

鞭毛藻プランクトンの鉛直移動と亜表層部の 貧酸素化機構について

宗景志浩*・中川倫寿**・福田 稔***

1. はじめに

1993年は全国的に異常気象が続き、陸域ではこれに伴う災害が頻発した。高知県でも降水量が平年値を大きく上回り、日射量は大きく下回った。浦の内湾では、例年6月から9月にかけて底層部に強い貧酸素水塊が発達するが、1993年度は8月以降底層部には生じなかった。しかし、8月と9月中旬および11月上旬に、水面直下1~6mの亜表層部で3 ppmを割る貧酸素水塊が形成された。亜表層部は養魚の遊泳層となっているため、酸欠によって摂餌や運動能力が低下し、斃死することもある。事実、8月と9月の発達期には小規模(数万尾)ながら被害が生じ、過去にも1988年9月初旬に養殖ハマチの(1/2, 30万尾に及ぶ)大量斃死があった(高知県水産局, 1989)。そこで、本研究では、8月と9月中旬に発達した亜表層部の貧酸素化を例に、そのメカニズムを調べた。

2. 方 法

(1) CTDによる定期観測とプランクトン観察

CTDによる定期観測を8月から10月にかけて図-1に示す観測点(目ノ糞)で行った。CTD観測では、水温・塩分・溶存酸素(DO)・クロロフィル-aおよび濁度の鉛直プロファイルを自動計測した。また、定期的に採水してプランクトンの分類と計数を行った。

(2) 一昼夜観測

8月25日および9月24日には、湾中央部の観測点で1~2時間おきに一昼夜にわたってCTD観測を実施した。9月の場合には、さらにプランクトンの分類と計測を2~3時間おきに行った。

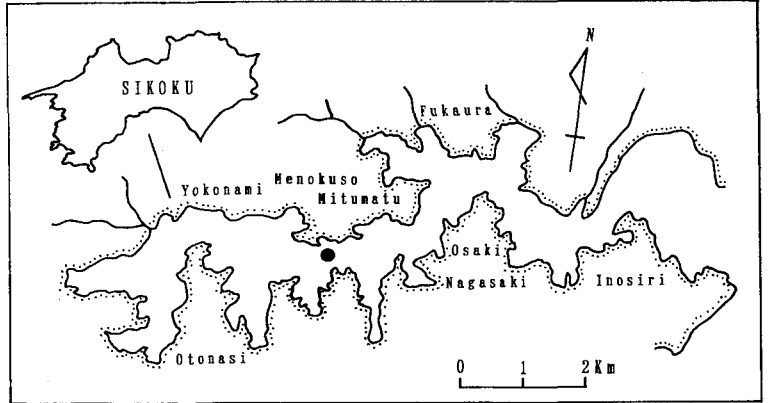


図-1 浦の内湾の地形と観測点

(3) DO消費速度の測定

CTD観測と並行して海水のDO消費を測定した。クロロフィル-a濃度の異なる水深から採水し、気泡が混入せぬように3本のポリ瓶(500 ml)に移した後、溶存酸素計(セントラル科学社 UC-12)を用いてDO濃度を測定した。測定後静かにセンサーを引き上げ、同じ海水を溢れるまで追加して栓をした。これらのポリ瓶をコンテナに入れ黒ビニールで覆い海面に垂下した。その後、4~6時間後に再びDO濃度を測定して、濃度の変化からDO消費速度を求めた。

3. 観測結果

(1) 塩分の季節変化とプランクトンの出現状況

図-2には湾中央部観測点における塩分の季節変化の上にプランクトンの出現状況を重ねて示した。

表層部の塩分は降雨直後の8月初旬および9月10日頃に低下するが、それに10日程度遅れ(8月10日頃および9月17日頃に)、底層部に30~32‰の高塩分水が差し込んでいる。

プランクトンは表層部が低塩分化した直後に増殖し、赤潮が形成された。プランクトン種の分類と計数の結果、表層付近では、8月にはラフィド藻類(*Chattonella* 属)が、9月には渦鞭毛藻類(*prorocentrum* 属)やラフィド

* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科
** 水産庁南海海区水産研究所
*** 高知大学 農学部栽培漁業学科

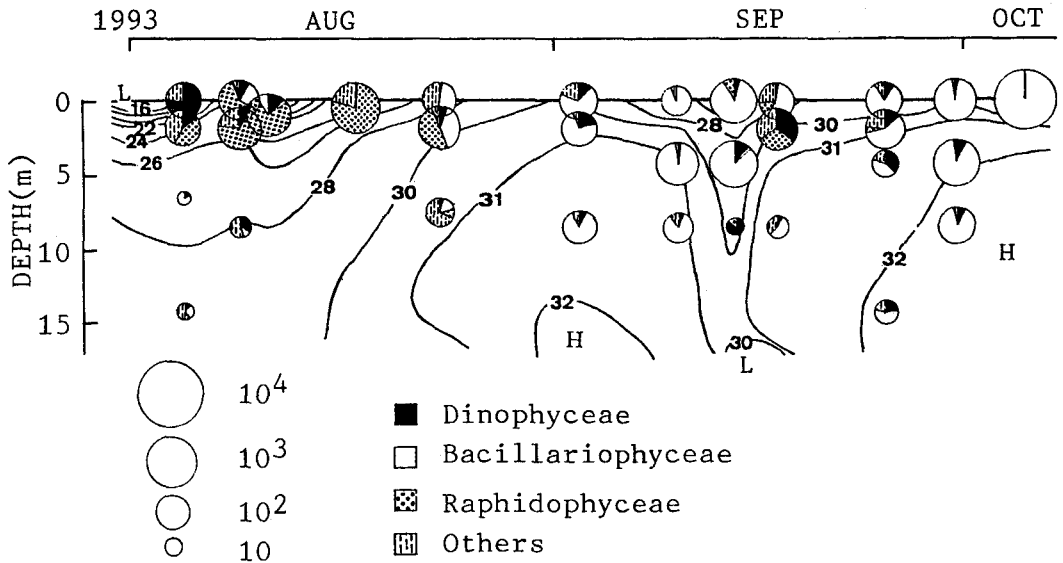


図-2 湾中央部における塩分変化とプランクトン出現状況 (cells/ml)

藻類 (*Fibrocapsa Japonica*) が分布し、ピーク時の細胞密度はそれぞれ 4000, 1000 cells/ml 程度であった。

(2) 鞭毛藻プランクトンの鉛直移動

図-3(A), (B)には8月24日と9月24日に行った一昼夜観測から、それぞれクロロフィル-a 濃度の鉛直分布の経時変化を示した。(A)は濁度からクロロフィル-a 濃度に換算したもので、(B)はクロロフィルメーター(SEA TECH 社, Fluorometer)による結果である。(B)は瞬間点源による測光であるため夜間は真の値よりかなり低めの値を示すが、ピークの位置(矢印)を知ることはできる。

クロロフィル-a 濃度は日中は表層直下1m付近で最大値をとり、8月25日には100 $\mu\text{g/l}$ 以上、9月24日には60 $\mu\text{g/l}$ 程度であった。クロロフィル-a 濃度のピークは日没とともに降下し、8月25日の場合は午前4時頃に水深13m付近に、9月24日の場合は午前0時頃に水深10m付近にみられた。クロロフィル-a 濃度は珪藻類や鞭毛藻類の細胞密度に比例するため、クロロフィル-a 濃度のピークの降下はプランクトンが夜間に降下したことを意味している。クロロフィル-a 濃度のピーク層のプランクトン種の分類と計数の結果からも、鞭毛を持つプランクトンが明らかに降下していることが確認された。降下水深や時間帯はプランクトンの種類によっても異なるようである(米田ら, 1957; Eppleyら, 1968)。また、夜間にはピークが表層直下にもみられる。これは500~1000 cell/mlの *Chaetoceros* 属を主体とする(鉛直降下の少ない)珪藻類プランクトンが分布していたためと思われる。

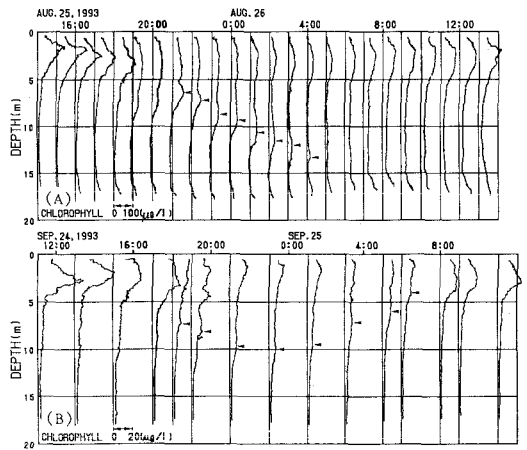


図-3 クロロフィル-a 濃度の鉛直分布

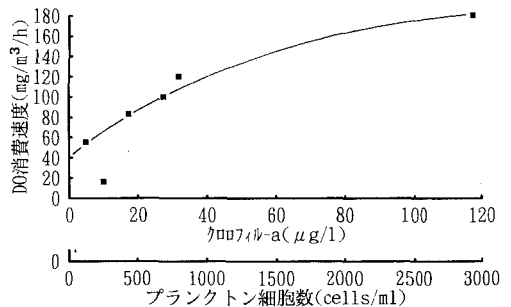


図-4 DO消費速度とプランクトン密度

(3) プラクトン密度と DO 消費速度

図-4には8月および9月の観測期に求めたDO消費速度とクロロフィル-a濃度(およびクロロフィル-a濃度から換算したプラクトン細胞数)との関係を示した。

実験データは少ないが、クロロフィル-a濃度はプラクトン細胞数に比例して増大し、DO消費速度はクロロフィル-a濃度およびプラクトン細胞数の増加に伴って増大した。DO消費速度はプラクトン種によっても異なると思われるが、ここでは、8、9月の実験値をすべてひっくるめて扱った。こうして求めた消費速度にはプラクトンによる消費以外に化学的な消費も含まれるため、細胞数が0となっても20~40 mg/m³/hのDO消費がある。

(4) 亜表層部の貧酸素水塊

図-5(B)は湾中央観測点におけるDO、同図(A)は高知市の日照時間の、それぞれ季節変化を示した。

底層部の貧酸素化は8月10日頃まで僅かに形成されていたが、その後湾外水の差込みがほぼ大潮毎に発生したため、底層部のDO濃度は4~5 ppmで推移した。しかし、水面下1~6 mの亜表層部では、8月17日・9月22

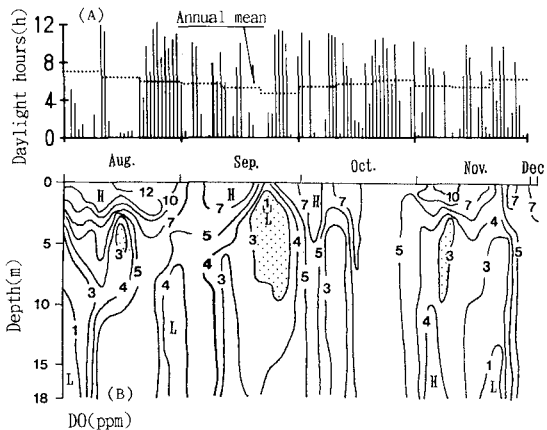


図-5 日照時間とDOの季節変化

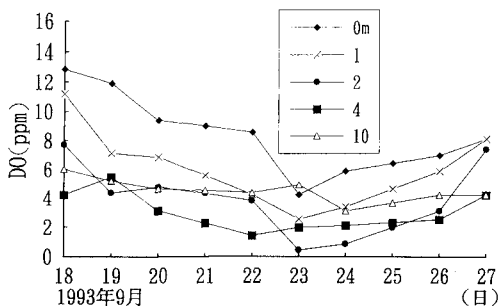


図-6 DO濃度の日変化

日および11月10日頃に3 ppm以下の強い貧酸素水塊が形成された(図中ドット部分)。これらの貧酸素化は、いずれの場合も天候が悪化し日照時間が極度に低下した数日後に形成された。また、貧酸素化の前には鞭毛藻プラクトンが1000 cells/ml以上に増殖し、かつ湾外水の差込みが生じた時期とも一致していた。1988年9月初旬に亜表層部が貧酸素化した場合も、貧酸素化の数日前から鞭毛藻赤潮が広範囲に発生し、かつ大規模な差込みが発達していた(宗景ら, 1990 a)。亜表層部は養魚の遊泳層であるため、この層の貧酸素化は摂餌や運動能力を低下させるばかりか、しばしば斃死を引き起こす。

図-6には9月18日から27日にかけての各層のDO濃度の日変化を示した。亜表層部の貧酸素化は9月18日頃から始まり、22~23日頃にもっとも進み、その後天候の回復に伴って消失した。

4. 亜表層部の貧酸素化機構

(1) 亜表層部のDO収支

9月18日から22日にかけて発生した亜表層部(1~6 m)の貧酸素化の機構を、図-7に示すモデルを用いて調べた。

水柱を水面下1 mおよび6 mで3層に分け、各層のDO濃度をO₁~O₃(ppm)とする。鉛直混合によって表層から亜表層部にDOが輸送される。差込みによって底層の海水が亜表層部に輸送され、さらに亜表層部の海水は等量だけ表層に輸送される。

亜表層部のDO生産速度をP(mg/m³/h)、消費速度をC(mg/m³/h)、差込みによる海水輸送量を単位面積当たりQ(m/h)とすると、亜表層部のDO収支は次式となる。

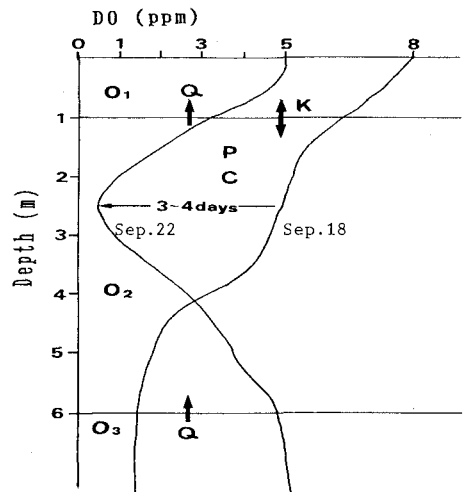


図-7 亜表層のDO収支モデル

$$A \int \frac{dO_2}{dt} dz = A \int \frac{d}{dz} \left(Kz \frac{dO_2}{dz} \right) dz - A \int (C - P) dz + A(O_3 - O_2)Q \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Kz は表層部と亜表層部の境界付近の鉛直拡散係数(cm^2/s), A は単位面積(m^2), t は時間, z は水深である。

(2) 鉛直拡散係数と差込みによる海水輸送量

鉛直拡散係数は塩分の鉛直分布と経時変化から求める。図-8の拡散モデルにおいて各層での塩分を S_n , 下層からの塩分の供給を Q , 各層間の鉛直拡散係数を K_n とすると, 各層での塩分収支は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} H_0 \frac{dS_0}{dt} &= Q - K_0 \frac{S_0 - S_1}{H} \\ H_n \frac{dS_n}{dt} &= K_{n-1} \frac{S_{n-1} - S_n}{H} - K_n \frac{S_n - S_{n+1}}{H} \quad (1 \leq n \leq 6) \\ H_7 \frac{dS_7}{dt} &= K_6 \frac{S_6 - S_7}{H} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 t は時間, H は層厚で一定(1 m)とする。CTD観測による9月9日・16日・24日および29日の塩分の鉛直分布を用いて拡散係数を求め, 結果を図-9に示した。これらは, 中村ら(1990)による結果とは傾向が異なる。降雨量が多く, 風のない夏季の浦の内湾では, 表層部の塩分成分が極端に強い為, 鉛直拡散係数は表層で小さく7 m以深で大きくなる。この推算是移流を考慮していないため, やや大きめと思われるが, 9月18日~27日の貧酸素化の発達期および消滅期のいずれの場合も, 表面直下の鉛直拡散係数として $K_z = 100 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ を用いた。

差込みによる下層からの海水の輸送量は, 発達期には中規模の差込みの輸送量 $2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{h}$ (宗景ら, 1990 b)を表面積 $41 \times 10^5 \text{m}^2$ で割った値(0.05 m/h)とし, DO回復期には差込みが弱まったため, その1/5(=0.01 m/h)

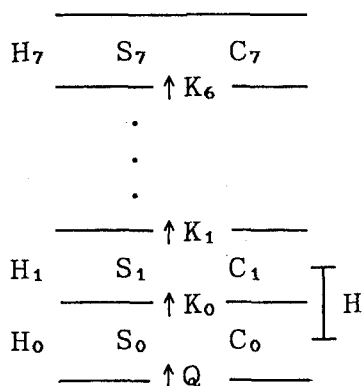


図-8 塩分の鉛直拡散モデル

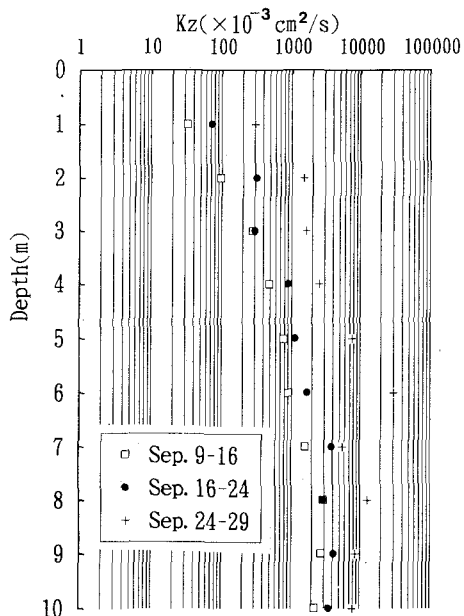


図-9 鉛直拡散係数

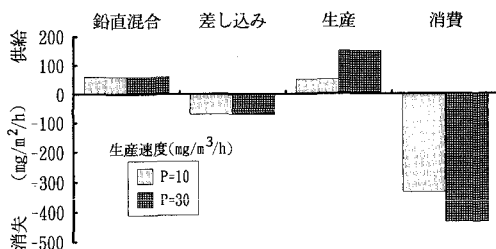


図-10 亜表層部の DO 収支

とした。これらの仮定値を用いて, 生産速度 P を変化させながら DO 消費速度 C を推算した。

(3) 推算結果

貧酸素化が進行した9月18日から22日の間の亜表層部の DO 収支の推算結果を図-10に示した。これによると, 鉛直混合と差込みに伴う DO 輸送量はほぼ打ち消し合い, 亜表層部の DO 濃度の増減には植物プランクトンによる生産 P と海水中での消費 C が支配的であった。そこで, 図-11に P と C の関係を示した。直線 O_b は9月18日から22日にかけて貧酸素化が進行した場合の, 直線 O_c は差込みによる貧酸素水の浮上がなく, かつ9月18日の DO 濃度がそのまま維持されると仮定($dO_2/dt = 0$)した場合の, 直線 O_f は9月22日から27日にかけて DO 濃度が回復した場合の, それぞれの P と C のとり得る関係を示している。

珪藻類や鞭毛藻類では個体当りの呼吸速度は, およそ $(1 \sim 3) \times 10^{-4} \mu\text{l} - \text{O}_2/\text{day}$ であるから(井上, 1974), 仮に

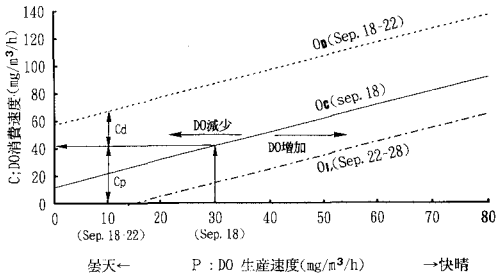


図-11 亜表層部の DO 消費速度と DO 生産速度との関係
 C_p : DO 消費ポテンシャル
 C_d : 鞭毛藻プランクトンの夜間降下に伴う DO 消費

10^6 cells/l の群が分布すれば、その群全体の呼吸速度は $4.2 \sim 12.6$ ml/m³/h ($6 \sim 18$ mg/m³/h) となる。また、適切な光条件のもとで健康に成長している植物プランクトンの呼吸速度は、光合成速度の $5 \sim 10\%$ を越えないとされている(井上, 1974)。これを 10% とし、生産速度が植物プランクトン数にほぼ比例すると仮定すると、晴天下では、亜表層部に分布する珪藻 (5.0×10^5 cells/l) による生産速度 P は 30 mg/m³/h となる。これに対応する浦の内湾の DO 消費速度 C は、図-10 より約 40 mg/m³/h となる。この値は少なくとも 9 月 18 日の DO 濃度を維持するための限界値である。

天候が悪化し日射量の少ない日が続けば、植物プランクトンが多量に存在しても必然的に生産力は低下する。しかし、DO 消費のポテンシャル(図-11 の C_p) はこのまま維持され、 C は 40 mg/m³/h のまま直線 O_c から O_b の側に近づき、 $C \gg P$ となって貧酸素化が始まる。いま、日射量の低下により DO 生産速度 P が 10 mg/m³/h (晴天時の $1/3$) に低下したとすると、9 月 18 日から 22 日にかけての貧酸素化に必要な DO 消費速度 C は 60 mg/m³/h となる。

貧酸素化の始まる前の 9 月 12~16 日頃には表層部のクロロフィル-a 濃度は高く、珪藻以外に *Chattonella* 属や *Prorocentrum* 属などの鞭毛藻プランクトンが多量に存在していた。これらのプランクトンは昼間は表層に集まるが、夜間は中層(亜表層を含む)に降下する。そして、降下した層の DO を消費するので、それらの層の DO 消費量は当然増大することになる。貧酸素化初期の 9 月 18 日頃の表層部(層厚 1 m)には、 10^6 cells/l 程度の鞭毛藻類が分布していた。これによる DO 消費は、図-4 より 120 mg/m³/h で、これが亜表層部(層厚 5 m)に均一に降下すると、 $120 \times 1/5 = 24$ mg/m³/h となり、先に文献(井上, 1974)から概算した消費速度に近い。これらの値は、

貧酸素化に必要な DO 消費速度 60 mg/m³/h の $1/3 \sim 1/4$ 程度を占め、亜表層部の大規模な貧酸素化を起こす DO 消費の増加分にほぼ匹敵する。さらに、これ以外に差込みに伴って巻き上げられた還元物質の酸化、残餌などの有機物や死滅したプランクトンの分解に伴う DO 消費等も亜表層の貧酸素化に関与していると思われる。

一方、天候が回復すると、消費速度 C は $40 \sim 60$ mg/m³/h のままで推移し、DO 生産量 P は増大するので、直線 O_b から直線 O_c へ、さらに O_i の側に近づいて DO 濃度は回復する。

5. おわりに

1993 年度は降水量が平年値を大きく上回り、日照時間(日射量)が大きく下回る異常気象となった。その結果、浦の内湾では湾外水の差込みが頻発し、底層部の貧酸素化は生じなかった。しかし、水面下 $1 \sim 6$ m の亜表層部が三回にわたって大規模に貧酸素化した。

亜表層部の貧酸素化の発達期には、湾外水の差込み・鞭毛藻プランクトンによる赤潮・日照時間の激減などが重なっていた。そこで、鉛直混合・差込み・プランクトンによる生産および消費を考慮して、亜表層部の DO 収支を推算した結果、亜表層部の貧酸素化には、日照時間の低下に伴う DO 生産の減少、鞭毛藻プランクトンの夜間降下に伴う DO 消費の増加が大きく影響していることが分かった。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(一般(C), No. 04650465)の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 井上裕雄(1974): ハマチ養殖場における DO 環境構造, 農水産分野における環境工学, 杉二郎教授還暦記念事業会, pp. 289-336.
- 高知県水産局(1989): 浦の内湾等漁業環境緊急対策調査報告書(浦の内湾), 68 p.
- 中村由行・西田克司・早川典生(1990): 閉鎖性水域における温度成層の形成のモデル化, 海岸工学論文集, 37 巻, pp. 794-798.
- 宗景志浩・木村晴保・村田宏・森山貴光・田島健司(1990 a): 浦の内湾における湾外水の差込み現象と貧酸素水塊の消長について, 日本水産学会誌, 57 巻, 9 号, pp. 1635-1643.
- 宗景志浩・木村晴保(1990 b): 差込み現象が浦の内湾の海洋環境に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 37 巻, pp. 779-783.
- 米田勇一・吉田陽一(1957): 赤潮の生理・生態学研究-I, 赤潮プランクトンの垂直移動について(1), 日本水産学会誌, 19 巻, 7 号, pp. 405-409.
- Eppley, R. W., O. Holm-Hansen and J. D. H. Strickland (1968): Some observation on the Vertical migration of dinofragelates, J. Phycol., Vol. 4, pp. 333-340.