

平成 18 年度 卒業論文

霞ヶ浦支流域における土地利用が水循環に与える影響に
ついての研究
－水文モデルを用いて－

筑波大学第一学群自然科学類

地球科学主専攻

200310393

埴 晃一

2007 年 1 月

目次

目次	i
Abstract	ii
表目次	iii
図目次	iv
1 はじめに	1
2 方法	2
2. 1 研究地域	2
2. 2 使用データ	3
2. 3 各種パラメータの設定	7
2. 4 使用モデル	7
2. 5 計算方法	18
2. 6 土地利用を変化させた解析	19
2. 7 流域飽和透水係数の推定	19
3 結果	20
3. 1 園部川流域平均飽和透水係数計算結果	20
3. 2 パラメータの調整	20
3. 3 現在の水収支計算結果	20
3. 4 現在の熱収支計算結果	23
3. 5 明治期土地利用入力時における水収支要素の変化	26
3. 6 明治期土地利用入力時における熱収支要素の変化	28
4 おわりに	31
謝辞	32
参考文献	33

The study of influence of land-use on the water cycle in a sub-basin of Kasumigaura using a hydrologic model

Koich HANAWA

Abstract

In order to elucidate the influence of land-use on the water and energy balance in Sonobe-gawa basin, a sub-basin of Kasumigaura, each component was compared between the estimates evaluated with the present land-use and those land-use of 100 years ago using TOPLATS (TOPMODEL-based land surface-atmosphere transfer scheme) hydrological model. In this basin, coniferous trees have decreased by half and farmland and urban area increased since 1900s. Application of the TOPLATS model yielded generally reasonable results. However, there were some problems in runoff analyses, because surface runoff calculation was overestimated and base-flow was underestimated, especially drought season and heavy raining time. As a result of those analyses, it was found that the land-use changes have a big influence on water cycle in the basin. Firstly, runoff rate of assumed basin of 100 years ago is smaller than present, especially during heavy rainfall period. Secondly, evapotranspiration rate of 100 years ago is larger than that at present, because the basin consisted of more forest 100 years ago and this tend to yield more evaporation of the intercepted rainfall and transportation. In conclusion, land-use changes, especially, the reduction of forest and increase of farmland and urban area in the basin have increased runoff rate and decreased evapotranspiration.

Key Words: Kasumigaura, TOPLATS, land-use change, GIS, quasi-distributed hydrological model

表目次

表 1	園部川流域諸元	38
表 2	植生区分設定項目	39
表 3	明治期土地利用区分の再区分	40
表 4	ティーセン法における雨量観測所の重み	40
表 5	雨量欠測期間	41
表 6	気温欠測期間	41
表 7	露点温度欠測期間	42
表 8	風速欠測期間	42
表 9	気圧欠測期間	43
表 10	植生パラメータ出典	43
表 11	土壌パラメータ出典	45
表 12	植生パラメータ設定値	46
表 13	土壌パラメータ設定値	47
表 14	流域単位パラメータ設定値	47
表 15	水収支計算結果と実測値の定量的比較 (2001年)	47
表 16	水収支計算結果と実測値の定量的比較 (2002年)	47
表 17	水収支計算結果の項目別比較 (2001年・2002年)	48
表 18	熱収支計算結果の項目別比較 (2001年・2002年)	48
表 19	現在と明治入力時の水収支計算結果の比較 (2001年)	49
表 20	現在と明治入力時の水収支計算結果の比較 (2002年)	49
表 21	現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較 (2001年)	50
表 22	現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較 (2002年)	50

図目次

図 1	園部川位置	51
図 2	現在の園部川流域土地利用図	52
図 3	明治期(1903年頃)の園部川流域土地利用図	53
図 4	園部川流域における土地利用区分割合の変化	54
図 5	土地利用変化の形態	55
図 6	雨量観測点の位置とティーセン分割の結果	56
図 7	TOPLATS の構造 (水収支)	57
図 8	TOPLATS の構造 (熱収支)	58
図 9	園部川流域における地形指標の分布と河道の位置	59
図 10	降雨終了後の流量と流量減衰率	60
図 11	日平均流量計算結果と実測値の比較 (2001年)	61
図 12	日平均流量計算結果と実測値の比較 (2001年・対数)	62
図 13	日平均流量計算結果と実測値の比較 (2002年)	63
図 14	日平均流量計算結果と実測値の比較 (2002年・対数)	64
図 15	各層の土壌水分計算結果 (2001年)	65
図 16	各層の土壌水分計算結果 (2002年)	66
図 17	水位流量曲線図 (霞ヶ浦工事事務所, 2000より)	67
図 18	短期流出の比較 (2001年10月9日0:00~10月21日0:00,総雨量192.9mm)	68
図 19	短期流出の比較 (2002年10月1日0:00~10月4日0:00,総雨量70.7mm)	69
図 20	土壌水分分布計算結果 (2001年)	70
図 21	表面流出分布計算結果 (2001年)	71
図 22	蒸発散量分布計算結果 (2001年)	72

図 23	地下水面までの深さ分布計算結果(2001年).....	73
図 24	実測値との比較対象となった地点.....	74
図 25	月別正味放射計算結果と実測値の比較 (2001年).....	75
図 26	月別顕熱計算結果と実測値の比較 (2001年).....	76
図 27	月別潜熱計算結果と実測値の比較 (2001年).....	77
図 28	月別地中熱流量計算結果と実測値の比較 (2001年).....	78
図 29	流域平均月別熱収支計算結果 (2001年).....	79
図 30	流域平均月別熱収支計算結果 (2002年).....	80
図 31	ボーエン比計算結果 (2001年).....	81
図 32	ボーエン比計算結果 (2002年).....	82
図 33	地表面温度計算結果 (2001年).....	83
図 34	地表面温度計算結果 (2002年).....	84
図 35	正味放射分布計算結果 (2001年).....	85
図 36	顕熱分布計算結果 (2001年).....	86
図 37	潜熱分布計算結果 (2001年).....	87
図 38	地中熱流量分布計算結果 (2001年).....	88
図 39	地表面温度分布計算結果 (2001年).....	89
図 40	日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2001年).....	90
図 41	日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2001年・対数).....	91
図 42	日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2002年).....	92
図 43	日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2002年・対数).....	93
図 44	明治入力時短期流出の比較 (2001年 10月9日 0:00~10月21日 0:00,総雨量 192.9mm).....	94
図 45	明治入力時短期流出の比較 (2002年 10月1日 0:00~10月4日 0:00,総雨量 70.7mm).....	95
図 46	明治入力時土壌水分分布計算結果 (2001年).....	96

図 47	明治入力時表面流出分布計算結果 (2001年).....	97
図 48	明治入力時蒸発散量分布計算結果 (2001年).....	98
図 49	明治入力時流域平均月別熱収支計算結果 (2001年).....	99
図 50	明治入力時流域平均月別熱収支計算結果 (2002年).....	100
図 51	明治入力時ボーエン比計算結果 (2001年).....	101
図 52	明治入力時ボーエン比計算結果 (2002年).....	102
図 53	明治入力時地表面温度計算結果 (2001年).....	103
図 54	明治入力時地表面温度計算結果 (2002年).....	104
図 55	明治入力時正味放射分布計算結果 (2001年).....	105
図 56	明治入力時顕熱分布計算結果 (2001年).....	106
図 57	明治入力時潜熱分布計算結果 (2001年).....	107
図 58	明治入力時地中熱流量分布計算結果 (2001年).....	108
図 59	明治入力時地表面温度分布計算結果 (2001年).....	109

1. はじめに

霞ヶ浦は、国内第2位の湖面積を持つ湖である。そのため以前から水資源として、農業・生活・工業用水として盛んに湖水が利用されてきており、その水の有効な利用は重要な課題となっている。また霞ヶ浦は 2156.7km² という広大な流域面積を有しており、流域の土地利用がその環境に大きな影響を与えていると考えられる。特に霞ヶ浦流域は首都圏に近く近年都市化が進んでいる地域であり、それらの土地利用の変化により流出特性をはじめとする水収支・熱収支特性が今後とも変化してゆくことが予想される。霞ヶ浦流域においては過去に流域の水収支について村岡(1981)や茨城県(2002)などで推定がおこなわれている。また流域における水循環のモデル化については藤田ら (2006)が現在の霞ヶ浦において水物質循環モデルを構築しており、霞ヶ浦隣接流域の谷田川流域では土木研究所(2002)が河川流量のモデル化を行っている。しかし、これらの研究は霞ヶ浦流域における土地利用が水循環にもたらす影響のみを取り出したものとはなっていない。

そこで、本研究では霞ヶ浦流域の一河川流域について分布型流出モデルを構築し、100年前の土地利用を想定したときの水収支・熱収支を推定し現在の値と比較することにより、この土地利用変化が霞ヶ浦支流流域の水収支・熱収支に与える影響を解明することを目的とする。

2. 方法

2. 1 研究地域

研究地域は霞ヶ浦流域北部に位置する河川である園部川(図 1)とする。茨城県(2002)によると園部川は霞ヶ浦北西部の石岡市から小美玉市に位置し、流域面積は 79.30km²、流域内の人口密度は 373 人/km²である。また藤田ら(2006)によると霞ヶ浦流域の年平均降水量は 1289mm である。

(1) 土地利用

現在(図 2)と 100 年前の土地利用図(図 3)、土地利用区分の割合(図 4)を示す。またこの 100 年間の土地利用の変化傾向を図 5 に示す。この地域において現在卓越している土地利用形態は畑地であり流域全体の 2/3 以上を占める。畑地は特に北西から南東方向に流下する川の両岸にある台地上に多く分布している。次いで多いのが針葉樹林と水田であり針葉樹林は台地上に、水田は河川周辺に多く存在している。一方王尾(2004)によれば明治期(1903 年)の対象流域において卓越していた土地利用形態は針葉樹林であり流域の半分以上を占めていた。次いで畑や水田が多くを占めていた。この 100 年間における対象流域の土地利用変化の特徴としてあげられるのは次の点である。

- ・ 流域における針葉樹林の割合が大きく減少している。図 5 によれば減少した針葉樹林の多くが畑地となっていたことがわかった。
- ・ 畑地の占める割合が大きく増加している。これは上の要因によるものと思われる。
- ・ 水田については占める割合、存在地域ともにこの 100 年で目立った変化はない
- ・ 市街地の面積が倍以上に増加している。

(2) 流域諸元

山田(2007)による園部川流域についての流域諸元(平均標高・平均勾配・形状比・水系密度)を表 1 に示す。山田(2007)によれば、園部川流域は水系密度が大きく流域に対する河川の割合が大きい流域であるとされている。また園部川流域では 8 年平均年積算雨量

が大きくなっており、筑波山の影響（地形性降雨）のために霞ヶ浦の北側の雨量が多くなっていると指摘されている。

2. 2 使用データ

研究対象河川流域を 60m メッシュに区分し、そのそれぞれについて現在と約 100 年前の土地利用区分・標高データを利用した。

また、雨量・気温・露点温度・風速・気圧・下向き短波放射量・下向き長波放射量については流域内で一様な値と仮定しその一時間ごとのデータセットを作成した。さらに、小川観測点(図 6)における園部川の流量データをモデル計算の検証値として用いた。なおモデルは園部川の流域界で計算をおこなったが、図 6 から分かるように検証値として用いた値はそれよりやや上流である。これらの項目についてはモデルの構築に 2001 年 1 月 1 日から 2001 年 12 月 31 日の値を使用し、モデルの検証に 2002 年 1 月 1 日から 2002 年 12 月 31 日の値を使用した。

(1) 土地利用図

現在の園部川流域の土地利用図は、環境省の第 2 回(1979 年)、第 4 回(1990 年)、第 5 回(1996 年)の自然環境基礎調査をもとに作られた「自然環境情報 GIS」データ(国立環境研究所, 1996)を使用して作成した。この GIS データでは植生が群落ごとに細かく区分されているが、今回の解析では対象地域の土地利用の状況を考慮し針葉樹林、広葉樹林(果樹園を含む)、草原、短草原(芝など)、水田、畑、市街地(道路・裸地を含む)、水面の 7 つに区分した。具体的な区分法について表 2 に示す。

100 年前の土地利用図は王尾(2004)による霞ヶ浦・小貝川・鬼怒川流域土地利用 GIS データから作成した。このデータは明治 36 年(1903 年)から大正元年(1912 年)にかけて作成された 5 万分の 1 地形図から、土地利用に関するデータを目視によって読み取りデジタル化したものである。このデータは流域内を 250m メッシュに分けて、各メッシュを針葉樹林・広葉樹林・伐採林・荒地・田・樹木畑・畑・市街地・河川湖沼の 9 つに

区分したものである。ここから、土地利用を現代土地利用図と同様の7つに区分した(表3)。このうち伐採林は王尾(2004)によれば薪炭材や木材として利用された樹林地帯である可能性が指摘されており、対象流域では主にアカマツ林がそのような利用をされてきたということを考慮し針葉樹林に分類した。

これらのうち水面(河川湖沼)については、ほとんどが農業用のため池やゴルフ場の池など数十m四方のものであり、解析単位に比べ小規模なものであるため解析から除外し、周囲の土地利用にあわせて解析を行った。

(2) 標高データ

今回使用した標高データは国土地理院による50mメッシュの標高データCDを使用した。各メッシュの値は1m単位で表されている。解析に用いる際にはGISソフトを用いてこれらのデータから各地点の値を、IDW(Inverse Distance Weighted)法を用いて内挿することによりDEM(Digital Elevation Model)を作成し、それをさらに60mメッシュに区切ることによってデータを作成した。

(3) 気象観測データ

今回使用した気象観測項目は雨量・気温・露点温度・風速・気圧の5項目である。

I 雨量

雨量データは園部川流域内にある国土交通省の小川・美野里・恋瀬川観測所、気象庁(AMEDAS)の柿岡・美野里観測所、茨城県土木部の岩間町・美野里町観測所の7観測点のデータを用いた。解析に当たっては流域をこれらの観測所によってティーセン分割をし、それぞれの影響範囲の比率によってそれぞれの観測雨量を重み付け平均し流域平均値を作成した。なお、ある観測点に欠測があった場合はその点を除いて平均した。各観測所の位置とティーセン分割の結果を図6・表4に示す。また各観測所の欠測期間について表5に示す。

II 気温

気温は筑波大学陸域環境研究センター圃場のルーチン観測データを用いた。欠測期間とそのときの処理について表 6 に示す。

III 露点温度

露点温度は筑波大学陸域環境研究センター圃場のルーチン観測データを用いた。欠測期間とそのときの処理について表 7 に示す。

IV 風速

風速は筑波大学陸域環境研究センター圃場のルーチン観測データを用いた。欠測期間とそのときの処理について表 8 に示す。

V 気圧

気圧は筑波大学陸域環境研究センター圃場のルーチン観測データを用いた。欠測期間とそのときの処理について表 9 に示す。

(4) 放射データ

今回利用した放射観測項目は下向き短波放射量・下向き長波放射量の 2 項目である。なお時間によって、短波放射の観測値が負の値となることがあるがこのような場合はその値を 0 とした。

I 下向き短波放射量

2001 年 2 月 2 日 19 時以降の値は筑波大学陸域環境研究センターで測定されている 4 成分放射計の観測値を用いた。この観測値は 10 分平均値であり、今回の解析に当たっては各時刻の前の時間の 10・20・30・40・50・この時刻の 00 分の値をとり平均値とした。また、2001 年 2 月 6 日 13:30 と同年 2 月 8 日 14:50~15:10 までが欠測となっているが、この間のデータについては欠測となっている時間の値を除いて平均値を算出した。

2001 年 2 月 2 日 19 時以前の値については陸域環境研究センターで測定されているルーチンデータの値を用いた。さらにそのうち欠測期間が 1 月 27 日 19 時~1 月 29 日 18 時の間あり、その間の値は館野の気象庁高層気象台における観測値を用いた。

II 下向き長波放射量

短波放射量と同様の期間について陸域環境研究センター4 成分放射計における値を用いた。解析の手法も同様である。

2001年2月2日19時以前の値については近藤(1994)による方法を用いて気温・露点温度・日照時間から推定した。

近藤(1994)によれば、快晴時の長波放射量 L_{df} は以下の式で与えられる。

$$L_{df} = (0.74 + 0.19\chi + 0.07\chi)\sigma T^4 \quad (2-1)$$

$$\chi = \log_{10} \omega_{TOP} \quad (2-2)$$

ここで、 σ はステファンボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T は地上の平均気温(K)、 ω_{TOP} は有効水蒸気量の全量であり以下の式で計算される。

$$\log_{10} \omega_{TOP} = 0.0315T_d - 2.1836 \quad (2-3)$$

ここで、 T_d は露点温度である。さらにここから雲の存在を考慮した下向き長波放射量 L_d は以下の式で計算される。

$$L_d = \sigma T^4 \left[1 - \left\{ \frac{1 - L_{df}}{\sigma T^4} \right\} C \right] \quad (2-4)$$

ここで C は雲の効果を表す係数であり、日照率(単位時間における日照時間の割合)を A とすると

$$C \equiv 0.826A^3 - 1.234A^2 + 1.135A + 0.298 \quad 0 < A \leq 1 \quad (2-5)$$

$$C \equiv 0.2235 \quad A = 0 \quad (2-6)$$

となる。ただし夜間の値については日照率を1として計算した。

(5) 流量データ

今回値を比較した流量データは国土交通省小川観測点における観測データである。対象期間において欠測となった期間は存在しなかった。

(6) 熱収支データ

今回値の比較に用いた熱収支データは筑波大学陸域環境研究センター圃場で測定された熱収支各成分(正味放射量・顕熱・潜熱・地中熱流量)の月平均値である。なおこのうち直接測定されているのは正味放射量・顕熱・地中熱流量の3項目であり、潜熱は正味放射量から顕熱・地中熱流量を引いた残差として計算した。

2. 3 各種パラメータの設定

モデルの構築に当たり植生・土壌の各種パラメータを設定した。これらのパラメータは土地利用区分と対応しており、植生のパラメータについては約2ヶ月に一度更新し季節変化を考慮した。植生パラメータの項目と出典を表10に、土壌パラメータの項目と出典を表11に、植生パラメータの設定値を表12に、土壌パラメータの設定値を表13にそれぞれ示す。また今回の解析では市街地は裸地面として計算した。

それらに加えて流域単位で設定する初期値・調整パラメータがあり、それらの項目と設定値を表14に示す。

2. 4 使用モデル

今回適用を検討したモデルは、準分布型モデルである TOPLATS(TOPMODEL-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme)である。TOPLATS は Famiglietti ら(1992)によって基本形が1992年に提案されたものであり、その後いくつかの改良が重ねられた(Peters-Lidard et al., 1997, Crow and Wood, 2003, Crow et al., 2005)。本研究で使用するのは2003年に提案されたバージョン(Crow and Wood, 2003)である。このモデルの特徴は、準分布型流出モデルの TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979)の手法によって DEM (Digital Elevation Model) から計算される地形指標を用いて土壌の空間的な乾湿の判定と基底流出の計算を行うことに加え、TOPMODEL では考慮されていなかった地表面における熱輸送過程や、植生の影響などを考慮することができる点にある。

(1) TOPLATS の概要

Peters-Lidard et al. (1997), Crow et al. (2005)によりモデルの概要を以下に示す。また TOPLATS の構造の模式図を図 7,図 8 に示す。今回解析に用いた TOPLATS では流域内のメッシュを地表面において Canopy 層、土壌中の不飽和域を上から Root zone、Surface zone1、Surface zone2、Transmission zone の 4 層に分けて解析を行っている。今回の計算では Root zone : 地表面から 0.05m まで、Surface zone1 : 地表面から 0.55m まで、Surface zone2 : 地表面から 1.8m まで、Transmission zone : 1.8m 以深から地下水水面まで、と設定した。さらにそれらの層の下に飽和域(地下水域)となる Water table が存在する。Water table は流域全体で 1 つの層となっており、この層からは基底流出が計算される。

・地形指標

地形指標とは TOPMODEL において、土壌の飽和しやすさを示す指標として用いられる値でありグリッドごとに以下のように計算される。

$$\lambda = \ln\left(\frac{a}{\tan B}\right) \quad (2-7)$$

ここで、 λ は地形指標、 a はあるグリッドにおける集水域面積、 B はあるグリッドにおける勾配を表す。園部川流域における計算結果を図 9 に示す。図 9 から分かるように地形指標の値の大きい地点と河道あるいは流水線が対応している。

(2) 水収支計算

I 大気

・可能蒸発散量

可能蒸発散量 E_p とそのときの潜熱 L_p は、以下の式で計算される。

$$L_p = \frac{\rho_a \cdot C_p}{Pc \cdot R_v} Vd \quad (2-9)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 C_p は空気の比熱、 R_v は水蒸気の空気力学的抵抗、 Vd は以下の式で表される飽差である。

$$Vp = Vp_{sat} - Vp_{act} \quad (2-10)$$

ここで、 Vp_{sat} は以下の式で計算される飽和水蒸気圧、 Vp_{act} は実水蒸気圧である。

$$Vp_{sat} = 611 \exp\left(\frac{17.27Ts}{237.3 + Ts}\right) \quad (2-11)$$

ここで、 Ts は可能蒸発散時の地表面温度(°C)である。また、 Pc は乾湿計定数で以下の式で示される値である。

$$Pc = \frac{C_p \cdot P_{air}}{0.622le} \quad (2-12)$$

ここで、 P_{air} は気圧(hPa)、 le は蒸発の潜熱である。また、 R_v は以下の式で計算される。

$$R_v = R_{sf} \text{ (裸地面・湿潤樹冠の場合)} \quad (2-13)$$

$$R_v = R_{par} + R_{vpd} + R_{tmp} + R_{sf} \text{ (乾燥樹冠の場合)} \quad (2-14)$$

ここで、 R_{par} は PAR(Photosynthetically Active Radiation : 光合成有効放射)による樹冠抵抗の限界値、 R_{vpd} は水蒸気圧による樹冠抵抗の限界値、 R_{tmp} は気温による樹冠抵抗の限界値、 R_{sf} は表面における水蒸気の空気力学的抵抗である。

R_{par} は以下の式で計算される。

$$R_{par} = \frac{1 + f_{par}}{f_{par} + Rs_{min} / Rs_{max}} \quad (2-15)$$

ここで Rs_{min} は最小気孔抵抗、 Rs_{max} は最大気孔抵抗である。また f_{par} は

$$f_{par} = 0.55(1 - Al) \frac{S_d}{Rgl} \frac{2}{LAI} \quad (2-16)$$

ここで、 Al はアルベド、 S_d は下向き短波放射量、 Rgl は放射調整パラメータ、 LAI は LAI (Leaf Area index : 葉面積指数) である。 R_{vpd} は以下の式で計算される。

$$R_{vpd} = \frac{1}{1 - \beta(Vp_{sat} - Vp_{act})} \quad (2-17)$$

ここで、 β は樹冠抵抗による飽差の調整量パラメータ(1/Pa)、 R_{tmp} は以下の式で計算される。

$$R_{tmp} = \frac{1}{1 - B(T_{ref} - T_{air})^2} \quad (2-18)$$

ここで、 B は樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ(1/K²)、 T_{ref} は樹冠抵抗の調整に用いる基準気温、 T_{air} は気温である。 R_{sf} は境界層モデル(Businger et al.,1971)の手法により以下の式で計算される。

$$R_{sf} = \left(\frac{1}{0.16U} \log \frac{Z_a - Z_{pd}}{Z_{0h}} \log \frac{Z_w - Z_{pd}}{Z_{0m}} \right) \quad (2-19)$$

ここで、 U は風速、 Z_a は風速以外の気象データの測定高さ、 Z_{pd} は地面修正量、 Z_w は風速の測定高さ、 Z_{0h} は熱輸送の粗度長、 Z_{0m} はモーメントの粗度長である。

II 樹冠

・ 樹冠の乾湿判定

湿潤樹冠の割合 Fw は、以下の式で計算される。

$$Fw = \left(\frac{W_{can}}{W_{cap}} \right)^{0.667} \quad (2-20)$$

ここで、 W_{can} は樹冠貯留量、 W_{cap} は最大樹冠貯留量を表す。

・ 裸地面からの蒸発 E_{bs}

今回の計算では裸地面とした領域が市街地であることを考慮し、裸地面からの蒸発を0として計算した。

・ 湿潤樹冠からの蒸発 E_{wc}

湿潤樹冠からの蒸発は以下の式で計算される。

$$E_{wc} = E_{pwc} (1 - (1 - Fw)) \quad (\text{凝縮が起こらない場合}) \quad (2-21)$$

ここで E_{pwc} は可能樹冠蒸発量、 F_w は式で計算された湿潤樹冠の割合である。可能樹冠蒸発量 E_{pwc} は

$$E_{pwc} = \frac{L_p}{le \cdot \rho_w} \quad (2-22)$$

で与えられる。 ρ_w は水の密度である。

・乾燥樹冠からの蒸散 E_{dc}

乾燥樹冠からの蒸散は、気象条件によって計算される可能蒸散量 E_{pd} と土壌水分量から計算される可能蒸散量 E_{pv} から計算される。 E_{pd} については

$$E_{pd} = \frac{L_p}{le \cdot \rho_w} \quad (2-23)$$

で与えられる。また E_{pv} については

$$E_{pv} = \frac{P_{soil} - P_{leaf}}{R_{soil} - R_{plant}} \quad (2-24)$$

で与えられる。ここで、 P_{leaf} は葉の最終水ポテンシャルである。そのほかの各成分の値は以下の式で計算される。

$$P_{soil} = - \frac{Ps}{R_s^{pi}} \quad (2-25)$$

ここで、 Ps は空気侵入値、 pi は Brooks-Corey pore size distribution index (Brooks and Corey, 1966) である。

$$R_{soil} = \frac{1}{A_{root} \cdot K_{zone} \cdot D_{root}} \quad (2-26)$$

ここで、 A_{root} は根活動要素、 K_{zone} は各層における飽和透水係数、 D_{root} は各層における根密度である。 R_{plant} については

$$R_{plant} = \frac{R_{root}}{D_{root}} \quad (2-27)$$

ここで、 R_{root} は根抵抗である。

以上の E_{pd} と E_{pv} のどちらか小さい方が乾燥樹冠からの蒸散量 E_{dv} となる。

- ・ 合計実蒸発散量 E_{act}

今回の解析では、一つのグリッドにおいては均一な地表面状態を仮定している。したがって各グリッドの実蒸発散量は以下のいずれかの式で計算される。つまり

裸地の場合

$$E_{act} = E_{bs} \quad (2-28)$$

植生が存在する場合

$$E_{act} = E_{wc} + E_{dc} \quad (2-29)$$

となる。

- ・ 降雨遮断

TOPLATS では林内雨など、最終的に地表面に到達する雨量のことを P_{net} : 正味雨量としている。ここで P_{net} は

$$P_{net} = (P - E_{wc}) - \frac{W_{cap} - W_{can}}{dt} \quad (2-30)$$

と表される。ここで P は林外雨量、 E_{wc} は湿润樹冠からの実蒸発散量、 dt は 1 Time step の時間(3600 秒)である。この式において P_{net} が負になるような場合は $P_{net}=0$ としている。林外雨量と正味雨量との差が新しい樹冠貯留量 W_{can} となる。

- ・ 凝結

可能蒸発散量が負になった場合、その量が凝結量として計算される。

III 土壌

- ・ 表層の水収支

- ・ 飽和・不飽和の判定

表層において $Zw - Ps \leq 0$ のとき飽和、それ以外の時を不飽和とする。ここで Zw : 各グリッドにおける地下水面までの深さ、 Ps は空気侵入値である。 Zw は各グリッドにつ

いて以下の式で計算される値である。

$$Z_w = \overline{Z_w} - \frac{1}{ff} (\overline{\lambda} - \lambda) \quad (2-31)$$

ここで、 Z_w は地下水表面までの深さ、 λ は地形指標の値、バーは流域平均を示す。

・飽和地表流量 R_{sat}

$$R_{sat} = P_{net} \quad (2-32)$$

土壌が飽和していると上式のように飽和地表流が発生する。ここで、 P_{net} は正味雨量である。

・表層(root zone)における浸透

表層における浸透は、表層が不飽和の時発生する。

・吸着率 S (降雨イベントごとに更新)

$$S = \sqrt{\frac{2K_s(\theta_s - \theta_{root})^2 P_s}{\theta_s - \theta_r} \frac{1}{pi_{gamm} + 0.5pi - 1} + \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_{root}}} \quad (2-33)$$

ここで、 K_s は地表面の飽和透水係数、 θ_s は飽和土壌水分(体積含水率)、 θ_r は残留土壌水分、 θ_{root} は root zone 土壌水分、 pi は Brooks-Corey pore size distribution index、 pi_{gamm} は $3pi + 2$ である。

・重力項 C

$$C = 0.5 \left(1 + \left(\frac{\theta_{root} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{pi_{gamm}}{pi}} \right) \quad (2-34)$$

・浸透能 I_{cap}

$$I_{cap} = CK_s \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4CK_s I_{cum}}{S^2} - 1}} \right) \quad (2-35)$$

ここで、 I_{cum} ：累積浸透量である。

- ・実浸透量

以上の式より地表面における浸透量が計算される。浸透能と正味雨量の比較により実蒸発散量 I は

$$I = \begin{cases} P_{net} \\ I_{cap} \end{cases} \quad (2-36)$$

- ・ホートン型地表流量

$$R_{inf} = P_{net} - I \quad (2-37)$$

正味雨量が実浸透量より大きかった場合、式に示すようなホートン型地表流 R_{inf} が発生する。

- ・鉛直方向の水収支
- ・各層の飽和・不飽和の判定

不飽和域の各層が地下水面によって飽和した場合、鉛直方向の水収支計算は以下の式で計算される不飽和の領域についてのみおこなわれる。

$Z_{zone} < Z_w - P_s$ の場合 計算対象となる層全層が不飽和

$Z_{zone-1} + 0.01 < Z_w - P_s \leq Z_{zone}$ $Z_{zone} - (Z_w - P_s)$ の領域が不飽和

$Z_w - P_s < Z_{zone-1} + 0.01$ 計算対象となる層全層が飽和

ここで、 Z_w は式で計算された地下水面までの深さ(m)、 P_s は空気侵入値、添え字の $zone$ は計算対象となる層を、 -1 は計算対象の層の上に位置する層を表す。

- ・鉛直方向の飽和透水係数の変化

以下の式のように、鉛直下方に行くにつれて飽和透水係数は指数関数的に減少する。

$$K_{root} = K_s \exp\left(-ff \frac{Z_{root}}{2}\right) \quad (2-38)$$

$$K_{sur1} = K_s \exp\left(-ff \left(Z_{root} + \frac{Z_{sur1}}{2}\right)\right) \quad (2-39)$$

$$K_{sur2} = K_s \exp\left(-ff\left(Z_{root} + Z_{sur1} + \frac{Z_{sur2}}{2}\right)\right) \quad (2-40)$$

$$K_{trans} = K_s \exp\left(-ff\left(Z_{root} + Z_{sur1} + Z_{sur2} + \frac{Z_{trans}}{2}\right)\right) \quad (2-41)$$

ここで、 K は各層における飽和透水係数、 Z は式で計算された各層の深さ、 ff はパラメータ、下付添え字はそれぞれ root : root zone sur1 : surface zone 1 sur2 : surface zone 2 trans : transmission zone を表す。

・ 下層への排水量 Dr

$$Dr_{zone} = K_{zone} (Rs_{zone})^{\frac{2+3pi}{pi}} \quad (2-42)$$

ここで、 Dr は各層における排水量、また添え字 zone は以下土壌の各 4 層を表す。

また、 Rs は以下の式で示される量である。

$$Rs_{zone} = \frac{\theta_{zone} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-43)$$

以上の計算が、各 4 層について行われる。

・ 上層への拡散量 Df

$$Df_{zone} = D_{zone} Gr_{zone} \quad (2-44)$$

$$D_{zone} = \frac{1}{pi} K_{ave} \frac{Ps}{\theta_s - \theta_r} \left(\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{pi}+2} \quad (2-45)$$

$$K_{ave} = \frac{1}{\frac{1}{2K_{zone}} + \frac{1}{2K_{zone+1}}} \quad (2-46)$$

$$\theta_a = \frac{\theta_{zone} + \theta_{zone+1}}{2} \quad (2-47)$$

$$Gr_{zone} = (\theta_{zone} + \theta_{zone+1}) \frac{2}{Z_{zone} + Z_{zone+1}} \quad (2-48)$$

ここで、添え字の+1は計算対象の層の下に位置する層を表す。以上の計算が、各4層について行われる。

- ・ 飽和域との水分移動
- ・ 基底流出

飽和域からの基底流出 Q は Sivapalan et al. (1987)により以下の式で表される。

$$Q = q_0 \exp(-ff \cdot \overline{Zw}) \quad (2-49)$$

ここで q_0 は土壌全層が飽和したとき(つまり $Zw=0$ のとき)の基底流出量、 Zw は地下水水面までの深さ (バーは流域平均) である。 q_0 については流域平均の飽和透水係数と地表面から難透水層までの深さをを用いて決定した。

- ・ 飽和域への涵養量

飽和域への涵養量 Rc_{act} は飽和域の収支 Rc_{bal} と可能涵養量 Rc_{ava} から以下のように計算される。

$$Rc_{act} = Rc_{bal} \quad Rc_{bal} \leq Rc_{ave} \text{ の場合} \quad (2-50)$$

$$Rc_{act} = Rc_{ava} \quad Rc_{bal} > Rc_{ave} \text{ の場合} \quad (2-51)$$

それぞれの成分は以下の式で計算される。

$$Rc_{bal} = D_{wt} - Df_{wt} - E_{wt} - \frac{Q}{Ar} \quad (2-52)$$

ここで、 D_{wt} は飽和域への排水量、 Df_{wt} は飽和域から上層への拡散量、 E_{wt} は飽和域からの蒸発散量(主に根による給水)、 Ar は流域面積である。

$$Rc_{ava} = Ap(\overline{Zw} - Ps) \quad (2-53)$$

ここで、 Ap は流域平均有効間隙率を表す。このとき、 Rc_{bal} と Rc_{ava} がともに負になった場合、有効間隙率が再計算される。

- ・流域平均の地下水面までの深さ

新しい流域平均の地下水面までの深さは式の実涵養量から計算される。

$$Zw = Zw_{old} - \frac{Rc_{act}}{Ap} \quad (2-54)$$

ここで Zw_{old} は前の時間における地下水面までの深さである。

(3) 熱収支計算

熱収支計算は以下の各成分について計算を行い、結果が収束するまで繰り返し計算を行う。

- ・地表面温度

計算開始段階における各時点における地表面温度 Ts についてはその時点の気温と等しいとする。

- ・正味放射量

正味放射量 Rn は以下の式で与えられる。

$$Rn = S_d(1 - Al) + L_d - Em \cdot \delta \cdot Ts^4 \quad (2-55)$$

ここで、 S_d は下向き短波放射量、 Al はアルベド、 L_d は下向き長波放射量、 Em は射出率、 σ はステファンボルツマン定数(5.67×10^{-8})である。

- ・顕熱

顕熱 H は以下の式で与えられる。

$$H = \frac{\rho_a C_a}{Ra} (Ts - Ta) \quad (2-56)$$

ここで ρ_a は空気の密度、 C_a は空気の比熱(1005J/kgK)、 T_a は気温(°C)、 T は地表面温度(°C)である。

また ρ_a は以下の式で表される。

$$\rho_a = \frac{P_a}{RaT_a} \quad (2-57)$$

$$Ra = 287(1 + 0.680q) \quad (2-58)$$

ここで、 P_a は気圧、 q は比湿である。

・ 潜熱

潜熱 Le は水収支計算における蒸発散量の計算で得られた値を用いる。

裸地の場合

$$Le = le \cdot E_{bs} \quad (2-59)$$

植生が存在する場合

$$Le = le \cdot E_{dc} \quad (2-60)$$

ここで、 le は蒸発の潜熱である。

・ 地中熱流量

地中熱流量 G は Peters-Lidard et al. (1998)の手法により以下の式で与えられる。

$$G = \frac{Hc_1 Hc_2 dt \cdot 2(Ts - Tp) + Hc_1 C_2 z_d^2 (Ts - Tm)}{Gd} \quad (2-61)$$

ここで Hc は熱伝導率、 Tp は恒温層温度、 C は熱容量、 z_d は恒温層深さ Tm は土壌中層温度、添え字の 1 は root zone の値を、2 は root zone と transmission zone の平均値を指す。 Gd は以下の式で計算される。

$$Gd = 2Hc_1 z_d dt + 2Hc_2 z_m dt + C_2 z_d^2 z_m \quad (2-62)$$

ここで、 z_m は Tm の示す深さである。

2. 5 計算方法

モデルの計算に当たって、解析対象期間の前に 2 ヶ月間の予備計算をおこなった。具体的には 2001 年 2002 年どちらの場合も解析対象期間の前に 2001 年 11 月と 12 月のデータを用いて計算を行った。この予備計算の期間は土壌最下層 (Transmission zone) から地下水層への水分供給量と地下水層からの基底流出がバランスする期間を考慮して設定した。

またモデルの計算結果とパラメータの妥当性を検証するために、2002 年 1 月 1 日か

ら 2002 年 12 月 31 日の値を用いて検証計算をおこなった。

2. 6 土地利用を変化させた解析

現在の土地利用においてモデルを構築した後に明治期の土地利用を反映した計算をおこなった。この計算は植生・土壌パラメータ以外の各種パラメータをそのままに、植生・土壌パラメータを明治期の土地利用分布に対応させて計算をおこない流域の水収支・熱収支に土地利用が与える影響のみを解析したものである。

2. 7 流域平均の飽和透水係数の推定

Brutsaert and Lopez(1998)の手法を用いて 2000 年から 2005 年までの日平均流量データから流域平均飽和透水係数の推定をおこなった。降雨終了後の流量減衰率と平均流量を両対数グラフにプロットし、傾き 3 の直線と傾き 1 の直線でフィッティングをおこないそれぞれの切片から流域平均の飽和透水係数が以下の式で推定できる。

$$k = 0.5757 \left(\frac{a1}{a3} \right)^{0.5} A(LD^{-2}) \quad (2-63)$$

ここで $a1$ は傾き 1 の直線の切片、 $a3$ は傾き 3 の直線の切片、 A は流域面積、 L は流路長(流水線長)、 D は帯水層厚さである。今回の計算ではこのうち傾き 1 の直線がうまくフィッティングできなかつたため、Brutsaert and Lopez(1998)の手法を参考に全プロットの線形回帰をおこない回帰直線の切片を $a1$ とした。

3. 結果

3. 1 園部川流域平均飽和透水係数計算結果

降雨終了後の流量と流量減衰率を両対数グラフにプロットした結果(図 10)から式における値が $a_1=0.1156$ 、 $a_3=0.006$ となった。この結果から流域平均の飽和透水係数は $1.8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と推定された。これを初期値として利用しモデルパラメータの調整をおこなった。

3. 2 モデルパラメータの調整

3. 1 で推定した流域平均の飽和透水係数を用いて流域平均の飽和透水量係数の推定をおこなった。藤田ら(2006)の使用したデータを参考に流域平均の帯水層厚さを 10m と仮定し流域平均の飽和透水量係数を $1.8 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とした。さらにこの値に流域面積をかけることにより流域パラメータである完全飽和時の地中流量を $9300 \text{m}^3/\text{s}$ と仮定しこの値を初期値としてモデルの計算をおこなった。次いで計算開始時の地下水面までの深さを、式 2-49 を用いて実測値と近い値になるように調整し、ついで流量曲線が実測値と近くなるように完全飽和時の地中流量の調整をおこなった。これらの調整を繰り返し最終的なパラメータを決定した(表 14)。

3. 3 現在の水収支計算結果

(1) 流出の再現性の検討

I 長期流出の再現性

長期流出の再現性について、調整期間である 2001 年と検証期間である 2002 年の日平均流出量の計算結果と実測値の比較を図 11・12・13・14 に示す。なお図 12・14 は流量を対数グラフでプロットしている。図 12・14 によると計算結果が降雨時の流量をやや過小評価する傾向が見られた。特に低水が続いた直後の降水イベントにこの傾向が強く認められた。一方で低水時の流量については過大評価する傾向が見られた。この傾向は表 15・16 に示された年間水収支の定量的評価とも一致する。年間積算流出量や流出

率が過大に評価された 2001 年は夏期に渇水の期間が存在し(山田、2007)その期間以後流量の過大評価が特にみられたが、逆に流出が過小評価された 2002 年は 2001 年のような渇水期が存在せず降水時流量の過小評価がみられた。さらにこの傾向には蒸発散量の存在も大きく影響しているがこれについては 3.2(2)で詳しく述べる。

これらを土壌水分との関連でさらに考察すると、図 15・16 に示すように土壌水分特に基底流出に影響する第三層以下の下層の土壌水分が降雨に対して敏感でなく、渇水期の影響が長引いていることがその原因として考えられる。これらの傾向は、TOPLATS の原型となった TOPMODEL の国内流域への適応事例である多田ら(2002)においても指摘されていることである。

さらに実測値の精度についても考慮する必要がある。今回の測定値は水位流量曲線を用いて観測された水位から流量への変換を行ったものであるが、この水位流量曲線が特に低水時において不安定であることがいくつかの調査で指摘されている。特に 2004 年の調査(霞ヶ浦工事事務所, 2004)では、園部川の水位観測地点が霞ヶ浦に近く平常水位については出島観測所(霞ヶ浦の水位)とほとんど差がなく霞ヶ浦の水位変動に影響を受けていると指摘されている。今回の計算期間で使用された水位流量曲線(図 17, 霞ヶ浦工事事務所, 2000)は高水時のデータも含めて解析しているため比較的良好な結果が得られたとされているが、図 17 に示されているように流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ を下回るような平常水位の場合については再現性がよくない。これらの点が計算結果の低水時の値や流出ピークからの減衰時の値の再現性がよくない要因の一つと考えられる。

II 短期流出の再現性

短期流出の再現性について 2001 年、2002 年各年の最大出水時(2001 年 10 月 9 日 0:00 ~10 月 21 日 0:00, 総雨量 192.9mm, 2002 年 10 月 1 日 0:00~10 月 4 日 0:00, 総雨量 70.7mm)のハイドログラフ(図 18・19)を示す。これらどちらの場合も、日単位の傾向とは異なりピーク瞬間流量が過大に評価される傾向が見られた。これは図 18・19 にも示されているように降雨時の表面流出が過大であるためである。今回の計算では地表流が発生した場合そのすべてが河道から流出するとしているが、実際には地表流の流動の

過程で吸収・蒸発する可能性もあり、河道へ流出する場合も地表流の発生地点によって流出までの時間差があると考えられるのでこのような誤差が発生したと考えられる。一方減水期では実測値に比べ少なく計算されている。しかし流量が基底流出時に戻ったときの再現性はよいので、この傾向も地表流が河道へ流出するまでの時間差が考慮されていないことが大きな要因と考えられる。

(2) 水収支各項目について

2001年と2002年の水収支各項目の比較を表15・16に示す。これによるともつとも注目できる点として2002年の降水量が2001年に比べ20%ほど少ないにもかかわらず2つの年の間で蒸発散量にほとんど差がみられないという点がある。そのため2002年の降水量に占める蒸発散量の割合は2001年のその値に比べ約1.2倍になった。特に蒸散量については総量・降水量に占める割合ともに2002年の方が大きくなった。3.1(1)Iで述べたようにこのことが流出計算にも影響を与えていると考えられる。今回の計算では蒸散量は土壌水分と植生パラメータから計算されるが、このうち植生パラメータは同一であり、土壌水分についても図にあるようにどちらの年も表層の値は0.5付近であるためこのような結果になったと思われる。

降水量の分配については、以上にも述べたように蒸発散量として使われる量が全体の半分以上であり、さらにその80%以上が植物による蒸散であることが分かった。そのほかの蒸発量については基本的に樹冠による遮断蒸発となっているが、この値は植生パラメータ(特にLAI)と降水量に依存しており降水量に占める比率には大きな変化はない。長期流出についてはそのほとんどが基底流出成分であるが、図18・19に示すような短期洪水流出時にはピーク流量の多くを表面流出が占める。このほとんどが地下水面の上昇による飽和地表流である。また年間水収支計算結果における収支(降水量－蒸発散量－流出量)はどちらの年も降水量の4%となっており、今回のTOPLATSの適用において水収支計算はほぼ閉じているといえる。

(3) 水収支分布計算の結果

I 土壌水分

現在(2001年)の年平均土壌水分の分布計算結果を図 20 に示す。土壌水分がもっとも多い地域は土地利用では市街地とされている地域である。これは地中の条件は他の地域と同様であるのに対して、地表面での蒸発散が起こらないものとされている、いわば土壌に「ふた」がされていることがその要因であると考えられる。これ以外の地域に関しては、森林地域が農耕地に比べ比較的の高い値を示していることなど以外は土地利用との対応は明瞭ではない。関連が大きいのは地形指標(図 9)である。地形指標の大きい地域と土壌水分の高い地域がほぼ対応していることが分かった。

II 表面流出

現在の年平均表面流出の分布結果を図 21 に示す。地表流が発生するのは基本的に地形指標の高い河道の地域と、水田・市街地など地表面の飽和透水係数が小さい地域である。量的には前者の方が圧倒的に多くこれは地表流のうちその大部分が飽和地表流であったことと一致する。

III 蒸発散量

現在の年平均蒸発散量の分布結果を図 22 に示す。蒸発散量の分布は基本的に土地利用分布と対応していることが分かった。広葉樹林での値が最も高く、次いで針葉樹林、畑、水田の順に蒸発散量が少なくなっていた。そして今回の計算では市街地の蒸発散量を 0 としているので市街地では地形要素に関わりなく蒸発散量は 0 となっている。地形との対応については河道の周辺の地形指標が高い地域で蒸発散量が大きくなる傾向が見られた。

IV 地下水面までの深さ

現在の地表から地下水面までの年平均深さの分布を図 23 に示す。地下水面までの深さは地形指標(図 9)とほぼ同一の分布であった。

3. 4 現在の熱収支計算結果

(1) 再現性の検討

2001年の結果から流域内で台地に位置する草地ピクセル(図24、北緯36.2507° 東経140.2435°)における月別熱収支計算結果と筑波大学陸域環境研究センター圃場の測定値との比較を熱収支要素ごとに図に示す(正味放射量:図25・顕熱:図26・潜熱:図27・地中熱流量:図28)。なお2002年の計算では分布計算結果を出力していないため比較はおこなわない。これによると正味放射量・地中熱流量計算については値・変化傾向とも実測値と近く再現性がよいことが示された。潜熱については夏期のピークを計算できなかった点以外は比較的再現性がよい。顕熱については実際より平価傾向を過大に表現してしまう傾向があることが示された。

(2) 熱収支各項目などの季節変化について

2001年と2002年の熱収支各項目の流域平均値月別変化を図29・30に、ボーエン比と地温の流域平均値日平均・10日移動平均の変化を図31・32・33・34に示す。

I 熱収支項目

2001年2002年とも熱収支の傾向に大きな違いは見られなかった。表18によると年間積算値では正味放射の60%程度が潜熱として、40%が顕熱として使われていることが分かった。

・ボーエン比

ボーエン比が1以下の日(潜熱輸送量が顕熱輸送量よりも多く、蒸発散が活発だったと思われる日)は2001年で192日、2002年で187日であった。季節変化に注目するとボーエン比が1以下の日が継続するのは5月から10月にかけての期間である(図31・32)。ただしこの期間の中で6月から8月の夏の期間はボーエン比が比較的によく計算された。これらの時期は図15・16によると土壌水分、特に蒸散に影響が強い表層の土壌水分が減少している時期に重なっており、計算結果は土壌の乾燥によって蒸発散が抑制されたことを示した。

II 地表面温度

地表面温度の変化傾向・変化量とも 2001 年 2002 年のあいだで大きな差はみられなかった。どちらの年においても最低が 270K(約 0℃)最高が 305K(約 30℃)付近の値をとり、時期的には 1 から 2 月に最低値をとり、7 から 8 月に最高値をとっていた。

(3) 熱収支分布計算の結果

I 正味放射

現在の年平均正味放射量分布を図 35 に示す。値が大きいのは森林地帯であり、値が小さいのは市街地と水田である。森林での値が大きく、市街地での値が小さい理由として考えられるのは V で示されているように地表面温度が高いことである。図 39 と比較すると全体的にこの傾向が強いと思われる。これに対して水田は地表面温度・正味放射量ともに低い値となっている。これについては表 12 に示されているように設定したアルベドの影響が考えられる。

II 顕熱

現在の年平均顕熱の分布を図 36 に示す。値が高いのは土地利用区分では市街地、地形区分では地形指標の値が小さく土壤水分の値が小さい地域であった。植生域全般で値が低かったが、植生種による違いは顕著ではなかった。

III 潜熱

現在の年平均潜熱の分布を図 37 に示す。潜熱の分布と図 36 に示した顕熱の分布はほぼ対応関係にあるといえる。ただし図 36 と比較すると、特に台地上で潜熱の方が相対的に地形の影響が大きいことが示された。これは地形の影響が大きい土壤水分の分布と蒸発散量に関連することの影響であるとみられる。

IV 地中熱流量

現在の年平均地中熱流量の分布を図 38 に示す。市街地で高く、森林地域で低い傾向がみられた。

V 地表面温度

現在の年平均地表面温度の分布を図 39 に示す。土地利用分布との関連が強くみられ

た。市街地で高く、森林地域で低い傾向があったが、これは I で述べたように正味放射量の分布に影響していると考えられる。

3. 5 明治期土地利用入力時における水収支要素の変化

(1) 変化の再現性の検討

2001年のデータを用いた場合と2002年のデータを用いた場合の現在の値との比較について表19・20に示す。このうち明治期土地利用入力時(以下、明治入力時とする)の値の現在の値に対する割合(以下、明治/現在とする)に注目すると、ほとんど変化がないことが分かった。少なくともその大小傾向については同一の傾向を示していた。したがって現在の値と明治入力時の値との差がはっきり認められ、土地利用の違いによる熱収支の差異について議論しても差し支えないことが示された。

(2) 流出形態の変化について

I 長期流出

長期流出について、2001年2002年のデータにおける現在と明治入力時の計算結果の比較を図40・41・42・43に示す。なお図41・43は流量を対数グラフでプロットしている。図41・43によると全体的に現在時に比べ明治入力時では流量は少ない、特にピーク流量は少ないことが分かった。特に低水期直後のイベントにそれが顕著であった。これは II でふれるように降雨に対する基底流出の反応が緩やかであることが原因であると考えられる。

II 短期流出

短期流出について、3.1であげた二つの期間(2001年10月9日0:00~10月21日0:00, 総雨量192.9mm, 2002年10月1日0:00~10月4日0:00, 総雨量70.7mm)でのハイドログラフ(図44・45)を示す。現在と明治入力時で変化が顕著にみられるのは、基底流出の量と変化傾向である。まず量についてはピーク時でみて1/4ほどに低下していた。さらに変化傾向については2001年のデータにおいて基底流出のピークが現在の計算結

果に比べ明治入力時では 7 時間の遅れがあり、2002 年のデータにおいては時間の遅れがあった。これらの点から明治入力時においては地下への水輸送が緩やかになっていたことが示された。この要因としては今回の計算では畑地の飽和透水係数を森林などに比べ高く評価したことが影響していると考えられる。今回の計算では地表面の飽和透水係数が全層の飽和透水係数に影響を及ぼすが、実際には畑地など地表面が耕されている場合であっても下層においても透水性がよいとはいえないのでこれらの点についてさらに考慮する必要がある。

(3) 水収支各項目の変化について

水収支各項目の変化について、どちらの年のデータも流出量が 25 から 30%少ないことが分かった(表 19・20)。特に流出量の内訳に注目すると基底流出が少ないことが影響していた。これには主に植生による降雨遮断量が多いことが関連していると考えられる。明治入力時は現在の 1.3 倍以上の降雨遮断量がみられた。これによって土壌へ供給される水分は現在の 9 割程度となった。明治期の土地利用では現在に比べて裸地面に当たる市街地が少ないだけでなく、農耕地のように季節によって植生量が増減する土地が少なく、流域の大半が落葉の影響が小さい針葉樹林で覆われていた(図 3)ことなどから、年間を通じて植生による降雨遮断が大きくなったと考えられる。この結果が蒸発散量、特に蒸発量が多くなったことにも影響を与えているといえる。現代と明治入力時とでは蒸散量はほぼ等しかったが、蒸発量は 1.2 倍程度ありこの大部分は遮断蒸発量である。従って計算結果からは植生の増加による水収支要素の変化については、植物の場合 LAI など表される植生の量が大きな要因となっているということが分かった。

(4) 水収支要素分布の変化

I 土壌水分

明治入力時の年平均土壌水分分布を図 46 に示す。現在において高い値を示した市街地が少なかったが、現在に比べ全体的に土壌水分量は多かった。ただし、明治入力時の

分布計算結果全般にいえることとして、全体明治入力時ではグリッドの大きさが大きい
ため地形の影響が大きく出やすくなっていることがあげられる。この点については検討
を要する。

II 表面流出

明治入力時の年平均表面流出分布を図 47 に示す。地形に影響される河道周辺での分
布に変化はみられないが、全体的に発生箇所は減少している。土地利用との対応につい
ては現在に比べ市街地が少ないため、河道を離れた地域での発生は少なくなっている。

III 蒸発散量

明治入力時の年平均蒸発散量分布を図 48 に示す。現在に比べ全体的に多いことが示
された。特に台地上でその傾向がはっきり見られており、これは現在に比べ森林地域が
多かったことに対応していると考えられる。

3. 6 明治期土地利用入力時における熱収支要素の変化

(1) 変化の再現性の検討

2001年のデータを用いた場合と2002年のデータを用いた場合の現在の値との比較に
ついて表 21・22 に示す。このうち明治／現在に注目すると、3. 5(1)で示されたのと同
様の傾向を示し、二つの間にほとんど変化がないことが分かった。したがって熱収支計
算結果についても現在の値と明治入力時の値との差がはっきり認められ、土地利用の違
いによる熱収支の差異について議論しても差し支えないことが示された。

(2) 熱収支各項目の変化について

2001年2002年各年における明治入力時の熱収支各要素の月別変化を図 49・50 に、
ボーエン比と地温の日平均・10日移動平均の現在と明治入力時の比較を図 51・52・53・
54 にそれぞれ示す。

I 熱収支各項目について

熱収支各項目年間収支(表 21・22)に注目すると、もっとも差があったのが地中熱流量

であった。総量としては少ないものも、現在は明治期の約 1.7 倍となっておりこれが II で述べる地表面温度の傾向に影響していると考えられる。さらに明治入力時は蒸発散で示された傾向と対応して潜熱が多く顕熱が少なくなっていた。また明治入力時では正味放射量が少ない。この要因は一つとして II で述べる現在の地表面温度の上昇が考えられる。つまり地表面温度の上昇に対応して上向き長波放射量が増加した可能性がある。さらに今回の計算では植生があるときの畑地は森林に比べて大きいアルベドを設定しているため畑地が増加した現在では正味放射量が減少したと考えられるが、この点については分布図からさらに解析する。

・ボーエン比

上でも述べたように、明治入力時は現在に比べ潜熱が多く顕熱が少ないため図 51・52 に示すように全体的にボーエン比が現在に比べ低くなっていた。これは水収支計算で示された傾向とも一致する。

II 地表面温度

I で述べたように地表面温度については一年を通じて明治入力時の値が現在よりも低くなった(図 53・54)。これは(3)に示されるように市街地の存在の増加が大きく影響しているものと考えられる。

(3) 明治期土地利用入力時における熱収支要素分布の変化

I 正味放射

明治入力時の年平均正味放射量分布を図 55 に示す。現在に比べ全体的にかなり大きいことが示された。この変化がみられる地域も蒸発散量や地表面温度の変化がみられた地域と同様に台地上である。ここからこの傾向は畑地・市街地に比べ地表面温度が低い森林の存在による影響であるとみられる。

II 顕熱

明治入力時の年平均顕熱分布を図 56 に示す。現在に比べて全体的に値が低い。さらに現在と比較して地形による影響が多くみられた。これは他の熱収支項目の変化と同様

に少数の土地利用区分(この場合は針葉樹林)が卓越するようになったために現れた変化であると思われる。

III 潜熱

明治入力時の年平均潜熱分布を図 57 に示す。他の要素の変化傾向と同様に全体的に値が現在よりも大きい。特に台地上で変化が顕著であることから、台地上での森林（針葉樹林）の減少が影響していることが考えられる。

IV 地中熱流量

明治入力時の年平均地中熱流量分布を図 58 に示す。現在に比べて全体的に減少がみられた。森林地域で値が低く、水田などで比較的高い値を示している。

V 地表面温度

明治入力時の年平均地表面温度分布を図 59 に示す。この結果においても現在と同様に正味放射量との対応がみられた。

4. おわりに

- ・ TOPLATS の水収支における再現性については、基底流出成分の再現性は比較的によいが、低水期における再現性とその後の降雨に対する再現性が特によくない。また降雨量が大きいイベントでは瞬間的に流量が過大評価される傾向がある。これは主に河道に流出する地表流が過大評価されていることによると考えられ、地表流の追跡計算のさらなる検討が必要である。また、流量の検討も必要と思われる。

- ・ TOPLATS の熱収支の再現性は比較的に良好であった。

- ・ 現在に比べ明治入力時では水収支において、蒸発散量が上昇し、流出量は減少した。これは分布計算と合わせると特に森林の増加によるものであり、森林による降雨遮断量の増加が影響していると考えられる。

- ・ 現在に比べ明治入力時では熱収支において、正味放射・潜熱が上昇し、顕熱・地中熱流量・地表面温度が低下した。これは水収支と同様に森林の増加による蒸発散の増加に加え、市街地の増加による地表面温度の上昇、それによる正味放射の減少が影響していると考えられる。

- ・ 水収支・熱収支とも地形による差異に比べ、土地利用の違いによる差異の方が大きく影響していた。

謝辞

本研究を実施するにあたり解析と考察その他研究の全般にわたって終始親身になってご指導いただいた筑波大学生命環境科学研究科の杉田倫明教授に深く感謝いたします。また、機会あるごとに有益な助言をくださった筑波大学生命環境科学研究科地球環境科学専攻水文学分野の諸先生方にも感謝いたします。

本研究の解析にあたって、茨城県土木部・国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川工事事務所から流量・気象データなどを快く提供していただきました。また現地調査の際にはこれらの諸機関に加え、流域各自治体の方の協力をいただきました。ここにそれら関係諸機関の協力を深く感謝いたします。さらに筑波大学生命環境科学研究科の福島武彦教授には河川流量データを、筑波大学生命環境科学研究科空間情報科学専攻研究員王尾和寿博士には明治期の土地利用データを、科学技術振興機構研究員小谷亜由美博士には植生パラメータの値を、筑波大学陸域環境研究センター準研究員渡来靖博士には4成分放射計のデータを快く提供していただき、さらに皆さんから有益な助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。また筑波大学第一学群自然学類の山田景子氏には共同で調査をおこない、さらには研究に際してデータも提供していただきました。深く感謝いたします。

最後に、研究を進めるに当たって時に有益な助言をいただき、時に励ましていただいた筑波大学水文学分野の皆さんに心から感謝いたします。

参考文献

- Beven K. J. and Kirkby M. J. (1979) : A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, **24**, 43-69
- Brooks R. H. and Corey A. T. (1966) : Properties of porous media affecting fluid flow. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **92**, 61-88
- Brutsaert W., Lopez J. P. (1998) : Basin-scale geohydrologic drought flow features of riparian aquifers in southern Great Plains. *Water Resours Research*, **34**, 233-240
- Businger J. A., Wyngaard J. C., Izumi Y., Bradley E. F. (1971) : Flux-Profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **28**, 181-189
- Chen F. and Dudhla J. (2001) : Coupling an advanced land surface-hydrology model with the pann state-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, **129**, 569-585
- Choudhury B. J., Idso S. B., Reginato R. J. (1987) : Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **39**, 283-297
- Crow W. T. and Wood E. F. (2003) : The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Advances in Water Resources*, **26**, 137-149
- Crow W. T., Ryu D., Famiglietti J. S. (2005) : Upscaling of field-scale soil moisture measurements using distributed land surface modeling. *Advances in Water*

Resources, **28**, 1-14

Famiglietti J. S., Wood E. F., Sivapalan M., Thongs D. J. (1992) : A catchment scale water balance model for FIFE. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 18997-19007

Hamada Y. (1999) : Production and transport processes of Carbon Dioxide in soil profiles at a coniferous and an adjacent grassland. Ph. D Thesis, Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba, pp194

Jacquemin B., Noilhan O. (1990) : Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set. *Boundary-Layer Meteorology*. **52**, 93-134

Jarvis P. G., James G. B., Landsberg J. J. (1976) : Coniferous Forest. Montheith J. L. ed. : Vegetation and the Atmosphere vol. 2 Case studies, Academic Press, pp439

Kotani A. and Sugita M. (2005) : Seasonal variation of surface fluxes and scalar roughness of suburban land covers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**, 1-21

Kotoda K. and Sugita M. (1984) : Changes in energy balance with foliation of deciduous forest during a spring season. *Annual Report, Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, **10**, 32-35

Sellers P. J., Los S. O., Tucker C. J., Justice C. O., Dazlich D. A., Collatz D. J., Randall D. A. (1996) : A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, **9**,706-736

Sivapalan M., Beven K., Wood E. F., (1987) : On hydrologic similarity 2. a scaled model of storm runoff production. *Water Resources Research*, **23**, 2266-2278

Oke T. R. (1987) : Boundary Layer Climates, Second Edition. Routledge, pp435

- Peters-Lidard C. D., Zion M. S., Wood E. F. (1997) : A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 4303-4324
- Peters-Lidard C. D., Blackburn E., Liang X., Wood E. F. (1998) : The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures. *Journal of Atmospheric Science*, **55**, 1209-1224
- Rutter A. J. (1975) : The hydrological cycle in vegetation. table III. Montheith J. L. ed. : *Vegetation and the Atmosphere* vol. 1 principles, Academic Press, 137
- Tsujimura M. (1994) : Dynamic behavior of soil water movement in a headwater basin. Ph. D Thesis, Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba, pp131
- 新井 正・西沢利英 (1974) : 「水文学講座 10 水温論」, 共立出版, pp297
- 猪野祐一 (2002) : 地下水の浸透解析と分布型水文モデル. 長岡技術科学大学環境・建設系環境システム工学専攻環境システム工学課程修士論文要旨, pp3
- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (2002):「第4期の霞ヶ浦に掛る湖沼水質保全計画策定関係資料集 水質予測関係」, pp158
- 茨城県土木部 (2001・2002) : 「茨城県水防情報システム」 CD-ROM
- 王尾和寿 (2004) : 流域を単位とした地域景観構造の可視化. 筑波大学芸術学研究科博士(デザイン学)学位論文, pp222
- 霞ヶ浦工事事務所 (2004) : 「流量観測結果」
- 霞ヶ浦工事事務所 (2000) : 「流量観測結果」
- 霞ヶ浦工事事務所 (2001・2002) : 「時間雨量」 CD-ROM
- 霞ヶ浦工事事務所 (2001・2002) : 「時間流量月報」 CD-ROM
- 気象庁 (2005) : 「アメダス再統計値 Disk6」 CD-ROM (財)気象業務支援センター
- 国土地理院 (2001) : 「数値地図 50m メッシュ(標高)・日本-II」 CD-ROM (財)日本地図センター

- 国立環境研究所 (1996) : 「自然環境 GIS」 CD-ROM
- 近藤純正 (1994) : 「水環境の気象学」 朝倉書店, pp350.
- 杉田典明・古藤田一雄 (1985) : 森林蒸発散におよぼす土壌水分の影響. 筑波大学水理実験センター報告, **9**,83-88
- 杉田倫明・古藤田一雄 (1987) : アカマツ林の葉面積指数の季節変化. 筑波大学水理実験センター報告, **11**,111-112
- 多田明夫・波平 篤・田中丸治哉・畑 武志 (2002) : 山林小流域の長短期流出解析への TOPMODEL の適用ー長短期流出両用モデルとの比較ー. 水文・水資源学会誌, **15**, 399-412
- 谷 信輝 (1982) : 土壌の熱容量. 土壌物理性測定法委員会編 : 「土壌物理測定法」 養賢堂, 299-303
- 田中克季・及川武久 (1998) : 水理実験センター内円形圃場草原における C3・C4 植物の LAI の季節変化 (1996, 1997). 筑波大学水理実験センター報告, **23**, 87-89
- 土壌物理学会編 (2002) : 「新編土壌物理用語事典」 データ集, 養賢堂, 180-183
- 土木研究所 (2002) : 「WE P モデル解説書 (試用版)」, pp52
- 日本工業規格 (2006) : 「JIS Z8901 試験用粉体及び試験用粒子」 11 種 関東ローム
- 日本農業気象学会 (1986) : 「農業気象用語解説集」 日本農業気象学会, pp327
- 藤田光一・伊藤弘之・小路剛志・安間智之 (2006) : 自然共生型流域圏・都市の再生 資料集 (II) 水物質循環モデルを活用した水環境政策評価 ～霞ヶ浦とその流域を対象として～. 国総研資料 第 299 号, 国土技術政策総合研究所, pp252
- 村岡浩爾 (1981) : 霞ヶ浦の水収支. 国立公害研究所研究報告, **20**, 103-119
- 山田景子 (2007) : 霞ヶ浦流域の水収支と土地利用との関係. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文, pp136
- 山中 勤・松尾大悟・矢野 翠・角張順一・飯田真一・涌井久司・清水亮介・田中 正 (2005) : 遷移課程のアカマツ二次林における植物種間の根茎分布の差異. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 39-44

山本荘毅 (1983) : 「新版地下水調査法」 古今書院, pp490

劉 建軍・莫 文紅・及川武久 (2004) : 陸域環境研究センター圃場における C3/C4 混生
草原の地下部バイオマスと成長量の季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター
報告, **5**,13-20

表 1 園部川流域諸元 (山田(2007)による)

項目	
流域面積	79.30km ²
最多傾斜方位	南東
平均傾斜角	1.785°
平均標高	28.6m
最大比高	374.79m
形状比	0.169
水系密度	1289

表 2 植生区分設定項目

群落名	区分
アカマツ植林	針葉樹林
アカマツ-ヤマツツジ群集	針葉樹林
クロマツ植林	針葉樹林
スギ・ヒノキ・サワラ植林	針葉樹林
モミ-シキミ群集	針葉樹林
ヤマツツジ-アカマツ群集	針葉樹林
外国産針葉樹植林	針葉樹林
アカシデ-イヌシデ群落	広葉樹林
イヌシデ-アカシデ自然林	広葉樹林
クヌギ群落	広葉樹林
クヌギ-コナラ群集	広葉樹林
クリ-ミズナラ群落	広葉樹林
ケヤキ群落	広葉樹林
コナラ群落	広葉樹林
コナラ-クリ群落	広葉樹林
シラカシ群集	広葉樹林
ニシキウツギ-ノリウツギ群落	広葉樹林
ニセアカシア群落	広葉樹林
ブナ-ツクバネウツギ群落	広葉樹林
マダケ・ハチク林	広葉樹林
モウテクソウ林	広葉樹林
ヤブコウジ-スダジイ群集	広葉樹林
ヤマボウシ-ブナ群集	広葉樹林
常緑果樹園	広葉樹林
桑園	広葉樹林
河辺ヤナギ低木群落	広葉樹林
竹林	広葉樹林
落葉果樹園	広葉樹林
アズマネザサ-ススキ群落	草地
クズ-カナムグラ群落	草地
ササ・タケ群落	草地
ススキ群団	草地
ススキ-アズマネザサ群落	草地
チガヤ-ススキ群集	草地
セイタカアワダチソウ群落	草地
ミゾソバ-ヨシ群落	草地
メダケ-ヤタケ群落	草地
ヨシクラス	草地
ヨモギ群落	草地
伐採群落	草地
休耕田雑草群落	草地
採石場	草地
路傍雑草群落	草地
造成地	草地
造成地、採石場、人為裸地	草地
ゴルフ場	短草地
牧草地	短草地
公園・墓地	短草地
水田	水田
水田雑草群落	水田
畑地	畑地
苗圃	畑地
茶畑	畑地
畑地雑草群落	畑地
工場地帯	市街地
市街地	市街地
緑の多い住宅地	市街地
緑の多い住宅地	市街地
緑の多い住宅地、公園、墓地	市街地
緑の多い住宅地、公園、運動公園、研究所、墓地等	市街地
開放水域	水面

表 3 明治期土地利用区分の再区分

王尾(2004)区分	新区分
針葉樹林	針葉樹林
広葉樹林	広葉樹林
伐採林	針葉樹林
荒地	草地
田	水田
樹木畑	広葉樹林
畑	畑地
市街地	市街地
河川・湖沼	水面

表 4 ティーセン法における雨量観測所の重み

	緯度	経度	標高 (m)	欠測がない場合		欠測がある場合	
柿岡	N 36° 14.0'	E 140° 11.3'	27	0.284140	0.375113	0.299044	0.384077
恋瀬川	N 36° 7.1'	E 140° 15.6'	10	0.136614	0.180354	0.14378	0.184664
小川	N 36° 10.2'	E 140° 21.1'	5	0.218241	0.288115	0.229689	欠測
美野里(国交省)	N 36° 15.3'	E 140° 19.4'	27	0.068643	0.090621	0.072244	0.092786
美野里(アメダス)	N 36° 14.3'	E 140° 19.4'	25	0.049840	0.065798	欠測	0.06737
美野里町(県)	N 36° 14.4'	E 140° 21.2'	23	0.094677	欠測	0.099643	0.127976
岩間町	N 36° 17.9'	E 140° 17.6'	30	0.147845	欠測	0.1556	0.199845

小川・美野里(国交省)の緯度・経度・標高は地図からの推定値である

「欠測がある場合」は左から美野里町(県)と岩間町が欠測の場合、美野里(アメダス)が欠測の場合、

小川(国交省)が欠測の場合の雨量観測所の重みを示す

表 5 雨量欠測期間

欠測期間	観測点
2001/2/9 16時-2001/2/28 24時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/3 22時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/3 24時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/6 4時-5時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/6 11時-12時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/7 6時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/7 11時-15時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/8 2時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/8 13時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/8 15時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/7/8 24時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/8/30 10時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/9/17 18時	美野里町(県) 岩間町(県)
2001/9/21 1時-2001/9/22 6時	美野里(気象)
2001/10/22 2時-3時	美野里町(県)
2001/12/19 12時	美野里町(県) 岩間町(県)
2002/2/9 8時-2002/2/10 16時	美野里町(県) 岩間町(県)
2002/6/1 1時-2002/6/30 24時	小川(国交省)
2002/7/11 15時	小川(国交省)
2002/7/13 18時-2002/7/18 15時	小川(国交省)
2002/7/19 23時	小川(国交省)

表 6 気温欠測期間

欠測期間	処理
2001/2/6 10時	前後から内挿
2001/2/6 14時	前後から内挿
2001/3/29 9時-15時	アメダス(長峰)の値を使用
2001/5/29 11時-16時	アメダス(長峰)の値を使用
2001/6/10 18時-19時	前後から内挿
2001/7/5 14時	前後から内挿
2001/10/20 18時	前後から内挿
2001/10/21 8時	前後から内挿
2001/10/21 17時-2001/10/22 11時	アメダス(長峰)の値を使用
2002/1/11 1時-2002/1/15 13時	高層気象台の値を使用
2002/1/19 1時-2002/1/21 11時	高層気象台の値を使用
2002/4/2 1時-2002/4/3 22時	高層気象台の値を使用
2002/5/20 1時-2002/5/24 22時	高層気象台の値を使用
2002/8/1 22時	高層気象台の値を使用
2002/10/19 1時-2002/10/20 17時	高層気象台の値を使用
2002/10/28 1時-2002/10/29 14時	高層気象台の値を使用
2002/12/26 1時-2002/12/27 13時	高層気象台の値を使用

表 7 露点温度欠測期間

欠測期間	処理
2001/2/6 10時	前後から内挿
2001/2/6 14時	前後から内挿
2001/3/29 9時-15時	3.2を代入
2001/6/10 18時-19時	前後から内挿
2001/7/5 14時	前後から内挿
2001/10/20 18時	前後から内挿
2001/10/21 8時	前後から内挿
2001/10/21 17時	前後から内挿
2002/1/11 1時-2002/1/15 13時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/1/19 1時-2002/1/21 11時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/4/2 1時-2002/4/3 22時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/5/20 1時-2002/5/24 22時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/8/1 22時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/10/19 1時-2002/10/20 17時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/10/28 1時-2002/10/29 14時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算
2002/12/26 1時-2002/12/27 13時	高層気象台の値(相対湿度)を使用し計算

表 8 風速欠測期間

欠測期間	処理
2001/2/6 10時	前後から内挿
2001/2/6 14時	前後から内挿
2001/3/29 9時	前後から内挿
2001/4/21 15時	前後から内挿
2001/5/14 1時-2001/5/15 18時	アメダス(長峰)の値を使用
2001/5/16 9時-16時	アメダス(長峰)の値を使用
2001/6/10 18時-19時	前後から内挿
2001/7/5 14時	前後から内挿
2001/10/20 18時	前後から内挿
2001/10/21 8時	前後から内挿
2001/10/21 17時-2001/10/22 11時	アメダス(長峰)の値を使用
2002/1/11 1時-2002/1/15 13時	高層気象台の値を使用
2002/1/19 1時-2002/1/21 11時	高層気象台の値を使用
2002/4/2 1時-2002/4/3 22時	高層気象台の値を使用
2002/5/20 1時-2002/5/24 22時	高層気象台の値を使用
2002/8/1 22時	高層気象台の値を使用
2002/10/19 1時-2002/10/20 17時	高層気象台の値を使用
2002/10/28 1時-2002/10/29 14時	高層気象台の値を使用
2002/12/26 1時-2002/12/27 13時	高層気象台の値を使用

表 9 気圧欠測期間

欠測期間	処理
2001/2/6 10時	前後から内挿
2001/2/6 14時	前後から内挿
2001/3/29 9時	前後から内挿
2001/6/10 18時-19時	前後から内挿
2001/7/5 14時	前後から内挿
2001/10/20 18時	前後から内挿
2001/10/21 8時	前後から内挿
2001/10/21 17時	前後から内挿
2002/1/11 1時-2002/1/15 13時	高層気象台の値を使用
2002/1/19 1時-2002/1/21 11時	高層気象台の値を使用
2002/4/2 1時-2002/4/3 22時	高層気象台の値を使用
2002/5/20 1時-2002/5/24 22時	高層気象台の値を使用
2002/8/1 22時	高層気象台の値を使用
2002/10/19 1時-2002/10/20 17時	高層気象台の値を使用
2002/10/28 1時-2002/10/29 14時	高層気象台の値を使用
2002/12/26 1時-2002/12/27 13時	高層気象台の値を使用

表 10 植生パラメータ出典

項目	針葉樹林	広葉樹林
各層における根の分布割合	山中ら (2005)	針葉樹の値を利用
エネルギー収支計算におけるLAI(leaf area index)	杉田・古藤田 (1987)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
樹冠貯留計算におけるLAI	杉田・古藤田 (1987)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
乾燥地表面のアルベド	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984)
湿潤地表面のアルベド	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984)
射出率	Kotani and Sugita (2005)	Oke (1987) Table 1.1
モーメント輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
熱輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
地面修正量 (m)	Jarvis et al. (1976)	植生高さから推定
最小気孔抵抗	Jarvis et al. (1976)	Rutter (1975)
最大気孔抵抗	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)
放射パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による水蒸気欠損の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
植生下の地中熱流量計算のための蒸散パラメータ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)
根活動要素	250とする	250とする
根密度	1とする	1とする
根抵抗	60000000とする	60000000とする
葉の最終水ポテンシャル(m)	-210とする	-210とする

表 10 続き

項目	草地	短草地(芝地)
各層における根の分布割合	劉ら (2004)	草地の値を利用
エネルギー収支計算におけるLAI(leaf area index)	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
樹冠貯留計算におけるLAI	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
乾燥地表面のアルベド	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
湿潤地表面のアルベド	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
射出率	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
モーメント輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	Kotani and Sugita (2005)
熱輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	Kotani and Sugita (2005)
地面修正量 (m)	植生高さから推定	植生高さから推定
最小気孔抵抗	Rutter (1975)	草地の値を利用
最大気孔抵抗	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)
放射パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による水蒸気欠損の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
植生下の地中熱流量計算のための蒸散パラメータ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)
根活動要素	250とする	250とする
根密度	1とする	1とする
根抵抗	600000000とする	600000000とする
葉の最終水ポテンシャル(m)	-210とする	-210とする

表 10 続き

項目	水田	畑	市街地
各層における根の分布割合	草地の値を利用	草地の値を利用	*
エネルギー収支計算におけるLAI(leaf area index)	Kotani and Sugita (2005)	表12の値とする	*
樹冠貯留計算におけるLAI	Kotani and Sugita (2005)	表12の値とする	*
乾燥地表面のアルベド	Kotani and Sugita (2005)	日本農業気象学会(1986)	Kotani and Sugita (2005)
湿潤地表面のアルベド	Kotani and Sugita (2005)	日本農業気象学会(1986)	Kotani and Sugita (2005)
射出率	Kotani and Sugita (2005)	日本農業気象学会(1986)	Kotani and Sugita (2005)
モーメント輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	植生高さから推定	Kotani and Sugita (2005)
熱輸送における粗度長 (m)	Kotani and Sugita (2005)	植生高さから推定	Kotani and Sugita (2005)
地面修正量 (m)	植生高さから推定	植生高さから推定	0とする
最小気孔抵抗	草地の値を利用	草地の値を利用	*
最大気孔抵抗	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)	*
放射パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)	*
樹冠抵抗による水蒸気欠損の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)	*
樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)	*
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)	*
植生下の地中熱流量計算のための蒸散パラメータ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)	*
根活動要素	250とする	250とする	*
根密度	1とする	1とする	*
根抵抗	600000000とする	600000000とする	*
葉の最終水ポテンシャル(m)	-210とする	-210とする	*

*は設定する値が存在しない(設定する必要がない)値であることを示す。

表 11 土壌パラメータ出典

項目	針葉樹林	広葉樹林
Brooks-Corey pore size distribution index	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
残留土壌水分	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数	Hamada (1999)	Tsujimura (1994)
恒温層深さ	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
恒温層温度	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
11の値をとる深さ	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表 11 続き

項目	草地	短草地(芝地)
Brooks-Corey pore size distribution index	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	土壌物理学会 (2002)	土壌物理学会 (2002)
残留土壌水分	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数	Hamada (1999)	Hamada (1999)
恒温層深さ	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
恒温層温度	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
11の値をとる深さ	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表 11 続き

項目	水田	畑	市街地
Brooks-Corey pore size distribution index	猪野 (2002)	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	Hamada (1999)	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	土壌物理学会 (2002)	土壌物理学会 (2002)	
残留土壌水分	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数	谷山 (2000, personal communication) による真瀬における値	土壌物理学会 (2002)	
恒温層深さ	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
恒温層温度	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
11の値をとる深さ	山本 (1983)	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	山本 (1983)	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	谷 (1982)	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表 12 植生パラメータ設定値

項目	針葉樹林	広葉樹林	草地	短草地(芝地)	水田	畑	市街地
根の分布割合(root zone)	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	*
根の分布割合(surface1 zone)	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	*
根の分布割合(surface2 zone)	0.15	0.15	0	0	0	0	*
エネルギー収支計算におけるLAI(leaf area index)							
1・2月	2	0.4	0.01	0.25	0.01	0.01	*
3・4月	2	1.75	0.2	0.75	0.01	1	*
5・6月	2.6	5.25	1	0.625	1.2	2	*
7・8月	4	7	3.5	1	7	3	*
9・10月	3.5	6.5	2.2	1	1.2	1	*
11・12月	3	2	1	0.5	0.01	0.01	*
樹冠貯留計算におけるLAI							
1・2月	5	0.4	0.01	0.25	0.01	0.01	*
3・4月	2	1.75	0.2	0.75	0.01	1	*
5・6月	2.6	5.25	1	0.625	1.2	2	*
7・8月	4	7	3.5	1	7	3	*
9・10月	3.5	6.5	2.2	1	1.2	1	*
11・12月	3	2	1	0.5	0.01	0.01	*
乾燥地表面のアルベド							
1・2月	0.1	0.1	0.25	0.25	0.13	0.1	0.16
3・4月	0.1	0.1	0.23	0.25	0.15	0.2	0.16
5・6月	0.1	0.15	0.2	0.22	0.12	0.2	0.16
7・8月	0.1	0.15	0.19	0.2	0.17	0.2	0.16
9・10月	0.1	0.15	0.18	0.23	0.17	0.2	0.16
11・12月	0.1	0.1	0.2	0.25	0.13	0.1	0.16
湿潤地表面のアルベド							
1・2月	0.1	0.1	0.25	0.25	0.13	0.1	0.16
3・4月	0.1	0.1	0.23	0.25	0.15	0.2	0.16
5・6月	0.1	0.15	0.2	0.22	0.12	0.2	0.16
7・8月	0.1	0.15	0.19	0.2	0.17	0.2	0.16
9・10月	0.1	0.15	0.18	0.23	0.17	0.2	0.16
11・12月	0.1	0.1	0.2	0.25	0.13	0.1	0.16
射出率							
1・2月	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.9	0.9
3・4月	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.95	0.9
5・6月	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.95	0.9
7・8月	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.95	0.9
9・10月	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.95	0.9
11・12月	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.9	0.9
気象データの測定高(m)	12	12	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
風データの測定高(m)	12	12	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
モーメント輸送における粗度長(m)							
1・2月	0.7	0.4	0.022	0.006	0.003	0.022	0.00004
3・4月	0.7	0.65	0.022	0.006	0.005	0.022	0.00004
5・6月	0.7	0.7	0.072	0.012	0.017	0.1	0.00004
7・8月	0.7	0.7	0.113	0.017	0.033	0.1	0.00004
9・10月	0.7	0.7	0.213	0.009	0.025	0.1	0.00004
11・12月	0.7	0.7	0.220	0.001	0.005	0.022	0.00004
熱輸送における粗度長(m)							
1・2月	0.27	0.05	0.005	0.003	0.063	0.003	0.0031
3・4月	0.35	0.09	0.007	0.001	0.050	0.003	0.0031
5・6月	0.18	0.09	0.001	0.001	0.027	0.014	0.0031
7・8月	0.25	0.09	0.000	0.002	0.019	0.014	0.0031
9・10月	0.27	0.09	0.000	0.004	0.027	0.014	0.0031
11・12月	0.39	0.09	0.001	0.006	0.039	0.003	0.0031
地面修正量(m)							
1・2月	8.5	6.67	0	0	0	0	0
3・4月	8.5	6.67	0.065	0.033	0	0	0
5・6月	8.5	6.67	0.104	0.054	0.0004	0.2	0
7・8月	8.5	6.67	0.717	0.109	0.644	0.333	0
9・10月	8.5	6.67	0.655	0.058	0.143	0.333	0
11・12月	8.5	6.67	0.403	0	0	0	0
最小気孔抵抗(s/m)	250	200	150	150	150	150	*
最大気孔抵抗(s/m)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	*
放射パラメータ	30	30	30	30	30	30	*
樹冠抵抗による飽差の調整量パラメータ	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	*
樹冠抵抗による気温の調整量パラメータ	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	*
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温(K)	298	298	298	298	298	298	*
植生下の地中熱流量計算のための蒸散パラメータ							
1・2月	0.4	0.4	0	0.47	0	0	*
3・4月	0.4	0.4	0.47	0.47	0	0	*
5・6月	0.4	0.5	0.47	0.47	0.5	0.4	*
7・8月	0.4	0.5	0.47	0.47	0.5	0.4	*
9・10月	0.4	0.5	0.47	0.47	0.5	0.4	*
11・12月	0.4	0.4	0.47	0.47	0	0	*
根活動要素	250	250	250	250	250	250	*
根密度(1/m ²)	1	1	1	1	1	1	*
根抵抗(s/m)	6.0E+08	6.0E+08	6.0E+08	6.0E+08	6.0E+08	6.0E+08	*
葉の最終水ポテンシャル(m)	-210	-210	-210	-210	-210	-210	*

*は設定する値が存在しない(設定する必要がない)値であることを示す。

表 13 土壌パラメータ設定値

項目	針葉樹林	広葉樹林	草地豆草地(芝地)		水田	畑	市街地
Brooks-Corey pore size distribution index	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
空気侵入値 (m)	0.1	0.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
飽和土壌水分	0.772	0.772	0.65	0.65	0.6	0.65	0.7
残留土壌水分	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
地表の飽和透水係数 (m/s)	5.00E-05	1.00E-05	2.00E-05	2.00E-05	2.40E-06	4.00E-05	1.00E-06
恒温層深さ (m)	13	13	13	13	13	13	13
恒温層温度 (K)	288	288	288	288	288	288	288
土壌中層温度の値をとる深さ (m)	1	1	1	1	1	1	1
初期土壌中層温度 (K)	281	281	281	281	281	281	281
土壌成分の熱容量 (J/kg/m ³)	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06
石英率	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

表 14 流域単位パラメータ設定値

項目	設定値
降水の終了と浸透能回復との時間差 (秒)	18000
初期樹冠貯留量 (m)	0
完全飽和時の地中流量 (m ³ /s)	2000
TOPMODELパラメータff	3.8
初期平均地下水面までの深さ (m)	2.0

表 15 水収支計算結果と実測値の定量的比較 (2001年・単位 mm)

項目	実測値	計算値	計算値/実測値(%)
降水量		1327	
流出量	517	578	112
流出率 (%)	39	43	110
(降水量)-(流出量)	817	763	93

表 16 水収支計算結果と実測値の定量的比較 (2002年・単位 mm)

項目	実測値	計算値	計算値/実測値(%)
降水量		1070	
流出量	446	352	79
流出率 (%)	42	33	79
(降水量)-(流出量)	624	718	115

表 17 水収支計算結果の項目別比較 (2001年・2002年)

単位 mm かつこ内は降水量に占める割合(%)

土地利用	2001	2002	2002/2001 (%)
降水量	1327 (100)	1070 (100)	81
遮断量	215 (16)	171 (16)	80
正味降水量	1112 (84)	899 (84)	81
流出量	578 (44)	352 (33)	61
基底流出	521 (39)	325 (30)	62
飽和表面流出	49 (4)	23 (2)	47
ホートン型表面流出	8 (1)	4 (0)	50
蒸発散量	700 (53)	671 (63)	96
蒸発量	129 (10)	82 (8)	64
蒸散量	571 (43)	589 (55)	103
凝結量	0 (0)	0 (0)	
収支	49 (4)	47 (4)	96

表 18 熱収支計算結果の項目別比較 (2001年・2002年)

単位 MJ/m² かつこ内は正味放射に占める割合(%)

土地利用	2001	2002	2002/2001 (%)
正味放射量	2776 (100)	2853 (100)	103
潜熱輸送量	1710 (62)	1640 (57)	96
顕熱輸送量	997 (36)	1134 (40)	114
地中熱流量	63 (2)	70 (2)	111
収支	6 (0)	9 (0)	150

表 19 現在と明治入力時の水収支計算結果の比較 (2001 年)

単位 mm かつこ内は降水量に占める割合(%)

土地利用	現在		明治		明治/現在 (%)
降水量	1327	(100)	1327	(100)	100
遮断量	215	(16)	295	(22)	137
正味降水量	1112	(84)	1032	(78)	93
流出量	578	(44)	431	(32)	75
基底流出	521	(39)	391	(29)	75
飽和表面流出	49	(4)	35	(3)	71
ホートン型表面流出	8	(1)	5	(0)	63
蒸発散量	700	(53)	831	(63)	119
蒸発量	129	(10)	270	(20)	209
蒸散量	571	(43)	561	(42)	98
凝結量	0	(0)	0	(0)	
収支	49	(4)	65	(5)	133

表 20 現在と明治入力時の水収支計算結果の比較 (2002 年)

単位 mm かつこ内は降水量に占める割合(%)

土地利用	現在		明治		明治/現在 (%)
降水量	1070	(100)	1070	(100)	100
遮断量	171	(16)	230	(21)	135
正味降水量	899	(84)	840	(79)	93
流出量	352	(33)	237	(22)	67
基底流出	325	(30)	217	(20)	67
飽和表面流出	23	(2)	17	(2)	74
ホートン型表面流出	4	(0)	3	(0)	75
蒸発散量	671	(63)	783	(73)	117
蒸発量	82	(8)	205	(19)	250
蒸散量	589	(55)	578	(54)	98
凝結量	0	(0)	0	(0)	
収支	47	(4)	50	(5)	106

表 21 現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較 (2001 年)

単位 MJ/m² かつこ内は正味放射に占める割合(%)

土地利用	現在		明治		明治/現在 (%)
正味放射量	2776	(100)	3011	(100)	108
潜熱輸送量	1710	(62)	2033	(68)	119
顕熱輸送量	997	(36)	931	(31)	93
地中熱流量	63	(2)	37	(1)	59
収支	6	(0)	10	(0)	167

表 22 現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較 (2002 年)

単位 MJ/m² かつこ内は正味放射に占める割合(%)

土地利用	現在		明治		明治/現在 (%)
正味放射量	2853	(100)	3082	(100)	108
潜熱輸送量	1640	(57)	1912	(62)	117
顕熱輸送量	1134	(40)	1114	(36)	98
地中熱流量	70	(2)	45	(1)	64
収支	9	(0)	11	(0)	122

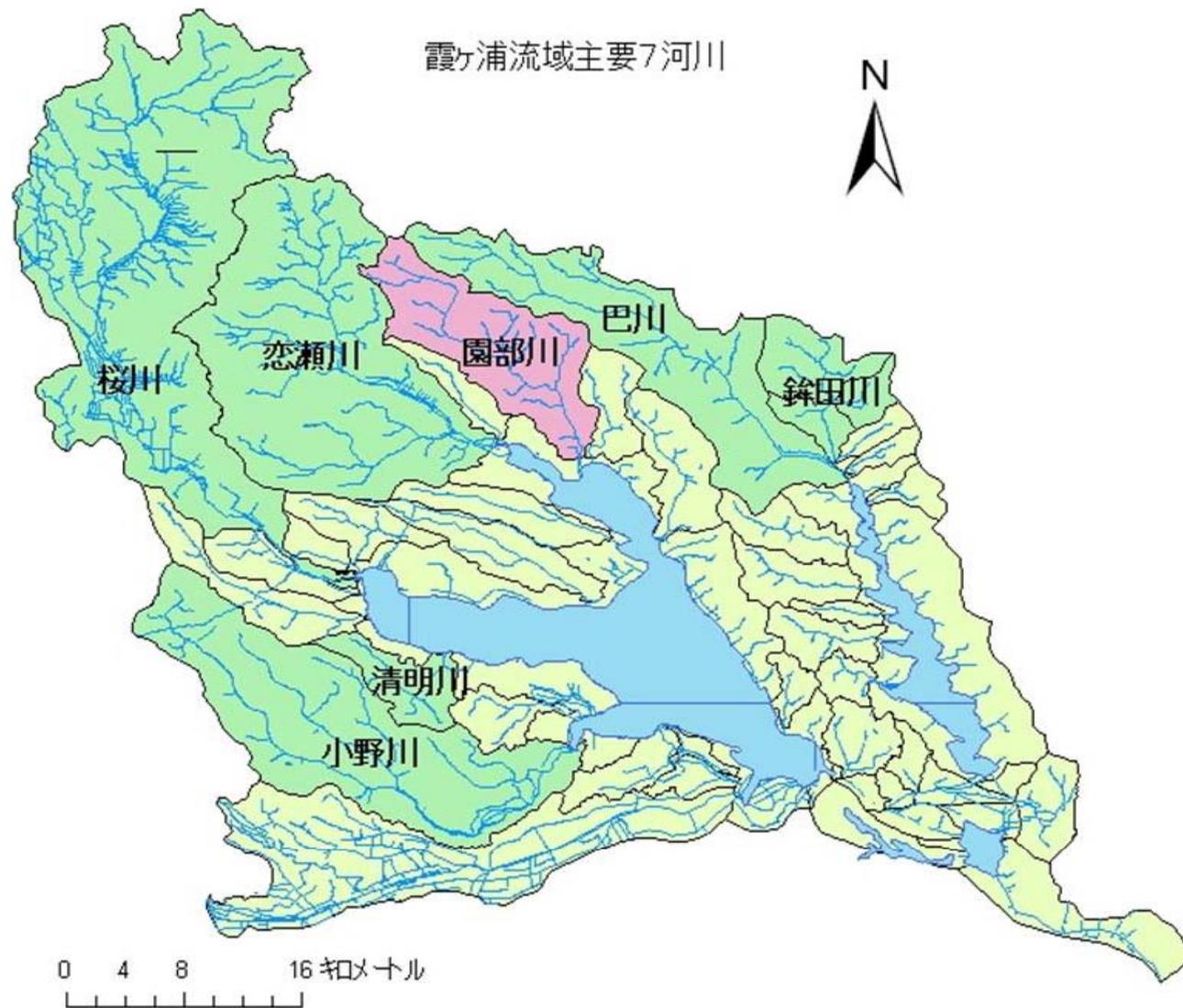


図1 園部川位置

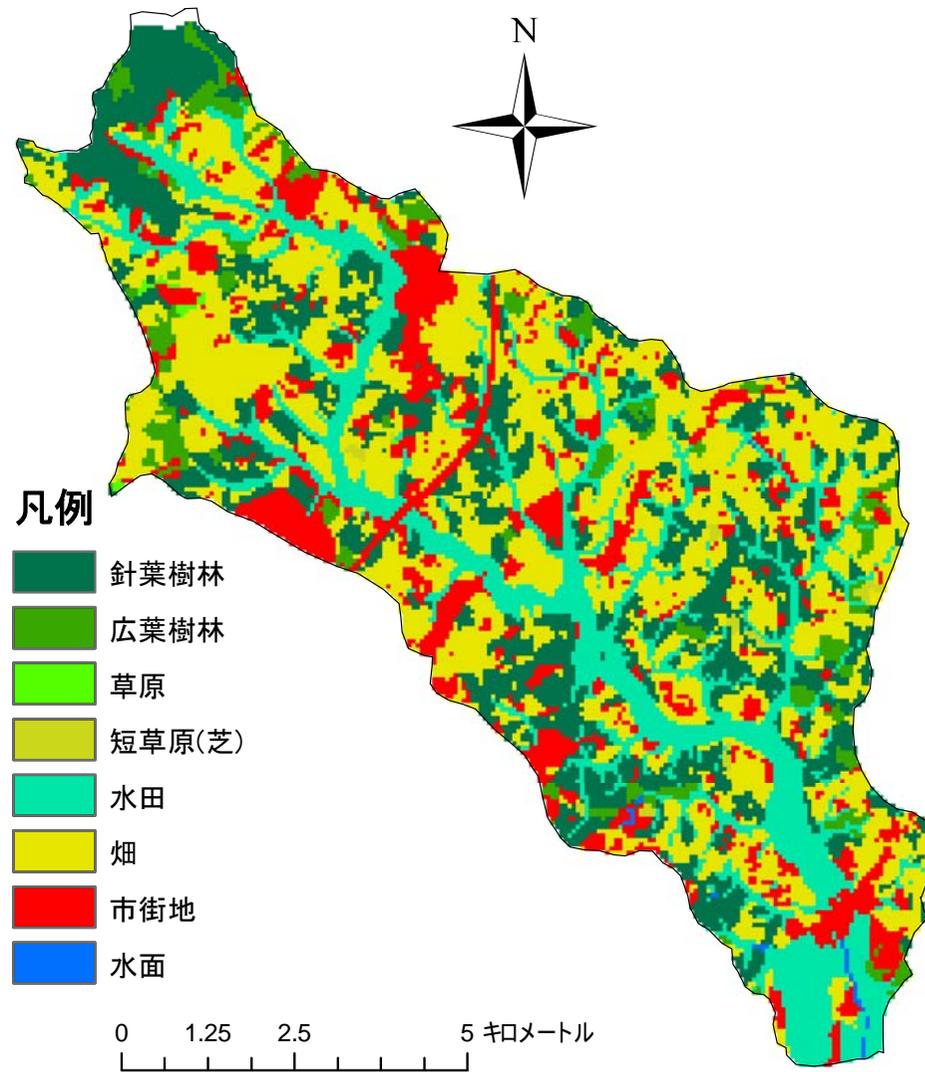


図2 現在の園部川流域土地利用図

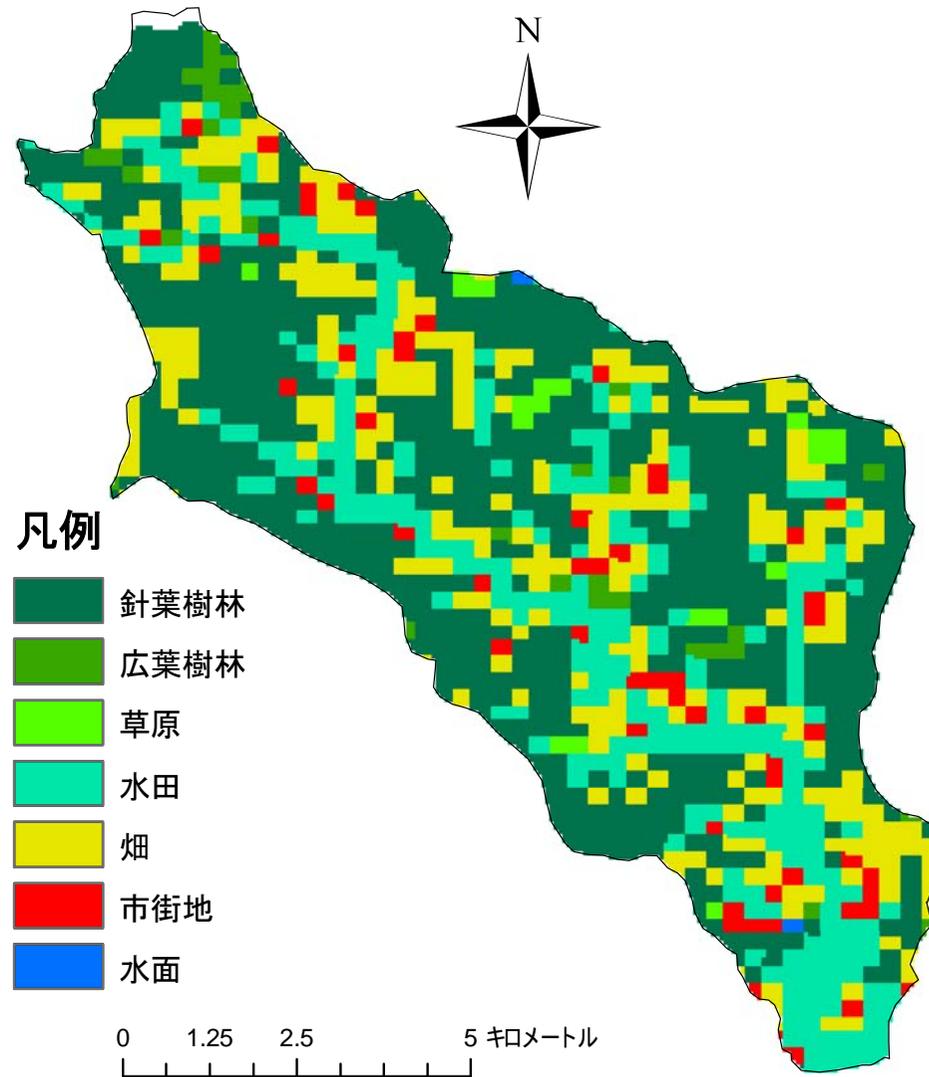


図3 明治期(1903年頃)の園部川流域土地利用図

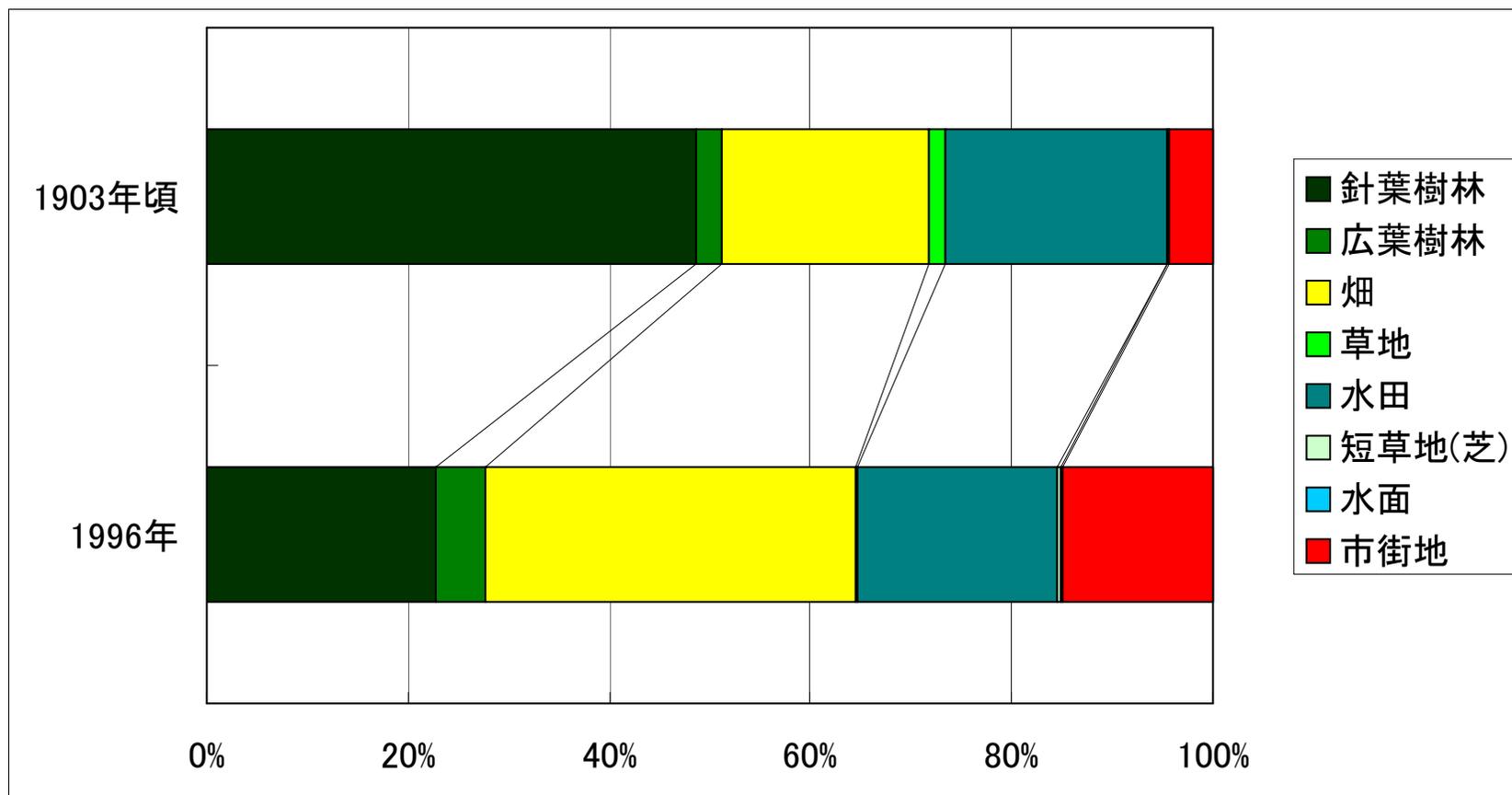


図4 園部川流域における土地利用区分割合の変化

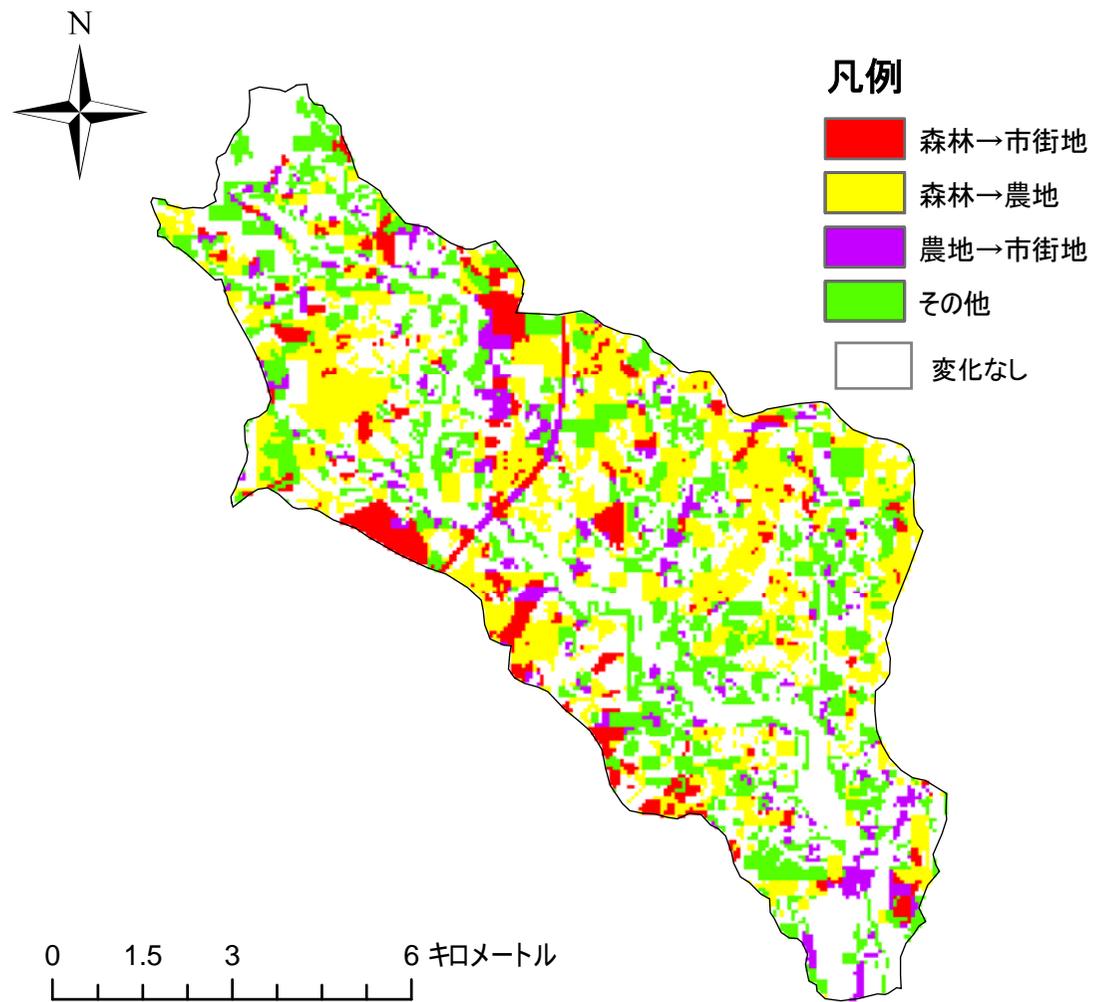
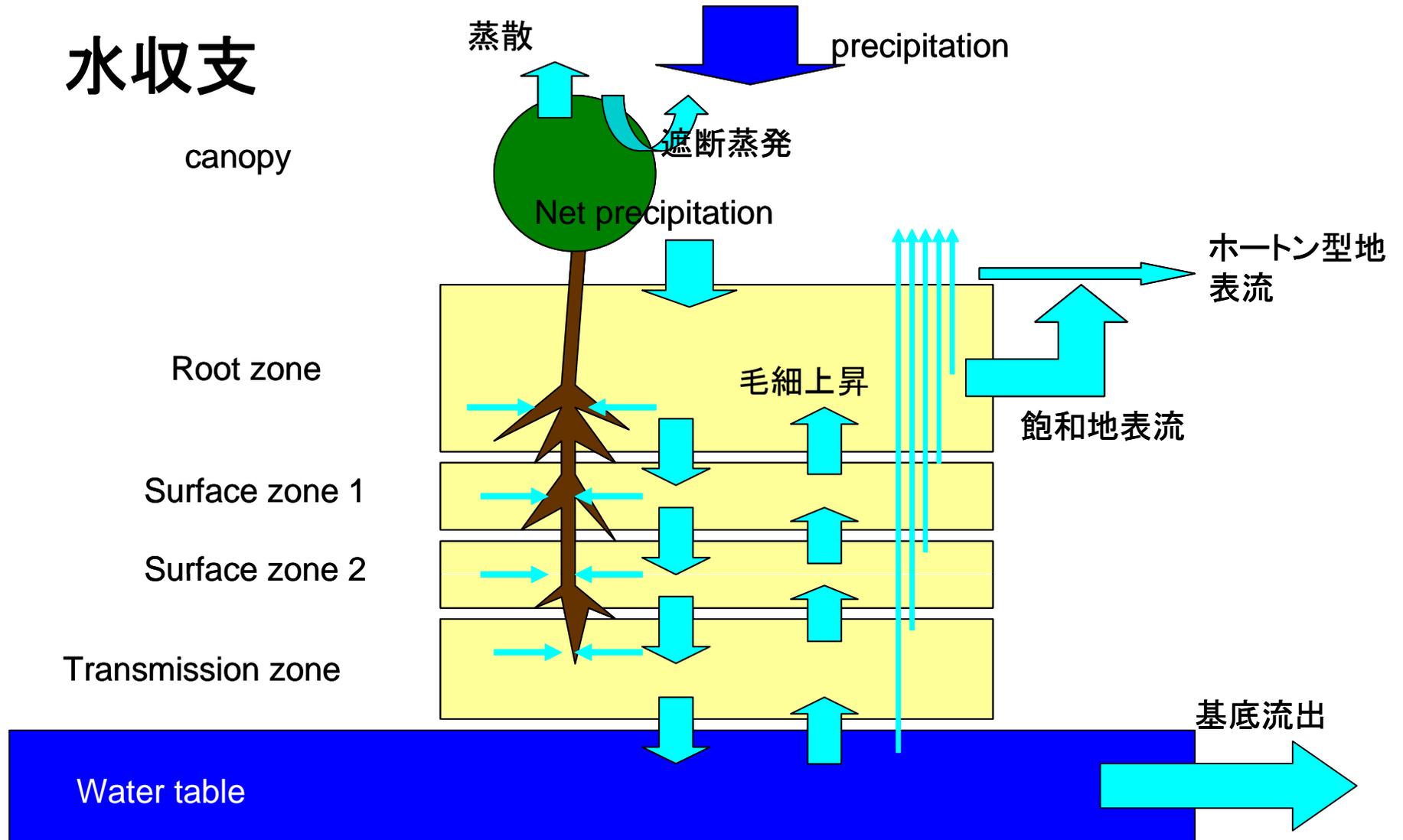


図5 土地利用変化の形態



図6 雨量観測点の位置とティーセン分割の結果

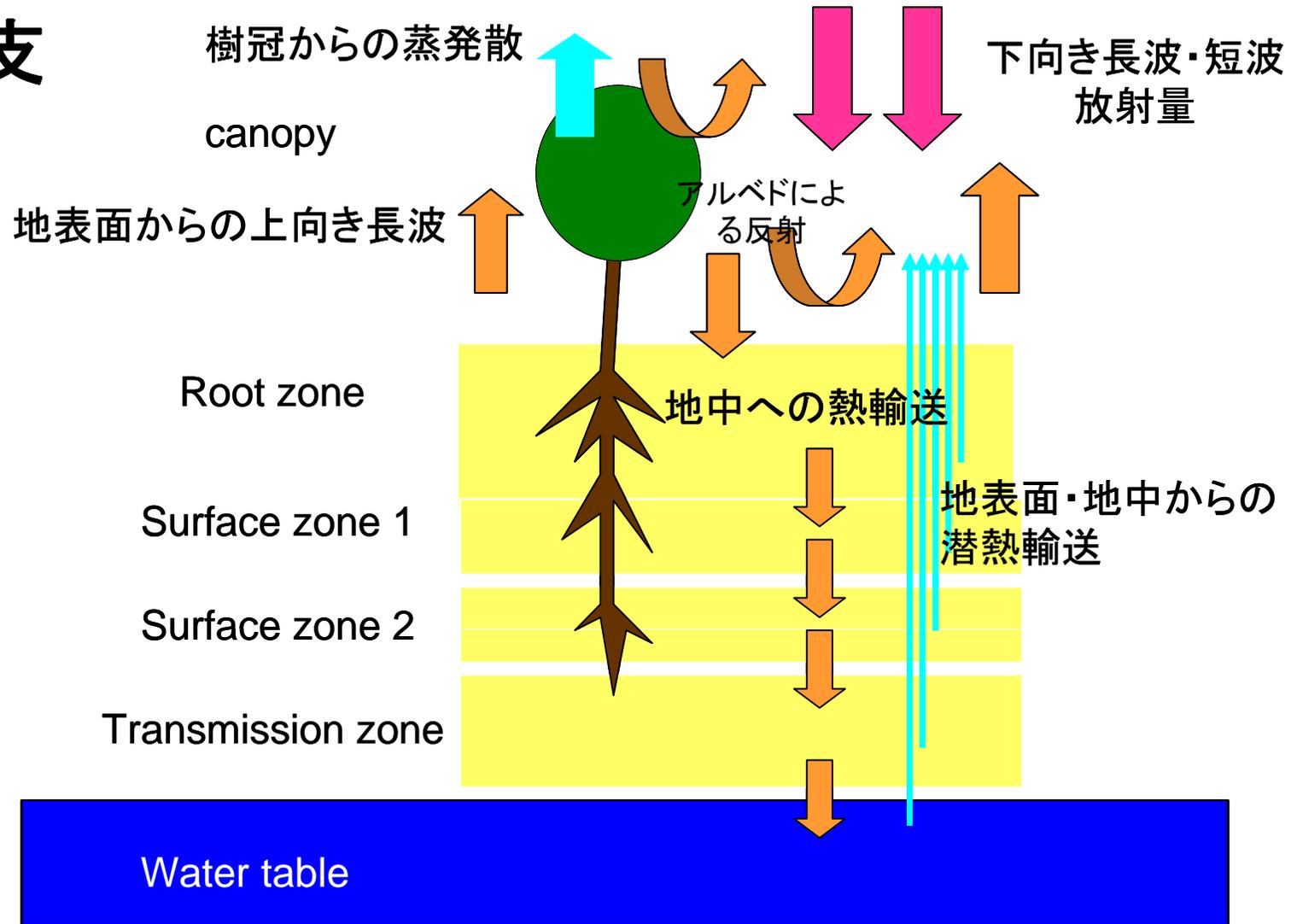
水収支



57

図7 TOPLATSの構造 (水収支)

熱収支



58

図8 TOPLATSの構造 (熱収支)

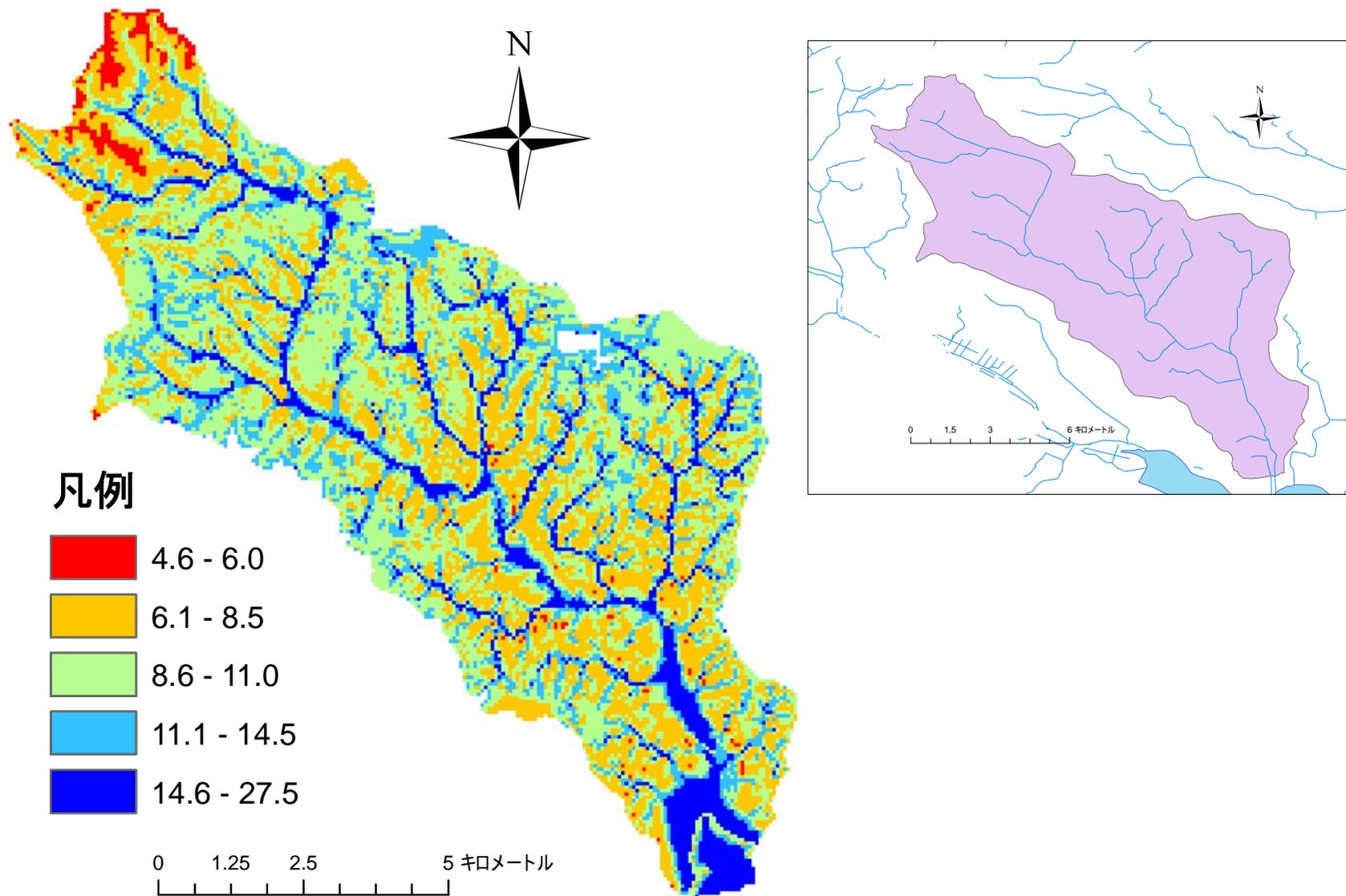


図9 園部川における地形指標の分布と河道の位置

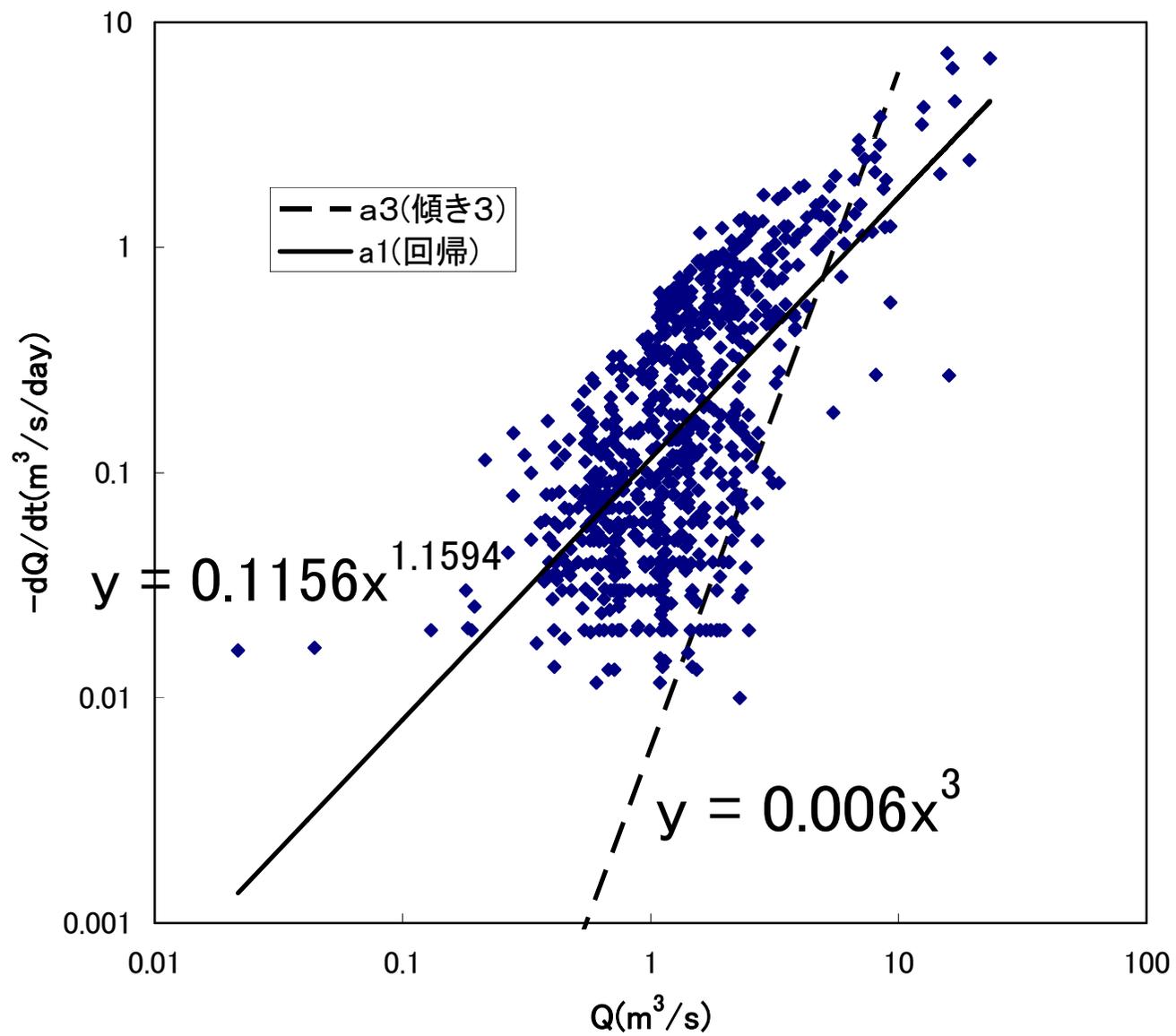


図10 降雨終了後の流量と流量減衰率

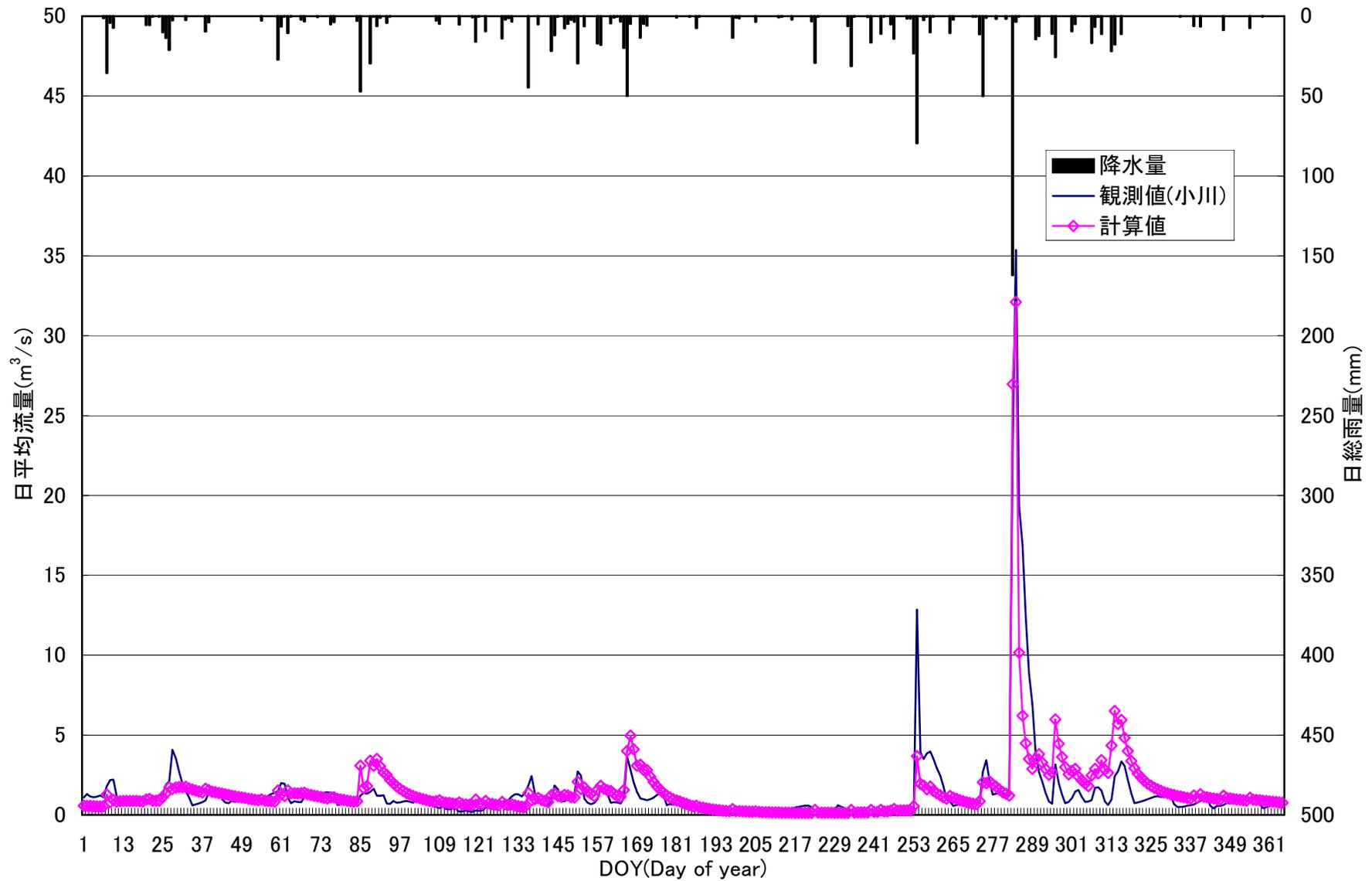


図11 日平均流量計算結果と実測値の比較 (2001年)

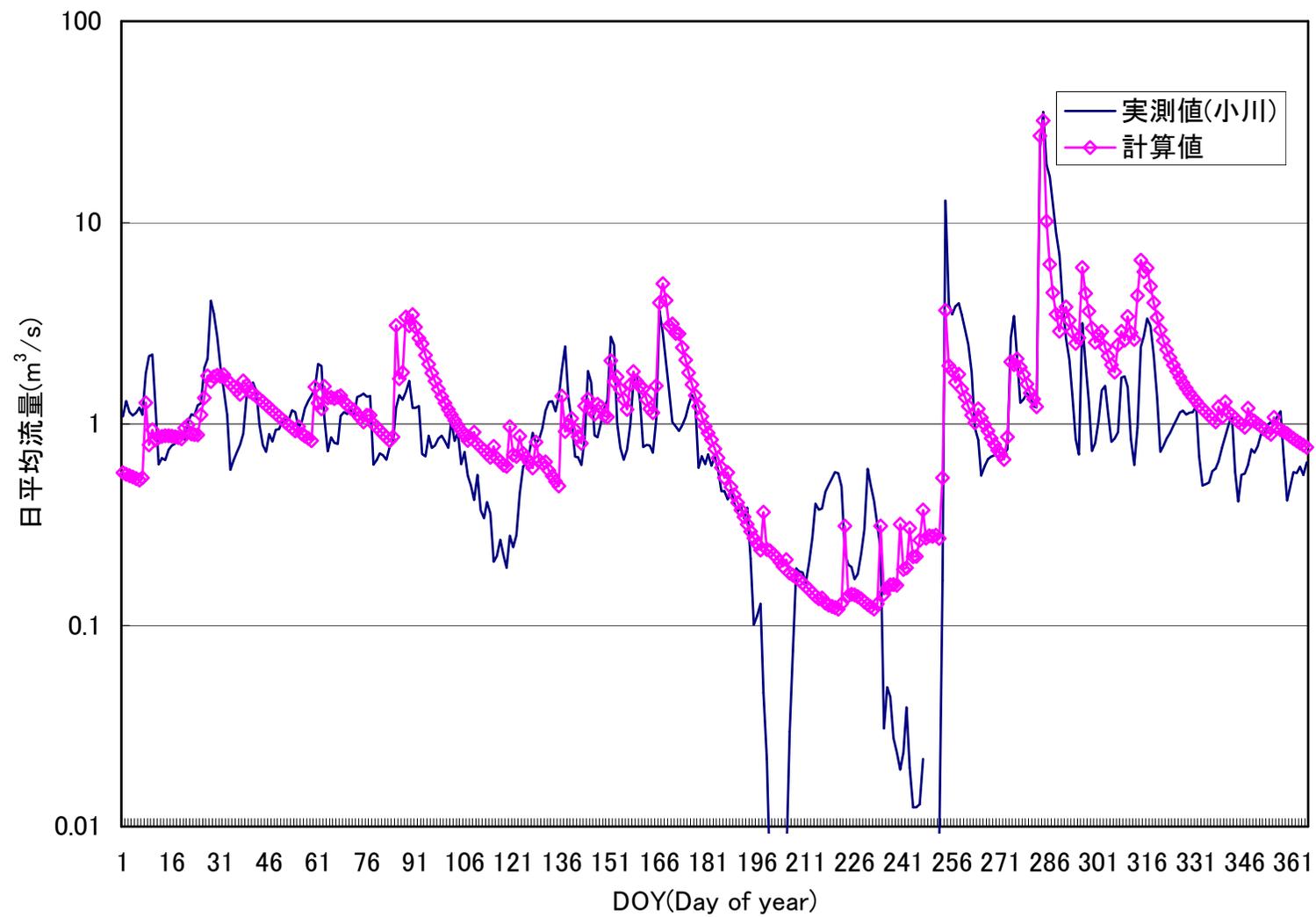


図12 日平均流量計算結果と実測値の比較 (2001年・対数)

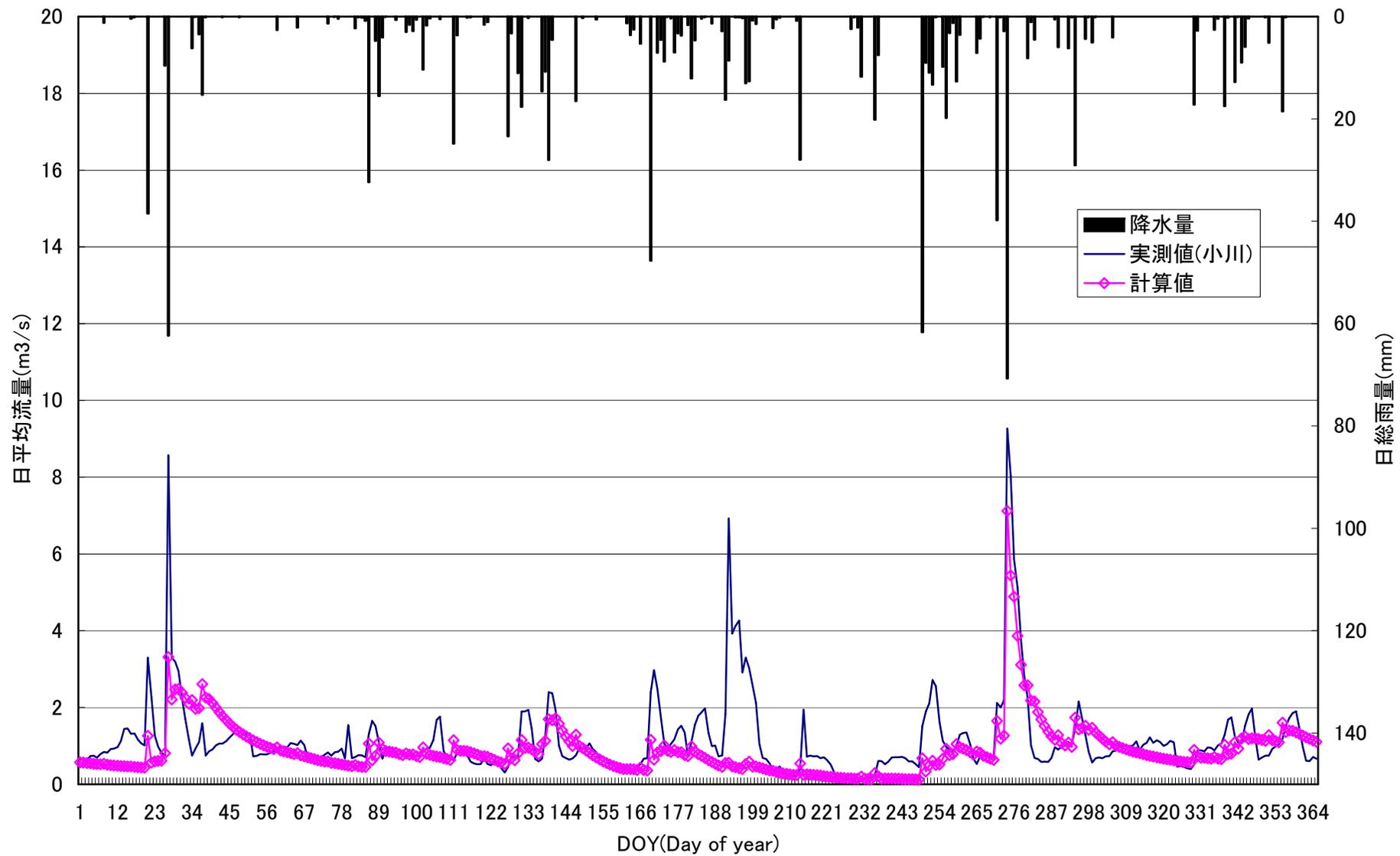


図13 日平均流量計算結果と実測値の比較 (2002年)

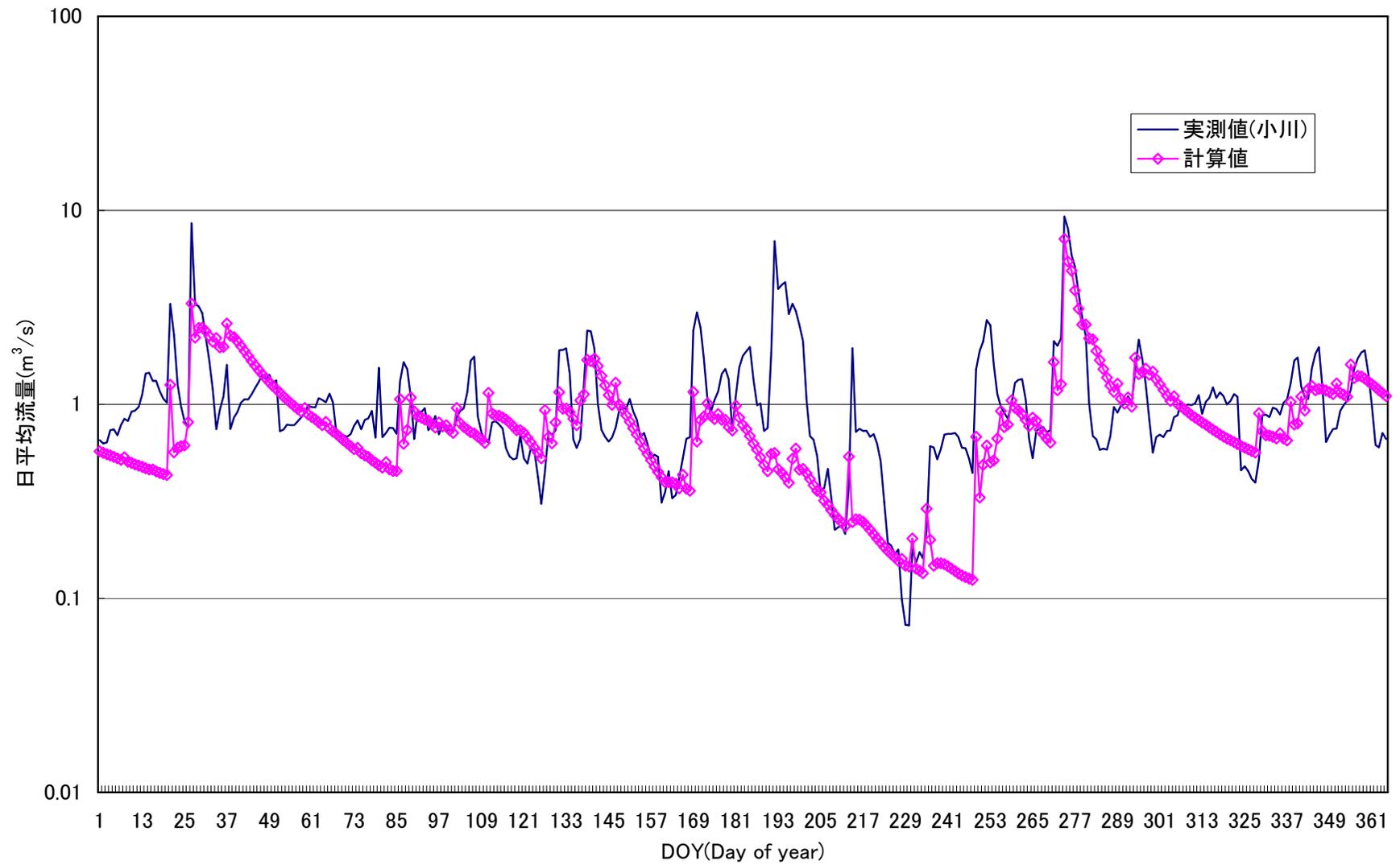


図14 日平均流量計算結果と実測値の比較 (2002年・対数)

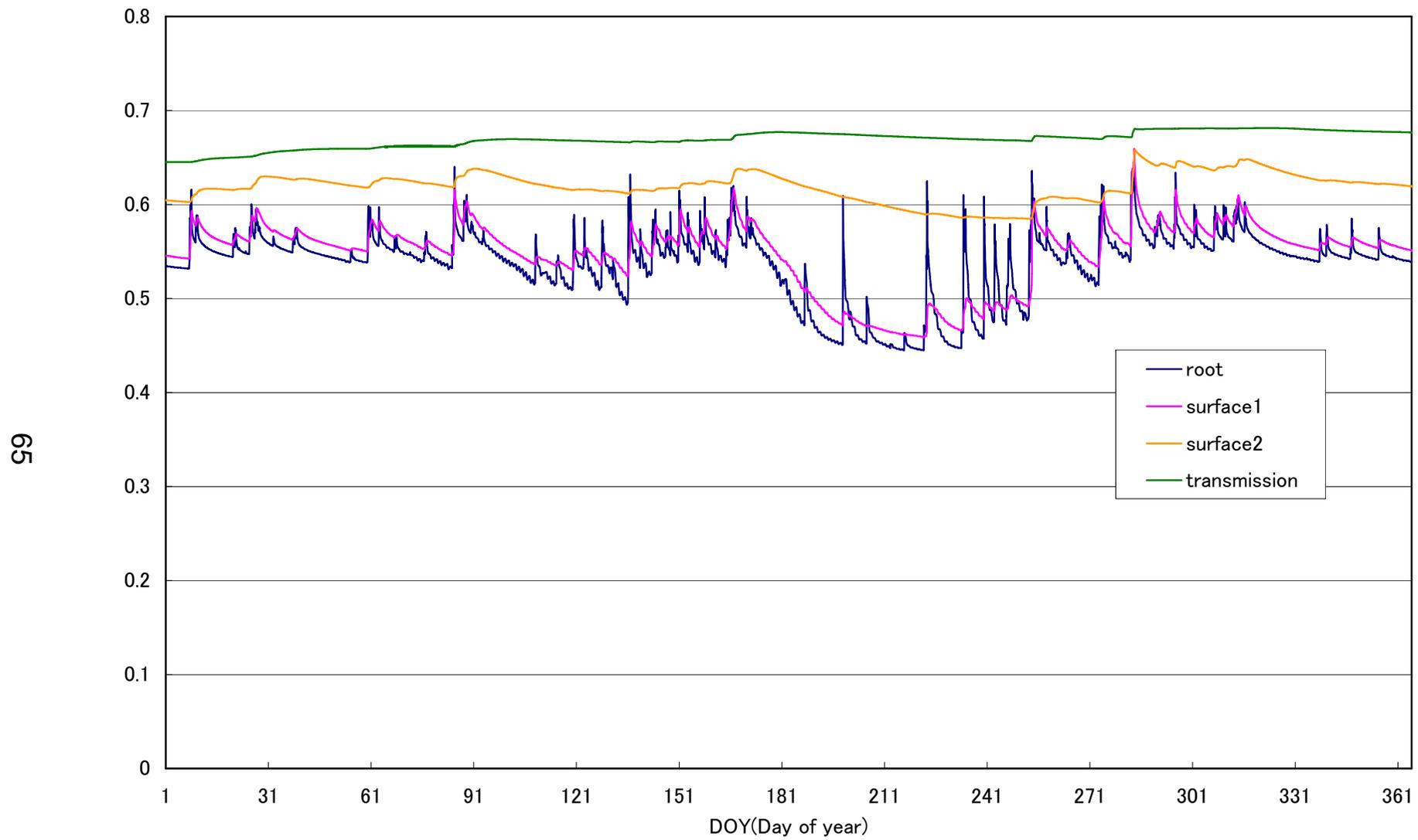


図15 各層の土壌水分計算結果 (2001年)

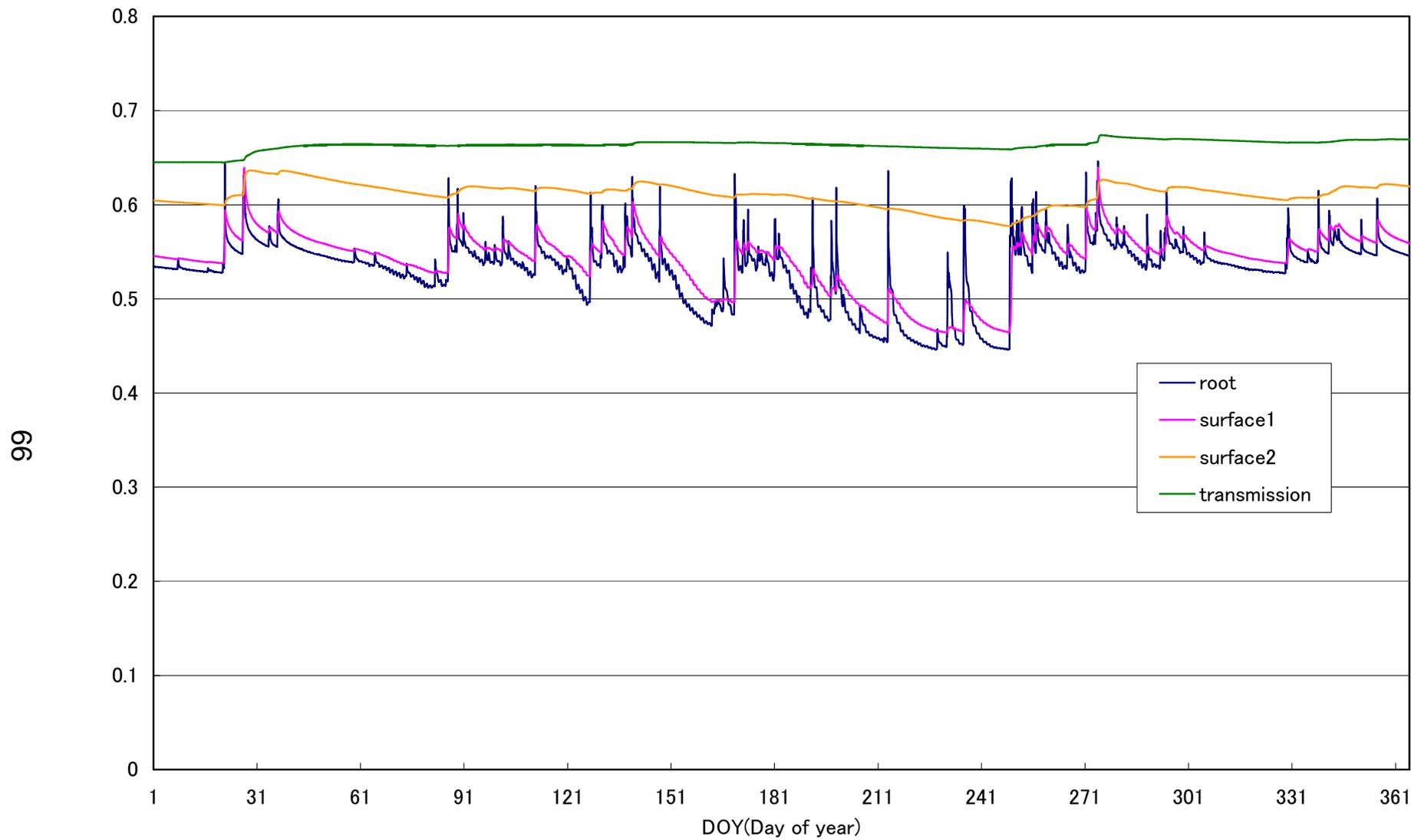


図16 各層の土壌水分計算結果 (2002年)

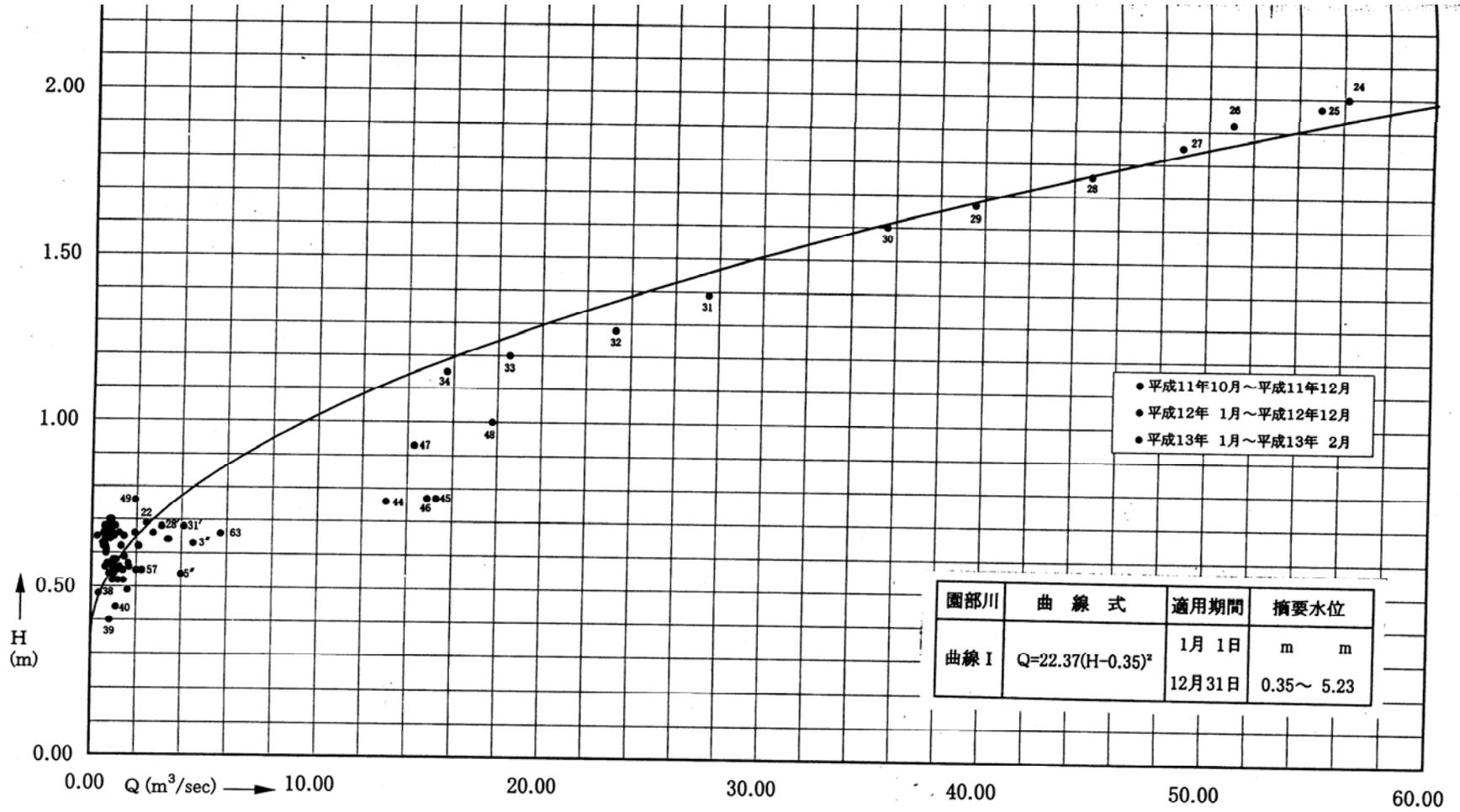


図17 水位流量曲線図 (霞ヶ浦工事事務所, 2000より)

89

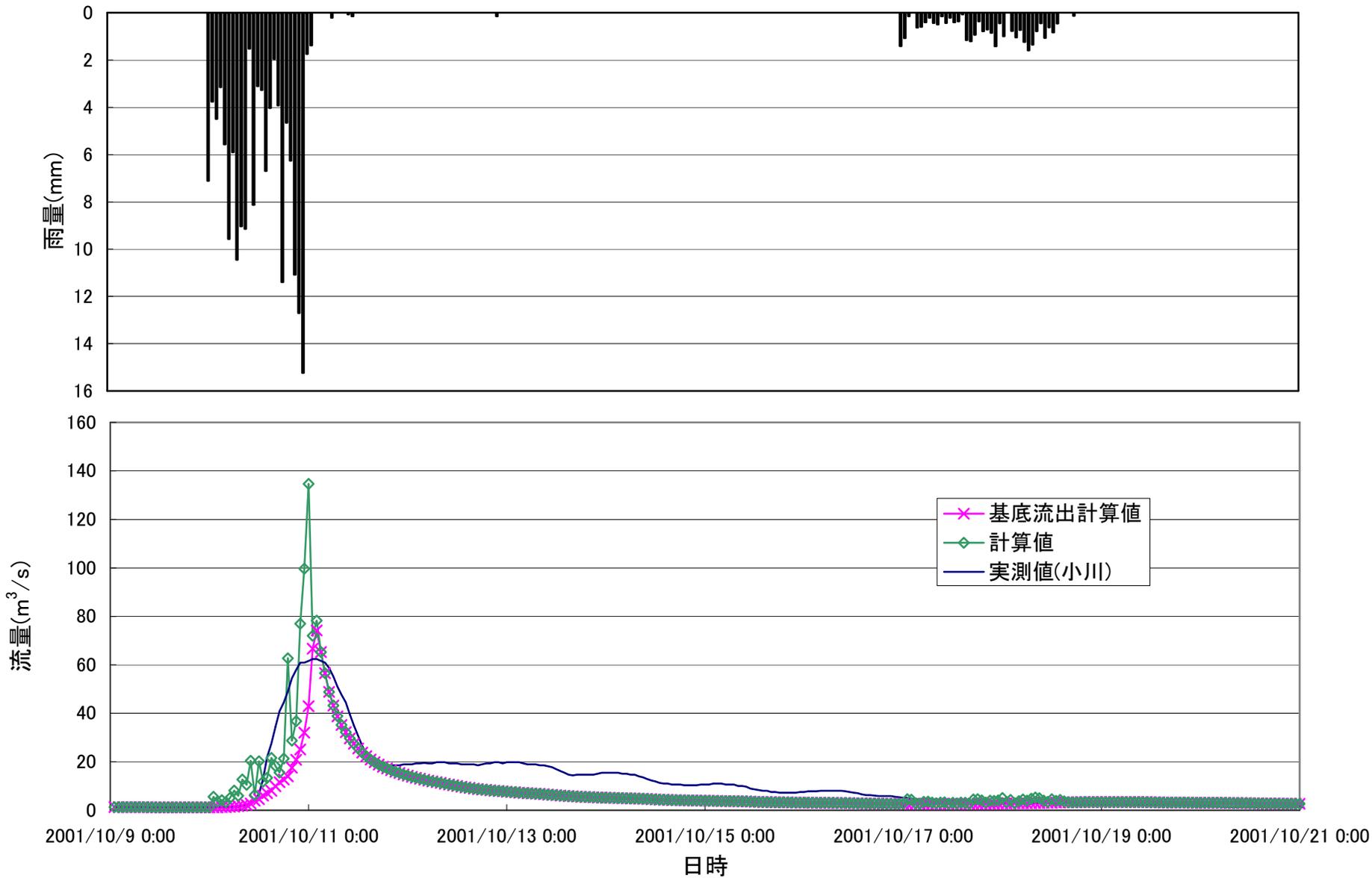


図18 短期流出の比較(2001年10月9日0:00~10月21日0:00,総雨量192.9mm)

69

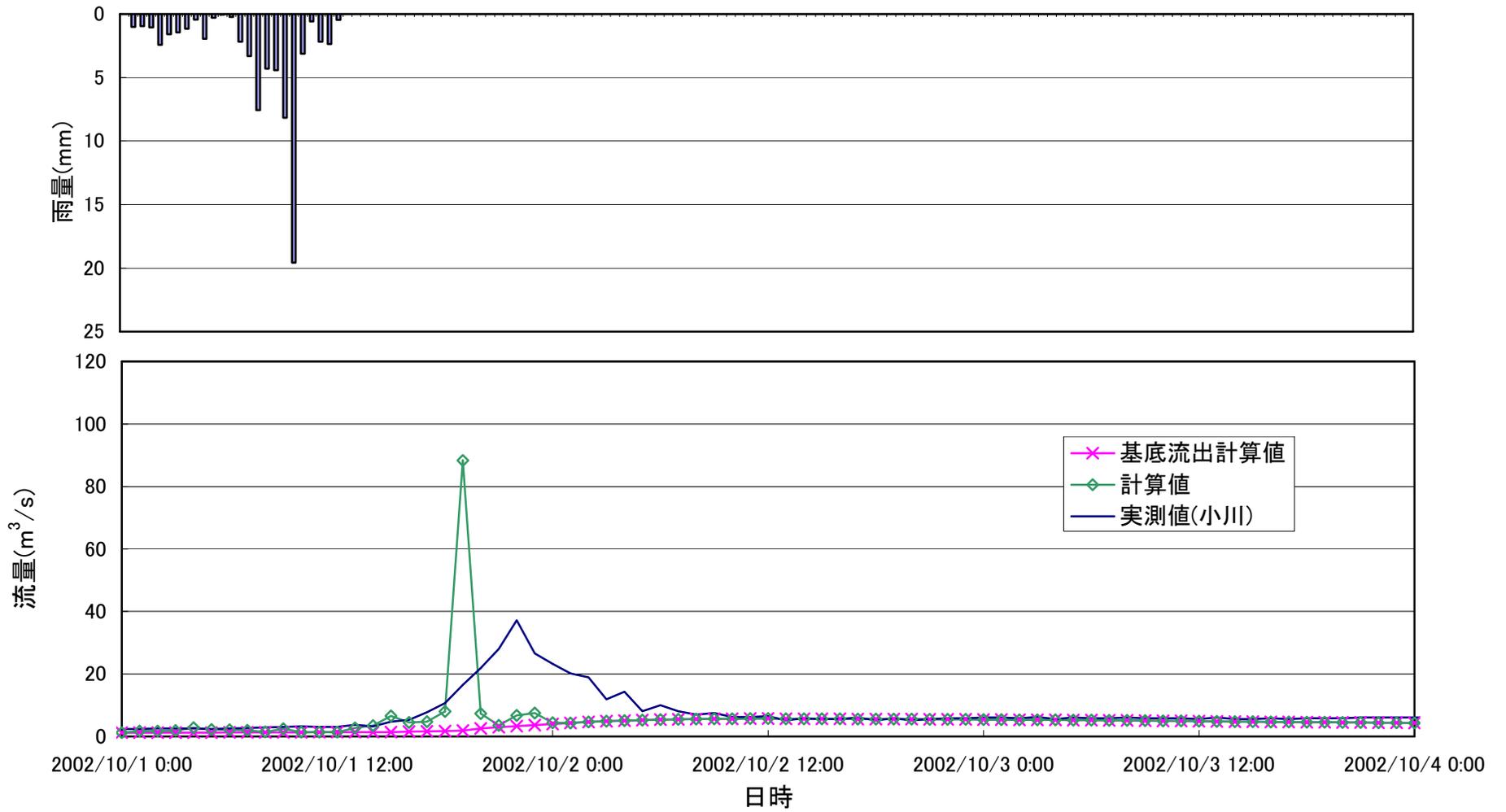


図19 短期流出の比較(2002年10月1日0:00~10月4日0:00,総雨量70.7mm)

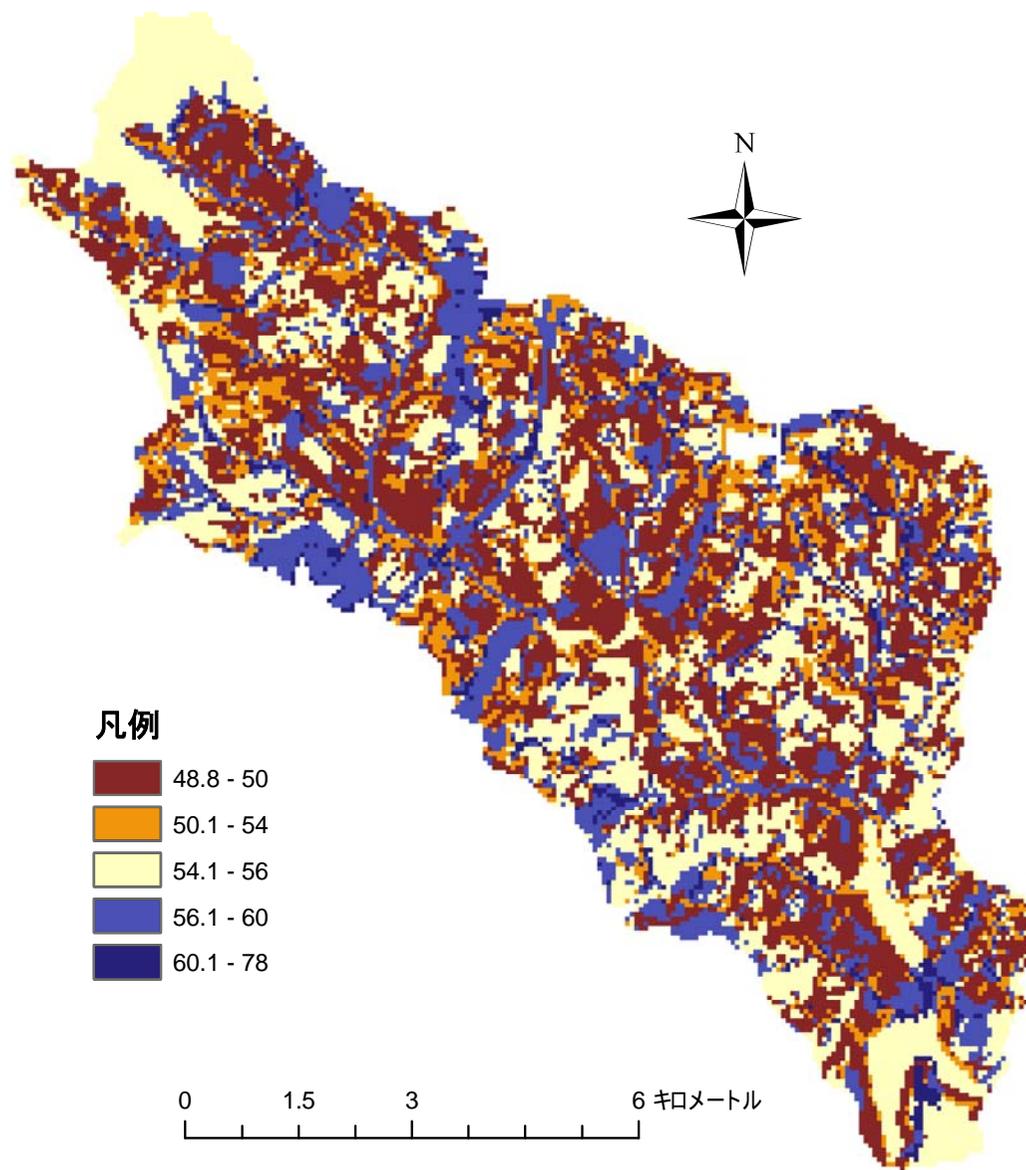


図20 土壤水分分布計算結果 (2001年平均 単位%)

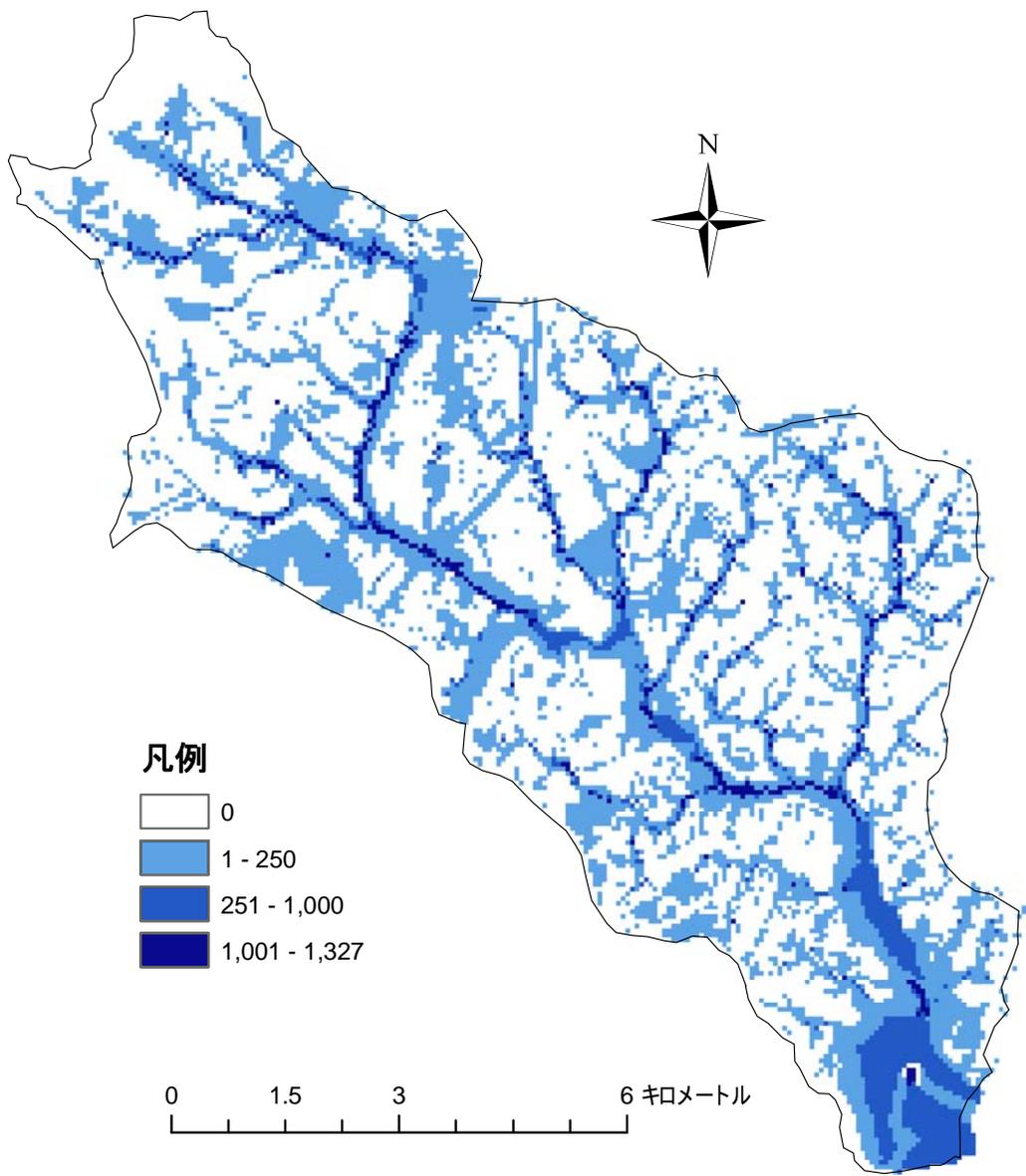


図21 表面流出分布計算結果(2001年積算 単位mm)

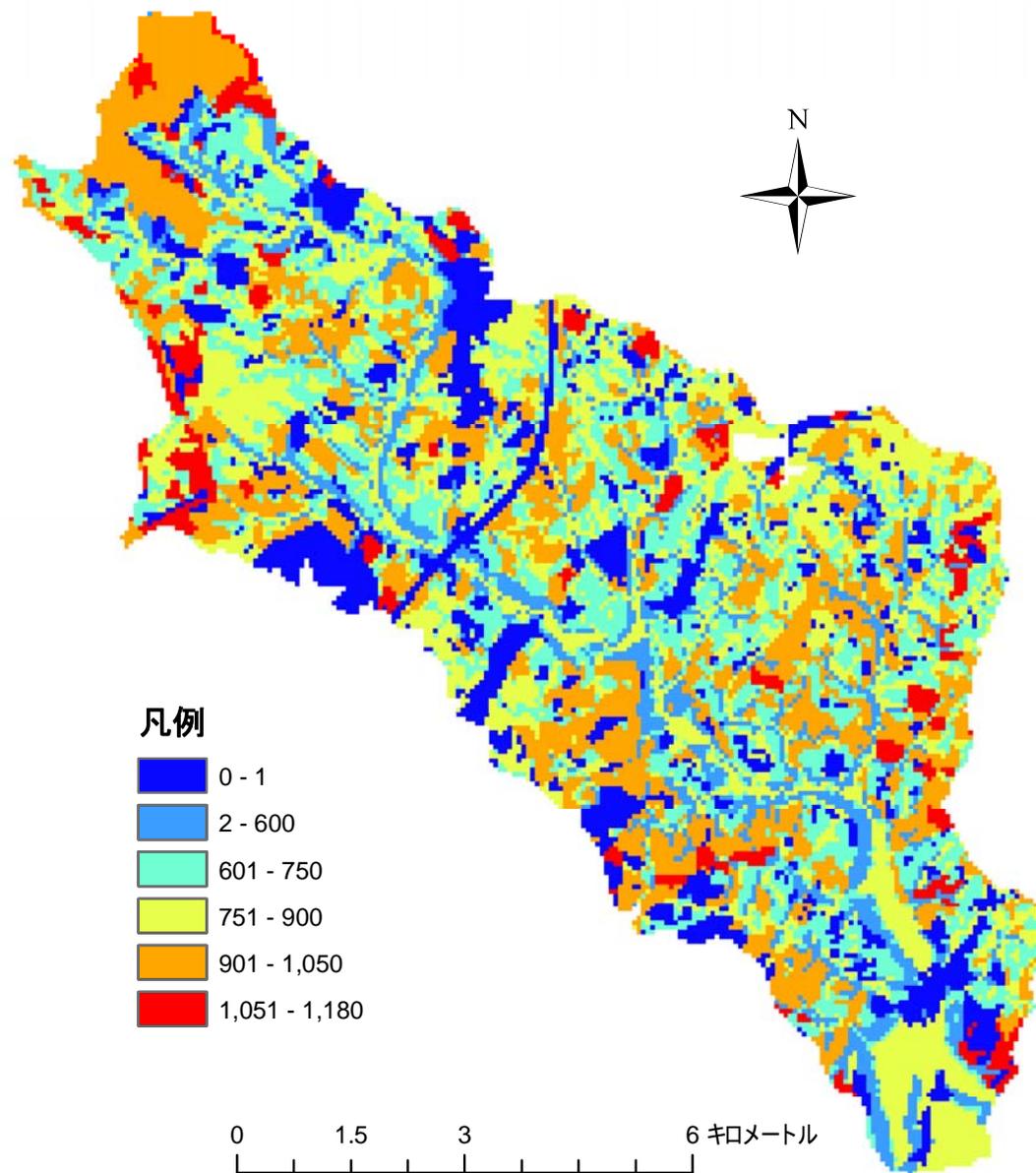


図22 蒸発散量分布計算結果(2001年積算 単位mm)

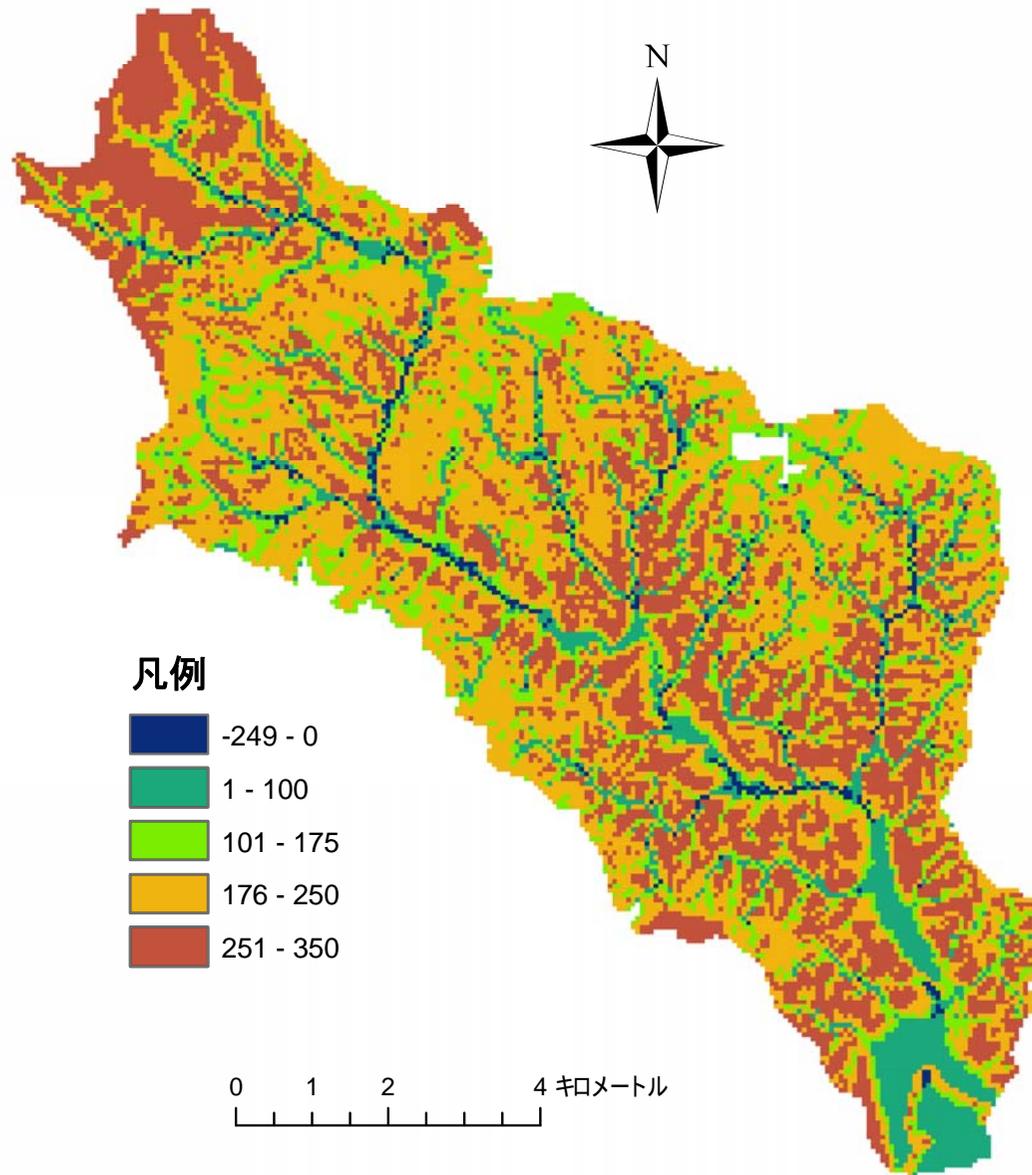


図23 地下水面までの深さ分布計算結果(2001年平均 単位cm)
負の値は地下水面が地表面よりも上に計算されたことを示す

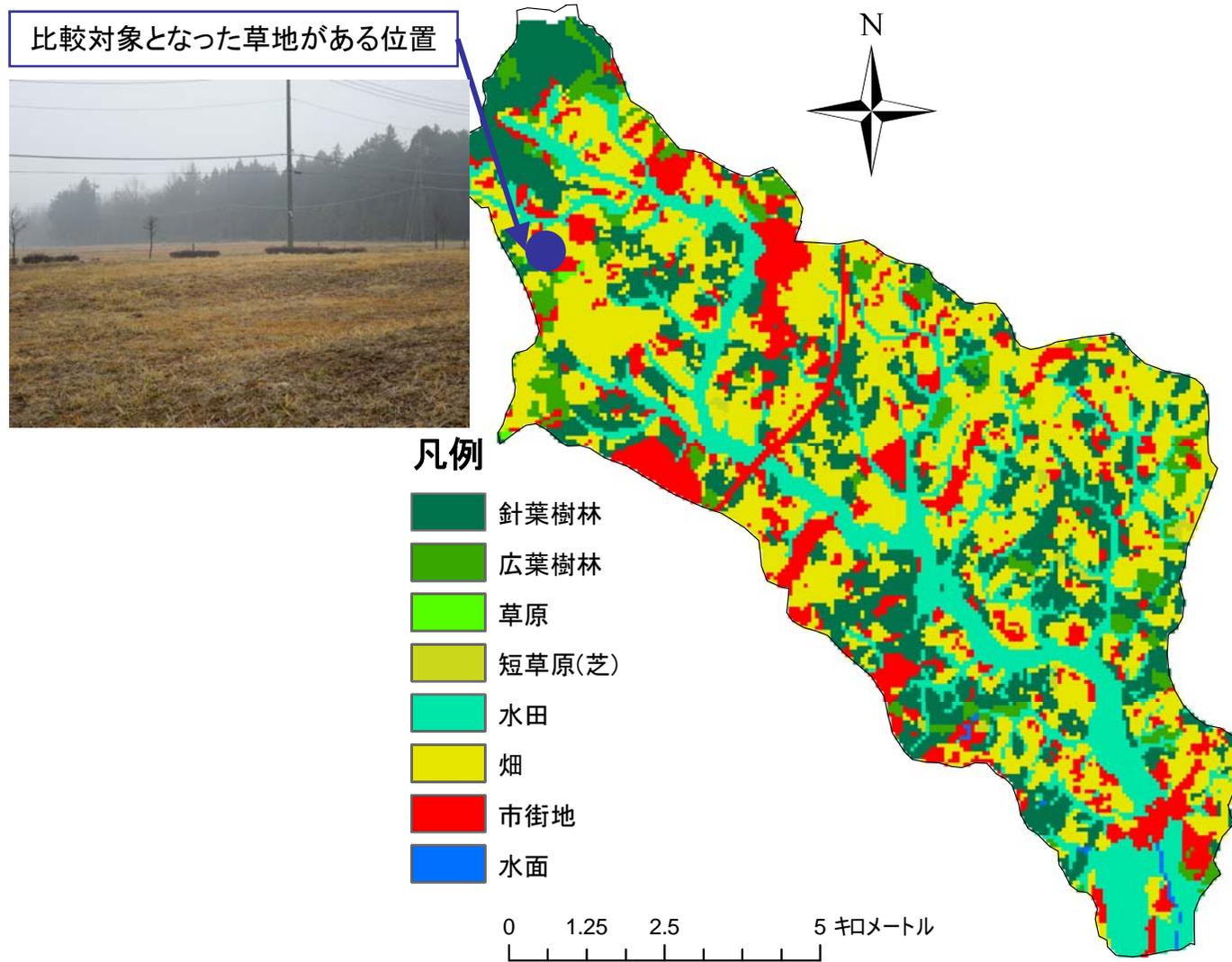


図24 実測値との比較対象になった地点

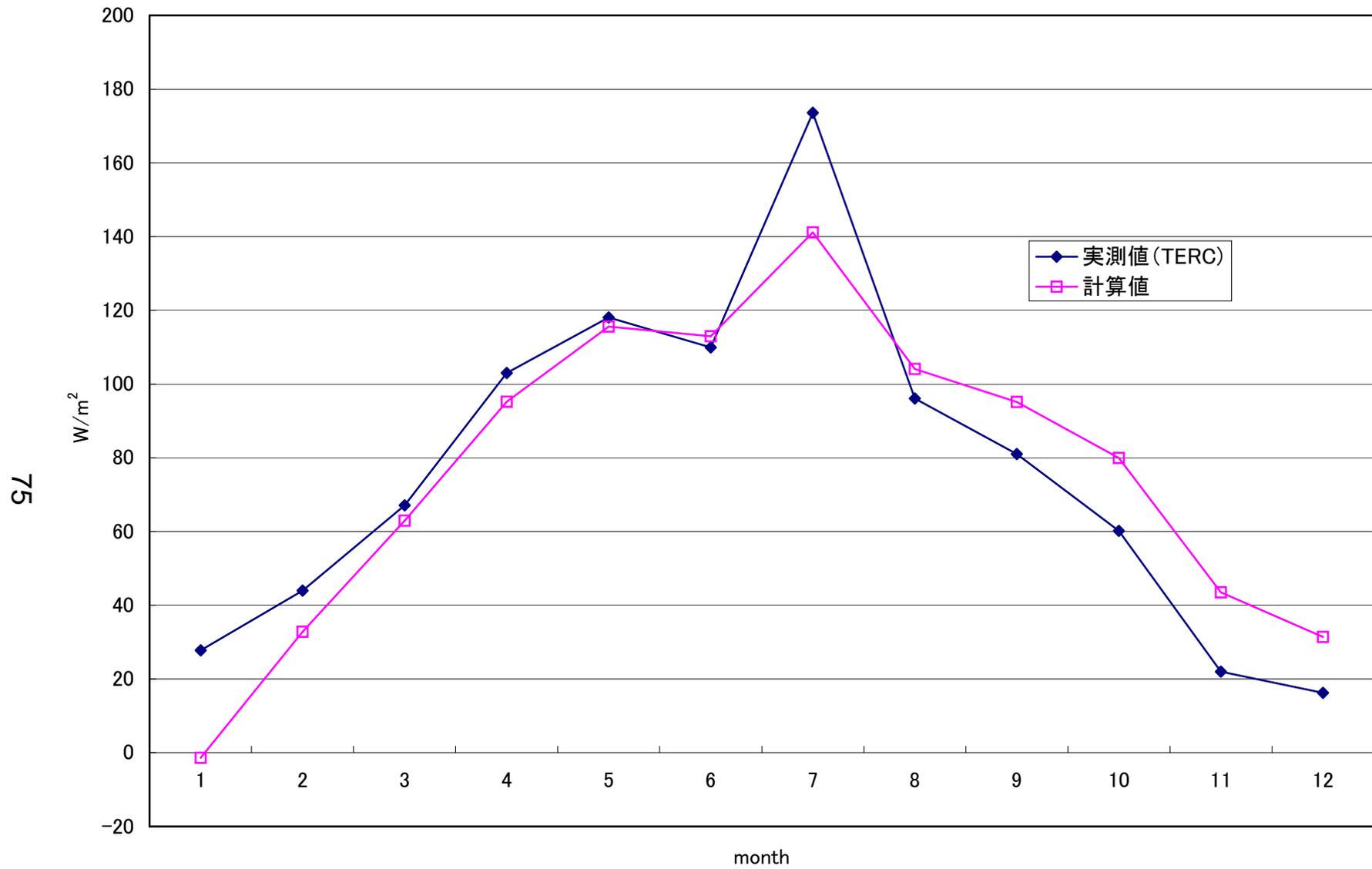


図25 月別正味放射計算結果と実測値の比較 (2001年)
 値は月平均値 (TERC:筑波大学陸域環境研究センター)

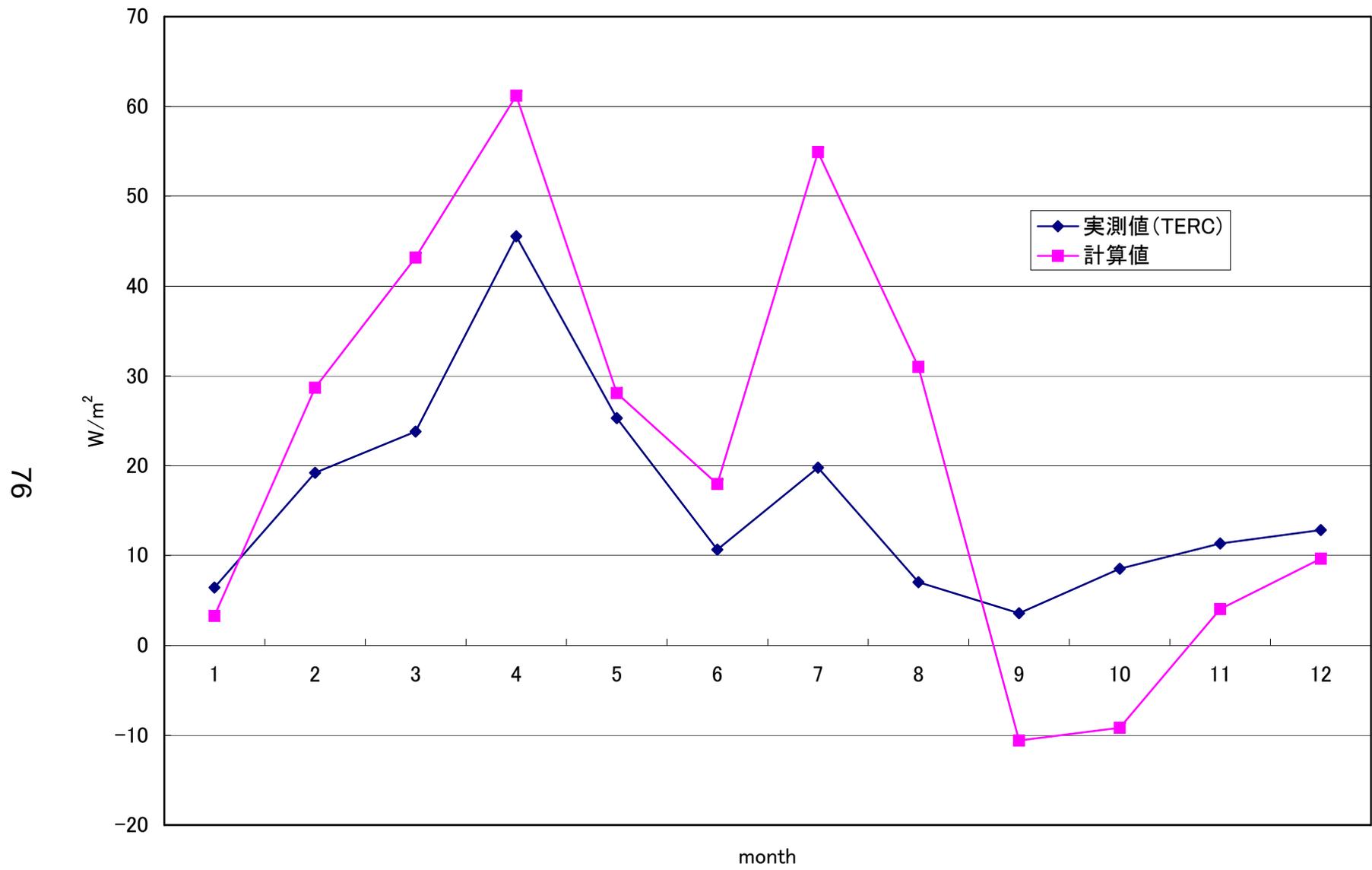


図26 月別顕熱計算結果と実測値の比較 (2001年)

値は月平均値

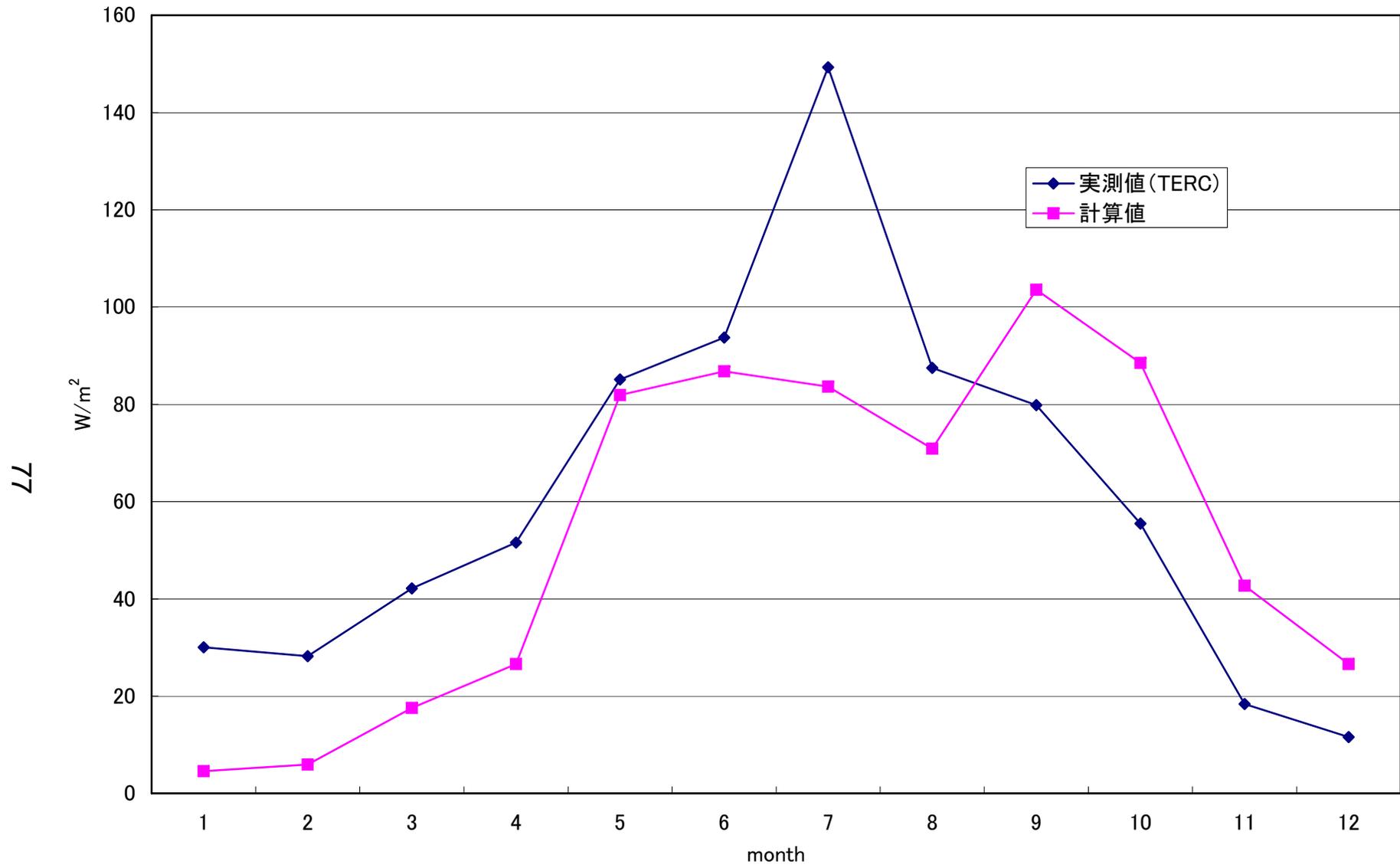


図27 月別潜熱計算結果と実測値の比較 (2001年)

値は月平均値

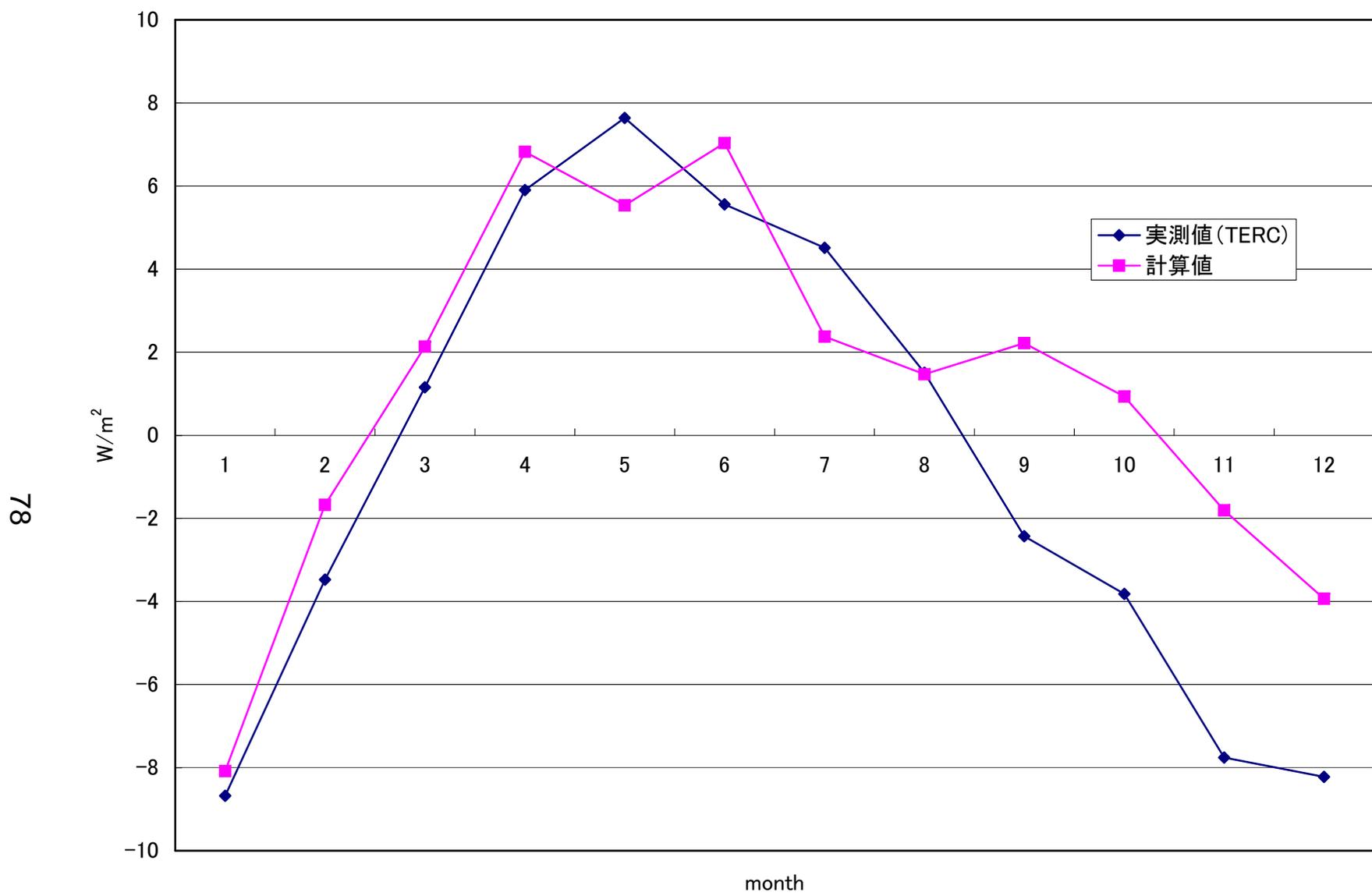


図28 2001年月別地中熱流量計算結果と実測値の比較
 値は月平均値

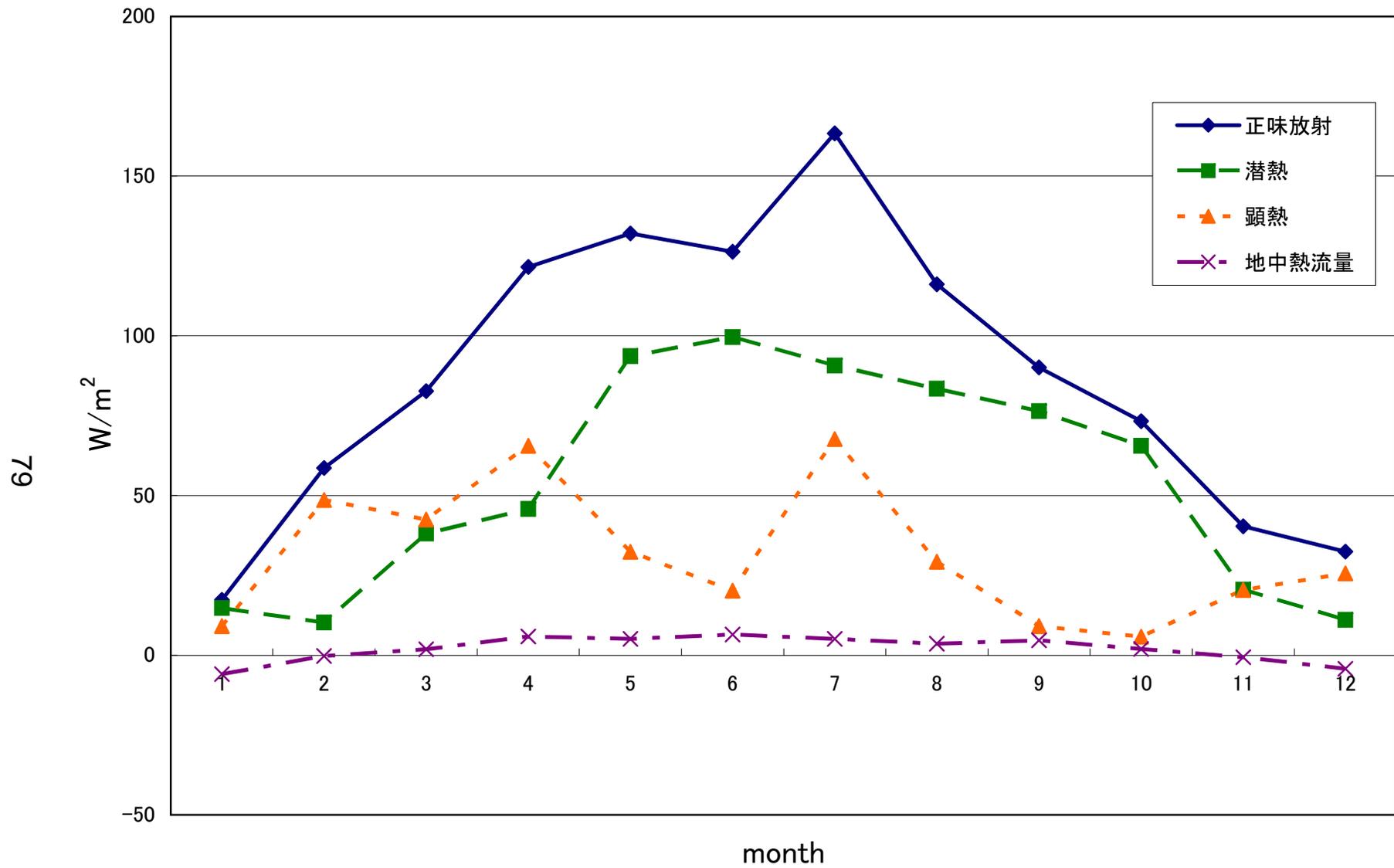


図29 流域平均月別熱収支計算結果 (2001年)

値は月平均値

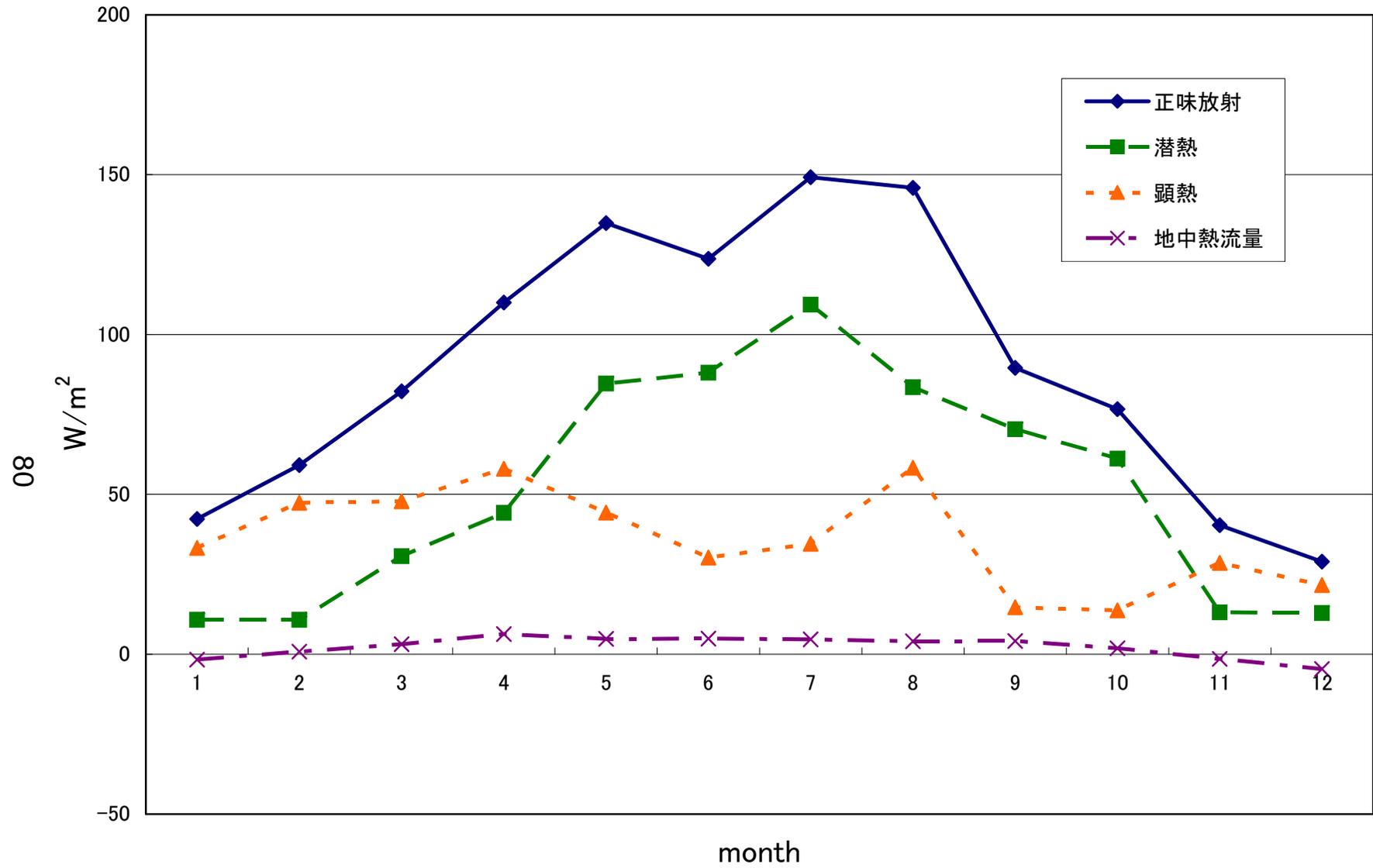


図30 流域平均月別熱収支計算結果 (2002年)

値は月平均値

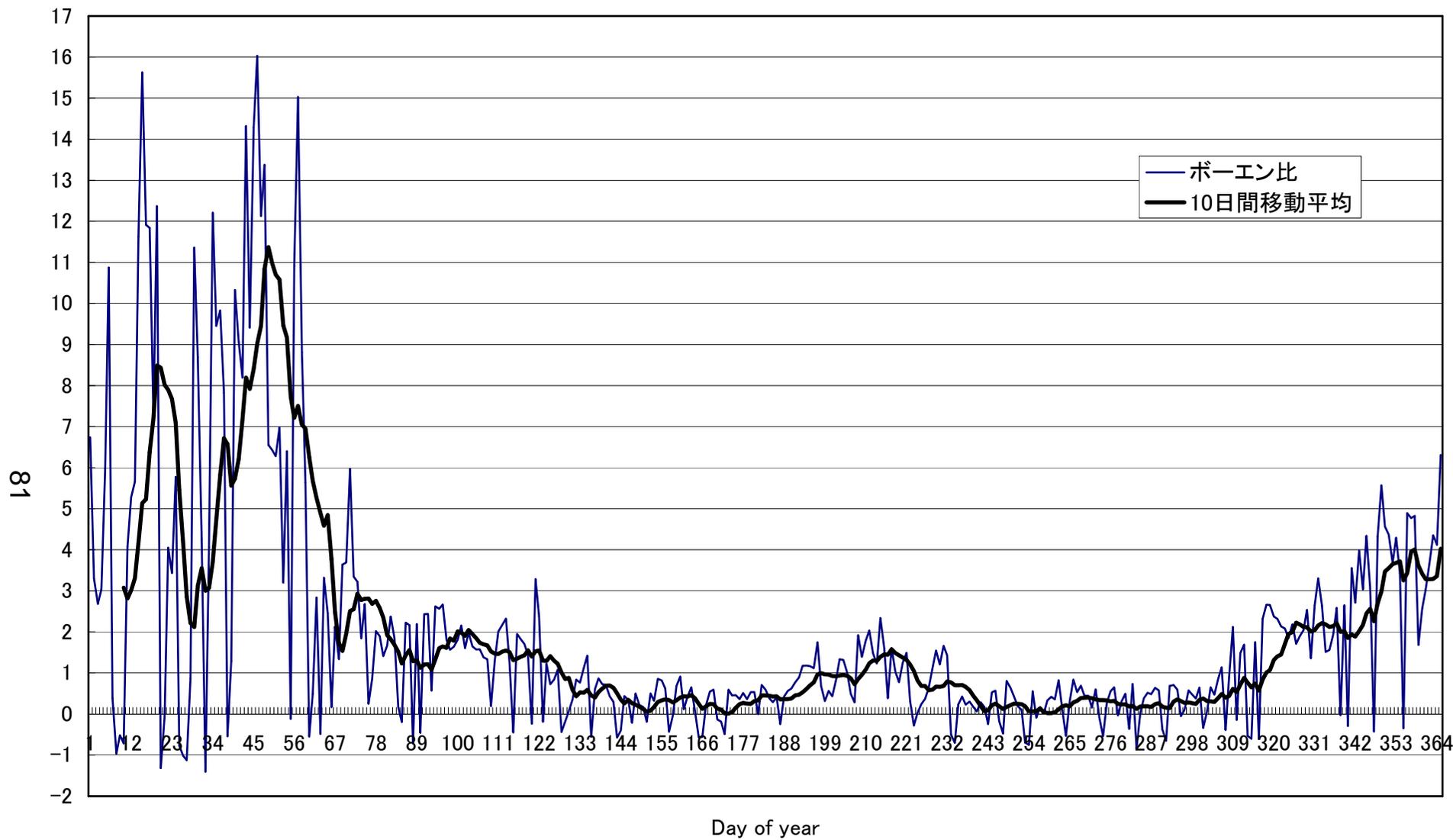


図31 ボーエン比計算結果 (2001年)

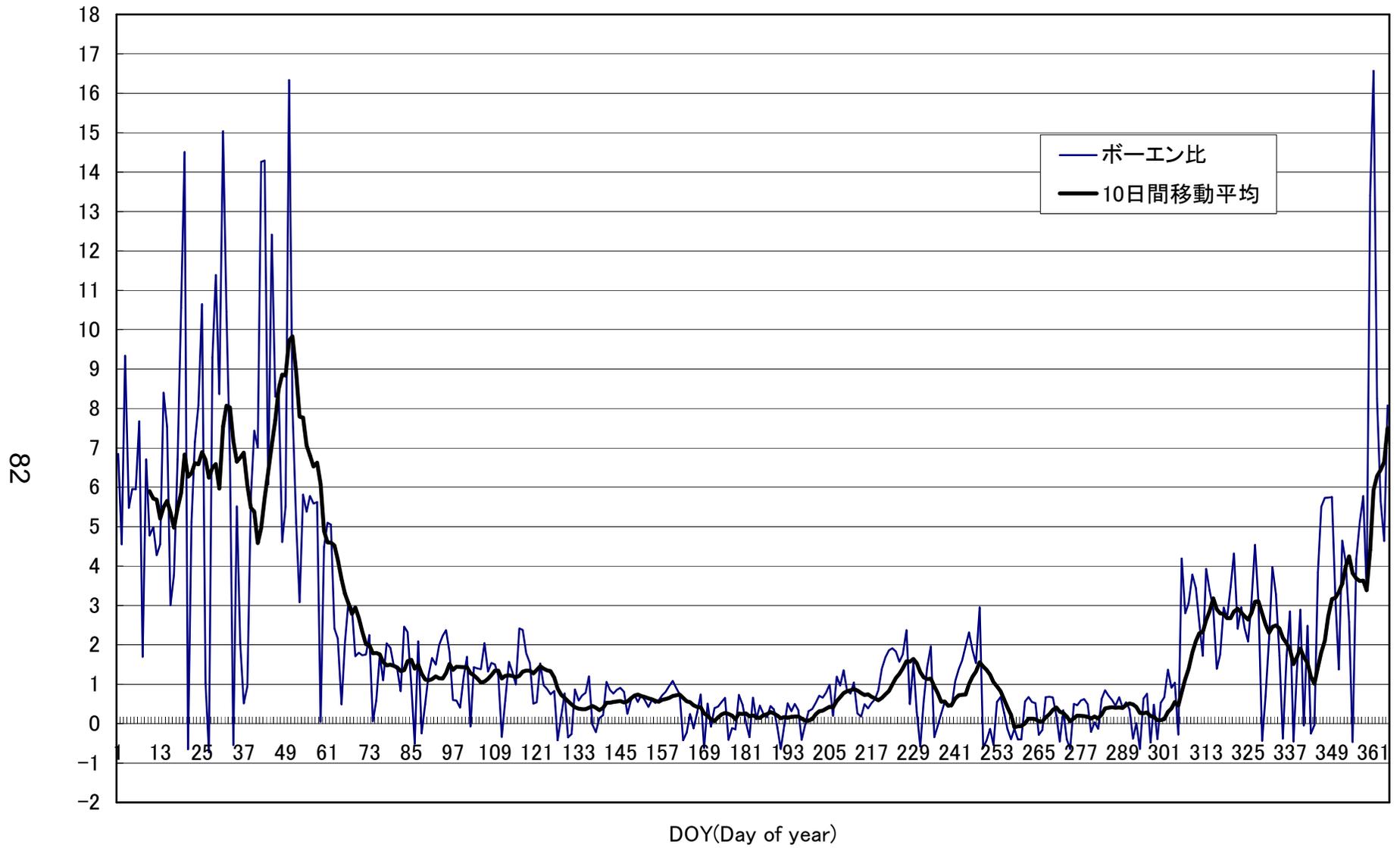


図32 ボーエン比計算結果 (2002年)

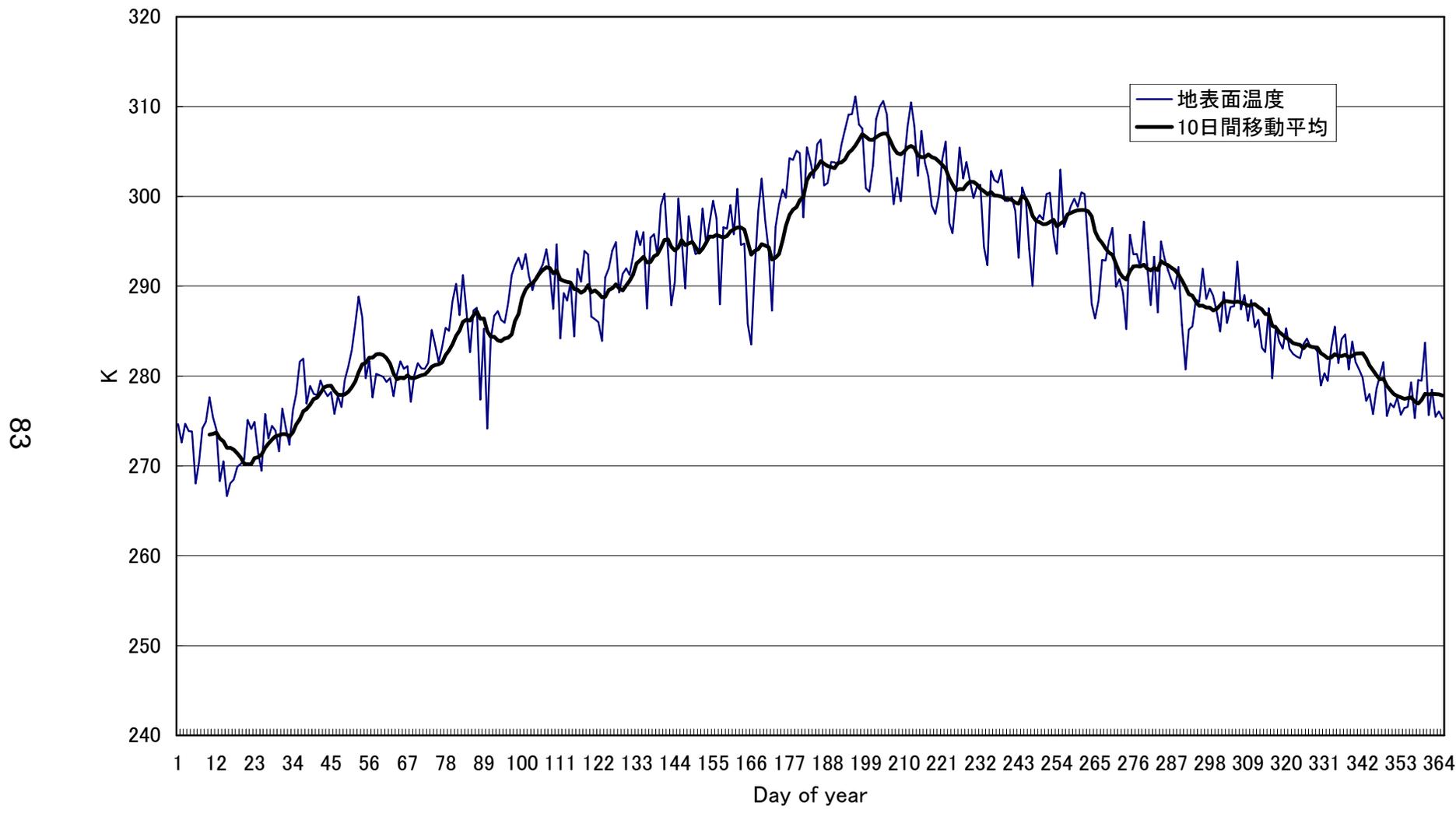


図33 地表面温度計算結果 (2001年)

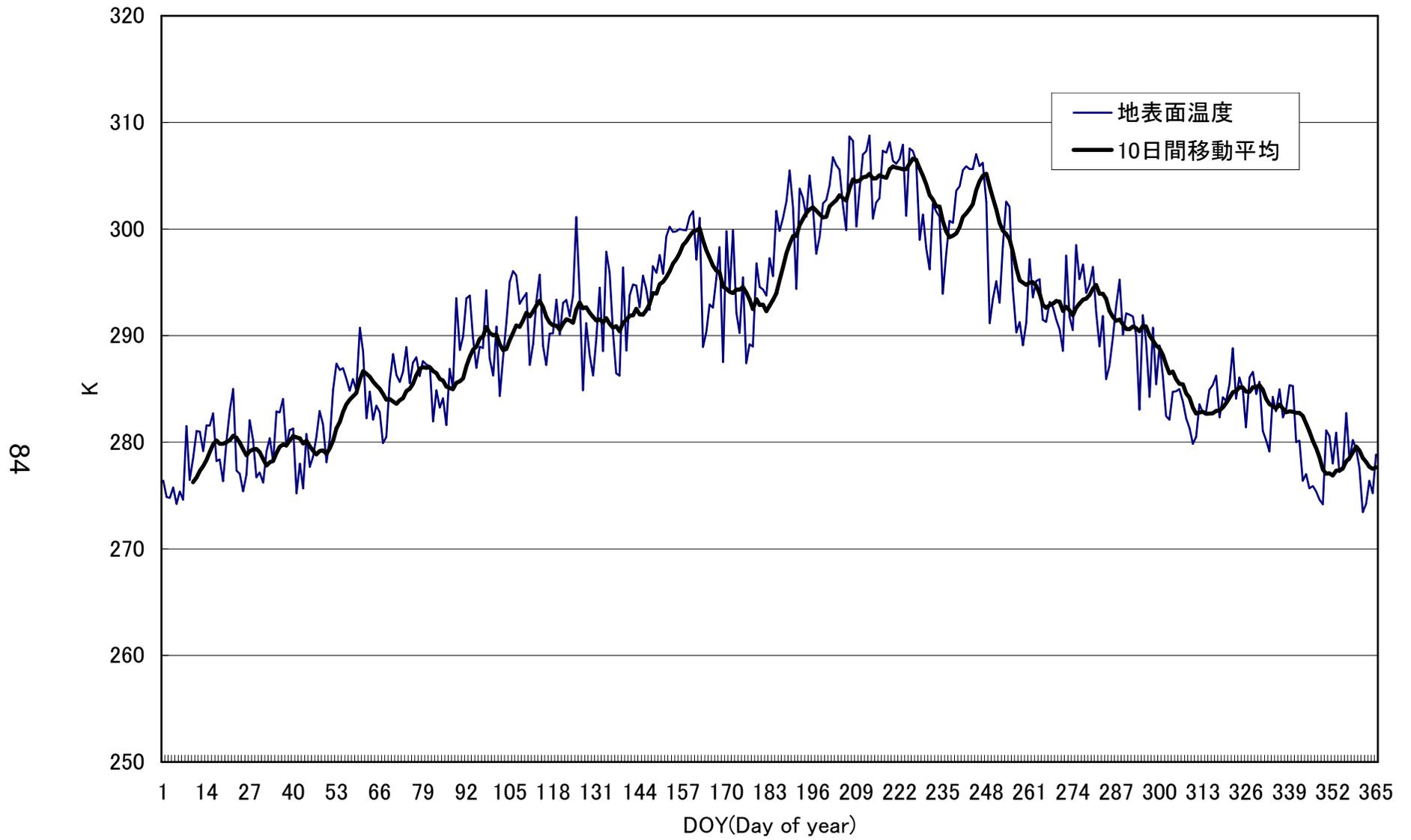


図34 地表面温度計算結果 (2002年)

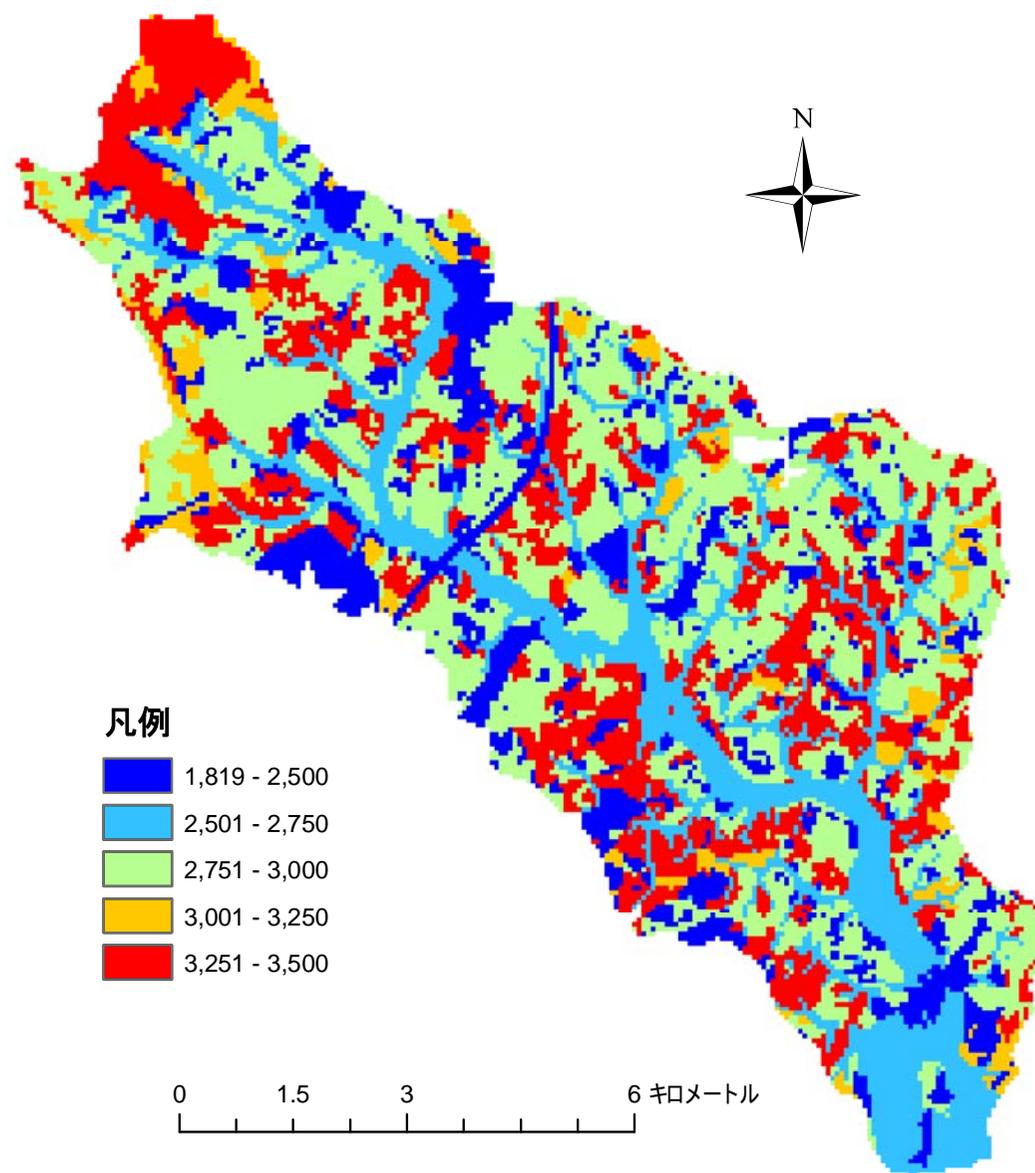


図35 正味放射分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

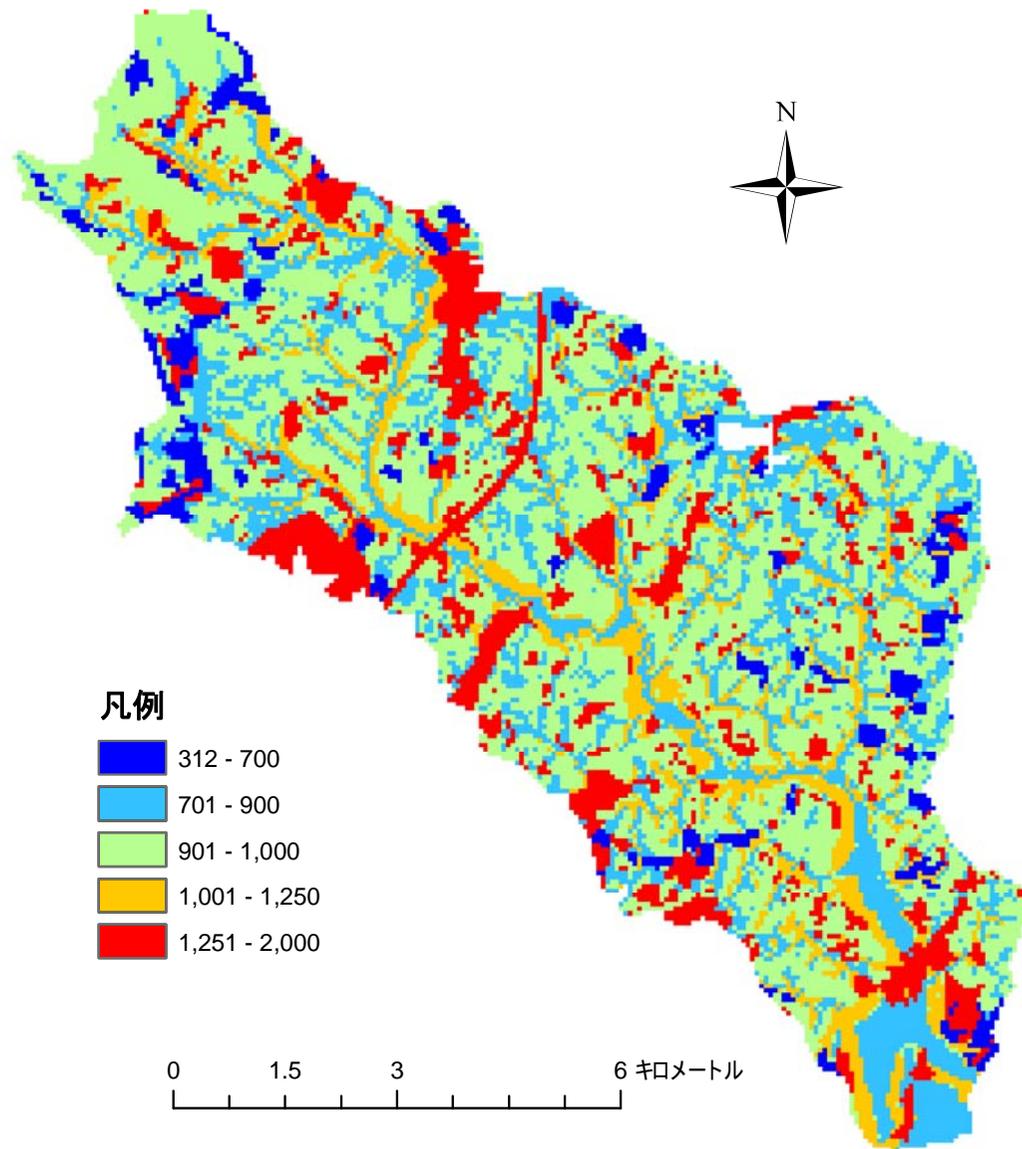


図36 顕熱分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

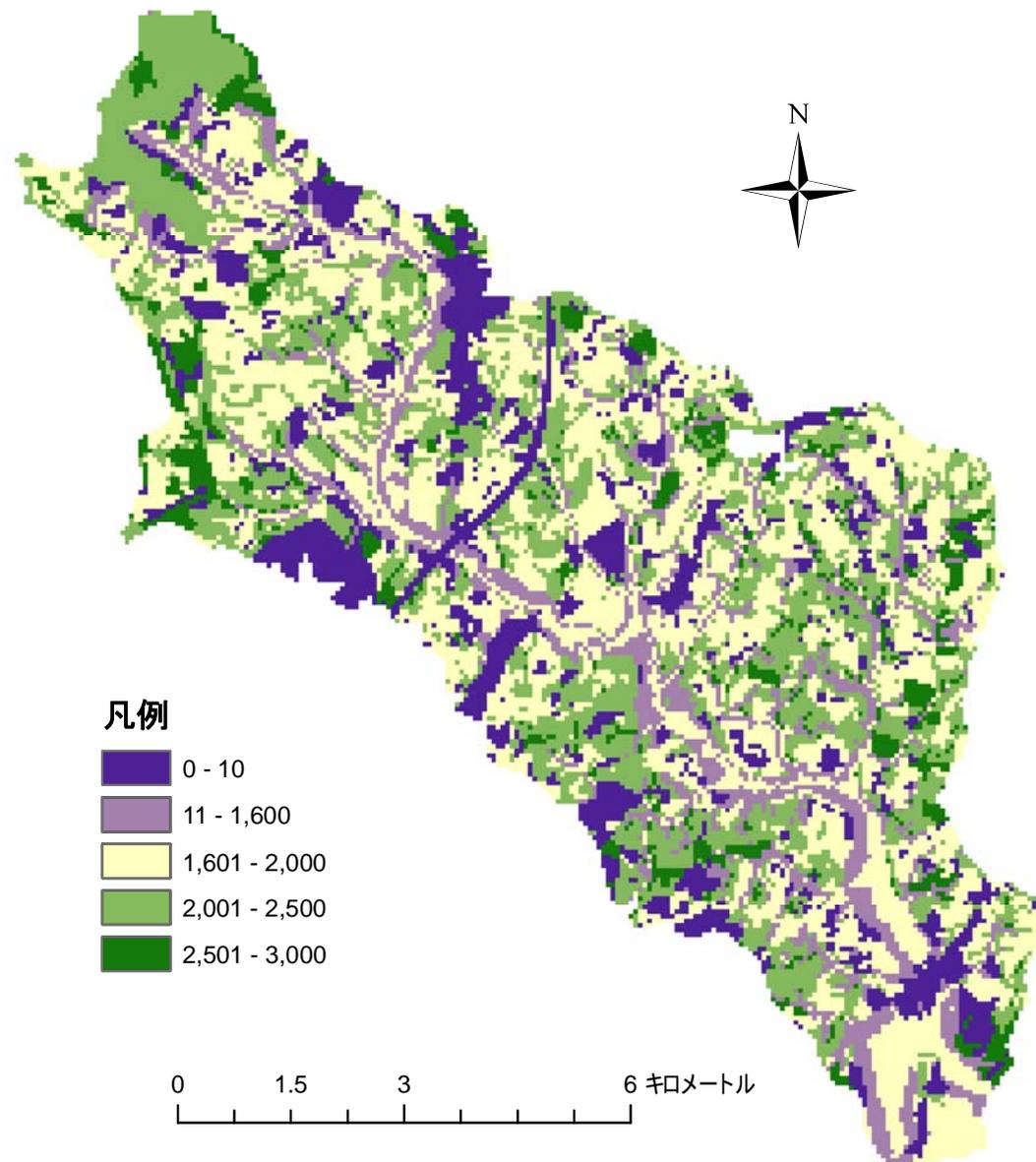


図37 潜熱分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

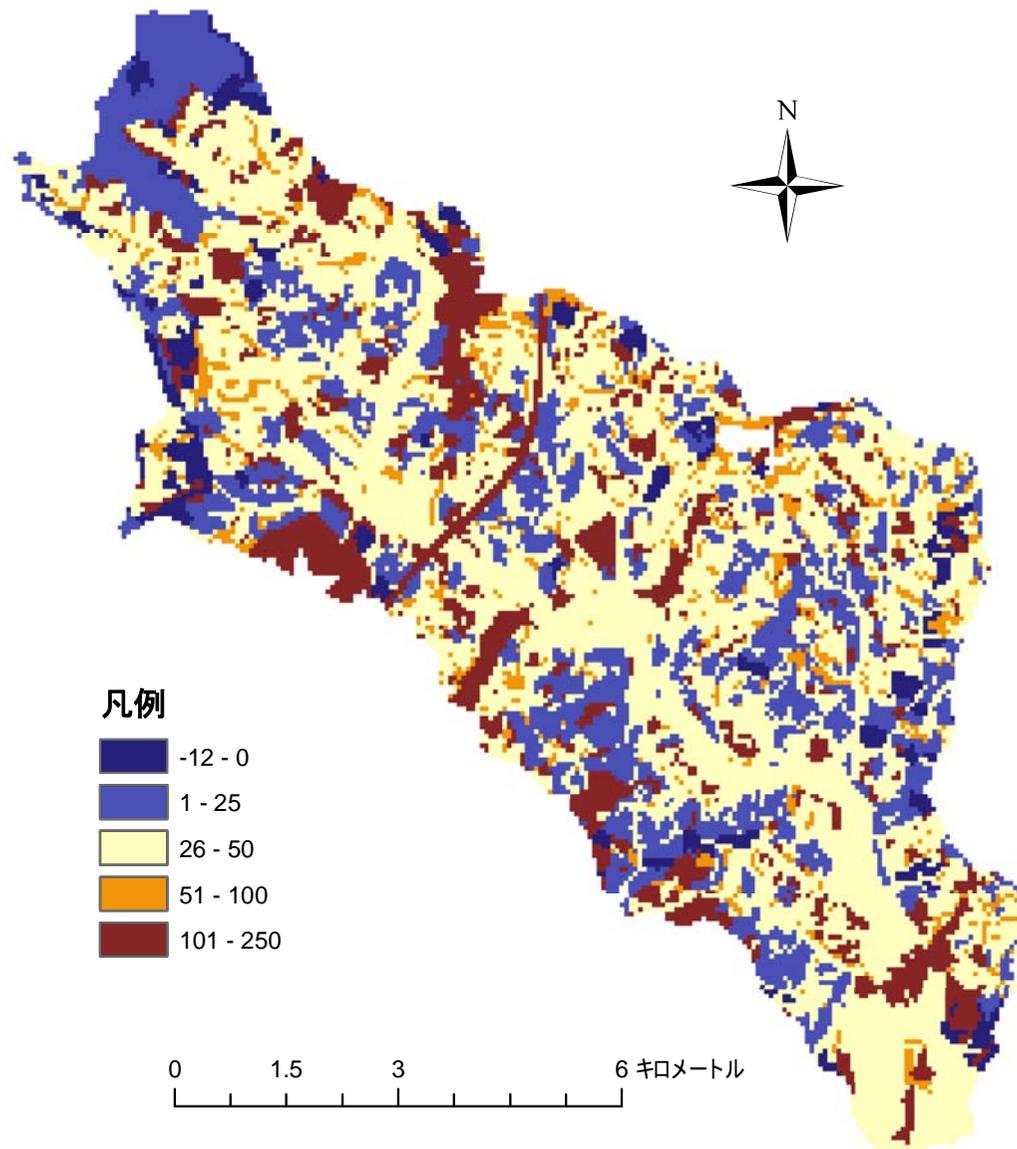


図38 地中熱流量分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

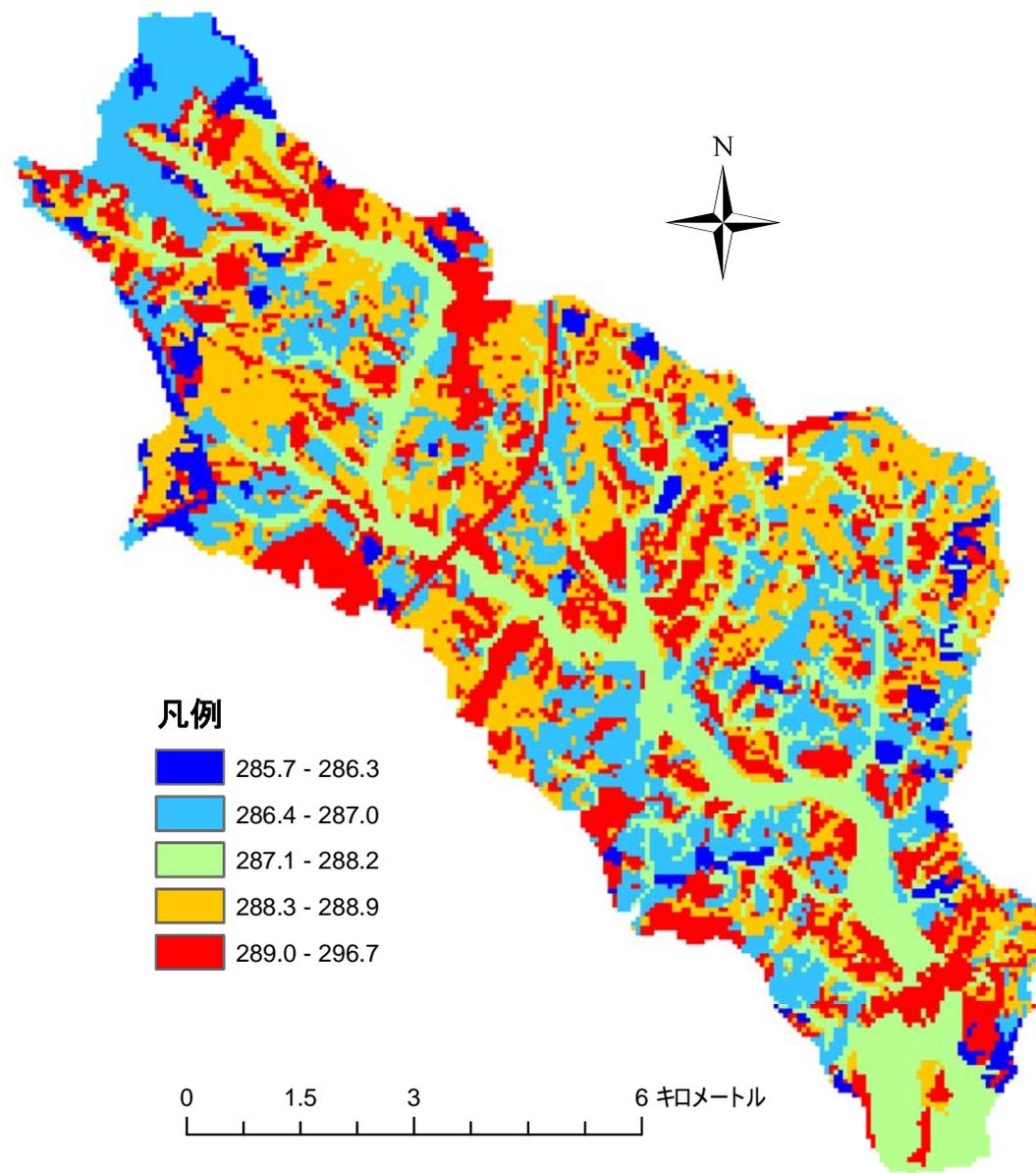


図39 地表面温度分布計算結果(2001年平均 単位K)

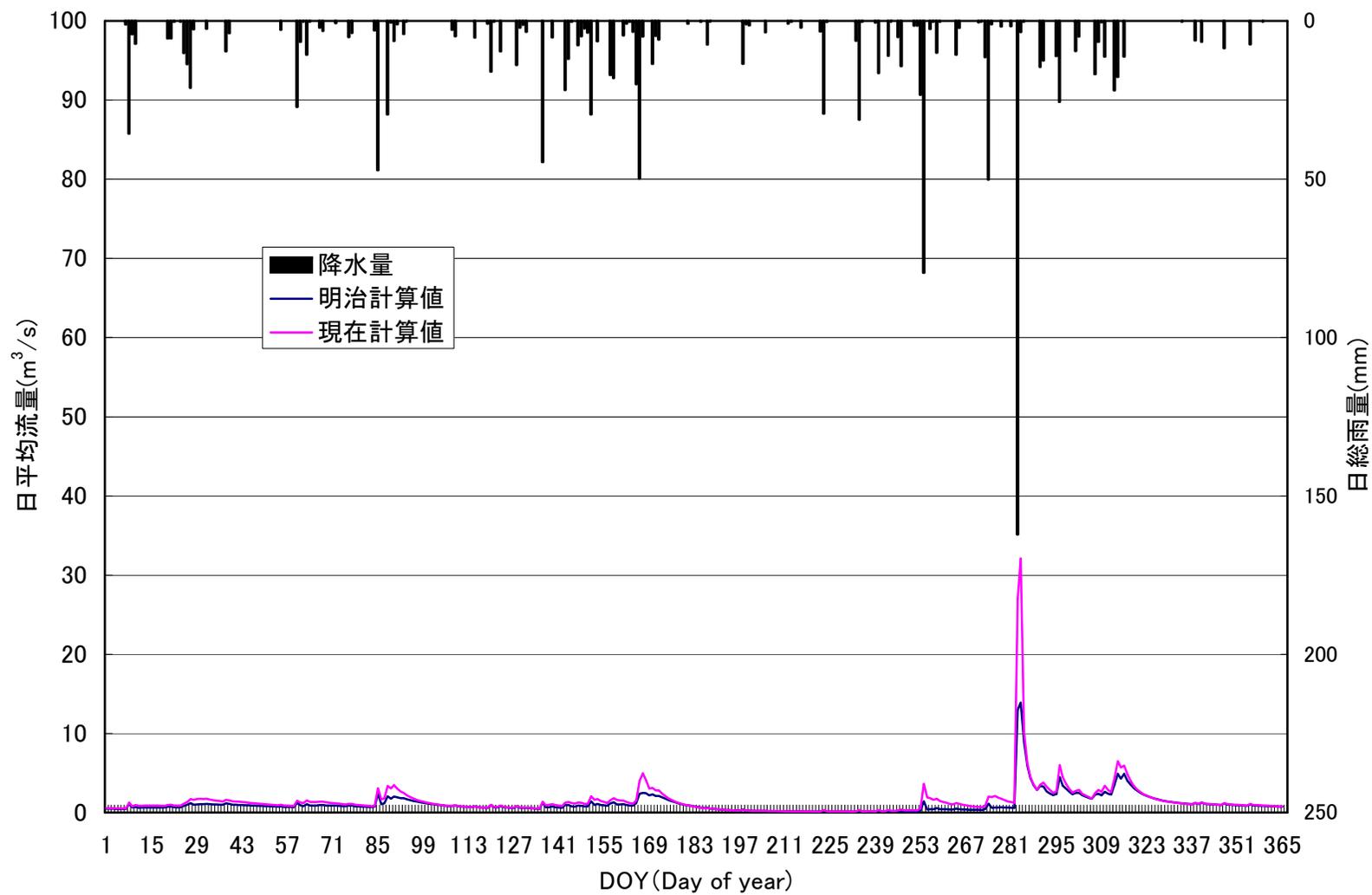


図40 日平均流量計算結果と明治計算結果の比較 (2001年)

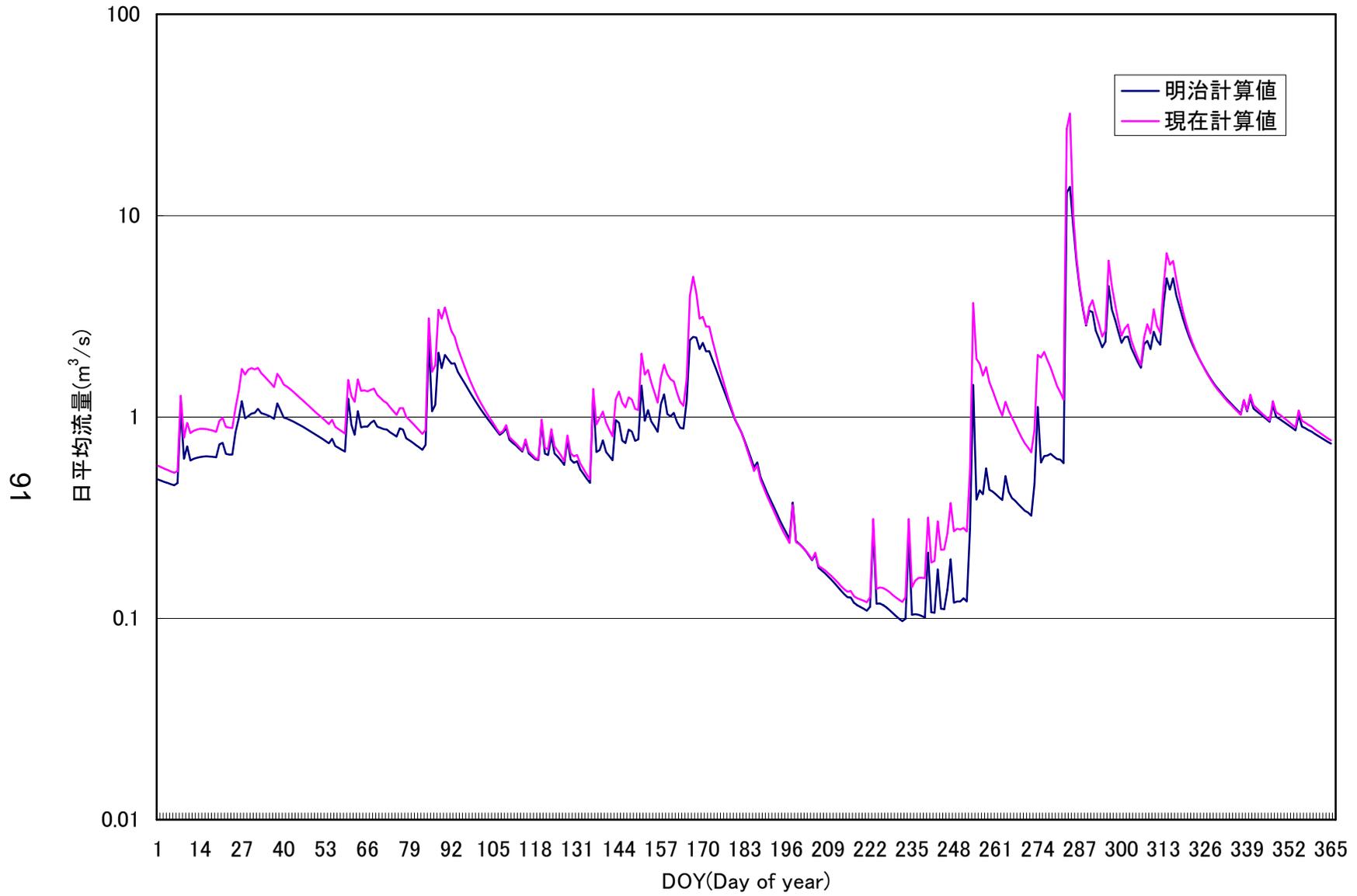


図41 日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2001年・対数)

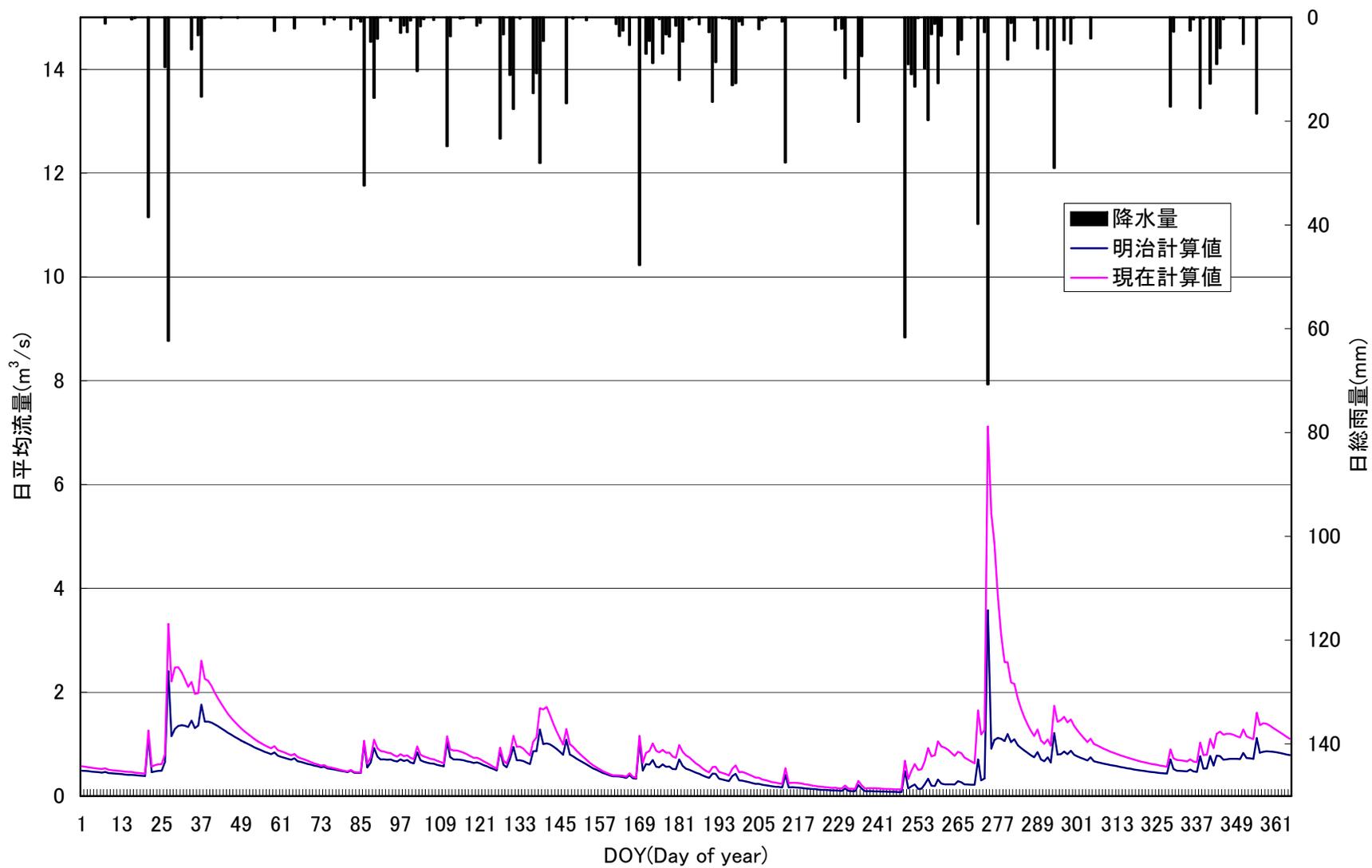


図42 日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2002年)

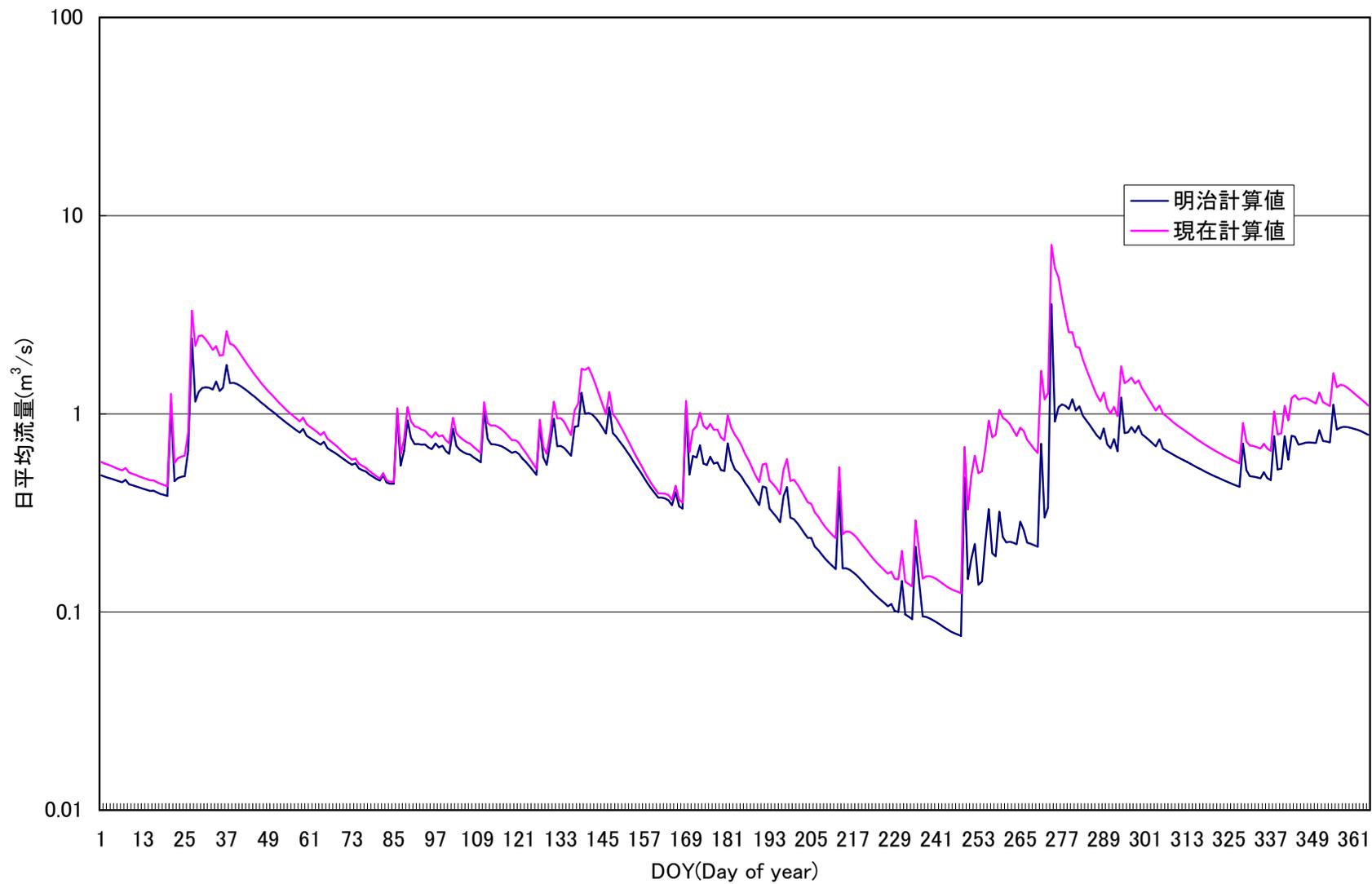


図43 日平均流量計算結果と明治入力時の比較 (2002年・対数)

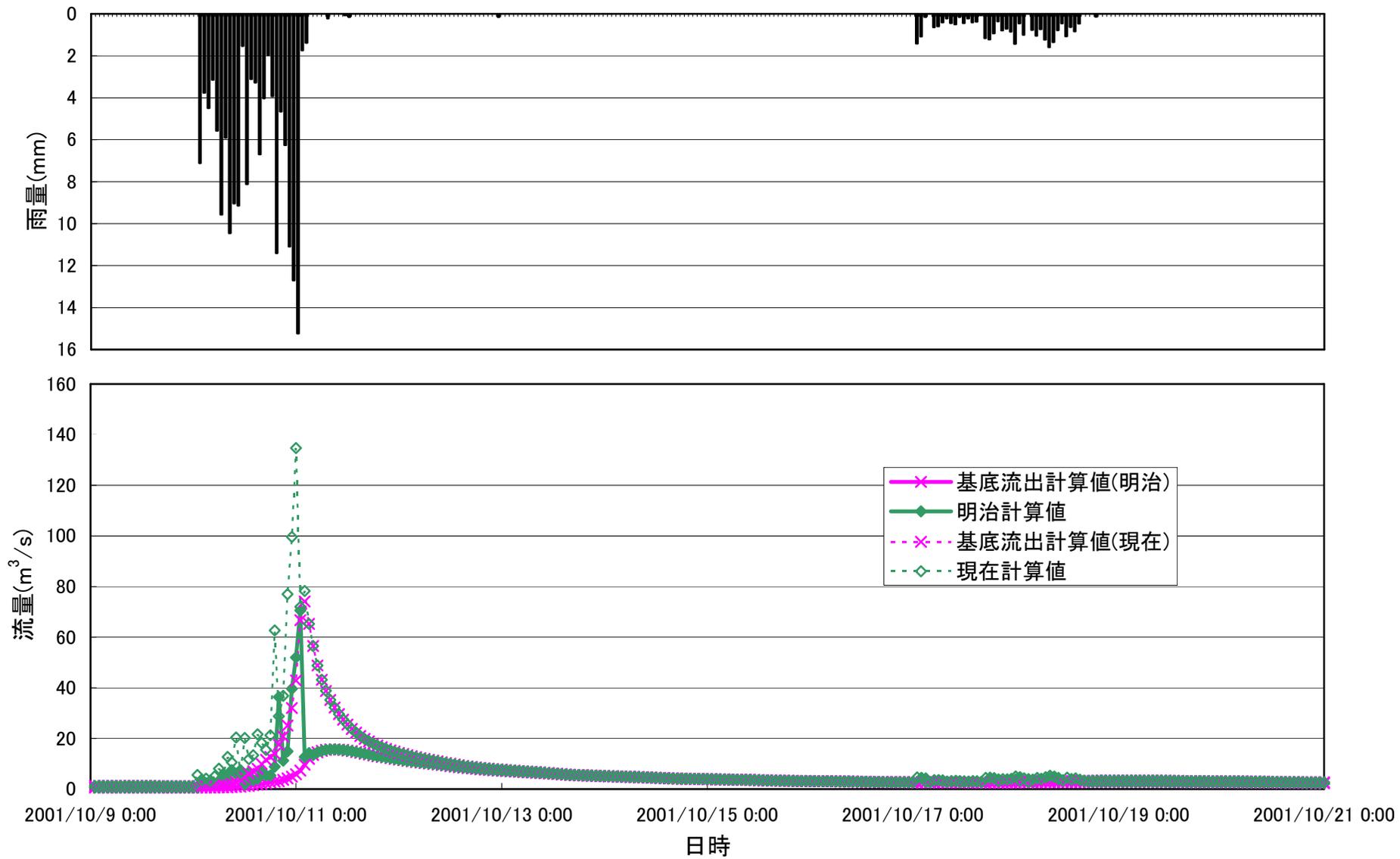


図44 明治入力時短期流出の比較(2001年10月9日0:00~10月21日0:00,総雨量192.9mm)

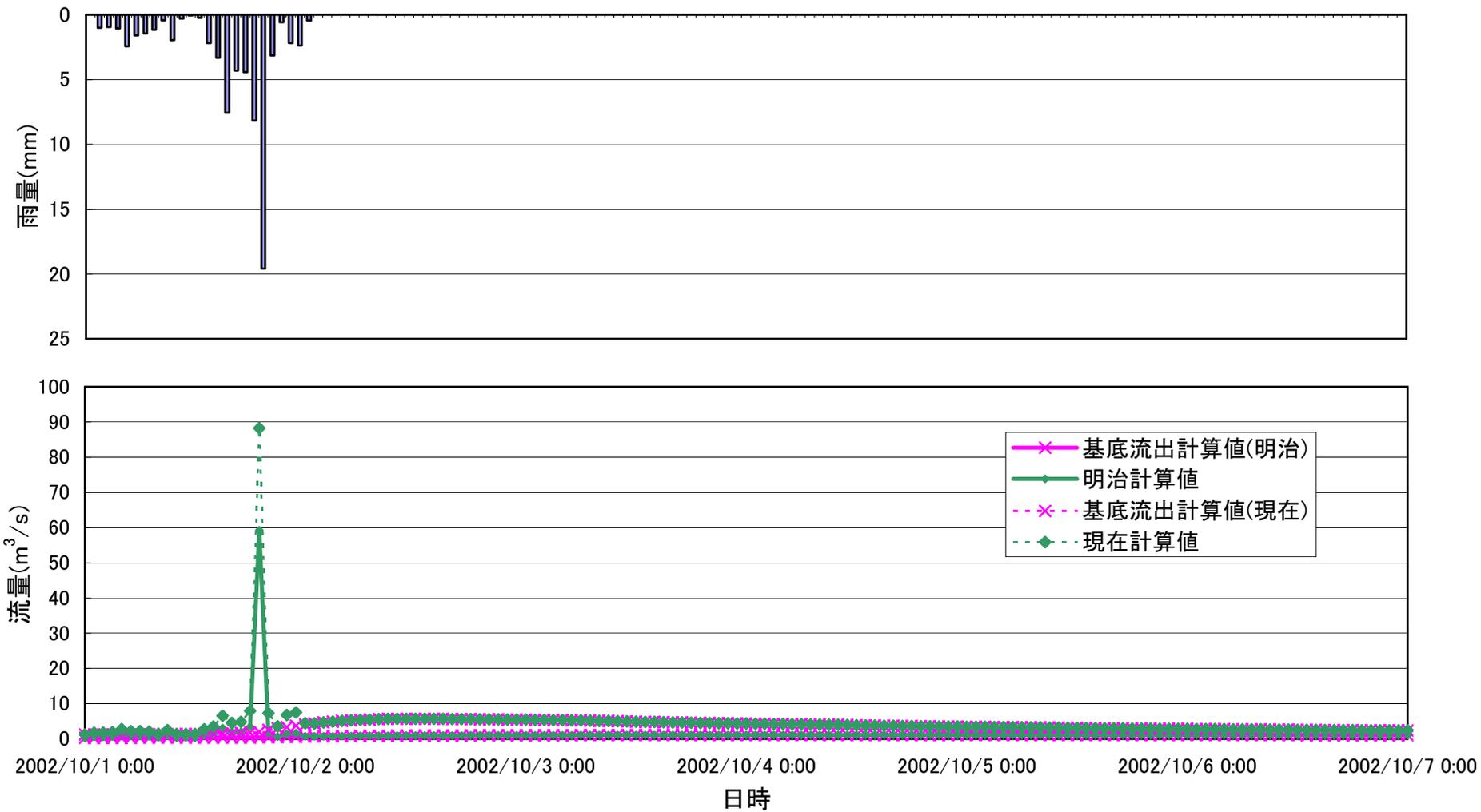


図45 明治入力時短期流出の比較(2002年10月1日0:00~10月4日0:00,総雨量70.7mm)

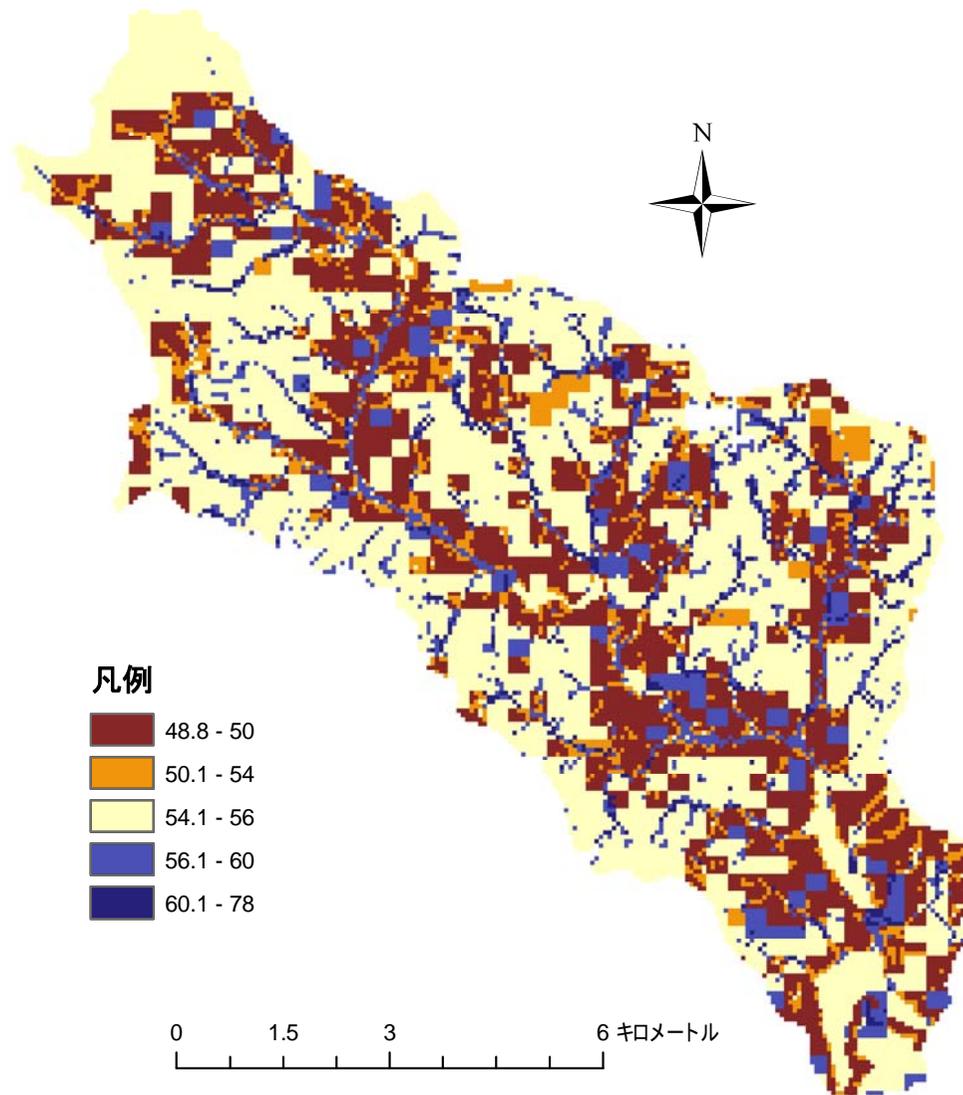


図46 明治入力時土壤水分分布計算結果 (2001年平均 単位%)

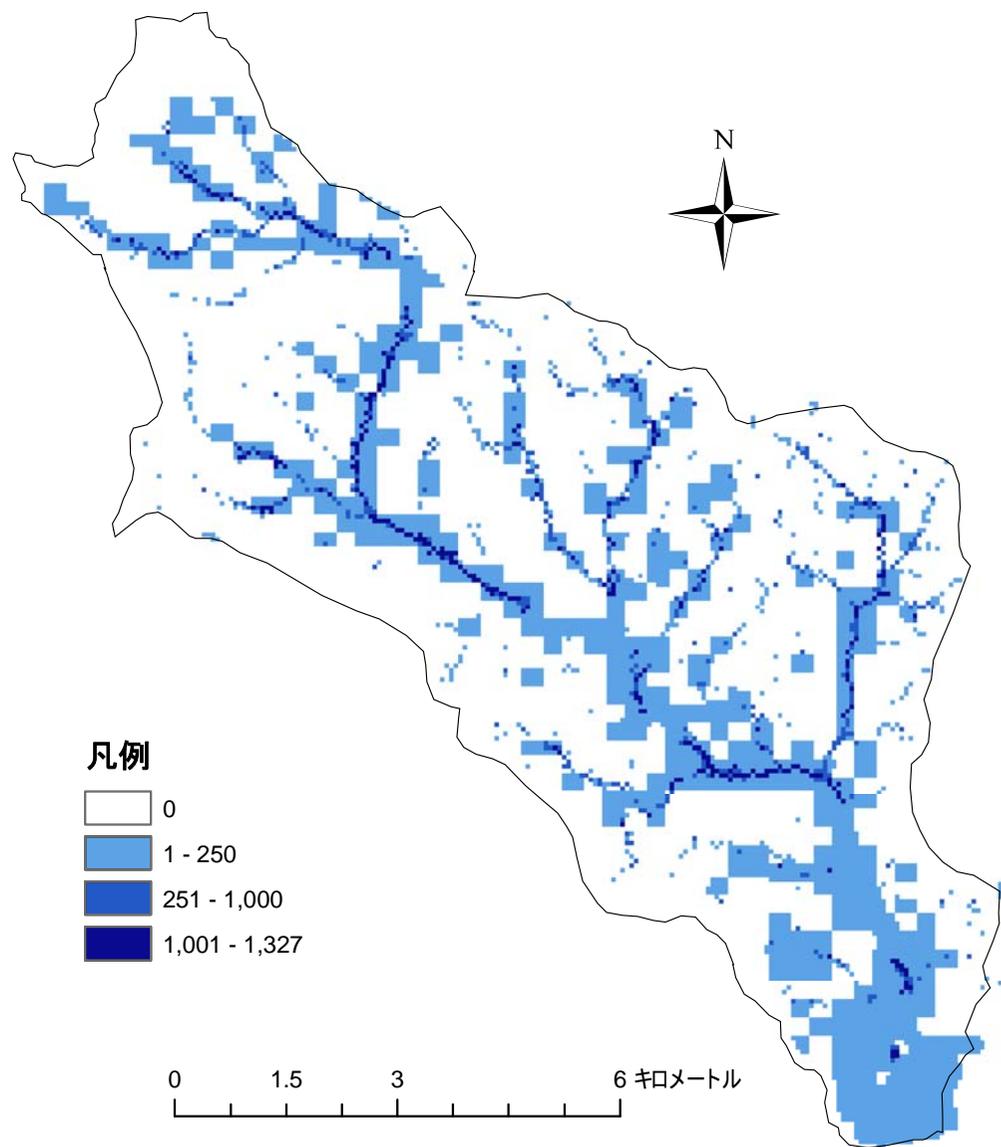


図47 明治入力時表面流出分布計算結果 (2001年積算 単位mm)

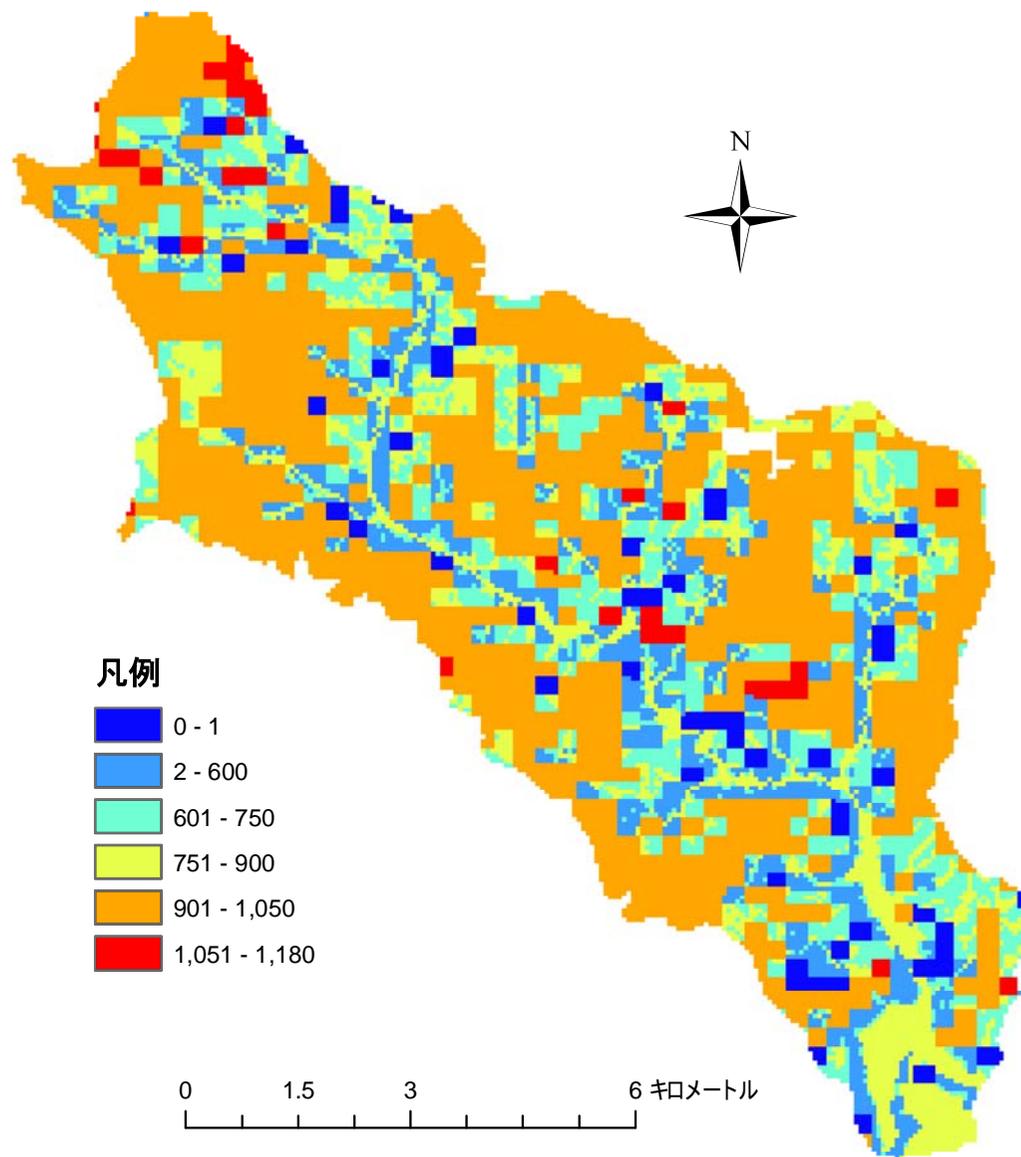


図48 明治入力時蒸発散量分布計算結果 (2001年積算 単位mm)

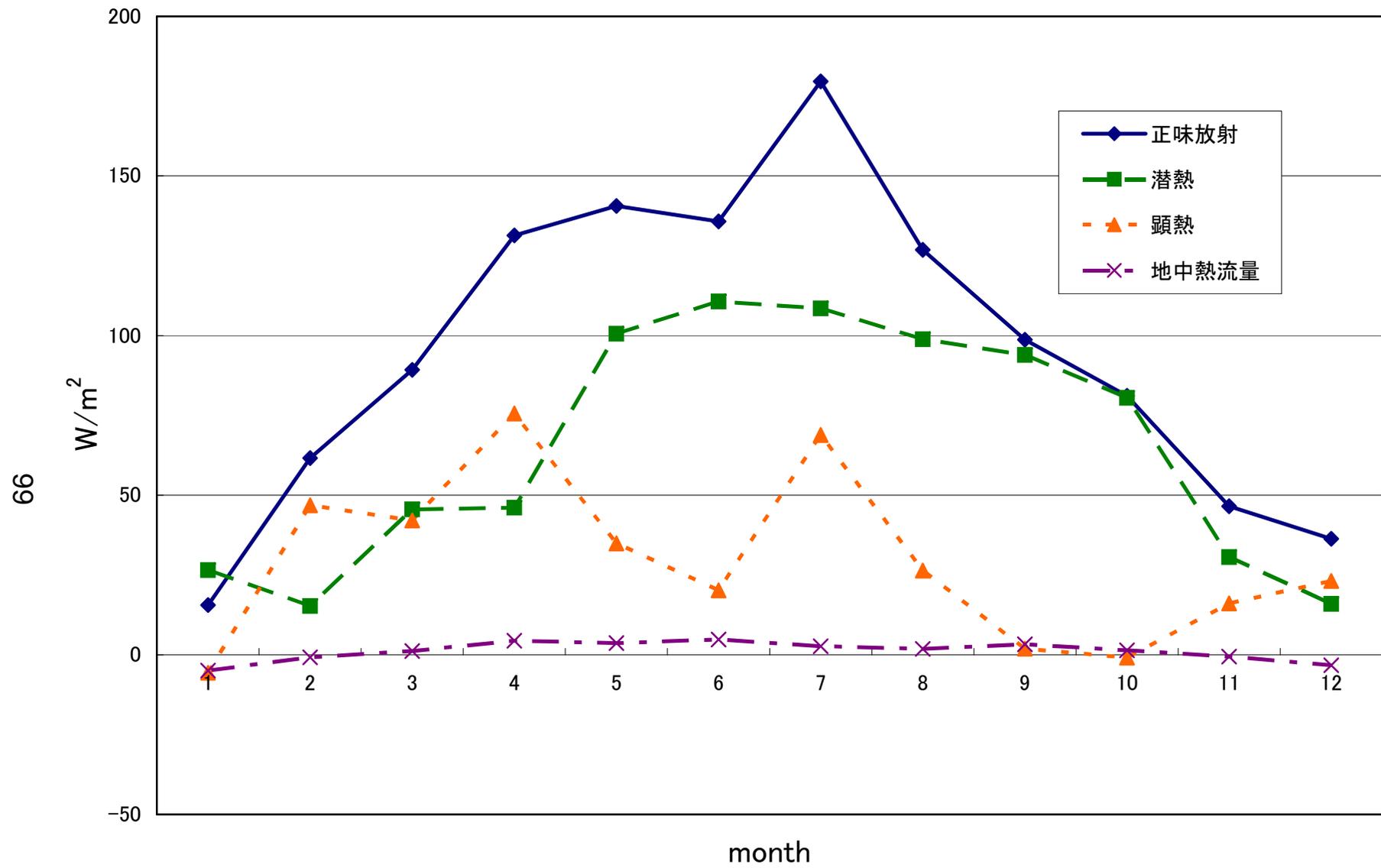


図49 明治入力時流域平均月別熱収支計算結果 (2001年)
 値は月平均値

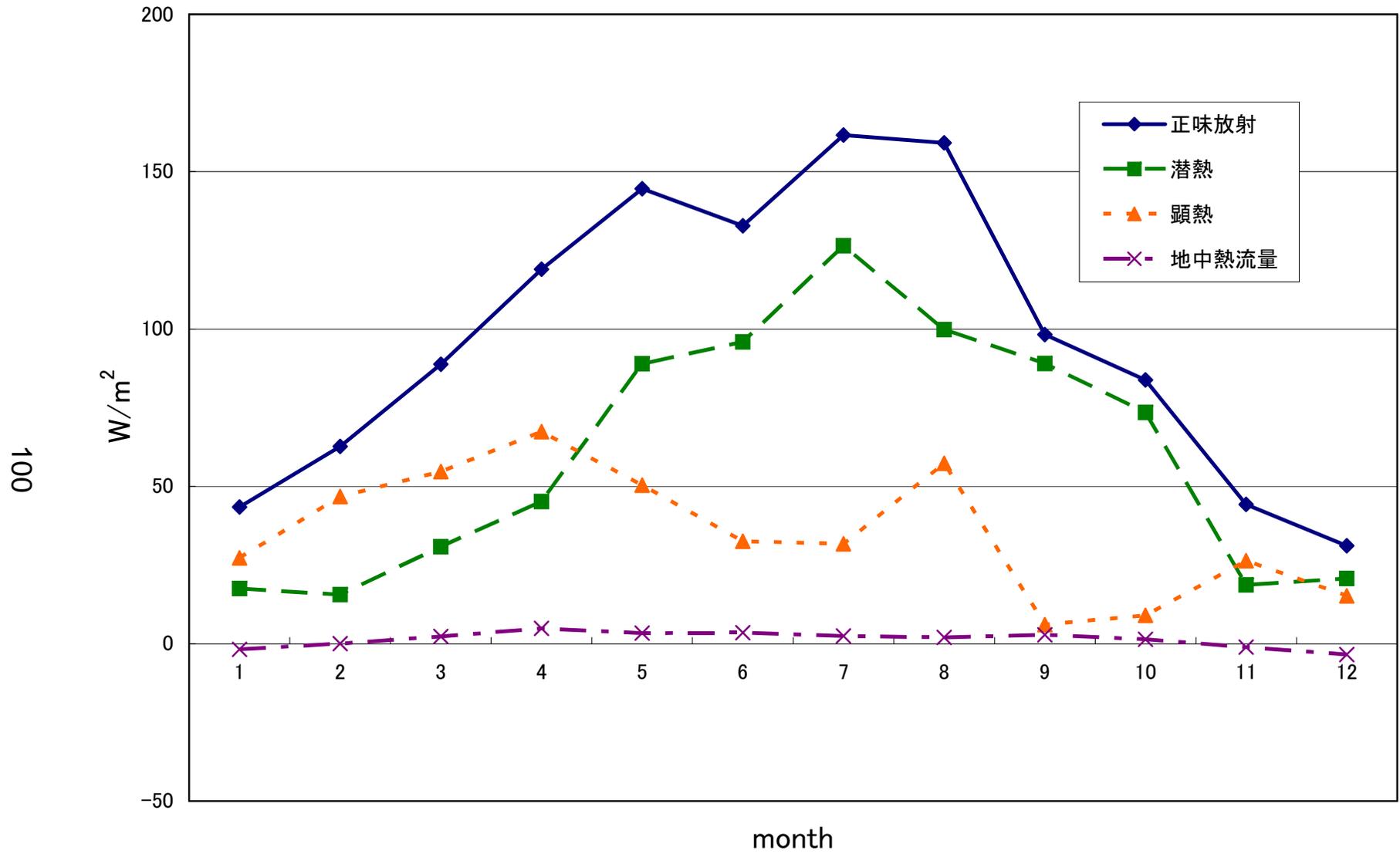


図50 明治入力時流域平均月別熱収支計算結果 (2002年)

値は月平均値

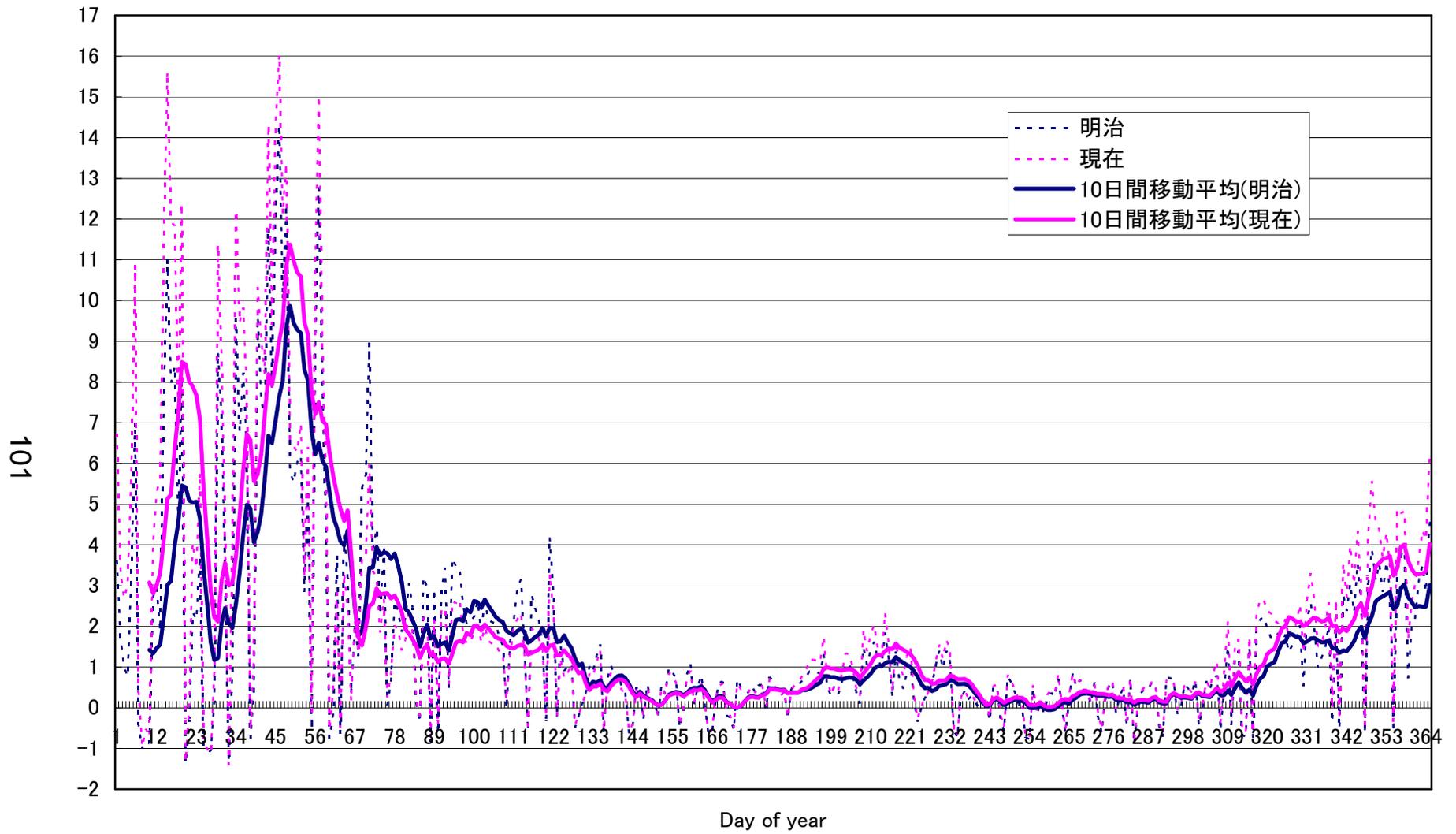


図51 明治入力時ポーエン比計算結果 (2001年)

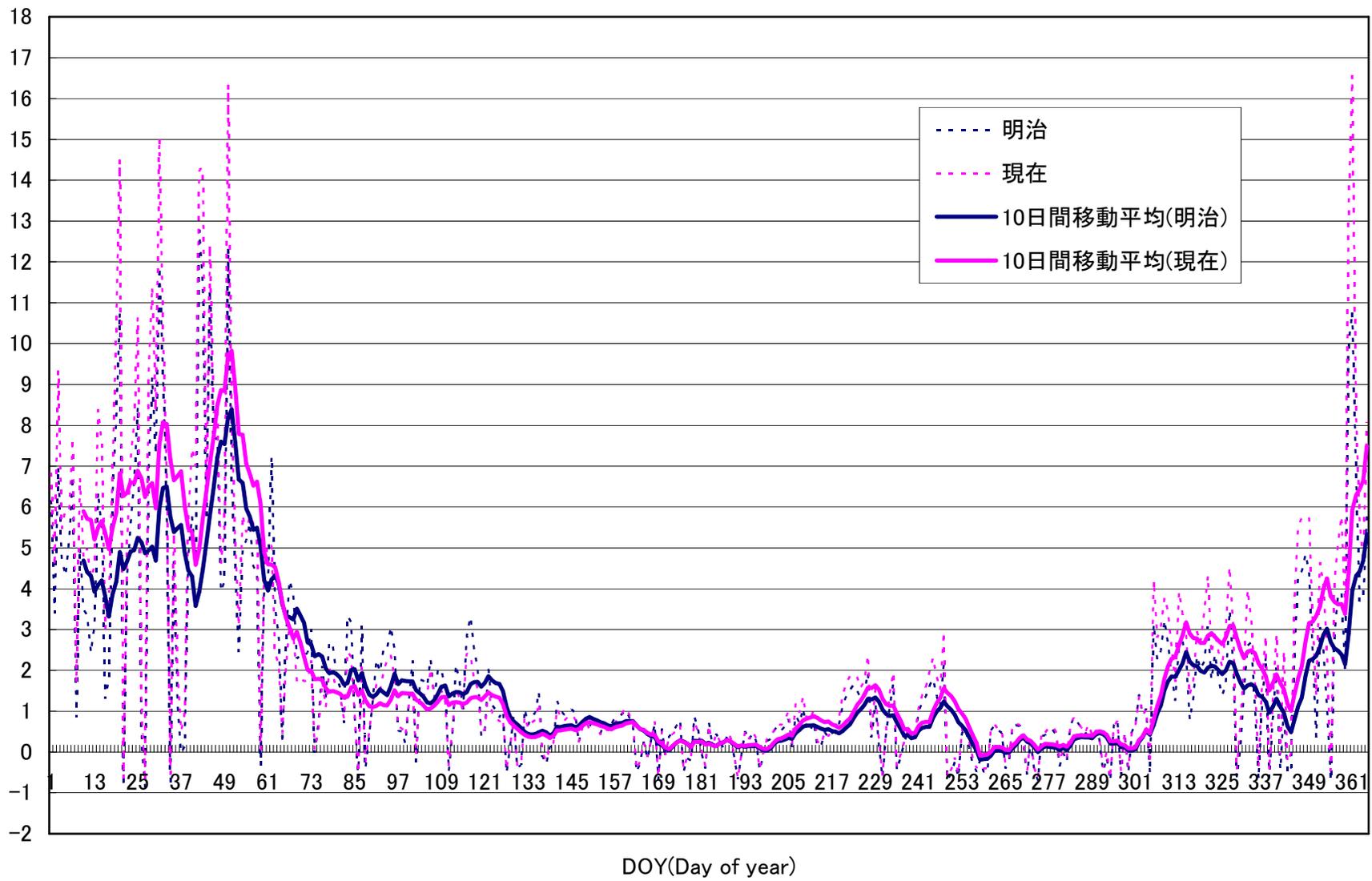


図52 明治入力時ポーエン比計算結果 (2002年)

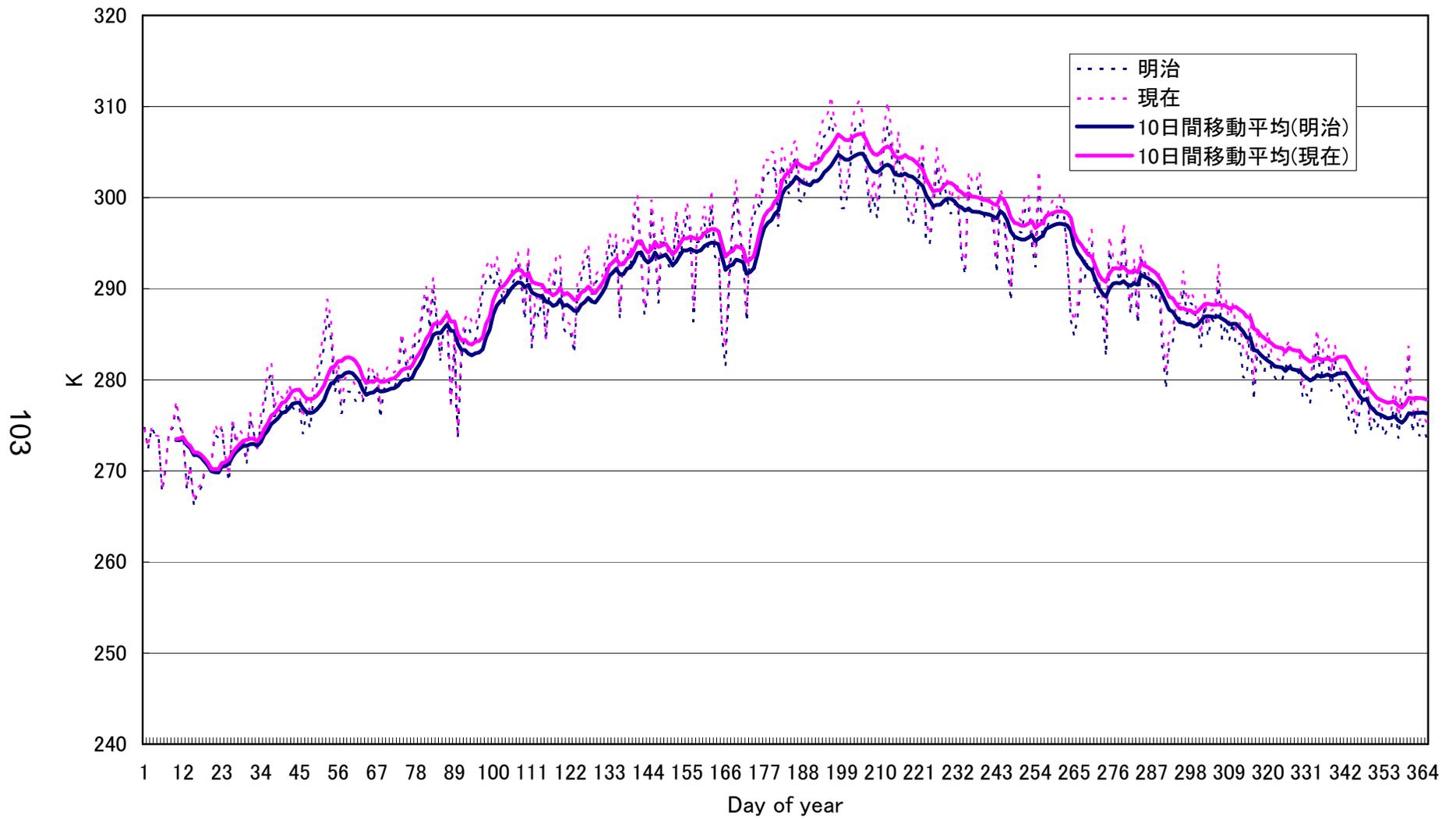


図53 明治入力時地表面温度計算結果 (2001年)

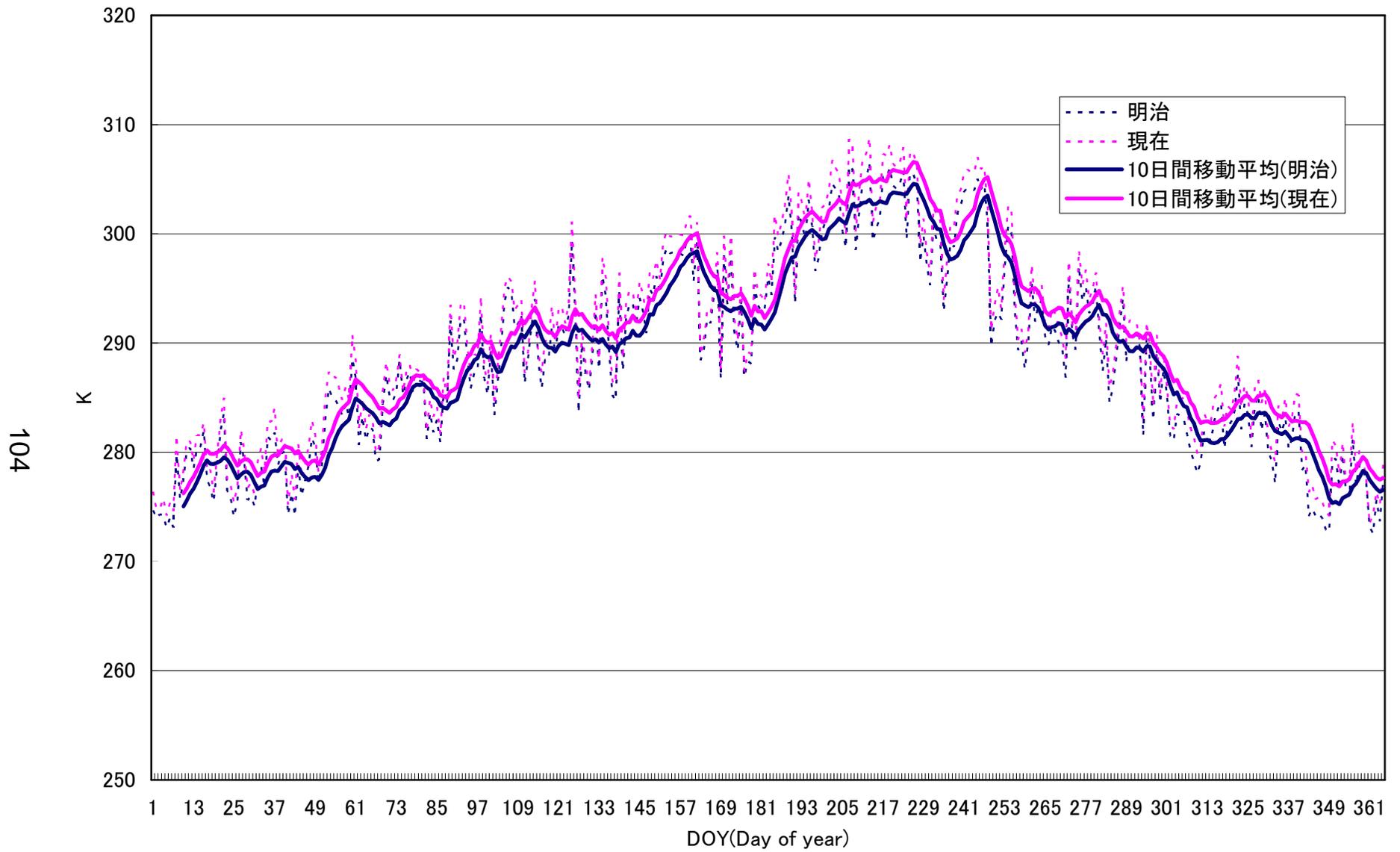


图54 明治入力時地表面温度計算結果 (2002年)

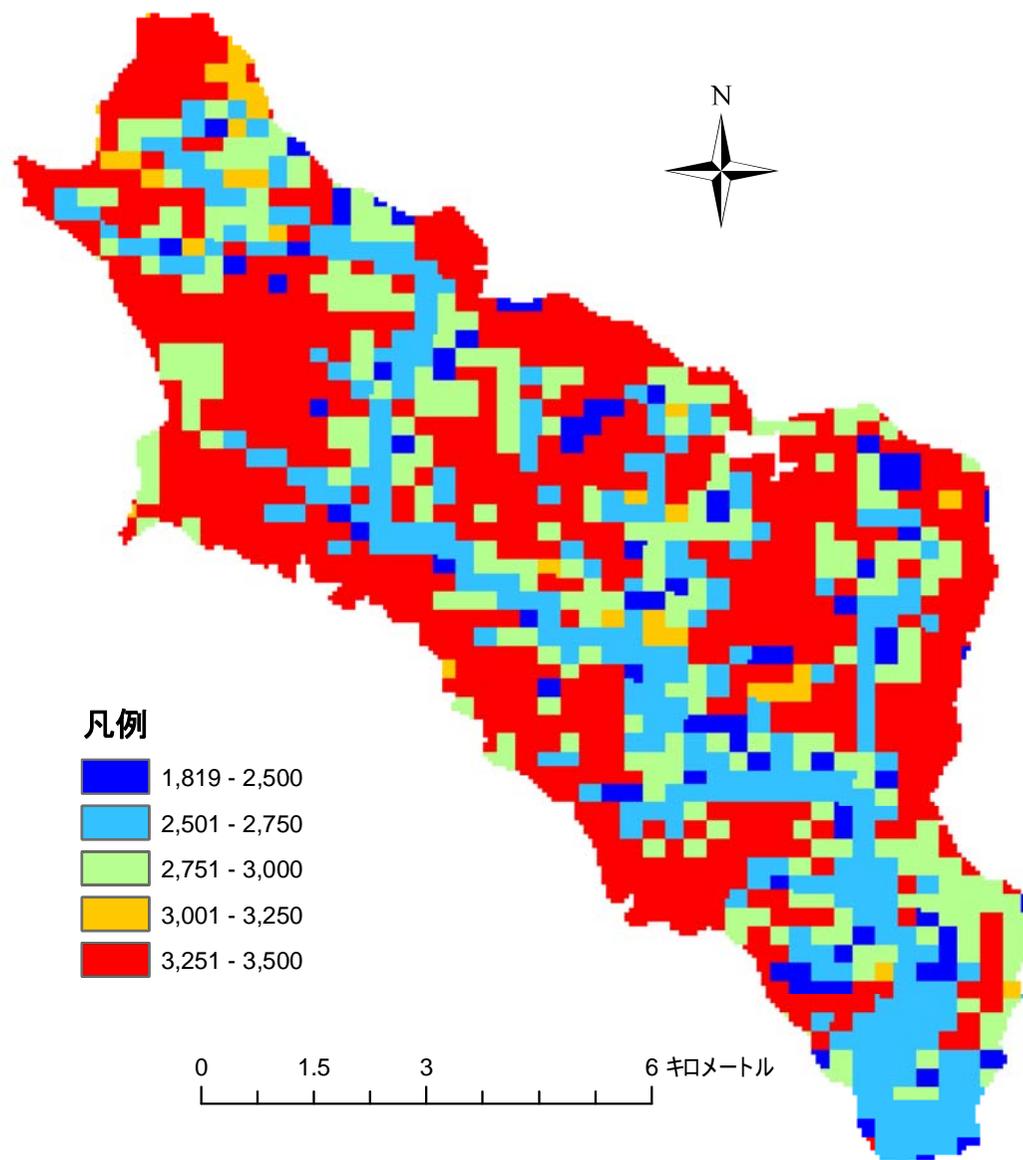


図55 明治入力時正味放射分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

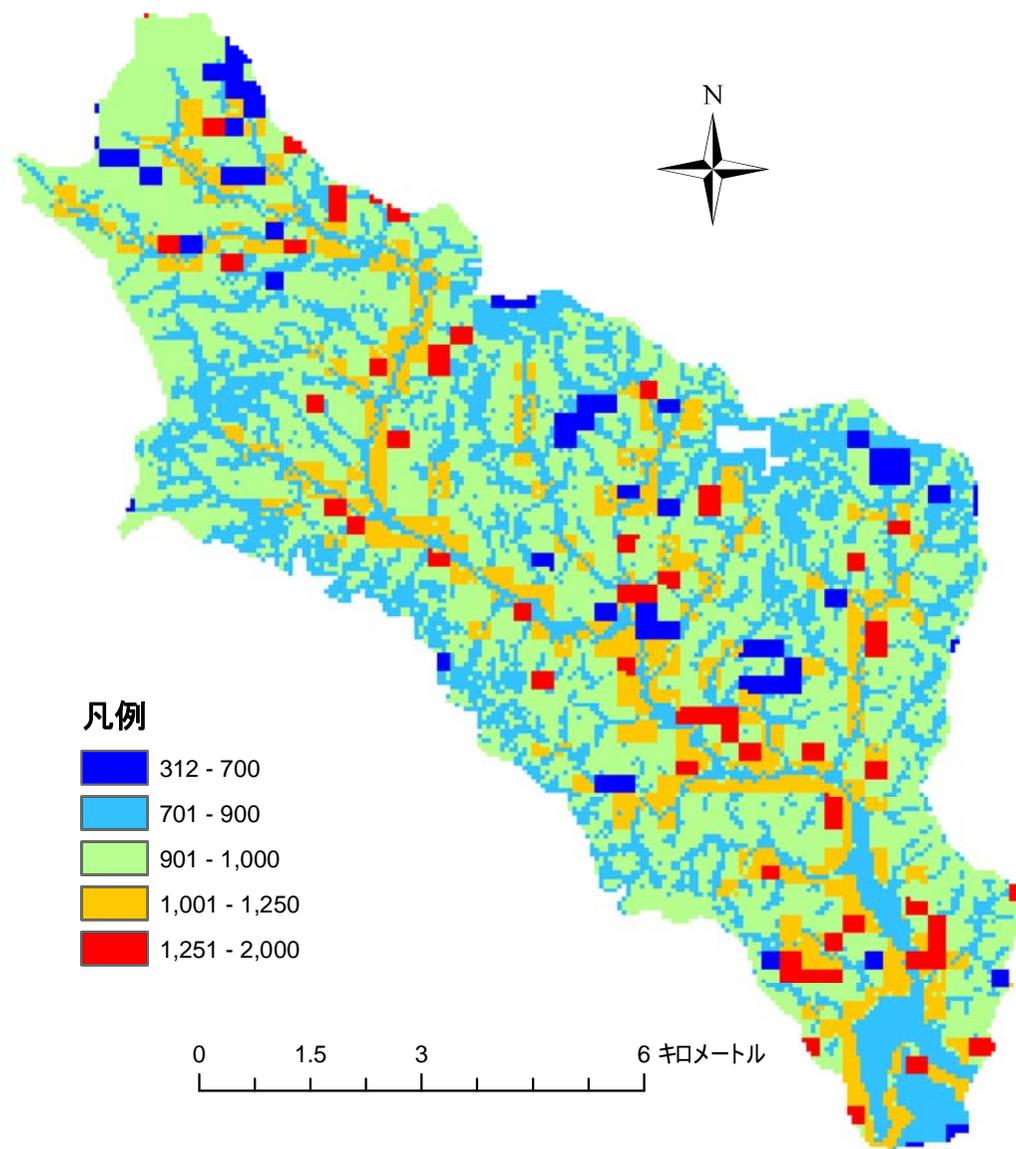


図56 明治入力時顕熱分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

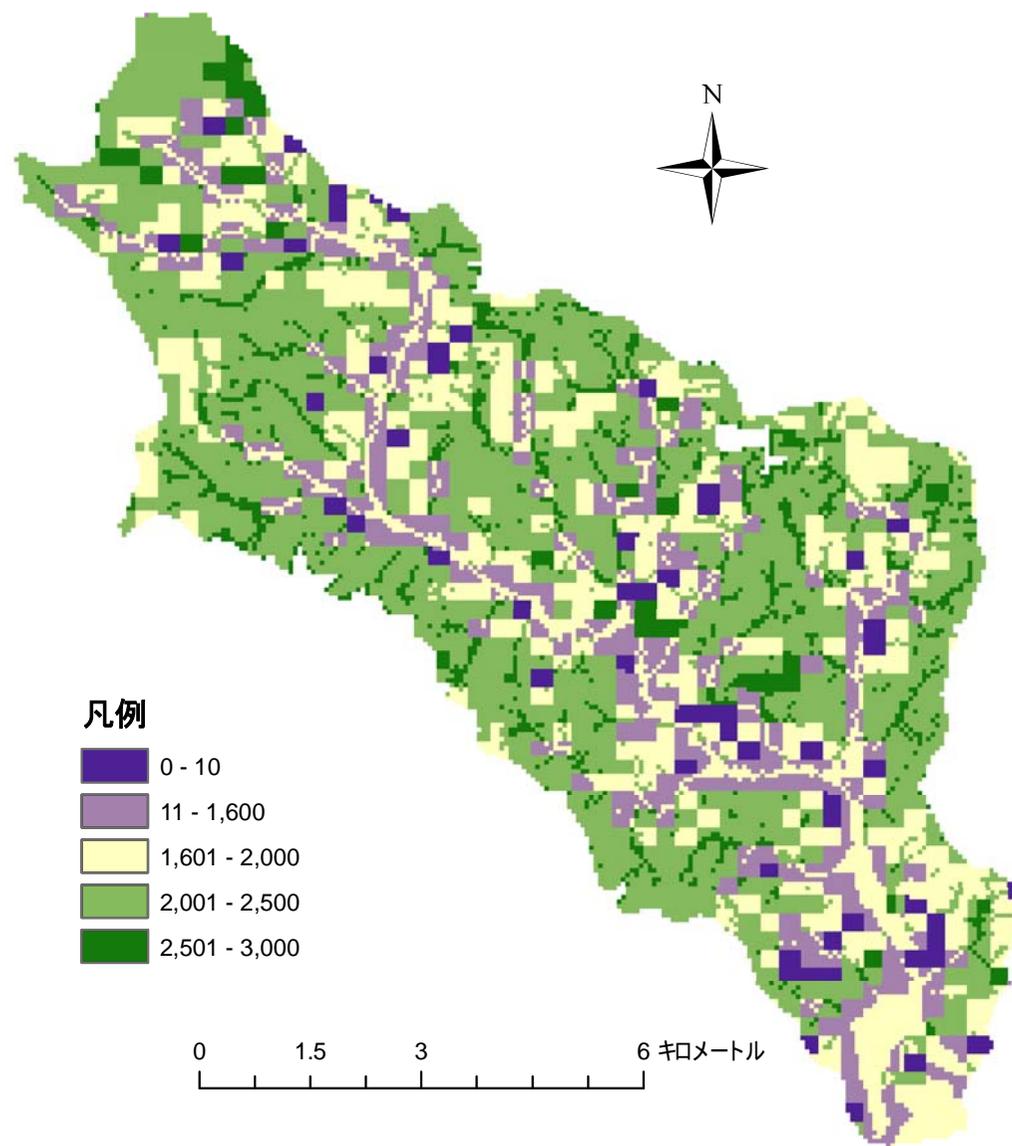


図57 明治入力時年潜熱分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

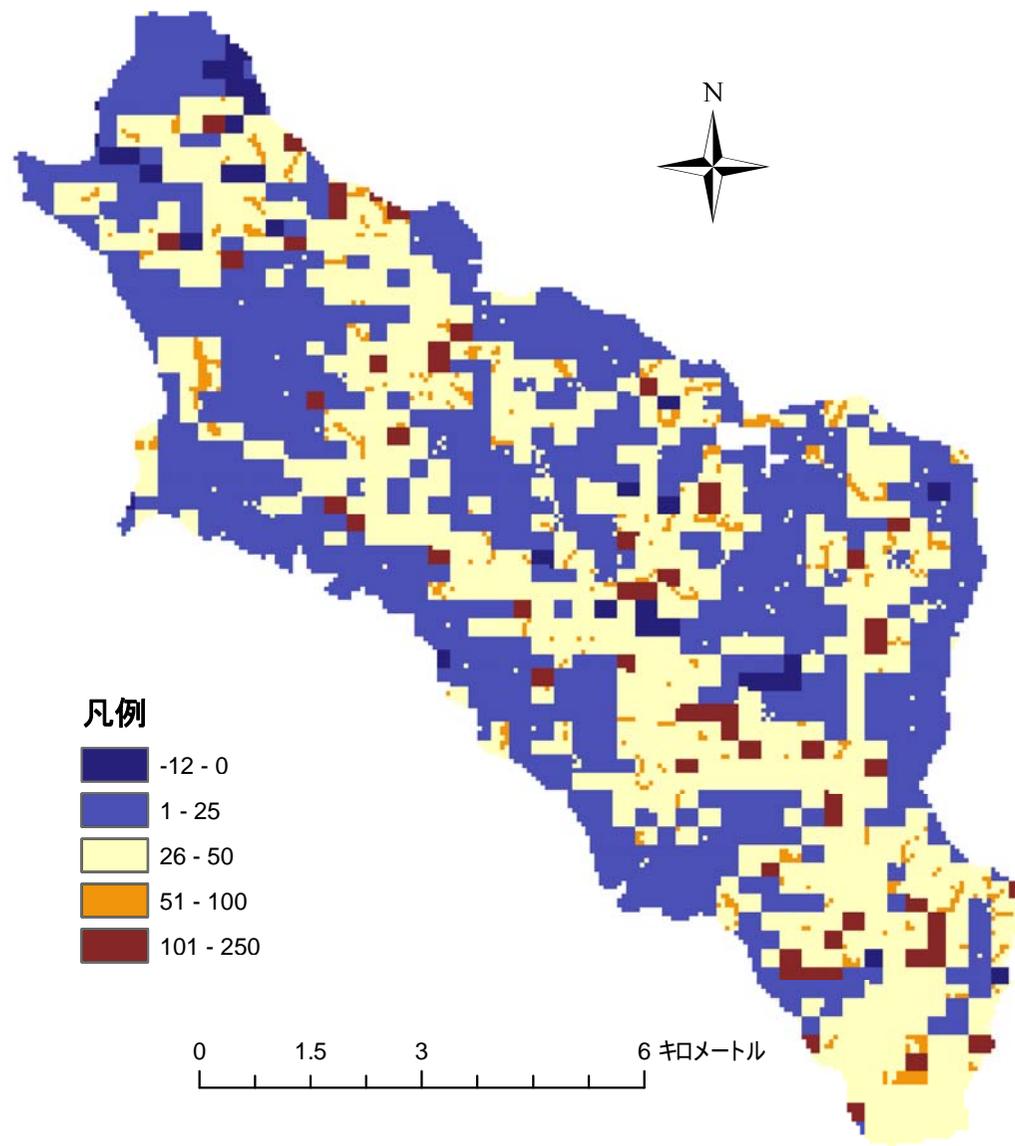


図58 明治入力時地中熱流量分布計算結果(2001年積算 単位MJ/m²)

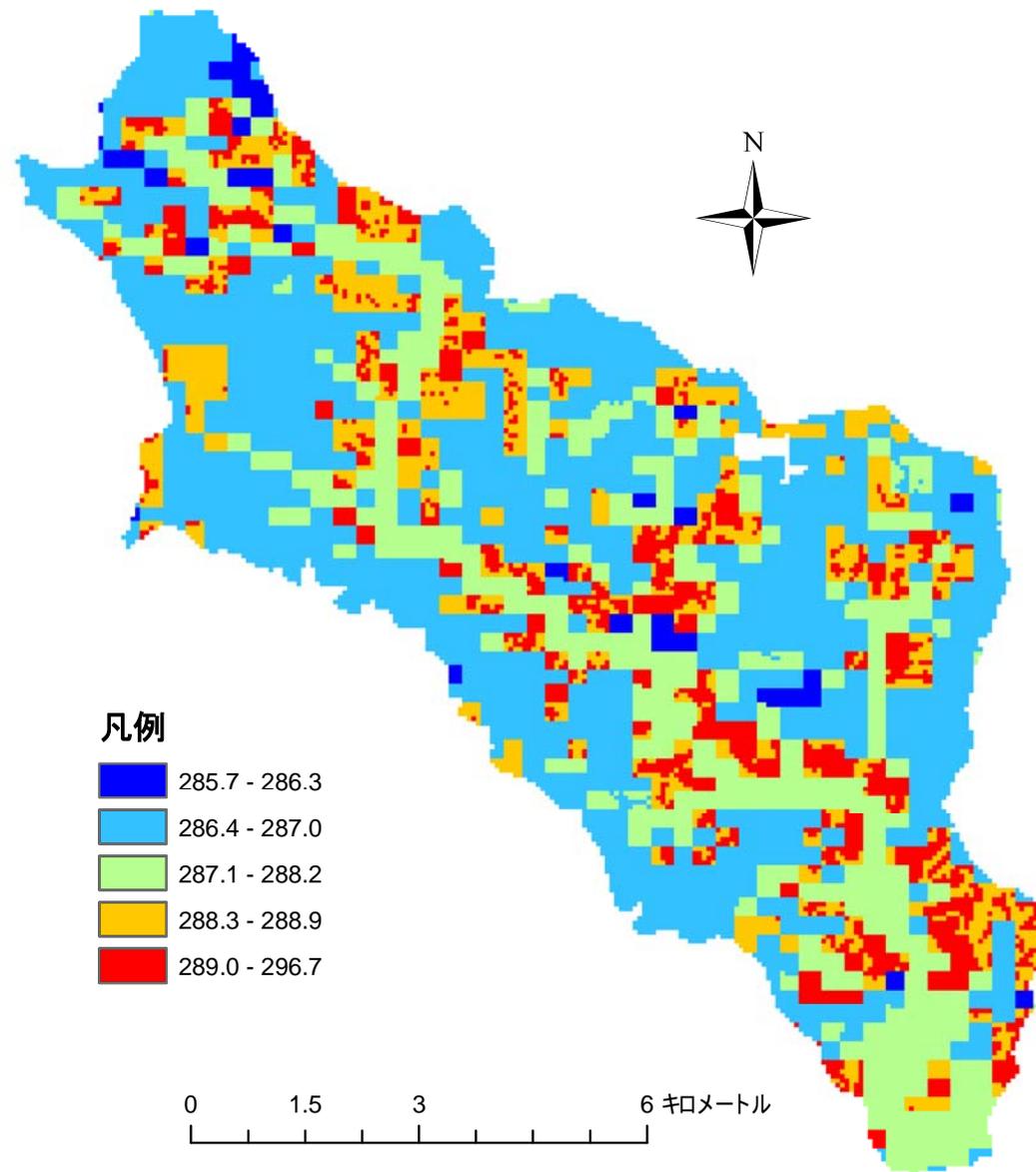


図59 地表面温度分布計算結果(2001年平均 単位K)