

都市・人,そして川(7)

—水・熱収支の観測と解析—

Partnership between city, people and river (7)

—Observation and Analysis of Water
and Heat Balances in Watersheds—



河原能久*

By Yoshihisa KAWAHARA

キーワード：都市, 河川, 水循環,
水収支, 熱収支

1. はじめに

市街地の拡大や人口の高密度化, 生活様式の高
度化等に起因して, 都市域における水, 熱, 物質
循環は大きく変化しつつある。都市型水害の発生
や渇水時の利水安全度の低下, 平常時の河川流量
の減少, 公共用水域の水質悪化などの水問題が発
生する一方で, 都市域での温暖化や降雨パター
ンの変化など, 都市特有の気候も顕在化しつつあ
る。今後の都市の健全な発展のためには, 流域に
おける水循環系(熱や物質の移動をも含めた)の
把握とそれに基づいた体系的かつ効率的な対策の
実施が不可欠である。

本稿では, 建設省の水循環再生構想の対象の1
つである千葉県海老川流域における水・熱収支の
解析結果を報告するとともに, 常磐新線の開通に
伴い開発が予定されている牛久沼流域における水
循環の観測計画について説明する。なお, 水・熱
循環解析手法の詳細に関しては文献^{1), 2)}を参考に
していただきたい。

2. 海老川流域における水・熱収支

2.1 海老川流域の概要³⁾

千葉県海老川流域を図-1に示す。流域面積は

27km²であり, 海老川本川及び前原川など7つの
支川が船橋市と鎌ヶ谷市を流れている。流域は標
高20~30mの台地と河川沿いの沖積低地(標高3
~5m)に分けられる。台地部は関東ローム層,
常総粘土層, 成田砂層から構成されている。流域
内や流域界の近くには, 6ヶ所の雨量観測所,
3ヶ所の河川水位流量観測点, 14ヶ所の地下水位
観測点があり, 詳細な連続観測データが得られて
いる。この流域は, 1960年代以降, 首都圏の
ベッドタウンとして急速に開発が進んだ。市街化
率は1993年時点では62%であるが(図-2),

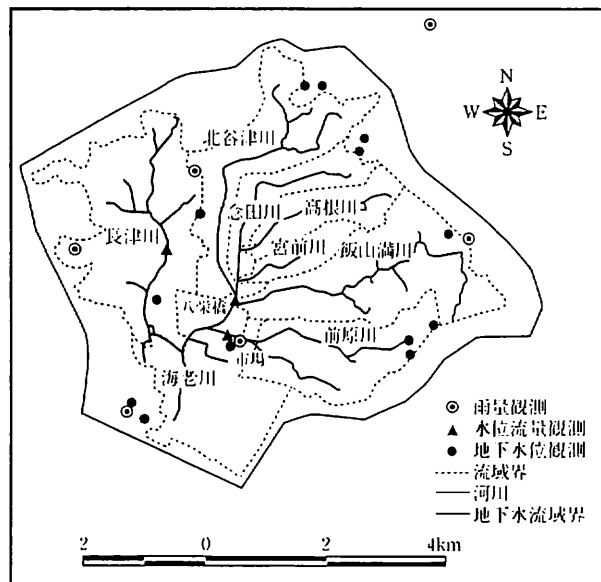
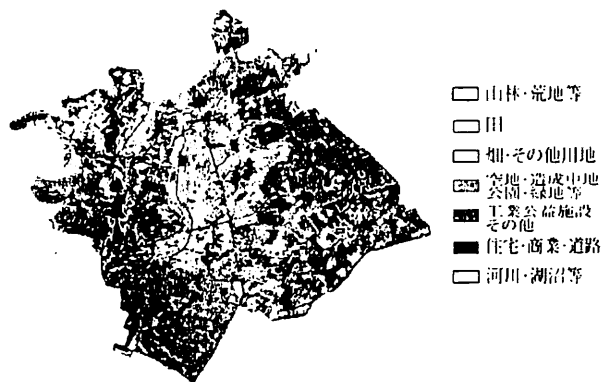
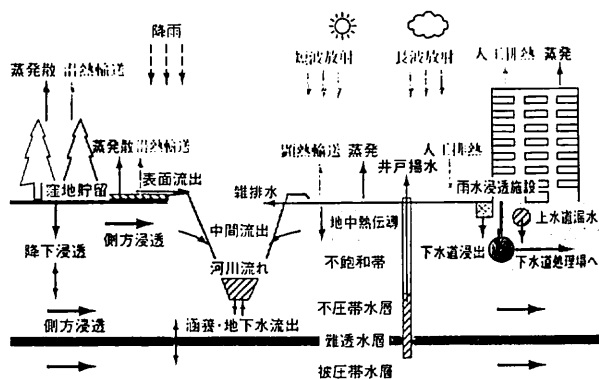


図-1 海老川流域と観測地点

*建設省土木研究所 河川部都市河川研究室 主任研究員



図ー2 海老川流域の土地利用 (1993年)



図ー3 対象とする起床・水文現象

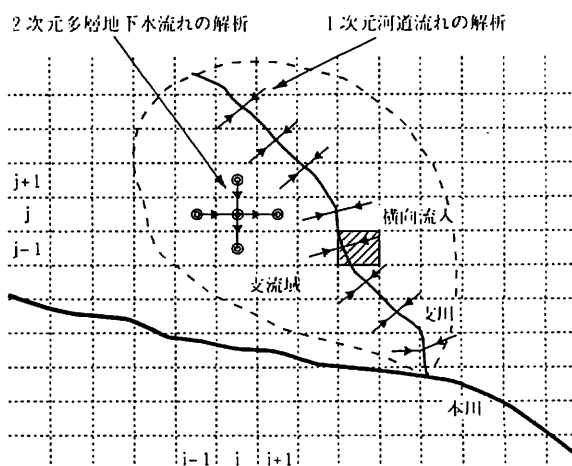
今後、農地や山林が市街地に転換され、都市化がさらに進むと予想されている。

2.2 水・熱循環解析モデルの概要^{1), 2)}

水・熱循環解析に用いたモデルは分布型モデルであり、様々な水・熱輸送現象をモデル化している。図ー3に本解析モデルが対象としている輸送過程を示している。水循環過程としては、降雨、蒸発散、表面流出、窪地貯留、中間流出、地下水流、飽和・不飽和の浸透などの他に、人工の水循環過程である、上水、工業用水、農業用水の導入、地下水の揚水、雨水浸透施設からの浸透、下水、雑排水の河川への放流などを考慮している。一方、熱輸送過程については、日射、長波放射、顕熱、潜熱、土壌への熱伝導、人工排熱を対象としている。

計算メッシュ内の混在化した土地利用の影響は、各土地利用の面積占有率で重み付けをするネスティング法により考慮した。土地利用は、まず3種類(水域、土壌一植生域、不浸透域)に大分類し、土壌一植生域はさらに裸地、丈の低い草地または農耕地、丈の高い樹木に細分類した。また、不浸透域は低層都市域と都市キャノピーとに細分類した。

図ー4にモデルの平面構造を示す。河道内の流れは、河川に接するメッシュ毎に算出した流出量をもとに、kinematic wave法により解析した。ま



図ー4 モデルの平面構造

た、地下水流れに関しては、観測結果に基づき、飽和帯水層を3層(1層は不圧帯水層、残りの2層は被圧帯水層)に分割し、層ごとに2次元地下水流れの方程式を解き、地下水位の表面流出に与える影響などを検討できるようにした。

計算では50m正方のメッシュを用い、時間刻みを1時間とした。また、観測結果に基づき、地下水解析の境界を表面流出の境界の外側に設定した(図ー1)。計算期間は1992年から1996年末までであり、1993年のデータを用いてモデルのキャリブレーションを行った。入力データは観測結果を内挿することにより作成した。なお、船橋における年降水量は1993年に1,463mm、1994年に980mm、1995年に1,119mm、1996年にて1,123mmであり、1994年以降の降水量は平年値より少ない。

2.3 計算結果と観測結果との比較

モデルの検証は河川流量と地下水位に対して行った。図-5は海老川中流部に位置する八栄橋流量観測点での日流量を比較したものである。1996年の最大ピーク流量を除けば、出水時、低水時にかかわらず、計算結果と観測結果とは良好な一致を示している。1996年のピーク流量は降雨量に対して大きな値を示しているが、これは1996年においてのみ2地点での降水量データしか入手できておらず、正確な降水量分布を与えていないことによると考えられる。

図-6は1994年と1995年の八栄橋地点における流況曲線の再現性を比較したものである。1994年の結果では濁水流量に、また、1995年の結果では平水流量から濁水流量にかけて差があるものの、広範囲の流量を合理的に算出していると判断される。

前原川市場地点での2年間にわたる地下水位に対して、観測結果と計算結果とを比較したものが図-7である。計算結果は、観測結果を上回る時期があるが、変動パターンを捉えており、本モデルが地下水の流動を再現していると考えられる。

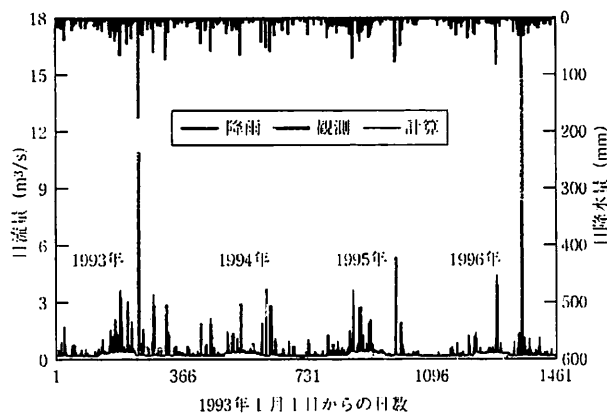


図-5 日流量の時系列の比較 (海老川八栄橋)

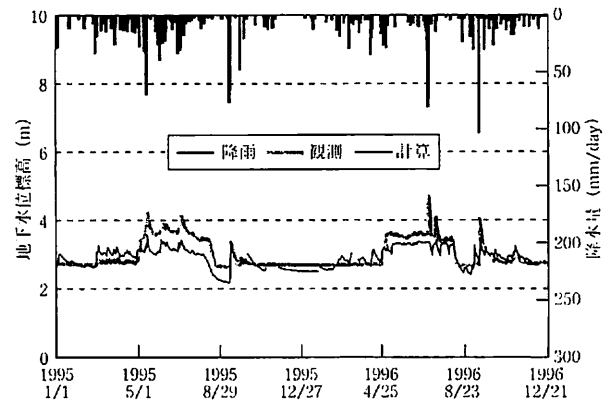


図-7 地下水位の比較 (前原川市場)

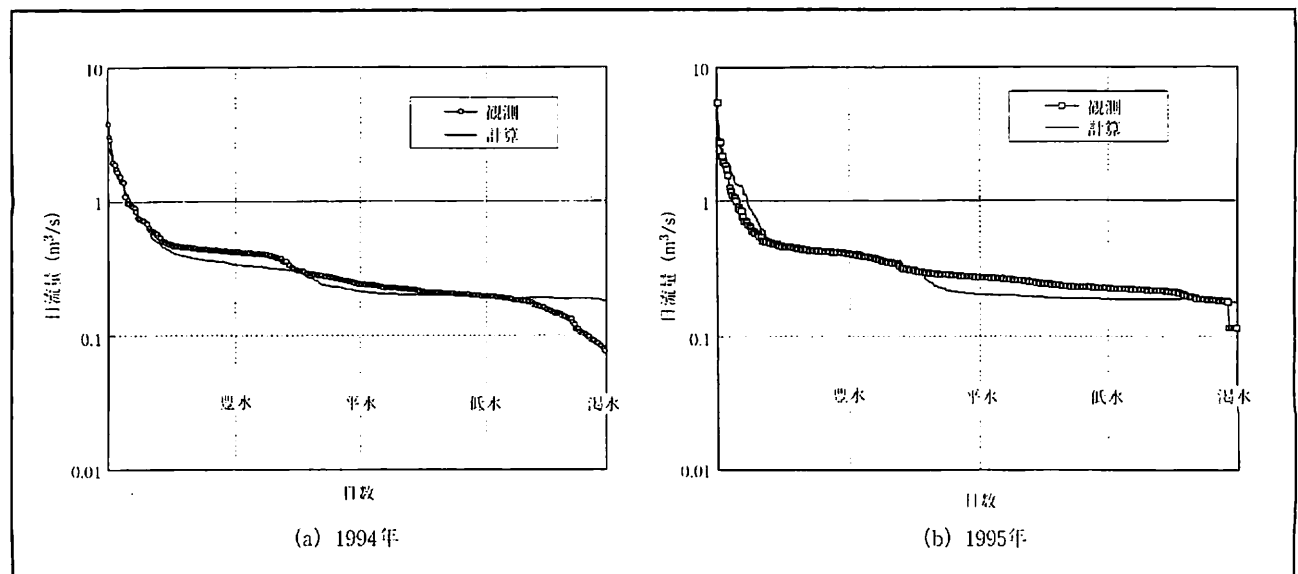


図-6 海老川八栄橋での流況曲線の比較

なお、観測データの不足のため、この流域では熱輸送解析の妥当性を検証していない。

2.4 水収支の解析

水・熱輸送を時間単位で解析した結果をもとに、年間水収支を算出した。例として、1993年における蒸発散量の分布を図-8に示す。水田や畑などの広がる流域の中央部では年間蒸発散量が600mmを越えているが、既成市街地では300mmを下回っている。

流域全体での年間の水収支を、降水量の多い1993年と少ない1994年について検討した結果を図-9に示す。なお、図中の上水は流域外から

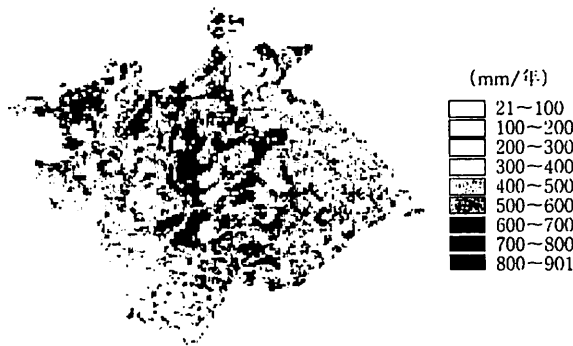


図-8 年間蒸発散量の分布 (1993年)

の上水と工業用水を、不浸透域での揚水も上水と工業用水を含んでいる。また、流域への流入水量と流出水量の差は地下水貯留量の変化分である。この流域では、1993年では、蒸発散、浸透、表面流出(水田からの排水を含む)が年間降雨量のそれぞれ約32%、23%、53%であり、自然流域と比べると浸透量が少なく、表面流出が大きくなっている。河川への雑排水量は中間流出と地下水流出の約4倍になっており、平常時の流量に占める雑排水の多さを示唆している。1994年の降水量は1993年のそれより480mm少なかったが、その影響は表面流出、浸透および表層土壌から不圧地下水への涵養に顕著に表れている。一方、蒸発散への影響は小さくなく、1994年では日射や気温が高かったために蒸発散が活発であったと推定される。

2.5 熱収支の解析

図-10は、1993年の1年間における熱フラックスを地表面での熱輸送過程別に算出したものである。日射に対するアルベド(反射率)は、水田などの農地で小さく都市域では大きいため、正味の日射量は農地で高くなる。また、地表面温度が

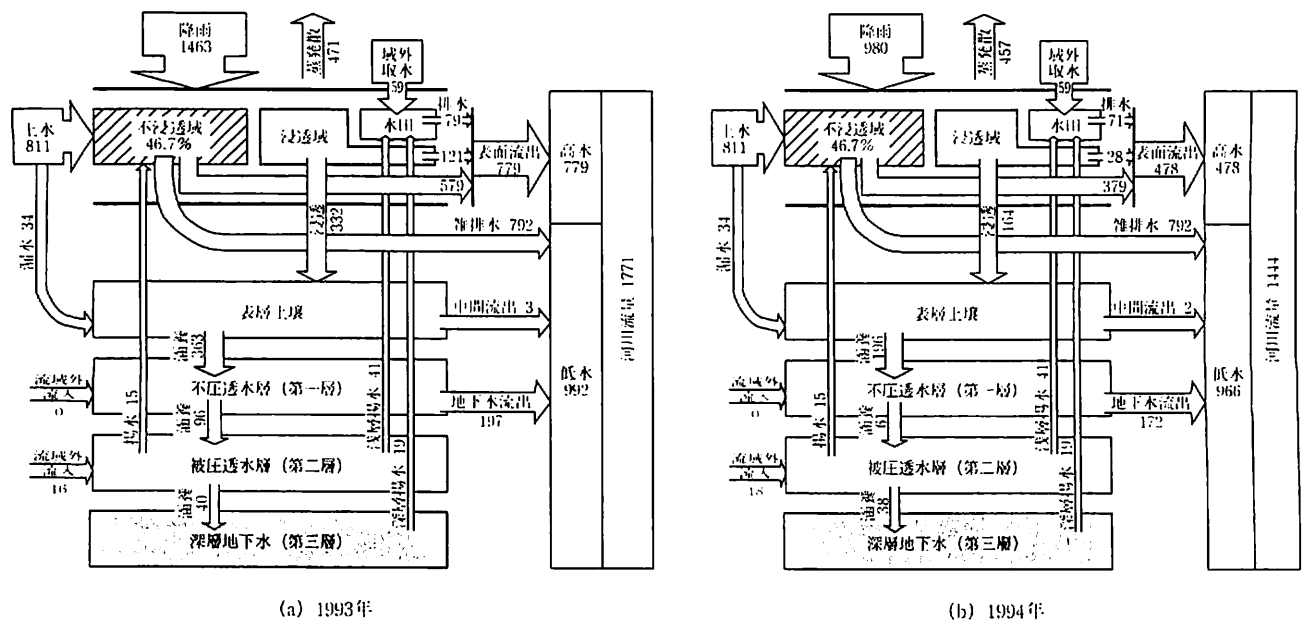


図-9 流域の年間水収支 (単位: mm)

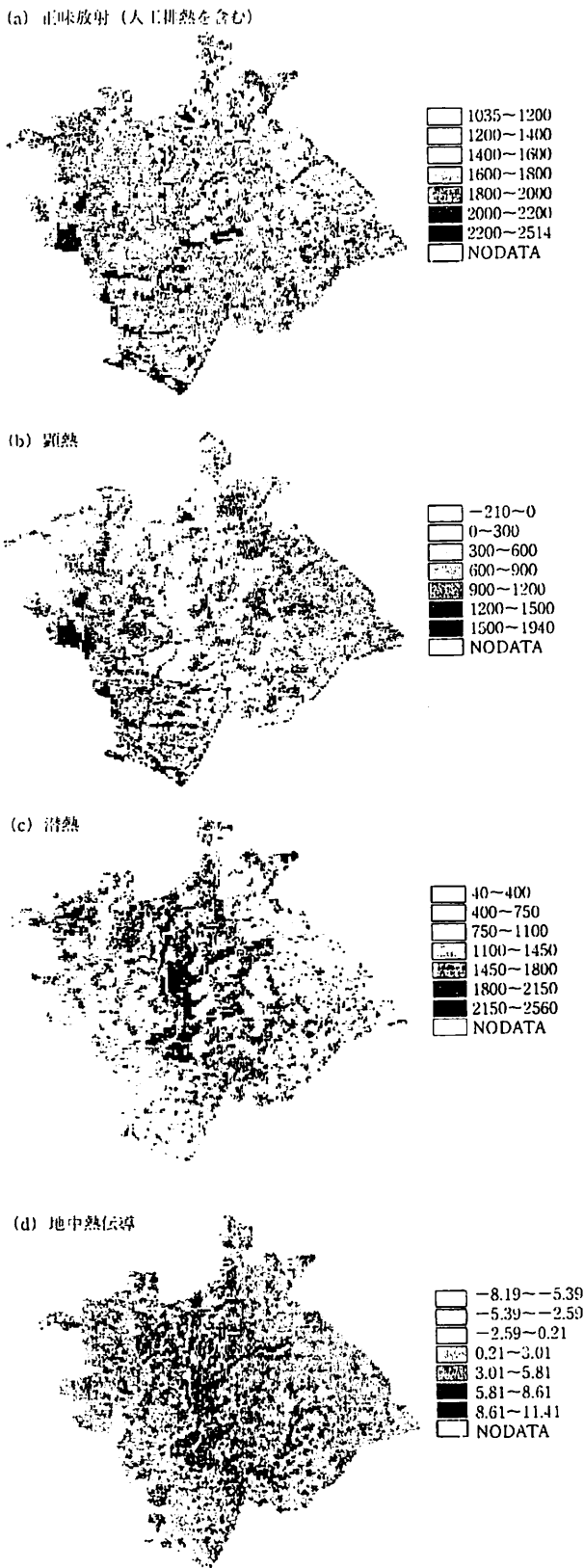


図-10 熱輸送過程別の年間熱フラックス
 (単位: MJ/m²/年)

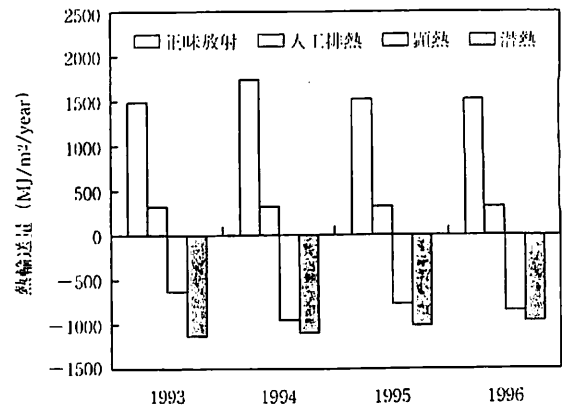


図-11 流域の年間熱収支

高い都市域では長波放射による失熱量が多い。このため、正味の放射量は流域の中央部で大きな値をとる。人工排熱は都市域で発生するが、それは正味の放射に比較すると小さい。このため、水田などが広がる流域の中央部にて正味の放射と人工排熱の合計は大きな値をとる。正味の地中熱伝導は極めて小さく、年間の熱収支の議論では無視することができる(図(d))。このため地表面では、人工排熱を含む正味の放射は顕熱および潜熱輸送に費やされる。顕熱輸送は既成市街地で大きな値を示すが、潜熱輸送は植生域で盛んに行われる(図(b), (c))。

流域全体の地表面での年間熱収支を1993年から1996年までを整理した結果を図-11に示す。この流域全体では、地表面での熱エネルギーの出入りは、正味の放射、潜熱輸送、顕熱輸送、人工排熱の順に行われている。なお、地中への熱伝導の寄与は僅かであり表記していない。降水量の多かった1993年と少なかった1994年とを比較すると、天候に恵まれた1994年の方が正味の放射量が多く、その増分が顕熱に転換されている。このため、1994年には平均気温が1.4℃高く記録されている。

なお、今後の都市化に伴う水循環系の変化や雨水浸透施設の導入が水循環系に及ぼす影響の評価については文献(24)を参照されたい。

3. 牛久沼流域の水収支の観測

3.1 牛久沼流域の概要⁹⁾

牛久沼流域は谷田川、西谷田川、稲荷川の流域から成り、その流域面積は166.4km²である(図-12、表-1)。この流域の地形は、標高

表-1 流域面積

河川名	流域面積 (km ²)
谷田川 (蓮沼川)	53.86 (内 21.19)
西谷田川 (高岡川)	55.51 (内 8.22)
稲荷川	29.54
牛久沼残流域	20.97
牛久沼面積	6.52
合計	166.40

() は支川を表す。

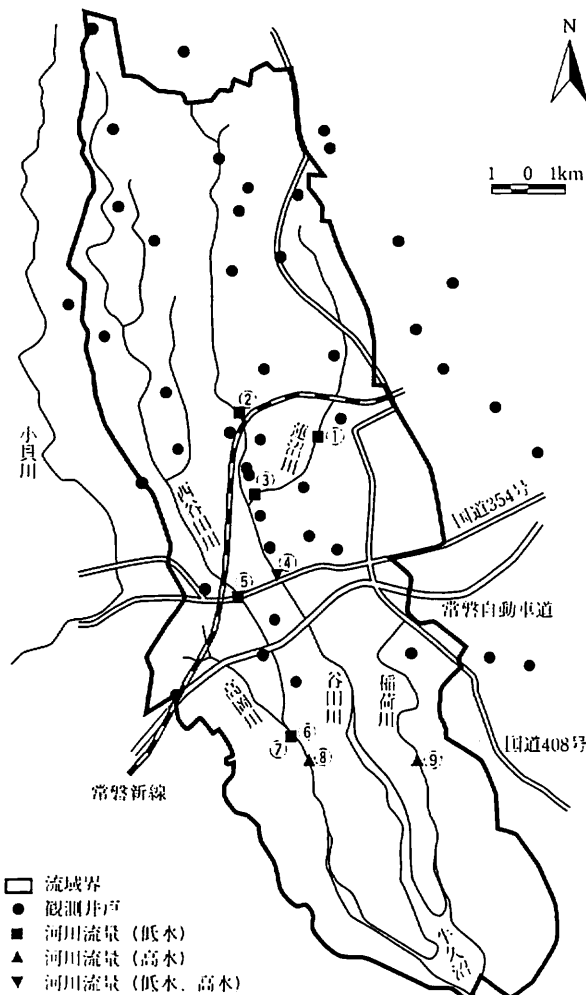


図-12 牛久沼流域と観測地点

20m~30mで北西から南東に向かい次第に標高が低くなる筑波・稲敷台地と谷田川、西谷田川、稲荷川の開析谷によって特徴づけられる。この流域では地下水が盛んに利用されている。主な帯水層として、関東ローム層(深度約2m~5m)、竜ヶ崎砂層(深度約10m程度)、成田層(深度約10m)がある。河川の平常時の流量はローム層と竜ヶ崎砂層からの地下水流出により維持されていると考えられている。谷田川支川の蓮沼川流域では市街化が進んでいる。

牛久沼流域では、平成17年度開通予定の常磐新線に関連した大規模な沿線開発が計画されている。施行主体は都市基盤整備公団と茨城県であり、5地区での開発総面積は1,350haである。また、開発に伴う洪水時の流出量の増大に対し、河川改修や調節池などの流出抑制施設の設置が計画されている。とりわけ、水循環系の保全に配慮し、流出抑制施設として浸透施設(浸透ますと浸透トレンチの組み合わせが主体)を開発地区の戸建て住宅や公共公益施設用地に設置することや、それらによる流出抑制効果を調節池計画や下水道計画に反映した計画が立てられていることは大きな特徴である。

3.2 水文観測計画

土木研究所では、牛久沼流域での水循環や牛久沼への流入負荷を把握するために、平成11年度より水文観測を実施するとともに、流域の自然・社会条件に関するデータの収集・整理を開始している。

平成11年度の水文観測内容は、1) 低水時における谷田川、西谷田川での流量・水質観測、2) 出水時における谷田川、西谷田川、稲荷川での流量・水質観測、3) 地下水位・水質の一斉観測である。観測地点は図-12に示しているが、低水時の観測は7地点(図中の①から⑦地点)、出水時の観測は3地点(図中の④、⑧、⑨地点)、地下水観測は約45カ所の既設の自家井戸

で実施する予定である。地下水の観測地点は、筑波大学が1971年から1978年にかけて実施した観測井戸のうち⁶⁾、現存し、かつ観測許可をいただいたものに、数箇所を追加することにより決定した。また、河川水の水質調査項目は、水温、DO、pH、濁度、電気伝導度、BOD(溶解性、沈降性)、SS、窒素(アンモニア性、硝酸性、亜硝酸性)、リンである。一方、地下水の水質項目は、水温、pH、溶存酸素、電気伝導度、窒素(アンモニア性、硝酸性、亜硝酸性)である。なお、筑波大学大学院地球科学研究科田中正助教授、都市基盤整備公団茨城地域支社、茨城県土木部河川課と連絡をとりながら観測を実施している。

雨量、気温、風向風速などの気象データは、筑波地域の研究所(筑波大学、土木研究所など)、茨城県による観測データ、AMeDASのデータを活用させていただく予定である。

その他のデータとして、標高、土地利用、地質、農業用水、都市用水、工業用水の利用状況、河川や地下水からの取水量、排水系統、人口・世帯数などのデータを収集し、GIS上に順次整理していく予定である。

現在、1回目の地下水調査と低水時の観測を実施し、データの整理を進めている段階である。

4. まとめ

都市河川流域を対象とした水・熱循環解析モデルを作成し、海老川流域に適用してモデルの妥当性を検討した。今後、モデルの改良を進めるとともに、雨水貯留浸透施設や下水処理水の再利用などの水循環改善対策の評価を行う予定である。

筑波地域での観測は開始したばかりである。河川改修や大規模開発の影響を長期間にわたりモニタリングしデータを蓄積することが重要である。今後、関連機関と密接に連携を保ち、調査内容を拡充するとともに水循環系の定量的な把握を行っていく予定である。

謝辞：海老川の観測データをご提供いただいた東京大学生産技術研究所虫明功臣教授、千葉県土木部都市河川課、社団法人雨水貯留浸透技術協会に感謝いたします。また、牛久沼流域での観測のご協力に対し、筑波大学地球科学研究科田中正助教授、都市基盤整備公団茨城地域支社、茨城県土木部河川課に感謝申し上げます。さらに、賈仰文、倪広恒の両氏に図面の作成で多大のご協力をいただきました。末尾ながら深謝いたします。

参考文献

- 1) Jia, Y. and Tamai, N.: Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model, 水文・水資源学会誌第11巻, 第2号, 150-163, 1998.
- 2) 河原能久, 末次忠司, 賈仰文, 倪広恒: 都市河川流域の水循環解析ーモデルの開発と海老川流域への適用ー, 土木技術資料(投稿中).
- 3) 海老川流域水循環再生構想検討協議会: みんなでとり戻そう私たちの海老川ー海老川流域水循環再生構想検討ー, 1997.
- 4) 賈仰文, 倪広恒, 河原能久, 末次忠司: 都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価, 水工学論文集(投稿中).
- 5) 茨城県: 谷田川河川整備計画, 1999.
- 6) 市川正巳, 他8名: 水文循環に及ぼす都市化の影響ー筑波研究学園都市およびその周辺地域の場合ー(総括), 筑波の環境研究, Vol.5, 5-18, 1980.