

## ピーク負圧と位相解析

河井宏允

### 要 旨

建築物に作用する風圧変動波形と振幅及び位相特性の関係を、自然風中で観測された潮岬風力実験所での大型高層建築物模型の壁面に作用する風圧変動の解析によって調べた。風上面に作用する正圧変動の波形と側面に作用する負圧変動の波形は、極めて異なっているが、振幅スペクトルを固定し位相スペクトルを交換した場合、それぞれの波形は元の波形と極めて類似する。特に、ピーク負圧は、正圧変動の振幅スペクトルと負圧変動の位相スペクトルの組合せによって極めて良く再現できることから、ピーク負圧の出現は位相特性によって支配されていると考えられる。ウェーブレット解析によって周波数ごとの波形の位相を調べた結果、ピーク負圧出現時には、ある周波数を中心として複数の周波数で位相が揃っていることが確認された。このことは、ピーク負圧の原因となる強い渦がある周波数領域で階層構造を保っていることを示している。

キーワード：風圧変動，ピーク負圧，位相スペクトル，ウェーブレット解析

### 1. はじめに

地震の波形の再現において、位相が極めて重要であることは、各所で指摘されている。例えば、神戸地震波の位相のみを用い、振幅特性として標準波を用いた場合には、神戸地震に極めて良く似た波形が再現される。そのため、地震応答解析では、振幅特性に加えて、位相特性として、幾種類かの既存の地震波の位相を用いて、波形を再現して応答解析が実施される。また、力学的に地震波の位相特性を推定する方法も盛んに研究されている（佐藤ら(2000)）。

風工学においても、屋根に作用する風圧変動において良く観察されるパルス状のピーク負圧の波形を位相特性で検討しようということ試みがなされている(Kumar(2000))。この試みでは、シミュレートされた波形を、実験で得られた歪度や尖度といった高次の確率変数に適合するように、位相特性を変化させる。しかし、この方法には力学的な特性との対応はなく、あくまでパルス状の風圧変動波形の模擬である。

本報告は、風圧変動特にピーク負圧の再現において、位相特性がどのような役割を果たしているかを、潮岬で得られた大縮尺の高層建築物模型に作用する風圧変動のデータを用いて解析した結果について述べたものである。解析の結果、波形の再現において

は、振幅特性はほとんど影響せず、位相特性が決定的な役割を果たすことが明らかとなった。この原因は、風圧変動のエネルギーの大部分が低周波数域にあることと密接に関係する。また、ピーク負圧は、低周波領域の変動の変動を含めたピーク負圧特性に関係する周波数領域の風圧変動の位相整合によって生じることが明らかとなった。

### 2. 解析データ

解析には、Fig.1に示した潮岬風力実験所に設置された大縮尺の高層建築物模型（2×2mの正方形断面で高さが8m）で2004年3月3日に観測された風圧変動記録（Fig.2）を用いた（奥田(1994)）。このデータが取得された時の平均風向は278度（北風を0度として時計周りが正）、平均風速は12.6m/sであった。Fig.2に示したデータは北面の最頂部西端の測定点北5と、最頂部から2段目の西面の中央の西8のデータである。風向がグランシングアングルにあたるため、北5には時折、1~2秒程度の周期を持つ大きな局部負圧が観測されている。



### 3. 風圧変動の振幅と位相特性

Fig.3はFig.2に示した風圧変動のフーリエ振幅スペクトル(0Hz~50Hz)を示したものである。Fig.3の横軸、縦軸はともに普通目盛りである。フーリエ振幅は、低周波数から高周波数に向かうにつれて急速に減少し、風圧変動のエネルギーが大凡10Hz以下の低周波数領域にのみ存在することが分かる。Fig.4は、2Hzまでのフーリエ振幅スペクトルである。低周波数領域におけるフーリエ振幅にはかなりのバラツキが認められるが、高周波数に向かうにしたがってバラツキは見かけ上小さくなる。

Fig.5は、2Hz以下の位相スペクトルを示したものである。フーリエスペクトルとは異なり、見かけ上、位相スペクトルはかなり不規則であり、この図からはこれといった特徴はないように思われるが、後に述べるように、一見不規則に見えるこの位相スペクトルの中に、波形を決定する重要な情報が含まれている。

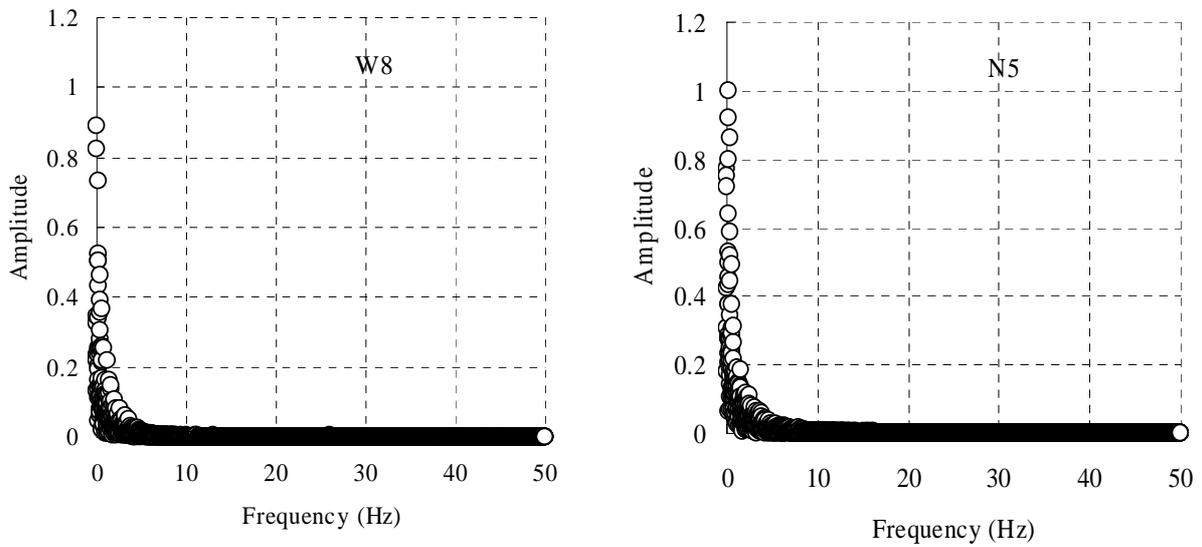


Fig.3 Amplitude spectra of pressure fluctuations (0Hz-50Hz)

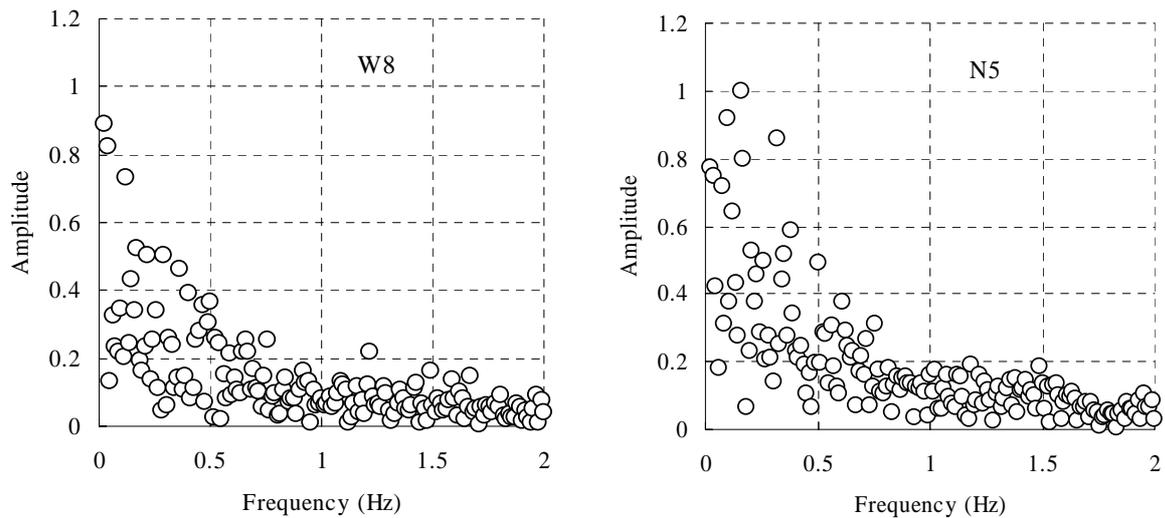


Fig.4 Amplitude spectra of pressure fluctuations (0Hz-2Hz)

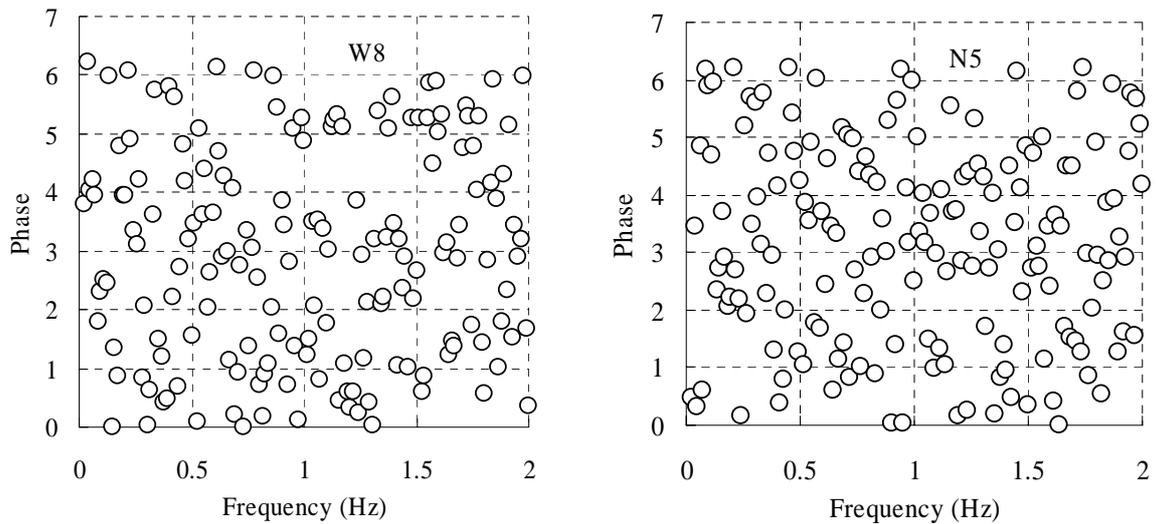


Fig.5 Phase spectra of pressure fluctuations (0Hz-2Hz)

#### 4. 位相特性と波形

Fig.5に示したように、一見不規則に分布している風圧変動の位相特性がどのように波形に影響しているかを調べるため、西8の風圧変動のフーリエ振幅と北5の風圧変動の位相特性を用いたフーリエ成分を合成して、新たな風圧変動の波形を生成しFig.6に示した。波形生成にあたっては、元の風圧変動記録が

ら、平均値を差し引いた上、振幅をそれぞれ標準偏差で基準化したものを使用した。

Fig.6は、西8の振幅スペクトルと北5の位相スペクトルによる合成波形である。図に示されているように、合成された波形は北5のオリジナル風圧変動波形と極めて良く似たものとなる。ゆっくりとした低周波数域の風圧変動の特性に加えて、ピーク状の大きな負圧が極めて良く再現されることが分かる。因み

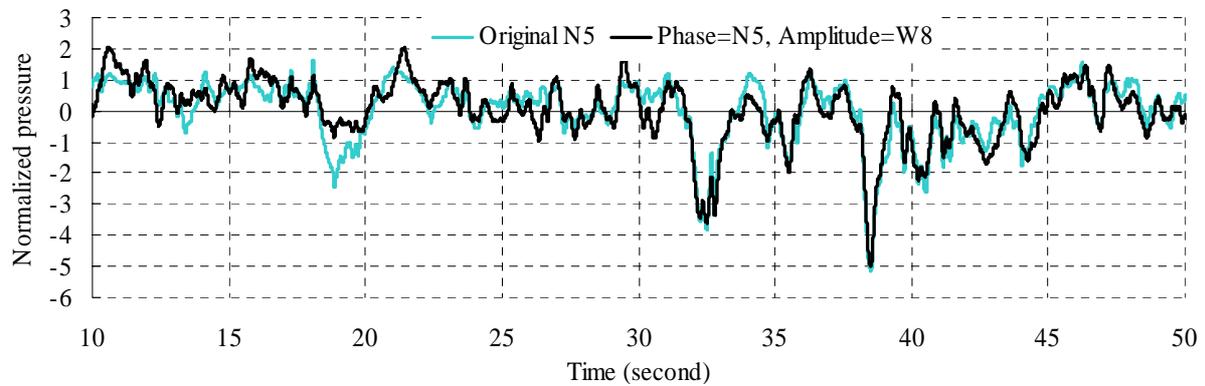


Fig.6 Comparison between original waveform at N5 and wave form reproduced by Fourier amplitude at W8 and Fourier phase at N5..

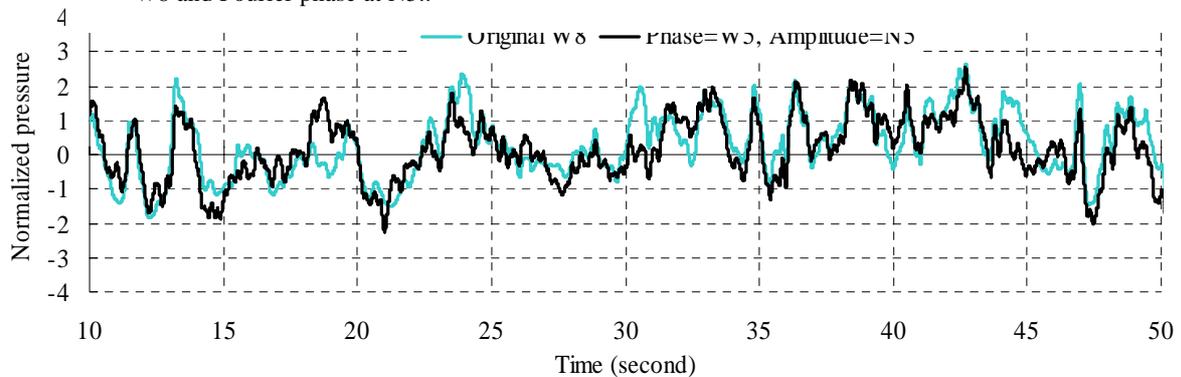


Fig.7 Comparison between original waveform at W8 and wave form reproduced by Fourier amplitude at N5 and Fourier phase at W8..

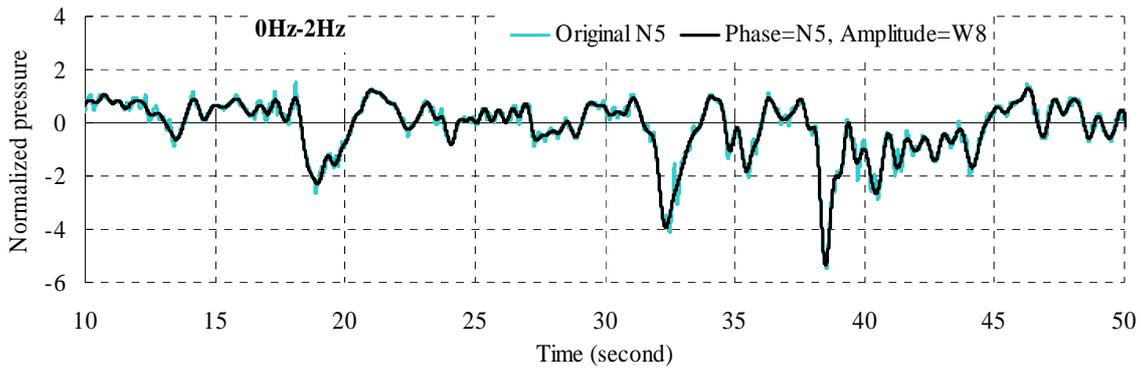


Fig.8 Comparison between original waveform at N5 and wave form reproduced by Fourier amplitude at W8 and Fourier phase at N5. 0Hz – 2Hz

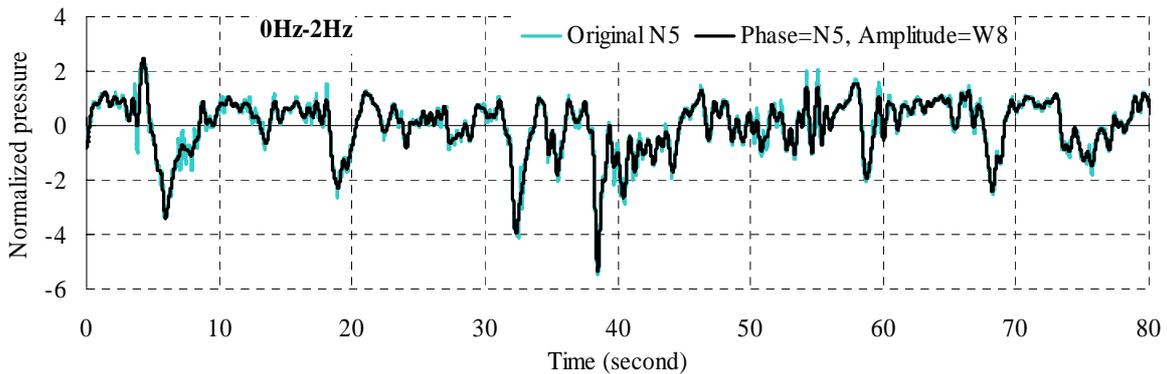


Fig9 Comparison between original waveform at N5 and wave form reproduced by Fourier amplitude at W8 and Fourier phase at N5. 0Hz – 2Hz

に、両者の相関係数は0.85ときわめて高い。このことは、フーリエ展開において、振幅スペクトルよりも位相スペクトルの中に、波形の再現に繋がるより重要な情報が隠されていることを示している。

Fig.7は、Fig.6とは逆に、北5の風圧変動のフーリエ振幅と西8の風圧変動の位相特性を用いて合成した波形を示している。この場合には、西8の風圧変動によく似た波形が合成される。この場合の相互相関係数は0.64であり、Fig.6に示した北5の波形の再現よりもかなり小さい。

このように、位相スペクトルが波形の再現に極めて重要な役割を果たしているのは、西8と北5の風圧変動の振幅スペクトルが振幅の大きな低周波数側では大差がなく、また高周波数側での振幅が極めて小さかったことによるものと思われる。

## 5. 波形の再現と必要周波数領域

Fig.3に示したように、フーリエ振幅スペクトルでは、高周波数領域における振幅は極めて小さい。したがって、波形の再現において、高周波数域の変動は余り効かないのではないかとと思われる。Fig.8は、2Hzまでの西8の風圧変動の振幅スペクトルと北5の

風圧変動の位相スペクトルを用いて波形を合成した結果を示したものである。データ数において、1/25になるが、結果は50Hzまでの全データを用いた場合より、はるかに良くオリジナル波形と一致する。特に、ピーク負圧については、極めて良く再現できることが分かる。因みに、オリジナル波形と再現波形の相互相関は0.986と極めて大きい。このことから、ピーク負圧を含めて、波形を特徴付ける重要な情報は2Hz以下の周波数領域における位相特性の中に含まれていると考えられる。

Fig.9は、より長いデータについて、2Hz以下の西8の振幅スペクトルに北5の位相スペクトルを適用し、北5のオリジナルデータと比較したものである。短いデータに適用した時に比べると、元のデータとの相関は若干小さくなるが、ピーク局部負圧の性状は良く捉えられており、位相情報の有用性が確認された。

Fig.10は0.5Hzまでのデータを用いて波形を合成した結果である。0.5Hzまでのデータを用いても、波形の大凡の様子は再現されているが、ピーク負圧はかなり小さくなってしまふ。したがって、ピーク負圧に関する情報は、0.5Hzから2Hzの間に含まれていると考えられる。

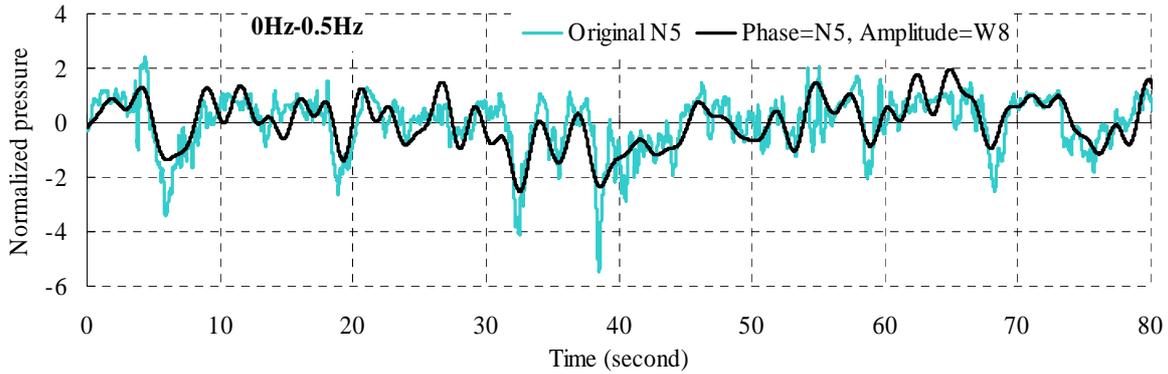


Fig10 Comparison between original waveform at N5 and wave form reproduced by Fourier amplitude at W8 and Fourier phase at N5. 0Hz – 0.5Hz

Fig.11は波形合成に必要な周波数と時刻38秒付近のピーク負圧の大きさとの関係を図示したものである。図に示されているように、使用するデータの上限周波数が2Hz以上では、ピーク負圧の大きさは変化しない。これより、ピーク負圧に関する情報は、ほぼ2Hzまでの位相スペクトルに含まれていると考えられる。なお、北5のオリジナル風圧変動データの38秒付近のピーク負圧のおおきさは、-5.458であり、2Hzまでの西8の風圧変動の振幅スペクトルを用いたピーク負圧の値-4.827の1.13倍、即ち、合成した波形は、元の波形のピーク負圧を1割強程度過少評価する。

## 6. ピーク負圧と位相

波形を合成した場合、ピーク風圧が生じる位相条件は、合成する周波数の波形のピークが同じ時間に生じることである。ここでは、簡単なため、正のピークが生じる条件を考える。波形の基本周期（解析データ区間）を  $T$  とし、この区間におけるピークについて考察する。この区間の基本周期の波形を  $\sin 2\pi f_1 t$  とすると、その最大値は  $T/4$  の時に生じる。基本周期の  $1/n$  の周期を持つ波、即ち周波数  $f_n = n/T$  の波の最大値は  $T/4n$  の時に生じるので、2つの波のピークが一致する場合の基本周期の波との時間差は、

$$\frac{T}{4} - \frac{T}{4n} = \frac{n-1}{4n}T \quad (1)$$

これを周波数  $f_n = n/T$  の波の位相差に直すと、 $(n-1)\pi/2$  となる。基本周期の波形に位相差  $\theta$  がある場合、即ち波形が  $\sin(2\pi f_1 t + \theta)$  で表される場合には、時間差は、

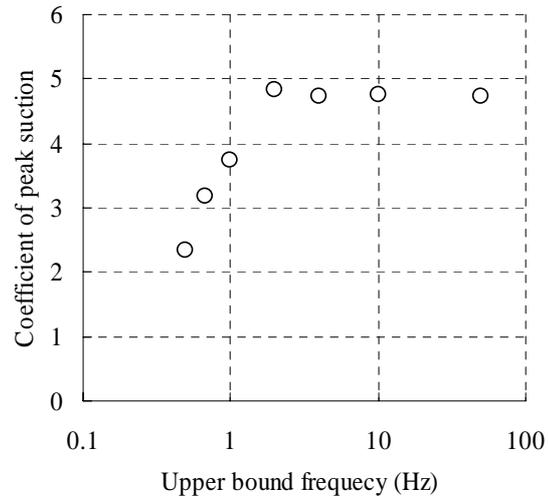


Fig.11 Effect of upper bound frequency to peak suction

$$\left( \frac{T}{4} - \frac{\theta}{2\pi} T \right) - \frac{T}{4n} = \frac{n-1}{4n} T - \frac{\theta}{2\pi} T \quad (2)$$

となる。これを周波数  $f_n = n/T$  の波の位相差に直

すと、 $\frac{n-1}{2}\pi + n\theta = n\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - \frac{\pi}{2}$  となる。このよ

うに、基本周期数の  $n$  倍の周波数を持つ波の場合の位相差は、 $n$  に比例して増加することになる。なお、隣合う周波数の位相差は、 $\pi/2 + \theta$  となり一定である。

Fig.12 は、振幅が全て1の20個の波形  $\sin(2\pi n f_1 t + \theta_n)$  について、位相差を一致させた場合の波形を示したものである。基本周期の波の初期位相は30度としている。この図から位相差を調整してピークが揃った場合の波形は、実験で得られるピーク風圧変動の波形に類似することが分かる。

Fig.13は、ピーク負圧が発生した側面風上端（北5）

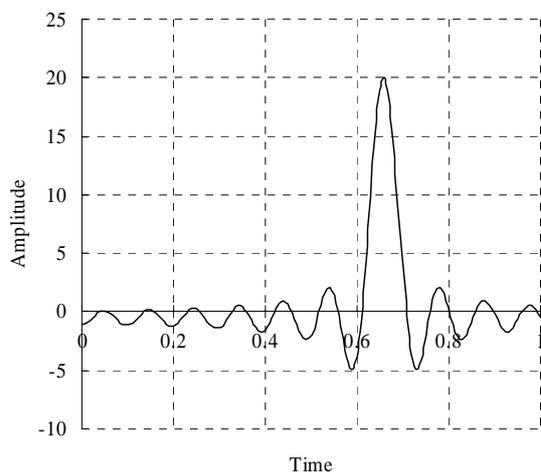


Fig.12 Simulated wave composed by sum of sin function with synchronized phase.

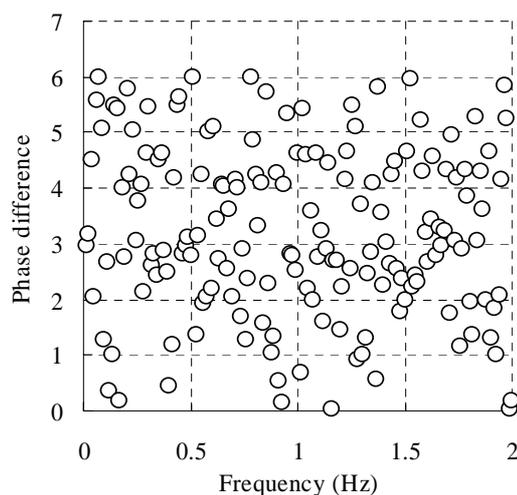


Fig.13 Phase difference spectrum (N5).

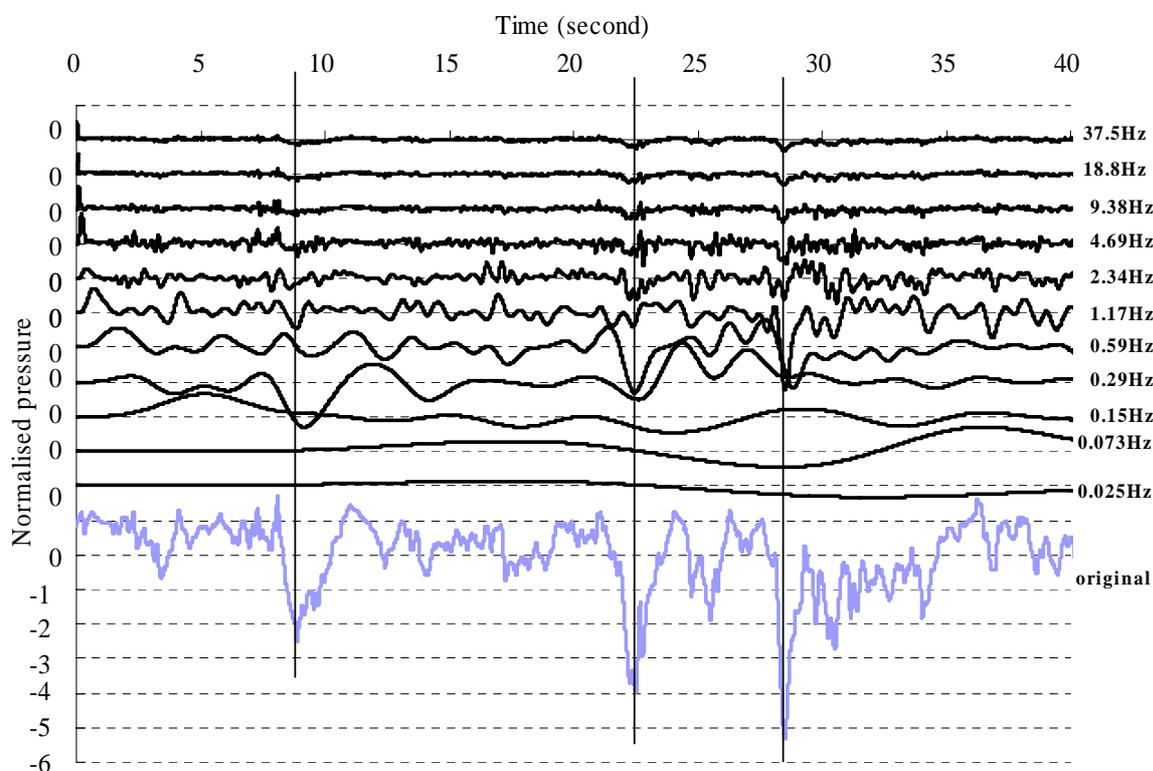


Fig.14 Decomposition of wave by 4th order B-Spline wavelet. (N5).

の風圧変動の位相スペクトルより求めた隣り合う周波数間の位相差を示したものである。もし、前節で示したように、全ての周波数の波のピークが揃うならば、位相差は3となる。Fig.12より、確かに位相差が3付近となる場合が多いが、その傾向は明瞭ではない。したがって、この解析データ区間でのピーク局部負圧の発生は、全ての周波数の波のピークがこの解析区間で一致したわけではなく、この解析区間のある特定の時間にある範囲の周波数の波のピークが一致することに原因があるのではないかと考えられる。次節では、このことを確認するため、時間周

波数解析のひとつであるウェーブレット解析によって、波形を解析し、ピーク局部負圧発生時にどのような現象が生じているかを解析する。

## 7. ウェーブレット解析

Fig.14は、4階のBスプラインウェーブレットを用いて北5の波形の多重解像度解析を行った結果である(Chui (1992))。このときに用いたデータは、Fig.9に示した波形の10秒から50秒の4096個のデータであ

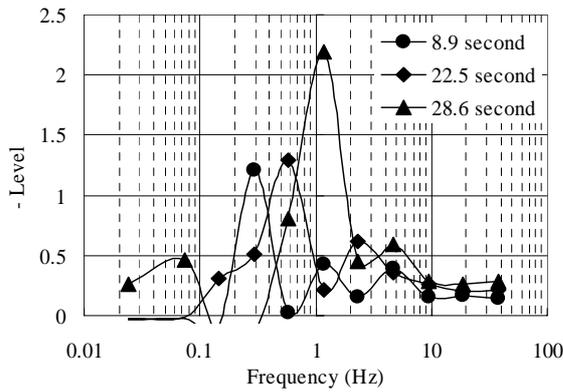


Fig.15 Level of components when negative peaks occur, N5

る。元波形から平均値を引いたデータを  $f_{12}(t)$  と表し、このデータのウェーブレット変換を2,4,8,16個・・・と2の巾乗ごとに求め、これを順に  $f_{11}(t), f_{10}(t), f_9(t), f_8(t) \dots$  とする。次に、 $f_i(t)$  と  $f_{i-1}(t)$  の差  $g_{i-1}(t) = f_i(t) - f_{i-1}(t)$  を求め、この時刻歴を表示する (Chui (1992))。元の波形  $f_{12}(t)$  は  $f_{12}(t) = \sum g_i(t)$  のように、各次数の  $g_i(t)$  の和として表される。Fig.14では、 $g_{11}$  から  $g_1$  までを大きい周波数から順に並び、右端にそれぞれの字数に対応する周波数を示している (河井(2008))。

Fig.14に示されているように、ピーク局部負圧が観測される時間においては、ある周波数帯での変動が同時にピークを持つことが分かる。したがって、これらの時間では隣り合う周波数帯の位相差が一定となると考えられる。ただ、同時にピークとなる周波数帯は、ピーク局負圧の特性によって変化する。パルス状の大きなピーク局部負圧が観測された8.9秒、22.5秒、28.6秒における各周波数の振幅を縦軸に、周波数を横軸にしてFig.15に示した。最も大きなピークが観測された28.6秒では、1.17Hzの振幅が最も大きくピークの全振幅の40%を占める。一方、22.5秒のピークでは0.59Hzの変動成分の寄与が最も大きく、2.34Hzの変動が続く。8.9秒では0.29Hzの変動が最も大きく、1.17Hzの変動が続く。このように、表れるピーク局部負圧の特性によって、中心となる変動の周波数が異なり、変動が同期する周波数帯も異なる。なお、Fig.9に示したように、ピーク局部負圧の出現には規則性は認められない。このように、ピーク負圧はある周波数帯で変動が同期することに伴って生じるが、これはピーク局部負圧を引き起こす流れの構造が階層構造をなしていることを示唆している。即ち、ピーク負圧が出現する時、ある周波数の渦を中心にカスケード的に流れ場に含まれる渦が通過していることを示している。

Fig.16, Fig.17は分解された1.17Hzの波形データ

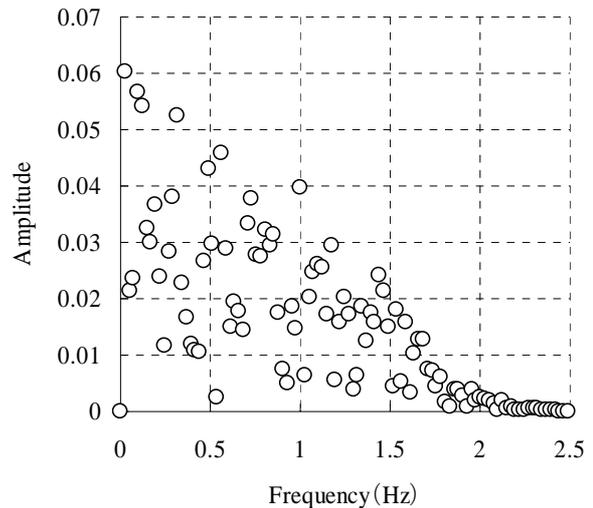


Fig.16 Amplitude spectrum of pressure fluctuation at N5

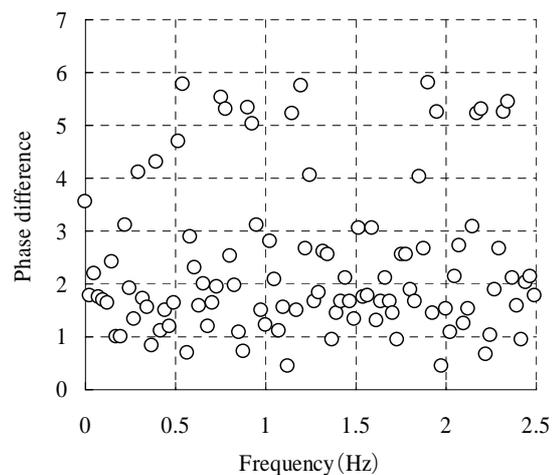


Fig.17 Phase difference spectrum of pressure fluctuation at N5

(4096個)をフーリエ変換し、その振幅スペクトルと位相差スペクトルを示したものである。時間・空間解析を行うウェーブレット解析では、各周波数に分解された波形といえども、Fig.16に示されたように多くの周波数成分を含んでいる。しかし、Fig.17に示されているように、位相差は1.75ラジアン(100度)付近に集中しており、ピーク負圧が位相整合によって生じることを示している。

## 8. 結論

潮岬風力実験所に設置された大縮尺の高層建築物模型に作用する風圧変動データを解析した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 風圧変動の特性を左右するのは、振幅特性よりも位相特性である。
- (2) 面に対してやや斜めから風が当たる時に、側面の風上端付近に発生する大きなピーク負圧は、周波

数2Hz以下の変動による。

- (3) ピーク負圧をもたらす風圧変動の位相特性と、周波数2Hz以下の風上面の振幅スペクトルによって、ピーク負圧をもたらす風圧変動をほぼ完全に再現することができる。したがって、振幅スペクトルをランダム位相の正弦波の合成によって求め、そのフーリエ振幅スペクトルと、ピーク負圧をもたらす風圧変動の位相スペクトルを組合せれば、ピーク負圧をもたらす風圧変動を模擬することができる。
- (4) ピーク負圧はある周波数付近の変動の位相が揃った時に生じる。本解析に用いた風圧変動の場合、1.17Hz付近での数個の波の位相がそろうだけで大きなピーク負圧をもたらされた。
- (5) ピーク負圧をもたらす中心となる周波数の時刻歴波形は、低周波数領域を含めて、ほぼ中心周波数の2倍の周波数までに、変動のエネルギーが分布し、フーリエ分解された波の位相差はほぼ一定となる。したがって、中心となる風圧変動の時刻歴波形は、位相差を適切に模擬できれば容易に再現することができる。

#### 謝 辞

本研究に用いられた観測データは、独立法人建築

研究所の奥田泰雄が中心となって作成した高層建築物模型の風圧観測システムによるものである。ここに、記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 奥田泰雄(1994): 直方体建築物に作用する風圧力の機構に関する実験的研究, 京都大学博士論文.
- 河井宏允(2008), 円錐渦と局部負圧, 日本風工学会誌, Vol.33. No.3, pp204-211.
- 佐藤忠信・室野剛隆・西村昭彦(2000): 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No. 640, pp. 119-130.
- Charles K. Chui (1992), "An Introduction to Wavelets", Academic Press, INC
- Kawai,H.(2004): Filed Measurement of Wind Pressure on Buildings, ;Wind Engineering & Science, International Workshop o Wind Engineering \$ Science, pp.170-181.
- Kumar,K.S.and T.Stathopoulos: A computerized Approach Replacing Wind Pressure Time Series, (8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and structural Reliability, PMC2000-018.

### Importance of Phase Characteristics Related with Strong Peak Suction

Hiromasa KAWAI

#### Synopsis

Amplitude and phase characteristics of pressure fluctuations observed in a large scale building model in natural wind were investigated by Fourier and wavelet analyses. Characteristics of the pressure fluctuation do not depend on the amplitude characteristics but mainly on the phase characteristics. Particularly large peak suction on a side face for glancing wind occurs when the phase of several components is arranged in some frequency region so that peaks of each component waves appear at the same time. The arrangement occurs randomly and the arrangement range of the frequency is different from a peak to a peak.

**Keywords:** pressure fluctuation, peak suction, phase spectrum, wavelet analysis