

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 —

FIELD SURVEYS OF THE EFFECT OF FLOW PATTERNS ON RESIDENCE TIME
AND WATER QUALITY IN THE UPPER CHIKUGO RIVER

矢野真一郎¹・齋藤正徳²・井芹寧³・高木太志⁴

中村健一, 山本隆利⁵・小松利光⁶

Shinichiro YANO, Masanori SAITO, Yasushi ISERI, Futoshi TAKAGI
Kenichi NAKAMURA, Takatoshi YAMAMOTO 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 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 農修 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工修 西松建設株式会社 信楽出張所(〒520-2111 滋賀県大津市上田上桐生町地先)

⁵国土交通省九州地方整備局 筑後川河川事務所(〒830-8567 久留米市高野1-2-1)

⁶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)

Recently, it has been apprehended that the water environment in the upper Chikugo River in Hita, Oita, where the river channel forks in three tributaries: the Chikugo (the Mikuma), the Kuma and the Shode, becomes worse due to the stagnancy of water. In order to provide fundamental informations of 3-dimensional flow structures and temporal and spatial variations of water quality field surveys were carried out from 2003 to 2004. The following relations between the flow patterns and the water quality were found out: (1) the residence time is affected by the existence of horizontal eddy around the riffles, (2) lower discharge can generate the eddy and (3) turbidity and chlorophyll-a are regulated by the river discharge in the ponded area by the Shimauchi movable weir.

Key words: field survey, flow pattern, water quality, phytoplankton, residence time, Chikugo River

1. 序論

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県にまたがり、周囲の山々と調和した緑の美しい景観を持つ上流域と我が国最大の干満差を持つ有明海に注ぐことで特有の汽水域をもつ下流域が見られる。上流域はアユの生息域として有名であり、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、住民や観光客に親しまれている。特に、日田市中央部の温泉街にかかる部分は、鵜飼い見物のための屋形船で有名であり、“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。

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、分岐直後に本川で固定堰(三隈堰)が、隈川に可動堰(島

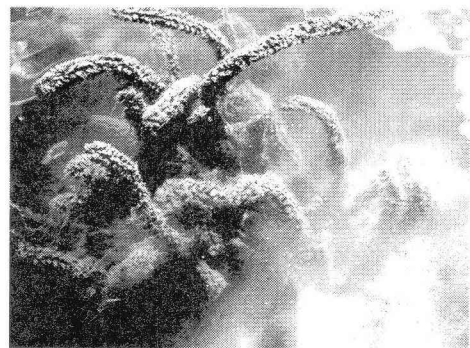


写真-1 水草上に浮泥が堆積している様子

内堰)が、庄手川に固定堰(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ている。しかしながら、過去の水質調査等の結果による

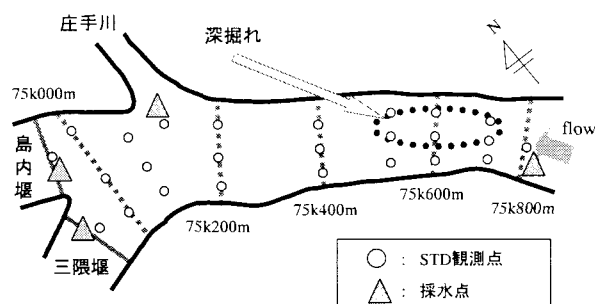


図-1 観測領域と水質観測の測点

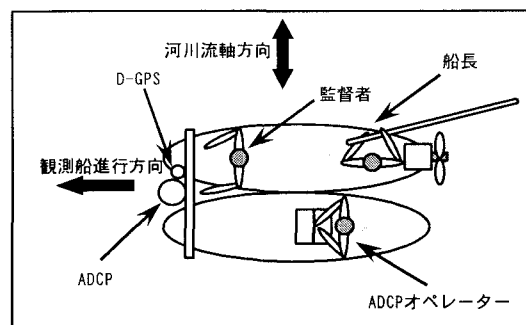


図-2 ADCP 曳航観測概略図

と深刻な水質汚濁は見られていない^{1),2)}。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(写真-1)、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の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、本研究では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、まずは基本的な情報を得るための現地観測を実施し、詳細な流動構造と水質構造の観測結果から、流量の増減に伴う滞留特性の変化が水環境に与える影響を検討した。

2. 現地観測について

(1) 現地観測の対象領域

現地観測の対象領域は、筑後川上流域のうち三川分岐後の堰(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。三隈堰は越流式の固定堰、島内堰は両岸沿いに魚道が設置されたアンダーフロー式の可動堰、庄手堰は自然石による浅瀬状の固定堰である。三川の分派比は、過去の現地調査結果より本川：隈川：庄手川＝7：1：2といわれている²⁾。

(2) 観測概要

2003年1月16、17日の両日、ならびに7月10日に超音波ドップラー流速計(以下、ADCP)(Workhorse ADCP 1200kHz、RD-Instruments社製)1台を使用し流動観測を行った。図-2に示すように、小型漁船2艘を横に連結した観測船の船首にADCPとDGPSを設置して曳航観測を行った。おおむね20～50mの間隔で測線を設定し、断面内の流速分布を測定することで水域全体における3次元の流動構造の把握を試みた。ADCPは、層厚を15cm、層数を40層に設定した。観測船は船外機で推進制御され、航行速度は約1m/s程度であった。各観測日における観測領域の上流に位置する小淵流量観測所での流量は、1月16、17日、ならびに7月10日について、それぞれ23.1m³/

s、28.2m³/s、42.6m³/sであった。これらは、1988年から1997年の10年間平均の低水流量(22.63m³/s)、平水流量(27.28m³/s)、豊水流量(39.94m³/s)と同程度であった。

また、2004年夏季の4日間(7月27日、8月4、11、18日)に多項目水質計YSI6600(YSI ナノテック社製)を使用して図-1に示す測点で水質観測を行った。観測は9時から13時の間に行い、下流端から上流に向かって観測を進めた。観測項目は水温、溶存酸素濃度、pH、電気伝導度、濁度、クロロフィルaの鉛直分布である。7月27日には、湛水域内における藻類の変化形態を調べるため、図-1に示す湛水域上流端、庄手川分流地点、島内堰直上および三隈堰直上の4地点において表層水をポリビンで直接採水し、直ちにホルマリンで固定した。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植物プランクトンの計数を行った。珪藻類については出現した殻数について全て計数を行ったのち、落射蛍光顕微鏡により細胞内色素の有無の確認を行った。

(3) 流動観測結果

ADCP 曳航観測より得られた水深データをもとに湛水域の水深コンター図を図-3に示す。75k600m付近では左岸側の水深が1m程度しかなく、右岸側では水深6mほどの深掘れが存在している。また、75k400mから三川分岐地点までの区間では、中央部の浅瀬により滞筋が2つに分けられている。流量28.2m³/s(1月17日)、42.6m³/s(7月10日)における水深平均流速ベクトル図を図-4に示す。流量28.2m³/sの場合は75k600m付近の右岸側で流速が大きく、逆にその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。また、三川分岐後はほとんど流れがなく、特に島内堰直上域ではほぼ停滞していた。これは可動堰である島内堰が通常は閉じられており、魚道からの流出のみとなっているからである。流量が42.6m³/sに増えると全体的に流速が大きくなり、流量28.2m³/sのときに見られた75k600m付近の渦構造が消滅し、停滞傾向が解消されていた。また、表-1に示す過去の粒度試験結果(提供：国土交通省筑後川河川事務所)によると、停滞傾向に起因して島内堰直上では上

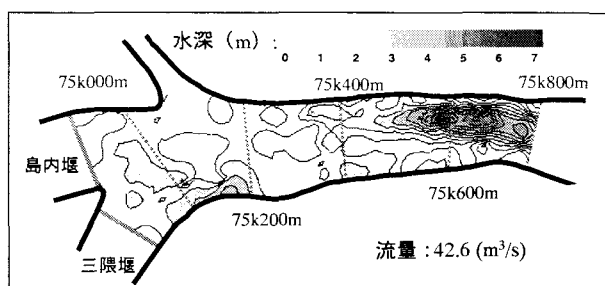


図-3 湛水域の水深分布図

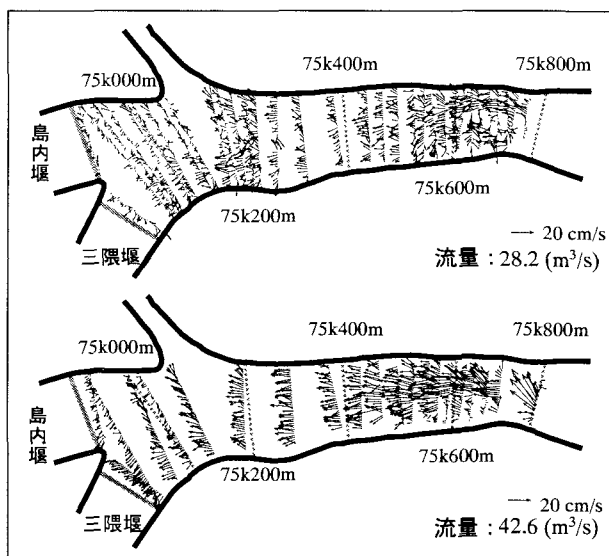


図-4 水深平均流速ベクトル (上: 流量 28.2m³/s, 下: 流量 42.6m³/s)

表-1 粒度分布

		75k000	75k400
右岸	粘土分	8.7	5.2
	シルト分	7.4	5.0
流心	粘土分	12.7	0.4
	シルト分	12.3	0.9
左岸	粘土分	3.1	1.5
	シルト分	3.4	2.3

(%)

流側より粘度・シルト分の割合が増加していた。

次に、流量 28.2m³/s、42.6m³/s における断面直交成分の流速コンター図を図-5 に示す。ここでは、深掘れと浅瀬が確認された 75k600m 付近の断面のみを示した。28.2m³/s のときは、左岸側では水深方向に一樣に逆流となっている。前述の河岸沿いの水草に浮泥が堆積する状況は、湛水域の両岸に見られるが、特に 75k600m 付近の左岸側が顕著であることとの関連性がうかがえる。一方、42.6 m³/s のときは流速が大きくなり、左岸側の逆流域が消滅し、全体的に流下する構造となっていることが確認できる。したがって、流量規模が 28m³/s 程度以下の場合には湛水域内全体で停滞性が強まり、40m³/s 程度以上になると停滞傾向は解消されるようである。

(4) 水質観測結果

流動観測より確認された停滞水域である島内堰直上と湛水域上流端(75k600m)のクロロフィルa、水温、濁度の

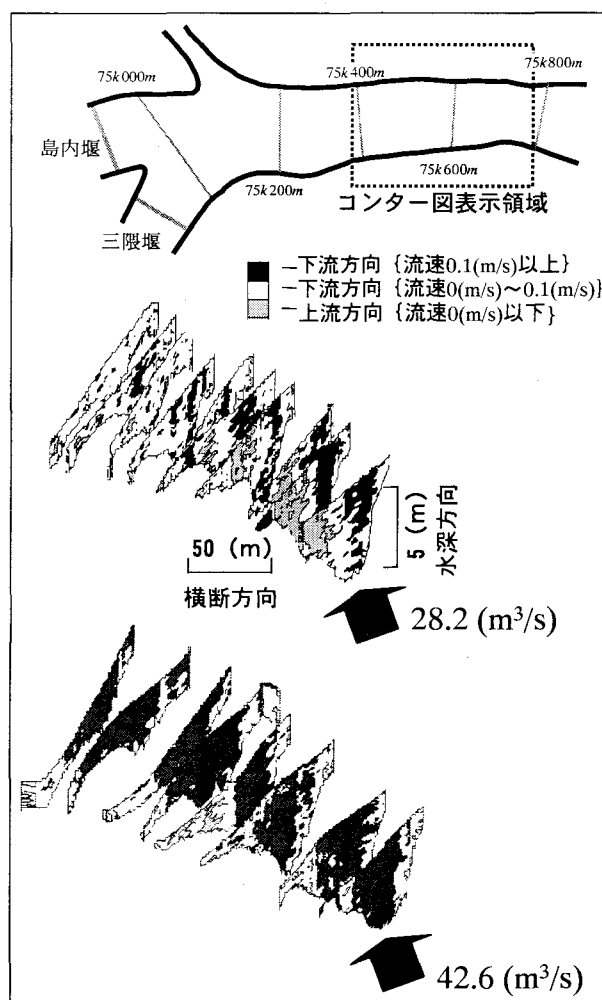


図-5 断面直交流速コンター図 (上: 流量 28.2m³/s 時, 下: 流量 42.6m³/s 時, 負の流速は上流向きの流れを表す)

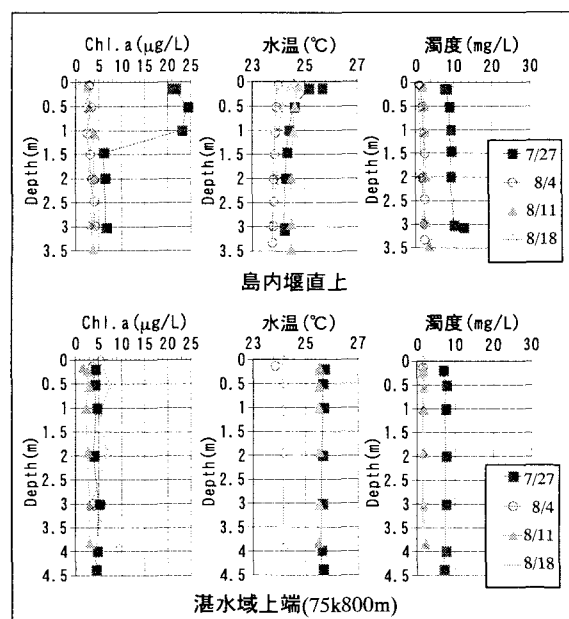


図-6 Chl. a・水温・濁度の鉛直分布 (上: 島内堰直上, 下: 湛水域上端(75k800m))

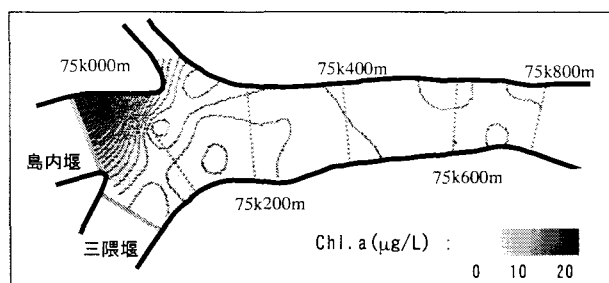


図-7 7月27日のChl. a濃度分布図(水表面下0.5m)

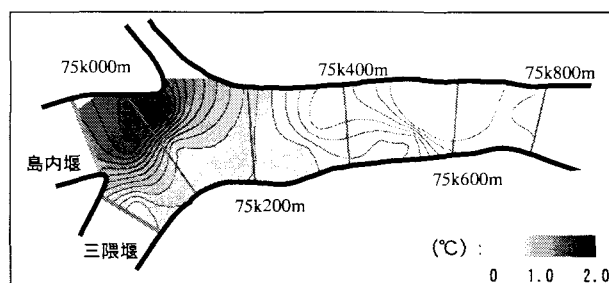


図-8 7月27日の表層と底層の水温差

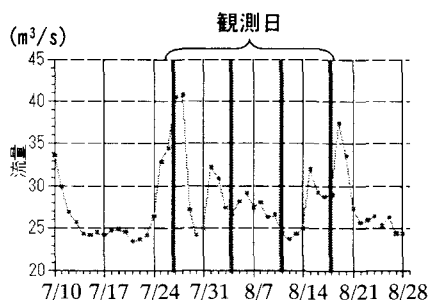


図-9 2004年夏季の流量(小淵地点)

鉛直分布をそれぞれ図-6に示す。各観測日の小淵地点における流量は、7月27日：40.5m³/s、8月4日：25.5m³/s、11日：24.3m³/s、18日：28.9m³/sであった。7月27日において島内堰上流ではクロロフィルaが水表面下1mまで大きな値を示していた。同日の水表面下0.5mにおけるクロロフィルaの水平分布図(図-7)より、島内堰の上流のみでクロロフィルaが高くなっていたことが分かる。また、水温は表層と底層で最大2℃程度の水温差が生じていた。水温差が大きかった7月27日の表層と底層の水温差の平面分布図(図-8)より、島内堰の上流以外は深掘れ部も含めて水温差は小さかった。濁度については、流量が増加した7月27日はやや高い値を示すが、それ以外の日には2mg/L以下の低い値を示している。図-9に2004年夏季の小淵地点における流量変化を示す。島内堰直上で他の観測日と水質構造の異なる7月27日は、7月13日～24日にわたって流量が25m³/s程度で推移したことから、停滞性が非常に強まった状態が以前に続いていたと考えられる。

(5) 藻類調査結果

計数結果を表-2に示す。流下プランクトンとして、藍

表-2 プランクトン調査の結果

(cells/mL)

種 類	名 称	湛水域 上端	島内堰 直上
藍藻	<i>Microcystis</i> sp. & <i>Chroococcus</i> sp.	135	157
	<i>Chamaesiphon</i> sp.	60	
	<i>Homoeothrix janthina</i> (f)	150	52
	<i>Phormidium</i> sp.	1	7
	<i>Oscillatoria</i> sp.		7
	<i>Merismopedia punctata</i>	60	26
緑藻	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	1	13
	<i>Cosmarium</i> sp.	1	
	<i>Scenedesmus</i> spp.	239	183
鞭毛藻等	<i>Trachelomonas</i> sp.		20
	<i>Euglena</i> sp.		10
	不明種		7
珪藻	<i>Achnanthes linearis</i>	1	
	<i>Achnanthes lanceolata</i>	19	16
	<i>Achnanthes minutissima</i>	7	
	<i>Achnanthes crenulata</i>	19	
	<i>Achnanthes</i> sp.	105	
	<i>Asterionella formosa</i> or <i>gracillima</i>	1	
	<i>Aulacoseira varians</i>	90	7
	<i>Aulacoseira distans</i>	1	
	<i>Aulacoseira granulata</i>	15	
	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	22	
	<i>Cocconeis placentula</i>	19	26
	<i>Cocconeis</i> sp.	30	26
	<i>Cyclotella</i> spp.	90	39
	<i>Cymbella ventricosa</i>	30	26
	<i>Cymbella sinuata</i>	4	
	<i>Cymbella tumida</i>	30	
	<i>Cymbella turgidula</i>	22	
	<i>Cymbella turgidula</i> var. <i>nipponica</i>	19	7
	<i>Diatoma hiemale</i>	75	52
	<i>Eunotia</i> sp.		1
	<i>Fragilaria</i> sp.	30	
	<i>Frustulia</i> sp.	4	3
	<i>Gomphonema parvulum</i>	1	
	<i>Gomphonema tetrastigmatum</i>	1	
	<i>Gomphonema</i> sp.	45	52
	<i>Meridion</i> sp.	11	7
	<i>Navicula</i> spp.	344	183
	<i>Nitzschia acicularis</i>		26
	<i>Nitzschia</i> spp.	314	653
	<i>Rhoicosphenia curvata</i>	45	
	<i>Rhopalodia gibba</i>		1
	<i>Stephanodiscus</i> sp.(big)	1	1
	<i>Surirella robusta</i>	1	1
	<i>Surirella</i> sp.	1	1
	<i>Synedra acus</i> or <i>ulna</i>	30	
	<i>Synedra ulna</i>	11	13
原生動物	<i>Paramecium</i> sp.		1
種類数		42	32
総細胞数		2085	1624

(注) fは糸状体数を示す。

藻、緑藻、珪藻類等50種が出現し、湛水域上端地点で2,085cells/mL、島内堰直上地点で1,624cells/mLの現存量が確認され、付着性藻類の沈降除去、および浮遊性藻類の増殖が観察された。ただし、一部の浮遊性藻類の中には、湛水域内で減少する種類も観察され、各藻類別に特徴的な挙動を示すことが明らかとなった。また、湛水域流入藻類として、河川付着藻類起源の付着性藻類と上流の止水域(ダム等)起源と推定される浮遊性藻類の出現が認められた。その概要を以下に示す。

a) 藍藻について

河川付着藻類起源として*Homoeothrix janthina*、*Chamaesiphon* sp.の出現が認められた。*H. janthina*は我が国の代表的付着性藍藻類である。これらの藻類は湛水域上流から堰にかけてそれぞれ150→53cells/mL、60cells/mL

→未検出と大きく減少した。湛水域内流速減少に伴う沈降作用によるものと考えられる。一方、浮遊性藻類の *Microcystis* sp.、*Chroococcus* sp. については、流下に伴って 135 → 157cells/mL と増加を示した。

b) 緑藻について

浮遊性藻類の *Scenedesmus* spp. が優占し、流下に伴い 239 → 183cells/mL とわずかに減少が認められた。一方、浮遊性の高い *Ankistrodesmus falcatus* は 1 → 13cells/mL と増加を示した。

c) 鞭毛藻等について

湛水域上端には鞭毛藻は確認できなかったが、島内堰上流地点で止水性の *Euglena* sp.、*Trachelomonas* sp. がそれぞれ 10、20cells/mL ずつ出現した。

d) 珪藻について

河川流下珪藻については河川付着藻類が剥離したものが多くを占める。今回の調査結果においても、36 種と多種の珪藻類の出現が認められた。珪藻類は流下に伴って、出現種数が 33 種から 20 種に、細胞数が 1,435cells/mL から 1,158cells/mL に減少した。いずれも、湛水域内の流速減少にともなう沈降作用によるものと考えられる。その一方、*Nitzschia* 属のみ、細胞数で 2 倍程度の増加を示した。特に、浮遊性の *N. acicularis* は、堰のみで出現しており、湛水域内で発生・増殖したものと考えられる。

Aulacoseira 属のうち、*A. distans*、*A. granulata*、*A. granulata* var. *angustissima* はいずれもダム貯水池等における代表的浮遊性種であり、上流のダム貯水池(松原ダムや下笠ダム)が起源と推定される。いずれも流入から放流にかけて減少が認められている。ダム放流→河川流下過程における攪乱作用により浮遊性が失われた可能性が高い。

3. 流動構造と水質変動特性に関する考察

(1) 島内堰直上域について

藻類調査における落射蛍光顕微鏡観察により、湛水域上端の流下藻類に比較して島内堰上流で増殖した藻類について、細胞内色素が豊富であることが明らかになった。また、島内堰上流では表層集積性大型鞭毛藻の *Euglena* sp. の増殖が認められた。これらの湛水域で活性化した浮遊性藻類が 7 月 27 日に見られた島内堰直上におけるクロロフィル a 増加の主要因と考えられる。また、島内堰直上域で浮遊性藻類が増殖していた原因の一つとして、7 月 27 日以前に 25m³/s 付近で流量が推移した期間が 10 日間程度と長かったことにより滞留時間が大きい状態が続いていたこと³⁾が考えられる。

次に、2003 年に行った同様な観測データも含めて、流量と島内堰直上域における濁度の相関を図-10 に示す。濁度と流量には強い相関関係があり、流量の減少は滞留時間を大きくすることに加えて、濁度低下に伴い水中の光量子が増加することにより浮遊性藻類が増殖しやすい環境が作られていると考えられる。

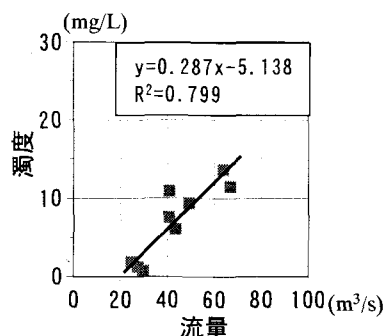


図-10 島内堰直上域における流量と濁度の相関

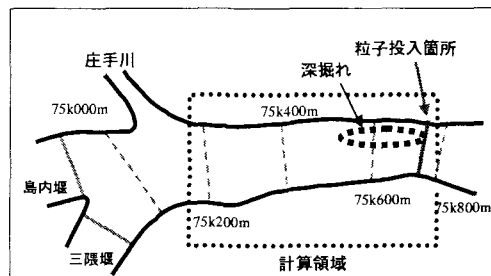


図-11 粒子追跡計算の計算領域

(2) 渦構造の影響について

a) 粒子追跡計算の概要

深掘れ部と浅瀬が存在する 75k600m 付近を中心に湛水域の両岸で水草上に浮泥が堆積するのが見られる。その原因を流動構造の面から把握するために、流量が 28.2m³/s と 42.6m³/s の 2 ケースについて、ADCP による流動観測データを使用した 3 次元粒子追跡計算を行った。計算領域は、図-11 に示す ADCP による観測データが十分揃っていた湛水域上流端から庄手川分流前までの区間とした。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、 $\Delta x=10\text{m}$ (流軸方向)、 $\Delta y=2\text{m}$ (横断方向)、 $\Delta z=0.5\text{m}$ (鉛直方向) のスタッガード格子に内挿した。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⁴⁾により修正した。

粒子追跡計算には、石塚⁵⁾ のオイラー・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、鉛直方向の渦動拡散係数は 0.0022m²/s とした。また、粒子の投入位置は湛水域上流端断面とし、横断方向に 20cm、鉛直方向に 50cm の間隔で均等に配置し、合計 3,711 個の粒子の挙動を計算した。

b) 計算結果

粒子投入から 1 時間後、2 時間後、ならびに 3 時間後の粒子の移動状況を図-12 に示す。まず、28.2m³/s の場合については、粒子投入から 1 時間後と 2 時間後に 75k600m 付近に生じている渦に粒子がトラップされてい

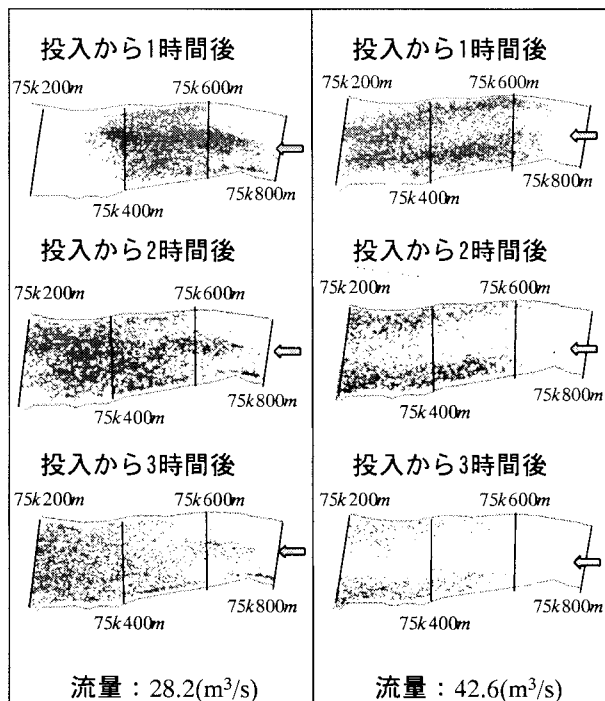


図-12 粒子追跡計算結果(左: $28.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 右: $42.6 \text{ m}^3/\text{s}$)

る様子が分かる。3時間後でも75k600m付近とその左岸側に若干の粒子が残っている。一方、 $42.6 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合では、粒子投入から3時間後では、75k600m付近から全ての粒子が流れ去っている。ただし、75k400m～200mの区間内で両岸沿いに粒子が残っていた。

次に、投入粒子の計算対象領域内における残留率の時間系列を図-13に示す。得られた残留率曲線を時間積分したものを平均通過時間スケールと定義し、各流量に対して計算したところ、 $28.2 \text{ m}^3/\text{s}$ のときが212分、 $42.6 \text{ m}^3/\text{s}$ のときが112分となった。これらは、対象領域容積と流量から得られる滞留時間スケール($28.2 \text{ m}^3/\text{s}$: 121分、 $42.6 \text{ m}^3/\text{s}$: 74分)と比較して1.9倍と1.5倍に相当していた。以上の結果より、流量が小さい時には局所的な流動構造により滞留時間が長くなり、75k600m付近左岸側を中心として水草上に浮泥が堆積しやすい状況が発生しているものと考えられる。

4. 結論

筑後川上流域の日田市内の湛水域において、流動構造と水質構造の現地観測結果から以下の知見が得られた。(1) 島内堰直上の停滞水域において、長期的に流量が少ない状態が続くと、滞留時間の増加と濁度の低下に伴う水中光量子の増加により浮遊性藻類の増殖が起りやすい状況になる。

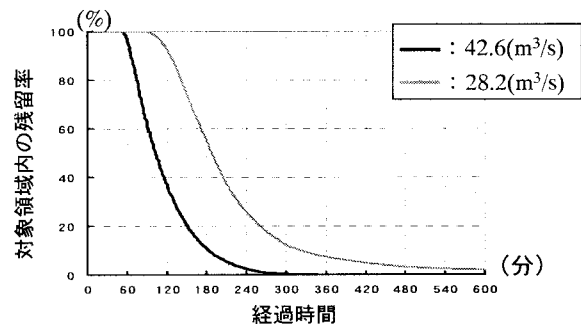


図-13 残留率の時間変化

(2) 流量が小さい時には、75k600m付近に発生する渦構造により滞留時間が長くなり、浮泥が堆積しやすい状況がとくられる。

河川には利水や治水などを目的としてダムや堰などの河川構造物が数多く建設されているが、これまでダムについては水質障害の事例が多数報告されていた。一方、堰については長良川の河口堰における河川水の滞留時間増加による植物プランクトンの増殖や底質の悪化、貧酸素水塊の発達などが報告されている⁶⁾が、上流域の堰については報告事例が少なく、貴重な研究成果が得られたものと考えられる。今後は、より詳細な現地観測データの積み上げによる正確な現象把握を行い、有効な水環境改善策の提案へ繋げていく必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省筑後川河川事務所による筑後川における「筑後川上流河川環境特性検討会」における総合的な調査研究の一環として実施された。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、九州大学工学部環境流体力学研究室の修士2年平島英恵さん、4年生石川泰助君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) 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.
- 3) 西條八束, 村上哲生: 河口域生態系の特性と環境問題, 日本生態学会誌, 第43巻, p.211-221, 1993.
- 4) Shermann, C.A.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, *J. Appl. Meteor.*, Vol.17, pp.312-319, 1978.
- 5) 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.
- 6) 村上哲生, 西條八束, 奥田節夫: 河口堰, 講談社, 2000.

(2004.9.30 受付)