

平成24年度 卒業論文

霞ヶ浦支流域における土地利用変化が水・熱収支に与える影響の
解明

—園部川・小野川流域を対象として—

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

200910845

渡邊拓馬

2013年2月

目次

目次	.....	i
要旨	.....	ii
Abstract	.....	iii
表目次	.....	v
図目次	.....	vi
本文		
1. はじめに	.....	1
2. 研究方法		
2.1 対象地域	.....	2
2.2 使用データ	.....	2
2.2.1 モデル入力データ	.....	2
2.2.2 検証データ	.....	3
2.3 使用モデル	.....	4
2.3.1 モデル概要	.....	4
2.3.1-1 水収支計算	.....	5
2.3.1-2 熱収支計算	.....	12
2.3.2 計算方法	.....	14
2.3.3 モデルパラメータの設定	.....	14
2.4 土地利用変化比較	.....	15
3. 研究結果および考察		
3.1 パラメータの決定	.....	15
3.2 小野川	.....	15
3.2.1 現在	.....	15
3.2.1-1 水収支	.....	15
3.2.1-2 熱収支	.....	17
3.2.2 明治期	.....	18
3.2.2-1 水収支	.....	18
3.2.2-2 熱収支	.....	19
3.3 園部川との比較	.....	19
3.3.1 水収支	.....	19
3.3.2 熱収支	.....	20
4. 結論	.....	23
5. 謝辞	.....	24
6. 引用文献	.....	25
7. 付録	.....	28

霞ヶ浦流域における土地利用変化が水・熱収支に与える影響の解明
- 園部川・小野川流域を対象として -

渡邊拓馬

要旨

流域の土地利用変化は水循環環境に大きく影響する。特に霞ヶ浦流域は首都圏に近く平坦な地形であることから近年畑地化・都市化が急速に進んでおり、現在までに水循環が変化していることが予想され、今後とも人口の増加に伴い土地利用、水循環環境は変化していくと予想される。さらに、広大な霞ヶ浦流域ではその変化傾向は支流域毎に異なり、それぞれについて個別に評価し比較していくことが重要である。

本研究では準分布型の水文モデルを用い、霞ヶ浦流域の一つである小野川流域における 1903 年頃から 2003 年までの約 100 年間の土地利用変化が水・熱収支へ与える影響を明らかにした。モデル計算として気象条件は現在の値を適用し土地利用変化のみによる影響を比較するものである。さらにその結果を踏まえ、こちらも霞ヶ浦流域の一つである園部川流域における先行研究の結果と比較することにより、土地利用変化傾向の異なる 2 つの流域の水・熱収支への変化の違いを比較・評価し考察した。

小野川流域における明治と現在の比較結果から、明治から現在にかけて主に蒸発散量の減少、流出量の増加、地下水面の上昇、正味放射量の減少が見られた。年平均値として比較すると蒸発散量では約 30% 減少、流出量では 2 倍以上の増加が見られ、また正味放射量は約 15% 減少、潜熱フラックスは約 30% の減少が見られた。分布図と土地利用の関係を調べた結果、上記の変化は主に針葉樹林から市街地・畑地に土地利用が変化した点において顕著であった。これは樹冠貯留水分量の減少による蒸発量の減少、それに起因する流出量の増加、不透水域の増加による表面流の増加、アルベドの高い草地・市街地の増加による顕熱フラックスの増加が主な要因として考えられた。また園部川との比較では都市・農地増加割合の違いによる水・熱収支への影響の差が顕著に見られた。特に小野川では上流部で主に市街地、中流部では畑地、下流部では水田の増加割合がそれぞれ多く分布が塊状であったのに対し、園部川は散在的に土地利用が変化している傾向が見られ、その点が水・熱収支の変化にも影響していた。

キーワード：準分布型水文モデル，土地利用変化，霞ヶ浦，流域水収支

The study of the effects of land use change to water and heat balance in a tributary watershed of Lake Kasumigaura basin
– Case of Sonobegawa and Onogawa basins –

Takuma WATANABE

Abstract

In a watershed, land use has a significant impact on the water cycle. In the case of Kasumigaura basin, land use has been changing from forest to urban and agricultural areas rapidly in recent years due to its proximity to the Tokyo metropolitan area and flat topography. Therefore, it is expected that water environment has also been changing until today. Moreover it is expected that land use and water environment would change with increase of population from now on. On the other hand, it is important to compare and evaluate to each tributary watershed individually because the characteristics of change can be different to each tributary watershed in the extensive Kasumigaura basin.

In this study, the impact of the water and heat balance due to land use change was clarified over 100 years by applying a semi-distributed hydrological model to one of the tributary watersheds, Onogawa in Kasumigaura watershed. Current meteorological condition was used throughout the simulation which allows study of the impact only of land use changes. The results were further compared with those of Sonobegawa basin, another tributary obtained in a previous study. Finally the difference of the impact of the water and heat balance due to different land use change was considered.

As a result, decrease in evapotranspiration, and net radiation, and increase in discharge, and rise in water table were found until now in comparison to the case in Meiji at Onogawa. These changes can be summarized as follows: about 30% decrease in evapotranspiration, more than twice increase in discharge, about 15% decrease in net radiation, and about 30% decrease in latent heat flux. From inspection of the distribution maps of these variables in watershed, the above changes were identified to have occurred at the areas where forest changed into urban, or agricultural areas. It was considered that the main reason of the decrease in evapotranspiration was the decrease in canopy storage, which caused increase in discharge. Also, increase in surface runoff occurred due to increase in impermeable area; increase in sensible heat flux was due to glass, and urban area that has high albedo. On the other hand, in the comparison with the Sonobegawa results, it was clearly found that there is a difference of impact on water and heat balance due to difference of increase rate of urban, agricultural area. Especially, in the Onogawa watershed, the rate of increase of urban area was larger in upstream area. Also agricultural area increase was most common in midstream area, and paddy field area was abundant in downstream areas. These land uses were distributed as a mass in Onogawa, while in Sonobegawa changes occurred in scatter, which impacted on the water and heat balance changes.

Key Words : semi-distributed hydrological mode, Land use change,
Lake Kasumigaura, catchment water budget

表目次

表 1	小野川流域諸元	29
表 2	雨量各観測所の位置とティーセン分割の重み	29
表 3	植生区分設定項目	30
表 4	明治期土地利用区分の再区分	31
表 5	植生パラメータ出典	31
表 6	植生パラメータ出典	32
表 7	植生パラメータ出典	32
表 8	植生パラメータ設定値	33
表 9	土壌パラメータ出典	34
表 10	土壌パラメータ出典	34
表 11	土壌パラメータ出典	34
表 12	土壌パラメータ設定値	35
表 13	流域パラメータ設定値	35
表 14	水収支計算結果と実測値の定量的比較-2001年(mm/year)	35
表 15	水収支計算結果と実測値の定量的比較-2002年(mm/year)	36
表 16	熱収支計算結果の比較(MJ/m ²)	36
表 17	現在と明治入力時の水収支計算結果の比較-2001年(mm/year)	37
表 18	現在と明治入力時の水収支計算結果の比較-2002年(mm/year)	37
表 19	流出量比較-2001年	38
表 20	現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較-2001年(MJ/m ² /year)	38
表 21	現在と明治入力時の熱収支計算結果の比較-2002年(MJ/m ² /year)	38
表 22	小野川・園部川流域水収支各項目まとめ-2001年	39
表 23	小野川・園部川流域水収支各項目まとめ-2002年	39
表 24	小野川・園部川流域熱収支各項目まとめ-2001年	40
表 25	小野川・園部川流域熱収支各項目まとめ-2002年	40

図目次

図 1	霞ヶ浦 7 大河流域	41
図 2	雨量観測所ティーセン分割	41
図 3	小野川流域と小野川観測所を流出点としたときの流域	42
図 4	TOPLATS 水収支イメージ図	42
図 5	TOPLATS 熱収支イメージ図	43
図 6	標高分布図	43
図 7	地形指標 λ 分布図	44
図 8	小野川流域現在(2003 年)土地利用図	44
図 9	小野川流域明治期(1903 年頃)土地利用図	45
図 10	小野川流域土地変化図	45
図 11	園部川流域現在(2003 年)土地利用図	46
図 12	園部川流域明治期(1903 年頃)土地利用図	46
図 13	園部川流域土地利用変化図	47
図 14	流域全体に占める土地利用区割合の変化(小野川)	47
図 15	流域全体に占める土地利用区割合の変化(園部川)	48
図 16	明治期から現代における土地利用区分の変化率(小野川)	48
図 17	明治期から現代における土地利用区分の変化率(園部川)	49
図 18	小野川観測所流量と流量減衰率	49
図 19	日平均流量計算結果と実測値との比較(2001 年)	50
図 20	計算値と実測値の流況曲線の比較(2001 年)	50
図 21	日平均流量計算結果と実測値との比較(2002 年)	51
図 22	計算値と実測値の流況曲線の比較(2002 年)	51
図 23	月平均蒸発散量計算結果(針葉樹林平均値)と 実測値(陸域環境研究センターアカマツ林)の比較	52
図 24	月平均蒸発散量計算結果(草地平均値)と 実測値(陸域環境研究センター草地)の比較	52
図 25	月平均蒸発散量計算結果(水田平均値)と 実測値(農業環境技術研究所つくば間瀬サイト)の比較	53
図 26	月平均蒸発散量計算結果(芝地平均値)と 実測値(気象研究所)の比較	53
図 27	蒸発散量分布計算結果(2001 年年積算値・単位 mm/year)	54
図 28	土壌水分量(第 1 層)分布計算結果(2001 年年平均値・単位%)	54
図 29	地下水面までの深さ分布計算結果(2001 年年平均値・単位 cm/year)	55
図 30	表面流出量分布計算結果(2001 年年積算値・単位 mm/year)	55
図 31	月平均正味放射量計算結果と実測値との比較-2001(W/m^2)	56
図 32	月平均潜熱フラックス計算結果と実測値との比較-2001(W/m^2)	56
図 33	月平均顕熱フラックス計算結果と実測値との比較-2001(W/m^2)	57

図 34	月平均地中熱流量計算結果と実測値との比較-2001(W/m^2)	57
図 35	正味放射量分布計算結果(2001 年年積算値・単位 $MJ/m^2/year$)	58
図 36	潜熱フラックス分布計算結果(2001 年年積算値・単位 $MJ/m^2/year$)	58
図 37	顕熱フラックス分布計算結果(2001 年年積算値・単位 $MJ/m^2/year$)	59
図 38	地中熱流量分布計算結果(2001 年年積算値・単位 $MJ/m^2/year$)	59
図 39	地表面温度分布計算結果(2001 年年積算値・単位 $K/year$)	60
図 40	流域平均熱収支計算結果まとめ-2001(W/m^2)	60
図 41	流域平均熱収支計算結果まとめ-2002(W/m^2)	61
図 42	現在と明治日平均流量計算結果の比較-2001 年	61
図 43	現在と明治計算値流況曲線-2001 年	62
図 44	現在と明治流域平均月別正味放射量 計算結果の比較-2001 年	62
図 45	現在と明治流域平均月別潜熱フラックス計算結果の比較-2001 年	63
図 46	現在と明治流域平均月別顕熱フラックス計算結果の比較-2001 年	63
図 47	現在と明治流域平均月別地中熱流量計算結果の比較-2001 年	64
図 48	現在と明治流域平均月別地表面温度 計算結果の比較-2001 年	64
図 49	年積算蒸発散量分布計算結果($mm/year$)	65
図 50	年平均土壌水分量分布計算結果(%)	66
図 51	年平均地下水面までの深さ分布計算結果(cm)	67
図 52	年積算表面流出量分布計算結果($mm/year$)	68
図 53	9-10 月蒸発散量分布計算結果(mm)	69
図 54	9-10 月不飽和第 1 層水分量分布計算結果(%)	70
図 55	9-10 月地下水面までの深さ分布計算結果(cm)	71
図 56	9-10 月表面流出量分布計算結果(mm)	72
図 57	年積算正味放射量分布計算結果($MJ/year$)	73
図 58	年積算潜熱フラックス計算結果($MJ/year$)	74
図 59	年積算顕熱フラックス分布計算結果($MJ/year$)	75
図 60	年積算地中熱流量分布計算結果($MJ/year$)	76
図 61	年平均地表面温度分布計算結果(K)	77
図 62	日別年平均正味放射量相対頻度分布	78
図 63	日別年平均潜熱フラックス相対頻度分布	78
図 64	日別年平均顕熱フラックス相対頻度分布	79
図 65	日別年平均地中熱流量相対頻度分布	79
図 66	夏季(7-8 月)正味放射量分布計算結果(MJ)	80
図 67	夏季(7-8 月)潜熱フラックス分布計算結果(MJ)	81
図 68	夏季(7-8 月)顕熱フラックス分布計算結果(MJ)	82
図 69	夏季(7-8 月)地中熱流量分布計算結果(MJ)	83
図 70	夏季(7-8 月)地表面温度分布計算結果(K)	84
図 71	夏季(7-8 月)日平均正味放射量相対頻度分布	85
図 72	夏季(7-8 月)日平均潜熱フラックス相対頻度分布	85
図 73	夏季(7-8 月)日平均顕熱フラックス相対頻度分布	86

図 74	夏季(7-8月)日平均地中熱流量相対頻度分布	86
図 75	冬季(1-2月)正味放射量分布計算結果(MJ)	87
図 76	冬季(1-2月)潜熱フラックス分布計算結果(MJ)	88
図 77	冬季(1-2月)顕熱フラックス分布計算結果(MJ)	89
図 78	冬季(1-2月)地中熱流量分布計算結果(MJ)	90
図 79	冬季(1-2月)地表面温度分布計算結果(K)	91
図 80	冬季(1-2月)日平均正味放射量相対頻度分布	92
図 81	冬季(1-2月)日平均潜熱フラックス相対頻度分布	92
図 82	冬季(1-2月)日平均顕熱フラックス相対頻度分布	93
図 83	冬季(1-2月)日平均地中熱流量相対頻度分布	93

1. はじめに

霞ヶ浦は茨城県の南東に位置し、湖面積 220 km^2 ・流域面積 2156.7 km^2 の湖である。その広大な流域は茨城・栃木・千葉の3県にまたがり、流域内の人口は約97万人(2012年)、流域面積に対する人口密度は約454人/ km^2 であり、日本の平均(約343人/ km^2)を上回る。流域はそのほとんどが農耕地として開けているが、近年、鹿島臨海工業地帯の造成や筑波研究学園都市の建設などによって流域内での土地利用は多様に変化し、市街地の増加と畑地の減少が目立っている(国土交通省, 2012)。さらに近年首都圏・都市域の拡大と人口増加を背景とした水資源開発(藤田ら, 2006)がすすめられ、土地利用の変化により流出特性をはじめとする水・熱収支特性が変化していくと予想される。流域ごとの土地利用の変化に伴う水・熱収支の変化特性を比較し土地利用変化傾向の異なる支流ごとに水循環への影響の特徴を把握することは重要である。

霞ヶ浦流域に関しては、村岡(1981)などで水収支についてまとめられており、また流域のモデル構築においては、藤田ら(2006)が水物質循環モデルを構築しており、安倍ら(1997)では水循環の再現を目的として分布型水文循環モデルの構築が試みられた。しかし、これらの研究では霞ヶ浦流域における土地利用変化の影響は評価されていない。そこで埴(2007)では霞ヶ浦流域の支流の一つである園部川流域において分布型流出モデルを構築し約100年前からの土地利用の変化による水収支・熱収支に与える影響が解明された。その結果現在では都市域・畑に土地利用が変化した場所での正味放射量の減少や、流域全体で流出量の増加等が見られた。

しかし、流域の土地利用の変化傾向は各支流により異なり、複数の流域において土地利用の変化が水・熱収支へ与える影響を比較することが重要である。

本研究では霞ヶ浦支流の一つである小野川流域において分布型モデルを適用して約100年前からの土地利用変化による水・熱収支への影響を評価し、その変化の傾向を埴(2007)において研究された園部川流域と比較することで支流毎の土地利用変化の違いによる水・熱収支特性への影響の差異を調べ考察することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 対象地域

研究対象地域は霞ヶ浦支流の小野川流域とする。流域の所在を図1に、山田(2007)による流域諸元を表1に示す。藤田ら(2006)によると小野川はつくば市小野崎に源を発し南東へ流れ、稲敷市で霞ヶ浦に注ぐ。流域面積は 175.7 km^2 、水源から河口までの距離と定義される河川延長は 36.45 km である。山田(2007)によると小野川流域は平均傾斜角・最大比高が小さく非常に平坦な流域である。

2.2 使用データ

2.2.1 モデル入力データ

モデル入力データは気象項目の降水量、気温、露天温度、風速、気圧、下向き短波放射量・下向き長波放射量と、標高、土地利用(現在・明治期)である。気象項目は、対象期間が同じことから(埴, 2007)で使用されたデータを用いた。以下にその概要を記す。

i. 降水量

降水量は、小野川流域周辺の観測所のうち、気象庁(AMeDAS)のつくば・江戸崎観測所、国土交通省霞ヶ浦河川事務所の牛久・土浦観測所、茨城県土木部の木原・小野川・阿見町観測所、国立環境研究所霞ヶ浦臨湖実験施設(NIES)のデータを使用した。AMeDAS・霞ヶ浦河川事務所・茨城県土木部

については1時間毎のデータであり、臨湖実験施設は10分毎のデータであるためこれを積算し時間雨量データを作成した。解析にあたってはこれらの地点の測定値を流域内でティーセン分割法により重み付け平均することによりその流域平均値をモデル入力値とした。

ティーセン分割法では各観測所に対応した多角形の流域内面積を求め、それを流域面積で除すことで各観測所の重みを求めることで流域平均の雨量を算出した。各観測所の位置とティーセン分割の結果を図2・表2に示す。なお、期間内で欠測があった箇所についてはその観測点を除いてティーセン分割を行った。

ii. 気温・露天温度・風速・気圧

気温・露天温度・風速・気圧に関しては筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場ルーチン観測データを使用した。

iii. 下向き短波放射量・下向き長波放射量

下向き短波放射量・下向き長波放射量に関しては筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場4成分放射計観測データを使用した。なお、2001年2月2日19時以前の値については埴(2007)に従って近藤(1994)による方法を用いて気温・露天温度・日照時間から推定された。

この方法では、快晴時の長波放射量 L_{df} は以下の式で与えられる。

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

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

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。

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

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。

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

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

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

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

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。

iv. 地形

標高データは、国土地理院による「数値地図 50 m メッシュ(標高), 日本Ⅱ CD-ROM」を使用した。解析の際は ArcGIS 上で IDW(Inverse Distance Weighted)法を用いて内挿補完することで DEM(Digital Elevation Model)データを作成し、それを 60m メッシュに分割することでデータを作成した。

v. 土地利用

土地利用区分に関しては園部川流域との比較のために現在・明治において埴(2007)と同様の区分を行った。モデル入力に当たり GIS 上でラスタデータのメッシュサイズを 60m メッシュに設定しデータを作成した。

v-1. 現在

現在の土地利用データは、環境省自然環境局生物多様性センター植生調査第 6 回調査(2003)から得られた 2 万 5 千分の 1 植生図の GIS データを使用した。この GIS データでは植生が群落ごとに細かく分類されているが、今回の解析では埴(2007)と同様にこれらの区分を針葉樹林・広葉樹林・草地・短草地・水田・畑・市街地・水面の 8 つに再分類した。具体的な区分法について表 3 に示す。

v-2. 明治

明治期の土地利用データは、王尾(2004)による霞ヶ浦・小貝川・鬼怒川流域土地利用 GIS データを使用した。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 250m メッシュのラスタデータであり土地利用を針葉樹林・広葉樹林・伐採地・荒地・田・樹木畑・畑・市街地・河川湖沼の 9 つに分類している。解析においてはこの 9 分類を現在土地利用と対応させるために 7 区分に再分類し、さらにメッシュサイズを 60m 四方に再分割した。区分法について表 4 に示す。

2.2.2 検証データ

モデルの計算値との検証として河川流量と熱収支各項目について実測値を用いて検証を行った。

i. 河川流量

今回比較に使用した河川流量データは国土交通省霞ヶ浦河川事務所の小野川観測所の流量観測データである。これは 1 時間毎の水位実測値から水位流量曲線を用いて流量に変換されたものである。今回のデータでは、水位流量曲線は 2000 年に作成されたものを使用している(霞ヶ浦工事事務所, 2000)。またこの観測所は小野川流域の中流部に位置しており(図 3)、一方でモデル計算は流域流出点における流量を計算したため、今回は比較のために小野川流域全体の面積を小野川観測所における流域面積(=123.3km²)で除すことで面積比を求め、その値(=1.42)を乗じた値を実測値とした。

ii. 蒸発散量

今回蒸発散量の比較対象として、つくば市およびその周辺の様々な土地利用で観測された蒸発散量データを使用した。使用した観測値は、針葉樹林・草地における計算値の比較に筑波大学陸域環境研究センター内のアカマツ林・草地での観測値(藪崎ら, 2005), 水田・芝地の比較にそれぞれ農業環境技術研究所のつくば市間瀬サイトの観測値, 気象研究所での観測値(小野, 2008)を使用した。

観測値はそれぞれ, アカマツ林: 1984年9月–1985年8月, 草地: 1980・1981・1984年9月–1985年8月の平均値, 水田: 2004年–2006年の平均値, 芝地: 2001年の値であり, 月平均値を比較した。

iii. 熱収支

今回比較の対象とした熱収支項目は正味放射量 R_n ・顕熱フラックス LE ・潜熱フラックス H ・地中熱流量 G の4項目であり, データは陸域環境研究センター圃場で観測された1時間平均値を使用した。なおこのうち直接測定されているのは正味放射量・顕熱フラックス・地中熱流量の3項目であり潜熱フラックスはそれらの残差として計算した。

$$LE = R_n - H - G \quad (7)$$

2.3 適用モデル

2.3.1 モデル概要

今回適用したモデルは, TOPLATS(TOPMODEL-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme)である。TOPLATSは Beven and Kirkby (1979)により提案された準分布型流出モデル TOPMODEL(Benen and Kirkby, 1979 ; Beven ら, 1995)をベースとしている。準分布型とは, 地下水面より上の不飽和域・表層は分布型, 地下水面より下の飽和域は集中型として計算するもので, その特徴は DEM(Digital Elevation Model)から計算される地形指標をもとに表層・不飽和層の空間的な乾湿判定, 地表流の発生の空間的な算定ができる点にある。

TOPLATSは Famiglietti et al. (1992) によって基本形が提案され, TOPMODEL では考慮されていなかった地表面と大気間の水・熱輸送の計算, 植生の影響を考慮でき, 樹冠水収支の計算などができる点に特徴がある。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)をもとに埴(2007)によって変更されたものである。変更点としては, 裸地面において土壌抵抗関連のパラメータを設定しなかった場合抵抗が極めて小さくなり蒸発散量が過大に評価されていたものを, 強制的に0とするような設定などがされている。TOPLATSの構造図を図4・5に示す。

TOPLATSでは不飽和域である土壌を上から不飽和層1, 不飽和層2, 不飽和層3, 不飽和層4, の4層に分けて計算しており, 今回の計算では層1: 地表面から0.5mまで, 層2: 0.5mから1.5mまで, 層3: 1.5mから2.5mまで, 層4: 2.5mから地下水面までと設定した。

Piters-Lidard et al.(1997)によりモデルの主な計算手順を以下に示す。

2.3.1-1 水収支計算

i 樹冠域水収支

樹冠の水収支は入力された総雨量における正味雨量(林内雨)や樹冠からの蒸発散量の計算などからなる。

- 各タイムステップの樹冠貯留量は以下の式で計算される。

$$\frac{dW_c}{dt} = P - E_{wc} - P_{net} \quad 0 \leq W_c \leq W_{sc} \quad (8)$$

ここで、 t は時間、 W_c は樹冠貯留量、 P は総雨量、 E_{wc} は湿潤樹冠からの蒸発量、 P_{net} は正味雨量、 W_{sc} は最大樹冠貯留量であり、 W_{sc} はDickinson(1984)より葉面積指数(LAI, Leaf Area Index)の関数として以下の式で与えられる。

$$W_{sc} = 0.0002 \times LAI \quad (9)$$

また、今回の計算での1タイムステップの時間は3600(s)である。

- 湿潤樹冠からの蒸発量 E_{wc} は以下の式で計算される。

$$E_{wc} = E_{pwc} \cdot F_{wc} \quad (10)$$

$$E_{pwc} = \frac{LE_p}{L \cdot \rho_w} \quad (11)$$

ここで、 E_{pwc} は可能樹冠蒸発量、 F_{wc} は湿潤樹冠の割合、 LE_p は可能蒸発散量相当の潜熱フラックス、 L は蒸発潜熱、 ρ_w は水の密度であり、湿潤樹冠の割合 F_{wc} は可能樹冠蒸発量 E_{pwc} と樹冠貯留量から以下の式で計算される。

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{wc} = \left(\frac{W_c}{W_{sc}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (E_{pwc} \geq 0) \\ F_{wc} = 1 \quad (E_{pwc} \leq 0) \end{array} \right. \quad (12)$$

また、可能蒸発散量相当の潜熱フラックス LE_p は、以下の式で計算される。

$$LE_p = \frac{\rho_a \cdot c_p}{\gamma \cdot r_{av}} (e_s - e_a) \quad (14)$$

$$e_s = 6.11 \exp \left(\frac{17.27 T_{ps}}{237.3 + T_{ps}} \right) \quad (16)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 c_p は空気の比熱、 r_{av} は水蒸気の空気力学的抵抗、 e_s は飽和水蒸気圧、 e_a は実水蒸気圧であり、 T_{ps} は可能蒸発散時の地表面温度(°C)である。

また、 γ は乾湿計定数で以下の式で与えられる値である。

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P_{air}}{0.622L} \quad (17)$$

ここで、 P_{air} は気圧(hPa)である。

r_{av} は以下の式で計算される。

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{av} = r_{sf} \text{ (裸地面・湿潤樹冠の場合)} \\ r_{av} = r_{par} + r_{vpd} + r_{tmp} + r_{sf} \text{ (乾燥樹冠の場合)} \end{array} \right. \quad (18)$$

$$r_{av} = r_{par} + r_{vpd} + r_{tmp} + r_{sf} \text{ (乾燥樹冠の場合)} \quad (19)$$

ここで、 r_{sf} は表面における水蒸気の空気力学的抵抗、 r_{par} は光合成有効放射 (PAR : Photosynthetically Active Radiation) 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である。

r_{sf} は以下の式で計算される。

$$r_{sf} = \frac{1}{k^2 u} \ln\left(\frac{Z_a - Z_{pd}}{Z_{0h}}\right) \ln\left(\frac{Z_w - Z_{pd}}{Z_{0m}}\right) \quad (20)$$

ここで、 k はカルマン定数(=0.4)、 u は風速、 Z_a は風速以外の気象データの測定高、 Z_w は風速の測定高、 Z_{pd} は地面修正量、 Z_{0h} は熱輸送における粗度長、 Z_{0m} は運動量輸送における粗度長である。

r_{par} は以下の式で計算される。

$$r_{par} = \frac{1 + f_{par}}{f_{par} + \frac{r_{smin}}{r_{smax}}} \quad (21)$$

$$f_{par} = 0.55(1 - \alpha) \frac{R_{sd}}{R_{gl}} \frac{2}{LAI} \quad (22)$$

ここで r_{smin} は最小気孔抵抗、 r_{smax} は最大気孔抵抗、 α はアルベド、 R_{sd} は下向き短波放射量、 R_{gl} は放射調整パラメータである。

r_{vpd} は以下の式で計算される。

$$r_{vpd} = \frac{1}{1 - \beta(e_s - e_a)} \quad (23)$$

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)である。

r_{imp} は以下の式で計算される。

$$r_{imp} = \frac{1}{1 - B(T_{ref} - T_a)^2} \quad (24)$$

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_a は気温である。

- ・乾燥樹冠からの蒸散量 E_{dc} は，可能蒸散量 E_{pdc} と蒸散能 E_c の比較により小さい値を用いる．

$$E_{dc} = \min[E_{pdc}, E_c] \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{pdc} = \frac{LE_p}{L \cdot \rho_w} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_c = \frac{P_{soil} - P_{leaf}}{R_{soil} - R_{plant}} \end{array} \right. \quad (27)$$

ここで， P_{leaf} は葉の最終水ポテンシャルであり，その他の値は以下の式で与えられる．

$$P_{soil} = -\frac{Ps}{R_s^{\frac{1}{B}}} \quad (28)$$

$$R_{soil} = \frac{1}{A_{root} \cdot K_{zone} \cdot D_{root}} \quad (29)$$

$$R_{plant} = \frac{R_{root}}{D_{root}} \quad (30)$$

ここで， Ps は空気侵入値， B は Brooks and Corey(1964)による間隙径分布指数， 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， R_{root} は根抵抗である．

- ・裸地面からの蒸発量 E_{bs} は，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 0 とし
て計算した．

- ・また，正味雨量 P_{net} は，以下の式で計算される．

$$P_{net} = (P - E_{wc}) - \frac{W_{sc} - W_c}{dt} \quad (31)$$

ii 不飽和域水収支

土壌中の水収支は不飽和層 1~4 の各層ごとに計算される。

・各タイムステップで計算される各層の土壌水分量は以下の式で表わされる。

不飽和層 1

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 \frac{d\theta_1}{dt} = f_{bs}i_{bs} + f_v f_{r,1} i_{v,1} + f_v f_{r,lz} i_{v,lz} + d - f_{bs}e_{bs} - f_v f_{r,1} t_{v,1} - g_1 \quad (z_1 > 0) \\ \theta_1 = \theta \quad (z_1 = \theta) \end{array} \right. \quad (32)$$

不飽和層 2・3

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{2,3} \frac{d\theta_{2,3}}{dt} = g_{1,2} - g_{2,3} + d_{1,2} - d_{2,3} - f_{v,2,3} t_{v,2,3} \quad (z_{2,3} > \theta) \\ \theta_{2,3} = \theta \quad (z_{2,3} = \theta) \end{array} \right. \quad (34)$$

不飽和層 4

$$z_4 \frac{d\theta_4}{dt} = g - g_4 \quad (36)$$

ここで、 z は各層の深さ、 θ は各層の土壌水分量、 f_{bs} は裸地面の割合、 i_{bs} は裸地面の浸透量、 f_v は植生面の割合、 i_v は植生面の浸透量、 d は下層からの毛管上昇量、 e_{bs} は裸地面からの蒸発量、 e_{dc} は乾燥樹冠からの蒸発量、 t_v は植生面からの蒸散量、 g は下層への排水量である。下付き添え字はそれぞれ、 lz : 対象とする層の下層、1 : 不飽和層 1, 2 : 不飽和層 2, 3 : 不飽和層 3, 4 : 不飽和層 4 を表す。

・飽和・不飽和の判定

Z_w を各グリッドにおける地下水面までの深さ、 P_s を空気侵入値とすると、表層において

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_w \leq P_s \quad \text{のとき飽和} \\ Z_w > P_s \quad \text{のとき不飽和} \end{array} \right. \quad (37)$$

となる。

- ・ 表層不飽和の場合
- ・ 地表面における実浸透量 I は浸透能 I_{cap} と正味雨量 P_{net} の比較により小さい値を用いる.

$$I = \min[I_{cap}, P_{net}] \quad (39)$$

浸透能 I_{cap} は累積浸透量 I_{cum} と土壌パラメータから以下の式で計算される.

$$I_{cap} = CK_s \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4CK_s I_{cum}}{S^2} - 1}} \right) \quad (40)$$

$$C = 0.5 \left(1 + \left(\frac{\theta_{rz} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{2+3B}{B}} \right) \quad (41)$$

ここで, C は重力項, θ_s は飽和土壌水分, θ_r は残留土壌水分, B は Brooks and Corey(1964)による間隙径分布指標, K_s は地表面の飽和透水係数である.

- ・ 表層飽和の場合
- ・ 土壌が飽和した際には飽和表面流出 R_{sat} が発生する.

$$R_{sat} = P_{net} \quad (42)$$

ここで, P_{net} は正味雨量である.

- ・ 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 Horton 型地表流 R_{inf} が発生する

$$R_{inf} = P_{net} - I \quad (43)$$

- ・ 各層水分移動
- ・ 各 4 層における下層への排水量 Gd_{zone} は以下の式で計算される.

$$Gd_{zone} = K_s \left[\frac{\theta_{zone} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{2+3B}{B}} \quad (44)$$

下付き添え字の $zone$ は土壌各 4 層を表す。上記の計算が各 4 層について行われる。

- 各 4 層における上層への拡散量 D_{zone} は以下の式で計算される。

$$D_{zone} = D(\theta) \frac{(\theta_{zone} - \theta_{zone+1})}{\left(z_{zone}/2 - z_{zone+1}/2 \right)} \quad (45)$$

$$D(\theta) = BK_{s,ave} \frac{\psi_b}{\theta_s - \theta_r} \left[\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{2+3B}{B}+2} \quad (46)$$

$$K_{s,ave} = \frac{1}{\frac{1}{2K_{zone}} + \frac{1}{2K_{zone+1}}} \quad (47)$$

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

ここで下付き添え字の + 1 は計算対象の層の下の層を表す。上記の計算が各 4 層について行われる。

- 飽和透水係数の鉛直方向の変化は以下の式で表わされる。

$$K_1 = K_s \exp\left(-f \frac{Z_1}{2}\right) \quad (49)$$

$$K_2 = K_s \exp\left(-f \left(Z_1 + \frac{Z_2}{2}\right)\right) \quad (50)$$

$$K_3 = K_s \exp\left(-f \left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_3}{2}\right)\right) \quad (51)$$

$$K_4 = K_s \exp\left(-f \left(Z_1 + Z_2 + Z_3 + \frac{Z_4}{2}\right)\right) \quad (52)$$

ここで、 K は各層における飽和透水係数、 f は飽和透水係数の指数関数的な減少を表す TOPMODEL パラメータ、下付き添え字はそれぞれ 1: 不飽和層 1, 2: 不飽和層 2, 3: 不飽和層 3,

4：不飽和層 4 を表す。

iii 飽和域水収支

- ・地形指標(Topographic Index)

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であり以下の式で計算される。

$$\lambda_i = \ln\left(\frac{a}{\tan B}\right) \quad (53)$$

ここで、 λ_i は地点 i における地形指標、 a は地点 i から排出される等高線単位長さ当たりの集水面積、 $\tan B$ は傾斜勾配を表す。今回は計算には GRIDATB program(Beven, 1995)を使用し、流域の DEM データから算出した。上流部において傾斜勾配のない平坦な場所では地形指標が計算されなかったため、周囲のグリッドの値から推定して設定した。標高の分布図を図 6 に、 λ の分布図を図 7 に示す。

- ・各グリッドにおける地下水面までの深さ Z_w は以下の式で計算される。

$$Z_w = \bar{Z}_w - \frac{1}{f}(\bar{\lambda} - \lambda) \quad (54)$$

ここで、 $\bar{\lambda}$ は流域平均を表す。

- ・飽和域からの基底流出 Q_b は Sivapalan et al.(1987)から以下の式で計算される。

$$Q_b = Q_0 \exp(-f \cdot \bar{Z}_w) \quad (55)$$

$$Q_0 = AT_e \exp(-\lambda) \quad (56)$$

ここで、 A は流域面積、 T_e は流域平均の飽和透水量係数である。

2.3.1-2 熱収支計算

熱収支式は以下のようなになる。

Bh yhb

$$Rn = LE + H + G \quad (57)$$

ここで、 Rn は正味放射量、 LE は潜熱フラックス、 H は顕熱フラックス、 G 地中熱流量である

i 正味放射量

正味放射量 Rn は以下の式で計算される

$$Rn = R_{sd}(1 - \alpha) + \varepsilon R_{ld} + \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (58)$$

ここで、 R_{sd} 下向き短波放射量、 α はアルベド、 ε は射出率、 R_{ld} は下向き長波放射量、 σ はステファン - ボルツマン係数、 T_s は地表面温度である。

ii 潜熱フラックス

潜熱フラックス 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

$$LE = L \cdot E_{bs} \quad (59)$$

植生面の場合

$$LE = L \cdot (E_{wc} + E_{dc}) \quad (60)$$

iii 顕熱フラックス

顕熱フラックス H は以下の式で計算される。

$$H = \frac{\rho_a c_p}{r_{ah}} (T_s - T_a) \quad (61)$$

$$\rho_a = \frac{P_a}{r_{ah} T_a} \quad (62)$$

$$r_{ah} = 287(1 + 0.680q) \quad (63)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 C_a は空気の比熱、 T_a は気温である、 T_s は地表面の温度、 P_a は気圧、 q は比湿である。

iv 地中熱流量

地中熱流量 G は以下の式で計算される。

$$G = \frac{k_1 k_2 dt \cdot 2(T_s - T_p) + c_1 k_2 z_d^2 (T_s - T_m)}{G_d} \quad (64)$$

ここで、 k は熱伝導率、 T_p は恒温層の温度、 c は熱容量、 z_d は恒温層の深さ、 T_m は土壌中層温度、
下付き添え字の1は不飽和層1の値を、2は不飽和層1・2の平均値を表す。
 G_d は以下の式で与えられる。

$$G_d = k_1 z_d dt + 2k_2 z_m dt + c_2 z_d^2 z_m \quad (65)$$

z_m は T_m の示す深さである。

2.3.2 計算方法

今回は2001年1月1日から2001年12月31日までをキャリブレーション期間とし、2002年1月1日から2002年12月31日までをバリデーション期間として計算した。また、初期値パラメータの影響を除くため事前に1年間の予備期間(spin-up period)を設けた。

2.3.3 モデルパラメータの設定

TOPLATSにおいては各メッシュの土地利用区分に対応した植生・土壌パラメータを設定している。今回は埴(2007)により設定された各パラメータを適用した。埴(2007)から植生パラメータの項目と出典を表5-7に、植生パラメータの設定値を表8に、土壌パラメータの項目と出典を表9-11に、土壌パラメータの設定値を表12にそれぞれ示す。植生パラメータについては約2カ月に一度更新し季節変化を考慮した。

・流域平均飽和透水係数 K の設定

Brutsaert and Lopez(1998)の手法を用いて小野川観測点における2000年から2005年の日平均流量データから流域平均の飽和透水係数の推定を行った。日平均流量データは小野川観測点における1時間毎の流量観測データから作成した。日平均流量と流量減衰率を両対数グラフにプロットし、傾き3の直線と1の直線でフィッティングしそれぞれの切片の値から以下の式で流域平均の飽和透水係数を推定した。

$$K = 0.5757 \left(\frac{a_1}{a_3} \right)^{1/2} A(LD)^{-2} \quad (66)$$

ここで a_1 は傾き1の直線の切片、 a_3 は傾き3の直線の切片、 A は流域面積、 L は流路延長、 D は帯水層の厚さである。今回の計算ではBrutsaert and Lopez(1998)の手法を参考に全プロットの回帰直線の切片を a_i とした。また A 、 L はそれぞれ国土地理院の流域自然環境調査作業(霞ヶ浦流域地区)

GIS データをもとに ArcGIS 上で算出した値から $A=176.5\text{km}^2$, $L=81.7\text{km}$ とした。 D については藤田ら(2006)において霞ヶ浦流域におけるボーリング柱状図から流域平均の帯水層, 難透水層の厚さが推定されており, これを参考に $D=20\text{m}$ と設定した。

2.4 土地利用変化比較

小野川流域と園部川流域の現在・明治期土地利用図, 土地利用割合, 土地利用変化図を示す(図 8-17)。小野川流域の現在の土地利用では, 畑地が全体の約 30%と一番多く次に市街地, 水田, 針葉樹林と続いている。畑地と市街地で流域全体の 50%以上を占めており, 宅地化・市街化が進んでいる流域であるといえる。特に流域の上流部の北西方向はつくば駅や筑波大学の周辺に当たり, 筑波研究学園都市の開発により都市化した地域である。下流の河川周辺には水田が広く分布しており, その周辺の台地上に畑地や針葉樹林・広葉樹林が分布している。

一方明治期の土地利用では針葉樹林が最も卓越しており全体の半分以上を占めていた。土地利用変化としては針葉樹林から畑地に変化した割合が最も多く, 次に市街地への変化が多い。土地利用変化傾向を比較すると小野川流域の方が市街地の増加量が圧倒的に大きいことが分かる。

3. 研究結果および考察

3.1 パラメータの決定

流量と流量減衰率をプロットしフィッティングをした結果を図 18 に示す。ここから $a_1=0.0974$, $a_2=0.004$ となり, 式 66 から流域平均の飽和透水係数は $K=3.7 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ と推定された。

雨水貯留浸透技術協会(2007)によると, つくば市域ローム層の飽和透水係数の平均値は $4.44 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ であり, また国土交通省土木研究所(2001)によると小野川の西部に位置し牛久沼流入河川である谷田川流域の透水係数は $7.2 \times 10^{-7} \sim 8.5 \times 10^{-6}(\text{m/s})$ とされており, 今回の計算結果はこの地域の値としては 1~2 オーダー高い値となった。

この値を初期値とした計算結果を実測値と比較しそのほかの流域パラメータを調整することでキャリブレーションをした。具体的には飽和透水係数 $K(\text{m/s})$, TOPMODEL パラメータ f , 完全飽和時の地中流量(m^3/s), 初期地下水面までの深さ $Z_w(\text{m})$ を調整した。TOPMODEL パラメータ f は主に流出のピークからの流量の減衰率を示す指標であり主に基底流出の算出で式 55 の計算に用いられる。完全飽和時の地中流量は飽和透水量係数の値に流域面積を乗じることで得られ調整の結果最終的な値は $6.6 \times 10^4(\text{m}^3/\text{s})$ となった。最終的な流域パラメータの設定値を表 13 に示す。

3.2 小野川

3.2.1 現在

3.2.1-1 水収支

・流出量

2001 年・2002 年の日平均流出量の計算結果と実測値との比較及び流況曲線の比較を図 19-22 に, 年間収支の定量的比較結果を表 14・15 に示す。実測値に関しては小野川観測点の観測値に観測点の流域面積と小野川流域の面積比から 1.42 倍した値を使用した。

図 19・21 の結果をみると, 概ね低水時の基底流出に関しては再現性が良いが, 降雨イベント後の

流出の再現性が良好ではない。特にピーク後の流量の減衰が実際よりも遅く、降雨イベントが継続すると流量が大きくなる傾向が見られる。2002年に関しては流出ピーク時の流量がかなり過小に評価される傾向が見られた。

年間積算の流出量において、2001年は相対誤差45%と過大評価されたがこれは前述のように降雨後の流量の減衰が少なく計算され、流量の大きい期間が長かったためであると考えられる。2001年は10月10日に146(mm/day)と非常に降水量が多くその後の流出量が多い。またそれ以前の夏季(7~8月)には降水量が少なく渇水の期間が存在している。

一方で2002年は相対誤差-11%と過小評価された。基底流出時の再現性が良好なのに対し降雨後のピークがかなり過小に計算されたためだと考えられる。

ここで、計算値と実測値の誤差の評価指標として今回は Nash-Sutcliffe 指標 NS (Nash and Sutcliffe, 1970)を用いた。この指標では各時間の計算値と実測値との誤差からモデル計算の精度を評価し、 NS が1に近い程モデルの再現性が高いとされている。

Nash-Sutcliffe 指標 NS は以下の式で求められる。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \{Q_o(i) - Q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^n \{Q_o(i) - \overline{Q_o}\}^2} \quad (67)$$

ここで、 Q_o は流出量の実測値、 Q_c は流出量の計算値、 $\overline{Q_o}$ は流出量実測値の平均値、 n は計算時間数、 i は時間を表す。今回の計算では2001年において $NS=0.41$ 、2002年において $NS=0.34$ となりモデルの精度向上の余地があるといえる。

・蒸発散量

2001年の各土地利用における蒸発散量計算結果と実測値の月平均値の比較を図23-26に、年積算値の流域分布図を図27に示す。月別値の計算結果をみるといずれも8月の値が低くなっている。計算期間とした2001年は7・8月に極端な渇水期が存在し、7月の流域月積算雨量は18mm、8月は80mmである。そのためこの期間は表層土壌水分量が減少し蒸発散量が減少したと考えられる。その点を考慮し実測値との比較についてみると特に水田の比較において、計算値が冬季の値をかなり過小評価している点が顕著であった。これは植生パラメータである樹冠貯留計算におけるLAIの値を、冬季(1~4, 11~12月)に低く設定したためであると考えられる(表8)。

また分布計算結果について、分布図を土地利用図と比較すると市街地で顕著に低い値が見られ、次に水田、畑地と続いており、蒸発散量の多い地域は森林(特に針葉樹林)と同様の場所であった。土地利用との関係性が顕著に見られた。今回の計算では市街地における蒸発量は0として計算したためこのような結果になったと考えられる。

・土壌水分量

2001年の不飽和第1層の土壌水分量年平均値分布図を図28に示す。土壌水分量が多い地点は主に地形指標が大きい地点であった。地形指標は土壌の飽和しやすさを示す指標であり、土壌水分量に密接に影響していることが分かった。土地利用と比較すると市街地での土壌水分量が多くなっている。これは蒸発散量が市街地は圧倒的に少ない(ほぼ0)ためその分の水分量が土壌に浸透したためであ

ると考えられる。

- ・地下水面までの深さ(地下水貯留量)

2001年の地下水面までの深さの年平均値分布図を図 25 に示す。負の値をとる地点は地下水面が地表面よりも上に計算されたことを表す。値は地形指標と同じ傾向を示した。

- ・表面流出量

2001年の表面流出量の分布図を図 26 に示す。表面流出量も地形指標の大きい地点での値が大きく、河道周辺や流域上流部の窪地などでの流出が特に多い。土地利用では市街地・水田地帯で流出が見られ、土壌パラメータである地表の飽和透水係数が小さいことが影響していると考えられる。水田地帯はほとんどが地形指標の高い場所であり両方の要素が流出の増加に効いているといえる。

3.2.1-2 熱収支

- ・熱収支各項目の比較

月別熱収支各項目の計算結果と実測値との比較結果を図 31-34 に示す。今回熱収支項目の比較に使用した実測値は陸域環境研究センターのルーチン観測データを使用し、計算値については流域内の全草地ピクセルの平均値を用いた。

この結果によると、熱収支は各項目ともに年間を通しての変化傾向は再現性が良いといえる。潜熱フラックスについては夏季(7月)のピーク時の値を過小評価しており、一方で顕熱フラックスについては逆に過小評価する傾向が見られる。夏季については前述の通り、降水が非常に少なくモデル計算においてはその入力降水量が少ないことが蒸発散量の減少につながり結果として潜熱フラックスが低い値をとっていると考えられる。

- ・正味放射量

2001年の年積算正味放射量分布図を図 35 に示す。高い値をとるのは針葉樹林、広葉樹林であり、順に畑地、草地、水田、市街地と低くなっている。とくに草地・短草地など地表面のアルベドが高い場所では正味放射量は低い値をとっている。

- ・潜熱フラックス

2001年の年積算潜熱フラックス分布図を図 36 に示す。図 28 の土壌水分量の分布に類似した傾向が見られた。土地利用としては同様に市街地・畑地で低いが、水田でも低い値をとっている。また地形指標とも関連が見られ河道から少し離れた台地部分で高い値を示していることが分かる。

- ・顕熱フラックス

2001年の年積算顕熱フラックス分布図を図 37 に示す。顕熱フラックスは潜熱フラックスの分布と対応関係が見られる。短草地において特に低くその他の植生域でも低い値をとっている。

- ・地中熱流量

2001年の年積算地中熱流量分布図を図 38 に示す。草地や短草地での値が小さく市街地では非常に高い値を示した。また地形指標の大きい場所での値が大きくなっている。

- ・地表面温度

2001年の年平均地表面温度分布図を図 39 に示す。ここでも、土地利用区分と顕著な関係が見られる。

- ・熱収支各項目まとめ

2001年・2002年の熱収支各項目の計算結果のまとめを図 40・41、表 16 に示す。2001年・2002

年共に年変化や各項目の割合等の傾向は類似していた。正味放射量に占める割合としては潜熱フラックスの方が顕熱フラックスより若干大きく、また概ね4月から10月にかけては潜熱フラックスが大きく11月から4月は顕熱フラックスが大きな値をとっている。

3.2.2 明治期

上記の現在土地利用時の計算結果を踏まえ次に降水量などの気象入力データはそのままに、明治期の土地利用を適用して計算を行い現在の計算結果と比較した。

3.2.2-1 水収支

・変化の再現性の検討

2001年・2002年の現在と明治期土地利用適用時の水収支各項目の比較を表17・18に示す。各年の現在・明治において流出量や蒸発散量の値には差が見られるものの、明治の値に対する現在の値(%)はどちらの年でもおおよそ同程度の値を示している。共に明治から現在への土地利用において正味降水量の増加・流出量の増加・蒸発散量の減少など大小変化については同一の変化傾向を示しており、このことから明治と現在の土地利用変化による水収支の変化が認められ、その影響についても支障ないとする。

・水収支比較

流出量の比較について、現在と明治の日平均流量と流況曲線の比較グラフを図42・43に示す。また、流況曲線から実測値、現在計算値、明治計算値についての豊水流量(95日流量)、平水流量(185日流量)、低水流量(275日流量)、渇水流量(355日流量)および年最大流量・最小流量の値を表19に示す。

これらの結果から明治期では特に流出量が少ないという特徴が見られた。年間水収支でみると2001年は明治から現在で流出量が約2倍、2002年では約3倍に増加している。特に基底流出成分の増加の影響が大きい。この、流出量の増加の要因には植生による降雨遮断の影響が考えられる。遮断量はどちらの年でも約40%と大きく減少しておりそのことが地表面に直接届く正味降水量(林内雨)の増加につながっている。明治期の土地利用では針葉樹林が卓越しておりその樹冠に降水が捉えられることで土壌への浸透の減少、樹冠からの蒸発散による減少が起きていたと考えられる。それが現在では針葉樹林から畑地・市街地へと土地利用が変化したため遮断量が減少、結果流出量の増加につながったといえる。

蒸発散量の減少も大きく見られ、降水量に対して70%近くを占めていたのが50%前後へと減少しているが、その減少のほとんどは蒸発量の減少に起因しており蒸散量の減少はあまり見られない。蒸発量は裸地面からの蒸発と湿潤樹冠からの蒸発の合計量で計算される。つまり、LAIの設定値が大きく樹冠貯留量の多い針葉樹林の減少による湿潤樹冠の蒸発量の減少と、市街地(=裸地面)の増加による蒸発量の減少が要因となって蒸発量が減少したと考えられる。

流出量の増加・蒸発散量の減少の分布は植生・地形と密接にかかわっている。分布図については3.3で示し園部川流域の結果とともに考察する。

3.2.2-2 熱収支

・変化の再現性の検討

現在と明治期土地利用適用時の熱収支各項目の比較を表 20・21 に示す。明治の値に対する現在の値の比率をみると各年ではほぼ同じ変化割合を示していることが分かる。このことから熱収支計算においても水収支と同様に土地利用変化による変化が認められ、その影響について議論しても支障ないとする。

・熱収支各項目の変化

現在と明治の流域平均月別正味放射量・潜熱フラックス・顕熱フラックス・地中熱流量・地表面温度の比較グラフを図 44-48 に示す。まず表 20・21 から、明治から現在では正味放射量・潜熱フラックスが減少し顕熱フラックス・地中熱流量が増加していることが分かる。最も変化量が大きいののは潜熱フラックスで、2001・2002 年共に年間で 500 MJ/m^2 以上も減少しており、割合としては約 30% 明治から減少したことになる。図 45 から、年変化の傾向はほぼ同じまま年間を通して減少しており、また正味放射量に関しても潜熱フラックスに次ぐ減少量と年間を通しての減少の傾向が見られた。一方で地中熱流量は絶対量は小さいものの増加割合としては 2 倍以上の増加が見られた。また年変化傾向としては夏季に上がる一方で冬季(12-1 月)には明治よりも低い値となる傾向が見られた。都市化により季節変化が大きくなったといえる。顕熱フラックスは若干の増加が見られる。これらの変化について分布図をもとにさらに考察するが、明治期の熱収支分布計算結果に関しては園部川との比較とともに 3.3 で示す。

3.3 園部川との比較

小野川流域における上記の結果を踏まえ、埴(2007)から園部川流域における明治-現在の変化を加味し 2 つの流域での水・熱収支項目の変化傾向をそれぞれ比較した。

3.3.1 水収支

・年間

蒸発散量・表面流出量の年積算値、土壌水分量・地下水面までの深さの年平均値について園部川流域・小野川流域の明治・現在・変化量(現在-明治)の各分布図を図 49-52 に示す。また水収支各項目のまとめを表 22・23 に示す。

2 つの流域で各項目の変化傾向はおおむね同じであり蒸発散量では森林→市街地と変化した場所で減少が大きい。一方で水田地帯では増加の傾向が見られる。水田で増加した要因は水田の分布が地形指標の高い場所と類似しているためだと考えられる。つまり、河道周辺の飽和しやすい地帯では土地利用変化によって流出量・飽和域が増加することでそれに伴い地表からの蒸発量も増加したといえ、その場所が土地利用としては水田にあたるものとみられる。

また表 22・23 によると蒸発散量の減少が小野川の方が圧倒的に大きい。このことから市街地の増加割合の違いが蒸発散量の変化に影響していることが分かる。

次に地下水面までの深さについてみると小野川流域は平均で約 16 cm、園部川流域は約 7 cm 減少している。つまりそれぞれ 16cm と 7cm 地下水面が上昇しているということである。このことは小野川流域の方が地下水貯留量の増加量が多いことを表す。このことが年収支における流出量の増加が多くなる要因の一つと考えらる。

表面流出量は増加量の絶対値としてはどちらの流域も同程度である。流出地点の分布は河道とその周辺部であるが、勾配の大きい園部川（最大比高 374.8 m）では下流に行くにしたがって流出量は多くなっている。一方小野川は上流部でも標高が低く地形指標の高い場所が多く分布し、さらに市街地も上流部に固まって形成されているためその周辺からの流出量の増加が見られる。上流部と、霞ヶ浦に流入する下流部の両方から表面流出が起こり増加量も大きいことが分かる(図 48)。

・雨季

次に蒸発散量・土壌水分量・地下水面までの深さ・表面流出量について雨量の多い 9・10 月の 2 ヶ月間の値の園部川流域・小野川流域の明治・現在・変化量(現在－明治)の各分布図を図 53-56 に示す。

図 53 において蒸発散量を比較すると園部川で増加している場所が見られる(51－166 mm 程度)。現在の土地利用で森林が分布している場所と一致しており小野川の森林分布地帯でも同様の傾向は見られるが微量である。降雨量が多い時期は樹冠貯留量や表層の土壌水分量も増加しており、そこからの蒸発散量も平水時より多くなると考えられる。この、蒸発量の差が年間を通しての流出量の差に影響しているのではないかと考えられる。

さらに差が大きかったのは地下水面までの深さである(図 55)。園部川では年平均とほぼ変わらないのに対し、小野川では平均約 22 cm 地下水面の上昇が見られた。このことが小野川における基底流出の大幅な増加に影響しているとみられる。

3.3.2 熱収支

i 年間

正味放射量・潜熱フラックス・顕熱フラックス・地中熱流量・地表面温度について園部川流域・小野川流域の明治・現在・変化量(現在－明治)の各分布図を図 57-61 に、日平均値の相対頻度分布図を図 62-65 に示す。また、熱収支各項目のまとめを表 24・25 に示す。

年積算値については園部川では各項目の変化量は小野川より小さい結果となった。正味放射量は小野川が流域平均で約 400 MJ/m²(13%)減少に対し園部川は 250MJ/m²(8%)の減少であった。また潜熱フラックスは両流域で約 300MJ/m²減少と絶対量では差は小さかったが明治期の値に対する減少割合では小野川の 28 %減少に対し園部川は 16 %減少と相対的な差が見られた。顕熱フラックスについてはそれほど大きな差は見られなかった。地中熱流量では、小野川が 150 %増加に対して園部川は 70 %増加とどちらの流域も増加量が非常に大きいものの、流域による差も大きいものとなった。

この差分について分布図の結果と比較する。正味放射量は両流域で市街地、次いで畑地での減少が大きい。違いとしては増加している地点が小野川では河川周辺の水田地帯に広く見られ、園部川でも同様に水田での増加は見られるが比較的範囲は広くなく、局地的に突出して大きくなる傾向が見られる。また、畑地などでも増加が見られた。頻度分布についてみるとともに値の小さい方へシフトしているが、小野川の現在での分散が特に小さくなっていることに注目できる。小野川では 200 W/m²以上の頻度が大きく減少しており、年間を通して放射量が高い日がみられにくくなったと考えられる。これは、現在の土地利用が市街地・畑地で半数以上を占めていることからきているとみられる。

潜熱フラックス分布についても正味放射量と増加・減少の傾向は非常に類似していた。小野川流域は下流に水田地帯が多く上流は市街地が集中しており中流域では畑地が塊状に分布している。一方で

園部川は河道を中心に対照的に畑地が分布、その間に市街地がまばらに散在し、森林も上流・下流に同程度見られる。この土地利用分布は潜熱フラックスにも影響しており、小野川では下流で増加、上流で減少と分かれて分布しているように見られる。園部川では比較的散在しているように見られる。頻度分布では正味放射量と同様の傾向が見られる。小野川では現在にかけて 130 W/m^2 以上の値をとる日が極端に減少している。明治期の方が分散が大きく現在では中央値である $40\sim 50 \text{ W/m}^2$ 付近に頻度は集中している。

顕熱フラックスについて分布図をみると $600\sim 1200 \text{ MJ/year}$ と高い増加を示す地点が園部川の方が圧倒的に多いことがわかった。年積算の総量としてはそれほど大きな差は見られず、これは小野川では $\sim 600 \text{ MJ/year}$ と比較的増加量が少ない地点が広く分布しているためと考えられる。頻度分布で特徴的なのは小野川流域での尖度が 3.69 から 0.75 に減少し、歪度が -1.37 から -0.27 に増加している点にある。尖度とは頻度分布の尖り具合を示す指標であり値が正であれば正規分布より尖っており、負であれば扁平であることを示す。また歪度とは分布の左右対称性の違いを示す指標であり、値が正であれば中央値が左に傾いた右裾広がり分布であることを、負であれば中央値が右に傾いた左裾広がり分布であることを示す。現在の分布では尖度が小さくなっていることから尖りが少なくなっている、つまり全体の頻度が中央値である 35 W/m^2 付近に集中しているということになる。また歪度が大きくなっていることからもともと右(値の大きい側)に頻度が集中していたのが正規分布に近い左右対称な分布を示す形に変わったということになる。つまり年間を通して顕熱フラックスは $10\sim 80 \text{ W/m}^2$ の値に集中し(分散が小さくなり)極端に高い値や低い値を示すことがなくなり、明治期では分布が見られていた 40 W/m^2 以下の値が現在ではほとんどなくなっていることが傾向としてみられる。

地中熱流量は流域全体を通して非常に顕著な増加傾向を示した。特に小野川は流域のほとんどで増加している。頻度分布からは分散が非常に大きくなり尖度が小さくなっている点の特徴的である。つまり年間を通して変化が激しい事を表す。このことは図 47 からも伺え、現在では夏季の地中熱流量が大きく冬季は小さく推移している。

ii 夏季

同様に夏季(7-8月)の熱収支各項目の平均値について園部川流域・小野川流域の明治・現在・変化量(現在-明治)の各分布図を図 66-70 に、日平均の相対頻度分布図を図 71-74 に示す。

変化量の分布傾向は年間の積算値と大きな違いは見られなかった。

変化量としては潜熱フラックスの減少量が大きく場所によっては 800 W/m^2 減少しているところも見られた顕熱フラックスは増加量・減少量共に $300\sim 400 \text{ W/m}^2$ 程度であるのでおよそ 2 倍の変化量があり、夏季の潜熱フラックスの卓越による絶対量の多さが伺える。特に小野川流域では、潜熱フラックスは水田地帯で増加、市街地で減少している。潜熱フラックスが水田で増加した要因として、水田地帯は下流部の河道の周辺に位置しており標高も低い。流域全体では蒸発散量の減少により潜熱フラックスも減少しているが、その分流出量の増加し下流部の土壌・表層の水分量が増加したため、この周辺での蒸発量・潜熱フラックスが増加したと考えられる。このことは蒸発散量、表面流出量の年積算変化量の分布からも伺える。また顕熱フラックスは小野川流域で 100 W/m^2 以上増加している地点が局地的に存在し、そのほかは全体的に減少しているのに対し、園部川流域では 100 W/m^2 以下の増加をしている場所が広く分布している。増加を示す地点は小野川では森林から畑へ変化した場所、

園部川では森林から畑・市街地へと変化した場所である。一方で、地中熱流量・地表面温度は両流域で市街地の増加量が最も高く次に畑地が高い。顕熱フラックスのみ異なる変化傾向が見られたのにはほかの要因が考えられる。

日平均値の頻度分布についても年間と同様の傾向が見られる。両流域で正味放射量が全体的な減少傾向であり、潜熱フラックスもピークが小野川では 60 W/m^2 から 40 W/m^2 、園部川では 100 W/m^2 から $50\sim 80 \text{ W/m}^2$ 付近に遷移している。また地中熱流量における変化が顕著であり、両流域で明治期ではほとんどの値が $1.5\sim 3.0 \text{ W/m}^2$ をとっていたのが現在では $3.0\sim 7.0 \text{ W/m}^2$ 付近に広く分布を示していた。

iii 冬季

同様に冬季(1-2月)の平均値について園部川流域・小野川流域の明治・現在・変化量(現在-明治)の各分布図を図 75-79 に、日平均の相対頻度分布図を図 80 - 83 に示す。

正味放射量について、小野川流域では畑地で増加し、市街地・短草地で減少が見られる。特に短草地での減少が著しい。園部川流域では畑地と、水田の周りでの増加が見られたが散布的で土地利用との関連性は明確ではなかった。両流域の潜熱フラックスと顕熱フラックスの増減量が共に 200 W/m^2 前後であり夏季に比べ差がほとんどなかった。蒸発散量が夏季に比べ少なく比較的顕熱フラックスが卓越していることが伺える。特に顕熱フラックスが 100 W/m^2 以上増加している地点が夏季と比べ圧倒的に多く、土地利用が都市化・畑地化すると顕熱フラックスは冬季に特に増加することがわかった。また地中熱流量は流域全体で減少傾向にある。夏季は上昇傾向があったことから年間で変動が激しくなっていることが分かる。また河道に沿った水田の周縁での増加が見られる。地表面温度は夏季の変化量が $\pm 17 \text{ K}$ であったのに対し冬季は $\pm 4 \text{ K}$ 程度であった。共に全体的に増加しているが夏季に顕著である。頻度分布については年間・夏季と同様の傾向が見られた。

4.結論

・TOPLATS の再現性については、流出量に関して基底流出の再現性は良好であったが降雨イベント後のピーク流量に関してあまり良くなく特に降雨後の流量の引きが実際よりもかなり緩やかな減衰を示す傾向がある。これは土壤不飽和層が降雨前の渇水期における土壤水分減少を正確に再現できていないためと考えられる。

・熱収支に関しては夏季、特に7月に計算値と実測値で再現性が良くなかった。2001年7月は降雨が少ない期間であったことからモデル計算においては蒸発散量がかかなり低く計算されその結果潜熱フラックスの過小・顕熱フラックスの過大評価につながったとみられる。

・明治期土地利用適用時と現在土地利用適用時でのシミュレーション結果を比較すると、現在では流出量(特に基底流出量)の増加、蒸発散量(特に蒸発量)の減少が見られた。土地利用が針葉樹林→市街地・畑と変化することで樹冠貯留量が減少し樹冠からの蒸発が減少、その分の水分が流出に移動したと考えられる。土壤水分量・表面流出量はともに市街地で増加が大きい。樹冠による遮断の減少と不透水域の増加によりこれらの変化が起きたと考えられる。また土壤の飽和しやすさを示す地形指標との関連も大きかった。

・熱収支では正味放射量・潜熱フラックスが減少、顕熱フラックス・地中熱流量が増加した。蒸発散の減少や、アルベドの高い草地・畑地が増加したことが影響していると思われる。

・流域毎の比較をすると農地・市街地化割合の大きい小野川流域の方が上記のような変化がより大きく出ている。特に市街地の土壤面からの蒸発がほぼゼロであることが影響し、流域全体でも蒸発量の減少が顕著に見られる。

・また各土地利用の分布範囲が集中的であるか散布的であるかの違いにより熱収支等の分布にも影響が見られた。小野川では広範囲で一定の値をとり園部川では局地的に突出した値をとる傾向が見られる。

・土地利用だけでなく地形の影響も非常に大きいことが分かった。特に飽和地表流に関しては平坦である小野川流域の方が大きくなる等の傾向が見られた。また、両流域共に標高の高い台地上の土地に畑や森林が位置し比較的低い場所に市街地が多い傾向が見られ、水・熱収支への影響が大きくなる要因である可能性がある。

5.謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学大学院生命環境科学研究科の杉田倫明先生には、研究方法や考察に関する助言、ArcGIS の操作に関するご指導、様々なデータのご提供など終始非常に親身にご指導をいただき、数多くの面で大変お世話になりました。大変感謝申し上げます。また、筑波大学大学院生命環境科学研究科水文学分野の諸先生方には、発表など事ある毎に大変貴重なご意見をいただきました。また、杉田研究室の方々にはゼミでの発表の際などに貴重なご助言をいただいたほか、日頃から研究全般の進捗に関して励まして頂きました。

本研究は、筑波大学第一学群自然学類卒業生の埴晃一氏の論文を大いに参考にさせていただきました。TOPLATS モデルの概念の理解から使用方法、結果の考察など本研究を進めるに当たり大変頼りになるものとなりました。埴晃一氏には、論文を参考にさせて頂いたことをこの場を借りて感謝申し上げます。また解析にあたっては茨城県土木部・国土交通省霞ヶ浦河川事務所から流量・気象データを使用させていただきました。さらに筑波大学大学院人間総合科学研究科デザイン学領域環境デザイン研究室の王尾和寿博士には明治期の土地利用データをご提供いただきました。感謝いたします。

また、筑波大学生命環境学群地球学類水文学分野の皆様、及び地球学類同期の皆様の存在は大変励みになるものでありました。

以上の方々をはじめ、本研究を進める上で応援して下さいましたすべての方々と、家族、友人に心から感謝申し上げます。

6. 引用文献

- 安陪和雄, 寺川陽, 小川和延, 杉盛啓明 (1997): 霞ヶ浦流域における流域環境管理のための分布型水循環モデルの構築. 土木計画学研究・講演集, 20, 143-146.
- 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.
- 茨城県土木部 (2001・2002): 「茨城県水防情報システム」 CD-ROM.
- 雨水貯留浸透技術協会 (2007): TX 沿線地区(つくば市域)雨水貯留浸透基本計画書 計画編. pp23.
- 王尾和寿, 鈴木雅和 (2001): 流域を単位とした地域環境情報の可視化について. 日本造園学会誌 64(5), 811-814.
- 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.
- 小野圭介 (2008): 渦相関法による水田生態系の二酸化炭素および水蒸気フラックスの動態解明, 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 生物圏資源科学専攻博士論文, pp.152.
- 環境省 自然環境局 生物多様性センター (2004): 「自然環境情報 GIS」
<http://www.biodic.go.jp/trialSystem/top.html>(最終閲覧日: 2012年2月10日)
- 気象庁 (2001・2002): AMeDAS「気象統計情報」 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>(最終閲覧日: 2012年2月10日).
- 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所 (2001・2002): 「時間雨量」 CD-ROM.
- 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所 (2000-2005): 「時間流量」 CD-ROM.
- 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所 (2012): 霞ヶ浦(常陸利根川)河川維持管理計画. pp69.
- 国土交通省 土木研究所 河川部都市河川研究室 (2001): 茨城県谷田川流域における水循環に関する研究(1) 一地下水の実態調査と水循環の数値解析一, 土木研究所資料第 3782 号, pp.81.
- 国土交通省 水管理・国土保全局水資源部(2011): 日本の水資源, pp184.
- 国土地理院 (2001): 「数値地図 50m メッシュ(標高), 日本II」 CD-ROM.
- 国土地理院 (2003): 「流域自然環境調査作業(霞ヶ浦流域地区), 詳細流域界データ」 CD-ROM.
- 国立環境研究所霞ヶ浦臨湖実験施設: 「霞ヶ浦臨湖実験施設気象データ」
<http://www.cger.nies.go.jp/db/kasumi/index13.html>(最終閲覧日: 2012年2月10日).
- 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, 畑武史 (2002): 山林小流域の長短期流出解析への TOPMODEL の適用: 長短期流出量用モデルとの比較. 水文・水資源学会誌, 15, 399-412.
- 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.
- 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
筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場ルーチン観測データ
<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/databasehtml/database/>(最終閲覧日: 2012年2月10日).
- 土壌物理学学会編 (2002): 「新編土壌物理用語事典」データ集, 養賢堂, 180-183.
- 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, pp49.

- 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.
- 埴晃一 (2007) : 霞ヶ浦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 卒業論文, pp109.
- 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, 国土交通省 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.
- 藪崎 志穂, 田瀬 則雄, 萩野谷 成徳(2005) : 陸域環境研究センターにおける蒸発散量推定法の検討, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 6, 45-51.
- 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.
- リーブーンホン, 木内豪, 石川忠晴, 黎嘉韻(2011) : 分布物理型モデルを用いた霞ヶ浦における水循環と溶存態窒素の挙動解析. 河川技術論文集, 17, pp6.
- 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.
- Beven K.J., Kirkby M.J. (1979) : A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences*, 24, 43-69.
- Beven K.J., Kirkby M.J., Schofield N., Tagg A.F. (1984) : Testing a physically-based flood forecasting model(TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69, 119-143.
- Beven K. J., Quinn P., Romanowicz R., Freer J., Fisher J., Lamb R. (1995) : TOPMODEL and GRIDATB, a users guide to the distribution versions. *CRES Technical Report* 110 (2nd edition). Lancaster University. pp26.
- Beven K., Wood E. F. (1983) : Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, 65, 139-158.
- Brooks R. H. and Corey A.T. (1964) : Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3, Colo. State Univ., Fort Collins, pp37.
- Brutsaert W., and Lopez J. P. (1998) : Basin-scale geohydrologic drought flow features of riparian aquifers in the southern Great Plains. *Water Resources Resources*, 34, 233-240.
- 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 measurement using distributed land surface modeling. *Advances in Water Resources*, 28, 1-14.
- Dickinson R. E., (1984) : Modeling evapotranspiration for threedimensional global climate models, in *Climate Processes and Climate Sensitivity*, Geophys. Monogr. Ser., vol.29, edited by J. E. Hansen and T. Takahashi, AGU, Washington, D. C., 58-72.
- Famiglietti J. S., Wood E. F., Sivapalan M., Thongs D. J. (1992) : A catchment scale water balance model for FILE. *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.
- Milly P. C. D. (1986) : An Event-Based Simulation Model of Moisture and Energy Fluxes at a Bare Soil Surface. *Water Resources Research*, 22, 1680-1692.
- 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 the Atmospheric Sciences*, 55, 1209-1224.
- 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.
- Rutter A. J. (1975) : The hydrological cycle in vegetation. table III. Montheith J. L. ed. : Vegetation and the Atmosphere vol. 1 principles, Academic Press, pp137.
- 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.
- 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.

7. 付録

付録として、ArcGIS 上で標高及び土地利用の 60m メッシュラスタデータの作成方法について記す。

・標高

標高データは国土地理院による「数値地図 50 m メッシュ(標高), 日本Ⅱ CD-ROM」のデータを使用した。このデータは 50 m 間隔の標高ポイントデータである。ArcGIS の「3D Analyst ツール」>「ラスタの内挿」>「IDW」を選択し、「入力ポイントフィーチャ」に DEM データを選択、「出力セルサイズ」を 50(m)に設定することで 50 m メッシュの標高ラスタデータが作成される。

・土地利用

現在の土地利用データは、環境省自然環境局生物多様性センター植生調査第 6 回調査(2003)の GIS データを使用した。このデータはフィーチャクラス、シェープファイル形式のベクトルデータである。「変換ツール」→「ラスタへ変換」→「フィーチャ→ラスタ」選択し、「入力フィーチャ」にこのデータを選択、「出力セルサイズ」を 50(m)に設定することで 50 m メッシュの植生(土地利用)データを作成した。

明治の土地利用データは王尾(2004)による霞ヶ浦・小貝川・鬼怒川流域土地利用 GIS データを使用した。このデータは 250 m メッシュのラスタデータである。このデータを一度「変換ツール」→「ラスタから変換」→「ラスタ→ポリゴン」を選択し、シェープファイル形式のベクトルデータに変換した後、現在の植生データと同様の方法で 50 m メッシュのラスタデータに変換した。

表1 小野川流域諸元 (山田(2007)による)

項目	
流域面積	175.7km ²
平均傾斜角	0.49°
平均標高	18.8m
最大比高	31.9m
形状比	0.13
水系密度	1050km ⁻¹
流路長	36.45km

表2 雨量各観測所の位置とティーセン分割の重み

観測点	種類	緯度	経度	ティーセン法における重み		
				欠測がない場合	欠測がある場合	
つくば	AMeDAS	N36° 03.4'	E140° 07.5'	0.150	0.150	0.150
江戸崎	AMeDAS	N35° 57.6'	E140° 19.2'	0.164	0.164	
木原	県	N36° 01.5'	E140° 17.4'	0.002	0.006	0.012
小野川	県	N35° 56.4'	E140° 15.0'	0.270	0.294	0.367
阿見町	県	N36° 01.5'	E140° 12.5'	0.116		0.116
牛久	国交省	N35° 59.6'	E140° 09.2'	0.198	0.219	0.198
土浦(道路)	国交省	N36° 01.3'	E140° 09.4'	0.099	0.167	0.099
臨湖	NIES	N36° 00.1'	E140° 22.6'	0.001	0.001	0.058

「欠測がある場合」は左から阿見町が欠測の場合、江戸崎が欠測の場合を表わす。

表 3 植生区分設定項目(埜(2007)による)

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-スタジイ群集	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 4 明治期土地利用区分の再区分(埜(2007)による)

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 5 植生パラメータ出典(埜(2007)による)

項目	記号	針葉樹林	広葉樹林
各層における根の分布割合	d	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)	LAI	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	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	α	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984)
湿潤地表面のアルベド	α	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984)
射出率	ϵ	Kotani and Sugita (2005)	Oke (1987) Table 1.1
運動量輸送における粗度長 (m)	$Z0m$	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
熱輸送における粗度長 (m)	$Z0h$	Kotani and Sugita (2005)	Kotoda and Sugita (1984); Sellers et al. (1996)
地面修正量 (m)	Zpd	Jarvis et al. (1976)	植生高さから推定
最小気孔抵抗	$rsmin$	Jarvis et al. (1976)	Rutter (1975)
最大気孔抵抗	$rsmax$	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)
放射調整パラメータ	Rgl	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗による飽差の調整量パラメータ	β	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	B	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	$Tref$	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	τ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)
根活動要素	$Aroot$	250とする	250とする
根密度	$Droot$	1とする	1とする
根抵抗	$Rroot$	600000000とする	600000000とする
葉の最終水ポテンシャル(m)	$Pleaf$	-210とする	-210とする

表 6 植生パラメータ出典(埜(2007)による)

項目	記号	草地	短草地(芝地)
各層における根の分布割合	d	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)	LAI	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
樹冠貯留計算におけるLAI	LAI	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
乾燥地表面のアルベド	α	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
湿潤地表面のアルベド	α	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
射出率	ε	田中・及川 (1998)	Kotani and Sugita (2005)
運動量輸送における粗度長 (m)	$Z0m$	Kotani and Sugita (2005)	Kotani and Sugita (2005)
熱輸送における粗度長 (m)	$Z0h$	Kotani and Sugita (2005)	Kotani and Sugita (2005)
地面修正量 (m)	Zpd	植生高さから推定	植生高さから推定
最小気孔抵抗	r_{smin}	Rutter (1975)	草地の値を利用
最大気孔抵抗	r_{smax}	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)
放射調整パラメータ	Rgl	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	β	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	B	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	$Tref$	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	τ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)
根活動要素	$Aroot$	250とする	250とする
根密度	$Droot$	1とする	1とする
根抵抗	$Rroot$	600000000とする	600000000とする
葉の最終水ポテンシャル(m)	$Pleaf$	-210とする	-210とする

表 7 植生パラメータ出典(埜(2007)による)

項目	記号	水田	畑	市街地
各層における根の分布割合	d	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)	LAI	Kotani and Sugita (2005)	表12の値とする	*
樹冠貯留計算におけるLAI	LAI	Kotani and Sugita (2005)	表12の値とする	*
乾燥地表面のアルベド	α	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	α	Kotani and Sugita (2005)	日本農業気象学会(1986)	Kotani and Sugita (2005)
射出率	ε	Kotani and Sugita (2005)	日本農業気象学会(1986)	Kotani and Sugita (2005)
運動量輸送における粗度長 (m)	$Z0m$	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)	$Z0h$	Kotani and Sugita (2005)	植生高さから推定	Kotani and Sugita (2005)
地面修正量 (m)	Zpd	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	r_{smin}	草地の値を利用	草地の値を利用	*
最大気孔抵抗	r_{smax}	Chen and Dudhla (2001)	Chen and Dudhla (2001)	*
放射調整パラメータ	Rgl	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	β	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	B	Jacquemin and Noilhan (1990)	Jacquemin and Noilhan (1990)	*
樹冠抵抗の調整に用いる基準気温	$Tref$	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	τ	Choudhury et al. (1987)	Choudhury et al. (1987)	*
根活動要素	$Aroot$	250とする	250とする	*
根密度	$Droot$	1とする	1とする	*
根抵抗	$Rroot$	600000000とする	600000000とする	*
葉の最終水ポテンシャル(m)	$Pleaf$	-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 8 植生パラメータ設定値(埜(2007)による)

項目	記号		針葉樹林	広葉樹林	草地	草地(芝地)	水田	畑	市街地
根の分布割合(不飽和層1)	d_1		0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	*
根の分布割合(不飽和層2)	d_2		0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	*
根の分布割合(不飽和層3)	d_3		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)	LAI	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	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	α	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	α	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	ϵ	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)	Za		12	12	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
風データの測定高 (m)	Zw		12	12	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
運動量輸送における粗度長 (m)	Z0m	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)	Z0h	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)	Zpd	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)	rsmin		250	200	150	150	150	150	*
最大気孔抵抗 (s/m)	rsmax		5000	5000	5000	5000	5000	5000	*
放射調整パラメータ	Rgl		30	30	30	30	30	30	*
樹冠抵抗による飽差の調整量パラメータ	β		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	B		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)	Tref		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	τ	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	Aroot		250	250	250	250	250	250	*
根密度 (1/m ²)	Droot		1	1	1	1	1	1	*
根抵抗 (s/m)	Rroot		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)	Pleaf		-210	-210	-210	-210	-210	-210	*

表9 土壌パラメータ出典(埴(2007)による)

項目	記号	針葉樹林	広葉樹林
Brooks-Corey間隙径分布指数	B	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	P_s	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	θ_s	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
残留土壌水分	θ_r	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数	K_s	Hamada (1999)	Tsujimura (1994)
恒温層深さ	Z_d	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
恒温層温度	T_d	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
土壌中層温度の値をとる深さ	Z_m	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	T_m	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	C	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	q	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表10 土壌パラメータ出典(埴(2007)による)

項目	記号	草地	短草地(芝地)
Brooks-Corey間隙径分布指数	B	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	P_s	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	θ_s	土壌物理学会 (2002)	土壌物理学会 (2002)
残留土壌水分	θ_r	杉田・古藤田 (1985)	杉田・古藤田 (1985)
地表の飽和透水係数	K_s	Hamada (1999)	Hamada (1999)
恒温層深さ	Z_d	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
恒温層温度	T_d	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
土壌中層温度の値をとる深さ	Z_m	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	T_m	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	C	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	q	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表11 土壌パラメータ出典(埴(2007)による)

項目	記号	水田	畑	市街地
Brooks-Corey間隙径分布指数	B	猪野 (2002)	猪野 (2002)	猪野 (2002)
空気侵入値 (m)	P_s	Hamada (1999)	Hamada (1999)	Hamada (1999)
飽和土壌水分	θ_s	土壌物理学会 (2002)	土壌物理学会 (2002)	
残留土壌水分	θ_r	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	K_s	谷山 (2000,私信) による真瀬における値	土壌物理学会 (2002)	
恒温層深さ	Z_d	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	T_d	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118	新井・西沢 (1972) 図118
土壌中層温度の値をとる深さ	Z_m	山本 (1983)	山本 (1983)	山本 (1983)
初期土壌中層温度(K)	T_m	山本 (1983)	山本 (1983)	山本 (1983)
土壌成分の熱容量	C	谷 (1982)	谷 (1982)	谷 (1982)
石英率	q	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)	日本工業規格 (2006)

表 12 土壌パラメータ設定値(埴(2007)による)

項目	記号	針葉樹林	広葉樹林	草地	草地(芝地)	水田	畑	市街地
Brooks-Corey間隙径分布指数	<i>B</i>	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
空気侵入値 (m)	<i>P_s</i>	0.1	0.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
飽和土壌水分	<i>θ_s</i>	0.772	0.772	0.65	0.65	0.6	0.65	0.7
残留土壌水分	<i>θ_r</i>	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)	<i>K_s</i>	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)	<i>Z_d</i>	13	13	13	13	13	13	13
恒温層温度 (K)	<i>T_d</i>	288	288	288	288	288	288	288
土壌中層温度の値をとる深さ (m)	<i>Z_m</i>	1	1	1	1	1	1	1
初期土壌中層温度 (K)	<i>T_m</i>	281	281	281	281	281	281	281
土壌成分の熱容量 (J/kg/m ³)	<i>C</i>	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06	2.26E+06
石英率	<i>q</i>	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

表 13 流域パラメータ設定値

項目	設定値
飽和透水係数K(m/s)	3.7×10^{-4}
帯水層の厚さ(m)	20
降水の終了と浸透能回復との時間差 (s)	7,200
初期樹冠貯留量 (m)	0
完全飽和時の地中流量 (m ³ /s)	6.6×10^5
TOPMODELノパラメータf	7.0
初期平均地下水面までの深さZm(m)	4.0

表 14 水収支計算結果と実測値の定量的比較-2001年(mm/year)

項目	実測値	計算値	相対誤差(%)
降水量		1161	
流出量	370	538	45
流出率(%)	32	46	
(降水量)-(流出量)	791	623	-21

表 15 水収支計算結果と実測値の定量的比較-2002年(mm/year)

項目	実測値	計算値	相対誤差(%)
降水量		1005	
流出量	398	353	-11
流出率(%)	40	35	
(降水量)-(流出量)	607	652	7

表 16 熱収支計算結果の比較(MJ/m²)

かっこ内は正味放射量に占める割合(%)

	2001年	2002年
正味放射量	2607(100)	2710(100)
潜熱輸送量	1380(53)	1417(52)
顕熱輸送量	1145(44)	1200(44)
地中熱流量	77(3)	85(3)
誤差	6(0)	9(0)

表 17 現在と明治入力時の流域平均水収支計算結果の比較－2001 年(mm/year)

カッコ内は降水量に占める割合(%)

	現在	明治	現在/明治(%)
降水量	1161(100)	1161(100)	100
遮断量	155(13)	250(22)	62
正味降水量	1006(87)	911(78)	110
流出量	538(46)	248(24)	217
基底流出量	459(40)	184(16)	249
飽和表面流出	66(6)	59(5)	112
ホートン型表面流出	13(1)	5(0)	260
蒸発散量	548(47)	779(67)	70
蒸発量	34(3)	231(20)	15
蒸散量	514(44)	548(47)	94
貯留量変化	88(8)	167(14)	53
凝結量	0(0)	0(0)	0
誤差	-13(1)	-33(3)	39

表 18 現在と明治入力時の流域平均水収支計算結果の比較－2002 年(mm/year)

カッコ内は降水量に占める割合(%)

	現在	明治	現在/明治(%)
降水量	1005(100)	1005(100)	100
遮断量	139(14)	228(23)	61
正味降水量	866(86)	777(77)	111
流出量	352(35)	120(12)	293
基底流出量	296(29)	69(7)	429
飽和表面流出	56(6)	50(5)	112
ホートン型表面流出	0(0)	1(0)	0
蒸発散量	580(58)	787(78)	74
蒸発量	14(1)	208(21)	7
蒸散量	566(56)	579(58)	98
貯留量変化	185(18)	191(19)	97
凝結量	0(0)	0(0)	0
誤差	-112(11)	-93(9)	74

表 19 流出量比較(m³/day)－2001 年

	年最大流量	豊水流量 (95日流量)	平水流量 (185日流量)	低水流量 (275日流量)	渇水流量 (355日流量)	年最小流量
実測値	61.3	1.82	1.29	0.92	0.16	0.11
現在計算値	73.1	3.27	2.02	1.08	0.26	0.2
明治計算値	28.6	1.53	0.79	0.3	0.1	0.08

表 20 現在と明治入力時の流域平均熱収支計算結果の比較－2001 年(MJ/m²/year)

「現在」「明治」のかっこ内は正味放射量に占める割合(%)

「現在－明治」のかっこ内は明治の値に占める割合(%)

	現在	明治	現在－明治	現在/明治(%)
正味放射量	2607(100)	3002(100)	-395[13]	87
潜熱輸送量	1380(53)	1904(63)	-524[28]	72
顕熱輸送量	1145(44)	1056(35)	89[8]	108
地中熱流量	77(3)	31(1)	46[150]	248
誤差	6(0)	11(0)	-5[45]	55

表 21 現在と明治入力時の流域平均熱収支計算結果の比較－2002 年(MJ/m²/year)

「現在」「明治」のかっこ内は正味放射量に占める割合(%)

「現在－明治」のかっこ内は明治の値に占める割合(%)

	現在	明治	現在－明治	現在/明治(%)
正味放射量	2710(100)	3103(100)	-393[13]	87
潜熱輸送量	1417(52)	1922(62)	-505[26]	74
顕熱輸送量	1200(44)	1130(36)	70[6]	106
地中熱流量	85(3)	39(1)	46[118]	218
誤差	9(0)	13(0)	-4[31]	69

表 22 小野川・園部川流域水収支各項目まとめ-2001 年
 かつこ内は降水量に占める割合(%)

	小野川(現在)	小野川(明治)	園部川(現在)	園部川(明治)
降水量	1161(100)	1161(100)	1327(100)	1327(100)
遮断量	148(13)	250(22)	215(16)	295(22)
正味降水量	1013(87)	911(78)	1112(84)	1032(78)
流出量	538(46)	248(24)	578(44)	431(32)
基底流出量	459(40)	184(16)	521(39)	391(29)
飽和表面流出	66(6)	59(5)	49(4)	35(3)
ホートン型表面流出	13(1)	5(0)	8(1)	5(0)
蒸発散量	548(47)	779(67)	700(53)	831(63)
蒸発量	34(3)	231(20)	129(10)	270(20)
蒸散量	514(44)	548(47)	571(43)	561(42)
貯留量変化	88(8)	167(14)	24(2)	34(3)
凝結量	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
誤差	-13(1)	-33(3)	25(2)	31(2)

表 23 小野川・園部川流域水収支各項目まとめ-2002 年
 かつこ内は降水量に占める割合(%)

	小野川(現在)	小野川(明治)	園部川(現在)	園部川(明治)
降水量	1005(100)	1005(100)	1070(100)	1070(100)
遮断量	139(14)	228(23)	171(16)	230(21)
正味降水量	866(86)	777(77)	899(84)	840(79)
流出量	352(35)	120(12)	353(33)	237(22)
基底流出量	296(29)	69(7)	325(30)	217(20)
飽和表面流出	56(6)	50(5)	23(2)	17(2)
ホートン型表面流出	0(0)	1(0)	4(0)	3(0)
蒸発散量	580(58)	787(78)	671(63)	783(73)
蒸発量	14(1)	208(21)	82(8)	205(19)
蒸散量	566(56)	579(58)	589(55)	578(54)
貯留量変化	185(18)	191(19)	55(5)	40(4)
凝結量	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
誤差	-112(11)	-93(9)	-3(0)	10(1)

表 24 小野川・園部川流域熱収支各項目まとめ-2001 年
 カッコ内は正味放射量に占める割合(%)

	小野川(現在)	小野川(明治)	園部川(現在)	園部川(明治)
正味放射量	2607(100)	3002(100)	2776(100)	3011(100)
潜熱輸送量	1380(53)	1904(63)	1710(62)	2033(68)
顕熱輸送量	1145(44)	1056(35)	997(36)	931(31)
地中熱流量	77(3)	31(1)	63(2)	37(1)
誤差	6(0)	11(0)	6(0)	10(0)

表 25 小野川・園部川流域熱収支各項目まとめ-2002 年
 カッコ内は正味放射量に占める割合(%)

	小野川(現在)	小野川(明治)	園部川(現在)	園部川(明治)
正味放射量	2710(100)	3103(100)	2853(100)	3082(100)
潜熱輸送量	1417(52)	1922(62)	1640(57)	1912(62)
顕熱輸送量	1200(44)	1130(36)	1134(40)	1114(36)
地中熱流量	85(3)	39(1)	70(2)	45(1)
誤差	9(0)	13(0)	9(0)	11(0)

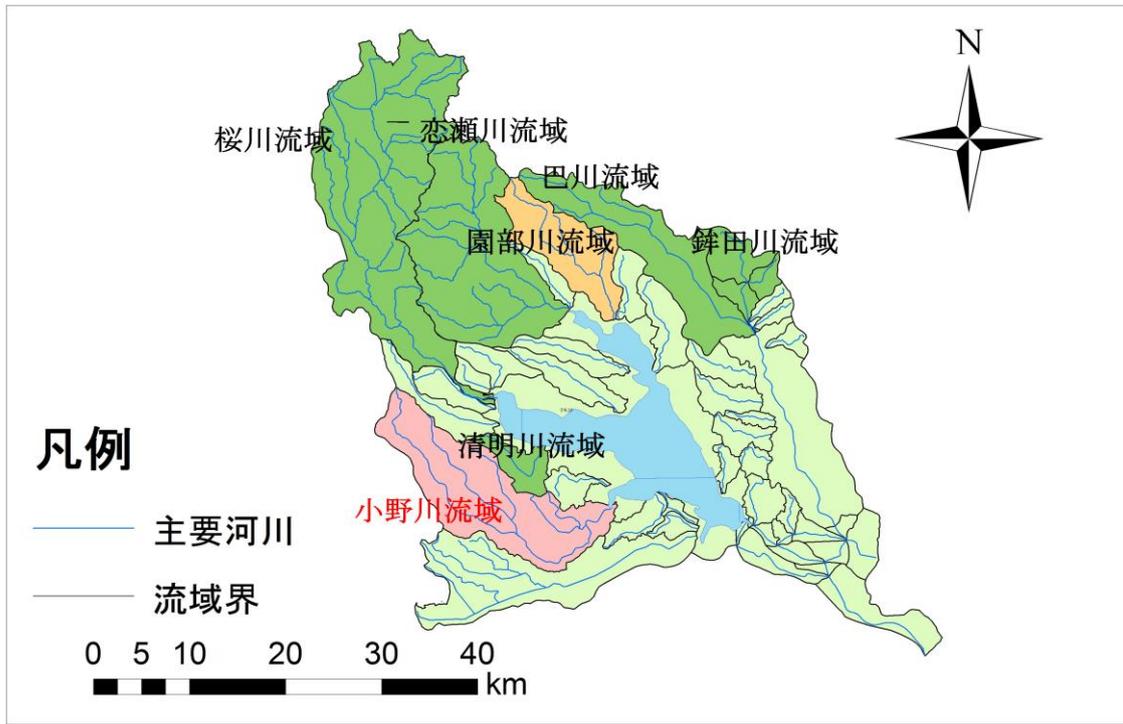


図1 霞ヶ浦7大河川流域

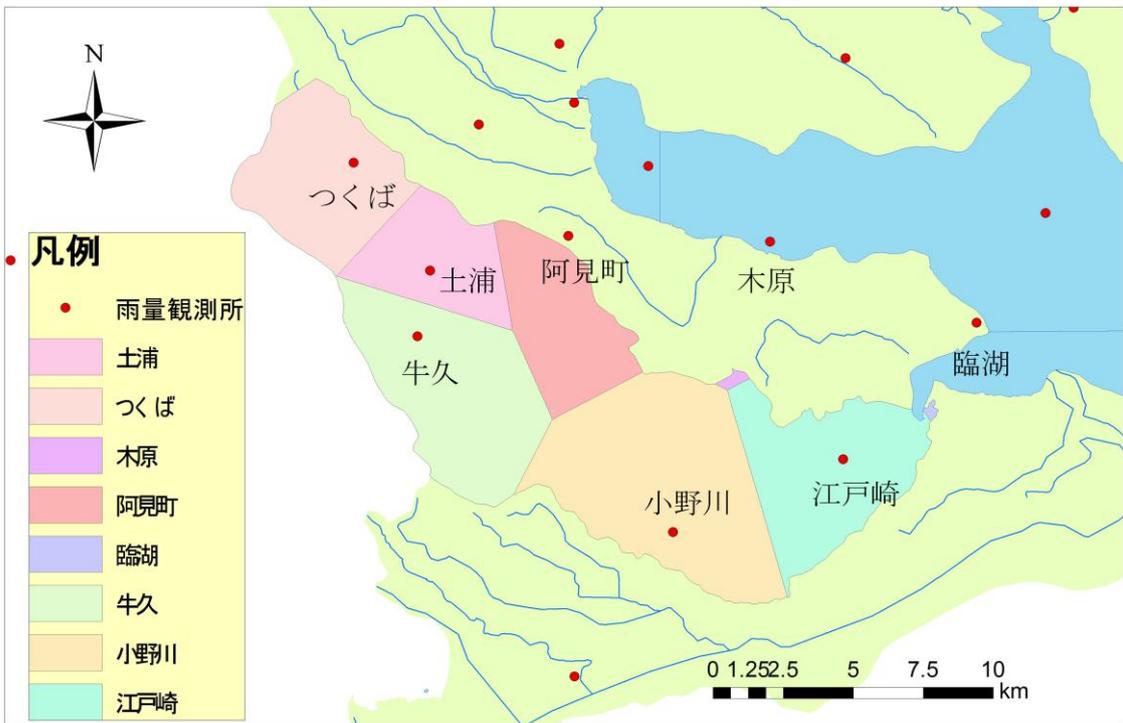


図2 雨量観測所ティーセン分割

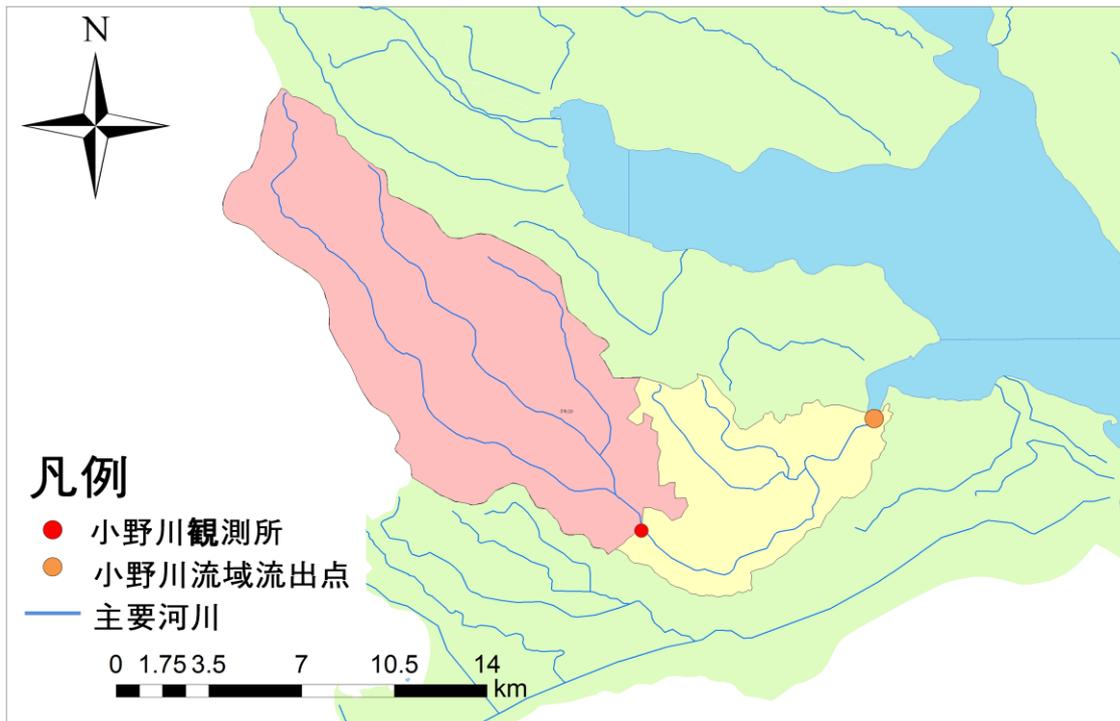


図3 小野川流域と小野川観測所を流出点としたときの流域

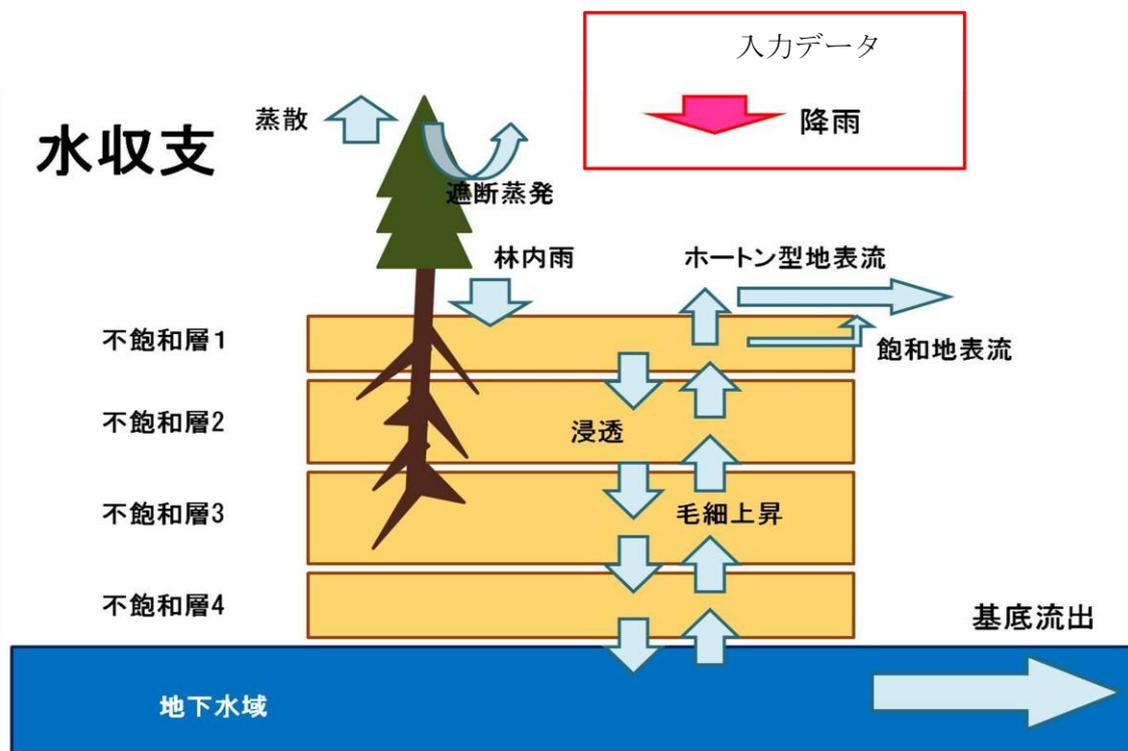


図4 TOPLATS 水収支イメージ図

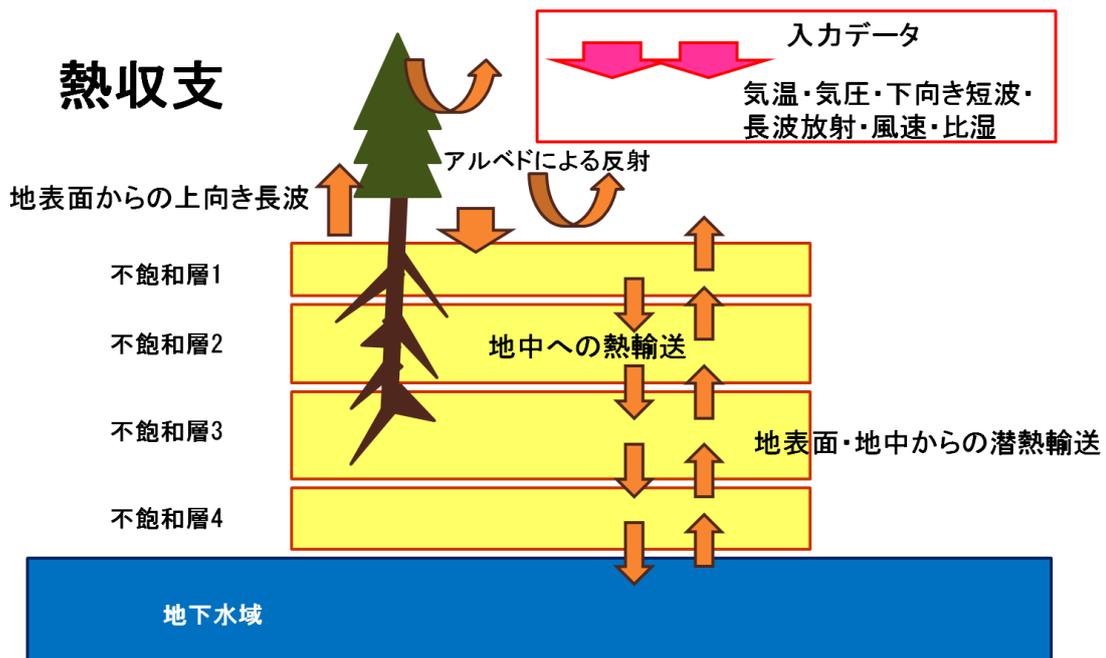


図5 TOPLATS 熱収支イメージ図

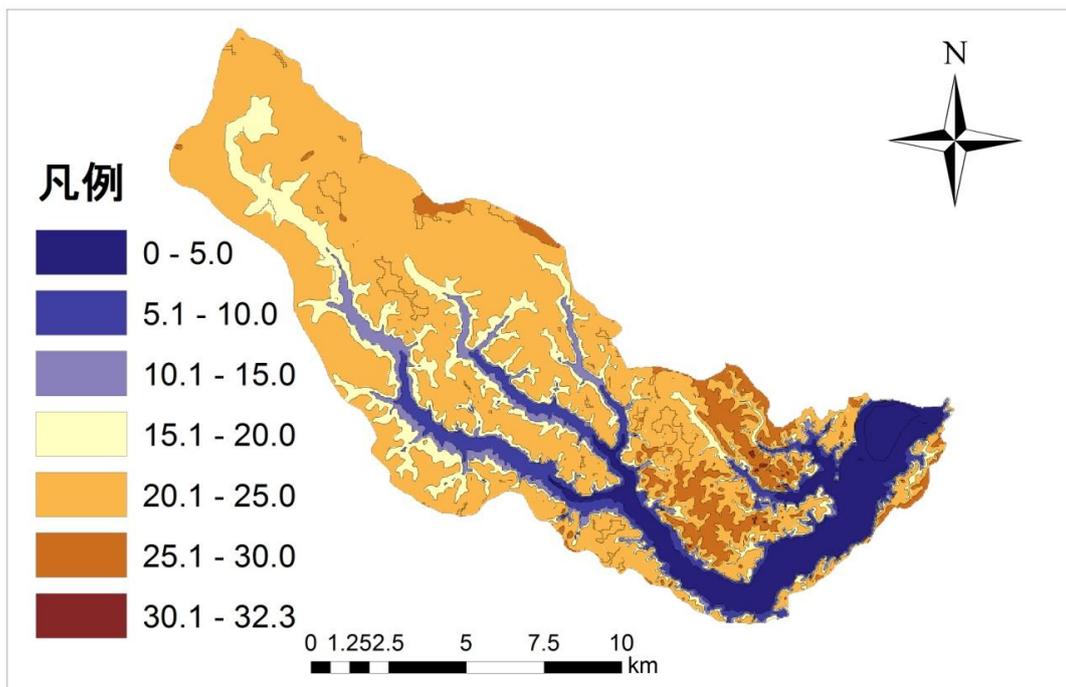


図6 標高分布図

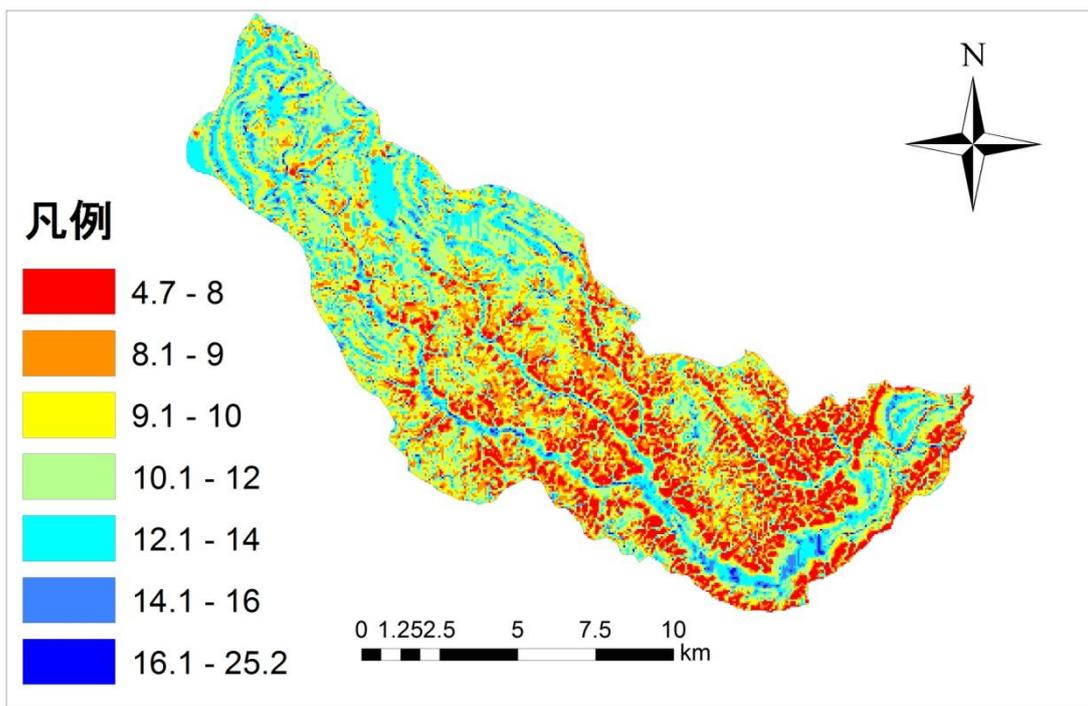


图 7 地形指標 λ 分布图

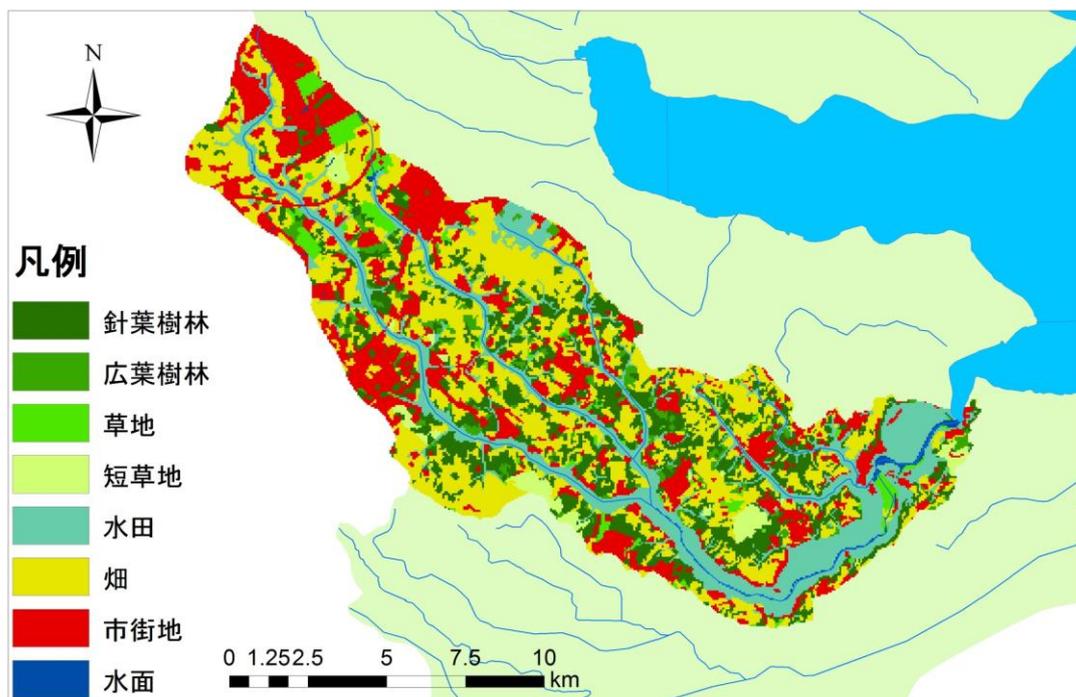


图 8 小野川流域現在（2003 年）土地利用图

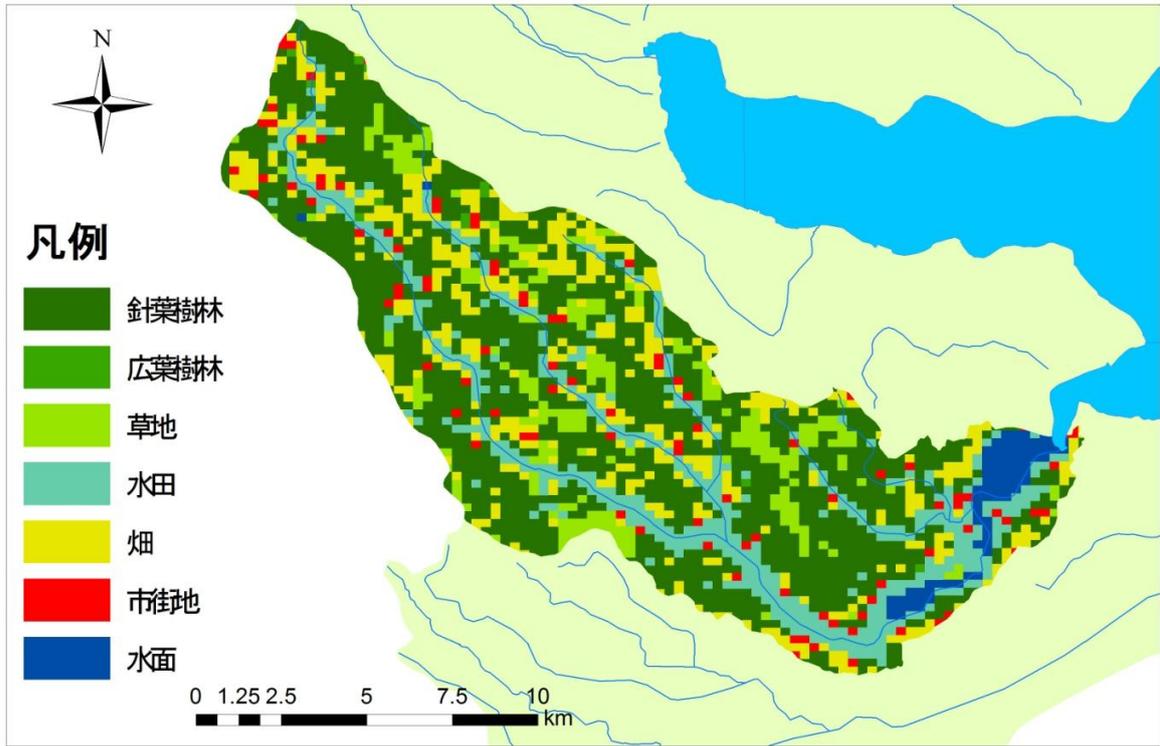


図9 小野川流域明治期（1903年頃）土地利用図

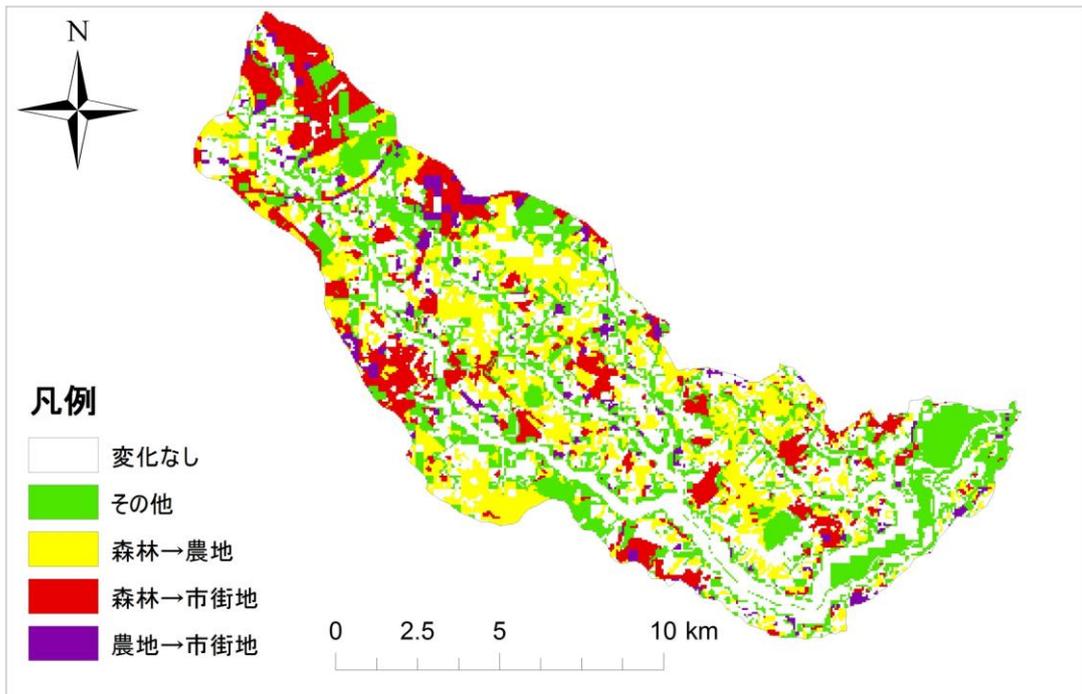


図10 小野川流域土地変化図

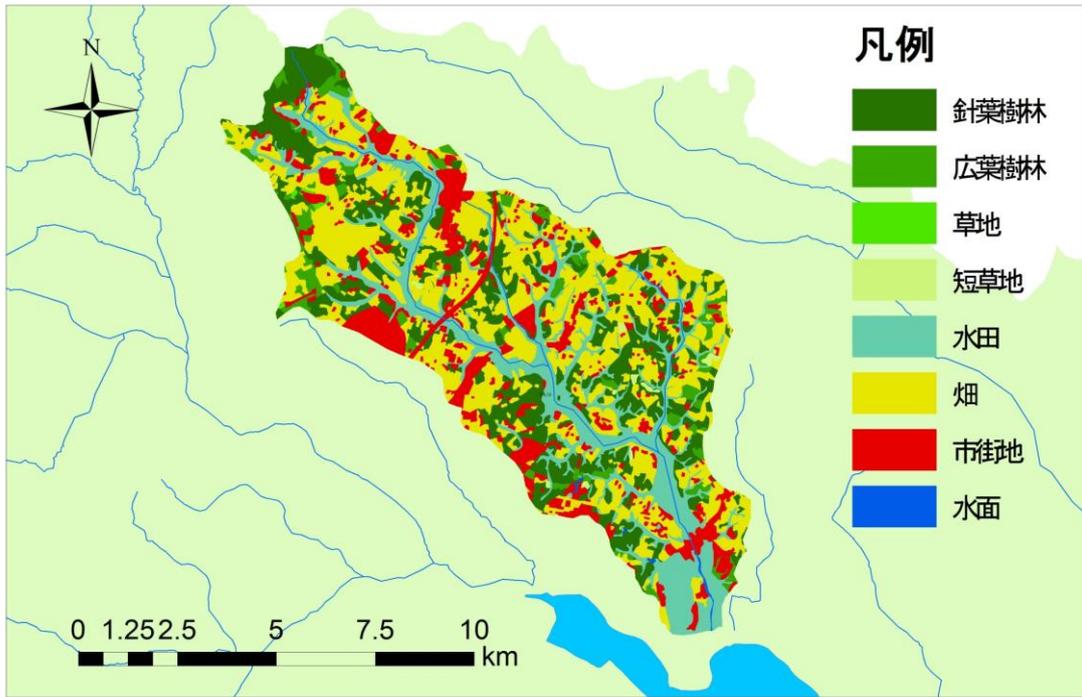


図 11 園部川流域現在（2003 年）土地利用図

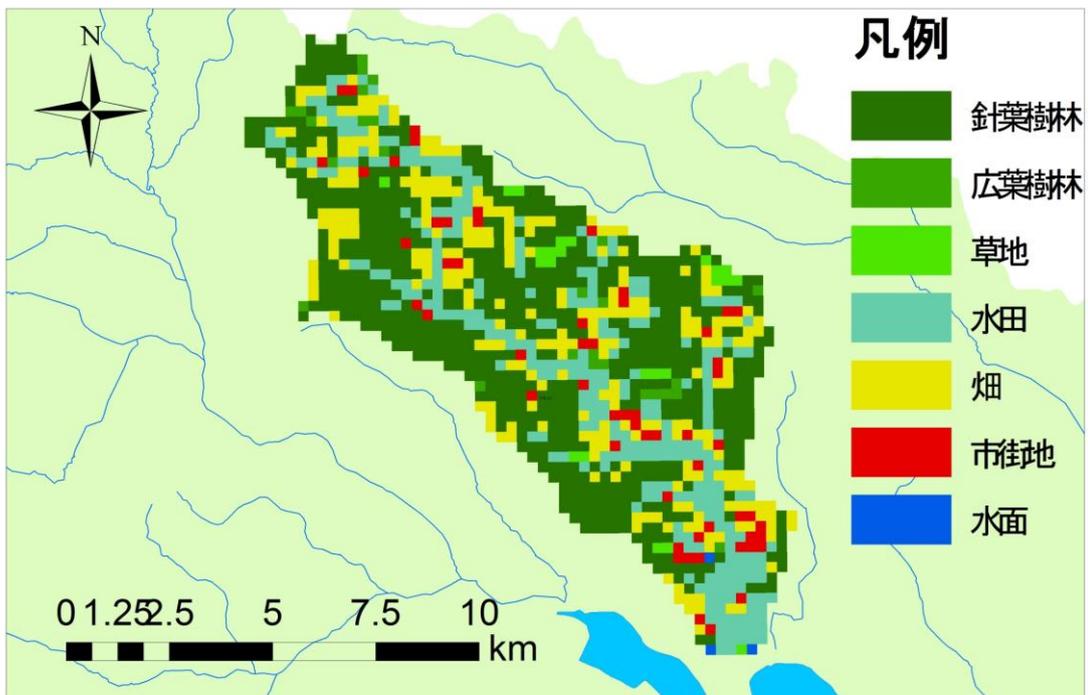


図 12 園部川流域明治期（1903 年頃）土地利用図

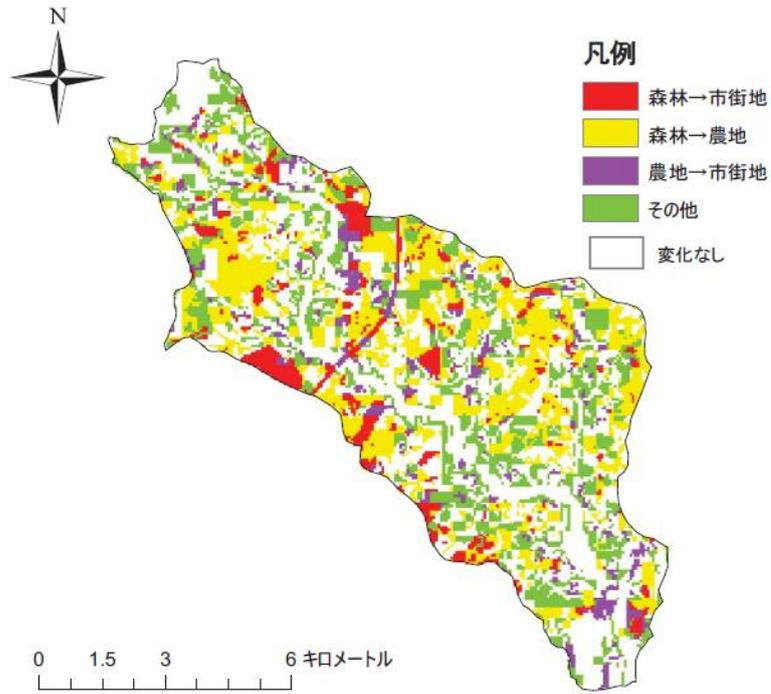


図 13 園部川流域土地利用変化図

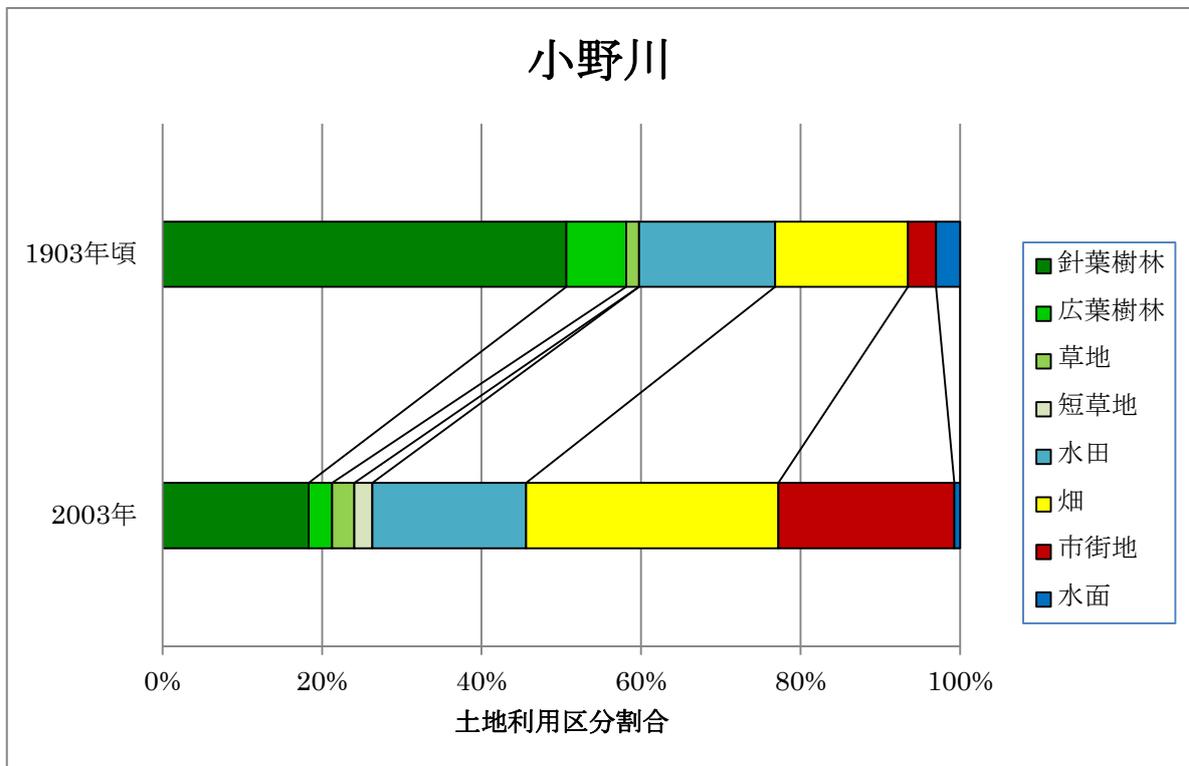


図 14 流域全体に占める土地利用区割合の変化(小野川流域)

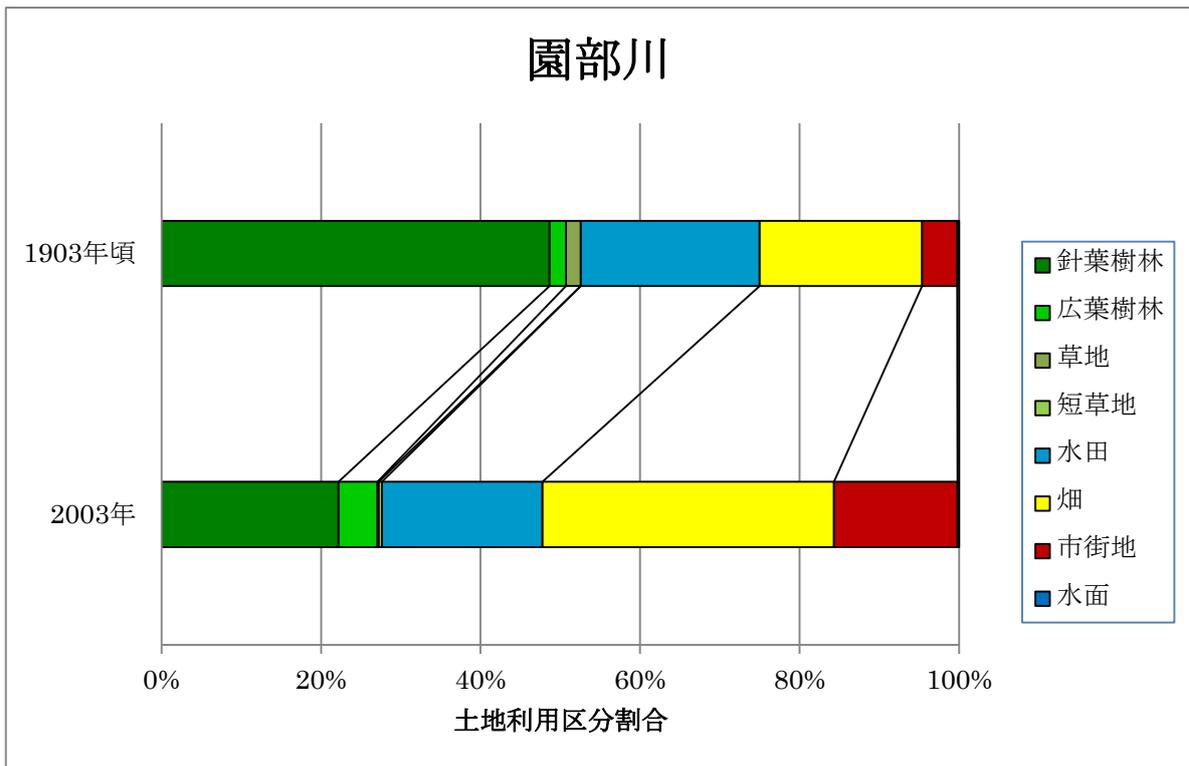


図 15 流域全体に占める土地利用区分割合の変化(園部川流域)

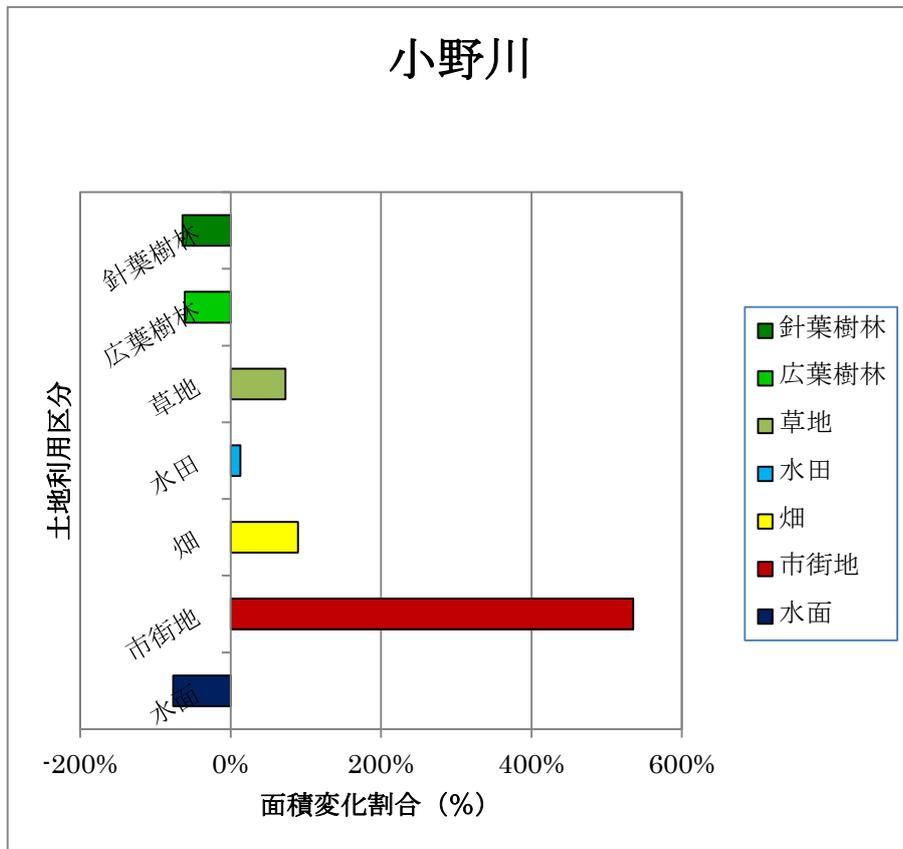


図 16 明治期から現在における土地利用区分の変化率(小野川流域)

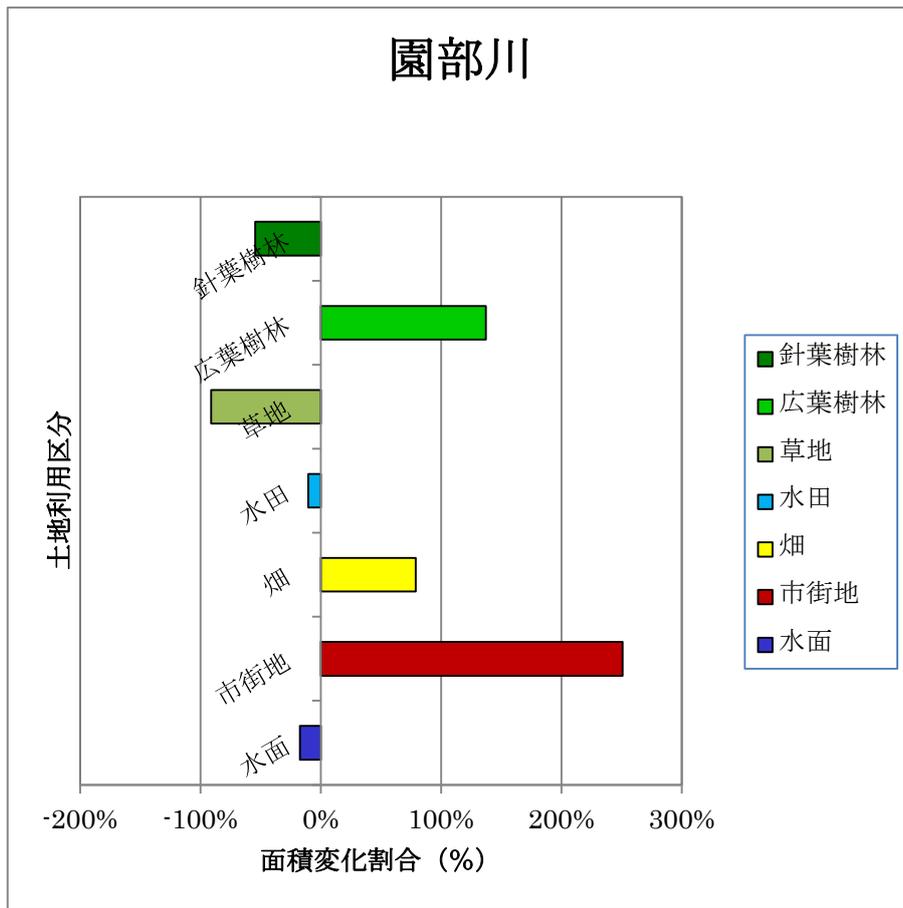


図 17 明治期から現在における土地利用区分の変化率(園部川流域)

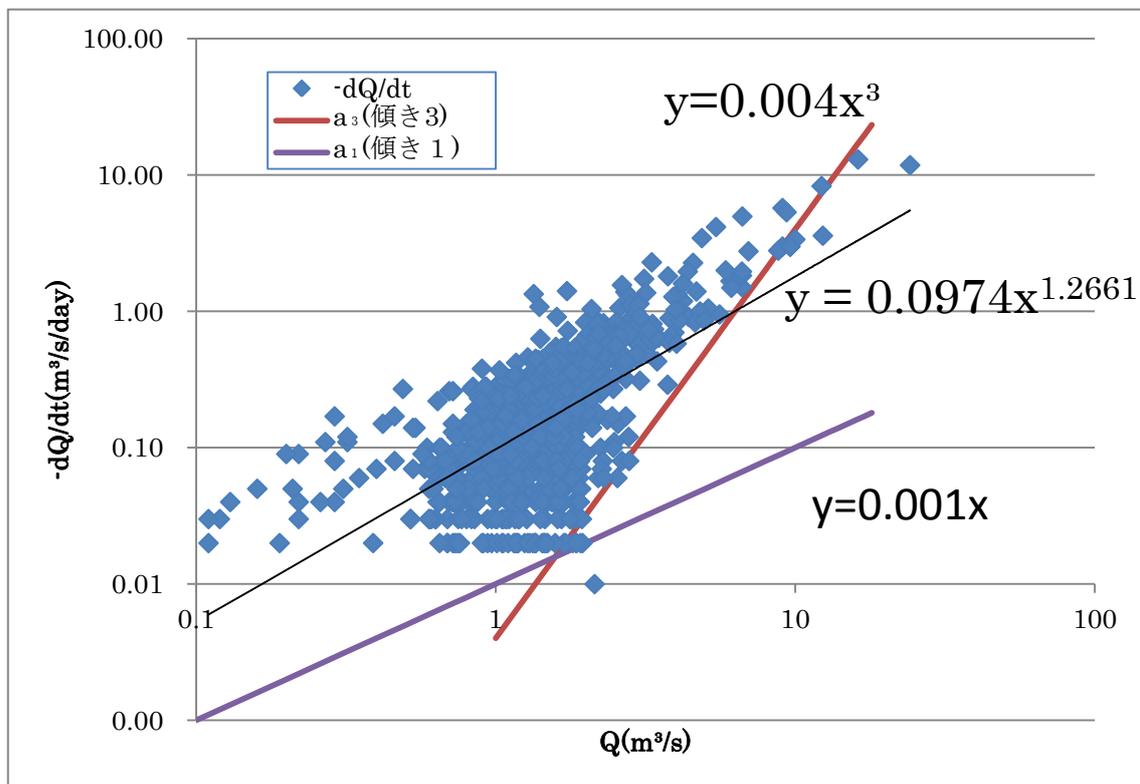


図 18 小野川観測所流量と流量減衰率

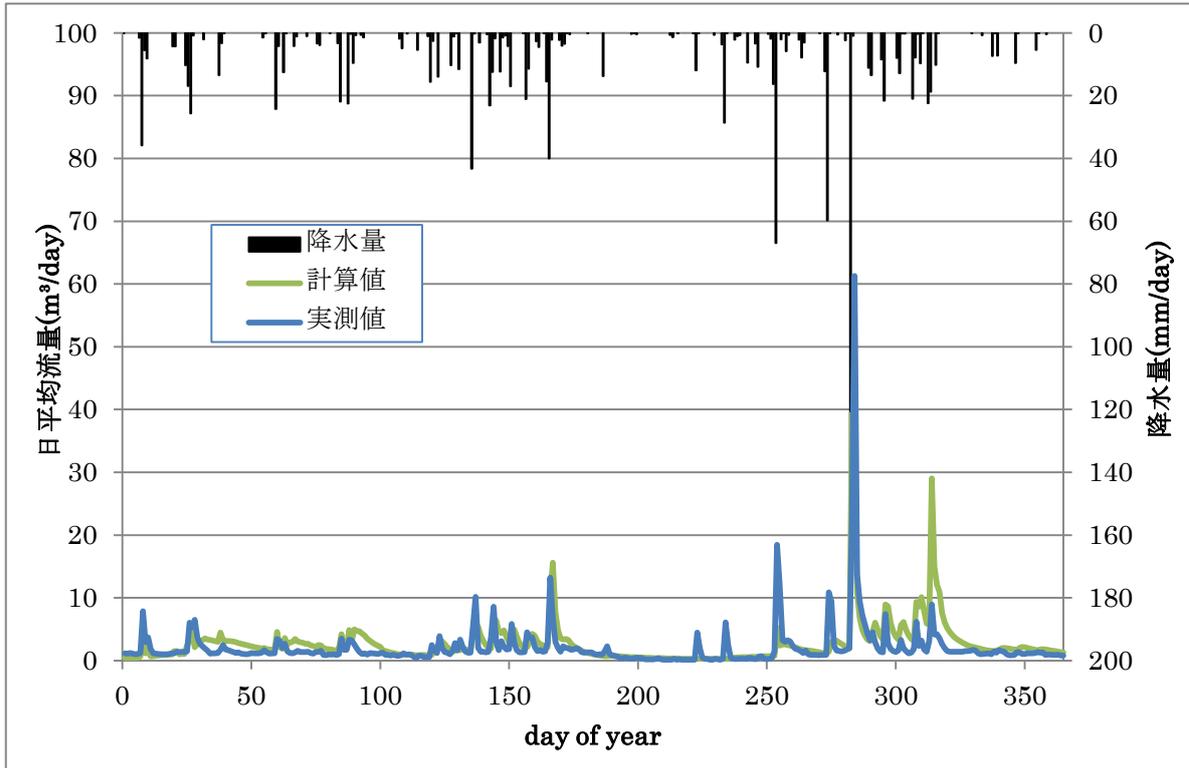


図 19 日平均流量計算結果と実測値との比較 (2001 年)

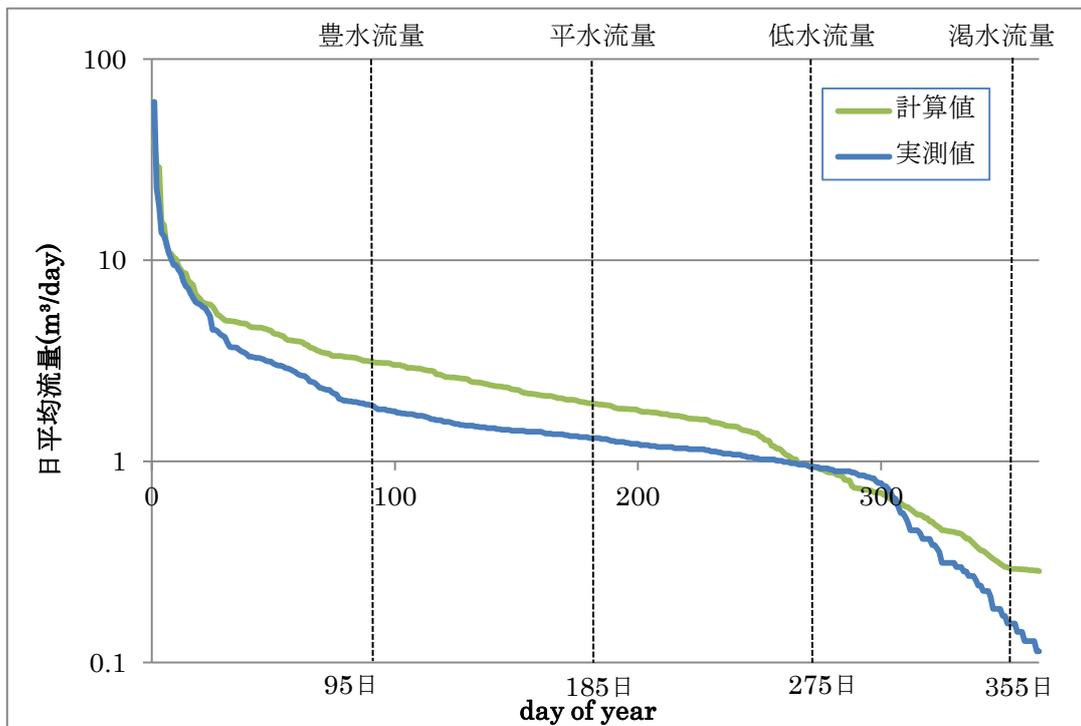


図 20 計算値と実測値の流況曲線の比較(2001 年)

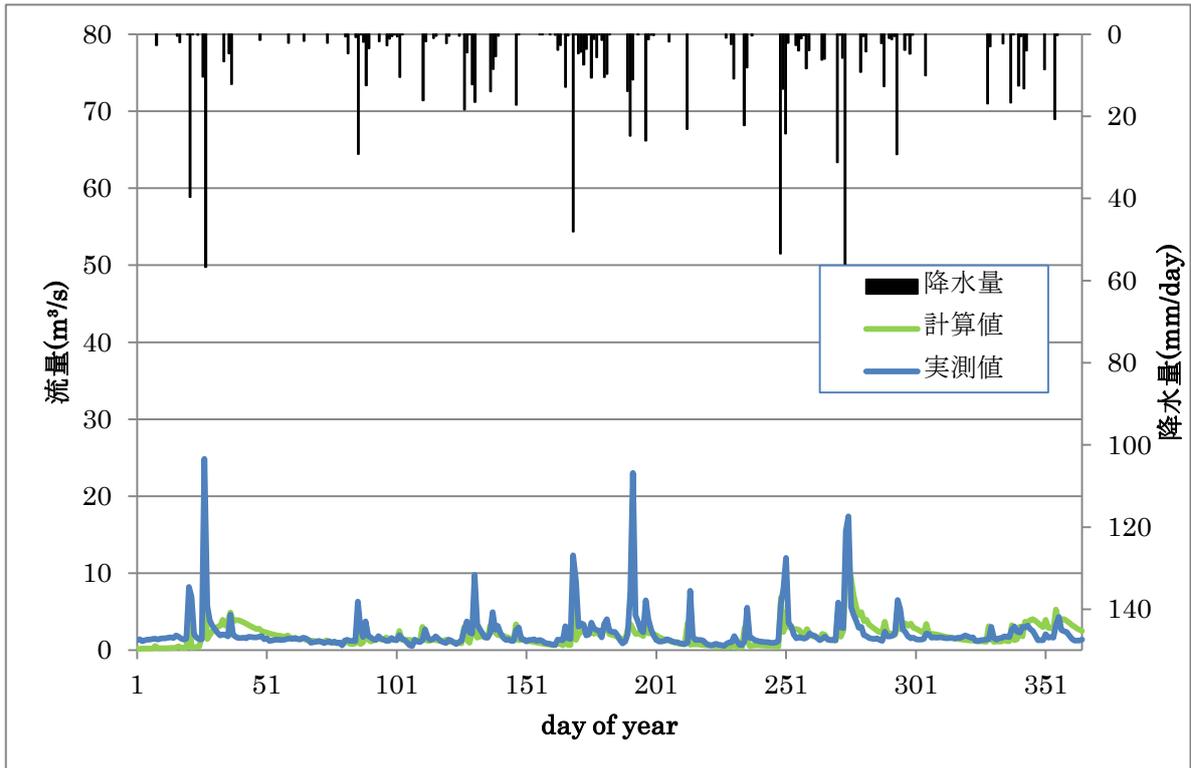


図 21 日平均流量計算結果と実測値との比較(2002年)

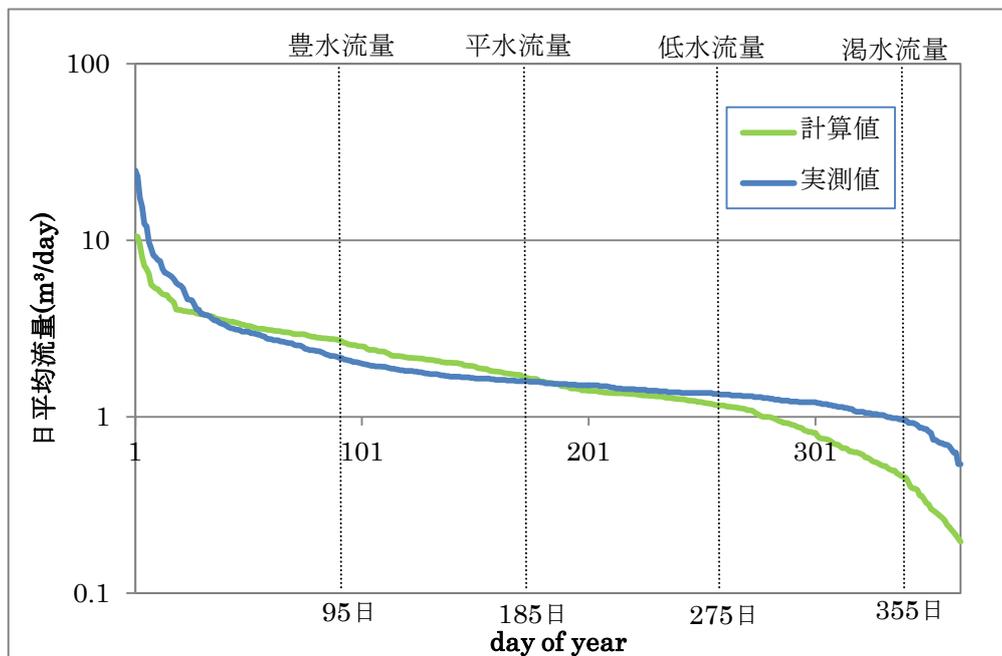


図 22 計算値と実測値の流況曲線の比較(2002年)

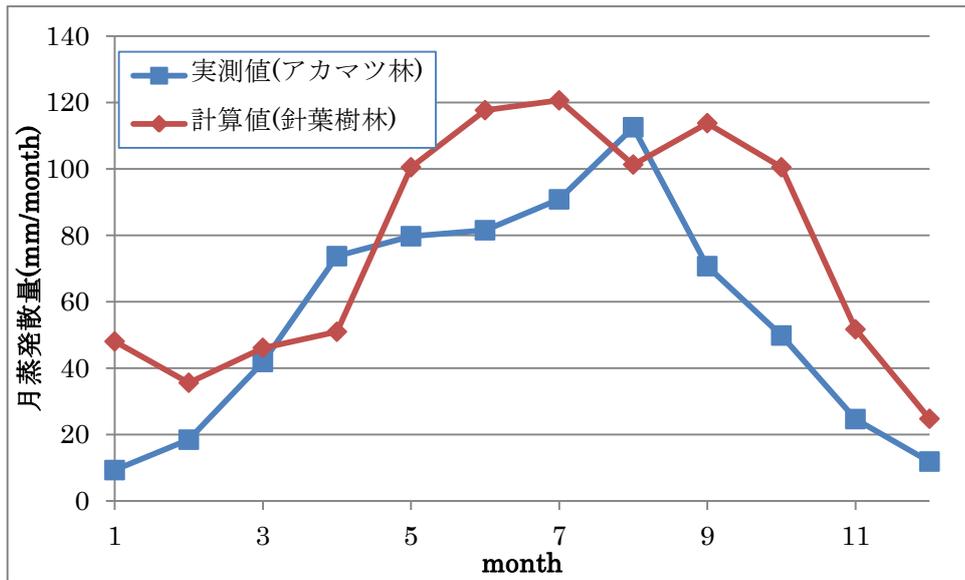


図 23 月平均蒸発散量計算結果(針葉樹林平均値)と
 実測値(陸域環境研究センターアカマツ林)の比較
 計算値は 2001 年, 実測値は 1984 年 9 月-1985 年 8 月の値

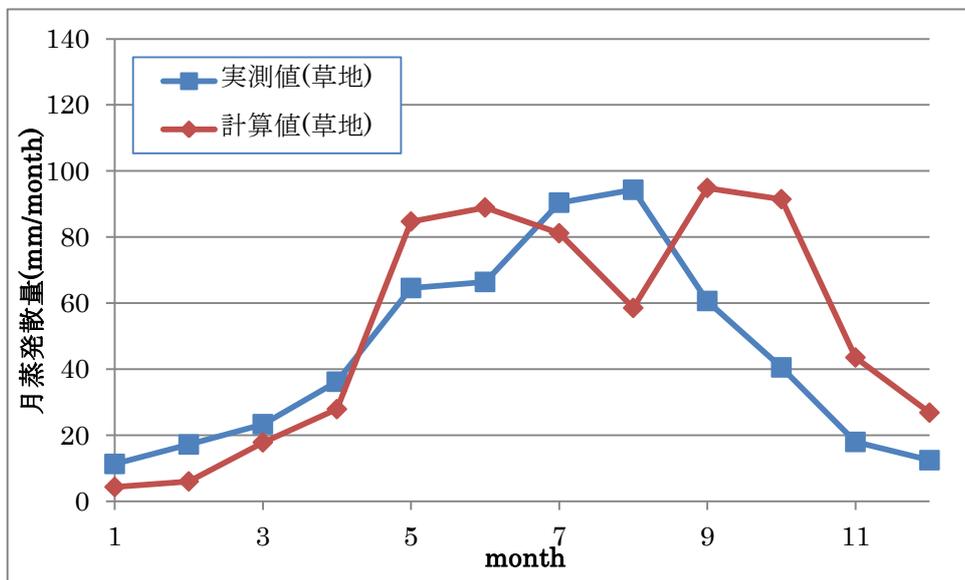


図 24 月平均蒸発散量計算結果(草地平均値)と
 実測値(陸域環境研究センター草地)の比較
 計算値は 2001 年, 実測値は 1980 年, 1981 年, 1984 年 9 月-1985 年 8 月の平均値

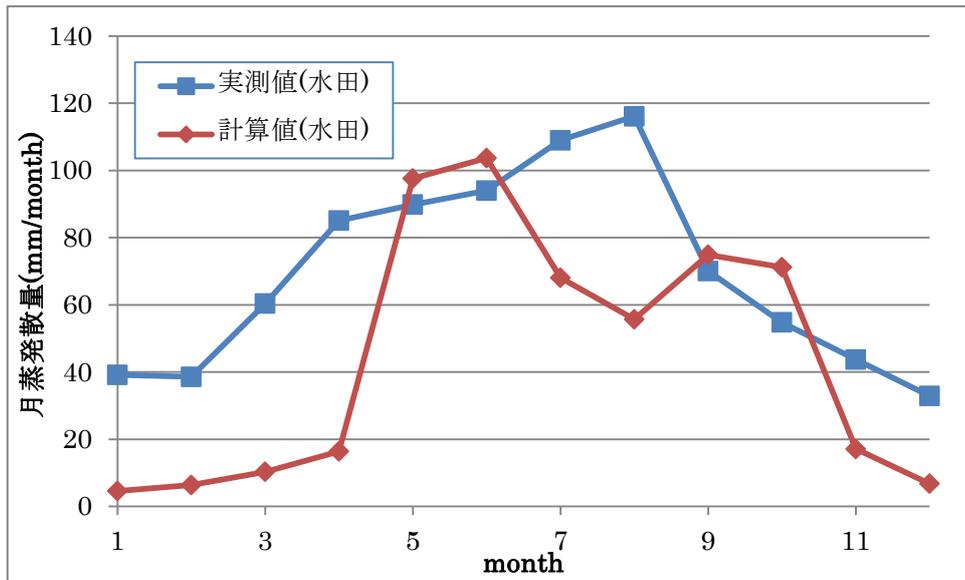


図 25 月平均蒸発散量計算結果(水田平均値)と実測値(農業環境技術研究所つくば市間瀬サイト)の比較
計算値は 2001 年, 実測値は 2004 年~2006 年の平均値

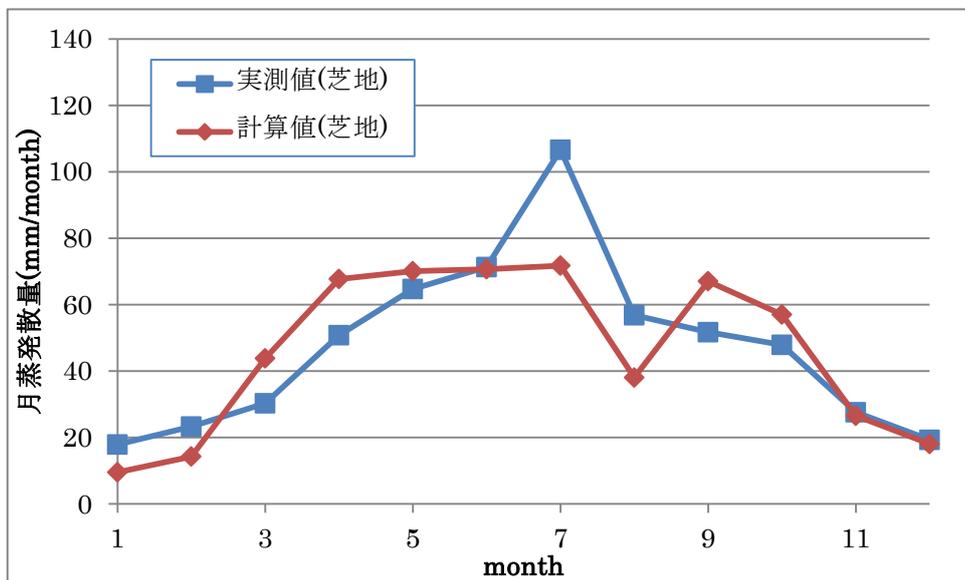


図 26 月平均蒸発散量計算結果(芝地平均値)と実測値(気象研究所)の比較
計算値, 実測値共に 2001 年の値

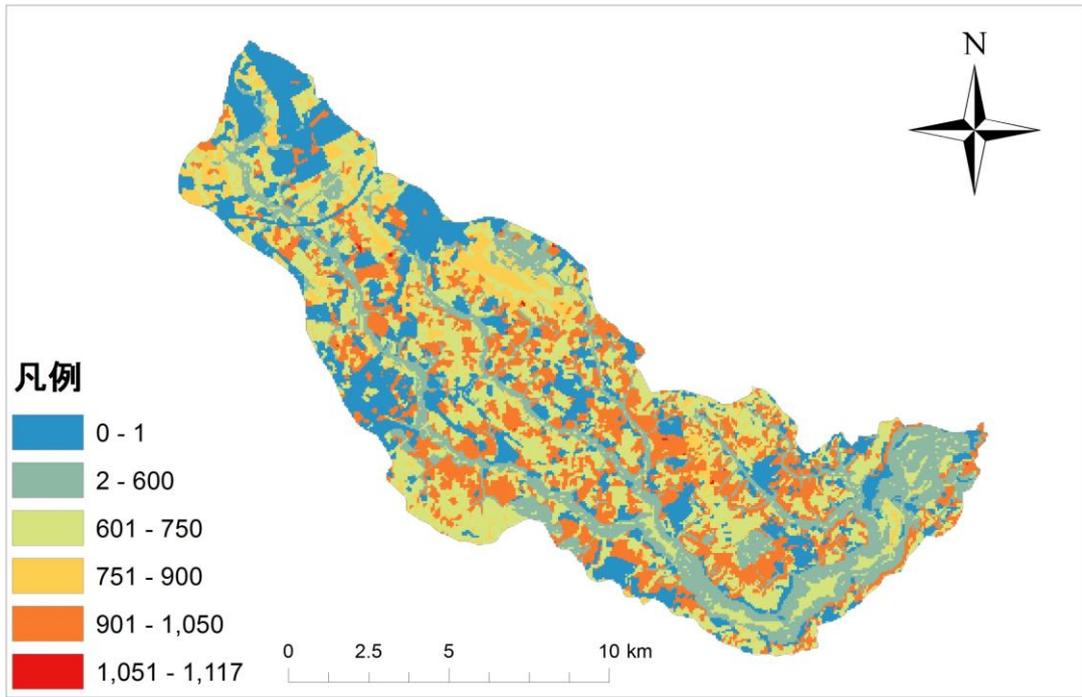


图 27 蒸發散量分布計算結果 (2001 年年積算值・單位 mm/year)

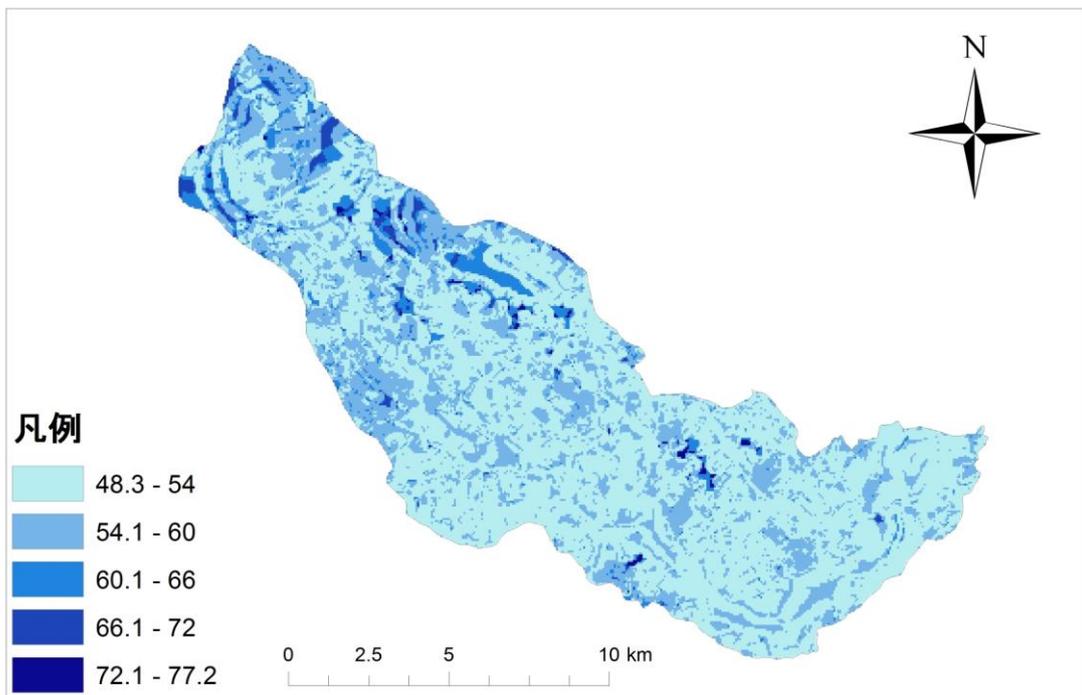


图 28 土壤水分量 (第 1 層) 分布計算結果 (2001 年年平均值・單位%)

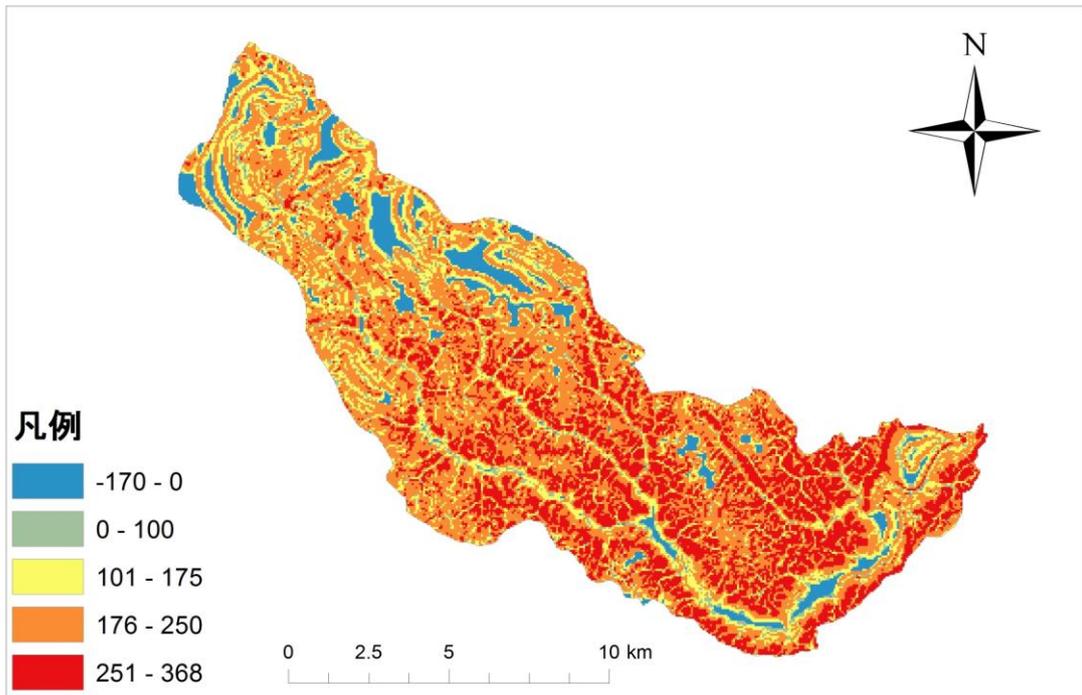


図 29 地下水面までの深さ分布計算結果 (2001 年年平均値・単位 cm/year)

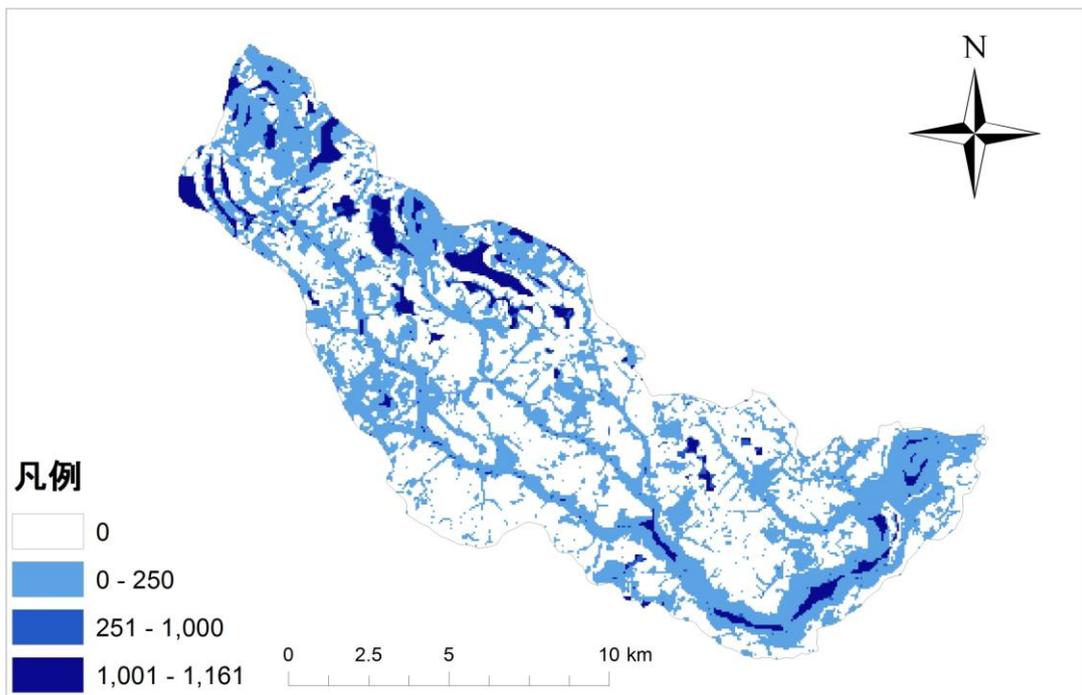


図 30 表面流出量分布計算結果 (2001 年年積算値・単位 mm/year)

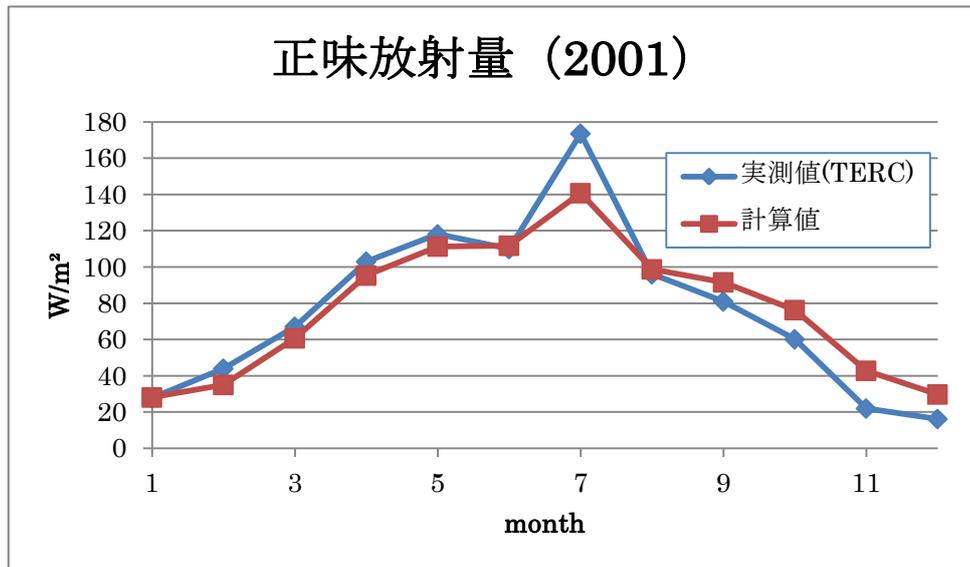


図 31 月平均正味放射量計算結果と実測値との比較-2001(W/m²)

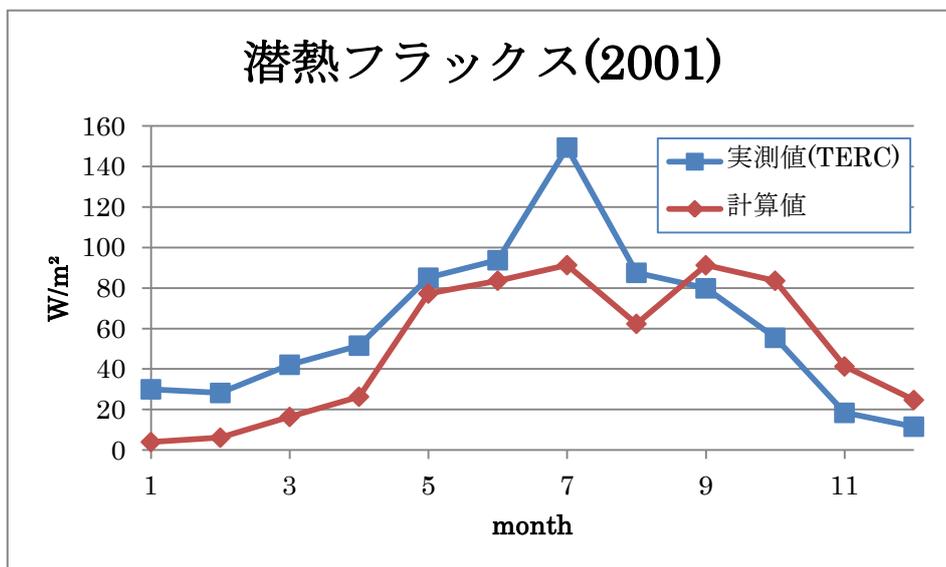


図 32 月平均潜熱フラックス計算結果と実測値との比較-2001(W/m²)

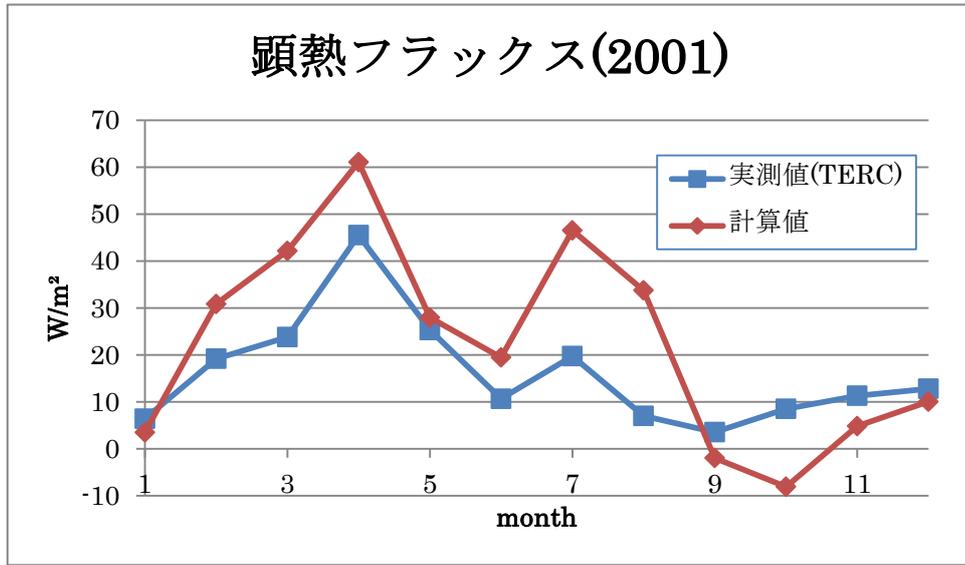


図 33 月平均顕熱フラックス計算結果と実測値との比較-2001(W/m²)

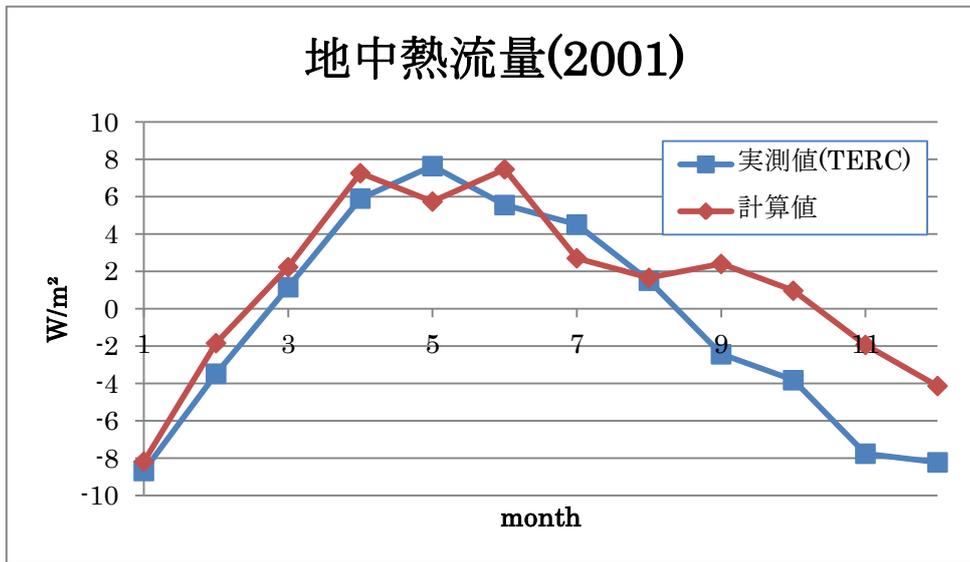


図 34 月平均地中熱流量計算結果と実測値との比較-2001(W/m²)

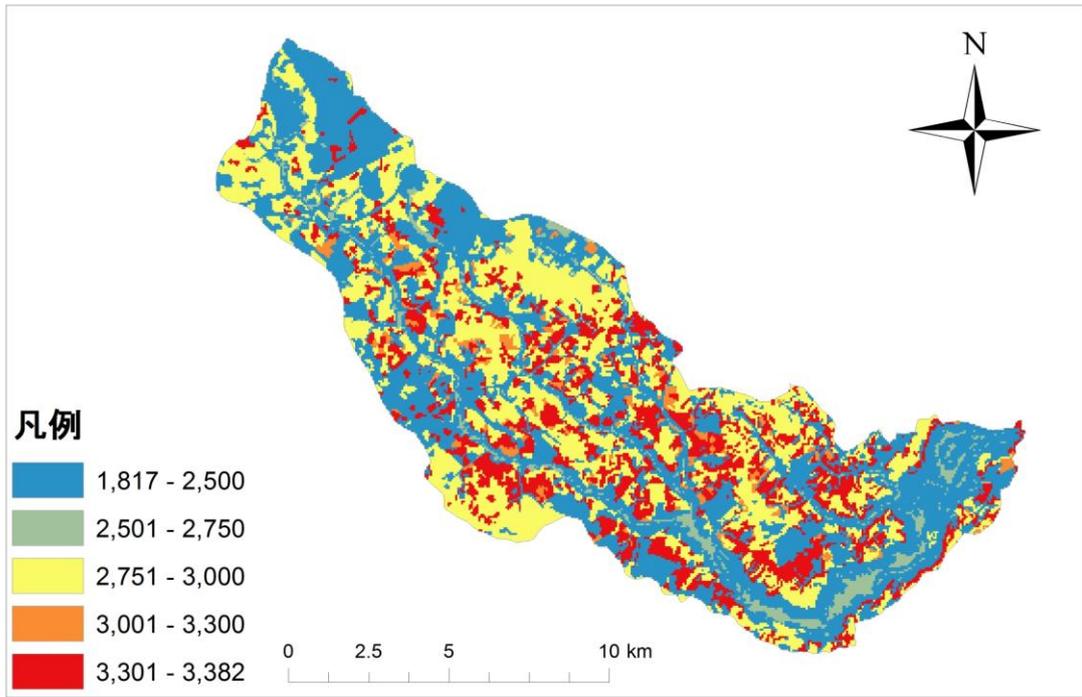


図 35 正味放射量分布計算結果 (2001 年年積算値・単位 MJ/m²/year)

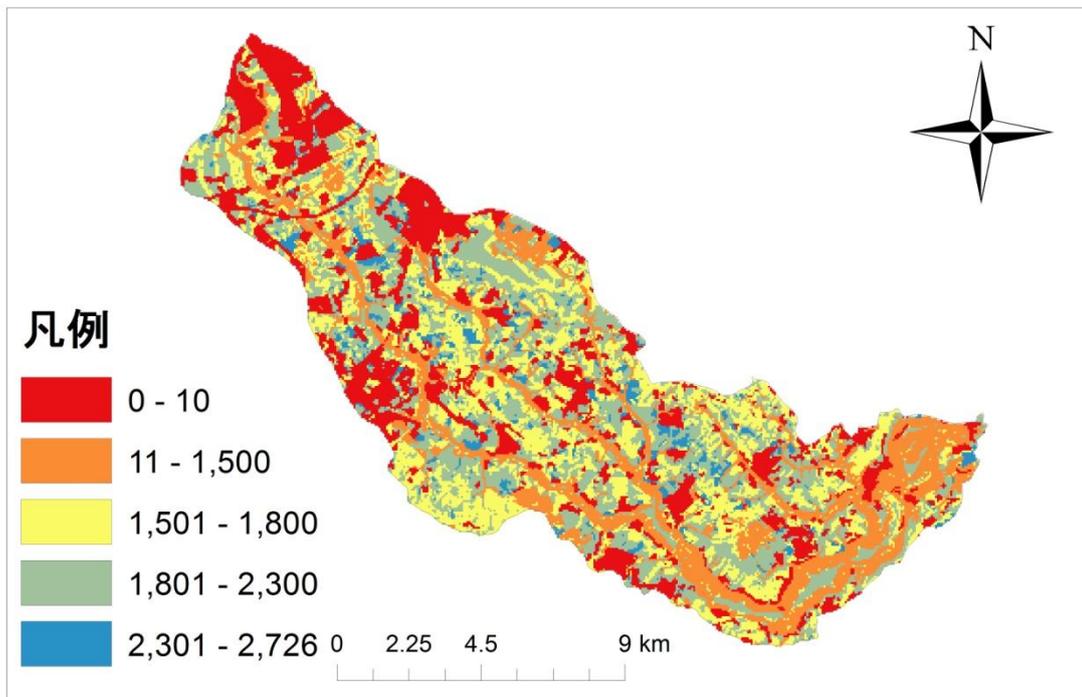


図 36 潜熱フラックス分布計算結果 (2001 年年積算値・単位 MJ/m²/year)

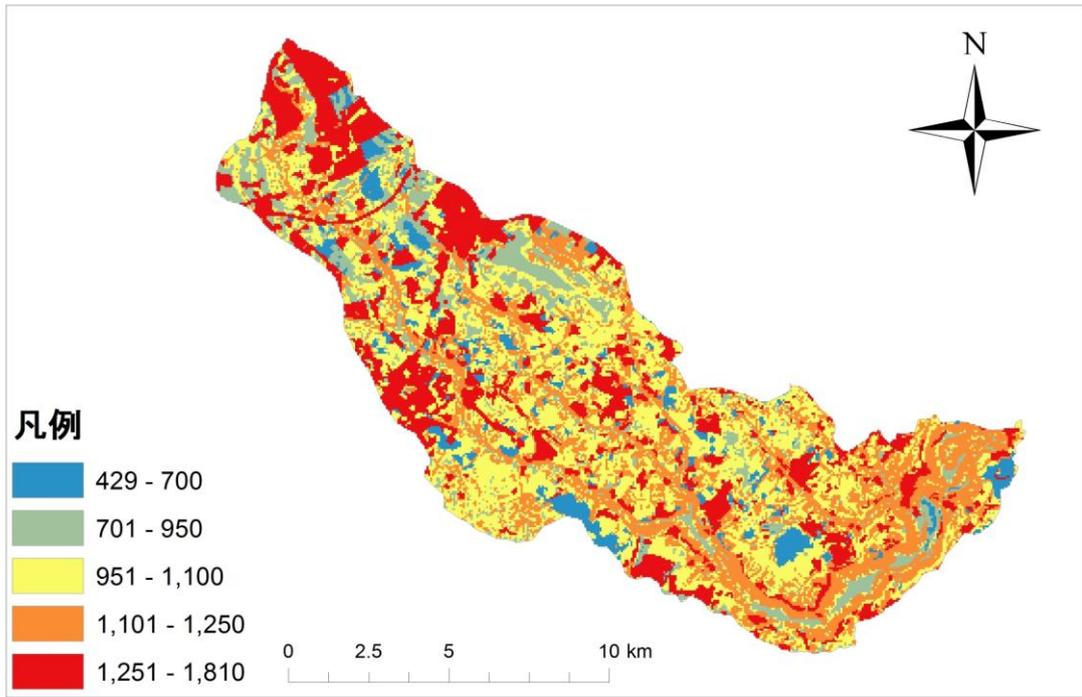


図 37 顕熱フラックス分布計算結果（2001 年年積算値・単位 MJ/m²/year）

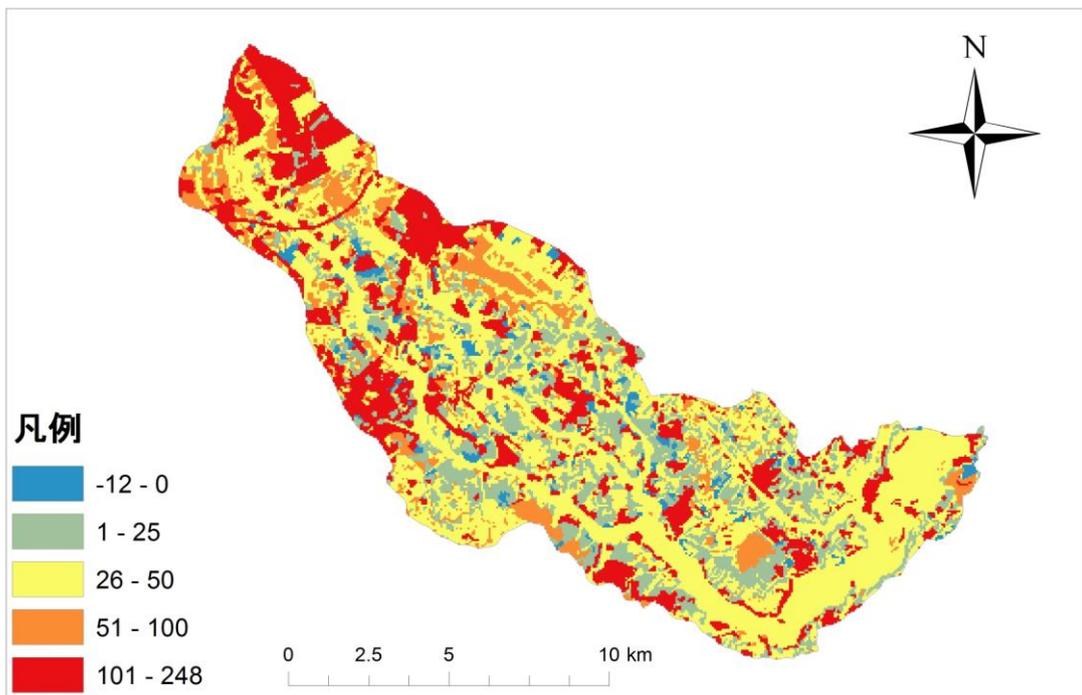


図 38 地中熱流量分布計算結果（2001 年年積算値・単位 MJ/m²/year）

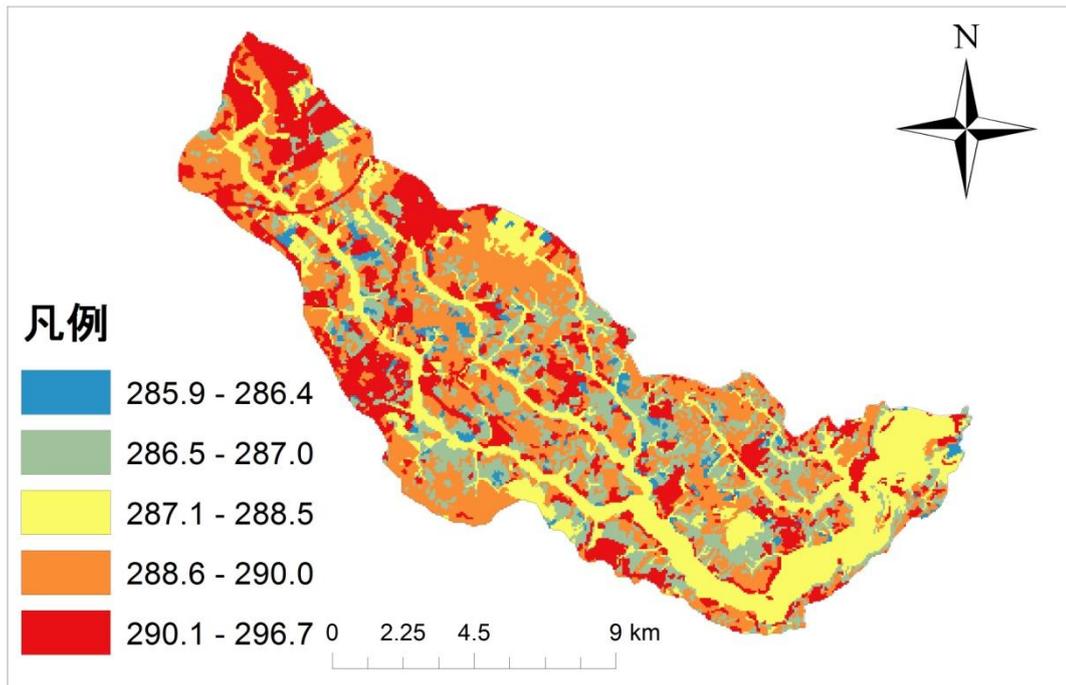


図 39 地表面温度分布計算結果 (2001 年年積算値・単位 K/year)

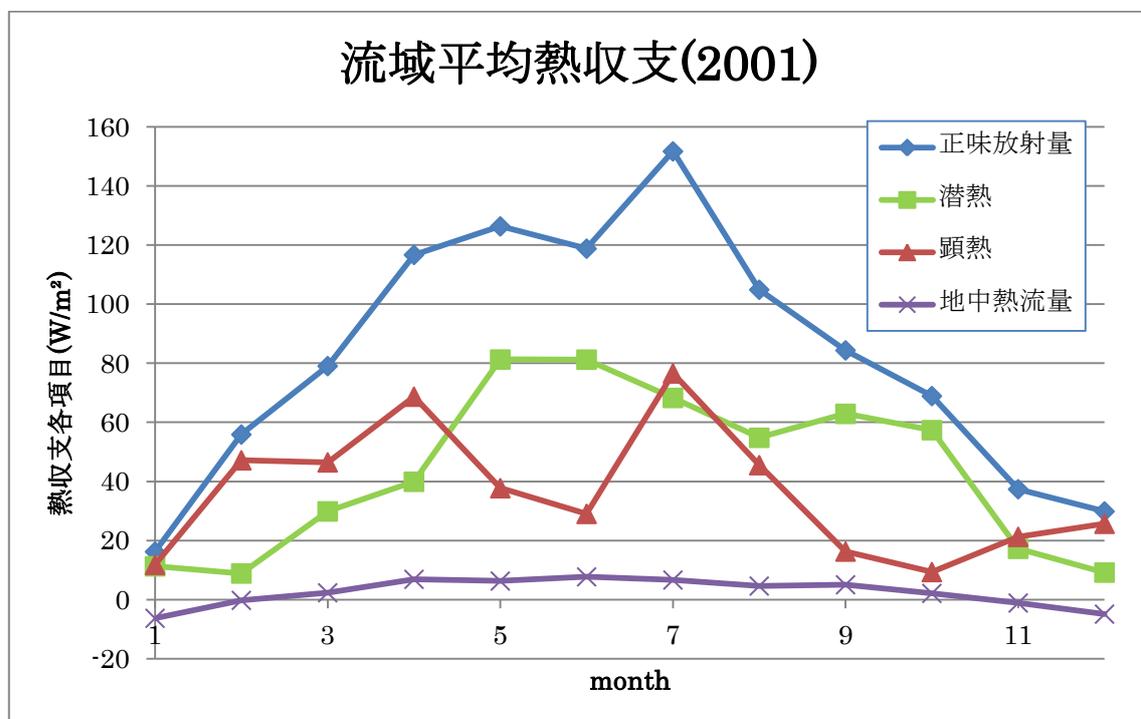


図 40 流域平均熱収支計算結果まとめ-2001(W/m²)

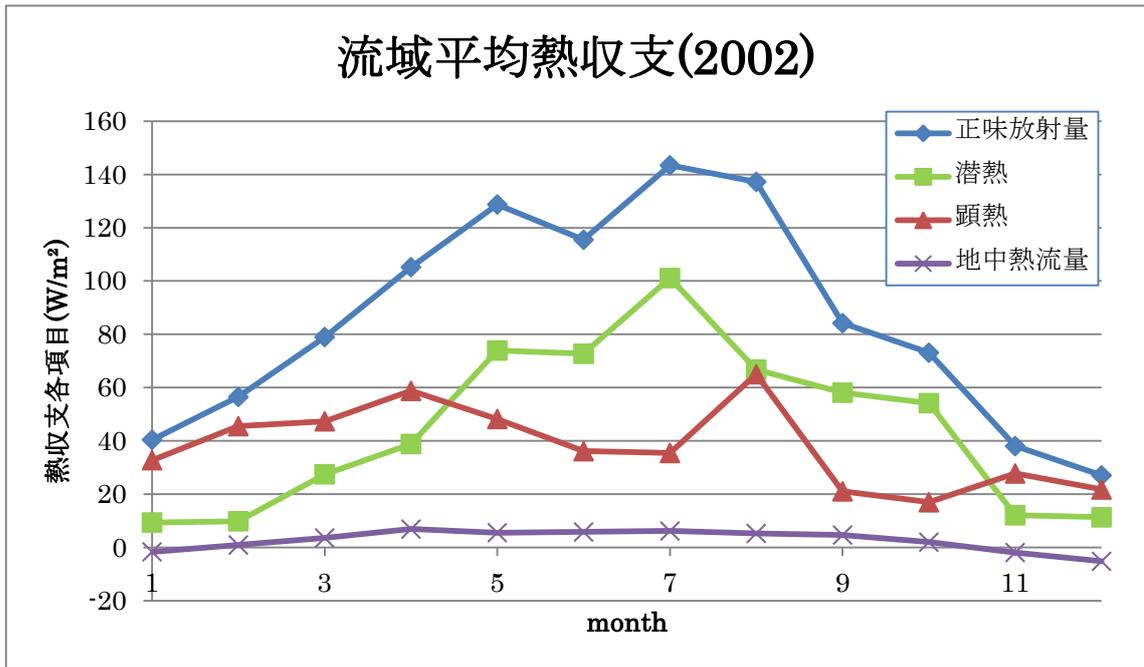


図 41 流域平均熱収支計算結果まとめ-2002(W/m²)

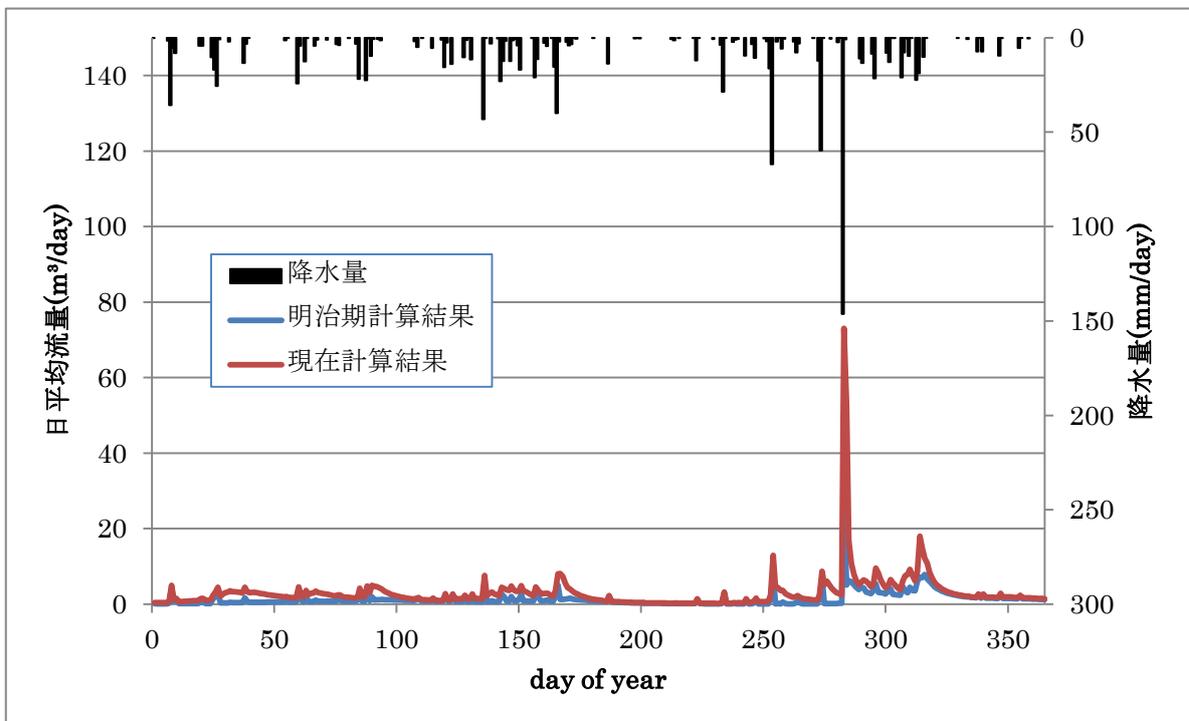


図 42 現在と明治日平均流量計算結果の比較-2001年

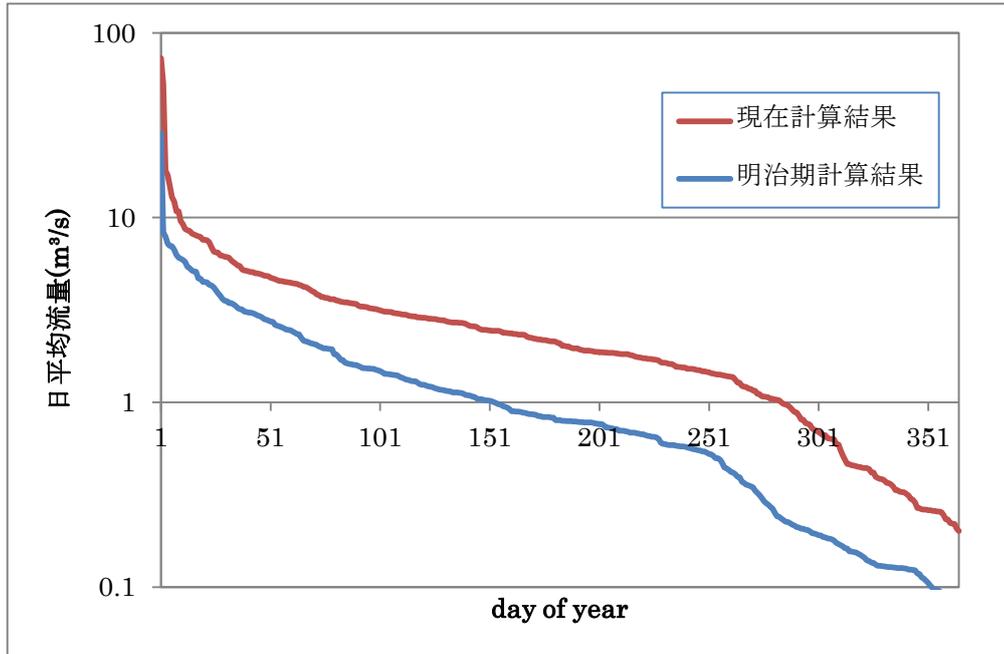


図 43 現在と明治計算値流況曲線－2001 年

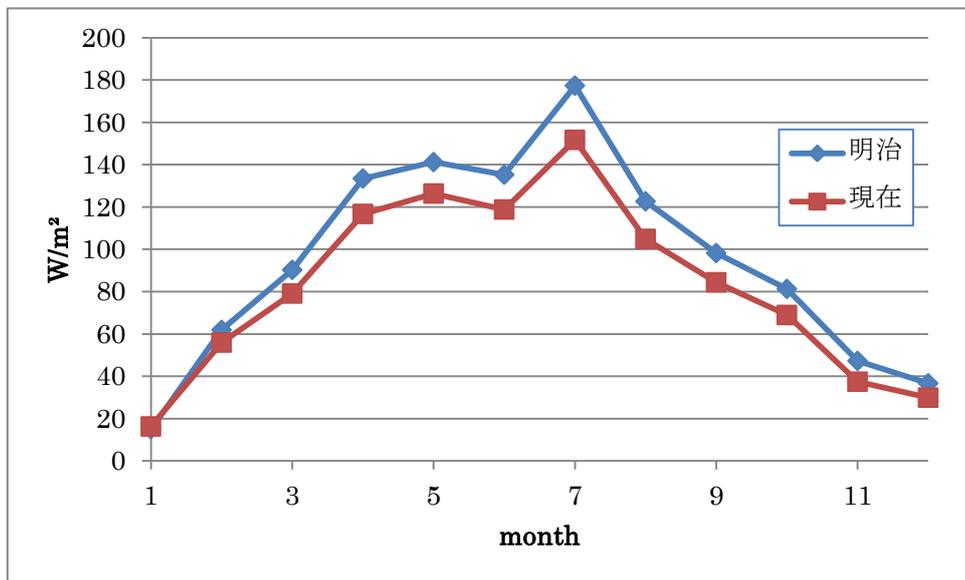


図 44 現在と明治流域平均月別正味放射量
計算結果の比較－2001 年

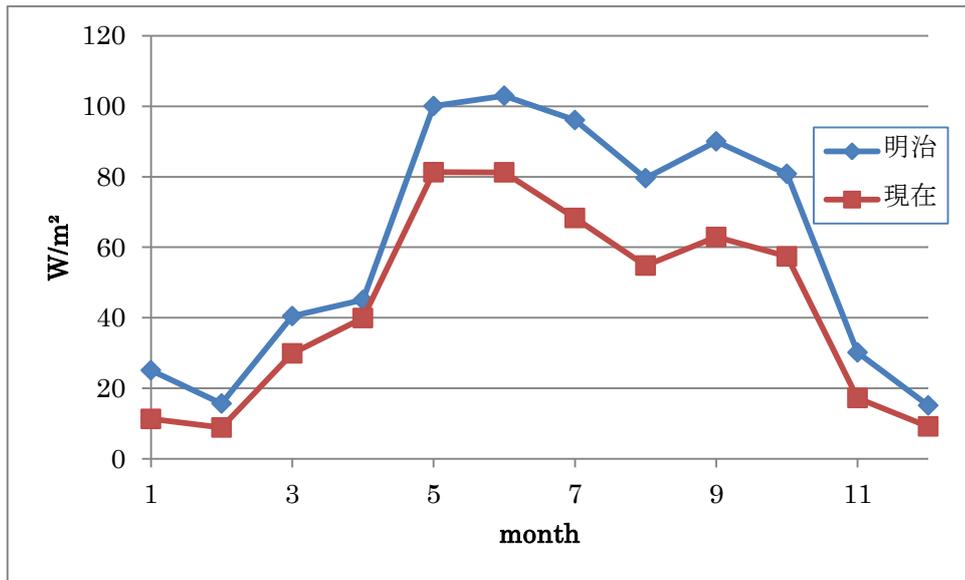


図 45 現在と明治流域平均月別潜熱フラックス
計算結果の比較－2001 年

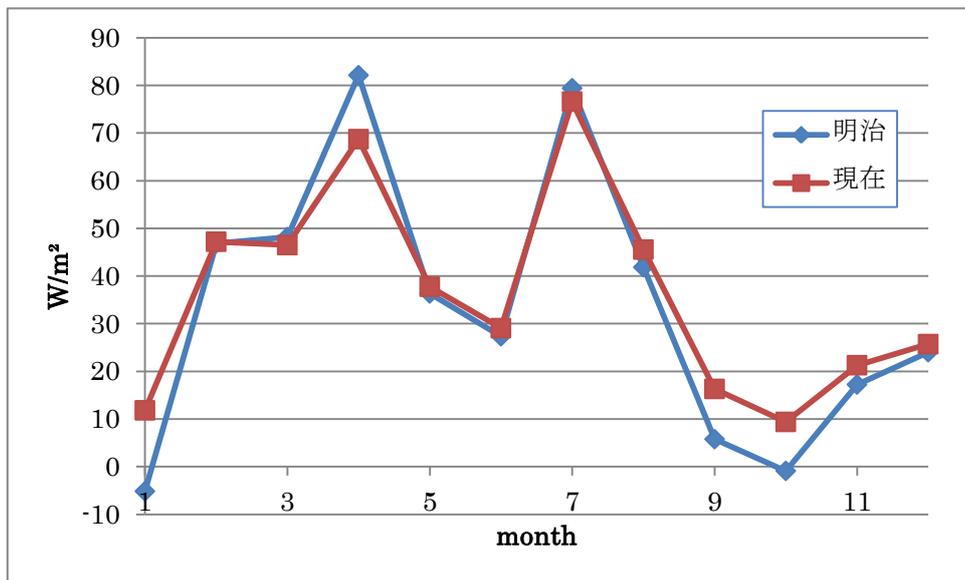


図 46 現在と明治流域平均月別顕熱フラックス
計算結果の比較－2001 年

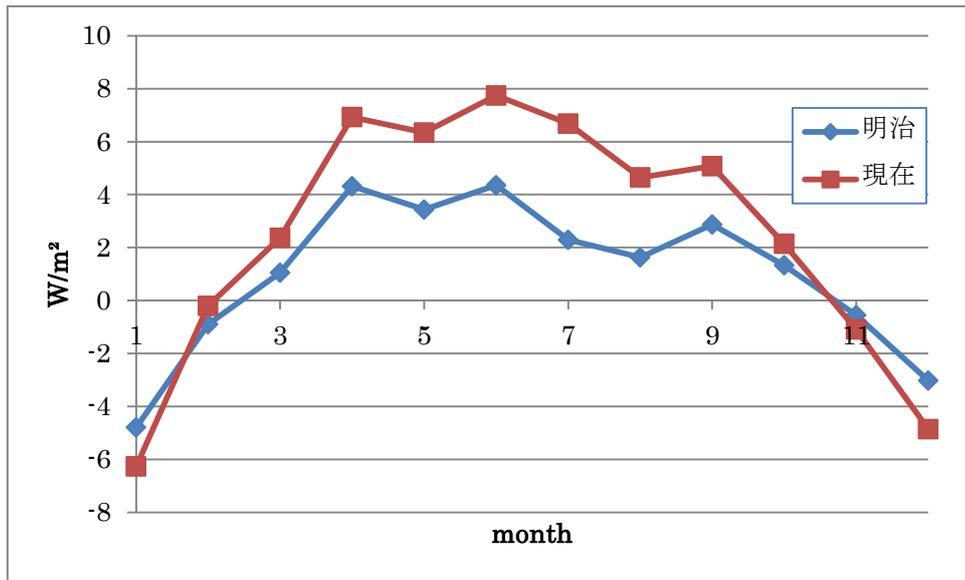


図 47 現在と明治流域平均月別地中熱流量
計算結果の比較－2001 年

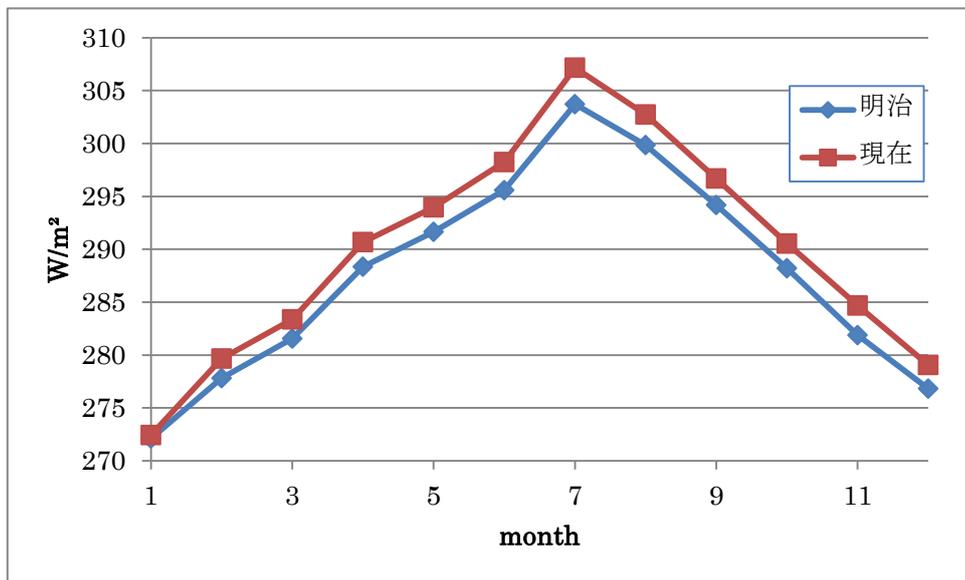


図 48 現在と明治流域平均月別地表面温度
計算結果の比較－2001 年

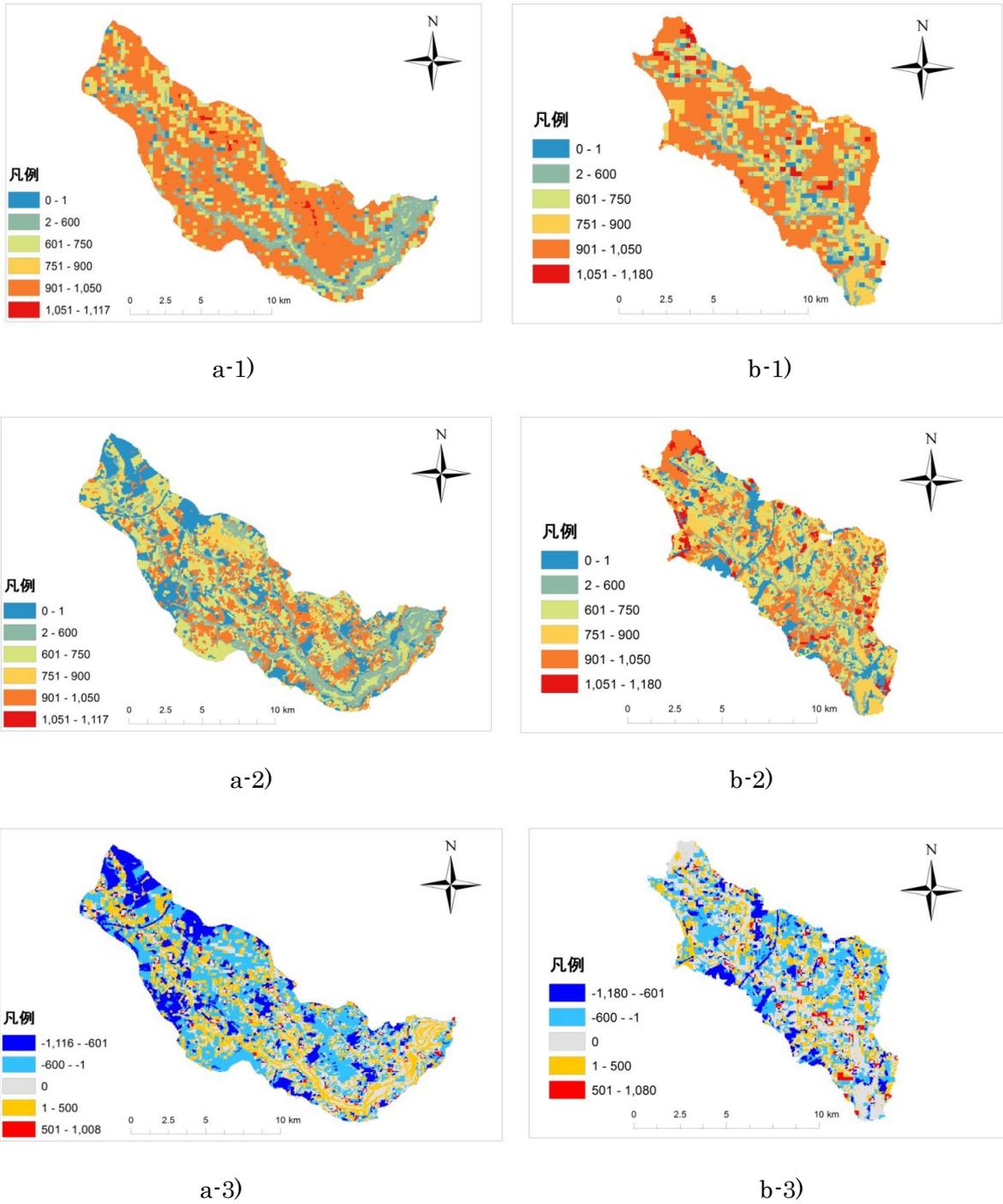


図 49 年積算蒸発散量分布計算結果(mm/year)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川變化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川變化量(現在－明治)

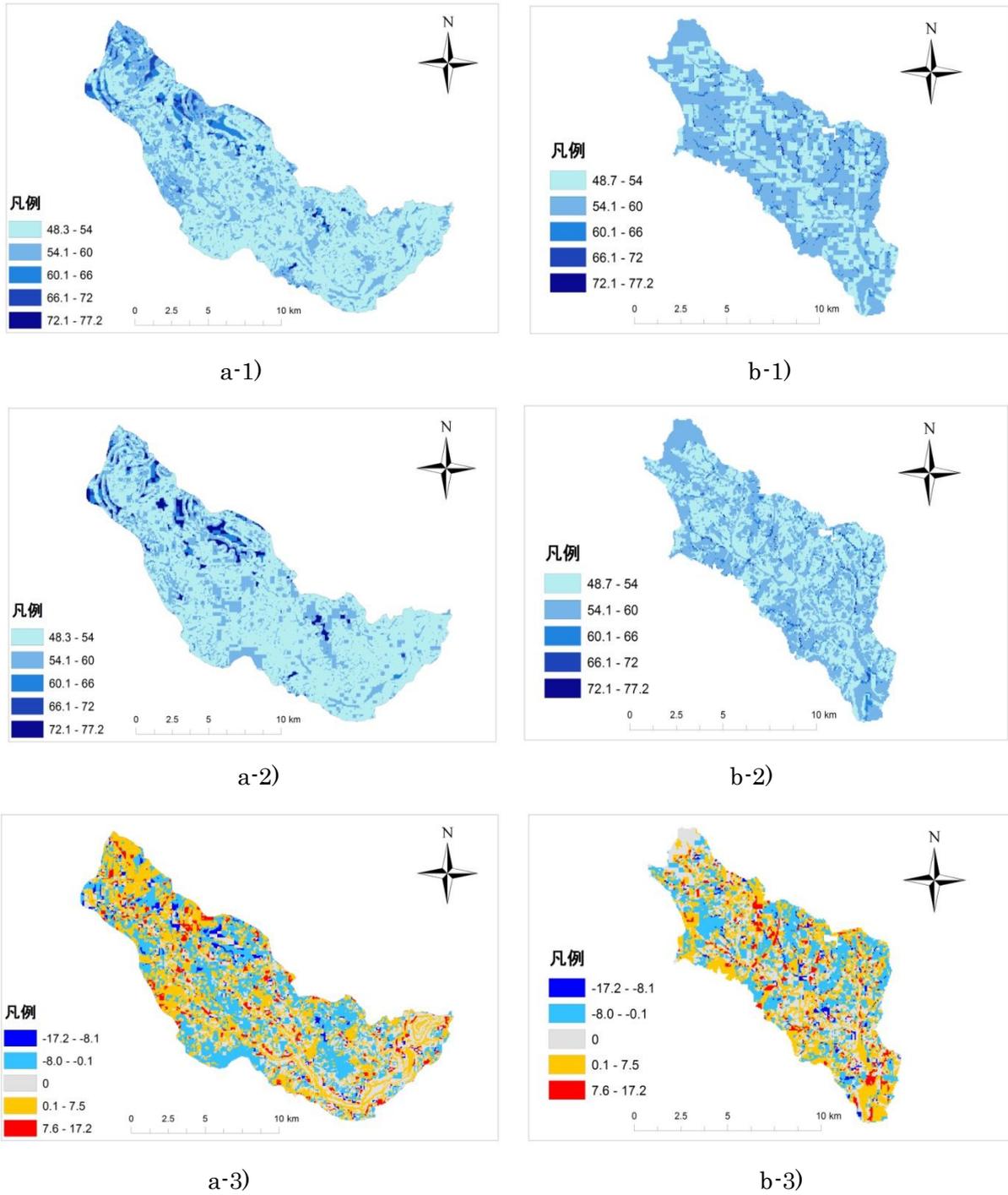
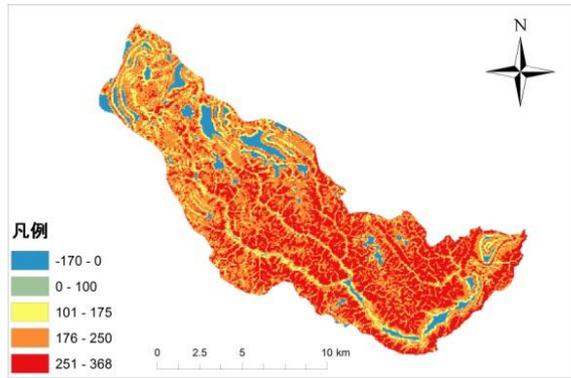
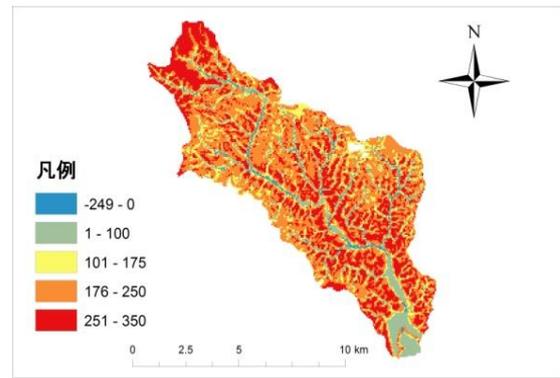


图 50 年平均土壤水分量分布計算結果(%)

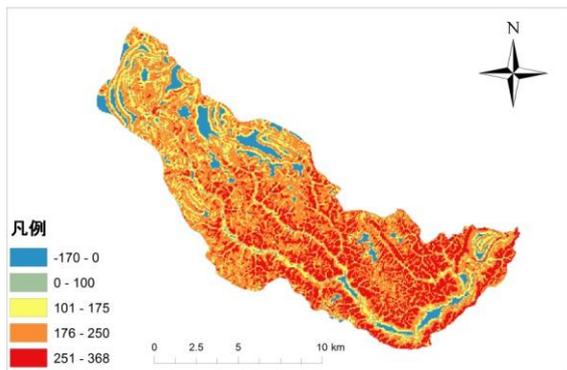
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川變化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川變化量(現在－明治)



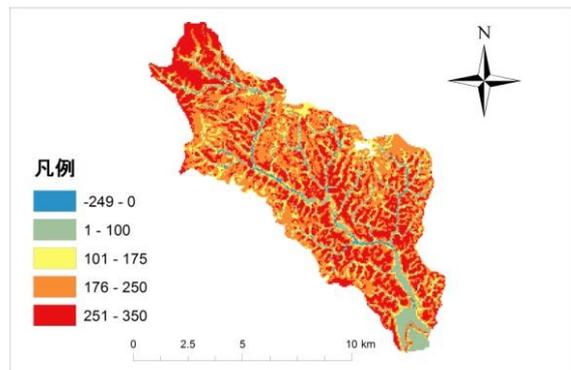
a-1)



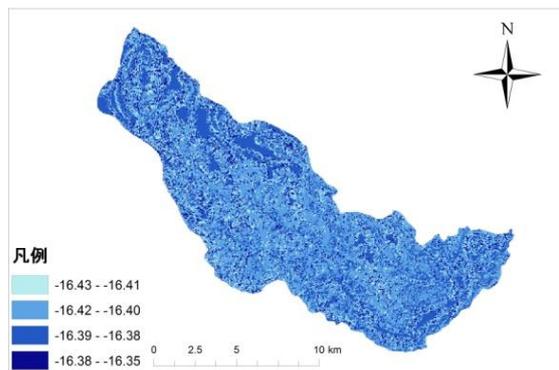
b-1)



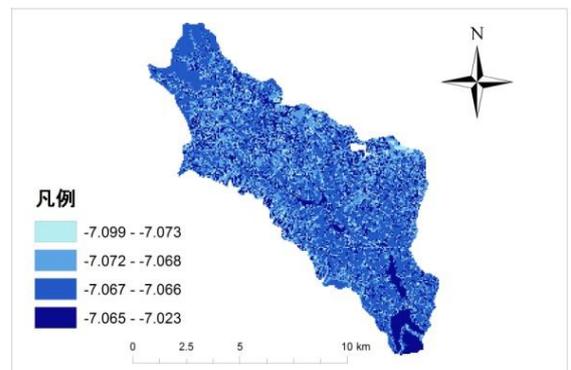
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 51 年平均地下水面までの深さ分布計算結果(cm)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

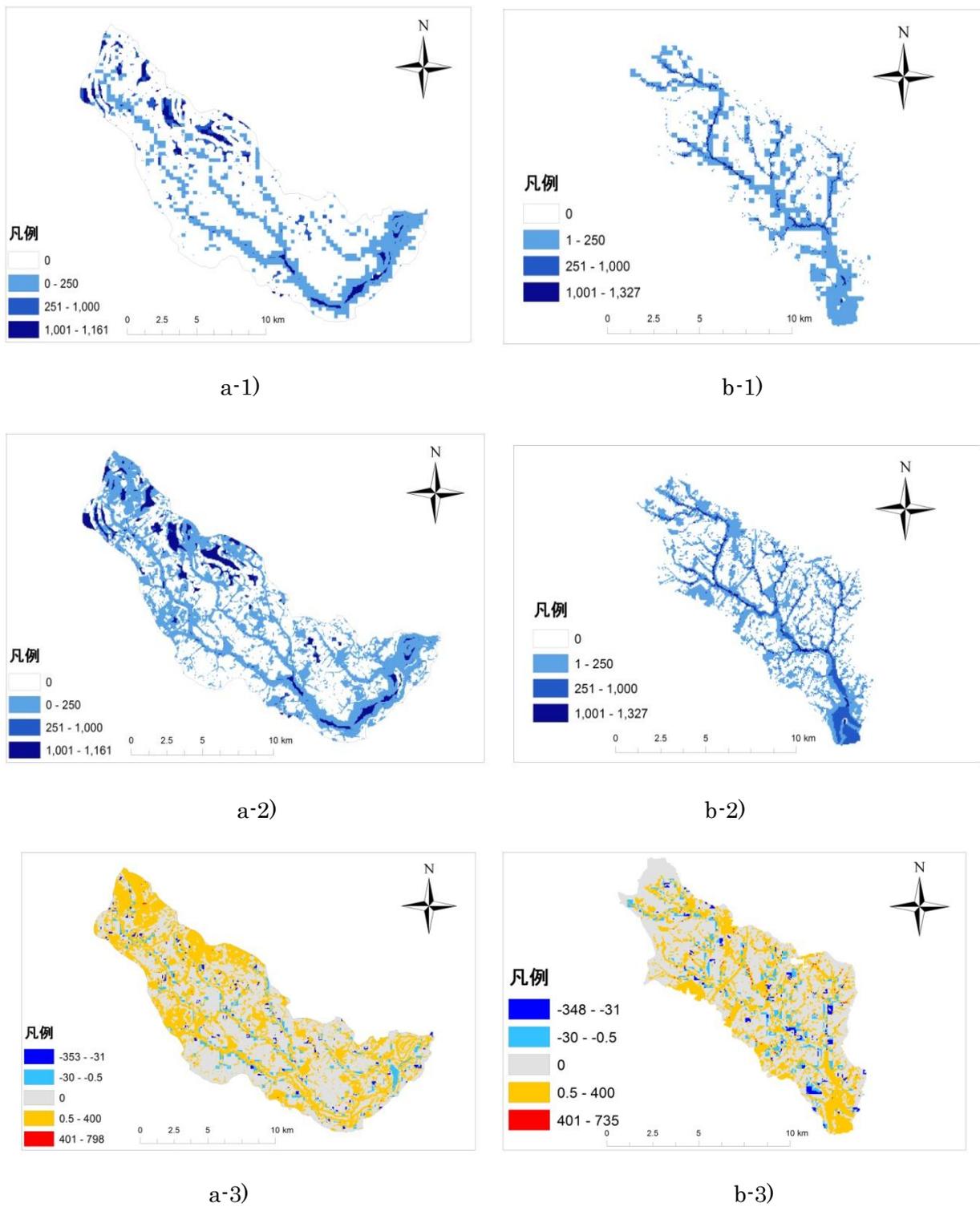
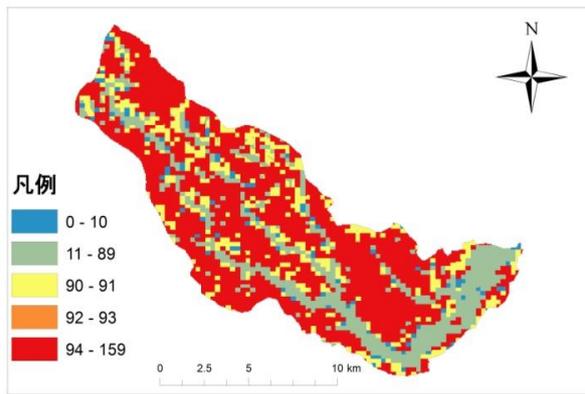
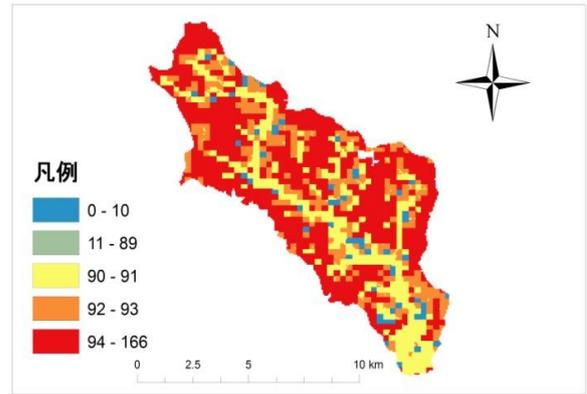


图 52 年積算表面流出量分布計算結果(mm/year)

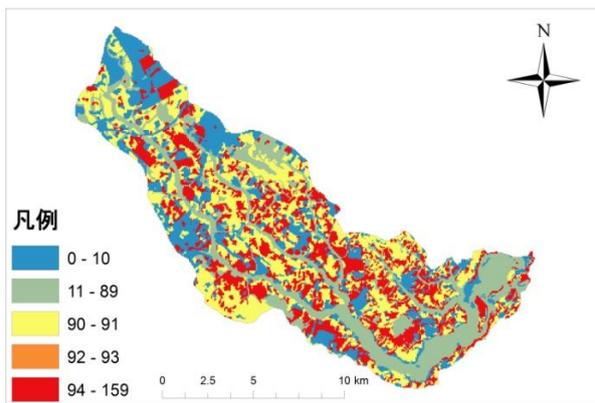
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川變化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川變化量(現在－明治)



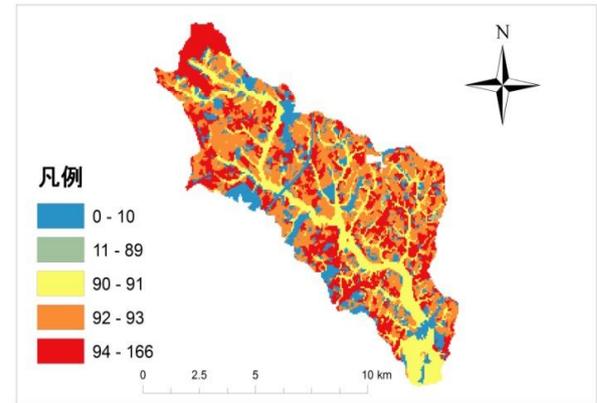
a-1)



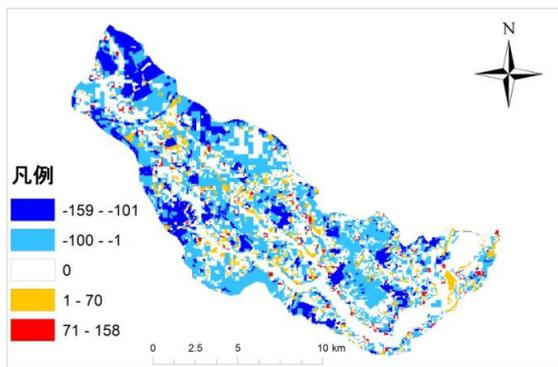
b-1)



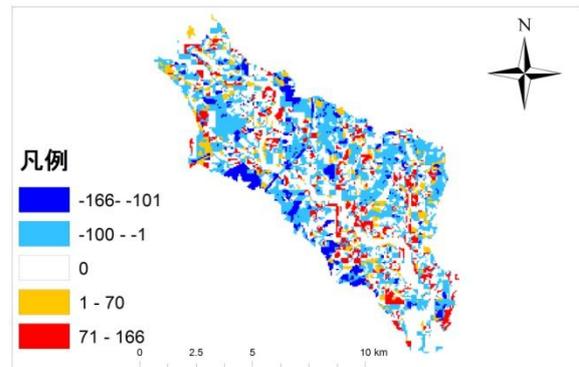
a-2)



b-2)



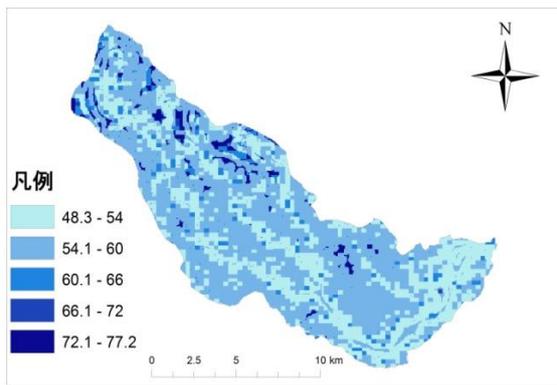
a-3)



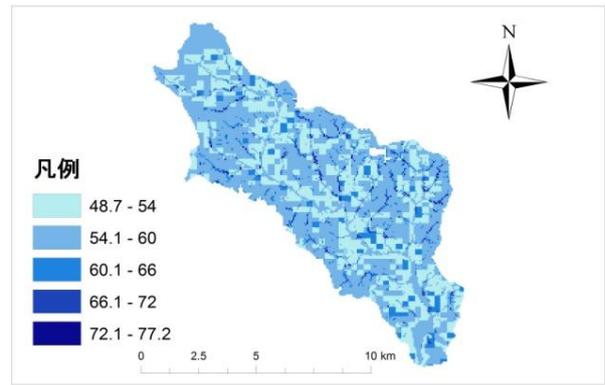
b-3)

图 53 9-10 月蒸発散量分布計算結果(mm)

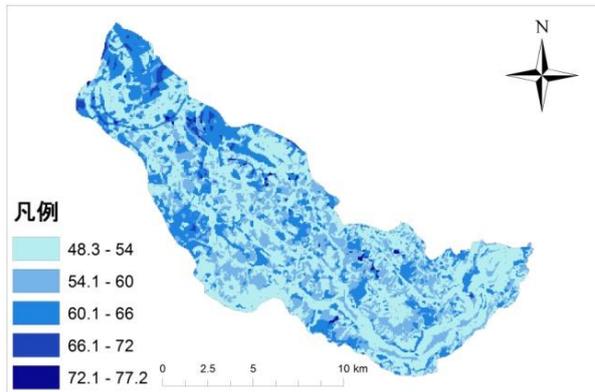
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)



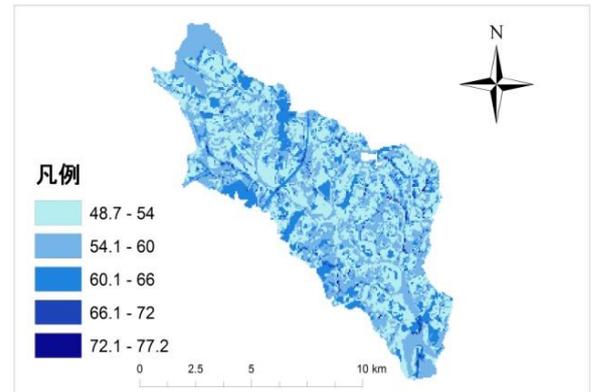
a-1)



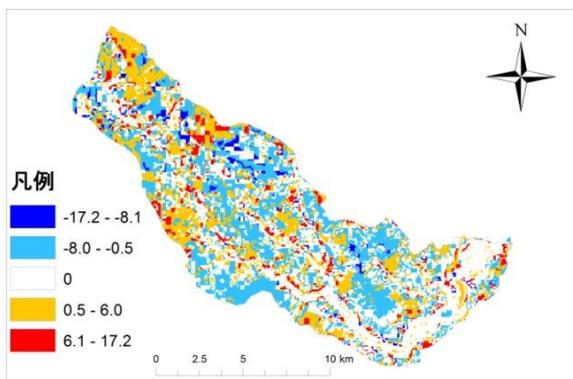
b-1)



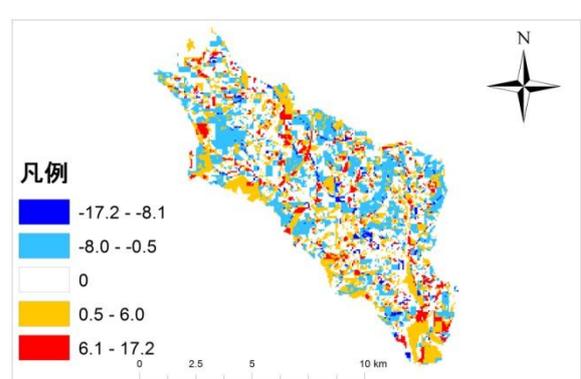
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 54 9-10月不飽和第1層水分量分布計算結果(%)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)

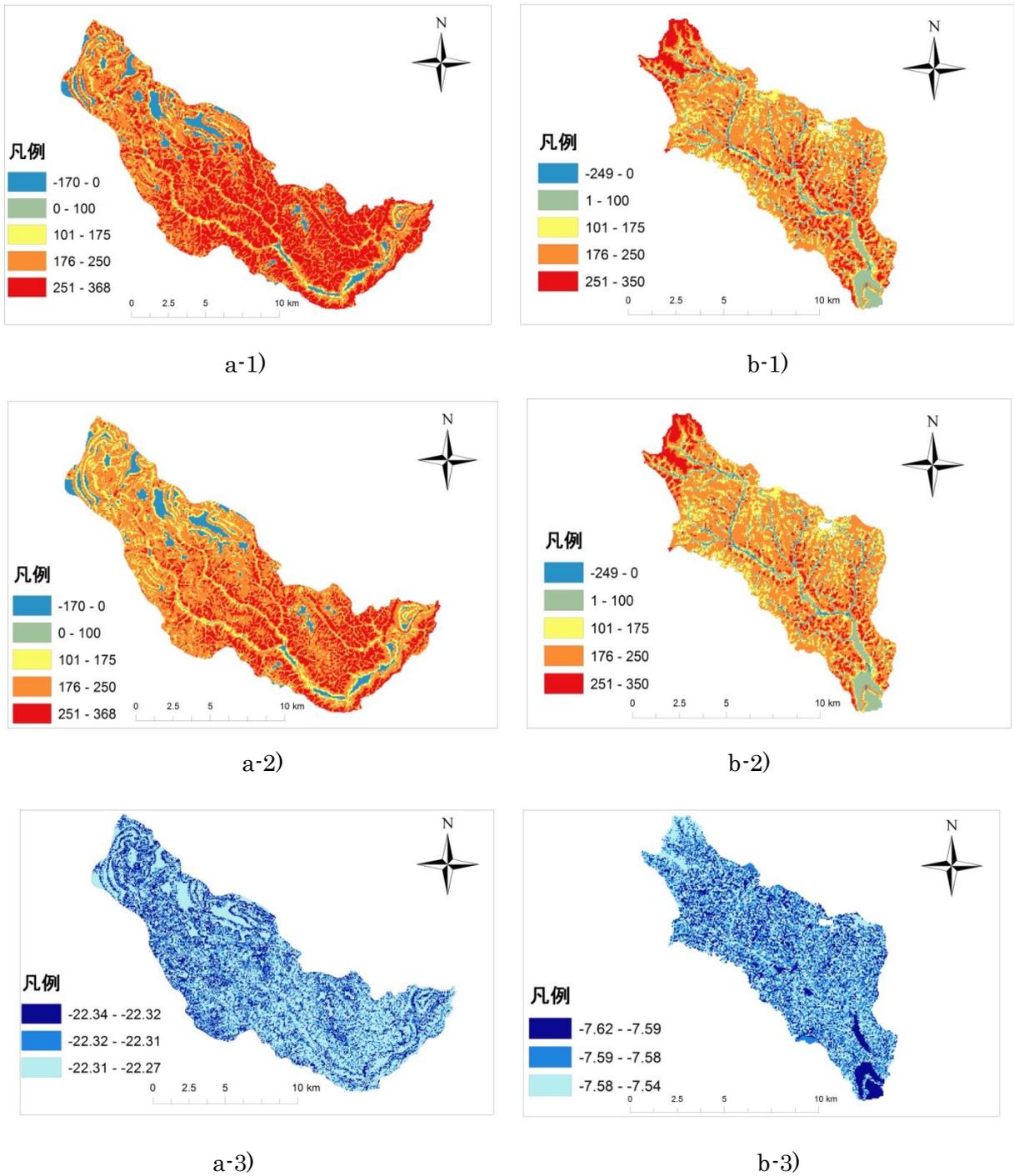
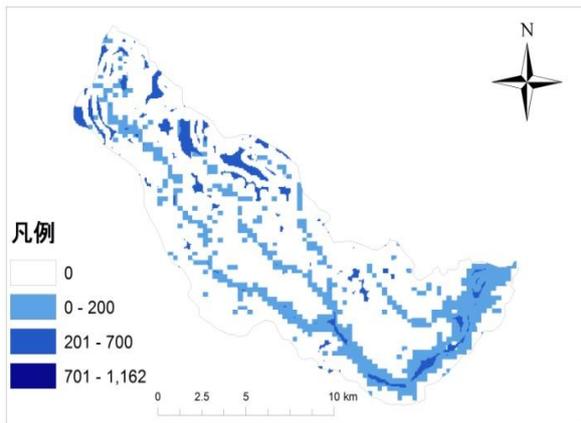
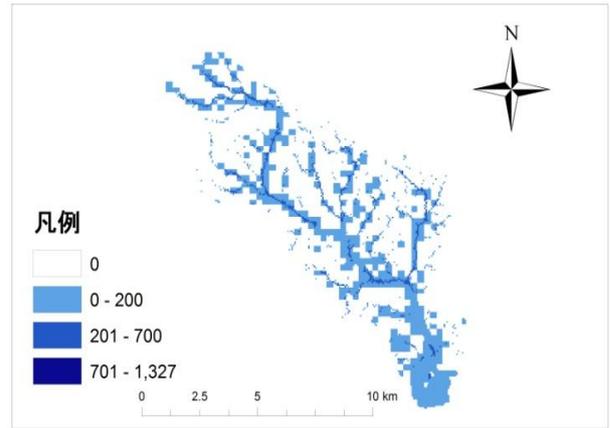


図 55 9-10 月地下水面までの深さ分布計算結果(cm)

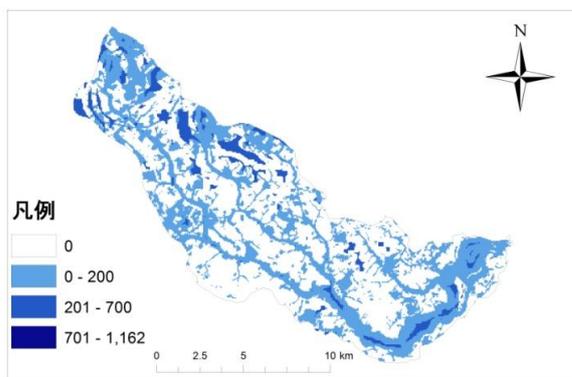
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)



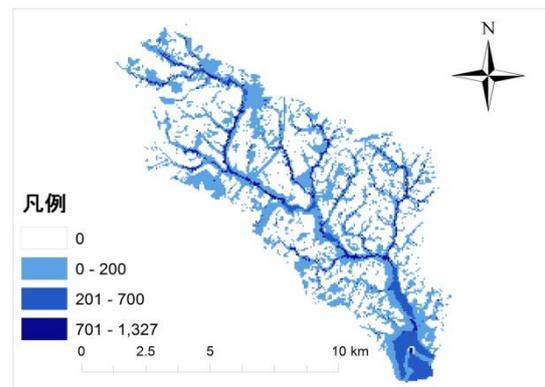
a-1)



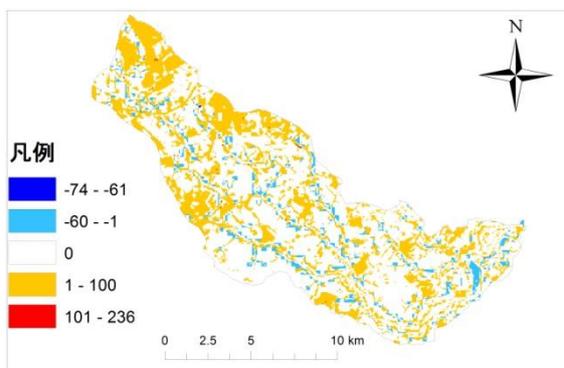
b-1)



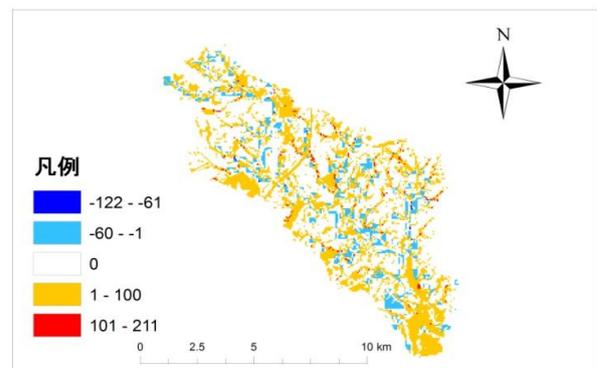
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

图 56 9-10 月表面流出量分布計算結果(mm)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

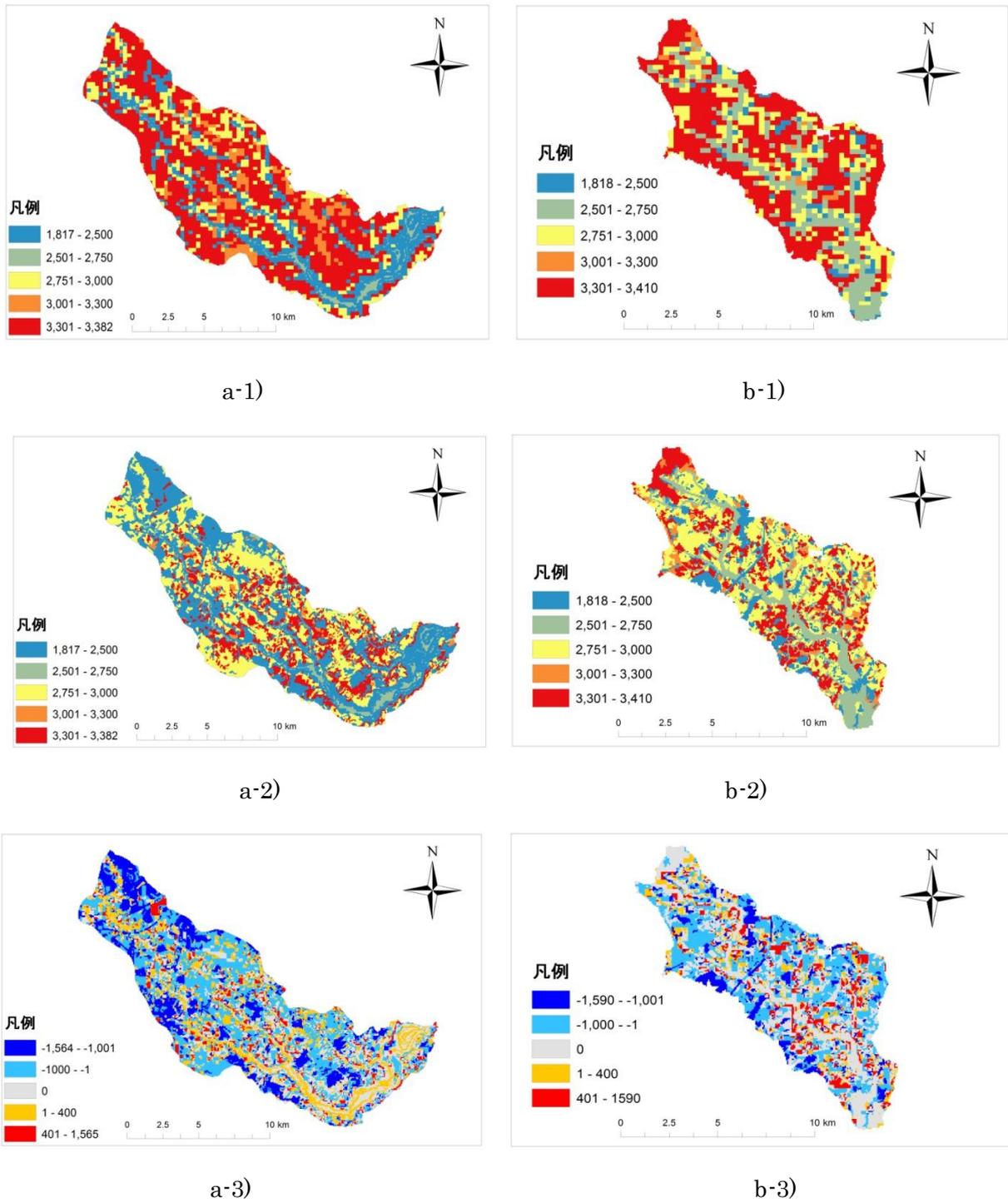
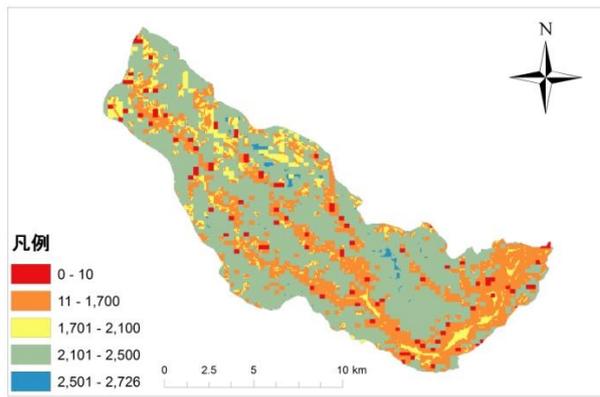
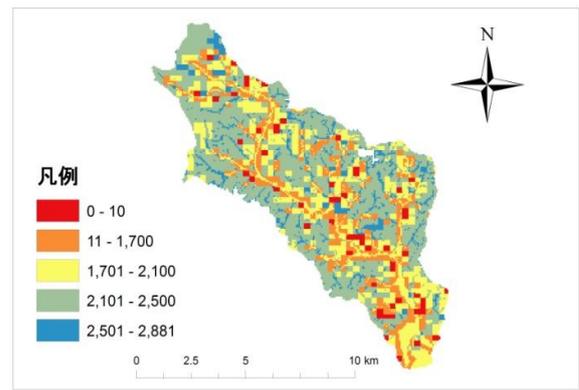


図 57 年積算正味放射量分布計算結果(MJ/year)

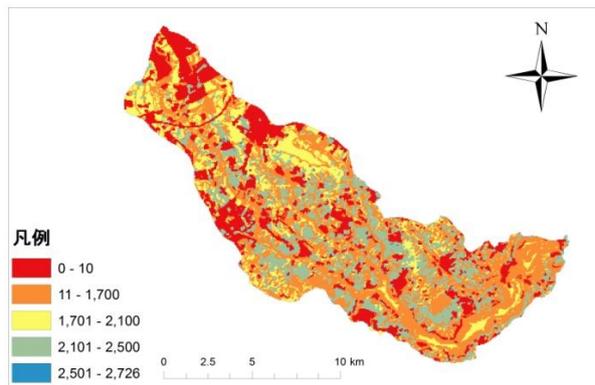
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)



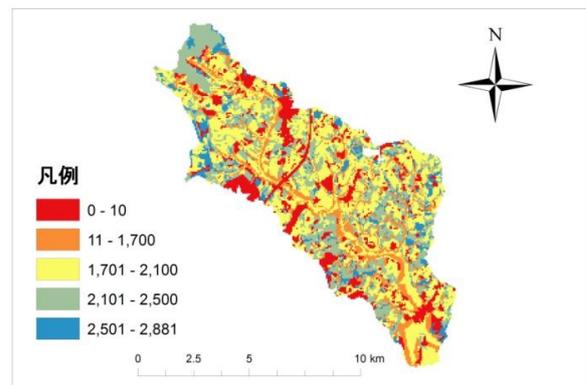
a-1)



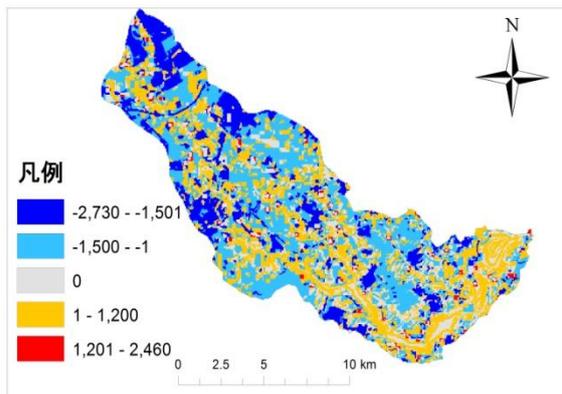
b-1)



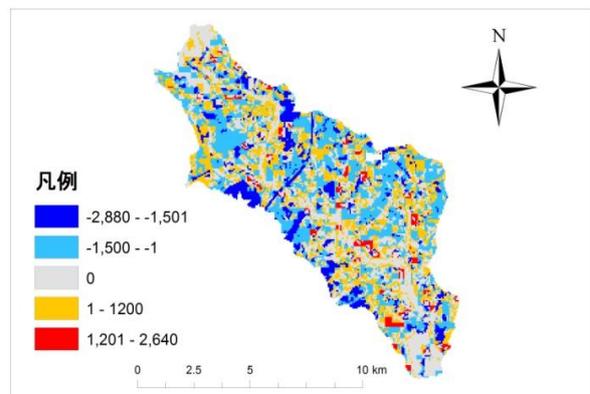
a-2)



b-2)



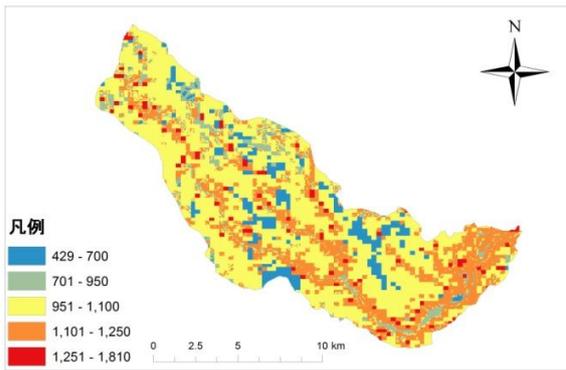
a-3)



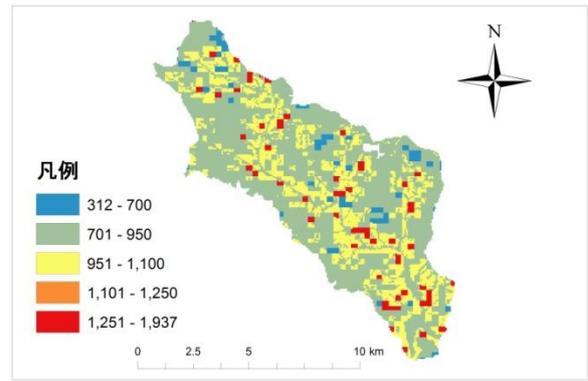
b-3)

図 58 年積算潜熱フラックス計算結果(MJ/year)

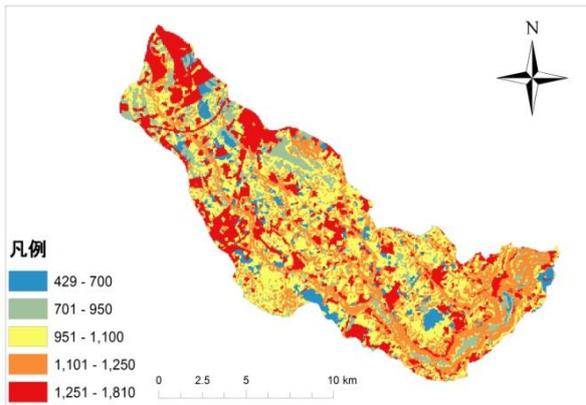
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)



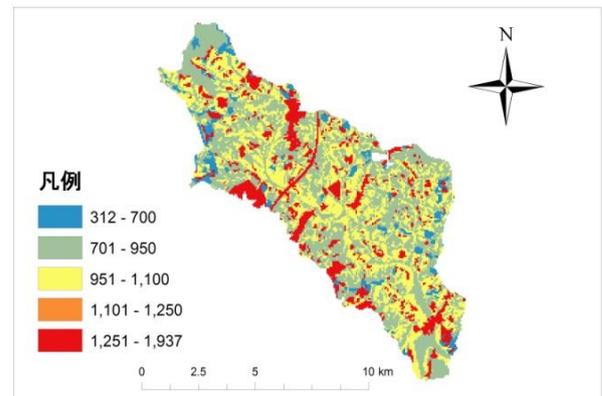
a-1)



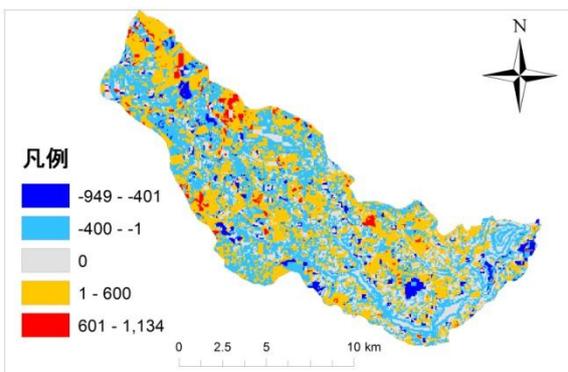
b-1)



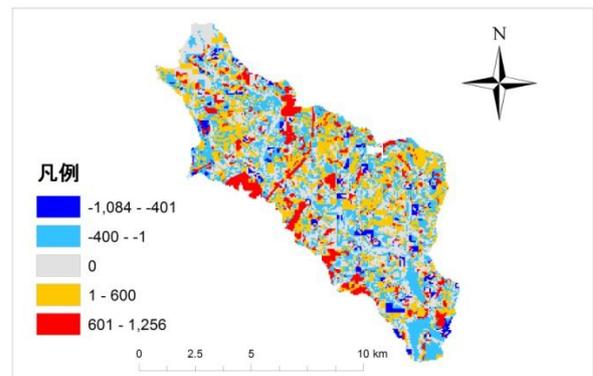
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 59 年積算顕熱フラックス分布計算結果(MJ/year)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)

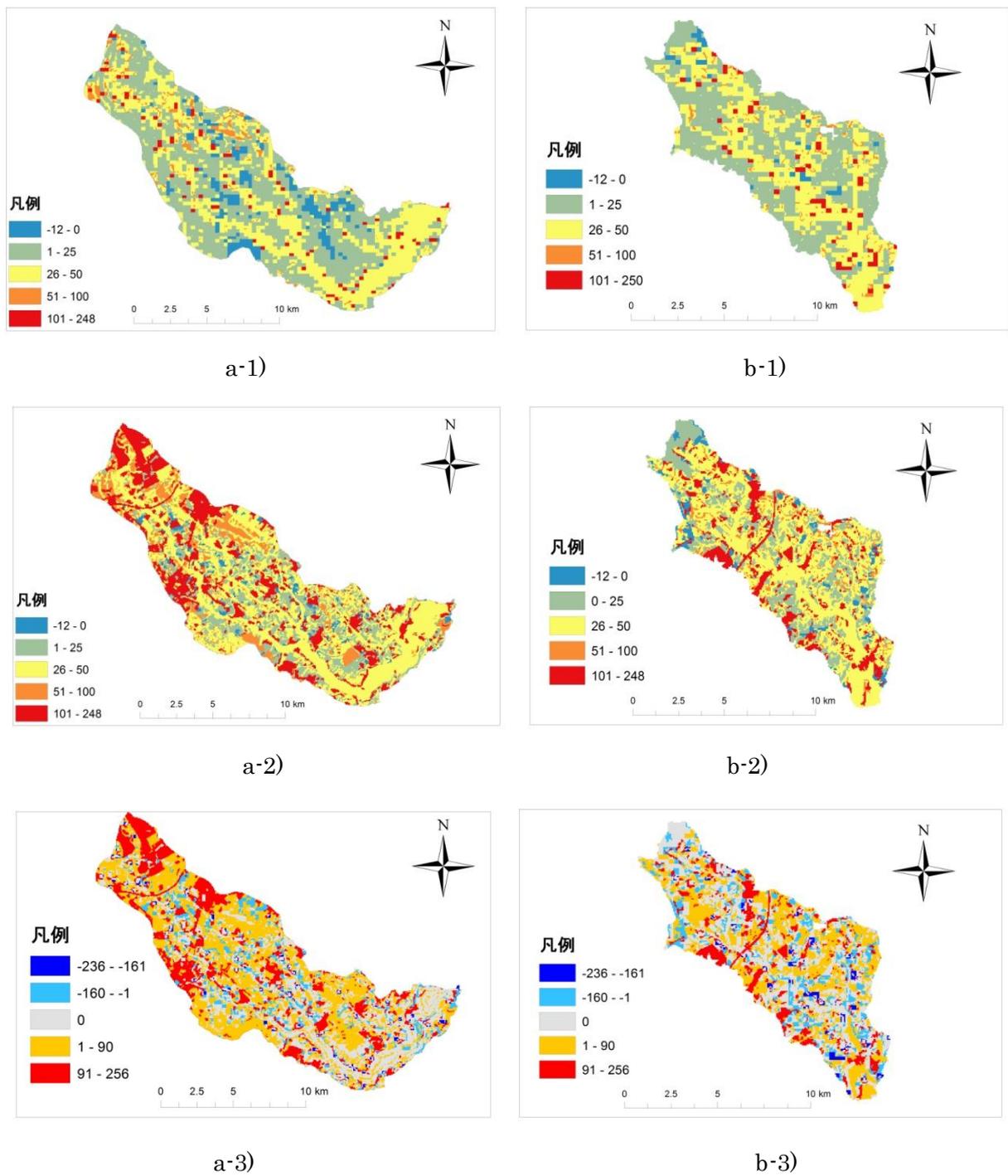


図 60 年積算地中熱流量分布計算結果(MJ/year)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

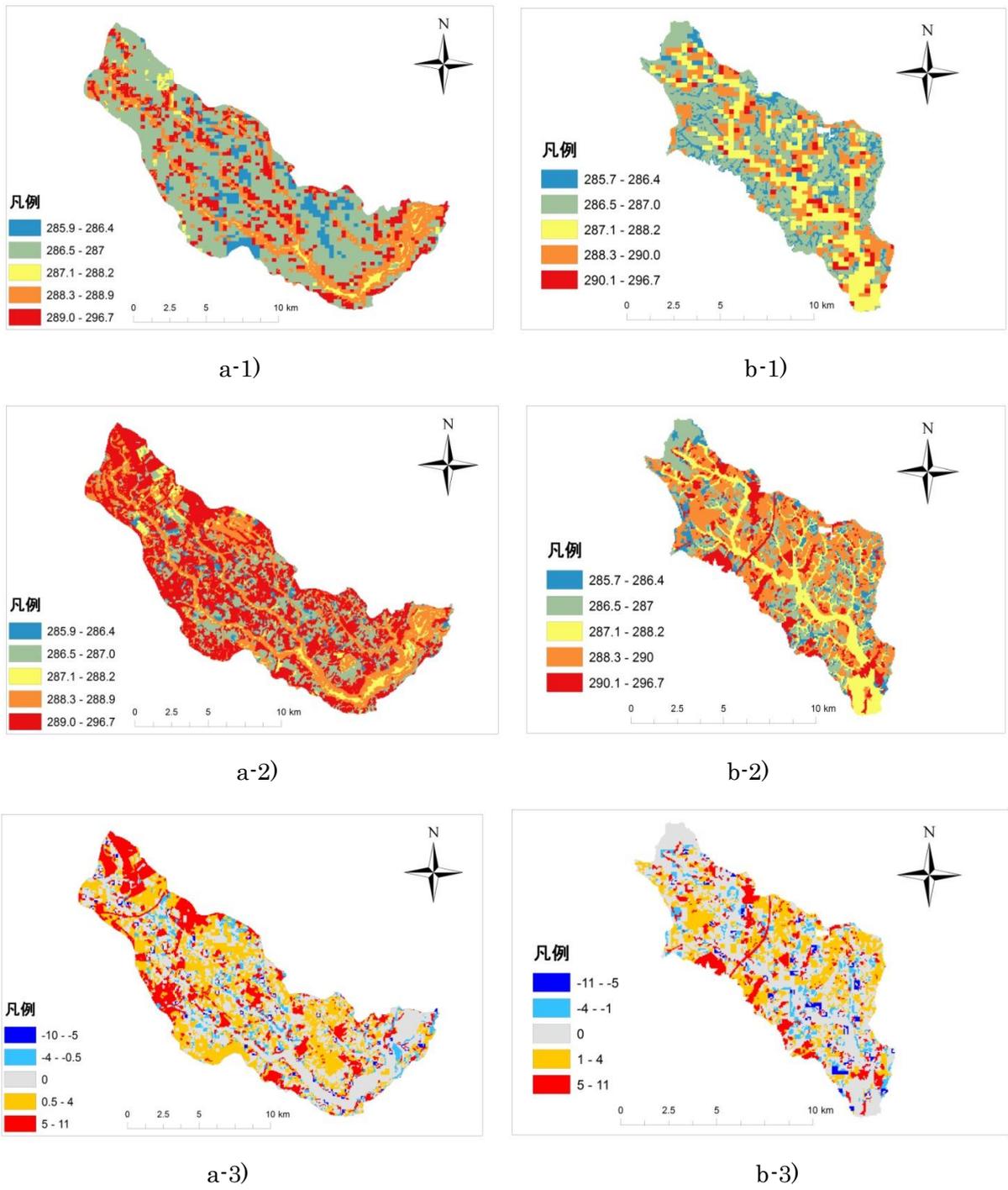


图 61 年平均地表面温度分布計算結果(K)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

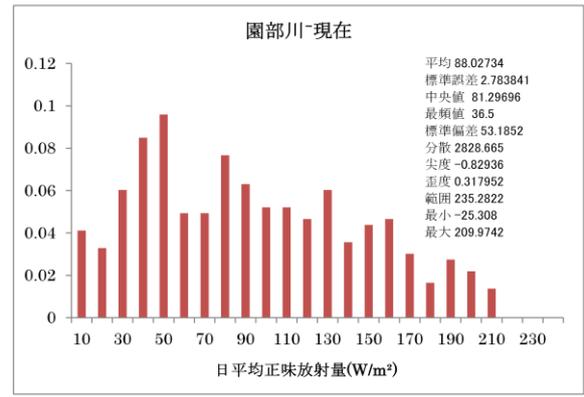
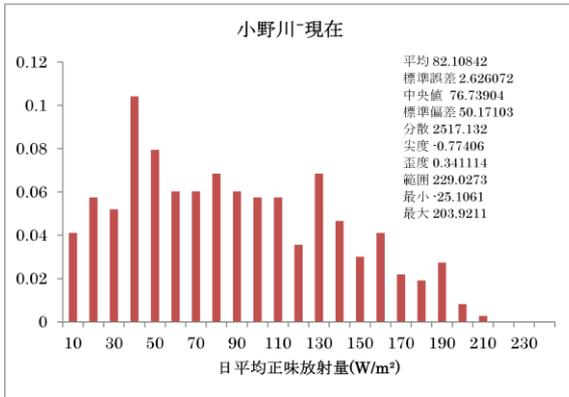
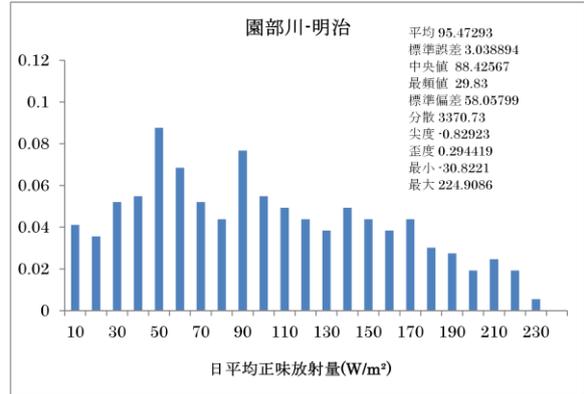
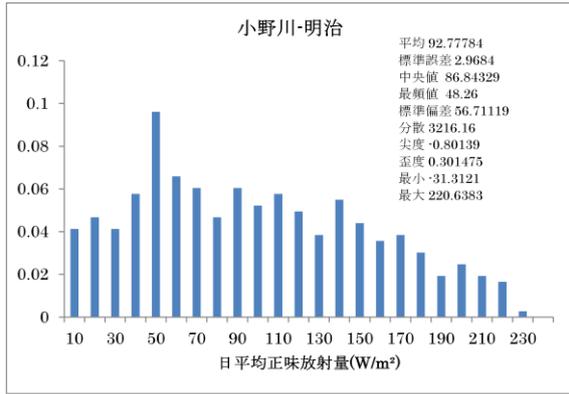


図 62 日平均正味放射量相対頻度分布

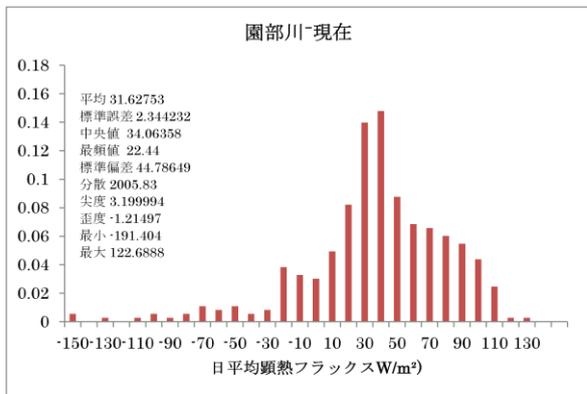
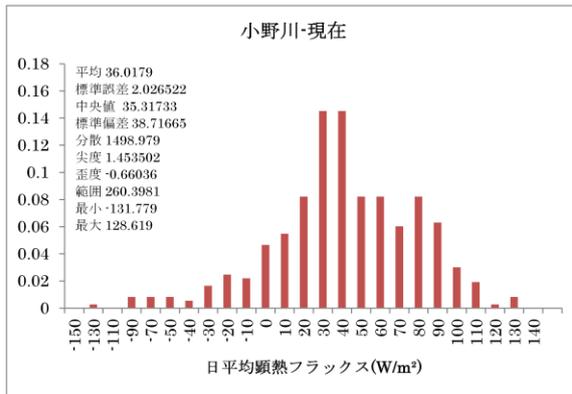
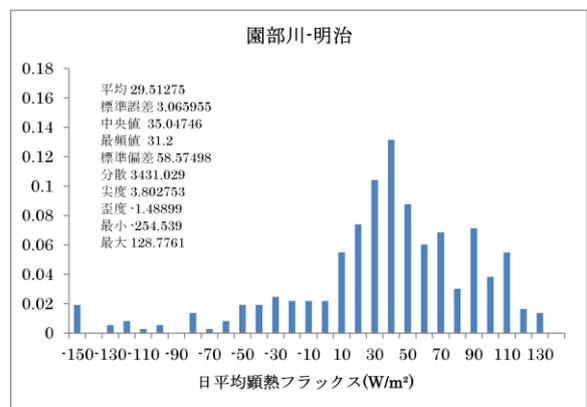
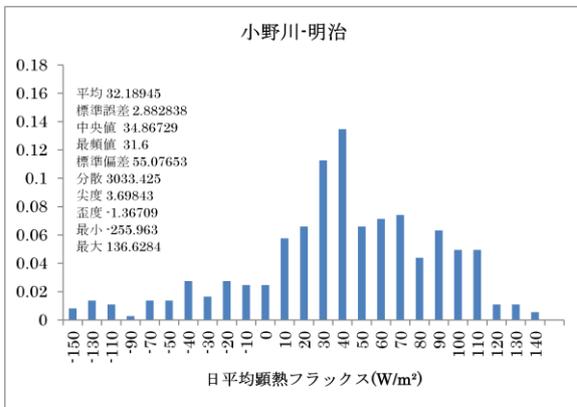


図 63 日平均潜熱フラックス相対頻度分布

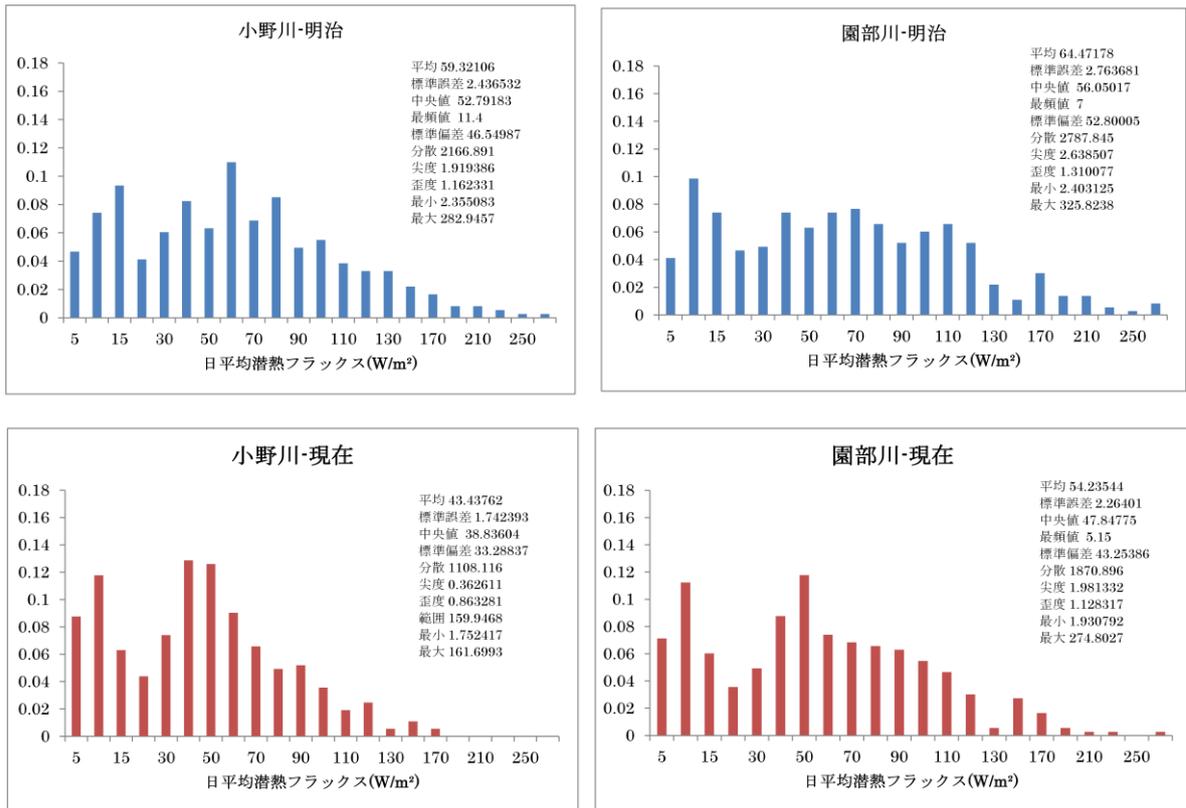


図 64 日平均顕熱フラックス相対頻度分布

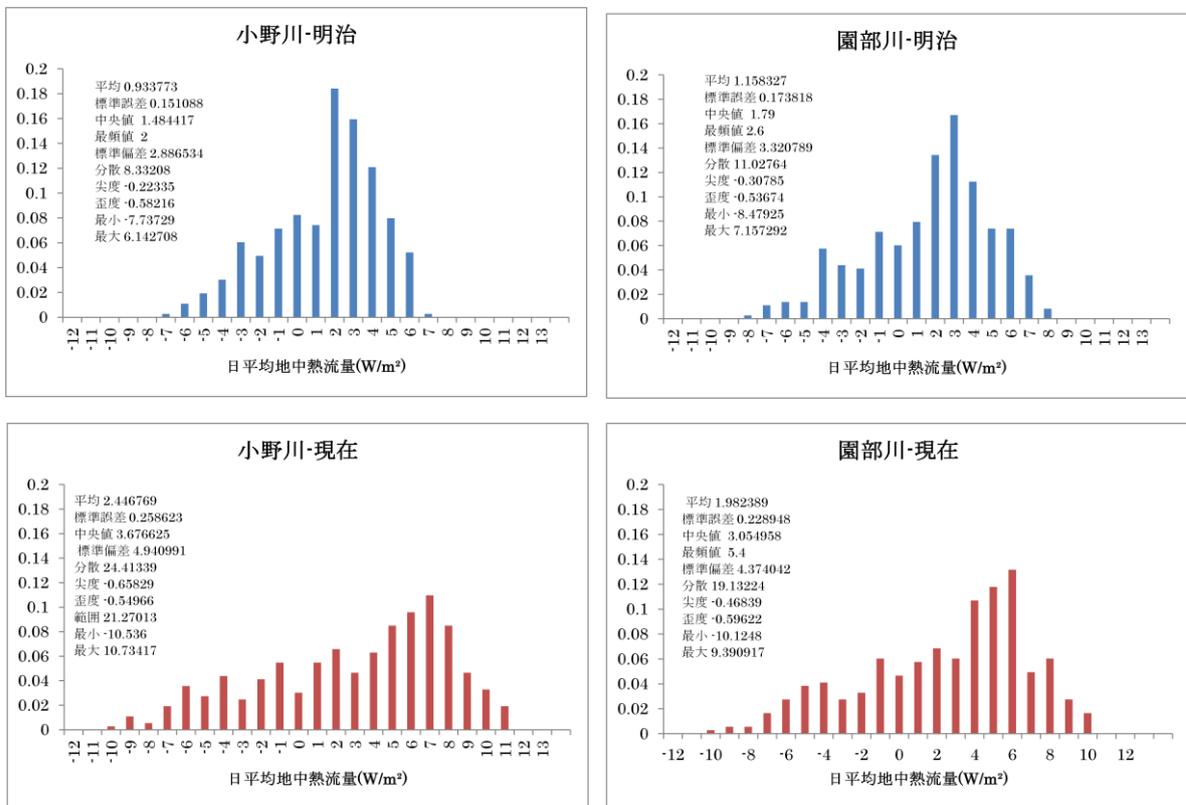
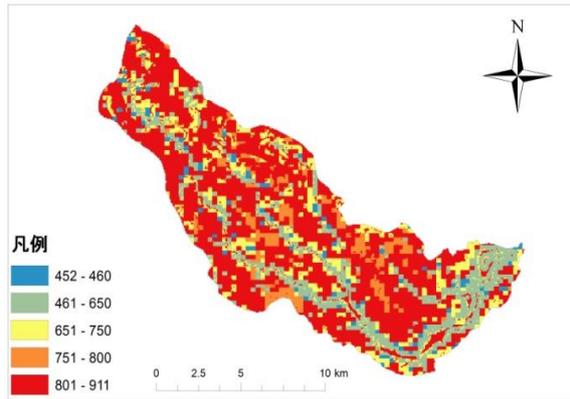
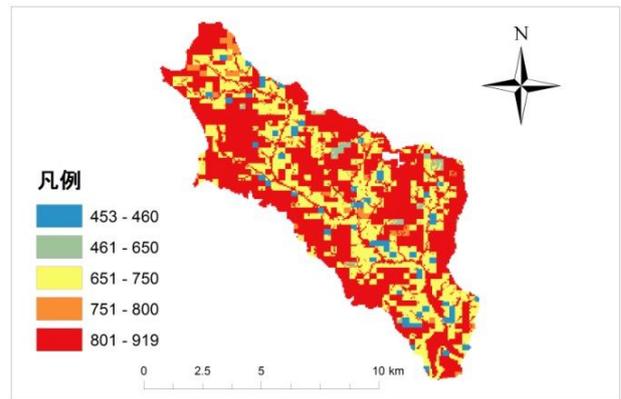


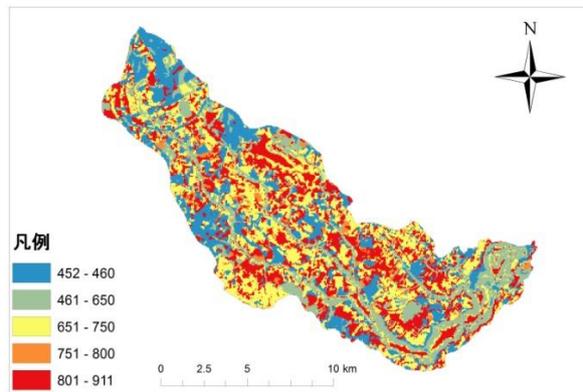
図 65 日平均地中熱流量相対頻度分布



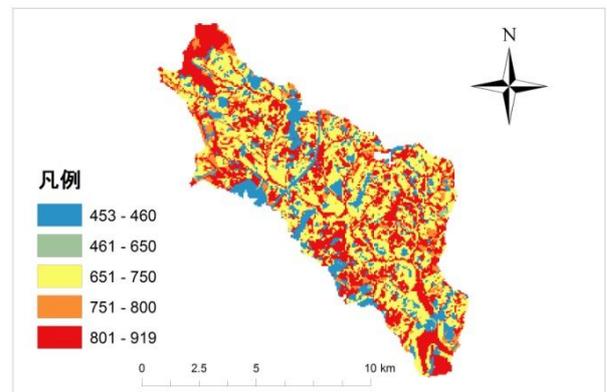
a-1)



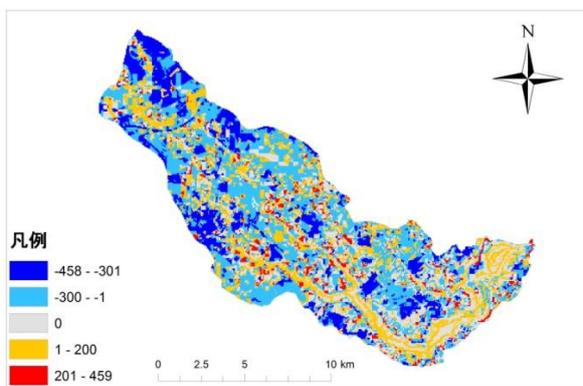
b-1)



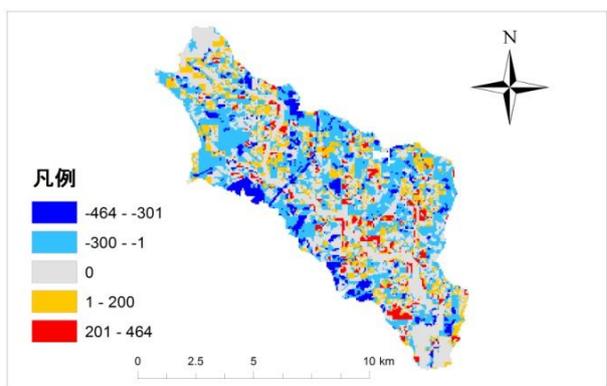
a-2)



b-2)



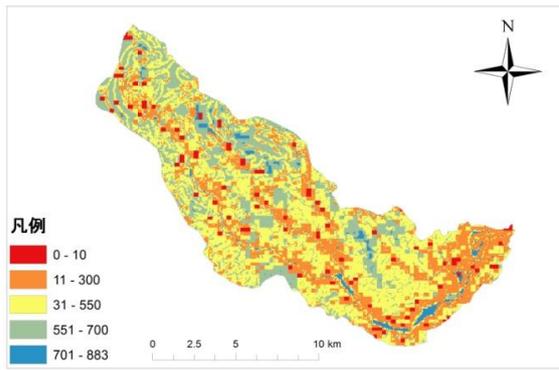
a-3)



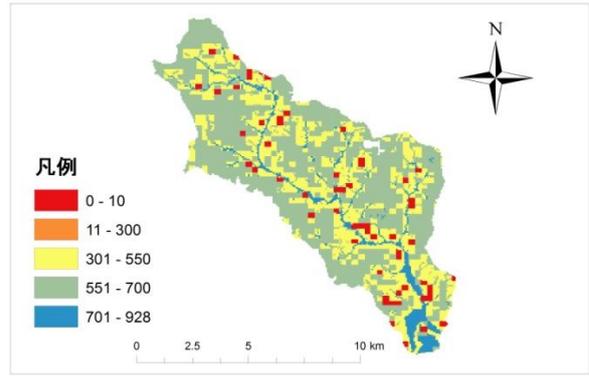
b-3)

図 66 夏季(7-8月)正味放射量分布計算結果(MJ)

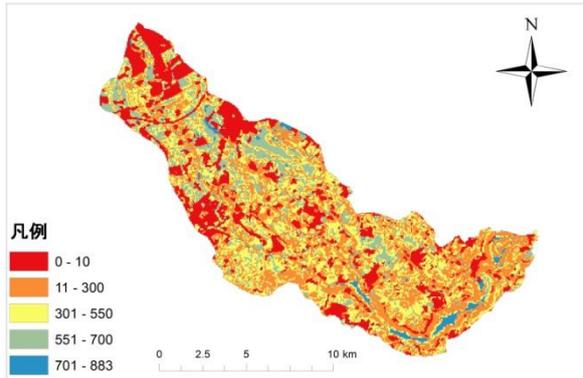
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)



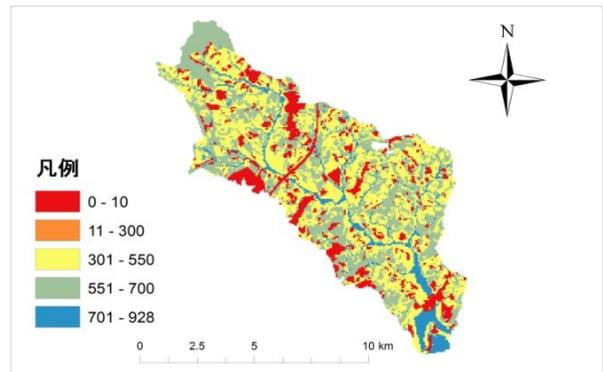
a-1)



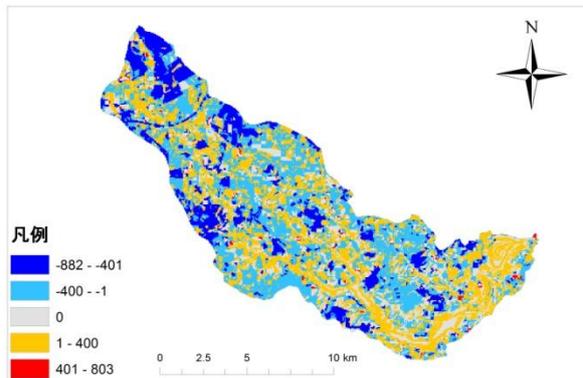
b-1)



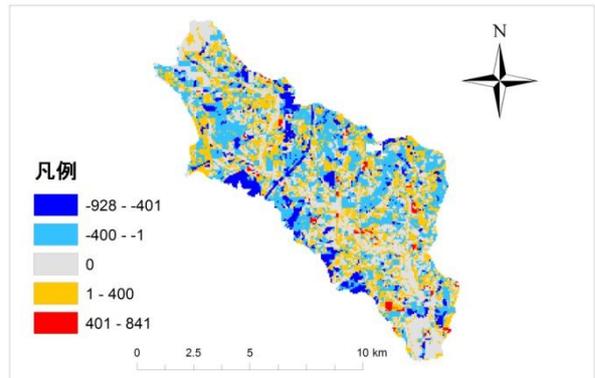
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 67 夏季(7-8月)潜熱フラックス分布計算結果(MJ)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在－明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在－明治)

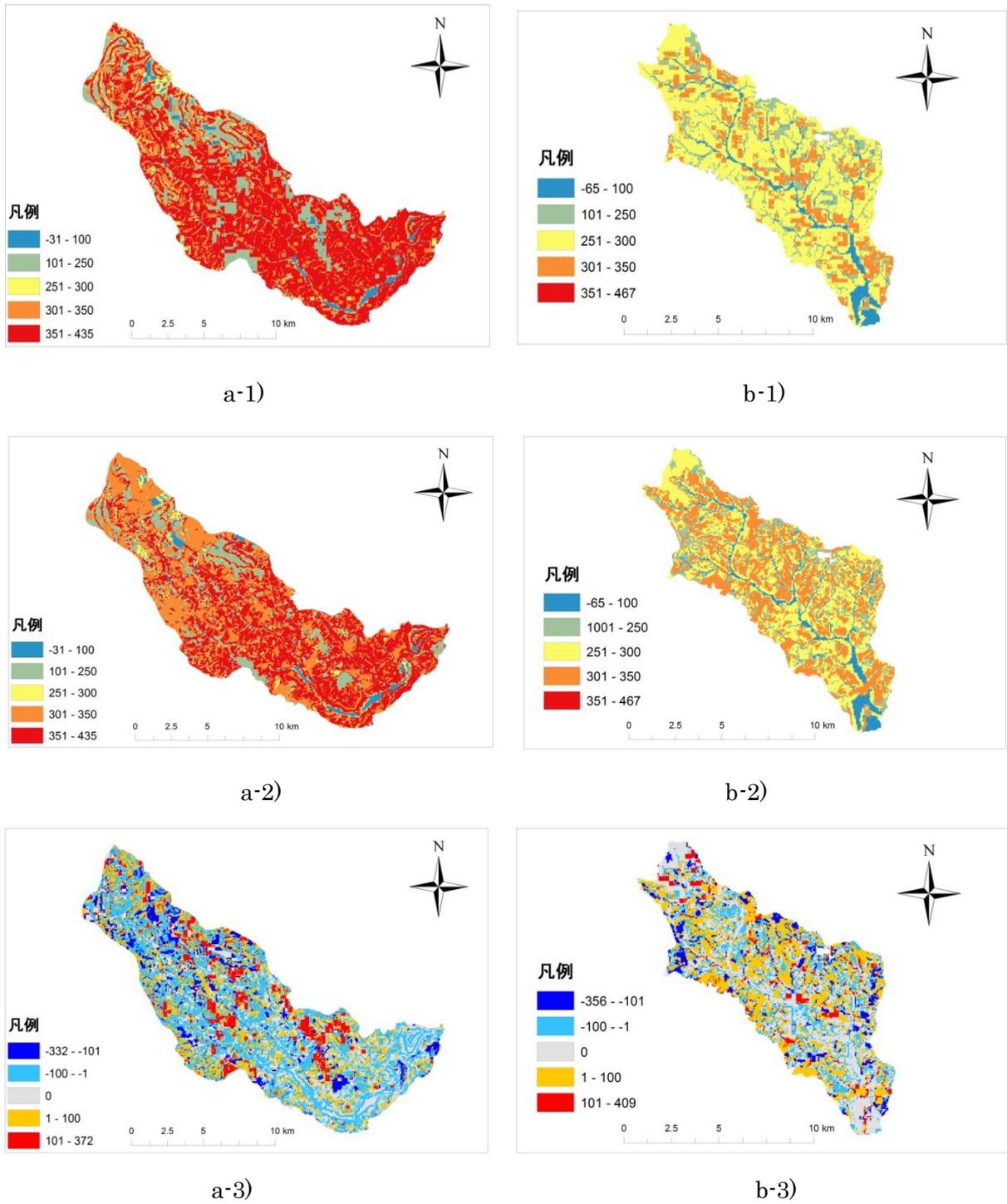


図 68 夏季(7-8月)顕熱フラックス分布計算結果(MJ)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

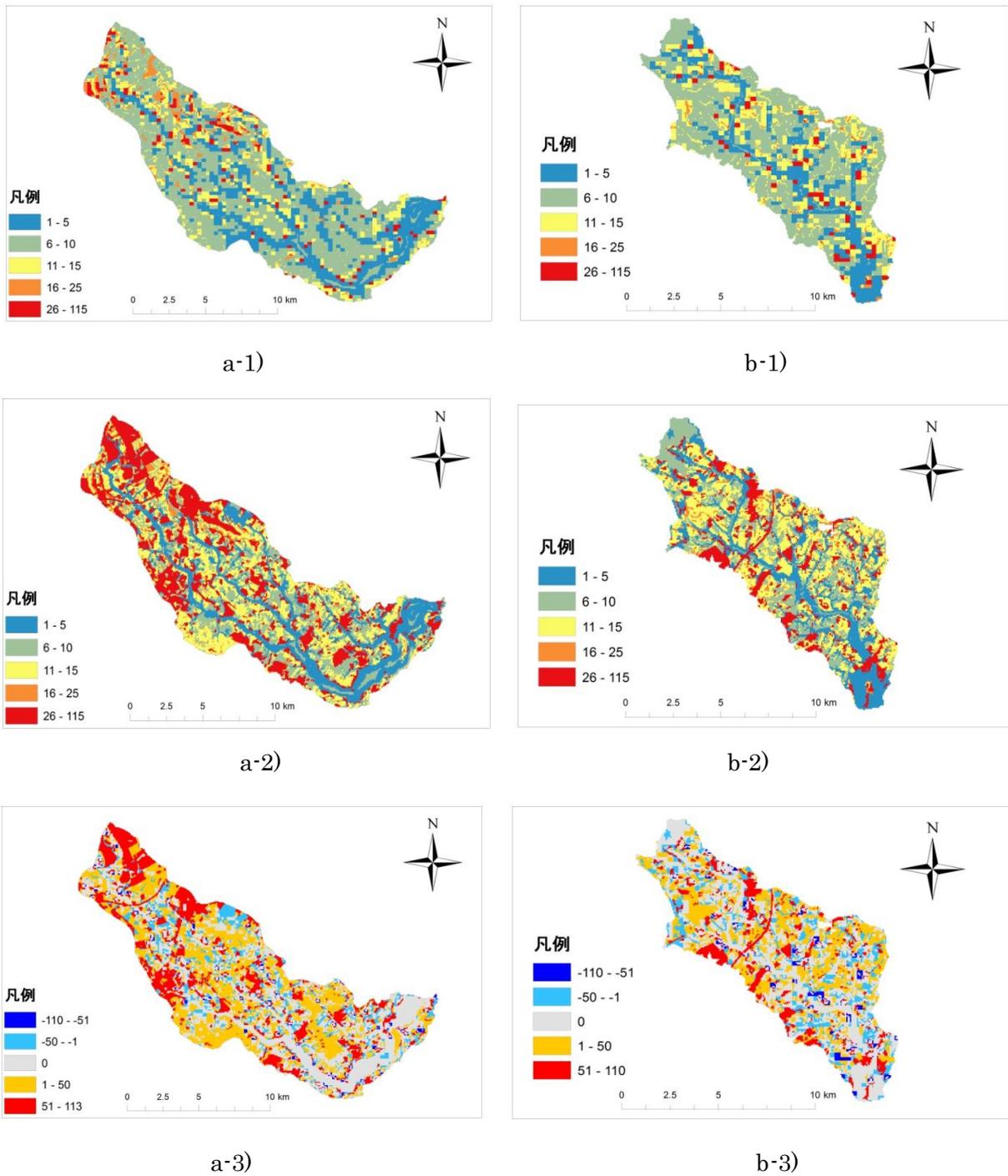
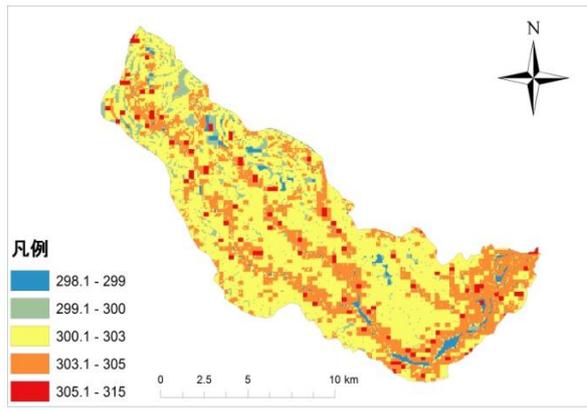
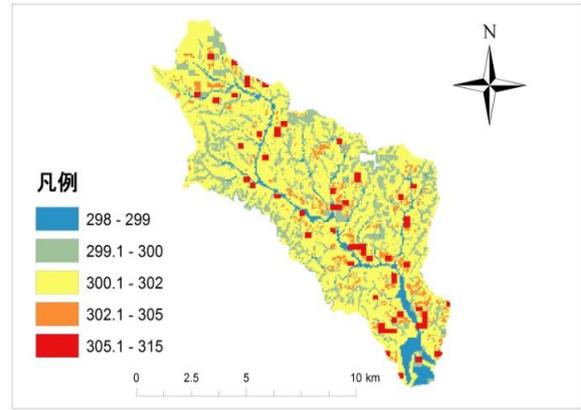


図 69 夏季(7-8月)地中熱流量分布計算結果(MJ)

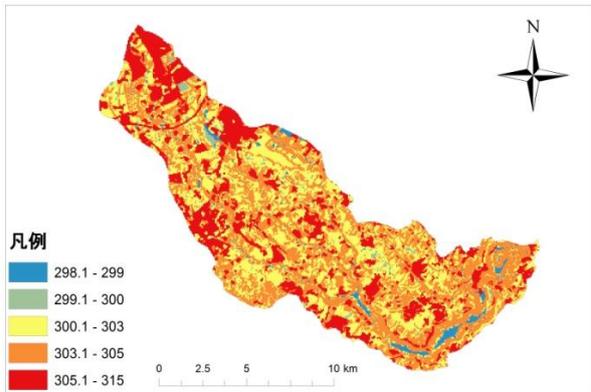
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)



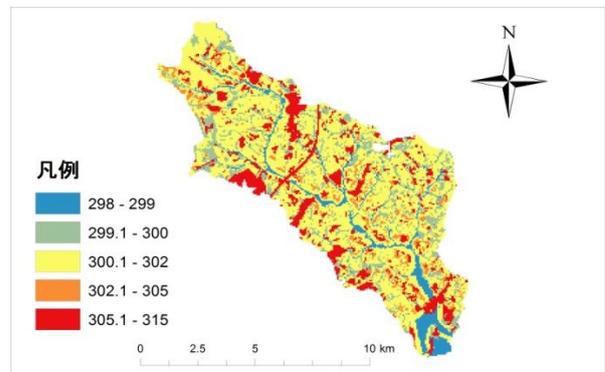
a-1)



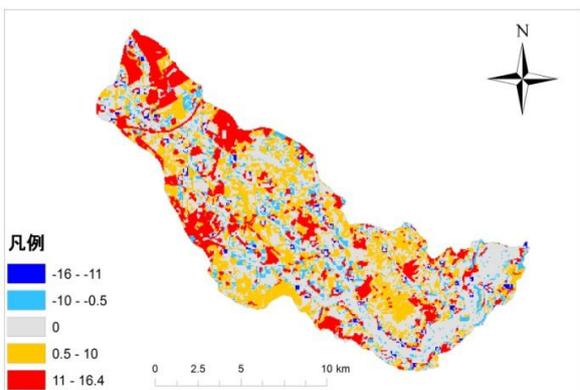
b-1)



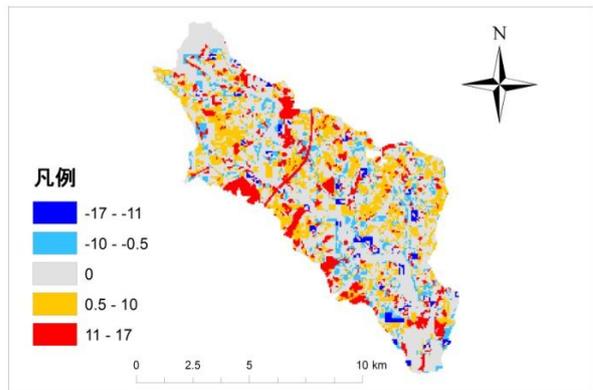
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 70 夏季(7-8月)地表面温度分布計算結果(K)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

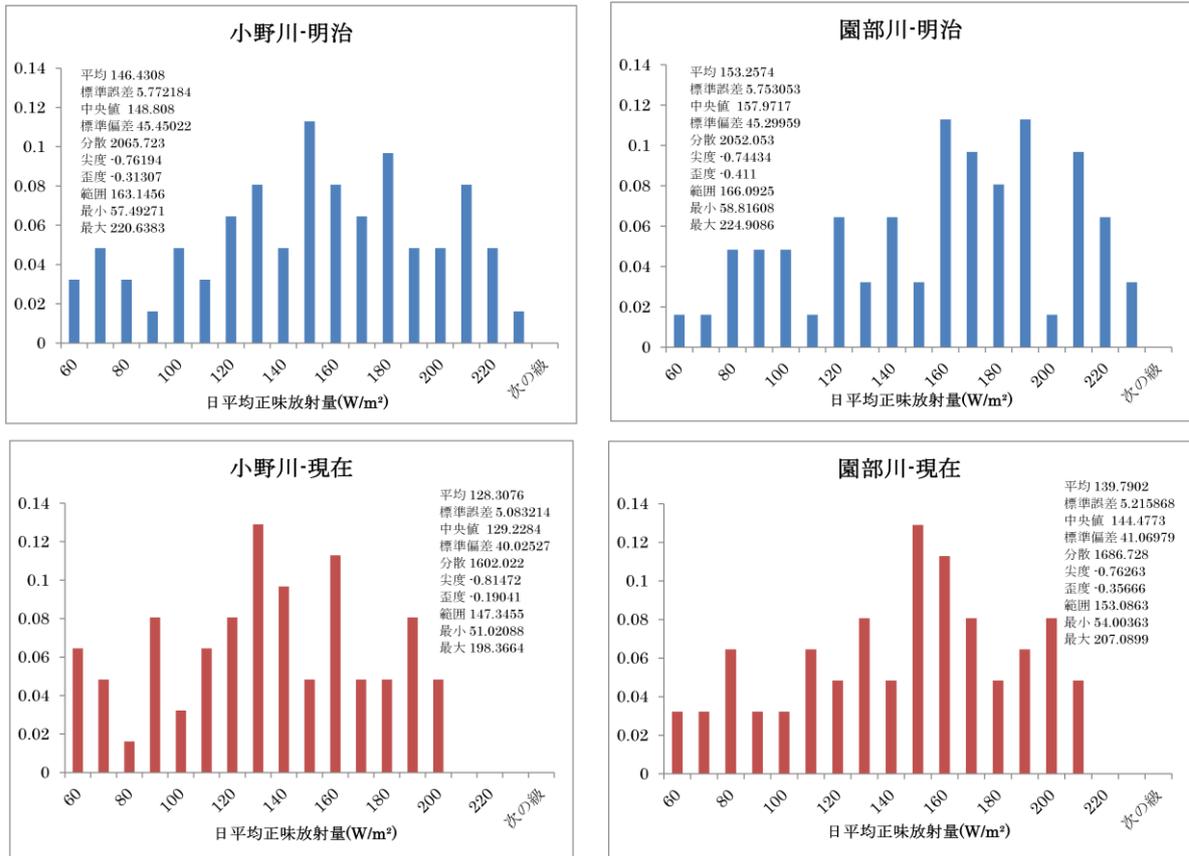


図 71 夏季(7-8月)日平均正味放射量相対頻度分布

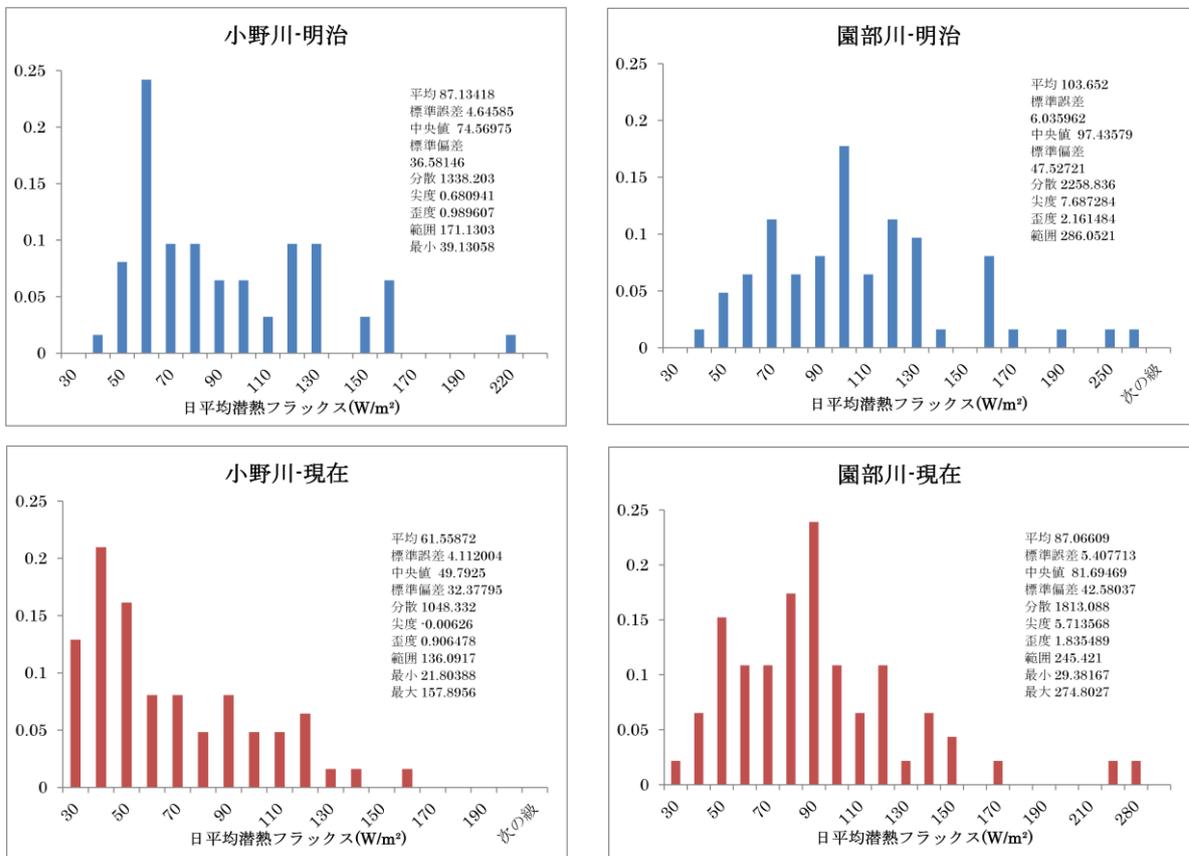


図 72 夏季(7-8月)日平均潜熱フラックス相対頻度分布

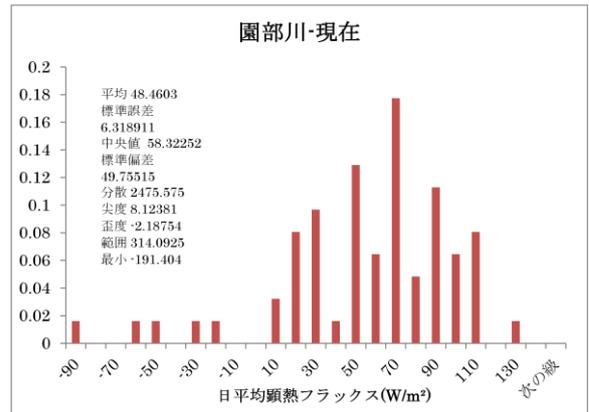
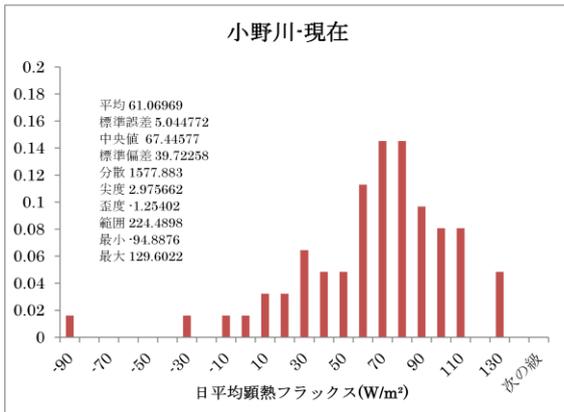
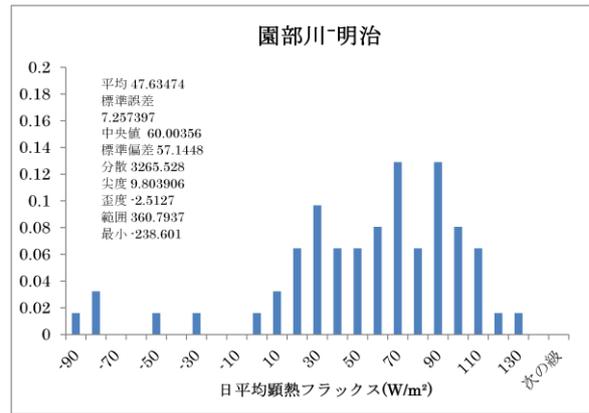
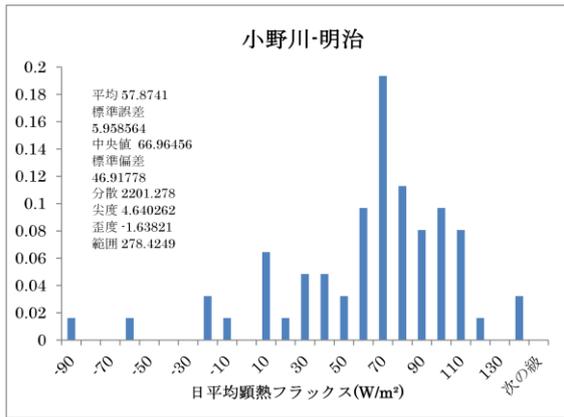


図 73 夏季(7-8月)日平均顕熱フラックス相対頻度分布

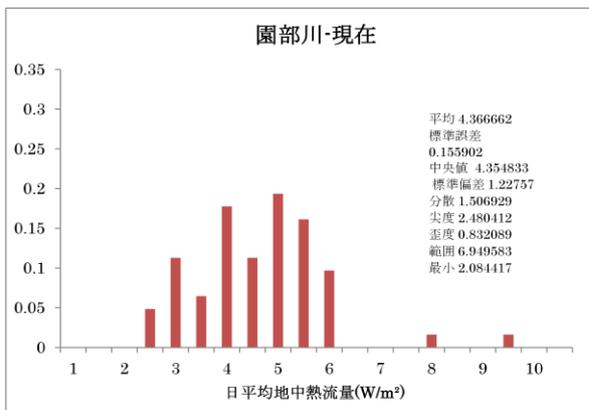
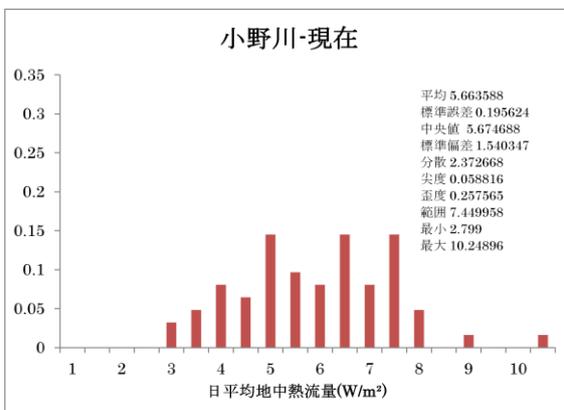
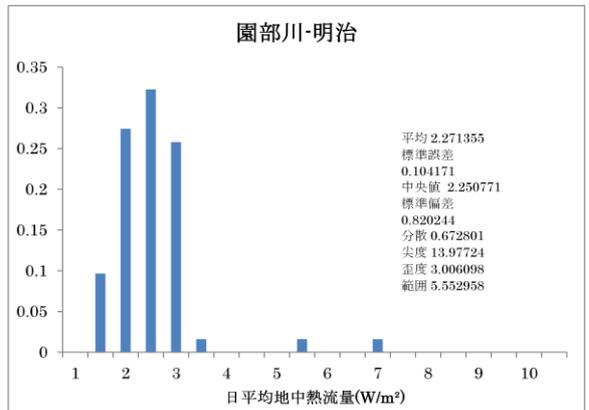
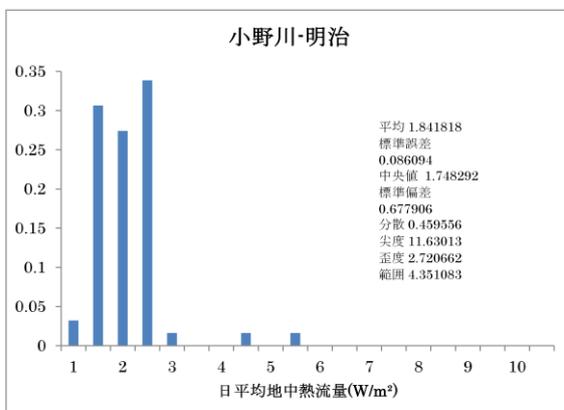
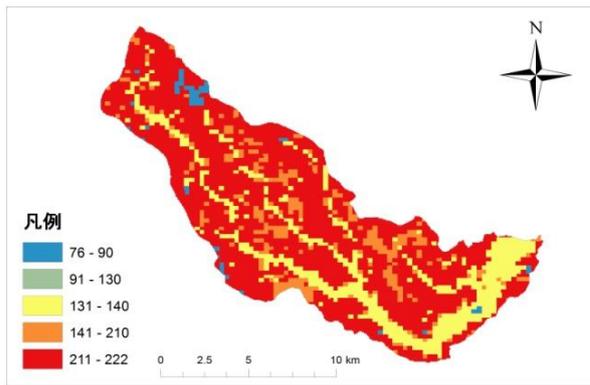
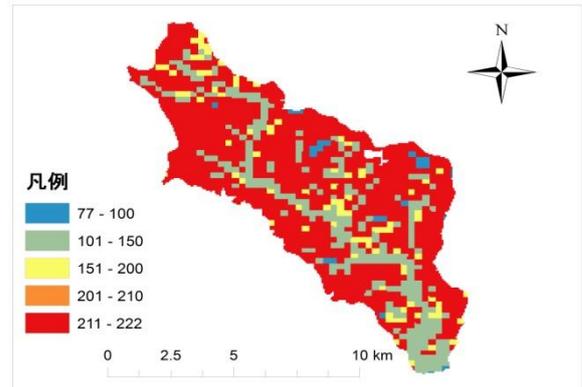


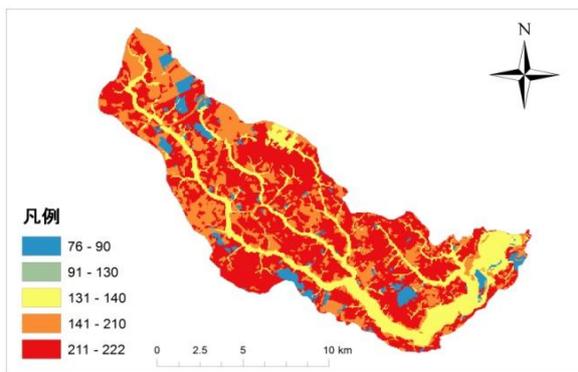
図 74 夏季(7-8月)日平均地中熱流量相対頻度分布



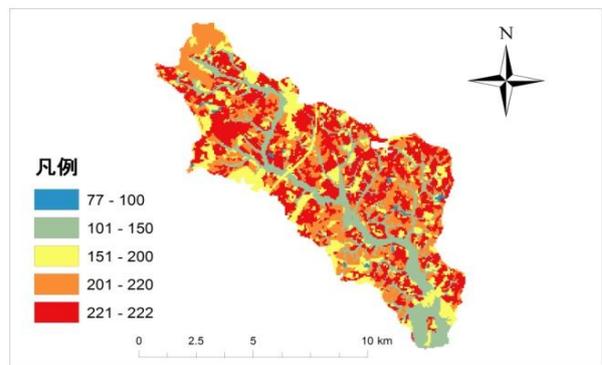
a-1)



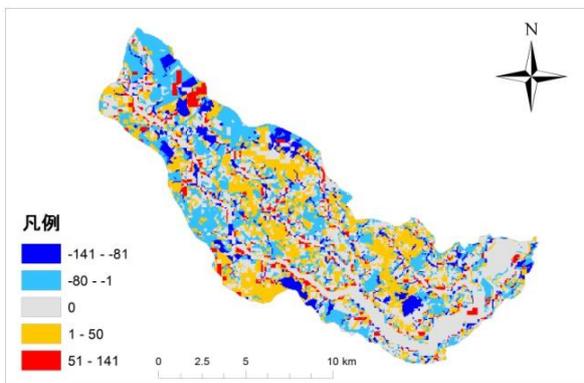
b-1)



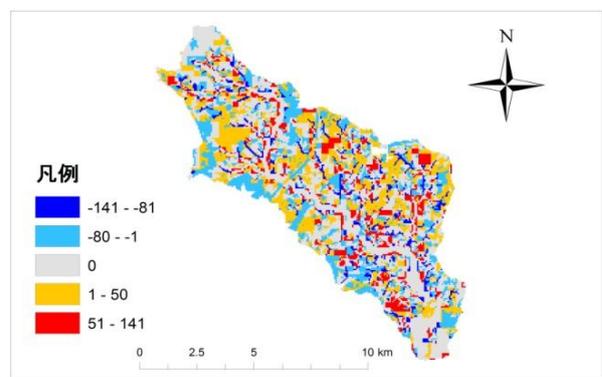
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

图 75 冬季(1-2月)正味放射量分布計算結果(MJ)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

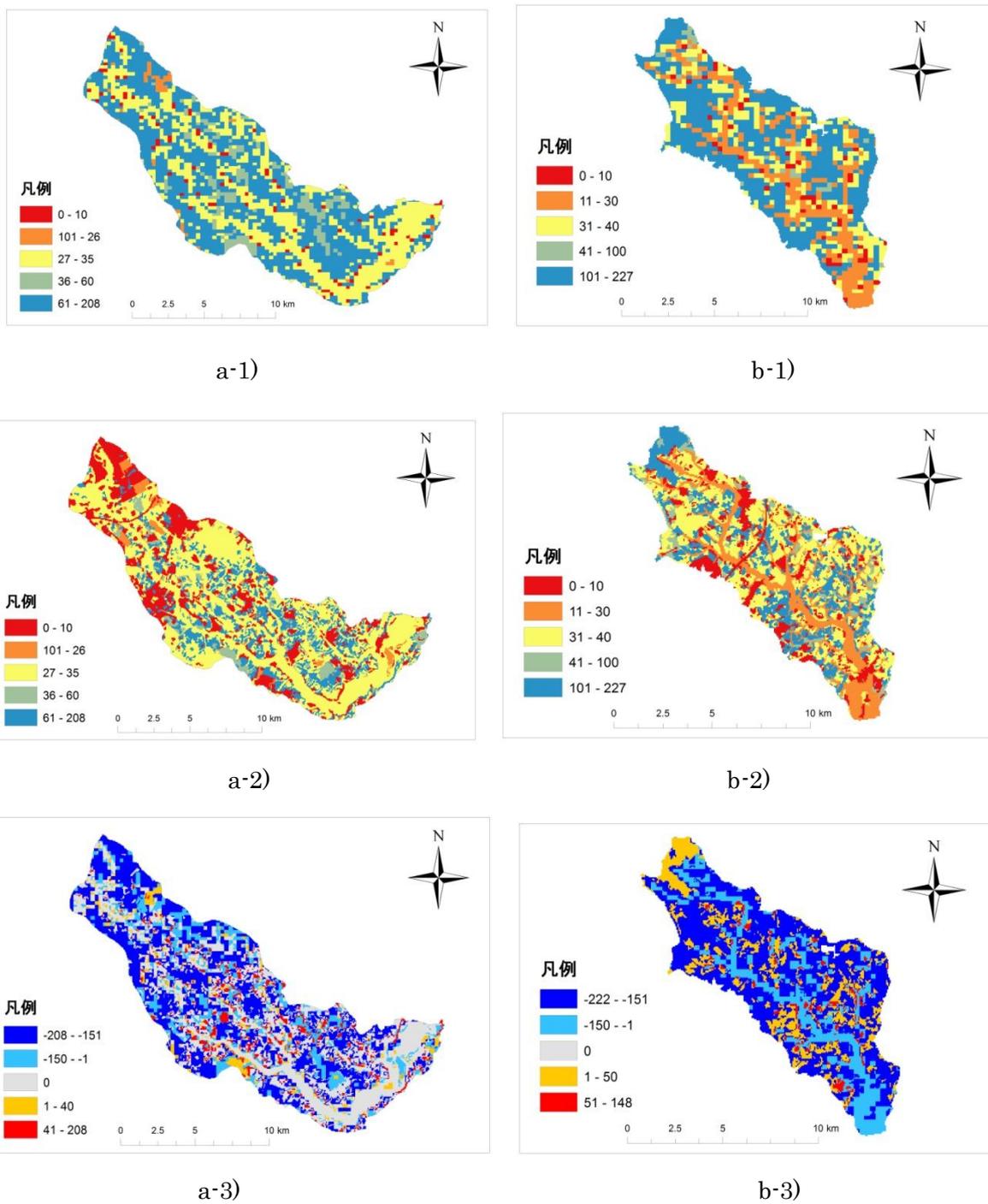
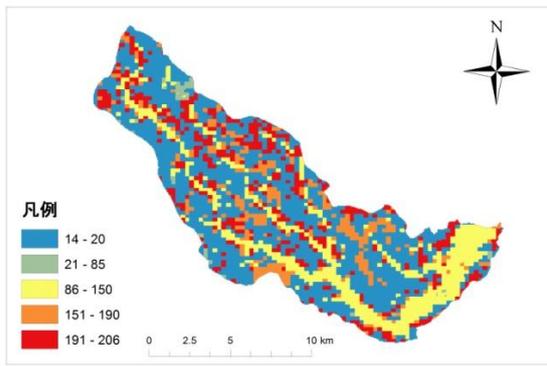
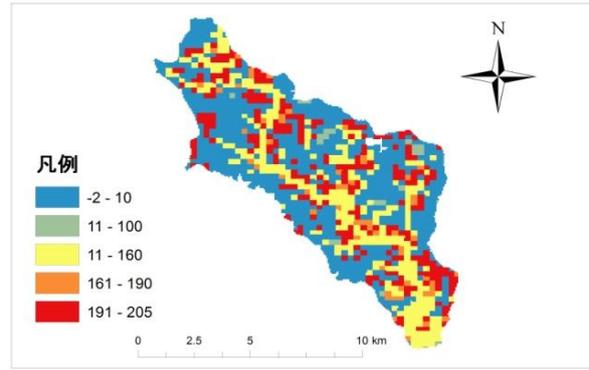


図 76 冬季(1-2月)潜熱フラックス分布計算結果(MJ)

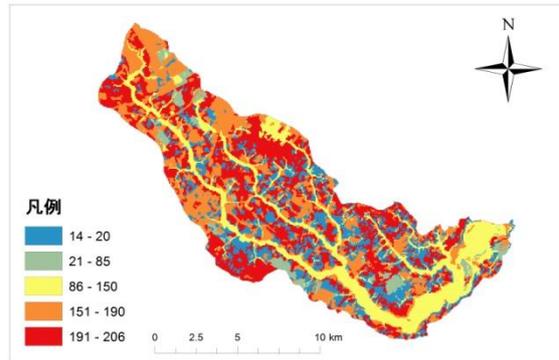
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)



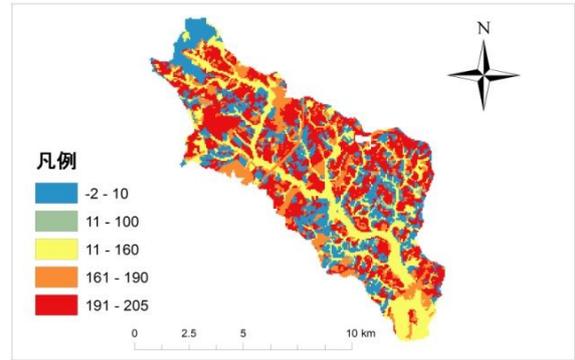
a-1)



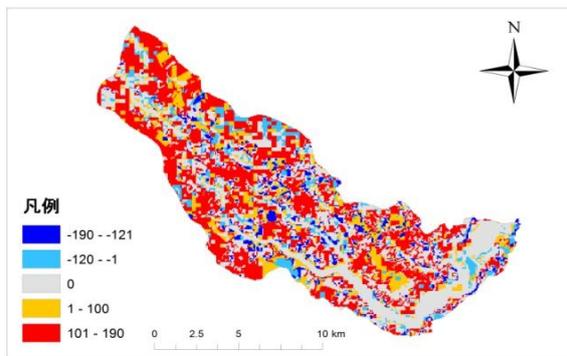
b-1)



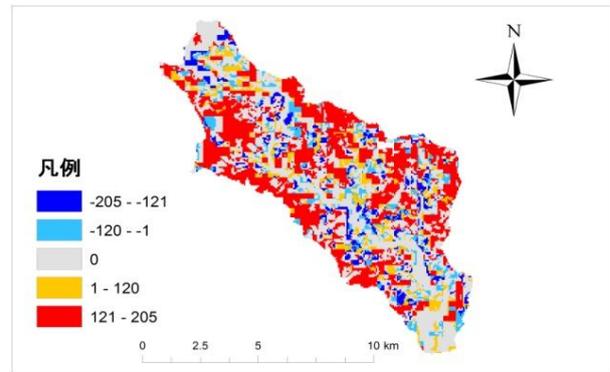
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 77 冬季(1-2月)顕熱フラックス分布計算結果(MJ)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

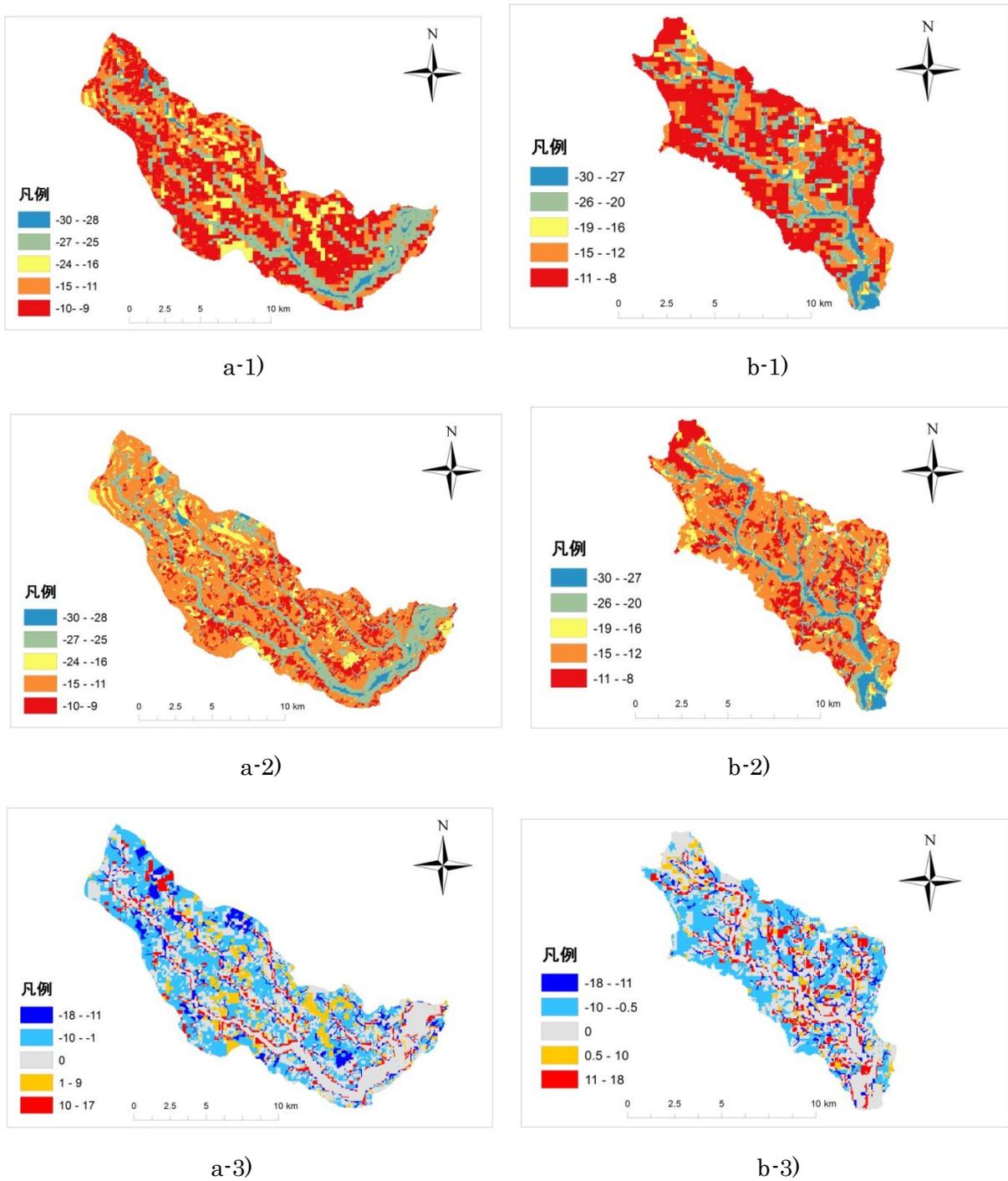
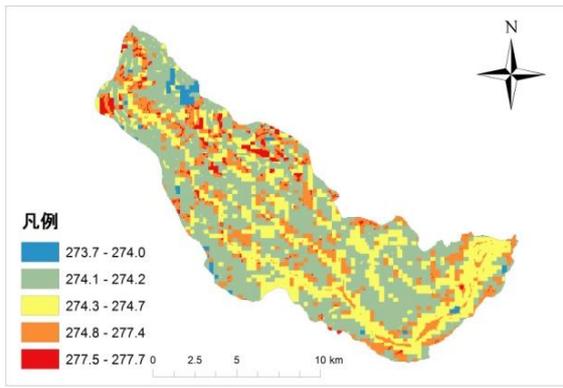
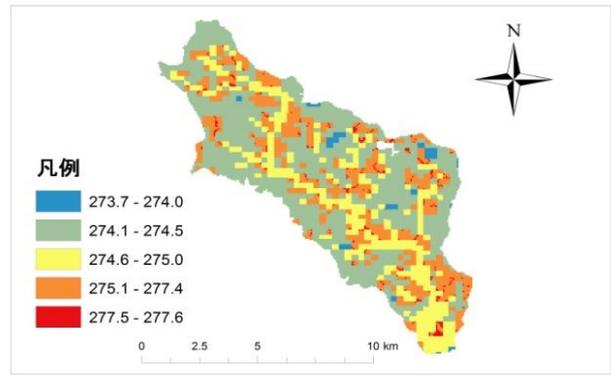


図 78 冬季(1-2月)地中熱流量分布計算結果(MJ)

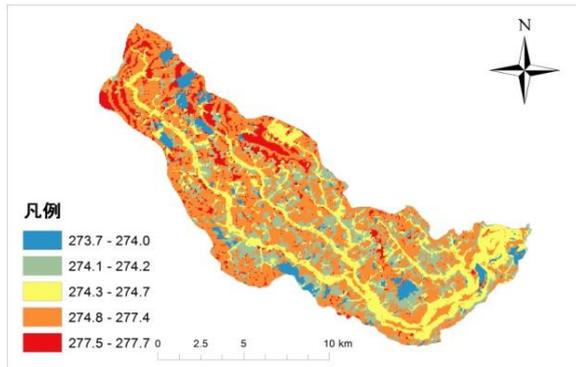
a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)



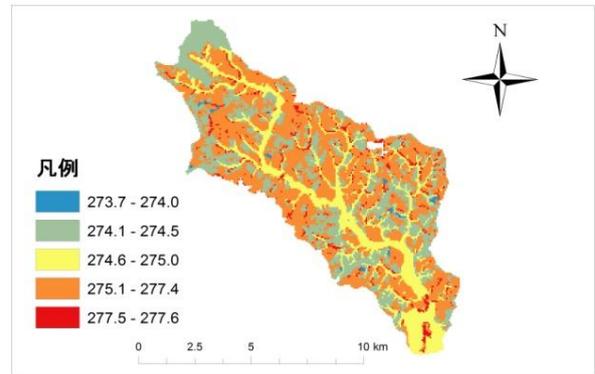
a-1)



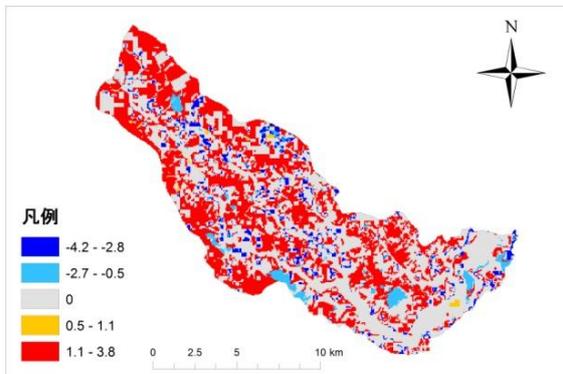
b-1)



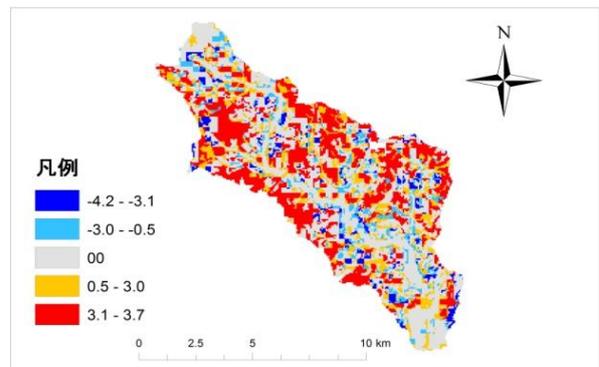
a-2)



b-2)



a-3)



b-3)

図 79 冬季(1-2月)地表面温度分布計算結果(K)

a-1)小野川流域明治期土地利用適用時, a-2)小野川現在, a-3)小野川変化量(現在-明治)
 b-1)園部川流域明治期土地利用適用時, b-2)園部川現在, b-3)園部川変化量(現在-明治)

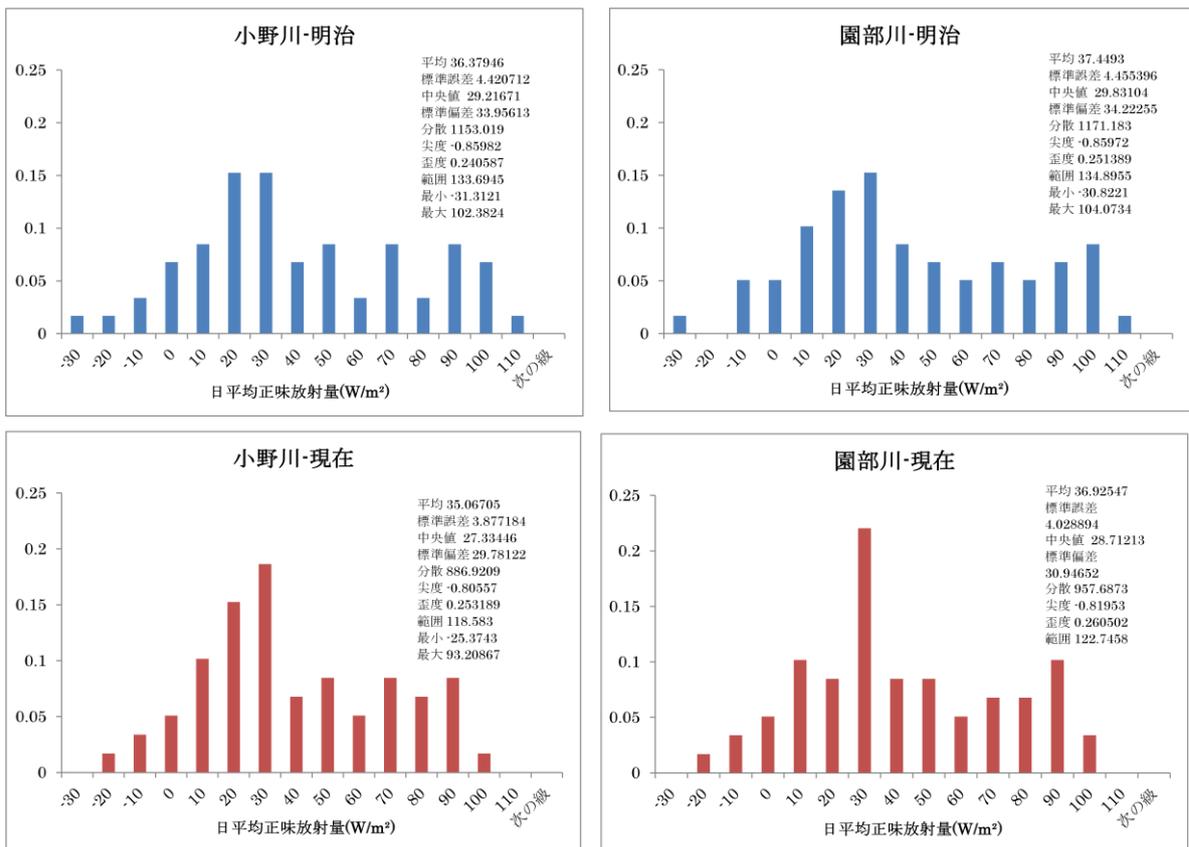


図 80 冬季(1-2月)日平均正味放射量相対頻度分布

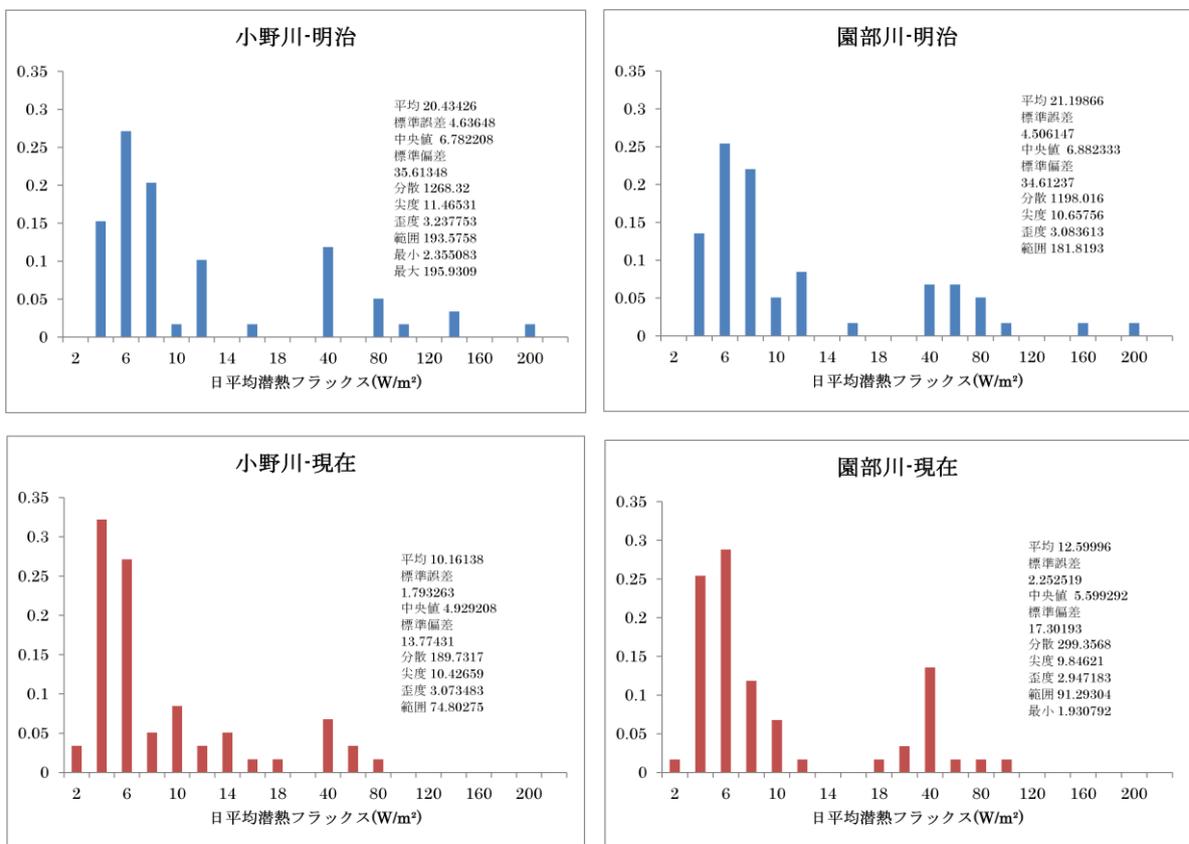


図 81 冬季(1-2月)日平均潜熱フラックス相対頻度分布

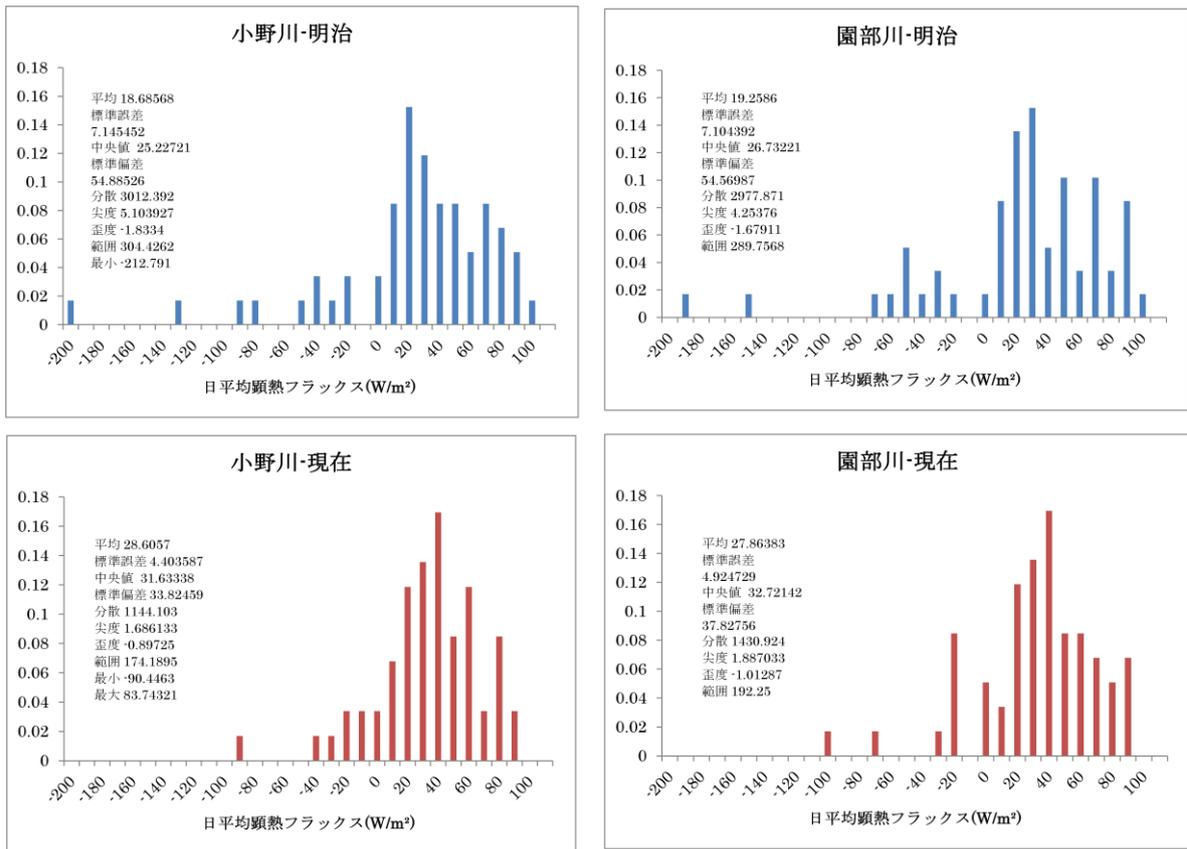


図 82 冬季(1-2月)日平均顕熱フラックス相対頻度分布

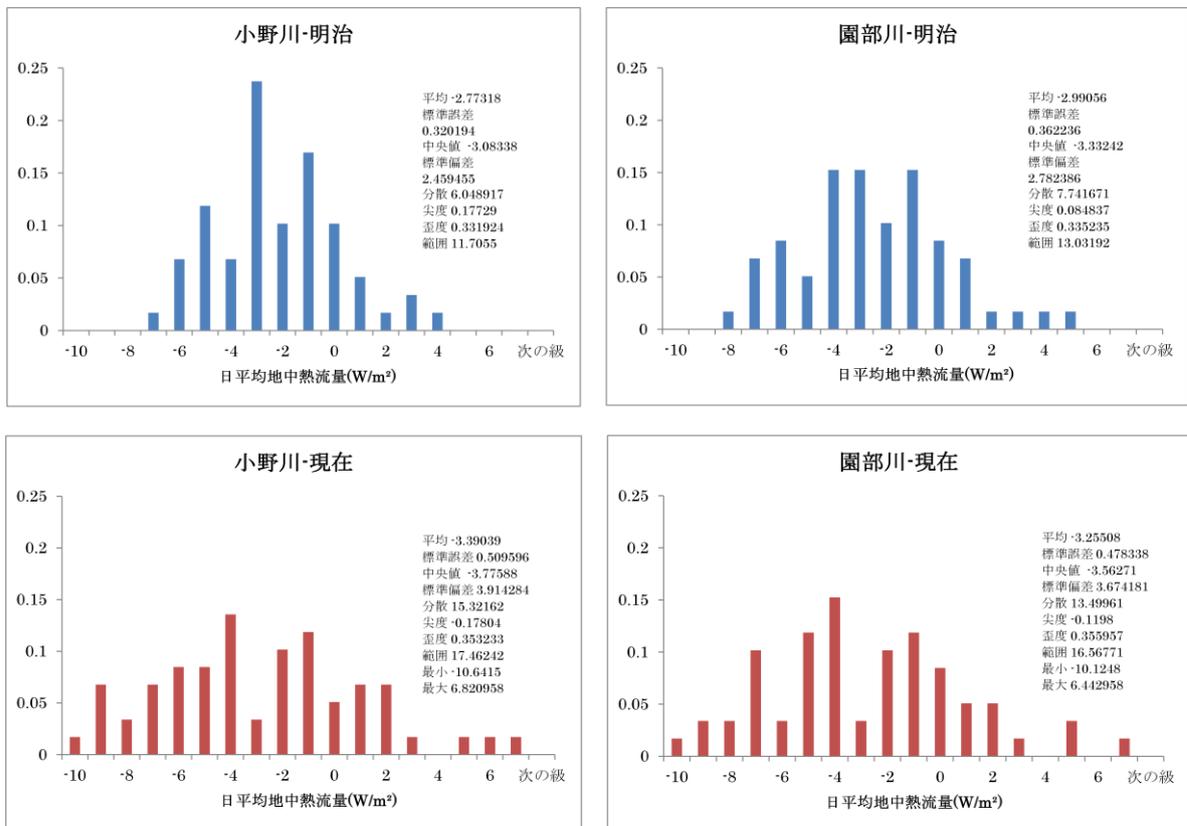


図 83 冬季(1-2月)日平均地中熱流量相対頻度分布