

# 多点風速計の周波数応答補正による瞬間風速評価

## Evaluation on Instantaneous Wind Speed Measured with General Multi-Channel Anemometer by Correcting Frequency Response Characteristic

作田 美知子 MICHIKO SAKUTA  
岩本 毅 TAKESHI IWAMOTO

本研究は、汎用的な無指向性の多点風速計(以下、GMA)を用いて瞬間風速の評価をすることを目的とし、GMAで計測した風速値の周波数応答特性を補正することで瞬間風速の評価を試みた。GMAと熱線流速計(以下、HWA)の計測値から、GMAによる計測でも10Hz以上の周波数においても有効な風速変動が得られることがわかった。さらに、計測値の低下量や位相遅れを補正することで、GMAの時刻歴波形はHWAとよい対応を示した。時間スケール1/100程度を想定すると、風環境評価における瞬間風速の評価に本手法の適用が可能と考える。

キーワード：多点風速計，瞬間風速，風環境評価，周波数応答補正

The purpose of this study is to evaluate instantaneous wind speed with general multi-channel anemometer (GMA). Correcting frequency response characteristic of wind speed measured with GMA, instantaneous wind speed was evaluated. By measuring wind speed with GMA and hot-wire anemometer (HWA), effective fluctuating wind speed in a frequency band over 10Hz was obtained from wind speed measured with GMA. As amplitude and phase lag were corrected, the time history of wind speed measured with GMA is compatible with that measured with HWA. In the case that time scale on wind tunnel experiment is approximately 1/100, this method is applicable to evaluate instantaneous wind speed for wind environmental assessment.

**Key Words:** Multi-Channel Anemometer, Instantaneous Wind Speed, Wind Environmental Assessment, Correction Frequency Response Characteristic

### 1. はじめに

市街地の風環境評価は、風洞実験やCFD解析により予測評価が行なわれているが、平均風速だけでなく瞬間風速を予測することも重要<sup>1)</sup>である。風洞実験で用いられる風速計は熱線流速計(以下、HWAと称す。)やサーミスタ風速計に代表される無指向性の多点風速計(以下、GMAと称す。)等様々なものがある<sup>2)</sup>。HWAはその応答性能は非常に高いが、風環境評価を行う場合には、建物周辺の複雑な流れ場において数多くの測定点を評価する必要があるため、GMAを用いることが多い。

GMAは、センサー部のサーミスタ素子や白金巻線はガラス等でコーティングされており、その応答性能は0.1Hz～1Hz程度とHWAよりも悪い。GMAの応答性

能を高める試み<sup>3)</sup>として、センサー部のガラスのコーティングを無くすことや、風速の応答振幅を補正することが行われたが、汎用化されてはいない。そのため、通常GMAは平均風速の計測にのみ用いられ、瞬間風速の評価を行う場合にはGMAで計測した平均風速にガストファクターの仮定値を乗じて評価を行う。

そこで、筆者らはGMAの計測値を用いた瞬間風速の評価として、計測方法を工夫することで1Hz以上の周波数においてもGMAで計測した風速値から有効な風速変動値を拾い出し、その計測値に対して周波数毎に低下量や位相遅れを補正することで、瞬間値の評価を試みた。本研究では、GMAの周波数応答性能の把握および補正值を求めることを目的に、HWAとGMAを用いて風洞気流中で風速測定を行った。そして、GMAの計測値を

補正し瞬間値を評価した。GMAを用いた瞬間風速の評価手順の概要と瞬間風速評価の事例を示す。

## 2. 瞬間風速評価手順

GMAで計測した風速値の周波数応答の補正手順を示す。GMAとHWAで同時計測した風速時刻歴波形をフーリエ変換し、振幅スペクトルと位相スペクトルを求める。GMAとHWAのスペクトルを比較し、HWAを基準とした振幅の比率  $GMA/HWA = gain$  および位相の差分  $GMA - HWA = phase$  を算出する。算出した  $gain$  と  $phase$  の近似値を用いてGMAの振幅スペクトルと位相スペクトルに補正を施す。補正後の振幅スペクトルと位相スペクトルに逆フーリエ変換を行い時刻歴波形に戻す。これらの展開は式(1)～(13)に示される。補正方法の概念を図-1に示す。

$$XH(t) \xrightarrow{FFT} XH_A(f) + iXH_B(f) \quad (1)$$

$$XG(t) \xrightarrow{FFT} XG_A(f) + iXG_B(f) \quad (2)$$

$$GH(f) = \sqrt{\{XH_A(f)\}^2 + \{XH_B(f)\}^2} \quad (3)$$

$$GG(f) = \sqrt{\{XG_A(f)\}^2 + \{XG_B(f)\}^2} \quad (4)$$

$$PH(f) = \tan^{-1}\{XH_B(f)/XH_A(f)\} \quad (5)$$

$$PG(f) = \tan^{-1}\{XG_B(f)/XG_A(f)\} \quad (6)$$

$$g(f) = GG(f)/GH(f) \quad (7)$$

$$p(f) = PG(f) - PH(f) \quad (8)$$

$$CGG(f) = GG(f)/g(f) \quad (9)$$

$$CPG(f) = PG(f) - p(f) \quad (10)$$

$$CXG_A(f) = CGG(f) \times \cos CPG(f) \quad (11)$$

$$CXG_B(f) = CGG(f) \times \sin CPG(f) \quad (12)$$

$$CXG_A(f) + iCXG_B(f) \xrightarrow{*FFT} CXG(t) \quad (13)$$

ここで、

$XH(t)$ ; HWA 風速時刻歴の計測値、

$XG(t)$ ; GMA 風速時刻歴の計測値、

$GH(f)$ ; HWA 振幅スペクトル、 $GG(f)$ ; GMA 振幅スペクトル、

$PH(f)$ ; HWA 位相スペクトル、 $PG(f)$ ; GMA 位相スペクトル、

$g(f)$ ; gain、 $p(f)$ ; phase、

$CGG(f)$ ; 補正後の GMA 振幅スペクトル、

$CPG(f)$ ; 補正後の GMA 位相スペクトル、

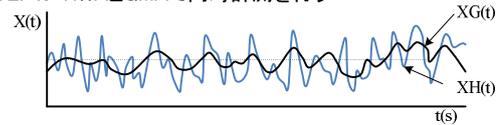
$CXG(t)$ ; 補正後の GMA 風速時刻歴、

$t$ ; 時刻、 $f$ ; 周波数とする。

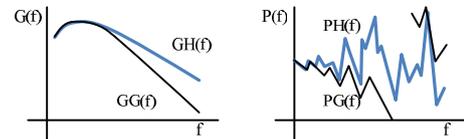
## 3. 実験概要

GMAの応答特性の把握および周波数応答補正に用いる  $gain$  と  $phase$  を求めることを目的に HWA と GMA を

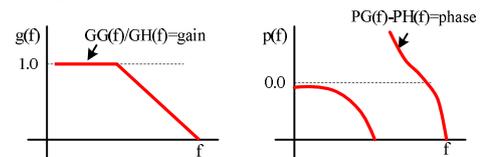
STEP1. HWAとGMAで同時計測を行う



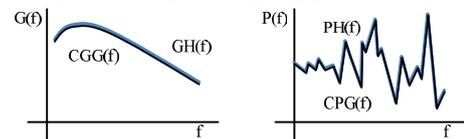
STEP2. FFTによりフーリエスペクトルを求める。



STEP3. gainとphaseを求める。



STEP4. gainとphaseを用いて補正を施す。



STEP5. 逆FFTにより、風速の時刻歴に戻す。

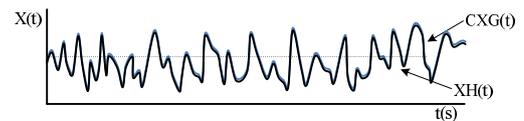


図-1 補正方法の概念

表-1 使用風速計概要

記号	風速計	センサー素子	
HWA	カノマックス社製熱線流速計 平行流形プローブ0247R-T5	タングステン φ5μ	
GMA	SMA	芝浦電子製サーミスタ 多点風速計 AS201形	サーミスタ
	TMA	東亜工業製 多点風速計	白金巻線 抵抗体

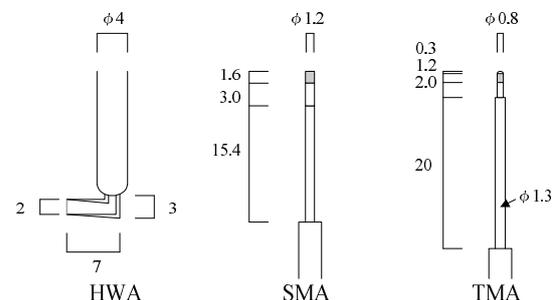


図-2 風速計外観

用いて気流の同時計測を行った。

### (1) 使用風速計概要

HWAはカノマックス社製の熱線平行流形プローブを使用した。GMAは芝浦電子製サーミスタ多点風速計

(以下、SMA と称す。)と GMA の中では高い応答性を有する東亜工業製の多点風速計(以下、TMA と称す。)の2種類を用いた。使用した風速計の概要を表-1に、風速計の外観を図-2に示す。

(2) 実験条件

GMA (SMA,TMA) と HWA のセンサー部を風直方向に 5mm 離して風洞床面 5mm 高さに設置し、計測を行った。実験風速は高さ 5mm で 0.8 ~ 9.0m/s とし、風洞床面の粗度を変えて各風速で5つの乱れ強さで計測した。再現した気流の乱れ強さは風速約 3.5m/s で 6% ~ 26% 程度である。幾何学スケールは 1/300 を想定した。実験状況として、TMA と HWA での同時計測の状況を写真-1に示す。計測の際には SMA,TMA の高周波で低減する微小な信号を計測できるように、A/Dには NI 社製の 18bit A/D変換器 (dithering 機能有) を使用し、51.2kHz でオーバーサンプリングした。サンプリング個数は  $2^{21}$  個 (40.96 秒) とした。フーリエ変換には、最初と最後の約 0.48 秒分のデータをフェードイン・フェードアウト処理したデータを用いた。時刻歴波形は平均化処理で 400Hz のデータとし、最初と最後の 0.48 秒分のデータをカットして 16000 個のデータとした。

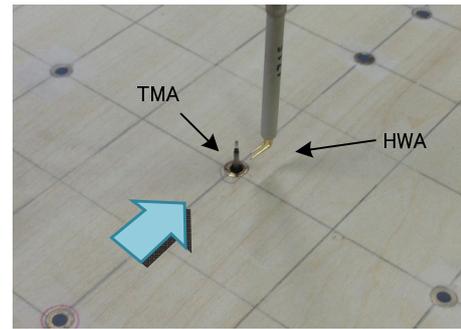
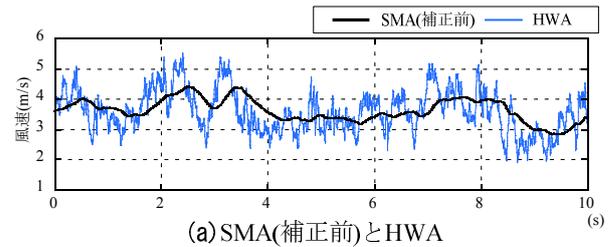
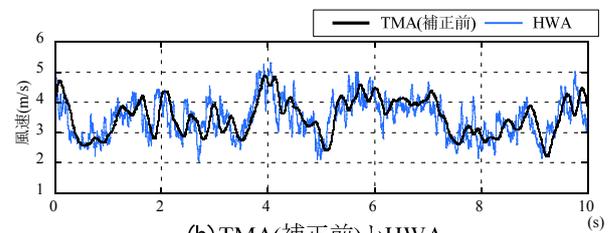


写真-1 実験状況



(a) SMA(補正前)とHWA



(b) TMA(補正前)とHWA

図-3 GMA(補正前)とHWAの時刻歴

4. 実験結果

(1) 風速計の応答性能

GMA (SMA,TMA) と HWA での同時計測結果の一例として、風速約 3.5m/s, 乱れ強さ18%での結果を示す。風速の時刻歴波形を図-3に示す。時刻歴波形は後述する補正後の波形と同様に、100Hzの移動平均処理をした。SMA,TMAともにHWAと比較すると高い周波数成分が計測できておらず、特にSMAは数秒程度の変動しか捉えていないことがわかる。振幅スペクトルおよび位相スペクトルをそれぞれ図-4に示す。SMAでは1Hz程度の周波数でも応答性能の低下や位相の遅れがみられる。また、TMAでは振幅スペクトルは1Hz程度まではHWAとよい対応を示すが、2Hz付近から低下し、位相も徐々に遅れる。SMA,TMAともに振幅は小さくなるものの10Hz以上の周波数においても風速変動を捉えており、特にTMAはノイズレベルを小さくするよう改良されているため、50Hz以上の周波数においても風速変動を捉えている。

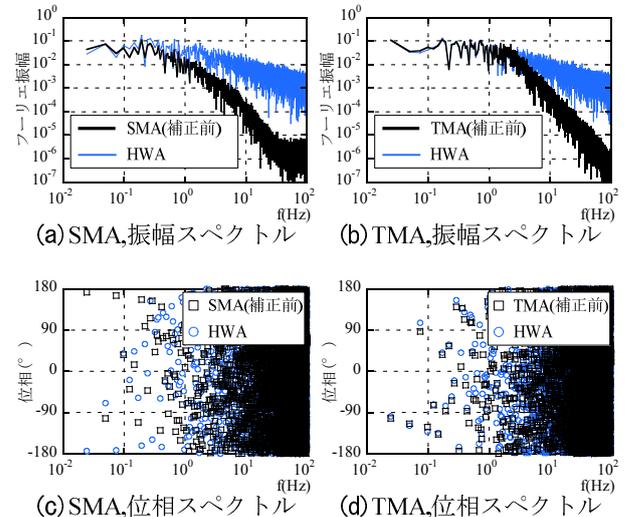


図-4 振幅スペクトルと位相スペクトル

(2) 風速および乱れ強さの影響

gain と phase への風速および乱れ強さの影響を検討した。風速の影響の検討では、風洞床面のラフネスブロックの配置を同一条件とし風速のみ変化させた。乱れ強さは風速によって若干変化し16~20%であった。gain と phase の近似線の風速による変化を図-6に示す。SMAのgainは低周波数から風速が低くなるほど小さくなる傾

gain と phase を図-5に示す。図-5にはgain と phase の近似線も合わせて示す。phase は SMA,TMA ともに 10Hz 以上ではノイズにより判別が難しいため、近似線はそれより低周波数でのものを延長して用いた。

向がみられたが、phaseは風速による差は小さく、いずれの風速でも同じ近似線で近似することができた。

TMAでは1.5Hz以上の周波数で風速が低くなるほどgainは小さくなりphaseが遅れる傾向にある。風速を一定にし、乱れ強さを変化させた場合には、SMA,TMAともにgainとphaseに顕著な差はなかった。gainとphaseは、平均風速による影響がみられるが、乱れ強さによる影響は小さいといえる。

5. 瞬間風速評価結果

図-5に示したgainとphaseの近似を用いてスペクトルを補正し、逆フーリエ変換により得られた時刻歴波形を図-7に示す。gainとphaseの傾向から補正が可能な周波数は100Hz程度までと判断し、100Hzで移動平均処理をした。また、SMAは図-4から30Hz以上ではノイズが大きいため、30Hzでローパスフィルターをかけた。SMA,TMAともに周波数補正を施すことで、補正前よりもHWAの変動を捉えることができている。風速スケールを1/3と想定すると、時間スケールは1/100となり、風環境評価が必要となる平均化時間3秒程度の瞬間風速の評価について、本手法での評価が適用できるものと考ええる。

6. おわりに

本論文では、無指向性の多点風速計の計測値に周波数補正を加えることで瞬間風速を評価する方法を示した。GMAとHWAの周波数応答性能の比較から、GMAでも計測方法を工夫することで10Hz以上の周波数においても有効な風速変動が得られることがわかった。さらに、gainとphaseの近似値を使って補正したGMAの時刻歴波形はHWAとよい対応を示し、本手法は風環境評価における瞬間風速の評価に適用が可能と考える。今後は、gainとphaseを精査するとともに、市街地モデルにおいても瞬間風速の評価を行い、風環境評価における本手法の有効性について検討を行う予定である。  
謝辞：本研究を行うにあたり、ご協力いただきました株式会社WindStyleならびに東亜工業株式会社に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 村上他, 居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第325号, 1983
- 2) 日本建築センター, 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 2008

- 3) 岩佐他, 風洞実験における風速変動量の測定に関する研究—高応答特性を有するサーミスター風速計を用いた場合—, 日本建築学会論文報告集第280号, 昭和54年6月

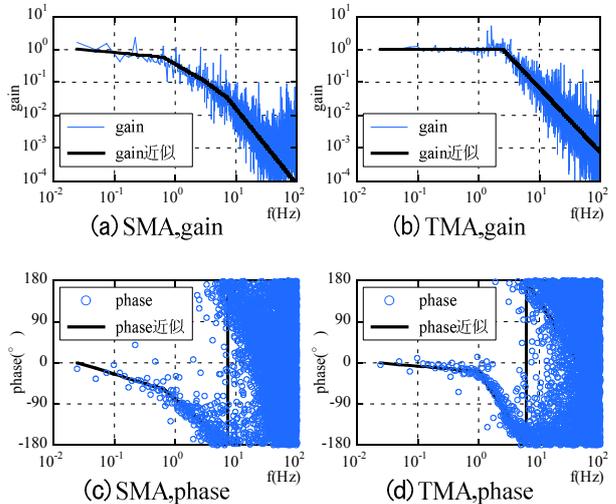


図-5 gainとphase

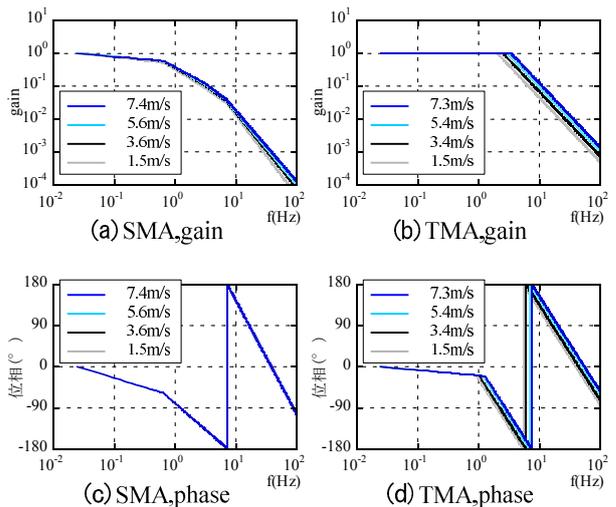


図-6 gainとphaseの風速による変化

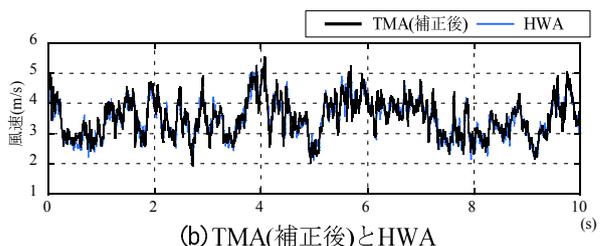
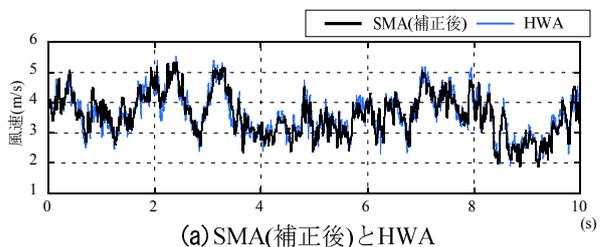


図-7 GMA(補正後)とHWAの時刻歴