

堰上流湛水域における滞留特性が 浮遊性藻類の増殖に与える影響の評価 —筑後川上流の湛水域における現地観測による検討— ESTIMATION OF THE EFFECT OF RESIDENCE CHARACTERISTICS ON PLANKTONIC ALGAL DEVELOPMENT IN THE UPPER CHIKUGO RIVER

矢野真一郎¹・齋藤正徳²・井芹寧³・小松利光⁴

Shinichiro YANO, Masanori SAITO, Yasushi ISERI and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生会員 工修 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(同上)

³正会員 工博 西日本技術開発株式会社 環境部(〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁴フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

In recent years, it has been apprehended that water environment in the upper Chikugo River in Hita, Oita, where the river channel forks in three tributaries: the Chikugo, the Kuma and the Shode, become worse. In order to discuss countermeasures for improvement of water environment in this area, field surveys were carried out from 2003 to 2004. It was found that planktonic algae can be developed along the stream in the area due to stagnation of water. In addition, in this study particle-tracking method (Euler-Lagrange method) was applied by using the data of flow by field surveys and numerical simulations to investigate the effect of variation of the river discharge on residence time and planktonic algal development. The results show that there is the strongest stagnancy of water at a reservoir area by the Shimauchi movable weir, and the residence time increase with a decrease in river discharge. It was also confirmed that residence time is equivalent to the time scale of growth of planktonic algae in dry season.

Key words: river discharge, Euler-Lagrange method, planktonic algae, residence time, the Chikugo River

1. 序論

九州北部地方を流域に持つ筑後川は、幹川流路延長143km、流域面積2860km²の九州最大の一級河川である。流域は熊本・大分・福岡・佐賀の4県から構成されており、流域内には107万人もの人々が居住している。筑後川の上流部はアユの生息域として有名であり、山地溪流の景観を示し、中流部では典型的な瀬と淵が存在し、中州や石原が発達している。また、下流部においては高水敷に多くの河川利用施設(公園・グランド等)が存在し、多くの住民に親しまれている。そして、上流部と中流部の境目である大分県日田市を通過する一帯は地元では「三隈川」と呼ばれ、特に、日田市中央部の温泉街にかかる区間は、5月から10月にかけて行われる鵜飼い見物のための屋形船で有名であり、川開き観光祭など河川を活用した祭・イベントも多数あり、“水郷日田”のシンボルとして地元にとって大きな観光資源となっている。

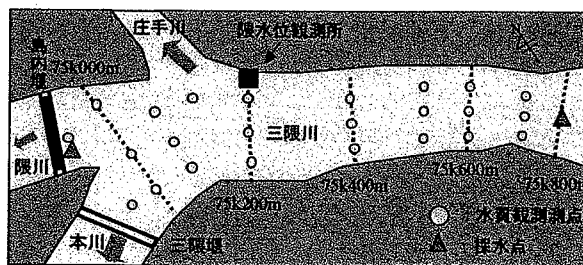


図-1 対象領域と水質観測の測点

一方、この水域は筑後川(三隈川)が、本川・隈川・庄手川の三川に分岐する部分の上流側に位置しており(図-1)、分岐直後に本川で越流式の固定堰(三隈堰)が、隈川にアンダーフロー式の可動堰(島内堰)が、庄手川に自然石の敷石による固定堰(庄手堰)が設けられることで、湛水域が形成されている。

近年、この水域に関して地元日田市や周辺地域の住民や観光産業関係者などから水質改善の強い要望が出され

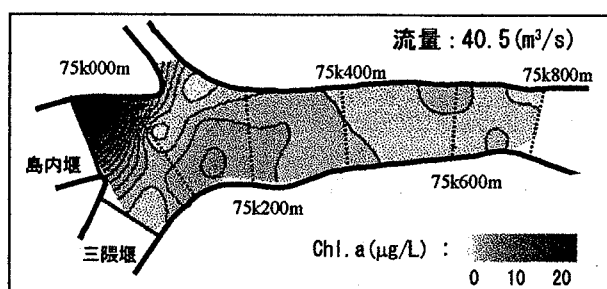


図-2 7月27日のChl. a濃度分布図(水表面下0.5m)

ている。しかしながら、過去の水質調査等の結果によると、BODやSSなどの水質項目は概ね環境基準A類型を満足しているように、深刻な水質汚濁は見られていない¹⁾。ただし、視覚的な問題として、ゴミや泡の浮遊、河床の礫と巨石や河岸沿いに繁茂した大型の水草に浮泥が堆積すること、河川水の透明感の欠如などが恒常的に見られる。したがって、憩いの場や観光資源としての景観上の改善や、鵜飼いの場としてのアユの生息環境保全という高度な水環境の改善が住民等により要望されていると考えられる。

そこで、同湛水域における水環境の保全・改善策を検討することを最終的な目的として、流動構造と水質構造を把握するために現地観測を実施した。そして、図-1に示す観測測点において多項目水質計を用いて行った2004年夏季(7月27日)の水質観測結果によると、水面下0.5mにおけるクロロフィルaの水平分布図(図-2)から、島内堰の上流域のみでクロロフィルaが高く、20µg/Lを超えていることが分かった²⁾。また、同日に行った流下藻類調査結果によると、島内堰直上において藍藻類の*Microcystis* sp、*Chroococcus* spや、表層集積性大型鞭毛藻の*Euglena* sp.などの浮遊性藻類が検出された。そして、これらの浮遊性藻類を落射蛍光顕微鏡で観察したところ、細胞内色素が豊富であったことから、これらの活性化した浮遊性藻類が島内堰上流域におけるクロロフィルa増加の主要因と考えられた。

また、島内堰上流域で浮遊性藻類が活性化する要因として、平常時では、堰体長100.5mの島内堰はゲートを全閉しており、島内堰の両脇に位置している10m程度の魚道を兼ねた水路からのみの流出となっており、島内堰から流出する流量は少なく、島内堰上流域は停滞水域となっていることが考えられる。

そこで、本研究では湛水域内における流動構造の現地観測結果と平面2次元河川流シミュレーションの計算結果をもとに、河川流量の変化が湛水域の滞留特性に与える影響を把握することを試みた。また、流量に応じた流動構造の変化による滞留時間の変化が堰直上における浮遊性藻類の増殖とどのような関係があるかを調べた。

2. 湛水域の流動構造と流下藻類の動態について

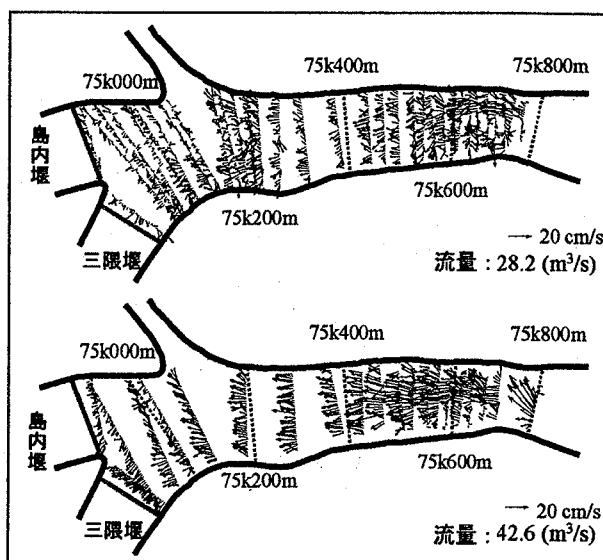


図-3 水深平均流速ベクトル(上:流量28.2m³/s, 下:流量42.6m³/s)

(1) 対象領域について

対象領域は三川分岐後の堰(三隈堰・島内堰・庄手堰)直上から上流に向かって約1kmの区間である(図-1)。湛水域の面積は0.18km²、容積は43万m³、平均水深は2.4mである。三川の分派比は、現地調査結果³⁾より、本川:限川:庄手川=7:1:2となっていた。また、観測領域の上流に位置する小沢流量観測所での流量(以下、流量)は、1995年から2004年の10年間平均値で、渇水流量(19.1m³/s)、低水流量(22.0m³/s)、平水流量(26.0m³/s)、豊水流量(34.3m³/s)である。また、低水流量以下の流量変動が小さく、非常に安定している。これは、昭和43年に筑後川上流域に位置している下笠、松原両ダムの建設に関する基本計画の一部変更に伴い、建設省(現:国土交通省)、大分県、日田市の三者において交わされた覚書により、限水位観測所(図-1)において日平均19m³/sを下らないという事項が確認されており、渇水時においても17~19m³/s以上の流量が確保されているためである³⁾。

(2) 湛水域の流動構造

a) 現地観測

2003年の1月16、17日の両日、7月10日、ならびに12月16日に超音波ドップラー流速計(以下、ADCP)(Workhorse ADCP 1200kHz、RD-Instruments社製)1台を使用し、観測船の船首にADCPとDGPSを設置して、おおむね20~50mの間隔で測線を設定し曳航観測を行った。観測時の流量は、1月16、17日、7月10日、ならびに12月16日について、それぞれ24.3m³/s、28.2m³/s、42.6m³/s、23.2m³/sであった。

次に、ADCP曳航観測結果として、流量42.6m³/s(7月10日)と流量28.2m³/s(1月17日)における水深平均流速ベクトル図を図-3に示す。流量が42.6m³/sと28.2m³/s

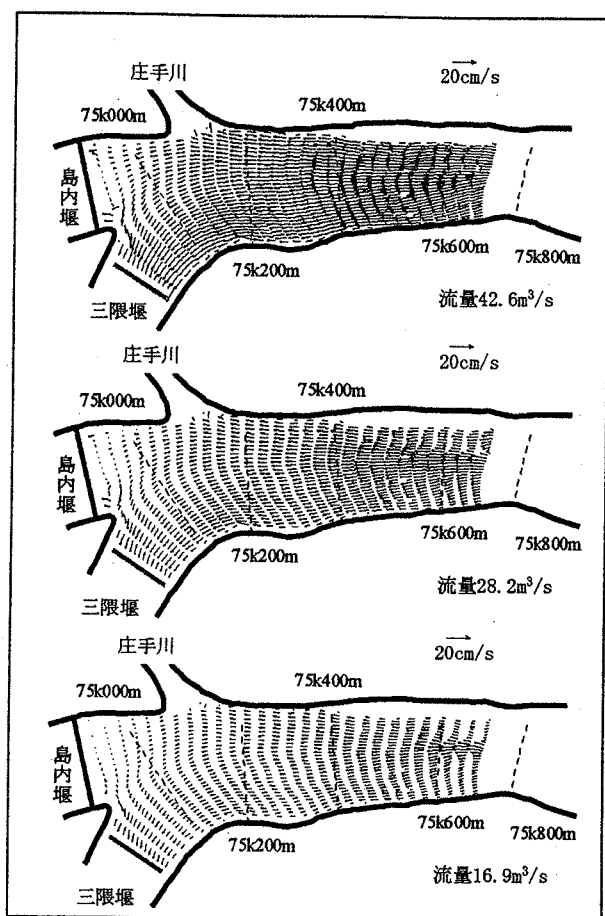


図-4 2次元河川流シミュレーション計算結果(上:流量42.6m³/s, 中:流量28.2m³/s, 下:流量16.9m³/s)

の両方の場合において、島内堰上流域では流れが弱く、停滞していることがわかる。また、流量が28.2m³/sのときに75k600m付近の右岸側で流速が大きく、逆に左岸側では上流向きの流れが発生し水平的な渦構造が生じているのが分かる。そして、流量が24.3m³/s(1月16日)、23.2m³/s(12月16日)の場合でも同様な水平的な渦構造が発生していたので、流量が28m³/s以下になると湛水域上流域で渦構造が発生すると思われる。このように水平的な渦構造が発生する原因は、湛水域の上流で河川が蛇行しているため、流量が減少すると湛水域上流の75k600m付近で地形により主流軸が右岸側に移動するためである。

b) 平面2次元河川流シミュレーション

ADCP 曳航観測結果を補足する目的で、4回行われたADCP 曳航観測時の流量に加え、流量が16.9m³/sから62.0m³/sまでの計15ケースについて、平面2次元河川流シミュレーションを行い、湛水域の水平的な流動構造の再現を試みた。なお、地形データはADCP 曳航観測から得られた水深データを使用し、座標系は一般曲線座標系を用いた。格子間隔は、 $\Delta x=6.3\text{m}$ (流軸方向)、 $\Delta y=1.6\text{m} \sim 3.4\text{m}$ (横断方向)としている。なお、計算には、長田⁴⁾による一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析プログラムコードをベースに使用した。

流量が42.6m³/s、28.2m³/s、ならびに16.9m³/sの場合の

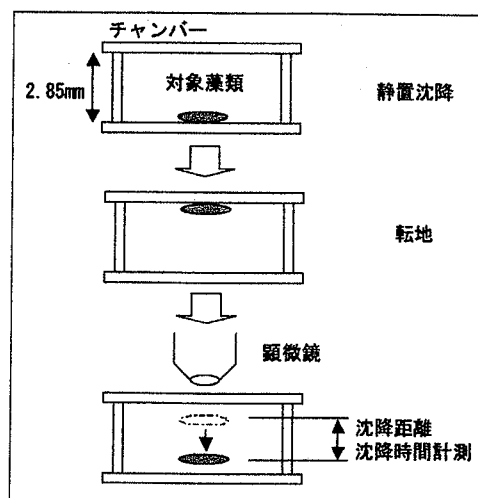


図-5 単細胞藻類の沈降速度測定方法

計算結果を図-4に示す。湛水域上端より上流の詳細な地形データがなかったことにより上流端付近の再現性が悪く、ADCP 曳航観測結果(図-3)と比較して75k600mより上流域の流動構造を再現できなかったが、流量が42.6m³/sと28.2m³/sの場合の計算結果については、75k600mより下流域では観測結果と概ね一致していた。また、流量16.9m³/sでは水深が浅くなるため、島内堰の右岸側水路からの流出が無くなり、島内堰上流の右岸側で止水域が発生している様子が分かる。なお、本研究は島内堰上流域を含めた湛水域下流域の滞留特性を把握することを目的としているため、75k600mより上流において観測と計算で流動構造が一致していないことは本研究の検討には大きく影響しないと思われる。

(3) 流下藻類の動態について

2004年7月27日に図-1に示す湛水域上端と島内堰直上の2カ所の採水点において表層水を採水し、ホルマリン固定した。その後、試験室に持ち帰り、各試料を遠心分離器(3,000rpm, 10min)で濃縮後、罫線入り計数板に分取し、位相差顕微鏡を用いて流下藻類の計数を行った。その結果によると、島内堰直上では活性化した浮遊性藻類が多く確認されたが、流下藻類のうち付着性藻類は流下に伴い1,007→440cells/mLに減少していた。このことから、付着藻類量が湛水域内を通過する過程で減少する原因を把握することを試みた。まず、沈降による減少が考えられることから、湛水域上端で検出された付着性藻類のうち単細胞の *Cymbella* sp. と群体の *Homoeothrix janthina* の沈降速度を測定した。まず、単細胞藻類の沈降速度測定方法については、図-5に示すように上下方向から検鏡可能な厚さ2.85mmのチャンバー内に付着藻類を含んだ試料を注入し、底部に沈殿安定するまで静置した。沈降確認後180度反転し、チャンバー内の藻類を検鏡により追跡することにより沈降距離および沈降速度を計3回計測した。測定にあたっては、あらかじめ顕微鏡の鉛直移動つまみの回転角度と鉛直移動距離の関係

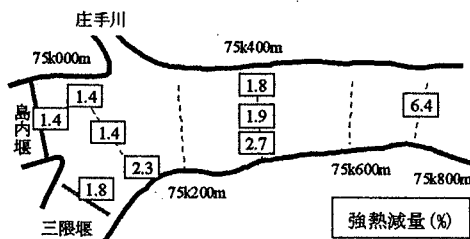


図-6 湛水域内の強熱減量の平面分布
(調査日: 2000年8月9～10日)

を求め、一定時間のつまみの回転数および回転角度から移動速度を算出した。次に、群体藻類沈降速度測定方法については、現地の石礫から剥離採取した付着藻類群体を、1mL 駒込ピペットを用いイオン交換水を満たした100mL メスシリンダーの上端にできるだけ攪乱が起きないように注入した。沈降速度が安定した段階で、シリンダー側面より目視により懸濁物沈降距離および沈降時間を3回以上測定した。計測後、測定対象の沈降懸濁物を駒込ピペットで採取し、検鏡により群体の組成を確認した。

まず、単細胞の *Cymbella* sp. ($75 \times 18 \mu\text{m}$) の沈降速度は $282 \mu\text{m}/\text{min}$ となった。湛水域内の容積を湛水流量 ($19.1 \text{ m}^3/\text{s}$) で割ることで得られる湛水域の平均通過時間スケールは約6時間であり、この間に単体の *Cymbella* sp. が沈降する距離は約0.1mとなった。したがって、湛水域の平均水深が2.4mであることや、*Cymbella* sp. は湛水域内で検出された流下藻類の中で比較的大型な珪藻類であることを考えると、単体で湛水域に流入する付着藻類が湛水域を流下する過程で沈降により減少する割合は非常に少ないと思われる。また、浮遊性藻類の *Cyclotella* sp. ($\phi 2.5 \mu\text{m}$) 単体についても同様な手法で沈降速度を測定してみたところ、 $78 \mu\text{m}/\text{min}$ とかなり小さな値を示した。

次に、群体の *Homoeothrix janthina* ($500 \mu\text{m}$) の沈降速度については、 $10 \text{ cm}/\text{min}$ と大きな値が得られた。これより、群体で流入してくる付着藻類は流速の低下により沈降し湛水域上端付近に堆積するものと思われる。

また、図-6に示す2000年8月9～10日に行われた底質調査結果(提供: 国土交通省筑後川河川事務所)によると、上端付近が湛水域内で最も強熱減量が高く、湛水域に流入してきた群体の藻類が堆積していたものと考えられる。そして、75k400mの流心では河床に付着している藻類が $562, 481 \text{ cells}/\text{cm}^2$ (珪藻類が99%以上)であり、流速が大きい湛水域上端の $73, 180 \text{ cells}/\text{cm}^2$ と比較してかなり多く、流速の低下により定着する付着藻類が多くなったと考えられる。次に、写真-1に示すように75k600m左岸側付近の水深1m程度の領域では表層まで水草が繁茂していることから、懸濁物のトラップおよび水草表面の付着藻類の増殖が生じているものと考えられる。以上により、湛水域に流入してくる流下プランクトンは水草に付着、群体は湛水域上流域でも沈降・堆積する割合が高く、その下流でさらに流速低下により

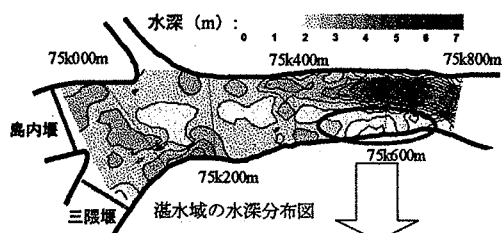


写真-1 75 k 600左岸側において表層まで水草が繁茂している様子

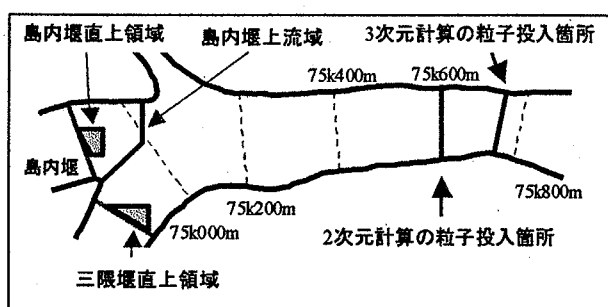


図-7 粒子追跡計算の概要

定着する付着藻類も多いと考えられる。また、湛水域を流下する過程において沈降による単細胞のプランクトンの減少が見られる程の流下時間スケールを持っていないことが分かった。

3. 流量の増減に伴う湛水域の滞留特性の変化が浮遊性藻類の増殖に与える影響

(1) 粒子追跡計算の概要

停滞傾向が強い島内堰上流域で浮遊性藻類の増加が確認されたが、流量の増減に伴い湛水域の滞留特性がどのように変化するかを把握するために、ADCP 曳航観測データを使用した3次元の粒子追跡計算と、平面2次元河川流シミュレーションの計算結果を用いた2次元の粒子追跡計算を行った。

ADCP 曳航観測データを使用した3次元の粒子追跡計算に使用する流速データは、以下の手順で作製された。まず、離散的なADCP観測データをIDW(Inverse Distance Weighted)空間補間によりスタッガード格子上に内挿した。その後、それら格子上的流速データが連続条件を満足するようにマスコンモデル⁵⁾により修正した。

粒子追跡計算には、オイラー・ラグランジュ法による3次元粒子追跡計算コード⁶⁾をベースに使用した。水平方向の渦動拡散係数にはSGSモデルを採用し、3次元粒子追跡計算の場合には鉛直方向の渦動拡散係数は $0.0022 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

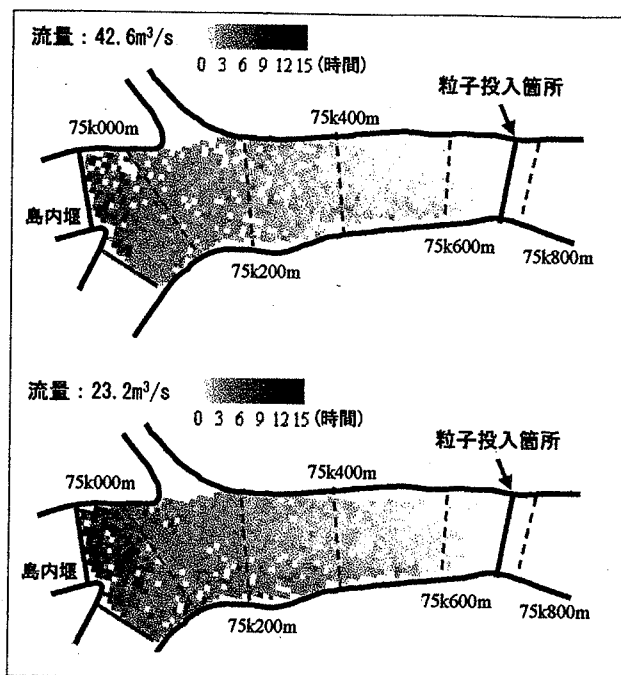


図-8 表層の平均年齢の分布図(上:流量42.6m³/s、下:流量23.2m³/s)(3次元計算)

(2) 計算結果

まず、ADCP 曳航観測データを使用した3次元の粒子追跡計算結果を示す。図-7に示す粒子投入箇所から1分毎に約130個ずつマーカー粒子を流し続け、湛水域に存在する粒子がほぼ均等になるまで計算した。それらの粒子全てについて投入されてからの経過時間を表す年齢を求め、各計算メッシュ内に存在する粒子の年齢を平均することにより算出した平均年齢を求めた。なお、格子間隔は水平方向10m、鉛直方向1mとした。

流量が42.6m³/sと23.2m³/sのときの表層(水深0mから1mまで)における平均年齢の分布図を図-8に示す。流量が42.6m³/sのときは、島内堰上流域で他の2つの堰直上に較べてやや高い値を示し、図-7に示す島内堰直上領域では表層から底層までの全体で平均年齢は約6時間となった。また、流量が23.2m³/sまで減少すると、流量42.6m³/sと比較して、特に島内堰上流域において平均年齢の増加が著しく、図-7に示す島内堰直上領域では平均年齢は約13時間に増加した。

次に、平面2次元河川流シミュレーション結果を用いた2次元粒子追跡計算について説明する。なお、平均年齢を求める方法において、3次元の場合と異なる点は以下の通りである。粒子投入箇所は図-7に示す75k600m付近のライン上であり、1分毎に約50個流し続けた。また、格子間隔は3mとした。図-7に示す島内堰直上領域と75k200mから75k600mまでの領域における平均年齢の流量に対する変化を図-9に示す。75k200mより上流の領域に対して島内堰直上領域の方が、流量の減少に伴う平均年齢の増加が大きくなっている。また、3次元計算

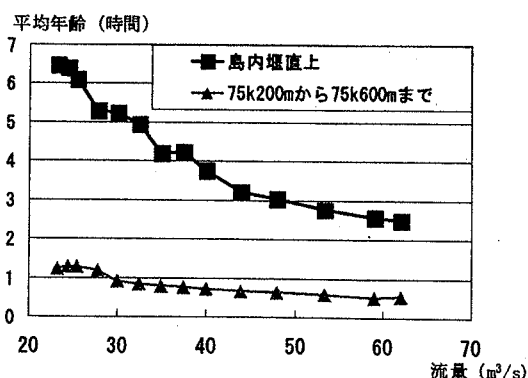


図-9 流量と平均年齢の関係(2次元計算)

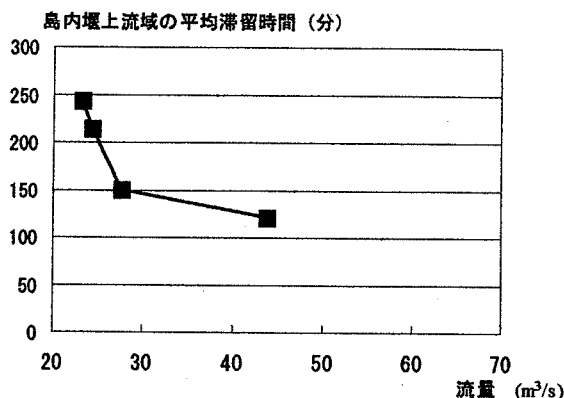


図-10 流量と平均滞留時間の関係(3次元計算)

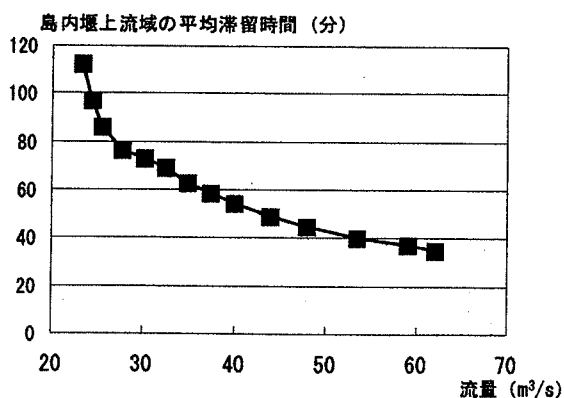


図-11 流量と平均滞留時間の関係(2次元計算)

より得られた島内堰直上の平均年齢と比較するとおおよそ半減している。これは、3次元計算と2次元計算の違いによるものと推測される。

次に、流量の増減による島内堰周辺の滞留特性の応答を把握するために、図-7に示す島内堰上流域に3次元計算では約8,200個、2次元計算では約5,800個のマーカー粒子を均等に配置し、それら粒子の初期配置領域内における残存率の時間変化である残余関数を時間積分することにより算出した平均滞留時間を求めた。

まず、4回行ったADCP 曳航観測結果を用いた3次元計算より得られた流量と平均滞留時間の関係を図-10に示す。流量が減少するに従い平均滞留時間が大きくなり、滞留傾向が強くなることが分かる。また、島内堰上流域に均等に配置された約8,200個の粒子が、島内

堰と三隈堰の両方から流出する割合はおおよそ1:1となっていた。次に、平面2次元河川流シミュレーション結果を用いた2次元計算による結果を図-11に示す。3次元計算と同様な傾向を示している。また、2次元計算より得られた流量 $16.9 \text{ m}^3/\text{s}$ のときの平均滞留時間は217分であった。3次元計算と2次元計算からそれぞれ得られた平均滞留時間の関係から、このときの実際の平均滞留時間も2倍の7時間程度になることが予想される。また、島内堰上流域の右岸側の止水域ではさらに停滞することから、局所的に平均滞留時間が日スケールになることが考えられる。

以上の計算結果より、湛水域内における粒子の移動のパターンは以下になる。豊水流量程度では、湛水域上端から庄手川分流後の75k000m付近までの区間を2～3時間で流下する。それら粒子の一部が島内堰上流域に流入し、2～3時間停滞した後に流入した粒子の約半数が三隈堰から流出する。また、流量が低下すると、島内堰上流域で粒子が停滞する時間が大幅に伸びる。

(3) 浮遊性藻類の増殖について

上述の計算結果を藻類調査の結果と照らし合わせてみた。*Microcystis* spと*Chroococcus* spの湛水域上端における細胞数(135 cells/mL)が、島内堰直上での細胞数(157 cells/mL)へ増加するのに要する時間を、各藻類の比増殖速度を用いて計算したところ、5～6時間程度となった。これは、藻類調査時の流量 $40.5 \text{ m}^3/\text{s}$ に近い流量での計算結果より、湛水域上流端から島内堰直上まで流下するのに要する時間と同程度である。したがって、この浮遊性藻類の増殖は上流端から流下する間に行われたと推定される。

次に、過去10年程度の間に夏季(6月～9月)における日平均流量が $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 未満と $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 未満を記録した日の積算日数を図-12に示す。2002年や1994年のような渇水年の場合には、湛水域内の滞留傾向が非常に強くなっていたと推測される。特に、1994年においては、流量が $20 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回る期間が2週間続いていたことから、島内堰上流右岸側の停滞水域では浮遊性藻類が増殖可能な時間スケールにまで滞留時間が増加していたと考えられる。したがって、このような状態が長期間続く場合には、河川上流域においても浮遊性藻類が増殖し、水質障害を引き起こす可能性があることが示唆された。

4. 結論

筑後川上流の堰湛水域において、ADCP 曳航観測データを使用した3次元粒子追跡計算と平面2次元河川流シミュレーション結果を用いた2次元粒子追跡計算より、以下の滞留特性が把握できた。

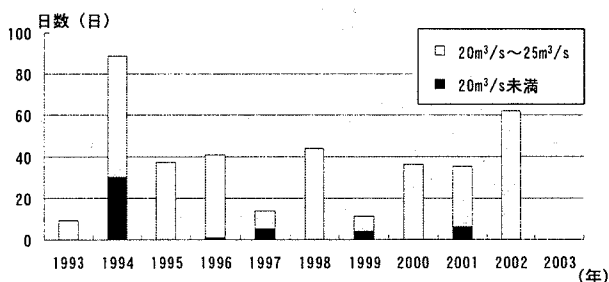


図-12 夏季(6月～9月)におけるそれぞれの流量の積算日数

- (1) 島内堰上流が最も停滞傾向が強く、流量が減少すると湛水域全体で平均年齢の増加率が高くなり、特に島内堰上流域で顕著であった。
- (2) 渇水時では島内堰上流右岸側に止水域が発生し、浮遊性藻類が増殖可能な滞留時間を持ちうる。

これらの結果は、河川上流域においても浮遊性藻類の増殖が起こり得ることを示したものであり、高度な水環境レベルが求められる同水域において維持流量の設定に配慮が求められることを示唆している。また、水草や付着藻類・浮遊性藻類は、河川水中の栄養塩を吸収する一方、枯死分解時には栄養塩を放出し、湛水域の水質構造に影響を及ぼしている。今後は、湛水域内の栄養塩動態を把握し、堰の流動構造の調整や水草の管理等による水環境保全策の検討を行う予定である。

謝辞：国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所には、本研究の参考資料等を頂戴した。現地観測において、日田漁業協同組合の江藤恵吉理事、ならびに江藤英二専務理事には観測船の備船にご協力いただいた。また、九州大学工学府環境流体力学研究室の博士3年齋田倫範氏をはじめ学生諸氏にも観測作業にご協力いただいた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 株式会社建設技術研究所：日田地区水環境調査検討業務報告書，2000。
- 2) 矢野真一郎，齋藤正徳，井芹寧，高木太志，中村健一，山本隆利，小松利光：堰による湛水域の流動構造が滞留特性や水質構造へ与える影響-筑後川上流域における現地観測による検討-，水工学論文集，第49巻，pp.1525-1530，2005。
- 3) 株式会社建設技術研究所：日田地区水環境調査検討概要報告書，2001。
- 4) 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析プログラム，水理公式集例題プログラム集平成13年度版，土木学会，2002。
- 5) Shermann, C.A.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, *J. Appl. Meteor.*, Vol.17, pp.312-319, 1978。
- 6) 石塚正秀：オイラー・ラグランジュ法による3次元粒子追跡シミュレーション，水理公式集例題プログラム集平成13年度版，土木学会，2002。

(2005. 4. 7 受付)