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)	建築物荷重指針・同解説を用いて風応答予測を行う際の風力スペクトルの平滑化指標の提案
Title(English)	Proposal of a Smoothing Index for Wind Force Spectra in Predicting Wind Response using"RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINDS"
著者(和文)	小林稜, 佐藤大樹, 田中英之, 曽根孝行, 渡井一樹
Authors(English)	Ryo Kobayashi, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka, Takayuki Sone, Kazuki Watai
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ｉ, , pp. 477-480
Citation(English)	, Ｉ, , pp. 477-480
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2022年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2023年2月

建築物荷重指針・同解説を用いて風応答予測を行う際の風力スペクトルの平滑化指標の提案

構造－振動

超高層建物　建築物荷重指針・同解説
風応答解析　パワースペクトル密度

正会員 ○ 小林稜[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
正会員　田中英之[*3]　正会員　曽根孝行[*3]
正会員　渡井一樹[*3]

1. はじめに

「建築物荷重指針・同解説」[1)]（以下，荷重指針）を用いることで風荷重や応答を評価することが出来る。「荷重指針」において風応答の標準偏差を求める際，解析モデルの固有振動数における入力風力のパワースペクトル密度/Power Spectrum Density（以下，PSD）の値をホワイトノイズと仮定することで，数値積分を行うことなく解析的に求めることができる[2)]。しかし，固有振動数における入力風力の PSD の値にばらつきがある場合，応答の標準偏差の値に影響を及ぼし，精度が悪くなる。そのため本研究では，荷重指針の予測式による風応答評価の高精度化を目的としている。このばらつきを小さくする，つまりパワースペクトル密度を平滑化する方法として，複数波によるアンサンブル平均が用いられる。しかし，時間や費用の面から風力データのサンプル数を確保することが難しい場合も少なくない。加えて，風力の平滑化度合いを数値で評価する方法が確立されておらず，異なる風力の平滑化度合いを比較することが困難である。そこで，筆者らはアンサンブル平均と移動平均を併用して入力風力の PSD の平滑化を行った場合の，荷重指針による風応答予測と時刻歴応答解析による風応答予測を比較することで，平滑化が風応答予測に及ぼす影響の検証を行ってきた。文献3)において，解析モデルの 1 次固有振動数 ${}_1f$ に対する移動平均の振動数幅の比（バンド比）を用いて風応答予測と平滑化の関係を検証した。しかし，バンド比と予測精度の間に明確な関係は見いだせなかった。そこで本報では，パワースペクトル密度を無次元化し，その極値に注目する新たな平滑化の指標を提案し，その予測精度を検証することを目的とする。

2. 解析モデル概要

2.1 解析モデル

解析対象建物は，建物密度 $\rho = 175\ \mathrm{kg/m^3}$，質量は高さに一様であるとし，高さ $H = 200$ m，辺長比 $D/B = 1$（D，B：幅，奥行き，$D = B = 40$ m）の 20 質点せん断型モデルとする[4)]。フレームの 1 次固有周期 ${}_1T$ は，${}_1T = 3.0$ s，5.0 s の 2 種類とし，建物の 1 次固有モードは直線の正規化モードとした。構造減衰は剛性比例型として，${}_1T$ それぞれに対して 1 次減衰定数 ${}_1\zeta = 1\%$，2%，3%，4%，5%の 5 種類を用いる。

本報では，1 次モードの風応答のみに注目し，1 次モーダル質量 ${}_1M$ と 1 次モーダル風力 ${}_1F$ として与える水平 1 自由度の 1 質点系モデルで解析・検討を行う。

2.2 入力風力

構造物に作用する風外力は風洞実験結果[4)]を用いた。実験気流は「荷重指針」の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成された。対象建物を想定した実験模型は，高さ 300 mm，$D/B = 1.0$ の角柱模型とし，層風力は高さ方向に 9 層分測定した。基本風速は $U_0 = 36$ m/s，風速は再現期間 100 年の時に頂部風速 $U_H = 52.0$ m/s，再現期間 500 年の時頂部風速は $U_H = 57.9$ m/s を想定した。検討用風外力は，1 組につき 20 質点分の風力波形を 0.05 s 秒刻み 14000 ステップとした。各風力波形前後に 50 s のエンベロープを設け,中間の 600 s が重ならないように 10 組（wave1~10）取り出した。その後，応答の減衰時間を考慮し，加力を行わない 100 s のデータを最後に加えた 800 s × 10 組で検討を行った。検討用風力入力方向は，風直交方向とする。

3. 予測式の概要

1 次モーダル変位の標準偏差 ${}_1\sigma_q$ の予測値は式(1)（以下，予測式）のように表すことが出来る[2)]。

$$ {}_1\sigma_q = \frac{{}_1\sigma_F}{{}_1M\left(2\pi {}_1f\right)^2}\sqrt{1+\frac{\pi}{4\,{}_1\zeta}\frac{{}_1f\ {}_1S_F\left({}_1f\right)}{{}_1\sigma_F^2}} \qquad (1) $$

ここで，${}_1S_F({}_1f)$：1 次固有振動数 ${}_1f$ における 1 次モーダル風力のパワースペクトル密度，${}_1\sigma_F$：1 次モーダル風力の標

Proposal of a Smoothing Index for Wind Force Spectra in Predicting Wind Response using"RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINDS"

Ryo KOBAYASHI , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA, Takayuki SONE , Kazuki WATAI

準偏差である。${}_1f$付近における入力風力の PSD は振動数の変化量に対するパワースペクトル密度の変化量（以降，ばらつき）が大きく，予測式の ${}_1S_F({}_1f)$の値として PSD の値を用いると，1 次モーダル変位の標準偏差 ${}_1\sigma_q$ にもばらつきを生じることが確認されている [3]。そこで本報では，入力風力のパワースペクトル密度をアンサンブル平均や移動平均による平滑化を行い，${}_1S_F({}_1f)$を算出したのち，予測式（式(1)）を用いて得られる ${}_1\sigma_q$（以降，RLB）と時刻歴応答解析による ${}_1\sigma_q$（以降，THA）を比較し，平滑化度合いと時刻歴応答解析に対する予測式の精度の関係を把握し，平滑化指標を提案する。

4. 平滑化の評価

4.1 平滑化指標の概要

本節では，無次元化パワースペクトル密度 ${}_1\widetilde{S}_{NDF}$ を用いて，平滑化の指標を提案する。図 1 (a)，(b)のように無次元パワースペクトル密度の極値に注目し，固有振動数 ${}_1f$ に対して±50%の範囲 [3]における極値同士の差の絶対値（以下，振幅 ΔS）を抽出する。その後，図 1(c)，(d)のように振幅 ΔS を並べ，ΔS の標準偏差 Γ_S を式(2)から算出し，Γ_S と THA に対する RLB の比 RLB/THA との関係について検証を行う。

$$\Gamma_s=\sqrt{\frac{1}{j_2-j_1+1}\sum_{j=j_1}^{j_2}\left(\Delta S^{(j)}-\overline{\Delta S}\right)^2} \qquad (2)$$

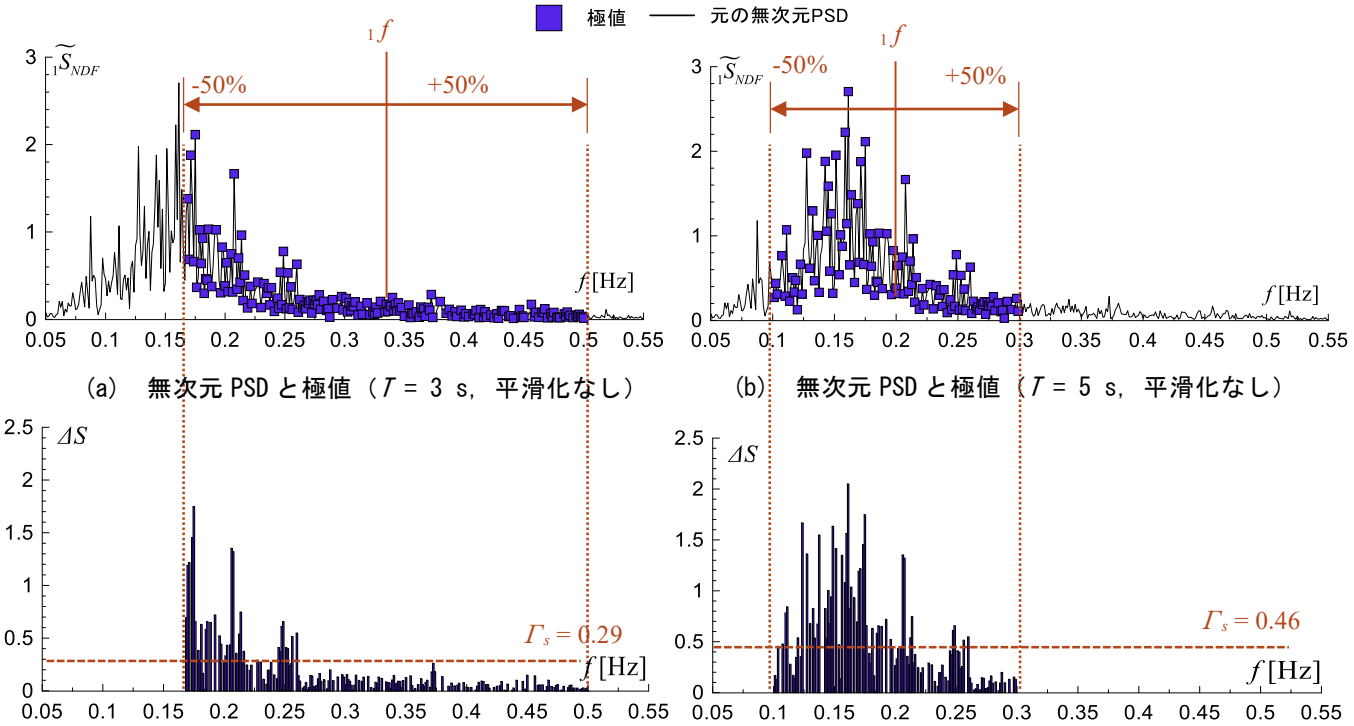
ここで，j_1：Γ_s の計算を開始する点，j_2：Γ_s の計算を終了する点，$\overline{\Delta S}$：$\Delta S^{(j)}$($j = j_1 \sim j_2$)の平均値である。図 1 より，${}_1T = 3$ s は ${}_1T = 5$ s の時に比べ Γ_s を計算する際の $j_1 \sim j_2$ の範囲が広いことが分かる。また，${}_1T = 3$ s の時は $\Gamma_s = 0.30$，${}_1T = 5$ s の時は $\Gamma_s = 0.46$ となり ${}_1T = 3$ s の場合の方が Γ_s の値は小さくなる。これは，${}_1T = 5$ s における $j_1 \sim j_2$ の範囲内に PSD のピークが存在したことでばらつきが大きくなったと考えられる。

4.2 平滑化指標を用いた評価

本報で検討に用いる平滑化の方法は，アンサンブル平均と移動平均と 2 つとする。アンサンブル数は 3 波，5 波，10 波の 3 種類とし、移動平均はパワースペクトル密度の振動数刻み Δf（= 0.00125 Hz）を用いて，$2n_s\Delta f$(n_s = 0~16) の 17 種類で検討を行う。

図 2 にアンサンブル数が 3 波（wave1~3），5 波（wave1~5），10 波（wave1~10）の入力風力のパワースペクトル密度（有次元）を n_s = 0，1，8，16 で移動平均したもの，表 2 にその時の無次元化したパワースペクトル密度の振幅の標準偏差Γ_sの値を示す。図 2，表 1 より，n_s = 0（移動平均前）の場合，アンサンブル数が大きくなると，Γ_sの値も小さくなっている。また，同じアンサンブル数で比較した場合，n_s の値が大きくなるとグラフも滑らかになり Γ_s の値も小さくなっているが，n_s = 16 におけるΓ_sの値が n_s = 8 における値より大きいことから，n_s に限界がある可能性がある。そこで次に，図 3 に n_s を増やした n_s とΓ_sの関係を示す。

図 3 より，移動平均幅 n_s が大きくなるにつれて Γ_s の値が小さくなる傾向があるが，n_s = 8 付近を超えると n_s を大きくしてもあまりΓ_sの値は変わらない結果となった。周



(a)　無次元 PSD と極値（T = 3 s，平滑化なし）

(b)　無次元 PSD と極値（T = 5 s，平滑化なし）

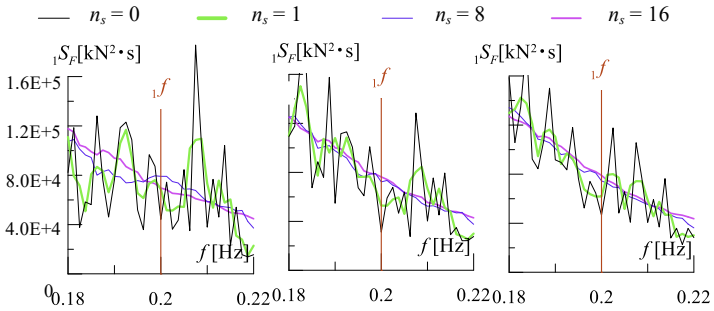
(c)　振幅の値（T = 3 s，平滑化なし）

(d)　振幅の値（T = 5 s，平滑化なし）

図 1　平滑化指標 Γ_sの算出方法（wave1～3、再現期間 500 年，移動平均幅 n_s =0 ）

期に注目すると，$_1T$ = 5 s よりも $_1T$ = 3 s の場合の方がΓ_sの値が大きく，図 1(a)，(b)から得られた結果と同様となった。また，アンサンブル数に注目すると，n_s=0 の場合はアンサンブル数が多いほどΓ_s の値は小さくなるものの，n_s を大きくするとアンサンブル数によらないことも分かった。

以上のことより，Γ_s を小さくするためには n_s を大きくすることが最も効果的で，次に $_1T$ を短くすることである。一方で，アンサンブル数を大きくしても移動平均ほどの平滑化効果は期待できない。



(a) 3 波 (wave1～3)　(b) 5 波 (wave1～5)　(c) 10 波 (wave1～10)

図 2　移動平均後の入力風力のパワースペクトル密度（有次元）

表 1　移動平均後の Γ_s

n_s	アンサンブル数		
	3波(wave1~3)	5波(wave1~5)	10波(wave1~10)
0	0.46	0.37	0.25
1	0.25	0.20	0.15
8	0.07	0.07	0.08
16	0.09	0.10	0.15

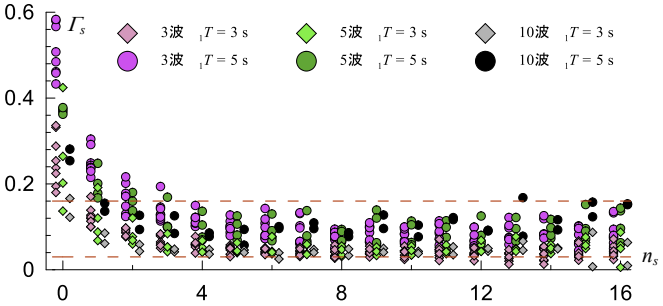


図 3　Γ_s と n の関係

5. 有効平滑化指標の決定

5.1 Γ_s と RLB/THA の関係

表 2 に本章で用いるパラメータを示す。また，THA に対する RLB の比である RLB/THA と，その時の Γ_s の関係を図 4 に示す。図 4 より，多くのケースが Γ_S ＝ 0～0.3 付近に集中しているように見受けられる。そこで次節において，RLB/THA の誤差が±10%となるデータが多く含まれる範囲について検証を行い，その Γ_S の範囲を決定し，これを有効平滑化指標と呼ぶこととする。

表 2　検討パラメータ

$_1T$	3 s, 5 s
$_1\zeta$	1%, 2%, 3%, 4%, 5%
再現期間	100年, 500年
アンサンブル数	3波(4ケース), 5波(2ケース), 10波(1ケース)
移動平均幅 $2n_s\Delta f$	n_s = 0 ~ 16
合計	2380ケース

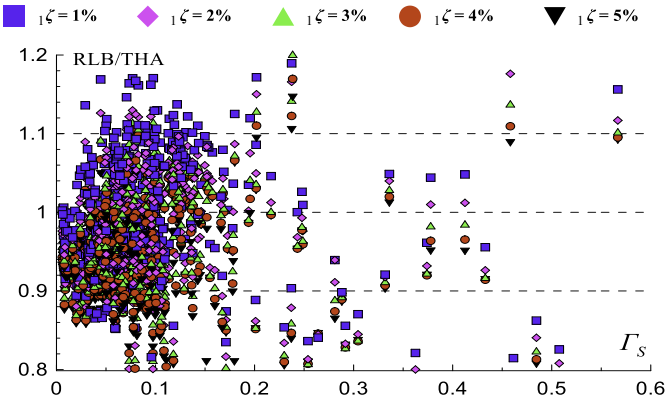


図 4　Γ_S と誤差（RLB/THA）の関係（全ケース）

5.2 有効 Γ_S の決定

本節では，RLB/THA が±10%となるデータが多く含まれる Γ_S の範囲を決定するために，式(3)のように，j 番目のビンにおけるサンプル数に対する j 番目のビンにおいて誤差が±10%となるサンプル数の比$\lambda_{s10}^{(j)}$ (以降, 成功率) を定義する。

$$\lambda_{s10}^{(j)} = \frac{N_s^{(j)}}{N_{smp}^{(j)}} \tag{3}$$

ここで，$N_s^{(j)}$: j 番目のビンにおいて，誤差が±10%となるサンプル数，$N_{smp}^{(j)}$: j 番目のビンにおけるサンプル数である。図 5 に，Γ_S が 0 から 0.6 まで 0.01 刻みで λ_{s10} を算出したものとそれぞれの N_{smp} を示す。

図 5 より，データ数 N_{smp} には偏りがあり，N_{smp} の値が小さすぎる場合に λ_{s10} の評価に偏りが生じることが考えられる。よって本報では，N_{smp} が最大となる 0.04≦Γ_S≦0.05 の 325 個の 1/10 である 33 個未満のデータは無視することとする。以上の条件より，0.03≦Γ_S≦0.16 の範囲であれば, 概ね λ_{s10} の値が 80%以上となることが分かる。これより，本報では，0.03≦Γ_S≦0.16 を有効な Γ_S の範囲と定め，この範囲を有効平滑化指標（有効Γ_s）とする。

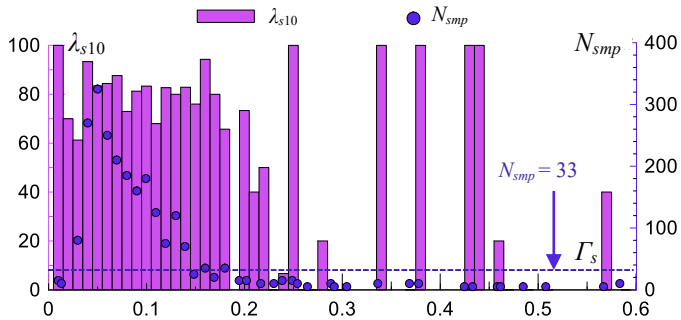


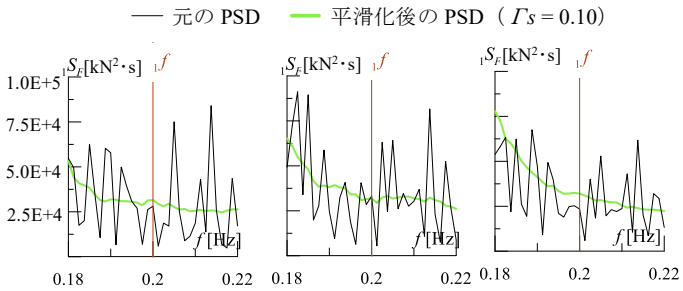
図 5　λ_s と Γ_s の関係

6. CFD 解析の風力を用いた有効 Γ_s の検証

本章では，5 章で設定した有効 Γ_s の検証を行うために，2 章で示した入力風力とは別の風力[5)]を用いて作成した風力のパワースペクトル密度を有効 Γ_s の範囲に収まるように平滑化を行い，予測精度を確認する。

本章では，CFD 解析によって作成された風力[5)]を用いた。風速は再現期間 500 年相当とし，各風力波形前後に 50 s のエンベロープを設け,中間の 600 s が重ならないように 5 組取り出したものである。その後，応答の減衰時間を考慮し，加力を行わない 100 s のデータを最後に加えた 800 s × 5 組で検討を行った（wave1～5）。なお，風力入力方向は，風直交方向のみとする。また，検証を行った解析モデルの 1 次固有周期は ${}_1T = 5$ s とする。

図 6(a)~(c)にアンサンブルの組み合わせが異なる 3 つの風力のパワースペクトル密度と，それぞれを 5 章における有効 Γ_s の範囲内となる $\Gamma_s = 0.10$ を目標に移動平均を行ったパワースペクトル密度を示す。また表に $\Gamma_s = 0.10$ を目標に移動平均を行ったパワースペクトル密度を用いて RLB/THA の算出を行った結果を示す。なお，THA の値はアンサンブル 5 波の平均値を用いている。



(a) wave1～3　(b) wave3～5　(c) wave1～5

図 6　移動平均前後のパワースペクトル密度（Γ_s = 0.10）

表 3　CFD 風力を用いた Γ_s と誤差(RLB/THA)の関係

風力	$n_s = 0$ の Γ_s	Γ_s	n_s	RLB/THA				
				${}_1\zeta$=0.01	${}_1\zeta$=0.02	${}_1\zeta$=0.03	${}_1\zeta$=0.04	${}_1\zeta$=0.05
wave1-3	0.46	0.10	12	1.08	1.00	0.96	0.93	0.91
wave3-5	0.58	0.10	9	1.06	0.99	0.95	0.92	0.90
wave1-5	0.41	0.10	4	1.09	1.01	0.97	0.94	0.92

表 1（風洞実験）と表 3（CFD 解析）を比較すると，$n_s = 0$（移動平均前）において，表 1（風洞）はアンサンブル 3 波で $\Gamma_s = 0.46$，アンサンブル 5 波で $\Gamma_s = 0.37$，アンサンブル 10 波で $\Gamma_s = 0.25$ となっており，表 3（CFD）はアンサンブル 3 波である wave1~3 は $\Gamma_s = 0.46$，wave3~5 は $\Gamma_s = 0.58$，アンサンブル 5 波の $\Gamma_s = 0.41$ であることから，いずれの場合においても，アンサンブル数が大きくなると Γ_s の値も小さくなる。このことから，アンサンブル数を大きくすると PSD が平滑化され，その平滑化度合いが Γ_s に反映されていることが分かる。また，同じアンサンブル数同士で比較を行うと，アンサンブル 3 波の場合，表 1（風洞）の wave1~3 は $\Gamma_s = 0.46$ と表 3（CFD）の wave1~3 は $\Gamma_s = 0.46$ と同じ値を取っているが，wave3~5 の場合は $\Gamma_s = 0.58$ と大きな値を取っている。このことから，アンサンブル数が同じ場合でも平滑が度合いが異なることが分かる。また，表 1 と表 3 の wave1~3 より，表 3 の wave3~5 の方が平滑化されていないと言える。さらに，アンサンブル 5 波同士で比較を行うと，表 1 の wave1~5 は $\Gamma_s = 0.37$ であり，表 3 の wave1~5 は $\Gamma_s = 0.41$ であることから，アンサンブル 5 波において，同じ条件でも CFD 解析による風力の方が平滑化がされていないということが言える。このように，Γ_s を用いることで異なる風力であっても平滑化度合いを比較することが可能である。一方で，表 3 の wave1~3 と wave3~5 のように，スペクトルの形状によって元の Γ_s の値が大きくても必要な n_s が小さい値を取ることもあり，同じ n_s でも同様に平滑化されるわけではないことにも注意する必要がある。また，表 3 より，全てのケースにおいて RLB/THA が誤差±10%以内となり，成功率 λ_{s10} が 80%以上となることが分かった。このことから，本報で決定した有効 Γ_s の範囲，$0.03 \leqq \Gamma_s \leqq 0.16$ は有効であると考えられる。

7. まとめ

本報では荷重指針を用いて風応答予測を行う際に有効な，入力風力のパワースペクトル密度（PSD）の平滑化指標 Γ_s を提案した。以下に知見を示す

・PSD の振幅の標準偏差 Γ_s を用いることで風力の PSD の平滑化の程度を評価することができる。

・±10%の誤差で予測できる Γ_s の範囲 $0.03 \leqq \Gamma_s \leqq 0.16$（有効平滑化指標，有効 Γ_s）を提案し，風洞実験および CDF 解析の風力を用いて検証を行った。

なお，本検証は限られた範囲であるため今後はさらに広い条件での検証を行い，本手法の有用性を確認する予定である。

参考文献

1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
2) 日本建築学会：建築物荷重指針を活かす設計資料 2-建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド，2017.2，2004.6
3) 小林稜，佐藤大樹，田中英之，Alex Shegay：風力のパワースペクトル密度の平滑化が風応答予測に及ぼす影響，鋼構造年次論文報告集，第 30 巻，pp585-596，2022.11
4) 平塚紘基，佐藤大樹，田中英之：履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の弾塑性風応答予測，日本建築学会技術報告集，第 27 巻，第 66 号，pp.662-667，2021.6
5) 沖村将大，佐藤大樹，田中英之，曽根孝行，渡井一樹，畔上泰彦：風洞実験および CFD より得られた風力を用いた超高層建物の時刻歴応答解析　その 1　気流特性および風力特性の比較，日本建築学会関東支部研究報告集，2023.3

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生　Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士（工学）　Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3 株式会社竹中工務店 技術研究所　Research & Development Institute, Takenaka Corporation