

(9) 釜房湖のカビ臭発生要因の分析と流動特性

ANALYSIS ON MUSTY ODOUR AND WATER FLOWS

IN LAKE KAMAFUSA

石橋良信*・佐藤敦久**・今野 弘***・後藤光亀**

Yoshinobu ISHIBASHI*, Atsuhisa SATO**, Hiroshi KONNO***, Koki GOTO**

ABSTRACT; This essay is a report on the mechanisms for the musty odour production in the lake Kamafusa where is located in the northern part of Japan. The investigation and analysis are made about the condition and the prediction for the musty odour production, identification of the odorous compounds and the effect to the water flows in the lake.

As a result, Actinomycetes as odour producing aquatic organism is turn into *Phormidium tenue* because the change of the biota which is caused by the cold-weather in summer season in 1980.

From the cultivation by *Phormidium tenue*, the threshold odour value increases following to the increasing of Chlorophyll-a. And it is confirmed that the musty odour compound of *Phormidium tenue* is 2-methylisoborneol by the qualitative analysis.

According to the analysis of quantification theory, it is considered that the duration of higher temperature and insolation beyond the average value is effective to the musty odour production. Moreover, the threshold odour value is getting higher with the raise of water level.

To anticipate, the method of "effective accumulated temperature" is applied to the musty odour production and it is indicated its efficiency and the numerical value.

It is observed that the horizontal and vertical circulations are formed in the lake. Furthermore, it is found that the wind-driven current effects directly upon the diffusion of musty odour.

KEYWORDS; musty odour, blue-green algae, 2-methylisoborneol, wind-driven current, water supply

1. はじめに

水につく異臭味とくにカビ臭は琵琶湖、霞ヶ浦をはじめ全国各地の水道水源で問題になっており、発生条件や異臭味除去に関する指針や総括的まとめ等が示されている。また、カビ臭原因生物は放線菌、藍藻類の *Phormidium*, *Oscillatoria*, *Anabeana* 等であり、カビ臭物質の同定とともに詳細な調査研究がすすめられているが、種々の要因の絡む自然条件下での発臭機構については明らかにされていない点も多い。しかも、地域性、湖盆形態、滞留時間等、個々の湖において特性が異なり統一的な検討を一層難かしくしている。

仙台市の主要水源である釜房湖は昭和47年以来放線菌および *Phormidium* によるとみられるカビ臭が発生し、東北にあって異臭味に関係する代表的なダム湖になっている。

本報は釜房湖におけるカビ臭発生の特徴をまず概観し、次に *Phormidium* の培養実験と産生物質の確認を試みた。また、発生要因に関して数量化理論の適用や、有効積算温度等の試みを提案、解析した。さらにカビ臭発生に影響を及ぼすと考えられる湖水の流動状態と風力係数の評価について調査検討した。なお、本調査研究は仙台市水道局と共同で行なった。

* 東北学院大学工学部 Tohoku Gakuin Univ. Eng. Dep., ** 東北大学工学部 Tohoku Univ. Eng. Dep.,

*** 東北工業大学 Tohoku Inst. of Tech.,

2. 流況および栄養状態

仙台市の南西25kmに位置する釜房湖は平均深度が11.6mで、とくに等深線図から旧河道部を除けば比較的浅いダム湖である。Table 1に諸元を、Fig.1に湖の形状および音響測深機で計測し、後述の解析に用いた代表的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、の断面形状を示す。

また、湖には3河川が流入しており、昭和56年度の年平均流入水量は $8.88 \text{ m}^3/\text{S}$ であり、湖の滞留日数は40日前後であった。

釜房湖の躍層は例年夏期に良く発達している。この期間、底層部は無酸素状態になり、底泥からの鉄、マンガン等の溶出も多くなる。ただし、昭和55年のみは冷夏であった故に躍層の形成が弱く、溶存酸素も底層まで存在していた。また、秋の循環期以降とくに冬期は表層から底層まで水温、水質ともに均一になる。

ダムサイト近傍にある取水塔での過去10年間における水質試験結果では KMnO_4 消費量はほとんど $3 \text{ mg}/\ell$ を越え、夏期から初冬にかけては $5 \sim 6 \text{ mg}/\ell$ に達する。硝酸性窒素の形態が多い無機性窒素は平均的に $0.3 \text{ mg}/\ell$ であるが、近年は夏から冬に $0.4 \text{ mg}/\ell$ 前後に増加している。指針によれば、 KMnO_4 消費量が $3 \text{ mg}/\ell$ 以上で要注意、 $5 \text{ mg}/\ell$ の水域ではとくに警戒を要すること、また無機態窒素が $0.3 \text{ mg}/\ell$ 以上ではカビ臭の発生率が急増することから、

釜房湖でのカビ臭発生の可能性は十分であると考えられる。一方、全リンは夏期から初冬にかけて平均 $19.7 \mu\text{g}/\ell$ の値をとり、かつリン酸イオンは $0.02 \text{ mg}/\ell$ 以下が多いが、 $128 \text{ mm}/\text{d}$ の降雨による出水時には全リンとして平常時の負荷量の7倍程度に達することがあり、藻類増殖の点からは無視できないと思われる。

釜房湖の栄養状態を修正Carlson指数(TSI_M)³⁾で表わすと、Chl-*a*濃度を指標にした場合 $\text{TSI}_M(\text{Chl})=50$ 、透明度では $\text{TSI}_M(\text{SD})=50$ 、全リン濃度では $\text{TSI}_M(\text{TP})=49$ となり、釜房湖は琵琶湖南湖の値に近く、同程度の栄養段階にあると推察される。さらに、Forsberg, Rydingによるスウェーデンの湖沼を対象にした判定結果³⁾ではChl-*a*、透明度では富栄養状態に、全窒素、全リンでは中栄養状態に分類される。また、藻類増殖のための補償深度は透明度の2~2.5倍として4~5mと見積れる。

3. カビ臭発生状況

3.1 釜房湖におけるカビ臭発生の特徴

釜房湖ではダム築造後1年でカビ臭が発生し、当初は間欠的な発生であったが、最近では毎年生じている。Fig.2に臭気濃度(TO)の経年変化を示す。

釜房湖のカビ臭発生状況の特徴は、第1に、はやい年代の放線菌と思われる発臭と近年の*Phormium*の2

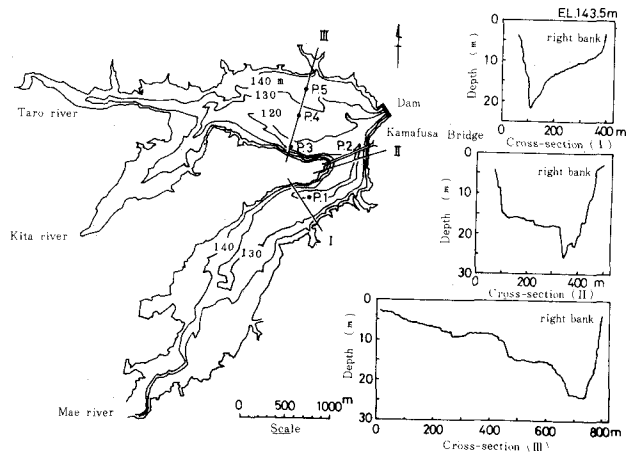


Fig.1 Study Area in Lake Kamafusa

Table 1 Views of the Lake Kamafusa

Location	38°12' N 140°14' E
Catchment Area	195.25 km ²
Reservoir Area	3.9 km ²
Normal High Water Level	EL. 149.80 m
Estimated High Water Level	EL. 150.60 m
Limited High Water Level	EL. 143.80 m
Gross Storage	45300000 m ³
Storage in Normal High Water Level	42000000 m ³

種の原因生物による発臭であり、第2に、カビ臭の発生が8、9月に集中する点である。

初期の段階においては、水質の理化学試験、生物種と藻体数、生物総数を求めた生物学的試験、一般細菌、大腸菌群、従属栄養細菌に放線菌を加えた細菌学的試験をもとに湖水の上層、中層、底層部のカビ臭の発生状況の相違を調べるための主成分分析の結果では、循環期に、かつ底層に発生の疑いがもたれ、しかも底層部での臭味が強いこと、また*Oscillatoria*, *Anabeana*等の藍藻類が存在しないにもかかわらず、カビ臭物質geosminが検出されることおよびクレインスキー培地により放線菌の集落がみられること等から放線菌に基づくものと考えられた。ところが、梅雨期にとくに雨が強く冷夏であった昭和55年には生物相に変化がみられ、この年以降は藍藻類*Phormidium*による発生に変わっていった。さらに、昭和56年以後は夏期の他に冬期にも臭気が強まる傾向にある。

全国的に5月にカビ臭の発生するケースが多いが、釜房湖では8、9月に集中する。これは低温で梅雨明けが遅い東北に位置する地域性に起因すると思われる。また、TOは昭和48年の80が最高で比較的低い。

Fig. 3に近年3年間の表層における主たる生物相の経年変化を示す。春先には適温が低い珪藻類*Asterionella*や浄水場のろ過池閉塞を引き起こす*Synedra*が増殖するが、5、6月の制限水位までの放流および水温の上昇とともに珪藻類は激減し、夏には適温の高い藍藻類が増え冬期まで存在する。昭和54年まではカビ臭発生時の藻類の優占種は必ずしも一致していないが、55年以後は*Phormidium*が優占種になっている。なお、*Phormidium*による発生日は昭和54年9月10日、56年8月1日、57年8月23日であった。

Fig. 4に月1度の頻度で実施した定期採水による表層での*Phormidium*の藻体数とTOの関係を示す。両者には顕著な相関は認められないが、500 n/ml以上になると一般に臭気が感知できるTO15を越えるようである。

3.2 原因生物および産生物質

(A) 実験方法

*Phormidium*の培養はあらかじめプランクトンネットで採取した検水の適量をBG-11⁵⁾の寒天培地に接種し、単藻分離を試みた。この操作を照度500 lxの白色蛍光灯下で2,3回行った後本実験のための5 lの液体培地による大量培養を行なった。なお、大量培養の前に藻体数を均一に接種するための予備培養を行なった。BG-11の培地組成をTable 2に示す。

器具は乾熱滅菌、培地はすべて高圧蒸気滅菌(121℃, 15分)しているが、培地は無菌培養ではない。ま

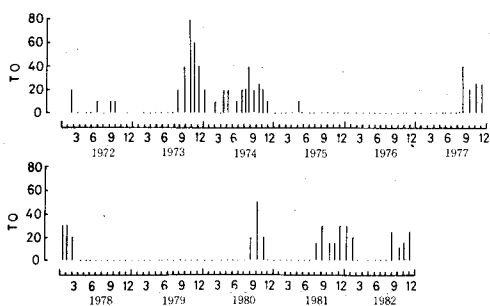


Fig. 2 Temporal Change of Threshold Odour (TO)
(surface water)

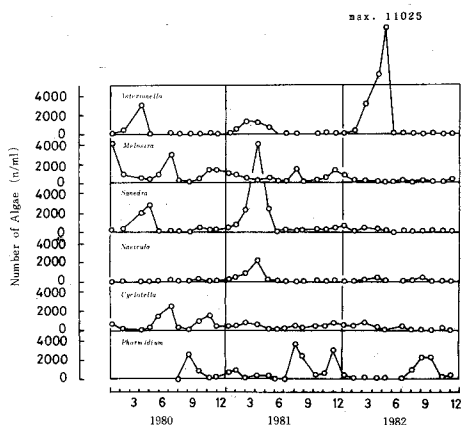


Fig. 3 Temporal Change of Biota

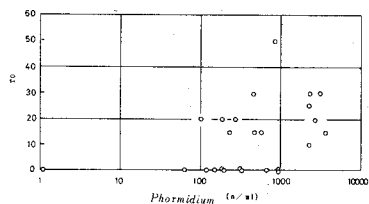


Fig. 4 Relation between TO and *Phormidium*
(surface water)

た、温度は20℃とし、初期のpHはほぼ8.40に調整した。培養は静置培養でときどき手で振とうした。

実験は照度をおのおの500, 1000, 1500 lxとして連続照射した試料、500 lxの連続照射のもと培地組成中の窒素あるいはリン濃度を半減させた試料およびフミン酸を添加した試料についてそれぞれ増殖の推移をみた。測定指標は *Phormidium* の藻体数、Chl-*a*、TO、pH 値である。

産生物質の定性的確認の試料は昭和57年暮れに採取し、照度500 lxで大量培養した。Chl-*a* が28.8 $\mu\text{g}/\ell$ の試料3 ℓ について、回収率の検討を試みながら、水蒸気蒸留を行ない約100倍に濃縮し、ガスクロマトグラフ (GC) 装置で分析した。*Phormidium* からのカビ臭物質の分離・濃縮のフローシートをFig. 5に示す。GCの測定条件は充てん剤:2%OV-1 Chromosorb W, AW-DMCS, カラム:3 mm ϕ $\times$ 3 m, カラム温度:170℃, キャリアガス:He50 ml/min である。

Table 3 Samples and Pre-treatment

Sample	Date of Collection	Odour	Pre-treatment
Source Water (RW)	1980 11.12 ~12.2	Musty Odour (TO 20)	20 days water flow with granular activated carbon
<i>Phormidium</i> (Ph)	1980 11.28	Musty Odour	Cultivated <i>Phormidium</i> from the source water
Residual <i>Phormidium</i> (Ph)	1980 11.28	Musty Odour	Residue in FB flasks

一方、仙台市水道局ではガスクロマトグラフィー質量分析計 (GC-MS) による定量分析を行なっている。用いた試料をTable 3に示す。なお、寒天培地を用いた点を除いて *Phormidium* (記号Ph) の培養条件は同一であるが、GC-MSにかける前処理はスーパーテルでかき取った試料をFBフラスコ内でジクロロメタンに浸潤させ、24時間静置後、蒸留水200 mlを加えて蒸留、さらにジクロロメタンで再抽出し、最終的に2 mlまでクデルナ・ダニッシュ濃縮装置で濃縮して検液としている。また、実験にはFBフラスコ内の残留物をジクロロメタンで洗浄した液 (記号Ph) および釜房湖水を活性炭でろ過して臭気物質を吸着させた後記号Ph. と同様に処理した試料 (記号RW) について分析している。

GC-MS による測定はEI (Electro Impact) による分析だけでは明確でない部分があるので、反応ガ

Table 2 Component of BG-11 Agar

NaNO ₃	0.5	g	Fernic Citrate	0.006	g
KH ₂ PO ₄	0.039	g	VitaminB ₁	0.002	g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.075	g	VitaminB ₂	trace	
CaCl ₂	0.036	g	EDTA	0.001	g
Na ₂ CO ₃	0.02	g	*A5 Solution	1.0	ml
Na ₂ SiO ₃	0.058	g	*B6 Solution	1.0	ml
citric Acid	0.006	g	Distilled Water	1000	ml

A 5			B 6		
H ₂ BO ₃	2.86	g	NH ₄ VO ₃	0.23	g
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81	g	Cr ₂ K ₂ (SO ₄) ₂ ·24H ₂ O	0.96	g
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22	g	NiSO ₄ ·6H ₂ O	0.45	g
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08	g	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.49	g
NaMoO ₄	0.02	g	Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	0.18	g
H ₂ SO ₄	a drop		Ti Solution	20	ml
Distilled Water	1000	ml	N/10 H ₂ SO ₄	1000	ml

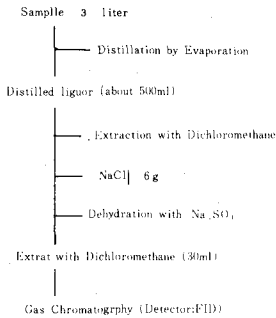


Fig. 5 Extraction of Odorous Compounds

Table 4 Conditions of Measurements of GC-MS for the Odorous Compounds

Column : Glass Column (2.5mm $\times$ 3 m)
 5% PEG-20M
 Chromosorb WAW-DMCS 80~100mesh
 Column Temp. : 150℃
 Injection Temp. : 250℃
 Sample : 5~10 μl (CH₂Cl₂)
 Ion Source Temp. : 250℃
 Carrier Gas : He (30ml/min)
 Separator Temp. : 270℃

- (1) GC-MS EI (Electro Impact)
 Electron Energy: 60eV
 Electron Current: 60 μA
 Accel Volt: 3.5KV
- (2) GC-MS CI (Chemical Ionization)
 Reagent Gas: i-C₄H₁₀ (iso-butane)
 NH₃
 Electron Energy: 120eV
 Electron Current: 200 μA
 Accel Volt: 3.5KV

スにイソブタン（記号CI-i）とアンモニア（CI-NH₃）を使用したCI（Chemical Ionization）による分析も行なっている。Table 4 に測定条件を示す。また臭気物質の判定にはgeosmin と 2-methylisoborneol の標準品を使用した。

(B) 実験結果および考察

(1) *Phormidium* の増殖

接種後からlag 相において*Phormidium* は浮遊状態にあるが、対数増殖期からは寒天様物質をとまなう束状群体を呈し、Chl-a、TO、pH 値は増加するが藻体数は測り得ない状態になる。なお、細胞の幅は1～2 μm、長さ5～6 μmである。

昭和57年秋に採水した試料の大量液体培養の結果、21日間の培養において1500 lxで連続照射したもののChl-aは最大404 μg/l、TO 800、1000 lxではChl-a 269 μg/l、TO 700、500 lxではChl-a 57.5 μg/l、TO 400に達し、照度が強いほど、増殖は顕著である。反面、強い照度においては死滅期近くでの珪藻、緑藻の繁殖も激しく、*Phormidium* の純粋培養の観点からは増殖が遅れるものの、照度は500 lxが適切と結論された。

また、Fig. 6 に培地の窒素分を半減（無機性窒素0.16 mg/l）したときの生育状況を示す。中村によれば、窒素分が無ければ増殖しないといわれるだけに、本例は値が小さく、Chl-aの値は39 μg/l、TO 200 までしか上がらないが、曲線のパターンは全試料とも類似である。すなわち、一端下降したpH は対数増殖に入るに先立ちpH値の上昇がみられる。

また、対数増殖期以後にはChl-a の増加にTO が同時またはやや遅れて増加する傾向をとる。この傾向は松本・土屋の実験結果に一致する。一方、岡山らは*Anabaena*の産生臭気物質はほぼ全量藻体内に保持されていることを指摘している⁸⁾。同じ藍藻類である*Phormidium* でも同様に藻体内に保持されているものとすれば、バクテリアなどによる分解作用等で細胞の破損とともに臭気が上昇するとも考えられる。事実、死滅期に近い*Phormidium* には糸状体の中の細胞に欠損がみられ、また死滅後は容易に細胞膜が溶け、藻種は緑藻に変わることが多い。一方、Doig は海に生じる赤潮の実験からフミン質が藻類の増殖に関係することを指摘している⁹⁾が、フルボ酸を添加した中村の研究結果⁶⁾と同じように、本研究でも*Phormidium* の増殖にはフミン酸は影響しないものと思われた。

(2) 産生物質

Gerber¹⁰⁾ によって放線菌からカビ臭物質であるgeosmin（1965）、2-methylisoborneol（1969）が検出されて以来、Table 5 に示すような藍藻類の産生物質が検出、明記されている。¹⁾ 11)

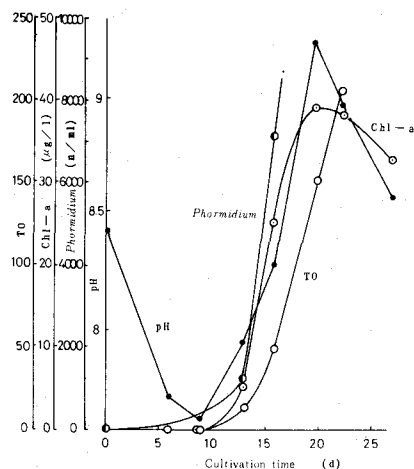


Fig. 6 Time-course of Chlorophyll-a, Threshold Odour Value, pH and Number by *Phormidium tenue*

Table 5 Musty Odorous Compounds by Blue-Green Algae¹⁾

Blue-green Algae	Odorous Compounds	Measurement
<i>Schizothrix mulleri</i>	geosmin	GC, GC-MS
<i>Oscillatoria animalis</i>	geosmin	GC
<i>Phormidium out umnale</i>	geosmin	GC, GC-MS
<i>Anabaena spiroides</i>	geosmin 2-methylisoborneol	GC-MS
<i>Oscillatoria chlorina</i>	geosmin	GC
<i>Oscillatoria splendida</i>	geosmin	GC
<i>Phormidium tenue</i>	2-methylisoborneol	GC

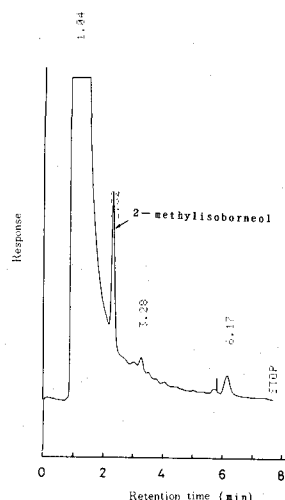


Fig. 7 Gas Chromatograms for the Odorous Compounds

産生物質確認のためのGCによる定性実験ではFig. 7に示すように、2-methylisoborneolの保持時間2.32分と同じ位置にピークが現われている。しかし、保持時間4.40分に現われるはずのgeosminのピークは現われていない。したがって、釜房湖の*Phormidium*は2-methylisoborneolを産生することと、検鏡のトリコームから*Phormidium tenue*と推察される。

これに対し、水道局で行なったGC-MSによる定量試験では興味ある結果を得た。Table 6に結果を示す。分離可能であった物質として2-methylisoborneol, ベンツアルデハイド, geosmin, $C_{13}H_{27}COOCH_3$ を同定している。2-methylisoborneolはEI, CI-i, CI-NH₃いずれからも検出されることが予想されたことであるが、geosminは原水(RW)および*Phormidium* (*Ph.*, *Ph.*)のCI-iに存在が認められた。RWにおける存在は、現在でも発生が予想される放線菌あるいはわずかながら存在する*Oscillatoria*の産生するgeosminの混入のためと推定される。*Ph.*, *Ph.*のCI-iでgeosminが検出されたことから、2-methylisoborneolとgeosminの両方が確認されたことになるが、*Oscillatoria*から2-methylisoborneolが検出された例¹²⁾もあり、生成過程をふまえた調査が必要である。

また、昭和53年のクレインスキー培地による2種の放線菌の培養抽出液のGC-MS試験から、カビ臭物質の他にTable 7に示す炭化水素類、テルペン類が検出された。

ところで、geosminは二環性セスキテルペン、2-methylisoborneolはショウノウに類似した二環性モノテルペンであり、ともにメバロン酸経路によって生合成されるイソプレノイド化合物である。また、Table 6の $C_{13}H_{27}COOCH_3$ はイソプレノイド3分子よりなる化合物と考えられる。これら化合物の前駆体はアセチルCoA、メバロン酸、ヒドロキシシメチルグルタル酸やゲラニルピロリン酸等であり、今後、これら微量有機化合物の生合成の経路を把握することが臭気発生予測、防御の点から必要になると思われる。

3.3 カビ臭発生の要因と状況考察

Phormidium による発生を対象に定期採水の資料をもとに、臭気の発生や臭気が存在する状態でさらに臭気の上昇する場合の条件算出に主眼をおいて数量化理論の計算を試みた。数量化理論の分類は第二類である。アイテムは外的基準にTOの状態、属性アイテムとして*Phormidium* 1 ml当たりの藻体数、気温の月平均変動量に対するTO変化前1週間の1日当たりに換算した平均増減量、同定義による日射量、2週間における水位(EL)の変化量の日平均値、硝酸性窒素および攪乱の要因の7項目をそれぞれ3～4のカテゴリに分けてアンケート形式とした。Table 8にアンケート用紙を示す。

その結果、サンプルスコアの統計量中のグループ毎の平均値と規準化後のカテゴリ数量の値との比較から、臭気が発生もしくは上昇するための条件としてTable 9の結果が推定された。すなわち、*Phormidium* が500 n/ml以上、気温の上昇がその月の平均変化量より1日当たり0.01～0.99℃または1.0℃以上高くなり、日射量が同様に0.01～0.09 MJ/m²と多くなる場合にカビ臭の発生、TOの上昇があると考えられ、かなり

Table 6 Confirmed Trace Substances

1) 2-methylisoborneol

Sample	E I	CI-i	CI-NH ₃
R W	detection	detection	detection
<i>Ph.</i>	detection	detection	detection
<i>Ph.</i>	detection	detection	detection

2) Benzaldehyde

Sample	E I	CI-i	CI-NH ₃
R W	impossible detection	impossible detection	impossible detection
<i>Ph.</i>	detection	detection	detection
<i>Ph.</i>	detection	detection	detection

3) geosmin

Sample	E I	CI-i	CI-NH ₃
R W	detection	detection	detection
<i>Ph.</i>	non-detection	detection	non-detection
<i>Ph.</i>	non-detection	detection	non-detection

4) $C_{13}H_{27}COOCH_3$

Sample	E I	CI-i	CI-NH ₃
R W	non-detection	non-detection	non-detection
<i>Ph.</i>	non-detection	non-detection	non-detection
<i>Ph.</i>	detection	non-detection	non-detection

Table 7 Isolated Compounds by Actinomycetes
Excepting the Musty Odour Compounds

Hydrocarbon	$n-C_{10}H_{22}$, $n-C_{11}H_{24}$, $n-C_{12}H_{26}$ $n-C_{13}H_{28}$, $n-C_{14}H_{30}$
Terpene	$C_{10}H_{16}$, $C_{15}H_{24}$ Sesquiterpene

気象的要因が影響すると思われる。また、硝酸性窒素は 0.20 mg/l 以上存在すれば、臭気発生には十分と思われる。EL 変動は水位が2週間当たり 1.0 m 以上上昇するとカビ臭が強まる傾向がありそうであるが、実際には EL が減少傾向では臭気が生じる場合があり、相関性は低い。

なお、カビ臭が発生しない条件は *Phormidium* が存在せず、気温、日射量が減少傾向にある場合および硝酸性窒素が 0.2 mg/l 以下の場合と推察できる。

次に夏の臭気発生と初冬からの TO の上昇について¹⁴⁾考察する。有賀は湖沼の植物プランクトンには適温が存在し、水温の上昇期には適温も上がり、下降期には適温も低下する傾向を示し、夏期の藍藻類の適温はかなり高いと述べている。また、*Phormidium* の増殖の適温は 25°C との報告もある。⁴⁾これに対し、釜房湖の夏期臭気発生時の表層の水温は $20\sim 26^\circ\text{C}$ の範囲にある。しかも、前述の制限水位までの水位低下により受熱体としての湖水容量も減少し、また放流量も減少して湖内は大きな培養槽のような状態を呈する。夏期の発生はこのような水温を中心とする現象および夏から増加する有機物、無機性窒素等が加味された発生と推論できる。なお、夏期の発生前には必ず晴天の日が続くようである。

一方、水稻を対象に、農芸化学の分野には有効積算温度の概念がある。すなわち、ある温度を基準に基準温度以上の温度を累積し、合計温度がある定められた温度以上に達した時点で発芽、開花等が発現することを予測する方法である。この考えをカビ臭の発生に適用してみた。本来ならこの場合水温で検討すべきであろうが、昭和55年、56年の日毎のデータに欠損があるため、気温で代用した。¹⁵⁾その結果、カビ臭が発生した前日までの1日1回の平均気温の有効積算温度は、春先増殖の珪藻類が減少し、その後藍藻類が増殖しはじめる境界の時期、また躍層の形成がされはじまる時期である6月の平均気温をとって基準温度を 18.5°C とした場合、昭和55年 141°C 56年 143°C になった。昭和57年にこの基準温度を適用した場合、有効積算温度は 143°C になり概ね一致する。したがって、有効積算温度の *Phormidium* 増殖に与える意義について多くの湖で今後とも調査検討する必要があるが、釜房湖では基準温度を 18.5°C に定めたとき、気温の積算温度が 140°C 付近に達する

Table 8 Items and Categories of Questionnaire

1	<i>Phormidium</i> (n/ml)	(1) 0 (2) 1~499 (3) 500~1499 (4) above 1500
2	TEMP (°C) Daily Average Varying Quantities per One Week	(1) +0.01~+0.99 (2) above +1.00 (3) -0.01~-0.99 (4) under -1.00
3	SUN (MJ/m ²) Daily Average Varying Quantities per One Week	(1) +0.01~+0.99 (2) above +1.00 (3) -0.01~-0.99 (4) under -1.00
4	EL (m) Daily Average Varying Quantities	(1) +0.01~+0.99 (2) above +1.00 (3) -0.01~-0.99 (4) under -1.00
5	NO ₃ (mg/l)	(1) 0~0.19 (2) 0.20~0.29 (3) 0.30~0.39 (4) above 0.40
6	Existence of Disturbance	(1) YES (2) NO

1	<i>Phormidium</i> :	Number of <i>Phormidium</i>
2	TEMP :	Temperature
3	SUN :	Insolation
4	EL :	Water Level
5	NO ₃ :	NO ₃ -N
6	Existence of the Cause for the Disturbance	

Table 9 Calculated Results of Quantification Theory

(in the case of the odour production or raise)

1	<i>Phormidium</i> (n/ml)	above 500
2	TEMP (°C)	+0.01~+0.99 or above +1.00
3	SUN (MJ/m ²)	+0.01~+0.99
4	EL (m)	above +1.00
5	NO ₃ (mg/l)	0.20~0.29
6	Existence of Disturbance	NO

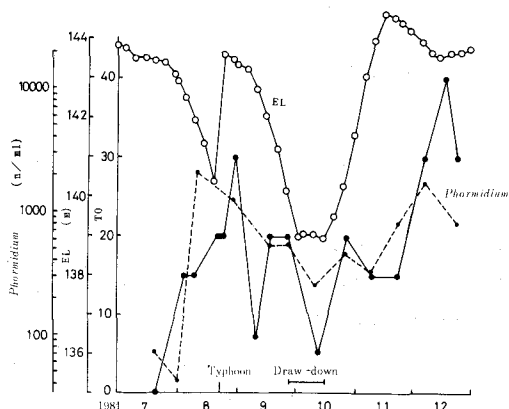


Fig. 8 Relation between the Elevation of the Water Surface (EL) and the Musty Odour

とカビ臭が発生するという予測ができる可能性がある。

初冬からの TO の上昇は水温が 4°C まで下がることを考慮すると、水温が *Phormidium* の増殖に影響しているとは考えにくい。また光が弱いときには水温が藻類の増殖（光合成量）の制限因子にはなりにくいといわれている。¹⁴⁾ 一方、循環期には躍層が形成されないで夏と初冬では湖水の滞留日数の違いがみられる。56 年 8 月上旬を例にとると躍層が明確で表面放流である夏期には 8 月 2 日～12 日までの流入 3 河川の水温変化は $17\sim 24^{\circ}\text{C}$ の間にあり、躍層（ $7\sim 8\text{ m}$ ： 8 m での水温 15°C ）以浅が流入、放流の流動に関与すると考えられ、滞留日数は約 30 日弱、また初冬には躍層の消失、水位の上昇で約 55 日に増える。滞留日数が増加すれば、栄養塩と藻類との接触時間も増加することになる。初冬の TO の上昇、*Phormidium* の増殖はこのような現象と数量化理論で指摘した日射量の月平均変動量に対する日射量の増加等の状況が複合されて生じるのが一因と考えられる。

さらに、水位変動に関して、水位を極端に低下させた後、平水位にもどした際カビ臭が発生する事例がみられる。¹⁵⁾ 数量化理論では水位変動を考慮した攪乱の要因は期間のとり方に問題があり明確ではないが、Fig. 8 にみられるように臭気存在時の水位（EL）と TO には EL の変化に TO が追従する傾向があるようにみられる。このことに対し、EL 減少時には放流にともなう表層付近の活性の強い *Phormidium* の流出が、EL 上昇時には湖水の攪乱や補償深度以浅への栄養塩の回帰等の影響があるものと考えられる。

4. 湖水の流動特性

既存の研究では水深が比較的深く、湖盆形状が複雑で水温躍層の存在下での湖水流動の実態は十分明らかでない。そこで漂流板により釜房湖における鉛直・水平方向流動の概要を調査した。Fig. 9 に示す漂流板を、Fig. 1 に示す各断面鉛直・水平方向に 7 個設置し、30 分毎の流動状況を観測するとともに、湖内水温分布、流入河川水温変化を調査した。調査は昭和 56 年 8 月、57 年 7、8、11 月に合計 6 度行なった。

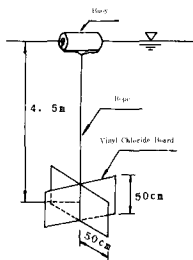


Fig. 9 Floats

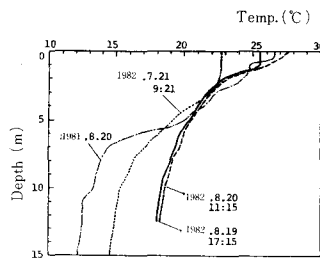
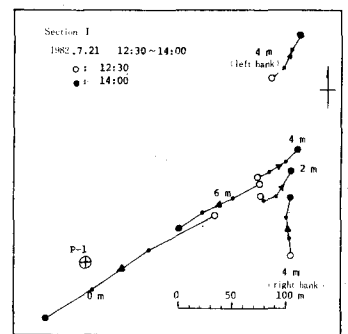
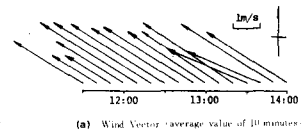


Fig. 10 Depth-distribution of Temperature



(b) Streamlines

Fig. 10 に断面 I の水温分布を示す。Fig. 11 に昭和 57 年 7 月 21 日の断面 I の湖水流動結果を示す。風は風速 $2\sim 4\text{ m/s}$ の南東寄りの風で、調査期間中 7 月 20 日 10 時から 21 日 14 時の河川水温は $16.2\sim 18.6^{\circ}\text{C}$ で、Fig. 10 に示す水温躍層から流入水は $6\sim 8\text{ m}$ 層に侵入可能である。これに対し、深度 0 m （平均深度 0.25 m ）は平均流速 2.9 m/s で上流へ、深度 $2, 4\text{ m}$ では逆流、 6 m で 0 m と同方向へ流動する鉛直循環流が認められる。この湖水流動は変水層以浅では吹送流による鉛直循環流が、変水層以深では表層の吹送流にともない、変水

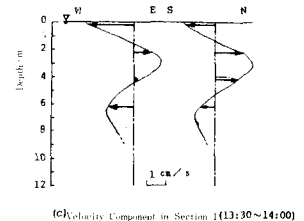


Fig. 11 Observed Currents (1982. 7. 21)

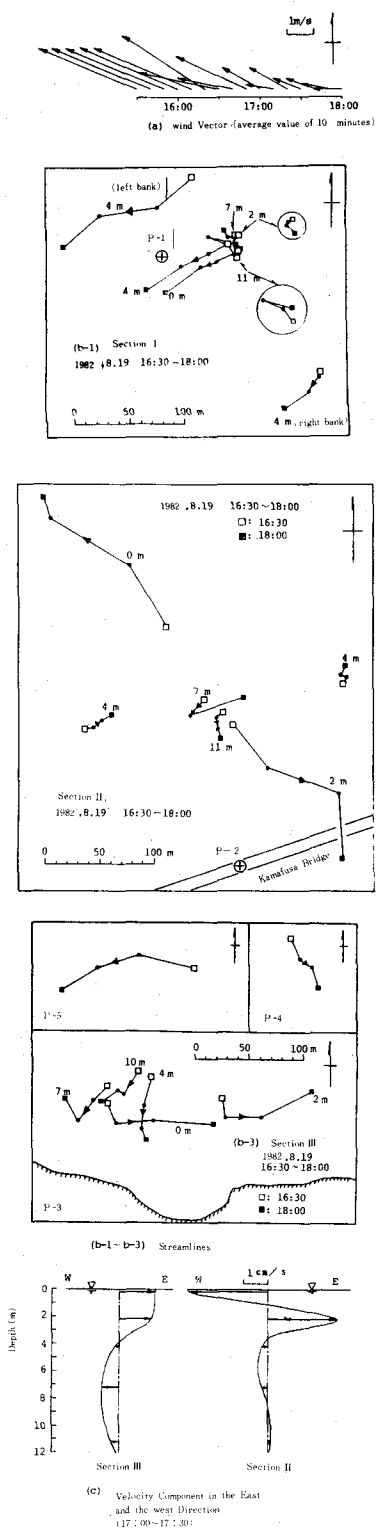


Fig.12 Observed Currents (1982.8.19)

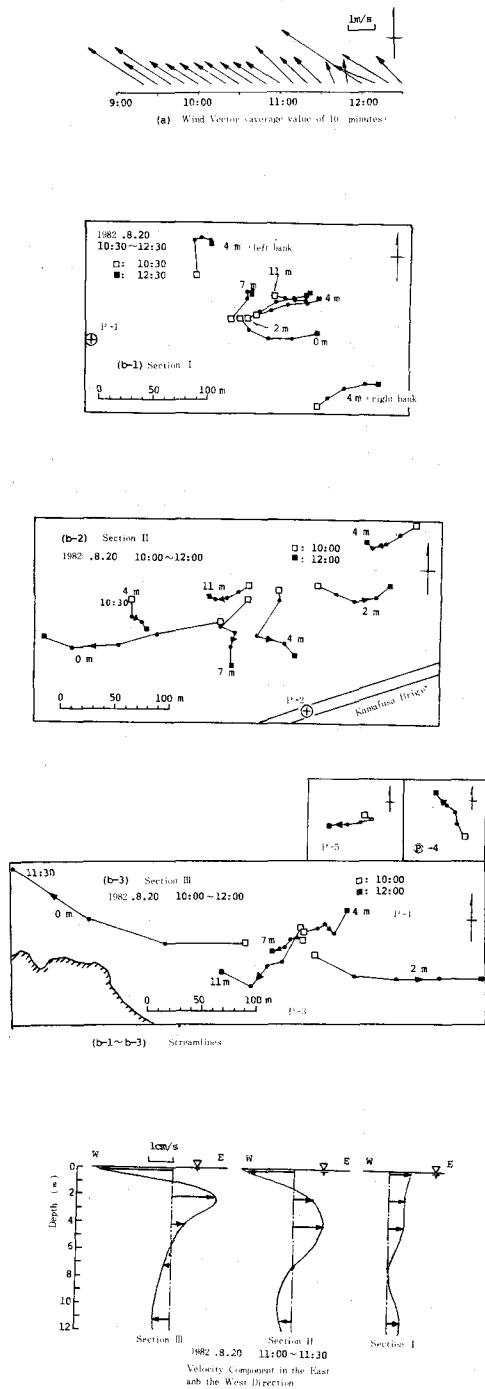


Fig.13 Observed Currents (1982.8.20)

層上部の湖水が連行され、湖端に生じるポテンシャル差を補うように変水層以深に表層と同一方向の傾斜流が生じたと考えられる。

Fig. 12に昭和57年8月19日の流動結果を示す。ここで、19日18時から20日14時までの流入河川水温は17～21℃の範囲で変化している。昭和57年の夏は、多雨のため躍層の発達が十分でなく、底層付近の水温は前年に比較して5～6℃程高く、流入河川水は底層付近に侵入可能な状況にある。また、風は南東から東寄り、4～1 m/Sである。深度0 mの流動は断面Ⅰで上流へ、断面Ⅱ、Ⅲでは反時計回りの水平循環流が認められる。また、断面Ⅱでは釜房大橋を境に南北方向へ湖水の交換が認められる。断面Ⅲで水深の浅いP-5付近は風向に対応した順流が、旧河道の水深の深いP-3付近では逆流およびそれにともなう鉛直循環流が認められる。さらに、断面Ⅱ、Ⅲにおける鉛直循環流の相違は興味深い。

Fig. 13に、8月20日の流動結果を示す。風は南東寄り1～3 m/Sで前日とほぼ同様であるが、断面Ⅰの表層は前日と反対方向に流動しており、湖全体の流動も前日とかなり変化している。このように、湖水の流動は風速、風向、湖盆形状の影響を受け、短期間に水平的にも鉛直的にも流向、流速が変化する。

一方、風による水面応力によって生じる水面付近の湖水流動速度 V_0 は、¹⁹⁾ 昼間安定して風が吹く場合、次式で推定される。

$$V_0 = kW, \quad k: \text{風力係数} (0.02 \sim 0.05) \\ W: \text{平均風速} (m/S)$$

ここで、実測による表層の流動速度を用い、風力係数の評価を行なった。風速、風向は釜房ダム管理所データ（水面上約50 m）を用いた。その結果、湖周辺の地形特性から東西方向に風が卓越的に吹く場合、断面Ⅲ付近の表層の流動速度は、風速約3 m/Sで $k = 0.01 \sim 0.04$ として推定でき、風速8～9 m/Sでは $k = 0.01$ 程度となる。

以上の結果から、当ダム湖で、水面が広い断面Ⅲで3 m/S東西方向に卓越して風が持続して吹く場合、 $k = 0.02$ と仮定すれば、表層水の流動速度は6 cm/Sとなり、6時間で約1.3 km流動すると試算できる。Fig. 14に昭和55年9月のカビ臭の水平分布を示した。表層付近で臭気濃度の高い*Phormidium* によるカビ臭が湖の特定の場所に発生するとともに、湖全体に広がるのに半日から1日程度の短時間で済むことになる。

また、鉛直方向の流動が吹送流にともなう乱流渦によるものとし、その規模が渦動粘性係数 ϵz によって決定される鉛直混合流について検討を加えてみる。Reynoldsの仮定により拡散係数 K_z は ϵz にはほぼ同等と仮定できるとしたとき、吹送流による表層付近の平均流速 V_0 と鉛直拡散係数 K_z で決まる時間 T と、水平、鉛直距離 L 、 H との関係は次式で与えられる。¹⁹⁾

$$L = V_0 T, \quad H = \sqrt{K_z \cdot T}$$

いま、Fig. 12 (C) の断面Ⅲの表層流動を想定し、 $H = 2 m$ 、 $V_0 = 6 cm/S$ 、 $K_z = 2 cm^2/S$ とおくと、水面上の物質が水深2 mの全層に拡散するまでの時間 T は5.6時間、水平距離は1.2 kmとなる。

ただし、深い湖で、水温躍層が発達し、水温勾配が大きい場合 ϵz は変水層に近づくにつれ急激に激少するので、浅い湖ほど混

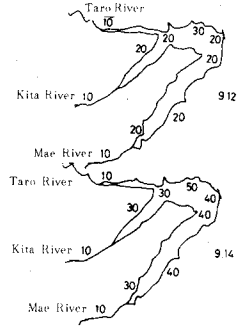


Fig. 14 Horizontal Distribution of Threshold Odour Value (TO)

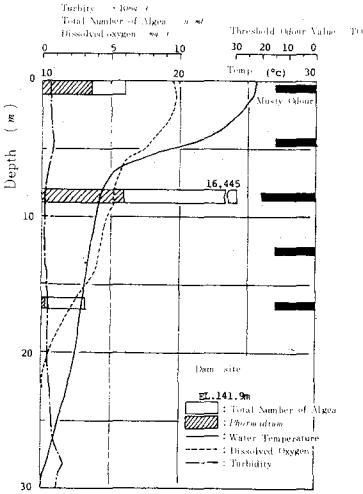


Fig. 15 Vertical Distribution of Water Quality and Threshold Odour Value (1981, 8, 10)

合層が増大はしないとされる。しかし、吹送流にともなう鉛直循環流が水温躍層や湖盆形状等の影響を受け、湖の各地点で異なる状況を示すことから、これら流動状況の異なる水塊の合流する地点等における鉛直方向の混合は無視できないと推察される。

Fig. 15に出水が少なく水温躍層が発達した場合、Fig. 16に出水が多く（一時中層放流）水温躍層が弱い場合の臭気濃度（TO）の鉛直分布を示す。いずれも水温16 m付近までカビ臭が認められる。

変水層以浅の湖水は前述のように吹送流にともない鉛直方向にも比較的混合され易いと考えられる。変水層以深における臭気濃度は主に*Phormidium*の沈降過程の分解による着臭と推察される。ここで釜房湖の透明度は約2 mであり、補償深度は4～5 m程度である。したがって、昭和56年の8 m層での生物数の増加は、変水層の粘性係数の減少による沈降速度の低下により集積されたものと考えられる。昭和57年では8月上旬、中旬に中層付近からの放流があり、8 m層の臭気濃度は低下している。

また、本調査により、変水層以深にも吹送流にともなう流動が認められるが、湖端での流動特性が明確でないので、湖端における変水層上下層の混合については今後の研究に期待したい。

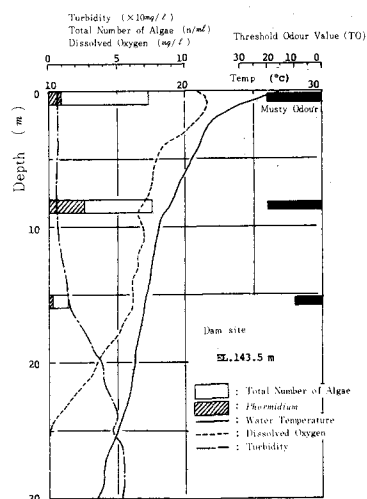


Fig.16 Vertical Distribution of Water Quality and Threshold Odour Value (1982. 8. 25)

5. おわりに

釜房湖におけるカビ臭発生機構を調査検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) カビ臭原因生物は当初放線菌と考えられたが、昭和55年の気象異変を契機に藍藻類*Phormidium*に変化した。
- 2) *Phormidium*の産生物質として定性的に2-methylisobornolを確認したが、GC-MSによる詳細な分析からgeosminが検出されることがあり、検討を要する。
- 3) カビ臭の発生しやすい水質状態のもとでの数量化理論の結果、カビ臭の発生や臭気の上昇には気温、日射量の増加等の気象要因がかなり影響していると考えられる。
- 4) 釜房湖、昭和55年以降の夏期のカビ臭発生は主に水温が*Phormidium*の適温に近づくためであり、冬の臭気上昇は月平均変動量に比しての日射量の増加と*Phormidium*と栄養塩との接触時間に影響する滞留日数の増加の結果と推論できる。

また、有効積算温度の適用により、カビ臭発生日を予測できる可能性がある。

- 5) 釜房湖では湖水表層の流動速度は風力係数0.01～0.04として推定できる。また、湖水流動の湖周辺の地形、湖盆状態、風向風速により水平および鉛直循環流がよく発達し、カビ臭の発生が湖のごく一部で発生しても、半日ないし1日程度で湖全体に拡散する。

現在、生合成に関係する溶存微量有機物質その他の観点から継続調査中であるが、今後とも詳細に検討していきたい。

最後に、貴重な資料の提示をいただいた仙台市水道局、建設省釜房ダム管理所、御教示いただいた茨城県企業局杉浦則夫氏、元東北大学助手狩野仁一郎氏に感謝する。

参考文献・引用文献

- 1) 日本水道協会：異臭味水対策の指針、1979。
- 2) 八木正一：淡水生物一特に藍藻類に起因する臭気、衛生化学、第29巻、第1号、PP.17～24、1983。

- 3) 須藤隆一他編：富栄養化対策総合資料集，サイエンスフォーラム，PP.43～78，PP.173～183，1983.
- 4) 仙台市水道局，建設工学研究振興会：釜房湖異臭水報告書，昭和54～58年.
- 5) 東京都水道局：藍藻類培養条件の検討，PP.1～12，1977.
- 6) 中村寿子：異臭味関連藍藻類の増殖に関する実験（Ⅰ），第33回全国水道研究発表会講演集，PP.367～369，1982.
- 7) 松本淳彦，土屋悦輝：藍藻 *Oscillatoria Splendida* によるカビ臭物質 geosmin の産生，日本水処理生物誌，Vol.14. No.2 PP.12～16，1978.
- 8) 岡山治一他：琵琶湖に発生した異臭味水原因藍藻類に関する研究，第34回全国水道研究発表会講演集，PP.495～497，1983.
- 9) Doig, M. T and D. F. Martin: The Effect of Naturally Occurring Organic Substances on the Growth of Red Tide Organism, Water Research, Vol.1. 8, PP.601～606，1974.
- 10) 菊池 徹：琵琶湖および印旛沼の水の臭気問題，JAPAN ANALYST. Vol.22, PP.1530～1538，1973
- 11) Tabachek, J. A and M. Yurkowski: Isolation and Identification Blue-green Algae Producing Muddy Odor Meta Metabolites, Geosmin and 2-methylisoborneol, in Saline Lake in Manitoba, J. Fish. Res. Board Can., Vol.33 (1), PP.25～35，1976.
- 12) 土屋悦輝，首藤紘一他：藍藻 *Oscillatoria sp.* および河川水中の臭気物質 2-Methylisoborneol, Geosmin, p-Cresol, Indole および 3-Methylindole の確認，衛生化学，Vol.25，1979.
- 13) 磯井廣一郎：植物成分の生合成，廣川書店，PP.65～104，1980.
- 14) 有賀祐勝：水界植物群落の物質生産Ⅱ，共立出版，生態学講座，PP.39～63，1973.
- 15) 仙台管区气象台：宮城県気象月報.
- 16) 合田健，村岡浩爾，福島武彦：浅い湖における吹送流と拡散に関する実験的研究，第22回水理講演会論文集，1978.
- 17) 江頭進治：密度成層場の流れと混合機構に関する基礎的研究，1980.
- 18) 吉村信吉：湖沼学，生産技術センター新社，1976.
- 19) 日本水質汚濁研究編：湖沼環境調査指針，1982.