

利根川下流域の河床勾配は非常に緩やかなため、かつては渇水になると塩水が上流まで遡上して塩害が発生させていた。特に、昭和33年には既往最大の塩害が発生し、塩止め堰の早期建設が強く求められた。これらの要望に対して、河口から18.5km地点に可動堰である利根川河口堰が昭和46年6月に竣工し、管理開始から約40年が経過しようとしている。河口堰建設の目的は、流水の正常な機能の維持(塩害防除・下流維持流量の確保)、新規利水(水道・工業・農業用水)である。平成19年に実施された関東地方ダム等管理フォローアップ委員会による評価⁹⁾によれば、事業目的である塩害防除、水道・工業・農業用水の供給については十分な効果が確認されている。

3. 河口堰湛水区間の水質特性

利根川河口堰の湛水区間の上流端は、河口から76.5kmの布川地点である。河口堰湛水区間の環境基準の類型指定は、河川のA類型(BOD2mg/L)が指定されている。河口堰湛水区間における主要な3地点における、BOD 75%値の経年変化を図-2に示す。環境基準点は布川地点、水郷大橋地点(河口から約40km)である。河口堰地点(河口から約26km)は、河口堰にもっとも近い水質観測地点である。採水は流心で行われ、採水深度はそれぞれの地点で約1.5m、約3m、約1.5mである。図からBOD75%値は、年によって変動しており、経年的に明確な変化傾向は見られないことが解る。平成10～12年度及び平成18年度を除くと、水郷大橋・河口堰地点のBODは布川地点より1mg/L前後高く、湛水区間でBODが上昇していることが確認される。平成18年度のBODは河口堰で2.4mg/Lである。

河口堰地点における、平成16～18年度のBOD、COD、クロロフィルaの季節変動傾向を図-3に示す。BODとCODの季節変動傾向はほぼ一致しており、1月～4月に高くなる傾向がある。また、BOD・CODとクロロフィルaの季節変動傾向もほぼ一致しており、BOD・CODのピーク濃度は植物プランクトンの影響によるものであると言える。年最大クロロフィルaの値は、OECDによって示されている富栄養度の区分の内、「富栄養」を上回る「過栄養」に相当する75 $\mu\text{g/L}$ を毎年のように上回っている状況である。

河口堰地点におけるT-N、T-Pの季節変動傾向を図-4に示す。T-Nは冬季に上昇する傾向が見られる。T-N、T-Pの濃度レベルでは富栄養化の閾値とされる0.2mg/L、0.02mg/Lの約10倍、約5倍の高いレベルにある。NP比は重量比で常に10を上回っており、リン制限と判断される。

河口堰地点における平成18年度の月別植物プランクトンの出現種を図-5に示す。年間を通じて珪藻が優占種である。夏季より冬季～春季に存在量が大きくなることが

特徴である。種別では冬季～春季の優占種は *Thalassiosira* 科、春季～夏季の優占種は *Skeletonema* 科である。

滞留時間と河口堰地点のクロロフィルaの季節変動傾向を図-6に示す。滞留時間は、河口堰湛水区間における水収支から求めた河口堰放流量の推定値を当日から遡って積算し、河口堰湛水区間の貯水容量を98,000 km^3 になるまでの日数とした。平均的な滞留時間は8.7日であり、冬季～春季に長くなる傾向があり、クロロフィルaのピークが生じる時期とほぼ一致している。

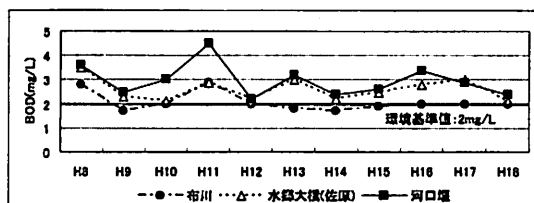


図-2 河口堰湛水区間のBOD75%値の経年変化

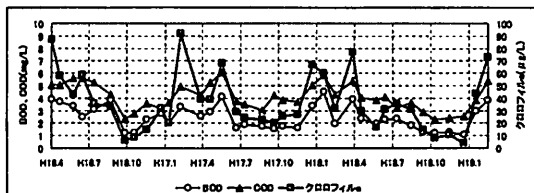


図-3 河口堰地点のBOD、COD、クロロフィルaの季節変動傾向

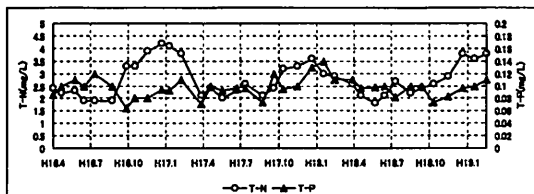


図-4 河口堰地点のT-N、T-Pの季節変動傾向

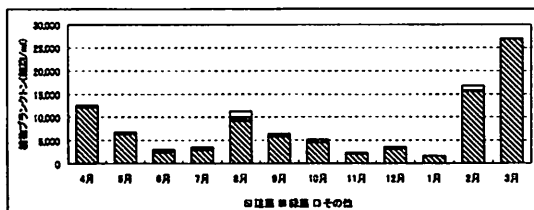


図-5 河口堰地点の植物プランクトン出現種(平成18年度)

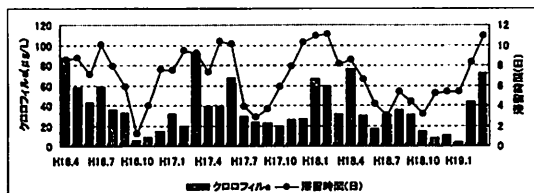


図-6 河口堰湛水区間の滞留時間の季節変動傾向

以上から、利根川河口堰湛水区間の水質特性としては、流域からの流入負荷が集中する河川の最下流部に位置しているため、栄養塩濃度が通年で高い状態にあり、滞留時間が長くなる冬季～春季に植物プランクトンが大幅に増殖し、BOD、CODに影響を及ぼしていると整理される。

4. 水質予測モデルによる現況水質再現計算

(1) モデルの概要

河口堰湛水区間の水質特性のさらなる把握等のために、利根川河口堰(河口から18.5km)～布川地点(河口から76.5km)を対象に水質予測モデルを構築した。モデルは鉛直二次元の流動モデルに低次生態系モデルを組み合わせたものを適用した。

モデルの空間分割は、縦断方向は1kmピッチ、鉛直方向は0.5mピッチで行った。縦断方向の空間分割概要と主要な流入・流出地点及び水質観測地点の位置関係を図-7に、鉛直方向の空間分割概要を図-8に示す。

鉛直二次元の流動モデルの基礎式を以下に示す。

(連続式)

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(水平方向運動方程式)

$$\frac{\partial Bu}{\partial t} + u \frac{\partial Bu}{\partial x} + w \frac{\partial Bu}{\partial z}$$

$$= -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L B \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{\sigma} B \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x \quad (2)$$

(鉛直方向運動方程式)

$$\frac{\partial Bw}{\partial t} + u \frac{\partial Bw}{\partial x} + w \frac{\partial Bw}{\partial z} = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L B \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{\sigma} B \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_z \quad (3)$$

$$\nu_{\sigma} = \nu + \nu_i = \nu + C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

ここに、 x ：流下方向座標、 z ：鉛直方向座標、 u ： x 方向流速、 w ： z 方向流速、 B ：水域の幅、 ν_L ：水平方向の渦動粘性係数、 F_x ・ F_z ：底面摩擦及び風に起因する運動量フラックス、 ν ：水の動粘性係数、 ν_i ：鉛直方向の渦動粘性係数、 k ：乱れエネルギー、 ε ：粘性散逸率である。

水質に関する基礎式は次のとおりである。

$$\frac{\partial BC}{\partial t} + u \frac{\partial BC}{\partial x} + w \frac{\partial BC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x B \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z B \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_c B \quad (5)$$

ここで、 C ：各水質項目の濃度、 D_x ：水平方向の乱流拡散係数、 D_z ：鉛直方向の乱流拡散係数、 S_c ：水質項目毎の生成・消滅項である。

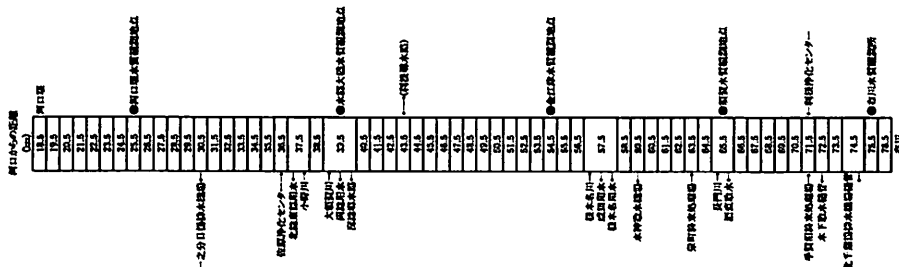


図-7 縦断方向の空間分割概要と主要な流入・流出地点及び水質観測地点の位置関係

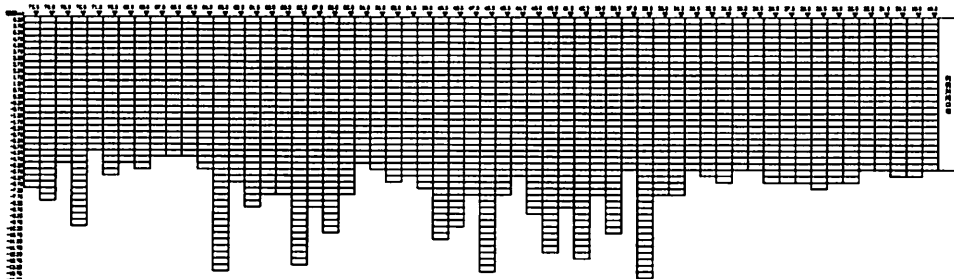


図-8 モデルにおける鉛直方向の空間分割概要

植物プランクトンの増殖速度式は次のとおりである。

$$S_p = \mu_{\max} F_t F_l \min \left(\frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}}, \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}} \right) C_p - D_p \quad (6)$$

ここで、 S_p ：植物プランクトンの増殖量、 $\mu_{\max}$ ：植物プランクトンの増殖速度、 F_t ：水温の影響修正項、 F_l ：日射の影響修正項、 C_{IN} ：無機態窒素濃度、 C_{IP} ：無機態リン濃度、 $K_{IN} \cdot K_{IP}$ ：無機態窒素・リンの半飽和定数、 C_p ：植物プランクトン濃度、 D_p ：植物プランクトン死滅速度である。

水質項目毎の生成・消滅項には、植物プランクトンの消長を表現するために低次生態系モデルを適用した。対象とする水質項目はCOD(溶存態・懸濁態)、クロロフィルa、有機態窒素、アンモニア態窒素、亜硝酸・硝酸態窒素、有機態リン、リン酸態リンとした。モデル化した水質項目毎の生成・消滅項の概要を図-9に示す。

なお、計算結果について環境基準の達成状況を評価する際は、利根川河口堰湛水区間の環境基準の有機汚濁指標がBODであるため、COD計算値をBODに変換して評価した。変換方法は図-10に示すようにCODとBODの観測値に相関が認められたことから、相関式によって行った。両者の相関が高い理由としては、河口堰湛水区間で採取した試料水についてBOD試験を行う場合に、試料水に含まれる藻類によるDO消費をカウントするため、BODもCODと同様に植物プランクトン量と正の関係があるためと考える。

(2) 境界条件の設定

モデルの境界条件の設定方法を表-1に示す。境界条件は、基本的に実績値を用いて時間または日単位で設定した。

上流端境界条件である布川地点の水質は、水質自動監視データ(水温、COD、T-N、T-P、クロロフィルa、アンモニア態窒素)によって与えた。

低次生態系モデルのパラメータ設定値を表-2に示す。パラメータ値は、貯水池などを対象とした既往文献における設定事例³⁾を参考に、文献値の範囲内におさまるように設定した。植物プランクトンは、河口堰湛水区間における出現種の調査結果から、年間を通じて珪藻類が優占種であること、さらに、種別でみれば水温が高い時期に出現量の多い種と水温の低い時期に出現量の多い種があることから、いずれも珪藻類であるが、主に夏季に増殖する高水温増殖型と主に冬季に増殖する低水温増殖型の2種類を想定してパラメータを設定した。

また、植物プランクトンの増殖パラメータの内、半飽和定数の値は一般に細胞の大きさと外界の栄養素の平均レベルの増加とともに増加する⁴⁾という指摘がある。河口堰湛水区間の窒素・リン濃度は、貯水池などより濃度

レベルが高いことから、貯水池の既往報告値より大きめの値になる可能性があると考えられた。

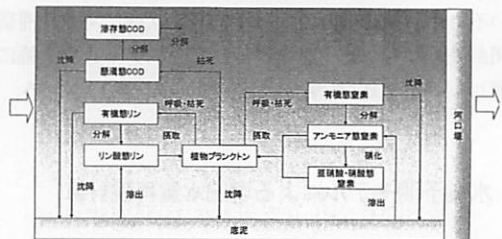


図-9 モデル化した水質項目毎の生成・消滅項の概要

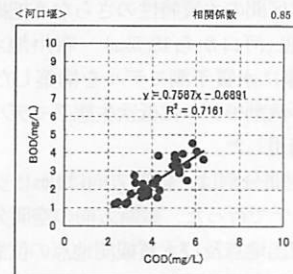


図-10 CODとBODの相関と相関式(河口堰地点)

表-1 モデルの境界条件の設定方法

境界条件	単位	設定方法(設定に用いたデータ)
気象		
気温	℃	アメダス香取(時間データ)
風速	m/s	アメダス香取(時間データ)
風向	—	アメダス香取(時間データ)
日射量	cal/cm ² /日	鏡子地方気象台(時間データ)
露量	十分比	鏡子地方気象台(時間データ) ※3時間毎
湿度	%	鏡子地方気象台(時間データ)
流入水量		
布川	m ³ /s	布川(国土交通省)(時間データ)
手賀川	m ³ /s	手賀沼越管放流量(国土交通省)(日単位データ)
利根沖化センター	m ³ /s	平均処理水量
手賀沼終末処理場	m ³ /s	平均処理水量
流入支川	m ³ /s	低水流量設定値(長門川、大須賀川、小野川、根木名川)
取水量	m ³ /日	日取水量実績値
放流量	m ³ /日	流入量と流出量の差分
流入水質		
布川	mg/L	水質自動監視データ(水温、COD、T-N、T-P、クロロフィルa：日単位)
下水処理場	mg/L	現況水質(県報告値)(年一定)
流入支川	mg/L	平成18年度公共用水質測定結果(月一定)

表-2 低次生態系モデルのパラメータ設定値

	パラメータ名	単位	設定値
植物プランクトン① (高水温増殖型)	比最大増殖速度	1/日	1.8
	増殖の最適水温	℃	28
	増殖の最適日射量	cal/cm ² /日	250
	無機態窒素半飽和定数	mg/L	0.133
	無機態リン半飽和定数	mg/L	0.009
	呼吸(死滅)速度		0.06
	沈降速度	m/日	0.1
植物プランクトン② (低水温増殖型)	比最大増殖速度	1/日	1.8
	増殖の最適水温	℃	5
	増殖の最適日射量	cal/cm ² /日	180
	無機態窒素半飽和定数	mg/L	0.133
	無機態リン半飽和定数	mg/L	0.009
	呼吸(死滅)速度		0.06
	沈降速度	m/日	0.1
窒素	有機態窒素の無機化速度	1/日	0.02
	有機態窒素の沈降速度	m/日	0.5
	有機態リンの無機化速度	1/日	0.02
リン	有機態リンの沈降速度	m/日	0.5
	CODの分解速度	1/日	0.01
COD	CODの沈降速度	m/日	0.5
	植物プランクトン中のCOD/クロロフィルa比	mgCOD/μg-Chl.a	0.043
その他	植物プランクトン中の窒素/クロロフィルa比	mgN/μg-Chl.a	0.0075
	植物プランクトン中のリン/クロロフィルa比	mgP/μg-Chl.a	0.0005

利根川流域内のダム湖、湖沼及び利根川河口堰地点のT-N、T-P年平均値の比較を図-11に示す。北海道の茨戸川のデータも参考値として示した。T-N、T-Pともに利根川河口堰地点の値は、ダム貯水池・湖沼より明確に大きく、水質汚濁が問題となっている湖沼と同レベルである。

一方、珪藻類に関する査索、リンの半飽和定数の報告例を表-3に示す。印旛沼、手賀沼、茨戸川のような人為的汚濁負荷の影響を強く受けている水域の半飽和定数の値はダム貯水池の値に比較して大きめになっている傾向が確認できる。よって、利根川河口堰湛水区間の査索、リンの半飽和定数の値は、印旛沼・手賀沼・茨戸川に関する報告値の平均を採用することとした。

(3) 現況再現計算結果

現況再現計算は平成18年の4月～平成19年3月までの1年を対象として実施した。計算時間間隔は60秒とした。

下流部湛水区間の河口堰地点(河口から約26km地点)における平成18年度の各水質項目の時系列変化について、計算値と観測値の比較を図-12に示す。T-Nについては、計算値が観測値より高めになっている時期があるものの、計算値は概ね良好な再現性が得られていると判断される。

平成18年度について同定したモデルで平成17年度の再現計算を行った結果を図-13に示す。全体的に良好な再現性が得られている。夏～秋のクロロフィルaの再現性については改善の余地がある。

5. 河口堰湛水区間のBOD改善方策と効果の評価

河口堰湛水区間のBOD改善方策について、モデルを用いて検討した結果を以下に示す。河口堰湛水区間のBODは、陸域負荷由来のBOD(以下、非生物体BODと略記)と植物プランクトン由来のBOD(以下、生物体BODと略記)から構成される。河口堰地点の現況再現計算結果における両者の内訳を図-14に示す。観測値ではなく、日単位の計算結果についてBODの内訳を示したのは、植物プランクトンの消長に由来する生物体BODは日変動があるため、月1回の観測値について内訳を示すよりも年間変動傾向を把握しやすいと考えたためである。生物体BODは、冬季～春季及び夏季にBODに占める割合が大きくなる。

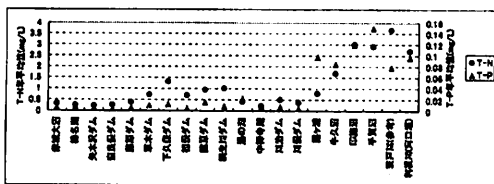


図-11 各水域のT-N、T-P年平均値の比較(平成18年度)

表-3 珪藻類に関する査索・リン半飽和定数報告例(9.9.7.9)

パラメータ名	値	対象水域	測定方法
窒素半飽和定数	0.08	茨戸川	キャリブレーション
	0.25	茨戸川	実験値
	0.1	印旛沼	キャリブレーション
	0.1	手賀沼	キャリブレーション
	0.03	ダム貯水池	ACP試験など
	0.01	ダム貯水池	キャリブレーション
リン半飽和定数	0.008	茨戸川	キャリブレーション
	0.002	茨戸川	実験値
	0.005	印旛沼	キャリブレーション
	0.02	手賀沼	キャリブレーション
	0.007	ダム貯水池	ACP試験など
	0.001	ダム貯水池	キャリブレーション

※印旛沼・手賀沼は種による区分なし

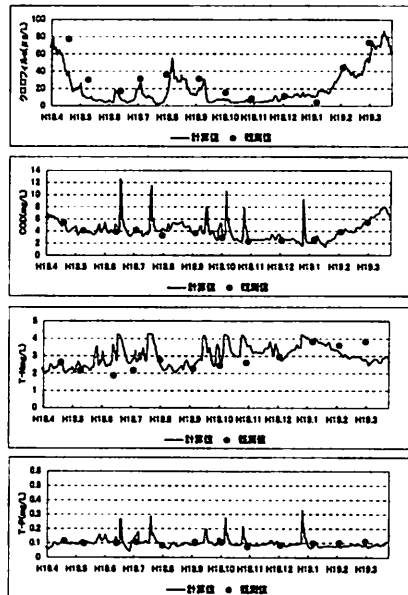


図-12 現況再現計算結果(河口堰地点、平成18年度)

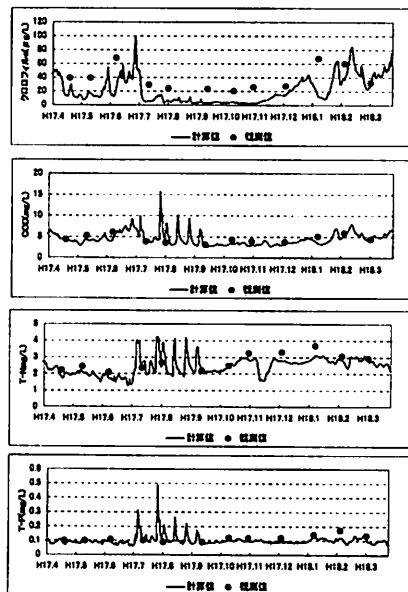


図-13 現況再現計算結果(河口堰地点、平成17年度)

特に、3～4月はBOD観測値の3～5割近くを占めている。よって、河口堰湛水区間のBOD改善のためには、陸域からのBOD負荷量の削減に加えて、植物プランクトンの増殖を抑制することも必要となる。

植物プランクトンの増殖抑制策のひとつとして、湖沼などの閉鎖性水域では栄養塩負荷の削減が挙げられる。河口堰湛水区間における栄養塩負荷削減の効果を把握するために、栄養塩負荷の感度分析を実施した。

河口堰湛水区間の植物プランクトンの増殖は、前述したようにリン律速であることが観測データから明らかになっていることから、栄養塩負荷の内、T-P流入負荷量を50%、100%削減した場合のBODの感度を予測した。

予測結果を図-15に示す。当然のことながら、生物体BODのBODに占める割合が高い時期については、T-P流入負荷量の削減効果が生じている。なお、図-14の非生物体BODと図-15のT-P100%削減時のBOD濃度が一致しない原因は、図示した非生物体BODには枯死した植物プランクトン由来のBODが含まれるためである。また、T-P流入負荷量の削減率に対してBODが比例的に低減しないのは、現況のT-P濃度が高く、T-P濃度が大幅に低下しなければMonod式で表した植物プランクトンの増殖モデルにおけるT-Pの影響関数の値が小さくならないためである。

一方、河川におけるBOD環境基準の達成状況の評価は、年度75%値を指標として行われる。T-P流入負荷量を削減した場合のBOD計算結果について、年度75%値を算出し、環境基準達成状況を確認した。

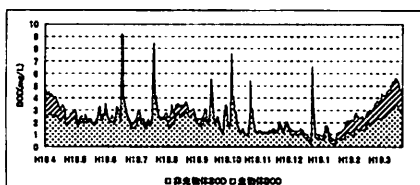


図-14 BODの内訳(河口堰地点、計算結果)

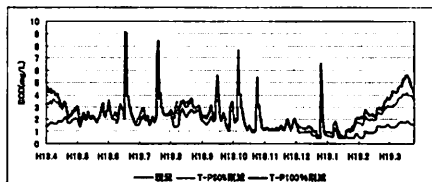


図-15 T-P流入負荷量を削減した場合のBOD(河口堰地点)

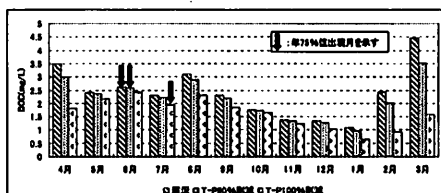


図-16 T-P流入負荷量を削減した場合のBOD月平均値(平成18年)

日単位の時系列計算結果から年度75%値の算出方法は、日単位の時系列計算結果を月単位で平均し、月単位データについて年75%値(小さい順に並べ、9番目の値)を求めた。現況とT-P流入負荷量を削減した場合の河口堰地点の計算結果を月別に整理した結果を図-16に示す。生物体BODの占める割合が高い月である4月、8月、1～3月においてT-P流入負荷量の削減効果が大きくなっている。しかし、BOD75%値に着目すると、BOD75%値は現況とT-P50%削減の場合が6月、T-P100%削減の場合が7月に出現している。いずれも生物体BODの占める割合が低い月であり、T-P流入負荷量の削減効果はBOD75%に反映されていない。BOD75%値は、年間の月別の値の相対的な大小関係によって決まる指標である。利根川河口堰湛水区間の場合、生物体BODによってBODが大きく上昇する月は年に数回程度の場合が多いため、BOD75%を指標とした場合はT-P流入負荷量の削減効果が評価されにくいと言える。

7. まとめ

利根川河口堰湛水区間を対象に、観測データの分析から水質特性を明らかにし、シミュレーションモデルによって植物プランクトンの影響を受けているBOD改善策としてリン流入負荷量の削減効果を検討した結果、以下が明らかとなった。

- ・ 利根川河口堰湛水区間では、冬季～春季に珪藻類が大増殖し、BODに影響を及ぼしている。
- ・ 河口堰湛水区間は流域最下流に位置するため、栄養塩濃度が通年高い状態にあり、滞留時間が長くなる冬季～春季に植物プランクトンが大増殖している。
- ・ 河口堰湛水区間のシミュレーションを行う場合、栄養塩濃度が高いので植物プランクトンの栄養塩の半飽和定数はダム貯水池等より大きめの値を設定する必要がある。
- ・ BOD改善策として、栄養塩負荷量削減による植物プランクトンの増殖抑制が考えられるものの、環境基準の指標であるBOD75%値で水質改善効果を評価した場合、栄養塩負荷量削減効果を適切に評価することが難しい。

利根川河口堰湛水区間の水質をBODを指標として評価する場合、植物プランクトンの増殖によってBODの値が高くなる月は年に数ヶ月であり、環境基準の評価指標であるBOD75%値には影響を及ぼさない年もある。しかし、年最大クロロフィルaの値は「過栄養」と判断される75 $\mu\text{g/L}$ を毎年のように上回っている状況である。BODの環境基準達成を目的に流域からの有機汚濁負荷量削減対策を進めていくとともに、河口堰湛水区間では植物プラン

クトンの増殖を抑制するために栄養塩負荷量の削減も進めていく必要がある。栄養塩負荷としては、本検討では実績データがほとんど存在しないため、底泥からの栄養塩の溶出についての検討は行っていないものの、河口堰湛水区間に流入した栄養塩負荷が堆積していると考えられることから、その影響についても明らかにする必要がある。このような観点から、平成22年1月に策定された「利根川流域別下水道整備総合計画基本方針」においては、河川ではT-Pの水質環境基準の類型指定が行われていないものの、栄養塩類に係る望ましい水質の在り方と下水道以外の対策も含めて、地域の実情に応じて引き続き検討し、流域全体で水質改善・維持に努めることとしている。

また、水環境の改善を検討するにあたり、水生生物等の保全の上で望ましい水質を維持することが重要視されるようになってきている。2010年3月に公表された閉鎖性海域中長期ビジョンでは、閉鎖性海域の環境基準項目であるCOD、T-N、T-Pの高低のみをもって生物及びその生育・生息環境が良好であるかを判断することは十分でないと指摘した上で、底層のDOと透明度を新たな目標指標として提案している⁹⁾。このような観点も含めて、河口堰湛水区間の水質特性及び生態系も含めた視点からの水質管理のために、最適と考えられる水質指標及び目標レベルを再検討し、必要な施策を実施していく必要があると考える。

謝辞：本論文は、2010年1月に策定された「利根川流域別下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書」の成果の一部を再整理したものである。調査の実施にあたって、ご指導をいただきました東京大学大学院

花木啓祐教授、埼玉大学大学院 浅枝 隆教授、群馬大学大学院 清水義彦教授、貴重な資料等をご提供いただきました茨城県・栃木県・群馬県・埼玉県・千葉県・千葉市及び国土交通省関東地方整備局の利根川関連事務所の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (独)水資源機構：第16回関東地方ダム管理フォローアップ委員会 利根川河口堰定期報告書2007
- 2) 岩佐義朗著：湖沼工学，山海堂，pp.224-228, 1990.
- 3) 山本晃久，五十嵐崇博：水質予測シミュレーションにおけるパラメータ設定に関する検討，平成17年度ダム水源環境技術研究所 所報，pp.78-83, 2006.
- 4) アレキサンダー・J・ホーン，チャールス・R・ゴールドマン：陸水学，京都大学学術出版会，pp.153-155, 1999.
- 5) 吉岡紘治ら：閉鎖性河口域茨戸川の水質機構特性と水環境保全策，河川環境総合研究所報告 第9号，pp.1-17, 2004.
- 6) 杉原幸樹ら：茨戸川の富栄養化に関する総合的解析その2－負荷収支の推定と生態系モデルによる水質シミュレーション，北海道開発土木研究所月報 No.615号，pp.10-24, 2004.
- 7) 平間幸雄：手賀沼の水質シミュレーションモデルの改良，平成13年度千葉県環境研究センター年報，pp.206-212, 2003.
- 8) 梅田信ら：環境アセスメントにおける水質予測パラメータの設定に関する検討，平成15年度ダム水源環境技術研究所 所報，pp.3-9, 2004.
- 9) 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に係る懇談会：閉鎖性海域中長期ビジョン，2010.

(2010.5.21 受付)

The Properties of Water Quality of Estuary Barrage Reservoir

Wataru YANAGISAWA¹, Tomohiro KOBAYASHI¹, Akio NOHARA², Ken KISHI³
and Noriyuki NAKASHIMA³

¹Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

²Reserch and Development Center, Nippon Koei Co.,Ltd.

³River and Hydraulic Engineering Dept.Nippon Koei Co.,Ltd.

In this study, analyzing of observation data and water quality simulation were carried out to characterize the water quality of estuary barrage reservoir of Tonegawa river.

The main conclusions of this study are phytoplankton in estuary barrage reservoir that is keeping high concentration of nutrient during year tend to multiply from winter to spring when hydraulic retention time is getting longer than other season, it is necessary of reduction of nutrient load because the BOD is influenced by the multiplication of phytoplankton but it is difficult estimation of effect of reduction on nutrient load in case of using BOD75% as index of water quality.