岡山大学環境理工学部研究報告
第 26 巻, 第 1 号, pp.1-5, 2021 年 3 月

岡山県３河川流域における実蒸発散量の推定

―Morton 法と修正 Brutsaert and Stricker 法の比較―

諸泉利嗣*　三浦健志**

Estimation of actual evapotranspiration in 3 river basins in Okayama prefecture

- Comparison of Morton method and modified Brutsaert & Stricker method -

Toshitsugu MOROIZUMI* and Takeshi MIURA**

In the study, the actual evaporation was estimated in the Asahi River, the Takahashi River, and the Yoshii River basins in Okayama prefecture for four years from January 1999 to December 2002. The Morton method and the modified Brutsaert and Stricker (B & S) method were applied to the three river basins to estimate the actual evapotranspiration and compare the two methods.

As a result, the actual evapotranspiration by the Morton method was all almost equal to that by the Penman's potential evapotranspiration, and the evapotranspiration was overestimated rather than the actual evapotranspiration. The actual evapotranspiration by the modified B & S method was below the Penman's potential evapotranspiration throughout the year, and the total annual amount was about 80% of the potential evapotranspiration. In addition, the modified B & S method showed the general tendency that the actual evapotranspiration was lower in urban area than in the hilly and mountainous areas.

Key words: *Complementary relationship, Actual evapotranspiration, Potential evapotranspiration,*

１　はじめに

近年，持続可能な水資源の確保，健全な水循環の観点から，都市域における雨水・涵養地下水利用や水資源の再利用に多くの期待が寄せられている．水資源の再利用の面においては水の循環利用や地下水の利用，流域内・外へ導かれる水などについて考慮する必要がある．また，水利施設を適正に配置し涵養地下水を効率よく利用するためには流域内でも細かく区切られた領域ごとの地下水量を把握する必要がある．以上のことから，この提案を考えるにあたっては，流域内における水収支をできる限り詳細かつ正確に把握する必要がある．水収支の推定には流域水収支の重要な構成要素である実蒸発散量の推定を行う必要がある．

そこで本研究では 1999 年 1 月から 2002 年 12 月の 4 年間を対象に，岡山県の旭川流域，高梁川流域，吉井川流域における実蒸発散量の推定を行った．対象とした 3 河川は岡山県を南北に縦断しており，その源は県北部に位置している中国山地に発している．河川の流域面積はいずれも 2000km^2 前後であり，年平均降水量は 1200mm から 1400mm と全国平均を下回っている．また，県南部では降水量はさらに少なくなっており，岡山市では 1000mm を下回る年もある．旭川や高梁川の下流域には岡山市や倉敷市が位置しており，今後ますます発展することが予測される．また，吉井川下流部では農業県から工業県への飛躍に重要な役割を果たしている．このように岡山県では降水量の乏少や，都市化の影響により，今後水利用の重要性が高まっており，水収支の重要な構成要素である実蒸発散量を推定する意義は大きいと考える．

２　研究方法

2.1 計算手法

本研究では，実蒸発散量を推定する手法として，Morton 法と修正 Brutsaert and Stricker 法（以下，修正 B & S 法）を用いた．これらの式は「実蒸発散量 E_a と Penman の可能蒸発散量 E_{pen} は表層土壌水分の変化に応じて補完しあい，両

* 岡山大学大学院環境生命科学研究科
**岡山大学大学院環境生命科学研究科（名誉教授）

者の和は可能蒸発量 E_{pot} の 2 倍に等しい」という補完関係の概念を基に考えられ，通常の地上気象観測資料から実蒸発散量を推定する方法である．補完関係は次式のように表現される．

$$E_a = 2E_{pot} - E_{pen} \tag{1}$$

本研究で用いた Morton 法と修正 B&S 法は次式で示される．

Morton 法：

$$E_a = 2\varphi\frac{S+M}{\ell} - \left\{\frac{\Delta}{\Delta+\lambda}\frac{S}{\ell} + \frac{\lambda}{\Delta+\lambda}\frac{F}{\ell}(e_{sa}-e_a)\right\} \tag{2}$$

S:純放射量(MJ/d), M:移流項(MJ/d), ℓ:水の潜熱(MJ/kg), Δ：飽和水蒸気圧曲線の勾配(hPa/K)，λ：熱輸送係数(hPa/K)，F：水蒸気輸送係数(MJ/m^2/hPa)，e_{sa}，e_a：それぞれ空気の飽和水蒸気圧，水蒸気圧(hPa)

修正 Brutsaert and Stricker 法（修正 B&S 法）：

$$E_a = 2.52\frac{S+M}{\ell} - \left\{\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{S}{\ell} + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}f(u_2)(e_{sa}-e_a)\right\} \tag{3}$$

γ：乾湿計定数(hPa/K)，$f(u_2)$：風速関数：u_2：高度 2m の風速(m/s)

風速関数については Penman(1948)の式を用いた．

実蒸発散量は，可能蒸発散量と等しいか，それよりも小さくなることから，実蒸発散量推定結果の妥当性を検証するために, Penman 式による可能蒸発散量も求めた. Penman 式は次式で示される．

$$E_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{S}{\ell} + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}f(u_2)(e_{sa}-e_a) \tag{4}$$

2.2 推定手順

蒸発散量の推定手順は以下の(1)～(5)の通りである．

（1）アメダス観測地点の気象データから各アメダス観測地点の土地被覆別の実蒸発散量を Morton 法, 修正 B&S 法, Penman 式で求める．今回は吉井川流域で 5 ヶ所（古町，奈義，津山，和気，虫明），旭川流域で 4 ヶ所（上長田,久世,福渡,岡山），高梁川流域で 5 ヶ所（千屋,新見,高梁,倉敷,笠岡），計 14 ケ所のアメダス地点のデータを用いて推定を行う. また, アルベドの値は Kotoda (1986) の値を用いた．

（2）アメダス観測地点の標高とアメダス観測地点の蒸発散量から，土地被覆ごとに流域別の標高と蒸発散量の関係式を手法別に求める．

（3）数値地図のデータから岡山県 3 河川流域の各 1km メッシュの土地被覆と標高を抽出する．しかし，数値地図のデータでは地表面被覆の分類は本研究で用いたアルベドの分類と同じではない．そこでアルベドの地表面被覆分類と対応させるために以下の 5 つ（①～⑤）に分類した．

①田
②その他の農用地, 荒地, ゴルフ場
③森林
④建物用地, 幹線交通用地, その他の用地
⑤河川及び湖沼, 海浜

アルベドの地表面被覆分類で，①を水田, ②を畑地, ③を常緑樹, ④を市街地, ⑤を水域として推定していくこととする．

（4）標高−蒸発散量の関係式と抽出した標高と土地被覆を用いて, メッシュごとの蒸発散量を 3 つの手法別に推定し，3 河川流域別の蒸発散量を推定する．

（5）水収支から蒸発散量を求め，(4)で推定した値と比較し，補完関係式から求めた蒸発散量の妥当性を検証する．

3　推定結果と考察

3.1 アメダス観測地点の実蒸発散量

今回の推定手法では必要な気象データは風速・気温・日照時間・相対湿度・平均雲量のデータが必要となるが，相対湿度・平均雲量は岡山県内においては，津山特別気象観測所と岡山地方気象台でしか観測されていない．

そこで，まず津山と岡山のデータから，気温に対する相対湿度の回帰式，日照時間に対する平均雲量の回帰式を年ごとに求める．次に，求めた回帰式を用いて気温から相対湿度を，日照時間から平均雲量をそれぞれのアメダス観測地点ごとに求めることとした．以下に，2002 年の気温 - 相対湿度の回帰式，日照時間 - 平均雲量の回帰式を例として示す．

$$y = 0.037x^2 - 1.23x + 78.79 \tag{5}$$

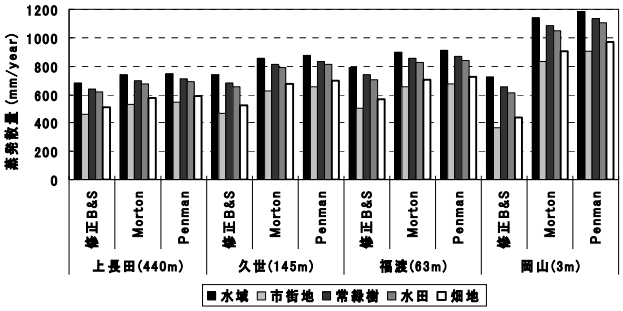
x：気温（℃），y：相対湿度（%）

$$y = 0.159x^2 - 1.75x + 11.69 \tag{6}$$

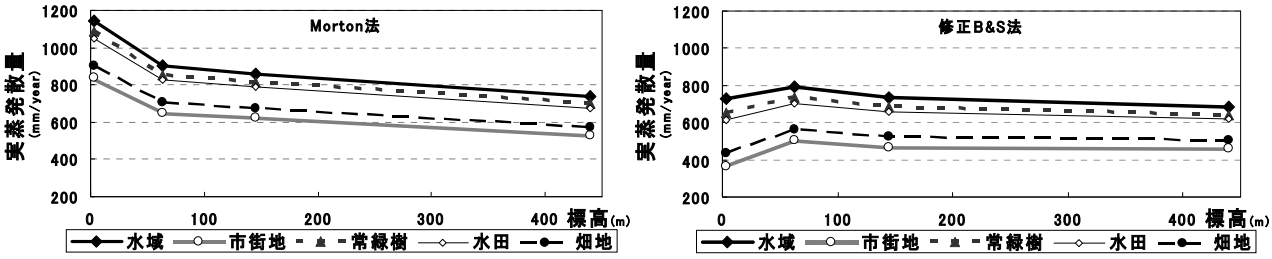
x：日照時間（hour），y：平均雲量

得られた気象データから 2.1 で示した式を用いて実蒸発散量を推定した結果の一例として旭川流域におけるアメダス観測地点の実蒸発散量を**図−1** に示す．

岡山のような標高の低い地点では蒸発散量が高くなり，上長田といった標高の高い地点で蒸発散量が低くなる傾



図−1　旭川流域におけるアメダス観測地点の蒸発散量



図－2　旭川流域における実蒸発散量と標高の関係（左：Morton 法, 右：修正 B&S 法）

向があり，その差は 300～400mm も達する．しかし，これは Morton 法や Penman 式の時に言えることであり，修正 B&S 法では逆に標高の低い地点の方が蒸発散量は低くなる．このような傾向は吉井川流域や高梁川流域のアメダス観測地点でも見られた．すべてのアメダス観測地点を見ても Morton 法と Penman 式はほぼ同様の推定結果となったが，修正 B&S 法はどのアメダス地点でも他の 2 つの手法よりも約 100～200mm 小さい値を示した．標高の低い岡山や笠岡，倉敷といった地点でとくに低くなり，岡山では Penman 式と 500mm 近く離れている．地表面の種類間での蒸発散量の差はどの手法とも標高が高い山間部の方が少なくなる．また，修正 B&S 法は Penman 式や Morton 法よりも地表面の種類による蒸発散量の差が大きい．

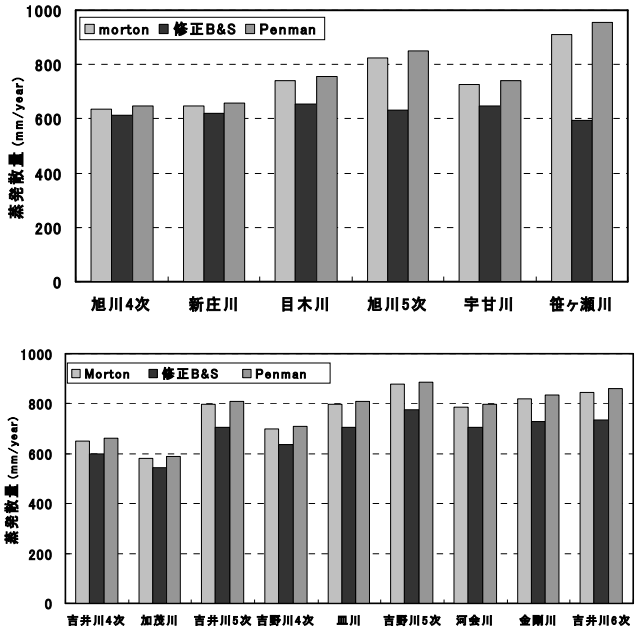
3.2 実蒸発散量と標高

図－2 に旭川流域における Morton 法と修正 B&S 法の実蒸発散量と標高との関係を示す．旭川流域のアメダス観測地点の標高は, 岡山 3m, 福渡 63m, 久世 145m, 上長田 440m である．福渡から上長田まで両手法とも標高が高くなるにつれて次第に実蒸発散量も減少していく傾向がある．岡山から福渡といった標高の低い地点での関係は, Morton 法では先ほどの傾向と同じように標高が低い岡山が蒸発散量は高くなっており，標高に対する実蒸発散量の傾きは福渡－上長田間より大きくなっている．しかし，修正 B&S 法ではこれまでの傾向とは違い，岡山の方が低くなり，他の地点とも比較しても岡山が最も低くなっている．また，傾きは符号が逆であるが Morton 法同様大きい．このように修正 B&S 法と Morton 法での標高が低くなる地点での実蒸発散量が全く逆の傾向となることは他の吉井川や高梁川流域でも見られた．

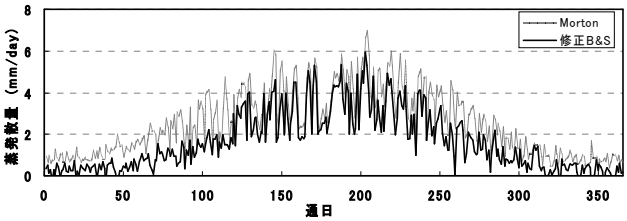
3.3 流域の実蒸発散量

3.3.1　小流域の実蒸発散量

数値地図から抽出した標高と土地被覆分類のデータと 3.2 で求めた実蒸発散量の関係を用いて，それぞれの流域における実蒸発散量を推定した．今回は 3 河川流域をさらにいくつかの小流域に分け各流域の蒸発散量も推定した．旭川流域と吉井川流域の推定した結果を**図－3** に示す．すべての流域で蒸発散量は約 600～900mm となった．旭川流域では上流部の流域（旭川 4 次，新庄川）では手法によっ



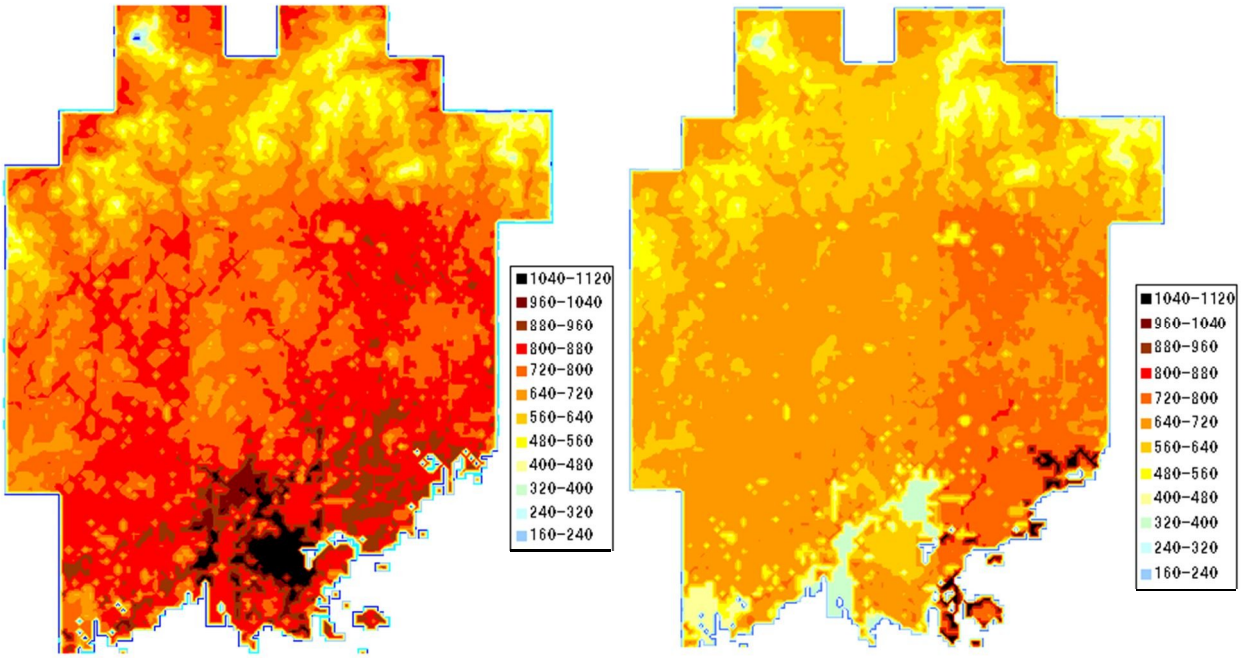
図－3　旭川流域における小流域ごとの蒸発散量
上：旭川流域, 下：吉井川流域



図－4　笹ヶ瀬川流域の実蒸発散量の日変化

ての差はあまり見られなかったが，下流域（旭川 4 次，笹ヶ瀬川）では Penman 式と Morton 法の値が大きくなり修正 B&S 法との差が 200～300mm ほど開いた．修正 B&S 法は 600mm 前後とほぼ一定の値をとった. このような傾向は高梁川流域にも見られる．しかし，吉井川流域では標高の低い下流域で実蒸発散量は低くならず，逆に下流域になるほど高くなる傾向があった．この原因としては，アメダス地点の蒸発散量をみると，旭川流域・高梁川流域での標高の低い観測地点の笠岡，倉敷，岡山に比べ吉井川流域の虫明は修正 B&S 法の蒸発散量が高くなっているためである．

笹ヶ瀬川流域の実蒸発散量の日変化を**図－4** に示す．実蒸発散量は冬季には少なく 1mm 以下となる日もあるが，



図－5　３河川流域の実蒸発散量分布図
左：Morton 法，右：修正 B&S 法（単位：mm/year）

夏季には多く 5mm 以上となる日もあり，季節によってかなり変動する．修正 B&S 法は年間を通して Morton 法より実蒸発散量は低くなっていることがわかる．特に春と秋で差が大きくなり，夏季では差が小さくなる．

3.3.1　小流域の実蒸発散量

3 河川流域の蒸発散量の分布図を**図－5** に示す．本研究で用いた実蒸発散量の推定手法ではこの図で示すように全体的に Morton 法は修正 B&S 法よりも 100mm～150mm ほど高くなった．しかし，地域別に見てみると，両手法とも標高の高い県北部で実蒸発散量は低くなり，県北部では手法による差はあまり見られなかった．また，岡山市や倉敷市の標高の低い市街地では Morton 法では蒸発散量が 800mm～1000mm と流域内で最も高くなっているが，修正 B&S 法では 300mm 前後と流域内で最も低くなっており Morton 法と逆の傾向を示している．一般的に市街地では実蒸発散量で言えば低くなる傾向があると言われており修正 B&S 法の傾向の方が一般的な傾向を捉えたと言える．各流域の蒸発散量はどの流域でもほぼ同じで，Morton 法と Penman 式は約 800mm，修正 B&S 法は約 650mm となった．

3.4 水収支から求めた実蒸発散量

1999 年の 1 月～2002 年の 12 月の四年間で流域水収支は閉じると仮定すると，降水量と河川流量の差は蒸発散量と等しくなると考えることができる．そこで河川別の流域平均降水量と河川流出高の差と 3.3.2 で求めた実蒸発散量を比較した．流域平均降水量は岡山県内の降水量が観測されているアメダス観測地点の降水量データを用い，ティーセン分割法によって求めた．河川流出高は日本河川局のデータを使用して求めた．推定結果を**表－1** に示す．流域平均降水量は吉井川で最も高く約 1420mm であったが，河川流出高は逆に吉井川で最も少なくなり約 770mm であった．そのため残差（流域水収支から求めた実蒸発散量）は吉井川で最も高くなり約 650mm，旭川で最も少なく，約 300mm となった．これらの値と 3.3.2 で推定した値を比較すると吉井川流域では修正 B&S 法で推定した結果とほぼ等しくなったが，Morton 法を用いた場合は約 200mm の差が生じた．旭川や高梁川流域では両手法ともかなりの差があるが，修正 B&S 法の方が近い値を示した．

表－1　流域水収支から求めた実蒸発散量（単位：mm/year）

	降水量	河川流出高	残差	修正B&S法	Morton法
吉井川	1423.2	770.1	653.1	658.5	840.0
旭川	1323.0	1021.2	301.8	627.1	776.9
高梁川	1292.9	927.4	365.5	648.5	772.1

4　おわりに

本論文では岡山県の 3 河川流域で Morton 法と修正 B&S 法を適用し実蒸発散量を推定し，両手法の比較を行った．結果として，Morton 法は Penman の蒸発散位と標高との関係，年蒸発散量，日変化のすべてがほぼ等しくなり，実蒸発散量というよりは蒸発散位となり過大に推定された．このことは 3.4 で求めた流域水収支から求めた蒸発散量と比較してもかなり上回っていることからも言える．

修正 B&S 法は 1 年を通して蒸発散位を下回り，年総量では Penman の蒸発散位の 8 割程度となった．また都市部で蒸発散量が低くなるという一般的な傾向を捉えることができ，今回の推定方法では精度よく推定できたといえる．しかし，旭川流域，高梁川流域で流域水収支から求めた蒸

発散量とかなりの差があった．このことは今後検討する必要がある．

また，Morton 法と修正 B&S 法は市街地で全く逆の傾向となった．これは岡山や倉敷といった標高の低い市街地にあるアメダス観測地点の実蒸発散量が Morton 法と修正 B&S 法でかなりの差があり, その影響を受けたと考えられる．しかし，岡山と倉敷ではなぜこのような差が現れたのかはわからない．この原因の解明には，Morton 法と修正 B&S 法の式の違い, 市街地と郊外の気候の違いを求める必要があり，現在検討中である．

謝辞：本研究の計算及び原稿作成作業において山本将也氏（環境管理工学科 平成 18 年卒業）の協力を得た．ここに記してお礼申し上げる．

参考文献

Bouchet, R.J. (1963): Evapotranspiration reelle et potentielle, signification climatique, Int. Assc. Sci.Hydrol., 62, pp.134~142.

Brutsaert, W. and Stricker, H. (1979): An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, Water Resour.Res., 15(2), pp. 443~450.

Kotoda, K. (1986): Estimation of river basin evapotranspiration, Environ. Res. Cent. Pap, Univ. of Tsukuba, 8, pp. 1~66.

Morton, F. I. (1978): Estimating evapotranspiration from potential evaporation-Practicality of an iconoclastic approach-, Journal of Hydrology, 38, pp. 1~32.

Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 193, pp. 120~145.

大槻恭一，三野徹，丸山利輔 (1984a): 計器蒸発量，蒸発散位と実蒸発散量の関係－実蒸発散量推定に関する研究(Ⅰ)－，農土論集, 111, 95~103.

Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972):On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, Mon. Weath. Rev., 100, pp. 81~92.

大槻恭一，三野徹，丸山利輔 (1984b): 水収支と補完関係式による流域蒸発散量の比較－実蒸発散量推定に関する研究(Ⅱ)－，農土論集, 112, pp. 17~23.

三浦健志，奥野林太郎，(1993): ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細，農土論集，164，pp. 165~17.