

# 数値流体解析による付加物を有した二箱桁断面橋梁の空力特性の検討

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR AERODYNAMIC STABILITY OF

2-BOX GIRDER SECTION WITH VARIOUS ATTACHMENTS

土木工学専攻 11号 栗林伶二

Reiji KURIBAYASHI

## 1. はじめに

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・耐風性に優れた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。これまで、橋梁断面の形状や付加物の決定には、風洞実験や数値流体解析(CFD)による検討が行われており、一箱桁橋の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。しかし、二箱桁断面においては、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、空力特性に与える影響に関しては、十分な検討と現象の解明が必要であると指摘されている<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では高欄や検査車ルールなどを付加した実橋梁に近いモデルにおいて3次元数値流体解析を行う。具体的には、まず静的空気力を求めることで付加物の違いによる流れ場を把握する。同時に、縮尺模型を用いて煙風洞実験を行い、CFD 結果と比較することで実橋梁断面まわりの正確な流れ場の可視的検討を行う。その後、静的空気力の結果を用いて非定常空気力解析、フラッター解析を行うことで振動の発生原因の特定や耐風性能の問題点を明らかにするとともに、二箱桁断面橋梁でのフラッター発現風速を予測することを目的とする。

## 2. 解析手法

### 2.1 支配方程式

流れ場の支配方程式は、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式で表され、離散化には、丸岡ら<sup>1)</sup>が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用する。また、乱流モデルには LES の Smagorinsky SGS モデルを採用する。

### 2.2 対象断面

図-1 に本研究で用いる 5 種類の断面と高欄の形状を示す。各断面は、 $B/D=4$  ( $B$ : 桁幅、 $D$ : 桁高) と開口部幅  $4D$  を組合せた箱桁断面にフェアリング、センターバリアを付加した断面である。これを基本断面とする。断面①は基本断面に加えて検査車ルールを断面外側から  $1D$  の位置に設置、高欄 a を外側に付加した断面である。断面②は検査車ルールを断面外側から  $2D$  の位置に設置、高欄 a を外側に付加した断面である。断面③は検査車ルールを断面外側から  $3D$  の位置に設置、高欄 a を外側に付加した断面である。断

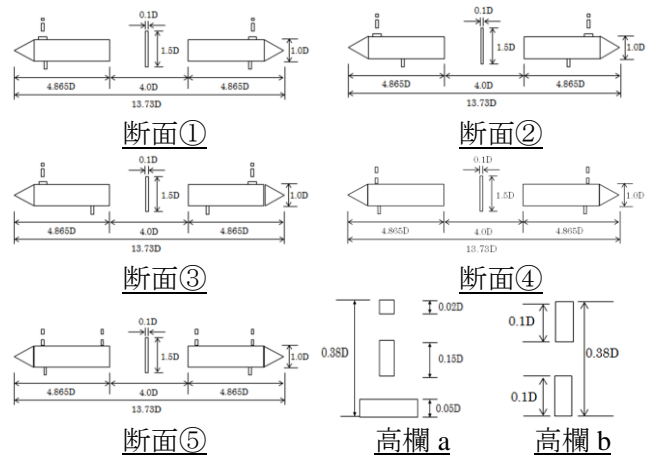


図-1 対象断面と高欄形状

表-1 解析諸元

断面形状	断面①	断面②	断面③	断面④	断面⑤
時間増分 $\Delta t$	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U
最小要素幅	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D
総接点数	32330×33	30722×33	32330×33	48661×33	58709×33
総要素数	31752×32	30168×32	31752×32	48000×32	57900×32
Reynolds数 Re	3.0×10 <sup>4</sup>				
軸方向長さ	3.2D				
軸方向分割	32				
軸方向幅	0.1D				
モデル定数 Cs	0.1				

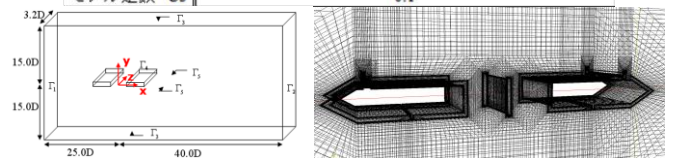


図-2 解析領域と要素分割図

面④は検査車ルールを断面①と同様に断面外側から  $1D$  の位置に設置、高欄 b を外側に設置した断面である。断面⑤は断面④に加えて、高欄 b を断面の内側と外側に設置した断面である。

### 2.3 付加物のモデル化

高欄のモデル化には出野らの風洞実験<sup>2)</sup>を参考とした。高欄の高さは共に  $0.38D$  とし、高欄 a は上下方向に 3 本の矩形柱で構成、高欄 b は上下方向に 2 本の矩形柱で構成する。高欄の充実率は高欄 a を 58%、高欄 b を 53%程度確保するように組み合わせ再現しており、高欄の形状によって断面上面での剥離点の位置が変わらないように設置位置および高欄頂点の形状に注意してモデル化を行った。また、高欄や検査車ルールで流れの剥離を正確に再現するために、断面近傍に近づくほど細かな要素分割になるように設定し、剥離点近傍での最小要素幅は  $0.0005D$  とした。これにより、高欄の形状及び充実率によって断面の空力特性が変化することも同時に確認する。検査車ルールの寸法は前述の風洞実験<sup>2)</sup>と同様の矩形

柱でモデル化を行なう。

## 2. 4 解析条件

表-1 に解析諸元、図-2 に解析領域と要素分割図を示す。境界条件は、 $\Gamma_1$  で無次元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。解析領域は奥行き方向の軸方向長さを 3.2D とし、軸方向分割を 32 として軸方向幅を 0.1D としている。迎角は、頭上げをプラス方向とし、 $\alpha=0.\text{deg.}$  を中心に  $-8.\text{deg.}\sim+8.\text{deg.}$  の間を迎角 1.0deg.ピッチで行う。

## 3. 静的空気力

図-3 に各断面の静的空気力係数を示す。図-3(a)の  $C_d$  に着目すると断面②、③は断面①に比べて迎角変化に伴う抗力係数が低く抑えている。ここから、検査車ルールが断面の内側にある方が抗力低減効果のある断面であるとわかる。さらに、図-3(b)の  $C_l$  に着目すると、全断面において迎角変化に伴う勾配が正勾配であることから、たわみ振動現象発生の可能性は低いと考えられる。一方、図-3(c)の  $C_m$  に着目すると、断面①は迎角  $\alpha=5^\circ\sim6^\circ$  で迎角変化に伴う勾配が正勾配から負勾配に変化している。このことから、検査車ルールを外側に設置した断面では、高迎角時でねじれ振動現象発生の可能性が考えられる。

次に、高欄の形状と設置位置による空気力の違いを把握するため図-3 の断面①、④、⑤に着目する。図-3(a)の  $C_d$  では、断面④、⑤の値は断面①と同様に迎角を増加させると抗力係数が増加する傾向が得られており、値もほぼ同様である。また、図-3(b)の揚力係数においても正勾配を示していることからたわみ振動現象発生の可能性は低いと考えられる。一方で図-3(c)の  $C_m$  に着目すると、断面④、⑤の迎角  $\alpha=5^\circ\sim6^\circ$  では断面①で見られた負勾配は確認されなかった。しかしながら、断面④では迎角  $\alpha=2^\circ\sim3^\circ$ 、 $\alpha=6^\circ\sim7^\circ$  において、断面⑤では迎角  $\alpha=3^\circ\sim4^\circ$  で負勾配に変化している様子が確認できる。このことから、検査車ルールを外側に付加した断面では迎角が変わることで流れの特性が変化する点が存在すると考えられ、検査車ルールの設置位置が高迎角時にねじれ振動に対して不安定になる原因であると推測できる。

## 4. 流れの可視化

### 4. 1 煙風洞実験

検査車ルールを外側に付加することでねじれ振動に対して不安定になると推測できる断面④、⑤において煙風洞実験を行い、正確な流れ場の把握を試みた。実験は中央大学理工学部水理研究室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:2000mm)を用いて行う。橋梁模型は図-1 に示すように開口部にオープングレーチング床版を考慮した形状とし、風洞流路内の閉塞率が 5%となるよう、B:桁幅=60mm,D:桁高=15mm とした。

### 4. 2 可視化用レーザー光の考案

写真-1 に本実験で用いたレーザー発生装置を示す。本実験においては高出力レーザーが高価であること

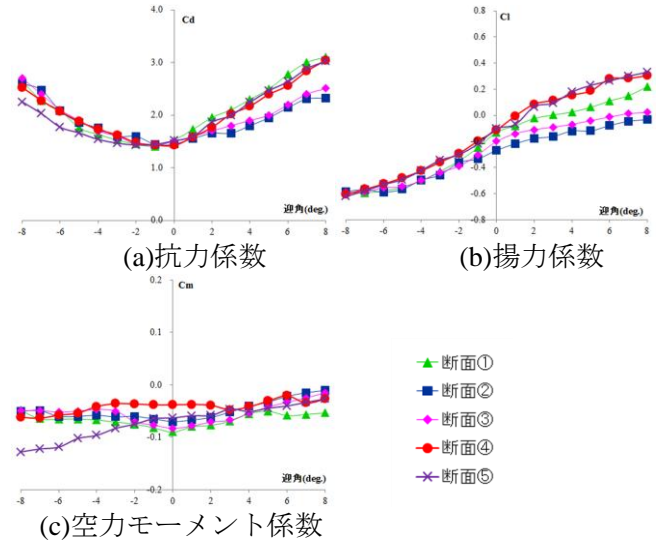


図-3 迎角変化時における静的空気力係数

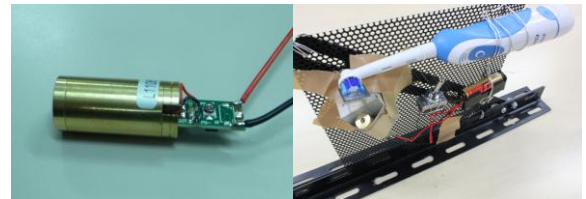


写真-1 レーザーポインタとレーザー発生装置

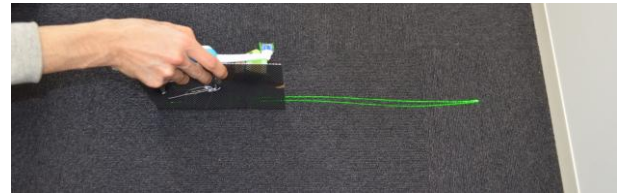
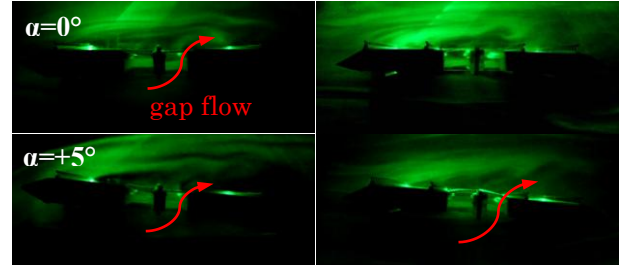


写真-2 自作レーザーによるスリット光



断面④

断面⑤

写真-3 迎角変化による流れ場の比較

から、市販の緑色レーザーポインタを使用して新たに超低コストで可視化レーザーを作成することを試みた。まず、実験に際して煙を見るために強い波長の光を出力させる必要がある。そこで緑色レーザーポインタに付属してある可変抵抗を変化させ、光の出力を 1mW→30mW 程度に増加させる。次に、レーザー光は一点照射のため風洞実験の際に断面周辺の流れを一度に見ることができない問題がある。そこで、電動歯ブラシと鏡の反射を利用して光をスリット状に出力させ、断面周辺の流れを可視化しようとした。先端が回転するタイプの電動歯ブラシを用意し、先端の毛を片側だけ脱毛し、残りの毛の部分に 1 辺 10mm 程度の鏡を垂直に接着し、鏡に緑色レーザーの光が当たるように設置することで写真-2 に示すように光が一点照射からスリット状になることが確認できた。



### 4. 3 煙風洞実験による可視化

写真-3 に断面④と断面⑤の迎角変化による流れ場の比較を示す。断面④では、迎角  $\alpha=0^\circ$  では断面下面から上面に向けて gap flow 現象が生じ、その影響から風下断面で渦を形成している様子が確認できる。さらに迎角  $\alpha=+5^\circ$  では開口部に入り込む gap flow が強くなっている様子が見られる。断面⑤では、迎角  $\alpha=0^\circ$  では風上断面の内側高欄で剥離した流れは、センターバリアを通り越して風下断面の上側で渦を形成している。迎角  $\alpha=+5^\circ$  では風上断面内側の高欄で剥離した流れは、渦を形成しながら断面から離れるように流れていく様子が確認でき、断面周辺にはほとんど風が無い状態であることが確認できる。

### 4. 4 数値解析による可視化

図-4 に断面①、②、③の迎角  $\alpha=5^\circ$ 、 $6^\circ$  の瞬間圧力分布図を示す。瞬間圧力分布図に着目すると、断面①の迎角  $\alpha=5^\circ$  では、風下断面検査車レール後の渦が断面に回り込むように形成されており、その後断面に再付着していることが確認できる。一方、迎角  $\alpha=6^\circ$  では検査車レールで剥離して形成された渦が断面から徐々に離れて形成されている様子が見られる。このことから、断面①では迎角  $\alpha=5^\circ\sim 6^\circ$  で風下断面後方の流れの状態が変化していると考えられ、 $C_m$  が正勾配から負勾配に変化した原因であると思われる。断面②、断面③に着目すると迎角  $\alpha=5^\circ$ 、 $6^\circ$  とも風下断面の検査車レール付近で形成された渦が、断面から徐々に離れて形成されていることが確認できる。このことから迎角  $\alpha=5^\circ\sim 6^\circ$  では流れの状態は変化していないため空力モーメント係数が変化しないと考えられる。

次に図-5 に風洞実験で得た断面⑤の流れ場の状態と、CFD での瞬間流線図を示す。図-5 より風の流れ方から、風上断面で剥離した流れが、再付着し、内側高欄で再剥離している様子を確認できる。また、CFD 結果では風下断面での渦形成まで同様に再現できていることから、本手法での CFD の精度を確認することができる。このことから、簡易模型を用いた煙風洞実験が、構造物まわりの流れ場の検討手法として適用可能であると考えられる。

## 5. フラッター解析

### 5. 1 非定常空気力動的解析

静的空気力ならびに煙風洞実験の結果から正確な流れ場を再現できたと考えられる。そこで振動状態に関する流れ場を把握するために、1 自由度たわみ・ねじれ強制加振動的解析を行う。強制加振はたわみ片振幅  $\eta_0 = 1.0D$ 、ねじれ片振幅  $\phi_0 = 1.0\text{deg.}$  とし、風洞実験値<sup>2)</sup>と同様の値に設定する。

一般的に非定常空気力係数のうち、 $C_{M\eta I}$ 、 $C_{L\theta R}$  は値が小さければ小さいほど、また特に  $C_{M\theta I}$  は負で絶対値が大きいほどフラッターに安定的だと言われている。さらに  $C_{M\theta R}$  は値が小さいほど、連成フラッターに対し安定性を向上させると言われている。

図-6 に非定常空気力係数のうち、上記に示した係数の結果を示す。各係数を比較すると無次元風速  $U/(fB) = 15.0$  以上でそれぞれの断面特性が異なってい

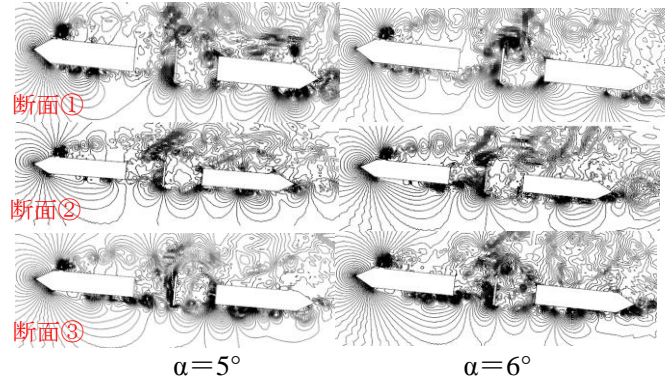


図-4 瞬間圧力分布図 (迎角  $\alpha=5^\circ$ 、 $6^\circ$ )

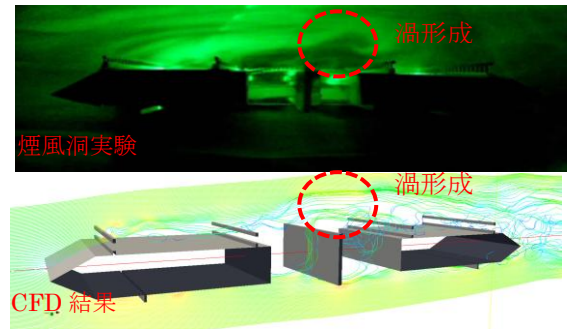


図-5 風洞実験結果と CFD 結果の比較

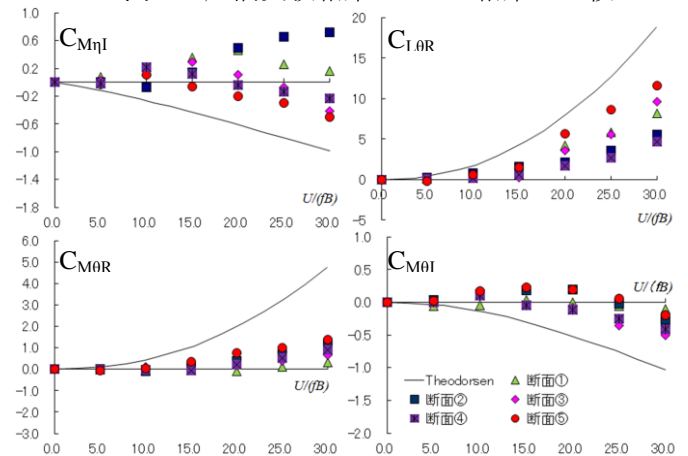


図-6 非定常空気力係数の解析結果

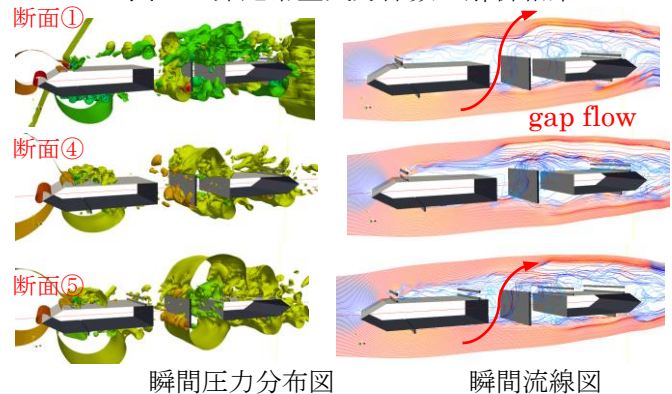


図-7 強制加振時の流れ場(ねじれ加振  $U/(fB) = 15.0$ )

る。これは高風速時においては高欄や検査車レールの付加物の設置位置により流れの状態が変化することを表している。

たわみ振動解析結果である  $C_{M\eta I}$  では、断面①、②において  $U/(fB) = 15.0$  を超えるあたりで正の勾配を示しており、断面③と特性が異なっている。ここから検査車レールを内側に付加することでたわみ振動に関

して安定すると考えられる。次に、ねじれ振動解析結果である  $C_{LOR}$ ,  $C_{MOR}$ ,  $C_{MOI}$  では、各断面において理論値とほぼ同様の傾向を示している。その中で高欄の形状が異なる断面④では、他の断面に比べて  $C_{MOI}$  は負で絶対値が大きく、 $C_{MOR}$  は値が小さい値を示している。ここから高欄の形状を変化させることでフラッターに対し影響が出ると考えられる。

次に図-7 に流れ場の状態の状態として、非定常空気力係数に変化が表れ始める  $U/(fB)=15.0$  時の瞬間圧力分布と瞬間流線図を示す。まず、瞬間圧力分布図に着目すると、高欄の形状が異なる断面④、⑤では断面近傍の圧力が高くなっている。これは高欄  $b$  では剥離した流れが断面に再付着していることから圧力が上がったと思われる。瞬間流線図に着目すると、センターバリアの存在により下流断面の再付着位置が断面側面となっており、その後検査車レール付近で再剥離している様子が確認出来る。また、断面①と断面⑤では開口部に gap flow の存在が確認できる。一方、断面④では断面上面と断面下面の双方から風が入り込んで複雑な渦を形成している様子が確認でき、開口部の風が複雑になることで非定常空気力係数の結果に影響を及ぼしていると考えられる。

## 5.2 フラッター解析

5.1 で求めた非定常空気力係数を用いてたわみ・ねじれ 2 自由度フラッター解析を行う。その際の構造諸元を表-2 に示す。この条件は、東京湾横断道路を想定した支間 2,800m の吊橋における鉛直曲げ、ねじれの各 1 次モードの諸元<sup>3)</sup>を基にしたものである。

図-8、図-9 に風速  $U$  と、算出されたたわみ・ねじれ両空気減衰率  $\delta$  の関係を示す。これによると図-8 のたわみ減衰率はどの断面においても常に正の値を示した。このことからギャロッピング現象のような鉛直曲げの発散振動は起こらないと考えられる。一方、図-9 のねじれ減衰率は正から負へと移行している。この時の風速でねじれフラッターの発現が危惧されるため、本解析断面ではねじれフラッターのみが問題となる。

次に、表-3 に断面形状の違いによるフラッター発現風速を示す。各断面を比較すると、断面①を除くすべての断面が Theodorsen 理論よりも高い結果となり、開口部を有する橋梁断面の耐風性の高さがうかがえる。特に、断面②と断面③のフラッター発現風速は断面①と比較して約 1.5 倍程度大きく、検査車レールを内側に設置することで高い耐風安定性を有することが確認できる。一方、断面①、④、⑤ではフラッター発現風速が低くなっており、耐風安定性が低い断面であると言える。これは検査車レールを断面外側に付加したことで迎角変化により風下断面後方の流れ場が変化すること、開口部への風が複雑であることが原因と考えられ、付加物の違いによりフラッターに影響されることを示唆している。

本論では、代表流速  $U$  一定として振動数  $f$  を調整することで無次元風速を算出する手法を採用してきた。このため、高風速側になると加振振動数が小さ

表-2 構造諸元

桁幅 $B$	36 [m]
単位長さ重量 $m$	3000[kg f/s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
単位長さ極慣性 $I$	402100[kg f/s <sup>2</sup> ]
鉛直たわみ振動数 $f_{\eta}$	0.062[Hz]
ねじれ振動数 $f_{\phi}$	0.126[Hz]
たわみ構造減衰率 $\delta_{\eta 0}$	0.02
ねじれ構造減衰率 $\delta_{\phi 0}$	0.02

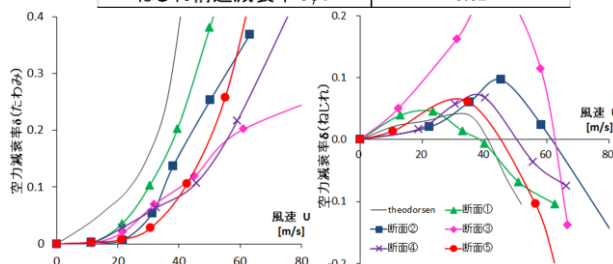


図-8 たわみ空気減衰率 図-9 ねじれ空気減衰率

表-3 フラッター発現風速

	フラッター発現風速 $U_{cr}$
断面①	40 m/s
断面②	61.1 m/s
断面③	62.4 m/s
断面④	51 m/s
断面⑤	45 m/s
Theodorsen	41.0 m/s

くなることから、計算を開始してから流れ場が安定するまでの繰り返し計算数が増加する。そのため高風速側になるにつれて計算時間が増大することになる。また、同時に物体の動きがゆっくりとなることから静的な状態で求めた空気力の影響が解析上、顕著に現れると推測される。また、フラッターは静的な時間的な組み合わせであるため、静的空気力を正確に求めることが必要になる。そこで本論では静的解析および煙風洞実験にて正確な流れ場を再現できた、そのためフラッター発現風速においても正確な流れ場を求めることができたと考えられる。

## 6. おわりに

本研究のまとめを以下に記す。

- (1)静的空気力、非定常空気力では外側に検査車レールを設置することで耐風性が落ちると確認できた。
- (2)迎角変化により風下断面後方の流れ場が変化すること、開口部への風が複雑であることが、耐風性が落ちる原因であると確認できた。
- (3)煙風洞による可視化実験をおこない、CFD 結果との比較から、本解析手法の良好な精度を確認した。
- (4)フラッター解析より、付加物の形状及び設置位置の違いによるフラッター発現風速の違いをとらえることができた。

今後の展開は、有迎角時のフラッター性能の検証の確認を行い、二箱桁断面橋梁の更なる検討を行う。

<参考文献>

- 1)丸岡晃、太田真二、平野廣和、川原陸人：同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性流れの解析、構造工学論文集、Vol.43A、pp.383-394、1997.4.
- 2)出野真由子、吉住文太、曾我明、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.634-641.2007
- 3)川崎貴之：数値流体解析による付加物を有する二箱桁断面橋梁のフラッター特性の検討、構造工学論文集 Vol.57A