

現地観測に基づく手賀沼における水温・Chl. a 濃度・ 流動特性に関する検討

FIELD MEASUREMENTS ON WATER TEMPERATURE, CHLOROPHYLL-A AND CURRENT STRUCTURE IN LAKE TEGANUMA

二瓶泰雄¹・山崎裕介²・谷脇大介³・大竹野歩⁴・西村司⁵

Yasuo NIHEI, Yusuke YAMASAKI, Daisuke TANIWAKI, Nobu OOTAKE and Tsukasa NISHIMURA

¹正会員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²学生会員 修(工) 東京理科大学大学院博士後期課程 理工学研究科土木工学専攻

³非会員 学(工) 株式会社一条工務店営業部(〒135-0042 東京都江東区木場 5-10-10)

⁴学生会員 学(工) 東京理科大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

⁵正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

To investigate the hydrodynamic environment and water quality in Lake Teganuma, which is one of well-known eutrophied lakes in Japan, we have performed field measurements on water temperature, Chlorophyll-a and current structure. For the field observation, we deployed 15 moored buoys with various memory-type sensors and conducted CTD measurements. The result shows that the formation of diurnal thermal stratification is closely related with the increase of Chlorophyll-a. The temporal and spatial variations of Chlorophyll-a in the lake are examined with special attention to the discharge from North-Chiba water conveyance channel. We also clarify the vertical circulation of wind-driven current which occurs appreciably in the lake with shallow water depth less than 1m.

Key Words: Lake Teganuma, Chlorophyll-a, water temperature, current structure, field measurement

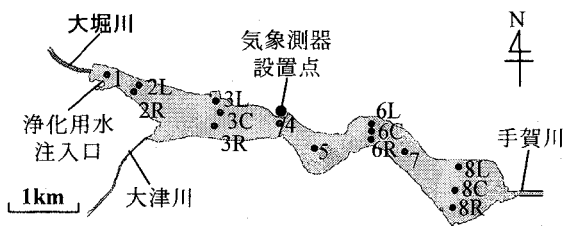
1. 序論

利根川水系に属する手賀沼は、湖沼面積 650ha、水容量 560 万 m³、平均水深 0.86m という極めて浅い湖沼である。この手賀沼は、かつては水生植物の宝庫であり豊かな自然を形成していたものの、流域の都市化に伴う流域人口の著しい増加により、汚濁負荷量が急増したため、日本一水質汚濁化が進行した湖沼となっている。この手賀沼における水質汚濁化の主要因としては、流域からの過剰な汚濁物質の流入と沼内における栄養塩・有機物の再生産等が指摘されている^{1), 2)}。この手賀沼における水質改善を行うために、沼内における底泥浚渫やアオコ回収、水生植物の植栽の実施³⁾に加えて、最近では、利根川よりくみ上げられた水を北千葉導水路を通して手賀沼に注水する、という北千葉導水事業の操業が開始している。また、手賀沼へ流入する主要河川である大堀川や大津川及びそれらとつながる排水路においても様々な水質浄化対策が実施されている³⁾。

このような手賀沼における水質環境を適切に管理・把握するためには、様々な浄化対策を行うとともに、手賀

沼流域全体にわたる水環境モニタリングの実施が必要不可欠である。このうち、手賀沼内を対象とした水環境調査は、当然のことながら数多く行われているものの、それらは主として水質環境に着目しており^{1), 2), 4)}、流動構造や密度の決定因子である水温分布に関する知見は限定されている^{5), 6)}。さらに、最近では、上述した北千葉導水事業による利根川からの浄化用水の注水や手賀沼中央部における狭く部の開削に伴って、沼内における水理環境自体が変化していることが想定されることから、沼内における水理環境やそれと水質環境特性との関係性を検討することは極めて重要となる。

著者らは、最近、手賀沼流域における水環境特性を総合的に把握するために、手賀沼への汚濁負荷量や河川水環境に関する現地観測を行い、貴重な観測結果を蓄積しつつある^{7), 8)}。本論文では、これらの研究の一環として、手賀沼における水理・水質環境特性を把握するために、約一ヶ月間にわたる多点連続観測を実施することを試みた。ここでは、この観測結果に基づいて、沼内における水温・Chl.a 濃度分布及び流動構造について検討及び考察を行ったので、以下にそれらの結果を示す。



図—1 手賀沼と観測点配置図

2. 現地観測方法

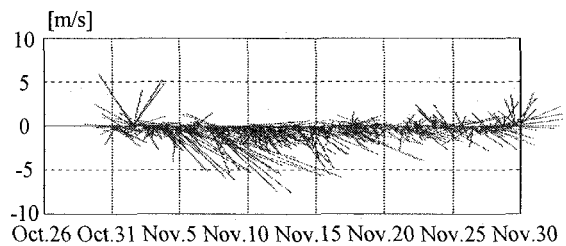
現地観測は、手賀沼と主要流入河川である大堀川と大津川、手賀沼と利根川をつなぐ手賀川を対象として、2001年10月27日から11月29日にかけて実施した。観測地点は、図—1に示されているとおり、手賀沼内に15地点設置するとともに、大堀川と大津川、手賀川にそれぞれ1地点ずつ配置した。手賀沼内の観測地点における水深は0.8～2.2mである。測定項目としては、全地点において水位・水温を、また4地点 (Stns.1, 3C, 6C, 8C) において表層流速を、1地点 (Stn.3C) においてのみ濁度・Chl.a濃度・pH・DO等の水質項目を計測した。なお水温に関しては、沼内の成層状況を把握するために、表層から底層にかけていくつかの高さにおいて計測した。さらに、流速鉛直構造を検討するために、Stn.3C においてのみ底層流速も測定した。これらの項目の計測に際しては、小型水温計 (TidbiT, Onset 社製)、水位計 (Diver, Eijkelkamp 社製)、小型流速計 (Compact-EM, アレック電子 (株) 製)、濁度・Chl.a濃度計 (ACL104-8M, アレック電子 (株) 製)、多項目水質計 (W-22P, (株) 堀場製作所製) を用いることとした。

また、沼内における水温・水質構造をより詳細に把握するために、上記観測期間中のうち11/10, 17, 22, 29においてCTD調査を実施した。ここで測定する水質項目としては、TN, TP, COD, Chl.a濃度, DO, pHとしている。さらに、気象測器を沼中央部北岸 (図—1中丸印) に設置し、気温・湿度、風向・風速、日射量、降雨量といった気象データを同時に収集した。なお、この気象観測は2001年10月30日～11月30日まで行われた。

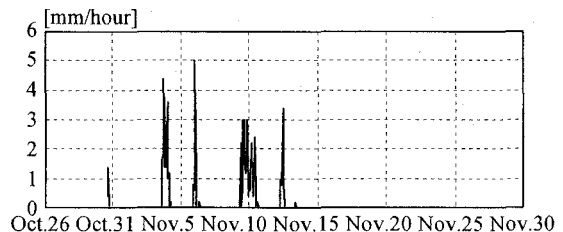
3. 観測結果と考察

(1) 水理・水質環境の基本的な特徴

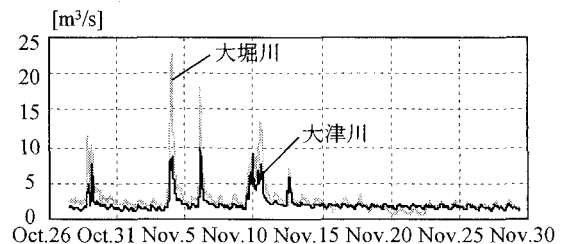
図—2は、観測期間中における風速ベクトルと時間雨量、大堀川と大津川における流量、北千葉導水路からの浄化用水量に関する時系列変化を示す。なお、浄化用水量に関しては、一日あたりの総注水量として示されている。まず、風速ベクトルに関しては、11/4や11/7を除いて、概ね3m/s以下の弱い北西風が卓越している。また、



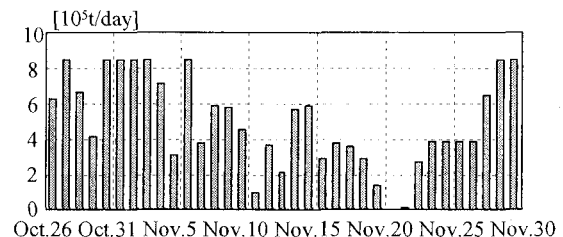
(a) 風速ベクトル



(b) 時間雨量



(c) 河川流量

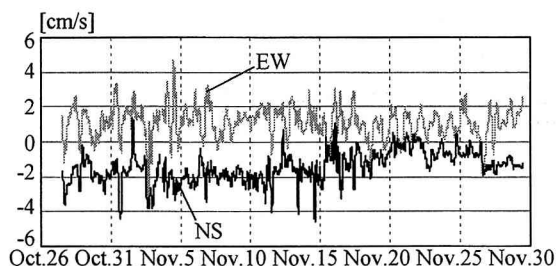


(d) 浄化用水量 (北千葉導水路)

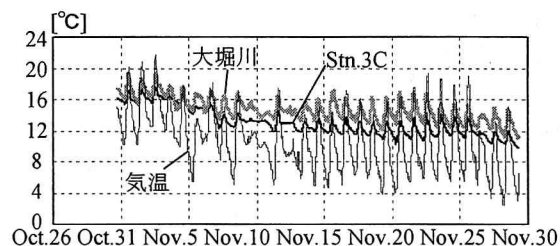
図—2 気象データ及び河川流量、浄化用水量の経時変化

まとまった降雨は数日間見られ、それに伴って大堀川や大津川における流量が増大し、その値は最大で非降雨時の10倍程度まで上昇していることが分かる。浄化用水量に関しては、最大注水量である10m³/s (約8.6×10⁵t/day)を放流している期間が主として観測期間前半に見られ、このときには二つの流入河川の合計流量を大きく上回る注水量となっている。また、11/10と11/20前後にはこの注水量は大幅に低下している。

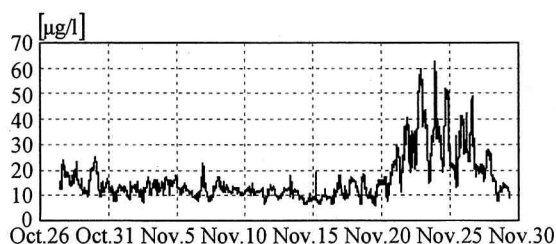
次に、手賀沼内における水理・水質環境の基本的な特徴を把握するために、手賀沼西部 (Stn.3C) 表層における流速、水温、Chl.a濃度、DO、pHに関する時系列データを図—3に示す。なお、流速に関しては、図を見やすくするために南北成分 (NS, 正は北向き流れ)、東西成分 (EW, 正は東向き流れ) と分けて図示されており、さら



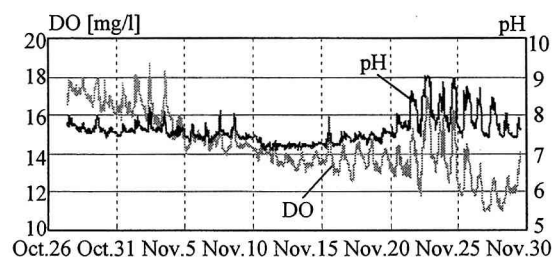
(a) 水平流速 (3 時間移動平均)



(b) 水温 (Stn. 3C と大堀川) 及び気温



(c) Chl.a 濃度



(d) DO と pH

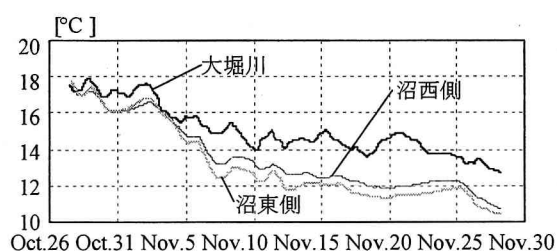
図—3 水理・水質環境の基本的な特徴 (Stn.3C, 表層)

に、各々3時間移動平均値が示されている。まず、表層流速 (同図 (a)) に着目すると、東西・南北成分ともに概ね 4cm/s 以下の弱い流れが形成されており、主な流向としては南東方向となっていることが分かる。ここでの流速変動を風速変動 (図—2 (a)) と別途比較したところ、東西方向成分に関しては明確な対応関係が生じていたものの、南北方向成分に関しては東西方向成分と比べると両者の関係はやや不明瞭となることが確認されている。

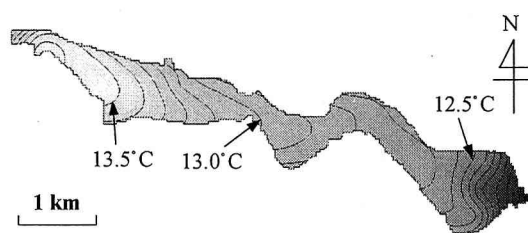
同図 (b) に示されている沼水温と河川水温 (大堀川) 及び気温を比べると、全体的には河川水温が最も高く、沼水温は一部の日中を除いて気温より高温となっている。また、日較差は気温が最も大きく、沼水温が最も小さいことが分かる。

Chl.a 濃度 (同図 (c)) に関しては、全期間中概ね 25 µg/l 以下と小さい値となっているものの、11/20 以降数日間にわたり Chl.a 濃度が大きく増加していることが分かる。この Chl.a 濃度が増加し始めるタイミングは、図—2 から明らかなように、河川出水が見られず浄化用水量が全くない日 (11/20 頃) と一致している。また、11/22 以降には、浄化用水の注水が再開されるものの、Chl.a 濃度はすぐには減少せず、その後数日間においては高濃度状態を保っていることが確認できる。

同図 (d) に示されている DO については、観測期間前半には 16~18mg/l と高い値をとるものの、その後の水温の低下に伴って DO 値は大きく減少する。期間後半には DO 値はやや増加するとともに大きく日変動している様子が伺える。この DO 値の大きな日変化は、同図 (c) に示されている Chl.a 量の高濃度期間と対応していること



(a) 沼内及び河川における 24 時間移動平均水温の経時変化



(b) 表層水温コンター (11/10, CTD 調査)

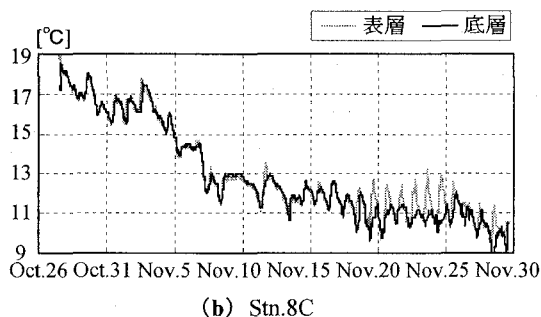
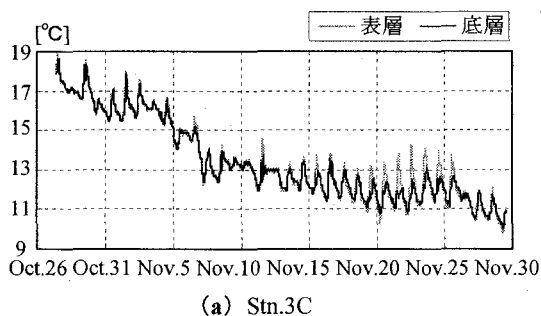
図—4 沼内における水温分布特性

から、植物プランクトンの光合成活動に起因していることが分かる。また、pH は観測期間中概ね 7.0~8.0 であり、Chl.a 濃度が増大している期間においては DO とともに上昇し、大きく日変動していることが伺える。

(2) 水温環境特性

a) 水温平面パターン

沼内における水温の水平分布特性について検討するために、沼西側と東側及び大堀川河口部における 24 時間移



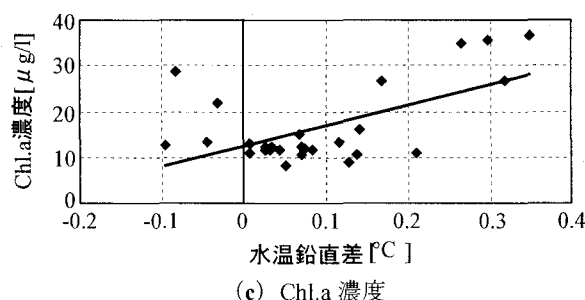
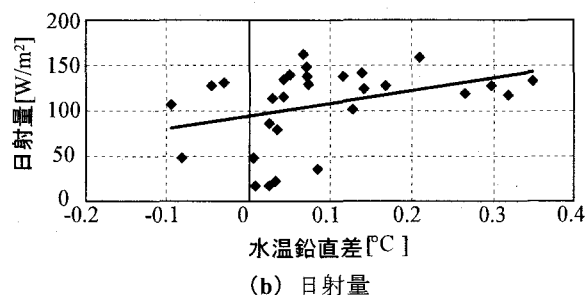
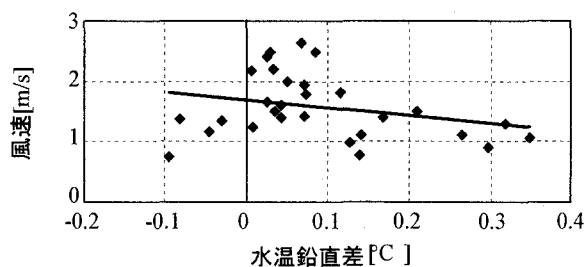
図—5 表層・底層水温の比較

動平均水温の時系列変化を図—4 (a) に示す。ここで、沼西側及び東側における水温値は、Stns.1~4 までの計 7 地点及び Stns.5~8 までの計 8 地点に含まれる全水温データをそれぞれ平均した値である。これを見ると、沼西側と東側ともに、11/2 から約 5 日間に約 3 度の急激な水温低下が生じていることが分かる。また、観測期間前半では河川及び沼西側・東側における水温値には明確な差は生じていないものの、上述した急激な水温低下後には、水温の大小関係は河川>沼西側>沼東側となっていることが分かる。また、図—4 (b) は、CTD 調査 (11/10, 10~13 時) により得られた表層水温コンターを示す。これを見ると、沼西側の水温が相対的に高く、東側へ行くとともに水温が低下している様子が分かる。この調査時には、図—2 (c) に示されているように河川出水が見られたことから、大堀川や大津川河口部が位置する沼西側の水温が相対的に高くなっており、流入河川が沼内水温に対して多大な影響を与えていることが確認される。

このような水温変動の要因を定量的に解明するために、熱収支解析を行うことを試みたところ、大気からの熱輸送は冷却効果、水平移流に伴う熱輸送は加熱効果、として各々作用していることが確認されている。これより、沼西側の水温値が沼東側よりも相対的に高いのは、相対的に高温な河川水・浄化用水が沼西側より流入するためであることが示唆される。

b) 水温鉛直分布

次に、水温の鉛直分布特性を検討するために、Stns.3C・8C における表層・底層水温の時系列変化を図—5 に示す。これを見ると、観測期間中には水温成層は両地点ともに

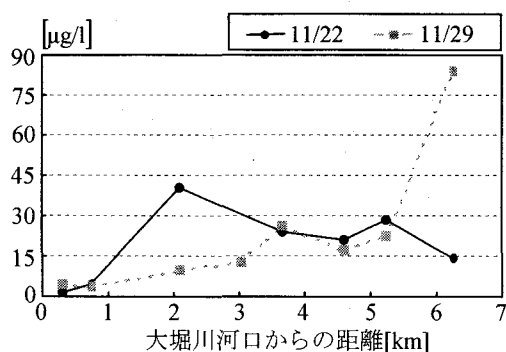


図—6 水温成層状況と各物理パラメータとの関係 (Stn.3C)

概ね存在しない。しかしながら、Chl.a 量の高濃度期間 (11/20~25) においては、表層水温と底層水温の差が日に形成され夜間に消滅する、という顕著な日成層が生じていることが分かる。

この水温成層の形成要因を検討するために、表層水温と底層水温の差 (以下、水温鉛直差と呼ぶ) の日平均値と、様々な物理パラメータとの相関関係を検討することを試みた。ここでは、風速、日射量、Chl.a 濃度の日平均値と日平均水温鉛直差 (= 表層水温 - 底層水温) の相関関係を検討した結果を図—6 に示す。これらを見ると、水温鉛直差が生じている場合には、日射量が大きく風速値が小さくなっているものの、水温鉛直差が小さいときにおいても日射量が大きく風速レベルが小さい場合が存在する。それに対して、Chl.a 濃度に関しては、一部のデータを除いて、Chl.a 濃度の増加とともに概ね水温鉛直差も大きくなっていることが分かる。

このような水温鉛直差と風速、日射量、Chl.a 濃度との因果関係を定量的に比較するために、同図中に各データに対する近似曲線を示す。これより、水温鉛直差と各影響因子との相関係数に関しては、風速は 0.27、日射量は 0.37、Chl.a 濃度は 0.59 となっていた。これより、Chl.a 濃



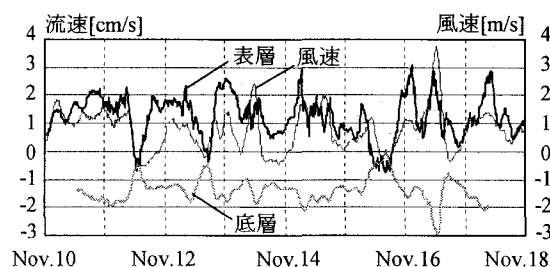
図—7 Chl.a 濃度の空間分布特性 (11/22, 29)

度と水温鉛直差の相関係数は 6 割程度であるものの、風速や日射量の値よりも相対的に大きくなっていることが分かる。以上の結果をまとめると、風速値が小さく日射量が大きく植物プランクトン量が多くなると沼内の水温成層が形成されていること、また、この成層化を引き起こす要因としては Chl.a 濃度が他の二つの要因よりも大きく影響を及ぼしている、ということが推察される。なお、このような水温成層の形成要因は、風速や日射量、Chl.a 濃度の絶対値に依存するため、当然異なる時期・季節において同種の議論が適用できるかどうか定かではなく、今後さらなる検討を行う予定である。

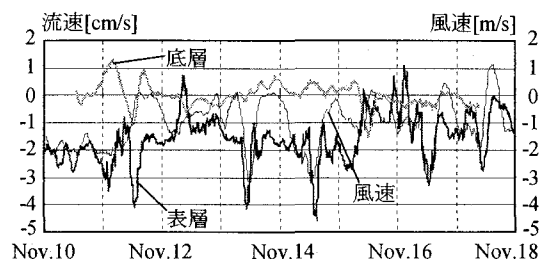
(3) Chl. a 濃度の時空間変動特性

沼内における Chl.a 濃度の時空間変動特性を検討するために、11/22, 29 に行われた CTD 調査により得られた Chl.a 濃度の縦断分布を図—7 に示す。図—2 (d) を見て分かるように、11/22 は浄化用水注水再開直後であり、11/29 は注水再開後約一週間経過している。この図を見ると、11/22, 29 とともに、大堀川河口からの距離とともに概ね Chl.a 濃度は増加している。両者の大きさを比べると、沼西側（河口から約 2km 地点）においては 11/22 の方が高くものの、沼東側（河口から約 6km 地点）では 11/29 の方が大きくなっており、空間分布特性が大きく変化していることが分かる。この期間内には大きな河川出水が見られず気象状況も大きく変化していないことから、この Chl.a 濃度の空間分布特性の違いは、北千葉導水路からの浄化用水の注水状況と密接に関連しているものと考えられる。浄化用水を注水していない場合には沼全域において Chl.a 濃度は高くなり、その後浄化用水注水を再開すると、沼西側より植物プランクトンの増殖は抑制されており、さらに沼東側において Chl.a 濃度の高濃度域が形成されているものと推察される。なお、北千葉導水路からの浄化用水注水に伴う沼内の水質改善効果に関しては、COD などの他の水質項目と合わせて現在検討しており、別途報告する予定である。

(4) 流動構造特性



(a) 東西方向成分（東向きを正とする）

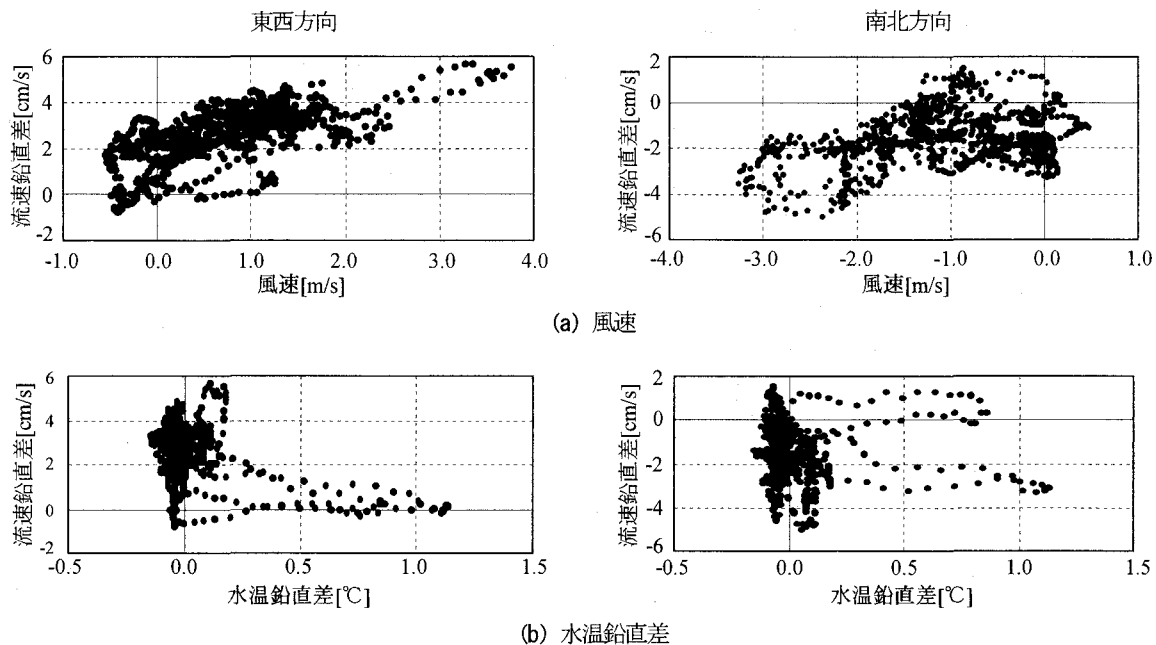


(b) 南北方向成分（北向きを正とする）

図—8 表層・底層流速及び風速の時系列変化

次に流速鉛直構造を把握するために、Stn.3C における表層・底層流速の時系列データを、風速データとともに図—8 に示す。これを見ると明らかに、Stn.3C における平均水深が約 0.8m と極めて浅いにも関わらず、表層と底層において明確な流速差が生じていることが、東西・南北方向ともに見られる。詳細に見ると、表層流速は風速と同方向に流れ、底層ではその逆方向の流れが生じ、表層と底層とで流向がほぼ逆転しており、吹送流に伴う鉛直循環流構造が卓越していることが分かる。

このような流速鉛直構造と風速及び水温成層状況との関連性を調べるために、表層と底層の流速差と風速及び水温鉛直差に関する相関図を図—9 に示す。ここで、流速鉛直差は表層流速から底層流速値を差し引いたものを与え、東西及び南北方向の流速・風速は、東向き及び北向きを各々正とする。また、ここでのデータは全て 3 時間移動平均値である。この図を見ると、風速の絶対値が大きくなるとともに、流速鉛直差は増加しており、明確な相関関係が見られるのに対して、水温鉛直差と流速鉛直差の間には明確な対応関係は見られない。これらの結果より、この観測点 (Stn.3C) 付近における鉛直循環流構造は、非成層場（水温差 0.2℃以下）においても明確に存在していること、また、風速レベルは当然ながら流速鉛直構造に対して強く影響を与えているものの、水温成層による効果は顕著には現れていないことが分かる。なお、他の湖沼では弱い温度成層でも吹送流に多大な影響を及ぼすことが指摘されており⁹⁾、この議論をさらにすすめるためには、観測データの更なる蓄積を行う必要がある。



図—9 流速鉛直構造と風速及び水温成層との関係

4. 結論

手賀沼における水理・水質環境特性を明らかにするために、手賀沼全域及び周辺河川を対象とした多点連続観測を約1ヶ月間にわたり実施した。そこで得られた結論は、以下に示すとおりである。

- (1) 手賀沼内における水温鉛直成層状況を調べたところ、約一ヶ月間の観測期間のうち数日間のみ明確な日成層が形成されていた。この水温成層は、風速レベル、日射量、Chl.a濃度と密接に関連しており、その中でもChl.a濃度が他の二つの要因よりも相対的に大きく影響を及ぼしていることが示された。
- (2) CTD 調査結果を用いて、沼内におけるChl.a濃度の時空間変動特性を調べたところ、北千葉導水路からの浄化用水注水状況により、Chl.a濃度の空間分布特性が大きく変化することが明らかとなった。具体的には、浄化用水を注水していない場合には沼全域においてChl.a濃度は高くなるものの、浄化用水注水再開後は、Chl.a濃度の高濃度域は主として沼東側において現れていることが確認された。
- (3) 水深1m以下の極めて浅い水深にも関わらず、沼内には明確な鉛直循環流構造が卓越していることが明らかとなった。この鉛直循環流構造は、非成層場（水温鉛直差 0.2°C 以下）においても明確に生じていること、また、水温成層は流速鉛直構造に対して大きな影響を及ぼしていないことが明らかとなった。

謝辞：本論文における現地調査・水質分析を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏が

ら多くの御助力を得た。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費若手研究（B）（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田安彦・白鳥孝治・立本英樹：印旛沼・手賀沼 —水環境への提言—, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 2) (社)日本水環境学会編：日本の水環境 3 関東・甲信越編, 技報堂出版, pp.153-166, 2000.
- 3) 本橋敬之助・立本英機：湖沼・河川・排水路の水質浄化 —千葉県の実施事例—, 海文堂, pp.1-128, 1997.
- 4) 小林節子, 平間幸雄：手賀沼の最近の水質の変化について (1) 排出負荷量と水質の関係, 平成9年度千葉県水質保全研究所年報, pp.63-71, 1998.
- 5) 木内浩一・小林節子：手賀沼における水温, DOの連続観測, 平成8年度千葉県水質保全研究所年報, pp.105-114, 1997.
- 6) 木内浩一：手賀沼における夏の温度成層とその水質について, 平成9年度千葉県水質保全研究所年報, pp.103-108, 1998.
- 7) 二瓶泰雄・大竹野歩・河嶋祐太・酒井耕介・増永良・戸簾幸嗣・出口浩：降雨時における手賀沼流域の水環境特性に関する現地観測, 河川技術論文集, Vol.7, pp.187-192, 2001.
- 8) 二瓶泰雄・大竹野歩・菊間弘和・藤本美樹：手賀沼流域における汚濁負荷特性に関する現地観測, 河川技術論文集, Vol.8, pp.517-522, 2002.
- 9) 田中昌弘・石川忠晴：日成層形成時の吹送流の特性について, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.63-72, 1989.

(2002. 9. 30受付)