

富栄養化した都市域の池沼における 水生植物の水質浄化機能に関する検討

CAPABILITY OF WATER PURIFICATION BY AQUATIC PLANTS IN AN URBAN EUTROPHIC RESERVOIR

長林久夫¹⁾, 馬場浩太²⁾, 黒沢高秀³⁾, 佐川演司⁴⁾

Hisao NAGABAYASHI, Kohta BABA, Takahide KUROSAWA, Kohji SAGAWA

- ¹正会員 博士 (工学) 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)
²学生会員 日本大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)
³非会員 博士 (理学) 福島大学 共生システム理工学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川 1)
⁴非会員 白河第二高等学校 (〒961-0851 福島県白河市南登り町 54)

The effects of water purification by aquatic plants grow thickly in an urban eutrophic reservoir, which is clarified by the field data and model examinations. The revenue of water usage and the nutrient load was discussed by the field observation, and the reason for the plant overgrowth caused the water quality was examined. Changing process of growing the aquatic plants and the relation to the phytoplankton growth was also examined. In addition, the nutrient in an aquatic plant per unit mass was analyzed, and the gross weight of nitrogen, phosphorus, and BOD contained in the plant of the reservoir were evaluated. Finally, the overgrowth of aquatic plants was modeled according to the logistic function. The water quality transition was discussed on the basis of the model examination that considered the plant growth.

Key words : water purification, aquatic plants, phytoplankton, over grows, model examination

1. はじめに

水生植物による水質浄化の試みは、多くの池沼や湖沼で実施¹⁻³⁾されている。都市域の用水池や園池などは一般に閉鎖性が強く、また流入水の栄養塩類の負荷量が大きいため、水質悪化が問題となることが多い。さらに、富栄養化した池沼には水生植物が多量に繁茂するケースもあり、それらの水質浄化への機能が期待される。一般に、水生植物の水質浄化への寄与は、成長のための栄養塩類の吸収効果⁴⁾のみならず、付着生物膜による浄化や乱れの減衰による物質沈降の促進効果、アオコなどの植物性プランクトンの抑制効果⁵⁾、風による底泥の巻上げ防止⁶⁾などが期待される。しかし、これらの効果を湖沼において現地調査し、定量的に評価した研究は少なく、多くの資料を必要としている。また、水生植物の繁茂と衰退の過程と水質特性との関係を明らかにすることは水生植物を用いた浄化のための基礎資料として重要である。

本研究は水生植物が大量に繁茂した都市域の富栄養の用水池において、水生植物の水質浄化への寄与を評価する目的で調査とモデル検討を実施している。検討は、湖の

栄養塩類の負荷収支と湖内水質の時空間分布を測定から示し、次いで水生植物量の計測と単位質量当たりの植物に含有される栄養塩量を求めて、湖内の水生植物に含有される栄養塩類の総量を評価した。最後に、水生植物の増殖をロジスティック曲線で表現して、水生植物の繁茂を考慮した簡易的な水質モデルを作成した。年間の湖内水質の推移と比較してモデルの各項の評価を行い、水生植物の繁茂が及ぼす植物プランクトンや水質との関係を現地調査から検討した。

2. 湖沼の概要及び調査方法

図-1 に検討対象である南湖の概要図を示す。南湖は福島県白河市の市街地に位置し、時の藩主松平定信が「士民享楽」⁷⁾の思想のもとに 1801 年に水利開発と貧困救済を兼ねて築造した用水池と公園を兼ねた歴史的な建造物であり、国の史跡及び名勝に指定されている。現在も湖水は農業用水として利用されている。周囲の自然環境を借景にした湖の景観は素晴らしく、散策や湖面利用など多くの人々に親しまれている。面積 177,000m² の小さな



図-1 南湖流入出経路

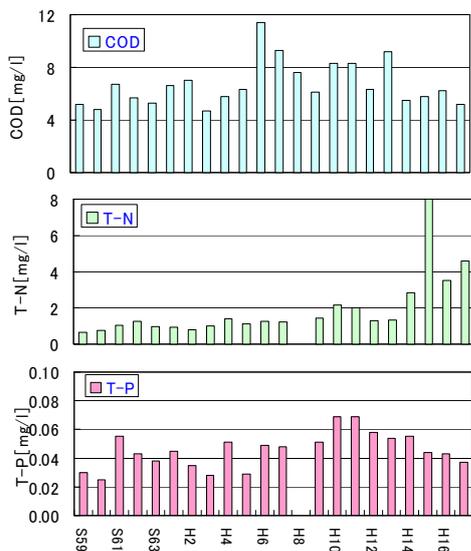


図-2 南湖湖心における栄養塩類の経年変化

池沼であり、現在では上流域及び周辺域の都市化の進展により水質汚濁が進行⁸⁾している。築造されてからの時間経過のために現在、湖の底泥の堆積厚さは約 1.2m 程度で、平均水深は 1.5m⁹⁾と浅い。図-2 に湖心における化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)の経年推移図¹⁰⁾を示す。COD は平成 6 年を境に低減傾向にあるが、T-N と T-P は平成 12 年まで同様な増減の推移を示し、T-N は平成 14 年から増加傾向に転じた。一方、T-P は平成 12 年から低減傾向にある。また、平成 4 年には水質の悪化のために白河市が底泥の浚渫¹¹⁾を実施している。さらに、平成 15 年からは 11 月下旬に約 10 日間程度、湖水を抜いて天日に晒す池干しを実施しており、平成 19 年度まで 6 回実施した。

湖の植物種は比較的豊かであるが、古くからあった水生植物に混じってヒシやコカナダモの繁茂が急激に進展している。現在では 6 月頃から北西部の流入河川近くにヒシが大量に繁茂し、さらに湖心に向かい外来生物法の要注外来生物のコカナダモが広い範囲において繁茂している。これら水生植物の最盛期には北西部において湖

面のボート利用に支障が出るほどの繁茂状況である。さらに、南湖の風物詩であったジュンサイが消失し、そのため歴史的・文化的資産として価値のある南湖公園⁷⁾の美しい景観を保全し、機能回復していくことが市民からも強く望まれている。

本研究は、南湖の水質特性に影響を及ぼす湖内植生と植物プランクトンの関係を調査して、水生植物の水質浄化機能を定量化することを目的としている。

調査は図-1 に示す湖内の 4 点について植物量を測定している。NO.1 は流入部付近のヒシの群落であり、NO.2 はヒシとコカナダモの混合領域である。NO.3 は在来種が育成する領域である。そして NO.4 は北東部のコカナダモの群生領域である。各領域において 1m² 区間を定めて、水面から湖底までの植物種を採取器によって採取し、植物を判別可能な種に区分して乾燥重量を求める。さらに植物群落の外縁部を GPS により測定して、領域面積を求めて、それに単位面積当たりの植物量をかけて領域の全植物量を算出した。採取した植物の湿潤重量と乾燥重量を求め、植物種に含有される窒素をケルダール窒素分解法によって求めた。さらにフッ化水素分解法を用いて溶解し、資料を誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)及び誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)装置により含有元素及びリン量を求めた。また、月 1 度の定期的な観測においては植物プランクトンの種の同定と定量を行った。さらに、流入流出水量と水質の測定を実施して、湖内の栄養塩類の経時的な消長と植物繁茂との関係を調べ、植物による水質浄化機能のモデル化の検討を行った。

3. 結果及び考察

(1) 水生植物群落と水質特性との関係

南湖における水質の最大の特徴は、大量の水生植物が繁茂することによって、富栄養湖にも係らずアオコが発生しないこと、湖内における水質浄化が認められることにある。図-3 に湖内水質の流下方向分布を示す。窒素、リン、生物化学的酸素要求量(BOD)の流出水は流出口において流入水質の約半分程度まで濃度が減少する場合があった。流下に伴う減少率の大きいものは、リン、窒素、BOD の順である。一方、COD は 5 月を除いて流下に伴う濃度の低下はなく、8 月、9 月においては湖内で増加を示す場合がある。COD は例えば宗宮・津野¹²⁾の水域生態系と水質項目の模式図に示されるように、無機態の栄養塩類が一次生産者により植物プランクトンに摂取され、それが捕食、死滅の過程を経てデトリタスとなる。また、沈降や巻上げに加えて底泥からの溶出や分解による溶解性有機物も含めたものの和として考えられる。しかし、湖内におけるリンや窒素の大幅な減少は植物繁茂による吸収や植物プランクトンによる摂取の他に、懸濁態栄養

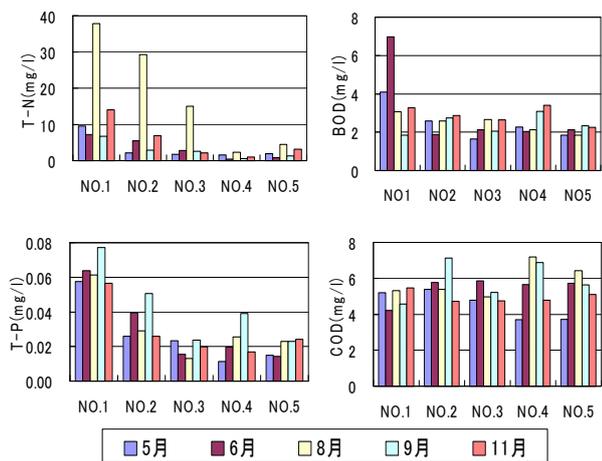


図-3 湖内水質の流下方向分布

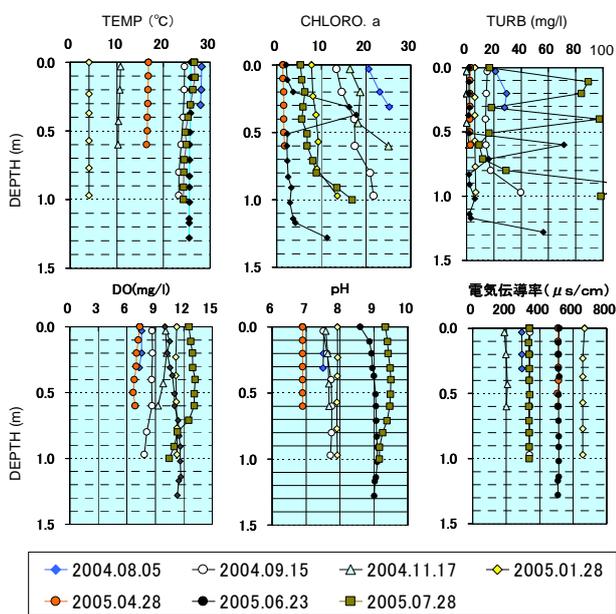


図-4 湖心における水質の季節的变化

塩類の沈降効果も推定され、多くの機構について検討する必要がある。以下では、この懸濁態栄養塩類の沈降と上述の微生物の捕食、死滅の過程を経てデトリタスとなり沈降するものを合わせて湖内における沈降と定義する。

図-4 に湖心における水温、クロロフィル、溶存酸素、pH、電気伝導度の季節的な変化を示す。5月になると DO が湖底側から上昇し、7月では 13mg/l 程度の過飽和状態となり、同時に pH は9を越えるアルカリ状態となる。8月から11月までの pH は8程度であり、その間のクロロフィルは増加している。水生植物や藻類増殖の光合成による無機炭素から有機炭素を生成する一次生産で考えると、水温上昇とともに5月初旬からの DO と pH の増加は、水生植物の急激な繁殖による溶存酸素と水酸イオン増加による影響と見ることが出来る。8月以降に植物の成長が安定化すると、藻類の増加によるクロロフィル濃度の増加が予想される。このように、大量の植物繁茂がもたらす影響は大きいことが示された。

(2) 水生植物による浄化機構の検討

南湖で採取された代表的な植物種はヒシ、コカナダモ、ヒルムシロ類、その他の在来種であった。ヒシは西岸の流入部付近に群生しており、写真-1 に示すように最盛期にはボート利用の阻害となるほどである。5月には領域一面に繁茂しており、6月には白河市によるヒシの除去作業が実施された。除去部以外のヒシは9月まで繁茂が継続している。10月には多くのヒシが湖底に沈んでいる。一方、コカナダモは湖内全域において最も多く群生しており、ヒシとともに植物量の大半を占めている。コカナダモの群生の中にはクロモ、オオトリゲモ、イバラモも認められたが量的には少量である。図-5 に季節ごとの植物群落面積の推移を示す。図中に示す実線はハンドヘルド GPS で測定した植物群落の外縁をトレースして示したものである。水生植物は5月にほぼ各領域で繁茂し、9月には最大面積を示す。10月には最大面積の約半分に減少している。ヒシとコカナダモの乾燥重量 1g 当たりの窒素



写真-1 湖内植生の状況

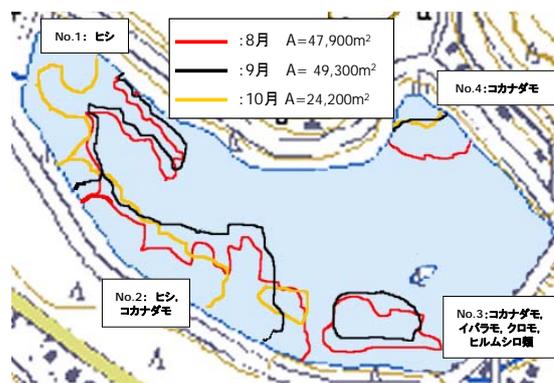


図-5 植物繁茂面積の検討

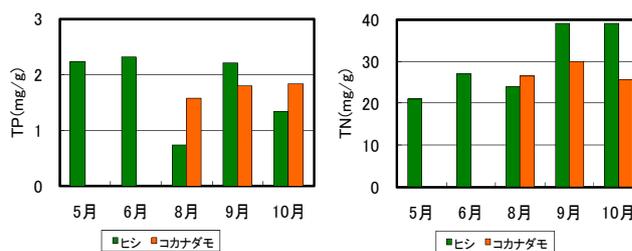


図-6 ヒシ、コカナダモに含有される T-P, TN 量の検討

とリンの含有量の分布を図-6に示す。季節的に大きな差はなく、窒素含有量に対するリン含有量の質量比はほぼ10:1であった。これをもとに、湖内の総植物量から算出した窒素、リンの植物含有量は8月から10月までの湖内の窒素で343kgから694kg、リンで21.4kgから47.3kgの範囲であると推定される。

一般に植物体内に吸収される栄養塩類は根から吸収されるものが多いが、南湖での優先種であるヒシは浮葉と水中根が水中の溶存態無機窒素を吸収し、土中の根からの吸収は少ないことが報告されている¹³⁾。これは、各部の単位質量当たりの吸収速度は同程度であるが、ヒシ固体内の浮葉と水中根の占める比率が土中の根に比べてはるかに大きいことによっている。また、南湖でも認められるクロモやマツモは流れ藻となった根のない状態でも一次的に成長できることが推定されている¹⁴⁾。コカナダモからも多くの流れ藻が生じており、水生植物が大量に繁茂する池沼においては、土中の根以外の部位における栄養塩類の吸収量の評価も課題となる。

以下では、水生植物による栄養塩類の吸収効果を概算的に算定する。土中の根からの栄養塩類の吸収量の評価は不明であるために、ここでは南湖の水生植物に含有される栄養塩が水中からの吸収によるものと仮定した。流入負荷量から流出量と湖内沈降水量、湖内の現存量を差し引いた年間の水生植物による栄養塩類の吸収量を式(1)より試算した。過去の観測¹⁵⁾をもとに湖への流入量と負荷量を4月から8月の農繁期の流入流量を0.1m³/s、その他の期間の流量を0.04m³/sとし、窒素とリンの流入濃度をそれぞれ3mg/l、0.1mg/l¹⁶⁾の一定値と仮定して、植物量に含有される栄養塩量に見合う沈降水量と流出量は、流入負荷に対して年間に沈降水量を30%、流出量を45%と仮定するとこれより、T-N=672kg、T-P=16.5kgと試算される。

$$\sum Q_{in} \times C_{in} \times (1 - W - C_{out}) - V \times C_{in} \quad (1)$$

ここで、 Q_{in} ：流入水量、 C_{in} ：流入栄養塩濃度、 W ：沈降率、 C_{out} ：流出率、 V ：湖体積である。

(3) 植物プランクトンの水質への寄与の検討

次に植物プランクトンの種類を月別、各地点の変化をみる。地点NO.3の植物プランクトンを酢酸ルゴール溶液で固定し、自然沈降法で濃縮したものから1ml分取し顕微鏡(10×20倍、10×40倍)で同定及び計数した物の結果を図-7に示す。6月、8月では緑藻類が優先種であるが、9月以降は藍藻類が優先種となる。6月から8月は植物が成長する時期であり繁茂のため、植物プランクトンの細胞数は少ない。植物の成長が安定する9月には藍藻類が増加し、植物プランクトンの細胞数は最大となる。図-3より栄養塩類が多く水温も高いための増加も考えられる。図-8に8月に計測した湖内各地点の植物プランクトンを示す。流入部(NO.1)では珪藻類が大半を占めるが湖内で

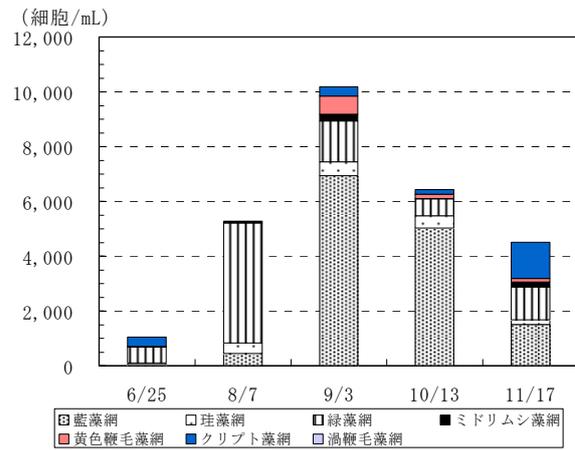


図-7 植物プランクトン月別の総数変化

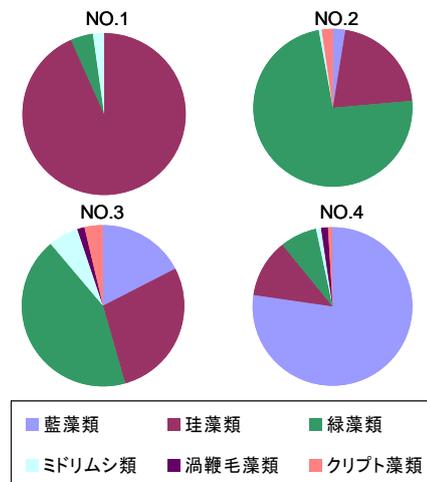


図-8 各地点の植物プランクトン変化

は減少し、ヒシ部(NO.2)では緑藻類が増加し、湖心(NO.3)になると藍藻類が見られてくる。北部のボート乗り場(NO.4)は流れの停滞性が強い領域であり、藍藻類が75%を占めるがアオコの発生は認められない。なお、8月までは灌漑期にあたり、湖の滞留時間は20日間程度であるために、大量の藍藻類の発生に至らなかったと考えられる。ちなみに、9月からは非灌漑期となり滞留時間は100日程度である。また、図-3においても、9月のCODは高い濃度を示している。

(4) 湖の水収支の検討

南湖における主な流入水路は灌漑期、非灌漑期を通じて図-1における①が主要な流入水路となっている。また、灌漑期には②からの流入が多い。非灌漑期の流量は10から20l/s程度、灌漑期は40から100l/s程度である。年間を通じての下流への流出水は、④の水路を通じて排水されているが、灌漑期には⑤からも排水される。非灌漑期の流量は10l/s程度、灌漑期は④において400/s、⑤から200/s程度¹⁶⁾である。次に検討すべきは蒸発散量を考慮した湖面水位の推定である。湖面への直接降雨 R_p と蒸

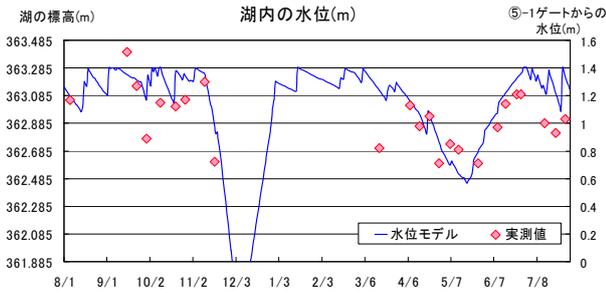


図-9 湖内水位の実測値と計算値

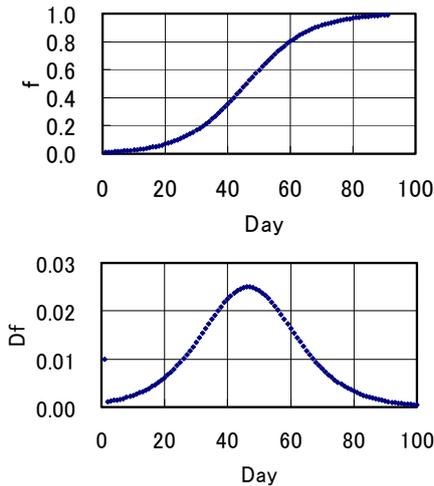


図-10 成長関数と日の増加関数

発散量 E_v を考慮した湖面水位の推定式を式(2)に示す.

$$\frac{d(AH)}{dt} = (Q_{in} - Q_{out}) + A(R_p - E_v) \quad (2)$$

ここで、 A_j : 湖面積、 H : 水深、 Q_{in} : 流入流量、 Q_{out} : 流出流量、 R_p : 日降水量、 E_v : 蒸発散量である.

湖の日単位の蒸発散量を北緯、経度、日照時間、日平均気温から求めて¹⁶⁾式(2)に与える. 夏場では日 4mm、冬場で日 0.5mm 程度である. 図-9 に湖面水位の実測値と計算値の関係を示す. この計算において降水量が多い場合は洪水吐から排水するものとして、水位を一定としている. また、11 月から 12 月にかけての、急激な水位低下と増加は、池干しを示している. 灌漑期と非灌漑期の仮定流量を用い、湖への直接降雨と蒸発散量のみを考慮したモデルであるが、結果の適合は良好である.

(5) 流入流出負荷モデルの検討

流入水の水質負荷のは式(3)に示す負荷-流量曲線 (LQ 曲線) によって検討した.

$$L = aQ^b \quad (3)$$

各種栄養塩の流入水路における LQ 関係はともに良好な指数関係¹⁹⁾を示しており、流量に対する負荷量を与えた. また、降雨時には河川からの導水は停止しており、雨水の流下のみとなるので、この場合には水田地域の LQ 式

を用いた.

(6) 水生植物の増殖モデルの検討

南湖の水生植物は現地における目視と図-5 に示す繁茂面積の分布図より 5 月頃から水面まで伸長し、8 月にはほぼ成長を完了するものとして、式(4)に示すロジスティック関数を用いて表現した¹⁷⁾.

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-cx)} \quad (4)$$

繁茂した水生植物は 10 月まで代謝を行うが、モデルでは 7 月以降の繁茂量の変化はないものとしている. また、成長の過程において日単位の増加量は栄養塩類の吸収量を算定するもとなる. 図-10 に成長関数と日の増加関数を示す. 上述より成長が開始されて約 100 日で完了する関数を仮定すると、増加関数は約 40 日で最大の増加を示している.

(7) 水生植物の繁茂を考慮した水質モデルの検討

物質収支にもとづく、湖内水質のモデルを式(5)に示す.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{V} (C_{in}Q_{in} - CQ_{out} - \alpha W_l CV - D_G V_{AD}) \quad (5)$$

ここで、 C : 湖内における物質濃度(mg/l)、 C_{in} : 流入物質の濃度(mg/l)、 Q_{in} 、 Q_{out} : 流入、流出水量(m^3/s)、 α : 沈降率、 W_l : 成長速度(1/s)、 D_G : 増加速度(1/s)、 V : 湖貯水量(m^3)、 V_{AD} : 植物吸収量(g)を示す.

この検討では湖内流動に伴う巻上げや溶出は無視できるものとした. 水深は 1.5m 程度であるために図-4 に示すように水温成層は考慮せず、また、流入負荷は日単位で完全混合するものとしている. これより、式(2)の水収支式と式(5)の物質保存式を連立して解くことにより湖の水質が計算できる.

図-11 に湖心における栄養塩類の水質モデルによる検討事例を示す. 最上部の図は水生植物の育成に伴う沈降率のみを 30% 考慮した T-N の計算値と実測値の比較である. 8 月から 4 月までは、計算は実測値の分布を表現しているが 5 月から 8 月までは計算の濃度が 1mg/l 程度高くなっている. 次の 2 つは植物繁茂の沈降率を T-N 30%、T-P 45% として水生植物の増殖による栄養塩類の吸収を考慮した計算結果である. 計算値は年間を通じて、推定値は実測値を表現している. 水生植物による吸収率の増加関数は 4 月より、40 日から 50 日においてピークを迎える. このことより、4 月中旬から 6 月にかけての計算値が改善されている. 沈降率は結果が合致するように与えており、図-3 の湖内流下に伴う T-P の減少量は T-N に比べて大きいことが示されている. 最下段は BOD の結果であり、水生植物による吸収量は考慮しないが、付着生物膜による浄化効果を仮定している. このとき年間の BOD 浄化総量が 100kg として算出された. この値は水生植物による窒素の吸収量 70kg より大きい値であった.

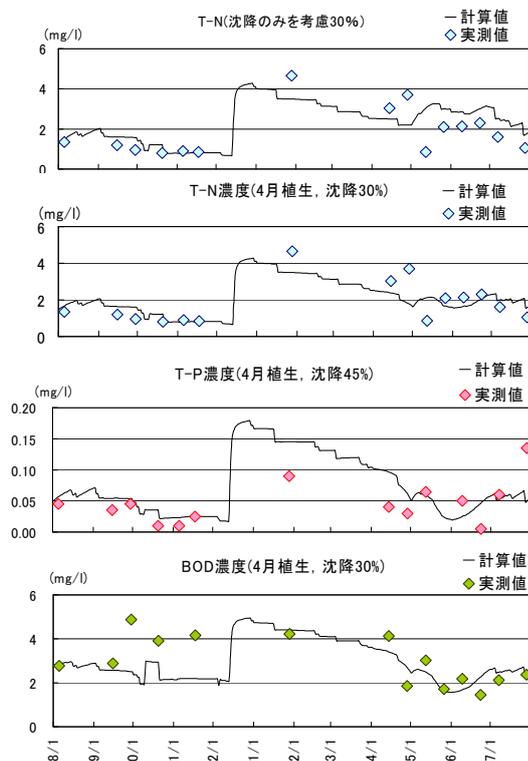


図-11 湖心における水質モデルの適用

4. 終わりに

富栄養化した都市域の用水池における水生植物の大量繁茂による水質浄化について、現地調査による現状把握と、水生植物の繁茂を考慮した水質モデルの検討を行った。以下に本研究で得られた主要な結論を要約する。

- (1) 水生植物に含有される窒素，リン量は単位質量当たりヒシにおいて窒素で2.1から3.9%，リンで0.074から0.3%程度であった。また，コカナダモは窒素の含有量は2.1から3.3%，リンで0.10から0.3%であり，ヒシとほぼ同様な含有量であった。
- (2) 水生植物の繁茂量は8月，9月で最大になり，10月には最盛期の約半数の量となる。この時期の湖内の水生植物による窒素の含有量は343kgから694kg，リンは21.4kgから47.3kgの範囲である。
- (3) 湖心における植物プランクトンの推移は，6月の細胞数は最小であり，9月にピークを迎え，11月に向かって減少している。6月のプランクトンの細胞数はきわめて少なく，水生植物の繁茂による植物プランクトンの抑制効果は8月まで持続することが示された。
- (4) 水生植物の繁茂をロジスティック関数で近似し，これをもとにした植物の増加関数を得た。
- (5) 水生植物の繁茂による栄養塩類の沈降率と水生植物による吸収を考慮した湖内水質のモデルは沈降率をT-Nでは30%，T-Pでは45%とすることにより年間の推定値は実測値を表現した。
- (6) BODについては水生植物への付着生物膜を考慮した浄化効果を試算している。このとき年間の浄化総量

は100kgと推定された。

謝辞: 本研究は日本大学工学部文部科学省学術フロンティア推進事業の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 野村武史，江頭信一，松本博文，橋本茂：自然水質浄化機能を活用した実験施設の計画・設計について，こうえいフォーラム，第10号，2002。
- 2) 宮沢裕子，山口明男，伊田健司，水井廣二，松下隆一：自然観察公園における浄化沼の水質浄化効果，埼玉県公害センター研究報告 第22号，pp.7-14，1995。
- 3) 渡部正弘，大金仁一，小山孝昭，佐々木久雄，嵯峨京時：伊豆沼・内沼の水生植物の栄養塩吸収試験，宮城県保健環境センター年報，第24号，2006。
- 4) 藤田和男，北村雅美，斎藤直己：水生植物（沈水植物）の水質浄化効果に関する実験，岡山県環境保健センター年報30，pp.17-24，2006。
- 5) 村田知也，丸山治朗，中井正則，有田正光：浮葉植物（ガガブタ）が繁茂するため池における生態系と水質およびその季節変化に関する現地調査，水工学論文集，第49巻，pp.1267-1272，2005。
- 6) 天野邦彦，時岡利和，対馬孝治：浅い湖沼の水質への水生植物の影響解析，水工学論文集，第49巻，pp.1219-1224
- 7) 白河市：南湖公園公式ホームページ，URL. <http://www.city.sirakawa.fukushima.jp/>
- 8) 福島県南建設事務所：南湖の水質—みんなで考えよう！南湖公園ワークショップからの提案—。
- 9) 長林久夫，日本大学工学部：南湖水質業務委託報告書，p.47，2006。
- 10) 福島県：水質年報，昭和59年度-平成17年度。
- 11) 白河市教育委員会：第2次保存管理計画書史跡名勝南湖公園，平成20年3月，p.1，p.19，資料11-1—資料11-7，2008。
- 12) 宗宮功，津野洋共著：水環境基礎科学，コロナ社，pp.131-134，1998。
- 13) 渡辺，大鐘，小山，栗野，佐々木：伊豆沼・内沼湖畔試験池の水性植物の栄養塩吸収，宮城県保健センター年報，第25号，pp.103-106，2007。
- 14) 一瀬，岡本，若林，藤原，加賀爪，辻：琵琶湖沿岸での水質形成機構に関する調査—沈水植物の吸収・分解実験について—，琵琶湖衛生環境センター所報，第39号，pp.48-56，2004。
- 15) 福島県南建設事務所：南湖の水質，南湖ワークショップからの提言（パンフレット）2007。
- 16) 長林久夫：南湖水質業務委託報告書，p.101，2006。
- 17) 阿南光政，弓削こずえ，大串和紀，中野芳輔：ロジスティック曲線を用いた水生植物の栄養塩類除去機能の評価，九州大学大学院農学部研究院学芸雑誌 第62巻，第1号，pp.83-90，2007。

(2008.9.30 受付)