

# 数値流体解析と煙風洞を用いた二箱桁断面橋梁における耐風安定性の検討

Computational Fluid Dynamics Analysis and Smoke Wind Tunnel Test for Aerodynamic Stability of 2-box Girder Section

川崎 貴之\*・平野 廣和\*\*・佐藤 尚次\*\*\*

Takayuki KAWASAKI, Hirokazu HIRANO and Naotsugu SATO

\*修士(工学) 東海旅客鉄道(株)(〒108-8204 東京都港区港南 2-1-85, 研究当時: 中央大学大学院)

\*\*工博 中央大学総合政策学部 教授 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

\*\*\*工博 中央大学理工学部 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

To long span bridges, 2-box girder cross section has been suggested for economic advantage and aerodynamic stability. It is expected to apply computational fluid dynamics (CFD) to develop this cross section. However, result of CFD sometimes differs from wind-tunnel test's one for complicated flow fields. In this paper, the difference of the aerodynamics forces and the flow field by the cross section shapes is calculated by using CFD. Also, flow fields of 2-box girder with various attachments like handrails are examined by smoke wind tunnel. So, one of the purposes is to confirm the effectiveness of CFD by comparing smoke wind-tunnel test. Another one is to clarify influence of various attachments for wind stability.

**Key Words:** CFD, smoke wind tunnel test, 2-box girder, flow field

## 1. はじめに

橋梁に用いる材料強度の向上, 新たな制振機構の開発などに代表される新技術の蓄積によって, 長大橋さらには超長大橋の架設が可能となってきている. この実現のためには, 従来よりも高い耐風安定性と経済性を両立した長大・超長大橋梁の断面形状が求められることになる.

そこで, 明石海峡大橋を超える規模の超長大橋の検討において, 経済性・耐風性に優れる桁断面として, 矩形断面を並列させ両端にフェアリングあるいは開口部にセンターバリアを付加した二箱桁断面が提案されている. また, 長大・超長大橋の耐風安定性断面の開発には, フラッター性能の向上が必要不可欠な課題である. フラッターとは, 発散型現象であり直接構造物の破壊につながる現象である. フラッター性能の向上に関しては, 従来から断面形状やガイドベーン, センターバリア等の付加物の種類をパラメータとした風洞実験による検討が行われてきた<sup>1)~4)</sup>.

一方, 計算機性能の向上に伴い数値流体解析(以下, CFD(Computational Fluid Dynamics)とする)が大きな進歩を遂げ, 今後も更なる解析技術の発展が見込まれており, 一箱桁橋を対象にした静的空気力係数や非定常空気力係

数は, 概ね実験値と整合した CFD 結果が報告されている<sup>5)</sup>. しかし, 二箱桁断面を対象にした研究では, 流れの干渉により複雑な流れ場となることから, 風洞実験結果と CFD が一致しない場合が報告されている. このため, 流れの干渉が空力特性に与える影響については, 十分な検討とこの現象の解明が必要であると指摘されている<sup>6)</sup>. このようなことから, CFD と煙風洞などによる流れ場の比較を行い, 可視的にフラッター性能向上のメカニズムを検討している研究は少ないのが現状である.

ところで, 実橋梁には, 手すり, 中央高欄, メンテナンスのための検査車レール等の付加物がある. Jones ら<sup>7)</sup>は, これらの付加物は橋梁断面に比べてその面積は小さいものの, 橋桁の空気力特性に大きな影響を与える可能性があるとして報告している. 数値流体解析でこれらの断面を対象にする場合, 付加物まわりにさらに細かい要素分割が必要になる. そのため, これまで CFD を実橋梁断面に適用した事例<sup>8)</sup>は少ない. Sarwar, 石原ら<sup>9)</sup>は LES モデルを用いた 3 次元数値流体解析を行い実橋梁断面の空力特性を検討しているが, 未だ計算面での制限は大きく, 一般の実務者が自由に採用できないのが現状である.

このような背景から, 本研究では二箱桁断面橋

梁を対象に3次元数値流体解析を行い、耐風安定化部材の有無による静的空気力や流れ場の相違等を定量的・可視的に評価する。さらに、基本断面模型と高欄などの付加物を考慮した実橋梁断面模型で煙風洞可視化実験を行い、CFDと煙風洞実験の流れ場を比較し、CFDによる流れ場の再現性を検証する。そして、基本断面と実橋梁断面まわりの流れ場を比較し、微細な付加物の影響を検討することで、振動の発生原因の特定や耐風性能の向上要因を明らかにすることを目的とする。

## 2. 解析概要

### 2.1 基礎方程式

流れ場の支配方程式は、LESによりフィルターをかけられた非圧縮 Navier-Stokes 方程式を用いる。フィルターをかけた非圧縮流れの運動方程式と連続の式は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

ここでSGS応力 $\tau_{ij}$ に対して、分子粘性あるいはレイノルズ応力に対する渦粘性との類似から、渦粘性近似を導入する必要がある。そこで本研究ではSmagorinskyモデルにより求める。なお、 $C_s$ はこのモデルにおいて与えるべき唯一の無次元定数であって、Smagorinsky定数と呼ばれている。

$$\tau_{ij}^a = -2\nu_t \bar{D}_{ij} \quad (3) \quad \nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{D}| \quad (4)$$

### 2.2 解析手法

数値流体解析には、丸岡ら<sup>10)</sup>が提案しているIBTD/FS有限要素法を適用する。これにより、運動方程式(1)はIBTD法、連続式(2)はFS法により離散化される。本手法では、流速と圧力は分離して求まり、それぞれ陰的に解くことになるが、代数方程式の行列が対称となる特徴を有するため、対称行列用の代数方程式の解法のみで解析することができる。

### 2.3 解析条件

本研究で用いた3種類の断面形状を図-1に示す。ここで断面①は、断面辺長比B/D=4(B:桁幅, D:桁高)と開口部幅4Dを組合せた二箱桁であり、

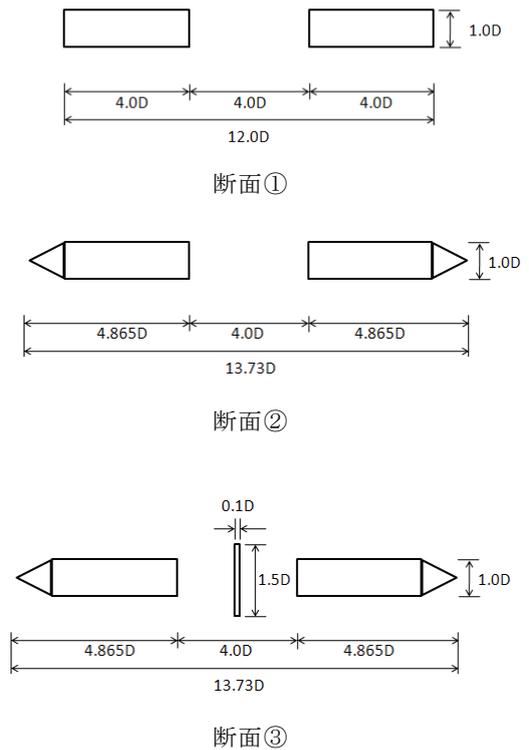


図-1 断面形状  
表-1 解析諸元

断面形状	断面①	断面②	断面③
時間増分 $\Delta t$	0.02D/U	0.02D/U	0.01D/U
最小要素幅	0.0005D	0.0005D	0.0005D
総節点数	24049 × 33	20755 × 33	25744 × 33
総要素数	23648 × 32	20448 × 32	25348 × 32
Reynolds数 Re	$3.0 \times 10^4$		
軸方向長さ	3.2D		
軸方向分割	32		
軸方向幅	0.1D		
モデル定数 $C_s$	0.1		

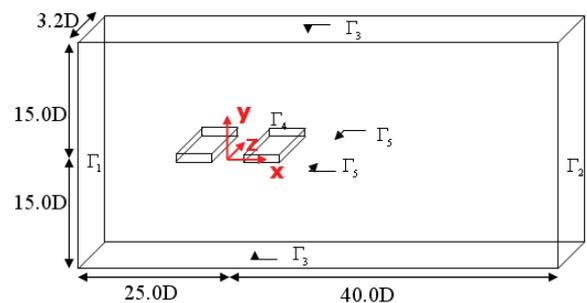


図-2 解析領域

本研究ではこの断面を基本とする。断面②は、断面①にフェアリングを付加（基本断面+フェアリング）したものであり、断面③は、断面②にセンターバリアを付加（基本断面+フェアリング+センターバリア）したものである。ここでの断面②、③は、出野らの研究グループ<sup>4)</sup>が明石海峡大橋を超える長大橋を想定して行った風洞実験断面であ

る。本研究では、出野らの風洞実験断面<sup>4)</sup>と同一寸法を用いてモデル化を行い、比較することで3次元数値流体解析の整合性を確認する。

表-1に計算メッシュなどを示した解析諸元を、図-2に解析領域を示す。境界条件は、 $\Gamma_1$ で代表流速である一様流速1.0、 $\Gamma_2$ では移流境界条件とする。また、 $\Gamma_3$ でslip、 $\Gamma_4$ でno-slip条件とし、断面軸方向の境界 $\Gamma_5$ では周期境界条件を用いている。解析する迎角は、迎角 $\alpha=0.\text{deg}$ を中心に $-10.\text{deg}$ ～ $+10.\text{deg}$ の間を迎角1.0 degピッチで行う。

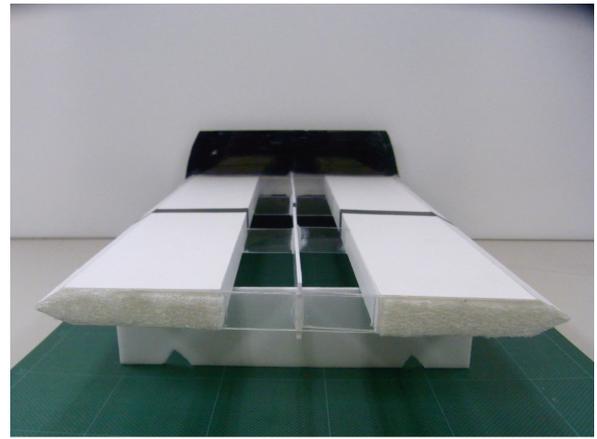
### 3. 煙風洞実験概要

#### 3.1 風洞装置および実験模型

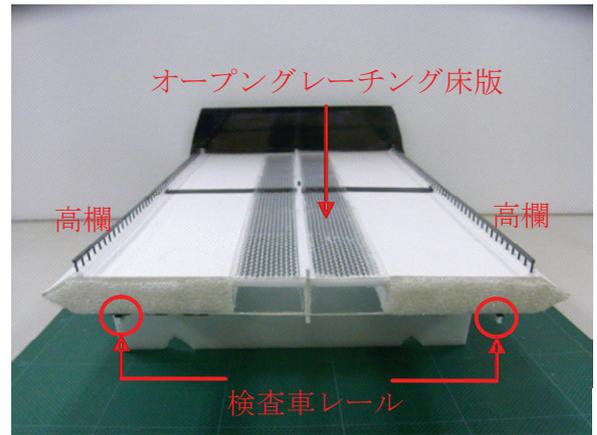
煙風洞実験は、中央大学理工学部都市環境学科所有の遠心送風機付きエッフェル型風洞（高さ300mm×幅員300mm×測定部長さ2,000mm）を用いる。写真-1に橋梁模型例として断面③模型を示す。解析断面①～③と同様の形状を基本断面①～③とし、風洞流路内の閉塞率が5%となるよう、B:桁幅=60mm,D:桁高=15mmとする。基本断面①～③のそれぞれに高欄、検査車レール、そしてオープングレーチング床版を付加する形状を改良断面①～③とし、計6体の模型で比較・検討を行う。なお、模型材質は発砲ポリスチレンで、オープングレーチング床版は明石海峡大橋のグレーチングの開口率を参考に、開口率約60%とする。写真-2に風洞内の模型と高速カメラ（HSカメラ）とデジタルビデオカメラ（DVC）の設置状況を示す。HSカメラは32万画素で、1秒間に60コマの白黒撮影が可能である。可視化方法は、遠心送風機の外側から煙を注入し、風洞流路上方からスリット光源で照らす方法を採用する。その実験状況を写真-3に示す。煙はフォグジェネレーター内で専用リキッドを蒸発させたものが空気と混合することで、霧状の煙が発生する。また、可視光源には波長235nm、ビーム幅3mmのgreen laserを50 $\mu\text{m}$ マルチモードファイバーによって幅3mmのスリット光に変換したものを使用する。

#### 3.2 実験条件

迎角 $\alpha=0,\pm 1,2,3,5,7,10.\text{deg}$ の13種類での実験を行う。なお、本実験では風洞装置の大きさの問題から、模型の代表長さを大きく設定できなかったため、風速 $U=2.0\text{ m/s}$ 、 $Re$ =約3,000での実験を行う。



基本断面



実橋梁断面

写真-1 橋梁模型（断面③）

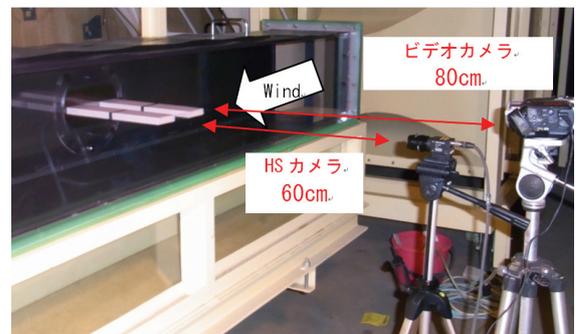


写真-2 実験装置配置状況

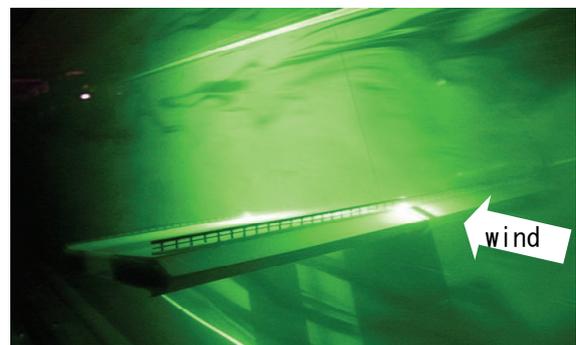


写真-3 実験状況

## 4. 解析結果

### 4.1 静的空気力係数

図-3は、桁高  $D$  を代表長として無次元化を施した静的空気力係数及び出野らの行った風洞実験結果<sup>4)</sup>を併せて示したものである。なお、断面③の実験値は、検査車レールが付加された形状であるが、本研究ではこれを考慮していない。

図-3(a)に示す平均抗力係数に着目すると、断面②、断面③は断面①に比べ、迎角を増加させても抗力が低く抑えられていることから、抗力低減効果のある断面であることがわかる。

図-3(b)に示す平均揚力係数では、迎角  $\alpha=5.\text{deg}$  ~  $7.\text{deg}$  において、断面①は負勾配になっているため、鉛直方向の発散振動発現の可能性が推測される。一方、断面②および断面③は、同迎角付近において勾配は緩やかになるものの、負勾配にはなっていない。これにより、断面②・断面③が鉛直方向の発散振動の起振力抑制に効果があると予想される。また、断面③が最も勾配が緩やかな結果となったことから、断面③の高い耐風安定性が予測できる。

図-3(c)に示す平均空力モーメント係数に着目すると、断面③では空力モーメント係数の勾配は、迎角を大きくしても断面②より小さく抑えられているのがわかる。先ほどの揚力係数の結果とあわせ、断面②に比べ断面③のほうが耐風安定性に優れた断面形状であることが考えられる。これより、フェアリングとセンターバリアを同時に付加することで、振動現象を発生させる空気力の低減効果を期待できる可能性が高い。

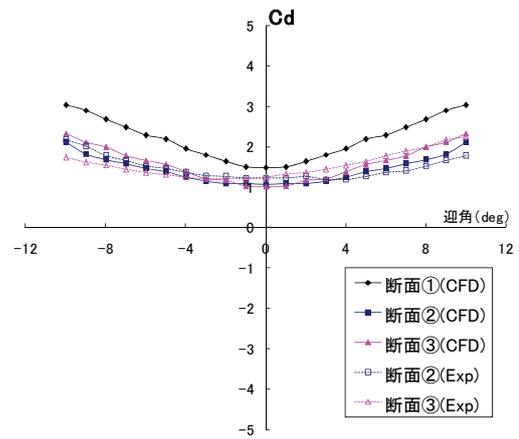
また、出野ら<sup>4)</sup>の実験結果と解析結果を比較すると、全領域でほぼ同様な傾向が得られている。

### 4.2 流れ場の状態

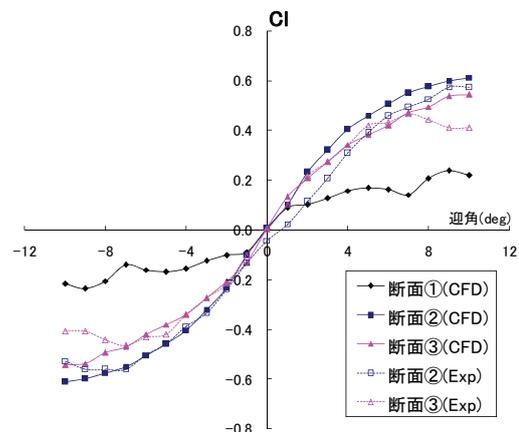
図-4に迎角  $\alpha=0.\text{deg}$  時の時間平均流線図を、図-5に同迎角時の瞬間圧力分布図を示す。

図-4より断面②と断面③では断面①と比較して上流断面の剥離せん断層が小さく抑えられている。これはフェアリングを上流断面前縁部と、下流断面後縁部に付加することで、流線が断面に沿うような流れとなり、剥離後すぐに再付着したためだと考えられる。また、断面③においても上流断面後縁で剥離した流れがセンターバリアに再付着し、その後すぐに剥離し下流断面側面に再付着している。

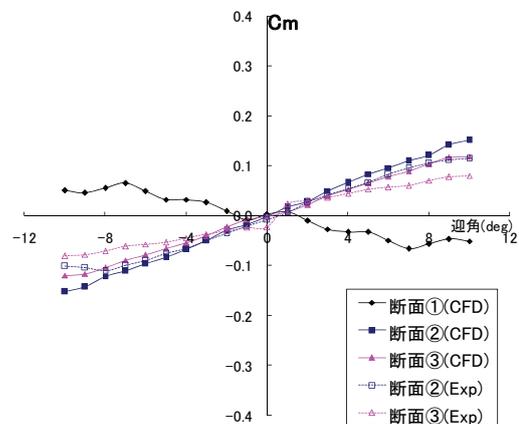
図-5より瞬間圧力分布に関しても、断面①



(a) 平均抗力係数  $C_d$



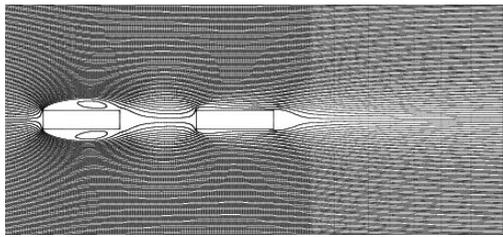
(b) 平均揚力係数  $C_l$



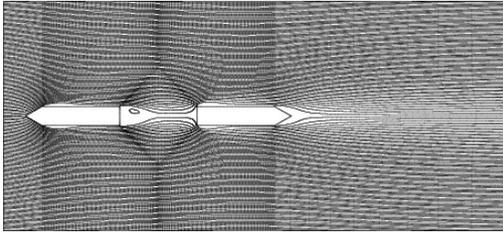
(c) 平均空力モーメント係数  $C_m$

図-3 静的空気力係数の解析と実験<sup>4)</sup>との比較

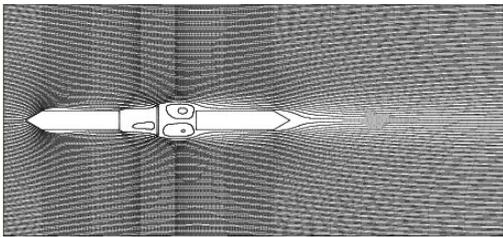
では強い剥離せん断層の影響で大きな渦の発生が確認できる。また、断面①と断面②では下流断面前縁に高い圧力の領域が見られるが、断面③ではこれが見られない。この理由は図-4の時間平均流線図からわかる通り、断面①、断面②では下流断面の前縁部の再付着位置が前縁となっているのに対し、断面③では再付



断面①

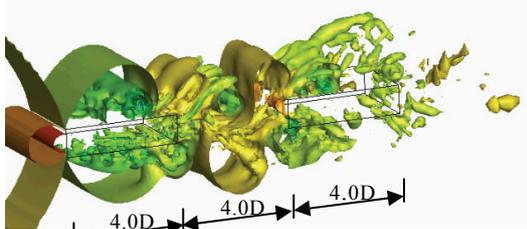


断面②

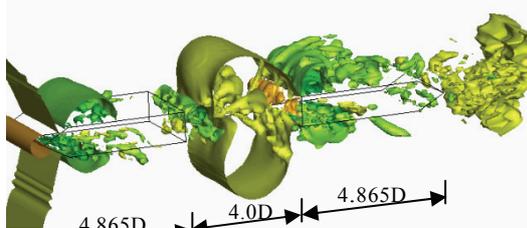


断面③

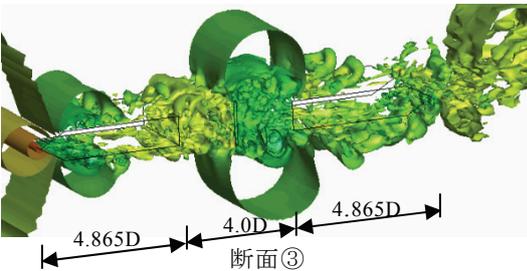
図-4 断面毎の時間平均流線図の比較 ( $\alpha=0.\text{deg}$ )



断面①



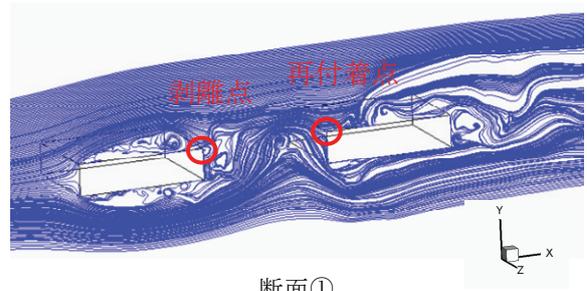
断面②



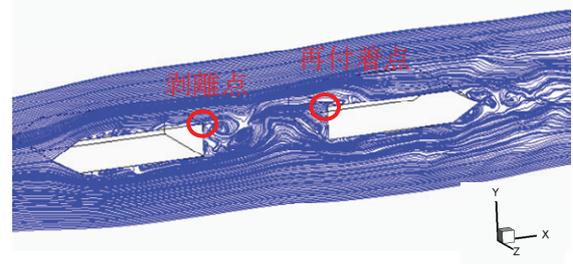
断面③



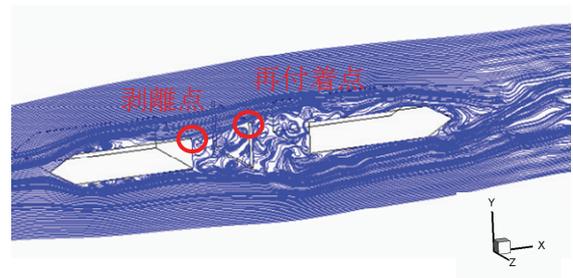
図-5 断面毎の瞬間圧力分布図の比較 ( $\alpha=0.\text{deg}$ )



断面①

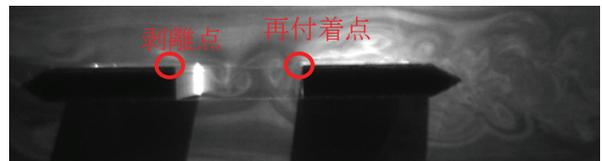


断面②

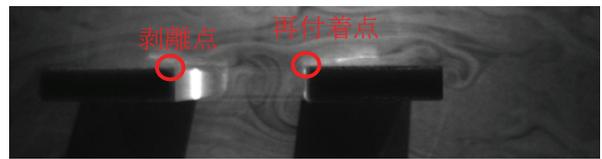


断面③

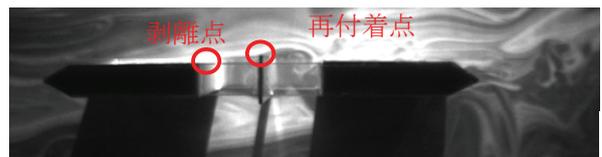
図-6 CFDによる瞬間流線図 ( $\alpha=0.\text{deg}$ )



基本断面①



基本断面②



基本断面③

図-7 煙風洞実験による流れ場 ( $\alpha=0.\text{deg}$ )

着位置が下流断面の上下側面であることに起因する。つまりセンターバリア付加によって下流断面の再付着位置が側面へと移動し、下流断面の圧力低減につながったと思われる。

また、すべての断面において、断面前縁の剥離せん断層には明確な3次元性は確認できないのに対し、断面後縁から剥離してできた渦には3次元性が確認できる。このことから、二箱桁断面のような構造物が並列に並ぶ断面形状を対象にCFDを行う場合、下流断面の空気力を正確に再現するには、流れの3次元性を考慮した3次元数値流体解析の必要性が高いと考えられる。

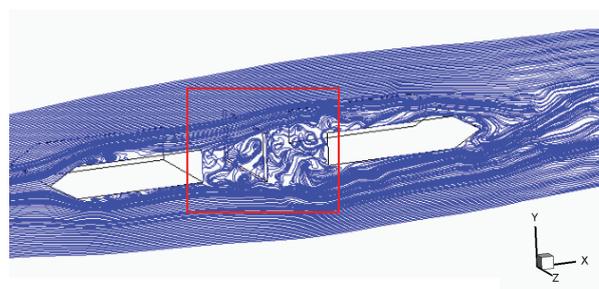
## 5. 煙風洞実験結果

### 5.1 CFDと煙風洞の流れ場の比較

図-6に迎角 $\alpha=0.\text{deg}$ におけるCFDによる瞬間の流れ線図を、図-7に迎角 $\alpha=0.\text{deg}$ における煙風洞実験での基本断面の流れ場を示す。図-7の実験結果より断面①、断面②では上流断面後縁から剥離した流れが下流断面前縁に再付着している。一方、断面③では上流断面後縁から剥離した流れがセンターバリア上下端部に再付着・剥離し、その後下流断面の側面に再付着している。これらの断面形状による流れ場の違いを図-6のCFD結果と比較すると、剥離点や再付着位置に関して同じ特徴を有していることがわかる。また図-8に断面③まわりの流れ場の全体図と開口部拡大図を示す。図-8より、センターバリア前後の開口部内において流れの滞留が発生していることも再現できている。このことから、本手法でのCFDによる流れ場の再現性の高さを確認することができると同時に、橋梁断面まわりの流れ場の検討にCFDが有効なツールになることを示している。

### 5.2 基本断面と実橋梁断面の流れ場の比較

図-9に基本断面と実橋梁断面との流れ場を並べて示す。基本断面と実橋梁断面を比較すると、流れ場が大きく異なっていることがわかる。まず、基本断面①と基本断面②では開口部内にカルマン渦が確認できるが、実橋梁断面ではオープングレーチング床版の設置によりこれが確認できない。次に、基本断面③では上流断面の高欄付加によって、再付着

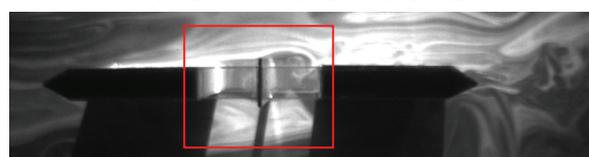


(全体図)

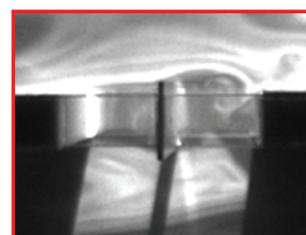


(開口部拡大図)

3次元CFDによる瞬間流れ線図



(全体図)



(開口部拡大図)

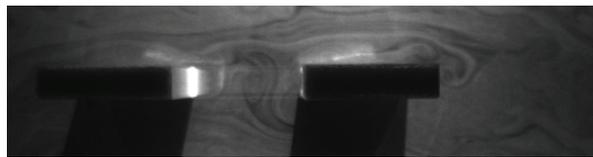
煙風洞実験結果

図-8 断面③の開口部の流れ場比較 ( $\alpha=0.\text{deg}$ )

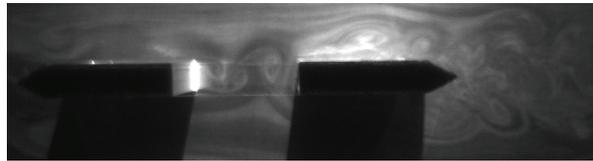
位置が変化し、開口部の状態も実橋梁断面のものと異なっている。また、図-10に実橋梁断面の高欄部分の拡大図を示す。図-10より高欄の付加によって、上流断面前縁で剥離した流れが再度高欄部分で剥離している。このため、実橋梁断面では基本断面よりも大きな剥離せん断層がみられる。さらに、高欄のスリットを通過した流れは小さな渦を形成し、断面の下流に成長しながら運ばれている。これより、高欄等の付加物が基本断面で発生する剥離バブルからの渦を抑制し、フラッター性能の向上に寄与していることが推察される。

### 5.3 迎角変化による流れ場の比較

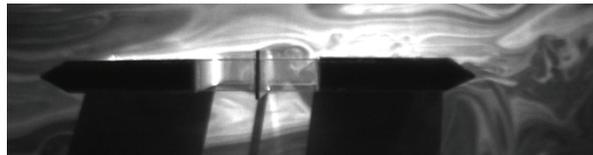
図-11に実橋梁断面③の迎角 $\alpha=+1.\text{deg}$ ,  $+7.\text{deg}$ の流れ場を示す。 $\alpha=+1.\text{deg}$ の流れ場は



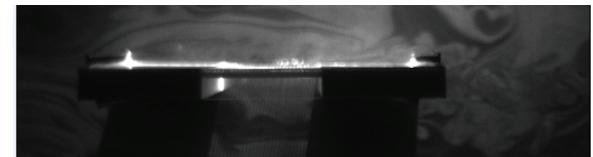
基本断面①



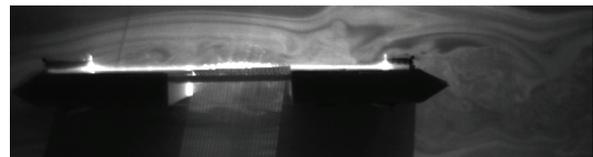
基本断面②



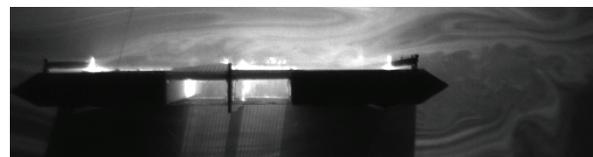
基本断面③



実橋梁断面①



実橋梁断面②



実橋梁断面③

図-9 基本断面と実橋梁断面の流れ場の比較

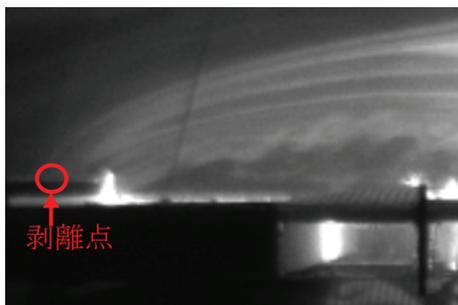
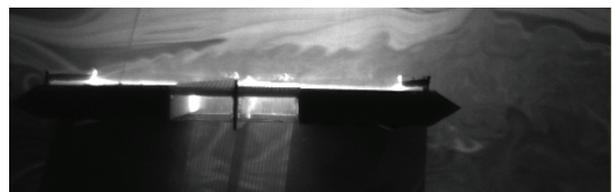
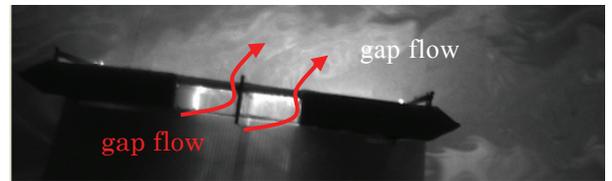


図-10 実橋梁断面高欄部拡大図

上流断面高欄部で発生した渦が徐々に成長しながら下流断面へと流れているのが確認できる。一方、 $\alpha=+7.\text{deg}$  の流れ場においては上流断面高欄部で発生した渦が下流断面上では、 $\alpha=+1.\text{deg}$  のものと比較してもかなり大きな渦へと成長している。これは上流断面下側から



実橋梁断面③ (迎角  $\alpha=+1.\text{deg}$ )



実橋梁断面③ (迎角  $\alpha=+7.\text{deg}$ )

図-11 迎角変化に伴う流れ場の比較

の gap flow が センターバリアと下流断面前縁で剥離し、その剥離渦と合わさったことによると考えられる。つまり、高迎角時には断面③における下流断面再付着位置が上下面から前縁へと変化したため、再付着せず完全薄利の状態となったと考えられる。また、下流断面後流に着目すると、 $\alpha=+7.\text{deg}$  の流れ場では検査車レールから剥離した渦が見られる。これも、高迎角に伴い渦が大きく巻きこむように剥離していることに起因していると思われる。さらに、迎角が大きくなると開口部での流れの滞留が確認できなくなり、下流断面の変動圧力の位相差が生じていない可能性も考えられる。以上より、高迎角時には付加物の設置位置や形状により流れ場が複雑に変化することが予想される。これらのことから、前節で付加物がフラッター性能の向上に寄与している可能性を示唆したが、高迎角時には流れ場が異なることから、付加物の設置位置や形状を変化させた検討が必要であるとの従来からの考え方を確認することができた。

## 6. おわりに

本研究では明石海峡大橋を超える規模の、長大・超長大橋を想定し、経済性・耐風性に優れるとされている二箱桁断面橋梁を対象に、CFD と煙風洞による可視化実験をおこなった。そして、解析と実験の両面から定量的・可視的にフラッター性能や流れ場の変化について検討してきた。本研究のまとめを以下に記す。

- (1) 出野ら<sup>4)</sup>の実験結果との比較より、解析領域全域において良好な精度を確認した。

また、圧力分布図より断面後縁から剥離してできた渦には3次元性が確認でき、3次元解析の必要性を示唆した。

- (2) フェアリング付加により、剥離後の流れが断面に沿うようスムーズに流れ、剥離渦発生抑制に寄与していると考えられる。また、センターバリア付加により下流断面の再付着位置が変化し、圧力分布を軽減していると推察した。
- (3) CFDにより算出した瞬間流線図と煙風洞実験結果を比較すると、剥離点や再付着点においてほぼ同様の特性を示した。さらに、基本断面③ではセンターバリア後方の開口部の流れの滞留も確認できた。
- (4) 煙風洞実験により基本断面と付加物を考慮した実橋梁断面を比較すると、異なる流れ場となることを確認した。具体的には、基本断面①、②で見られた開口部のカルマン渦が確認できなくなり、高欄のスリットを通過した流れは小さい渦を形成して下流へ流れることを確認した。
- (5) 低迎角時には高欄をはじめとする付加物が剥離バブルからの渦を抑制し、フラッター性能の向上に寄与している可能性を示した。一方で、高迎角時には低迎角時に見られた開口部での滞留が見られなくなり、流れの再付着点の変化などによってフラッター性能の低下が予想されると推察した。

今後の課題として、CFDに関しては、変動圧力や非定常空気力の位相差を算出し、より詳しい耐風性向上要因の解明を試みる。また、風洞実験に関しては断面模型上の圧力測定や、ばね支持試験などの定量的な検討を試みる必要がある。さらに、検査車レールの設置位置の違いによるフラッター性能の違いも検討していくことも必要である。

## 謝 辞

本研究を行うに際し、八戸工業高等専門学校丸岡晃准教授の協力と貴重な助言を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)及び中央大学理工学研究所共同研究助成の給付を受けたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 佐藤弘史, 萩原勝也, 松藤様照, 鳥海隆一, 日下部毅明, 嶋本英治, 星加益朗: 開口部付箱桁を有する超長大橋の耐風性に関する検討, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.407-412, 1996.12.
- 2) 佐藤弘史, 萩原勝也, 横山功一, 松藤様照, 嶋本英治, 星加益朗: 開口部を有する偏平箱桁の非定常空気力特性に関する考察, 構造工学論文集, vol. 44A, pp.937-942, 1998.3.
- 3) 佐藤弘史, 楠原栄樹, 大儀健一, 北川信, 伊藤進一郎: 超長大橋の一様流中における耐風性, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.351-356, 2000.11.
- 4) 出野麻由子, 吉住文太, 井上浩男: 付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.643-641, 2007.3.
- 5) 東隆介, 平野廣和: 1:13 矩形断面に作用する非定常空気力の数値流体解析による検討, 第18回風工学シンポジウム, pp.287-292, 2004.12.
- 6) 松本勝, 白土博通他: 鉛直板付き分離箱桁のフラッター特性, 第18回風工学シンポジウム, pp.311-316, 2004.12.
- 7) Jones, N. P., Scanlan, R. H., et al.: The effect of section model details on aero elastic parameters. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.54/55, pp.45-53, 1995.
- 8) 渡邊茂, 丸岡晃, 井上浩男: フェアリングを有する箱桁断面に作用する静的空気力の数値流体解析による検討, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.219-224, 2002.12.
- 9) Sarwar, M, W., Ishihara, Fujino: Numerical Prediction of vortex Induced Vibraton and Control of Box Girder Bridge Section Using Aerodynamic Countermeasures, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 2008.9.
- 10) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.4.

(2010年3月9日 受付)