

大和川での1時間毎の自動観測測定から 導き出されたCODの流量依存特性

CHARACTER OF COD VALUES WITH FLOW RATE CLAFIED BY ONE HOUR AUTOMATIC MEASUREMENT IN THE YAMATOGAWA RIVER

高野芳隆¹・井伊博行²・石塚正秀³・平田健正⁴・元永秀⁵

Yoshitaka TAKANO, Hiroyuki II, Masahide ISHIZUKA, Tatemasa HIRATA and Hide
MOTONAGA

¹学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

³正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部 (同上)

⁴正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

⁵国土交通省近畿地方整備局大和川河川事務所 (〒582-0009 大阪府柏原市大正2-10-8)

COD was previously measured from sampled water. Then 1 month measurement does not include flood condition because of safety for sampling. 1 hour measurement is automatically sampled and measured in situ at station and then includes flood condition. To clarify difference between 1 month measurement and 1 hour measurement, using both measuring results of flow rate, COD, TB and EC values of the Yamatogawa river, effect of flow rate on COD, TB and EC values was clarified. COD and TB values increased with flow rate. EC value decreased as flow rate increased. The relationships between COD and flow rate, TB and flow rate were very similar. Therefore, COD was more strongly influenced by floating material than soluble substances because TB was concentration of floating material. Using the relationships between COD and flow rate, COD loads were calculated. As a result, the COD load calculated by the 1 hour measurement was more about 2 times than the COD load calculated by the 1 month measurement.

Key words: COD, TB, EC, flow rate, COD load

1. はじめに

現在, 日本の水質は改善されつつあるが, 未だ環境基準を達成できない流域もある。本研究の対象流域である大和川は水系全体において, 水質汚濁の指標の一つである生物化学的酸素要求量(BOD)75%値が, 平成15年度の時点で, 6.0mg/lと環境基準値を達成しておらず, さらに全国一級河川の中で, BOD75%値がワースト1位を記録している¹⁾。本研究以前に, 大和川の水質汚濁の原因と今後の水質改善のため, 定期観測データを使用した物質負荷量の推定と土地利用との関係^{2),3),4),5),6)}について研究がなされてきたが, 詳細な水質汚染の原因がいまだ解明されていない。この定期観測データは1ヶ月に1回の水質と流量のデータであり, 観測頻度が低く, 濃度と流量の関係が詳細にわからなかった。そこで本研究では, 大和川の河口付近の浅香と中流付近の河内橋とで以前から行われている水質と流量の観測頻度が低い定期観測データと近年から行われている観測頻度が高い自動観測データを用いて, 自動観測データ

の観測頻度が増えることの効果について, 特に, 生物化学的酸素要求量(BOD)と同様, 水質汚濁の指標の1つであり, 測定が自動化が行われている化学的酸素要求量(COD)と流量の関係から考察した。さらに, この関係を溶存成分の影響を示す電気伝導度(EC)と, 浮遊成分の影響を示す濁度(TB)と比較した。最後に, 定期観測データと自動観測データを用いてそれぞれのCOD負荷量の算定を行い考察した。

2. 調査地域, 測定概要

対象流域となる大和川を図-1に示す。大和川は笠置竜門山脈に源を発して初瀬川溪谷を流れ, 奈良盆地に流れ込んでいる。そして, 佐保川, 曽我川, 竜田川などの奈良盆地の水を集め, 生駒山地と金剛山地の切れ間の「亀の瀬」と呼ばれる溪谷部を通過して大阪平野に入り, 石川を合わせて大阪市と堺市の間を西流して大阪湾に注いでいる大和川は, 流域面積1,070km², 幹川流路延長68kmの一級河川である。

大和川流域は, もともと雨の少ない気候(年平均

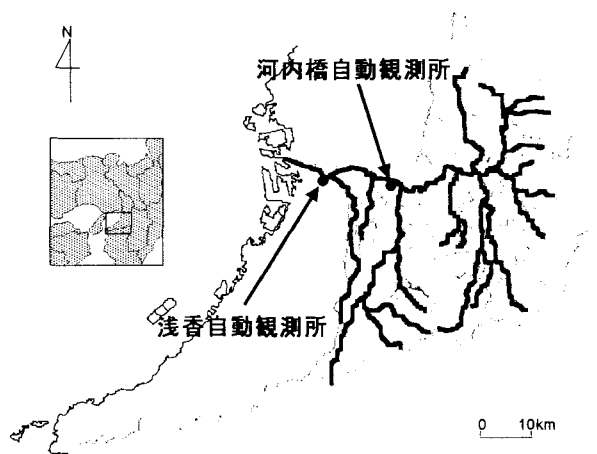


図-1：大和川流域と浅香，河内橋自動観測地点

降水量：約1,400mm、全国平均：1,800mm弱）であり，大きな支流が流れておらず，昔から水不足に悩まされている．農業に必要な水の確保をするため「ため池」が多く造られ，現在でも奈良盆地や羽曳野・泉北丘陵には，大小のため池が数多く残っている⁷⁾．

本研究では国土交通省近畿地方整備局大和川河川事務所が所有する水質，流量の観測データをもとに解析を行った．水質，流量の観測データは，河内橋テレメーター(水質自動監視所)，柏原テレメーター(水位流量監視所)，浅香テレメーター(水質自動監視所)，香ヶ丘テレメーター(水位流量監視所)の2002年5月から2003年12月までの1時間毎の自動観測データと，1983年1月から2003年7月までの1ヶ月に1回の定期観測データから流量と，化学的酸素要求量(COD)，電気伝導度(EC)，濁度(TB)の3つの水質項目を用いた．尚，定期観測は室内観測であり，自動観測は現地観測で，EC，TBについては水質自動監視装置[K-82S]を，CODはCOD自動測定装置が使われている．

3. 結果と考察

(1) 定期観測と自動観測の違い

a) 測定頻度の違いによるCODと流量の関係

一般的に負荷量は水質データと流量データを乗じることによって求めることができる．そこで，過去の負荷量を算定するにあたり，この水質データと流量データが高頻度で測定されるほど負荷量の精度も高くなるといえる．この地域において，過去に一般的に行なわれていた測定の頻度は，流量測定について1日1回，水質測定においては月に1回の割合であった．そこで，1時間毎に測定した場合と，過去の頻度で測定を行った場合の違いを明らかにするために，観測が自動化されている化学的酸素要求量(COD)と流量の関係について考察した．

浅香の定期観測データのCODと流量の関係を図-2に，自動観測データのCODと流量の関係を図-3に示した．図-2は1983年から2003年までの21年間の定期観測データから得られた図である．定期観測データのCOD濃度は1ヶ月に1回測定されたもので，流量

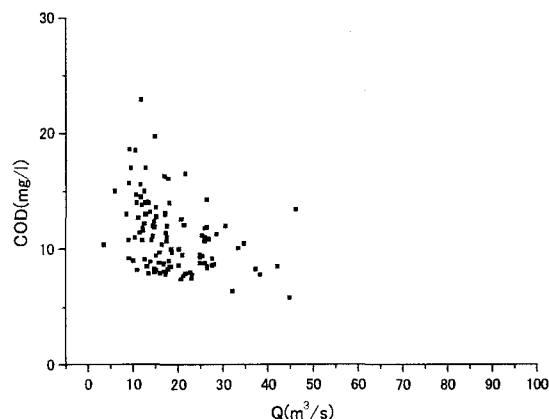


図-2：浅香におけるCODと流量(Q)の関係
(1983年～2003年：定期観測)

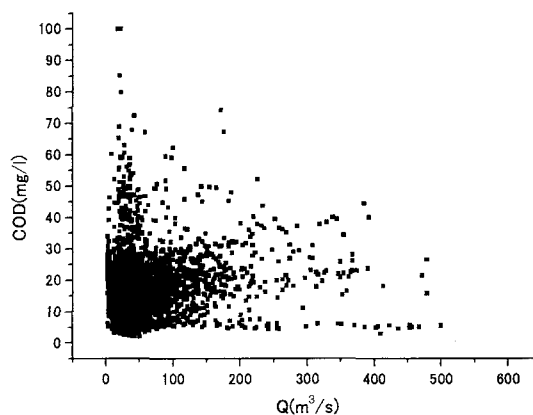


図-3：浅香におけるCODと流量(Q)の関係
(2002年5月～2003年12月：自動観測)

データは1日1回観測されたものであるが，COD濃度測定日の値を用いている．図から，多くのデータが流量(Q)50m³/s以内，COD濃度30mg/l以内に収まっており，流量が増加するとCOD濃度が減少するようにみられる．図-3は，2002年5月から2003年12月までの約1年半の自動観測データからの図で，COD濃度，流量共に1時間毎に観測されたものである．図-3は，図-2に比べてデータの数も格段に多くなり，定期観測データでは，50m³/sまでの流量に対応するCOD濃度の関係だけがみられたが，1時間毎の自動観測データでは流量が500m³/sまでの高流量時のCOD濃度の関係もみることができた．COD濃度は定期観測では最大25mg/lであるが自動観測では100mg/lまで観測された．河内橋についても同様に，定期観測データでは50m³/sまでの流量に対応するCOD濃度の関係が，自動観測データでは流量が350m³/sまでの高流量時のCOD濃度の関係がみられた．しかしながら，自動観測でもセンサーの測定限界や高流量時の水の巻き上げが激しい時に観測所のポンプがつまり，COD濃度データが浅香では100mg/l，河内橋では50mg/lを超えるときも100mg/l，50mg/lの値を示してしまうといった問題がある．さらにこれらの問題が，浅香での流量が500m³/s以上，河内橋では流量が350m³/s以上のデータでみられ，流量がそれらを超えるデータに

表-1：流量のデータ数による割合と総流量による割合(2003年：浅香)

流量(Q)データの個数	2003年	割合(%)	流量(Q)	2003年	割合(%)
$Q < 50\text{m}^3/\text{s}$ (回)	7648	87.3	$Q < 50\text{m}^3/\text{s}$ (回)	632723436	56.9
$50\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 150\text{m}^3/\text{s}$ (回)	872	10.0	$50\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 100\text{m}^3/\text{s}$ (回)	244683821	22.0
$150\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 250\text{m}^3/\text{s}$ (回)	129	1.5	$150\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 200\text{m}^3/\text{s}$ (回)	88998300	8.0
$250\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 350\text{m}^3/\text{s}$ (回)	56	0.6	$250\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 300\text{m}^3/\text{s}$ (回)	59212512	5.3
$350\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 450\text{m}^3/\text{s}$ (回)	30	0.3	$350\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 400\text{m}^3/\text{s}$ (回)	42014988	3.8
$450\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 550\text{m}^3/\text{s}$ (回)	21	0.2	$450\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 500\text{m}^3/\text{s}$ (回)	36682344	3.3
$550\text{m}^3/\text{s} \leq Q$ (回)	4	0.0	$550\text{m}^3/\text{s} \leq Q < 600\text{m}^3/\text{s}$ (回)	8390412	0.8
合計のデータ数(回)	8760	100.0	総流量(m^3/year)	1112705813	100.0

については省いている。

この定期観測データと自動観測データのの違いの重要な点は、定期観測データでは低流量時の濃度との関係しか表されなかったが、自動観測データを使うことにより高流量時の濃度との関係をみることが可能になったことである。このことから、図-2では流量が増加するとCOD濃度が減少し、図-3では流量が増加するとCOD濃度も増加しているように、両者で異なった関係がみられた。したがって、図-2は図-3の一部と考えられ、次に図-3のパターンの原因について以下に検討する。

b) 流量の割合

今までの定期観測では天候や人的要因により高流量時の採水は行われていなかったことを含め、このように定期観測データから自動観測データを使用することによって、高流量時の水質データが得られるようになった。したがって、流量データと濃度データから算定される負荷量に大きな影響があると考えられる。そこで、新たに得られた高流量時のデータが年間の流量に占める割合について考える。流量のデータ数と年間の総流量から計算した結果を浅香について表-1に示す。表-1は、流量データ数に対する割合(左半分)と総流量に対する割合(右半分)を、定期観測データで示した流量範囲($50\text{m}^3/\text{s}$ 未満)を基準に、流量を $100\text{m}^3/\text{s}$ 毎に分けて示した。この表から、浅香では $50\text{m}^3/\text{s}$ 未満のデータ数が全体のデータ数の80%以上を占めているが、総流量の割合についてみると、 $50\text{m}^3/\text{s}$ 未満の割合は60%以内になっていることがわかる。また、河内橋においてもデータ数が全体のデータ数の80%以上を占めていたが、総流量の割合についてみると、 $50\text{m}^3/\text{s}$ 未満の割合は50%であった。これらのことから、定期観測データでは流量が少ない時の現象だけが表され、年間総流量の約半分ぐらゐの関係が示されただけということがわかる。

(2) 水質の流量依存特性

a) CODと流量の関係

このように、自動観測データを使用することによって高流量時の観測が可能になったが、図-3のように、COD濃度と流量の関係に大幅な広がりが見られた。この原因を解明するため、降雨などによって流量が増加し、減少していく現象について最大流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上であるものをイベントと呼ぶことにし、浅香において、2002年5月から2003年12月までの流量

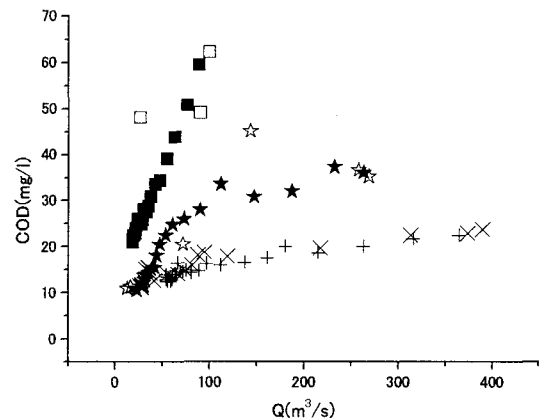


図-4：イベント毎の代表的なCODと流量(Q)の関係
(2002年5月～2003年12月：浅香)

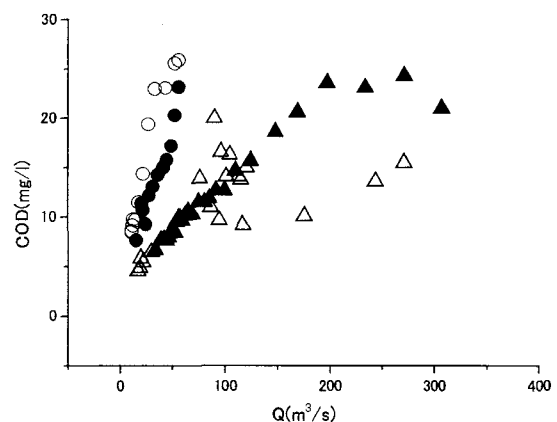


図-5：イベント毎の代表的なCODと流量(Q)の関係
(2002年5月～2003年12月：河内橋)

変化を58のイベント、河内橋においては43のイベントに分離させた。そして、各イベント毎にCODと流量の関係についてみた。その代表的な結果を図-4、図-5に示す。図-4に示す□-■、☆-★、×-+と図-5に示す○-●、△-▲はそれぞれ流量が増加して減少するというイベントの変化を表し、□、☆、×、○、△は流量増加時の変化を■、★、+、●、▲は流量減少時の変化を表している。これら2つの図から流量が増加するとCOD濃度も増加していることがわかり、傾きもばらばらであることがわかる。また、図-5においては○-●と△-▲で表された関係が楕円を描いているのに対して、図-4の□-■、☆-★、×-+は直線のようにになっている。一般に

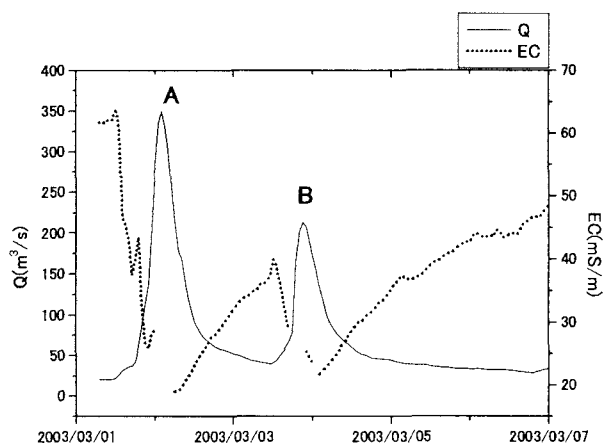


図-6：ECと流量(Q)の時系列変化
(2002年3/1(7:00)～3/7(0:00)：浅香)

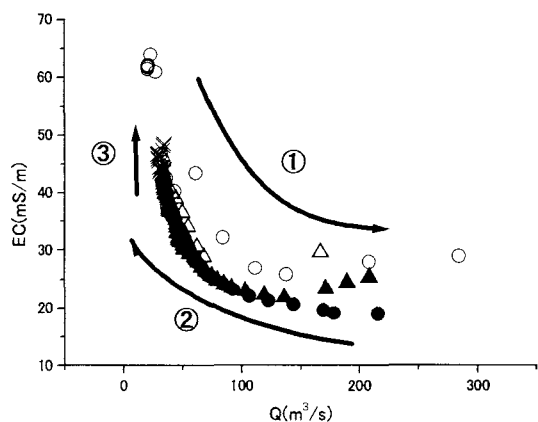


図-7：図-6のECと流量(Q)の関係
(2002年3/1(7:00)～3/7(0:00)：浅香)

流量と濃度の関係において、降雨時の水質は、流量のピークの前か後ろかで、同一流量であっても異なるヒステリシスを描くことが多い⁸⁾。晴天時に流域に堆積していた負荷物質が降雨によって掃流され、出水が長く続き高流量の状態が続いた場合、汚濁物質はすでに流れてしまっているために水質濃度が低下する現象が原因だと考えられる。また、図の基底流量時の座標からスタートし基底流量時の座標に戻るブーメラン型の変化が左回り、右回り、直線のようにみられるのは、イベントが発生したときの河床の巻上げ等が大きく関係すると考えられる。したがって、先ほどの図-3はこれらの変化の集合体であることがわかる。

b) EC、TBと流量の関係

ここで、CODの流量依存特性と他の水質項目との違いをみてる。COD濃度は一般的に、溶存成分と浮遊成分の両方の影響を受けるが、大和川において、どちらの成分の影響を強く受けているのか考察した。COD濃度と同様に、1時間毎に測定を行っている溶存成分の総量の目安となる電気伝導度(EC)と、浮遊成分を測定している濁度(TB)の流量依存特性との違いについて考えた。図-6、図-7に浅香における代表的なECと流量(Q)の関係を、図-8、図-9に浅香にお

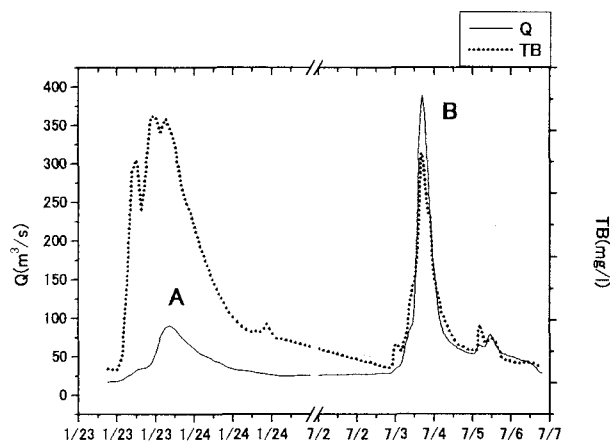


図-8：TBと流量(Q)の時系列変化
(2003年1/23(6:00)～1/24(18:00)と
7/3(12:00)～7/6(20:00)：浅香)

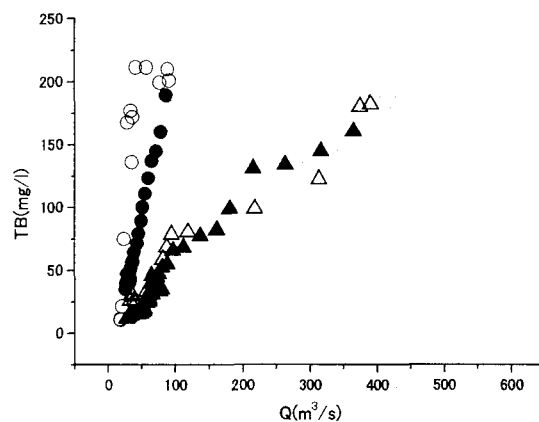


図-9：図-8のTBと流量(Q)の関係
(2003年1/23(6:00)～1/24(18:00)と
7/3(12:00)～7/6(20:00)：浅香)

ける代表的なTBと流量(Q)の関係^{9),10),11)}を示す。図-6は浅香の2002年3月1日の7時から3月7日の0時までの流量とECの時系列変化を示し、AとBの2つのイベントが連続している時のECと流量(Q)の関係を図-7に表した。図-7において、○と●は図-6のAのイベント時の変化を、△と▲は図-6のBのイベント時の変化を示し、○と△は流量増加時の変化、●と▲は流量減少時の変化を示す。また×はイベントの前後すなわち基底流量時のECと流量(Q)の関係を示している。図-7から、流量が増加するとライン①のように移動し、流量が減少するとライン②のように移動し、基底流量時はライン③のように移動する。つまり、基底流量時からイベントが発生し、基底流量時に戻る変化は3→1→2→3と変化し、流量増加によって溶存成分の希釈が表されていることがわかる。また、イベントが連続して続くと希釈が長時間続くことになり3→1→2→1→2→3と変化する。そして、この希釈には限界があり、濃度が20mS/m前後まで下がるとそれ以上下がらなくなる下限値に達するものと考えられる。以上のことから溶存成分であるECは流量が増加すると雨水の流入によって一般に希釈さ

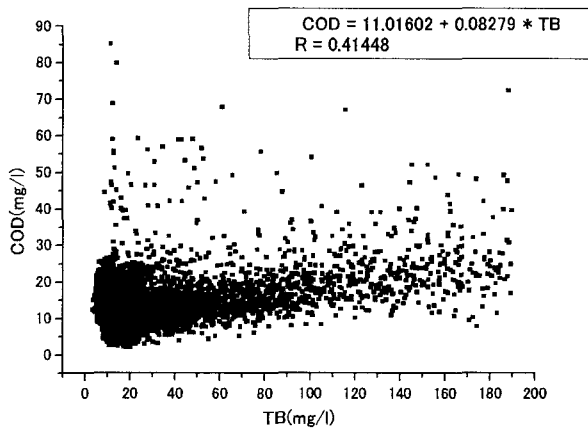


図-10：CODとTBの関係とその相関
(2002年5月～2003年12月：浅香)

れるので減少する。しかし、雨水の流入がなく基底流量時の期間が長く続くと、ECの値は大きくなる。

次にTBと流量(Q)の関係についてみる。図-8は浅香の2003年1月23日の6時から1月24日の18時までと、7月3日の12時から7月6日の20時までの流量とTBの時系列変化を示し、それぞれのイベントをAとBとし、そのTBと流量(Q)の関係を図-9に表した。まず図-9において、○と●は図-8のAのイベント時の変化を△と▲は図-8のBのイベント時の変化を表し、○、△は流量増加時の変化を●、▲は流量減少時の変化を表している。これら2つの図からCODと流量の関係と同様に、流量が増加するとCOD濃度も増加していることがわかり、傾きもばらばらであることがわかる。また、図-9においては○—●で表された関係が楕円を描いているのに対して、△—▲は直線のようにになっている。このように、TBはCODの時と同様の関係がみられることから、COD濃度は浮遊成分の影響を強く受けていることが考えられる。さらに、これらECと流量、TBと流量の関係は、河内橋においても同様のことがいえた。

c) CODとEC, TBの相関

COD濃度が浮遊成分の影響を強く受けることが考えられることから、COD濃度とEC, TBとのそれぞれの相関について考えた。COD濃度と溶存成分であるECとの相関は全くみられなかったが、COD濃度と浮遊成分であるTBについては若干の相関がみられた。図-10にCODとTBの関係を示した。図から、TB濃度が増加するとCOD濃度が増加していくことがわかる。また、同じTB濃度でもCOD濃度のばらつき幅が大きい。このCOD濃度とTB濃度の相関は、図に示すように0.41と数値的にみると比較的相関が低いといえる。しかしながら、COD濃度は一般に、浮遊成分と溶存成分の両方の影響が考えられるので、浮遊成分のTBとの相関は、それほど高くならなかったと考えられる。先ほどの溶存成分であるECと流量の関係のように、希釈効果も考えられるため、あまり相関が見られない。

(3) L-Q式を用いた負荷量算定

a) 定期観測データと自動観測データのL-Q式

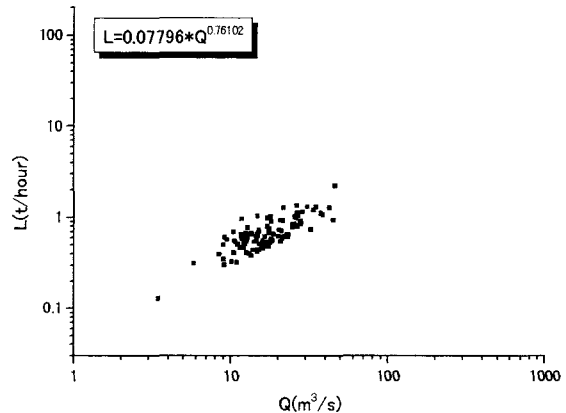


図-11：浅香での負荷量(L:t/hour)と流量(Q:m³/s)の関係(1983年～2003年：定期観測)

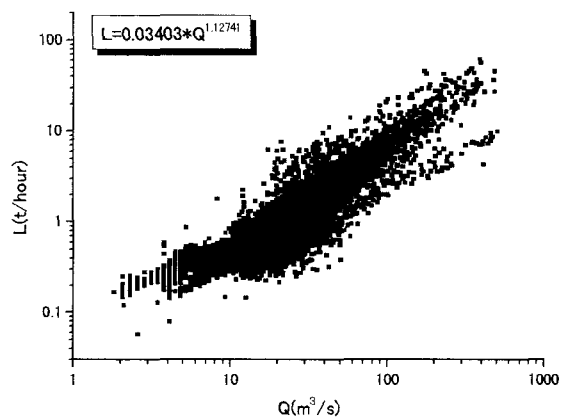


図-12：浅香での負荷量(L:t/hour)と流量(Q:m³/s)の関係(2002年5月～2003年12月：自動観測)

ここまで、定期観測データと自動観測データの測定頻度による違いについてCOD濃度と流量の関係をj用いて考察してきたが、ここでは実際にそのCOD濃度と流量のデータから負荷量を算定する。

現在まで、負荷量を推定する方法として、降雨を考慮した様々な統計回帰モデルが用いられている。統計回帰モデルには3つのモデル、①流送モデル、②流送・堆積モデル、③累加負荷量回帰モデルがあり、本研究では降雨時負荷量の統計回帰モデルの流送モデル(L-Q法)を用いた。流送モデルは、1週間程度の頻度で定期的に観測したデータを用いても計算が簡単で扱いやすく比較的使用頻度が高いモデルであり、流量と負荷量の関係は次式で表される。

$$L = a \cdot Q^b \quad (1.1)$$

ここで、L：負荷量、Q：流量、a, b：定数である。一般にこの式では、観測データの測定時間間隔が大きい場合、降雨時の水質が流量のピークの前後で同一流量であっても異なるというヒステリシスを考慮できないという短所がある。しかし、この短所は観測頻度が低い場合に該当し、今回用いた1時間毎のデータについては観測頻度が高く、ヒステリシスを考慮できると考えられる。このL-Q法で導いたL-Q式を観測頻度が低い定期観測について図-11に、観測頻度が高い自動観測について図-12に示す。それぞれの図

表-2：定期観測データ，自動観測データから導いたL-Q式(L:t/hour, Q:m³/s)を使った負荷量算定結果
(2003年：浅香，河内橋)

	L-Q式作成データ	L-Q式(L:t/hour, Q: m ³ /s)	2003年の負荷量(t/year)
浅香	定期観測	$L=0.07796*Q^{0.76102}$	9563
	自動観測	$L=0.03403*Q^{1.12741}$	17658
河内橋	定期観測	$L=0.06832*Q^{0.70856}$	6724
	自動観測	$L=0.00569*Q^{1.4714}$	13720

の縦軸に示している負荷量は，定期観測，自動観測それぞれのCOD濃度データと流量データを乗じて求めた値である．この2つの図を比較すると，定期観測データを用いた負荷量と流量の関係では流量が50m³/s以内の負荷量と流量の関係までしかみることができないのに対して，自動観測では10倍の500m³/sまでの関係をみることができる．この結果，L-Q式の傾きが大幅に違い，明らかに，定期観測データから求めたL-Q式の方が流量変化(流量が50m³/s以上)に対しての負荷量を考慮していないことが判る．

b) L-Q式を用いた負荷量算定

図-11と図-12に示すように定期観測データから導いたL-Q式と自動観測データから導いたL-Q式を用いて，2003年の1年間の負荷量を算定した．その結果を表-2に示す．表-2から，浅香，河内橋の両地点において，定期観測からのL-Q式で算定した負荷量と自動観測からのL-Q式で算定した負荷量とでは大きく違い，自動観測から算定した負荷量の方が，従来の定期観測から算定した負荷量よりも約2倍あることが判った．

4. まとめ

本研究以前に，大和川の水質汚濁の原因と今後の水質改善のため，定期観測データを使用した物質負荷量の推定と土地利用との関係について研究がなされてきた．しかし，従来まで使用されてきた1ヵ月に1回の定期観測データでは，高流量時の水質特性を考慮できないという問題がある．そこで本研究ではこの問題に対して観測頻度が高い自動観測データを用いて補い，従来の定期観測データと近年から得られる自動観測データの違いを明らかにし，化学的酸素要求量(COD)と流量の関係から示した．そして，この関係を溶存性の影響を示す電気伝導度(EC)と，浮遊成分の影響を示す濁度(TB)とそれぞれ比較し，その結果，TBとCODは同じ流量においても濃度が違うヒステリシスの関係がみられ，CODは，浮遊成分の影響を強く受けていることが判った．そして，溶存成分であるECは，降雨イベントによって減少し，その後，基底流量時に増加し，次の降雨イベントではその増加した値から減少し，降雨イベントが続くと増加する時間がないので，ECは最低値を示したまま一定となることも判った．また，これら水質の流量依存特性を浅香と河内橋の2地点で解明することができた．最後にこのCODと流量の関係を用いて，定期観測データと自動観測データを降雨時負荷量の統

計回帰モデルの流送モデル(L-Q法)を用いてそれぞれのCOD負荷量の算定を行った結果，浅香，河内橋の両地点において，定期観測からのL-Q式で算定した負荷量と自動観測からのL-Q式で算定した負荷量とでは大きく違い，自動観測から算定した負荷量の方が，従来の定期観測から算定した負荷量よりも約2倍あることが判った．今後の課題として，今回は，大和川の2地点のデータを用いたが，流量だけでは説明できなかったCODやTB，ECの変化について，降雨や土地利用に密接な関係があると考えられることから，それらの変動特性など，より詳細な調査・解析を行う必要があると考えられる．

参考文献

- 1) 国土交通省(平成15年度一級河川の水質現況)：
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/05/050707_.html
- 2) 窪原拓馬，井伊博行，平田健正，石塚正秀，谷口正伸，伊勢達男，宮川勇二：大和川流域における物質移動量の推定，水工学論文集，第46巻，pp.229～234，2002
- 3) 窪原拓馬，井伊博行，平田健正，江種伸之，石塚正秀，伊勢達男，宮川勇二：大和川流域における河川水の水質特性について，水工学論文集，第45巻，pp.985～990，2001
- 4) 井伊博行，谷口正伸，平田健正，石塚正秀，窪原拓馬，伊勢達男，宮川勇二：大和川のBOD，アンモニア態窒素，陰イオン界面活性剤濃度の季節変動とその原因について，水工学論文集，第46巻，pp.235～240，2002
- 5) 平田健正，井伊博行，長谷部正彦，江種伸之，坂本康，糸川高德，西山幸治，酒井信行，岩崎宏和：土地利用特性の河川水質に及ぼす影響—大阪府石川流域—，土木学会論文集，No.614/II-46,97-107,1999.2
- 6) 井伊博行，平田健正，長谷部正彦，江種伸之，坂本康，糸川高德，西山幸治，酒井信行，堀井壮夫：環境同位体及び化学組成からみた石川流域の河川水と地下水の起源について，水工学論文集，第43巻，1999.2
- 7) 国土交通省河川局ホームページ：<http://www.mlit.go.jp/river/>
- 8) 武田育郎著：水と水環境の基礎知識，株式会社オーム社，2001
- 9) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，第345号II-1，1984
- 10) 伊勢屋ふじこ：茨城県桜川における浮遊土砂と河畔堆積減少，第23回水理講演会論文集，1979
- 11) 有田正光編著，池田裕一，中井正則，中村由行，道奥康治，村上和男共著：水圏の環境，東京電機大学，1998

(2004.9.30 受付)