

B-31 水中を浮遊する微小な生物粒子の遭遇現象と乱流構造の関係性

○藤井 秀太¹・横嶋 哲^{1*}・宮原 高志¹

¹静岡大学 大学院工学研究科 数理システム工学専攻 (〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

* E-mail: yokojima@sys.eng.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

生物にとって他の生物との出会い、すなわち遭遇は生きていくために最も大切なイベントと言っても過言ではない。生物における遭遇は捕食・生殖などに繋がる。遭遇が少なければその種は必然的に絶滅に向かう反面、遭遇が多ければより多くの捕食が可能となり、子孫の繁栄にも優位であることは容易に想像できる。これはあらゆるスケールの生物に当てはまることであり、水中の微生物にとっても例外ではない。水中には乱流変動が遍在し、これが水生微生物の動きを大きく支配する。つまり遭遇と乱流構造の関係性を解明できれば、人為的に遭遇をコントロールすることが可能となる。このようなアプローチは、仔魚の成長を促進する養殖環境の構築や微生物による水質浄化の最適化等を進める上で強力なツールとなることが期待できる。しかし乱流中の微生物同士の遭遇頻度を検討した例は数多いが^{2,3)}、遭遇現象がどういった流れ構造によって誘起されているかを検討した例は見当たらない。

本研究では動物/植物プランクトンや水中懸濁物、細菌などを模擬した生物粒子間の乱流中での遭遇を数値的に再現し、遭遇現象の支配要因を明らかにすることを目指す。

2. 検討対象とする系の詳細とその数値実験法

(1) 背景乱流場

本研究では、乱流の最小長さスケールであるコルモゴロフ長 η オーダー離れた被食者を感知できる微生物を考察対象とする(図-1参照)。そのような微生物のスケールでは乱流場は等方かつ一様とみなせるので、ここでは微生物が生息する水環境の背景乱流場として一様等方乱流を考える。また、 $\Omega(\eta)$ 離れた捕食者と被食者の相対運



図-1 知覚可能半径が R の捕食者と餌の遭遇。

動に最も影響を及ぼすのは同程度の大きさの渦運動である。ここではそのような最小スケールの渦運動を正確に再現するため、ナビエ・ストークス方程式の直接数値シミュレーション(DNS)を行った。数値解析法の詳細は文献4)を参照されたい。

遭遇に対する乱流場の影響を明らかにするため、背景流速場として一様等方乱流のある瞬間を切り取った凍結乱流場を扱う。その理由は、乱流渦が時空間で成長・減衰する“生きた”乱流場だと、どのような乱流構造が遭遇現象に関与しているのかを捉えることが困難なためである。Wang *et al.*⁵⁾は微小粒子の遭遇頻度を凍結乱流場を用いて評価することの問題点と妥当性について議論している。

(2) 水生微生物とその遭遇

本研究で扱う微生物は大きさが流体の最小スケールであるコルモゴロフ長に比べて十分に小さく、排除体積効果は無視できるものとする。また、微生物の密度は水にはほぼ等しく、慣性効果も無視できると仮定する。さらに問題を簡素化するために遊泳能力を持たない微生物を検討対象とする。よって捕食者・被食者ともに背景乱流場に完全に追従する。2.(1)で述べたナビエ・ストークス方程式のDNSから求まる背景乱流場の流速 \vec{u} を用いれば、捕食者P及び被食者Hの時刻 t における位置 $\vec{x}_{P,H}(t)$ は以下の式で表せる：

$$\frac{d}{dt} \bar{x}_{p,H} = \bar{u}(\bar{x}_{p,H}, t) \quad (1)$$

捕食者は自身を中心とする半径 R の球空間内で被食者の存在を知覚できるものとする。以下では R を知覚可能半径、球空間を知覚可能領域と呼ぶ。ある捕食者1個体とある被食者1個体が流れの作用によって接近し、捕食者の知覚可能領域内に被食者が入ることを本研究では「遭遇」と呼ぶ。

(3) 数値シミュレーションの条件

本研究では2種類の生物粒子である捕食者および被食者を $24^3(=13824)$ 体ずつ用意し、乱流場へランダムに初期配置した。また捕食者の知覚可能半径 R をコルモゴロフ長の3倍とした。

本研究で扱う一様等方乱流場は、そのテイラー・レイノルズ数 Re_λ を約31とした。互いに独立な凍結乱流場を3つ(瞬間場1, 瞬間場2, 瞬間場3)用意した。実験領域は全ての方向に周期条件を課した立方体空間である。一様等方乱流のDNSは 48^3 のフーリエ・モードを用いてスペクトル法で行った。このとき計算格子間隔 Δx はコルモゴロフ長の2倍程度であり、乱流のDNSとして十分な空間解像度を備えている。多数の遭遇事象を観測するために、数値シミュレーションはコルモゴロフ時間 τ_η の180倍という長時間に渡って行った。また、遭遇現象を見逃すことのないように、時間刻み幅 Δt はコルモゴロフ時間よりも十分小さい $(1/40)\tau_\eta$ とした。この結果、それぞれの瞬間場において約350万回の遭遇を観察することができた。

(4) 検討した特徴量

本研究では乱流中での捕食者-被食者の遭遇現象の発生位置の空間的偏りと乱流構造がどのように関係しているかを検証するために、ナビエ・ストークス方程式のDNSから得られる流速ベクトル \bar{u} を用いた以下の乱流統計量、すなわち

- ・乱流エネルギー: $(1/2)\bar{u} \cdot \bar{u}$
- ・加速度ベクトル $\bar{a} = D\bar{u}/Dt$ の絶対値: $|\bar{a}|$
- ・ひずみ速度テンソル $S_{ij} = (1/2)(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)$ の第2不変量: $S_{ij}S_{ij}$
- ・回転テンソル $\Omega_{ij} = (1/2)(\partial u_i/\partial x_j - \partial u_j/\partial x_i)$ の第2不変量: $\Omega_{ij}\Omega_{ij}$
- ・渦度ベクトル $\bar{\omega} = \nabla \times \bar{u}$ の絶対値: $|\bar{\omega}|$
- ・ヘリシティ: $\bar{u} \cdot \bar{\omega}$

の6つのパラメーターに注目して検討を行う。

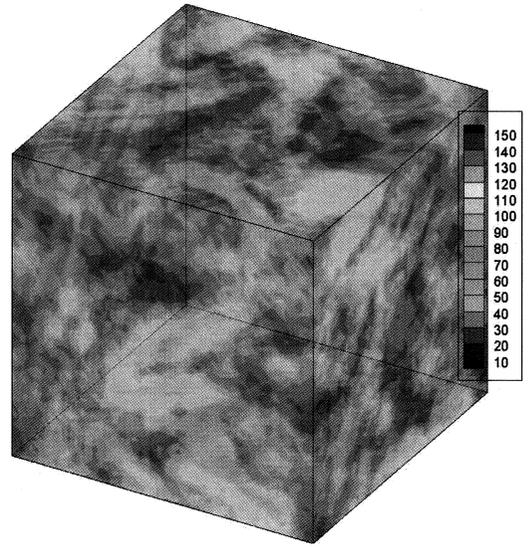


図-2 瞬間場1における遭遇数のカラーカウンター表示。

3. 結果と考察

捕食者と被食者の遭遇は実験空間の任意の位置で生じる。本研究ではこの実験空間を微小領域に分割し、その領域内で生じた遭遇をまとめて評価した。ここでは流体運動を 48^3 のフーリエ・モードで表現したことに合わせて、実験空間を 48^3 の微小立方体領域(セル)に分けて遭遇をカウントした。瞬間場1において $180\tau_\eta$ のシミュレーション時間内に観察された遭遇数の空間分布を図-2に示す。乱れは統計的に一様・等方であっても遭遇は一様に生じるわけではなく、150を超える遭遇が観測されたセルもあった反面、捕食者と被食者の遭遇が全く発生しないセルも確認されるなど、その分布は非常に不均一であることが図-2から確かめられる。

本研究では2(4)で挙げた6つの特徴量と遭遇数の空間分布との関係を探るために、両者の相関係数を評価した。表-1に結果をまとめた。これより6つの特徴量において、ひずみ速度テンソルの第2不変量と遭遇数の空間分布に強い相関関係があることが分かった。

図-3および図-4はそれぞれ計算領域内の、ひずみ速度テンソルの第2不変量の値が大きい場所と遭遇現象が多く起こっている場所を示す。これより、視覚的にもひずみの強いところで遭遇現象が多く起こっていることが確かめられた。瞬間場2, 瞬間場3でも同様の結果が得られることを確認した。ひずみ速度テンソルの第2不変量以外の5つのパラメーターについては相関が弱く、遭遇現象との因果関係があるとは言えない。

4. おわりに

本研究では乱流中の微生物の遭遇現象がどのような乱流構造によって支配されているかについて検討を行った。

数値実験結果より、ひずみが強いところで微生物同士の遭遇現象がより多くの起きていることが相関係数からも流れの可視化画像からも認められた。乱流のアクティブ制御によってひずみ強度を局所的にコントロールできれば、養殖環境の構築や微生物による水質浄化の最適化等を進める上で強力なツールとなることが期待できる。

参考文献

- 1) Kiorboe, T.: A Mechanistic Approach to Plankton Ecology, Princeton Univ. Press, 2008.
- 2) Lewis, D.M. and Pedley, T.J.: Planktonic contact rates in homogeneous isotropic turbulence: theoretical predictions and kinematic simulations, *J. Theor. Biol.*, Vol. 205, pp.377-408, 2000.
- 3) 馬場 謙二郎, 横嶋 哲, 益子 岳史, 宮原 高志: 乱流中のプランクトン間の遭遇率と摂食率, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp. I_817-I_822, 2013.
- 4) 横嶋 哲, 益子 岳史, 松坂 隆弘, 宮原 高志: 一様等方乱流中のラグランジュ粒子の接触特性評価, 京都大学数理解析研究所講究録, No.1822, pp.76-83, 2012.
- 5) Wang, L.-P., Wexler, A.S. and Zhou, Y.: Statistical mechanical description and modeling of turbulent collision of inertial particles, *J. Fluid Mech.*, Vol. 415, pp.117-153, 2000.

表-1 乱流中の遭遇数と各特徴量の相関係数.

	瞬間場1	瞬間場2	瞬間場3
乱流エネルギー	-1.25E-01	1.45E-02	2.56E-02
加速度	3.99E-02	4.69E-02	-3.76E-02
ひずみ速度	7.77E-01	7.90E-01	7.90E-01
回転	3.15E-01	2.90E-01	3.27E-01
渦度	2.81E-01	2.84E-01	3.14E-01
ヘリシティ	-2.83E-02	-2.23E-01	1.02E-01

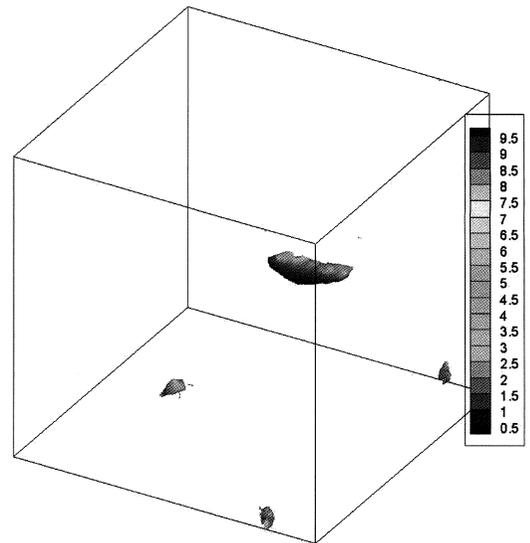


図-3 瞬間場 1 におけるひずみ速度テンソルの第 2 不変量 $S_{ij}S_{ij} = 3.34(u_{\tau}/\eta)^2$ の等値曲面. ここで u_{τ} はコルモゴロフ速度を表す.

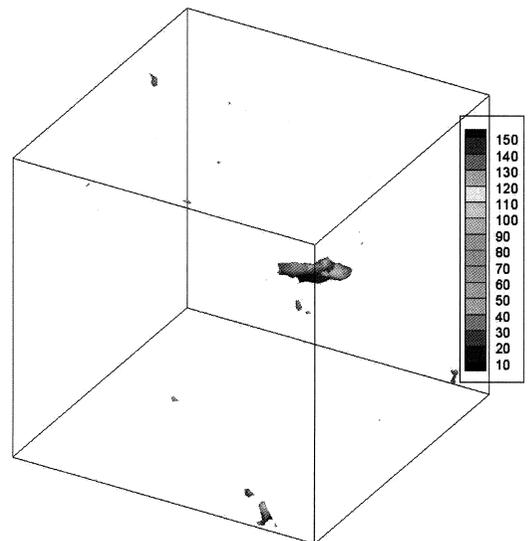


図-4 瞬間場 1 における遭遇数が 98 の等値曲面.