

一般セッション | 一般セッション (第四部門：流体力学)

2026年5月16日(土) 15:00 ~ 16:15 | A会場(環境棟：2階講義室)

第4部門 (3)

座長:内田 龍彦(広島大学)

15:00 ~ 15:15

[11010] 二方向規則波浪場に置かれた円柱周辺の底面流況に関する水理模型実験とその数値解析 (シンポジウム講演概要)

*梶川 勇樹¹、越智 丈喜¹、北出 将大¹、黒岩 正光¹ (1. 鳥取大学)

15:15 ~ 15:30

[11011] 水没した橋梁周辺の流れ構造に関する基礎的研究 (シンポジウム講演概要)

*山口 拓磨¹、張 浩¹、松村 政秀¹、Yan Wang¹ (1. 熊本大学)

15:30 ~ 15:45

[11012] 橋脚周辺の水位縦断変化および流速構造のステレオPIVによる計測一下降流に着目してー (シンポジウム講演概要)

*溝口 敦子^{1,2}、小松 洸太郎¹ (1. 名城大学、2. 東北大学災害科学国際研究所)

15:45 ~ 16:00

[11013] 渦の生成に関する速度勾配テンソル場の解析 (シンポジウム講演概要)

*中山 雄行¹ (1. 愛知工業大学)

16:00 ~ 16:15

[11014] 空気衝撃波背後の微弱な放射に関する基礎的研究 (シンポジウム講演概要)

*船津 賢人¹、荻野 智也¹、市橋 智志¹、大谷 清伸²、澁澤 健二³ (1. 群馬大学、2. 東北大学、3. 茨城高専)

二方向規則波浪場に置かれた円柱周辺の底面流況に関する水理模型実験と
その数値解析（シンポジウム講演概要）
Hydraulic Experiment on Near-Bottom Flow Around a Cylinder
Placed in a Bidirectional Regular Wave Field and Its Numerical Simulation
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

梶川 勇樹（鳥取大・工） 越智 丈喜（鳥取大・院）
北出 将大（鳥取大・院） 黒岩 正光（鳥取大・工）
Yuki KAJIKAWA, Tottori University
Takeyuki OCHI, Tottori University
Masahiro KITADE, Tottori University
Masamitsu KUROIWA, Tottori University
E-mail: kajikawa@tottori-u.ac.jp

In this study, the authors aimed to clarify the near-bottom flow conditions around a circular cylinder in a bidirectional regular wave field, and conducted hydraulic experiments and its numerical simulations using a three-dimensional flow model. It demonstrated that in the bidirectional waves, the flow direction away from the cylinder is more pronounced than in unidirectional waves. Furthermore, while the three-dimensional analysis was able to reproduce the general flow conditions, challenges remained in accurately reproducing the cross-flow velocity.

1. はじめに

着床式洋上風力発電施設の基部では、波や流れの影響により局所洗掘現象が発生する。施設保護のためにも洗掘対策を実施する必要があるが、その前提として洗掘予測が極めて重要となる。従来、波のみ、あるいは波・流れ共存場における円柱周りの局所洗掘を対象とした研究は数多く行われてきた。しかしながら、従来の研究は直線水路において一方向のみの波あるいは波・流れを対象としたものであり、実海域のような多方向からの入射・流入を想定した研究は行われていない。多方向波浪場における円柱に作用する流体力に関する研究は数多く行われているものの、局所洗掘に係る円柱周りの流況や地形変化に関する研究は行われていないのが現状である。

そこで本研究では、多方向波・流れ共存場における円柱周りの局所洗掘現象の解明と予測を最終目標とし、まず二方向規則波浪場における円柱周りの底面流況の解明を目的として、固定床水理模型実験と三次元数値解析を行った。

2. 水理模型実験の概要

本研究では Fig. 1 (left) に示す多方向造波水槽を使用した。造波装置はピストン方式であり、15 枚の造波板を時系列で位置を制御することにより多様な波を造波できる。静水深を 0.30 m とし、直径 0.15 m の円柱を二方向規則波浪場内で合成波高が最大となる位置に設置した。円柱設置位置から造波装置に対して平行移動し、同じく合成波高が最大となる位置に波高計を設置した。Fig. 1 (right) に示す点において、底面から 0.025 m 上の水平方向流速を電磁流速計により計測した。各点において波高および流速を 50 Hz で 30 秒間計測し、計測データを波の周期毎に時間平均した。実験条件を Table 1 に示す。本研究では二方向規則波だけでなく、比較のため一方向規則波の実験も行った。

3. 実験結果と考察

実験結果として Fig. 2 に 1 周期分の波形（実線）を、Fig. 3 に Fig. 2 中に示される時間 $t = 0.1$ s での底面流速ベクトルをそれぞれ示す。Fig. 3 はちょうど円柱設置位置を波の峰が通過している時の状況に相当する。

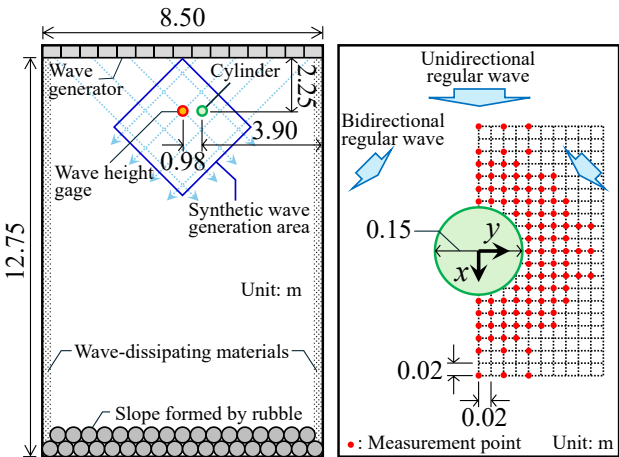


Fig. 1 Experimental wave basin (left) and flow velocity measurement points (right).

Table 1 Experimental conditions					
	Water depth h_0 (m)	Wave height H (m)	Synthetic wave height H_s (m)	Wave period T (s)	Wavelength L (m)
Unidirectional regular wave	0.30	0.073	—	1.0	1.40
Bidirectional regular wave		0.052	0.103		1.38

Fig. 2 の二方向波を見ると、合成波高が計測されているため一方向波より波高が大きい。Fig. 3 を見ると、波高が異なるため流速値の比較は難しいものの、円柱前面から側面にかけて、二方向波は一方向波よりも外向き（ y 軸プラス方向）の流れが強く表れている。これは、谷通過時も同様に見られた。このような流れが表れた原因は、円柱に対して波が斜め入射してきたことにある。この結果は移動床を想定した場合、洗掘に伴う流送土砂が、二方向波では一方向波に比べて円柱からより遠方へ輸送されることを示している。即ち、実海域のような多方向波浪場における円柱

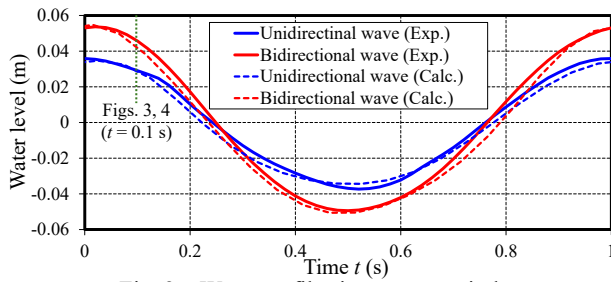
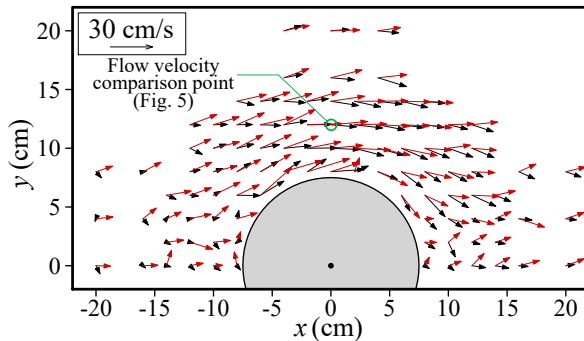


Fig. 2 Wave profiles in a wave period.

Fig. 3 Near-bottom velocity vectors in the experiments at $t = 0.1$ s. (black: unidirectional wave, red: bidirectional wave)

周りの局所洗掘では、洗掘孔の範囲が一方向波での予測範囲よりも大きくなる可能性を示している。事実、実海域での円柱周りの洗掘観測では、水中安息角よりもかなり緩い勾配で広範な洗掘孔が確認されている²⁾。高精度な洗掘予測には、多方向波浪を考慮する必要があると考えられる。

4. 三次元モデルによる実験流況の再現解析

著者らりの数値モデルにより、実験の再現解析を行った。基礎方程式には FAVOR 法を導入した三次元 RANS を使用し、渦動粘性係数の評価には RNG $k-\varepsilon$ モデルを採用した。Fig. 1 (left)中に示す合成波作成可能範囲を対象に、水平および鉛直方向格子幅をそれぞれ 0.015 m, 0.005 m として解析を行った。Fig. 2 に実験と解析（破線）による波形の比較を、Fig. 4 に二方向波での底面流速ベクトル ($t = 0.1$ s) の比較を、Fig. 5 に Figs. 3-4 中に示される円柱側面での(a) x 軸方向底面流速 u_b および(b) y 軸方向底面流速 v_b の比較をそれぞれ示す。

Fig. 2 より、解析結果は両波とも概ね実験波形と一致しているものの、二方向波での差が若干大きい。Fig. 4 より、解析による二方向波は、円柱前面から側面にかけての y 軸プラス方向の流れおよび全体的な流況について実験結果を再現できている。Fig. 5 の流速比較を見ると、(a)の u_b では一方向波および二方向波とも解析は実験結果を再現できている。特に一方向波については Fig. 2 の波形に続き、解析結果は実験値と良好に一致している。一方、(b)の v_b については差が表れた。一方向波については、実験において正負流速値の変動が表れているものの、解析結果は概ね実験結果と一致している。しかしながら、二方向波について、実験ではほぼ正の流速値となっているものの、解析では円柱位置を波の谷から峰が通過していく際 ($t = 0.5 \sim 1.0$ s) に負の流速値が表れている。この間、実験においても流速値が低下しており、解析はそれを表しているものと考えられるが、低下量が大きい。数値モデルにおける乱流モデル等の影響も考えられるが、Fig. 2 に示される若干の波形の不一致が大きな原因と考えており、今後の課題である。

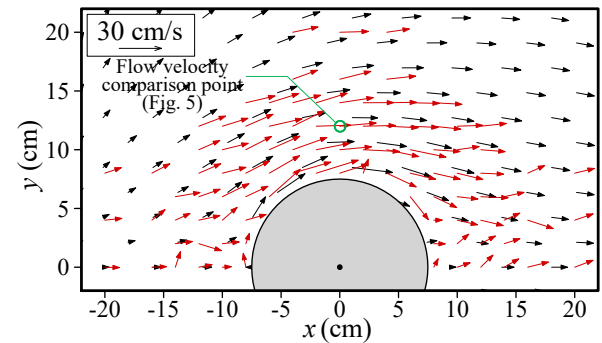
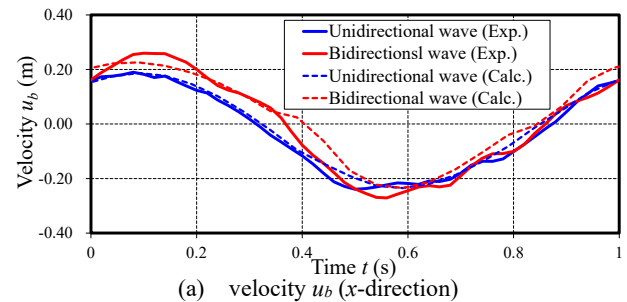
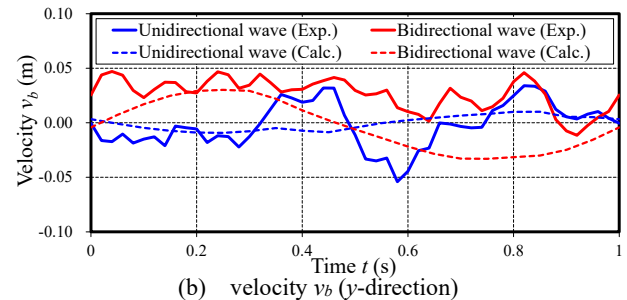
Fig. 4 Comparison of near-bottom velocity vectors of bidirectional wave at $t = 0.1$ s. (black: calc., red: exp.)(a) velocity u_b (x -direction)(b) velocity v_b (y -direction)

Fig. 5 Comparisons of near-bed flow velocities at the side of a cylinder in a wave period.

5. おわりに

本研究では、二方向規則波浪場における円柱周りの底面流況を解明するため、水理模型実験と三次元モデルによる再現解析を行った。その結果、二方向波では一方向波に比べて円柱から遠ざかる流向が強く表れること、三次元解析により概ねの流況は再現できるものの、横断流速についてはその再現性に課題が残ることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24K07683 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 梶川勇樹, 本田未依奈, 原知聡, 馬込伸哉, 武田将英, 黒岩正光: 波・流れ共存場における円柱周辺の地形変化に関する大型実験の三次元解析と高速化の検討, 土木学会論文集特集号(海岸工学), 80 巻, 17 号, 24-17192, 2024.
- 原知聡, 栗原明夫, 武田将英, 馬込伸哉, 柴田雄也, 倉原義之介, 間瀬肇, 石川和之: 実海域における没水した直立円柱周りの局所洗掘に関する現地観測, 土木学会論文集特集号(海洋開発), 81 巻, 18 号, 25-18061, 2025.

水没した橋梁周辺の流れ構造に関する基礎的研究（シンポジウム講演概要）
Fundamental Study on Flow Structure around a Submerged Bridge
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

山口 拓磨（熊本大） 張 浩（熊本大） 松村 政秀（熊本大） Yan WANG（熊本大）
Takuma YAMAGUCHI, Faculty of Engineering, Kumamoto University
Hiroshi CHO, Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University
Masahide MATSUMURA, Center for Water Cycle, Marine Environment and Disaster Management, Kumamoto University
Yan WANG, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
E-mail: bn.taku.07@gmail.com

Frequent floods exceeding the design level have caused severe damage to river-crossing bridges. This study conducted hydraulic model experiments to clarify the flow structure around submerged bridges and to quantitatively evaluate the effects of railing presence and overtopping depth on the surrounding flow. Analyses of water surface profile, time-averaged velocity and Reynolds stress demonstrate that overtopping depth and ancillary structures significantly influence the hydraulic characteristics.

1. はじめに

橋梁などの河川横断構造物の設計においては、計画出水を対象としているため、超過洪水に対する防災力が通常考慮されていない。一方、極端な気象の増加に伴い、計画規模を上回る洪水により、毎年のように橋梁上部構造や河道内の橋脚の流出被害が発生するだけでなく、周辺地域への洪水、土砂、流木災害も後を絶たない。実際、令和2年7月の豪雨では、熊本県球磨川水系において多数の橋梁が流失し、周辺地域も含めて大きな被害が生じた。このような災害の防止と軽減において、超過洪水によって橋桁まで橋梁が水没した場合の流れ構造の解明は喫緊の課題である。

水没した橋梁は、洪水の流れに大きな障害をもたらし、複雑な流れを生み出す¹⁾。大本²⁾により、水位上昇など、橋梁が異常洪水に与える影響について確認されている。また、窪田ら³⁾により、複数橋梁による橋桁・流木抵抗は急激な水位状況につながり、氾濫域の流況変化が家屋被害や人的被害を助長する傾向にあることが示唆されている。一方で、既往研究では洪水や津波による橋梁への被害を最小限に抑える方法が検討され、橋桁が流れに対する障害物となり被害を拡大するメカニズムについてはあまり議論されていない⁴⁾。本研究では、橋梁周辺の洪水の挙動メカニズムと水害リスクの解明を目指し、欄干の有無と越流水深の違いによる水没した橋梁周辺の流れ構造に着目し、基礎水理実験を実施する。

2. 実験概要

本研究は、熊本大学工学部にある全長 14 m、幅 60 cm、深さ 40 cm の可変勾配水路を用いた(Fig. 1)。橋梁模型に関しては長さ 60 cm、幅 9 cm、厚さ 3 cm の木材を用いて作成し、上流端から約 9 m 地点に設置した。実験では、欄干の有無と越流水深の違いに着目した。橋桁のみの場合を CaseA、欄干がある場合を CaseB とし(Fig. 2)、欄干付のケースでは、欄干は幅 1 mm、厚さ 1.5 cm のアルミ棒を固定し、不透過の欄干とした(Fig. 3)。また、越流水深の違いは各ケースにおいて、橋桁のみの場合を基準に初期水位から模型上部まで $H_s=0\text{cm}$ 、 1.5cm 、 2.5cm の3段階に変化させて計 6 ケースの実験を行った。水路の横断中心部でポイントゲージを用いて水位を、KENEK 社の 2 軸電磁流速計本体 (VM-802H) と L 字型センサー (VMT-200-04PLKU) を用いて流速を測定した。計測範囲に関しては、縦断方向 (X 軸) が橋梁上流側 $X=-50\text{ cm}$ から下流側 $X=50\text{ cm}$ の 1m 区間であり、鉛直方向 (Z 軸) は河床から水面まで 0.5 cm 間隔で、サンプリング時間は 20 秒、サンプリング間隔は 0.02 秒で

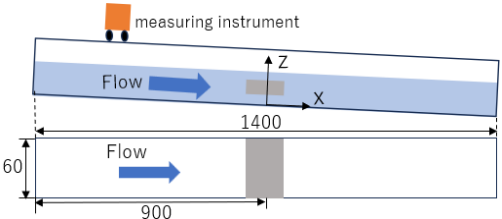


Fig. 1 Experimental water channel (cm)

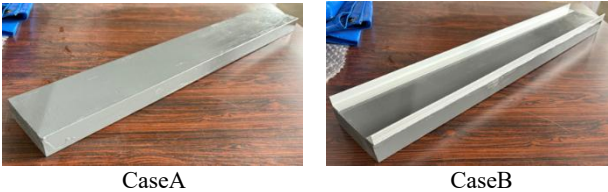


Fig. 2 Bridge model

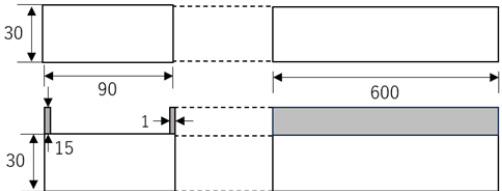


Fig. 3 Bridge model sketch (mm)

Table 1 Hydraulic conditions

流量 Q (l/s)	26.15
水路勾配 i_0	1/1000
初期水位 h (cm)	9.0
水路幅 B (cm)	60
平均流速 U_0 (cm/s)	48.4
摩擦速度 u^* (cm/s)	2.60
フルード数 Fr	0.52
レイノルズ数 Re	33,396

ある。水理条件を Table 1 に示す。

3. 結果および考察

実験データをもとに、水面形状、平均流速および乱れ特性について解析を行った。ここでは、各ケースにおける水面形状、縦断方向流速成分 U のコンター図、鉛直方向流速

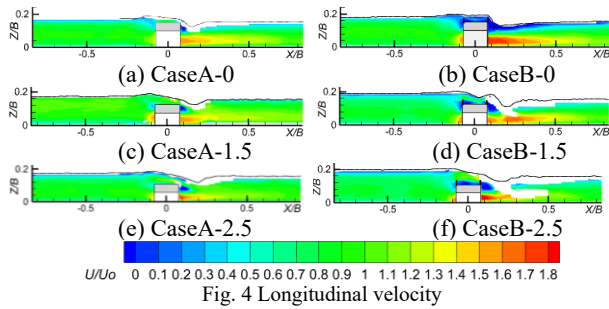


Fig. 4 Longitudinal velocity

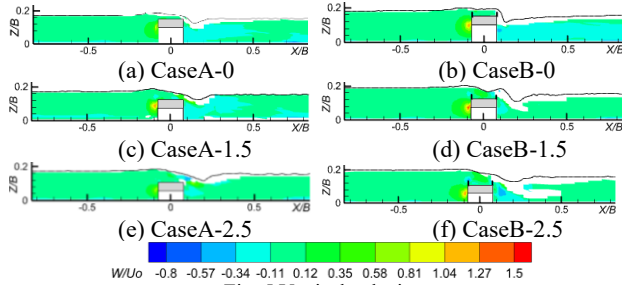


Fig. 5 Vertical velocity

成分 W のコンター図は Fig. 4, Fig. 5 に、上流側と下流側のレイノルズ応力はそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。なお、縦断方向および横断方向の座標は水路幅 B 、平均流速の各成分は等流状態における断面平均流速 U_0 、レイノルズ応力は底面せん断応力 ρu_*^2 で無次元化した。

まず、水面形状に関して、橋梁上部の水面形は欄干がない場合では連続的に低下することに対し、また、欄干がある場合では欄干前後で乱れることがわかった。桁模型付近の下流側では橋梁からの下降流により水面が大きく低下し、橋梁から距離が離れると水位は初期水位付近で一定になっていくことがわかった。上流側の水位は CaseB-2.5 では水位が最大の 11.8 cm と初期水位から 31% の水位上昇がみられた。一方、CaseA-0 では上流側の水位が最低で 10.3 cm となり、初期水位から 14% の上昇となった。

次に、平均流速に関して、縦断方向流速はすべてのケースにおいて、堰き止めによって橋梁に向かう流速の低下が、河床付近では縦断方向流速の増加が見られ河床付近の最大流速は CaseA で $U/U_0 \approx 1.4$ 程度に対して、CaseB では $U/U_0 \approx 1.8$ と約 30% 近く増大し、より広く加速域が分布する特性を示している。鉛直方向流速は、橋梁近傍で、上流側では上昇流が、下流側では下降流が発生していることがわかった。 $H_s = 0$ cm の場合、流速の最大値が CaseA の 0.38 に対し、CaseB では 1.30 と 242.1% にまで跳ね上がっている。これは、水没直後の浅い越流状態において、不透過欄干が強力な障害物として機能し、接近流の方向をほぼ完全に鉛直方向へ転換させたためと考えられる。 $H_s = 1.5$ cm では CaseA の 1.30 に対し、CaseB では 1.57 と 20.8%、 $H_s = 2.5$ cm では CaseA の 0.73 に対し、CaseB では 1.27 と 74.0% の増大率となっていて、深い水没条件下でも欄干によって鉛直方向の流速が増大させられていることが分かる。

最後に、レイノルズ応力に関して、上流側の橋梁近傍 ($X = -6.0$ cm) では、各越流水深で橋梁の橋桁底面付近からレイノルズ応力が負の値への絶対値の変化が顕著になる類似した応力分布がみられ、主流が橋梁に衝突したことによって運動量が上層へ運ばれていることが分かる。絶対値は欄干の存在および越流水深の増加によって大きくなることがわかった。また、橋梁から離れた地点 ($X = -50$ cm) での乱れによる運動量輸送の特性は越流水深が大きくなることによ

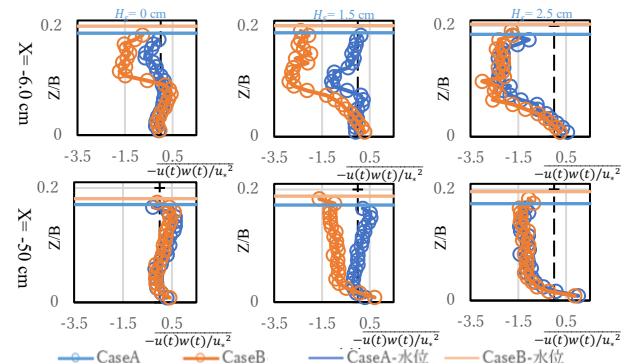


Fig. 6 Distribution of Reynolds stress in the upstream reach

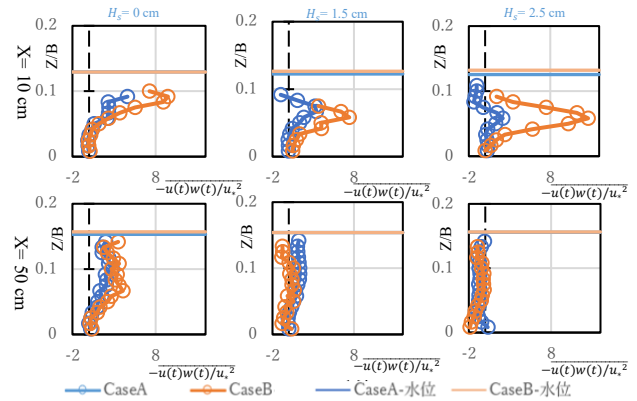


Fig. 7 Distribution of Reynolds stress in the downstream reach

て下層へ向かうものから上層へ向かうものへと変化することがわかった。下流側では、ほとんどのケースでレイノルズ応力の大部分は正の値を示しており、運動量が下層に運ばれていることが分かる。橋梁近傍 ($X = 10$ cm) では河床から水深中央に向かって絶対値が大きくなったり、橋梁から離れた地点 ($X = 50$ cm) では値が 0 へ近づいたりともケースで類似した分布特性を持っていることがわかった。

4. 結果および考察

本研究では、水没した橋梁周辺の流れ構造に関する基礎水理実験を実施した。実験結果より、欄干の存在や越流水深の増加は災害リスクの増加が多岐にわたって考えられることがわかった。今後、実験ケースを増やし、欄干や越流水深が流れ構造に与える影響について、より詳細に検討する予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 24K00971 助成を受けた。

参考文献

- 1) 張 浩：四万十川流域における沈下橋の防災と維持管理技術の開発に関する研究，河川基金助成事業成果報告書 2016-5211-064, 2018.
- 2) 大本照憲，岩本滉矢，宇根拓孝，平川隆一：令和 2 年 7 月球磨川水害における中州および橋梁が洪水流に与えた影響，木学会論文集 B1(水工学)，Vol.77, No.2, I_445-I_450, 2021.
- 3) 窪田利久，柏田仁，井上隆，二瓶泰雄：三次元河川流・氾濫流一体解析法に基づく令和 2 年球磨川洪水における橋桁抵抗影響評価，木学会論文集，Vol.80, No.16, 23-16157, 2024.
- 4) 土木学会地震工学委員会：橋梁の対津波・対洪水設計に関する研究小委員会・活動報告書 2020.11.

橋脚周辺の水位縦断変化および流速構造のステレオ PIV による計測 ～下降流に着目して～（シンポジウム講演概要）

Stereo PIV Measurements of Longitudinal Water-Surface Variations and Flow Structures around a Bridge Pier with Focus on Downflow (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

溝口 敦子（名城大・理工/東北大災害研） 小松 洸太郎（名城大・理工）
Atsuko MIZOGUCHI, Meijo University/Tohoku University
Kotaro KOMATSU, Meijo University
E-mail: atsu@meijo-u.ac.jp

Bridge piers generate a downflow in front of the pier, which plays an important role in the initiation of local scour. In this study, laboratory experiments were conducted to investigate the relationship between free-surface variations and the downflow structure around a bridge pier under both subcritical and supercritical flow conditions. The flow field around the pier was measured using stereo PIV while the longitudinal water-surface variation upstream of the pier was recorded. The present paper reports these observations as a measurement case focusing on the relationship between longitudinal water-surface variations and the flow structure around a bridge pier.

1. はじめに

橋脚周辺では、橋脚前面に形成される下降流およびそれに伴う馬蹄渦（horseshoe vortex）が、局所洗掘の主要因の一つとして知られている。接近流は橋脚前面で停滞し、圧力上昇とそれに伴う下向き圧力勾配により下降流が発生する。この下降流は床面付近で側方流や上流向きの流れへと偏向し、橋脚基部を取り囲む馬蹄渦系を形成する。これらの流れ構造は橋脚周辺の河床せん断応力を増大させ、橋脚周辺の洗掘孔の形成および発達に大きく寄与することが指摘されている。また、洗掘の進行に伴い、これらの流れ構造も変化することが知られている。しかしながら、橋脚前面に形成される下降流の発生領域や強度、およびそれらの洗掘孔発達に伴う変化は、十分な計測データが蓄積されているとは言えない。例えば洗掘孔の進展による流れの変化は最近ステレオ PIV を用いて計測されている²⁾が、水面変化とともに整理された情報はほぼないに等しい。

本研究では近年の橋梁被災のうち橋脚周辺の局所洗掘現象に着目し、周辺河道に関わる水位縦断変化と洗掘孔に関わる橋脚前面の流れ構造を調べた。これまで橋脚前面における下降流の発生位置や鉛直方向の影響範囲について接近流速などの影響が指摘されているものの、自由水面の応答との対応関係や、洗掘の進行に伴う流れ構造の変化については十分に整理されていない。ここではそれらの整理を目指して、まず、橋脚周辺の水位縦断変化と流速構造の関係に着目し、常流および射流条件下における橋脚前面の下降流構造を水路実験により計測することにした。本概要は一計測事例の報告となるが、水面変化と下降流構造を整理し、橋脚周辺流れの特徴について示す。

2. 実験方法

（1）実験装置

Fig.1 に示すように、実験は、長さ 10m、幅 0.2m の可変急勾配水路に三河珪砂 3 号および 6 号を張り付けた固定床を敷き橋脚を設置して行った。橋脚模型は小判型の断面で作成し、水路下流端から 3.4m の水路中央に設置した。Fig2 のように LaserSheet を入れ、側面から完全同期した高速度カメラ（カトウ光研製 K5）で撮影した動画を用いてステレオ PIV を実施した。

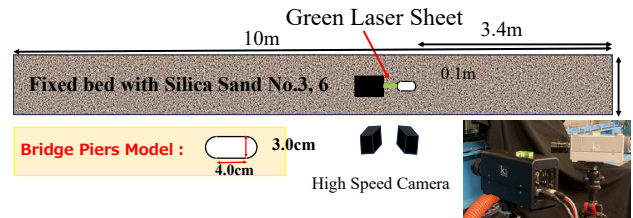


Fig.1 Experimental Set Up

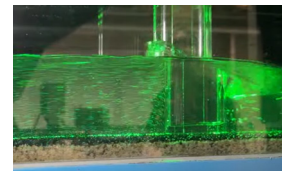


Fig.2 Laser Sheet and Pier Model

Table.1 Hydraulic conditions of the experimental case

Bed Slope	Q(m ³ /s)	Case	Fixed Bed covered by Silica Sand No.3				Fixed Bed covered by Silica Sand No.6			
			H ₀ (m)	U ₀ (m/s)	Fr	Re=U ₀ D/v	H ₀ (m)	U ₀ (m/s)	Fr	Re=U ₀ D/v
1/200	0.003	CaseA1	0.036	0.42	0.71	21389.7	0.027	0.55	1.07	32193.8
	0.0055	CaseA2	0.051	0.54	0.77	23037.2	0.041	0.68	1.07	32177.5
	0.008	CaseA3	0.064	0.63	0.79	23726.6	0.052	0.77	1.08	32481.8
	0.003	CaseB1	0.028	0.54	1.05	31374.5	0.022	0.70	1.52	45576.4
1/100	0.0055	CaseB2	0.039	0.70	1.13	34001.9	0.031	0.89	1.61	48195.3
	0.008	CaseB3	0.049	0.82	1.18	35524.1	0.039	1.01	1.63	48880.0
	0.003	CaseC1	0.022	0.67	1.43	42765.9	0.018	0.83	1.96	58760.5
	0.0055	CaseC2	0.037	0.74	1.23	36983.7	0.025	1.10	2.21	66408.7
1/50	0.008	CaseC3	0.039	1.03	1.66	49832.2	0.033	1.23	2.17	65060.9

（2）実験条件および計測事項

実験では、ポイントゲージによって橋脚周辺の水位とステレオ PIV によって流速を計測した。水位計測は Table.1 に示すように、底面は三河珪砂 3 号、6 号珪砂（平均粒径 2.1mm、0.21mm）を張り付けた固定床を使用し、流量、水路勾配をそれぞれ 3 パターンとする条件下で行った。3 号珪砂の固定床では橋脚前面の下降流を計測するステレオ PIV を、加えて CaseA1, C1 に限定し計測断面を横断方向にずらした計測も行った。

3. 計測結果

（1）水位計測結果

Table.1 からわかるように 3 号珪砂固定床を用いて今回用いた流量通水条件下では、勾配 1/200、1/100 と 1/50 がそれ

それぞれ緩勾配，急勾配となる．本実験条件では水路幅の15%の橋脚を置いたため，流水断面の阻害率が高い．ただし，勾配によって橋脚モデルを置いたときの水面の変化が大きく異なり，Fig.3 に示すように緩勾配となる1/200 では全ケース上流側の広い範囲で水深が大きくなり，橋脚下流との水位のギャップができる．その一方で，急勾配条件である1/100 や1/50 では水位の堰上げが橋脚直上流に限られた．加えて勾配1/50 は直前まで水位がせきあがらず流速が大きいため橋脚前面で水深以上に水面が堰上がりケースによっては碎波のような現象も見られた．橋脚脇の水位縦断形状も含めた計測例をFig4 に示すと，緩勾配である1/200 のケースでは橋脚脇に大きな水面勾配ができる結果となった．

(2) 流速のステレオ PIV 計測結果の例

ステレオ PIV で計測した結果の一部を Fig6 に示す．今回の計測は4000fps で撮影した動画を用い各時間の二次元流

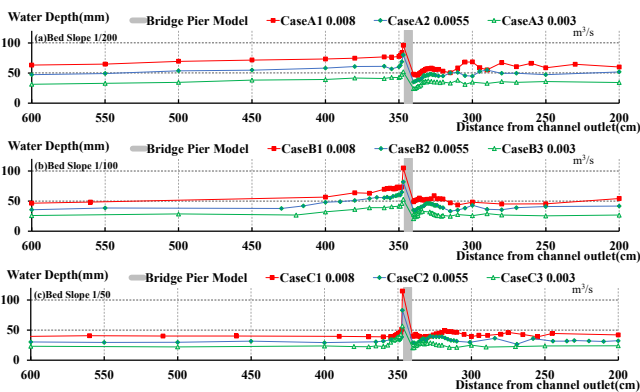


Fig. 3 Water Depth Variation along the Center Line of Channel

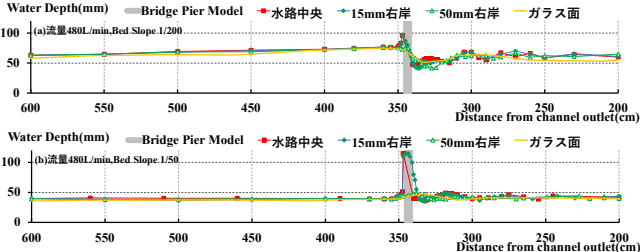


Fig. 4 Variations in Water Depth Downstream

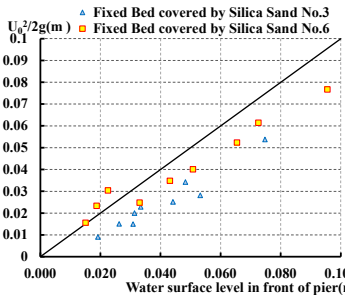


Fig. 5 Relationship between Mean Velocity Head and Water Surface Elevation at the Front of a Pier

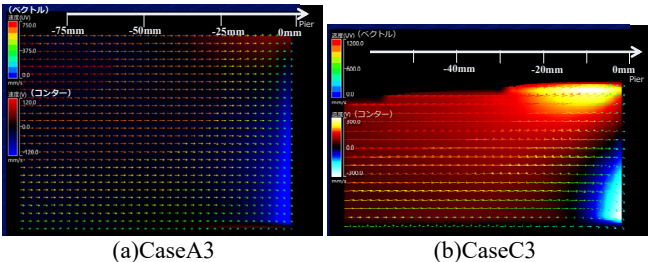


Fig. 6 Velocity Vector along the centerline in front of pier

Table.2 DownFlow Condition

Case	下方流速領域高 (mm)	最大下降流速 (mm/s)	Case	下方流速領域高 (mm)	最大下降流速 (mm/s)
CaseA1	36	-127	CaseC1	27	-247
CaseA2	50	-157	CaseC2	16	-207
CaseA3	54	-174	CaseC3	19	-282
CaseB1	28	-134			
CaseB2	43	-135			
CaseB3	56	-180			

速分布を算出しており，ここでは時間平均流速分布を結果例として示す．Fig6 におけるベクトルの色は三成分含めた流速絶対値，背景のコンターは鉛直上向き成分の大きさを表す．これらの図から，今回の計測で橋脚前面の下降流を捉えることができたと言える．また，緩勾配の三号珪砂固定床 CaseA シリーズでは橋脚上流側の広い範囲で水位が堰上げられ流速は遅くなり，橋脚前面で下方に向かう流速も遅いものの水深方向に広い領域で現れる．一方，急勾配のケースは流量が大きくなると橋脚の直上流で水路表面付近は鉛直上向きの流れが強く表れ下方に向かう領域が水深方向には狭くかつより速い結果となった．両ケースともに上方に向かう流れは水深が小さいケースで限られた領域でしか見られないのも特徴的であった．

4. 考察

本実験でも橋脚に流れがぶつかると，上方と側方に橋脚をよける流れとともに流れが強い下降流が発生する現象が確認された．ある程度水深が大きくなると鉛直上向きの橋脚前面では橋脚をよける流れが発生するが，表面近くの橋脚前面にぶつかり水面がせりあがる領域と下降流が生じる領域は分かれる．この領域境界位置と時間平均流速の鉛直下向き成分の最大値を実験結果から読み取りまとめたのが Table2 である．通常，下降流の領域は橋脚直径に依存すると言われているが，今回は緩勾配と急勾配では異なる結果となった．これは，Fig4 の例に示した周辺水面変化の違いが生む流れの特徴が関係すると考える．特に，緩勾配では上流側の水位の堰上げにより橋脚側方で水面勾配がきつくなり流速は加速するため側方の河床が大きく掘られるはずである．局所洗掘を議論する際にはこうした水路の特徴による変化を考慮したうえでの流れの検討が必要になる．

5. 結論

橋脚洗堀は，下降流と馬蹄形渦と深く関連していることが知られている．本研究では，これまであまり着目されていなかった常流・射流条件が橋脚洗堀に及ぼす影響を調べる第一歩として，水路内に橋脚を入れたときの状況と橋脚前面に合われる下降流について調べた．その結果，緩勾配では急勾配と異なる下降流領域を持つ結果となった．洗堀の進行に伴う水位堰上げ解消現象と下降流の関係など今後詳細を調べる予定である．

謝辞：本研究の一部は，河川財団の河道研究プロジェクト（助成番号 2024-8111-002，代表者：溝口敦子）および JSPS 科研費（24K01136，代表：溝口敦子）の助成を受けて実施した．ここに記し謝意を表する．

参考文献

- 1) Bruce W. Melville: Pier and Abutment Scour: Integrated Approach, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol.123, No.2, 1997.
- 2) Ulrich Jenssen, Michael Manhart: Flow around a scoured bridge pier: a stereoscopic PIV analysis, *Experimental in Fluid*, Volume 61, article number 217, 2020.

渦の生成に関する速度勾配テンソル場の解析（シンポジウム講演概要） An Analysis of Velocity Gradient Tensor Fields where a Vortex is Generated or Generates (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

中山 雄行（愛工大・工）
Katsuyuki NAKAYAMA, Aichi Institute of Technology
E-mail: nakayama@aitech.ac.jp

This study presents an analysis method to investigate geometrical characteristics of the velocity gradient tensor field around/inside a vortex. It applies theory of local flow geometry that defines the Galilei invariant coordinate system associated with the swirl plane and elliptic vortical flow geometry. An analysis of vortices in homogeneous isotropic turbulence shows that they are generated in a region where two shear tensor components support swirling and that they generates uniform strain and maximum shear components regions.

1. はじめに

渦は、気象・海洋・太陽、或いは昆虫等の非常に広範囲なスケールでの自然現象から多様な工学の分野に関わる。その渦生成のメカニズムは、乱流や対象とする流れの領域の特性や条件等により異なるが、工学分野においてその発生・生成のコントロールは必ずしも容易ではない。渦流れの特性や圧力極小等の渦特有の主要な性質は、渦中の速度勾配テンソル $\nabla \mathbf{v}$ の分布により定められる。このとき、渦が生成する領域はどのような速度勾配テンソル場であるか、或いは渦が生成した場合はこの場からどのような強さの渦が形成され、独自の $\nabla \mathbf{v}$ の場を形成するか、というメカニズムがそれぞれの流れの場で解ると、渦が生成する領域の予測・評価や生成後の流れの特性の評価において有効である。渦周辺の流れに応じた渦構造の特性は、渦モデル等を仮定した上で解析されているが¹⁾、ローカルトポロジーの理論を用いると、モデルを仮定しない現実的な渦、即ち実際に観測された渦の旋回平面や楕円方向を特定し、本平面上の $\nabla \mathbf{v}$ 等の分布特性を調べることが可能である²⁾。

そこで、本研究では、流れの中で生成した渦とその周囲の $\nabla \mathbf{v}$ の場の特性を解析する手法を検討し、一様等方性乱流のDNS (Direct Numerical Simulation)において乱流渦の特性を解析することを目的とする。

2. ローカルトポロジーの物理量と渦空間

渦領域は、ローカルトポロジーにおける流れの旋回有無とその強さを表すswirlity φ ³⁾が正である領域として同定することができる。このとき、 $\nabla \mathbf{v}$ は複素固有値 $\varepsilon_R \pm i\varphi$ を有し、複素固有ベクトル $\xi_p \pm i\eta_p$ の ξ_p , η_p により定義される平面がローカルトポロジー上の旋回平面である。 ξ_p , η_p は、これらが直交するように設定することができ、渦流が非軸対称・楕円型軌道である場合は ξ_p , η_p がその長短軸となる。 ξ_p , η_p , $\xi_p \times \eta_p$ に平行な正規直交基底により座標系を定義すると、これは旋回平面また楕円軌道の長短軸に基づくガリレイ不変の渦空間 (x_i) 座標系となる。非圧縮性流体の場合、この座標系における $\nabla \mathbf{v} (\mathbf{A} = [a_{ij}] = [\partial v_i / \partial x_j]; i, j = 1, 2, 3)$ は以下の様に表される³⁾。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \varepsilon_R & \alpha\varphi & \omega_2 \\ -\varphi/\alpha & \varepsilon_R & -\omega_1 \\ 0 & 0 & -2\varepsilon_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ε_R はローカルトポロジーにおける半径方向速度成分の固有値の相加平均に相当し、 α は渦流対称性、 ω_i は渦度ベクトル成分である。

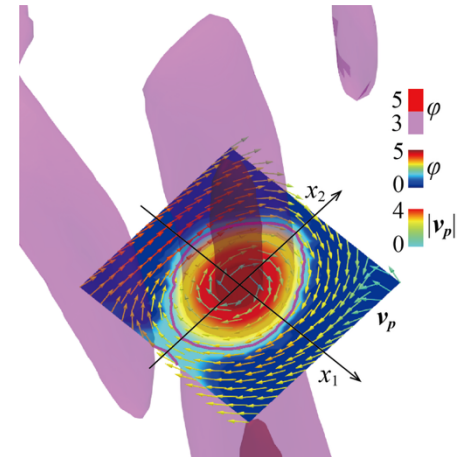


Fig. 1 A vortical region and swirl plane represented by contours of φ , and vortical flow $\mathbf{v}_p$ and line where $\varphi = 2$ in the plane.

3. 解析法

本解析は、速度場における $\nabla \mathbf{v}$ よりswirlity (φ)を求めて渦領域を同定し、更にこの極大点から渦中心を定めて旋回平面また渦空間座標系を定義する (Fig. 1 参照)。次に本平面上の $\nabla \mathbf{v}$ 成分を求め、これらを渦空間座標系の基底を用いて座標変換を行い、渦の楕円軌道に関連付けた $\nabla \mathbf{v}$ の成分に変換する。

本座標系にて旋回平面上の渦コア（中心）領域内外の $\nabla \mathbf{v}$ 場の分布特性を調べることにより、渦の外部の $\nabla \mathbf{v}$ 場の特性が解り、また渦内部の場と比較することにより、渦自身が形成する速度勾配テンソルの特性を特定することができる。

4. 乱流渦における解析と考察

一様等方性乱流のDNSにて本解析を行う。擬スペクトル法により求めたテイラーレイノルズ数 Re_λ 約35、またコルモゴロフスケール η 約0.012における速度場において $\nabla \mathbf{v}$ より φ を求めて渦領域を同定し、 φ の1階導関数とヘッセ行列からこの極大点を求めて渦中心を定め、渦中心の渦空間座標系にて有限規模の渦の旋回平面を定める。前述した様に本平面上の $\nabla \mathbf{v}$ 成分を算出し、これらを渦中心における渦空間座標系の成分に変換し、渦の楕円軌道に関連付けた $\nabla \mathbf{v}$ の成分を評価する。

同定した一つの渦について、渦領域と一つの旋回平面を φ のコンターにて表したものをFig. 1に示す。旋回平面上では渦流 $\mathbf{v}_p$ 、また $\varphi = 2$ の等値線も併せて示す。本図の旋回平面上における渦空間座標系に変換した $\nabla \mathbf{v}$ のテンソル成

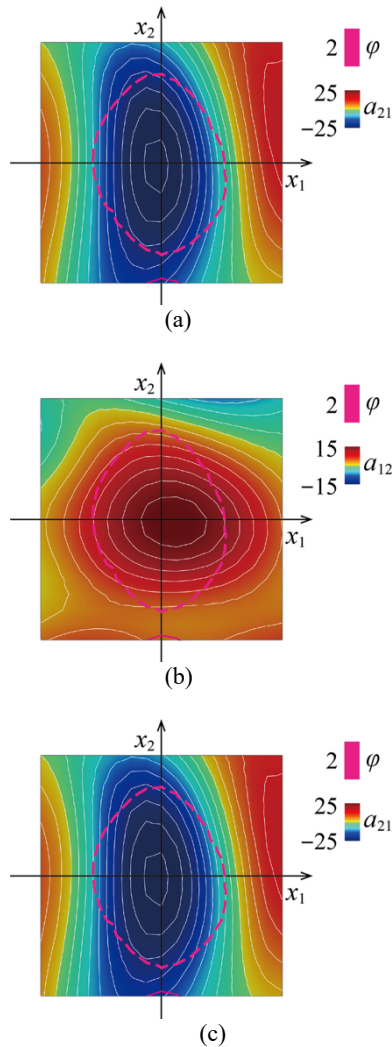


Fig. 2 Contours of (a) a_{11} , (b) a_{12} , and (c) a_{21} components in swirl plane in a vortex, with bold dot line where $\varphi = 2$.

分 a_{11} , a_{12} , a_{21} のコンターを Fig. 2 に示す. 図中の太鎖線は $\varphi = 2$ の等値線である. 渦領域内では, 半径方向速度や歪み成分に関わる成分 a_{11} が一様な分布に変化されていることが解る. a_{12} , a_{21} は渦の旋回に関わる成分であるが, 渦コア領域がこれらの成分の極大領域になっている.

渦中心周りの半径 $r = 0.5\eta \sim 5\eta$ における a_{21} の統計的な分布を Fig. 3 に示す (75 点の渦中心). a_{21} は渦中心周りで最も強くかつ一様な分布をし, 半径が大きくなるに従って値が小さくなると共に波数 2 の周期性があることが解る. これより, 本成分の主要な分布特性は二次形式で表すことができると考えられる.

また, 渦中心の $a_{21}(=\varphi/\alpha)$ と $r = \eta, 4\eta$ における a_{21} の結合確率密度関数(JPDF)を Fig. 4 に示す (約 106000 点の渦中心). 渦中心近傍における a_{21} は, 中心の値に比例しほぼ同等の値であるが, 半径が大きくなると中心の φ/α に対して値が半分以下になり, また符号が変わる領域もある. この結果は, 本乱流における渦中心のこのせん断・回転成分は, 渦領域周辺よりも 2 倍以上の強さになることを示している.

5. 結 言

swirlity と渦空間座標系を用いた渦内外領域の速度勾配テンソルの解析は, 渦の生成によりどのような速度勾配テン

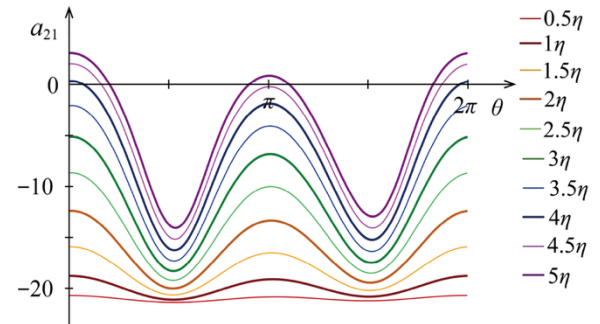


Fig. 3 Statistical distribution of a_{21} in swirl plane around a vortex center at radius $r = \eta - 5 \eta$.

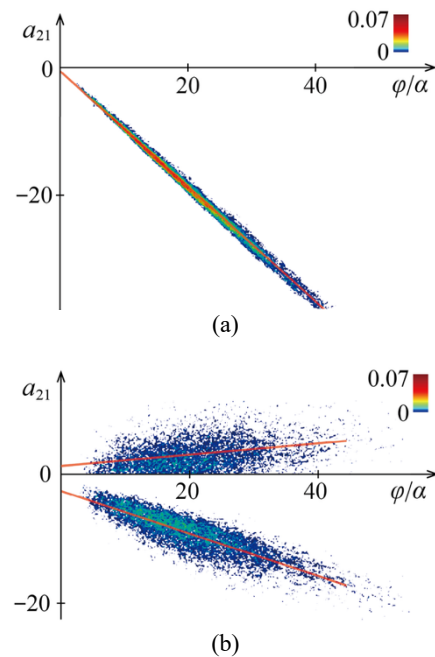


Fig. 4 JPDF of φ/α and a_{21} at $r =$ (a) η and (b) 4η .

ソル場が形成され, 外部に対する各成分の強さや分布の幾何学的特性の変化を分析することができる. また, 渦が生成する速度勾配テンソル場の条件の評価にも有効であると考えられる.

6. 謝 辞

本研究の一部は, 東北大学流体科学研究所における公募共同研究(CP04APR25, J25I037), 核融合科学研究所における公募共同研究(NIFS25KISC019), JSPS 科研費 JP25K07589 の助成の下で行われた.

参考文献

- 1) A. Prochazka and D. I. Pullin: Structure and Stability of Non-symmetric Burgers Vortices, *J. Fluid Mech.*, 363, pp.199-228, 1998.
- 2) K. Nakayama: Characteristics of Formation of Vortical Structure in Homogeneous Isotropic Turbulence", *22nd Int. Conf. Fluid Dyn.*, pp. 1170-1171, 2025.
- 3) K. Nakayama: Topological Features and Properties Associated with Development/decay of Vortices in Isotropic Homogeneous Turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 014701, 2017.

空気衝撃波背後の微弱な放射に関する基礎的研究（シンポジウム講演概要） Fundamental Study of Weak Radiation behind Air Shock Waves (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

船津 賢人（群馬大院理工） 荻野 智也（群馬大院理工・院）
市橋 智志（群馬大院理工・院） 大谷 清伸（東北大・流体研） 澁澤 健二（茨城高専）
Masato FUNATSU, Gunma University
Tomoya OGINO, Gunma University
Satoshi ICHIHASHI, Gunma University
Kiyonobu OHTANI, Tohoku University
Kenji SHIBUSAWA, Ibaraki National College of Technology
FAX: +81-277-30-1509
E-mail: masato.funatsu@gunma-u.ac.jp

In our laboratory, the characteristics of radiation behind air shock waves have been studied systematically by using a diaphragm-type shock tube. In previous studies, we generated a shock wave with an incident shock Mach number of approximately 5 and analyzed the radiation behind the reflected shock wave by using a high-speed video camera. This radiation was high intensity and varied according to Mach number. In this study, we generated a shock wave with low Mach number and focused on weak radiation to analyze the fundamental characteristics of radiation from weak to strong.

1. はじめに

本研究室では、衝撃波背後における放射特性の解明を目的として、隔膜式衝撃波管を用いた実験的研究を系統的に行っている。以前の研究¹⁾²⁾において、入射衝撃波マッハ数と全放射強度値の関係を明らかにした（図1）。また、入射衝撃波マッハ数が高い領域（図1の赤領域）に対して狭帯域フィルターを用いた分光計測を行い、放射に窒素と酸素が寄与することがわかった。一方、低い入射衝撃波マッハ数における放射に着目した研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、低い入射衝撃波マッハ数（図1の青領域）に着目し、 $M_s = 4.5, 4.0$ の衝撃波を発生させた。狭帯域フィルターを用いて放射計測し、放射に寄与する化学種を推定し考察した。

2. 実験装置および実験方法

衝撃波管は内径80 mmであり、高圧力室（長さ1,000 mm）と低圧力室（長さ4,000 mm）から構成される隔膜式衝撃波管である。駆動気体にHe、試料気体には乾燥

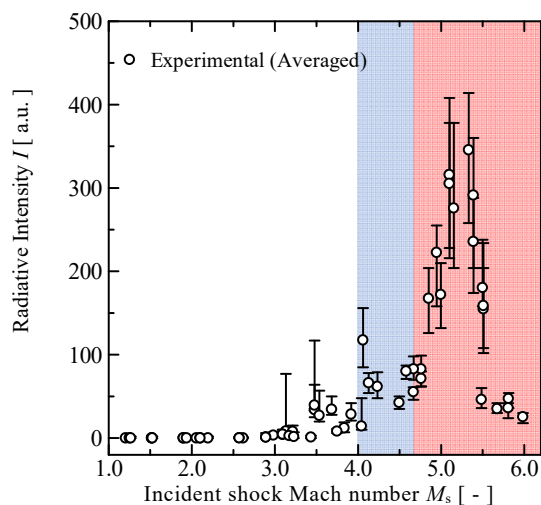


Fig. 1 Relationship between radiative intensity and incident shock Mach numbers¹⁾

空気（体積比率 $N_2 : O_2 = 79 : 21$ ）を用いた。また、隔膜はPET (Polyethylene Terephthalate) フィルムを使用した。計測部には2つの圧力センサーを低圧力室の管端から440 mm位置、100 mm位置に設置し、それぞれチャンネル1、チャンネル2とした。衝撃波背後の放射は、衝撃波管側面に設置した観察窓（直径10 mm）より、高速度ビデオカメラを用いて観察した。本研究では5種類の狭帯域フィルターを用いた。代表的なフィルターであるMC650は中心波長648.75 nm、半値全幅12.50 nmであり窒素の原子線に対応している。

3. 実験結果および考察

MC650の放射強度分布の時間変化から、 $M_s = 5.1^2)$ 、4.5の放射は反射衝撃波通過後に観察され放射が反射衝撃波背後で生じていることがわかる。また $M_s = 5.1^2)$ では観察窓全体で放射がみられ $M_s = 4.5$ では斑模様状で観察された。 $M_s = 4.0$ では放射はほとんど観察されない。放射強度値は入射衝撃波マッハ数の減少にともない減少しており、これは入射衝撃波マッハ数の減少により衝撃波背後の温度が低下したためと考えている。酸素原子線に対応するMC780においても入射衝撃波マッハ数の減少にともない放射強度値が減少している。また $M_s = 4.0$ では放射がほとんど観察されない。これらのことから、 $M_s = 4.0$ では酸素分子や窒素分子の解離が生じず、それに由来する酸素原子や窒素原子の放射は生じていないと考えられる。

4. まとめ

$M_s = 4.5$ では斑模様状の放射がみられ、 $M_s = 4.0$ では放射は観察されない。 $M_s = 4.0$ では分子の解離が生じず、それに由来する原子の放射が生じていないと考えられる。

参考文献

- 1) Suzuki, T., et al.: Experimental Study of Emissions behind Air Reflected Shock Waves, *Proc. Sympo. Shock Waves in Japan*, (2012), 4 pages (in Japanese).
- 2) Aoki, S., et al.: Radiation Measurements behind Reflected Air Shock Waves with Narrow Band-pass Filter, *Proc. Sympo. Flight Mechanics and Astrodynamics*, (2012), 4 pages (in Japanese).