

衛星データを用いた東北地方の年水収支解析

Analysis of Yearly Water Balance in the Tohoku district
using satellite data

風間 聡*・多田 毅**・沢本正樹***

By So KAZAMA, Tsuyoshi TADA and Masaki SAWAMOTO

Although a large number of effort has been made on the analysis of water balance in a small basin, little is known about the balance in wider area in detail. Remote sensing technic is useful for the analysis. Recently snow volume and evapotranspiration distribution can be evaluated from satellite data. Therefore water balance in the Tohoku district, 66,000 km², is studied from using these data in this paper. As the result, we obtain the distribution of precipitation and runoff ratio, and discuss these data.

Keywords : water balance, remote sensing, Tohoku district, snow

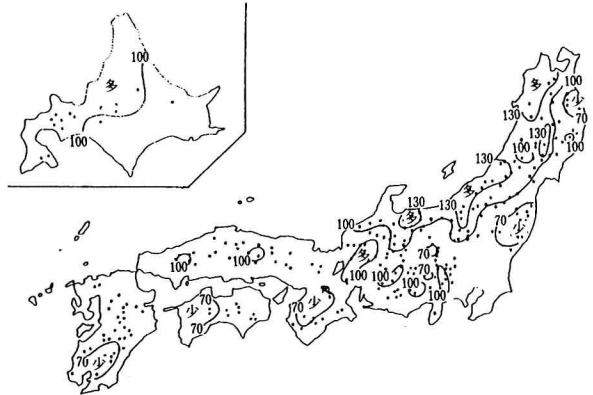
1. はじめに

近年、様々な水文国際プロジェクトが行われ、水文観測と数値実験が多様な地表面において実行されている。その範囲は広大であり、目的は地球上においての水循環の把握であるといえる。例えば古くはThornthwaite¹⁾のような気候学的手法から最近の数値計算の推定法が数多く挙げられる。気候学的手法の多くは何点かのデータから熱収支式を解いて、その結果の補間から広域のデータを作成するものである。数値計算は、GCMに代表されるように気象観測に基づき移流方程式と保存則、熱運動式を解くものである。一方、小さなスケールの水収支の問題は、流域単位で多く行われている。これらは、例えばHudsonら²⁾や風間ら³⁾のように、ダムサイトでの流出量のデータから水収支を求めたものがほとんどである。しかし、日本において、流量データと降水データを用いて水収支を求めると、いくつかの問題が生じることがある。篠原ら⁴⁾は流量年表と降水分布から日本の流出率分布を調べ(図-1)、流出率が100%を越える様な地域が生じることや、極端に低い地域があることを指摘し、樫根⁵⁾はこの原因として、(1)積雪地での降雪量の補正、(2)火山性の地形では地下水移動、(3)流量観測の正確性、との問題点を指摘した。これに対して、風間ら³⁾は奥只見流域で降雪の補正を行い、水収支を調べ年70%の流出率を得た。もし、流出率の分布データが得られるのであれば、その場所で流出係数は決めることができ、物理モデルの作成にも貢献できるし、水資源情報としても利用で

* 正会員 博(工) 筑波大学講師 構造工学会
(〒305 つくば市天王台1-1-1)
** 学生会員 修(工) 東北大学大学院 工学研究科
*** 正会員 工 博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

きる。

本研究は、積雪域として東北地方を対象に、積雪分布データを用いて降水量の補正を行い、蒸発散の分布データから年水収支の分布を調べ、加えて流出率の分布を調べ、その結果について考察したものである。



図－1 日本の流出率分布（篠原）

2. 降水分布

2. 1 分布データの作成

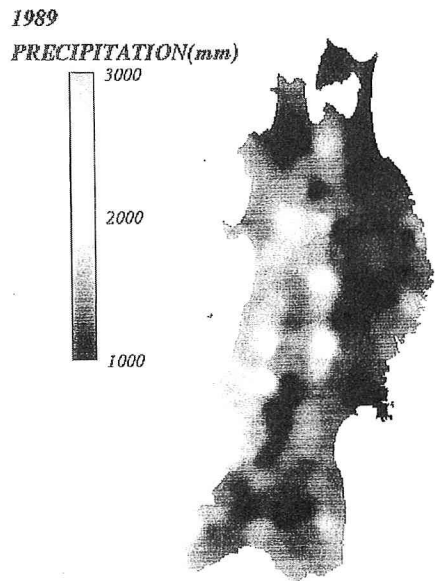
降水量の様な観測点が限られているデータを分布データにするには、補間を行わなければならない。このような場合、線形な方法と非線形な方法がある。線形な方法で代表的なのは、重

み付き距離平均法や内分補完法である。非線形な方法では、spline関数やGreen関数を用いたものが代表的である。しかし、値が大きく変化せず、領域が大きい際には、非線形の方法は、計算時間が莫大、外挿の際の発散性、境界条件の設定が困難など、問題は多い。そこで本研究では重み付き距離平均法（以下重み付き平均法）を用いることとし、そのパラメータの同定について本節で論じる。

重み付き平均法は以下の式で表される。

$$Pd = \sum_{i=1}^n a_i z_i \quad (1)$$

ここでPdは求めるデータ、 z_i は既知データ、 a_i は、 $a_i = d_i^{-p}$ で表され、 d_i は既知データと求めるデータとの距離、 p は重み係数。問題なのは n, p のパラメータの値である。 n は平均に用いるデータの個数であるが、数が多すぎると観測点周辺の値が平均化されてしまうため、局所性が失われてしまう。また、 n が3以下の場合、不連続な箇所が発生してしまう。本研究では n の値を局所性が失われず、不連続な箇所が目立たず、局所性が最大限いかなせる値として $n=4$ を採用した。また、 p は距離に対する重みである。 p の値が大きいほど観測点回りの局所性はいかにされるが、観測点間の広い領域においては平均値に近づく。ここでは、 p の値を2から5まで、順次変化させ、その分布図を見ながら検討した。その結果、東北地方程度の領域において1989年のAMeDASデータでは（20km四方）、過度の平均化が行われない値として $n=4$ の際の p の値は3が適当であることを確認した。これは年降水量の標高依存性が $p=2$ では見られず、 $p=4$ では局所性が効きすぎるため観測点間の値の変化が見られなくなり、広い地域で同じ年降水量を示すことによっている。そこで係数 $(n, p)=(4, 3)$ を採用することとした（図－2）。ここで、1989年から1991年までの3年間平均の東北地方の1級河川について降水量を調べた。表－1に流域内の観測点の算術平均値と尾根を考慮したThiessen法、重み付き計算法から求めた流域降水量を表す。この結果では重み付き平均法の値が小さくなる。これは、山岳地帯の降水量観測点が少ないため、本来多いはずの山地領域で、他の観測点との平均によって低減されるためである。



図－2 降水分布図（ $(n, p)=(4, 3)$ ）

2 2 降雪補正

積雪がある地域では、降雪の特性から高地部分で降水量が増える傾向がある。しかし、標高の大きい地点では、メンテナンスが困難なため、降雪量の観測は行われていない。そのため、年間降水量分布データを作成する際、重み付き平均法では、山岳地域において過小な評価を行ってしまう。そこで、年間降水量を求めるために降雪量の補正を行う。

風間ら⁶⁾はNOAA衛星データを用いて、積雪域抽出を行いほぼ月一で東北地方の積雪域を求め、さらに雪線からの標高データを用いて、

積雪深と標高の線形関係から積雪深分布を求めた。また、積雪深の変化から積雪水当深分布推定を試みている。そこでこのデータを用いて、降雪量の補正を行う。方法は以下の通りである。(1)AMeDASの降水量データにおいて気温が1.5℃以下の場合を降雪量とする。(2)上と同様に重み付き平均法で降雪分布を求める。(3)各分布点においてその年の最大積雪水当量が降雪量より大きい場合、最大積雪水当量を降雪量とする。(4)降雪量が最大積雪水当量より大きい場合、そのままとする。これらの概念図と式を図-3、式(2)に示す。この結果を得られた降水量分布を表-1に併せて表す。単純な重み付き平均法で求めた降水分布より値は大きくなり山地部分での降水量は改善されている。しかし、この方法は最大積雪水当量以後の降雪量に関しては、考慮に入れられないため、標高の高い箇所においては完全ではない。以下に式(2)を示す。

$$P_c = \begin{cases} P & (S_f \geq S_{wd}) \\ P - S_f + S_{wd} & (S_f < S_{wd}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 P_c は計算された年降水量、 P は重み付き平均法から求めた年降水量、 S_f は気温1.5℃以下の降水量、 S_{wd} は、年最大積雪水当深。

3. 蒸発散分布

蒸発散を求めるには幾つかの方法があり、目的に応じて利用されている。日本の様な湿潤地帯では、Thorntthwaite法が有効であることが野上ら⁷⁾に確認されている。また、積雪があるような地域にお

いても風間ら³⁾によって確認された。しかし、これらは流域代表値であり、分布を得ることはできない。多田⁸⁾は1989年についてGISデータを用いて地覆分類を行い、森林部分ではNOAA衛星のNDVI(植生指標)と蒸発散との相関関係から、水田域では日射法を用い、都市域では、森林相当面と非森林相当面とに分けて森林面ではNDVIによる方法、非森林面では、数値計算からそれぞれの蒸発散量を求めた。これらの結果を併せ、各地での水収支法と比較したところ良好な結果が得られた(図-4)。

表-1 4方法による1級河川の降水量

basin Name	Thiessen Method	Arith mean Method	(n.p)					Estimate Precipitation
			3,1	3,4	4,1	4,4	4,3	
Iwaki	1349	1362	1253	1264	1259	1263	1261	1339
Takase	1395	1395	1307	1402	1299	1394	1368	1387
Yoneshiro	1739	1726	1525	1559	1516	1557	1549	1626
Mabechi	1268	1268	1184	1183	1186	1183	1182	1290
Koyoshi	1748	1729	1705	1716	1700	1716	1715	1738
Omono	1577	1576	1616	1615	1622	1615	1616	1659
Kitakami	1399	1424	1310	1319	1307	1318	1315	1384
Aka-kawa	2249	2049	1813	1846	1815	1843	1837	1935
Mogami	1614	1614	1511	1520	1511	1519	1517	1601
Naruse	1427	1383	1437	1455	1425	1451	1446	1500
Yoshida	1346	1319	1364	1372	1359	1371	1370	1388
Naton	1670	1667	1561	1595	1542	1592	1584	1653
Shiroishi	1900	1914	1497	1517	1481	1513	1508	1594
Abukuma	1384	1414	1312	1298	1316	1299	1302	1323

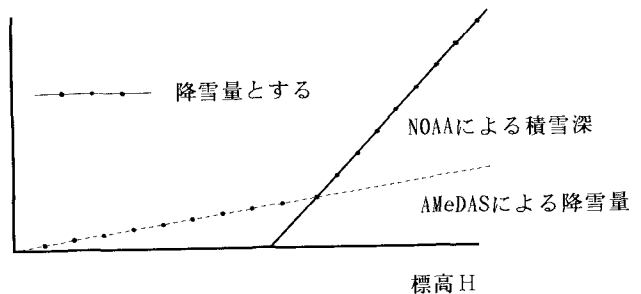


図-3 降雪補正概念図

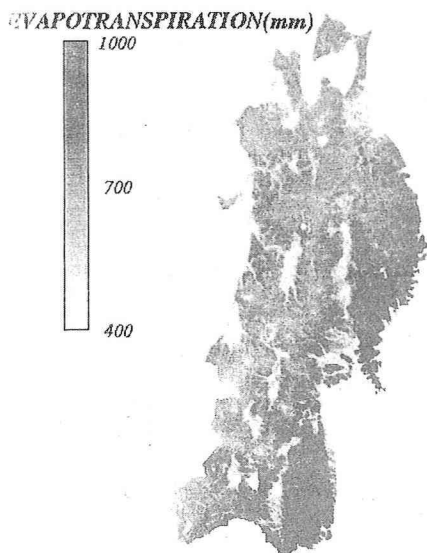


図-4 蒸発散分布図

4. 東北地方の水収支

4. 1 流量との関係

流域規模で水収支を求める際、普通、流量データと降水量データとを組み合わせる。そこで、上で求めた1級河川での降水量と、流量年表から求めた流量、それに加えて、上から求めた蒸発散量、最大積雪水当量を1989年について図-5に示す。この図からも

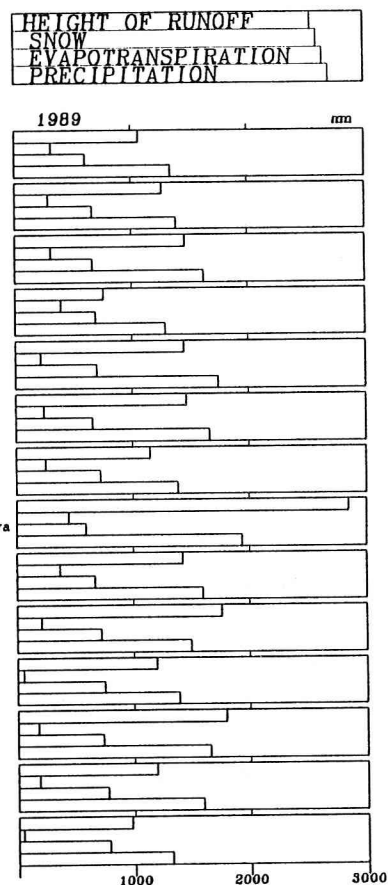


図-5 1級河川水収支図

わかるように、篠原の結果と同じように流出率が100%を越える地域が出てくる。また、明らかに流出量が過剰の部分も見られる。これは、H-Q曲線で流量を求めているため、河口に近い観測点での流量計測は潮位を拾ってしまう場合と横断面の変化が激しい場合、低水位での流量精度が低下するためである。

そこで、東北地方の流量を降水量と蒸発散量との差から求め、東北地方の全体の平均水収支を求めたものが図-6である。全体での流出率はおよそ57%である。沖ら⁹⁾が求めた世界の河川のデータと比較すると、アマゾン川流域の水収支と非常に近い結果となっており、興味深い(降水量1893mm, 流出高1024mm, 蒸発散868mm, 流出率54%)。これは、東北地方の場合、積雪が大きな貯留の効果を持ち、春期の降水量の少ない時期に、融雪出水により河川や地覆に水が供給されるため、常に蒸発散が促されることと、よく保存された森林域が多く、この地域での蒸発散が活発であること、が挙げられる。

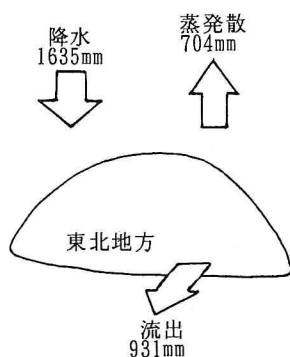


図-6 東北地方水収支

4. 2 流出率の分布

水資源を考える際、各地域での流出率(流出係数)は、重要な問題である。特に合理式や分布型流出モデルのメッシュ毎に流出係数を決める必要がある際に、事前に流出率の分布を知っておくことは非常に効果的である。そこで、流出量を降水量から蒸発散量をひいたものとし、降水量で正規化することから流出率分布図を作成する(式(3))。

$$Rr = \frac{P-E}{P} \quad (3)$$

ここで、Rrは流出率、Eは蒸発散である。この式は、年地下貯留の変化が無いことを仮定している。図-7に流出率分布図を示す。流出率は0.1から0.9まで広く分布している。特徴的なのは積雪の多い日本海で流出率が高くなっている。針葉樹林帯では、年間通しての蒸発散量が多いため低い流出率となっている。また、山岳域では1000m以下の地域では流出率が低く、1000mを越えると、標高が高くなるにつれて、流出率が高くなる。一方、都市域では90%を越える流出率が見受けられる。一見意外なのは水田地帯の流出率の高さである。水田域は貯留の効果が高く、蒸発が促され、流出率は低くなることが考えられるが、これはその地域での降水だけでなく、山地からの水の供給を受けているため、そのような錯覚を受けるのである。流出率の分布と土地利用を併せて考えると、積雪域を持つ東北地方のような場合、山地部分での降水のほとんどが流れ出し、中腹部で蒸発散は促され、残りの水は水田域で涵養され、都市域ですばやく海に流出する、ことがわかる。これは一般に言われていることだが、このような図で、より定量的に水資源評価が出来ることがわかる。

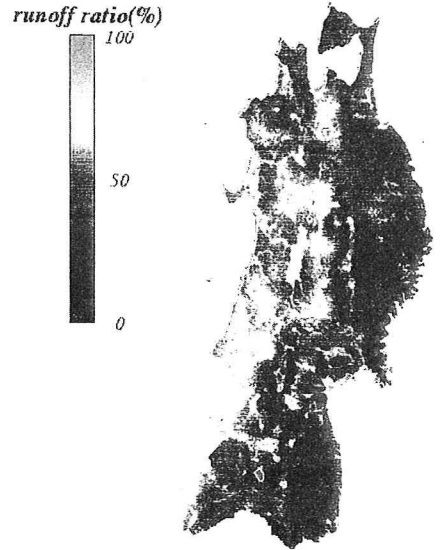


図-7 流出率分布図

5. まとめ

1989年の東北地方を対象に流出率分布図を作成した。そのためにNOAA衛星データを用いた積雪水当深の分布から降雪量の補正を行い、年降水量の分布を推定した。この際、分布データを作成するのに重み付き距離平均法を用い、この方法のパラメータの検討を行った。また、植生指標と地覆分類データを用いて求めた蒸発散の分布データと併せて、流出率の分布図を作成した。この図から、定性的に水循環について考察した。

この方法では、従来問題になっている流量データの不確実性を排除でき、しかも分布データの形で得ることが出来る。また、降雪の補正を簡易ではあるが行うことも出来る。流出率については過去に見られたような100%を越えるものは見受けられない。今後は、降雪補正を正確に行うことでより正確な水循環が理解されるだろう。加えて、より広域に適用することも可能なので、日本、東アジアでの水収支解析を行い、比較したい。

謝辞：本研究で用いられているNOAAデータは東北大学と東北電力の共同研究の一環として受信したものである。また、地上解析用データベースは東北大学理学部大気海洋変動観測センターによるものである。なお、本研究にあたり、文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）および河川情報センター研究開発助成の補助を得た。また、公表にあたり小川基金の援助を受けた。ここに併せて謝意を表します。

参考文献

- (1)C.W.Thornthwaite and J.R.Mather: The Water Balance, Climatology, Vol.8, No.1, pp.1-86, 1955.
- (2)J.A.Hudson and K.Gilman: Long-term Variability in the Water Balances of the Plynlimon Catchments, J.Hydrology, No.143, pp.355-380, 1993.

- (3)風間聡・沢本正樹：積雪のある流域における水収支について-只見川滝ダム流域における事例解析-, 水工学論文集, 第38巻, pp.113-118, 1994.
- (4)篠原武次：流出率についての水文気候学的考察, 天気, 12, pp.174-175, 1965.
- (5)榎根勇：水と気象, 朝倉書店, 180pp., 1989.
- (6)風間聡・沢本正樹：衛星データを用いた東北地方の積雪水資源量推定, 水工学論文集, 第38巻, pp.107-112, 1994.
- (7)野上道夫：暖かさの指数と流域蒸発散量-気候値メッシュデータによる解析-, 地学雑誌, Vol.99, No.6, pp.144-156, 1990.
- (8)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, 105pp., 1995.
- (9)沖大幹・虫明功臣：世界の大河川と海洋における水収支, 生産研究, Vol.45, No.7, pp.502-505, 1993.