

霞ヶ浦流域の環境変化と霞ヶ浦の水収支  
1970年代と現在の差異

山本 和也

201121305

平成 26 年 1 月

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科環境科学専攻  
平成 25 年度 修士（環境科学）学位論文

## 要旨

### 霞ヶ浦流域の環境変化と霞ヶ浦の水収支：1970年代と現在の差異 Changes in watershed environments and water balance of Lake Kasumigaura from 1970s to present

霞ヶ浦は茨城県南東部に位置する湖であり、西浦、北浦、常陸利根川で構成されている。その湖水は水資源として流域で生活する人々に大きく貢献しており、将来にわたって水資源を有効利用するために、水収支を把握することが重要である。霞ヶ浦の水収支は1970年代を対象に村岡（1981）によって評価されている。その後、流域の環境変化や大規模な用水事業が行われたが、総合的な水収支の評価はされてこなかった。そこで本研究では、現在の霞ヶ浦における水収支を評価し、1970年代と比較することでその差異を解明することを目的とした。

研究対象地域は霞ヶ浦およびその流域とする。まず湖面降水量は、霞ヶ浦流域内外の気象観測所から収集した雨量データを使用して求めた。河川流量を求める際には、実測されている流入7河川と流出河川については国土交通省の流量データを使用した。その他の河川については各河川の流域面積・流域降水量と、流量観測の結果を参考にしてそれぞれの河川に当てはめた、実測河川の流出率から推定した。湖面蒸発量は、渦相関法・バルク法によって算出された伊倉（2010）の結果を基に推定した。地下水流入量は、西浦湖岸の井戸の水位を観測してダルシーの法則によって求めた内藤（2008）の結果を用いて推定した。生活用水・工業用水取水量、処理下水排水量に関しては、茨城県や湖周辺の市町村の各管理所などからデータや資料を頂き、それを用いて算出した。農業用水の取水量・排水量に関しては、村岡（1981）の方法に従って原単位と湖周辺の水田面積から求めたものに、新たな取水データを足し合わせて算出した。貯留量変化は、水位変化に湖面積を乗じて算出した。以上のデータをそれぞれ年単位で積算し、水収支式の各収支項を求めた。

2008～2010年の年単位水収支を本研究の新手法で算出した結果、霞ヶ浦全域において総流入量は約21～23億 $\text{m}^3$ 、総流出量は約18～24億 $\text{m}^3$ であった。水収支項の中で量が最も多いのは流入、流出ともに河川流量であった。総量のうち河川流量が占める割合は、流入については75～76%、流出については60～69%であった。ただし水域別に見た場合、北浦の流出は50%近くが工業用水取水によるものであった。また現在と1970年代の変化は主に、河川流量の増加により生じていた。さらに上水取水が約5倍、工水取水が約2倍、下水排水が約7倍と増加していた。それに伴って平均滞留時間は、流入量を基に算出したら約30日、流出量を基に算出したら約20日短くなった。流域の環境および水利用変化により霞ヶ浦の水循環量を増加させていると考えられる。

**Keywords** : 水収支, 湖沼, 霞ヶ浦, 水利用, 水循環

## 目次

目次 .....	i
表目次.....	iii
図目次.....	iv
第1章 序論.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 湖沼の水収支.....	1
1.1.2 霞ヶ浦の水収支と水利用 .....	1
1.1.3 霞ヶ浦の治水・利水に関わる歴史 .....	2
1.1.4 流域の土地利用変化 .....	4
1.2 研究目的 .....	4
第2章 研究方法.....	6
2.1 研究対象地域 .....	6
2.2 水収支.....	6
2.3 使用データ .....	12
2.3.1 湖心観測データ .....	12
2.3.2 その他のデータ .....	12
2.4 流域界.....	15
2.5 降水量.....	20
2.6 河川流入出量 .....	22
2.6.1 河川流量.....	22
2.6.2 先行研究の方法 .....	22
2.6.3 現在の実測河川 .....	23
2.6.4 非実測河川の流量観測.....	23
2.6.5 現在の非実測河川 .....	24
2.7 蒸発量.....	29
2.8 地下水流量.....	30
2.9 取水・排水量 .....	33
2.9.1 生活用水・工業用水 .....	33
2.9.2 農業用水.....	33
2.9.3 処理下水排水.....	33
2.10 貯留量変化.....	34
第3章 結果と考察.....	38
3.1 降水量分布 .....	38
3.2 7河川流入量 .....	38

3.3	河川流量観測の結果と適用 .....	38
3.4	常陸利根川の流量 .....	38
3.5	年単位水収支のまとめ .....	57
3.6	水域ごとの各水収支要素が占める割合 .....	62
3.7	各水収支要素の 1970 年代と現在の差異 .....	62
3.8	1970 年代と現在の水収支要素が占める割合の比較（霞ヶ浦全域） .....	66
第 4 章	結論 .....	68
謝辞	.....	69
引用文献	.....	70

## 表目次

表 2.1	水収支項目の推定方法.....	10
表 2.2	当研究室による湖心観測所での観測項目（伊倉，2010）.....	13
表 2.3	国土交通省による湖心観測所での観測項目（伊倉，2010）.....	14
表 2.4	河川ごとの流域面積と霞ヶ浦の湖面積.....	19
表 2.5	流量観測詳細.....	27
表 3.1	流量観測の結果.....	52
表 3.2	中小河川に適用する実測 7 河川.....	53
表 3.3	霞ヶ浦全域の水収支（2008 年～2010 年）.....	58
表 3.4	西浦の水収支（2008 年～2010 年）.....	59
表 3.5	北浦の水収支（2008 年～2010 年）.....	60

## 図目次

図 1.1	木原における水位変化と霞ヶ浦の治水・利水に関わる歴史.....	3
図 1.2	霞ヶ浦流域の 1976 年と 2009 年の土地利用比較.....	5
図 2.1	霞ヶ浦流域.....	8
図 2.2	霞ヶ浦湖心観測所（宮野，2010）.....	9
図 2.3	西浦へ流入する河川の流域.....	16
図 2.4	北浦へ流入する河川の流域.....	17
図 2.5	残流域.....	18
図 2.6	霞ヶ浦流域雨量観測点.....	21
図 2.7	河川流域と流量観測点（村岡，1981）.....	25
図 2.8	河川流域と流量観測点（本研究）.....	26
図 2.9	中小河川に当てはめる実測河川の適用手順.....	28
図 2.10	2008 年の西浦の蒸発量分布（伊倉，2010）.....	31
図 2.11	動水勾配の地域特性（内藤，2008）.....	32
図 2.12	取水・排水地点（1970 年代）.....	35
図 2.13	取水・排水地点（現在）.....	36
図 2.14	水位観測点.....	37
図 3.1	2007 年の年降水量分布.....	40
図 3.2	2008 年の年降水量分布.....	41
図 3.3	2009 年の年降水量分布.....	42
図 3.4	2010 年の年降水量分布.....	43
図 3.5	2011 年の年降水量分布.....	44
図 3.6	桜川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	45
図 3.7	恋瀬川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	46
図 3.8	小野川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	47
図 3.9	清明川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	48
図 3.10	園部川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	49
図 3.11	巴川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	50
図 3.12	銚田川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31).....	51
図 3.13	水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係（2011 年 1 月 12 日～13 日）.....	54
図 3.14	水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係（2011 年 4 月 11 日～12 日）.....	55
図 3.15	水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係（2011 年 8 月 25 日～26 日）.....	56

図 3.16	水収支（2008年～2010年平均） .....	61
図 3.17	水域ごとの各水収支要素が占める割合（流入，2008年～2010年平均） .	63
図 3.18	水域ごとの各水収支要素が占める割合（流出，2008年～2010年平均） .	64
図 3.19	1970年代と現在の水収支の比較（霞ヶ浦全域） .....	65
図 3.20	1970年代と現在の各水収支要素が占める割合の比較（霞ヶ浦全域） .....	67

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 湖沼の水収支

水収支は気候や地形などの自然条件と、土地利用や水利用などの人間活動に大きく左右され、湖においては水位や滞留時間、水質などに影響する（茨城県霞ヶ浦環境科学センター，2012）。

湖沼の水収支は、一定期間における湖水の容量の変化量が、すべての水源からの流入量と湖水の消失量との差を表す収支式によって求めることができる。また湖沼の水収支および物質収支は、湖沼の富栄養化の問題に対して、一つの重要な基礎研究であり、水質汚濁とその防止策に対して水文学的な貢献をなし得るものである（市川・榎根，1978）。

湖沼の水収支に関する研究として、まず世界の湖沼について見てみると、Morrill (2004) はチベットの湖の水収支に対する夏季アジアモンスーンの影響について述べている。また、Gibson *et al.* (2006) はカナダのグレートスレーブ湖の水収支と水位に対する、気候の影響について述べている。つぎに日本の湖沼について見てみると、例えば浦野 (1987) が、北海道の洞爺湖の年間水収支についてまとめている。洞爺湖の水は発電用水、上水道などに利用されており、そのような人為的水移動の調節が湖水位の調節に重要な役割を占めていることを明らかにしている。

湖沼は断層湖、カルデラ湖、火山湖、堰止湖、海跡湖に分類できる（環境庁自然保護局，1995）。その中で日本の都市近郊に位置する海跡湖では、1970年代以降、都市域の拡大や都市への人口と産業活動の集中によって、湖沼およびその流域での自然環境や社会環境が大きく変化した。例えば、湖岸の人口化による湖沼景観の悪化、富栄養化による水質汚染、湖岸・湖底の著しい地形改変、新たな洪水の発生、湖沼の生態系の変化などである。日本の海跡湖は、自然状態に近い湖沼環境がよく残されている北海道のサロマ湖や、大部分の水域が干拓によって陸地化された秋田県の八郎潟など、それぞれの地域の事情によって異なる変遷をたどっている。その中でも茨城県の霞ヶ浦は、湖岸地帯（湖岸低地と沿岸域）でさまざまな人為的な地形改変が顕著に行われてきた湖である（平井，1995）。

#### 1.1.2 霞ヶ浦の水収支と水利用

霞ヶ浦は茨城県南東部に位置する湖であり、西浦、北浦、常陸利根川で構成されている。霞ヶ浦の湖水は、流域およびその周辺で生活する人々によって、水資源として利用されている。しかしその使われ方には特徴があり、湖から取水をして流域で水利用を行なった後に、排水を湖に戻すという方法がとられている。そのため霞ヶ浦は、水質的なリスクが高

い、「下流汚染蓄積型湖沼」と呼ばれている（総合地球環境学研究所，2011）。よって物質収支が重要な検討事項となるが，その基礎となるのは水収支である。したがって将来にわたって水資源を有効利用するために，水収支を把握することは重要である。

霞ヶ浦の水収支は，1972年から1979年を対象に村岡（1981）によって評価されている。その後，茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課（2004）では，湖の水質や負荷量を検討する過程で，1991年～2000年の降水，河川流入，蒸発，取水をまとめている。

特定の水収支要素については，伊倉（2010）が西浦における2008年の湖面蒸発量を，湖面全域の分布を考慮して求めている。また内藤（2008）では西浦における2007年の地下水の流入，流出を調べ，差し引きとしての地下水流入量を求めている。そして山田（2007）では，霞ヶ浦流域の支流域である7大河川（桜川，恋瀬川，小野川，清明川，園部川，巴川，鉾田川）流域の降水量，流出量，蒸発量の解析を行い，これらの水収支の結果と，土地利用などの関係について考察をしている。

### 1.1.3 霞ヶ浦の治水・利水に関わる歴史

霞ヶ浦に対しては1960年代以降，治水・利水を目的に人為的な大規模な働きかけが行われ，それに伴って水位が変化している（図1.1）。霞ヶ浦は利根川水系の最末端にある湖であり，古くから利根川本流の影響を強く受けてきた。具体的には，洪水で利根川本流の流量が多い時には，利根川の水が霞ヶ浦へ逆流して湖岸地帯に洪水害をもたらした。また渇水時には海水が逆流し，農作物等へ被害を及ぼしてきた。これに対処するため，まず霞ヶ浦の流出口に常陸川水門が1963年に完成した。その後，1975年から水門の操作による水位管理が始まった。1975年前後を境にして，水位が上昇してY.P.1 m前後を保つようになっていく。

また1970年から1995年にかけて霞ヶ浦開発事業が実施され，湖岸堤の整備などの大規模な工事が行われた。そして1994年には霞ヶ浦用水事業が完成し，西浦から取水した水が筑波山を越えて，霞ヶ浦の流域外まで運ばれるようになった。

これらの結果，霞ヶ浦は首都圏の貴重な水資源となった。しかし，常陸川水門が閉鎖されたことによって利根川および海水との交流が止められ，このことは湖流や魚類の移動に影響を与えた。それから，人工的な湖岸になったことで，湖の生態系は大きく変化することになった。また，人間の社会経済活動による水質汚濁が急激に進んでいった。そして近年は，工場の新規立地や鉄道沿線の宅地造成，筑波研究学園都市建設に伴う市街地化などの土地利用・土地被覆の変化により，水環境の保持・改善にいつそうの努力が必要とされている（茨城大学農学部霞ヶ浦研究会，1979；霞ヶ浦研究会，1994；水資源機構，2011）。

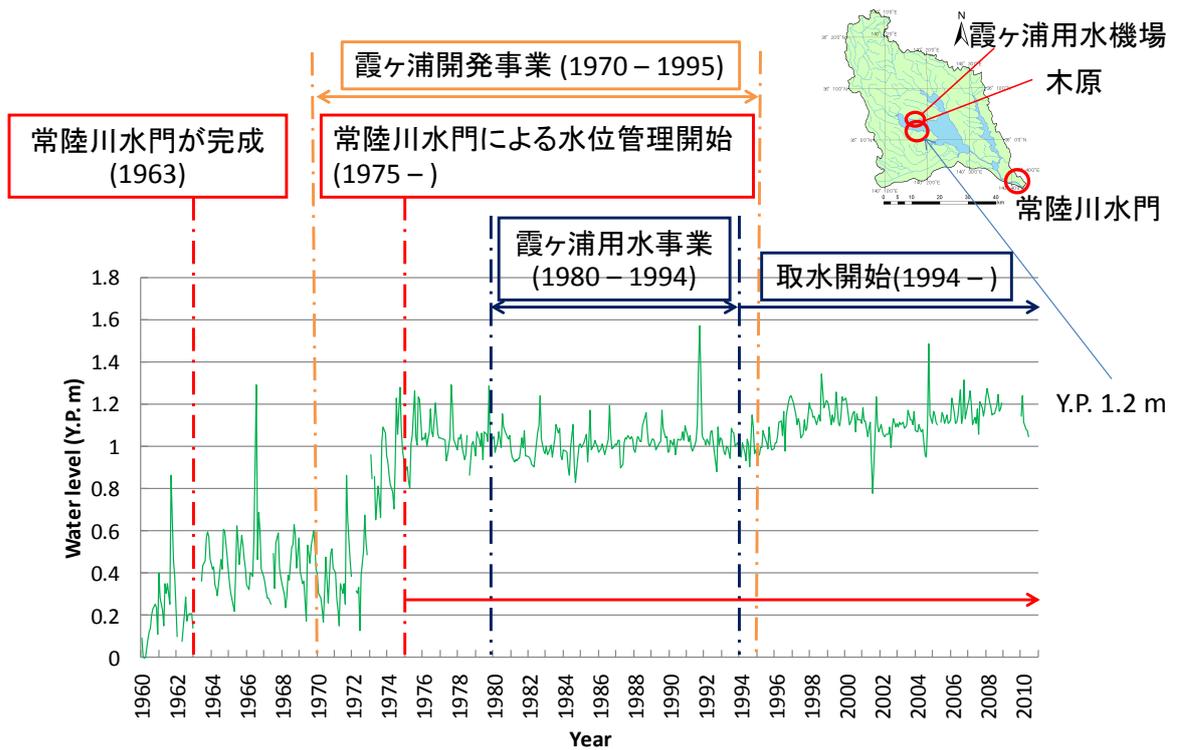


図 1.1 木原における水位変化と霞ヶ浦の治水・利水に関わる歴史

※Y.P. (Yedogawa Peil): 霞ヶ浦 (利根川水系) の水位を測量する際の基準面.

(Y.P. 0 m = T.P. -0.840 m)

#### 1.1.4 流域の土地利用変化

霞ヶ浦流域の土地利用は、1970年代と現在では変化している。霞ヶ浦流域の土地利用の面積と割合を、1976年と2009年について比較した結果を図1.2に示す。これを見ると、どちらの年も水田の割合が多いことが分かる。変化に着目すると、市街地が増加していて、森林が減少している様子が見て取れる。また、水田と畑はやや減少している。

#### 1.2 研究目的

以上で述べたように、霞ヶ浦の水収支については村岡（1981）が評価した以降、大規模な開発事業や用水事業によって湖岸や流域には様々な環境変化が生じたにもかかわらず、総合的な水収支をまとめた研究は存在しない。また最近の研究では、湖面蒸発量や地下水流入量など、特定の要素を求めたものが存在するにとどまっている。そこで本研究では、現在の霞ヶ浦における水収支を総合的に評価し、1970年代と比較することでその差異を説明することを目的とした。

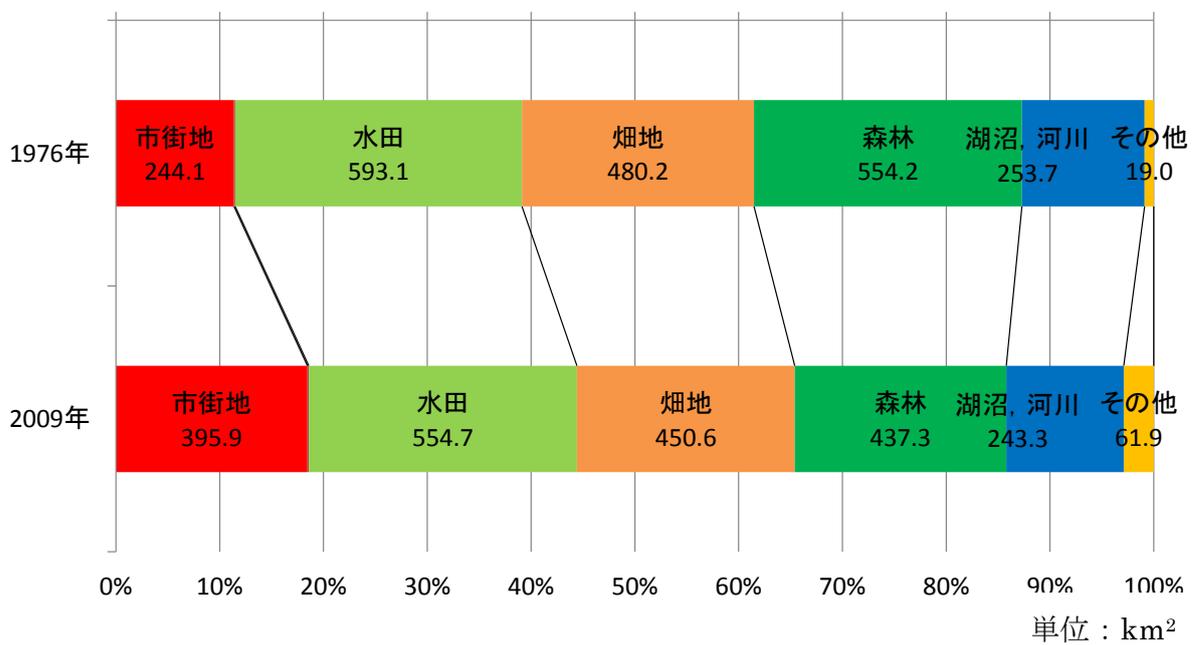


図 1.2 霞ヶ浦流域の 1976 年と 2009 年の土地利用比較

※国土交通省国土政策局（2013）：「国土数値情報（土地利用細分メッシュ）」より作成

## 第2章 研究方法

### 2.1 研究対象地域

本研究の対象地域は、茨城県南東部に位置する霞ヶ浦およびその流域である（図 2.1）。霞ヶ浦は利根川水系に属する湖であり西浦，北浦，北利根川，鰯川，外浪逆浦および常陸川で構成されている。本研究では西浦，北浦（北浦＋鰯川），常陸利根川（北利根川＋外浪逆浦＋常陸川）の 3 つに区分をして解析を行なった。また西浦の中央（36° 02′ 35″ N, 140° 24′ 42″ E）に，湖心観測所（図 2.2）が存在する。

霞ヶ浦は流域面積が約 2157 km<sup>2</sup>であり，茨城県の約 1/3 を占めている。湖面積は約 220 km<sup>2</sup>であり，日本の中では琵琶湖に次いで 2 番目に広い湖である。湖岸線は約 252 km であり，日本で第 1 位の長さとなる。水深は平均で 4 m，最大でも 7.3 m であり，広くて浅い湖であるという特徴をもっている。湖の貯留量は，水位が Y.P.1.00 m の時に約 8.5 億 m<sup>3</sup> である。流域の年間平均降水量は 1937 年～1990 年の平均値で 1310 mm であり，全国平均よりも少ない傾向がある（水資源協会，1996）。

### 2.2 水収支

本研究では霞ヶ浦全域，西浦，北浦それぞれの水域ごとに現在の水収支要素を算出し，水域ごとに各水収支要素が占める割合を求めた。また水収支を算出する際には，村岡（1981）の方法と新しい方法それぞれで算出し，村岡（1981）の結果である 1972～1979 年の水収支と比較をした。本研究の対象期間は，2008 年～2010 年とした。また水収支単位期間は年，水文期間は 1 月から 12 月とした。

ある範囲，ある期間を対象とすると水収支式は一般に，

$$\text{流入} - \text{流出} = \text{貯留量変化} \quad (2.1)$$

と表すことができる。

また湖水を対象とすると水収支式は，

$$P + R_{in} + G_{in} - E - I - R_{out} - G_{out} = \Delta S \quad (2.2)$$

となる。ここで， $P$ : 降水量， $E$ : 蒸発量， $R$ : 河川流量， $G$ : 地下水の流量， $I$ : 湖水の地中への浸透， $\Delta S$ : 期間の始めと終わりの貯留量変化，添字の  $_{in}$  を流入， $_{out}$  を流出とする（杉田，2012）。

霞ヶ浦の水収支は，式(2.2)にさらに人為的な取水・排水を加えることで求めることがで

きる。霞ヶ浦の水収支要素は，流入として湖面降水  $P$ ，河川流入  $R_{in}$ ，地下水流入  $G_{in}$ ，処理下水排水  $D_{ser}$ ， $D_{ind}$ ，農業用水排水  $D_{agr}$ ，流出として湖面蒸発  $E$ ，河川流出  $R_{out}$ ，地下水流出  $G_{out}$ ，生活用水取水  $I_{ser}$ ，工業用水取水  $I_{ind}$ ，農業用水取水  $I_{agr}$  があげられる。貯留量変化  $\Delta S$  は，湖水位の変化に湖面積を乗じて算出する（村岡，1981）。これらの項目を式(2.1)に代入し，さらに貯留量変化を左辺に移行し，流入－流出－貯留量変化を計算した。

各水収支要素の推定方法をまとめたものを表 2.1 に示す。また，各水収支要素の詳細な算出方法を次節以降で説明する。

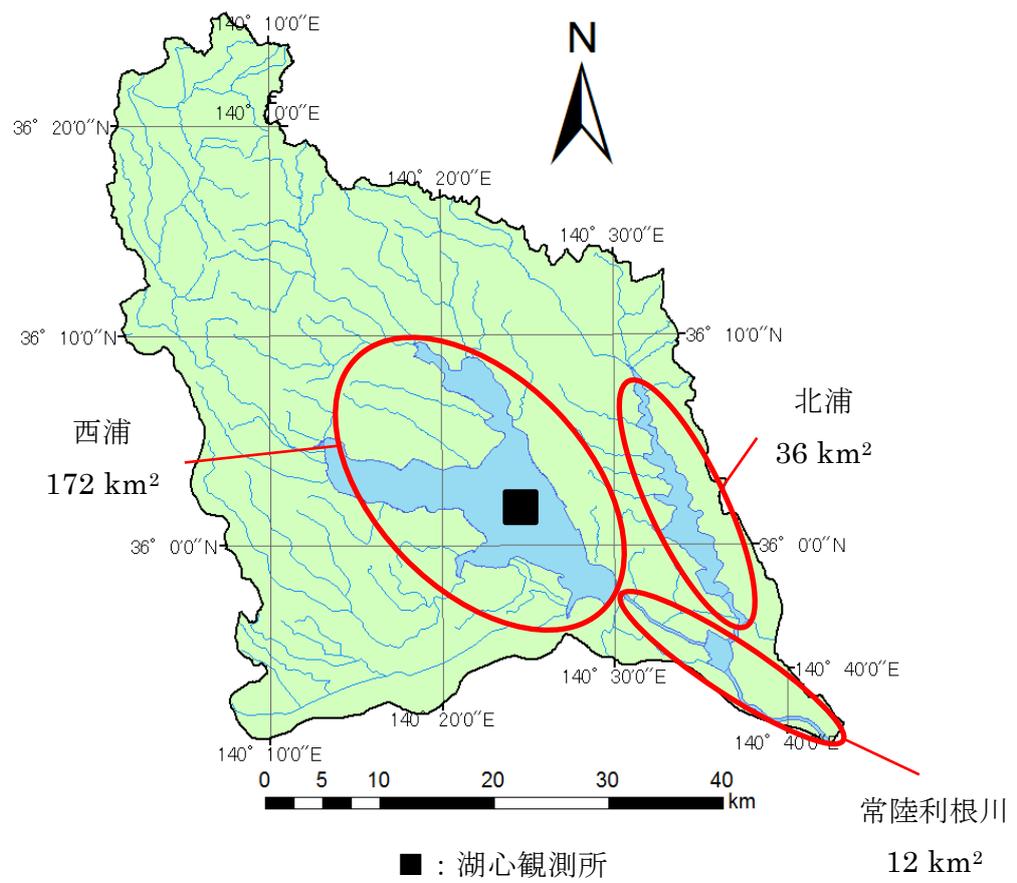


図 2.1 霞ヶ浦流域

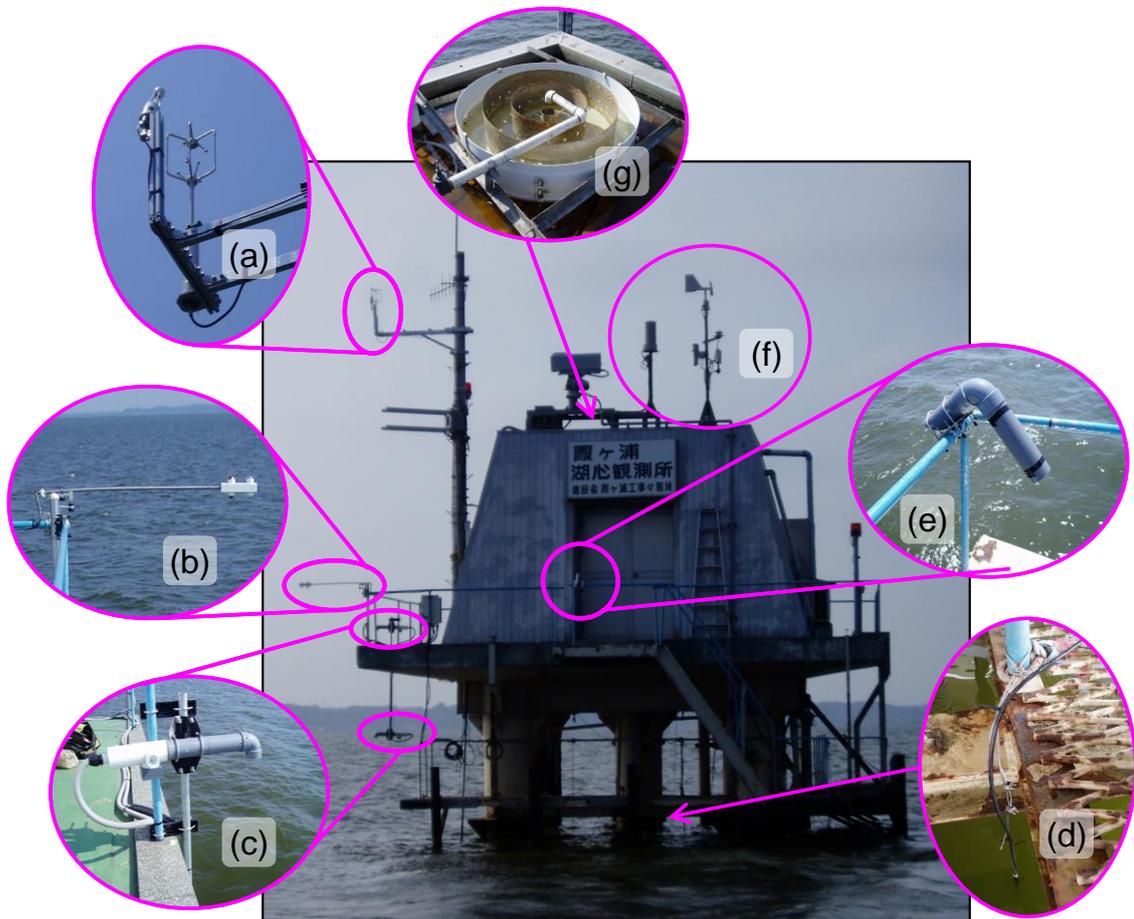


図 2.2 霞ヶ浦湖心観測所 (宮野, 2010)

- (a) 左：超音波風速温度計， 右：オープンパスガスアナライザー  
 (b) 4成分放射計 (c) 温湿度計 (d) 水温計 (e) 放射温度計  
 (f) 左：雨量計， 右：上から風向風速計，日射計，温湿度計 (すべて国土交通省所有)  
 (g) 大型蒸発パン (国土交通省所有)

表 2.1 水収支項目の推定方法

	村岡 (1981)	本研究	
		方法 I (村岡 (1981) を踏襲)	方法 II (最新の技術を採用)
$P$	湖周囲 4 か所 <sup>1)</sup> の測定値の平均.	左と同じ	流域内外 41 か所の測定値からクリギング法により分布推定→湖部分の平均推定
$R_{in}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流域降水量</li> <li>流域内 10 か所<sup>2)</sup>の測定値の平均.</li> <li>・河川流入量</li> <li>7 河川<sup>3)</sup>の流量の実測値 (1972 年) と降水量から全河川の流出率を決定.</li> <li>全河川および残流域からの流入量を, 各河川の流出率・水域ごとの流域降水量・流域面積から推定.</li> <li>(流出率はどの年も同じ値を使用)</li> </ul>	左と同じ  流出率に関しては, 7 河川 <sup>4)</sup> は現在の値を使用.	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流域降水量</li> <li>上と同じ (河川流域部分の平均推定)</li> <li>・河川流入量</li> <li>(1) 7 河川<sup>4)</sup>+新利根川の流量: 実測値を使用</li> <li>(2) 他の河川および残流域からの流入量: 適用させる 7 河川の流出率と, 各河川の流域降水量・流域面積から推定 (流出率は年ごとに決定し, 毎年違う値を使用)</li> </ul>
$G_{in}$	河川流入量の 1%. 美浦村モデル地区における推定値を霞ヶ浦湖岸全域に拡張. 河川流入量に対する比をとる.	左と同じ	西浦周囲で推定された流入量 (内藤, 2008) から, 水域ごとの流入量を推定. 河川流入量の 1.59% (霞ヶ浦), 1.05% (西浦), 2.23% (北浦).
$D_{ser}$	下水処理場 <sup>6)</sup> の排水量データ.	下水処理場 <sup>7)</sup> の排水量データ.	左と同じ
$D_{ind}$	下水処理場 <sup>6)</sup> の排水量データ.	下水処理場 <sup>7)</sup> の排水量データ.	左と同じ
$D_{agr}$	排水量原単位と水田面積から推定.	左と同じ	左と同じ
$E$	湖周囲 2 か所 <sup>5)</sup> のパン蒸発量	渦相関法とバルク法	左と同じ

	測定値から推定	によって求められた湖心値よりも、10%小さい値を湖面全域平均値として使用.	
$R_{out}$	水収支式の残差	左と同じ	常陸利根川の実測流量
$G_{out}$	ゼロと仮定	左と同じ	左と同じ
$I_{ser}$	取水施設 <sup>6)</sup> の取水量データ	取水施設 <sup>7)</sup> の取水量データ	左と同じ
$I_{ind}$	取水施設 <sup>6)</sup> の取水量データ	取水施設 <sup>7)</sup> の取水量データ	左と同じ
$I_{agr}$	取水量原単位と水田面積から推定	左と同じ+取水施設 <sup>7)</sup> の取水量データ	左と同じ
$\Delta S$	水位観測値 <sup>8)</sup> から決定	左と同じ	左と同じ (使用する観測所を増やし <sup>9)</sup> , 水域ごとに計算)

注：

- 1) 雨量測定点 (4 か所) : 土浦, 江戸崎, 銚田, 鹿島 (図 2.6 参照)
- 2) 雨量測定点 (10 か所) : 土浦, 江戸崎, 銚田, 鹿島, 柿岡, 真壁, 筑波山 (門井), 館野 (つくば), 竜ヶ崎, 美野里 (図 2.6 参照)
- 3) 7 河川 : 桜川, 恋瀬川, 小野川, 清明川, 園部川, 巴川, 山王川 (図 2.7 参照)
- 4) 7 河川 : 桜川, 恋瀬川, 小野川, 清明川, 園部川, 巴川, 銚田川,  
流出河川 : 潮来, 鱒川, 日川 (図 2.8 参照)
- 5) パン蒸発量の測定地点 (2 か所) : 江戸崎, 玉造 (図 2.10 参照)
- 6) 取水・排水施設 (図 2.12 参照)
- 7) 取水・排水施設 (図 2.13 参照)
- 8) 水位観測点 : 湖心, 木原, 八木薪, 白浜, 潮来, 賀 (図 2.14 参照)
- 9) 水位観測点 : 全地点 (図 2.14 参照)

## 2.3 使用データ

### 2.3.1 湖心観測データ

当研究室では、国土交通省関東地方整備局の霞ヶ浦河川事務所が所管する霞ヶ浦湖心観測所に観測測器を設置して水文・気象要素の測定を行っている。機材設置は2007年5月24日に行われ、同日15:30から現在（2014年1月）にかけてデータを測定、記録している（宮野，2008，2010；伊倉，2010）。その詳細を表2.2に示す。また国土交通省による、湖心における観測データを提供いただき使用した。その詳細を表2.3に示す。

### 2.3.2 その他のデータ

本研究ではその他、以下の機関（項目）のデータを使用した。

- ・気象庁アメダス（降水量）
- ・国土交通省霞ヶ浦河川事務所（降水量，河川流量，蒸発量）
- ・国土交通省水文水質データベース（水位）
- ・水資源機構利根川下流総合管理所（河川流量）
- ・水資源機構霞ヶ浦用水管理所（生活用水取水，工業用水取水，農業用水取水）
- ・茨城県企業局（生活用水取水，工業用水取水）
- ・茨城県土木部（処理下水排水）
- ・石岡台地土地改良区（農業用水取水）
- ・国土交通省国土政策局（土地利用）
- ・国土地理院（詳細流域界）

表 2.2 当研究室による湖心観測所での観測項目 (伊倉, 2010)

項目	測器	高度※	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
風速3成分 $u, v, w$ [m/s] 気温 $T_a$ [°C]	超音波風速温度計 (Gill Instruments Ltd., R3A)	9.80 m	毎0.1秒	前30分	毎時0分, 30分
水蒸気濃度 $\rho_v$ [g/m <sup>3</sup> ] 二酸化炭素濃度 $\rho_c$ [mmol/m <sup>3</sup> ]	オープンパスアナライザー (LI-COR, Inc., LI-7500)	9.25 m	毎0.1秒	前30分	毎時0分, 30分
短波放射 $S^{\downarrow}$ , $S^{\uparrow}$ [W/m <sup>2</sup> ] 長波放射 $L^{\downarrow}$ , $L^{\uparrow}$ [W/m <sup>2</sup> ]	4成分放射計 (Kipp & Zonen B.V., CNR-1)	4.29 m	毎5秒	前30分	毎時0分, 30分
気温 $T_a$ [°C] 湿度 $Rh$ [%]	通風温湿度計 (REBS, Inc., AEM)	2.00 m, 3.72 m	毎5秒	前30分	毎時0分, 30分
水面温度 $T_s$ [°C]	放射温度計 (Minortra, CML-303N)	4.27 m	毎5秒	前30分	毎時0分, 30分
水温 $T_w$ [°C]	白金測温抵抗体	-0.1 m, -1.0 m, -2.5 m	毎時5分, 35分	(瞬間値)	毎時0分, 30分

※ 観測高度は平水位面 (Y.P.+1.0 m) からの高さとする.

表 2.3 国土交通省による湖心観測所での観測項目 (伊倉, 2010)

観測項目	測器	測定高度	サンプリング時刻	平均化時間	ロガー出力時刻
水位 $Z_w$ [m]	水晶式水位計	—	毎秒	前1時間	毎時0分
雨量 $P$ [mm]	転倒ます式雨量計	8.85 m	毎時0分	前1時間積算値	毎時0分
風向 $WD$ [°], 風速 $U$ [m/s]	風車型風向風速計	9.45 m	毎0.25秒	前1時間	毎時0分
蒸発量 $E$ [mm]	パン蒸発計	6.75 m	毎時0分	前1時間積算値	毎時0分
日射量 $S_f$ [W/m <sup>2</sup> ]	全天日射計	8.75 m	毎秒	前1時間	毎時0分
気温 $T_a$ [°C]	通風温湿度計+白金測温抵抗体	8.25 m	毎秒	前1時間	毎時0分
露点温度 $DP$ [°C]	塩化リチウム塗布式露点温度計	8.25 m	毎秒	前1時間	毎時0分
水温 $T_{ws}$ , $T_{wb}$ [°C]	白金測温抵抗体	-0.5 m, -3.5 m	毎秒	前20分	毎時0分(上層) 毎時30分(下層)
気圧 $AP$ [hPa]	アネロイド型気圧計	6.75 m	毎時0分	瞬間値	毎時0分

※ 観測高度は平水位面 (Y.P.+1.0 m) からの高さとする。

## 2.4 流域界

湖の水収支要素である降水量や河川流入量などを算出する際には、湖や各流入河川の流域面積を明らかにする必要がある。さらに、観測データが流域内のどの場所に位置しているのかを明らかにする必要がある。そこで本研究では ArcGIS for Desktop ver.10.1 を用いて、流域界データと観測データを重ね合わせ、空間的な解析を行なった。

そのために、国土地理院 (2002) によって作成された「詳細流域界データ」を使用した。これは 2 万 5 千分の 1 地形図、2 万 5 千分の 1 土地条件図、数値地図 50 メートルメッシュ (標高) を基にして作成されたデータである。このデータを用いて、全 58 の流入河川および残流域の流域界を決定し、流域面積を算出した。西浦へ流入する河川を図 2.3 に、北浦へ流入する河川を図 2.4 に、どの河川にも属さなかった残流域を図 2.5 に示す。また今回算出した、河川ごとの流域面積と霞ヶ浦の湖面積を、既存の文献の値と比較した (表 2.4)。なお表 2.4 の観測地点より上流の流域面積とは、後述する河川の流量観測点を ArcGIS 上で流域界図に重ね、その点よりも上流の流域面積を計算した値のことである。既存の文献の値は、水資源協会 (1996) に記載されている値を引用した。河川 No.①～⑦が、後述する現在の実測河川、河川 No.1～51 が非実測河川である。また No.21 野田奈川と No.22 柏木排水路は、多くの資料には記載されていない河川であったが、茨城県霞ヶ浦環境科学センターのウェブサイト上の流入河川の地図に記載されていたため、本研究では流入河川として扱った。



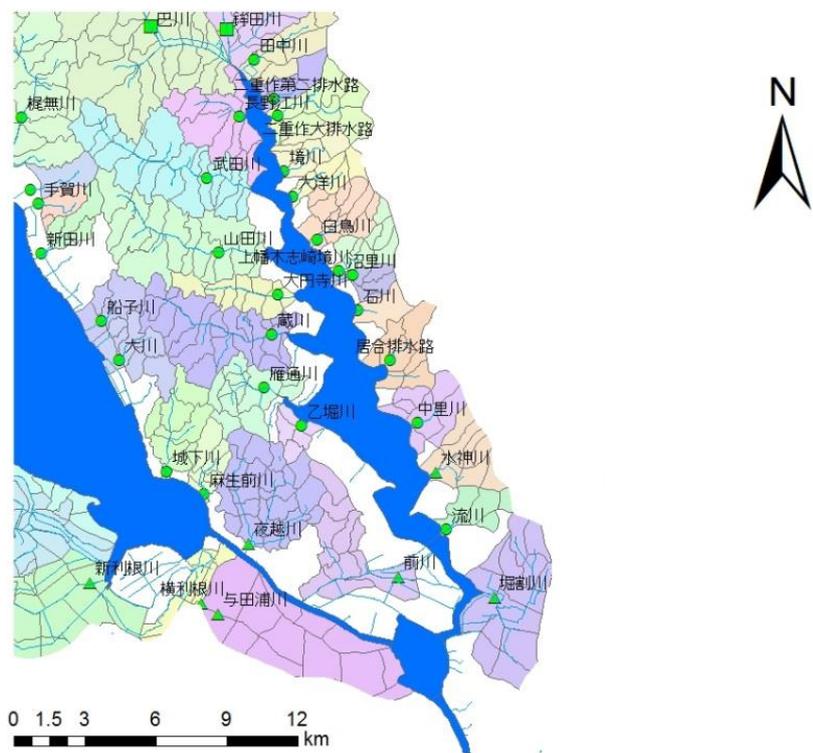


図 2.4 北浦へ流入する河川の流域

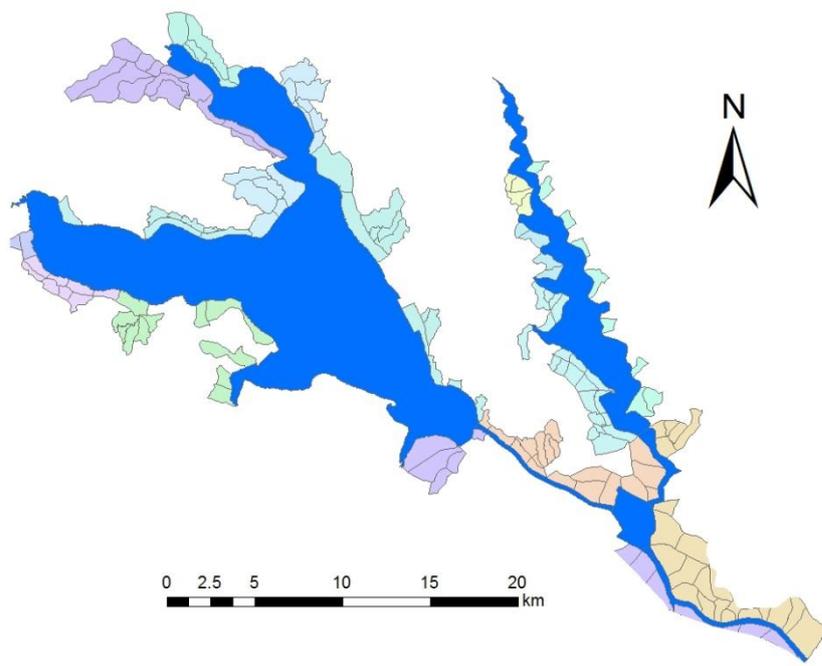


图 2.5 残流域

表 2.4 河川ごとの流域面積と霞ヶ浦の湖面積

流入先	河川No. 河川名	詳細流域界 データ	詳細流域界 データ	水資源協会 (1996)	詳細流域界 データ	水資源協会 (1996)
		観測地点より上流の 流域面積(km <sup>2</sup> )	流域面積(km <sup>2</sup> )	流域面積(km <sup>2</sup> )	湖面積(km <sup>2</sup> )	湖面積(km <sup>2</sup> )
西浦	① 桜川	325.1	348.9	349.0		
	② 恋瀬川	147.6	215.0	224.5		
	③ 小野川	120.4	175.7	173.5		
	④ 清明川	18.1	24.4	25.0		
	⑤ 園部川	74.8	77.7	87.0		
	1 花室川	22.3	33.9	38.8		
	2 備前川	3.3	6.3	4.1		
	3 新川	5.9	7.1	8.8		
	4 境川	19.7	23.1	21.3		
	5 田村川	2.0	2.9	1.5		
	6 川尻川	6.7	11.5	8.8		
	7 一ノ瀬川	25.0	28.0	17.0		
	8 菱木川	21.8	25.1	23.7		
	9 山王川	12.3	12.7	12.3		
	10 中台用排水路	3.0	3.4			
	11 鎌田川	14.5	15.8	15.2		
	12 梶無川	26.9	33.9	25.0		
	13 萩根川	2.9	2.9	4.1		
	14 手賀川	2.1	2.1	1.5		
	15 新田川	3.3	3.3	3.1		
	16 船子川	3.3	4.4	4.7		
	17 大川	4.9	6.8	3.5		
	18 城下川	7.8	7.9	8.3		
	19 麻生前川	3.6	3.8	4.1		
	20 新利根川		185.1	153.0		
	21 (野田奈川)	14.6	26.7			
22 (柏木排水路)	3.5	3.8				
23 高橋川	14.1	17.8	14.6			
24 余郷入承水路	6.0	9.0	5.0			
25 大塚川	1.0	1.4	0.9			
26 大須賀津排水路	1.3	2.4	1.5			
	西浦残流域		90.5			
	小計		1413.2		168.7	172.0
北浦	⑥ 巴川	107.6	130.3	106.0		
	⑦ 銚田川	45.0	53.4	44.2		
	27 乙堀川	2.0	2.6	2.9		
	28 雁通川	6.5	8.4	6.0		
	29 蔵川	14.7	17.1	15.4		
	30 大円寺川	4.7	5.8	6.8		
	31 山田川	15.8	20.3	19.7		
	32 武田川	15.4	19.9	13.5		
	33 長野江川	7.2	9.7	6.8		
	34 田中川	5.1	6.5	4.6		
	35 二重作第二排水路	2.8	3.3	2.2		
	36 二重作大排水路	7.2	8.6	6.6		
	37 境川	4.2	4.5	3.1		
	38 大洋川	3.4	3.6	3.3		
	39 白鳥川	6.2	6.8	5.0		
	40 上幡木志崎境川	4.4	4.5	3.0		
	41 沼里川	2.2	2.6	1.8		
	42 石川	2.4	2.6	2.5		
	43 居合排水路	4.1	6.8	7.7		
	44 中里川	4.9	6.8	4.9		
45 水神川	6.7	7.7	6.0			
46 流川	4.3	4.5	3.7			
	北浦残流域		28.8			
	小計		365.2		33.8	36.0
常陸利根川	47 夜越川	6.0	16.3	16.4		
	48 横利根川		6.7	6.5		
	49 前川		11.9	11.8		
	50 与田浦川		30.2	30.1		
	51 堀割川		18.9	4.4		
	常陸利根川残流域		67.8			
	小計		151.8		14.3	12.0
合計			1930.1		216.9	220.0

## 2.5 降水量

一定地域一定期間の水収支を算定する場合に、最も重要な要素の一つは降水量である(市川, 1973)。湖沼や流域への降水量を算定する場合、ある 1 地点での降水量測定値で全体を代表させるのは難しく、領域全体の積分値あるいは平均値である面積降水量が必要になる。面積降水量の求め方としては算術平均法、ティーセン法、等降水量線法、雨量・高度法などが存在する。さらに最近では、クリギング法や逆距離加重法などの地球統計学的手法を用いることも多い。これは、領域内に高密度の格子点を設定し、各格子点における降水量を空間内挿して領域内の全格子点の値を算術平均することで面積降水量を求める方法である(杉田ほか, 2009)。特にクリギング法は、鉱山学的手法として誕生した後、比較的少数の点的観測だけから領域全体の様子もしくは平均値を予測せざるを得ないという状況におかれる、多くの分野で使用されている(間瀬, 2010)。本研究では、山田(2007)においても用いられていたクリギング法を使用した。本研究で使用した雨量の観測所を図 2.6 に示す。

まず村岡(1981)の方法では、西浦湖面を代表する観測所を土浦・江戸崎、北浦湖面を代表する観測所を銚田・鹿島、外浪逆浦(常陸利根川)湖面を代表する観測所を鹿島としていた。霞ヶ浦全域で 4 地点の測定値を使用していることになる。そして各水域ごとに雨量(mm)の算術平均を行なった後、その値に湖面積( $m^2$ )を乗じて湖面降水量( $m^3$ )を求めていた。

つぎに本研究の方法であるが、村岡(1981)を踏襲した方法 I では、上記と同じ観測所の現在のデータを使い、同じ方法をとった。

さらに、最新の技術を採用した方法 II では、流域内外 41 地点のデータを利用した。そして山田(2007)を参考にして、ArcGIS を用いてクリギング法により雨量分布を推定した。そして求めたい範囲である西浦、北浦、常陸利根川それぞれの湖の部分抽出し、その範囲の平均雨量(mm)を推定した。その値に湖面積( $m^2$ )を乗じて湖面降水量( $m^3$ )を求めた。

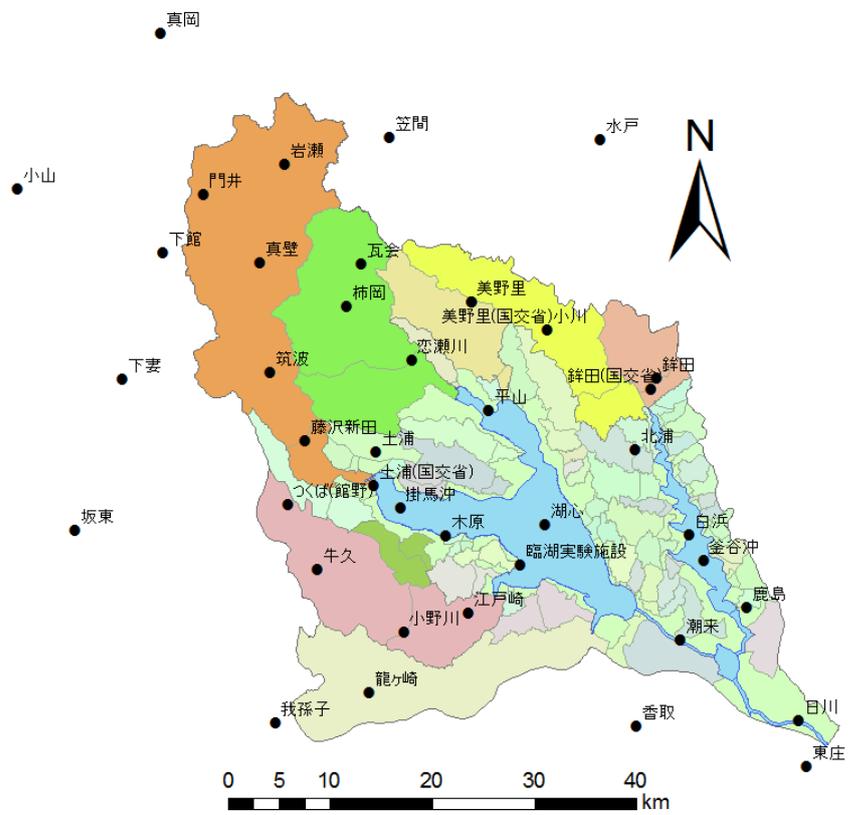


図 2.6 霞ヶ浦流域雨量観測点

## 2.6 河川流入出量

### 2.6.1 河川流量

ある河道断面を通過する水の平均流速を $\bar{v}$ 、断面積を $A$ とすると、通過する水の量である流量 $Q$ は、

$$Q = \bar{v}A \quad (2.3)$$

と表される。また流量を測定する際には、河川をいくつかの小断面に区切り、それぞれの断面ごとに水深、流速を測定し、断面を積算する方法がとられる。 $\bar{v}_i$ を小断面 $i$ における平均流速、 $A_i$ を小断面 $i$ における面積とすると、流量 $Q$ は、

$$Q = \sum \bar{v}_i A_i \quad (2.4)$$

となる。

しかしこのような河川流量の測定を直接連続的に行うことは難しいので、通常は河川水位を連続測定し、あらかじめ求められた河川水位と流量との関係式を用いて流量に換算する方法がとられる。その方法の一つとして、対象河川において、さまざまな水位の時に流量を実測し、水位（ $H$ ）と流量（ $Q$ ）の関係を与える水位流量曲線（ $H$ - $Q$  カーブ）を作成する方法がある（杉田ほか，2009）。水位を連続的に測定し、この曲線から水位の関数として流量を求める。

また、湖へ流入する年間の河川流量を推定する際には、

$$\text{河川流量} = \text{流域面積} \times \text{年降水量} \times \text{平均流出率} \quad (2.5)$$

という式を利用できる（内藤，2008）。

### 2.6.2 先行研究の方法

村岡（1981）の方法では、まず西浦流域、北浦流域、外浪逆浦（常陸利根川）流域それぞれの流域平均降水量を求めている。西浦流域を代表する観測所を土浦・柿岡・真壁・筑波山（門井）・館野（つくば）・江戸崎・竜ヶ崎、北浦流域を代表する観測所を美野里・鉾田・鹿島、外浪逆浦（常陸利根川）流域を代表する観測所を鹿島とした。霞ヶ浦流域全域で10地点の測定値を使用している。そして湖面降水と同じように算術平均をして、各流域の平均降水量を推定している。

河川流入量は、まず 1972 年について図 2.7 に示す当時の実測 7 河川（桜川、恋瀬川、小野川、清明川、園部川、巴川、山王川）のそれぞれの日別比流量を求め、実測河川流域の地形特性と、非実測河川流域の地形特性との比較をし、非実測河川の流域規模に応じてそれぞれのタイプに分類する。つぎに、これらの各タイプの比流量に、当該非実測河川流域の面積を乗じて日別河川流量を推定している。そしてこの結果と降水量の比をとり、流出率を決定した（建設省・国土開発技術研究センター、1977）。その後、各年の全河川および残流域から湖への流入量を、各河川の流域面積・流域降水量・流出率から推定している。

河川流出量は、水収支式の残差として求めていた。

### 2.6.3 現在の実測河川

村岡（1981）を踏襲した方法Ⅰでは、降水量と河川流出量に関しては、2.6.2 項と同じ方法をとった。河川流入量に関しては、現在 7 河川（桜川、恋瀬川、小野川、清明川、園部川、巴川、鉾田川）の流量が常時測定されている。これらの河川の流出率は、それぞれの河川流量の測定値と、クリギング法によって推定された降水量の比から求めた値を用いた。

最新の技術を採用した方法Ⅱでは、まず河川流入量に関しては、西浦への流入は桜川、恋瀬川、小野川、清明川、園部川の 5 河川および新利根川の、北浦への流入は巴川、鉾田川の 2 河川の実測データから算出する。実測データの流量を、各河川の観測地点より上流の流域面積で除して比流量を求め、その値に河口からの流域面積を乗じて、湖への流入量を推定した。

河川流出量は、実測データから求めた。なお、常陸川水門が閉鎖している時の逆流が含まれるデータを使用した。霞ヶ浦全域からの流出は日川の流量、西浦からの流出は潮来の流量、北浦からの流出は鱒川の流量を用いた（図 2.8）。

### 2.6.4 非実測河川の流量観測

方法Ⅱで、常時流量が測定されていない非実測河川（中小河川）の流入量を算出するために、流量観測を行なった。流量を観測するにはさまざまな方法があるが、本研究では流速計を用いた流量観測を行なった。この流速計を用いる方法は、低水時における流量観測法であるといえる（高瀬、1978）。

本研究では主に電磁流速計を用い、一部の河川ではプロペラ式流速計を用いた。観測地点は、図 2.8 に示す通りである。丸で囲ってある地点以外が中小河川の流量観測点である。基底流量を観測するために、無降雨期間が 5 日以上続いた後の日に行なった。観測地点と観測日の詳細を表 2.5 に示す。なお表中で空欄の河川は、河口に水門があるなどの理由に

より，新利根川を除いて流入はないと判断した河川である．

本研究における流量観測と，流量を算出する手順は以下の通りである．

- (1) 川幅をメジャーで測る．
- (2) 川幅を等分し，折尺で水深を測る．
- (3) 等分した区画の真ん中で流速計を用いて流速を測る．測る深度は 6 割水深である．1 区画につき 3 回測り，その平均値を採用する．
- (4) 各区画の面積と流量を掛け合わせて，区画ごとの流量を計算し，それらを足し合わせて全体の流量を算出する．

#### 2.6.5 現在の非実測河川

最新の技術を採用した方法Ⅱでは，中小河川（非実測河川）については，流量観測を行なって取得した基底流量や，地形データを参考にして，対応する実測河川の流出率を当てはめた．まず流量を求めたい河川について，流量観測で測定した各中小河川の基底流量の比流量と，実測 7 河川の低水流量の比流量を比較した．そして流量を求めたい河川の基底流量の値に一番近い低水流量の値を持つ，実測河川を選ぶ．また，各河川の流域降水量を求めておく．その後，当てはめる実測河川の年間の降水量と流量から流出率を求めた．そして，求めたい河川の流入量を流域面積・流域降水量・流出率から推定した（図 2.9）．また残流域からの流入量については，西浦，北浦および常陸利根川，それぞれの水域に流入する実測河川の平均流出率を用いた．

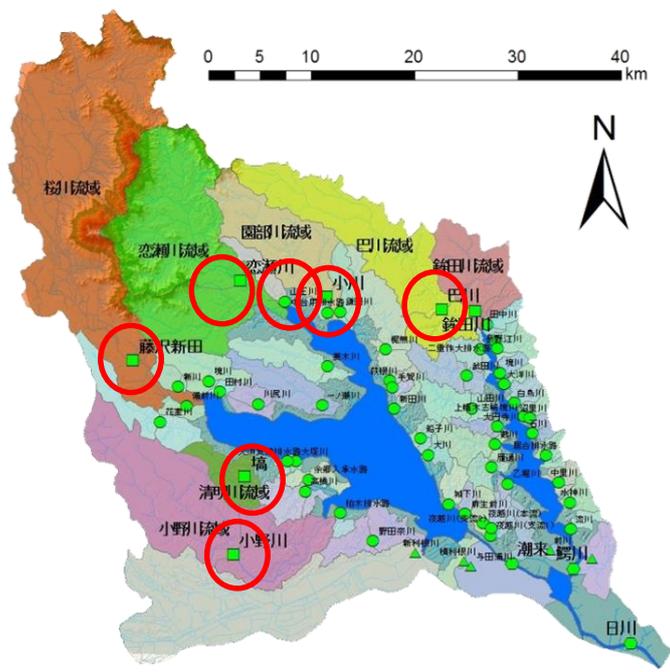


図 2.7 河川流域と流量観測点 (村岡, 1981)

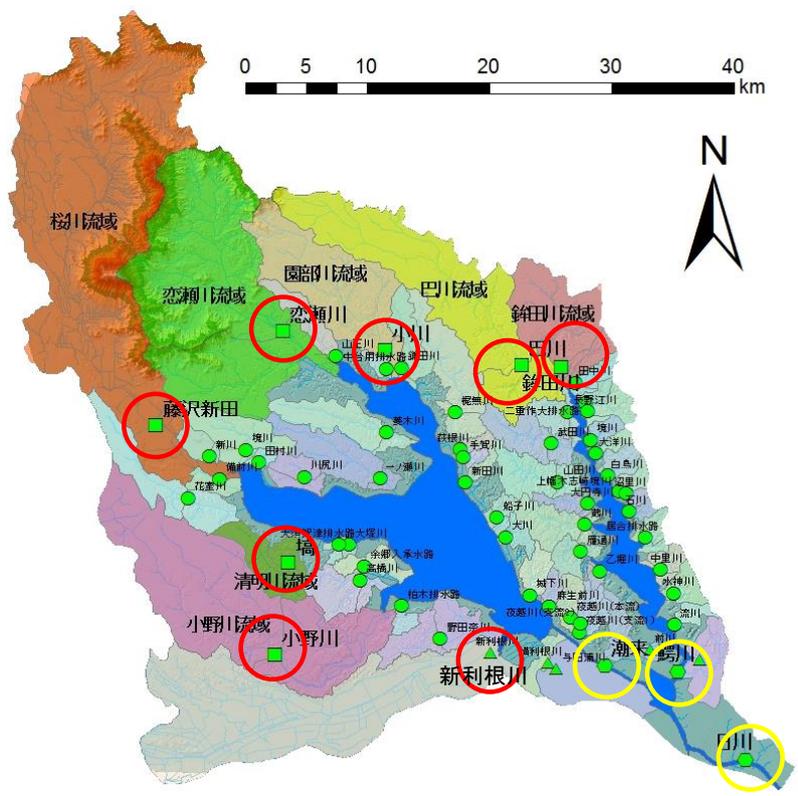


図 2.8 河川流域と流量観測点（本研究）

表 2.5 流量観測詳細

河川No.	河川名	流入先	流域面積(km <sup>2</sup> )	観測地点より上流の 流域面積(km <sup>2</sup> )	観測地点			測定日 2012年				
					緯度N	経度E						
					度	分	秒	度	分	秒		
1	花室川	西浦	33.9	22.3	36	3	36.1	140	10	17.5	2月22日	
2	備前川		6.3	3.3	36	4	26.7	140	12	1.1	2月22日	
3	新川		7.1	5.9	36	5	28.1	140	11	29.9	2月22日	
4	境川		23.1	19.7	36	5	44.4	140	13	29.2	2月22日	
5	田村川		2.9									
6	川尻川		11.5	6.7	36	4	31.9	140	16	39.7	2月22日	
7	一ノ瀬川		28.0	25.0	36	4	26.5	140	20	46.9	3月16日	
8	菱木川		25.1	21.8	36	6	30.8	140	21	7.2	3月16日	
9	山王川		12.7	12.3	36	9	55.9	140	18	24.2	3月16日	
10	中台用排水路		3.4	3.0	36	9	20.9	140	21	10.6	3月16日	
11	鎌田川		15.8	14.5	36	9	23.5	140	21	58.8	3月16日	
12	梶無川		33.9	26.9	36	7	22.8	140	24	54.3	3月16日	
13	菽根川		2.9	2.9	36	5	43.1	140	25	8.4	3月30日	
14	手賀川		2.1	2.1	36	5	23.6	140	25	21.3	3月30日	
15	新田川		3.3	3.3	36	4	14.1	140	25	27.0	3月30日	
16	船子川		4.4	3.3	36	2	40.4	140	27	7.7	3月30日	
17	大川		6.8	4.9	36	1	47.2	140	27	37.4	3月30日	
18	城下川		7.9	7.8	35	59	11.3	140	28	54.6	7月25日	
19	麻生前川		3.8	3.6	35	58	40.5	140	29	59.0	7月25日	
20	新利根川		185.1									
21	(野田奈川)		26.7	14.6	35	57	16.3	140	24	1.7	7月25日	
22	(柏木排水路)		3.8	3.5	35	58	45.6	140	21	54.7	7月25日	
23	高橋川		17.8	14.1	35	59	54.7	140	19	40.2	7月25日	
24	余郷入承水路		9.0	6.0	36	0	31.7	140	19	53.8	7月25日	
25	大塚川		1.4	1.0	36	1	29.6	140	19	4.8	7月25日	
26	大須賀津排水路		2.4	1.3	36	1	29.5	140	18	29.6	7月25日	
27	乙堀川	2.6	2.0	36	0	14.6	140	32	43.6	7月30日		
28	雁通川	8.4	6.5	36	1	7.9	140	31	41.5	7月30日		
29	蔵川	17.1	14.7	36	2	19.7	140	31	55.4	7月30日		
30	大円寺川	5.8	4.7	36	3	15.9	140	32	5.5	7月30日		
31	山田川	20.3	15.8	36	4	14.8	140	30	26.5	7月30日		
32	武田川	19.9	15.4	36	5	57.6	140	30	6.9	7月30日		
33	長野江川	9.7	7.2	36	7	21.7	140	31	2.1	7月30日		
34	田中川	6.5	5.1	36	8	40.1	140	31	27.8	7月30日		
35	二重作第二排水路	3.3	2.8	36	7	46.3	140	32	1.4	7月30日		
36	二重作大排水路	8.6	7.2	36	7	23.0	140	32	8.3	7月30日		
37	境川	4.5	4.2	36	6	6.3	140	32	17.7	8月2日		
38	大洋川	3.6	3.4	36	5	30.6	140	32	32.4	8月2日		
39	白鳥川	6.8	6.2	36	4	31.3	140	33	12.7	8月2日		
40	上幡木志崎境川	4.5	4.4	36	3	47.7	140	33	49.5	8月2日		
41	沼里川	2.6	2.2	36	3	41.9	140	34	12.1	8月2日		
42	石川	2.6	2.4	36	2	53.5	140	34	19.5	8月2日		
43	居合排水路	6.8	4.1	36	1	43.6	140	35	14.7	8月2日		
44	中里川	6.8	4.9	36	0	17.7	140	36	0.9	8月2日		
45	水神川	7.7	6.7	35	59	14.0	140	36	44.0	11月4日		
46	流川	4.5	4.3	35	57	49.1	140	36	46.3	8月2日		
47	夜越川	16.3	6.0	35	58	10.6	140	31	6.1	11月4日		
48	横利根川	6.7										
49	前川	11.9										
50	与田浦川	30.2										
51	堀割川	18.9										

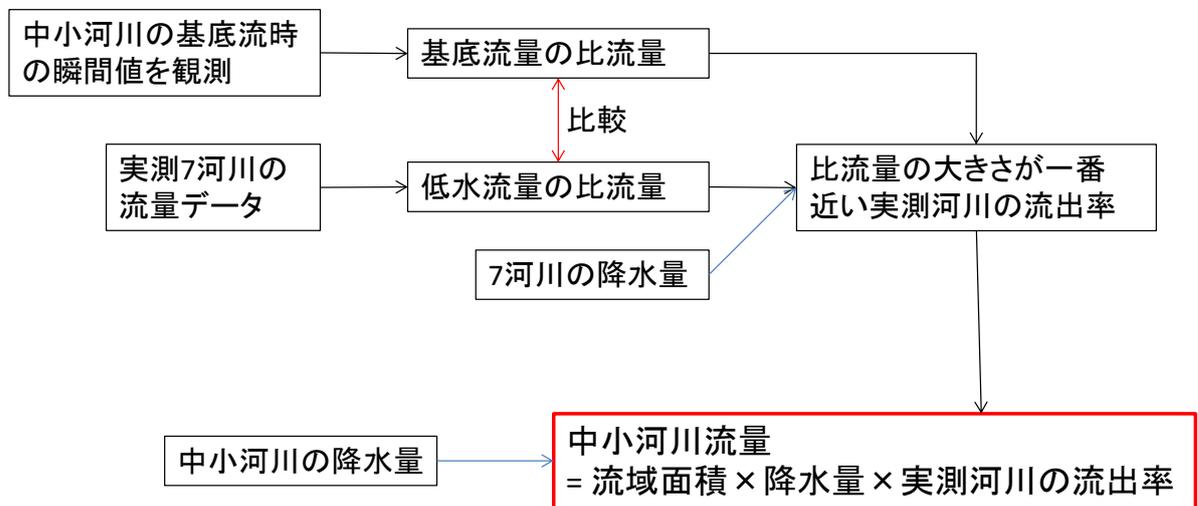


図 2.9 中小河川に当てはめる実測河川の適用手順

## 2.7 蒸発量

湖面蒸発量を算出する方法としては、まず直接的に湖面蒸発量を測定する、パン蒸発計を用いる方法と渦相関法がある。一方、間接的に蒸発量を求める方法には、バルク法、プロファイル法、ボーエン比法や、これらを組み合わせた手法がある（杉田ほか，2009）。

渦相関法では、水蒸気フラックス  $E$  [mm] は

$$E = \frac{\rho_a}{\rho_w} \overline{w'q'} \quad (2.6)$$

と表される。フラックスは超音波風速温度計の鉛直風速成分とオープンパスアナライザーによる湿度変動の測定によって求められ、 $w'$ ：鉛直風速の変動 [m/s]、 $q'$ ：比湿の変動 [kg/kg]、 $\rho_a$ ：大気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_w$ ：水密度 [kg/m<sup>3</sup>]である。また $\overline{\quad}$ は30分平均であることを示す。30分間のデータ数は18000である。渦相関法において水蒸気濃度、鉛直風速は極めて短周期で測定される必要がある（伊倉，2010）。

バルク式では、水蒸気フラックス  $E$  [mm]は

$$E = \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot C_e \cdot U \cdot (q_s - q) \quad (2.7)$$

と表される。ここで  $C_e$ ：バルク輸送係数、 $U$ ：水平風速 [m/s]、 $\rho_a$ ：大気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_w$ ：水密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $q$ ：比湿 [kg/kg]、 $q_s$ ：飽和比湿 [kg/kg] であり、

$$\rho_a = 1.293 \cdot \frac{273.15}{273.15 + T_a} \cdot \frac{AP}{1013.25} \cdot \left( 1 - 0.378 \cdot \frac{e}{AP} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho_w = 1.00 \cdot 10^3 + 3.97 \times 10^{-2} \cdot T_w(h) - 6.10 \times 10^{-3} \cdot \{T_w(h)\}^2 \quad (2.9)$$

$$q_s = \frac{0.622 \cdot e_s}{AP} \quad (2.10)$$

$$q = \frac{0.622 \cdot e}{AP} \quad (2.11)$$

と表される。ここで、 $AP$ ：気圧 [hPa]、 $e_s$ ：飽和水蒸気圧 [hPa]、 $e$ ：水蒸気圧 [hPa] であり、

$$e_s = 6.11 \cdot 10^{7.5 \cdot T_s / (237.3 + T_s)} \quad (2.12)$$

$$e = 6.11 \cdot 10^{7.5 \cdot T_a / (237.3 + T_a)} \cdot \frac{Rh}{100} \quad (2.13)$$

で表される．ここで， $T_s$ ：地表面温度 [°C]， $T_a$ ：気温 [°C]， $Rh$ ：相対湿度 [%]を示す（伊倉，2010）．

村岡（1981）の方法では，土屋ほか（1981）の結果である玉造と江戸崎に設置したパン蒸発計の測定量から蒸発量を求めていた．

霞ヶ浦湖心の蒸発に関しては，宮野（2008），宮野（2010）などによって最新の手法を用いて研究されている．本研究の方法では，伊倉（2010）による，蒸発量の湖面全域平均値は，湖心値より約 10%小さいという結果を使用した（図 2.10）．この割合を用いて，渦相関法とバルク法で求められた湖心値（魏，私信）より，10%小さい値を使用した．

## 2.8 地下水流量

湖沼の地下水の流入出量  $Q$  については，ダルシーの法則

$$Q = kID \quad (2.14)$$

で表せる．ここで， $k$ ：透水係数， $I$ ：動水勾配， $D$ ：帯水層の厚さである（内藤，2008）．

村岡（1981）の方法，本研究の方法 I では，村岡・細見（1981）の研究を基にして，美浦村モデル地区で推定された流入量を霞ヶ浦全域へ拡張している．これにより，地下水流入量は河川流入量の 1%程度という結果になった．

つぎに，本研究の方法 II では，内藤（2008）の結果である 2007 年の西浦への地下水流入量（図 2.11）の値を使用し，西浦へはこのまま適用した．北浦，霞ヶ浦全域へは，この値を西浦の湖岸長で除して湖岸線 1 km 当たりの流入量を算出し，その値に北浦，霞ヶ浦全体それぞれの湖岸長を乗じて，推定した．

またこの方法によって求めた結果は，霞ヶ浦においては河川流入量の 1.59%，西浦においては 1.05%，北浦においては 2.23%という値になった．2007 年以外の年の地下水流入量は，この割合を使用して求めた．

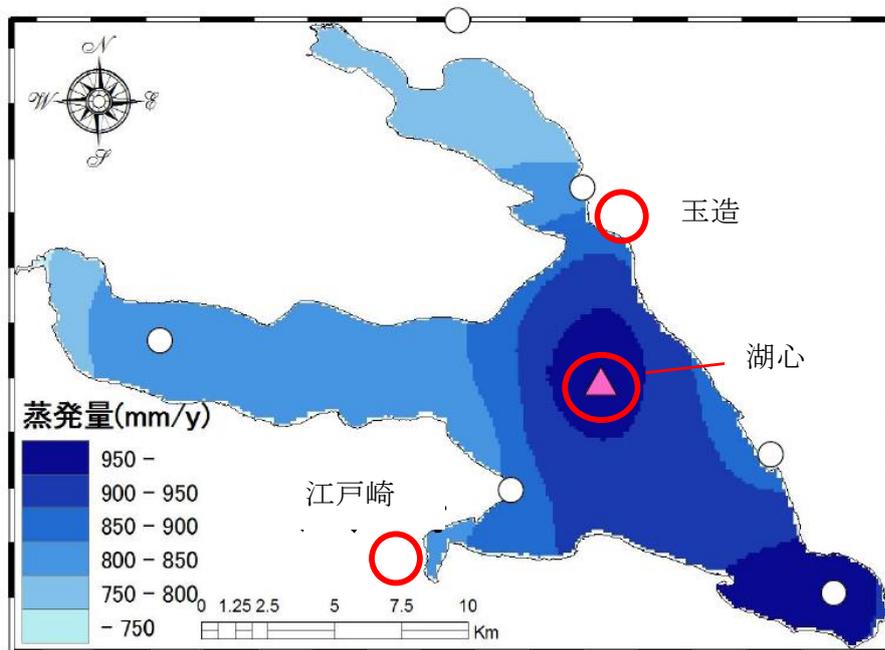


図 2.10 2008 年の西浦の蒸発量分布 (伊倉, 2010)

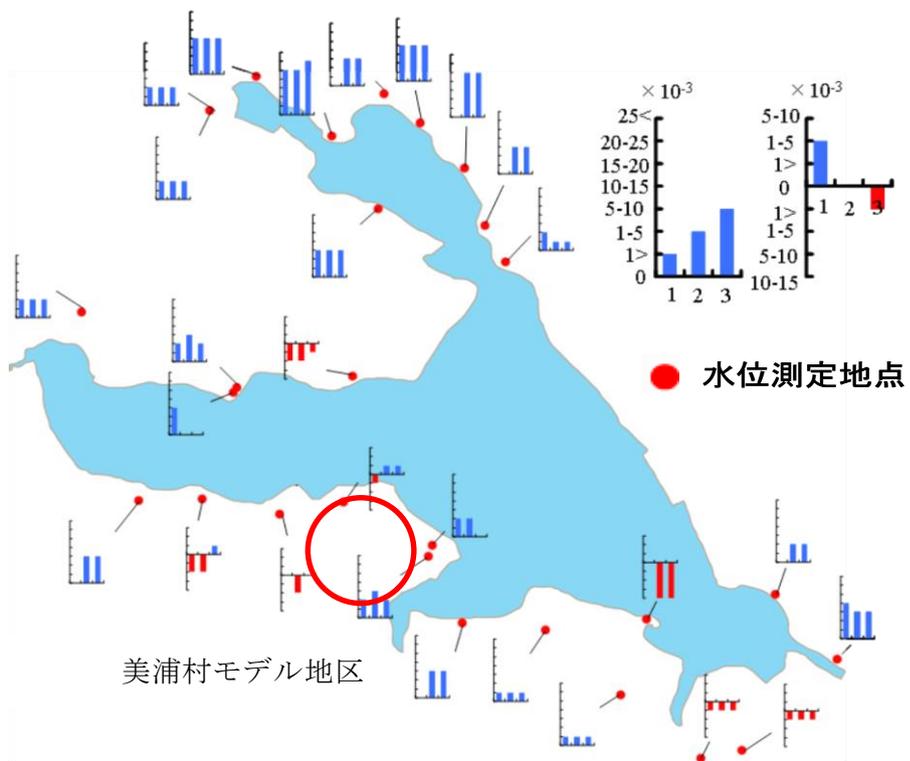


図 2.11 動水勾配の地域特性 (内藤, 2008)

※青：地下水から湖水へ、赤：湖水から地下水へ

## 2.9 取水・排水量

### 2.9.1 生活用水・工業用水

村岡（1981）の方法では、図 2.12 に示す赤丸の地点で取水を行っており、データを官公庁などから取得していた。

本研究の方法では、図 2.13 に示す地点（石岡台地以外）で取水を行っており、各地点の取水量データを茨城県企業局、水資源機構霞ヶ浦用水管理所から提供していただき、使用した。

### 2.9.2 農業用水

村岡（1981）では、取水・排水の原単位を水田の水利用類型別に設定し、定めた原単位に湖周辺の水田面積を乗じて、取水、排水量を求めていた。水田は以下のような分類である（茨城県農地部農地計画課，1978；村岡，1981）。

- A 型：雨のほか湖水取水の用水はあるが、排水はない地域
- B 型：用水は雨だけで湖への排水はある地域
- C 型：雨のほか取水・排水によって湖水の出入りがある地域
  - C1 型：一般の取排水方式によるもの
  - C2 型：干拓地の取排水方式によるもの
- D 型：取水・排水のほか循環利水が行われている地域

現在の湖周辺の水田面積は、北村ほか（2010）に記載されていた値である 19000 ha を利用した。この値は、茨城県の農林水産統計年報である関東農政局水戸統計・情報センター（2005）から得られたものである。また現在の原単位は、国土交通省水管理・国土保全局水資源部（2013）に記載されている 1970 年代と現在の農業用水の利用量にあまり変化がないことから、村岡（1981）と同じであると仮定して算出した。

また本研究の方法では、水資源機構霞ヶ浦用水管理所、石岡台地土地改良区から提供していただいた取水量データも合わせて使用した。

### 2.9.3 処理下水排水

村岡（1981）では図 2.12、本研究の方法では図 2.13 に示す青丸の地点で排水を行っている。流域下水道である霞ヶ浦浄化センター、潮来浄化センターにおける排水量データは、茨城県土木部から提供していただき、それを使用した。湖沿岸の各市町村の下水処理

場における排水量は、茨城県土木部下水道課（2011）に記載されている日平均流入水量の値から推定した。

## 2.10 貯留量変化

村岡（1981）の方法，本研究の方法Ⅰでは，湖心，木原，八木薪，白浜，潮来，賀の6地点の平均水位を霞ヶ浦の水位としている．本研究の方法Ⅱでは図 2.14 の全地点の水位データを使い，西浦，北浦，常陸利根川それぞれの水域ごとに平均をし，貯留量変化を求めた．また，すべての水域の貯留量変化を足し合わせたものを，霞ヶ浦全域の貯留量変化とした．水位データは，国土交通省河川局が提供している水文水質データベースから入手した．

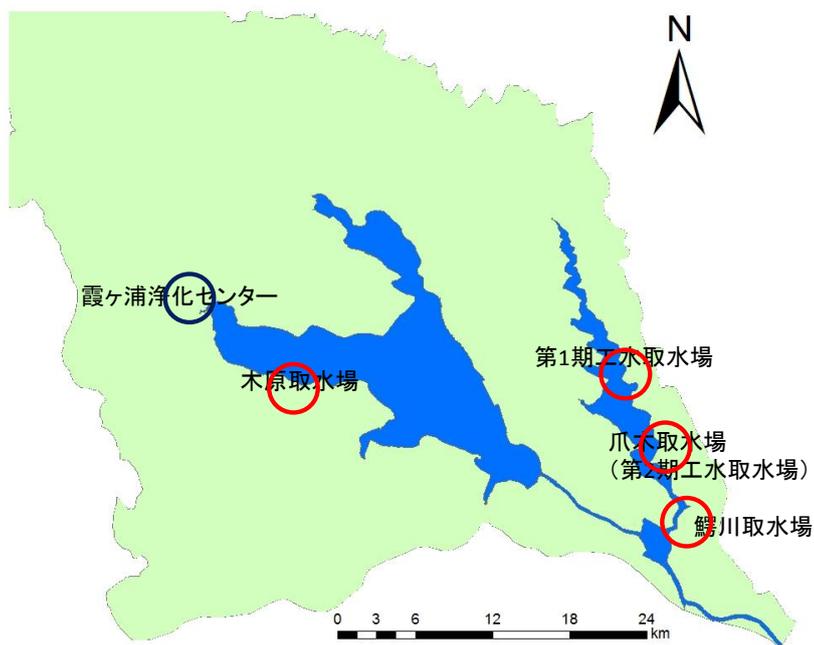


図 2.12 取水・排水地点 (1970年代)

赤丸：取水

青丸：排水

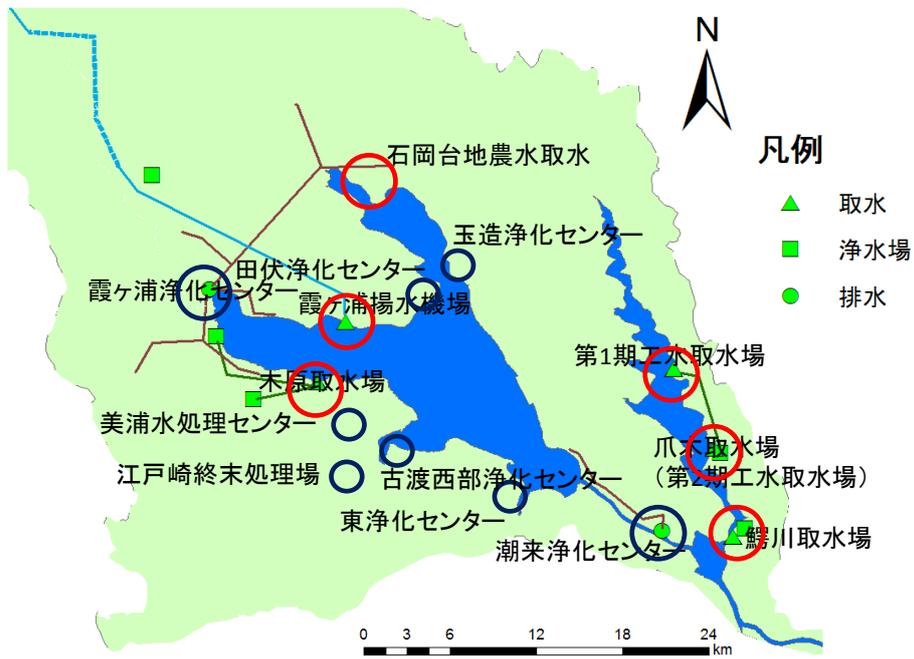


図 2.13 取水・排水地点（現在）

赤丸：取水

青丸：排水

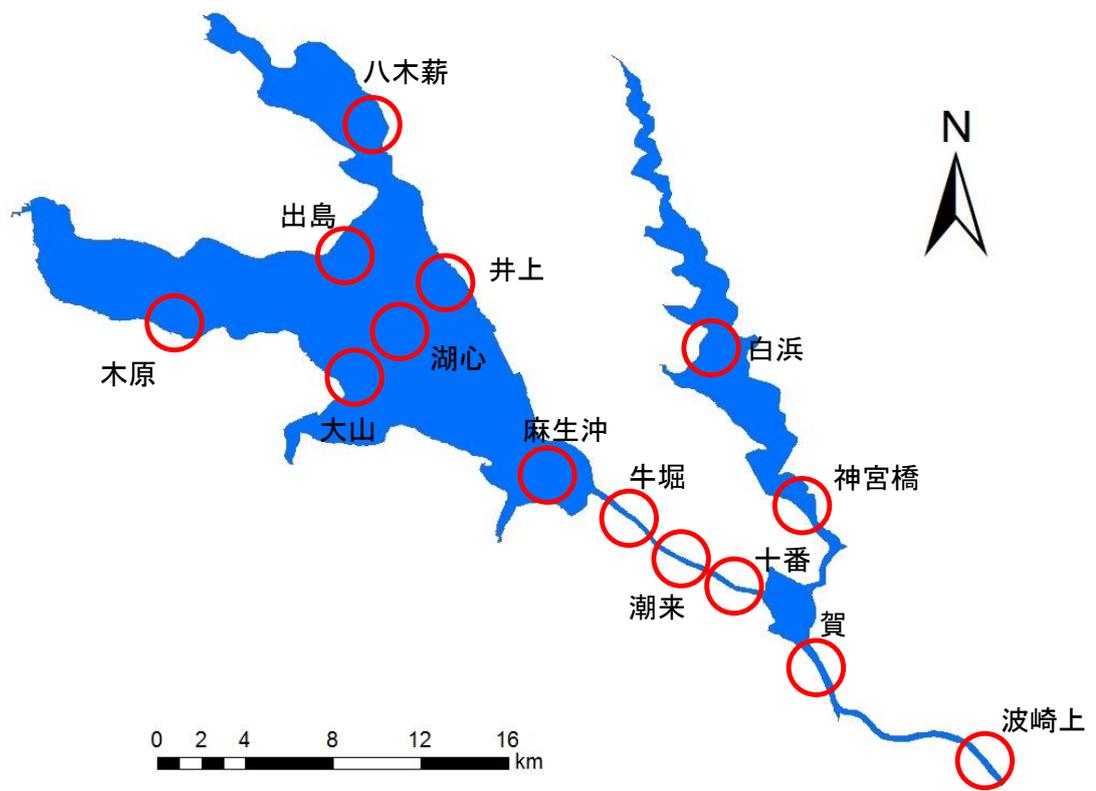


图 2.14 水位観測点

## 第3章 結果と考察

### 3.1 降水量分布

2007年～2011年の年降水量分布を図 3.1～図 3.5 に示す。分布を見ると、年によって多少の違いはあるが、西浦周辺ほど降水量が少なく、湖から離れるにつれて降水量が増加する傾向が存在した。特に常陸利根川の下流ほど降水量が多かった。

### 3.2 7河川流入量

現在実測されている流入7河川のハイドログラフを、図 3.6～図 3.12 に示す。このデータは、H-Q式を用いて水位から流量に換算されたデータである。この結果から、適用するH-Q式の変更時にも、流量はなめらかに接続されていることが確認できた。

### 3.3 河川流量観測の結果と適用

流量観測の結果を表 3.1 に示す。右から2番目の列の観測流量が、得られた結果である。これを基底流量の年間平均値として考え、1年分積算し、流域面積で除して求めた比流量（流出高）が1番右の列である。さらに、それぞれの河川に適用する実測7河川を表 3.2 に示す。これは、中小河川の流量観測結果と、2002年～2012年の11年間の7大河川の低水流量を比較して、最も値に近いものを当てはめている。

### 3.4 常陸利根川の流量

霞ヶ浦の各水域からの流出量を考える際には、常陸利根川の潮来、鱒川、日川の流量を使用する。一見、常陸川水門が開いている時のみ流れがあると考えられるが、年積算流量を見ると、潮来と鱒川の値を足すと日川の値を超えることから、水門閉鎖時に逆流が存在することが示唆された。

そこで水門の開閉があった2011年の1月12日～13日(図 3.13)、4月11日～12日(図 3.14)、8月25日～26日(図 3.15)の3期間を対象に、潮来、鱒川、日川の流量と、流量観測地点の上流と下流それぞれの水位の時系列変化を検証した。その結果、水門開放時は潮来、鱒川、日川ともに大きな順流が生じ、その際に、各水位観測所ではそれぞれ水位が低下することが分かった。水位の低下の仕方は、上流側では比較的ゆるやかに低下するのに対し、下流側では比較的急激に低下する。その間、水位差はプラス方向に大きくなる傾向がある。また、水門閉鎖後は潮来では6時間程度順流が続いたのちに逆流が生じ、その後、値は振動する。鱒川では1～2時間後に強い逆流が生じ、その後、値は振動する。

日川では直後に概ね流量ゼロとなり，その後，値は振動する．その際の水位の変動としては，各地点とも振動しながら，水門開放前と同じかやや低い水位に落ち着く．潮来，鱈川，日川どの地点でも水門閉鎖時には逆流が生じる場合があり，特に鱈川での逆流は多いことが分かった．

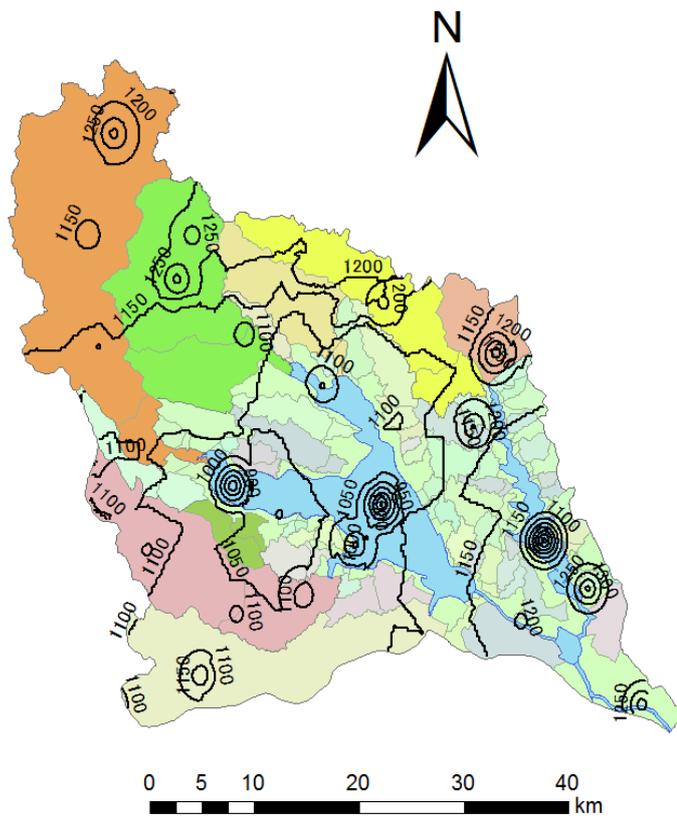


図 3.1 2007 年の年降水量分布

単位：mm

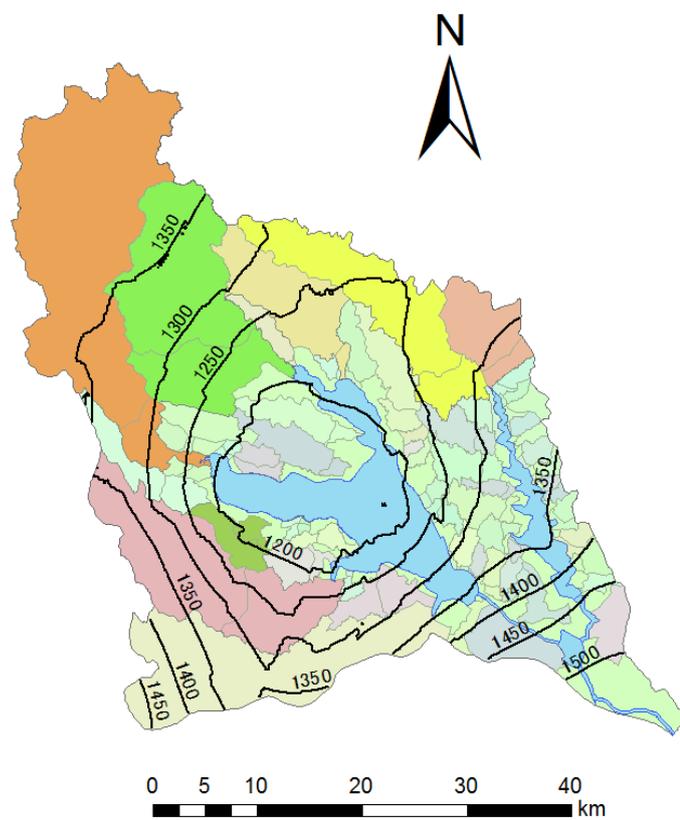


図 3.2 2008 年の年降水量分布

単位 : mm

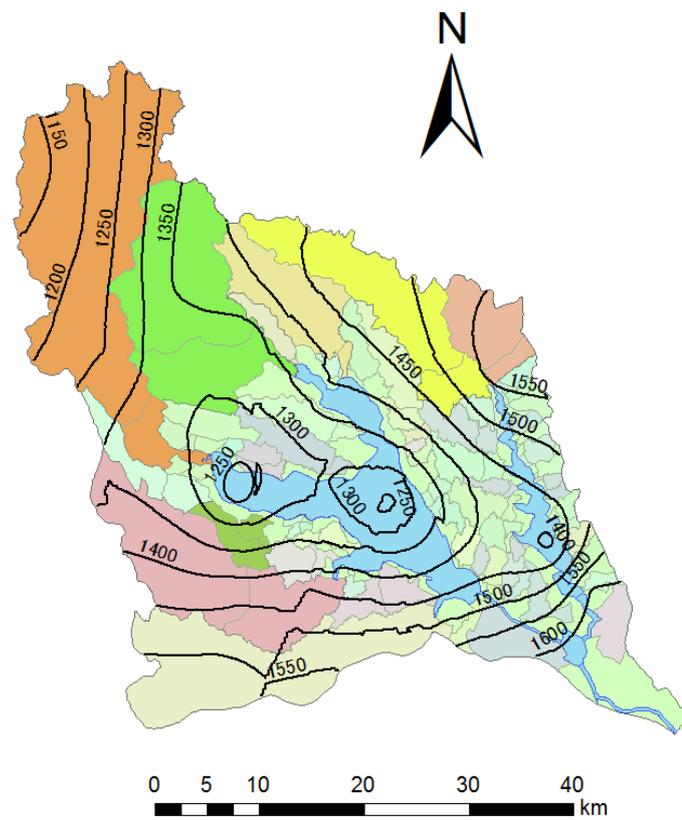


図 3.3 2009 年の年降水量分布

単位 : mm

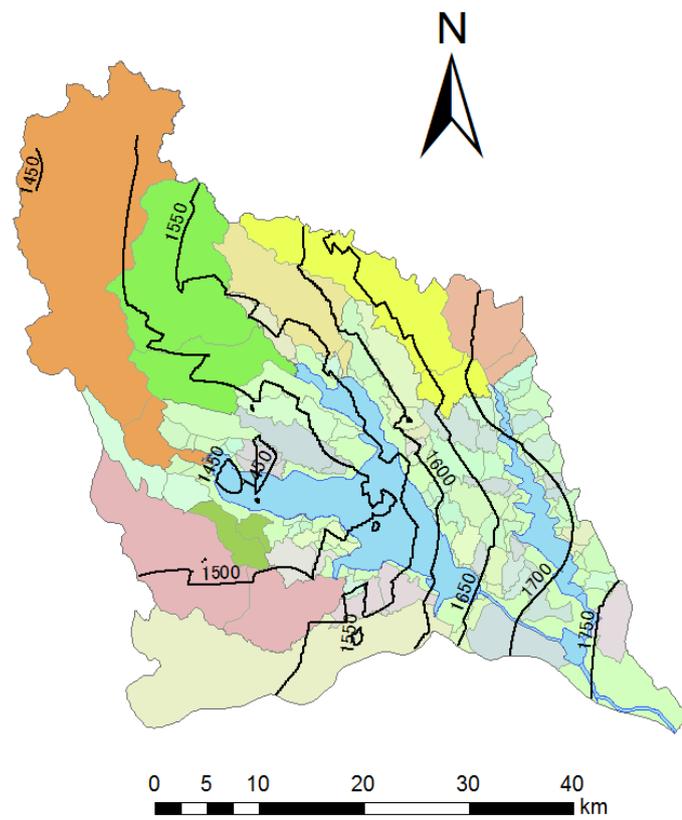


図 3.4 2010 年の年降水量分布

単位 : mm

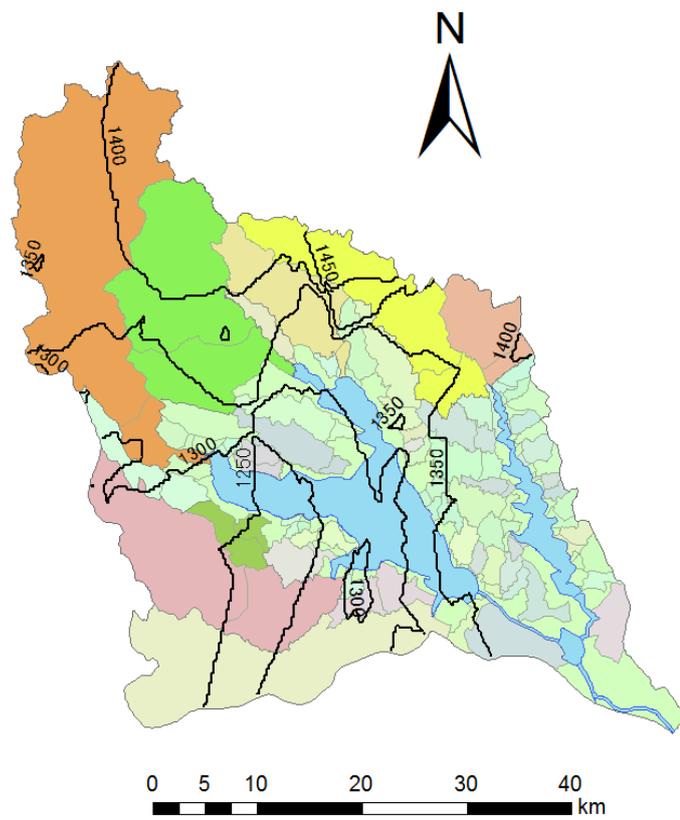


図 3.5 2011 年の年降水量分布

単位：mm

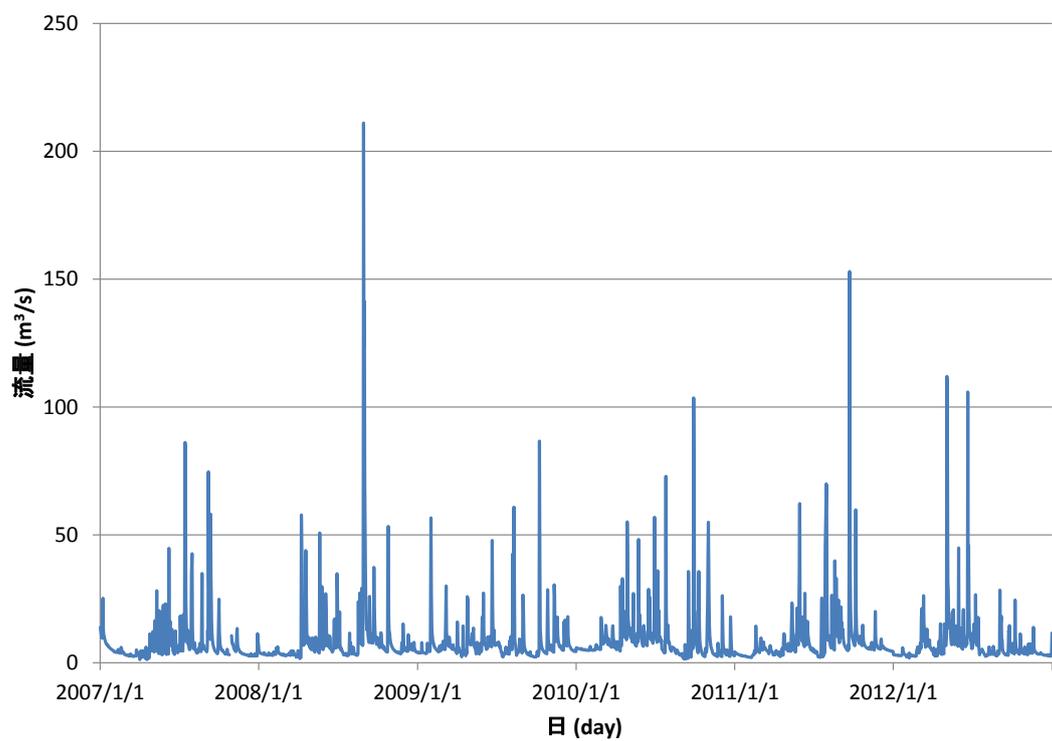


図 3.6 桜川の日平均流量(2007/1/1~2012/12/31)

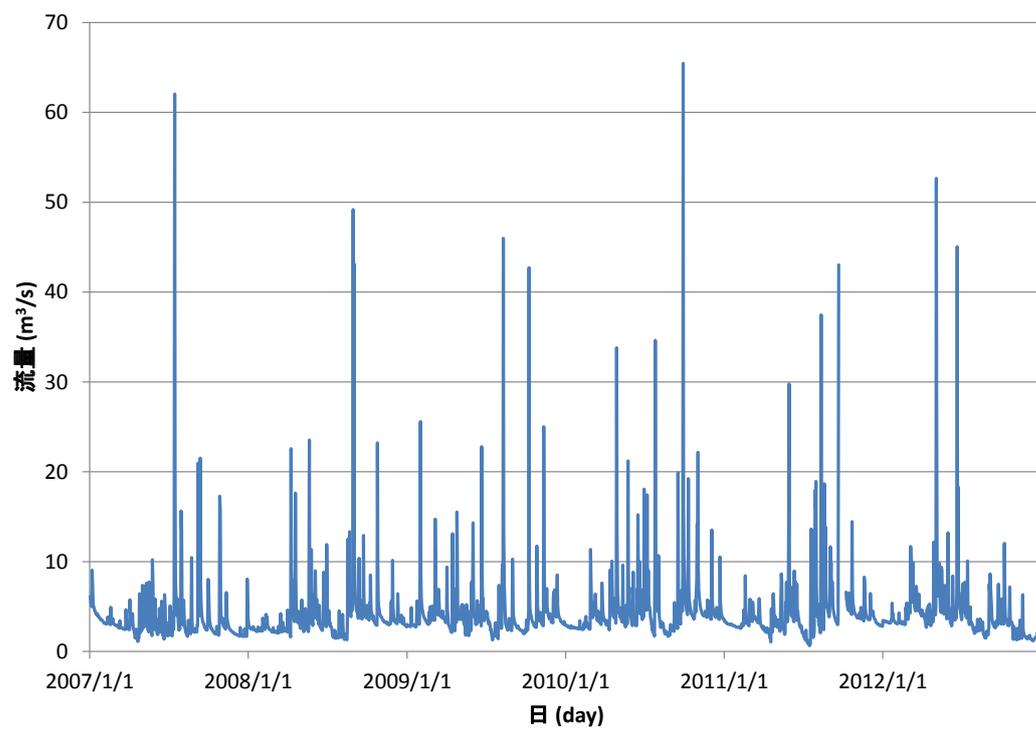


図 3.7 恋瀬川の日平均流量(2007/1/1~2012/12/31)

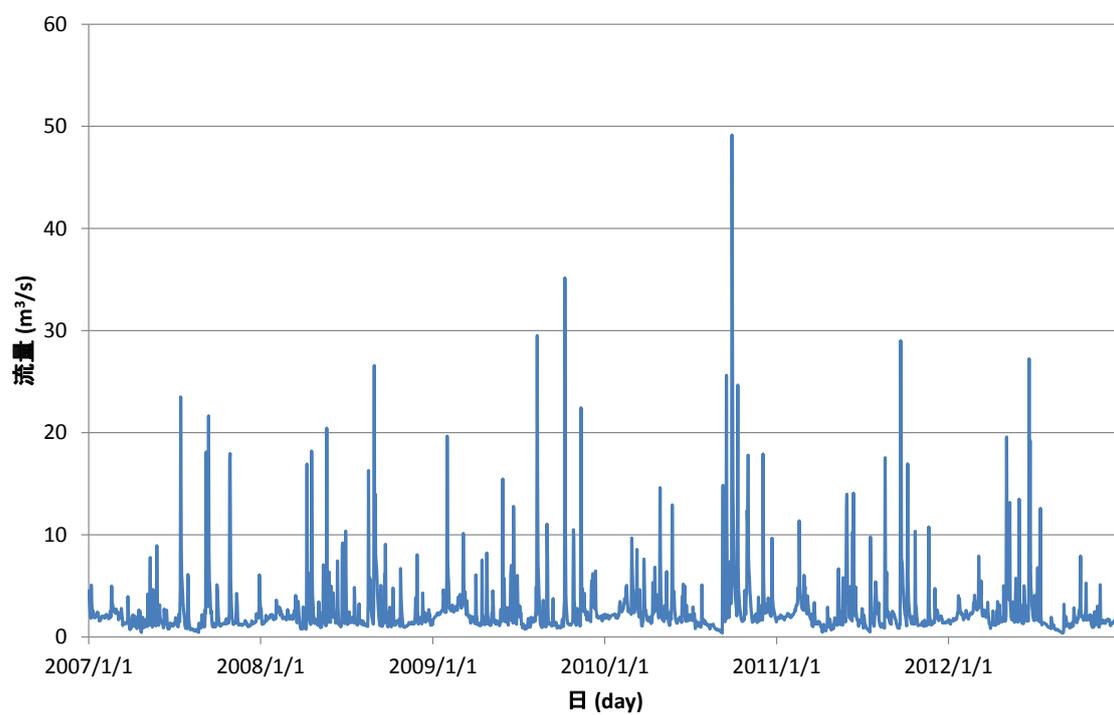


図 3.8 小野川の日平均流量(2007/1/1~2012/12/31)

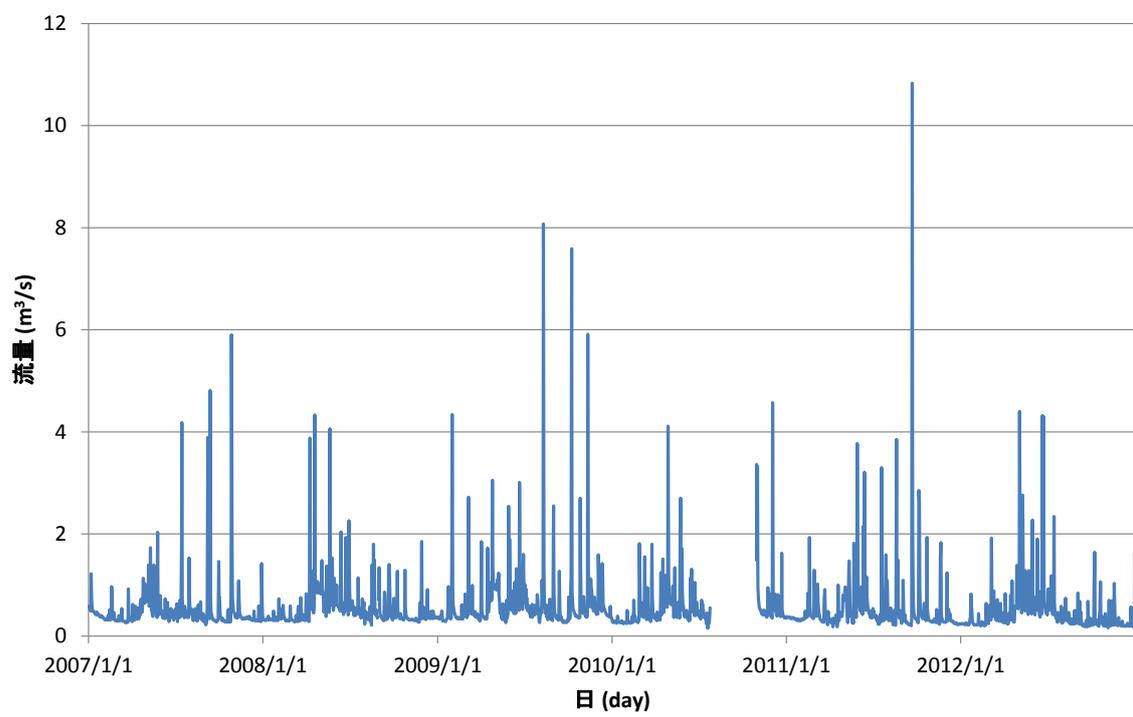


図 3.9 清明川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31)

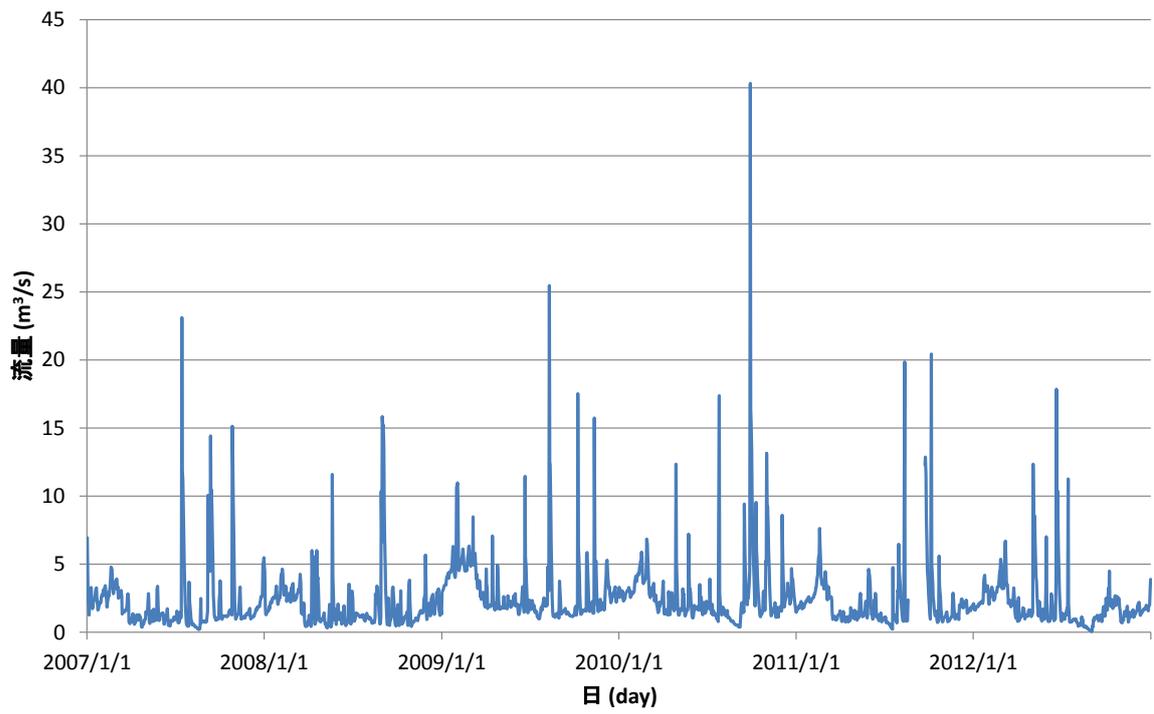


図 3.10 園部川の日平均流量(2007/1/1~2012/12/31)

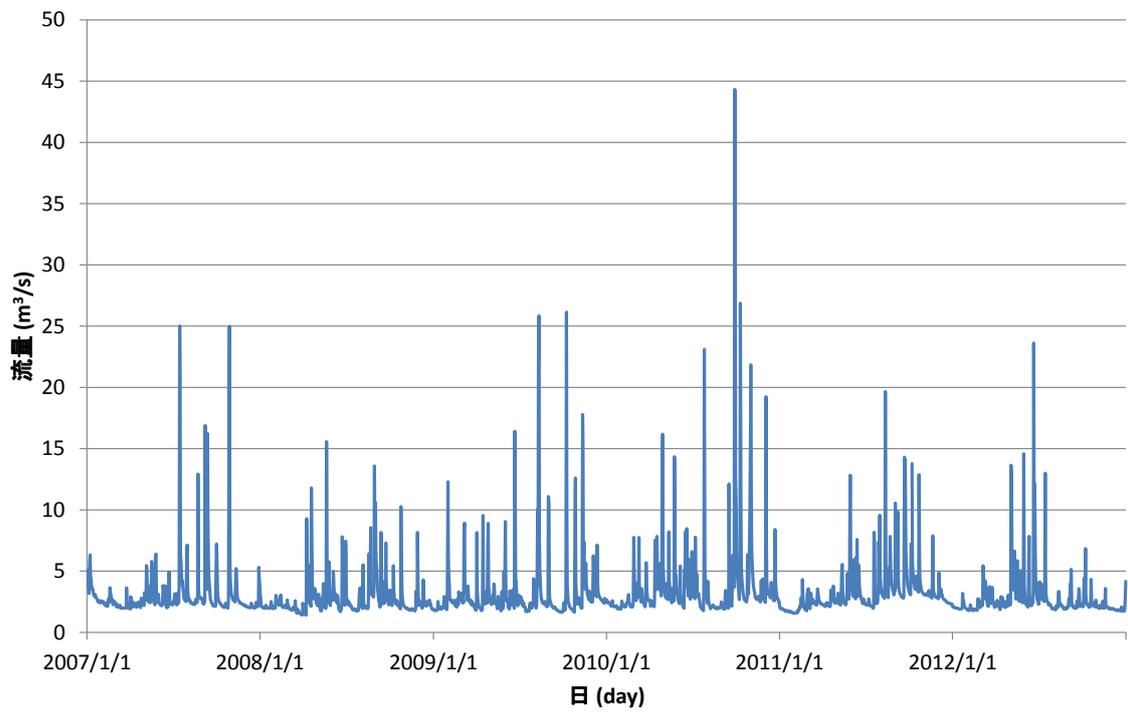


図 3.11 巴川の日平均流量(2007/1/1～2012/12/31)

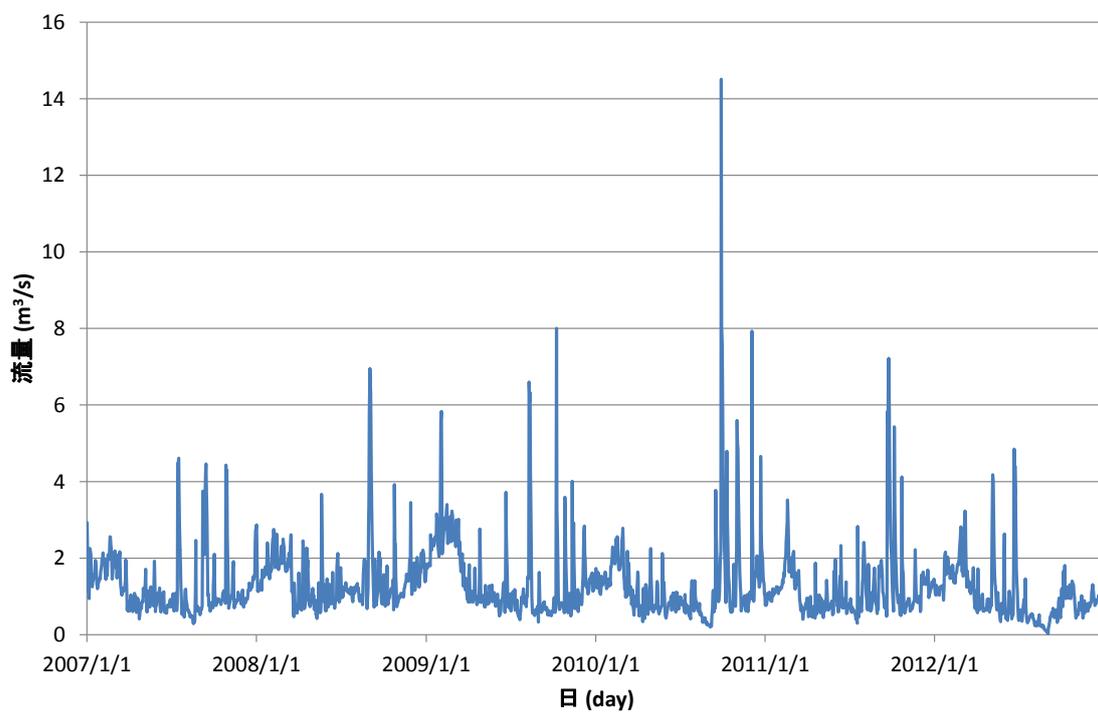


図 3.12 銚田川の日平均流量(2007/1/1~2012/12/31)

表 3.1 流量観測の結果

河川No.	河川名	流入先	観測地点より上流の		観測地点			観測流量 (m <sup>3</sup> /s)	比流量 (mm/y)				
			流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積 (km <sup>2</sup> )	緯度N 経度E								
					度	分	秒	度	分	秒			
1	花室川	西浦	33.9	22.3	36	3	36.1	140	10	17.5	0.205	289	
2	備前川		6.3	3.3	36	4	26.7	140	12	1.1	0.034	330	
3	新川		7.1	5.9	36	5	28.1	140	11	29.9	0.043	230	
4	境川		23.1	19.7	36	5	44.4	140	13	29.2	0.145	233	
5	田村川		2.9										
6	川尻川		11.5	6.7	36	4	31.9	140	16	39.7	0.064	300	
7	一ノ瀬川		28.0	25.0	36	4	26.5	140	20	46.9	0.315	398	
8	菱木川		25.1	21.8	36	6	30.8	140	21	7.2	0.207	299	
9	山王川		12.7	12.3	36	9	55.9	140	18	24.2	0.197	505	
10	中台用排水路		3.4	3.0	36	9	20.9	140	21	10.6	0.148	1550	
11	鎌田川		15.8	14.5	36	9	23.5	140	21	58.8	0.247	537	
12	梶無川		33.9	26.9	36	7	22.8	140	24	54.3	0.419	492	
13	萩根川		2.9	2.9	36	5	43.1	140	25	8.4	0.071	762	
14	手賀川		2.1	2.1	36	5	23.6	140	25	21.3	0.026	393	
15	新田川		3.3	3.3	36	4	14.1	140	25	27.0	0.025	244	
16	船子川		4.4	3.3	36	2	40.4	140	27	7.7	0.040	385	
17	大川		6.8	4.9	36	1	47.2	140	27	37.4	0.044	282	
18	城下川		7.9	7.8	35	59	11.3	140	28	54.6	0.134	545	
19	麻生前川		3.8	3.6	35	58	40.5	140	29	59.0	0.119	1052	
20	新利根川		185.1										
21	(野田奈川)		26.7	14.6	35	57	16.3	140	24	1.7	0.304	655	
22	(柏木排水路)		3.8	3.5	35	58	45.6	140	21	54.7	0.112	1018	
23	高橋川		17.8	14.1	35	59	54.7	140	19	40.2	0.359	801	
24	余郷入承水路		9.0	6.0	36	0	31.7	140	19	53.8	0.111	584	
25	大塚川		1.4	1.0	36	1	29.6	140	19	4.8	0.017	547	
26	大須賀津排水路		2.4	1.3	36	1	29.5	140	18	29.6	0.023	561	
27	乙堀川	2.6	2.0	36	0	14.6	140	32	43.6	0.018	288		
28	雁通川	8.4	6.5	36	1	7.9	140	31	41.5	0.188	910		
29	蔵川	17.1	14.7	36	2	19.7	140	31	55.4	0.300	643		
30	大円寺川	5.8	4.7	36	3	15.9	140	32	5.5	0.046	311		
31	山田川	20.3	15.8	36	4	14.8	140	30	26.5	0.147	293		
32	武田川	19.9	15.4	36	5	57.6	140	30	6.9	0.281	575		
33	長野江川	9.7	7.2	36	7	21.7	140	31	2.1	0.094	411		
34	田中川	6.5	5.1	36	8	40.1	140	31	27.8	0.113	700		
35	二重作第二排水路	3.3	2.8	36	7	46.3	140	32	1.4	0.011	127		
36	二重作大排水路	8.6	7.2	36	7	23.0	140	32	8.3	0.224	976		
37	境川	4.5	4.2	36	6	6.3	140	32	17.7	0.126	947		
38	大洋川	3.6	3.4	36	5	30.6	140	32	32.4	0.067	614		
39	白鳥川	6.8	6.2	36	4	31.3	140	33	12.7	0.015	74		
40	上幡木志崎境川	4.5	4.4	36	3	47.7	140	33	49.5	0.040	290		
41	沼里川	2.6	2.2	36	3	41.9	140	34	12.1	0.011	152		
42	石川	2.6	2.4	36	2	53.5	140	34	19.5	0.026	340		
43	居合排水路	6.8	4.1	36	1	43.6	140	35	14.7	0.120	913		
44	中里川	6.8	4.9	36	0	17.7	140	36	0.9	0.043	276		
45	水神川	7.7	6.7	35	59	14.0	140	36	44.0	0.080	380		
46	流川	4.5	4.3	35	57	49.1	140	36	46.3	0.021	156		
47	夜越川	16.3	6.0	35	58	10.6	140	31	6.1	0.100	530		
48	横利根川	6.7											
49	前川	11.9											
50	与田浦川	30.2											
51	堀割川	18.9											

表 3.2 中小河川に適用する実測 7 河川

河川No.	河川名	流入先	流域面積 (km <sup>2</sup> )	基底流比流量	適用河川	
				2012年 (mm/y)	低水流量 (mm/y)	適用7河川
1	花室川	西浦	33.9	289	343	小野川
2	備前川		6.3	331	343	小野川
3	新川		7.1	230	343	小野川
4	境川		23.1	234	343	小野川
5	田村川		2.9			
6	川尻川		11.5	301	343	小野川
7	一ノ瀬川		28.0	399	366	桜川
8	菱木川		25.1	300	343	小野川
9	山王川		12.7	506	519	銚田川
10	中台用排水路		3.4	1554	616	巴川
11	鎌田川		15.8	538	523	園部川
12	梶無川		33.9	493	519	銚田川
13	萩根川		2.9	764	616	巴川
14	手賀川		2.1	394	366	桜川
15	新田川		3.3	245	343	小野川
16	船子川		4.4	386	366	桜川
17	大川		6.8	283	343	小野川
18	城下川		7.9	546	558	恋瀬川
19	麻生前川		3.8	1055	616	巴川
20	新利根川		185.1			
21	(野田奈川)		26.7	657	616	巴川
22	(柏木排水路)		3.8	1021	616	巴川
23	高橋川		17.8	803	616	巴川
24	余郷入承水路		9.0	585	611	清明川
25	大塚川		1.4	548	558	恋瀬川
26	大須賀津排水路		2.4	562	558	恋瀬川
27	乙堀川	北浦	2.6	289	343	小野川
28	雁通川		8.4	912	616	巴川
29	蔵川		17.1	644	616	巴川
30	大円寺川		5.8	312	343	小野川
31	山田川		20.3	294	343	小野川
32	武田川		19.9	576	558	恋瀬川
33	長野江川		9.7	412	366	桜川
34	田中川		6.5	701	616	巴川
35	二重作第二排水路		3.3	128	343	小野川
36	二重作大排水路		8.6	978	616	巴川
37	境川		4.5	950	616	巴川
38	大洋川		3.6	615	616	巴川
39	白鳥川		6.8	74	343	小野川
40	上幡木志崎境川		4.5	291	343	小野川
41	沼里川		2.6	152	343	小野川
42	石川		2.6	341	343	小野川
43	居合排水路		6.8	916	616	巴川
44	中里川		6.8	276	343	小野川
45	水神川		7.7	381	366	桜川
46	流川		4.5	157	343	小野川
47	夜越川	常陸利根川	16.3	532	523	園部川
48	横利根川		6.7			
49	前川		11.9			
50	与田浦川		30.2			
51	堀割川		18.9			

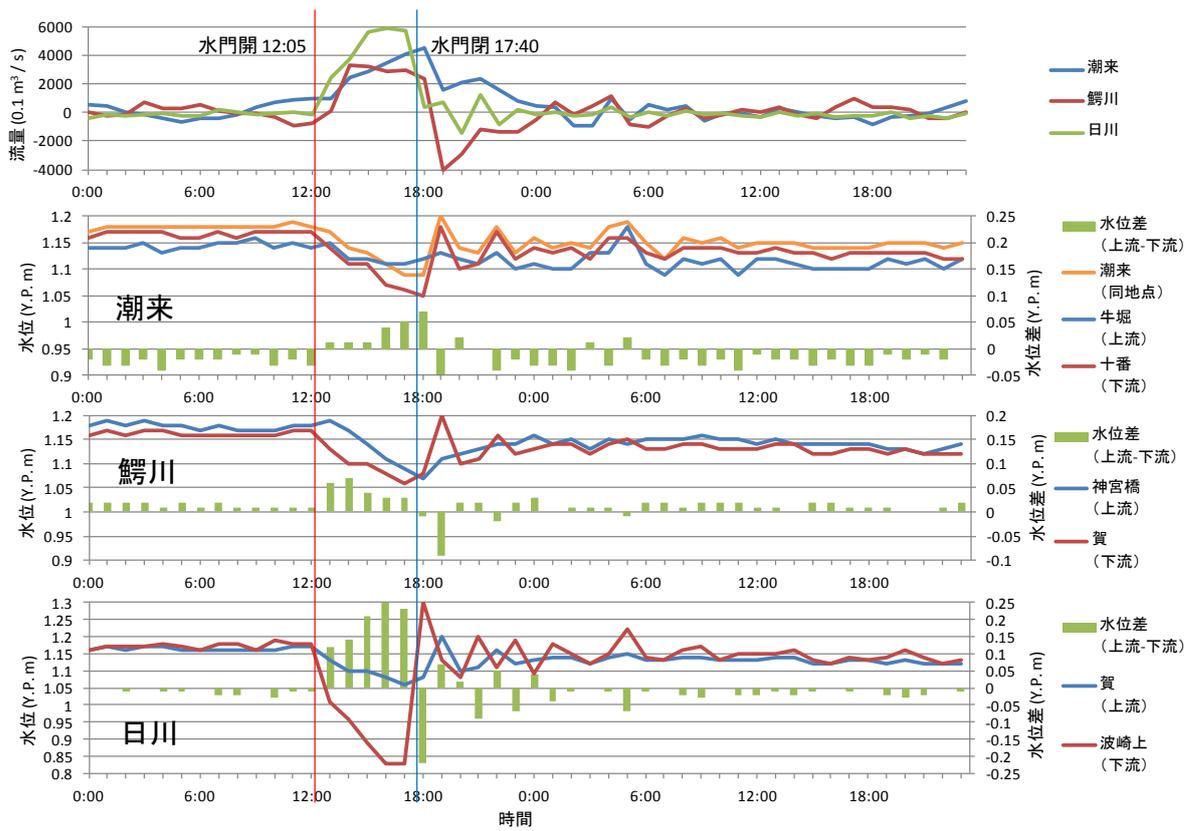


図 3.13 水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係  
(2011年1月12日~13日)

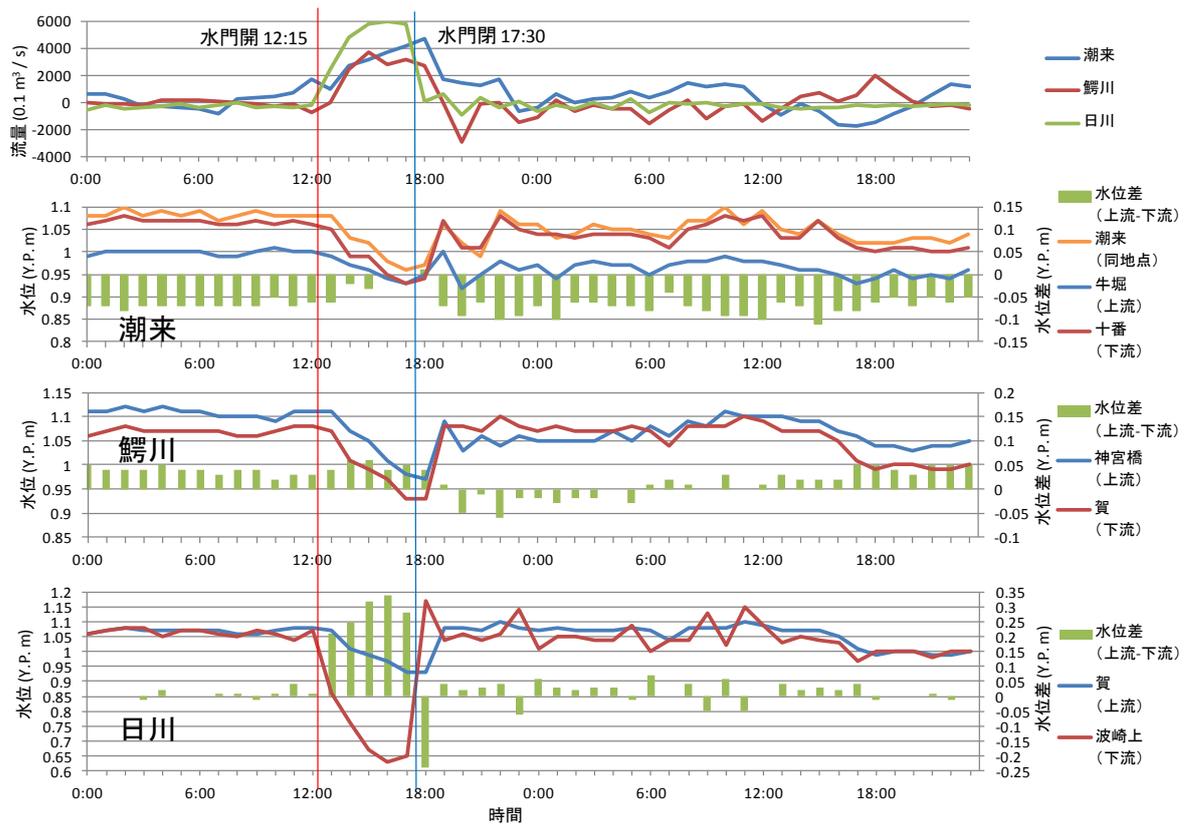


図 3.14 水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係  
(2011年4月11日～12日)

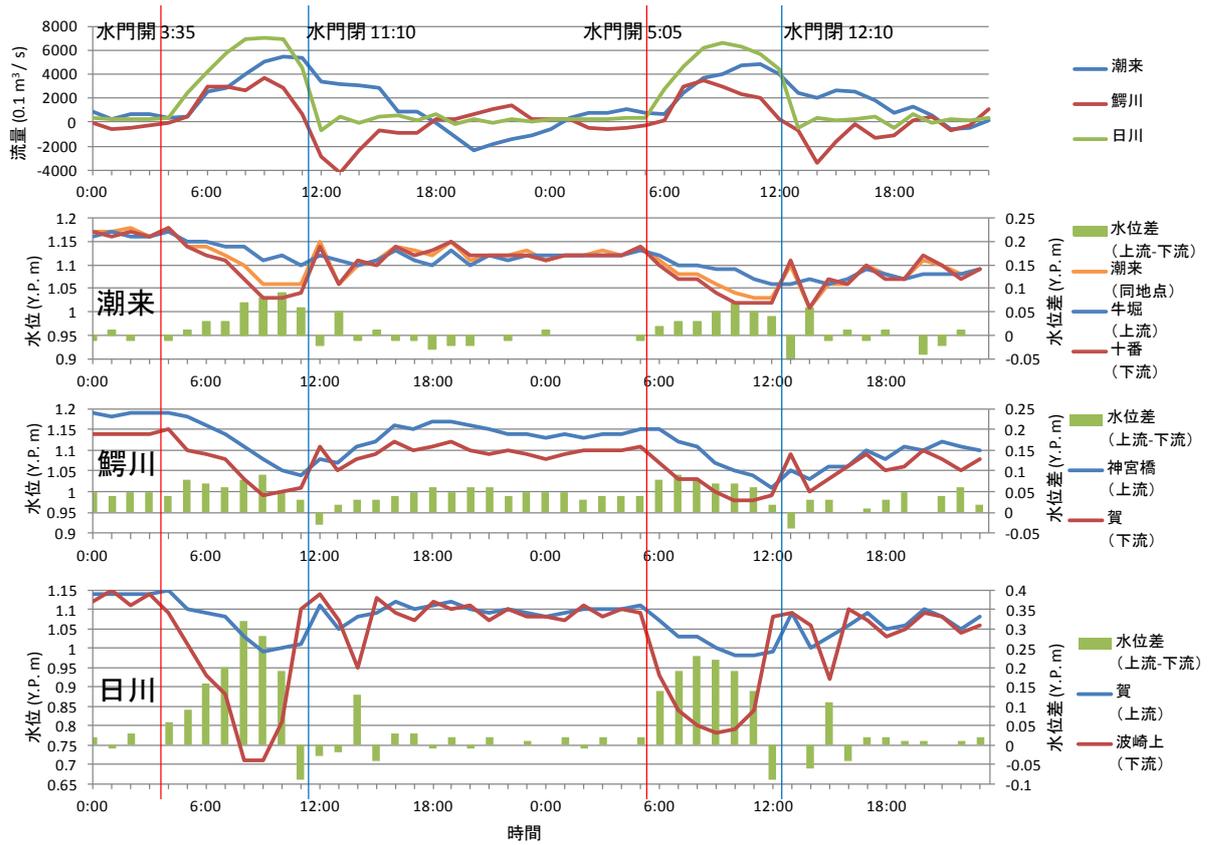


図 3.15 水門の開閉前後における常陸利根川の流量と水位の関係  
(2011年8月25日~26日)

### 3.5 年単位水収支のまとめ

2008年から2010年の水収支について、霞ヶ浦全域（表 3.3）、西浦（表 3.4）、北浦（表 3.5）について、それぞれ方法Ⅱ（表 2.1 参照）で算出した。模式図を図 3.16 に示す。図の左半分が流入、右半分が流出を表している。それぞれの四角の中の上段左側が西浦、上段右側が北浦、下段が霞ヶ浦全域の値である。2008年～2010年平均値を見ると、霞ヶ浦全域と北浦で水収支を考える場合、誤差項はプラスとなり、西浦で水収支を考える場合、誤差項はマイナスとなった。また年ごとに見ると、霞ヶ浦全域と西浦については、2010年の河川流出量が、多い傾向があった。

表 3.3 霞ヶ浦全域の水収支 (2008 年～2010 年)

		2008	2009	2010	2008-2010 平均
流入	降水	273.79	299.90	343.58	305.76
	河川	1583.32	1648.77	1748.97	1660.35
	処理下水	33.79	33.48	35.14	34.14
	農業用水	175.73	175.73	175.73	175.73
	地下水	25.17	26.22	27.81	26.40
	合計	2091.81	2184.10	2331.23	2202.38
流出	蒸発	142.76	154.64	160.97	152.79
	河川	1098.76	1150.83	1681.91	1310.50
	生活用水	87.46	86.45	88.43	87.45
	工業用水	210.54	199.26	205.43	205.08
	農業用水	305.70	307.16	304.29	305.71
	合計	1845.22	1898.33	2441.04	2061.53
	貯留量変化	-34.17	-2.49	-22.12	-19.60
	誤差項	280.76	288.26	-87.69	160.44

Unit:  $10^6$  (m<sup>3</sup>/year)

表 3.4 西浦の水収支 (2008 年～2010 年)

		2008	2009	2010	2008-2010 平均
流入	降水	207.21	228.06	262.04	232.43
	河川	1191.99	1221.51	1272.70	1228.74
	処理下水	31.29	30.93	32.50	31.57
	農業用水	108.96	108.96	108.96	108.96
	地下水	12.52	12.83	13.36	12.90
	合計	1551.96	1602.29	1689.56	1614.60
流出	蒸発	111.61	120.90	125.85	119.45
	河川	1394.42	1422.92	1778.03	1531.79
	生活用水	63.85	64.50	66.01	64.79
	工業用水	29.92	29.58	29.83	29.78
	農業用水	215.62	217.07	214.20	215.63
	合計	1815.41	1854.97	2213.93	1961.44
	貯留量変化	-28.26	-1.97	-18.67	-16.30
	誤差項	-235.20	-250.72	-505.70	-330.54

Unit:  $10^6$  (m<sup>3</sup>/year)

表 3.5 北浦の水収支 (2008 年～2010 年)

		2008	2009	2010	2008-2010 平均
流入	降水	48.98	52.80	60.93	54.23
	河川	305.39	336.12	390.57	344.02
	処理下水	0.00	0.00	0.00	0.00
	農業用水	22.03	22.03	22.03	22.03
	地下水	6.81	7.50	8.71	7.67
	合計	383.20	418.44	482.23	427.96
流出	蒸発	23.36	25.30	26.34	25.00
	河川	72.80	126.62	119.59	106.34
	生活用水	23.61	21.95	22.43	22.66
	工業用水	180.63	169.68	175.60	175.30
	農業用水	30.79	30.79	30.79	30.79
	合計	331.19	374.34	374.75	360.09
	貯留量変化	-4.50	-0.36	-2.70	-2.52
	誤差項	56.51	44.46	110.18	70.38

Unit:  $10^6$  (m<sup>3</sup>/year)

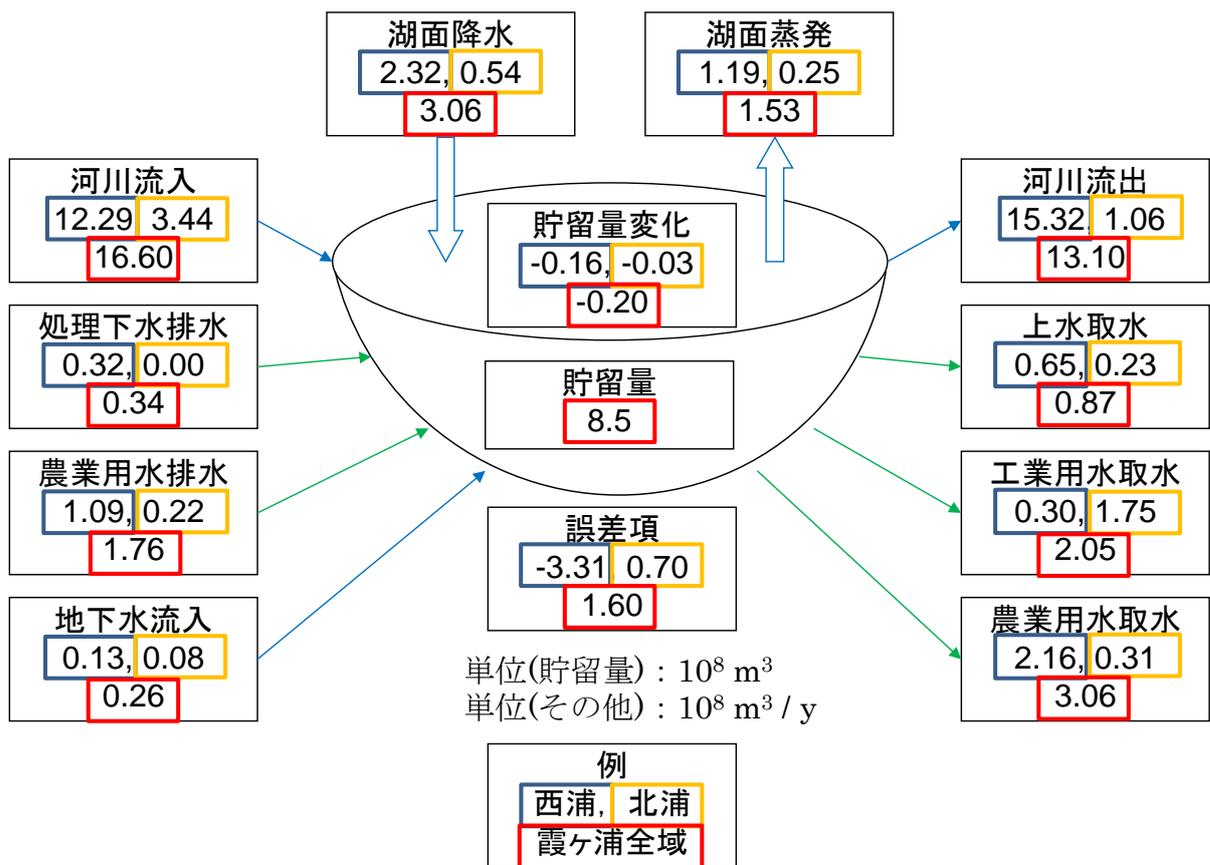


図 3.16 水収支 (2008 年～2010 年平均)

### 3.6 水域ごとの各水収支要素が占める割合

2008年～2010年の年単位水収支を方法Ⅱ（表 2.1 参照）で算出した結果、霞ヶ浦全域において総流入量は約 21～23 億 m<sup>3</sup>、総流出量は約 18～24 億 m<sup>3</sup>であった。

流入について、各水域ごとに各水収支要素が占める割合の 2008年～2010年平均値を図 3.17 に示す。全域においては降水が 13～15%、河川流入（残流域からの流入も含む）が 75～76%、処理下水排水が 2%、農業用水排水が 8%、地下水流入が 1%であった。どの水域も河川流入が占める割合が大きい。

流出について、各水域ごとに各水収支要素が占める割合の 2008年～2010年平均値を図 3.18 に示す。全域においては蒸発が 7～8%、河川流出が 60～69%、生活用水取水が 4～5%、工業用水取水が 8～11%、農業用水取水が 12～17%であった。霞ヶ浦全域と西浦に着目すると河川流出が占める割合が大きい、北浦に着目すると工業用水取水の割合が大きい。

### 3.7 各水収支要素の 1970 年代と現在の差異

霞ヶ浦全域について 1970 年代と方法Ⅱ（表 2.1 参照）で算出した現在の水収支を比較したものを図 3.19 に示す。それぞれの四角の中の上段が 1972 年～1979 年平均値、下段が 2008 年～2010 年平均値である。まず、人為的な取水・排水について比較すると、上水取水が約 5 倍、工業用水取水が約 2 倍、下水排水が約 7 倍になっている。その他の水収支要素に目を向けると、河川流入量が 1.3 倍となっている。それにつられて、地下水流入の値も上昇している。

各水収支要素の 1970 年代と現在の差を明らかにするために、それぞれの水収支要素は 1970 年代と現在で統計的に有意な差があるのかを確認した。それぞれの水収支要素ごとに、村岡（1981）の結果と方法Ⅱ（表 2.1 参照）で算出した年間の値を、1972 年～1979 年のグループと 2008 年～2010 年のグループに分け、それぞれのグループごとに各要素の平均値と標準偏差を算出した。そして有意水準 5%で t 検定（両側検定）を行なった。その結果、統計的に有意な差があった項目は流入では河川流入、地下水流入、処理下水排水、流出では河川流出、生活用水取水、工業用水取水、農業用水取水であった（図 3.19）。これらの要素は、1970 年代と比較して現在は増加しているといえる。

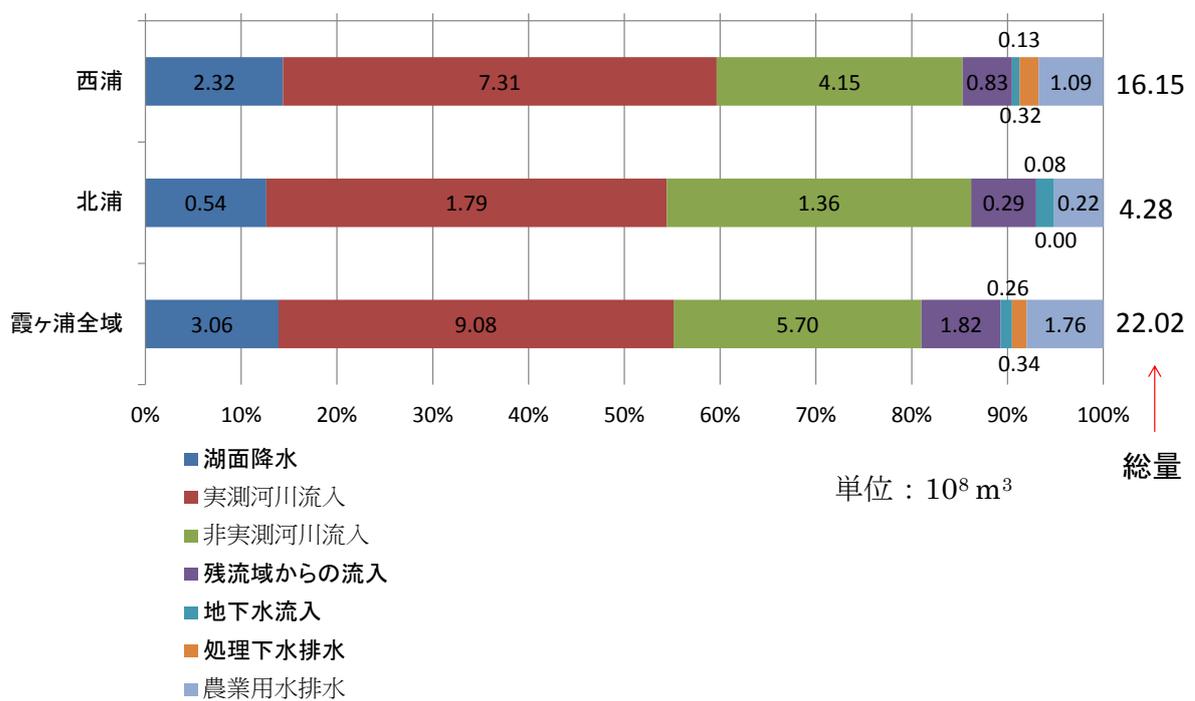


図 3.17 水域ごとの各水収支要素が占める割合（流入，2008年～2010年平均）

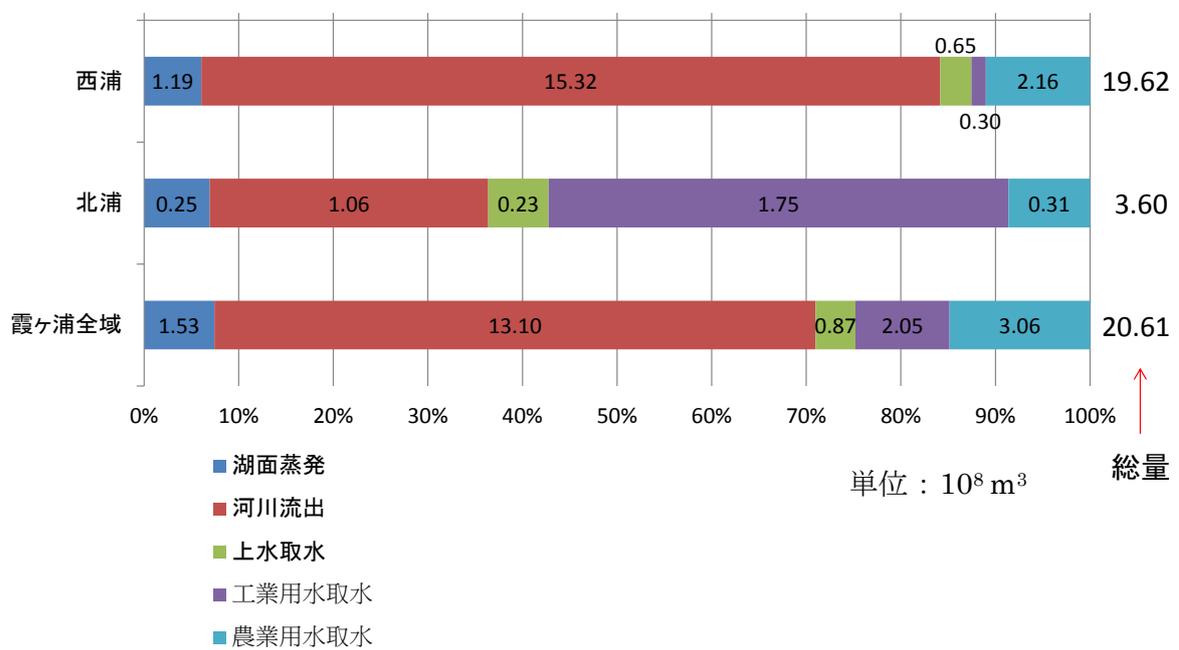


図 3.18 水域ごとの各水収支要素が占める割合（流出，2008年～2010年平均）

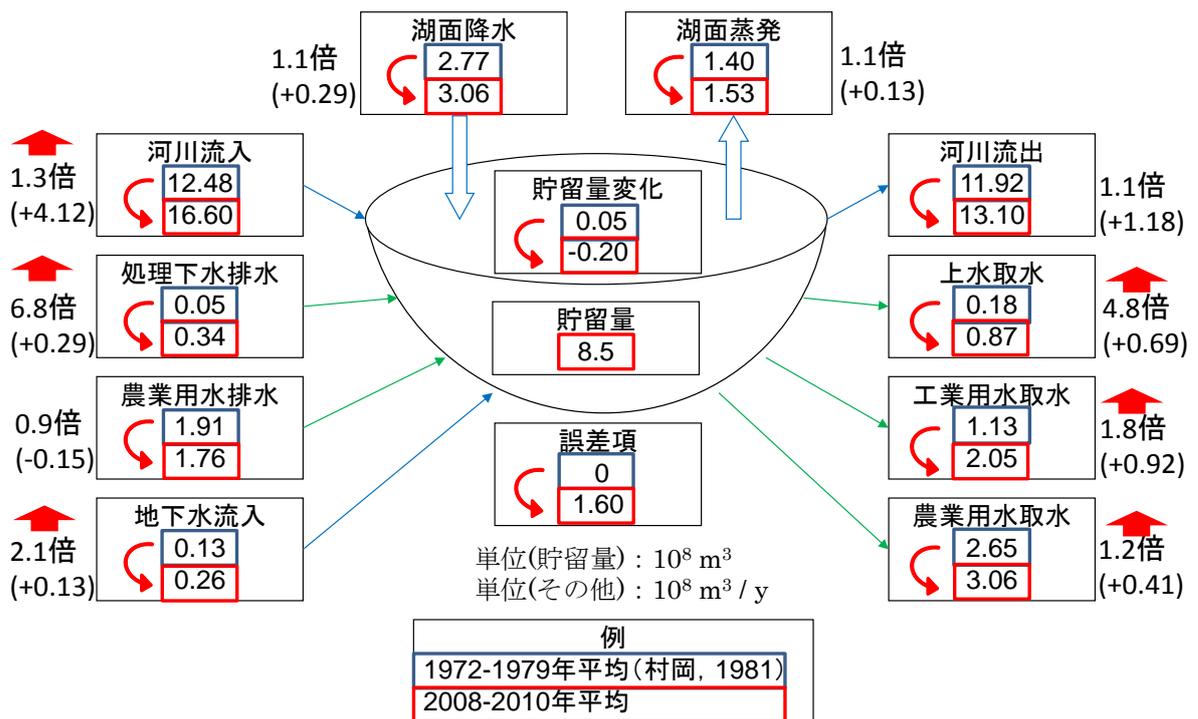


図 3.19 1970年代と現在の水収支の比較（霞ヶ浦全域）

※赤い上向き矢印が付いている項目は、有意水準 5%で t 検定を行なった結果、有意差があった項目。

### 3.8 1970年代と現在の水収支要素が占める割合の比較（霞ヶ浦全域）

各水収支要素が占める割合を、霞ヶ浦全域について1970年代と現在について比較したものを図3.20に示す。流入については河川の割合が増加していて、流出については河川の割合が減少している様子が分かる。その分、上水取水と工業用水取水の割合が上がっている。この結果から霞ヶ浦の水ガメ化が進み、常陸川水門を閉めて流出量を減らし、その分の水を取水に回すようになっている様子が分かる。

また、貯留量を1970年代については8.0億 $\text{m}^3$ 、現在については8.5億 $\text{m}^3$ として平均滞留時間を算出したところ、1970年代については約170日であり、現在については、流入量を基に算出したら約140日、流出量を基に算出したら約150日となった。平均滞留時間が短くなったことが霞ヶ浦の水質に与える影響を評価することは、今後重要な課題と考えられる。

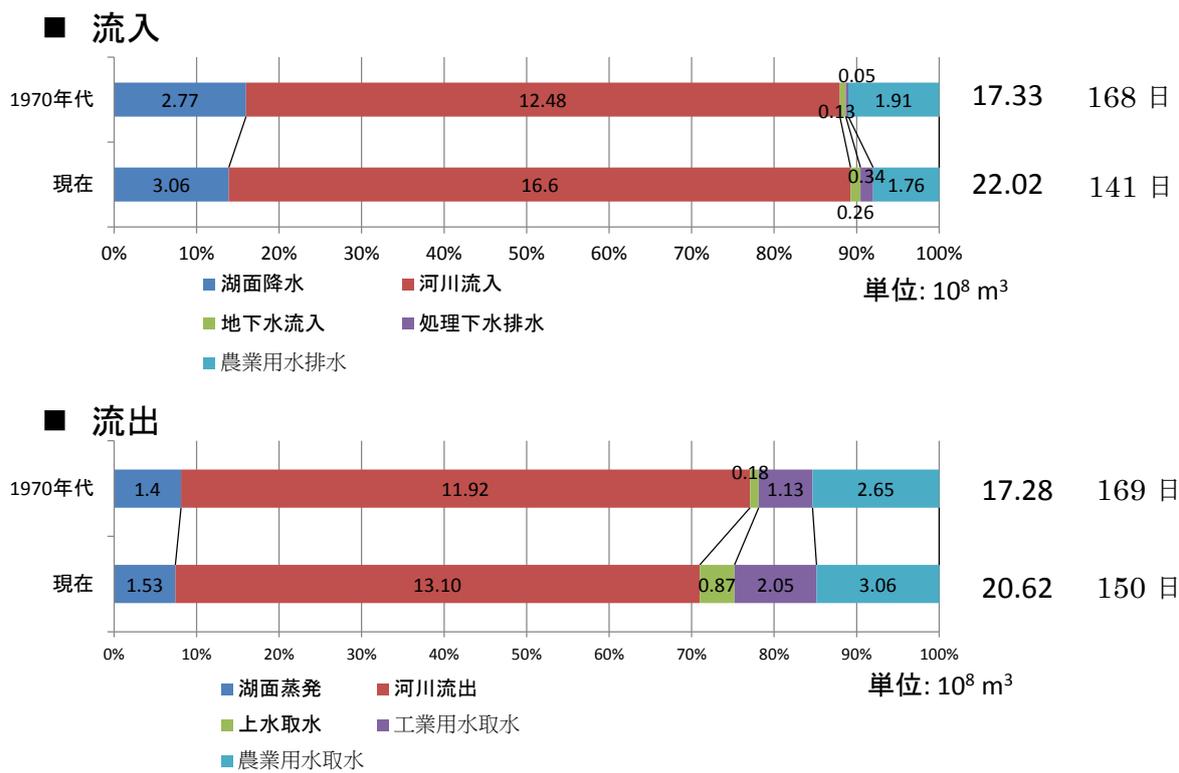


図 3.20 1970年代と現在の各水収支要素が占める割合の比較（霞ヶ浦全域）

※グラフの右側の数字は、左の列が年総量、右の列が平均滞留時間を示す。

## 第4章 結論

本研究では、現在の霞ヶ浦における水収支を評価し、1970年代と比較することでその差異を解明した。2008～2010年の年単位水収支を本研究の新手法で算出した結果、霞ヶ浦全域において総流入量は約21～23億 $\text{m}^3$ 、総流出量は約18～24億 $\text{m}^3$ であった。水収支項の中で量が最も多いのは流入、流出ともに河川流量であった。霞ヶ浦全域において総量のうち河川流量が占める割合は、流入については75～76%、流出については60～69%であった。また現在と1970年代の変化は主に、河川流量の増加により生じていた。さらに上水取水が約5倍、工水取水が約2倍、下水排水が約7倍と増加しており、霞ヶ浦の水循環量は増加していることが分かった。流域の環境および水利用変化により、この結果が生じたと考えられる。また平均滞留時間は、流入量を基に算出したら約30日、流出量を基に算出したら約20日短くなった。この結果が霞ヶ浦の水質に与える影響を評価することは、今後重要な課題と考えられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境系の杉田倫明先生には、日頃の熱心で的確なご指導、ゼミでの貴重なアドバイス、現地観測など数多くの場面で終始お世話になりました。大変感謝申し上げます。また筑波大学生命環境系の辻村真貴先生・浅沼順先生・河内敦先生には、主に流域環境ゼミにおいて、貴重なアドバイスを数多くいただきました。また田瀬則雄先生には、流域環境ゼミでのご助言の他、霞ヶ浦に関する書籍を提供していただきました。大変感謝いたします。

国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所の河野氏・斉藤氏および担当者の方々には、湖心観測所での観測にご協力いただきました。また、流量・気象データおよび霞ヶ浦に関する情報を提供していただきました。アイ・シー・エスの稲野氏および担当者の方々には、毎月の湖心データ回収に同行させていただき、データを提供していただきました。

水資源機構利根川下流総合管理所の田本氏には、流量データおよび新利根川に関する情報を提供していただきました。水資源機構霞ヶ浦用水管理所の北浦氏・田村氏には生活用水・工業用水・農業用水の取水量データを提供していただきました。霞ヶ浦用水土地改良区の担当者の方々には、農業用水の分水量データを提供していただきました。茨城県企業局の尾又氏・中嶋氏には、生活用水・工業用水の取水量データを提供していただきました。石岡台地土地改良区の茅場氏には、農業用水の取水量データを提供していただきました。茨城県土木部の長嶋氏・口町氏には処理下水排水量のデータを提供していただきました。国土交通省国土技術政策総合研究所の鍋島氏には、国総研資料冊子と付録のシステム一式を提供していただきました。

霞ヶ浦へ流入する河川の流量観測の際には、筑波大学水文科学分野の脇山氏・安倍氏・松野氏・福田氏・清水君・川口君・加納君・坂本君・富松君・Punさん・辻君・高橋君・吉田君に協力していただきました。また湖心データ回収の際には、杉田研究室の魏さん、高橋君、Kak君に同行していただきました。特に魏さんには、湖心点検の手順を教えてください、解析データを提供していただきました。

以上の方々のおかげで、研究を進めることができました。大変感謝いたします。また、杉田研究室や流域環境研究室の方々には様々な場面でご協力いただき、また互いに励ましあうことでここまで研究を進められました。

以上の方々と、ここまで私を様々な面で支えてくれた家族に対して、この場を借りて心から御礼申し上げます。

## 引用文献

- Gibson J.J., Prowse T.D. and Peters D.L. (2006): Hydroclimatic controls on water balance and water level variability in Great Slave Lake. *Hydrol. Process.*, **20**, 4155-4172.
- 平井幸弘 (1995) : 湖の環境学. 古今書院, pp.186.
- 茨城県農地部農地計画課 (1978) : 富栄養化対策現況. 対策計画報告書 (昭和 52 年度), pp.51.
- 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会 (編) (1979) : 霞ヶ浦一研究報告集一. 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会, pp.381.
- 茨城県土木部下水道課 (2011) : よみがえる水. pp.33.
- 茨城県霞ヶ浦環境科学センター (2012) : 霞ヶ浦への招待. インターネット : [http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04\\_kenkyu/introduction/kahology\\_top.html](http://www.kasumigaura.pref.ibaraki.jp/04_kenkyu/introduction/kahology_top.html) (2013.12.19)
- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課 (2004) : 第 4 期の霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定関係資料集. pp.221.
- 市川正巳 (1973) : 水文学の基礎. 古今書院, pp.310.
- 市川正巳・榎根勇 (編) (1978) : 日本の水収支. 古今書院, pp.344.
- 伊倉宏弥 (2010) : 衛星データを用いた霞ヶ浦湖面における蒸発量分布の推定. 筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻修士論文, pp.123.
- 霞ヶ浦研究会 (編) (1994) : ひとつと湖とのかかわりー霞ヶ浦ー. STEP, pp.167.
- 環境庁自然保護局 (編) (1995) : 日本の湖沼環境Ⅱ. 自然環境研究センター, pp.188.
- 関東農政局水戸統計・情報センター (2005) : 茨城農林水産統計年報. 茨城農林水産統計協会, 30-31.
- 建設省・国土開発技術研究センター (1977) : 霞ヶ浦汚濁制御調査報告書. pp.200.
- 気象庁 : AMeDAS「気象統計情報」. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>. (2014.1.19)
- 北村立実・黒田久雄・山本麻美子・根岸正美・田淵俊雄 (2010) : 霞ヶ浦湖岸循環利水水田地区の水収支と物質収支. 農業農村工学会論文集, **267**, 175-181.
- 国土交通省河川局 : 「水情報国土データ管理センター 水文水質データベース」. インターネット : <http://www1.river.go.jp/> (2014.1.19)
- 国土交通省霞ヶ浦河川事務所 : 「時間雨量」. CD-ROM.
- 国土交通省霞ヶ浦河川事務所 : 「時間流量」. CD-ROM.
- 国土交通省国土政策局 (2013) : 「国土数値情報 (土地利用細分メッシュ)」. インターネット : <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2014.1.19)
- 国土交通省水管理・国土保全局水資源部 (2013) : 日本の水資源. pp.211.

- 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」 .  
インターネット : <http://www.cger.nies.go.jp/db/kasumi/index13.html/> (2014.1.19)
- 間瀬茂 (2010) : 地球統計学とクリギング法 R と geoR によるデータ解析. オーム社,  
pp.240.
- 水資源協会 (1996) : 霞ヶ浦開発事業誌. 水資源開発公団霞ヶ浦開発事業建設部, pp.881.
- 水資源機構 (2011) : 霞ヶ浦開発事業定期報告書. pp.77.
- 宮野愛子 (2008) : 霞ヶ浦湖面におけるフラックスの測定と評価. 筑波大学第一学群自然  
学類地球科学主専攻卒業論文, pp.45.
- 宮野愛子 (2010) バルク式を用いた湖面におけるフラックスの算出. 筑波大学大学院生命  
環境科学研究科環境科学専攻修士論文, pp.78.
- Morrill C. (2004): The influence of Asian summer monsoon variability on the water  
balance of a Tibetan lake. *Journal of Paleolimnology*, **32**, 273-286.
- 村岡浩爾 (1981) : 霞ヶ浦の水収支. 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (IV) , 霞ヶ浦  
流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響. 国立公害研究所研究報  
告, **20**, 103-119.
- 村岡浩爾・細見正明 (1981) : 霞ヶ浦沿岸地下水の挙動と水質. 陸水域の富栄養化に関す  
る総合研究 (IV) , 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影  
響. 国立公害研究所研究報告, **20**, 69-102.
- 内藤大貴 (2008) : 霞ヶ浦沿岸域における地下水と湖水の交流関係. 筑波大学大学院生命  
環境科学研究科環境科学専攻修士論文, pp.127.
- 総合地球環境学研究所 (2011) : 「2011 年要覧 地球環境および地域発展制約下での下  
流汚染蓄積型湖沼の水環境問題と未来可能性」 . インターネット :  
[http://www.chikyu.ac.jp/archive/brochure/2011/yoran2011j\\_48-57.pdf](http://www.chikyu.ac.jp/archive/brochure/2011/yoran2011j_48-57.pdf) (2014.1.23)
- 杉田倫明 (2012) : 水の惑星「地球」の水循環と水収支. 小笠原正明・新井一郎・澤村京  
一・杉田倫明・守橋 健二 (編著) : 現代人のための統合科学—ビッグバンから生物  
多様性まで. 筑波大学出版会, 189-203.
- 杉田倫明・田中正・筑波大学水文科学研究室 (2009) : 水文科学. 共立出版, pp.275.
- 高瀬信忠 (1978) : 河川水文学. 森北出版, pp.328.
- 土屋巖・白井邦彦・増田啓子・河合崇欣・植田洋匡・佐橋謙 (1981) : 湖面蒸発量の研究.  
陸水域の富栄養化に関する総合研究 (IV) , 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性および  
その湖水環境に及ぼす影響. 国立公害研究所研究報告, **20**, 43-67.
- 浦野慎一 (1987) : 洞爺湖の年間水収支. 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 241-249.
- 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学類  
地球科学主専攻卒業論文, pp.136.