T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高減衰超高層建物の風応答ピークファクターの検討
Title(English)	Evaluation on the peak factor of the wind-induced response of high-rise building of the AIJ recommendation for loading
著者(和文)	張庭維, 佐藤大樹
Authors(English)	Ting-Wei Chang, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ｉ, , pp. 357-360
Citation(English)	, Ｉ, , pp. 357-360
発行日 / Pub. date	2022, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2021年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2022年3月

高減衰超高層建物の風応答ピークファクターの検討

構造－振動　　正会員 ○ 張庭維[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]

ピークファクター　風応答　風洞実験
パワースペクトル密度 高減衰 極値分布

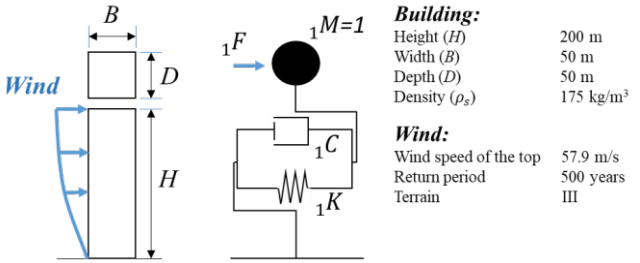
1.はじめに

日本の高層建築物は、風による荷重を考慮した構造設計が必要である[1]。風工学として、ピークファクターは、最大値に対する標準偏差の比を表し、風応答の特性を評価するための重大的な指標の 1 つである[2]。

しかし、Davenport[2]の提案したピークファクターの近似式は低い減衰の建築物を対象とした、狭帯域の振動応答を適用しており、高減衰建築物に十分に検討されていない。本報では、高減衰の超高層建物モデルを用いて風方向および風直交方向風力に対する応答解析を行い、Davenport のピークファクターを検証する。

2.建築物モデルと風力の概要

本研究で想定した建築物は、高さ H = 200 m、幅 B、奥行 D が等しく $B=D=50$ m の超高層建築物である(Fig.1(a))。1 次の固有周期が、${}_1T=0.01H=2$ 秒とした H1 フレーム、${}_1T=0.02H=4$ 秒とした H2 フレーム、${}_1T=0.03H=6$ 秒とした H3 フレームの 3 種類設定する。さらに、3 種類のフレームに対し、6 種類の 1 次の減衰定数（${}_1\xi$= 1%, 2%, 4%, 10%, 20%, 30%）を設定する、本報では一次モードに着目し、1 質点モデルを用いて解析を行う（Fig.1(b)）。1 次のモデルの振動数${}_1f$、減衰定数${}_1\xi$、バネ要素${}_1K$や、モデルのダッシュポット要数${}_1C$を、Table.1 に示す。



(a) Target building　(b)SDOF model

Fig. 1. Target building and wind

建物頂部最大平均風速は U_H=57.9m/s である。(地表面粗度区分 III、基準風速 U_0=36m/s、再現期間 500 年として換算した）[1]。風洞実験[3]を使用して 10 波（Wave1～Wave10 とする）の風外力時刻歴波形を作成し（風方向(along-wind)と風直交方向(across-wind))。なお、波形前後に 50s のエンベロープを設け、中間の 600 秒（10 分）でピークファクターを評価に用いる（Fig.2)。Fig.3 で Wave 1～10 の風力パワースペクトル密度（PSD）をアンサンブル平均した結果を示す。

Table.1. Parameter for Analytical models

Model	${}_1f$ [s]	${}_1\xi$	${}_1K$ [kN/m]	${}_1C$ [kN·s/m]
H1-01	0.500	0.010	9.870	0.063
H1-02		0.020		0.126
H1-04		0.040		0.251
H1-10		0.100		0.628
H1-20		0.200		1.257
H1-30		0.300		2.513
H2-01	0.250	0.010	2.467	0.031
H2-02		0.020		0.063
H2-04		0.040		0.126
H2-10		0.100		0.314
H2-20		0.200		0.628
H2-30		0.300		1.257
H3-01	0.167	0.010	1.097	0.021
H3-02		0.020		0.042
H3-04		0.040		0.084
H3-10		0.100		0.209
H3-20		0.200		0.419
H3-30		0.300		0.838

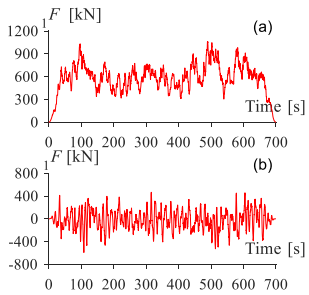


Fig. 2. Time history of wind force (a) along-wind, (b) across-wind

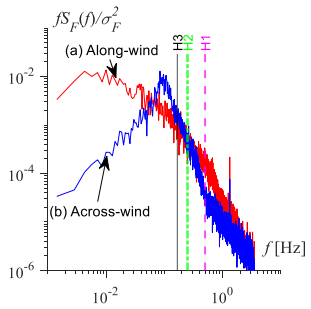


Fig. 3. PSD of wind force

3.ピークファクターの予測手法

建築物荷重指針[1]において変位のピークファクターの予測 g_D は式(1)で表される。

$$g_D=\sqrt{2ln(\nu_D T)}+\frac{0.5772}{\sqrt{2ln(\nu_D T)}} \tag{1}$$

ここで、変位のゼロクロッシング数ν_Dは式(2)[1]となる。

$$\nu_D=\sqrt{\sigma_V^2/\sigma_D^2} \tag{2}$$

同様に、速度、加速度のピークファクター(g_V と g_A)はそれぞれ式(3 a, b)より算出する。

Evaluation on the peak factor of the wind-induced response of high-rise building of the AIJ recommendation for loading

Ting-Wei CHANG, Daiki SATO

$$g_V = \sqrt{2ln(\nu_V T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2ln(\nu_V T)}} \tag{3a}$$

$$g_A = \sqrt{2ln(\nu_A T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2ln(\nu_A T)}} \tag{3b}$$

ここで、速度と加速度のゼロクロッシング数ν_Vとν_Aはそれぞれ式(4a, b)となる。

$$\nu_V = \sqrt{\sigma_A^2/\sigma_V^2}\ , \qquad \nu_A = \sqrt{\sigma_{A'}^2/\sigma_A^2} \tag{4a,b}$$

ここに、σ_D^2，σ_v^2，σ_A^2，$\sigma_{A'}^2$はそれぞれ変位、速度、加速度、加速度の微分値（加加速度）の分散を表し、それぞれの変動応答のパワースペクトル密度$S_D(\omega)$，$S_v(\omega)$，$S_A(\omega)$，$S_{A'}(\omega)$を積分することにより算出できる(式(5 a-d))。

$$\sigma_D^2 = \int_0^\infty S_D(\omega)d\omega \quad , \quad \sigma_v^2 = \int_0^\infty S_v(\omega)d\omega \tag{5a,b}$$

$$\sigma_A^2 = \int_0^\infty S_A(\omega)d\omega \quad , \quad \sigma_{A'}^2 = \int_0^\infty S_{A'}(\omega)d\omega \tag{5c,d}$$

ここで、変動応答のパワースペクトル密度$S_D(\omega)$ $S_v(\omega)$，$S_A(\omega)$，$S_{A'}(\omega)$は、それぞれ式(6 a-d)で表される。

$$S_D(\omega) = |H(i\omega)|^2 S_{F,1}(\omega)\ , \qquad S_v(\omega) = \left|\dot{H}(i\omega)\right|^2 S_{F,1}(\omega) \tag{6a,b}$$

$$S_A(\omega) = \left|\ddot{H}(i\omega)\right|^2 S_{F,1}(\omega)\ , \qquad S_{A'}(\omega) = \left|\dddot{H}(i\omega)\right|^2 S_{F,1}(\omega) \tag{6c,d}$$

ここに、$H(i\omega)$は周波数応答関数であり、式(7 a-d)で表される。

$$H(i\omega) = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{{}_1\omega}\right)^2 + i\left(2{}_1\xi\frac{\omega}{{}_1\omega}\right)} \cdot \frac{1}{{}_1K} \tag{7a}$$

$$\dot{H}(i\omega) = i2\pi\omega H(i\omega), \qquad \ddot{H}(i\omega) = -(2\pi\omega)^2 H(i\omega) \tag{7b,c}$$

$$\dddot{H}(i\omega) = -(i2\pi\omega)^3 H(i\omega). \tag{7d}$$

ここで、${}_1\omega$は一次の固有円振動数($= 2\pi_1 f$)。

Fig.4(a-c) に変位、速度および加速度の風方向と風直交方向のピークファクターの予測(Prediction)と解析結果(THA)の比較を示す。Fig.4(a)より、変位のピークファクターの解析結果は 2.5 から 4.0 の範囲であり、変位のピークファクターの予測は 3.0 に近いことが分かる。Fig.4(b, c)より、速度と加速度のピークファクターの場合、解析結果は 2.5 から 4.5 の範囲であり、その予測は 3.5 に近いことが分かる。

4. Cartwright の極値分布

Davenport の近似式(式(1))は Cartwright[4]の極値分布から導出されたものである。ピークファクターの予測の精度を検証するため、風応答の極値分布を検討する。Cartwright の極値分布は式(8)で表される[4]。

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[\varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\varepsilon^2}\right) + \eta\sqrt{1-\varepsilon^2}\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)\int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx\right] \tag{8}$$

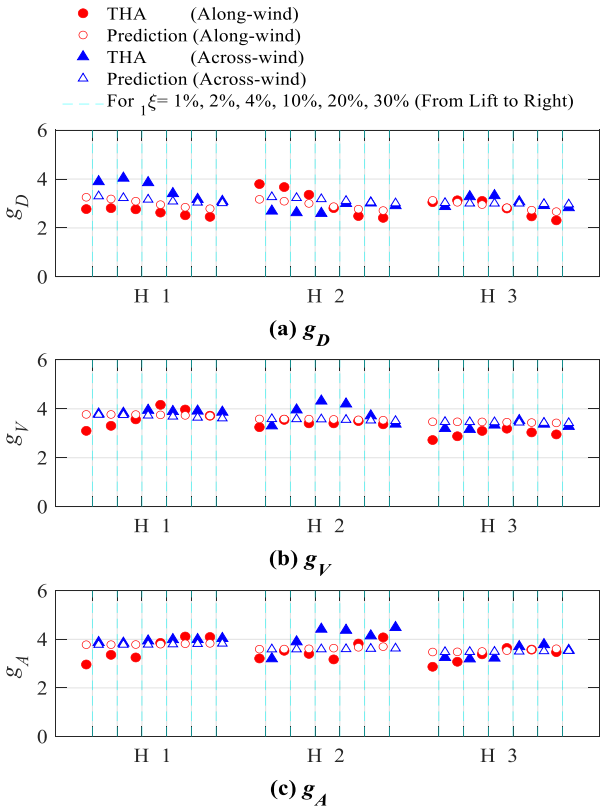


Fig. 4. Peak factor

Cartwright の累積極値分布は式(9)で表される[4]。

$$q(\eta) = \int_\eta^\infty p(\eta)d\eta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[\int_{\frac{\eta}{\varepsilon}}^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx + \sqrt{1-\varepsilon^2}\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)\int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx\right] \tag{9}$$

ε はパワースペクトル密度の特性を表すパラメータであり、式(10)より得られる[4]。εは無次元量であり、$0 \le \varepsilon \le 1$の値となる。ε が大きい場合、スペクトルは広帯域のものとなり、確率過程も広帯域確率過程となる。逆に ε が小さく、0に近いときは狭帯域のスペクトルとなり、確率過程も狭帯域確率過程となる。

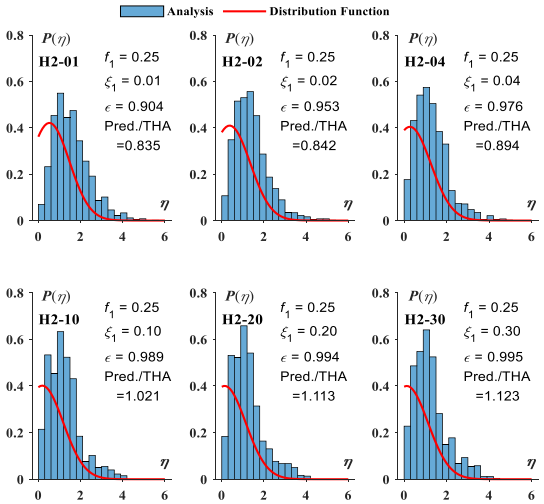
$$\varepsilon = \sqrt{1-\frac{\sigma_V^4}{\sigma_D^2\sigma_A^2}} \tag{10}$$

ここで、式(1)は式(9)の近似式(式(11) [4])を用いることを算出される。

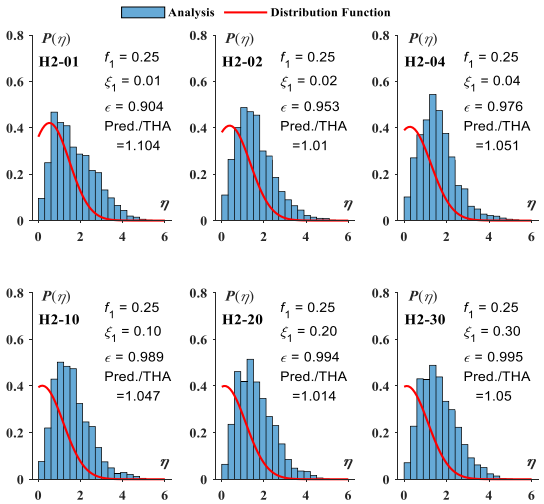
$$q(\eta) \approx \sqrt{1-\varepsilon^2}\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \tag{11}$$

Fig.5，6 に風方向および風直交方向における，時刻歴と式(8)の極値分布の比較を示す。それぞれの図において(a)変位，(b)速度，(c)加速度である。Fig.5(a-c)より、風方向の変位、速度および加速度の確率密度分布を見ると、ε が大きい場合はηの増加に伴い、極値がベキ乗的に減少し、

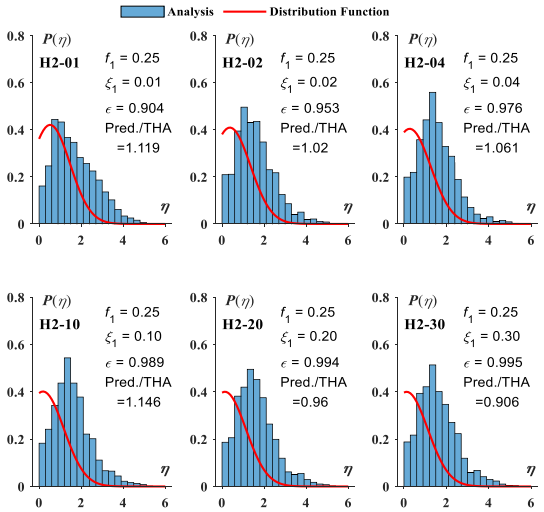
Cartwright の極値分布とのばらつきが大きいことが分かる。Fig.6(a-c)の風直交方向での変位、速度および加速度の極値分布は同じモデルであっても、風方向での結果に比べ、ε が小さい値を示している。また、変位、速度および加速度の確率密度分布においても Cartwright の極値分布に近いことが分かる。これは、風直交方向の風力が狭帯域のものであるため、減衰の大きなモデルであっても、応答が狭帯域となるためである。



(a) Displacement

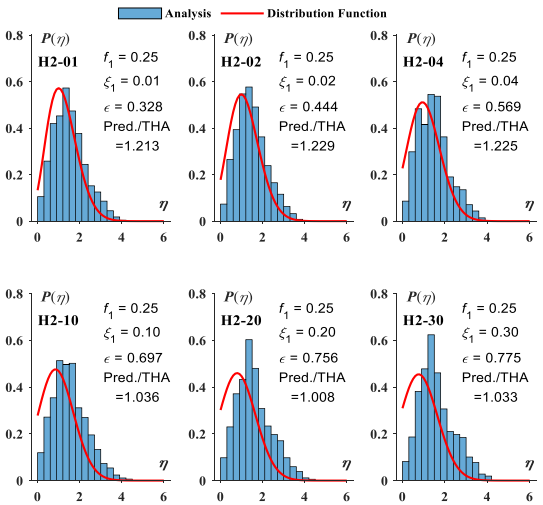


(b) Velocity

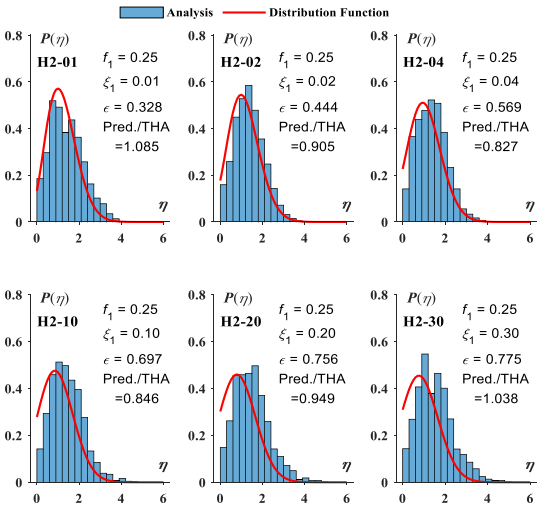


(c) Acceleration

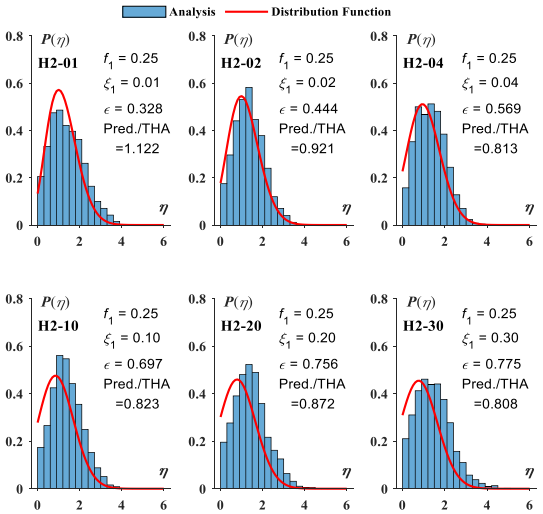
Fig.5. Peaks' distribution (Along-wind)



(a) Displacement



(b) Velocity



(c) Acceleration

Fig.6. Peaks' distribution (Across-wind)

Fig.7(a-c)に、変位，速度および加速度のピークファクターの予測精度を示す。風方向の場合(変位、速度および加速度)には、ε は 1.0 近く、予測誤差のばらつきが大きいことが分かる。一方、風直交方向の場合には、ε は 0.1～0.9 であり、0.5 を越えると、予測誤差が大きいことが分かる。

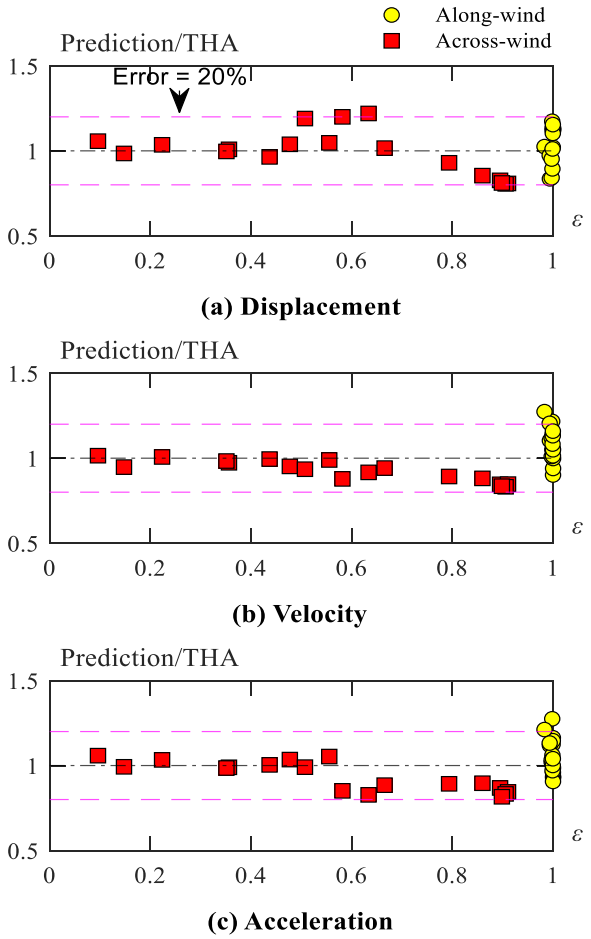


Fig.7. Accuracy of the coefficient ε

Fig.8 に、Cartwright の累積極値分布の一般式（式(9)）と近似式（式(11)）の比較を示す。ε は大きくなると、誤差がおおきくことが分かる。このことが Fig.7 において ε が大きい場合に式(1)による予測精度が低下した原因の一つである。

5. おわりに

本報では、高減衰超高層建物の風応答ピークファクターを検証した。風方向のピークの解析結果と Cartwright の極値分布は差異が大きく、風直交方向のピークの極値分布の予測精度は良い。更に、ε(式(10))は風方向の場合には 1.0 近く、風直交方向の場合には、0.1～0.9 であり、ε は 0.5 を越える場合、予測誤差が大きいことが分かった。予測誤差が大きい原因は Cartwright の累積極値分布の近似式(式(11))の誤差であり、ε は大きくなると、誤差も大きくためである。

今後の課題は高減衰超高層建物のピークファクターに予測手法の提案である。

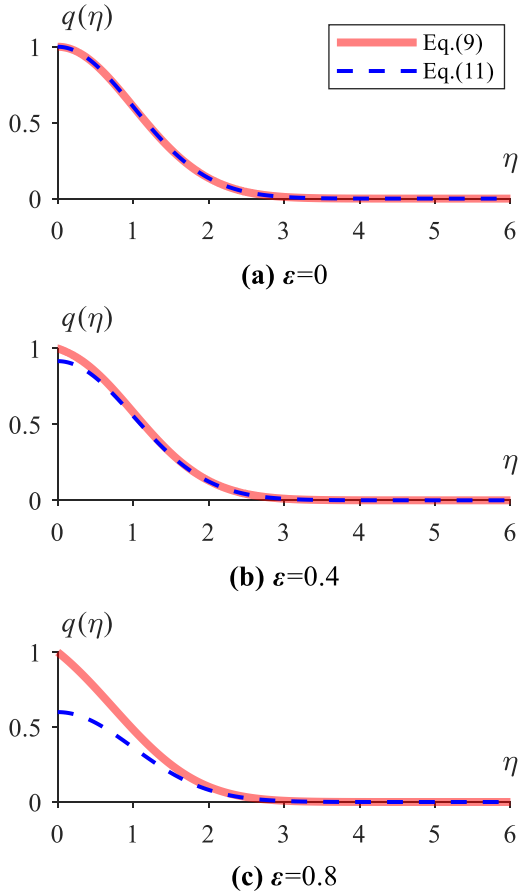


Fig.8. Accuracy of simplified equation of the cumulative probability distribution

謝辞

本研究は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（JPMJOP1723）、綿貫国際奨学財団の支援を受けました。

参考文献

[1] 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015

[2] Davenport, A. G. (1964). Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 28(2), 187-196.

[3] 丸川比佐夫，大熊武司，北村春幸，吉江慶祐，鶴見俊雄，佐藤大樹. 風洞実験に基づく高層建物の多層層風力によるエネルギー入力性状（その 2）矩形高層建築物に作用する層風力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-1, pp. 193-194, Sept. 2010.

[4] Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S.: The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function, Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Vol.237, pp.212-232, 1956.4.

*1 東京工業大学 大学院生 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

*2 東京工業大学 准教授・博士（工学） Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.