Bioluminescenceによるせん断力計測法の開発

Image measurements of shear stress distributions in oscillatory flows based on Bioluminescence

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 坂井純 (Jun Sakai) 北海道大学大学院工学研究科准教授 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

現在せん断力の計測は接触型一点計測が主流であり、液体中 のせん断力の面的分布計測技術はもとより、液体内のせん断力 の非接触で点計測する実用的な方法は確立されていない。

それとは別に力学的、化学的な外的作用に対して発光する海 生生物が多数存在し、渦鞭毛藻類のプランクトンのなかには液 体中の圧力変化やせん断力など力学的な応答として発光するも のがある。渦鞭毛藻類 Pyrocystis lunula (以後 PL)は液体中 の圧力変化やせん断力など力学的な変化に対して発光する Bioluminescence 反応(以後 BL 反応)として応答する。BL 反 応とはルシフェリンのような酵素と色素との結合が原因で、生 きた有機体から熱の無い光を放出する反応である(図-1)。

この BL の発光強度や分布形状から流体内で作用するせん断 力を特定することができれば、瞬時のせん断力三次元空間分布 の取得が可能となる。

本研究では計測方法を含め、水温、個体数密度、せん断力変 動速度など BL を実用計測として用いるために必要なファク ターとそれらの統計的評価とその不確定性を解明し、新たな計 測システムを構築することを目標としている。



図-1 Bioluminescence 反応

2. 実験方法,実験条件

本実験では図-2 に示すような全面透明アクリル製 U 字型振動流発生装置に PL を混入させた海水を入れ、振動流を発生させた際に装置内で発生する底面境界層付近のせん断力により発光する BL を装置側面から高感度カメラで撮影する。

振動流発生装置にはあらかじめエアコンプレッサーにより水 頭差を与え、空気圧を開放することにより振動流を発生させる。 水路の壁面は滑らかであるが底面アクリル板の脱着により底面 の祖度は変更が可能となっている。

流速の解析解を求めるために以下のような手順で式を導出した。

Navier-stokes 式より

解を次のように仮定する。

$$u = iB(z)e^{i\sigma t} - (2)$$

 σ ・・・円振動数

(2) 式を(1) 式に代入し(3) 式を得る。

$$B(z) = a\sigma + be^{-kz} + ce^{kz} - (3)$$

(3) 式に境界条件を代入し(4) 式を求めた。

$$B = H\sigma(1 - \frac{\sinh kz + \sinh k(h-z)}{\sinh kh})$$

H・・・水面から静水位までの距離 h・・・断面高さ $k = \sqrt{-\frac{\sigma}{\upsilon}}$

実際に装置内で発生する位相ごとの流速分布を確認するため に、UVP(Ultrasonic Velocity Profiler:超音波流速分布計)を 用いて装置内で発生する流速分布の測定を行った。あらかじめ 装置内には一方の水面と他方の水面との間に水頭差500mm を与 え、周期 1.5778 秒という条件の下実験を行った。図-3 に示す のは測定の結果から縦軸に水深(mm)、横軸に流速(mm/s)を プロットした水平流速の鉛直分布を解析解と比較した一例であ る。上の図が振動を始めてから0.1秒後から1.3秒後までの流 速分布であり、青,緑,赤,水色,紫まで0.1秒から0.3秒ご とにプロットしている。

UVP による測定値はノイズを含みながらも解析解とほぼ同等 の値を示した(図-4)。この結果から流速の解析解より求めた せん断力分布(図-5)とBioluminescence 発光との相関を調べ ていく。図-5 は振動を始めてから青の線が振動を始めてから 0.4 秒後、緑の線が 1.3 秒後のせん断力分布図であり、縦軸に 水深(mm)、横軸にせん断力(N/mm)をとっている。





図-3 鉛直方向の水平流速分布



40 50 20 -10 0 10 20 S(N/mm)

図-5 鉛直方向のせん断力分布

撮影した画像は連続画像として PC に取り込み、画像解析を 行う。また図 2 に示すように装置中央から左右に 32.5mm,上下 に 50mm(装置上端から下端まで)を撮影範囲とし,水温 20℃、 微生物の数密度は約 50 匹/cm³という条件の下実験を行った。

カメラの撮影開始のシグナルはトリガーによって送信される。 実験装置の水柱側面にフォトダイオード (photodiode:光エネ ルギーを電気エネルギーに変換する半導体素子)を設置しトリ ガーとつなぎ、向かい合うようにレーザーポインターを設置す る(図-6)。設置位置は静水位(水柱上端部より250mm)とし, 水頭差を与え開放されて振動を始めた装置内の海水がレーザー をよぎることで,電圧の変化を感知してトリガー信号をおくる ものとする。そのため図-4 に示す波形から1/4 周期遅れて撮 影を開始する。



3. 解析方法

Bioluminescence 発光強度(以後 BL 強度)の経時的な変化 及び空間的な変化を画像解析により明らかにする。PC 上に取 り込んだ画像は輝度補正を行った後、図-7 に示すように PL が 光っている場所を画像濃度勾配を基に抽出しその座標と BL 強 度を計測する。



図-7 発光PLの抽出

画像濃度で出力される BL の輝度を発光強度が撮影条件や環 境に依存しない絶対評価を行うため、フォトダイオードによる 光起電力として正規化した。図-8 に示すように振動流装置の 撮影位置に青色LEDを設置し、それと向き合うようにカメラと フォトダイオードを設置した。発光するLEDを撮影すると同時 にフォトダイオードでLEDの発光を電圧に変換し画像との関係 を調べた。種々のLEDの光量に対する撮影画像の平均輝度とそ の時の電圧をプロットし線形近似したものが図-9 である。こ の結果から画像濃度に補正係数として 0.9809 を乗じたものを 電圧とし、電圧と電流の積から BL 強度(W)を算出する。











図-10 最大発光強度の時刻暦応答







図-12 底面せん断力の時間変化



5. まとめ

図-10 は BL 強度の空間平均値の時系列を表している。BL 強 度は図-4 で示される振動流の半周期毎に明確なピークを持ち, 対応するせん断力(図-11)の絶対値の時間変化と0.25秒の位 相差をもって高い相関があることがわかる。最大 BL 強度は時 間と共に減少し、半周期毎に初期ピークの約20%ずつ低下す る。これは田中ら(2008)が繰り返し落錘載荷下の BL 強度が 載珂を重ねるごとに低下する生物疲労について報告しており, この結果も同様な疲労が原因であると考えられる。

図-11 は取得画像内の総発光 PL 数の時系列を示したもので ある。本実験では壁面に付着し同一位置においてせん断力に応 じて発光する PL 並びに流体によって輸送されながら発光する PL の両者が存在していた。図中の時間の進行に依らず PL 数が 変化しない発光位相では前者が卓越し、時間的に大きく変化す る位相では後者が顕著となる。

図-13 に示すのは負の底面せん断力のピークとなる 0.625 秒 のせん断力の鉛直分布であり、図-14 はその応答として発光した 0.875 秒のときの境界層付近の BL 強度鉛直分布であり、せん断力と BL 強度の間に明らかな相関が見て取れる。

今回の実験では全発光 PL 数が少なく、定性的な憶測となる

が,発光 PL 数もまた疲労により時間と共に減少する一方で発 光数と BL 強度に何かしらの関係があるものと考える。

参考文献

Peter Nielsen;

COASTAL BOTTOM BOUDARY LAYERS AND SEDIMENT TRANSPORT 1992

Anne-Sophie Cussatlegras , Patrice Le Gal;

Bioluminescense of the dinoflagellate Pyrocystis noctiluca induced by laminar and turbulent Couette flow