

貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係

Relation between the Hydrodynamic Characteristics of Stratified Flows
and Freshwater Red-Tide near the Upstream End of a Reservoir

* ** ***

松尾直規・山田正人・宗宮功

By Naoki MATSUO, Masato YAMADA and Isao Somiya

This study deals with the hydrodynamic behavior which relate to growing and accumulating process of freshwater red-tide due to *Peridinium bipes* blooming near the upstream end of a thermally stratified reservoirs. Hydraulic and ecological characteristics of the phenomena are estimated by field observation and numerical analysis. The results successfully explained development or keeping of the plankton population and its diurnal variation, which are concerned with circulative flow originated in plunging water and diurnal vertical migration of *Peridinium* population.

Keywords: stratified flow, freshwater red-tide, numerical analysis

1. はじめに

貯水池における淡水赤潮は、河川水の潜入点直下の水域を中心にみられることが多い。この水域では、貯留水に比べて低温の河川水が密度差により潜り込み、表層水を連行しながら貯水池底に沿って流下するのに伴い、表層では補償流としての上流へ向かう流れが生じる。淡水赤潮を形成する藻類種は渦鞭毛藻類のペリディニウムであることが多いが、この藻類は遊泳力を有し、昼間には光に向かって水表面近傍へ移動し、夜間には下方へ沈降することが知られている。貯水池上流端付近での淡水赤潮は、このような流れの運動特性と原因藻類の走光性に関係した集積と分散を日周期的に繰り返しながら、発達あるいは維持されると考えられている。¹⁾しかしながら、これらの現象の詳細な実態や定量的な関係については十分に明らかでなく、効果的な赤潮対策の樹立のためにもその解明が望まれている。

本研究は、上述したような淡水赤潮の現地観測結果とその一方向多層モデルによる数値解析より、現実の環境境界条件に対応した貯水池上流端水域での流れの挙動と淡水赤潮の集積および分散過程を詳細に検討し、それらの特徴と定量的関係を明らかにしようとするものである。

* 正会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487 愛知県春日井市松本町1200)

** 正会員 工博 国立公衆衛生院 廃棄物工学部 (〒108 東京都港区白金台4-6-1)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部衛生工学教室 (〒606 京都府京都市左京区吉田本町)

2. 現地観測結果からみた淡水赤潮の実態と特徴

1991年から1994年の秋期にA貯水池上流域において実施されたペリディニウムによる淡水赤潮の観測結果より、現象の時空間的変動の実態と特徴、ならびにその関連因子との関係について考察する。観測は図-1に示すダムから上流3.6~4.2Kmの水域において、24時間の連続観測を含めて行われ、ペリディニウム個体群密度、関連水質濃度、流速分布などが測定された。図-2、図-3に1992年におけるその観測例と観測期間中の関連因子の変動状況を示す。

図-2では、降雨終了後の10月26日以降、流入流量および流入水温の低下、また貯水池表層水温と流入水温との差の増大に伴い、表層のペリディニウム個体数が増加したことが示されている。

同様の変動傾向は1991年にも観測されており、いずれも上流端表層水域への藻体輸送の増大による集積の進行、さらには表層での増殖の結果と考えられる。集積と増殖のいずれが支配的かは明らかでないが、増殖に関係する日射量、栄養塩および水温に大きな変化はないことを考えると、集積の寄与は少なくないと推測される。

ペリディニウム個体数分布と水温分布の日周変動例を示した図-3では昼間に個体数は上流側、上層に集積し、夜間には下流側、下層へ移動し分散する傾向がみられ、昼間の高密度域は流入水の潜入点直下に位置する。また、15:00の潜入点下流では、藻体の潜入水による連行を反映した分布状況が認められる。なお、こうした変動量は日最大現存量の半分程度にまで達する。²⁾このような日周変動は、昼間の藻体の上方移動と逆流表層水による上流側への輸送、夜間の藻体の下方移動と潜入下層流による連行および下流側への輸送によるものと考えられる。また水温については、昼間に比べ夜間には河川水温の低下に伴い下層への潜入がより深くなること、また潜入し流下した後の上下層の温度差は昼間に増大することが示され、日周的な流入水温および表層水温の変動を反映している。

次に、こうした淡水赤潮の変動に関係する流速分布について、1994年の連続観測例を図-4に示す。これは、上述の観測とは年こそ違うが季節的には同じ時期の同じ赤潮状況のものであり、定性的には共通する特徴を示すものと考えてよい。同図より、水深1m以浅の上層では上流側へ、それ以下の下層では下流側へほぼ同程度の速度で流れていること、夜間に比べ昼間には上下層の速度およびその差が大きいたことが分かる。これらは、図-3で指摘した昼夜の水温分布特性に対応する密度成層流の特徴を示すものであるが、淡水赤潮原因藻類の日周的な鉛直移動と併せて考えると、藻体群をある一定範囲の水域で周期的に循環輸送するとともに夜間における輸送範囲外への流出を抑え、上流域での藻体量の維持さらには増大に寄与していると言えよう。

淡水赤潮の集積に関連する諸因子の内、関係が深いものは前述した流入水の流量、水温、貯留水の水温に加え風速、風向であることが従来の調査研究より経験的に指摘されている。³⁾データ不足のため各因子が集積に及ぼす影響の定量的解明は今後の課題であるが、対象水域での水温と藻体集積の程度については図-5、

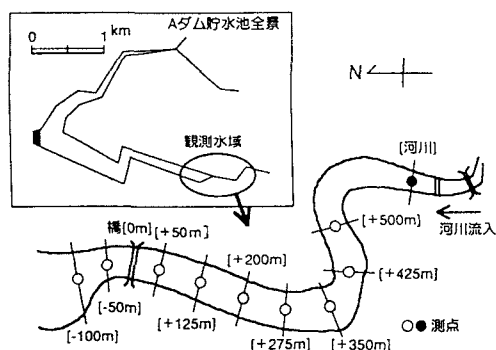


図-1 観測域の概要

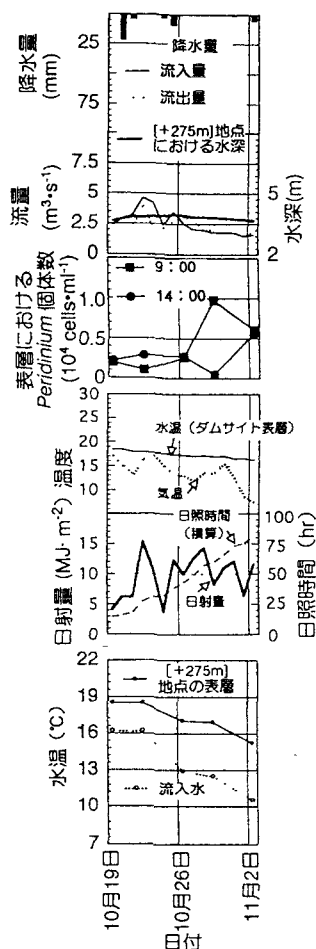
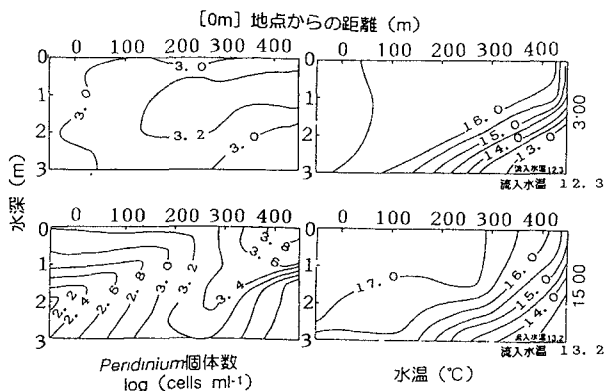


図-2 各種観測値の推移



図一 藻体密度と水温分布の観測例 (1992. 10. 27)

図一 6 に示すような関係が得られている。これらの図では、集積が顕著となる14時の表層 (0.5m以浅) および潜入点直下の150m区間における藻体現存量と、図一 1 に示した観測水域全域の現存量との比をそれぞれ集積率と定義しているが、前者のそれは表面水温と正の直線的相関が、後者では流入水温と負の直線的相関が認められる。両者ともに、流入水と表層水の温度差に対応した流動特性が藻体集積に及ぼす影響を示唆するものであろう。ただし、前者の関係は水温と正の相関を持つペリディニウムの鉛直遊泳速度及び増殖速度の集積への寄与をも含めた結果と考えられる。

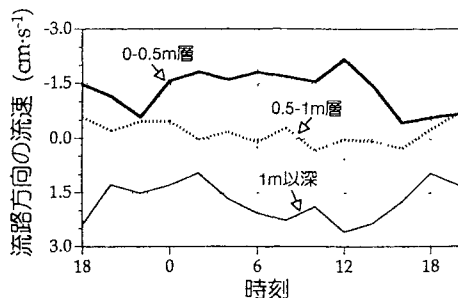
3. 流動と藻類集積の数値解析

3. 1 数値解析モデル

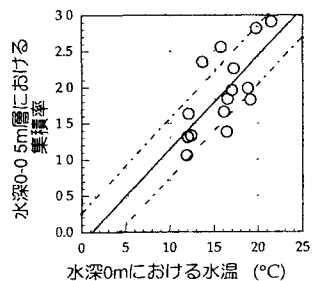
2. で述べた対象貯水池での流動と淡水赤潮原因藻類の集積に関する数値解析を実施し、現地観測で得られた現象の機構、関連因子との対応関係を確認するとともに、それらの定量的解明を試みた。解析に用いた数理モデルは従来よりの貯水池水理に関する一方向多層モデル⁴⁾である。このモデルは、貯水池を流下方向および水深方向に分割して得られるコントロール・ボリュームについて展開された水の連続式、運動量保存則、水温収支則および各種水質濃度収支則で構成されているが、各式の表示は文献⁴⁾に詳述してあるのでここでは省略する。水質については藻体密度の指標としてのクロロフィル a 濃度、栄養塩としての窒素、リン濃度の変化のみを扱い、その他の生物、水質指標は関与の程度が小さいか、もしくは不明であるため扱わないことにした。

クロロフィル a 濃度収支則は、移流・分散項、生産・消費項および藻体群の遊泳と沈降による鉛直移動項で構成される。対象藻類であるペリディニウムの生態的特徴の一つにシストの形成、発芽があるが、これらの過程については未だ不明な点が多いため本解析では考えないことにし、生産・消費項は現存量の増殖と死滅のみで表す。これらは次式のようなものである。

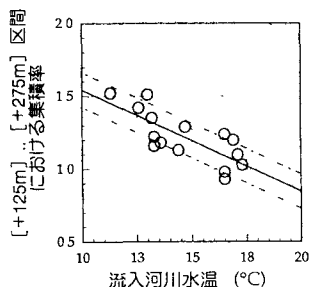
$$S(CP) = (G \cdot FN \cdot FI \cdot FT \cdot SP - D \cdot \theta^{(T-20)}) \cdot CP \quad (1)$$



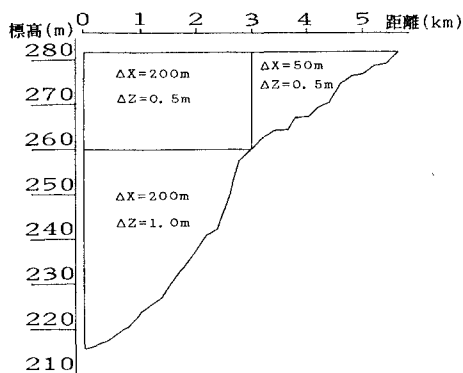
図一 4 上下層流速の日周変動



図一 5 表層水温と集積率との関係



図一 6 流入水温と集積率との関係



図一 7 解析に用いた貯水池分割

$$\text{ここに、} \quad \text{FN} = \text{TN} / (\text{TN} + \text{KN}) \cdot \text{TP} / (\text{TP} + \text{KP}) \quad (2)$$

$$\text{FI} = \text{I} / (\text{I} + \text{KI}) \quad (3)$$

$$\text{FT} = \{ \text{T} / \text{TS} \cdot \text{EXP} \{ (\text{T} - \text{T} / \text{TS}) \} \}^n \quad (4)$$

$$\text{SP} = \text{EXP} \{ -k \cdot \text{CP} \} \quad (5)$$

であり、CP：クロロフィル a 濃度、TN：全窒素濃度、TP：全リン濃度、T：水温、I：日射量、G：最大増殖率、D：20℃における死滅率、 θ ：温度補正計数、KN、KP、KI：全窒素、全リン、日射量のミカエリス定数、TS：最適温度、n：尖り度定数、SP：スペース効果係数、k：比例定数である。

鉛直移動項は、藻体群の平均的な鉛直移動による変化を移流項と同様の形式で表すものであり、その速度 WP（上向きが正）は、室内観測結果に基づいてベリディニウムの平均遊泳速度 VS、沈降速度 WS、および上方へ遊泳する藻体の割合 f より次式のように表示した。⁵⁾

$$\text{WP} = f (\text{VS} - \text{WS}) - (1 - f) (\text{VS} + \text{WS}) \quad (6)$$

ここに、 $f = 0.8 \cdot \text{I} / (\text{I} + \text{Kf})$ ただし、 $f < 0.4$ では $f = 0.4$

$$\text{VS} = 0.0000086 \cdot \text{EXP} \{ -4550.0 / (\text{T} + 273.16) \} \quad (\text{m/hour})$$

また、Kf は f に関する日射量のミカエリス定数であり、WS = 0.14 (m/hour) とした。

なお、窒素およびリン濃度の収支則は、移流・分散項、藻体群の増殖・死滅に伴う生産・消費項、沈降項および底泥からの溶出項で構成されている。

3. 2 解析条件

解析にあたっては、対象貯水池を図-7のように所要計算精度に応じて異なる大きさを分割し、淡水赤潮の集積域である上流域では流下方向に50m、水深方向に0.5mで細分した。数値計算は、従来の貯水池水理解析と同様の staggered scheme による陽解法⁶⁾を用い、1992年10月22日から28日の期間について実測の時間データを使って実施した。

初期条件の内、流速については計算開始時の流況下で静水状態から開始して72時間経過後の計算値を初期値とし、また水温は実測値、各水質濃度は実測値が不十分なため適当な設定値を与えた。流入水温および水質濃度は、実測値が乏しいのでそれぞれ気温および流入流量との相関回帰式で推定したが、クロロフィル a は $1.0 \mu\text{g/l}$ で一定とした。また、底面での抵抗は無視し、水表面では気象要素による熱交換を考慮した。

計算は、時間間隔を2秒として先に流速、水温を求め、次にそれらの値を使って時間間隔72秒で各種水質濃度を求めた。計算に用いた各種係数値は、室内実験等により得られた既存の経験的数値を参考に決めたが、水深方向の分散係数 Dz については各分割ブロックに関する密度勾配および速度勾配より求められる局所リチャードソン数 Ri の関数として次式で与えた。

$$\text{Dz} = 0.001 \cdot \text{EXP} \{ -0.5 \text{Ri} \} + 0.000001 \quad (\text{m}^2/\text{sec}) \quad (7)$$

(ただし、 $\text{Ri} < 0$ では $\text{Ri} = 0.0$ 、 $\text{Ri} > 10.0$ では $\text{Ri} = 10.0$)

3. 3 解析結果と考察

得られた計算結果より、図-3に示した観測結果と同時刻の流速、水温、クロロフィル a 濃度の上流域での分布を図-8、9、10に示す。図-8より、いずれも流入水の潜入とそれに伴う表層水の逆流が表されているが、3:00の方が流入水温が低いので潜入点が50m程度上流にあり、上下層の流速値がより大きくなっていることがわかる。また、図-9の水温分布は図-8の流速分布を反映したものとなっており、図-3のそれと比べると15:00の計算値の一致の程度があまり良くない。これらは、計算において気温に比例する形で与えた流入水温が15:00には図-3に示したそれより高かったための結果であるが、それでも図-3および図-4に示された流速分布と水温分布との定性的関係は再現していると考えられる。図-10の計算値は、初期値として $10 \mu\text{g/l}$ を一様に与えて得られたものであり、現実の値の再現を図ってはいないので図-3の観測

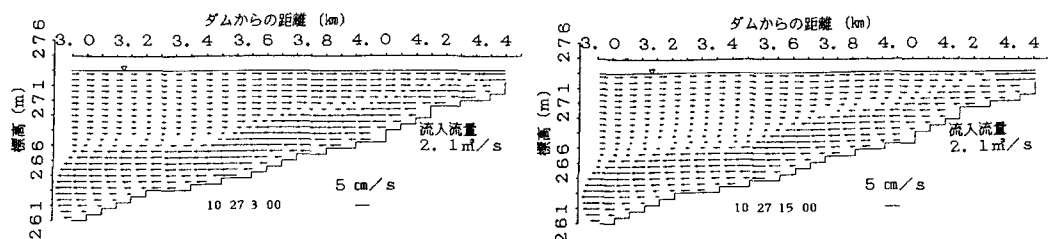


図-8 流層分布の計算例

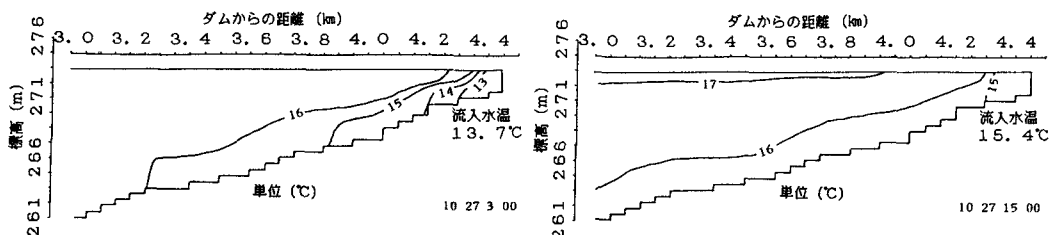


図-9 水温分布の計算例

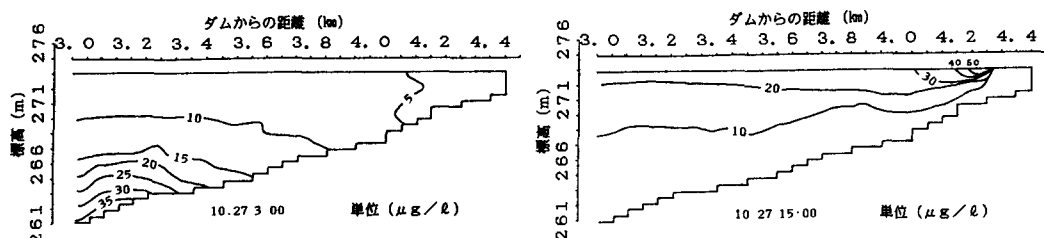


図-10 クロロフィルa濃度分布の計算例

値との比較はできないが、昼夜における藻体密度分布の傾向は良好に表現していると考えられる。特に、図-8に示した流動と藻体の鉛直移動による昼間の流入水潜入点下流域表層での藻体の集積、夜間の下流域下層部への輸送・分散の状況を計算結果は十分に説明している。

図-11～14は、得られた計算値より求めた上下層の平均流速、図-1の観測域下流端でのクロロフィルaの流入、流出負荷量、同じく観測域内現存負荷量、流入流量と観測域下流端の下層流量との比から求めた連行係数、観測域表層での藻体の集積率の推移である。図-11では、上下層の流速がほぼ等しいことや、0:00～12:00に値が大きく12:00～24:00には小さい日周変動の傾向が認められ、図-4の観測結果と類似した特徴が示されている。図-12では、図-10の濃度分布と関連して昼間に流入が、夜間に流出が大きくなること、またそれらは量的に同程度であることがわかる。その結果、図-13では、昼間に現存量が増えて20時ごろに最大となり、その後減少して9時ごろに最小となるような日周変動がみられる。この傾向は、同

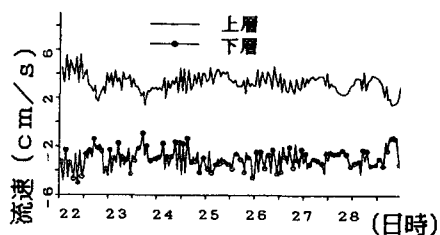


図-11 上下層の平均流速

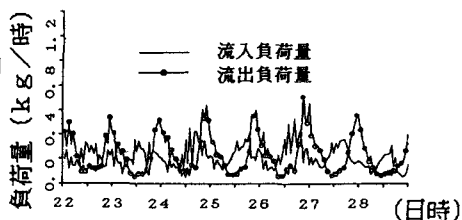


図-12 移入・移出負荷量

時に示した増殖をゼロとしたケースでも同じである。また、その増減量は日平均量の5割程度に達している。この変動特性は1994年に同水域で観測された結果と比べると最大、最小値の生起時刻が4~6時間ほど遅いことを除けばほぼ一致している。生起時刻の差は、観測域が谷間にあるため日没が計算で与えた時刻より早く藻体の下方移動が早まること、上下方向への移動開始が日照の開始・終了時刻とは必ずしも一致しないこと、異なる流況での流動、水温など水理条件の違い、藻体の鉛直移動速度の違い、1994年の観測域と計算対象域との違いによると考えられるが、その原因の究明は今後の課題である。経日的には、増殖があると0.03 (1/day)の増加率で日平均量が増え、それがない場合には-0.04 (1/day)の減少となっている。増加率は観測結果より求めた値0.06 (1/day)の半分程度であるが、現存量に対する比率からみれば大差はない。

いずれにせよ、この結果は増殖が藻体量の維持、増加を支え、淡水赤潮の継続と発達に寄与していることを示すものである。図-14では、連行量の増減に対応した図-11の上下層流速の変動および藻体の走光性鉛直移動に伴い、藻体の集積率が16時ごろに2.5程度を示すピークとなり、その後急激に減少して翌朝6時まで1.0以下で推移する状況がみられる。この状況は、観測結果と比較するとピークが2時間程度遅いことを除けばほぼ一致するものである。

次には、流入水の流速、水深、およびその密度と貯留水表面密度との差より求めた流入水に関する内部フルード数、ならびに潜入後の下層密度流に関し、その層厚、上下層水の平均密度差および速度差を用いて得られるオーバーオールリチャードソン数と、先述の連行係数、集積率との関係をみると図-15、16のようである。連行係数については、リチャードソン数と反比例するような一般的な負の相関がみられるとともに、内部フルード数とも同様の関係が認められる。後者の関係は、計算期間中の流入流速に大差はなく内部フルード数の変化が主として流入水温と表層水温の差による密度差に支配されていると考えられることから、両水温の差が大きいほど潜入水による連行が大となることを表している。これは、連行が大となれば表層での藻体の循環輸送量も増大することより、結果的には図-5、6に示したような水温と集積率との関係に帰着されるものと考えられる。ところが、上述の各水理量と集積率との関係はあまり明瞭でなく、内部フルード数では1.0以下の移出・分散について正の相関がみられるのを除けばバラツキが大きい。また、リチャードソン数に対しては全体的に正の相関があるように見えるが、はっきりとはしない。この点については時間的な遅れや藻体の鉛直移動および増殖の影響などさらに検討を要するであろう。

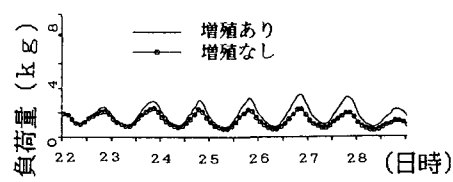


図-13 藻体現存量の推移

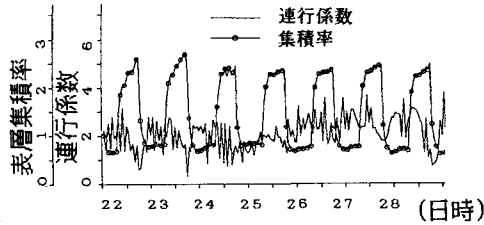


図-14 集積率と連行係数の推移

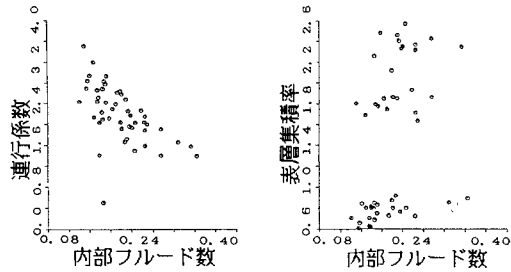


図-15 内部フルード数と連行係数、集積率との関係

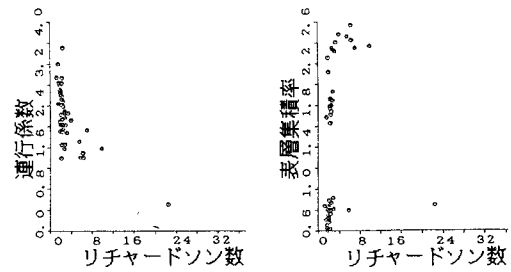


図-16 リチャードソン数と連行係数、集積率との関係

4. おわりに

本研究では、貯水池上流部における流動特性とペリディニウムを原因藻類とする淡水赤潮の集積現象について、現地観測と数値解析より検討した。その結果、流入河川水による密度成層流とそれに伴う表層水の挙動、ならびに水理特性を示すとともに、それらに輸送、循環される藻体量の時空間的変化特性を明らかにした。得られた成果は、淡水赤潮に関する景観障害対策の一つである流動制御についていくつかの有用な知見を与えるものと考えられる。しかしながら、実測データの不足等のため数値モデルによる実際現象の再現、検証には至らず、なおいくつかの解明すべき課題が残されている。これらを含め、今後ともより一層の現象解明に努める必要があろう。

本研究を遂行するに当たり、多大なご協力をいただいた京都大学衛生工学教室の小野芳朗助教授はじめ宗宮研の諸氏、水資源公団およびダム水源地環境整備センターの関係各位に感謝の意を表するとともに、研究の一部は文部省科学研究費（一般研究（c）課題番号06650575）の援助を受けたものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) 渡辺信、渡辺正孝：ダム湖における *Peridinium* 赤潮の発生状況とその増殖特性、第18回衛生工学討論会、pp. 41-46、1982
- 2) 山田正人、宗宮功、小野芳朗、小林尚礼：ダム貯水池における *Peridinium* 淡水赤潮の集積機構の評価、水環境学会誌、Vol. 18 (10)、pp. 775-782、1995
- 3) 松尾直規、高尾信、武田邦祐、加藤佐和子：貯水池流入部における淡水赤潮の集積現象について、平成6年度土木学会中部支部研究発表会、pp. 281-282、1995
- 4) 岩佐義朗、松尾直規：貯水池における水理特性の変化とその予測、第24回水理講演会論文集、pp. 251-258、1980
- 5) 山田正人、宗宮功、安永望、小野芳朗：渦鞭毛藻 *Peridinium* の走光性による遊泳速度に関する研究、陸水学会誌、Vol. 56 (2)、pp. 125-135、1995
- 6) 岩佐義朗編著：数値水理学、丸善、1995