Bioluminescence による流体力計測法に関する研究

Bioluminescence imaging on water mass impact pressures

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助手	正員	渡部靖憲	(Yasunori Watanabe)

1. はじめに

海洋構造物前面で波浪が砕波する時,極めて強い波力 が瞬間的に構造物に作用することは良く知られている. この衝撃砕波力に関する研究は古くから数多く行われて きたにもかかわらず,現在でもその発生発達に関するメ カニズムは明らかではなく,荒天時にはこれが原因と考 えられる深刻な被害が多数報告されている.この衝撃波 力発生発達機構の解明を困難にしている原因については, いくつか指摘されている.一つは,気体の影響である. 砕波ジェットが構造物に衝突する際に形成されるエアポ ケット,それが分裂し海中へと混入される大量の気泡に よるエアレーション効果は、水中及び構造物の圧力応答 を変化させるだけではなく新たな乱れの生成を誘発し, 現象を極めて複雑なものにしている.二つ目は,砕波時 に発生する乱れである.構造物前面では通常の砕波過程 が遮断されるため,狭い領域で強い乱れが集中すること になり,次の波浪がこの領域入射する際にその乱れに影 響を受け、前の砕波と異なる挙動を示す。この非再現的 波浪場の形成により衝撃波力もまた毎波浪で異なる複雑 なものへと変化させる.三つ目は,衝撃力自体が局所的, 瞬間的に発生する時空間的に不連続な性質を持つ点であ る.これは,上述の二点にも影響を受け,空間的に非一 様な強い局所性を持つ砕波圧を発生させるため、従来の 圧力センサーによる点計測ではこの特徴を評価し得ない.

一方,近年,微生物の発光を利用した力学計測の可能 性が試されている.この方法は,海水中に混入された多 数の植物プランクトンの力学的変化(例えば圧力変化) に応じた発光を可視化するものであり,本研究が対象と する衝撃流体力の空間分布特性を見積り得る可能性があ る.

本研究は,生物発光(Bioluminescence)の力学的応答の特性,不確実性を明らかにし,面的衝撃流体力計測への適用性について調べるものである.

2. 実験装置と実験条件

2.1 水塊の落下試験

本実験は、全面が透明アクリルで製作された上部円筒 容器(内径 10cm,高さ 30cm)、下部円筒容器(内径 10cm,高さh)、ボックス(縦 20cm,横 20cm,高さ 10cm)を組み合わせた装置で水塊の落下試験を行う. (図-1参照)

上部円筒容器の下端にはゴムシートを張り,パイプ内 を貫通するステンレス製の針でシートを破り,容積Qの 水塊を瞬時に落下させることでジェットを発生させる. ボックスの下面と上面には、それぞれ圧力センサー(PCB Piezotronics 製)を取り付け、下面圧力センサーでは落下水 塊の衝撃圧を、上面圧力センサーでは落下の際の空気圧 を周波数 5kHz でそれぞれ計測を行う.また、ボックス下 面にジェットが衝突する際の水面形の画像情報を取得す るために高速度ビデオカメラ(frame rate 1/250s)をボッ クス前面に取り付ける.

下部円筒容器の側面よりレーザー光を向かいに設置し たフォトダイオードに照射する.水塊ジェットが落下す る際にはこのレーザー光が遮断され,フォトダイオード に電圧変化が生じる.このフォトダイオードの電圧変化 から与えられるトリガー信号により圧力センサーと高速 度ビデオカメラを同時に起動し,同時刻の圧力変化と水 面形の画像情報が取得する.

本実験では,封入空気の圧縮による衝撃圧への影響を 計測するために,ボックス上面の空気孔を開けた場合と 閉じた場合で落下試験を行う.また,淡水と海水,水塊 容積Q(0.5L,1.0L,1.5L,2.0L),落下高さH(20cm, 30cm,50cm,100cm)を変化させ,計64ケースで落下試 験を行い,その際の圧力特性を調べる.(表-1参照)

2.2 Bioluminescence の光度測定試験

本実験では渦鞭毛藻類の Pyrocystis lunura (PL) (図-2 参照)を発光源として利用する.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 株の分譲を受け (NIES-609),圧力計測を行う上で十分な解像度となる個 体数を確保するまで培養を行う.

実際の落下試験は,2.1 の実験装置を利用して,上部円 筒容器に一定量の植物プランクトン(PL)を入れ,同様 に落下試験を行う.高速度ビデオカメラでボックスの底 面部より撮影を行い,ジェットが衝突する際の Bioluminescenceの光度を測定する.2.1の実験結果との照 合を行い,Bioluminescenceの力学的応答の特性,不確実 性を明らかにする.

表1 実験条件

内部流体		水、海水の2ケース
空気孔		ある場合、無い場合
<mark>落下高さ</mark>	H	20cm, 30m, 50cm, 100cmの4ケース
水塊の容積	Q	0.5L , 1.0L , 1.5L , 2.0の4ケース





図-2 植物プランクトン (Pyrocystis lunura)



図-3 衝撃圧の周波数スペクトルとその時の時系列(海水, H = 50cm, Q = 0.5L, 空気孔あり)







図-5 衝撃圧と空気圧の周波数スペクトルとその時の時系列(淡水, H = 100cm.Q = 0.5L, 空気孔なし)

図-1 実験装置



図-6 衝撃圧と空気圧の周波数スペクトルとその時の時系列(海水, H = 20cm, Q = 0.5L, 空気孔なし)



図-7 衝撃圧と空気圧の周波数スペクトルとその時の時系列(海水,H=100cm,Q=0.5L,空気孔なし)

3. 計測結果

Bioluminescence による衝撃計測の可能性を確かめる前 に,2-1 で説明した実験での衝撃力特性を予め把握する必 要がある.図-3 は,海水塊の衝撃圧の時系列とそのスペ クトルにf²(f:周波数)を乗じたもの(H=50cm,Q= 0.5L)を表している.水塊の衝突後複数の衝撃圧ピーク を伴いながら,平均圧力も上昇する典型的な衝撃圧変動 を示している.このケースのスペクトルには,10~100Hz に高スペクトル帯が存在し,1.6kHz 近傍に衝撃圧ピーク に由来すると考えられる非常に強いスペクトルを確認で きる.海水塊の衝突時には空気塊の取り込みの有無に関 わらず,例外なく程同一の周波数帯でこの衝撃圧スペク トルが存在し,この卓越周波数がユニークなものと考え られる一方(図-6,7参照),淡水を使ったケースではさ らに高周波(少なくとも 2.2kHz 以上)の衝撃圧スペクト ルが発生する.(図-4,5参照)

計測ボックス内からの空気の出入りを遮断したケース (衝撃砕波時のエントラップトエアーに対応する)では, 水質と落下速度に応じて変化する特徴が確認された.淡 水衝撃の場合,水塊の落下直後にのみ封入空気の影響が 圧力の時系列から確認できるものの,封入空気圧自体が 相対的に小さく衝撃圧への寄与は大きくない.(図-4,5 参照)また落下速度の増加に伴い,ミドルレンジのスペ クトルが高周波数側へ移動する傾向がある.(例えば, H=20cmの時は 10kHz 前後のスペクトルが,H=100cm では 100~1000Hzのスペクトルへと発達する.)海水衝 撃の場合,封入空気圧の上昇は顕著となり,その継続時 間も衝撃圧継続時間と同オーダーとなる.(図-6,7 参 照)更に衝撃圧スペクトルと封入空気スペクトルは極め て類似した形となり,海水衝撃においては空気の影響が 大きいことを表している.これら淡水と海水の封入空気 の影響の差異の原因は不明であるが,海水は衝撃時に大 量の気泡が混入するため,圧力応答が急激に変化するも のと考えている.これを明らかにするためにさらなるデ ータ蓄積が必要である.

図 10 は,落下水塊に培養した PL を紛入させ,同様な 衝撃力予備実験を行った際の計測ボックス側方からビデ オ撮影した連続画像である.部分的にではあるが,水塊 衝突後に発光する PL 群を確認する事ができる.

今後, PL の力学的応答(圧力強度,発光継続時間など)を調査し,新たな計測手段としての可能性を明確に していく.







図-9 衝撃圧ピーク値

4. 結論

本実験より以下の結論を得た.

- ・海水塊の衝突時には、空気塊の取り込みの有無に関係 なく 1.6kHz 近傍の周波帯において、衝撃圧ピークに由 来すると考えられる非常に強いスペクトルが発生する. また、淡水塊の場合は更に高周波の衝撃スペクトルが 確認される.
- ・海水塊での衝撃に対して,比較的低周波帯においては, 衝撃圧スペクトルと封入空気スペクトルは極めて類似した形となり,封入空気の影響が大きいことが認められる.
- ・淡水塊の衝撃に対する封入空気の影響は、時系列より
 落下直後においてはその影響は認められるものの、衝
 撃圧ピーク値に対する寄与は大きくない。
- ・衝撃圧に対する封入空気の影響について更にデータ蓄 積を行い,解析を行う必要がある.また,それらの解 析を踏まえ衝撃力特性を把握した上で, Bioluminescenceによる衝撃計測の可能性を確かめるこ とを今後の課題とする.









図-10 Bioluminescenceの予備実験

5. 参考文献

- 伊藤喜行・竹田英章(1967):桟橋に作用する揚圧力, 港研報告, Vol.6, No.4, pp.38-68.
- 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和(1978):水平版に働 く揚圧力に関する研究,港研報告, Vol.17, No.2, pp.3-47.
- G.N. Bullock, A.R. Crawford, P.J. Hewson, M.J.A. Walkden, P.A.D. Bird(2001) : The influence of air and scale on wave impact pressures, Coastal Eng., Vol42, pp.291-312
- M. Dale Stokes, Grant B. Deane, Michael I. Latz, and Jim Rohr(2004) : Bioluminescence imaging of wave-induced turbulence, J. Geophys. Res., Vol.109, C01004