

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘弾性ダンパーを有する一質点構造を対象とした全体減衰モデルによる風応答特性(構造)
Title	
著者(和文)	田上 高行, 佐藤 大樹, 北村春幸, 笠井和彦
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, KAZUHIKO KASAI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0,
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0,
発行日 / Pub. date	2011, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730338

粘弾性ダンパーを有する一質点構造を対象とした全体減衰モデルによる風応答特性

正会員 ○田上高行*1 同 佐藤大樹*2 同 北村春幸*3
同 笠井和彦*4

構造 振動

粘弾性ダンパー 風応答 制振構造

振動数依存性 全体減衰モデル 分数微分モデル

1. はじめに

粘弾性ダンパーは地震のような大振幅で高振動数の外乱だけでなく、風のように小振幅で低振動数の外乱まで効果的に振動エネルギーを吸収することから、高層建築の地震や風に対する制振には大変有効であると考えられている。

粘弾性ダンパーは振動数依存性を有しており、外乱の振動数により、そのダンパー特性が変化する。風外力は幅広い振動数成分を有するため、粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に影響を及ぼすことが予想される。そのため、ダンパーを設置する建物や入力特性を十分に考慮した設計が必要となる。

これまで、広範囲の振動数での挙動を正確に再現できる分数微分（以下、FD）モデルが提案されている。FDモデルのような厳密モデルにより、詳細で効率的な検討が可能であるが、現存する多くの構造解析プログラムに共通な機能をそのまま利用する簡易な近似モデルも、制振の普及化を促すため、極めて有用であると思われる。また、地震入力の場合においては、建物の共振振動数（自由振動時の固有振動数）と地震時の卓越振動数成分の影響をふまえた解析・評価法が既に提案されており、局所減衰機構の効果を、構造全体の等価な周期と減衰定数で表す、全体減衰（以下、GD）モデルの検討が行われている。しかし、風入力の場合には、GDモデルの妥当性は明らかとなっていない。

本報では、構成要素・入力特性の多くの組み合わせが、GDモデルの応答の違いに与える影響について検討する。なお、長時間振動時の粘弾性ダンパーの温度上昇は、過去の研究¹⁾から定常状態で考えることの妥当性が示されているため、本論文では振動数依存性のみ着目する。

2 解析モデルおよび風外力の設定

2.1 解析モデルの設定

風力作成の際に、高さ $H=200$ m、平面形の面積が $2,500$ m²、階高 $h=4$ m で 50 階の、辺長比が 1 と 3 の超高層建物を想定する。図 1 に示すように、辺長比 1 の建物は幅、奥行きが等しく $B=D=50$ m、また、辺長比が 3 の場合には、 $B=28.9$ m、 $D=86.6$ m とした。

風力を入力する対象のモデルは、文献 4) と同様に、建物の 1 次モードに着目し、ダンパーを設置していない建物（フレーム）の 1 次の固有振動数が、 $T_1=0.06H=12$ 秒（6H フレーム）、 $T_1=0.05H=10$ 秒

（5H フレーム）、 $T_1=0.04H=8$ 秒（4H フレーム）、 $T_1=0.03H=6$ 秒（3H フレーム）、 $T_1=0.02H=4$ 秒（2H フレーム）となる 5 フレームを設定し、それぞれに対して、ダンパー及びブレースの異なる 5 タイプのシステムを用意した（表 1）。

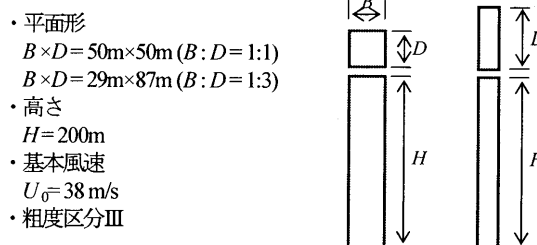


図 1 解析対象モデル概要

表 1 各フレームの要素

名称	K_f (N/m)	ダンパー	ブレース	$\frac{K_d(\omega_n)}{K_f}$	$\frac{K_b}{K_f}$	A_s/d (cm)	f_n (Hz)	ξ_n
F-6H1	0.274	硬	硬	2.0	∞	6.156×10^{-6}	0.144	0.223
F-6H2		柔		0.4		1.379×10^{-6}	0.099	0.087
F-6H3		硬	柔	2.0	3.0	6.406×10^{-6}	0.127	0.095
F-6H4		柔		0.4		1.384×10^{-6}	0.097	0.069
F-6H5		弱		0.077		2.759×10^{-7}	0.086	0.020
F-5H1	0.395	硬	硬	2.0	∞	8.366×10^{-6}	0.173	0.173
F-5H2		柔		0.4		1.884×10^{-6}	0.118	0.118
F-5H3		硬	柔	2.0	3.0	8.717×10^{-6}	0.153	0.153
F-5H4		柔		0.4		1.891×10^{-6}	0.117	0.117
F-5H5		弱		0.073		3.571×10^{-7}	0.104	0.104
F-4H1	0.617	硬	硬	2.0	∞	1.213×10^{-5}	0.216	0.245
F-4H2		柔		0.4		2.749×10^{-6}	0.148	0.097
F-4H3		硬	柔	2.0	3.0	1.265×10^{-5}	0.191	0.102
F-4H4		柔		0.4		2.759×10^{-6}	0.146	0.076
F-4H5		弱		0.068		4.896×10^{-7}	0.129	0.020
F-3H1	1.097	硬	硬	2.0	∞	1.948×10^{-5}	0.289	0.260
F-3H2		柔		0.4		4.452×10^{-6}	0.197	0.103
F-3H3		硬	柔	2.0	3.0	2.035×10^{-5}	0.256	0.107
F-3H4		柔		0.4		4.467×10^{-6}	0.195	0.081
F-3H5		弱		0.065		7.454×10^{-7}	0.172	0.021
F-2H1	2.467	硬	硬	2.0	∞	3.759×10^{-5}	0.433	0.281
F-2H2		柔		0.4		8.684×10^{-6}	0.296	0.112
F-2H3		硬	柔	2.0	3.0	3.932×10^{-5}	0.385	0.113
F-2H4		柔		0.4		8.712×10^{-6}	0.293	0.088
F-2H5		弱		0.057		1.311×10^{-6}	0.257	0.020

2.2 全体減衰モデルの作成方法

以下に、分数微分モデル（図 2 (a)）から全体減衰モデル（図 2

(b) を作成する手順を示す²⁾⁻⁴⁾。

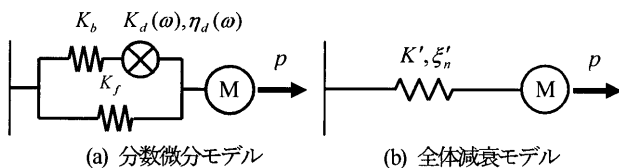


図2 分数微分と全体減衰のシステム

システムの貯蔵剛性 $K'(\omega_n)$ は式(1)により求まる。

$$K'(\omega_n) = K_f + K'_a(\omega_n) \quad (1)$$

ここで、式(2)より付加系の貯蔵剛性 $K'_a(\omega_n)$ を求める。

$$K'_a(\omega_n) = \frac{\{(1 + \eta_d^2(\omega_n))K'_d(\omega_n) + K_b\}K'_d(\omega_n)K_b}{(K'_d(\omega_n) + K_b)^2 + (\eta_d(\omega_n)K'_d(\omega_n))^2} \quad (2)$$

粘弾性ダンパーの貯蔵剛性 $K'_d(\omega_n)$ および損失係数 $\eta_d(\omega_n)$ は式(3),(4)より求める。

$$K'_d(\omega_n) = G \frac{1 + ab\omega_n^{2\alpha} + (a+b)\omega_n^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega_n^{2\alpha} + 2a\omega_n^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_s}{d} \quad (3)$$

$$\eta_d(\omega_n) = \frac{(-a+b)\omega_n^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega_n^{2\alpha} + (a+b)\omega_n^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (4)$$

求めた貯蔵剛性から式(7),(8)よりシステムの固有振動数 $\omega'_n(\omega)$ および減衰定数 $\xi'_n(\omega_n)$ をそれぞれ求める。

$$\omega'_n(\omega) = \sqrt{K'(\omega)/M} \quad (7)$$

$$\xi'_n(\omega_n) = \xi_0 + \eta(\omega_n)/2 \cdot \frac{\omega'_n(\omega)}{\omega} \quad (8)$$

本論文では、ダンパーの振動数依存性の違いが風応答に与える影響を比較しやすいように構造減衰 $\xi_0 = 0$ としている。また、共振時には $\omega'_n(\omega) = \omega$ であるため、式(8)は次式で表される。

$$\xi'_n(\omega_n) = \eta(\omega_n)/2 \quad (9)$$

システムの損失係数は、式(10)により求まる。

$$\eta(\omega_n) = \frac{\eta_d(\omega_n)}{1 + K_f/K'_a(\omega_n)} \quad (10)$$

付加系の損失係数 $\eta_d(\omega_n)$ は、式(11)より求める。

$$\eta_d(\omega_n) = \frac{\eta_d(\omega_n)}{1 + (1 + \eta_d^2(\omega_n))K'_d(\omega_n)/K_b} \quad (11)$$

以上より、全体減衰モデルのシステムの貯蔵剛性 $K'(\omega_n)$ と減衰定数 $\xi'_n(\omega_n)$ を決める。

2.3 風外力の設定

風外力は「建築物荷重指針・同解説」⁵⁾による風方向、風直交方向の変動風力のパワースペクトル密度をもとに、高さ方向の相関を考慮した三角級数モデルにより、多層の層風力の模擬風力波形をシミュレートした。⁵⁾粗度区分はⅢ、風速は再現期間500年に相当するレベルとして、基本風速38 m/s、頂部風速 $U_H = 63.8$ m/s、を設定した。模擬風力波形は0.01秒刻み95000ステップで30組作成した。エンベロープを前後50秒ずつ設け、300~900秒の10分間で応答を

評価する。作成した風外力で図2の1質点モデルを用いた振動数領域での解析を行い⁴⁾ 応答値を求める。なお、30組の応答のアンサンブル平均により応答を評価する。

10層分の風力から作成した風方向および風直交方向1次モーダル風力のPSDの一例を、辺長比1と辺長比3の場合を重ねて図3(a),(b)に示す。また、図中の斜線部分はフレームの1次固有振動数 $f_0 = 0.083 \sim 0.25$ Hz ($T_0 = 12.0$ 秒~4秒)の範囲を示している。図3(a),(b)より、風方向のPSDは、建物の固有振動数に比べ低振動数側にパワーを有する広帯的な形状であるのに対し、風直交方向のPSDは0.1Hz付近に鋭いピークを有する狭帯的な形状となっている。また、風直交方向の場合には、辺長比が3のPSDは辺長比1のPSDに比べ、ピークの位置が低振動数側にあることが確認できる。

図4(a),(b)に風方向および風直交方向の1次モーダル風力時刻歴波形の一例を示す。

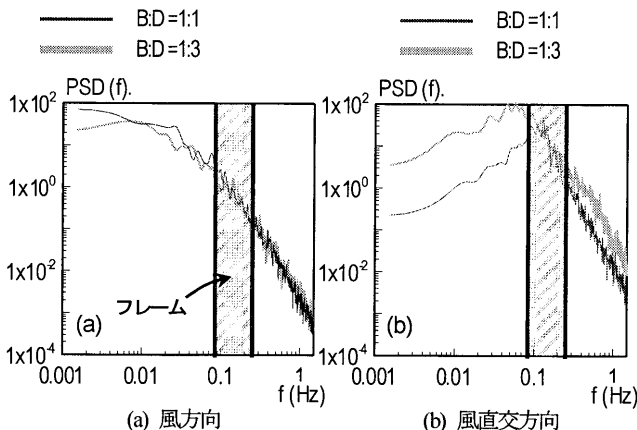


図3 風力のパワースペクトル密度の比較

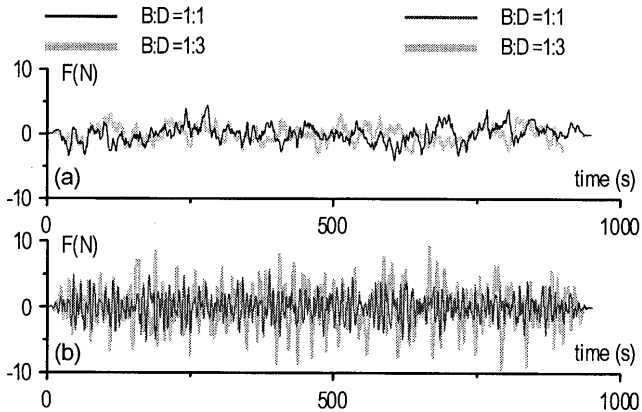


図4 風力の時刻歴波形 (a) 風方向 (b) 風直交方向

3. 正弦波を用いた各フレームの比較

本節では、各システムでの振動数依存性の違いについて述べる。ここでは、例として3Hフレームについて言及する。図5は、外乱振動数を変化させた場合のシステムの固有振動数 $f'_n(\omega) (= \omega'_n/(2\pi))$ と、減衰定数 $\xi'_n(\omega)$ の値をプロットしたものである。GDモデルは式(1),(10)より f'_n, ξ'_n が振動数に依存しないシステムとなる。図中の一点鎖線は共振振動数 f_n である。いずれの場合においても、共振振動数 f_n において、固有振動数 $f'_n(\omega)$ と減衰

定数 $\xi'_n(\omega)$ の値はGDモデルとFDモデルで一致している。F-3H1のような高減衰のフレームは、F-3H2、F-3H3のような低減衰のフレームに比べ、外乱の振動数が共振振動数 f_n から離れるほど、FDモデルとGDモデルの誤差が大きくなる事が確認できる。

図6(a),(b),(c)は、それぞれのフレームの共振振動数 f_n と、共振振動数を0.5倍、2倍した振動数で揺れる正弦波を用意し、FDモデルとGDモデルにそれぞれ入力した際の、定常状態での建物頂部の変位と荷重の履歴を重ねて示している。入力する全ての正弦波波形について振幅は同値とし、0.01秒刻み2000ステップの波形を用いる。表2には定常状態での剛性と損失係数と、それぞれFDモデルとGDモデルの誤差を示す。図6(a),(b),(c)から、外乱振動数が共振振動数 f_n では、FDモデルとGDモデルで良い対応を示しているが、外乱振動数が $0.5f_n$ と $2f_n$ の場合には、履歴が一致しない。表2からGDモデルの剛性、損失係数は外乱振動数を変化させてもほぼ変化しない。また、FDモデルは、外乱振動数が $0.5f_n$ と $2f_n$ の場合には剛性、損失係数が変化し、FDモデルとGDモデルの誤差が大きくなる。

----- FD model - - - - GD model

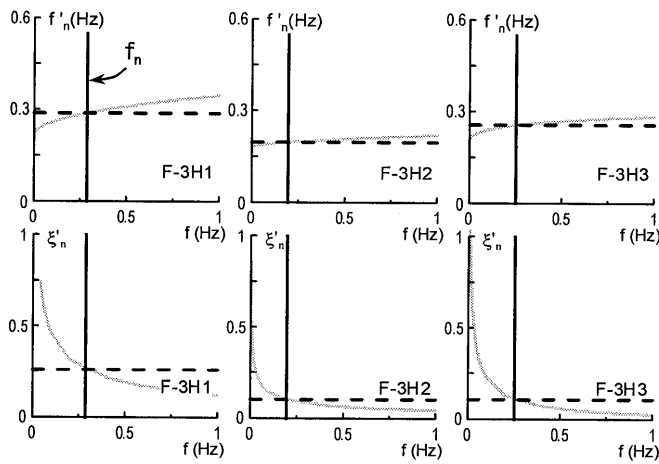


図5 振動数依存性の比較

----- FD model - - - - GD model

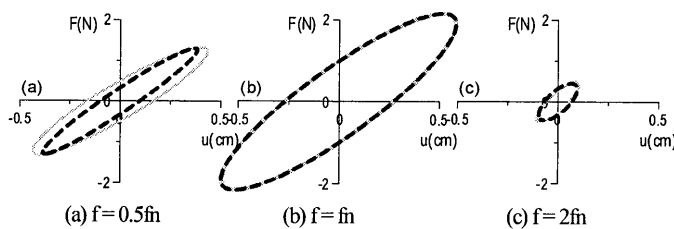


図6 各振動数での履歴比較

表2 各振動数での剛性と減衰定数

F-3H1	$0.5f_n$		f_n		$2f_n$	
	K'	η	K'	η	K'	η
FD	2.823	0.408	3.293	0.523	4.019	0.632
GD	3.290	0.261	3.297	0.520	3.309	1.037
FD/GD	0.858	1.566	0.999	1.006	1.215	0.609

4. 風力を用いた分数微分モデルと全体減衰モデルの比較

3節より、FDモデルとGDモデルの誤差は、各タイプの減衰定数 ξ'_n と共振振動数 f_n の影響を受けるため、減衰定数と共振振動

数の違いによる、FDモデルとGDモデルの誤差への影響を検証する。図6は、風方向、風直交方向での振動数領域解析(F_qA)の30波アンサンブル平均結果について、GDモデルの応答の最大値と入力エネルギー E_{inp} の誤差を、FDモデルの応答の最大値と入力エネルギー E_{inp} で除して求まる誤差を、各タイプの減衰定数 ξ'_n と共振振動数 f_n 、減衰定数 ξ'_n と共振振動数 f_n を掛けた値を横軸にしてプロットしている。RはGDモデルとFDモデルの誤差を意味し、例えばR(acc)であれば、GDの加速度をFDの加速度で除した値を示している。なお、入力エネルギー E_{inp} は式(12)で算出する。

$$E_{inp} = \int \dot{x} p dt \tag{12}$$

ここで \dot{x} :速度、 p :風力である。粘性係数 C_n は式(13)から求まるため、 $\xi'_n \cdot f_n$ を粘性係数 C_n として表すこともできる。

$$C_n = 4\pi M \cdot \xi'_n \cdot f_n \tag{13}$$

図7より、辺長比1の場合、風方向で、全体減衰モデルと分数微分モデルの誤差は、特に変位とエネルギーについて、減衰定数が大きくなれば、あるいは、共振振動数が高いほど、その値も大きくなる事が確認できる。これは、高減衰のシステムほど低振動数側にある風力による強制振動の影響を受けて共振振動数より低い振動数でのシステム特性を示すため、振動数の変化による風力のパワーの変化が小さいF-6H1システムに比べ、その変化の大きいF-2H1システムでは大きな違いが生じるものと思われる。速度や加速度については、変位やエネルギーほどの大きな違いは確認できない。また、共振振動数 f_n 、減衰定数 ξ'_n についての誤差は、あまり傾向をとらえきれないが、粘性係数 C_n である $\xi'_n \cdot f_n$ についての誤差は、値が大きくなるにつれて、誤差も大きくなるような曲線の傾向をとることが出来る。誤差の大きさは粘性係数の値が大きくなるにつれ、頭打ちになると考えられる。また、辺長比が3の場合にも、辺長比が1の場合と同様の傾向がとらえられる。図8は、図7と同様の検討を、風直交方向について検討を行っている。風直交方向についても、風方向と同様の結果が得られる事が確認できる。

5. まとめ

本研究は、広範囲の振動数に対して高精度に粘弾性ダンパーの特性を再現できる分数微分モデルを簡易に置換した、全体減衰モデルの精度を、正弦波入力により、各フレームの特性を把握した上で、風入力の場合について検討を行い、フレームの固有振動数や減衰定数を用いて評価を行った。以下に結論を述べる。

1. 減衰定数 ξ'_n が大きいフレームほど、FDモデルとGDモデルの誤差が大きくなる。
2. 共振振動数 f_n が大きいフレームほど、FDモデルとGDモデルの誤差が大きくなる。
3. 粘性係数 C_n が大きいフレームほど、FDモデルとGDモデルの誤差が大きくなる。
4. 風向、辺長比が異なる場合でも、FDモデルとGDモデルの誤差は、ほぼ同じ傾向となる。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金・若手研究(B)(19760383,代表研究者:佐藤大樹)の援助の下、実施いたしました。また、本研究を行うにあたり、東京工業大学笠井研究室作成の解析プログラム PC-ANSR を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.61-69, 2006.1
 2) 笠井和彦, 大熊 潔: 振動数に依存する制振構造の周期・等価減衰の評価法とその精度—弾性架構と粘弾性ダンパーやオイルダンパーをもつ一質点構造における全体減衰系への置換法—, 日本建築学会構造系論文集, 第580号, 51-59, 2004.6

3) 笠井和彦, 大熊 潔: Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察(その1 弾性・弾塑性フレームをもつ一質点制振構造の場合), 日本建築学会構造系論文集, 第550号, 71-78, 2001.12
 4) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, 75-82, 2009.1
 5) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説(2004), 2004

*1 東京理科大学理工学部建築学科 修士2年
 *2 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
 *3 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)
 *4 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D

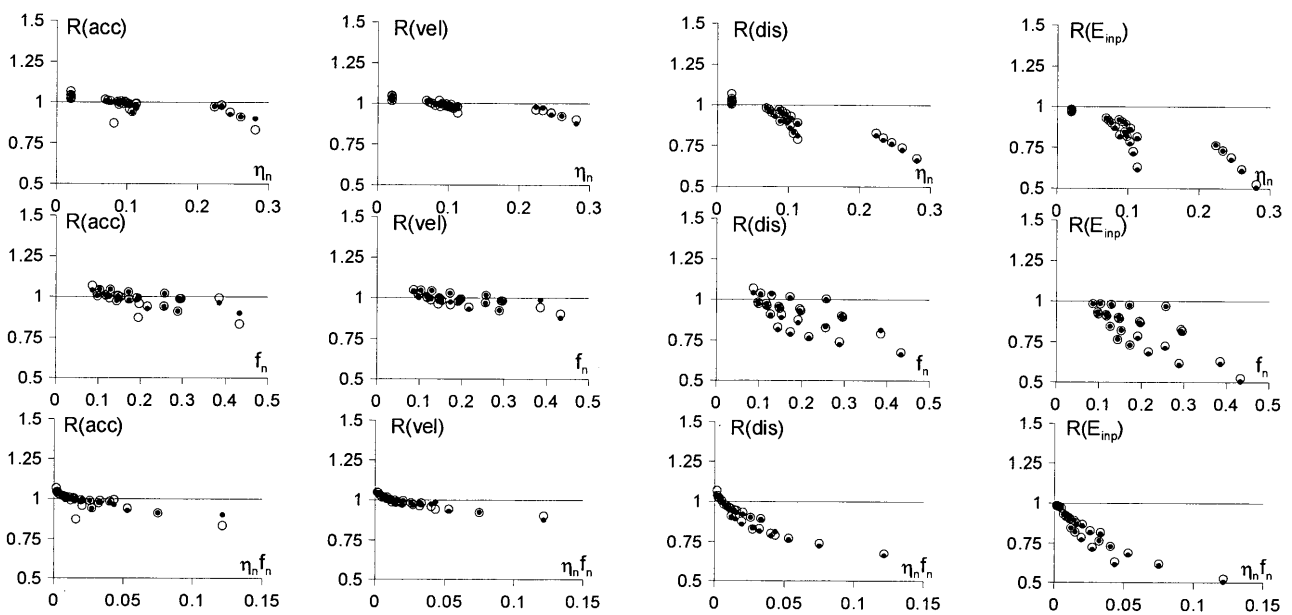


図7 風方向のFDmodeとGDmodelの誤差(最大値)

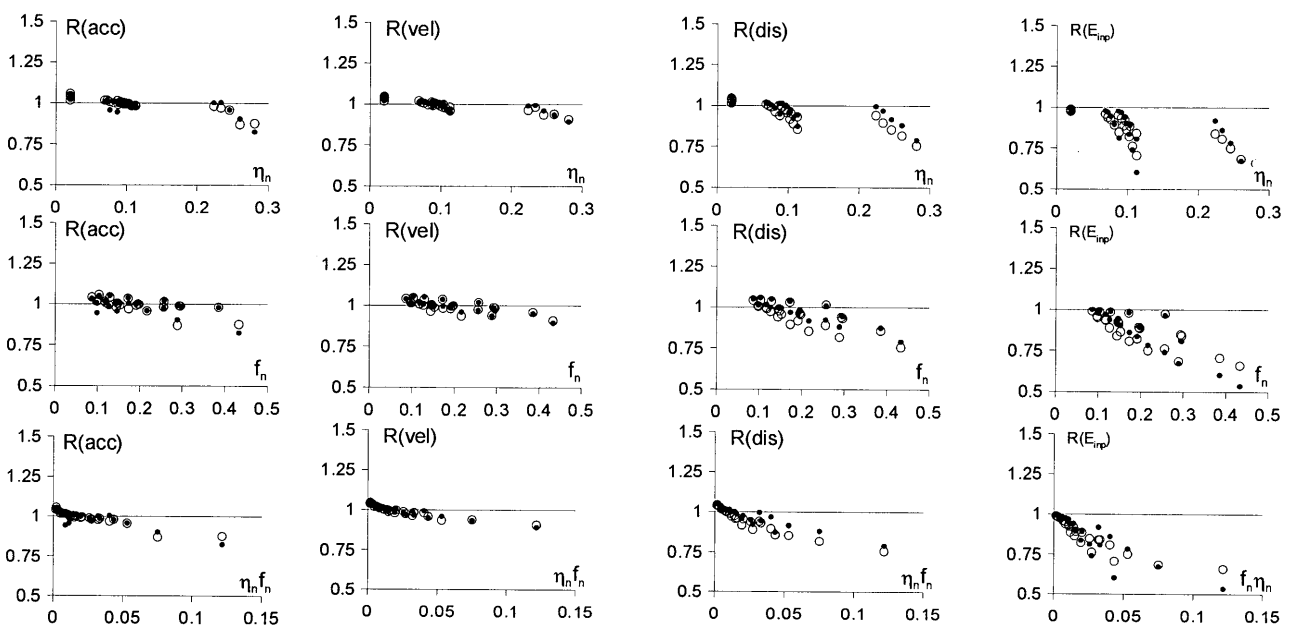


図8 風直交方向のFDmodeとGDmodelの誤差(最大値)