

## Ⅵ 赤潮に関する研究会

共催 日本海洋学会  
水産海洋研究会

主 題 赤潮現象の実態および水産との関連  
日 時 昭和41年4月10日 午前9時30分～午後5時30分  
場 所 東京都中央区勝どき5丁目5 東海区水産研究所会議室  
コンピナー 辻田時美 (東北区水産研究所)

### 話題および話題提供者

赤潮研究の歴史と発生機構諸説	辻田時美 (東北区水産研究所)
最近の赤潮現象の実態と被害	
1965年大村湾の赤潮	入江春彦 (長崎大学水産学部)
1964, '65年徳山湾の赤潮	大塚雄二 (山口県内海水産試験場)
英蕨湾を中心とする最近の赤潮	佐藤忠勇 (的矢湾養蠶研究所)
東京湾の赤潮	菅原兼男 (千葉県内海水産試験場)
厄水について	辻田時美 (東北区水産研究所)
赤潮の発生と海象気象の関係	
赤潮の発生と海象気象	宇田道隆 (東京水産大学)
赤潮発生と微細海況変化	平野敏行 (東海区水産研究所)
赤潮の毒性とその化学的特性	橋本芳郎 (東京大学農学部)
赤潮発生の生物学的機構	
内湾における赤潮発生機構	平野礼次郎 (東京大学農学部)
原生動物の増殖からみた赤潮	安達六郎 (三重県立大水産学部)

### 自由討論

赤潮と水産資源の関連  
赤潮の発生予知と対策

### 1 赤潮研究の歴史と発生機構諸説 (要旨)

辻田時美 (東北区水産研究所)

#### 1) 赤潮の定義

一般に赤潮と言うのはどんな現象なのか、これを定義づけることはむづかしい。しかし、その名の示す通り海色の異常であることには間違いないが、直接肉眼で赤色変化を認知出来なくても、水の色が桃色、醬油色、褐色、白濁など様々に変化している場合、それらの変色水塊

が Plankton など海洋微生物の大量繁殖によるものであれば、これらは赤潮類似現象であり、殊に Animal exclusion あるいは魚や底棲生物などの斃死 Mass mortality が起れば、明らかに赤潮と呼んでよからう。九州方面では水色は赤くならなくても、このような現象が随伴した海水の変化を苦潮とも言う。

いづれにしても、Plankton を主とする海洋微生物群の急速なる Density growth に伴って起る海色変化と、その Plankton の Population growth の結果起る変色水塊自体の非保存成分の異常変化を赤潮現象と言うことが出来る。

従って、赤潮とはこのような現象の一般的呼称であって、赤という色にこだわる必要はない。

## 2) 赤潮の発生機構について

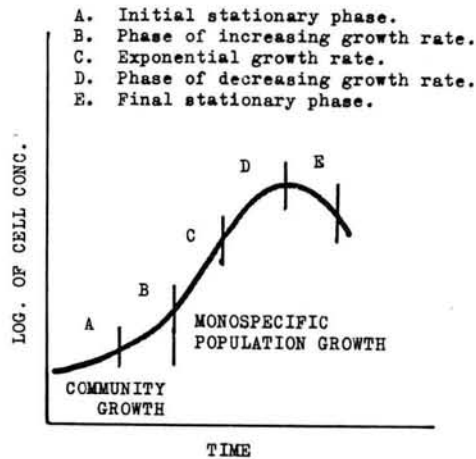
前節で述べた通り、赤潮の現象として特徴的なのは海の色の変化だけではない。水塊中の生物相を構造的にみれば、赤潮は海中の Plankton 相における遷移 Succession の時間的断面ともみることが出来る。即ち、Succession における赤潮の Phase を取出してみると、類型のところで述べるように、赤潮水塊中の Plankton の種の組成が単一種より成る場合 (Monospecific) と、優占種はあるが複合的なものがある。

Monospecific の場合は Protozoa の中でも Dinoflagellates が多く知られており、Diatom では Rhizosolenia の異常繁殖が有明海、九州西海域で白ケ潮などと呼ばれてしばしば発生する。Diatom の複合的な種組成による赤潮は中海の赤潮が著名で、三陸沿岸の厄水もこの類に入る。

これまでに知られた赤潮及びその研究からは、まだ発生の機構は解明されていないが、主要なる要因としては数個に整理統一できる。

そこで、Plankton の集団生態から種組成の変化をみると、才1図に示すような Population の growth curve が知られている。

即ち、Succession の過程において赤潮が出来る時は Community growth から Monospecific population growth に移るのであるが、注目すべきことは、何が原因となって Community growth から Monospecific population growth に移行するのか、ある



才1図 赤潮 Plankton の Population growth curve 模式図。

いは特定の数種だけが大量繁殖して単調な Plankton 相を形成するか、という点であって、これに関しては Organic regulation の思想が近年展開されるようになって、かなり問題の焦点が明らかになってきた。

要するに赤潮の発生機構を究明するには、

- (1) Plankton の急速なる大量繁殖の海況要因（環境物質の作用、水温、光のエネルギーなど）生体生理、生合成などの growth の速度に関連する外界の要因。
- (2) 頻発する Plankton の種を中心に細胞生理、特に分子生物学レベルにおける細胞分裂増殖機構。
- (3) growth promoter, inhibitor などの作用、即ち biological regulation のような生理生態。
- (4) 海中における Plankton の個体密度に作用する物理的条件、即ち Dynamic environment 力学的環境。
- (5) 栄養塩類の補給機構

以上少なくとも5の主要なる条件を解明することが必要である。

このような見解を中心に、赤潮の発生機構を理解するのに関係深い報告と論議の主なるもの（特に最も早く発表されたもの）を年代を追ってたどり、赤潮とその要因究明に関する諸説の発展の跡を述べよう。

### 3) 赤潮の類型

赤潮発生のメカニズムは勿論のこと、現象の記載そのものも断片的な場合が多い現状では、赤潮を分類する根拠は頗る薄弱であるので、これまでに知られている赤潮を系列的に整理分類することは困難である。

しかし、強いてこれまでに知られている赤潮の2, 3の特性によって整理すれば次のような分け方がある。

赤潮の発生水域をもとにした分類

他の生物に対する排除作用や毒作用の程度、有無

赤潮の生物的構造による分類

#### (1) 発生水域による赤潮の型

##### i) 内湾局地性 embayment type

これは内湾でも特に入り込んだ海岸の波打際、防波堤の内側、港湾構造物の附近などに見られるもので、近年この種の赤潮の発生が各方面で報告される傾向が出てきた。

この原因として考えられることは、海岸工事が多くなったこと、工場排水や人口の海岸集中による都市排水の増加などが原因で、海岸附近の海水汚染がひどくなったためであろうと推定される。

即ち、先に述べたような発生機構のなかでその一端が知られているように、溶在有機物

論 点	要 旨	著 者	所 見
刺戟物質の存在を説く。この観点から Plankton の大増殖に沿岸水の作用を論じた。	Phosphate, nitrate など平 行して循環せず、しかも鉛直混合など よって euphotic zone に供給さ れることのない物質、例えば一種の鉄化 合物の作用を想定した。	Gran, H. H., 1931; (大西洋北欧近海) Ketchum, B. H., 1949; (実験)、松平、Y., 1939 (厄水について)	Plankton の大繁殖、殊に vernal blooming の要因を 説明せんがために考えられた斬新か つ有力な説。
栄養塩類の添加、特に海水の鉛直混合とこれに続く日射量の増加。	外洋における Plankton の大増 殖特に vernal blooming を例 として栄養塩の鉛直輸送例えば upwelling, convection など の作用を論じた。( Norway 近海、 カリフォルニア近海)	Seiwell, H. R., 1931, '35; Gran, H. H., 1932; Braarud, T., 1935. Sverdrup, H. U., 1939, '53.	栄養塩類の必要性に重点をおき、 その補給添加機構の考察から、赤潮 の発生要因の解明に関係深い海況条 件を論じた。しかしまだ leakage の考慮はなされていない。
塩分変化の刺戟作用(中海赤潮を主として)	塩分の急速なる変化(降雨などによる) が何等かの刺戟となって細胞分裂の異常 増大を誘起するとの考え。	倉茂、喜田村、1934。	先駆的な意見であったが、これは むしろ Munk and Riley (1952) の理論によって説明さ れる海水 viscosity と物質の 吸収率の関係から説明されよう。 (特に降雨の後の日照を合せて)
沿岸水の作用 Mexico 湾 沿岸赤潮を対象 ( <u>Gymnodinium brevis</u> の赤潮)	Florida 近海の赤潮発生の条件と考 えられている excess phospho- rate は upwelling によるのではな くて terrigenous contami- nation によるものとした。	Ketchum, B. H. and Keen, J., 1948; Graham H. W. et al, 1954; Slobodkin, L. B., 1953; Chew, F., 1956.	Florida 沿岸赤潮の発生につい て栄養の役割を決定づける可なり明 快な諸論で、いづれも陸水の影響を 重視している。

論 点

Planktonの分裂増殖に必要な物質代謝の速度に関係深い栄養塩類の吸収率の変化と環境水温塩分変化の作用の理論。

Plankton の micr-odistribution の理論。

環境適合水塊の大きさの限界説 (leakage の理論)

要 旨

水温塩分の変化(水温上昇、塩分低下)による拡散係数、粘性係数の変化と栄養塩類の吸収率の変化との関係を論じ、降雨後の日照などと赤潮発生要因を説明するのに有用な理論が展開された。

また内湾の赤潮についてこの理論が応用されて赤潮の場合2~3倍の相対的吸収率の増大が知られた。

Plankton の輸送 transport と生物学的変化率“R”を組合せた微細分布の機構の理論的取扱いを展開し、湖沼で Daphnia の分布機構に適用した。即ち、PをPlの個体密度、Vxをx方向の流速とすれば、Plの時間的变化は

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{Diffusion} - P \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_x \frac{\partial P}{\partial x}$$

なる式で個体の集合に作用する力学的条件が表わされる。

Plankton の集合とその Patch の大きさ持続性に関する拡散と増殖率の相互作用について、赤潮を材料として理

著 者

Munk, W. H. and Riley, G. A., 1952 (理論)  
辻田, T., 1955 (大村湾夏の赤潮)

Ragotzkie, R. A. and Bryson, R. A., 1953

Kierstead, H. and Slobodkin, L. B., 1953 (理論)

所 見

極めて有用な理論で海況気象変化のゆを捉えて夏季赤潮発生の予測も出来るが、successionの生物学的要因が取扱われていないのと leakage を考えていないから、直接赤潮の発生機構の解明とはならない。

Plankton を濃縮する力学的条件は説明されたが、水塊内部における Pl、密度変化の生物学的調整作用 Organic regulation が取上げられないと、赤潮の本質的な解明には至らない。

赤潮の発生には栄養塩類は必要なる条件とはなるが決定要因ではないこと、leakage の問題が必要なることを

論を展開した。即ち、Planktonがその生存に至適の水塊の中で指数曲線的に増加しつつある場合、赤潮 *Pl.* が Population を保持出来る最小の限界があるべきで、そのような極小の臨界の大きさの存在を仮定して、理論的に赤潮の発生条件を考察したもので、円柱状の水塊（水平断面が円形）では、安定状態に達するまで充分時間が経過した時の半径は次式で与えられる。

$$R = 2,4048 \left(\frac{D}{K}\right)^{\frac{1}{2}}$$

但し  $D$  は拡散係数、 $K$  は増殖率。

栄養塩の摂取機構からみた種間競争による monospecific bloom の説明。

Plankton community における external metabolites に着目、excluding effect などの問題を提称し、海洋生物群の間で nonpredatory relationship 非捕食関係なる関係を示唆。

栄養塩類の代謝能力の差によって interspecific competition を考え、これによって monospecific blooming を説明せんとした。

Plankton の community dynamics において、community から Monospecific Population growth に移行する過程の説明に organic regulation の思想を中心にして論じたもので、Promoter, inhibitor の問題を提起した。

辻田, T., 1955 (例証)

Riley, G. A., 1943, '49, '52; Pratt, D. M., 1950; Ryther, J. H., 1954;

Lucas, C. E., 1936, '47, '49; Fleming, R. H., 1939; Bainbridge, R., 1953; Ryther, J. H., 1954

明らかにした重要な理論であるが、ただ Population growth の安定条件の仮定に問題がある。

Succession の説明には重要な考えである。特に赤潮に重要な community growth から monospecific Population growth が生起する原因に着目した点は重要。

赤潮現象で特に succession の特性を解明するための考え方として Organic regulation の必要性を示唆した点で、赤潮の研究に重要な意味がある。

論 点 要 旨

Plankton の日週活動を  
取上げて生理生態要因を重  
視した。

Phototactic behaviour な  
ど赤潮 Plankton の行動から赤潮  
現象を説明した。

著 者 所 見

米田、吉田、1957;  
平野、1957

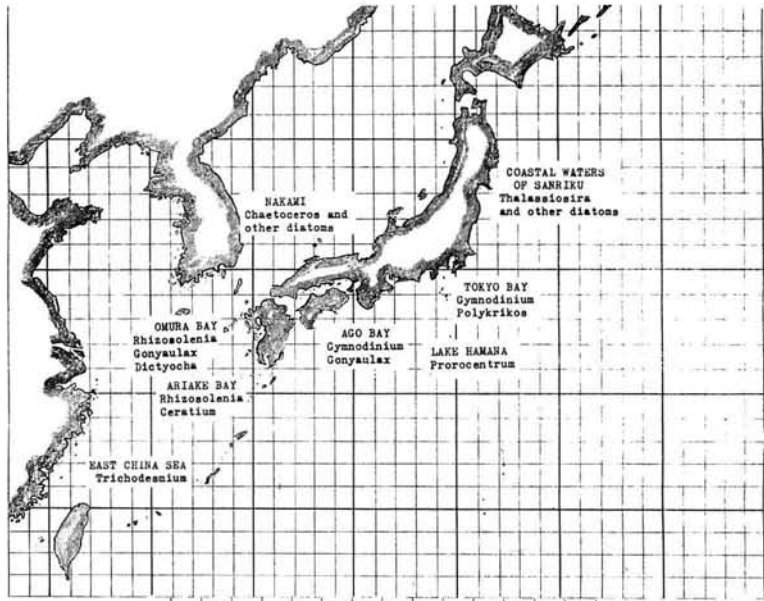
特に dinoflagellate の赤潮  
現象の説明には興味ある着眼点である。

重金属、あるいは金属キレ  
ート化合物が Plankton  
の増殖に与える作用を生態学  
的に研究し、赤潮にも一部論  
及した。

Fe, Co., Mn その他重金属、あるい  
はこれら金属とキレート物質の役割が海  
水の bioassay 分析、優占種の栄  
養特性などの実験から、Plankton  
の blooming の説明に有力な知見  
を提供した。

Menzel, D.W. and Ryther  
J.H., 1961; Provasoli,  
L., 1958, '63; Menzel, D.W.  
Hulburt, E.M. and Ryther,  
J.H., 1963

(Slobodkin  
 などが Pref-  
 ormed org-  
 anic matter  
 と呼ぶものもこの  
 中に入る)の増加、  
 重金属類の溶解な  
 ど、新しい事態が  
 表面化してきて、  
 これらが赤潮の起  
 り易い条件を誘起  
 したのではないかと  
 推定される。



ii) 内湾性 inlet  
 type

半ば閉塞された  
 小湾に発生し易い。  
 従って内湾の漁業、  
 殊に浅海増殖漁場  
 における被害が顕  
 著で、内湾の海況  
 が気象条件に大きく支配されるのと同様に赤潮の発生も気象条件が主要なる1次要因を  
 なしている。

オ2図 日本周辺の赤潮主要発生水域と  
 その主要赤潮 Plankton。

またオ2表でも知られるよう  
 に、わが国では中海の赤潮や東  
 京湾、大村湾などにしばしば起  
 る diatom の赤潮を除けば、  
 大ていの赤潮 Planktonは  
 Protozoa の場合が多い。

オ2表 頻発する赤潮 Plankton の属名と  
 主たる発生水域

iii) 沿岸性 coastal water  
 type

外洋に面した沿岸水域で、大  
 陸棚上から斜面海域までに現れ  
 易い。

沿岸水の影響する水域、ある

属名	発生水域	
	沿岸水	外洋水
Gonyaulax	○	—
Gymnodinium	○	—
Polykrikos	○	—
Peridinium	○	—
Ceratium	○	—
Prorocentrum	○	—
Trichodesmium	—	○
Rhizosolenia	○	○
Thalassiosira	○	○
Thalassiothrix	—	○
Chaetoceros	○	—



いは海深が euphotic zone より小さい水域に現れ易い。また時期的には湧昇の後の躍層の形成、あるいは冬の Convection の後に鉛直安定度が增大する時期などに起り易く、結局光合成を営む Plankton の春季増殖はこの種の代表的なもので、これを捕食して大繁殖する夜光虫の赤潮などは最もよく知られている。

要するに、沿岸域で Mixing, upwelling, heavy runoff などの条件が必要な赤潮である。

#### IV) 外洋性 Ocean type

大洋の upwelling が起る海域、あるいは地形的な上昇流の場所にかかる赤潮で、その占める範囲は広大で、航海者に最もよく知られている。印度洋、東支那海南部などの Trichodesmium の赤潮は有名、また North Sea や北洋(太平洋)において Convection の後の夏季 diatom の大繁殖などがあげられる。

この種の赤潮はしばしば漁況と密接な関係を現わすことが知られている。例えば North Sea で stinking water と呼ばれている鉛色の不快臭を発する水塊は、Rhizosolenia shrubsolei, Thalassiosira nordenskioldii あるいは Phaeocystis などが大繁殖したものでニシンやサバの不漁をまねくことが知られている (Bullen, G. E., 1908; Russel, E. S., 1915; Savage, R. E. and Hardy, A. C., 1935 など)。またわが国では北洋のサケ・マス漁場で Rhizosolenia などの diatom が大繁殖している緑色の水域ではサケの流網漁は不漁になることが報告されている (田村、藤井; 1953)

このような赤潮水塊が不漁を来すのは、一種の animal exclusion とみられ、魚類はこの水塊に対しては逃避行動を起したものである。

- (2) Animal exclusion または水族斃死の有無、赤潮と言えはすぐにそれが漁業に及ぼす影響を思わせる程、その魚介類に与える被害の先入観念は強い。そこで、水塊の中の生物相の変化、即ち赤潮水塊の生物的構造の特性は2次的にみて、その水塊が他の生物に与える影響を中心にみて赤潮の類型を考えてみよう。

##### i) 生物の斃死を伴う型

内湾の赤潮に多くみられるが、勿論 Animal exclusion も伴っている。東京湾、中海、大村湾、伊勢湾、などにしばしば起る。沿岸性の赤潮にもこの類に入るものがあり、Florida, California 沿岸の赤潮はその例である。

##### ii) animal exclusion のみを伴う型

東支那海の Trichodesmium の赤潮、三陸沿岸の厄水(ただし、これは時に海岸生物の斃死をも起す)、先に述べた North Sea の stinking water あるいは Weedy water、わが北洋漁場の Diatom の bloom による変色水塊などは魚を寄せつけず、または排除する。

この種の水塊の周辺では好漁場が出来る場合がある(厄水、stinking water)

### (3) 赤潮の生物的構造の違いによる分類

オ3の分類方法として赤潮水塊の生物的構造の相違、即ち Community dynamics を中心にみると、次の2に区別できる。

#### i) Monospecific population growth

(Monospecific bloom)

大村湾、英ご湾、東京湾など、あるいは California, Florida などに頻発する Dinoflagellate の赤潮によくみられるが、大村湾、九州西海域の Rhizosolenia の赤潮も典型的なこの型である。

また夜光虫の赤潮もこの類とみてよからう。

#### ii) 優占種混在型 bloom of a mixture of species of diatoms

diatom 類の赤潮に多くみられるもので、厄水、中海赤潮はこの代表的な赤潮で、東京湾でもしばしば起る。

これまでに報告された赤潮の例から知られることは、類型にも示したように、気象条件の他に栄養塩類の豊富な場所、またその補給が容易に持続される海洋条件の場所と時期に赤潮は発生している。また Plankton のなかでは光合成を営むものが多く赤潮を形成するが、夜光虫のような最もよく知られた海色変化を起す生物もある。

またオ2図およびオ2表に示すように、概ね赤潮の起り易い海域は一定した傾向にあり、またそれぞれの水域には同一の種の赤潮が発生し易い傾向がみられる。

このことは、それらの種がそれぞれの海域に endemic species として特性をもつようになったものと思われる。しかし、オ2表には示さなかったが、例えば Dictyocha fibula のように(辻田、1949)平常は出現の少い種が忽然として大繁殖して赤潮を形成するという現象も、赤潮研究にとっては充分注目すべき興味ある現象である。

### 4) 赤潮現象の綜観的分析

赤潮の発生から消滅までの過程を理解するのは succession や organic regulation, あるいは分裂増殖速度などの生物学的な現象だけ追求しても充分とは言えない。即ち、赤潮 Plankton の個体数変動に関する生理生態要因の究明とともに、高い個体密度を保持するために必要な水塊の力学的環境の色々な条件がなければ、赤潮 Plankton の density growth は成り立たない。

Plankton の density growth の機構を中心に赤潮を解明するには、Kierstad, H and Slobodkin, L. B. (1953), Ragotzkie, R. A. (1953), Woodcock, A. H. (1948) などの理論でも知られるように、水塊の中の赤潮 Plankton の density growth を高める独立水塊 discrete water mass の必要、あるいは水塊の leakage が小さいという水理条件が必要とされる。

このような考にもとづいて言えることは、赤潮現象は気象、海象、生物的条件が組合わさ

って起る、ということである。

オ2表およびオ2図でも知られるように、赤潮は海洋でも euphotic zone にみられる生物現象である。即ち光合成層における Plankton の集合作用でもあるから、Plankton の異常繁殖を誘起する環境の初期条件は気象であり、赤潮 Plankton の個体密度保存の条件には力学的環境が適合せねばならない。

このようにみてくると、赤潮の発生機構を理解するには単に Plankton の succession, 組成、個体密度の増大などの生物学的現象に限らず、一連の気象、海象変化の時系列と、この間における Plankton の生態をとらえることが、赤潮の機構究明のためには必要なる手段である。次にその2, 3の例によって説明を試みよう。(オ3, 4, 5表参照)。

オ3表 大村湾の赤潮発生過程 夏季、(辻田)

	6 月	7 月	8 月
	上 中 下	上 中 下	上 中 下
気象・海象の変化	梅雨期降水と日照の断続・水温上昇、塩分低下、弱い鉛直混合		梅雨明けとともに太陽輻射急増、表層より加熱、水温急上昇、鉛直安定度強化
保存成分の変化	陸水及び底層からの栄養塩の補給増大		溶在有機物の増加
生物現象	Diatom 徐々に増加及び死亡		Dinoflagellates の繁殖(赤潮)

才4表 中海赤潮の発生過程(梶川等、1952及び片岡、1965より作成)

	6月	7月	8月	9月
	上 中 下	上 中 下	上 中 下	上 中 下
気象・海象	Stagnation		Convection 8月下旬より始まる。 北西風吹き始める。 このため湾外水の進入が起る。特に台風接近時には外海水の進入著るしく、成層状態が破れて、鉛直混合が起る。	
非保存成分の変化	Detritus Precipitation   O <sub>2</sub> 消費   CO <sub>2</sub> } 増大 H <sub>2</sub> S }   Plankton 分解堆積		底層及び底泥中の栄養塩の鉛直輸送が盛に行なはれる。 還元性海水に対するO <sub>2</sub> の補給が行なはれる。	
生物現象	Plankton Precipitation		Diatomの大繁殖。	

オ5表 カリフォルニア沿岸における赤潮発生過程の分析 (辻田作成、1966)

現象系	Season											
	Mid-winter	Late winter	Early spring	Mid-spring	Late spring	Early summer	Mid-summer	Late summer	Early fall	Mid-fall	Late fall	Early winter
気象海象の推移	冬の終わりから早春にかけて湧昇が起る。euphotic zoneの下湖から下層水が上昇してきて、それ以前に西風によって移流してきていた表層水を置換える。			太陽輻射は年間の最大の強さになり、このため鉛直安定度は大きくなる。そして浅い所(約10m層)に水温の躍層が出来る。この時期には午后になると向岸の微風が吹き続けるので、表層水を海岸の方に押しやって岸近くに寄せる。				夏の終わり近くなると、沿岸の海流系の流向が変る。北太平洋から僅かに塩分の低い水が間接的にやってくる。		この北方系水の進入は晩秋に、週期性の冷却が始まるまで続く。		
非保存成分(栄養塩)の变化	湧昇によって栄養塩が euphotic zone に供給される。nitrate の量は恐らく南カリフォルニア沿岸水域の基礎生産の制限要素となるらしい。			この期間に利用される栄養塩類は湧昇のピークの時の濃度の10%乃至それ以下に減ってしまう。この期間は鉛直安定度極大となり、従って鉛直混合は極小である。								
生物現象	植物 Plankton の個体密度は冬の期間には小さく、湧昇が起っている間中は極小である。			植物 Plankton の個体密度は晩春から夏にかけては極大である。Dinoflagellates は優占種となる。そして水温躍層の上にある水塊にだけ分布する。この晩春から夏の間、これら趨光性と運動力のある Plankton は昼間は表面に濃厚に集る。赤色をしたこれら Dinoflagellates が集合して線条(スジ)状をなした表層水は午后の風で海近くに寄せられ、岬や防波堤、港などの構造物の風下側に集積される。(赤潮の出現)								

—106—