

三峡ダムの影響を考慮した長江河口域でのバロクリニック流動と 浮遊底質の解析

Numerical Experiment of Cohesive Sediment Transport in the Yangtze Estuary Considering the Influence of the Three Gorges Dam

三島豊秋¹・山下隆男²・駒口友章³

Toyoaki MISHIMA, Takao YAMASHITA and Tomoaki KOMAGUCHI

In this study, the baroclinic flow and cohesive sediment transport in the Yangtze Estuary considering the influence of the Three Gorges Dam(TGD) are simulated by using the ECOMSED + COSINUS. This model is created to describe the evaluation of the number concentration and floc size due to the aggregation and breakup processes. The influence of the Yangtze River outflow due to the construction of the TGD is estimated by the hydrological simulation for the lower basin from the TGD using HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran). The simulation predicted that the decrease of the flow and sediment discharge from the Yangtze River after the construction of the TGD result in the decrease of the sediment volume accumulated in the river mouth by the effects of flocculation processes.

1. 緒言

三峡ダムは、長江中流部に建設中の多目的ダムであり、総貯水量約390億m³を誇る巨大な多目的ダムである。二期工事が終了した2003年より一部の湛水が開始されており、2006年には本体工事でも完了している。ダム全体の工事が完了する2009年以降には、中国では消費電力の約1割となる電力供給および洪水調整による増水期の洪水氾濫の制御などの多くの効果が期待されている。

一方で、我国でもそうであったように、ダム建設に伴う下流域での河川水、流出土砂および栄養塩等の変化による水環境への影響が懸念されている。長江は東シナ海へ流入する大河である。長江から流出する大量の河川水による淡水プリュームは韓国および我国の東シナ海沿岸に広がり、この海域での跳層構造および栄養塩の供給にまで影響を及ぼすと推測されている(国立環境研究所, 2006)。これらの影響は、東シナ海における生物環境へ影響を及ぼすため、東シナ海沿岸域での水産業などへも大きな影響を及ぼすと推測される。三峡ダム建設の影響は、長江流域の中国国内のみにとどまらず、東シナ海に面する我国および韓国にとっても大きな懸念事項である。

ダム建設に伴うもう一つの影響に、流量変化およびダムへの堆砂による下流域および海域への土砂供給量の変化がある。長江は、年間数億トンの大量の土砂を東シナ海沿岸へ排出する大河である。長江の輸送土砂量は、流域の開発および上流域でのダム建設等により若干減少傾

向にあったが、三峡ダム建設後の2003～2006年のDatongでのそれは建設前の60%程度以下まで減少していることが報告されている(Xuら, 2009)。このような東シナ海沿岸への流出土砂量の減少は、この沿岸の土砂環境へ大きな影響を及ぼしていると推測される。

これらの長江・東シナ海系の水環境に及ぼす三峡ダムの影響は、人間活動を含む、陸面、陸水、河口、海洋、および気象の複雑な相互作用系の帰結として現れる。そのため、まず三峡ダム上流域および中下流域のそれぞれに対する気象・水文特性の評価、汚濁物質および土砂の流入・輸送特性の評価などが必要である。また、長江河口海域では、河川水と海洋水との混合過程、汚濁物質および浮遊砂の輸送特性、さらには東シナ海での黒潮および季節風による吹送流による長江起源水の拡散過程を評価することにより、総合的に評価しなければならない。

本研究では、三峡ダム中下流域での気象・水文流出、長江河口海域での河川水と海洋水との混合過程および浮遊砂の輸送解析に限定し、三峡ダムの影響を考慮した長江河口域でのバロクリニック流動およびフロック粒子の成長・破壊過程を考慮した浮遊底質の解析を行う。

2. 三峡ダム中下流での水文流出解析

長江から河口域への流出流量に及ぼす三峡ダムの影響を推定するために、三峡ダム中下流での水文流出解析を行う。長江河口域へのダム中下流域での水文流出解析には、HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) を用いる(Bicknellら, 2001)。HSPFは、米国環境保護庁で開発された分布型概念モデルに分類される水文流出解析モデルである。図-1に三峡ダム中下流域に対する流域分割図を示す。対象期間は、流量観測データが得られた二

1 正会員 博(工) (株)碧浪技術研究所技術部長
広島大学産学連携センター客員研究員
2 正会員 工博 広島大学教授大学院国際協力研究科
3 正会員 工博 (株)碧浪技術研究所代表取締役社長

期工事終了後の2004年1月～12月である。三峡ダム建設の影響評価を行うためには、最終的にはダムによる洪水調整を考慮した長江全流域を対象とする水文流出解析が必要である。しかしながら、対象期間におけるダムの運営状況に関する情報は得られておらず、また長江の広大なすべての流域に対してHSPFのパラメータ同定を行うことはすぐには困難である。そこでここでは、まずダム中下流域を対象とする次のような水文流出解析を行う。解析では、感潮流量点Datongを長江最下流の河口流量点とし、その上流の流量観測点Hankouまでの流域を対象とする。Hankou-Datong流域への流入流量の評価には流量観測点HankouおよびTianeでの観測流量を、また三峡ダムの有無による流域への流入流量の変化の推定には三峡ダム直下流の流量観測点Yichangでの観測流量を用いる。

図-2に2004年1月～12月のDatongでの流量変化を示す。図中には、三峡ダム無し、三峡ダム有り（ダム排出流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ ）、三峡ダム有り（ピークカット $25,000\text{m}^3/\text{s}$ ）、およびDatongでの観測流量が示されている。解析では、Yichang下流域での観測流量を流入させた場合を三峡ダム無しの場合とし、三峡ダム直下流の流量観測点Yichangでの流入流量をゼロとした場合、すなわちHankou-Datong流域への流入流量からYichangでの観測流量を差し引いた場合を三峡ダム有り（ダム排出流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ ）としている。三峡ダム有り（ピークカット $25,000\text{m}^3/\text{s}$ ）の場合には、洪水調整を行う6～10月の期間を対象にしており、またそれ以外の期間に対しても三峡ダムにおけ

る年間の計画水位に対する平均的な流量調整を考慮している。ただし、計画水位に対する流量調整では、有効貯水量と水位の変化のみから推定しており、ダム湖の詳細地形は考慮されていない。

図-2に示されているように、長江中下流での流量は、増水期である6～10月にかけて最も多い。増水期7月における平均流量は、三峡ダム無しの場合には約 $50,000\text{m}^3/\text{s}$ であり、また $25,000\text{m}^3/\text{s}$ でピークカットした場合には約 $45,000\text{m}^3/\text{s}$ となる。増水期に対する長江河口域での流動・浮遊底質の解析では、長江からの流出流量にはこれらの値を適用する。

3. 長江河口域での流動・浮遊底質解析の概要

流出する浮遊底質の大半が粘土・シルト性の粘着性底質であるような長江河口域における浮遊底質の解析では、塩分濃度・水温変化によるバロクリニック流動と同時に、フロック凝集による沈降速度の変化等を評価することが重要である。ここで長江河口域における流動・浮遊底質の解析に適用するモデルは、Fitriら（2006）により開発されたECOMSED + COSINUSモデルに若干の改良を加えたモデルである。彼女らのモデルは、エスチャリーを対象とする流況モデルであるECOMSEDに（HydroQual Inc., 2002）、欧州連合で行われたMAST-IIIのCOSINUSプロジェクトにおける粘着性材料に対する成果を取り込んだモデルであり（Winterwerpら, 2004）、バロクリニック流動および凝集・破壊によるフロック粒子の平均粒径・平均個数濃度の変化等を予測することが可能である。

改良は、塩分濃度 2psu 以上からのフロック凝集の発生および海底面からの平衡粒径を持つフロック粒子の巻き上がりに対して行っている。河川から海域へ流出する浮遊底質は、塩分濃度が 2psu 程度になると急速にフロック凝集を起こす。浮遊底質が河口域まで到達するまでに数日を有する長江河口域では、河川上流から流入させた浮遊底質が河道内でフロック凝集してしまわないためにも

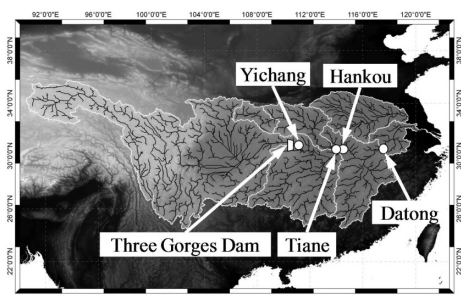


図-1 三峡ダム中下流での水文流出解析の対象範囲

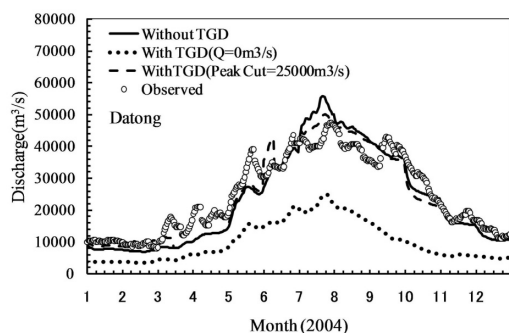


図-2 Datongでの流量（2004年）

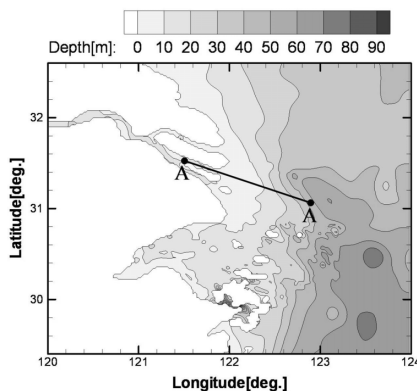


図-3 河口域での流動・浮遊底質解析の対象範囲

このようなモデル化が必要である。このモデル化は、海底面から巻き上がる凝集と破壊が釣り合ったフロック粒子の平衡粒径に対しても適用している。したがって、淡水域では最小粒径を持つ浮遊底質がそのまま巻き上がる。

図-3に長江河口域での流動・浮遊底質解析の対象範囲を示す。水平解像度は2064km×2064kmであり、鉛直方向分割は11層としている。海域での水位境界条件にはK1, O1, S2, およびM2の主要4分潮を与えおり、浮遊底質濃度および平均フロック粒径の初期条件および海域境界条件はそれぞれ1mg/Lおよび0.01mmとしている。なお、平均フロック粒径0.01mmはこの浮遊底質濃度における平衡フロック粒径にほぼ対応する粒径である。また、水温および塩分の初期条件および海域境界条件には、日本海洋センターHP(参照2009-11-20)上で公開されている水温および塩分統計処理データより、対象海域での対象月における平均水温および平均塩分濃度を算出して用いている。

長江上流の境界条件では、HSPFによる水文流出解析により算出された河口流量地点Datongでの流量を流入させる。この河川境界地点は、Datongよりかなり下流となるが、計算時間短縮のためにこの地点を河川境界としている。流入させる河川水の塩分は0.02psuとし、水温はDuanら(2008)およびZhairら(2007)の論文に示されているDatongおよび長江下流部での水温を参考に定めている。また、流入する浮遊底質の粒径は最小粒径である

4 μ mとする。浮遊底質濃度にはXuら(2009)によって整理されたDatongでの1950～2006年の月別の全流量および全浮遊底質濃度の相関図より、三峡ダム建設前の1991～2002年、および三峡ダム建設後の2003～2006年における月平均流量と浮遊底質濃度の関係式をそれぞれ算出することにより推定する。

図-4に三峡ダム建設前後におけるDatongでの月平均流量と浮遊底質濃度の関係を示す。なお、図中に示した三峡ダム建設前のデータは1991～2000年および2001～2002年の、三峡ダム建設後のそれは2003～2005年および2006年の月平均流量と浮遊砂濃度である。また、図中

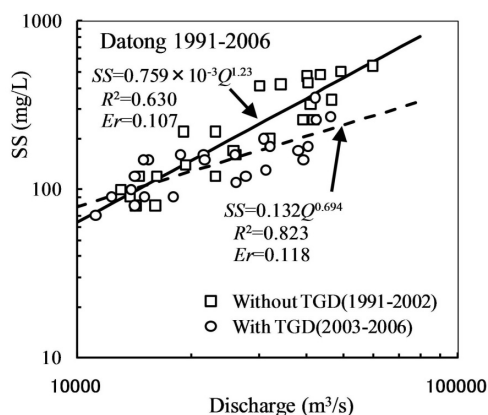


図-4 月平均流量と浮遊底質濃度との関係

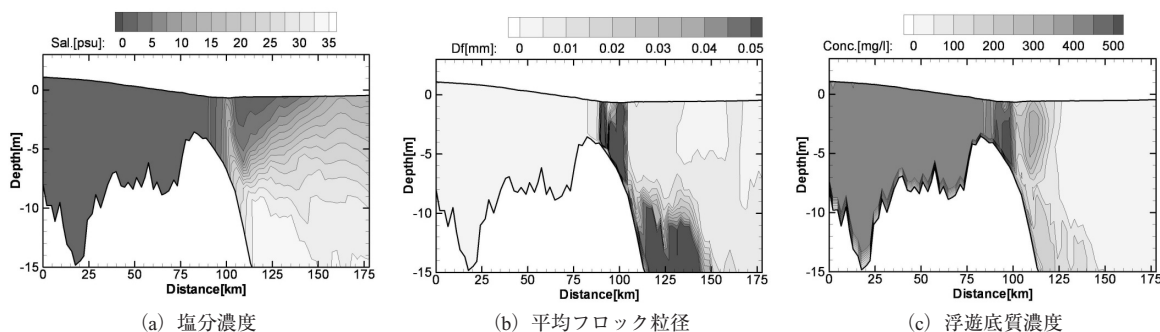


図-5 三峡ダム無しの場合のA-A断面での塩分濃度、平均フロック粒径および浮遊底質濃度

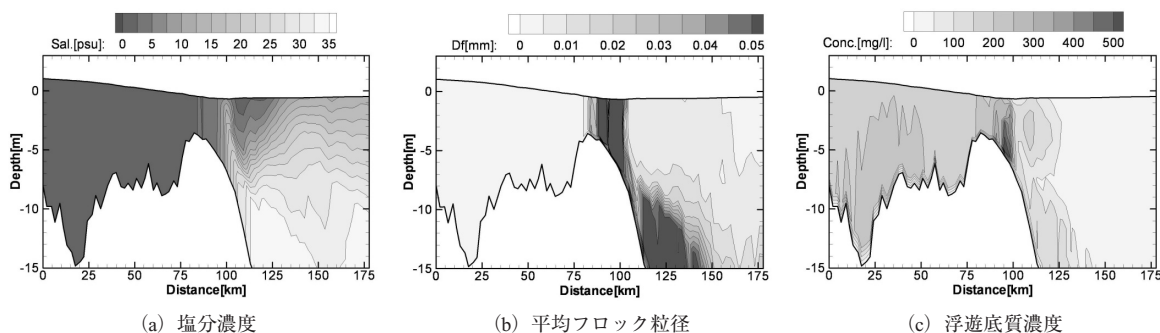


図-6 ピークカット25,000m³/sの場合のA-A断面での塩分濃度、平均フロック粒径および浮遊底質濃度

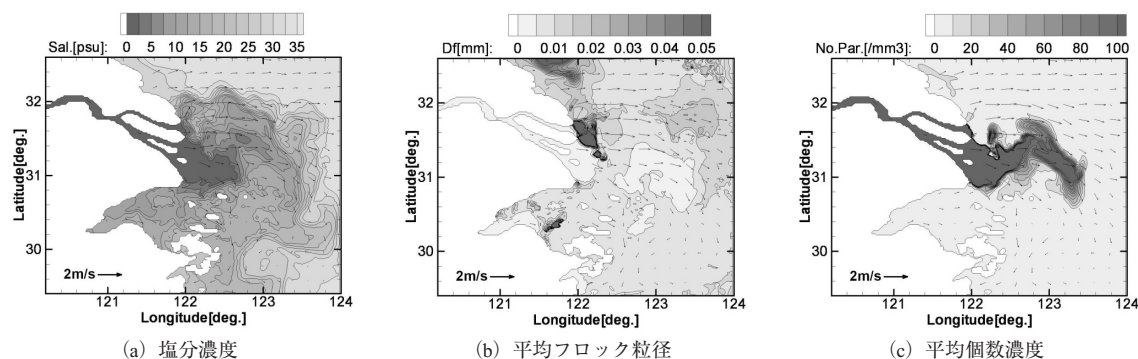


図-7 三峡ダム無しの場合の表層での塩分濃度、平均フロック粒径および平均個数濃度

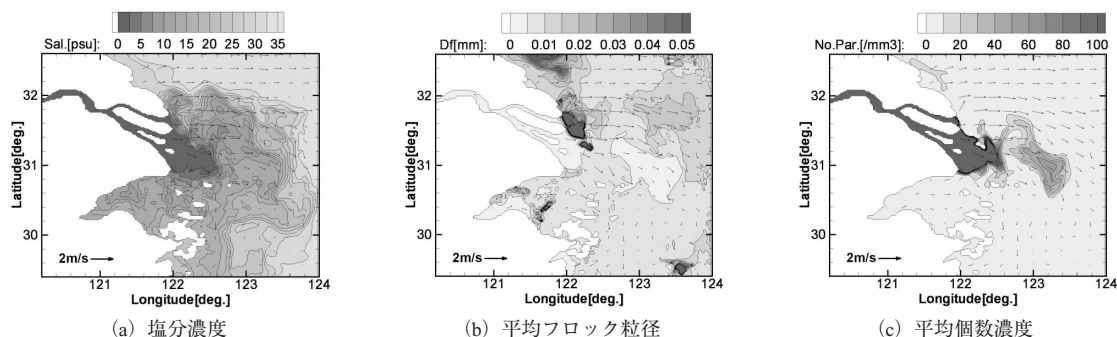


図-8 ピークカット25,000m³/sの場合の表層での塩分濃度、平均フロック粒径および平均個数濃度

に両対数に対するそれぞれの回帰曲線の寄与率 R^2 および標準誤差 Er を示す。図に示されているように、三峡ダム建設後の浮遊底質濃度は三峡ダム建設前のそれに比べ大きく低下している。実際にXuら(2009)の論文では、浮遊底質濃度は1950年以降低下しているが、三峡ダムが建設された2003年以降大きく低下したことが示されている。

4. 長江河口域での流動・浮遊底質の挙動

図-5に、増水期7月の平均流量を流入させた場合の三峡ダム無しに対する図-3のA-A断面での塩分濃度、フロック粒径および浮遊底質濃度の分布を、同様に図-6に三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）に対するそれらを示す。このとき、三峡ダム無しにおける河川流量および浮遊底質濃度はそれぞれ50,000m³/sおよび460mg/Lであり、三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）におけるそれらはそれぞれ45,000m³/sおよび220mg/Lである。また計算では、河川流量および潮汐を考慮した30日間のバロクリニック流動の助走計算の後に浮遊底質の計算を開始し、さらに60日経過した後の結果を出力している。

図-5に示されているように、河口域へ流入した河川水の淡水と海域での塩水とが交わる地点での平均フロック粒径は急激に大きくなっている。この地点では、浮遊底質濃度も高くなっており、海底からの底質の巻き上がり

が有ることが確認できる。この地点での急激な平均フロック粒径の増大は、塩分濃度の増加による凝集の進行および海底からの平衡フロック粒径の巻き上がりによって引き起こされている。実際にこの地点では0.5mmを超える平均フロック粒径の底質が巻き上がっている。浮遊底質濃度の分布にも見られるように、平均フロック粒径の増大した底質はその後沈降速度の増加により海底へと沈降する。これにより、長江河口域での浮遊底質の挙動にはバロクリニック流動による塩分濃度の分布およびそれによるフロック凝集の効果が大きく影響していることが改めて確認される。

図-5および図-6に示されている三峡ダム無しおよび三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の結果を比較すると、河川流量の多い前者の海域表層での塩分濃度は後者のそれに比べ低くなっている。また、当然ことながら高い浮遊底質濃度が流入する三峡ダム無しでの浮遊底質濃度は三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）のそれに比べ高くなっているが、両者共に河口での平均フロック粒径の増大に伴い急速に海底へと沈降していくために、河口から離れた海域での両者の浮遊砂濃度には差はなくなる。

図-7に三峡ダム無しの場合の河口域における表層での塩分濃度、平均フロック粒径および平均個数濃度を、ま

図-8に三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の場合のそれらを示す。長江より流出した河川水は南方へ向かって広がる傾向にあるが、河川流量の多い三峡ダム無しの場合には三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の場合に比べ若干低い塩分濃度水塊が広い範囲に広がっている。平均フロク粒径は、三峡ダム有り・無しによる大きな差は見られないが、北側の海域で大きくなる傾向にある。特に、0.05mmを超える平均フロク粒径は沿岸域に限られており、これは海底からの平衡フロク粒径の巻き上がりによる粒径の増大であると推測される。

一方、フロク粒子の平均個数濃度に着目すると、三峡ダム無しおよび三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の両者共に、河道から河口までの淡水域の沖に高濃度の平均個数濃度の分布が現れている。この海域における塩分濃度は2psuを超えているが、平均フロク粒径は0.005mm以下の最小粒径に近い粒径であり、十分にフロク凝集の進行していない水塊が沖へ流出していることが分かる。このような海域は広がることが無いため、底質はこの海域で急速に凝集して沈降していると推測される。この海域における三峡ダム無しおよび三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の平均個数濃度の差は浮遊底質濃度の差によるものあり、両者共に表層での浮遊底質濃度は同様の分布形状になっている。

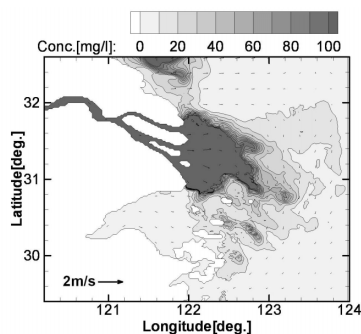
図-9に、三峡ダム無しおよび三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）に対する底層での浮遊底質濃度を示す。100mg/Lを超える濃度は両者共に河口近傍で最も広く分布しており、またより流量が多く高い浮遊底質濃度の河川水が流出する三峡ダム無しの場合に三峡ダム有り（ピークカット25,000m³/s）の場合に比べ広い範囲に分布している。すなわち、長江から流入した浮遊底質は、河川水と塩水が交わる地点で塩分濃度の増加および海底からの平衡フロク粒径の巻き上がりによる平均フロク粒径が増大し、急速に河口周辺へ沈降して堆積していることが分かる。そのため、三峡ダムの建設により河口周辺へ堆積する土砂量は大きく減少している可能性があることと推測される。

5. 結語

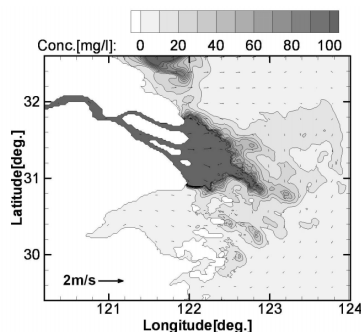
水文流出モデルHSPFおよび流動・浮遊底質モデルECOMSED + COSINUSを用いることにより、三峡ダムの影響を考慮した長江河口域でのバロクリニック流動およびフロク粒子の成長・破壊過程を考慮した浮遊底質の解析を行った。その結果、長江河口での浮遊底質の挙動には、フロク凝集の影響が大きなことが改めて示された。また、三峡ダム建設に伴う河口域に流出する流量および浮遊底質濃度の低下により、特に河口域への堆砂量が減少している可能性があることなどが推測された。

参考文献

- (独)国立環境研究所(2006)：東アジアの流域圏における生態系機能のモデル化と持続可能な環境管理プロジェクト、国立環境研究所特別研究報告、SR-73-2006、pp.31-42。
- 日本海洋センターHP：http://www.jodc.go.jp/index_j.html、参照2009-11-20。
- Fitri, R., 山下隆男, 高山知司(2006)：底泥の輸送・凝集・圧密モデルのマハカムエスチャリーへの適用、海岸工学論文集、第53巻、pp.476-480。
- Bicknell, B.R., J.C. Imhoff, J.L. Kittle, Jr., T.H. Jobes, and A.S. Donigan, Jr. (2001) : Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), User's Manual for Ver.12, U.S. EPA, Athens, GA., 845p.
- Duan, S., T. Liang, S. Zhang, L. Wang, X. Zhang, and X. Chen (2008) : Seasonal change in nitrogen and phosphorus transport in the lower Changjiang River before the construction of the Three Gorges Dam, Estuarine, coastal and shelf science, 79, pp.239-250.
- HydroQual Inc. (2002) : A Primer for ECOMSED Ver.1.3; Users Manual, HydroQual Inc., New Jersey, 188p.
- Winterwerp, J.C. and W.G.M. van Kesteren (2004) : Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment, Developments in Sedimentology 56, Elsevier, Amsterdam, 576p.
- Xu, K. and J.D. Milliman (2009) : Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam, Geomorphology, 104, pp. 276-283.
- Zhai, W., M.Dai and X. Guo (2007) : Carbonate system and CO2 degassing fluxes in the inner estuary of Changjiang (Yangtze) River, China, Marine chemistry, 107, pp.342-356.



(a) 三峡ダム無し



(b) ピークカット25,000m³/s

図-9 底層での浮遊底質濃度