁾が求めた釜房ダム流域におけるNDVIと蒸発散量との関係を用いて、名取川水系の蒸発散量及び、その空間的分布の推定を行った

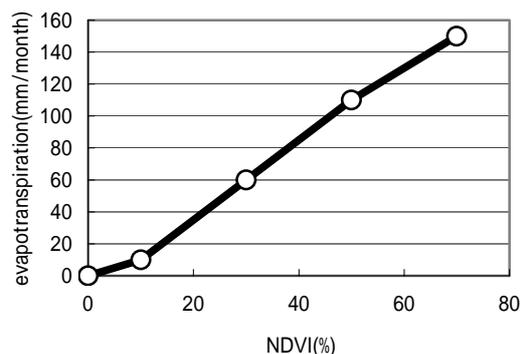


図-3 釜房ダム流域におけるNDVIと蒸発散の関係¹⁰⁾

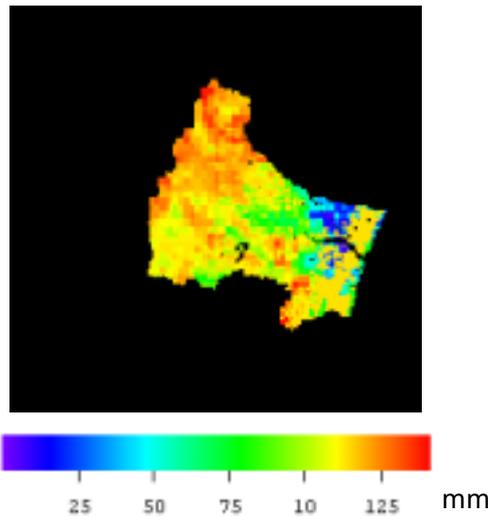


図 - 4 7月のNDVIによる蒸発散量分布

5. 流出計算法

流域はそれぞれ固有の河道網と斜面から成り立っているため、流域を河道と斜面とに分割し、河道系と斜面系それぞれについて水理学的に追跡を行う。本研究では、名取川水系のうち流量が大きくなる下流部の名取川、広瀬川、増田川、川内沢川、五間堀の5つの河川を河道系として扱った。斜面流出には kinematic wave モデルを、河道流出には dynamic wave モデルを用いて流出計算を行った。

(1) Kinematic wave 法について

kinematic wave 法は、雨水流出を運動方程式と連続の式を用いて水理学的に追跡する方法で、雨水流下の下流側の条件が上流側に及ばないという仮定のもとに成り立っている。kinematic wave モデルは、本来、斜面上を流下する地表流を対象としている。しかし、豪雨時の出水解析には表面流と中間流を合わせた直接流出に対して kinematic wave モデルを適用しても十分な結果が得られることが多い。本研究では、地下浸透は考慮せず、降雨および融雪による全流出量から蒸発散量を引いたものがすべて地表流であるとして kinematic wave 法を用いた。

降雨および流出はメッシュ点でのみ起こるものとし、このとき各メッシュへの流入量に降雨量および融雪量が加わり下流へ伝播される。連続の式は次のようになる。

$$Qdt + (r + s_m - E) dx B dt - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial t} dx \right) dt = \left(\frac{\partial A}{\partial t} dt \right) dx \quad \dots (5.1)$$

A: 流水断面積 B: 水面幅 Q: 流量
t: 時間 x: 流下方向の距離 r: 降雨量
s_m: 融雪量 E: 蒸発散量

上式で矩形断面を仮定し整理すると、下式が得られる。

$$\Delta h = \frac{\Delta t}{B \Delta x} (Q_{in} - Q_{out}) + (r + s_m - E) \Delta t \quad \dots (5.2)$$

h: メッシュの水深変化量 Q_{in}: 流入流量
Q_{out}: 流出流量 t: 計算時間間隔
x: 計算メッシュ間隔

上式の第1項、第2項はそれぞれ流入、流出による水深の変化量を表している。よって第2項をメッシュごとに求め、その値を流下先のメッシュに加えることにより各メッシュでの水深変化を求めていく。

(2) Dynamic wave 法について

河道を流れる洪水流は時間的・空間的に変化する。洪水流を支配している方程式は非線形の偏微分方程式であり、厳密な解を得ることは困難である。そのため、様々な数値解析法が提案されている。dynamic wave モデルとは差分法を用いて洪水流計算を行うモデルであり、運動方程式を全く省略せずに計算を行うことができる。

洪水流の基礎方程式は次の連続式(5.3)と運動方程式(5.4)から成っている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad \dots (5.3)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = 0 \quad \dots (5.4)$$

A: 断面積 Q: 流量 q: 横流入量
g: 重力加速度 v: 流速 H: 水位
n: マニングの粗度係数 h: 水深

連続式(5.3)で水路を矩形断面とし、時刻n, メッシュ番号iの点を差分中心として差分化したものを_{n+1}h_iについて解くと、以下の式(5.5)が得られる。

$${}_{n+1}h_i = {}_n h_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{{}_{n-1}h_i + {}_{n-1}h_{i+2}}{2} {}_n v_{i+1} - \frac{{}_{n-1}h_{i-2} + {}_{n-1}h_i}{2} {}_n v_{i-1} \right) - \frac{\Delta t}{B} q \quad \dots (5.5)$$

運動方程式(5.4)を、時刻n, 格子番号Iの点を差分中心として差分化し、_{n+1}v_iについて解くと、以下の式(5.6)が得られる。

$${}_{n+1}v_i = \frac{{}_{n-1}v_i (1 - fr) - \frac{\Delta t}{4\Delta x} ({}_{n-1}v_{i+2}^2 - {}_{n-1}v_{i-2}^2) - g \frac{\Delta t}{\Delta x} ({}_n H_{i+1} - {}_n H_i)}{1 + fr} \quad \dots (5.6)$$

$$fr = \frac{gn^2 |{}_n v|_i \Delta t}{2h^{4/3}} \quad \dots (5.6)$$

河道では(5.5), (5.6)を用いた差分計算により流出計算を行った。

6. 水資源解析

本研究における水資源量とは各メッシュの水収支の残差であり、そのメッシュで得ることができると考えられる水の量である。前述の流出計算は国土数値情報をもとに作成した標高マップ上で、各メッシュでの水収支より行った。流出計算の概念図を図-5に示す。

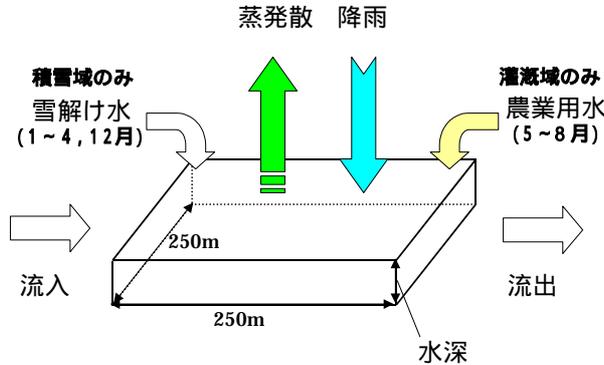


図-5 水収支概念図

(1) 計算条件

計算に用いた条件を以下に示す。

・時間スケール

流出計算の対象期間は1999年の1月から12月とし、繰り返し計算に用いた時間間隔は10秒である。

・空間スケール

国土数値情報に合わせて、1メッシュの大きさは250m×250mとした。ただし、河川部については陸地と計算方法が異なるので、上流端の川幅を10mとし、合流部より下流での川幅は元の河川の幅の和を用いた。

・融雪量

前述の積雪域(1月から4月と12月)にあたるメッシュでは、1日あたり1.4mmの雪解け水¹⁰⁾が流出するとし、10秒あたりの雪解け水をメッシュの流入量に加えた。

・降水量

対象期間の気象庁月報より川崎観測所における降水量を流域全体に一样にあたえることにした。特別降水量を10秒あたりに換算し、メッシュへの流入量に加えた。ただし、気温が2以下の場合には降雪であるとみなし、流出計算で扱わないことにした。

・ダム放水量

広瀬川、名取川の上流にはそれぞれ大倉ダム、釜房ダムがある。そのため対象期間のダム放水量データの日別値を10秒あたりに換算し、広瀬川と名取川の上流端の条件として用いた。

・粗度係数

流出計算には以下の粗度係数値を用いた¹²⁾。

水田・畑	: n = 0.025
宅地	: n = 0.04
山林	: n = 0.06
水域	: n = 0.025
河道	: n = 0.025

・農業用水

名取頭首工から取水される水のうち農業用水(5月から8月)は、図-1に示した灌漑域で利用される。灌漑域にあたるメッシュでは、農業用水を流入量に加えた。

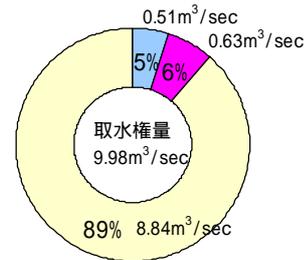
(2) 名取頭首工から取水される農業用水の割合

名取頭首工において設定されている水利権から、農業用水として取水される水量の比率を算定した。名取頭首工においては、上水、工業用水および農業用水の取水権が設定されており、これらの水利権量は、それぞれ次のように定められている。

上水(高田上水)0.51m ³ /sec (通年)
工業用水0.63m ³ /sec (通年)
農業用水8.84m ³ /sec
	(しろかき期 : 5/1~5/15)
	7.64m ³ /sec
	(灌漑期 : 5/15~8/31)

これらから、しろかき期および灌漑期における取水権量の比率を計算した結果を図-6に示す。

しろかき期(5/1~5/15)



灌漑期(5/15~8/31)

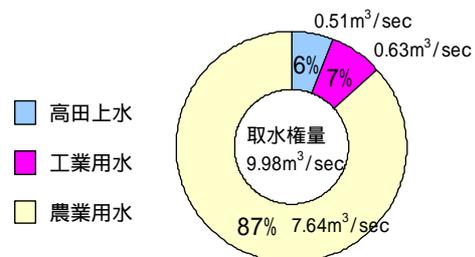


図-6 しろかき期および灌漑期における取水権量の比率

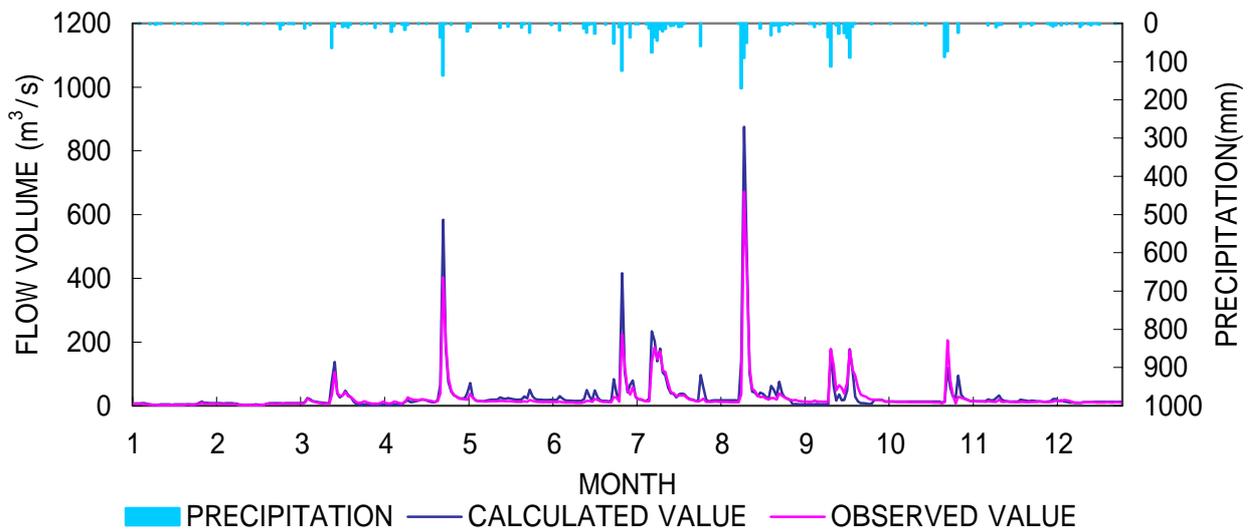


図 - 7 ハイドログラフの比較

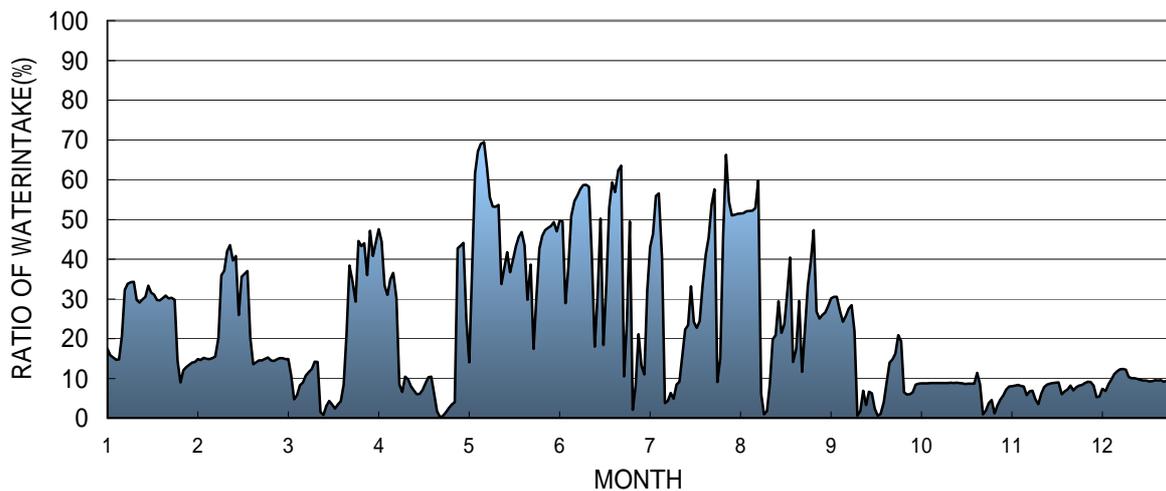


図 - 8 流量に占める取水量の割合の変化

図 - 6 からわかるとおり、名取頭首工においては、農業用水としての水量が全水量の約 90% を占めており、この取水量の流量に占める割合によってはそれより下流の河川においての水質悪化が考えられる。本研究では名取頭首工の上流に位置する余方地点における流量と名取頭首工からの取水量を比較することによって、取水による名取川への影響についても考察する。

7. 結果および考察

流出計算により得られた 1999 年のハイドログラフと余方流量観測所における実測値の比較を図 - 7 に示す。また、計算流量に占める名取頭首工からの取水量の割合を図 - 8 に、1999 年 4 月、8 月の平均水資源分布を図 - 9 と図 - 10 にそれぞれ示す。

本研究で構築した名取川流域の水循環モデルは、全体的に実測値よりも高い値を示した。これは今回のモデルで表面流のみを考慮しており、浸透の影響を考慮してい

ないためであると考えられる。しかし、流量ピーク時の一致や降水に対する応答を考慮すると、本モデルは良好な結果を示しているといえる。積雪、蒸発散、農業用水を考慮しながら名取川流域の流況の概略を再現できたと言える。

余方流量観測所における河川流量に占める取水量の割合については、やはり農業用水を取水している 5 月から 8 月にかけて高い割合を示した。特に 5 月のしらかき期(1 日から 15 日)には 7 割近くが取水されてしまっている。まとまった雨の影響で一時的に河川流量が増えている時期には、農業用水の占める割合が低くなる期間も見られるが、降水がなく流量の低い時期には農業用水は河川流量の多くの割合を占めていることがわかる。渇水時には下流側での流量の大きな減少と、それに伴う水質悪化などの問題が予想される。

図 - 9 と図 - 10 の平均水資源分布図は各日の貯留高さの平均を表している。河川への集水の様子や名取頭首工からの灌漑域への取水の様子を再現することができた。

この図から、上流域よりも下流域に多くの水資源が存在していることがわかる。上流域では植生が豊かであることから蒸発散の影響が大きく、また斜面も急であるために速やかに流出してしまうためであると考えられる。下流域では勾配が緩やかであることに加えて、河川部の水深も十分あるために河川への流入が少なくなっているために水が溜まりやすくなっていると考えられる。

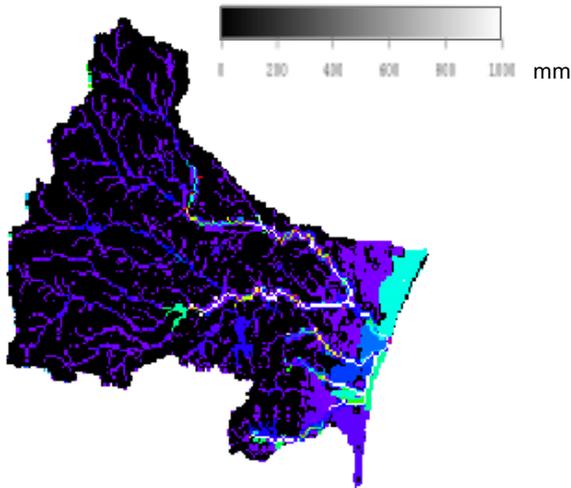


図 - 9 平均水資源分布 4月

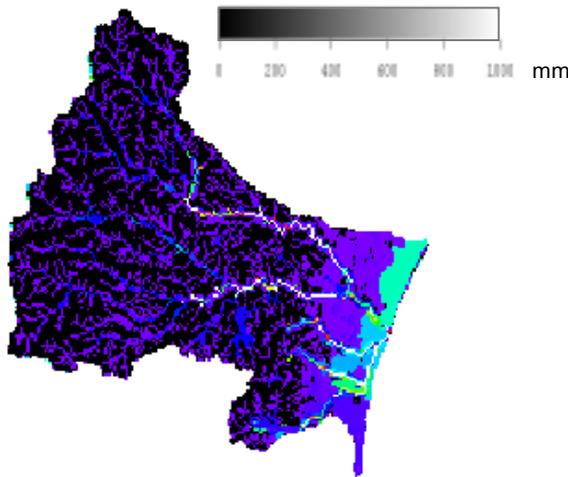


図 - 10 平均水資源分布 8月

8 . 結論

本研究では kinematic wave 法と、dynamic wave 法を用い名取川流域における水資源解析を行った。その結果得られた結論を以下に示す。

- ・ 降水の影響や融雪の影響を流出解析でうまく表現することができた。
 - ・ 名取頭首工から灌漑域への取水が流域に与える影響を評価した。
 - ・ 名取川水系の水資源分布を把握することができた。
- この結果は将来の土地利用の変化や気候変動が起こった場合の水資源量の予測や水資源計画に貢献することが

期待される。しかし、本モデルは地中への浸透や、融雪と降水の区別が明確になされていない。これらの点を改善することでより正確な解析が可能になると考えられる。

謝意：本研究を遂行するに際しては、国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所に放水量のデータを利用させていただいた。また、土木学会と国土交通省の共同研究、河川懇談会の援助を受けた。ここに併せて謝意を表す。

参考文献

- 1) 多田毅：衛星データによる東北地方の蒸発散推定手法の開発，東北大学修士論文，1995.
- 2) 田窪昭夫：衛星による植生指標変動の地域特性解析，東北大学修士論文，2001 .
- 3) 小池俊雄，高橋裕，吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定，土木学会論文集，土木学会論文集 第 357 巻/ -3, pp.159-169, 1985 .
- 4) 陸是皎，早川典生，吉岡善浩：衛星積雪面積情報と分布型流出モデルを用いた広域降雪抽出特性の試み，水工学論文集，41，pp.239-244, 1997
- 5) 風間聡，沢本正樹：NOAA/AVHRR を用いた積雪深分布および水資源量推定，水文水資源学会誌，第 8 巻，第 5 号, pp.477-483, 1995.
- 6) 土屋巖：リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析，国立公害研究所研究報告，第 71 号，1984 .
- 7) 風間聡，川村宏，枝松芳枝，沢本正樹：AVHRR/NOAA データによる積雪域抽出パラメータの経時変化，日本リモートセンシング学会誌，第 12 巻，第 4 号, pp.59-69, 1995.
- 8) 風間聡，川村宏，松澤茂，及川一志，沢本正樹 N-LAND データベース・システムを用いた合成積雪画像の作成と東北地方の積雪域の変化，日本リモートセンシング学会誌，第 16 巻，第 3 号, pp.56-64, 1996.
- 9) 本谷研，山崎剛：NOAA 近赤外チャンネルの Bidirectional (角度依存) 特性とその応用による積雪判別，水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp.112-123.1997.
- 10) 渡辺浩明，風間聡，多田毅，澤本正樹，岡崎新太郎：土地利用を考慮した時空間蒸発散解析，河川技術論文集，8 巻，2002 (印刷中) .
- 11) 古河俊也，笹本誠，堺茂樹，平山健一：降雪・積雪・融雪現象に関する現地観測，水工学論文集，第 32 巻，pp95-99, 1994
- 12) 氾濫シミュレーション(2)，土木研究所資料第 2175 号