

間欠式空気揚水筒周辺の水質・底質調査（平成6～12年度）

佐藤信也・吉田昇・珍田尚俊・片野登*・加藤潤**・渡辺寿***

要 旨

八郎潟干拓地西部承水路の間欠式空気揚水筒設置水域で平成6年度～平成12年度に行った水質・底質調査の結果を解析したところ、設置地点では明らかな攪拌効果が認められ、水平距離約100 m以内の水域で攪拌による水質の平均化が認められた。水循環の原動力である気泡による酸素供給量を酸素拡散モデルにより試算すると、気泡による溶存酸素濃度の増加は小さいことが確認された。

1. はじめに

秋田県は、八郎湖で最も汚濁が進行している西部承水路の浄化を計り、八郎湖の水質浄化対策の基礎資料を得るため、間欠式空気揚水筒（商品名レクリフター。以下「揚水筒」という。）を平成6年度及び平成8年度に各1基設置した。当所は、1号機設置前の平成6年6月からこの水域で水質調査を月1回、底質調査を年1～2回行ってきた。今回の報告は、平成6年度から平成12年度の調査に関するものである。

2. 揚水筒の仕様

揚水筒は、図1のように湖底に設置されており、陸上に設置されたコンプレッサーから送られる空気を下部の空気室に貯留した後に一気に放出し、空気が整流管を通じて浮上する際に上方への水の流れることができることを利用して、水を循環させようとするものである。基本的な仕様は2基とも等しく、表1のとおりである。

表1 揚水筒の仕様

揚水筒No.1	
設置時期	平成6年11月
揚水能力	17,160 m ³ /日
空気室容量	100 ㍓
空気圧縮機	7.5KW 840㍓/分 9.5Kgf/cm ²
材 質	FRP, 耐衝撃塩ビ
揚水筒No.2	
設置時期	平成8年10月
その他の仕様	No.1に同じ

3. 調査方法

3.1 対象水域の概要

揚水筒が設置されている西部承水路は、八郎潟干拓により西側に残った水面であり、図2の位置にある。水路の北端及び南端はポンプ場で他の水面と仕切られている。西部承水路から中央干拓地への取水量は平成12年の実績で、農業用水のかんがい期には約130万m³/日、非かんがい期には約30万m³/日であり、一定水位を保つために北端の浜口機場から東部承水路の水が供給され、南端の南部排水機場から調整池の水が供給される。南部排水機場では取水口の近くに中央干拓地の幹線排水路の排水口があるため、

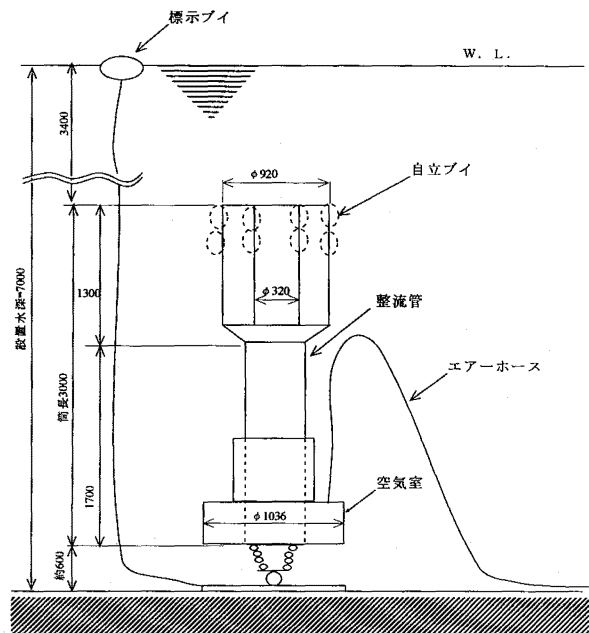


図1 揚水筒外形図

* 現秋田県立大学

** 現秋田県北部流域下水道事務所

*** 現秋田県水産振興センター

調整池より有機物、栄養塩類の濃度の高い水が混入して西部承水路に供給されることがある。揚水筒は、図3に示すように、西部承水路の北端寄りにある五明光橋の南北2ヶ所に設置されている。図4にその概念図を示す。設置地点付近は水路の幅が約450mと広く平均的な水深は約5mで、設置位置は水深約7mの最深部である。水路は橋の部分では幅が約30mに

狭まっており、水深も2m程度と浅い。各年度の調査地点は表2のとおりである。なお、St.6はバックグラウンドとして継続的に利用した地点で、水深約6mである。また、St. 4は平成6年（1994年）及び平成7年（1995年）はNo. 1揚水筒中心から東に約70mの位置にあったが、その後、図の位置に移設された。

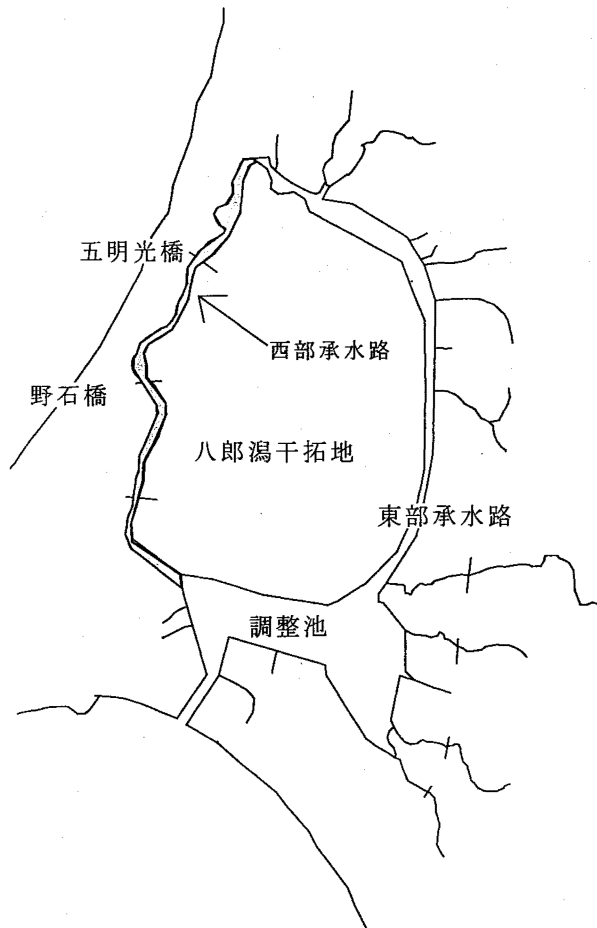


図2 西部承水路位置図

表2 各年度の水質調査地点

調査地点	年度(平成)						
	6	7	8	9	10	11	12
St1	◎	◎	○	○			
St2	◎	◎	◎	◎			
St3	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
St4	◎	◎	◎	◎			
St5	◎	○					
St6		◎	◎	◎	◎	◎	◎
St7			○	○			
St8			◎	◎	◎	◎	◎
St9			◎	◎	○		
凡例	◎ 水質・底質調査 ○ 水質調査のみ						

3.2 揚水筒の稼働状況

揚水筒は12月～3月の冬季間は稼働を休止させ、4

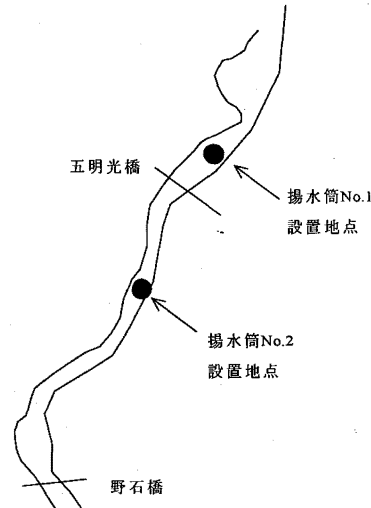


図3 揚水筒設置地点

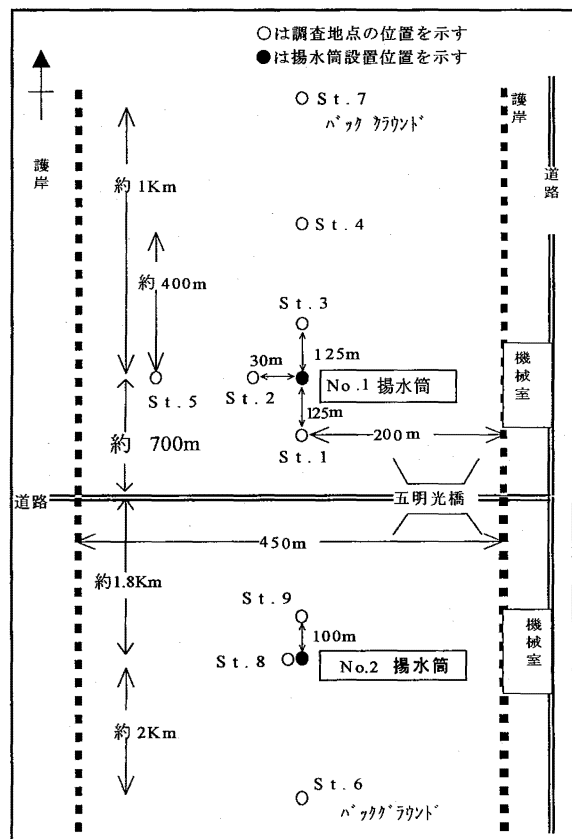


図4 調査地点概念図

月～11月に稼働させ、稼働期間中に調査を行った。ただし、平成6年については、6月～12月に調査を行

った。その年最初の調査時には、揚水筒が休止した状態でサンプリングなど調査を行い、調査後に揚水筒を始動させ、その年最後の調査後に揚水筒を停止させた。

データ解析時には、平成6年については、揚水筒No.1設置前後で区分し、その後は、毎年4月のデータを揚水筒稼動前のデータ、5月以降のデータを稼動後のデータとして処理している。

3.3 調査項目

調査は船上から行い、調査水深は、当初は1m間隔であったが、平成8年以降は0 m, 3 m, 5 mの3層とした。底質調査は、平成8年までは年2回その後は年1回であり、水質調査と併せて行った。

調査項目は、表3のとおりである。測定方法は、公共用水域の測定方法に従った。

表3 調査項目

水質調査項目
気温、水温、導電率、透明度、透視度、色相、pH、DO、BOD、COD、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、T-N、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、T-P、クロロフィルa、TOC、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 (溶解性)、 SO_4^{2-} 、T-Fe、T-Mn
底質調査項目
(含有量試験) COD、T-N、T-P、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、T-Fe、T-Mn
(溶出試験) COD、Cl、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 SO_4^{2-} 、T-Fe、T-Mn

4. 水質調査結果

4.1 経年変化

長期間継続したデータが得られている調査地点St.3、St.6、St.8の水深0m、3m、5mにおける主な項目の年間平均濃度を図7、図8に示す。St.6は、バックグラウンドであり、St.3、St.8はそれぞれ揚水筒No.1、No.2に近いポイントである。

水温は、平成9年('97年)と平成11年('99年)は夏季の気温の影響で高い。平成6年('94年)が低いのは、この年の調査期間が6~12月で、平成7年('95年)以降の調査期間4~11月に比べて気温の低い12月を含むためである。表層と下層の水温差は小さく、経年的な変化はない。

DOについては、平成9年と平成11年の特にSt.3の上層と下層の差が拡大する傾向があるが、これは平均水温が高いために思われる。

COD、T-N、T-P、クロロフィルa、TOCについては、平成6年から平成10年('98年)までは微増か横ばいであるが、平成11年から平成12年(2000年)に増加する傾向がある。これは、バックグラウンドとして設定した調査地点St.6において最も顕著であり、その次にSt.8の増加傾向が大きく、St.3は上昇幅が最も小さい。このSt.6>St.8>St.3の関係は、南から北への順序であり、南部排水機場からの用水供給との関連が示唆される。また、St.6はバックグラウンドであることから、このような変化は、西部承水路全体の水質特性と考えられる。

また、西部承水路から中央干拓地への取水量を図5に示す⁷⁾。実際には水路兩岸の干拓地から農業用水が取水されるが、中央干拓地側の取水量が圧倒的に多いので、これが西部承水路における流量の目安となる。中央干拓地への取水量は、平成6年以降、徐々に増加し平成12年には平成6年比12%の増加となっている。この増加曲線とCOD等の濃度の変化の傾向が類似することは、西部承水路に供給される水の質との関連を示唆するものである。西部承水路への水の供給は、水位により管理されており、水位が一定となるように南北両端のポンプ場から取水に見合った量の水が供給される。

気温については、平成6年と平成11年は、図6に示すように夏季に気温の高い日が多く⁶⁾、特に平成11年は調整池においてもアオコが高濃度に発生した年であった。

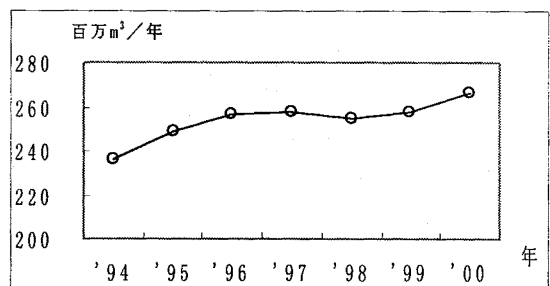


図5 西部承水路から中央干拓地への取水量

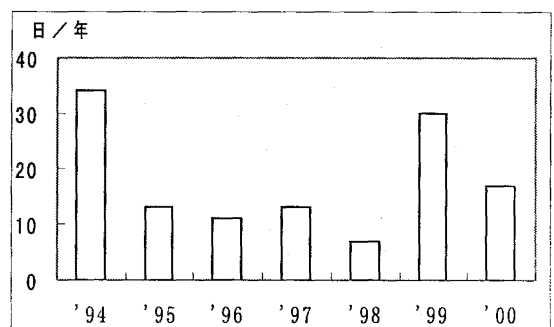


図6 平均気温25℃以上の日数(大潟観測所)

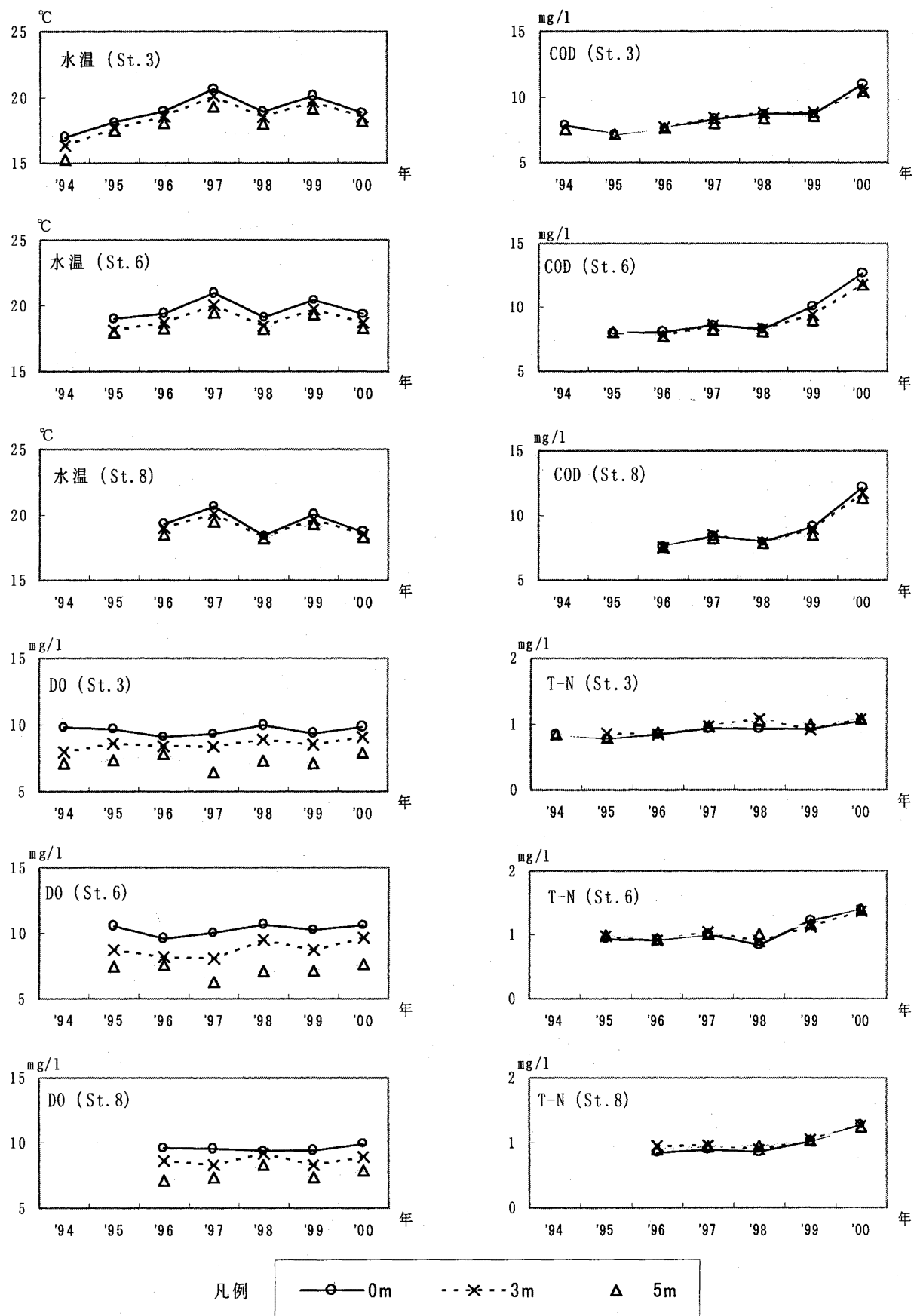


図7 St.3,6,8における各層の水温, DO, COD, T-Nの経年変化

各年の数値は, 調査期間(通常4月~11月)の測定値の平均値である。

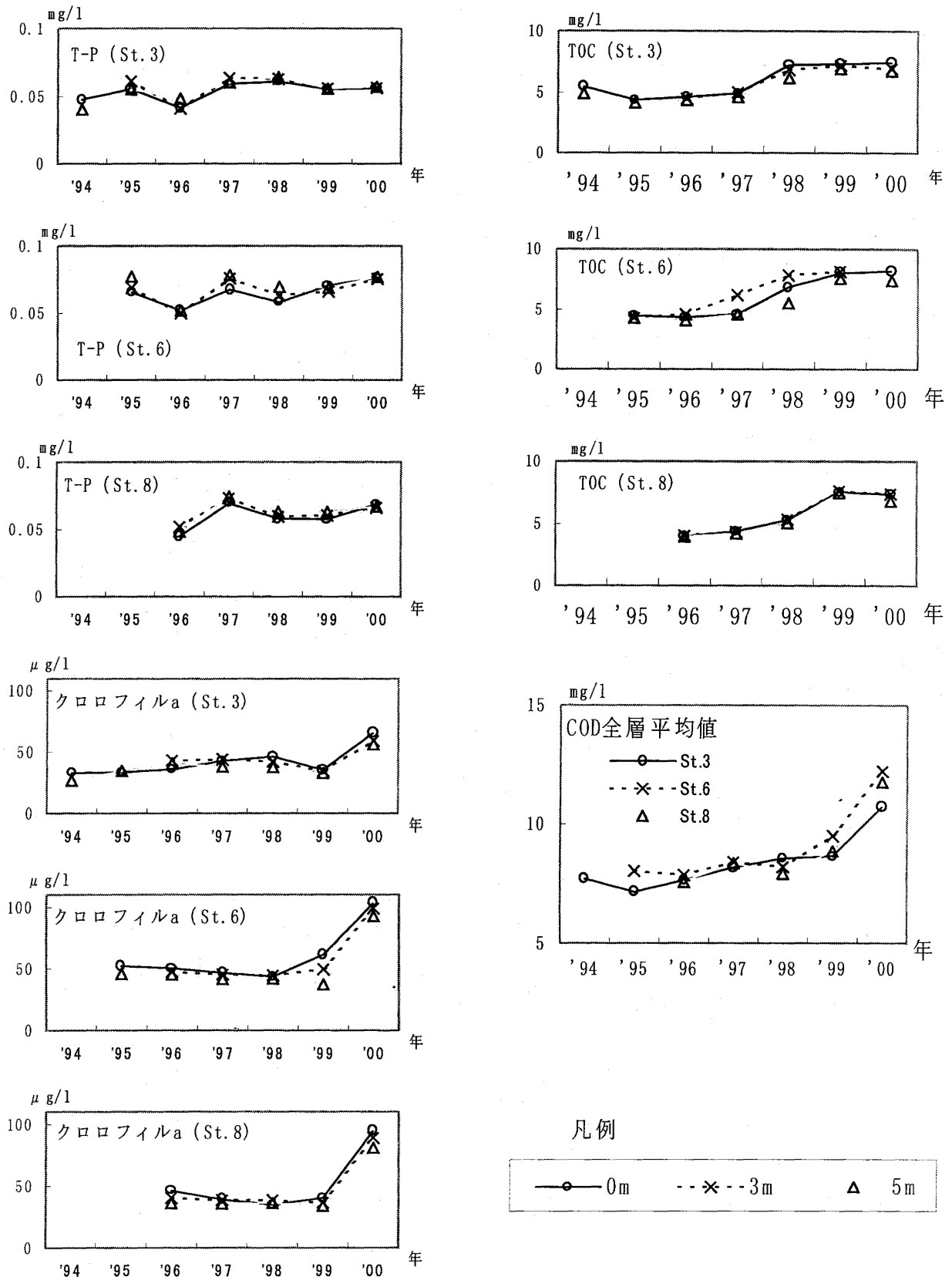


図8 St.3,6,8における各層のT-P, クロロフィルa, TOC, COD全層平均値の経年変化

各年の数値は、調査期間（通常4月～11月）の測定値の平均値である。

COD全層平均値は、水深0mと5mの平均値。St.8のみ水深0m, 3m及び5mの平均値。

4.2 経月変化

表層、水深3m及び水深5mの各層毎の水質の月ごとのデータは図9、図10のとおりである。地点によ

る水温の差は小さい。DOは夏季に低下するが、水深5m層の低下は表層や水深3m層と比べて大きい。

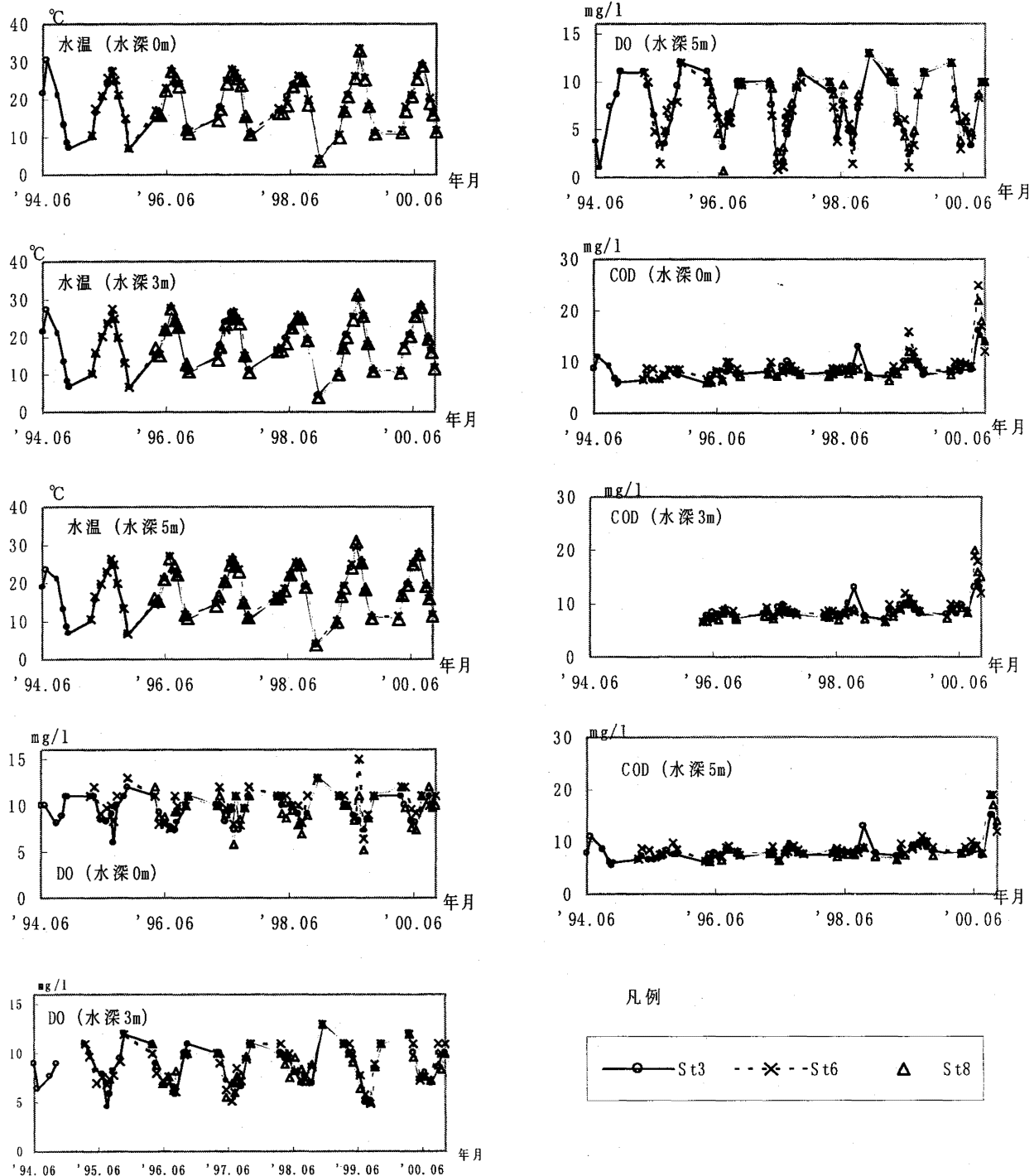


図9 水深0m, 3m, 5mにおける各地点の水温, DO, CODの経月変化

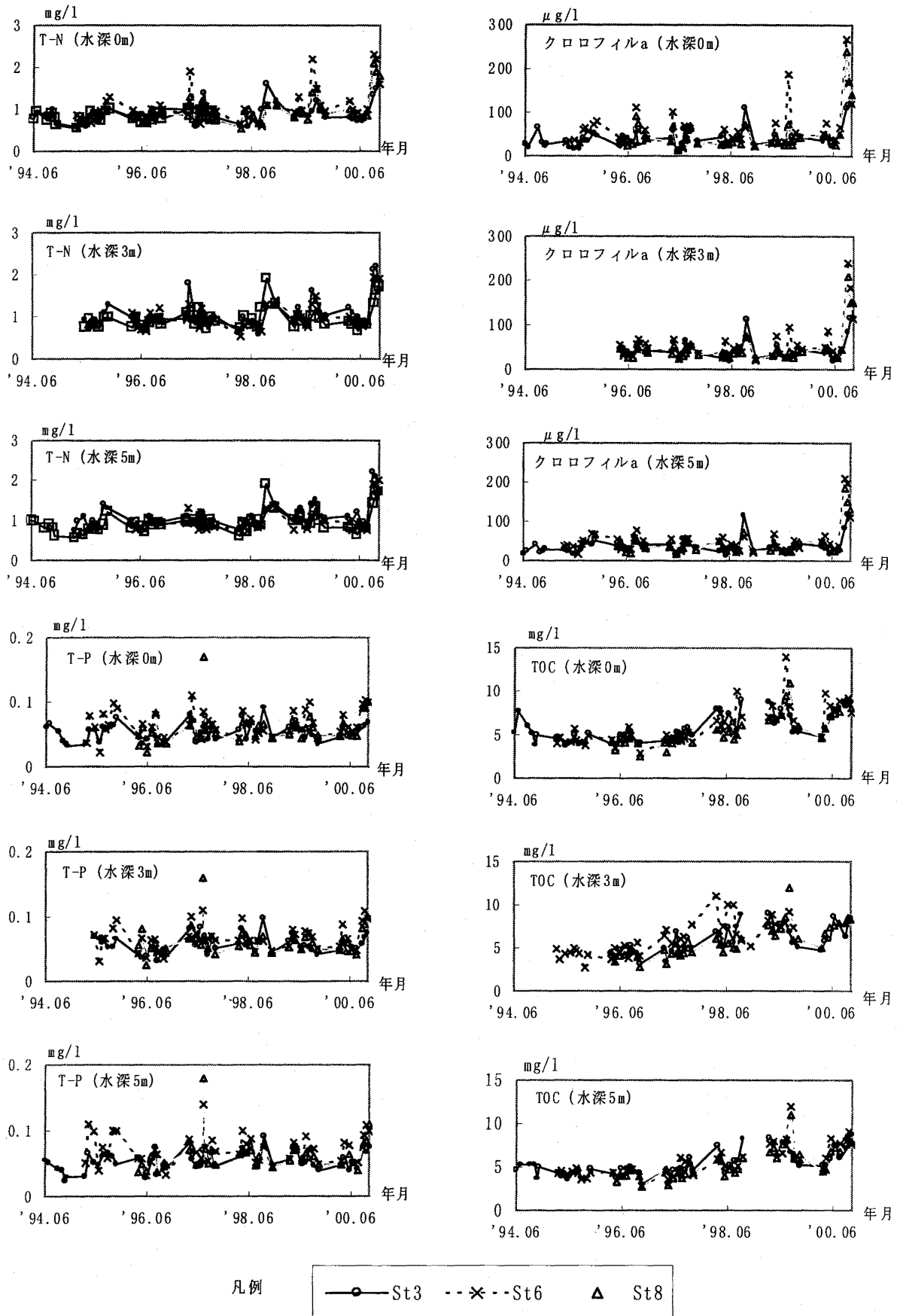


図10 水深0m, 3m, 5mにおける各地点のT-N, T-P, クロロフィルa, TOCの経月変化

4.3 項目間の相関

各項目のすべてのデータについて相関係数を求めると表4のとおりである。無機の塩類と導電率との関係、珪藻類の消長と関係する SiO_2 とBOD, COD, クロロフィルaの関係が見られる。

表4 項目間の相関

相関係数	相関のある項目の組み合わせ
+0.9 $\leq$	気温－水温
+0.8 $\leq$	導電率－ Na^+ , 導電率－ Cl^- , Na^+ － Cl^-
+0.7 $\leq$	COD－(クロロフィルa, SiO_2), クロロフィルa－ SiO_2 , 導電率－(Mg^{2+} , SO_4^{2-}), (pH , Mg^{2+})－BOD, Na^+ －(Ca^{2+} , SO_4^{2-}), Ca^{2+} － SO_4^{2-}
-0.7 $\geq$	BOD－ SiO_2

注) A－(B,C)とは、B,CともにAとの相関があることを示す。

4.4 揚水筒の効果の解析

揚水筒の効果を評価するに当たって、①揚水筒設置前後あるいは稼働前後の水質等の変化、②水平方向及び鉛直方向の水質等の変化、の2点に着目した。解析の対象としては、調査項目、調査地点（平面配置）、水深、時間の4要素となる。そこで、「地点間有意差の検定」として調査項目及び水深を固定して、調査地点と時間で2元配置したデータについて「繰り返しのない二元配置（測定時期、地点）の分散分析（有意水準0.05）」を行う。また、「層間有意差の検定」として調査項目及び地点を固定して、水深と時間で2元配置したデータについて同様の解析を行う。ただし、水質は時間変動するものなので、時間変動について検定の結果が有意と判定されるのは自然と考える。また、湧水、揚水、排水その他、現在は把握していない要因により水質が時間的・空間的に変動する可能性もあるので、揚水筒稼働前の状況をチェックする必要がある。

そこで、まず、揚水筒稼働前（休止期間中を含む。）のデータについて、地点間有意差の検定及び層間有意差の検定を行って特性を把握する。さらに、揚水筒の稼働中のデータについて同様に検定を行い、稼働前後の違いを評価する、という方法で解析することとした。なお、毎年4月の調査については、揚

水筒が休止の状態で調査を行ったものなので、稼働前のデータとして処理している。

4.5 稼働前の地点間、層間有意差

揚水筒稼働前の状態把握のために行った地点間有意差の検定結果は、表5のとおりである。揚水筒No.1の関係地点では地点によってTOCに有意差が見られる。St.4はSt.1,2,3より北寄りにあり、浜口機場から比較的濃度の低い東部承水路の水が供給される影響を反映していると考えられる。

揚水筒No.2の関係では、St.6がSt.8と比べてCOD, T-N, クロロフィルaが高い。St.6はバックグラウンドなので、付近の流入水や湧水の影響による濃度変化も考えられるが、最南端の地点なので南部排水機場からの供給水の影響も考えられる。

稼働前の層間有意差の検定結果は表6のとおりである。表層と下層の水温差が夏季に拡大する傾向があるが、これと併せて全層的に水温が上昇し、微生物活動が活発になり、酸素消費が増加するために下層のDOが低下する。各地点の層間有意差については、その地点の特性として、揚水筒稼働後も同様であろうと推測することにする。

4.6 地点間有意差の相違

揚水筒稼働中の地点間有意差の検定を行い、稼働前の検定結果と比較して違いのある部分を取り出すと表7のようになる。揚水筒に最も近いSt.2及びSt.8の表層で水温が低くなる傾向が認められる。また、揚水筒No.1直近のSt.2の表層ではDOが他の地点より低く、揚水筒No.2直近のSt.8の下層では他地点よりDOが高い。また、St.8の表層ではCOD, TOCが他地点より高く、逆に下層ではT-N, T-P, TOCが低くなる傾向が認められる。

4.7 層間有意差の相違

揚水筒稼働中の層間有意差の検定を行い、稼働前の検定結果と異なる部分を抽出すると、表8のようになる。揚水筒No.2から100m離れたSt.9において、揚水筒が稼働すると上下層の水温差が小さくなる傾向が認められる。その他の項目、その他の地点についても稼働前後の検定結果に変化が認められるが、稼働前は分散が大きかったため有意差が認められなかったが、稼働中は平均化により分散が小さくなり、有意差があると判断される場合が多いと考えられる。

表5 揚水筒稼動前の地点間有意差

項目	水深(m)	地点	揚水筒	有意差の内容
COD	0.3m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で2.5高い。
T-N	0m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で0.1高い。
クロロフィルa	5m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で7高い。
TOC	0m	St.1,2,3,4	No.1	St.1>2,3>4で差は最大2.4
	0m	St.6,7,8,9	No.2	St.6,7<8,9で差は0.3~0.5
	5m	St.1,2,3	No.1	St.1>2>3で最大差は1.0

表6 揚水筒稼動前の層間有意差の検定結果

項目	地点	水深	揚水筒	有意差の内容
水温	St.1,6,8,	0~5m	No.1,2	夏季に表層と下層の温度差が大きくなることがある。 (平成6年, 11年)
DO	St.1,6,8	0~5m	No.1,2	表層と下層の差がある。平均2, 夏季に8程度。
COD	St.1	0.2,5m	No.1	表層>下層。層差平均0.3
T-N	St.2	0.2,5m	No.1	表層<下層。層差平均0.7
T-P	St.6	0.3,5m	No.2	表層<下層。層差平均0.008
クロロフィルa	St.3	0.2,5m	No.1	表層>下層。層差平均0.7
TOC	St.1	0.2,5m	No.1	表層>下層。層差平均1.5
	St.8	0.3,5m	No.2	中層>他層。層差平均0.5

表7 揚水筒稼動前後の地点間有意差の相違

項目	水深	地点	揚水筒	相違内容
水温	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼動後にSt.1,3,4に対してSt.2が平均値で0.3℃低い。
	0m	St.6,8,9	No.2	稼動後にSt.8がSt.6,9に対して平均値で0.4~0.5℃低い。
DO	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼動後にSt.1,3,4に対してSt.2は平均値で0.8~0.9低い。
	5m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.7高い。
COD	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼動後にSt.3,4に対してSt.1,2が平均値で0.4~0.5高い。
	0.3m	St.6,8	No.2	稼動前にSt.8に対してSt.6が高い(表層で平均値2.5, 中層で同0.3)が, 稼動後には有意差なしとなる。
T-N	5m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.1低い。
T-P	5m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.006低い。
クロロフィルa	3m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6に対してSt.8は平均値で10低い。
TOC	0m	St.6,7,8,9	No.2	稼動前St.6,7<8,9差0.3~0.5 稼動後は有意差なし。
	3m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6>St.8差1.6(稼動前は同差0.8で有意差なし)
	5m	St.6,8	No.2	稼動後にSt.6>St.8差0.3(稼動前は同差0.2で有意差なし)

表8 揚水筒稼動前後の層間有意差の相違

項目	地点	水深(m)	揚水筒	相違内容
水温	St.3	0,1,2,3,4,5	No.1	稼動後の上層のデータの分散が稼動前より小さくなり、その結果、上層下層の平均値の差は0.6℃と小さいが、有意差があると判定される。
	St.4	0,2	No.1	同上
	St.9	0,3	No.2	稼動前に層間有意差（平均値で0.7℃）があるが、稼動後には差が認められない。
DO	St.3	0,3,5	No.1	稼動後に上層下層の差が2.6で有意。稼動前は3.2だが分散が大きいため有意でない。
	St.9	0,3	No.2	稼動後に上層下層の差が0.9で有意。稼動前も差は同じだが、分散が大きいため有意とならない。
COD	St.1	0,2,5	No.1	稼動前、中層下層の差が0.8で有意だが、稼動後は有意差なし。
	St.3,4	0,2,5	No.1	稼動後に中層下層の差が0.2~0.3で有意。稼動前は差が0.4~0.5だが分散が大きいため有意でない。
	St.6,8	0,3,5	No.2	稼動後に上層が下層より高く差が0.5~0.7となる。
T-N	St.2	0,2,5	No.1	稼動前に上下層の差が0.08で有意だが、稼動後は差が0.04で有意でなくなる。
	St.4	0,2,5	No.1	稼動後に上下層差が0.09で有意となる。稼動前は0.02で有意差なし。
	St.9	0,3	No.2	稼動後に上下層差が0.2となり有意。稼動前は0.06で有意差なし。
T-P	St.6	0,3,5	No.2	稼動前に上層下層の差が0.006で有意だが、稼動後は0.005となり有意でない。
	St.8	0,3,5	No.2	稼動後に層差0.004で有意だが、稼動前は層差0.005で有意差なし。
	St.9	0,3,5	No.2	稼動後に層差0.011で有意だが、稼動前はほとんど層差がなかった。
クロロフィルa	St.1	0,2,5	No.1	層差8で有意だが、稼動前は12で有意差なし。分散が小さくなったことによる。
	St.4	0,2,5	No.1	層差6で有意だが、稼動前は層差3で有意差なし。分散は稼動後に大きくなっている。
	St.6,8	0,3,5	No.2	層差が7~11で有意だが、稼動前は層差3~5で有意差なし。
TOC	St.6	0,3,5	No.2	表層より下層が0.6低い。稼動前は層差0.4で有意差なし。

5. 底質調査結果

5.1 経年変化

ほぼ全期間継続したデータが得られているSt.3, 6, 8におけるCOD, T-N, T-Pについては増加傾向が認められるが、d-CODについては逆に減少傾向が認められ、有機性沈殿物の増加が示唆される。また、St.1,4,6のように濃度が時期的に大きく変化する場合があります。これらの地点においては湧水などの影響で底質が乱されているか、又は、堆積層厚が薄いことも考えられる。（図11, 図12）

5.2 揚水筒稼動前後の底質の有意差検定

底質は季節変動が大きくないものと仮定して、各地点で揚水筒の稼動前後で平均値の差があるかどうかを検定した。しかし、多くの地点で稼動前のデータ不足のため検定が不能であり、検定が可能なSt.6については、COD, T-N, T-P, d-CODについて稼動前後の有意差はなかった。（等分散を仮定した2標本によるt検定。有意水準0.05 両側確率。）

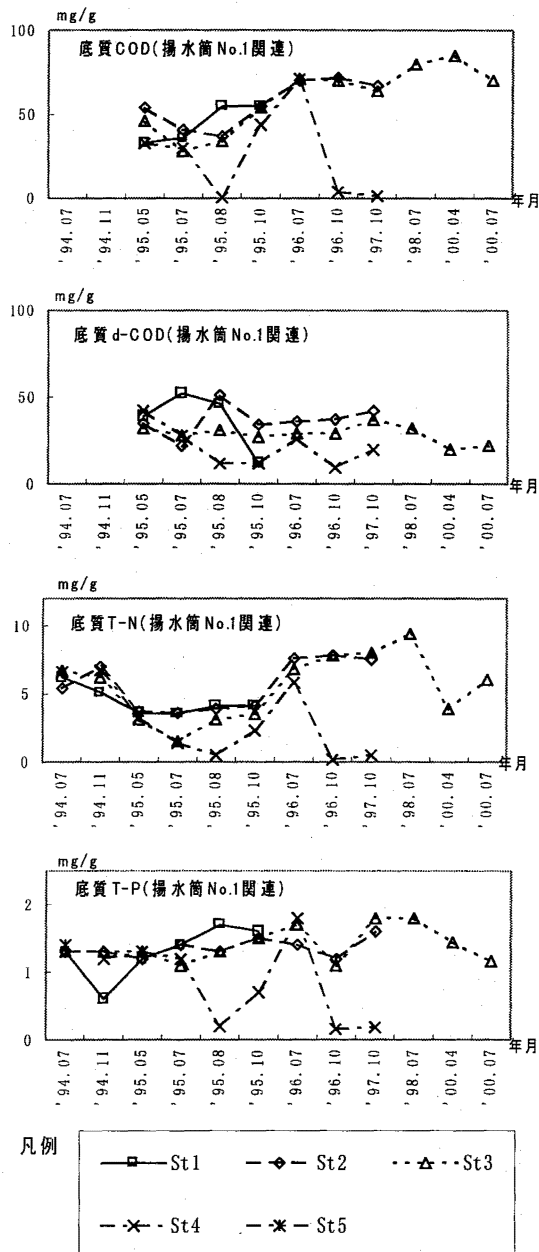


図11 底質の経年変化(揚水筒No.1関連地点)

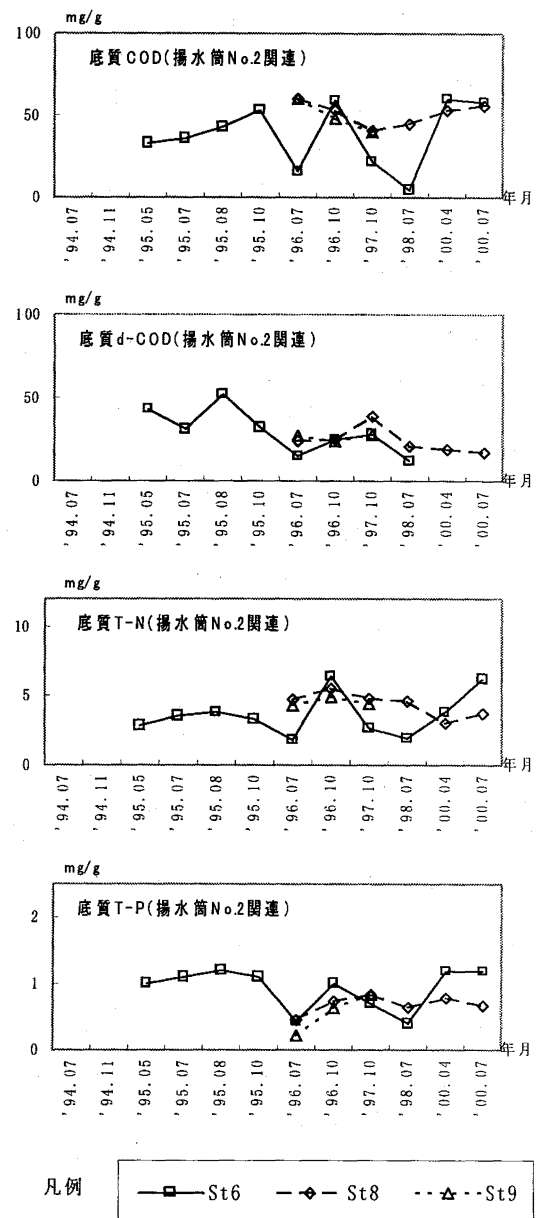


図12 底質の時間変化(揚水筒No.2関連地点)

5.3 地点間有意差の検定

稼動前のデータ不足のため、稼動後の地点間有意差のみ検定した結果を表9に示す。(繰り返しのない2元配置の分散分析, 有意水準0.05)

St.4のみが多く項目で特異的に低い。St.4は'95年及び'96年はNo.1揚水筒の東約70mにあり、'97年以降に北寄りに移設されたので、この影響も考慮しなければならないが、移設後も非常に低い値を示す

ことがあることから、堆積物が少ないか、湧水などにより堆積厚が不均一になっている、などが考えられる。また、移設後の現地点の堆積物が少ない理由として、最も北寄りのバックグラウンドSt.7の次に水路北端に近いので、水質と同様に、水路北側から比較的濃度の低い水が供給されるという西部承水路の特性を反映しているものと考えられる。

表9 揚水筒稼働後の底質の地点間検定結果で有意差のあったもの

項目	揚水筒	地点	有意差の内容
COD(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成7年～9年ではSt.2,3の平均値56に対してSt.4は同26
d-COD(溶出)	No.1	St.2,3,4	平成7年～9年ではSt.2,3の30,36に対してSt.4は21
T-N(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成6年～9年ではSt.2,3の5.0に対してSt.4は2.5
T-P(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成6年～9年ではSt.2,3の1.3に対してSt.4は0.8

6. 考察

6.1 揚水筒のかくはん効果

地点間有意差の検定結果から、揚水筒設置地点近傍では、夏季に下層の低水温・低DOの水が表層まで揚水され、周囲から水が流れ込む攪拌効果が認められる。

層間有意差の検定結果によれば、揚水筒設置位置から水平距離で約100m以内の地点でも上下層の温度差が小さくなる、平均値の変化を伴わないが分散(バラツキ)が小さくなる、などの変化があり、これも攪拌による平均化の効果と考えられる。

以上のことを踏まえると、揚水筒の攪拌効果を図13のようにイメージすることができる。気泡の浮上により、下層の低DOの水が上昇し、表層に達して表層で四方に拡散しながら、大気から酸素供給を受ける。一方、揚水筒の底部では、上昇した水が移動した後に周囲の水が流れ込むが、大部分の水平に移動してくる下層の水と、中層の水の沈み込みも若干あるものと考えられる。よって、表層では揚水筒直近で下層から巻き上げられてくる低DOの水の影響でDOが低下し、揚水筒から離れるに従ってDOは次第に回復する。一方、揚水筒直近の下層では中層の比較的DOの高い水も巻き込まれて、DOは若干上昇する場合もあるものと考えられる。表層に巻き上げられた水に含まれる成分は、揚水筒の中心から周囲に拡散していくが、深さ方向にも拡散するので、距離の2乗を超える割合で減衰するものと考えられる。

6.2 揚水筒のばっ気効果

揚水筒は気泡の上昇に伴う水の攪拌効果を目的とするもので、気泡サイズが非常に大きく、溶存酸素の増加を目的とするものではない。表層のDOが通年ほぼ飽和していること、気泡が揚水筒から放出されて自由に浮上を始める水深が約3.4mと浅いため、表層から中層までの間で溶存酸素の増加は観測されなかった。下層でDOが増加した地点があり、これは攪拌効果によるものと考えられるが、揚水筒

が気泡の浮上を利用していることから、幾分か酸素供給もあるのではないかと考えるのは自然である。そこで、確認のため、これを試算すると次のようになる。

初期の溶存酸素濃度によって溶解する酸素量が決まってくるので、深さ方向の溶存酸素分布を把握する必要がある。揚水筒未稼働時の水質特性として溶存酸素濃度の水深依存性があり、夏季に著しい。これは、水温上昇に伴って微生物活動が活発化し酸素消費速度が増加するためであり、理論的には、微生物による酸素消費速度は温度の変化により指数関数的に変化することが分かっている。(付録A。また、水深とDOの関係については付録Bを参照のこと。)これで、揚水筒稼働前の深さ方向の溶存酸素濃度を推定できる。

別に、気泡の形と浮上速度を求め、先に設定した溶存酸素分布の環境の中で気泡から水へ酸素が移動する量を試算すると、気泡による酸素供給量は非常に小さいことを確認できる。(付録C参照のこと。)

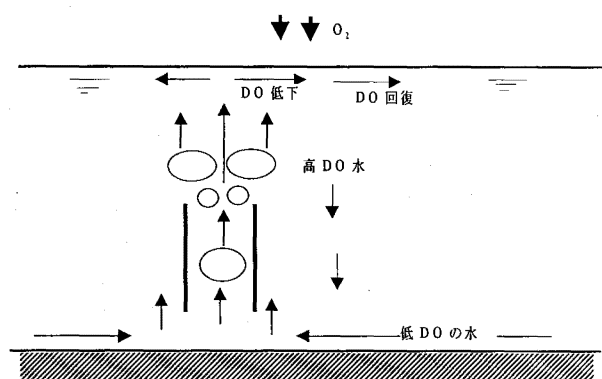


図13 揚水筒のイメージ

揚水筒により上下層が攪拌される。

参考文献

- 1) 秋田県環境政策課：平成13年度レイクリフター（間欠式空気揚水筒）による水質浄化対策事業実施要領。
- 2) 杉本昭典：水質汚濁，現象と防止対策，p325-343，技報堂，1974。
- 3) エッケンフェルダール Jr., W.W. オコンナー, D.J.（岩井重久訳）：廃水の生物学的処理，p77-89，コロナ社，1965。
- 4) 機械設計便覧，p957-958，丸善，1992。
- 5) 萩原耕一，新版BOD試験法解説，績文堂，1957。
- 6) 気象月報，1994.1～2000.3，気象庁。
- 7) 取水量調査簿（平成6年～平成8年）及び水利使用報告（平成9年～平成12年），秋田県八郎潟基幹施設管理事務所。

付録A. BOD速度定数の温度依存性

萩原⁵⁾によれば，

k_1 : T_1 °KにおけるBOD速度定数

k_2 : T_2 °KにおけるBOD速度定数

とすれば，

$$k_1 = k_2 \theta^{T_1 - T_2}$$

である。ここに， $\theta = 1.47$ である。

例えば， $T_1 - T_2 = 10$ のとき

$$1.47^{10} \approx 47$$

である。つまり，10°C上昇すれば反応速度は約47倍となる。

付録B. 水深とDOの関係

川のような流れのある場合の酸素拡散理論では，深さ方向の酸素分布は一様として取り扱うのが一般的である。しかし，揚水筒の効果を試算するには必要なのは深さ方向の濃度分布である。そこで，水面から深さ方向に酸素が拡散する場合を想定して拡散方程式を立て，これを近似的に解くことにする。

まず，酸素の拡散の一般論に従って「酸素移動速度は飽和濃度と実際の酸素濃度との差の勾配に比例する」と仮定すると，

$$J = -K_1 \frac{\partial}{\partial x} \{u_s(x, t) - u(x, t)\} \quad (1)$$

である。

ここに，

J : 酸素移動速度、 $u_s(x, t)$: (x, t) における飽和濃度、 $u(x, t)$: 溶存酸素濃度、 K_1 : 拡散係数。

である。

いま，深さ方向の拡散のみ考え，かつ，微生物による酸素消費を考慮すると，

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - K_1 \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} - K_2 L(x, t) u \quad (2)$$

が成り立つ。ここに， $L(x, t)$ は深さ x ，時刻 t におけるBOD濃度である。

ここで，系は定常状態であり，BOD濃度は一様であり，水深による温度変化もないと仮定すれば，

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad L(x, t) = L_0, \quad \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

なので，方程式は

$$K_1 \frac{d^2 u}{dx^2} - K_2 L_0 u = 0, \quad (4)$$

となる。これを u について解くと，次の解を得る。

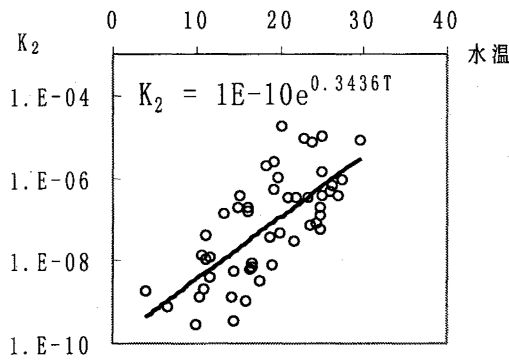
$$u(x) = u_0 \exp \left(- \sqrt{\frac{K_2 L_0}{K_1}} x \right) \quad (5)$$

ここに， $u_0 = u(0)$ ， $K_1 = D_L = 7.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{day}$ である。拡散係数 $K_1 = D_L$ （分子拡散係数）としたのは，深さ方向の拡散は，乱流の影響が少ないとみなしたものである。

脱酸素係数 K_2 は，温度に依存するが，実際の観測データから決めることにする。 K_2 は上式から次により求めることができる。

$$K_2 = \frac{K_1}{L_0} \left(\frac{1}{x} \lambda n \frac{u_0}{u} \right)^2 \quad (6)$$

バックグラウンドとして設定した St.6 の実測値を基にして K_2 を推定するが，水面では溶存酸素がほとんど飽和しており，水深 3m でも溶存酸素が飽和していることが多く乱流拡散の影響があると思われるので，水深 5m の平成 6 年～平成 12 年のデータを用いることにする。水温と K_2 の計算値の関係の回帰式を指数関数で求めると，図 B-1 のようになる。

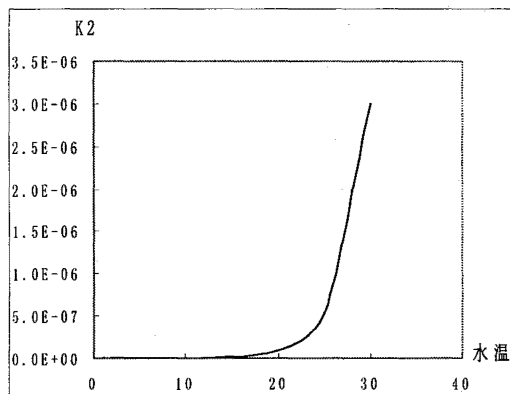
図B-1 St.6水深5mにおける水温とK₂の関係

St.6水深5mの平成6年～平成12年の水温、DO、BOD(CODから推定。)から(6)式により求めたK₂をプロットしたもの。縦軸は対数目盛である。

このグラフから、最小二乗法で一次式を求めると、水深5mで、

$$K_2 = 10^{-10} e^{0.3436T}, T: \text{水温} (^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

が得られる。式(7)のグラフは図B-2のようになり、水温が高くなると、微生物活動が急激に活発になり酸素消費速度が高まる様子を再現している。

図B-2 $K_2 = 10^{-10} e^{0.3436T}$ のグラフ

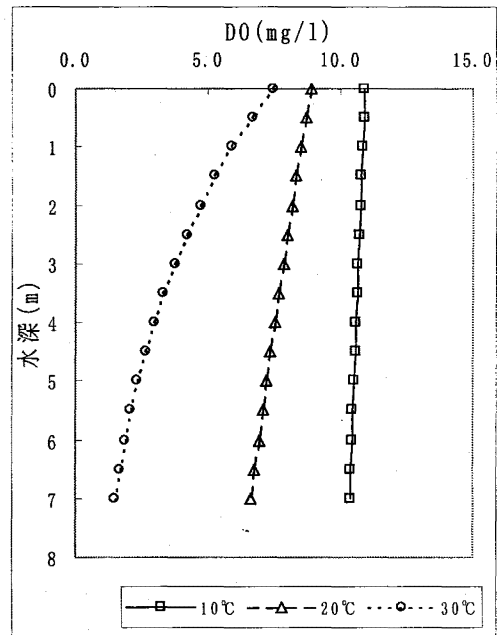
この脱酸素係数を用いて解 $u(x)$ を描くと、図B-3のように、水温が高くなるにつれて下層のDOが低くなる様子を再現できる。この後の計算では、この係数を用いることにする。 $K_2 = 3.1 \times 10^{-9}$ (10°C), 9.6×10^{-8} (20°C), 5.4×10^{-7} (25°C), 3.0×10^{-6} (30°C)。

付録C. 揚水筒のばっき効果試算

C.1 液体中を上昇する気泡の速度

C.1.1 液体中を上昇する気泡に関する理論

液体中を上昇する気泡の形と速度について、表C-1³⁾及び表C-2⁴⁾の知見がある。

図B-3 溶存酸素濃度の推計値 $u(x)$ のグラフ

計算条件: $L_0 = 3.2$ (BOD), $K_1 = 1.8 \times 10^{-4}$, $K_2 = 10^{-10} e^{0.3436T}$

C.1.2 揚水筒への応用

・気泡の大きさ

後の計算で分かるように気泡の相当直径は、揚水筒の整流管の部分で約0.58m、整流管の上部で4つに分割されてから水面までは約0.4mであり、上昇速度は約1.5m/secである。レイノルズ数を求めると次のようになる。

・レイノルズ数Re

密度 $\rho_1 = 1$, 粘度 $\mu_1 = 1 \times 10^{-6} \text{ kgfs/m}^2$, $d_b = 0.5\text{m}$, 気泡の上昇速度 $w_b = 1.5\text{m/sec}$ より、

$$\text{Re} = \rho_1 w_b d_b / \mu_1 = 7.5 \times 10^5 > 4000$$

よって表C-1、表C-2から、揚水筒で作られた気泡は、キノコ笠状の形で上昇するものと考えられる。その上昇速度は、表C-1から算出できる。

まず、空気室の水深6.4mで生成される気泡は空気室容量100%であり、整流管内を浮上する。整流管の上部(水深4.7m)までの相当半径は、水深 x (m)に応じて水圧の変化を考慮すると、次のように表わせる。

$$r_b(x) = 0.34(1 + x/10)^{-1/3} \quad (8)$$

この区間の平均半径は0.29m、平均浮上速度は1.65m/secである。

また、整流管上部で気泡は4つに分割されてそれぞれ浮上することになるので、水深4.7mから水面ま

での相当半径は、次式で表わすことができる。

$$r_b(x) = 0.21(1 + x/10)^{-1/3} \quad (9)$$

この区間の平均半径は0.20m, 平均速度は1.36m/secである。

C.2 揚水筒による酸素供給量の試算

C.2.1 気泡ばっ気による酸素供給量

気泡ばっ気に関する酸素移動の理論では、

m : 酸素移動量, K_L : 液膜係数, A : 接触面積,

C_s : 溶存酸素飽和濃度, C : 溶存酸素濃度,

t : 時間

として、酸素移動速度を次式により表す。

$$dm/dt = K_L A (C_s - C) \quad (10)$$

また、溶存酸素飽和濃度については次式の関係が分かっている。

$$C_s = 475/(33.5 + T), \quad T: \text{水温} (^\circ\text{C}) \quad (11)$$

気泡と接触する前の初期状態の溶存酸素濃度の分布は、式(5)により表されるものとし、表層における溶存酸素濃度は飽和しているものとして、(5)式で $u \rightarrow C$, $u_0 \rightarrow C_s$ と書き換え、式(11)とともに式(10)に代入すると、

$$dm/dt = K_L A * 475/(33.5 + T) [1 - \exp\{-(L_0 K_2 / K_1)^{1/2} x\}] \quad (12)$$

ここに、

$$K_1: \text{拡散係数} = D_L = 7.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h} \\ = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{day},$$

$$K_2: \text{脱酸素係数} = 10^{-10} \exp(0.3436T), \quad L_0: \text{BOD}$$

である。

また、 K_L については、エッケンフェルダーら³⁾の調査データ(同文献p86図3.3)を用いて得られる次の関係式を利用する。

$$K_L = 85.446 \text{ Re}^{0.56541} D_L / (d_b x^{1/3}) \quad (13)$$

表C-1 液体中を上昇する気泡の形状と速度

気泡の大きさ	形状	速 度
直径 $d_b=1\sim 1.5\text{mm}$ 又は $\text{Re}_b < 400$	ほぼ球形	$w_b = (1/18)(d_b^2 \rho_1 g / \mu_1)(1 - \rho_g / \rho_1)$
$d_b=8\sim 10\text{mm}$ 又は $400 \leq \text{Re}_b \leq 5000$	偏平な回転 楕円体形	$2 \leq \text{Re}_b \leq 4.02 G^{-0.214}$ のとき、ジグザグ又は螺旋状に上昇。 $w_b = 0.33 g^{0.76} (\rho_1 / \mu_1)^{0.52} r_b^{1.28}$ $4.02 G^{-0.214} \leq \text{Re}_b \leq 3.10 G^{-0.25}$ のとき、螺旋状に上昇。 $w_b = 1.35 (\sigma / \rho_1 r_b)^{0.50}$
$d_b > 8\sim 10\text{mm}$	キノコ笠形	鉛直に上昇する。 $w_b = 0.97(r_b g)^{0.50}$

D_L , $d_b=2r_b$, Re は与えられているから、

$$K_L = C_K (1 + x/10)^{1/3} x^{-1/3} \quad (14)$$

$$C_K = 5.51 \times 10^{-4} \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m})$$

$$C_K = 8.92 \times 10^{-4} \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

さらに、気泡を球形と見立てて気泡と水との接触面積 A を水深 x の関数で表すと、

$$A = C_A (1 + x/10)^{-2/3} \quad (15)$$

$$C_A = 1.45 \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m})$$

$$C_A = 2.22 \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

後のために、気泡の上昇速度の表式から dx/dt を求めておく。

$$w_b = -dx/dt = C_w (1 + x/10)^{-1/6}$$

$$C_w = 1.78 \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m}) \quad (16)$$

$$C_w = 1.40 \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

J : 酸素移動速度、 $u_i(x, t)$: (x, t) における飽和濃度、 $u(x, t)$: 溶存酸素濃度、 K_1 : 拡散係数。

さて、水深 d_1 から d_2 まで気泡が上昇する間に気泡が水に供給する酸素量は式(17)で与えられ、これを数値計算すると、表C-3のように1回の気泡の上昇によって供給される酸素量が得られる。

$$M_{d_1}^{d_2}(T) = \int_{d_1}^{d_2} \frac{dm}{dt} dt = \int_{d_1}^{d_2} \frac{dm}{dt} \frac{dt}{dx} dx = \\ - \int_{d_1}^{d_2} K_L A C_s \left\{ 1 - \exp(-\sqrt{K_2 L_0 / K_1} x) \right\} / w_b dx = \\ \frac{0.129}{33.5 + T} \int_{d_1}^{d_2} x^{-1/3} \left\{ 1 - \exp(-\sqrt{K_2 L_0 / K_1} x) \right\} \left(1 + \frac{x}{10} \right)^{-1/6} dx. \quad (17)$$

ここに,

ρ_l : 液体の密度, μ_l : 液体の粘度, σ : 表面張力, d_b : 気泡の直径 (相当直径), ρ_g : 気泡の密度

Re_b : 気泡の周りのレイノルズ数 $Re_b = \rho_l w_b d_b / \mu_l$,

$G = We^3 / (Re_b^4 Fr^2)$

$We = \rho_l w_b^2 d_b / \sigma$: ウエーバー数, $Fr = w_b / (g d_b)^{1/2}$: フルード数

表C-2 気泡の形と動き

Re	形状	動き
≤ 300	球状	剛性球体のように動く。上昇の軌跡は直線状又は螺旋状。
300~4000	楕円形	揺動しながら直線的に上昇する。
>4000	球形の帽子状	

表C-3 1回の気泡上昇による酸素供給量試算結果

(単位: g O₂/回)

水深区間(m)	水温20℃	水温30℃
6.4~0	0.00444	0.0157
6.4~6	0.000181	0.000513
6~5	0.000427	0.00127
5~4	0.000643	0.00204
4~3	0.00106	0.00366
3~2	0.000872	0.00327
2~1	0.000640	0.00261
1~0	0.000304	0.00135

C.2.2 揚水筒による酸素供給量

機械仕様 (コンプレッサー能力840ℓ/分, 空気室容量100ℓ) より, ほぼ7秒間隔で気泡が放出されることになる。1日に12,343回となる。気泡が6.4m上昇するものと仮定して, 表C-3から1日の酸素供給量を求めると, 表C-4のとおりである。

表C-4 揚水筒による1日当り酸素供給量試算結果

水温(℃)	1回の酸素供給量(mg/回)	1日の酸素供給量(g/日)
20	4.44	54.8
30	15.7	194

C.2.3 溶存酸素濃度への影響

揚水筒の揚水能力は17,160m³/日なので, 1日に深さ7m, 半径28mの円筒形の領域の水を1回循環させる能力があることになる。揚水筒から供給される全酸素量が消費されずに, 設定した領域内に均一に分散されると仮定すれば, 揚水筒による溶存酸素濃度の増加分は, 表C-5のように推測される。

表C-5 揚水筒による酸素濃度増加分の試算結果

(単位: mg O₂/ℓ)

水温(℃)	円筒形の影響領域の半径(m)					
	28	20	10	5	3	1
20	0.0032	0.0062	0.025	0.10	0.28	2.5
30	0.011	0.022	0.088	0.35	0.98	8.8