河川水質モデルにおけるN-BOD評価手法に関する研究

Nitrogenous BOD Evaluation Model for River Quality Model

野原昭雄*・内山雄介**・中嶋規行**

Akio NOHARA*, Yusuke UCHIYAMA**,Noriyuki NAKASHIMA**

ABSTRACT; A nitrogenous BOD(N-BOD) is the primary contributor not to meet environmental quality standard of BOD at urban river. In this study, N-BOD property in Turumigawa river was examined through analyzing monthly observation data. Reasonable correlation between N-BOD and NH_4-N was obtained at river section that receive secondary effluent from wastewater treatment plant, and as a result derived empirical N-BOD prediction model. The combination use of grid-based pollutant load runoff model and empirical N-BOD prediction model yield good agreement between the observed and predicted BOD concentration monthly behavior.

Key Words : Grid-based pollutant load runoff model, N-BOD, urban river

1. はじめに

都市河川においては,流域の下水道整備率が100%に近づいてもBOD環境基準を達成できない状況がよく見られる.この原因は,下水処理場放流地点より下流域の河川水質調査におけるBOD試験において,本来の有機物の分解に伴う酸素消費量(以下,C-BODと略記)に加えてアンモニア性及び亜硝酸性窒素の硝化による酸素消費量(以下,N-BODと略記)が検出され,後者の割合の高いことである場合が多い.

一方,都市河川流域においては流域の無秩序な都市化等に起因して治水・利水・環境に関する問題が顕在化している.解決の方向性として,流域における健全な水循環系の構築が提唱されており,各流域において水循環を考慮したマスタープランの策定が行われつつある.著者らはマスタープランの策定支援ツールとして,流域の水循環系(水量・水質)の現状把握,将来予測,対策効果予測を定量的に行うことができるグリッドベースの分布型汚濁負荷流出モデルを構築し,実流域へ適用してきた[1].同モデルによる計算結果は,COD,T-N,T-Pについて無降雨時に加えて降雨時の河川水質の変動を良好に再現できるものの,BODについてはN-BODに起因すると考えられる水質変動部分の再現性が低下する.

そこで,本研究では,同モデルのBOD再現性を向上させるために,既往の知見及び観測データからN-BODの評価手法を検討した.

2. 対象河川におけるN-BODの現状

(1) 対象河川

対象河川とした鶴見川は,東京都町田市を発し,神奈川県の都市部を流下し,東京湾に注ぐ,幹線流路延長42.5km,流域面積235km^{2}の都市河川である.市街地率は平成11年で85%に達している.河川水質は下

*日本工営(株)中央研究所 (Research and Development Center, Nippon Koei Co.,Ltd.)

**日本工営(株)首都圏事業部 河川水工部 (River & Hydraulic Engineering Dept.,Nippon Koei Co.,Ltd.)

水道整備によって改善されてきているものの,平成13年においても全国ワースト3(BOD75%6.6mg/L)にランクされている.

流域には下水処理場が7箇所存在する.施設の一部に高度処理の導入されている処理場があるものの,大半が二次処理・消毒の後に処理水を放流している.

図-1 鶴見川流域の概略

(2) BODに占めるN-BODの割合

対象河川においてBODに加えてC-BODが毎月観測されている地点の内,亀甲橋,臨港鶴見川橋,又口橋における観測結果を図-2に示す.C-BODは,BOD測定時にアリルチオ尿素(ATU)を添加することによって硝化反応を抑制したものである.BODとC-BODの差がN-BODである.亀甲橋,臨港鶴見川橋は上流側に下水処理場が存在し,又口橋は存在しない.また,臨港鶴見川橋は感潮域に位置している.

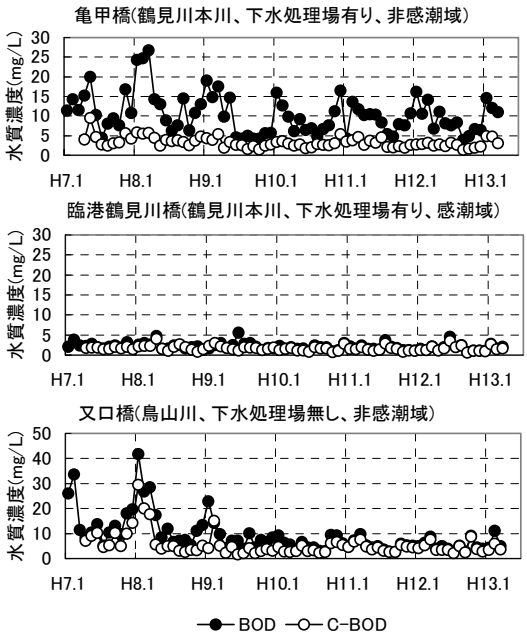

図-2 BOD,C-BOD観測結果

亀甲橋では,N-BODは通年で検出され,C-BODに比較してN-BODが大きくなっている期間が多い.また,C-BODは年間を通じて変化量が小さいのに対して,N-BODの変化量は大きく,BODの変動はN-BODによるものであることが分かる.同地点では,平水時流量の約5割,低水時流量の約6割を下水処理水が占めている[2].

臨港鶴見川橋地点は,上流側に7箇所の下水処理場が存在しているものの,N-BODはほとんど検出されていない.これは,同地点が感潮域に位置しているため,海水の希釈によってBODが低下していることに加え,塩化物イオンよってBOD試験における硝化反応が抑制されている[3]ことが原因と考えられる.

又口橋地点では,流域の下水道整備に伴う経年的な水質改善効果が見られる.上流側に下水処理場の存在しない同地点では,BODの変動はC-BODによるものであることが分かる.

表-1 硝化寄与率(3年間平均値)

観測地点名	河川名	下水処理場	硝化寄与率	備考
臨港鶴見川橋	本川	有(7箇所)	15.5%	感潮域
亀甲橋	本川	有(4箇所)	66.2%	非感潮域
又口橋	鳥山川	無	18.7%	非感潮域

BODに対するN-BODの割合を硝化寄与率として,各観測地点の平成10～12年の平均値を算出した結果を表-1に示す.他河川のデータとして,東京都内の河川における報告例[4]によれば,河川水中に占める下水処理水の割合が高い新河岸川と隅田川では,志茂橋(新河岸川)26～59%(年平均44%),小台橋(隅田川)28～55%(年平均33%)となっている.小台橋における河川水中に占める下水処理水の割合は39%とされている[5].これらの値に比べて亀甲橋の硝化寄与率は大きいと言える.また,新河岸川と隅田川でも鶴見川と同様に感潮域の観測地点では,上流側と比較して硝化寄与率の低くなる傾向が報告されている.

これらの観測結果から,N-BODのBODに及ぼす影響が大きいのは,上流側に下水処理場が存在し,かつ非感潮区間であると言うことができる.

(3) T-Nの構成比特性

亀甲橋,臨港鶴見川橋,又口橋におけるT-Nに占める各無機態窒素の構成比の経日変化を図-3に示す.

図は,無機態窒素濃度を積み上げたものを面グラフで,T-N濃度を線グラフで示している.

亀甲橋地点では,硝酸性窒素(NO_3-N)の変動が小さいのに対し,アンモニア性窒素(NH_4-N)は冬期を中心に濃度が高くなるという季節変動傾向が見られる.これは,下水処理場における硝化反応が水温の低下する冬期に抑制されるためであると推測される.亜硝酸性窒素(NO_2-N)の構成比は小さい.臨港鶴見川橋地点では,海水の希釈によってT-Nが亀甲橋地点より小さくなっているものの,無機態窒素の構成比やNH_4-Nの季節変動について同様の傾向が見られる.又口橋地点では,平成9年以前は,NH_4-Nの構成比が高かったのに対し,平成10年以降は,NO_3-Nの構成比が高くなっている.

これらの観測結果から,上流側に下水処理場の存在する地点ではT-Nに占めるNH_4-Nの割合が高く,T-Nの季節変動の原因はNH_4-Nの変動であり,その濃度は冬期に高くなる傾向があるのに対し,下水処理場の存在しない地点ではT-Nに占めるNO_3-Nの割合が高くなる傾向が見られる.

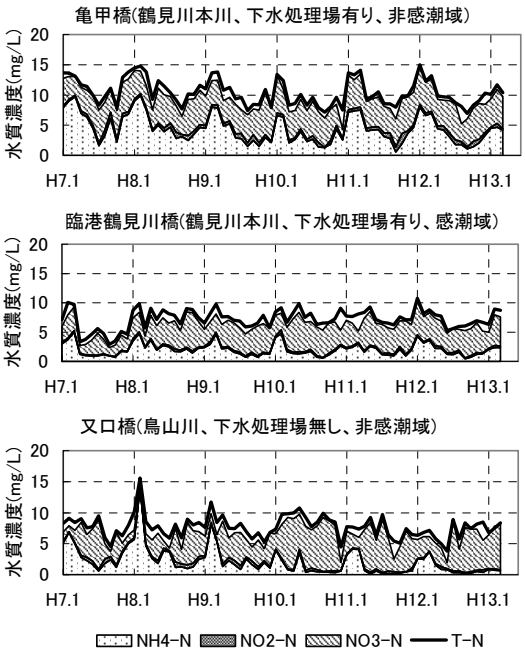

図-3 T-N観測結果と無機態窒素構成比

(4) NH_4-NとN-BODの関係

亀甲橋,臨港鶴見川橋,又口橋地点におけるNH_4-NとN-BODの関係を整理して図-4に示す. BODに占めるN-BODの割合が高かった亀甲橋地点では,NH_4-NとN-BODの間に0.7以上の比較的高い相関が得られている.亀甲橋地点より濃度は低いものの,T-Nに占めるNH_4-Nの構成比が大きかった臨港鶴見川橋地点では,NH_4-NとN-BODの相関はほとんど見られない.また,上流側に下水処理場の存在しない又口橋地点でも両者の相関関係は0.4と小さくなっている.

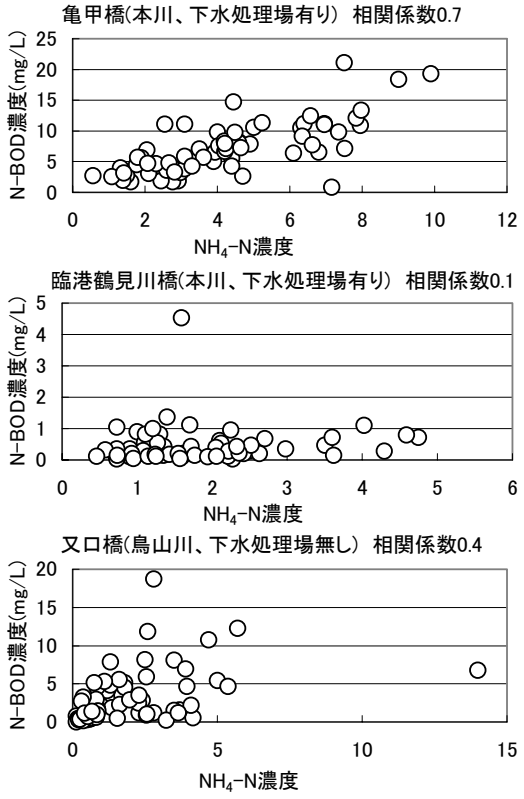

図-4 アンモニア性窒素とN-BODの関係

既往の研究によると,NH_4-NとN-BODの関係については明確になっていない.事業場排水の場合,NH_4-Nの高い場合に,前述した硝化寄与率が高くなるという報告[6]があるものの,河川水については,NH_4-NとN-BODの関係は不明瞭であるという報告[4]がある.山田らの研究[7]でも,河川水において両者の間に明確な関係は見られないとしているが,調査対象とした河川ではN-BODが通年で検出されておらず,検出される期間のみを対象とすれば,NH_4-Nが高いほどN-BODも高くなる傾向が明確になっている.一方,BOD試験におけるN-BODの検出に影響を与える要因としては、NH_4-Nの他に、硝化菌の馴化されていた河川水の水温やC-BOD/NH_4-N比が挙げられている.特に,C-BOD/NH_4-N比は,その値が小さいほどBOD試験において硝化反応が検出されるまでの遅滞時間が短くなることが室内実験で確認されている[7].

各観測地点における平成10～12年のC-BOD/NH_4-N比の平均値を表-2に示す.臨港鶴見川橋,亀甲橋にお

いては1.0以下の値になっている.山田らは, C-BOD/NH_4-N比が5を越えると5日間のBOD試験でN-BODは検出されにくい[6]としていることから,いずれの地点もN-BODが検出されやすい値となっている.

表-2 C-BOD/NH_4-N比(3年間平均)

観測地点名	河川名	C-BOD/NH_4-N比
臨港鶴見川橋	本川	0.80
亀甲橋	本川	0.76
又口橋	鳥山川	3.59

河川によってNH_4-NとN-BODの関係が異なるのは,このC-BOD/NH_4-N比や硝化菌の活性が異なるためであると推測される.本検討の対象河川である鶴見川の亀甲橋地点については,両者の相関が高いので, NH_4-NからN-BODを推測することができると判断した.

3. N-BOD評価手法

(1) 硝化反応による酸素消費量

硝化反応は, NH_4-NがNO_2-Nへ酸化される過程(亜硝酸化)とNO_2-NがNO_3-Nへと酸化される過程(硝化)から構成される.両反応を化学式で表すと次のとおりである.

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ \qquad (1)$$

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- \qquad (2)$$

両反応における酸素消費量は,上式から, NH_4-N 1mg/LがNO_2-Nまで酸化される過程で3.43mg/L,更にNO_2-NからNO_3-Nまで酸化される過程で1.14mg/Lである.よって,仮に試料水に1mg/LのNH_4-Nが含まれていて,5日間のBOD試験の間に完全にNO_3-Nまで酸化される場合,N-BODの値は4.57mg/Lになる.

(2) N-BODモデル化方法

河川水質モデルにおけるN-BODのモデル化方法としては,河川水中のNH_4-N濃度, NO_2-N濃度を追跡計算して,懸案地点におけるNH_4-N, NO_2-N濃度の計算結果を用いて次式でN-BODを求める方法が考えられる.

$$[N-BOD] = [NH_4-N] \times [\text{亜硝酸化率}] \times 3.43 + [NO_2-N] \times [\text{硝酸化率}] \times 1.14 \qquad (3)$$

ここで,亜硝酸化率,硝酸化率は,BOD試験期間中に酸化されるNH_4-N及びNO_2-Nの割合である.

河川水中のNH_4-N, NO_2-N濃度を個別に追跡することは,汚濁負荷量原単位が未整備であることなどから困難であるので,河川水中のT-N濃度を追跡計算し,T-Nに占めるNH_4-N, NO_2-Nの比率を乗じて,懸案地点のNH_4-N, NO_2-N濃度を算出することが現実的であると考えられる.さらに,観測値から河川水においてNO_2-Nがほとんど検出されないことが分かっているので, NH_4-Nのみを対象として次式のようにN-BODを評価することとした.

$$[N-BOD] = [NH_4-N] \times [\text{硝化率}] \times 4.57 = [T-N] \times [NH_4-N/T-N\text{比}] \times [\text{硝化率}] \times 4.57 \qquad (4)$$

ここで,硝化率はBOD試験期間中にNO_3-Nまで酸化されるNH_4-Nの割合である.

(3) パラメータの設定

N-BODモデルのパラメータは,硝化率とNH_4-N /T-N比の2つである.下水処理場が上流に存在する観測地点の内,非感潮域でC-BODが測定されており,硝化寄与率の大きい亀甲橋と大綱橋地点を対象にパラメータの設定を行った.

観測データの硝化率の平均値を東京湾へ流入する他河川における測定例と併せて表-3に示す.鶴見川における硝化率は他の河川に比べて大きい値となっている.これは,前述したようにC-BOD/ NH_4-N比が小さいことなどによるものと考えられる.また,表には硝化に影響を与える要素のひとつであると考えられる電気伝導率も併せて示した.概ね電気伝導率の高い地点では硝化率が小さくなっていると言える.

図-5に亀甲橋地点における月別の硝化率の変化を示す.硝化率は水温等の影響を受けて夏期に高く,冬期に低くなることが予想されたものの対象河川については明確な季節変動傾向を見いだせなかった.そこで,本検討では硝化率を年間一定値として取り扱うこととした.なお,表-3に示した他河川について

は,冬期に硝化率の低下する河川が見られた．よって,硝化率を年間一定として扱うか否かは対象河川のデータを分析して判断する必要があると言える.

硝化率は,両地点について[N-BOD推定値：NH_4-N（観測値）×硝化率×4.57]とN-BOD観測値の相対誤差の平均が最小となるように設定した(図-6).硝化率は,NH_4-N以外に硝化菌の菌体量の影響も受けると考えられるものの,菌体量に関するデータは得られなかったので,本検討では未考慮である．図-6から,N-BOD観測値の急激な変動部分について推定値は追随できていないものの,全体的に見てみるとNH_4-NからN-BODを比較的良く再現できると言える.

一方,NH_4-N /T-N比については両観測地点における実測値から設定した.両観測地点におけるT-Nに占めるNH_4-Nの割合を平成10～12年について月別に平均値を整理したものを表-4に示す.

NH_4-N /T-N比は,冬期に高くなり,夏季に低くなるというように季節変動が見られる.これは,両地点の河川流量に占める下水処理水の割合が高いことから,前述したように下水処理場放流水中のNH_4-Nの季節変動によるものであると考えられる.よって,月別に値を設定することとした.設定値を用いたT-NからのNH_4-N推定例を図-7に示す.

NH_4-N /T-N比は,下水処理場や浄化槽の処理状況や流下過程における硝化反応の進行程度等によって変化するので,月別としても一定値として扱うことは難しいと言える.本検討では,後述するベースとなる汚濁負荷流出モデルの窒素系の指標がT-Nであること,N-BODをモデル化する際にNH_4-Nベースで考えた方が分かりやすいことから,モデルパラメータとしてNH_4-N /T-N比を導入することとした.

表-3 他河川との硝化率の比較

河川名	地点名	硝化率(%)	電気伝導率(μS/cm)	測定回数(回)
新河岸川	芝宮橋	38	369	7
	志茂橋	16	390	7
隅田川	岩淵水門	27	1,050	7
	小台橋	14	813	7
	両国橋	9	16,600	7
荒川	新荒川大橋	9	1,110	3
	葛西橋	2	17,400	3
江戸川	新葛飾橋	17	202	3
	江戸川水門	10	2,030	3
	浦安橋	8	7,930	3
鶴見川	亀甲橋	43	429	39
	大綱橋	43	497	39

(出典)鶴見川以外は文献値[4)]

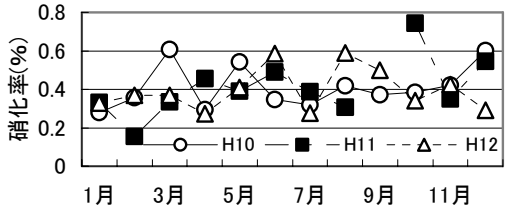

図-5 硝化率の季節変動(亀甲橋)

表-4 月別のNH_4-N /T-N比

	亀甲橋(鶴見川)	大綱橋(鶴見川)
1月	0.515	0.382
2月	0.534	0.438
3月	0.435	0.376
4月	0.394	0.319
5月	0.419	0.292
6月	0.334	0.249
7月	0.282	0.240
8月	0.243	0.181
9月	0.137	0.131
10月	0.197	0.159
11月	0.348	0.288
12月	0.354	0.281
平均	0.349	0.278

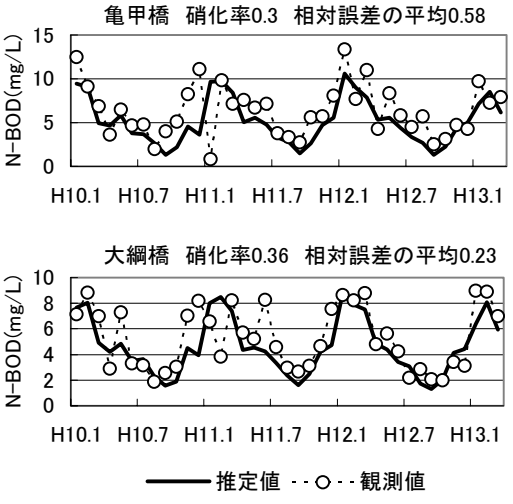

図-6 硝化率の設定

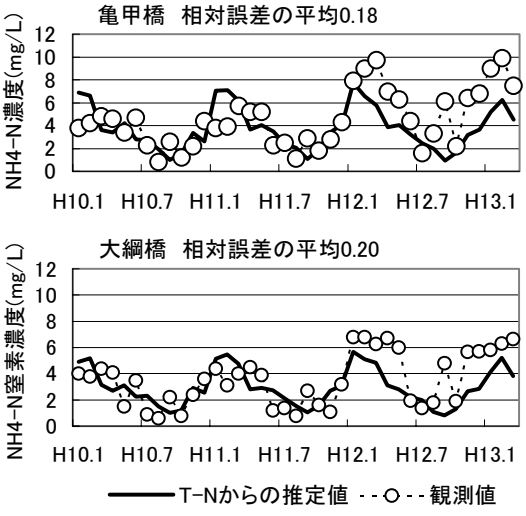

図-7 T-NからNH_4-N窒素濃度の推定

4. シミュレーション結果

N-BODモデルを分布型汚濁負荷流出モデルと組み合わせて実流域へ適用した. 分布型汚濁負荷流出モデルは, 流域を一定間隔のグリッド状に分割し, 各メッシュ間の水分及び汚濁負荷の移動を追跡することで流域の水循環系(水量・水質)を表現するモデルである. モデルは, 水量モデルと水質モデルから構成される.

水量モデルは, 水循環系を解析する手法の中で最も精緻な分布型物理モデルである. モデルは図-8に示すように, 「地表+表層土壌」, 「河川」, 「帯水層」から構成される. 各サブモデルの概要を表-5に示す.

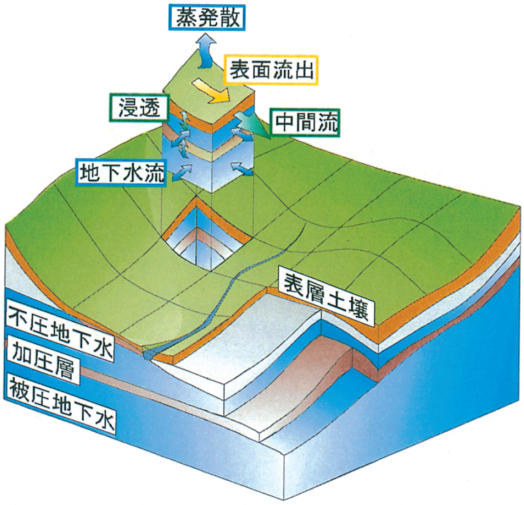

図-8 水量モデルの概念図

水質モデルは, 水量モデルにおける水分移動に伴う汚濁負荷の移動を追跡するモデルで, 図-9に示すように「発生/排出源」, 「流出経路」, 「河川サブモデル」から構成される. モデルの特徴は, ①非点源負荷流出を評価できる, ②無降雨時に降雨時を加えた365日の河川水質を評価できる, ③任意の河川地点の水質を評価できる点が挙げられる. 対象水質項目はBOD, COD, T-N, T-Pである.

分布型汚濁負荷流出モデルのBOD, T-N計算結果を用いて, 下水処理場より下流の非感潮域に位置する懸案地点についてN-BODモデルを適用してN-BODを慮したBODを求めた. なお, 分布型汚濁負荷流出モデルの追跡水質項目としてのBODはC-BODとし, モデルの入力データとしての下水処理場放流水質はC-BOD実績値を用いた.

表-5 水量モデルの概要

サブモデル名		概要
地表+表層土壌	表層土壌	地表面下数mまでの土壌を解析領域とし, 土中への浸透, 側方浸透, 地下水への降下浸透を飽和・不飽和浸透流解析で追跡する.
	地表面流れ	メッシュ毎に設定した等価斜面を流路網に従って連結して, そのモデル水路上をkinematic wave近似による不定流計算を行
	人工系	生活雑排水, 貯留浸透施設などの人工系の要因をモデル化したもの.
河川		kinematic waveによる不定流計算を行う.
帯水層		平面二次元の地下水解析

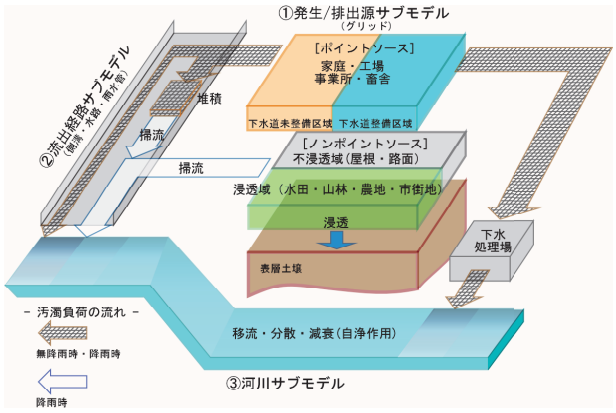

図-9 水質モデルの概念図

亀甲橋及び大綱橋地点における計算結果を図-10に示す. 図中にはC-BODの計算値とN-BODを加えたBODの計算値を併せて示した. 両地点ともに, N-BODを評価することによってBOD観測値の再現性が高まることが分かる.

C-BOD計算値が激しく変動している部分は, 降雨時の非点源負荷流出によるものである. N-BODを考慮したBOD計算値はC-BODの計算値にN-BODモデルによるN-BOD評価値を加えたものであるので, 同様に降雨時は激しく変動している.

さらに, C-BODの観測が行われていないものの, 上流側に下水処理場が存在する支川の観測地点である都橋(恩田川), 耕地橋(麻生川)のBOD再現計算結果を図-11に示す. 両地点のN-BODの算出に当たってはN-BODモデルのパラメータである硝化率とNH_4-N /T-N比を算出するために必要なC-BOD, T-N, NH_4-Nデータセットが揃っていなかったので, 亀甲橋地点の値を用いた. 前述したように, 二つのパラメータは様々な条件によって変化するので, 他の河川の値を単純に適用することは難しいと考えられる. 本検討の場合, 亀甲橋地点の値を適用した2地点はいずれも下水処理場放流口下流に位置しているので, 河川流量に占める下水処理水の割合が高いことから、比較的高い再現性が得られたものと考える.

5. 結論

本検討では, 都市河川におけるBODを評価する際に, その影響が大きいと考えられるN-BODの水質評価手法を河川観測データ等から検討し, 実流域への適用を行った. 得られた主な結果は次のとおりである.

1) BODに占めるN-BODの割合が高い河川区間は上流側に下水処理場が存在する非感潮域である. 感潮域および上流側に下水処理場の存在しない区間においてはBODに占めるN-BODの割合は小さい.

2) T-Nに占めるNH_4-Nの割合は, 上流側に下水処理場の存在する区間において高くなる. 上流側に下水処理場の存在しない区間についてはT-Nに占める硝酸性窒素の割合が高くなる傾向が見られた.

3) BODに占めるN-BODの割合が高く, C-BOD/ NH_4-N比の小さい河川区間ではNH_4-NとN-BODの間に比較的高い相関が見られた.

4) 懸案地点のT-N濃度からN-BODを推定する経験関数モデルを作成した. 分布型汚濁負荷流出モデルによるC-BODとT-N計算結果を用いてBODの再現計算を行ったところ, 比較的良好な再現性を得ることができた.

本検討で作成したモデルによって, 下水処理場への高度処理施設導入状況が現状の場合について, N-BODを考慮した将来水質の評価が可能となった.

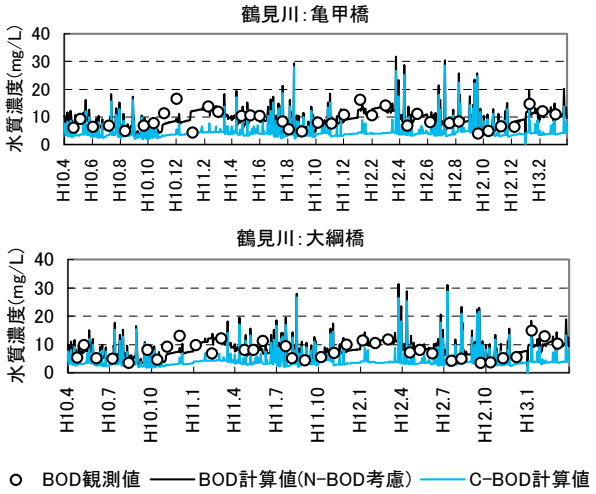

図-10 BOD再現計算結果(亀甲橋,大綱橋)

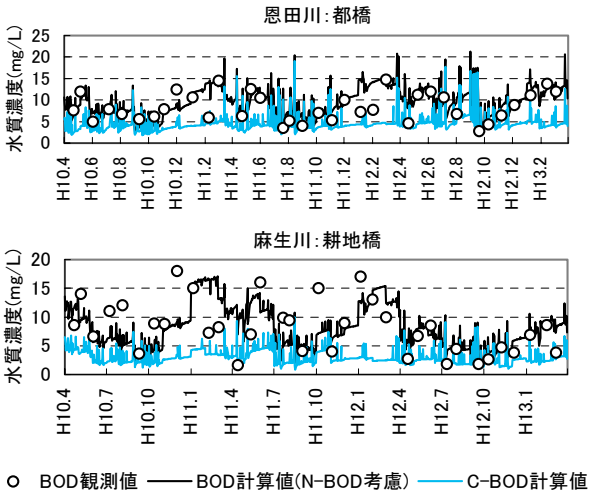

図-11 BOD再現計算結果(都橋,耕地橋)

謝辞：本検討にあたり貴重なご助言とデータを提供していただきました国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所流域調整課に深謝致します.

【参考文献】

1) 野原昭雄, 羽田野琢磨, 高木康行, 内山雄介, 中嶋規行, 中村茂：グリッドベースの分布型汚濁負荷流出モデルの開発と適用, 水工学論文集, 第47巻, 2003.

2) 鶴見川とその流域の再生～流域水マスタープラン策定に向けた提言～, (財)リバーフロント整備センター, p. 199, 2002.

3) 二渡了：強混合河川感潮部における物質輸送と水質変換に関する研究, 学位論文, pp. 134-143、1993.

4) 津久井公昭. 山崎正夫：都内河川におけるN-BOD測定(その3)－隅田川, 荒川及び江戸川のN-BOD測定結果－, 東京都環境科学研究所年報1993, pp. 100-107, 1994.

5) 東京都環境保全局：東京都水辺環境保全計画, p. 20, 1993.

6) 服部幸和, 望月京司, 大川和伸, 島田重行, 野中和代, 加茂智子, 柴田次郎, 東義仁, 中本雅雄：事業場排水の硝化寄与率に及ぼす各種因子の影響, 用水と廃水, Vol. 34, pp. 485-488, 1992.

7) 山田一裕・伊藤由季子・鹿野信宏・佐々木久雄・須藤隆一：河川のN-BODに及ぼす下水2次処理水の影響, 水環境学会誌, Vol. 20, No. 5, pp. 311-317, 1997.