

# 1. 都市河川流域の水環境システムに関する 基礎的研究

研究の意義

研究の概要

はじめに

1. 対象流域

2. 地域河川の変化

2-1 真間川流域の場合

2-2 鶴見川流域の場合

3. 流域内都市への影響

3-1 河川水質の変化

3-2 その他の影響

4. 都市河川流域における水循環システム

5. 海老川流域の自然系と人工系流量成分

5-1 対象流域の概要

5-2 観測結果とその考察

5-3 平常時流量、基底流量、人工系流量、降雨  
流出量（表面流出量）の算定

5-4 算定結果および考察

6. まとめ（海老川流域における観測を基礎として）

6-1 対象流域の概要

6-2 観測結果と流量成分の分離

おわりに

千葉工業大学 高 橋 弘



## 研究の意義

近年の急激な都市化現象は、地域が従来有していたバランスある水循環システムに大きな変化を与えた。即ち、森林の伐開、土地開発、住宅や都市施設の整備等は流域の不浸透域を拡大し、地表からの流出を増大させ、都市水害を頻発させた。

また、浸透域の減少は、地下水補給を阻害し、地下水の汲み上げによる地盤沈下を招くに至っている。更に、生活排水は河川に流入し、水質を汚染し、悪臭を発し、都市河川はドブ川とのイメージすら抱かせるに至っている。

こうした現状下で、治水、利水を含めた地域環境に及ぶ多面的な影響が生じその実態は単一的な調査では把握し難くなってしまっている。そこで本研究において自然系と人工系が交錯する都市河川における流出機構の変化と雨水浸透機構及び水質の変化を、システム的に把握することによって都市化に伴う河川流域の安全性の低下を防ぎ、環境の改善を可能にする対策の基礎的研究を行う。

## 研究の概要

本研究は先ず急速な都市化によって引き起こされた河川流域の変化を、主として河川の水害、水質、地盤沈下等の諸点から首都圏の東西に位置する真間川と鶴見川流域を事例として明らかにした。

次に、首都圏にあって急激に都市化されているが、まだ開発可能の土地を有し新たな試みも可能な船橋市を流れる2級河川海老川とその流域を対象として研究を行い、安全対策の基礎として①水循環システムとして現機構の把握、②水循環の中で主に平常時流量と水質を、同河川の調査・観測をもとにそれぞれシステムの定量化を図る。

次に、これを元にして水循環、水環境それぞれの分野の保全対策を取ることにより当地域の安全性の改善を目的とした研究を行うものであるが、本研究ではこれまでに明らかになった海老川流域の水循環システムを示す。

## はじめに

日本はアジア・モンスーン帯に位置しているため、降雨量が多く気候も温暖で、植物も生育し易い。これらの特徴の下に、日本の農業生産は湛水栽培を基本とした稻作農業を中心に発達し、日本式の農村居住様式に非常に良く適合し、生活と生産に矛盾が無く、従業者も多く、長い間日本の基幹産業の位置を占めていた。

都市は河川沿いに連続堤防を築き、住宅や都市施設を洪水から守る。その一方、都市周辺部にある農村部は、周囲からの流入水を一時的に貯留し、洪水調節池や浸透池となし得る水田土地利用を基本として居住し、生産を行ってきた。このように農業栽培と洪水対策を両立し共存していた時は、緑と水の豊かな農村と活気溢れる都市と調和が保たれ、住民は自然を感じつつ生活を楽しむことが出来た。

しかし、日本が高度に工業化、経済が急速に発展し始めた1960年代から東京、横浜、大阪等の大都市に、かつて例を見ない急激な人口増加が始まった。

当然ながら、これらの都市で、新たに宅地化した地域は氾濫地帯が多かったから、降雨により洪水時被害が激化し、新たな都市水害が発生した。

また、都市周辺の山林丘陵地を開発し、住宅地化した地帯もあるが、これらは開発自体に地滑り等防災上の問題点を持つほか、森林伐開に伴う保水低下によって下流域への雨水の流出を増すなど、洪水の原因となる危険を持っていた。

これら都市整備施設は、森林・丘陵や自然低地や水田の宅地化をはじめとし、河川改修、下水道の整備、道路・鉄道の增设、道路の舗装、地下水の汲み上げなど、自然の水循環を急速に変化させる結果を招く事項ばかりであった。そのため大都市に隣接する地域は水害等、大きな危険にさらされることになった。先ずこの実態を明らかにする。

## 1. 対象流域

東京都の人口は都市集中化が始まった1955年をベースにすると、わずか20年後の1975年に人口は約1.5倍の11,673,554人に達した。（表1-1参照）

表1-1 東京都の人口変化

年	1955	1965	1975	1985	1988
人口	8,037,084	10,869,244	11,673,554	11,829,363	11,935,700
増加率	—	1.35	1.07	1.01	1.01

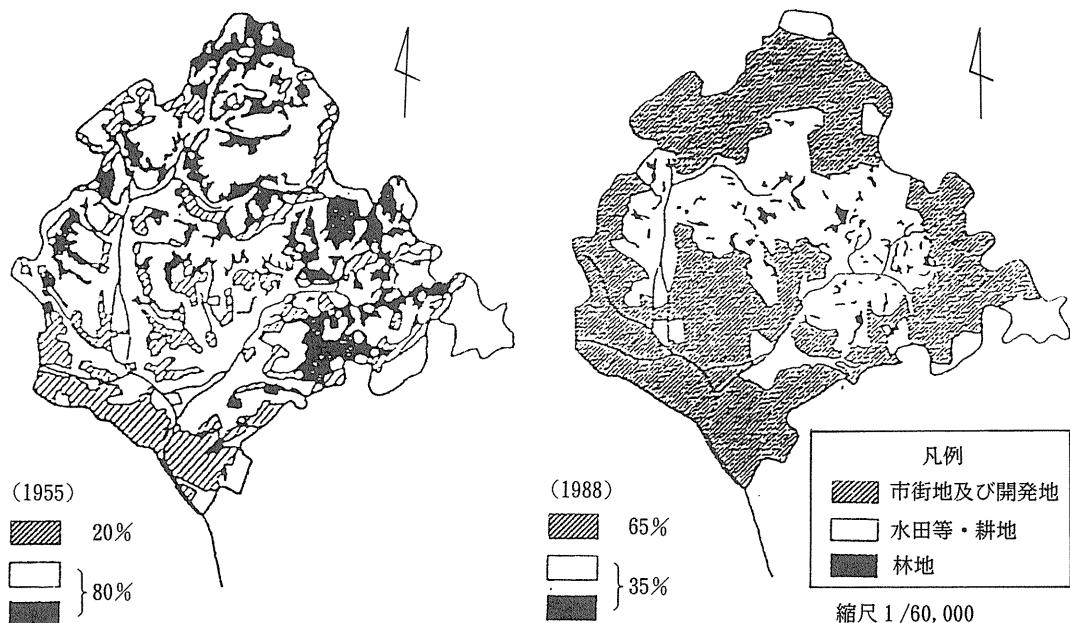


図1-1 真間川流域における土地利用の変遷（1955、1988）

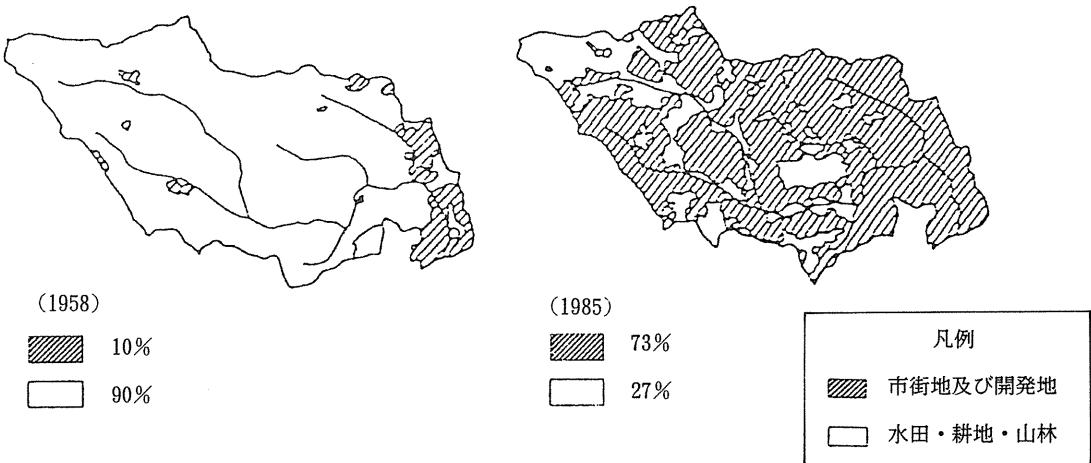


図1-2 鶴見川流域における土地利用の変遷（1958、1985）

東京都の東に接する市川市等の4市を流れる真間川流域では、1960年代から20年後の1980年にかけて約2.4倍 350,893人に達した。一方、西に隣接する横浜市、川崎市等の4市を流れる鶴見川では（特に亀の子橋上流域を見ると）同じく1970年から1985年にかけての15年間に約2倍、616,343人に達する急膨張を示している。何れもその後は、緩やかな伸びとなっているが、更に周辺地域をも含めた都市化が進んでいる。上記の2つの流域の都市化の変遷を図1-1と図1-2に示す。

## 2. 地域河川の変化

当該地域を流れる河川は、流域の都市化によって様々な変化が生じたが、先ず直接被害を与えたのは洪水流出の急増であった。かつて無かったような水害が頻発し市民に被害を与えた。

### 2-1 真間川流域の場合

真間川流域では、都市化が深刻に到らなかった1960年代は、未だ自然の水循環過程を保っていた。主な、災害記録を見ると次のようである。

東海・関東地方に記録的な被害をもたらした狩野川台風と呼ばれる、1958（昭和33）年9月の台風22号は総雨量約332.2mmであった。被害は浸水家屋床上2,456戸、床下2,560戸、被害耕地865ha、市街地浸水376haであった。これが真間川の最大の被害である。これを契機に河川の氾濫防止を目的とした改修工事が行われた。

その後、都市化が進んだ1981（昭和56）年10月、台風24号では総雨量約203.3mmがあった。被害は、浸水家屋床上2,728戸、床下2,152戸、被害耕地524.1ha、宅地浸水152.5haであった。これは、降水量では過去最大の狩野川台風時の2/3であるのに対し、被害はそれを上回るものとなった。

更に、それほど大きくもない降雨でも被害がしばしば発生するようになった。

## 2-2 鶴見川流域の場合

鶴見川の流域は、標高80から 170m級の丘陵・台地が流域の70%を占め、残りが沖積平野で全体の流域面積は 235km<sup>2</sup>である。

災害記録によると、1958年9月の台風22号（狩野川台風）豪雨では日雨量約 300.3mmに達し、被害は浸水家屋床上 7,000戸、床下11,840戸、末吉地点の最大流量は 509m<sup>3</sup>/s であった。

一方、1982年の9月の台風では日雨量 144.4mm、被害は浸水家屋床上 1,491戸、床下 4,056戸、浸水面積 270ha、末吉橋地点の最大流量 1,051m<sup>3</sup>/s となった。

即ち、降雨量にして半分以下であるにもかかわらず最大流量は約 2 倍に達した。

更に、図2-1によるように、降雨ピークから洪水流出ピークまでの洪水到達時間の短縮にみられるように、1965年までは約10時間かかったのに対し、1970年代後半以降は3～4時間に、1975年代には2～3時間に短縮され、洪水は一気に市街地を襲うようになった。

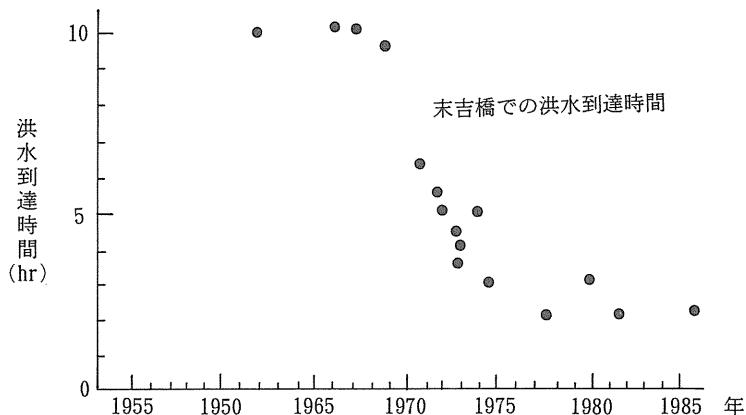


図2-1 鶴見川における洪水到達時間の変化

## 3. 流域内都市への影響

都市活動の活発化とともに自動車の排気ガスや工場からの排煙等により、大気汚染や騒音が公害として問題視されるようになった。同時に、住宅・道路・鉄道・水道などの都市施設の対応が急がれ、これらは当該地域の既存の水循環系を乱し洪水氾濫や被害の増加をもたらした。

### 3-1 河川水質の変化

各河川とも産業系の工場・事業所に対して、排水規制を徹底したため、1977（昭和52）年以降シアノやカドミウム等の有害物質は殆ど検出されていない。健康項目では、環境基準に達している。

真間川の場合、松戸市から国分川を流下し真間川に入り根本水門から江戸川に入る流れと、大柏川から真間川に入り東京湾に流れる2方向の流れがある。それぞれ根本水門と、上境橋地点で水質調査したBODを年間平均で示すと図3-1のようになる。

この中で、産業系については排水規制を行った事から、一時BOD値についても水質改善の傾向が

見られた。しかし、1985（昭和60）年前後からは、市街化が進み生活系の排水が増加した事や、流域内のほとんどの地域に流域下水道が進んでいない事もあり、有機性汚濁による富栄養化は進み、水質は横ばいにあるいは悪化の傾向にある。

真間川の環境基準はBOD10mg/lであるから、各年とも何れも適合するに至っておらない。

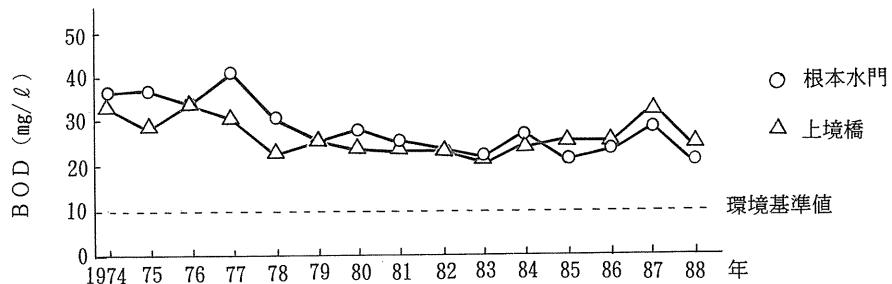


図3-1 真間川におけるBOD値の経年変化

鶴見川の場合、開発速度が特に速い鶴見川本川の亀の子橋地点を対象として注目すると流域下水道工事が進められ、1968（昭和43）年に1部が共用開始し、1988（昭和63）年現在で約60%の普及率である。にもかかわらず、顕著な水質の改善は見られない。

一方、谷本川に注ぐ上流の支川麻生川、真福寺川や中流部支川有馬川では、近年でもBOD値が37mg/lを示すなど、生活系排水の影響が強く現れ都市化につれて悪化の一途をたどっている事を示している。（図3-2参照）

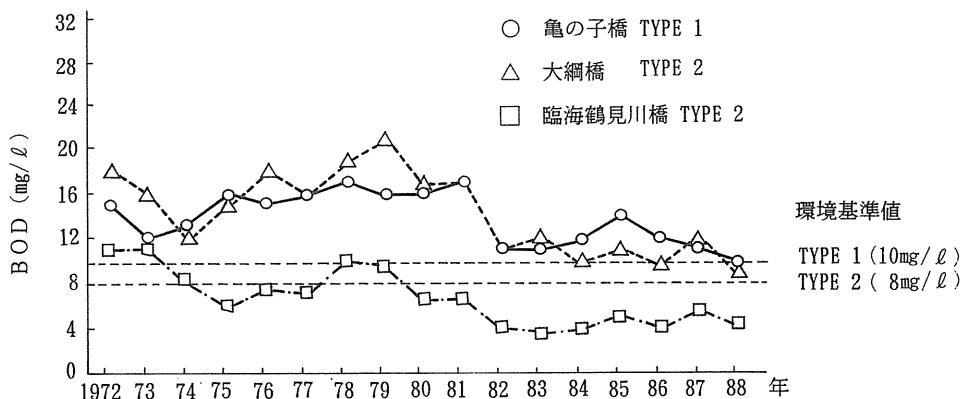


図3-2 鶴見川水系のBOD値の経年変化

### 3-2 その他の影響

都市化に伴い、工業用水や市民生活用の水道用水は必須のものとなる。このため手軽に、しかも安価に手に入れる事ができる地下水の汲み上げが盛んになり、地盤沈下を起こす原因となっていた。

真間川流域では、1955～1965年代の工業化、都市化による人口増加に対応して、盛んに地下水汲み

上げが行われる様になった。その結果は湧水が減少し、図3-3でも明らかなように地盤沈下が起こり始めた。

そこで、1969（昭和44）年に流域の南部、1972（昭和47）年には流域全部を地下水採取規制地域に指定し、上工業用水への転換を図った。以降、地下水の使用を禁じていった結果、最近ではほぼ全地域で沈下は止まっている。また、地下水位も最近になって安定化してきている。

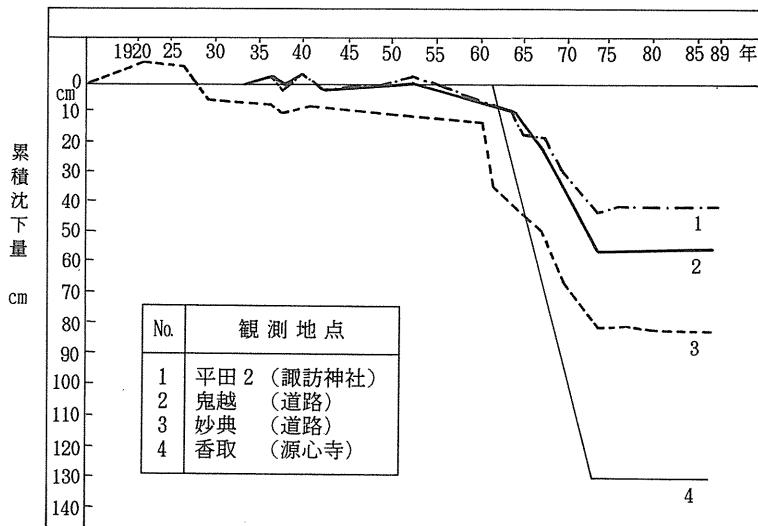


図3-3 真間川流域における地盤沈下の経年変化

鶴見川流域のうち川崎市域は、1920（大正末期）年頃から工業化が始まった地域である。そのため工業用井戸水の乱掘によって、特に臨海部を中心に地盤沈下が起き、1931（昭和6）年から1943（昭和18）年にかけて約134cmもの沈下をした地域もあった。この現象は、第2次大戦中に一時衰えたが、戦後の工業の復興と共に再び沈下が始まり、しばらく沈下を繰り返した。しかし、工業用水法等の規制や監視の強化により1965（昭和40）年頃から沈下が止み、地下水位も徐々に回復している。しかし、一部には未だ地下水の汲み上げを行っているところもある。

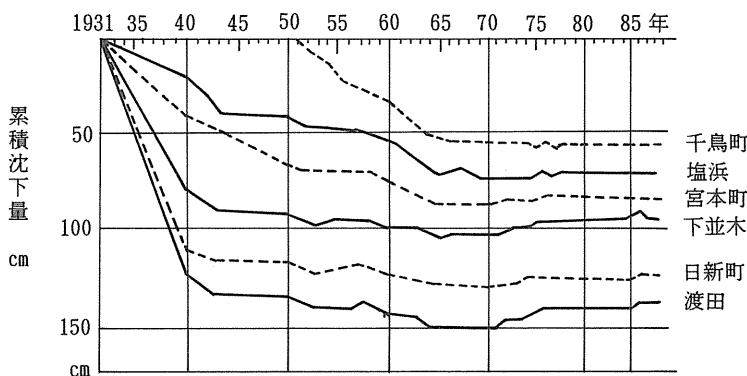


図3-4 鶴見川流域における地盤沈下の経年変化

#### 4. 都市河川流域における水循環システム

近年、急激な都市化による不浸透域の増大によって引き起こされた流出量の増加、浸透量の減少、家庭・事業所から河川への人工系排水の増加等を明らかにし、都市の水循環システムを流域を中心とした水循環保全の視点から捉えるため、都市河川の流域単位での収支の定量化を行った。本研究では、対象河川流域として、千葉県船橋市を貫流する2級河川海老川の支流である高根川と念田川の流域を選定した。表4-1に高根川流域と念田川流域の概要を示し、図4-1、4-2にそれぞれの流域の1992年の水循環図を示す。

高根川流域（不浸透47%）と念田川流域（不浸透39%）とでは流域面積が1.06倍違うので、単純に比較することは出来ないが不浸透域の増加による表面流出量の増加が確認できた。また、人口の増加による人工系排水の増加も顕著であることが図4-1と4-2から明らかになった。今後、下水道整備等が進むと河川への人工系排水は減少し水質的にはかなり改善されると思われる。しかし、河川水が減少してしまうことも考えられる。従って、都市化による不浸透域の拡大への対応が重要になると思われるが、この点については、普及度が低いため明確にはされなかったが、浸透施設からの洪水時の雨水浸透、地下水涵養が重要なものとなると考えられる。

表4-1 各河川の概要

	流域面積	人口(人)	流路延長	浸透面積：不浸透面積
①高根川	1.67km <sup>2</sup>	12,306	2.80km	53:47
②念田川	1.78km <sup>2</sup>	10,849	3.00km	61:39
②/①	1.06倍	0.881倍	—	—

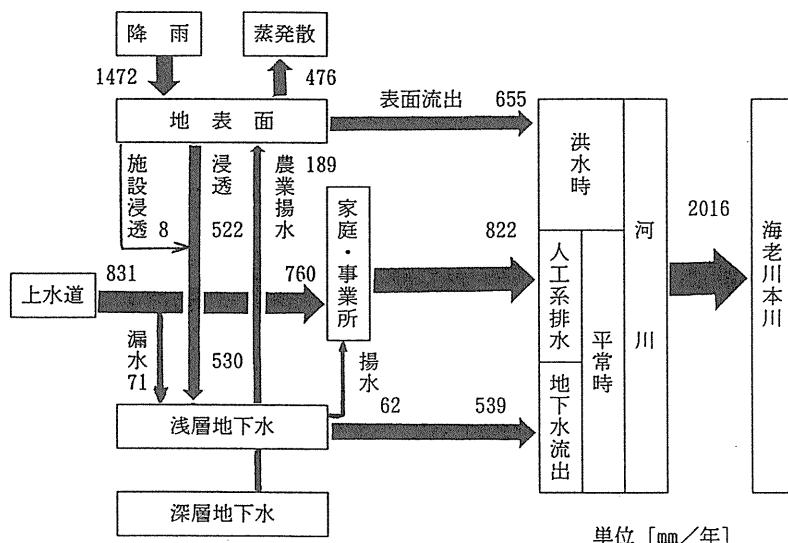


図4-1 高根川流域水循環図（1992年）

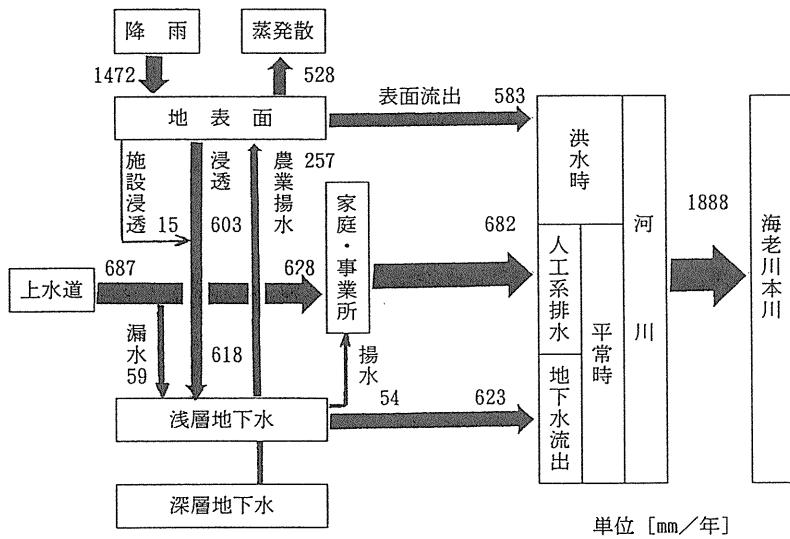


図4-2 念田川流域水循環図（1992年）

## 5. 海老川流域の自然系と人工系流量成分

近年の急激な都市化現象は、地域が従来有していた水循環システムに大きな変化をもたらしてきた。すなわち、開発による不浸透域の拡大による直接流出量の増大、地下水涵養量の減少、河川水質の悪化等である。本稿では、そのような状況下にある流域として海老川流域を選定し、自然系と人工系要素が交錯する都市河川における流出機構の変化をシステム的に把握する上で必要な河川流量成分の算定を行った。

### 5-1 対象流域の概要

対象とした海老川流域は千葉県の北西部の東京湾に面する位置にあり、急激に都市化した地域である。この海老川流域を図5-1に示す。海老川流域の流域面積は $26.52\text{km}^2$ である。本稿では海老川本川水位観測施設までの流域を対象流域とした。流域面積は $9.78\text{km}^2$ である。

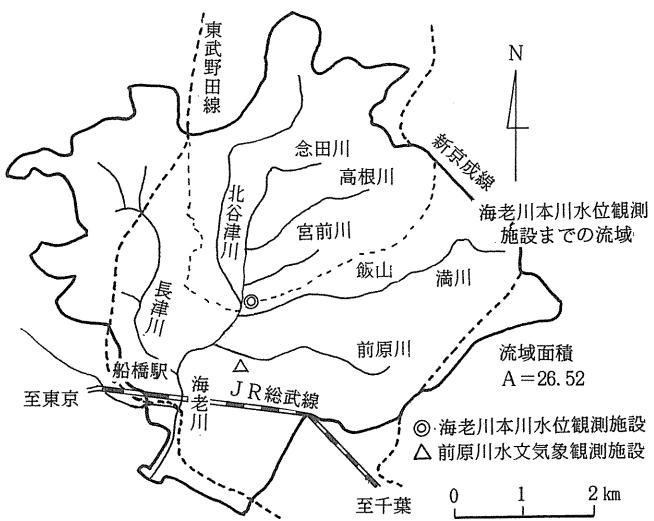


図5-1 海老川流域の概要

## 5-2 観測結果とその考察

海老川で実施した流量観測結果より水位流量曲線を作成し、河川水位を流量に換算した。その結果の例を図5-2(a)、(b)に示す。図5-2(a)は長期無降雨期、図5-2(b)は降雨を含む時期である。図5-2(a)より流量には無降雨時にきわめて規則的な日周期性が存在することが分かる。これは、人間活動の影響が顕著にあらわれた都市河川の特徴と考えられる。また、図5-2(b)より、降雨に対する流量の応答が非常に速く、降雨終了後の流量低減が急速で、降雨による基底流量の変動が少ないと分かった。

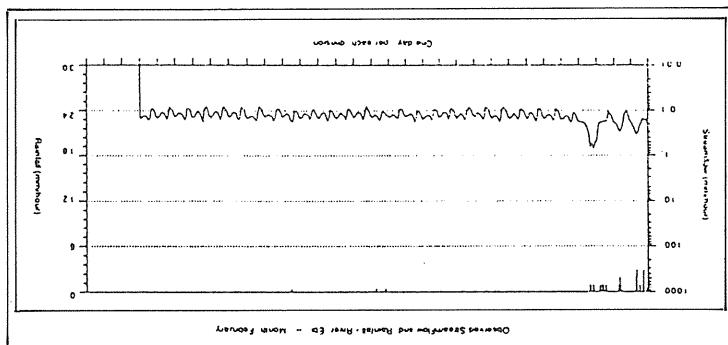


図5-2(a) 海老川ハイドログラフ（1992年2月）

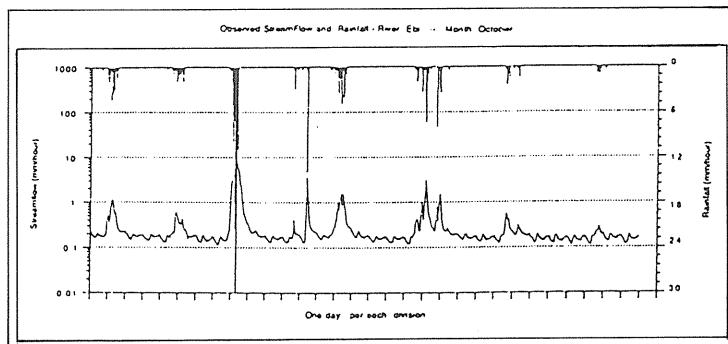


図5-2(b) 海老川ハイドログラフ（1992年10月）

## 5-3 平常時流量、基底流量、人工系流量、降雨流出量（表面流出量）の算定

- ① 降雨の影響を取り除いた1日の時間流量変動パターンを各月毎に7～10個抽出し、各月毎に1日の時間流量変動パターンを平均化した。
- ② 図5-3のように、河川流量を分離するために無降雨時における平常時流量を求め、これから基底流量を算定し、平常時流量から基底流量（各月の最低流量）を分離することにより人工系流量を求めた。
- ③ 降雨時における河川流量から平常時流量を差し引き、直接流出量を算定した。

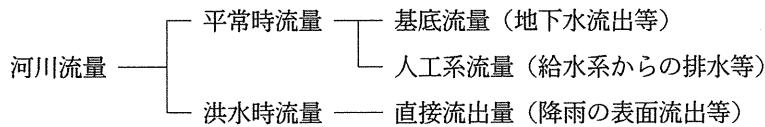


図 5－3 河川流量成分の構成

この算定結果を表 5－1 に示す。

表 5－1 1992年月別算定結果

(単位 : mm/day)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1992年
基底流量	2.18	2.09	2.04	1.78	2.54	2.93	3.98	3.31	3.55	2.76	2.76	2.78	999mm/年
人工系流量	0.80	0.81	0.81	0.51	0.49	0.60	0.71	1.02	0.98	0.74	0.74	0.65	271mm/年

#### 5－4 算定結果および考察

地域の開発状態の資料をもとに算定した海老川流域の水循環図を図 5－4 に示す。表 5－1 による人工系流量 271mm/年、基底流量は 999mm/年と算定された。図 5－4 に示す水循環図では、それぞれ 529mm/年、504mm/年となっており、観測値から求めた基底流量とは異なる値を示した。この 999mm/年の中に入工系流量がかなり含まれていると思われる。この原因として、流域が広く、そして支川が多いために人工系流量が基底流量にかなり影響を与えていると考えられるので、今後、この点を明らかにして行きたい。

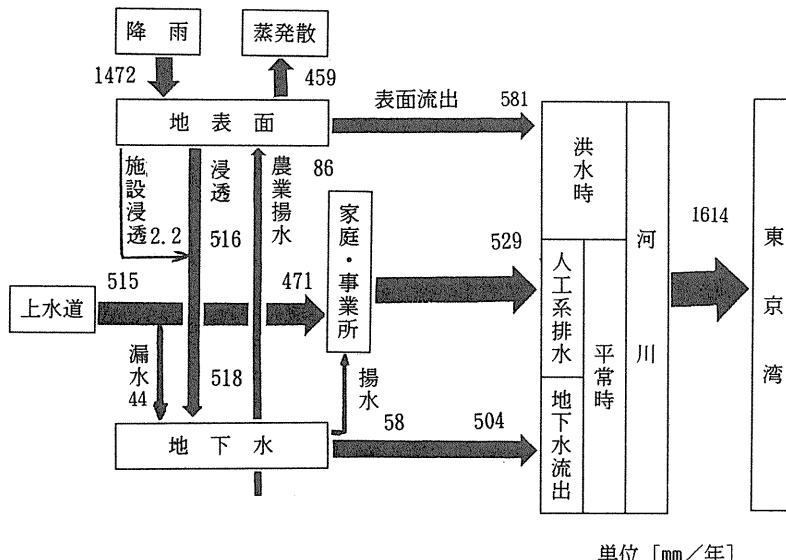


図 5－4 海老川水循環図 (1992年)

## 6.まとめ（海老川流域における観測を基礎として）

都市化流域の水循環系は、大別すると自然的水循環経路、雨水人工排水系径路および給水－排水径路の3径路からなり、それらが相互に関連を持ちながら河川流量を構成している。近年、都市河川では洪水流出抑制に加えて、「清流の復活」、「豊かでうるおいのある水辺」などの表現で代表されるように環境面から、平時の流量の保全についても関心が高まっている。本研究では都市河川流域として海老川流域を対象に、観測値と用水関係統計資料等を基に流量成分のクロスチェックを行ないながら現在の河川流量の構成を明らかにすることにより、今後の流域変化に伴う河川流量の変化を予測し、その保全策を考えるための基礎的知見を得ることを目的とする。

### 6-1. 対象流域の概要

海老川流域は、関東ローム層で覆われた洪積台地と沖積低地よりなっている。下流低地部は高密度に市街化されているが、上流部の一部には谷地田が残っており、台地部では上流へとスプロール的に都市化が進行している。観測は、海老川本川、前原川支川で行なっており、その観測項目と各流域の諸元を表6-1に示す。観測は1991年9月に開始された。ここでは1992年1月～12月のデータを対象とする。

表6-1 観測項目と流域の諸元

河川名	観測項目	流域面積(km <sup>2</sup> )	推定人口(人)	不浸透面積(%)
海老川	河川水位(10分)	9.87	45,200	44.0
前原川	河川水位(10分) 気温、湿度、風向、風速 示差放射、地下水位(3)	3.25	30,200	48.7

### 6-2 観測結果と流量成分の分離

図6-2(a)、(b)に海老川、前原川のハイドログラフの例を示す。図より以下の点が指摘できる。

(1) 海老川、前原川とも無降雨日に極めて観測的な日周期パターンが存在し、その変動量は前原川の方が大きい。これは、流域の規模の相違（海老川流域が前原川の約3倍）と都市化の程度の違いによると考えられる。

(2) 海老川、前原川とも降雨に対する応答が非常に速く、降雨終了後の流量低減が急速である。

次に、無降雨日のハイドログラフを平均し、無降雨時日周期型流量（日周期パターン）を求める。前原川は流量の変動が少ないので1年を4季（春：3～5月、夏6～8月、秋：9～11月、冬：12～2月）に分け、無降雨時日周期型流量を求めることができる。これに対し、海老川はより短期での変動がみられるので月別に無降雨日のハイドログラフを平均し、無降雨時日周期型流量を求めることとした。各河川の無降雨時日周期型流量を図6-2(a)、(b)に示す。図より以下の点が指摘できる。

(1) 午前と深夜に2回流量のピークが存在する。そして前原川は午前6時頃に、海老川は午前7時頃に河川流量が最小になる。

(2) 海老川は、月別の無降雨時日周期型流量の変動幅が大きく、特に7～9月にその流量値が大きくなっている。これは、海老川流域内の水田面積率（水田面積 5.5%）が前原川（2.3%）の約2倍あり、その用水源としての地下水揚水の影響が表れていると考えられる。

この無降雨時日周期型流量を使い、以下に定義する流量成分を算定する。

- (1) 基底流量：無降雨時日周期型流量の最低流量
- (2) 日周変動分流量：無降雨時日周期型流量から基底流量を差し引いた流量成分
- (3) 洪水流出量：洪水ハイドログラフから無降雨時日周期型流量を差し引いた流量成分

前原川について観測データからの各流量成分と水道事業年報から推算した有効給水量との比較結果を表6-2に示す。表より、有効給水量956mm/年にに対し日周変動分流量は839mm/年である。これは、有効給水量の約88%に相当し、河川に至る間の損失を考慮すると日周変動分流量を給水－排水成分とみなしてよいと考えられる。このことはまた、前原川の基底流量674mm/年が自然系地下水流出成分だけから構成されていることを意味する。

同様に、海老川について各流量成分を比較した結果を表6-3に示す。表の最下段は、前原川での有効給水量原単位258(ℓ／日／人)を基に算出した給水－排水系流量を示している。表より、分離した基底流量が999mm/年と非常に大きい。そして有効給水量471mm/年に対し観測データからの日周変動分流量 237mm/y年と小さい値となっている。これは、基底流量に自然系流量だけでなく、人工系流量の一部が含まれていることを示している。表6-3の最下段433mm/年と有効給水量471mm/年を比較すると、有効給水量の約92%が河川に排出されていることとなり、損失を考慮するとこれは妥当な値と考えられる。この433mm/年を用いて自然系地下水流出成分を計算すると803mm/年（水田の灌漑揚水量も含む）となる。

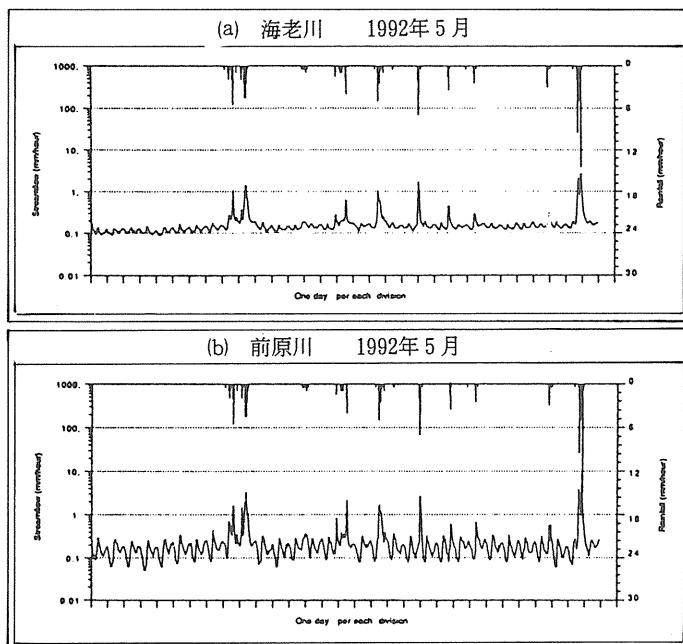


図6-1 流量ハイドログラフ

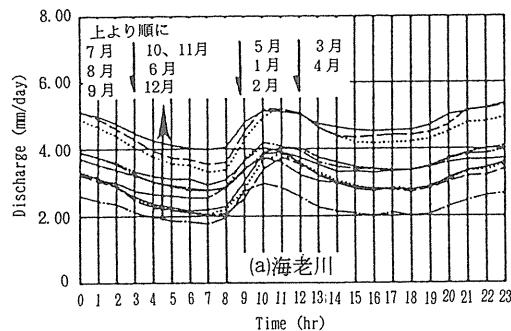


図 6-2 無降雨時日周期型流量

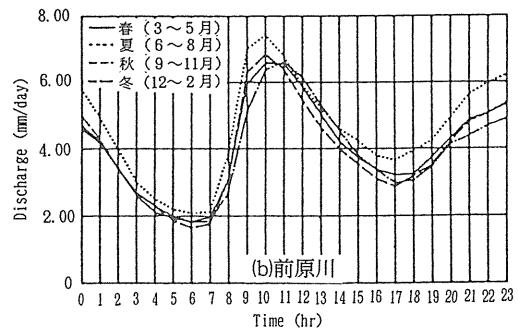


表 6-2 前原川流量成分

	(mm/年)
年間降雨量	1,472
年間流出総量	2,190
基底流量	674
日周変動分流量	839
有効水量	956
洪水流出量	631

表 6-3 海老川河川流量成分

	(mm/年)
年間降雨量	1,472
年間流出総量	1,780
基底流量	999
日周変動分流量	237
有効水量	471
洪水流出量	501
前原川での有効給水量の流出量 原単位を用いた給水－排水系流量	433

## おわりに

この研究に助成を頂いた(財)河川環境管理財団、及び資料収集・整理を頂いた皆さんに感謝を申し上げるとともに、今後も水質の観測を継続して実施し、資料の充実を図り都市河川水質改善の基礎的知見を得たい。