

河床生物膜による浄化能の評価と強化に関する研究

1. はじめに
2. 調査の概要
3. 河川水質の概況
4. 付着微生物の調査結果
5. 流下過程における水質変化と自浄能の考察
6. 流下過程における浄化能の評価と強化
7. まとめ

摂南大学 工学部土木工学科 海老瀬 潜一

1. はじめに

河川の流下過程の河床には、1次（基礎）生産を担っている独立栄養の付着藻類や、有機物質の分解を行う細菌類や原生動物などが多種多様に存在して、水質変化に係っている。独立栄養の藻類による1次生産があれば、水生昆虫や魚類等も加わった水域生態系となり、これらを餌とする鳥類の範囲にまで広がった豊かな生態系が構成される。しかし、糸状菌（スフェロチルス、*Sphaerotilus*）等が優占してしまうほど有機汚濁が進行してしまうと、溶存酸素の不足を生じたり、晴天時には懸濁物質の沈殿や付着により黄変した大量のミズワタの現存量が目立つ状況が出現するなど、人が目をそむける流れを呈し、降雨時には大量のミズワタの剥離や沈殿物質の浮上による大量の汚濁負荷の流出となる。

河床等に付着する微生物は、大規模な出水でもなければ、底泥と同様に河床に留まっている時間が長いため、その河川水中に含まれる物質と十分な接触時間、すなわち、反応時間さえあれば、その物質の変化に係わり、微生物自体の現存量や蓄積物量の変化として、河川の水質変化の履歴をとどめており、河川水質状態を判断する生物指標ともなり得る。したがって、河川水質の経日変化を、晴天時流出と降雨時流出の両面を捉えるように高い頻度で調査するとともに、河床付着微生物や底泥中の蓄積物質の経日変化も併せて追跡すれば、河川流下過程での自浄作用の内容と量の両面を定量評価することができる。

2. 調査の概要

淀川左岸の天野川は、図1のように生駒山系に源を発し、生駒・四条畷の両市境界の田園地帯を流下し、交野市・枚方市の市街地を貫流して、枚方大橋上流側で淀川に流入する流域面積49.8km²の小河川である。下水道普及率がおよそ60%と依然として高くないため、中・下流部の市街地から生活雑排水や工場排水等の汚濁負荷がある。河床勾配は、上流部が比較的急で、下流部ではやや緩やかで、沈殿物も多く見受けられる。とくに、洪水時には、上・中流部の境界の磐船神社周辺の丘陵地から砂粒子の流出が多く、中流部から下流の河床表面を覆っている状況である。

定期負荷量調査は、1996年8月30日～12月10日の105日間に合計35回、1997年5月19日～8月7日の81日間に合計28回、1997年8月24日～12月16日の117日間に合計39回、それぞれ3日に1度の割合でほぼ定時に連続的な調査を行った。さらに、現在では河川水質の年間変化で唯一の特異日となっている正月元旦、二日と大晦日とその前日の4日間連続調査も併せて実施した。1996年9～12月の間には定期調査と併せて、降雨時流出の負荷量調査も5回実施した。また、1995年9月9日～12月20日の105日間に合計35回の同様の定期調査と3回の降雨時流出負荷量も実施していて、各期間での水温・日照量や降水量の物理的環境条件の違いによる水質変化への影響度の差違も考察することが可能である。

各回の調査は、流下方向に3地点で行い、流水の流下時間を考慮して、上流側の地点から始めて下流側の地点に順次移動する方法で実施した。各地点で毎観測時に、河川の流水幅によって50cm～100cmの間隔で流水断面積を求め、1m～2mの間隔でプロペラ型微流速計で流速を測定し、流量を算定した。

現場で、水温、DO、電気伝導度（EC）を測定し、採水してクーラーボックスに氷冷して持ち帰り、一部試水にろ過操作を行って溶存態成分の試水とした。実験室で測定した水質項目は、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、T-COD、D-COD、P-COD、DOC、SS、Chl-aおよびアルカリ度と、農薬である。P-CODは、[T-COD]-[D-COD]の式から算定した。

また、河川水のほかに、河床面に素焼きのタイル（10×10cm）を敷置し、1～2週間後に回収して、ブラシで剥し取った付着微生物のSS（乾燥重量）、Chl-a、農薬の各濃度を測定した。農薬の分析はボンドエルートを用いた固相吸着アセトン抽出で、ガスクロマトグラフ・マススペクトリで同定・定量を行った。なお、上流・中流・下流地点までの流域面積はそれぞれ、16.9、40.4、49.8km²であり、それぞれの流路長は8.3、5.4、1.2kmである。

3. 河川水質の概況

最近十年間の天野川は、中・下流部を主とする下水道普及率の上昇とともに、生活雑排水分の流入量の減少により、有機物質や栄養塩の濃度・負荷量の低下による水質改善傾向と河川流量の減少傾向が続いているが、最近5年間は、表1のように下水道普及率上昇の鈍化とともに水質改善は足踏み状態にある。また、微量化学物質では、生活雑排水の合成洗剤等に由来する界面活性剤の多くを占める陰イオン界面活性剤の水質指標メチレンブルー活性物質でも下水道の普及とその普及率の鈍化とともに漸減傾向の下げ止まり傾向が見られている。

一方上・中流域の水田耕作は兼業農家がほとんどで、水稻の育苗共同委託等に伴う移植作業の時期的集中と、その後に続く農薬散布作業もある土・日曜日の休日に集中し、農薬の高濃度・高負荷量での流出が顕著な傾向を示すに至っている。

3日に1度の定期調査の4回のシリーズの調査結果の例を、上・中・下流地点でのT-CODやChl-aの1997年の経日変化について図2、3および図4、5に示し、流量や代表的な水質濃度についての平均値を表2と表3に示す。これまでの5回の一連の調査について、中・下流地点での水質負荷量の平均値を表4、表5に示す。各調査期間における降雨量にかなりの違いがあったために、水質濃度や負荷量の平均値とも、各調査期間の降雨量、したがって、平均流量に左右された結果となった。しかし、1997年度の春～夏季調査と夏～秋季調査の間には、水温・日照量・日照時間等の違いによる河床付着藻類の生産量に明らかに差違が見られた。

1997年の12月30、31日、1998年1月1、2日の年末・年始の連続4日間の水質調査は、最低の水質負荷量が期待された1月1日には、前前日の豪雨の影響が残存して、1月2日には1日正午前からの降雨の影響を大きく受けて、有機物質や Cl^- ・ Na^+ の濃度減少が見られたものの、負荷量では両日とも12月中旬の晴天継続期間の水質状況とさほど差のない結果となった。

4. 付着微生物の調査結果

河床付着生物膜は、河床の岩・礫・石・砂利・砂・シルト等表面にまず細菌等が付着してその後に藻類等が付着して形成されている。水温・日照量や流速・水深等の物理的環境条件の違いに加えて、河川水の汚濁の程度によって出現あるいは優占する種構成が異なる。したがって、上流から下流までの水質汚濁レベルの異なる流下過程を対象とするので、乾燥重量 (SS)、COD、クロロフィルa (Chl-a) 量とそれらの比率で評価する。晴天継続期間が長く調査期間中の降雨量が極端に少なかった1995年秋季のChl-a/SSとChl-a/P-CODの経日変化の例を図6に示しておく。とくに、河床に敷置した素焼きのタイルでの観測とは別に、河川流水中に剥離流出してくる藻類の流出負荷量からも河床付着生物膜の生産量の推定を行っている。

結果は、3.でも述べたように、長期間の連続的調査ゆえに、以下の事実が確認できた。春～夏季の水温・日照量の大きさによって、夏～秋季と比較して、流水中のChl-aの濃度と負荷量が大きな値を示し、盛んな光合成活動によって、河床付着藻類の現存量が増大し、その剥離流出量も大きな値を示す結果となった。最下流地点での春～夏季は $14.5 \mu\text{g/l}$ で、平均より少な目の降水量の降雨'96・'97年の夏～冬季の $4.1 \sim 9.3 \mu\text{g/l}$ より高く、渇水状況の'95夏～冬季の $27.8 \mu\text{g/l}$ よりは低い濃度レベルであったが、負荷量では 47.8mg/s と、'95・'96・'97年の 39.1 、 74.2 、 43.8mg/s に対して'96年の値よりかなり小さいが、他の2年と同程度か若干高めの値となっている。

これらの差は、降水量（したがって流速・流量）や晴天継続期間の大小の影響が最も大きく、ついで水温・日照量・日照時間の影響が春～夏季で大きかったことによると推定できる。とくに、図6のように長い晴天継続期間があれば、河床の付着生物の現存量 (Chl-a/SSやChl-a/P-COD) が増加し、増殖の平衡状態に達した生物膜が隔離流出して、河川水中の有機懸濁物質中の大きなウエイトを占める。これは、細菌と藻類を主として構成されるので、流下過程に十分な時間あるいは接触機会をつければ、有機物質の分解減少の自浄能を強化することが可能であることを示す結果である。

著者は霞ヶ浦への8つの流入河川の下流端で毎週1回定時で1年間52回の調査を行って、Chl-aの平均濃度が $3.3 \sim 12 \mu\text{g/l}$ の範囲にあった調査結果や、涸沼への流入河川の涸沼川の中流部2地点での2年の毎週定時調査ではChl-aの平均濃度が 2.6 、 $2.7 \mu\text{g/l}$ であった調査結果を得ている。これらと比較して天野川のChl-a濃度は、多くの調査期間が春季から初冬までであったことを勘案すると、とくに高くも低くもない平均的な基礎生産量レベルの状態にあると考察される。

5. 流下過程における水質変化と自浄能の考察

河川の流下過程では、有機物質については分解による浄化作用が期待される。途中からの流入出がない長い流下区間を選んで、その水質濃度変化を定量すればよい。流量変化がないかの確認も含めて、上下流の両端で流量と水質濃度を測定して、その流下区間の物質収支をとることができれば、その浄化量

を定量することが可能である。このとき、上流端から下流端までの流下時間を考慮して、その分だけ時間を遅らせて観測を行えば、同じ水塊の流下を追跡したことになって精度の高い定量となる。1回だけの観測では、その時点の浄化量になってしまうので、各種の環境条件の1年間の季節変化等を考慮して、定期的な何回かの頻度の観測値を平均すれば、平均の浄化量が得られることになる。ただ、途中からの流入出のない一定の長い流下区間を選ぶことは非常に困難であるため、途中からの流入出が無視できる程度の流下区間までも、対象に加える必要がある。

天野川の上・中・下流地点のそれぞれの流下区間には、支流や排水路の合流があるため、そのままの水質負荷量値の増減で自浄能の評価を行えない。それゆえ、中流域・下流域から流入することのない物質、例えば、水田散布農薬の負荷量値の増減で検討することができるが、農薬のほとんどが合成有機化合物であり、通常の有機物質ではない点が難である。この点には留意しながら、一応、農薬の流下過程での変化量の定量評価を行ってみる。中流地点から下流側では水田施用農薬の流入はない。中流地点から下流地点までの流路長は1.18kmで、両地点での平均流速から考慮して、晴天時流出では流速を0.4m/s程度であるから40～50分程度の流下時間となる。

観測された農薬濃度は、上・中・下流地点でMEPが11.8ppb、ダイアジノンが6.1ppb、IBPが2.2ppbの最高濃度が検出されたが、他は1ppb以下であった。中・下流間での農薬負荷量の変化は、殺虫剤のMEPが13%に、殺菌剤のピロキロンが68%に、除草剤のエスプロカルブが97%に減少していた。しかし、除草剤のメフェナセット・ベンチオカーブ・シメトリン、殺菌剤のIBP・イソプロチオラン、殺虫剤のダイアジノンは同程度の負荷量ながら、若干の増加の状況となった。この理由には、濃度ピーク時と採水のタイミングのずれ等の影響が考慮されるが、この短い流下過程では分解等による減少は大きく期待できない結果となった。ただ、河床に敷設した素焼きタイルの人工付着板上の生物膜中には、除草剤のエスプロカルブが10.1ppb、IBPが5.2ppbなどの濃度で蓄積されていたことから、細菌等から構成される河床付着生物膜による分解減少は十分期待できる。

6. 流下過程における浄化能の評価と強化

流下過程での浄化能が大きくなるのは、有機物質を分解してくれる微生物との接触機会を増やし、その反応時間を可能な限り大きく維持し、反応速度を大きくするために水温を高く保持することが全てである。すなわち、流速が小さく、したがって、流下時間が大きく、水深が小さく、したがって、河床生物膜との接触時間が大きくなるように維持できれば良い。これには、晴天時流出の低流量時に、河道の流水幅を大きく取り、できるだけ浅い水深（薄層流に近い状態）にするほか、河道に障害物を設けて流水路を蛇行させる等の手法が考えられる。

また、流水中の細菌密度（体積あたり）と河床生物膜中の細菌密度（表面積あたり）を同じ単位では比較できないが、そのまま比べてみると河床生物膜中の細菌密度が数オーダー大きいので、長期的には、河床に凹凸をつけて表面積を大きくしたり、河床に生物膜現存量が付着し易い礫や石等の河床構成材料

の状態に保持できれば都合が良い。

天野川の河床構成材料では、上・中流部が砂にシルト、下流部がシルト・砂・石が主になっている。下流部は河床勾配も緩く、低水敷自体も広いので、下流部で低水敷の流水断面を一杯に使って、流速が小さくなるようにし、可能な限り浅い水深で、ゆったり流下するようにするのが望ましい。とくに、中流部の山地か洪水時に供給される砂に河床が覆われていることが多く、礫や石等の河床構成材料は河床表面に現れず、洪水の度にその上の砂が搅乱掃流されるため、河床付着生物膜は残留する部分がほとんどなく、現存量が常に少な目の状況を呈している。

これらの状況に対して、浮流物等の廃棄物が河川に投棄されることを防止し、礫・石・砂利等の大きなサイズの河床材料の流出を防ぎ、場合によってはそれらを積極的に補給することが望ましい。

7.まとめ

都市河川や市街地河川では、流下過程の途中から多くの支川や排水路が流入するが多く、流下過程での自浄能の定量評価可能な途中からの流入のない流下区間や流入が無視できる流下区間を設定することが困難なため、流下区間での正確な流量収支や負荷量収支は取り難い。流域面積当たりの負荷量等での比較評価でも、当該流域をカバーする下水処理場の処理水の当該河川への放流の有無で大きな影響の違いがある。天野川には中流域に交野市の郡津と枚方市の香里に公共下水道の処理場が存在するが、下水道の普及状況からまだ生活雑排水の流入も続くことが予測され、現在でも合流先の淀川本川より有機物質をはじめとする多くの水質濃度が高い。この現状を踏まえて、河床付着微生物を活用した河川流下過程での水質改善を積極的にはかることも1つの具体策であろう。

発表論文リスト

- 1) 石橋大二郎・海老瀬潜一：「市街地河川での河床付着生物膜の流出負荷量への影響」、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、第7部、pp.4-5、1997年9月。
- 2) 田口義幸・相原正芳・海老瀬潜一・石橋大二郎・中川理：「天野川の流出負荷量変化と河床付着生物膜の流出」、日本水環境学会関西支部第2回研究発表会講演集、pp.66-67、1997年11月。

表1 天の川の公共用海域の水質測定結果（中流と下流の中間）

年度	Flow (m ³ /s)	BOD (mg/1)	COD (mg/1)	SS (mg/1)	T-N (mg/1)	T-P (mg/1)	陰イオン界面活性剤 (mg/1)
1993年度	1.10	7.8	10	23	10	0.66	1.09
1994年度	0.65	11	15	12	13	0.89	0.55
1995年度	1.16	12	13	28	9.4	0.88	0.42
1996年度	1.09	12	12	11	10.8	0.84	0.53

表2 各調査期間ごとの有機物質関連水質濃度の平均値の比較（下流地点）

調査期間 (年／月)	Flow (m ³ /s)	WT (°C)	SS (mg/1)	Chl-a (μg/1)	T-COD (mg/1)	D-COD (mg/1)	P-COD (mg/1)	DOC (mg/1)	Chl-a/SS (×10 ³)	Chl-a/P-COD (×10 ³)
1995/9-12	1.32	18.8	23.5	27.8	9.6	7.3	2.3	—	0.71	11.3
1996/8-12	3.21	20.0	18.9	9.3	8.1	6.9	1.2	—	0.49	7.80
1997/5-8	3.05	25.5	32.8	14.5	8.9	6.7	2.2	5.9	0.15	4.02
1997/8-12	2.73	20.7	22.5	20.9	9.3	6.5	2.8	4.0	0.26	4.45

表3 各調査期間ごとの有機物質関連水質濃度の平均値の比較（中流地点）

調査期間 (年／月)	Flow (m ³ /s)	WT (°C)	SS (mg/1)	Chl-a (μg/1)	T-COD (mg/1)	D-COD (mg/1)	P-COD (mg/1)	DOC (mg/1)	Chl-a/SS (×10 ³)	Chl-a/P-COD (×10 ³)
1995/9-12	0.72	18.6	16.1	11.9	8.3	6.9	1.4	—	0.48	8.58
1996/8-12	2.57	18.8	21.6	7.5	7.7	6.2	1.5	—	0.13	13.9
1997/5-8	2.23	24.5	52.9	11.7	8.5	5.9	2.6	5.3	0.10	3.91
1997/8-12	1.65	19.5	24.9	13.3	7.7	5.5	2.2	3.4	0.19	4.70

表4 各調査期間ごとの汚濁物質負荷量平均値の比較（下流地点）

調査期間 (年／月)	Flow (m ³ /s)	SS (g/s)	Chl-a (mg/s)	T-COD (g/s)	D-COD (g/s)	P-COD (g/s)	DOC (g/s)	Na (g/s)	C1 (g/s)
1995/9-12	1.32	54.8	39.1	12.6	9.2	3.5	—	—	—
1996/8-12	3.21	568.0	74.2	30.9	19.7	11.2	—	53.6	58.2
1997/5- 8	3.05	329.5	47.8	28.5	16.6	11.9	16.0	51.6	53.7
1997/8-12	2.73	169.3	43.8	25.6	15.8	9.8	10.3	32.1	32.8

表5 各調査期間ごとの汚濁物質負荷量平均値の比較（中流地点）

調査期間 (年／月)	Flow (m ³ /s)	SS (g/s)	Chl-a (mg/s)	T-COD (g/s)	D-COD (g/s)	P-COD (g/s)	DOC (g/s)	Na (g/s)	C1 (g/s)
1995/9-12	0.72	20.7	9.9	5.8	4.7	1.2	—	—	—
1996/8-12	2.57	517.0	64.8	20.8	16.2	4.6	—	36.9	36.0
1997/5- 8	2.23	329.5	36.1	19.6	10.4	9.2	10.5	30.9	29.6
1997/8-12	2.73	108.9	21.2	13.1	8.6	4.5	5.6	37.2	32.2

表6 流下過程各地点での農薬ピーク濃度 (μg/l)

	メフェナセット	IBP	タ・イアシ・ノン	ビ・ロキロン	エスフ・ロカルブ	ブ・レチラクロール	BPMC	ヘ・ンチオカーブ
上流地点	0.333	2.19	1.07	0.466	0.052	0.164	0.702	0.522
中流地点	0.241	1.37	4.23	0.399	0.051	0.158	0.198	0.217
下流地点	0.183	1.00	6.06	0.197	0.030	0.094	0.106	0.177

表7 流下過程各地点での農薬総流出量 (kg)

	メフェナセット	IBP	タ・イアシ・ノン	ビ・ロキロン	エスフ・ロカルブ	ブ・レチラクロール	BPMC	ヘ・ンチオカーブ
上流地点	0.041	1.15	0.22	0.157	0.002	0.009	0.074	0.067
中流地点	0.134	2.08	5.29	0.562	0.014	0.052	0.147	0.202
下流地点	0.146	2.16	6.35	0.382	0.013	0.053	0.146	0.328

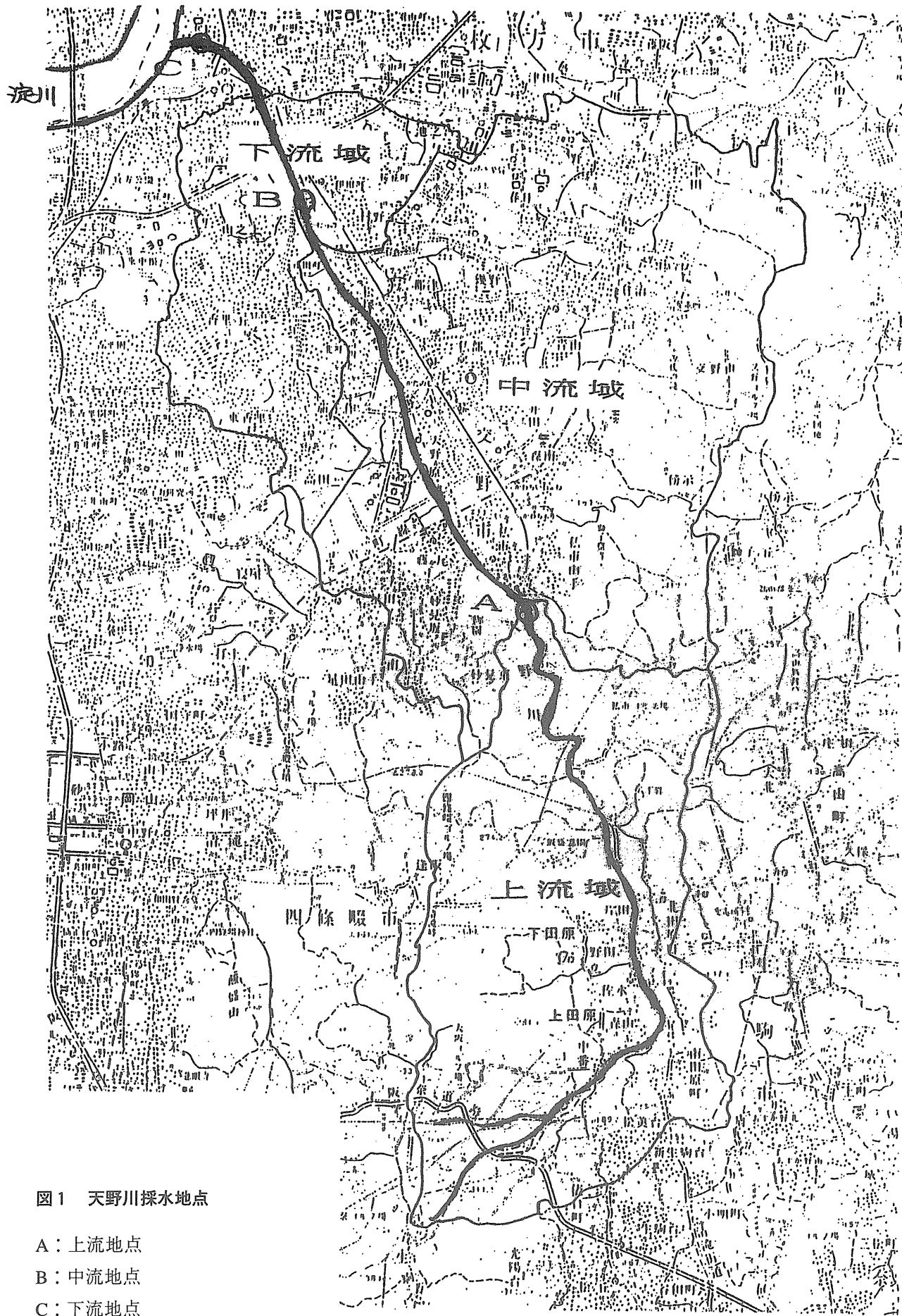


図1 天野川採水地点

- A：上流地点
- B：中流地点
- C：下流地点

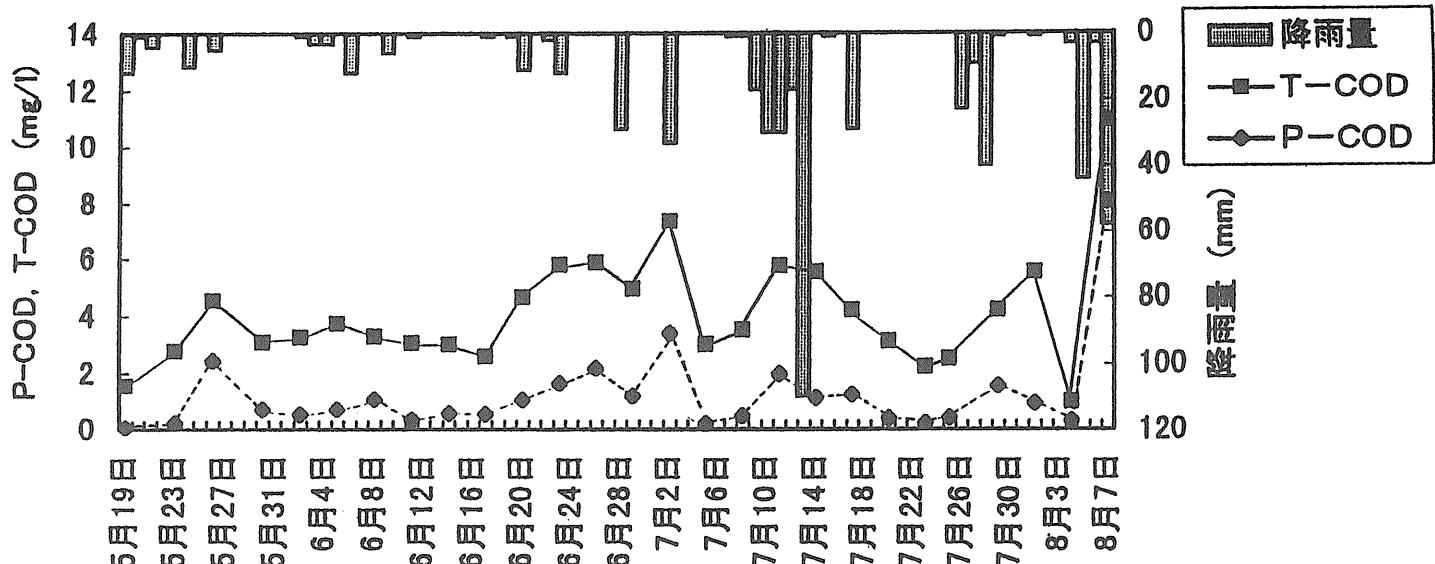


図2 (a) 上流地点でのCODの濃度変化

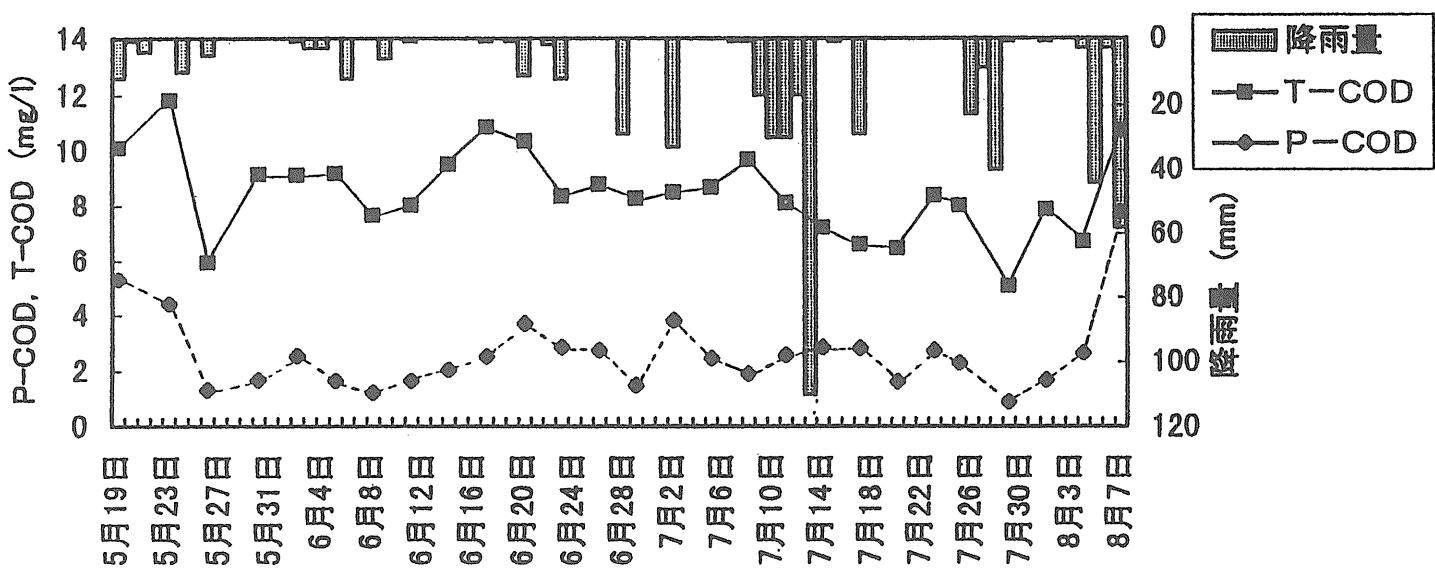


図2 (b) 中流地点でのCODの濃度変化

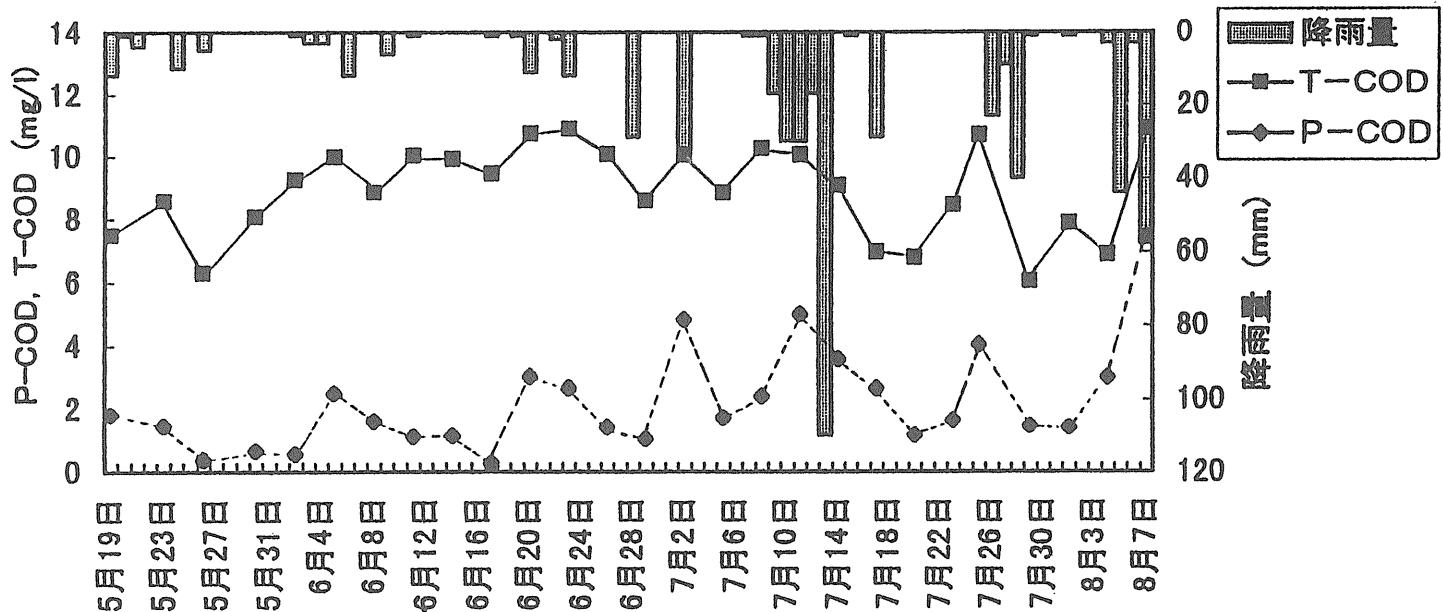


図2 (c) 下流地点でのCODの濃度変化

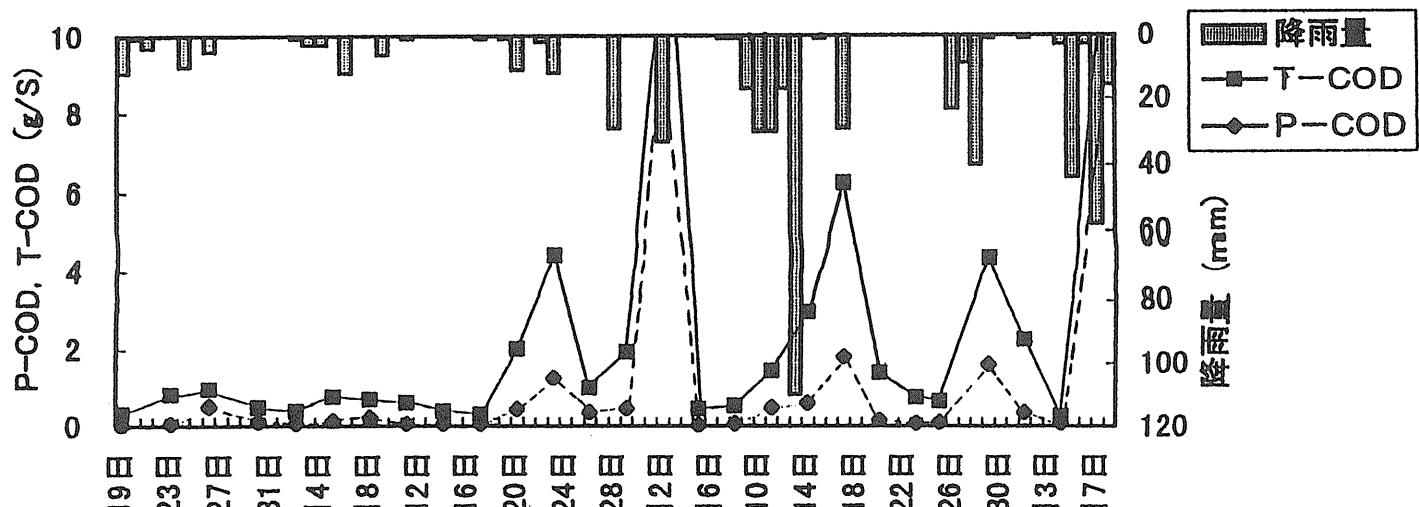


図 2 (d) 上流地点でのCODの負荷量変化

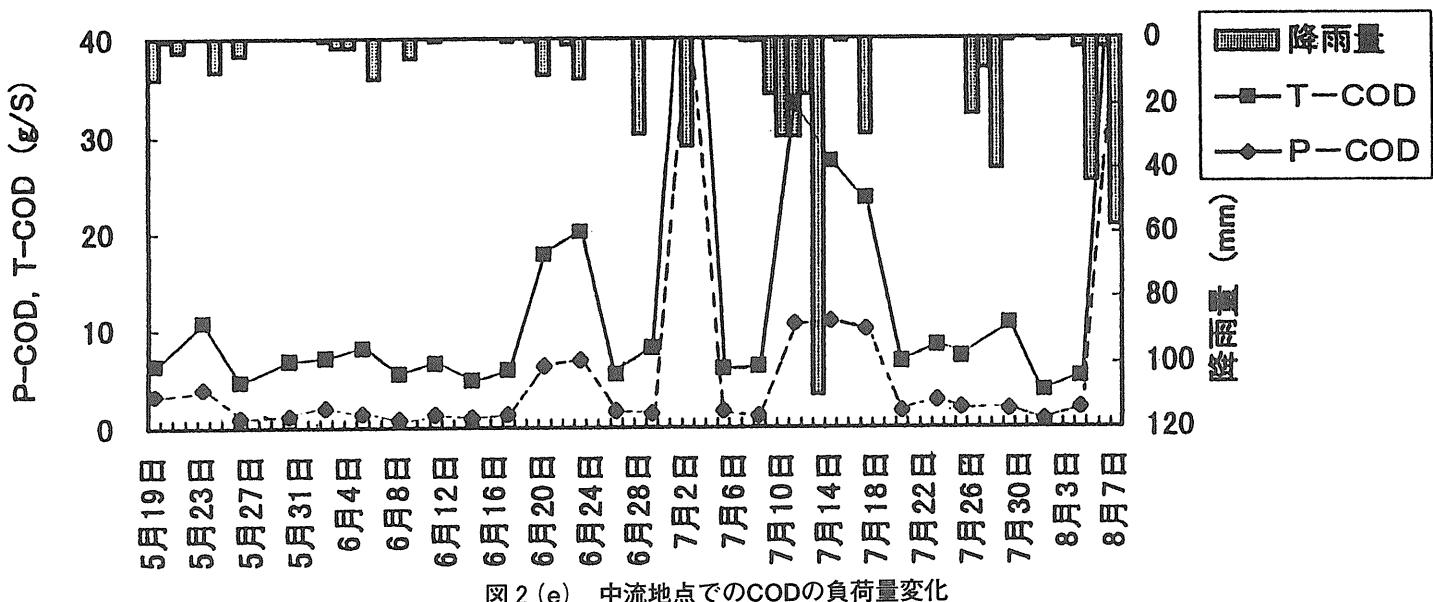


図 2 (e) 中流地点でのCODの負荷量変化

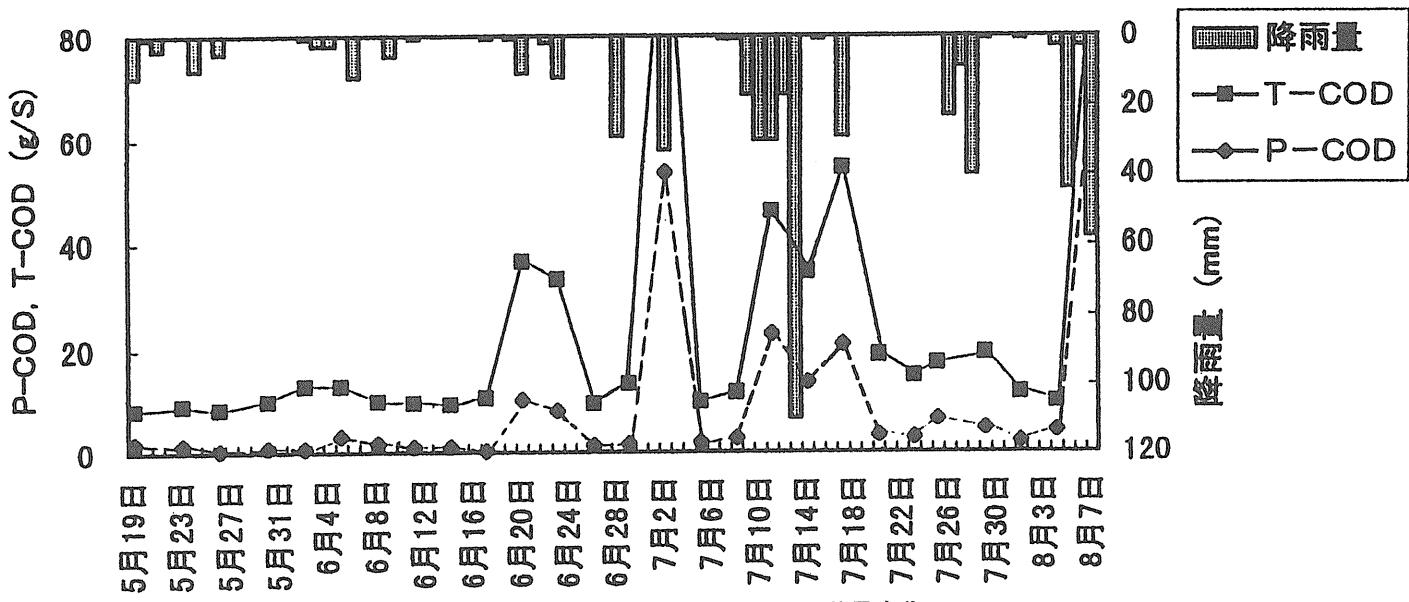


図 2 (f) 下流地点でのCODの負荷量変化

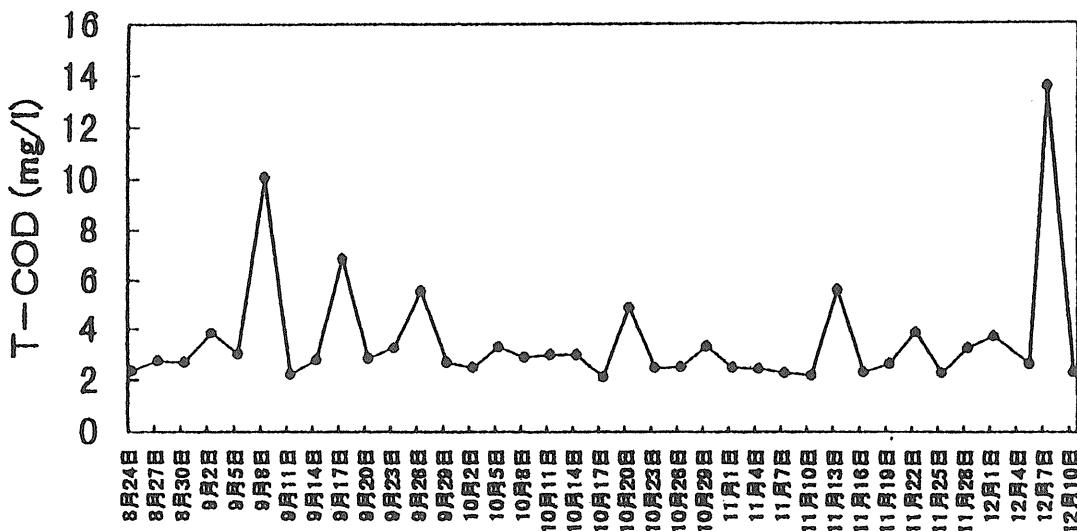


図3(a) 上流でのT-CODの経日変化

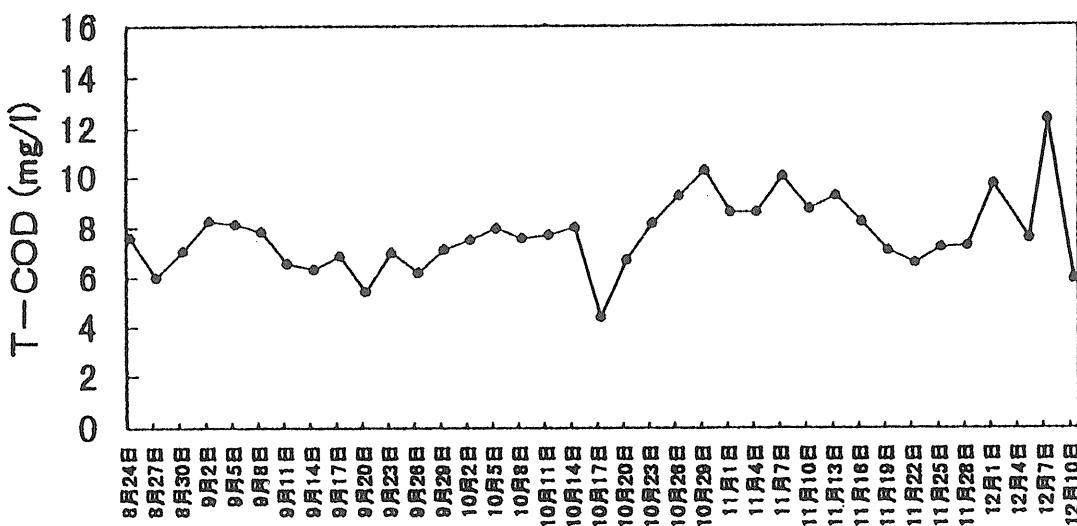


図3(b) 中流でのT-CODの経日変化

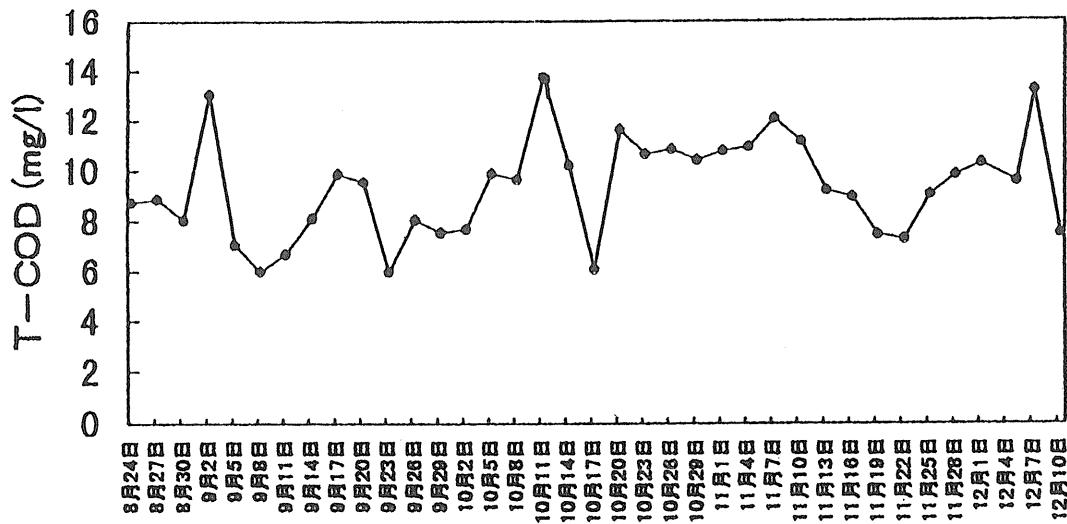


図3(c) 下流でのT-CODの経日変化

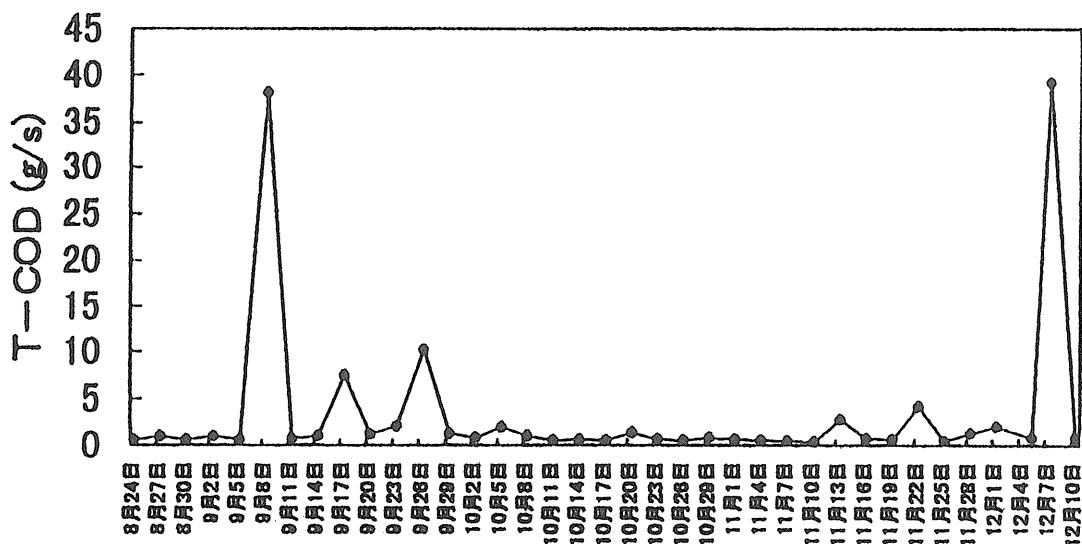


図 3 (d) 上流でのT-COD負荷量の経日変化

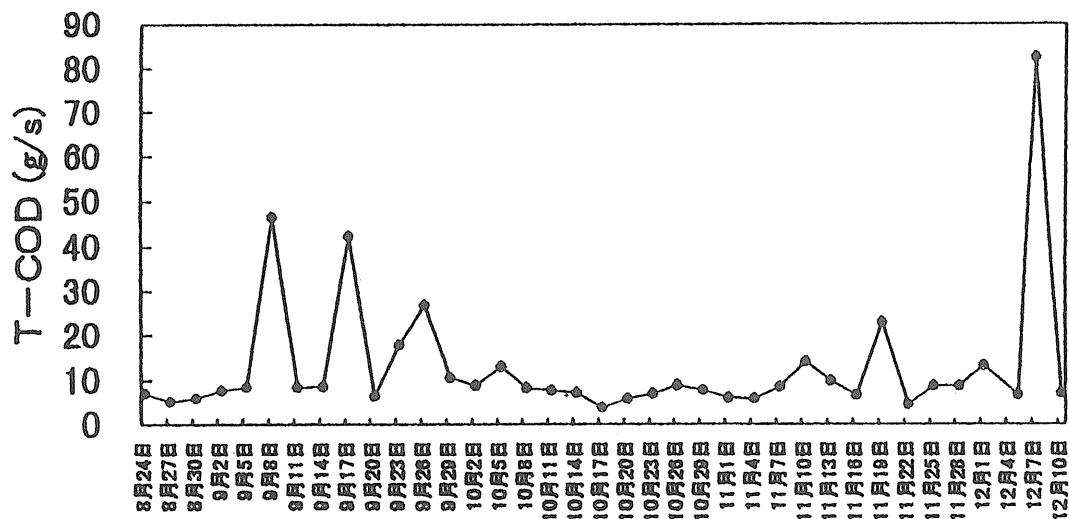


図 3 (e) 中流でのT-COD負荷量の経日変化

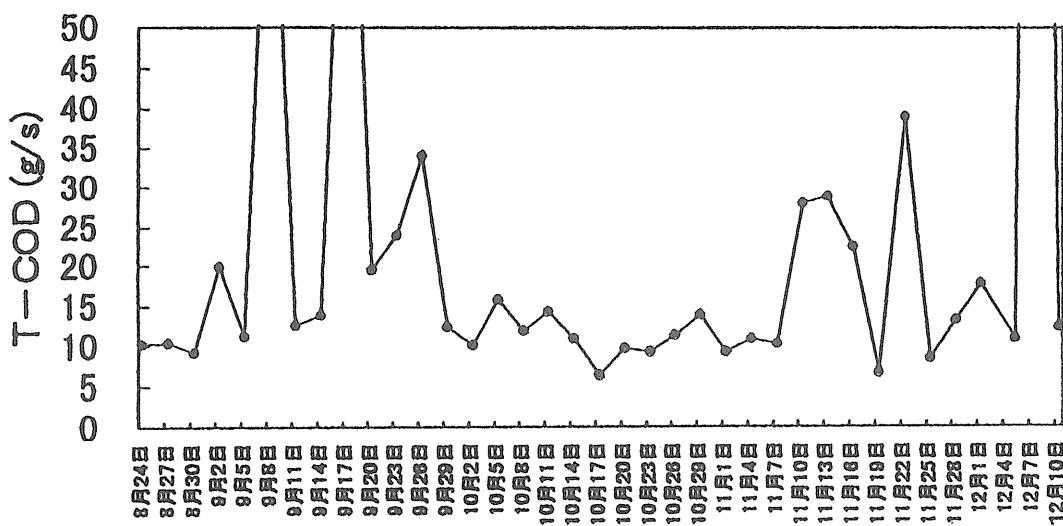


図3(f) 下流でのT-COD負荷量の経日変化

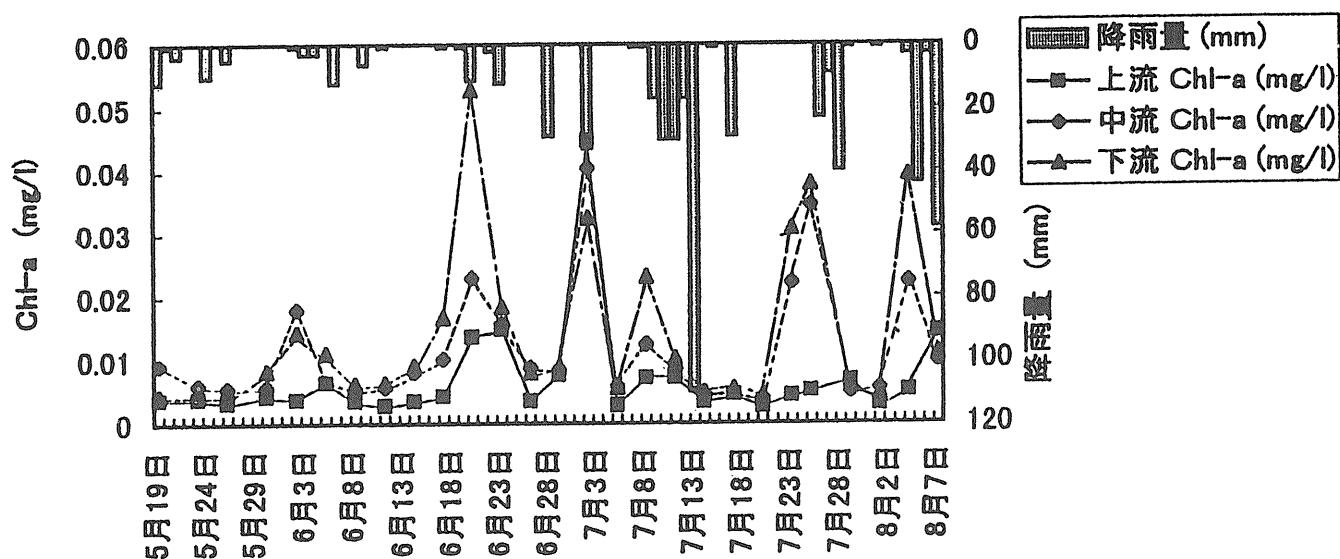


図4 (a) Chl-aの濃度変化

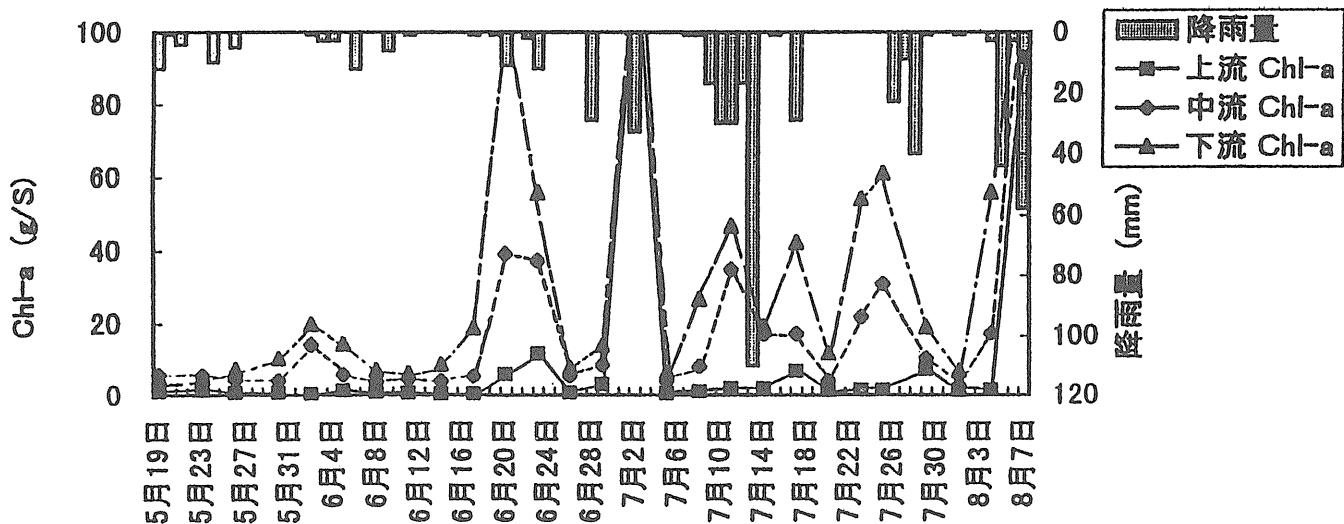


図4 (b) Chl-aの負荷量変化

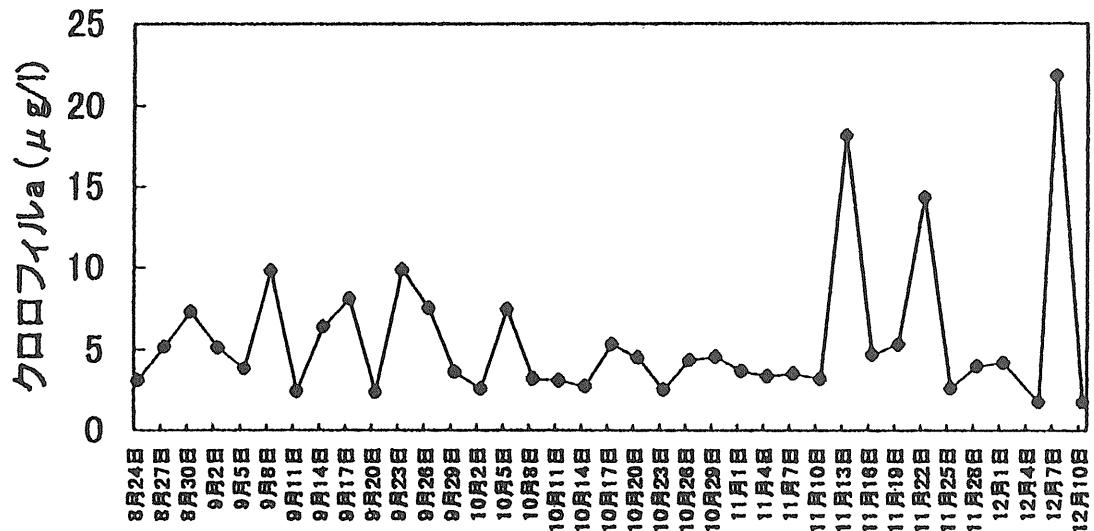


図 5 (a) 上流でのクロロフィルaの経日変化

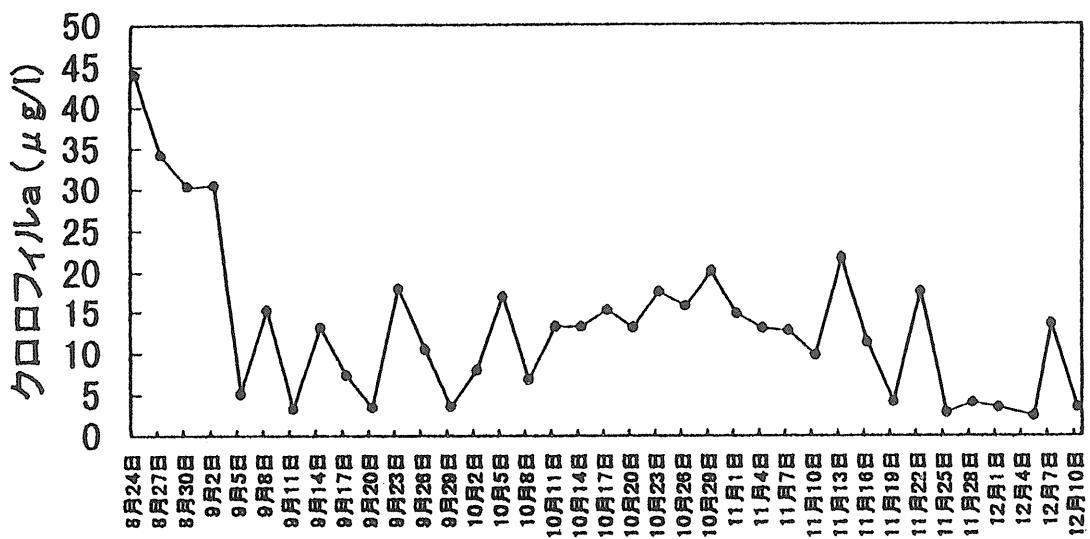


図 5 (b) 中流でのクロロフィルaの経日変化

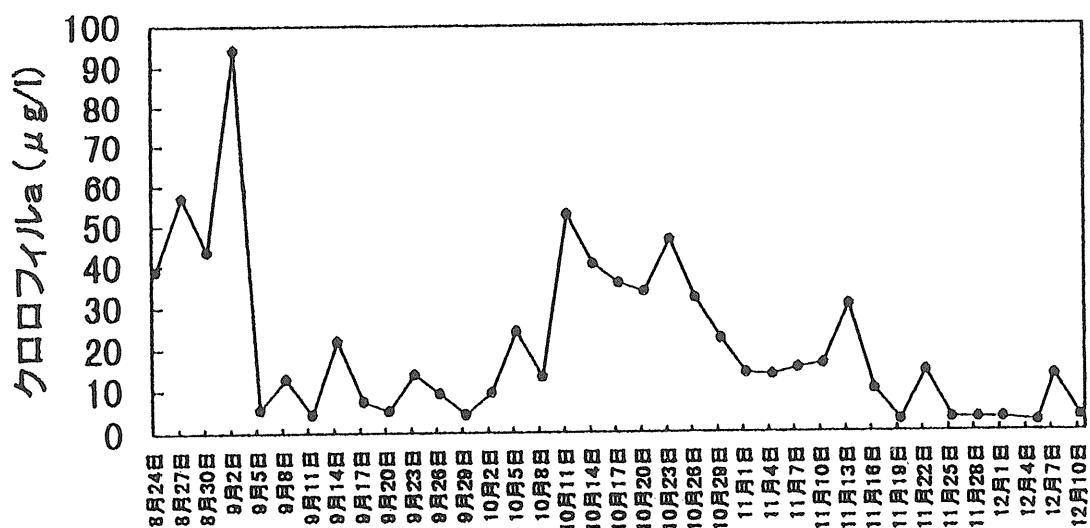


図 5 (c) 下流でのクロロフィルaの経日変化

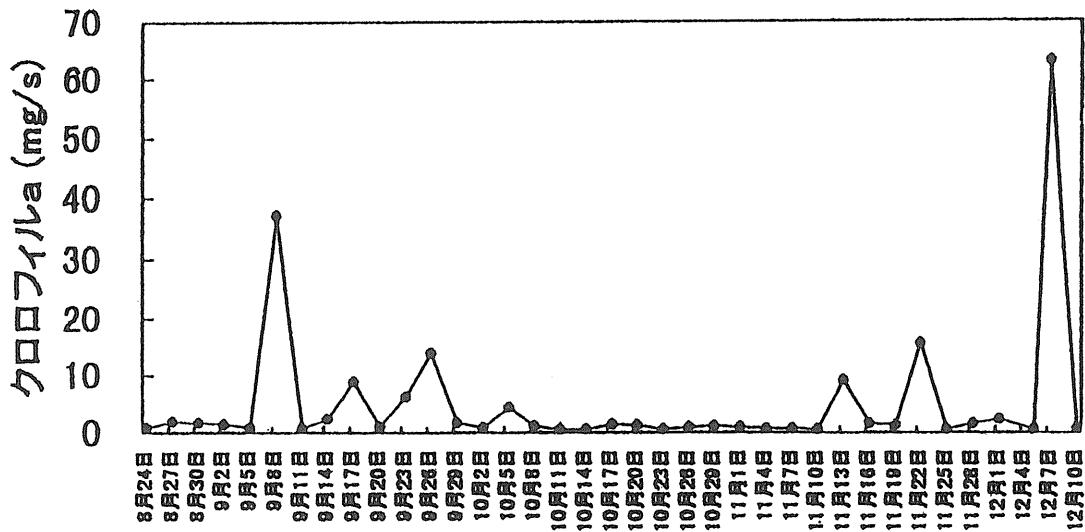


図 5 (d) 上流でのクロロフィルa負荷量の経日変化

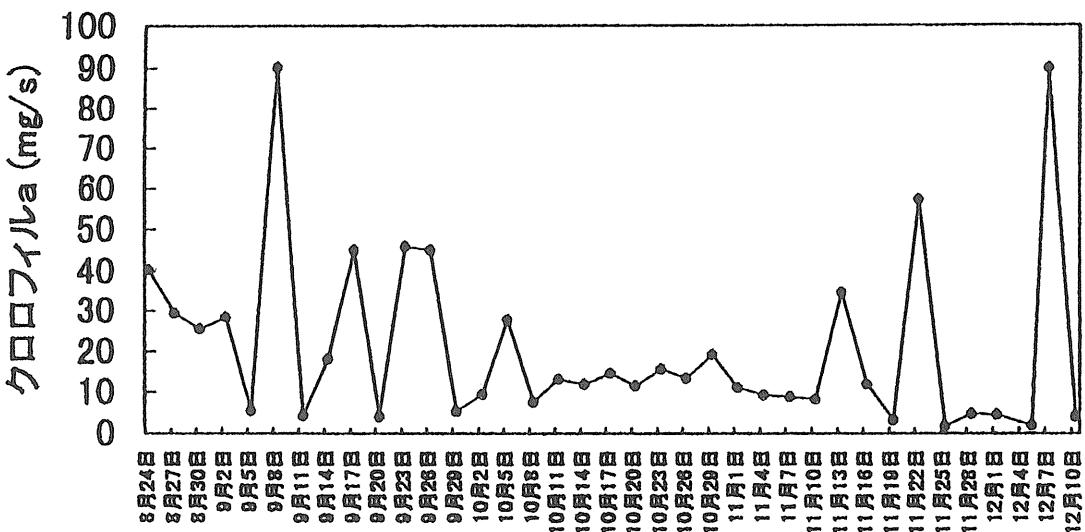


図 5 (e) 中流でのクロロフィルa負荷量の経日変化

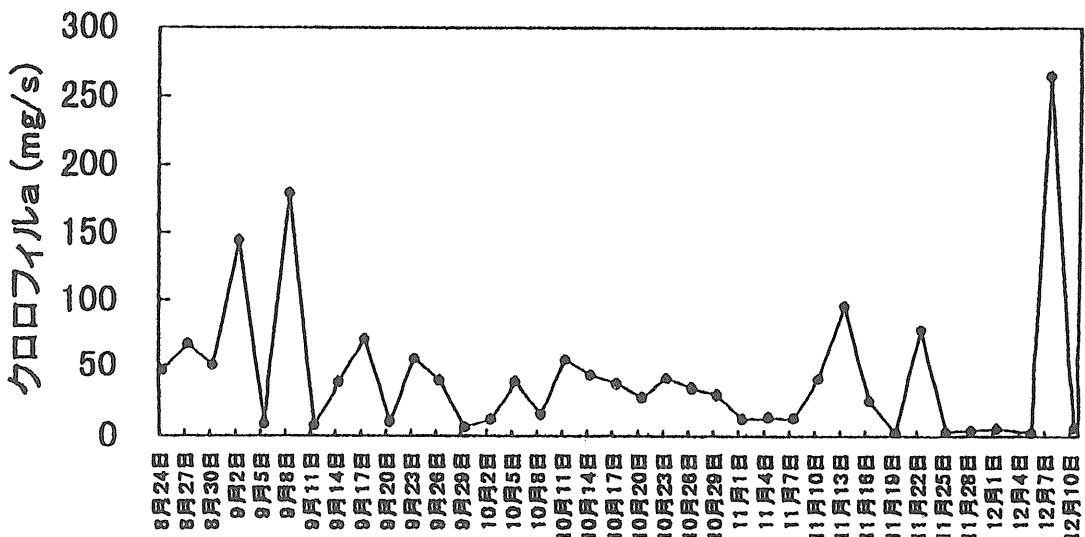


図 5 (f) 下流でのクロロフィルa負荷量の経日変化

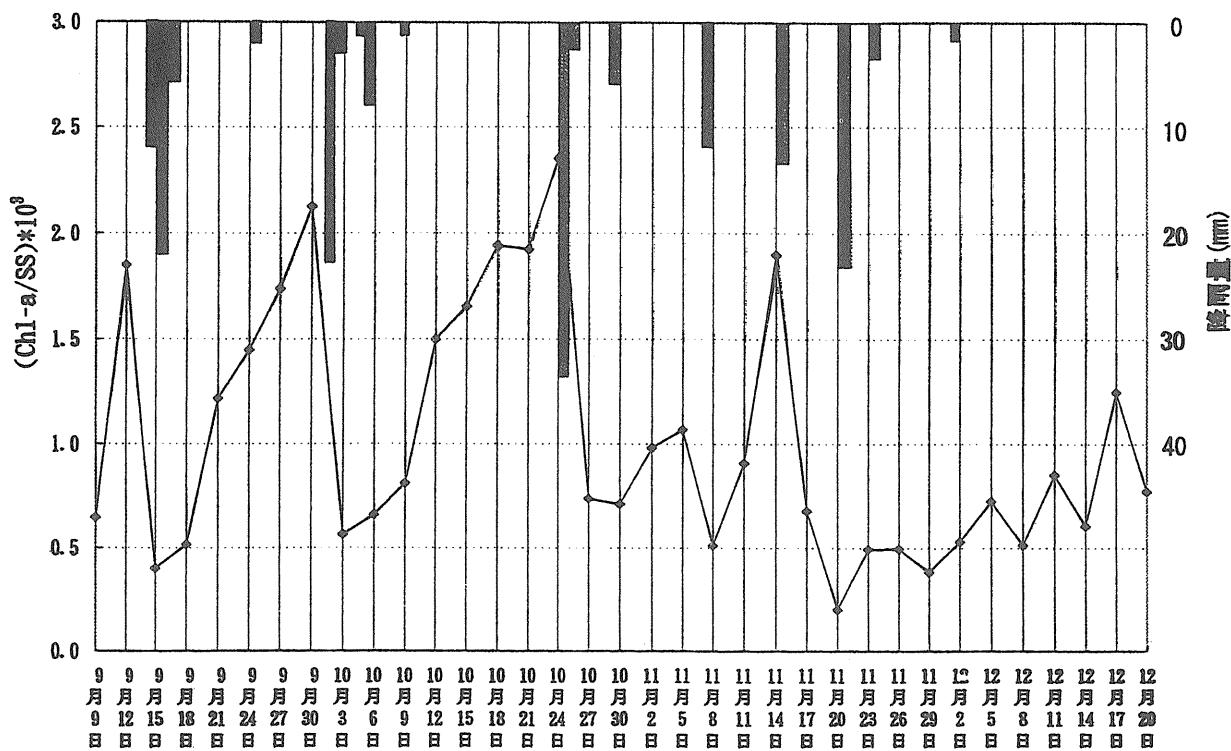


図 6 (a) 中流地点でのChl-a/SSの経日変化

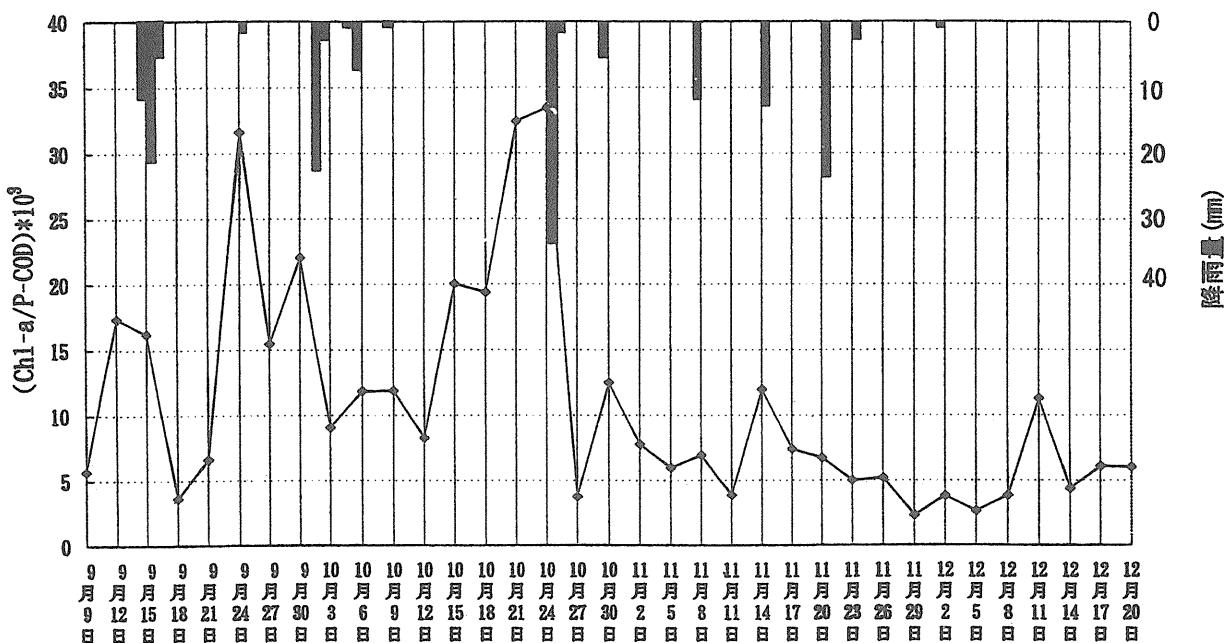


図 6 (b) 中流地点でのChl-a/P-CODの経日変化