第Ⅰ部門　　フラッター解析に基づいた平行2円柱のウェイク振動発生機構に関する研究

京都大学工学部　学生員　○小川 哲司　京都大学工学研究科　正会員　八木 知己
京都大学工学研究科　学生員　有間 将司　京都大学工学研究科　学生員　荒木 伸哉
京都大学工学研究科　Mohd Raizamzamani Md ZAIN　京都大学工学研究科　正会員　白土 博通

## 1．はじめに

斜張橋のケーブル等，複数の円柱が平行した構造に風が作用した場合，下流側の円柱が大きく振動する現象がある．このような空力振動現象は，風向直角方向に卓越した振動であるウェイクギャロッピング(以下WG)と，風向方向に卓越した楕円軌道振動であるウェイクインデュースドフラッター(以下 WIF)に大別され，これまでに多くの研究がなされているが，未だ発生メカニズムについては不明な点も残されている．本研究では，自由振動応答実験で得られた振動応答と鉛直・水平2自由度フラッター解析の結果から2円柱の配置条件と空力不安定性の関係性を考察した．

## 2．2自由度振動応答実験

過去の自由振動応答実験[1)]で得られた最大風速時($U$=12m/s, $U/fD$=177.8)の下流側円柱の2円柱配置に対する応答軌跡を図-1に示す．$W/D$が比較的大きい配置において発現した楕円軌道には非定常な応答も存在した．既往の研究[2)]を参考に，図-1の応答軌跡から下流側円柱の振動応答を分類した結果を図-2に示す．WGと見られる鉛直卓越振動が発現した領域を赤色，WIFと見られる楕円軌道を描く振動が発現した領域を青色で分類した．

## 3．非定常空気力係数を用いたフラッター解析

本研究では，非定常空気力係数を用いた2自由度フラッター解析により，各振動現象の発現機構と非定常空気力の発現への寄与の解明を試みた．非定常空気力を鉛直・水平1自由度強制加振によって計測し，式(1)，式(2)のように各項に分解される．

$$Lift=\frac{1}{2}\rho DU^2\left(kH_1^*\frac{\dot{\eta}}{U}+k^2H_4^*\frac{\eta}{D/2}+kH_5^*\frac{\dot{\xi}}{U}+k^2H_6^*\frac{\xi}{D/2}\right) \quad (1)$$

$$Drag=\frac{1}{2}\rho DU^2\left(kP_1^*\frac{\dot{\eta}}{U}+k^2P_4^*\frac{\eta}{D/2}+kP_5^*\frac{\dot{\xi}}{U}+k^2P_6^*\frac{\xi}{D/2}\right) \quad (2)$$

式中の$H_1^*$～$H_6^*$及び$P_1^*$～$P_6^*$は非定常空気力係数であり，力の作用する方向の空気力を表す項が非連成項，力の作用する方向以外の空気力を表す項が連成項である．これらの非定常空気力係数を用いてフラッター解析を行い，空力不安定性を検討した．非定常空気力係数は振幅依存性があるため，自由振動応答実験で得られた振動振幅に最も近い振幅の時の非定常空気力係数を用いて解析を行った．自由振動応答実験においてWGと見られる鉛直卓越振動が発現した領域でフラッター解析を行ったところ，$W/D$=7.58までの$S/D$が比較的小さい配置条件で対数減衰率が負となり，フラッターが発現するという結果となった．これは従来WGの発現に寄与すると考えられる揚力の鉛直速度同相項の$H_1^*$が正の値を示す領域と概ね一致している．自由振動応答実験でWIFが発現したと考えられる領域でフラッター解析を行ったところ，対数減衰率が正の値を示し，フラッターが発現しなかった．ただし，自由振動応答実験において楕円軌道振動は非定常な応答であり，フラッター解析の結果と対応していると考えられる．そこで，振動の非定常性を考慮し，WIFの発現に対する各非定常空気力係数の寄与を検討するために，非定常空気力係数の評価時間を短くして(約180波→10波または5波)フラッター解析を行った．評価時間の長い解析では対数減衰率が正の値を示したケースにおいて

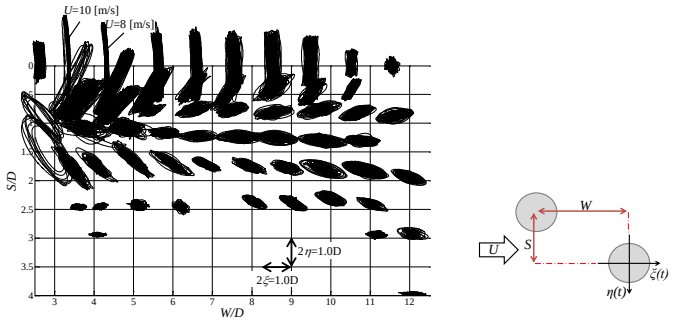


図-1. 自由振動応答時の下流側円柱の軌跡($U/fD$=177.8)

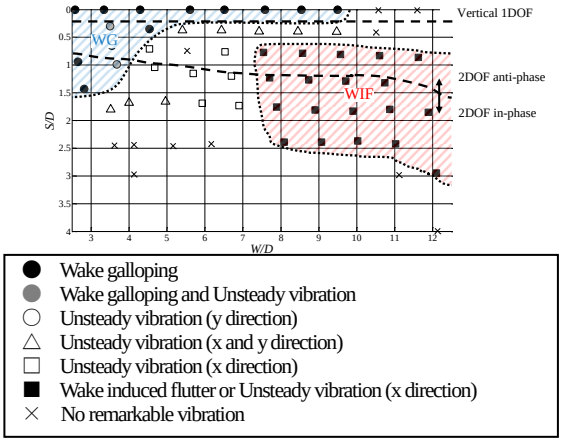


図-2. 自由振動応答実験による振動現象の分類

Satoshi Ogawa, Tomomi Yagi, Masashi Arima, Shinya Araki, Mohd Raizamzamani Md ZAIN, Hiromichi Shirato
ogawa.satoshi.53u@st.kyoto-u.ac.jp

も，非定常空気力の評価時間を短くする事で対数減衰率が負の値を示し，フラッターが発現した．評価時間を短くしたことで対数減衰率が負となったケースにおいて，寄与する非定常空気力係数の組み合わせは $P_4^*>0, H_5^*>0$ であった．また，$P_4^*>0, H_6^*<0$ で空力不安定化するケースも存在し，基本的には連成項である $P_4^*$, $H_5^*, H_6^*$の正負が WIF に寄与すると考えられる．さらに，従来 WIF の発現が報告されていなかった 2 円柱が近接配置された領域($W/D$=3.68, $S/D$=0.99, $U/fD$=177.8)や，自由振動応答実験で非定常な応答を示し，WG 及び WIF と見られる振動が共に発現しないと考えられていた領域($W/D$=5.0～7.5, $S/D$=0.5～2.0)においても評価時間の短くした結果，連成項の効果で対数減衰率が負の値を示し，不安定化した．フラッター解析の結果と自由振動応答実験で得られた振動応答を基にした振動特性の分類を図-3 に示す．これらの振動特性は以下に示すように，Type1 から Type6 に分類される．

Type1: $H_1^*>0$ による鉛直 1 自由度 WG

Type2: $H_1^*>0$ により WG が発生し，連成空気力による 2 自由度連成振動

Type3: 従来 2 自由度 WG が発現すると考えられたが，連成空気力の寄与による 2 自由度連成振動

Type4: 従来 WG 並びに WIF が共に発現しないと考えられていた領域で，連成空気力の寄与による非定常な 2 自由度連成振動

Type5: 従来 WIF が発現すると考えられていた領域で連成空気力の寄与による定常または非定常な 2 自由度振動応答の領域

Type6: 限定的な条件下での連成空気力による 2 自由度連成振動

これらの振動特性を大きく分類したものを図-4 に示す．1 自由度フラッターは $H_1^*>0$ の寄与による発現する振動である．$S/D$ が大きくなると水平方向への変位が生じるが，本質的な発現メカニズムは 1 自由度フラッターである．2 自由度フラッターは連成空気力の効果により振動が発現するケースを示している．しかし Type4 の領域で発生する 2 自由度フラッターは非定常な応答を示すため，今後詳細な検討を重ねる必要がある．また，別途行った非定常空気力の重ね合わせの可否についての検討から，鉛直・水平変位が逆位相の場合において，重ね合わせが成立しないことが判明した．このような配置条件ではフラッター解析の結果も実際の応答とは異なっており，今後検討する必要がある．

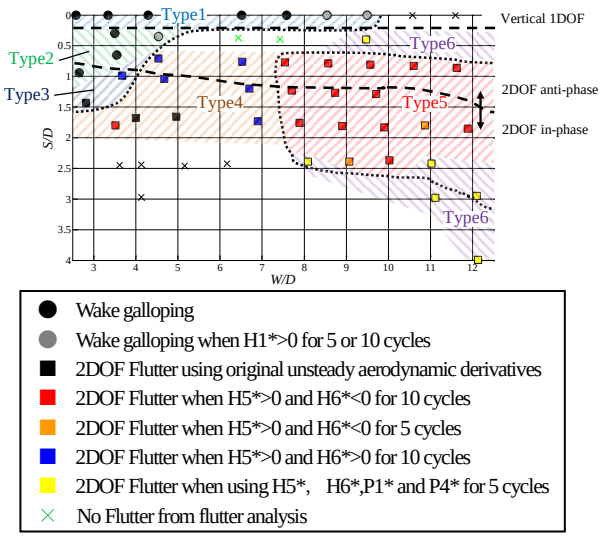


図-3. フラッター解析と自由振動応答を考慮した振動特性分類

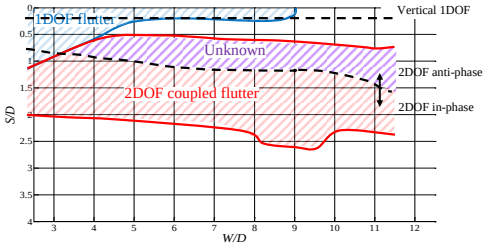


図-4. 発生メカニズムによる振動現象の分類

## 4．結論

以下に本研究で得られた結論を述べる．

1) 自由振動応答実験及び 2 自由度フラッター解析の結果から，2 円柱配置条件によって振動現象を分類した．さらに，これらはメカニズムによって 1 自由度フラッターと 2 自由度連成フラッターに大別される．非定常な応答を示した領域も 2 自由度連成フラッターで説明できることが示唆された．

2) WG の発現には $H_1^*$による励振力が寄与し，WIF とみられる 2 自由度振動には連成空気力に関する項である $P_4^*, H_5^*, H_6^*$の正負が寄与することが明らかとなった．

3) 鉛直・水平変位が逆位相となっている領域については非定常空気力の重ね合わせが成立しないので，今後検討する必要がある．

## 参考文献

1) 荒木伸哉，八木知己，小杉翼，有間将司，Mohd Raizamzamani Md ZAIN，白土博通：フラッター解析に基づいた並列円柱の空力振動現象に関する研究，第 23 回　風工学シンポジウム論文集，pp.205-210，2014.12

2) 宮田利雄，山田均，勝地弘，篠原建太郎：平行ケーブルのウェイク振動に関する風洞実験，第 16 回　風工学シンポジウム，pp.489-494，2000