Bioluminescence による衝撃流体力計測システムの開発

Bioluminescence imaging of impact pressure

北海道大学工学部土木工学科 学生員 田中康文 (Yasufumi Tanaka) 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

大型の低気圧や台風等の接近時に発達した波が、海洋構造物 前面で砕波する際,きわめて強い衝撃砕波力が瞬間的に作用し, 海洋構造物が破壊される被害が報告されている.海洋構造物の 破壊は国土保全を脅かす重要な問題であり,多くの実験や現地 観測によって衝撃砕波力の発生・発達機構の解明が長年行われ てきた.しかし,衝撃砕波力は動圧力が急変する気液混層乱流 で極めて複雑な流れ場であるため,その現象の解明には至って いないのが現状である.波浪条件のみでなく,砕波ジェットが 構造物前面に衝突する際の砕波ジェットの水面形や生成される 混入気泡や封入空気塊により,圧力応答自体が局所的に変化す ると同時に,気泡と水が混在することによる乱れの双方向への 影響等が現象を複雑にしている.また,衝撃圧自体が局所的, 瞬間的に発生し時空間に非一様であるため,従来の圧力センサ ーによる点計測では,瞬時の衝撃圧空間分布情報の取得が困難 であった.そのため,これらの情報が取得可能となれば,上述 の流体,封入空気塊,混入気泡等,各種パラメータの影響を考 慮した衝撃圧の発生・発達メカニズムを解明する重要な手がか りになると考えられる.

一方,近年,渦鞭毛藻類のいくつかの種で,液体中の圧力変 化やせん断力などの力学的な応答として発光する性質, Bioluminescence(以下 BL と略記)に関して研究がなされており, 液体内応力計測の手段としての可能性が示唆されている.本研 究は,衝撃圧力荷重に対する BL 強度や BL 継続時間等の力学的 応答特性,不確実性を明らかにし,面的流体力測定への適応性 について調べるものである.

2. 本実験で用いる渦鞭毛藻類

本実験では、渦鞭毛藻類の Pyrocystis lunura(PL)を発光源として 用いた.国立環境研究所微生物系統保存施設にて保存されてい る PL 株の譲渡を受け(NIES-609),圧力測定を行ううえで十分 な解像度となる個体数まで培養を行った.

この PL を始めとする渦鞭毛藻類の発光メカニズムは、「ルシフェリン(基質) - ルシフェラーゼ(酵素)反応」であり、圧力変化や化学的生息環境変化などの外的な刺激が加わると反応が進行し、早いフラッシュとして青色光(最大波長=474nm)が観察されることが報告されている.よって、化学的変化のない液体内において観察された BL 強度を画像計測することで力学的変化を取得することが可能となる.

3. 実験方法

本実験は,落錘型衝撃力試験機上で種々の動圧力に対する BL 強度及び BL 継続時間を画像計測を行った(図-1).この試験機



図-1 実験装置

は,電磁石により試験機上部に固定された衝撃盤を,電磁石用 整流計の電源を切ることで落下高さ H より落とし,鋼板製台座 に設置した BL 測定用耐圧容器に衝突させることで, 衝撃圧を発 生させる仕組みになっている . BL 測定用耐圧容器は,一定量の PLを混入した海水で満たし,容器底面には高感度動圧力センサ - (PCB PIETRONICS社製, ICP型, M106B)を設置し, 衝撃 盤が容器に衝突する際に発生する衝撃圧をサンプリング周波数 25kHz で計測した.電磁石を切ることで発生するトリガ信号 (5VTTL)により圧力計測を開始し,また同時に容器上部に設 置されたデジタル CCD カメラ (QIMAGING 社製 ,QICAM FAST 1394 12bit モノクロ画像, 40fps)を同期させ, 衝撃圧発生時の BL 強度分布の撮影を行った. なお,本実験で用いた CCD カメ ラは従来のものと比較して,採光能力が高く,微弱光の撮影に 適した高感度カメラであり, 蛍光などを定量的に解析する上で 最適な科学計測用カメラである.また,カメラで撮影された BL 強度分布を定量的に計測する為に, 容器設置個所に青色発光ダ イオードを設置し明るさを変化させ,その光をカメラで撮影す ると同時に,フォトダイオードでその光度を測定することで, カメラの採光校正値を与えた.

PL固有の発光特性を把握するため,実験条件を固定し,衝撃 圧試験機の落下高さを10cmとし,約110匹/cm³のPLを混入 したBL測定用耐圧容器に,衝撃圧力を計41回かけ,光度分布 測定試験を行った.

4. 計測結果と考察

図-2 は衝撃圧が発生した際の容器底面(10cm×10cm)に沈着し ている PLの発光時の輝度分布画像(100ms~200ms)であり,PL が存在する箇所でのみ発光が観察される.PL存在下での定量的 な光度測定を行うため,PL発光位置を画像処理で抽出し,本実 験のデータ解析に用いた.図-3 はその PL発光位置での平均 BL 強度とその分散値を示したものである.おおよそ,全てのケー スで同様の時系列形状であり,衝撃圧発生後,およそ 75ms~ 100ms で最大 BL強度を有し,その後,指数関数的に減衰してい る様子が観察される.衝撃圧が数 ms で発生することに対して, 発光時間が長く,載荷後の発光残像がある程度残ることに留意 する必要があるため,これらの適切な見積もりが大切である.

また,載荷履歴による BL 強度の応答特性を確認するため,同 ーの PL に対して, BL 強度が充分失われるまで,上述の衝撃試 験を繰り返し,載荷回数による BL 強度減衰を調べた(図4). 平均 BL 強度,標準偏差は,共に衝撃試験の試行初期段階におい ては,強い BL 強度を有するが,試行を重ねるごとに急激に減衰 し,試行回数 20 回を超えると微弱光を発する状態となる.

5. 衝撃圧による BL 強度変化の推定法

4章で得られた衝撃圧発生時の平均BL強度変化の特徴を以下 の式を用いて単純なモデルに表し,検討を行う.

$$F = a \cdot k \cdot \exp(-b \cdot k) \tag{1}$$

F:*BL*強度 *k*:試行回数 *a*,*b*:各試行における定数

全てのケースについてフィッティングを行い, 各係数 ab を決定 した.図-5 は, 載荷回数によるこれらの係数の変化を示したも のである.係数 b は一定であることに対して,係数 a は $a = 70 / k^{0.8}$ の近似曲線に載る形で評価することができる. 本実験ケースでのみこのモデル化を行ったが,今後は種々の動 圧力や PL 密度下での BL 強度のモデル化を行う必要がある.

6. 結論

本実験により以下の結論を得た.

- (1) PLは,衝撃試験の試行初期段階においては,強いBL強度を有するが,載荷回数が増加するに従い,大幅に BL強度低下する.
- (2) 衝撃圧による BL 強度変化をモデル化し, モデル係数である abの載荷回数による変化を見積もることが可能となった.

7. 参考文献

1)M.Dale Stokes, Grant B.Deane,Michael I. Latz, and Rohr:Bioluminescence imaging of wave-induced turbulence: Journal of gyophysical research



図-2 BL 輝度分布画像(試行一回目 40 fps)





図-5 式(1)のモデル係数 abの載荷回数による変化