

陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析法に関する検討 ～江戸川を例にして～

二瓶泰雄*・木水 啓**・植田雅康***
中岡 亮****・望月 健*****

沿岸環境管理に必要な陸域環境負荷に関する現状の調査方法や評価手法の問題点や精度に関する検討結果を、江戸川を例にして示した。陸域負荷の基礎となる流量・土砂輸送量に関する既存の観測精度を示すために、ADCP や CTD センサーを用いて洪水時調査を行った。その結果、既存の方法では流量に関しては2～4割、土砂輸送量に関しては3～5割程度過大評価していた。次に、陸域負荷評価によく用いられる区間代表法や $L-Q$ モデルの推定精度を検討した結果、年平均負荷量に関しては $L-Q$ モデルで最大2割、区間代表法では約3割の誤差が生じるのに対して、洪水時における高負荷状況の評価精度は両手法共に著しく低下することが示された。

1. はじめに

沿岸環境管理を考える上では、陸域からの環境負荷を把握することは必須である。陸域負荷の大部分を占める河川経由の負荷量を求める際には、流量と物質濃度（土砂、栄養塩、有機物濃度など）の実測値が必要となる。このうち、流量は自動観測所における水位データとその地点での水位流量曲線から求められる。一方、物質濃度に関しては、水質に関する自動観測所の数が水位と比べて非常に少なく、また測定項目が限定されている。そのため、長期の陸域環境負荷を評価するには、月一回程度の頻度で行われる低水時水質調査の結果のみに基づく方法（以下、区間代表法と呼ぶ）や、水質負荷量 L と流量 Q の相関関係に基づく方法（ $L-Q$ モデル）などが用いられる（武田，2001）。しかしながら、これらの算定法では、様々な出水時を含む長期間の結果が反映されず、陸域負荷評価精度に疑問が生じる。

また、上記の負荷量算定の元となる流量や物質濃度の実測値を取得するには、一般に、棒浮子による流量調査や横断面内の代表点（横断方向1点、鉛直方向数点）における採水調査が行われている。しかしながら、棒浮子観測は多くの水理学的問題を含み（木下，1984）、また、土砂濃度などは横断面内で一様になるとは考えにくく、数点のみの採水結果では物質濃度計測は不十分であると考えられる。

このように、陸域負荷の調査方法自体や評価方法に誤差が含まれており、この誤差を含む結果が沿岸環境研究の「境界条件」として長い間用いられている。本報では、現状の陸域環境負荷の計測・評価方法に関する問題点や精度の一端を明示することを目的とする。まず、既存の陸域負荷調査方法の計測精度を調べるために、流量と土砂輸送量に着

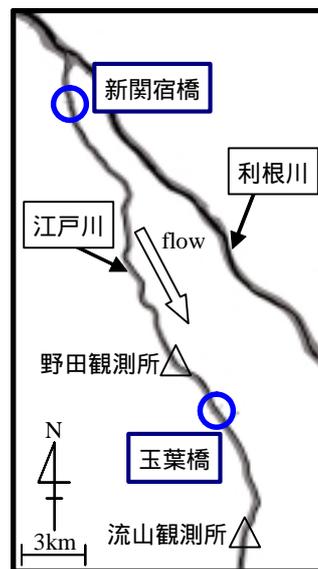


図 - 1 観測点の位置

目して、鉛直分布計測が可能な ADCP や CTD センサーを用いた現地観測を行い、その結果を既存の方法による結果と比べる。次に、陸域負荷評価方法の精度を示すために、自動水質観測所で連続計測されている水位及び有機物濃度の指標である COD を対象として、区間代表法や $L-Q$ モデルを用いて COD 負荷量を算定し、実測データと比較・検討する。

2. 陸域負荷調査方法の計測精度

(1) 観測方法

陸域負荷の基礎となる流量と土砂輸送量に関する既存の観測方法の精度を検証するために、江戸川を対象として現地観測を実施した。観測サイトは、図 - 1 に示すように、江戸川の上流部（新関宿橋、河口より 57.5km）と中流部（玉葉橋、35.5km）の2箇所である。観測期間は 2004/10/5-8（秋雨前線観測）、2004/10/21-22（台風 23 号観測）、という2つの洪水イベントとした。流量の観測には、別途行われた棒浮子観測と同期する形で、流速鉛直分布計測が可能な ADCP（WorkHorse ADCP Sentinel 1200kHz，RD 社製）

* 正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科
** 学生員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
*** 西武建設(株)
**** 学生員 大阪大学大学院 工学系研究科土木工学専攻修士課程
***** 東京消防庁

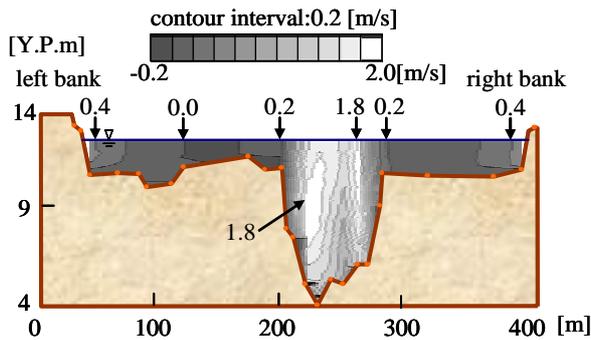


図-2 主流方向流速コンター（新関宿橋，10月21日17:13～18:23，BT補正なし）

を用いて行われた．具体的には，河川橋上より ADCP を吊り下げ，センサー面を水面下約 20cm に設置して計測し，これを横断面内の 8～15 地点において実施する．この ADCP データから流量を算定する際には力学的内挿法（二瓶・木水，2005）を用い，この結果と棒浮子観測の結果を比較する．なお，ADCP 計測時には，「河床面が静止している」という仮定を用いて底面との相対速度から流速を算定する，というボトムトラッキング機能（BT 補正）を採用する機会が多いが（武藤ら，2005），掃流砂輸送が顕著になる洪水時ではこの補正の仮定に疑問が生じる．そこで，水面上でほぼ固定された ADCP による本観測結果を用いて，「BT 補正なし」と「BT 補正あり」の流量を求め，両者を比較する．

次に，土砂濃度の計測には，濁度の鉛直分布計測が可能な CTD センサー（COMPACT-STD，アレック電子株）を橋上より吊るし，水表面付近から底面まで降ろす，という作業を横断面内の 8～15 地点で行った．その結果及び濁度と SS の検定結果から土砂濃度（SS）の鉛直・横断分布を算出する．また，得られた土砂濃度と ADCP による流速値を用いて横断面内を通過する土砂輸送量を求める．

(2) 流量に関する観測結果

a) 流速分布

流量算定の基礎となる，河道内における流速の横断・鉛直変化を見るために，主流方向流速コンター（BT 補正なし）を図-2に示す．ここでは，新関宿橋における10月21日17:13～18:23の結果を表示している．これを見ると，低水路流速は最大2m/sに達し，その流速ピークの横断位置は，低水路平面形や橋脚の影響を受けて，低水路の中央部には現れず右岸・左岸境界付近に生じている．また，流速ピークの高さは，右岸側では表層付近に現れるのに対して，左岸側では底層付近に現れている．左岸側では，低水路側岸に繁茂しているヤナギの葉が水表面付近を覆っているため，それに起因する流体抵抗により底層付近の流速が表層よりも大きくなる．一方，高水敷に関しては，植生が密に繁茂する場所では，0.1m/s 以下もしくは上流向きの流れが生じるのに対して，植生分布が疎な領域では0.4～0.5m/s という

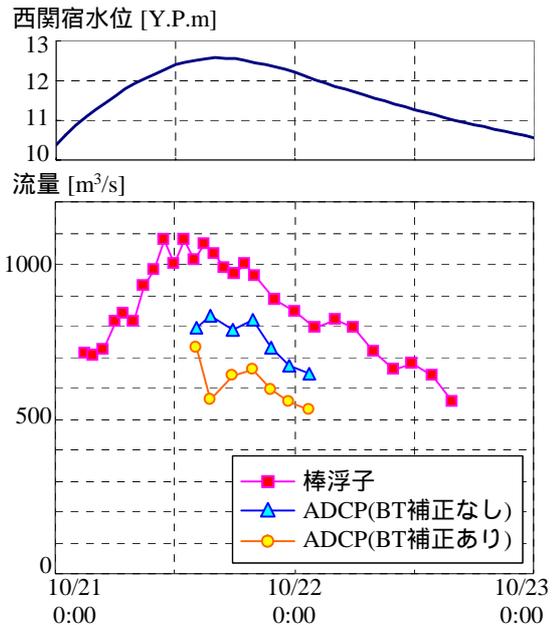


図-3 河川流量（台風23号観測，新関宿橋）

大きい流速が生じている．このように，横断面内の流速分布は横断・鉛直方向に大きく異なっており，さらに，水深平均流速と表層流速の比である更正係数が横断面内において一様となっていないことが分かる．

b) 棒浮子観測と ADCP 観測による流量の比較

棒浮子観測と ADCP 観測により得られた河川流量及び水位変動の時間変化を図-3に示す．ここでは，新関宿橋における台風23号観測時の結果を表示している．まず，棒浮子観測結果と ADCP 観測結果（BT 補正なし）を比べると，どの時点でも棒浮子による流量値が相対的に大きい．ADCP 計測期間の平均値としては，棒浮子観測及び ADCP 観測の結果は各々954m³/s，754m³/sとなり，棒浮子観測値は ADCP 観測結果の1.27倍とやや高い．このような両観測値の相対関係は，他の観測地点（玉葉橋）や秋雨前線観測においても確認されており，今回観測を行ったイベント程度の小規模出水の場合には，江戸川では，棒浮子観測値は ADCP 調査結果の概ね1.2～1.4倍となることが示された．棒浮子観測の流量値が過大評価しているのは，棒浮子自体が流れの収束域に集まりやすいことや，観測が困難な低水路側岸付近における流速低下分が流量算出時に反映されていないためである．この2～4割の流量誤差は，東京湾の海水交換や滞留時間の評価を考えると，決して小さくない誤差である．

また，ADCP 観測における BT 補正の有無と流量観測値の関係に関しては，従来用いられる BT 補正ありの場合における流量値は，BT 補正なしの値よりも下回っている．これは，底面速度が0.5m/s を越える結果となっているためであり，従来の ADCP 調査で採用されている BT 補正を行うと流量を過小評価することが明らかとなった．

(3) 土砂輸送量に関する観測結果

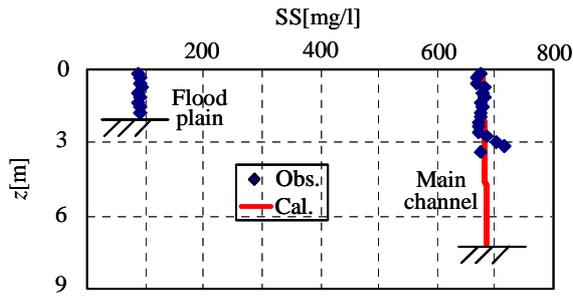


図 - 4 SS 鉛直分布の観測値と推定値 (台風 23 号観測時, 新関宿橋, 10/21 13:31 ~ 14:54, z: 水面からの高さ)

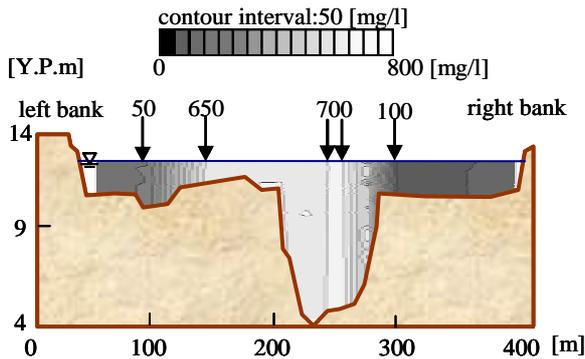


図 - 5 SS の断面コンター (新関宿橋, 10/21 13:31 ~ 14:54)

a) 土砂濃度分布

SS の鉛直構造に関する基本的な特徴を抽出するために、台風 23 号観測時の新関宿橋における低水路と高水敷上の SS 鉛直分布を図 - 4 中の印で示す。ここでは、SS の観測値とともに測定点の底面位置を表示している。これを見ると、SS の観測値は低水路、高水敷ともに鉛直方向に大きな変化は見られず一様化している。浮遊土砂の粒径分布を調べた結果、中央粒径が 10 ~ 20 μm という微細粒子であったため、SS の鉛直分布が一様化したものと考えられる。また、CTD センサーの計測範囲に着目すると、高水敷では水深全体にわたって計測値を得ることができたものの、流速レベルが大きい低水路では CTD センサーが下流方向に流されたため底層まで計測を行うことができなかった。そこで、SS 鉛直分布として指数関数を仮定して得られた SS の推定値を同図中に実線で図示する。これより、低水路や高水敷ともに、SS 推定値は観測値と概ね一致しており、本観測で得られた SS 分布が良く知られている指数関数で近似できることが示された。

次に、新関宿橋における横断面内の SS コンターを図 - 5 に示す。ここでは、洪水時の水位ピーク期 (10/21 13:31 ~ 14:54) での結果を図示している。このコンター図作成に採用されている SS 値としては、観測値がある部分ではそのまま観測値を使用し、データ欠測の部分には上記の推定値を与えている。この図を見ると、低水路で最大 700mg/l まで達しているのに対して、高水敷では 50 ~ 200mg/l 程度である。また、左岸・右岸側の高水敷における SS 差と対応して低水

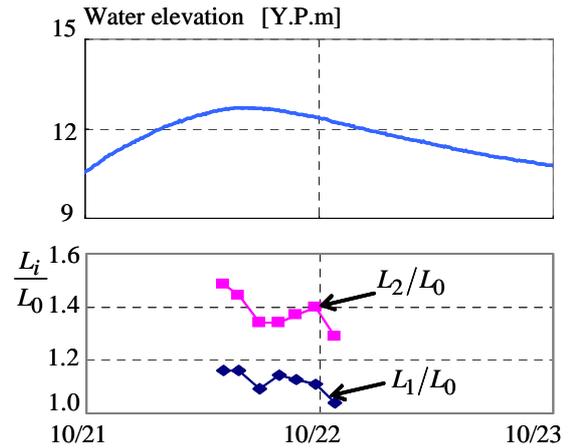


図 - 6 土砂輸送量の算定結果 (台風 23 号観測, 新関宿橋)

路内でも SS 差が見られる。このように SS は断面内で大きく変化し、鉛直方向よりも横断方向の変化が顕著である。

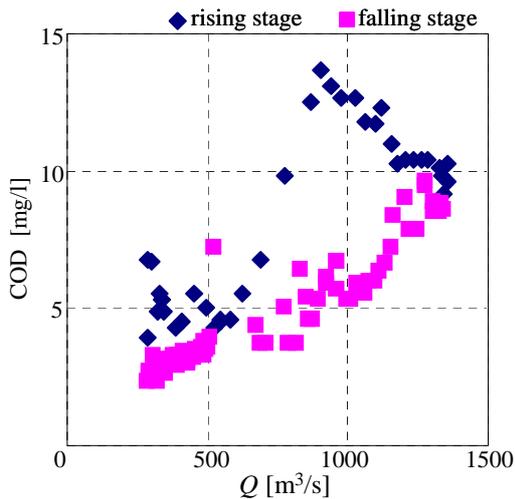
b) 土砂輸送量の評価精度

CTD センサー及び ADCP により計測された SS と流速の観測データに基づいて土砂輸送量 L_0 を算定した結果を図 - 6 に示す。通常の調査では、低水路中央部における SS 計測値と流量の積により土砂輸送量を算定しているの、ここでは、低水路中央部の SS 値と ADCP 調査による流量値の積 L_1 、同じ SS 値と棒浮子観測による流量値の積 L_2 を算出して本観測結果 L_0 で割っている。これを見ると、低水路中央部の SS は断面平均値よりも大きいため、本観測結果 L_0 と比べて、 L_1 や L_2 は過大評価しており、 L_1 では 4 ~ 16%、 L_2 では 29 ~ 49% の算定誤差が生じている。類似した傾向は、他の観測結果からも確認されている。これより、既存の土砂動態調査では、土砂輸送量をおよそ 30 ~ 50% 過大評価しており、土砂濃度計測のみに起因する誤差は 10% 程度となる。出水時に増加する栄養塩や有機物の懸濁態濃度の空間分布は土砂濃度と類似すると予想されるため、これらの懸濁態濃度の負荷量評価にも同程度の誤差が生じるものと考えられる。これらの負荷量評価の誤差は、沿岸海域への物質輸送や水系一貫土砂管理の点から無視できないものと考えられる。また、土砂輸送量の高精度評価のためには SS の鉛直・横断分布調査を行うことは不可欠であり、そのためには本研究で行った CTD センサーを用いる調査法は有用である。

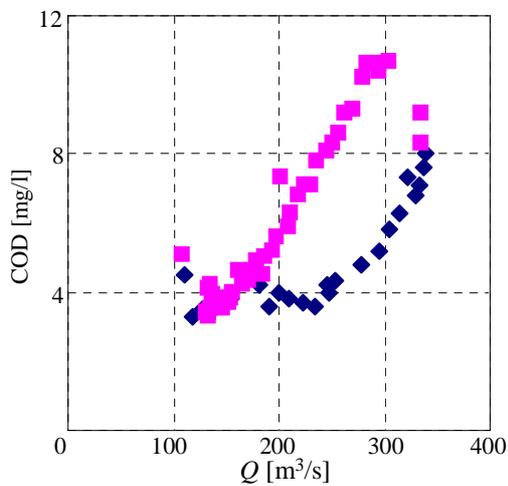
3. 陸域負荷評価手法の検討

(1) 評価方法の概要

陸域負荷評価手法として一般的な区間代表法や $L-Q$ モデルの推定精度を検証する。ここでは、1 時間間隔で連続計測されている自動水位・水質観測所におけるデータを用いて、水質の測定項目の一つである COD を例にして、COD 負荷量の算定を行う。具体的には、実測されている COD と流量の積による COD 負荷量を正解とし、区間代表法や $L-Q$ モデ



(a) 濃度先行型 (04/10/9~14)



(b) 濃度後方型 (04/9/30~10/3)

図 - 7 洪水時における COD と流量 Q のヒステリシス

ルにより算定された COD 負荷量の推定精度を検討する。

COD 負荷に関する解析対象地点は、江戸川中流部の流山 (図 - 1) とする。ここで用いるデータは、野田観測所 (河口より 39.5km) における水位と、流山観測所 (河口より 27.5km) における COD とする。流山観測所においても水位観測は行われているものの、この場所は河口部に位置する江戸川水閘門の開閉状況に影響される湛水域であるため、精度の良い水位 - 流量曲線が得られていない。そこで、野田観測所で得られる水位データ及び水位 - 流量曲線から野田観測所での流量を算出し、その結果と連続式を用いて流山観測所の流量を求めている。この COD 及び流量データは 1 時間間隔で取得されており、本論文では 2002 年から 2004 年までの 3 年間の解析対象とする。なお、2. で記述している流量や懸濁態濃度 (土砂濃度) に関する計測誤差については、ここでは言及せずにデータ解析を行う。

上記の観測データを用いて、区間代表法と $L-Q$ モデルに

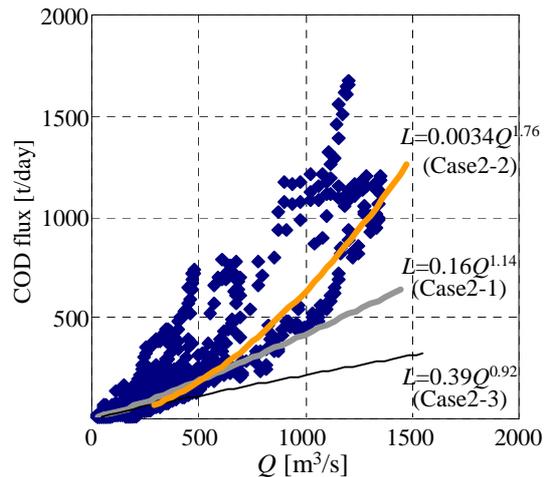


図 - 8 L と Q の相関図及び各ケースの $L-Q$ 曲線 (2004 年)

より COD 負荷量を算定する。ここでは、流量には実測値を用い、COD もしくは COD 負荷量の算定には次に示す方法を適用する。まず、区間代表法としては、低水時における COD データを毎月 1 つ抽出し、その間のデータを線形補間して COD の時系列データを作成する、という方法 (Case1) を用いる。次に、 $L-Q$ モデルとしては、実測された COD 負荷量 L と流量 Q に対して、次の近似式を適用する。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

ここで、 a, b は係数である。 $L-Q$ 式を作成するデータ対象としては、解析対象期間の全データ (Case2-1)、最も大きい洪水イベント時のみのデータ (Case2-2)、Case1 で採用された低水時のみのデータ (Case2-3) とする。これに加えて、流量の大きさにより低水時 (Case2-3) と高水時 (Case2-2) の $L-Q$ 式を組み合わせるケース (Case2-4) も採用する。これらの 5 つの方法により、2002~2004 年を対象として年毎に COD 負荷量を算出し、実測値と比較する。

(2) 江戸川における COD 負荷特性

まず、江戸川における COD 負荷特性を見るために、洪水時における COD と流量のヒステリシスを図 - 7 に示す。ここでは、代表的な洪水イベントとして、2004/10/9~14 と 2004/9/30~10/3 の期間を選定し、増水期と減水期を分けて表示している。これを見ると、前者のイベントでは増水期の COD が減水期の値より大きい「濃度先行型」であるのに対して、後者のイベントではその逆となる「濃度後方型」となっている。2002 年から 2004 年までの 3 年間で生じた 13 の洪水イベントに対して、流量と COD のヒステリシスを調べた結果、上記の 2 つのヒステリシスに分類され、洪水イベント中の最大流量が $500\text{m}^3/\text{s}$ より大きい場合には濃度先行型が、それよりも最大流量が小さい場合には濃度後方型が生じることが確認された。また、類似したヒステリシスは、流量と COD 負荷量においても存在している。

図 - 8 は COD 負荷量 L と流量 Q の相関図及び上記の Case2-1, 2-2, 2-3 における $L-Q$ 曲線を示している。ここで

表 - 1 実測値と各手法による年平均 COD 負荷量の算定結果

		2002年	2003年	2004年
実測値[kt]		16.1	13.3	14.8
割合 [%]	Case1	71.0	69.8	71.0
	Case2-1	87.8	85.7	80.8
	Case2-2	86.7	51.3	51.8
	Case2-3	59.8	67.4	63.9
	Case2-4	94.6	76.7	80.4

は、2004 年における全データがプロットされている。これを見ると、流量が大きくなると共に COD 負荷量のばらつきが顕著となっている。これは、上述した一洪水イベント中における L と Q のヒステリシスが影響することや洪水イベント毎に $L-Q$ の関係が変化するためである。また、 $L-Q$ 曲線はケース間で異なり、式 (1) 中の b に関しては、高水時のみの Case2-2 が最も大きく、低水時のみの Case2-3 が最も小さい。年間データに対する Case2-1 では両者の間となっている。また、これら 3 つの $L-Q$ 曲線はばらつきの大きい観測データとはある程度の差が生じており $L-Q$ モデルに基づく COD 負荷量の評価には限界があることが伺える。

(3) 各手法の推定精度

陸域負荷評価手法の基本的な推定精度を検証するために、各年の年平均 COD 負荷量に関する実測値及び各ケースの算定結果を表 - 1 に示す。ここで、各手法の算定結果は実測値で基準化された形で表記されている。これを見ると、低水時データのみに基づく区間代表法 (Case1) では 70~71% となり、高水時データを考慮できていないために過小評価となっている。 $L-Q$ モデルに基づく方法としては、対象全データを用いた方法 (Case2-1) の結果は 81~88% と平均的には最も実測値に近いのに対して、高水時データのみ (Case2-2) や低水時データのみ (Case2-3) では概ね過小評価している。しかしながら、この両者の $L-Q$ 式を組み合わせた場合 (Case2-4) では Case2-2 や Case2-3 よりも算定精度を向上させて 77~95% となり、Case2-1 を上回る精度のときもある。これより、適切な $L-Q$ 式を選定することにより、年間平均 COD 負荷量として推定誤差を 5~23% に抑制できることが示された。また、出水時の COD データが含まれていない区間代表法においても、年平均負荷量の推定誤差が 30% 程度であり、適切な $L-Q$ モデル (Case2-4) と比べても大幅には推定精度は低下しないことが伺える。

次に、洪水イベント時における COD 負荷量の算定結果を比較するために、実測値及び各手法により算定された COD 負荷量の時系列変化の一例を図 - 9 に示す。ここでは、図中の太矢印に示されるように、2 つの洪水イベントが生じており、2 番目のイベントは Case2-2 の $L-Q$ 曲線を作るときに対象とした結果である。この図より、まず、Case2-2 の結果に関しては、2 番目の洪水時では当然のことながら実測値と

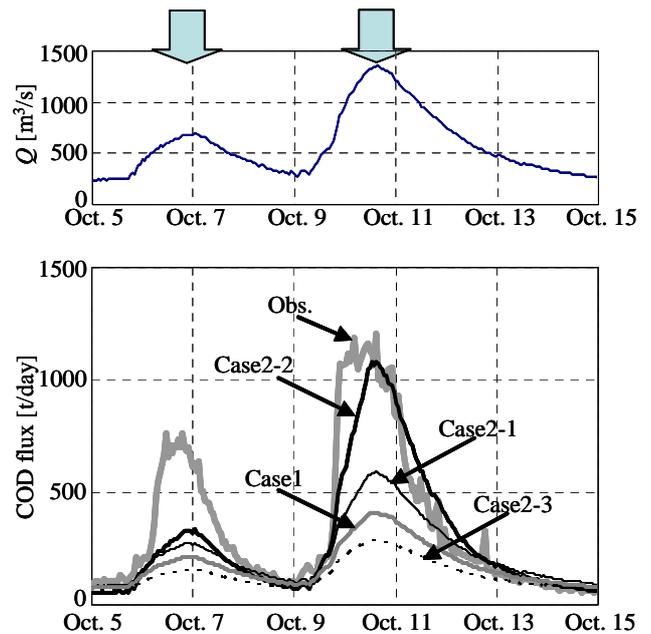


図 - 9 流量および COD 負荷量の時系列変化 (2004 年 10 月)

推定値は概ね良好に対応しているものの、1 番目のイベント時には両者には大きな差が生じている。これは、前述したように、洪水イベント毎に L と Q の関係が変化しているためである。また、他の評価手法により算定された COD 負荷量のピーク値は実測値よりも大幅に小さい。以上のことから、これらの陸域負荷評価法では、負荷量の年平均値に関してはある程度の推定精度が保たれるものの、洪水イベント時における高負荷状況の算定精度は著しく低いことが分かる。この問題は、沿岸生態系の“フェイズ・シフト”(灘岡, 2005) を取り扱う上では憂慮すべき問題である。

4. まとめ

本報では、陸域環境負荷の計測方法や評価手法に関する現況と問題点、精度の一端について江戸川を例にして示した。ここで得られた結果をベースとして、沿岸海域環境に関する研究・管理の面から陸域負荷評価に必要な質と量について今後議論していく必要がある。

謝辞：棒浮子観測結果及び江戸川の水位・COD データに関しては、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所にご提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 木下良作 (1984): 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, No.345 / -1, pp.1-19.
- 武田育郎 (2001): 水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp.1-198.
- 灘岡和夫 (2005): 広域統合システムにおけるサンゴ礁生態系 - その保全・回復に向けての諸課題, 月刊海洋, Vol.37, No.2, pp.169-175.
- 二瓶泰雄・木水啓 (2005): 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集 (投稿中).
- 武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川一 (2005): ADCP を用いた水流域における流速分布計測, 水工学論文集, Vol.49, pp.637-642.