

Visual/Media Computing Conference 2017
2017年度 第45回 画像電子学会年次大会

2017年6月24日(土)

会場: 一橋大学 一橋講堂
(東京都千代田区一ツ橋)

シェル構造の研究—強さの秘密から振動減衰まで
A Study on Shell Structures - Reasons of Strength of Shells and
Vibration Damping of the Structures

新宮清志

Kiyoshi Shingu

日本大学名誉教授 / 総合資格特別顧問

Professor Emeritus, Nihon University / Executive Adviser, Sogo Shikaku



新宮清志 略歴

昭21年(1946年)1月: 島根県出雲市生まれ

昭43年(1968年)3月: 日本大学工学部建築学科卒業

昭49年(1974年)3月: 同・大学院理工学研究科建築学専攻博士課程単位取得退学

昭49年(1974年)4月: 日本大学助手(理工学部建築学科)(駿河台校舎)

昭55年(1980年)4月: 日本大学専任講師(理工学部海洋建築工学科)(船橋校舎)

昭60年(1985年)4月: 日本大学助教授

昭60年(1985年)7月～昭和61年(1986年)8月: 日本大学海外派遣研究員(長期)、
カーネギーメロン大学、ウィスコンシン大学客員研究員

平5年(1993年)4月: **日本大学教授**

平18年(2006年)8月: 日本建築学会関東支部長(理事)(2010年6月まで)

平20年(2010年)6月: 日本建築学会副会長(2012年5月まで)

平24年(2012年)4月: 特任教授(2013年3月まで)

平24年(2012年)5月: 日本建築学会監事(2014年5月まで)

平25年(2013年)4月: 日本大学上席研究員(現在に至る)

平25年(2013年)6月: **日本大学名誉教授**(現在に至る)

平27年(2015年)8月: 総合資格学院 顧問

平28年(2016年)11月: **総合資格学院 特別顧問**(現在に至る)



専門

●シェル構造

●ソフトコンピューティング

(ファジィ理論、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム等)

建築物(茶室、近代建築)やロボットへの応用

●海洋建築構造

(軟着底式海洋構造、洋上接合治具など)



被災地の視察 2011.4.16(土)宮城県

地震により崩壊したRC造の建物(仙台市内)



被災地の視察 2011.4.17(日)宮城県

津波により転倒したRC造の建物(女川町)



被災地の視察 2011.4.17 (日)宮城県

石巻市内河川流域の津波被害地



・シェルとは・・・

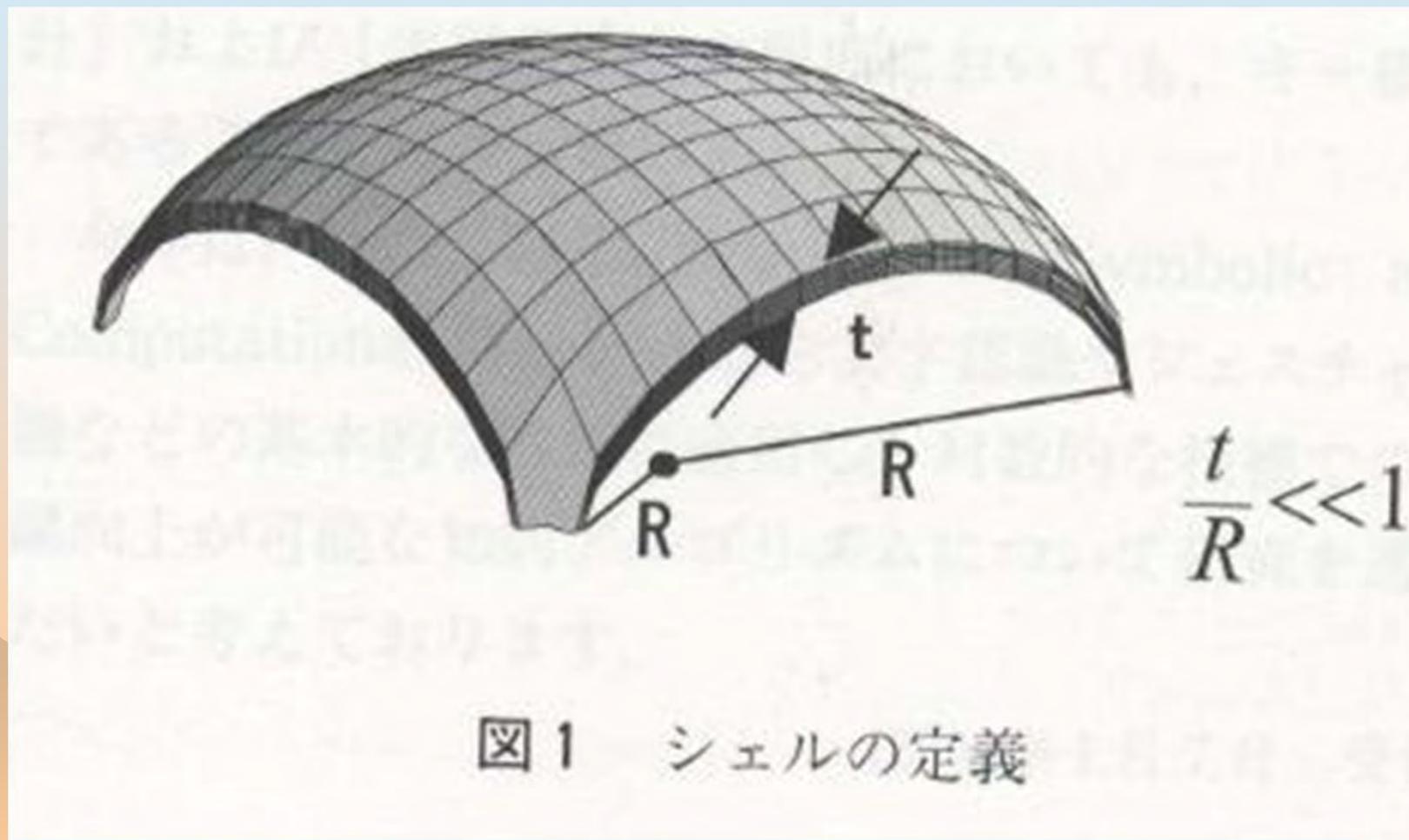


図1 シェルの定義

シェル構造の分類 (幾何学的形状による)



球形シェル



楕円面形シェル

a) 正のガウス曲率を有するもの

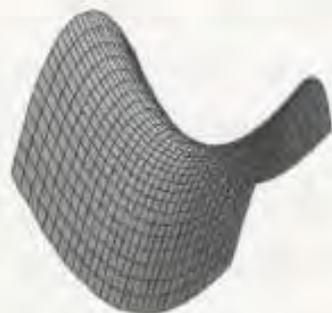


円錐形シェル



円筒形シェル

b) 零のガウス曲率を有するもの



鞍型 HP シェル



一葉双曲面シェル

c) 負のガウス曲率を有するもの



猿鞍面シェル



トーラスシェル

d) 正負のガウス曲率を有するもの

シェルの応用分野

- 自然や身の回りのもの：
卵、貝殻、茶碗、コップ、爪、……
- 陸上：
建物の屋根、基礎、自動車のボディ、サイロ、
ガスタンク(産業構造物)……
- 海中・海上：
船、潜水艦、深海調査船、海中展望塔……
- 上空：
飛行機、ロケット、宇宙船……

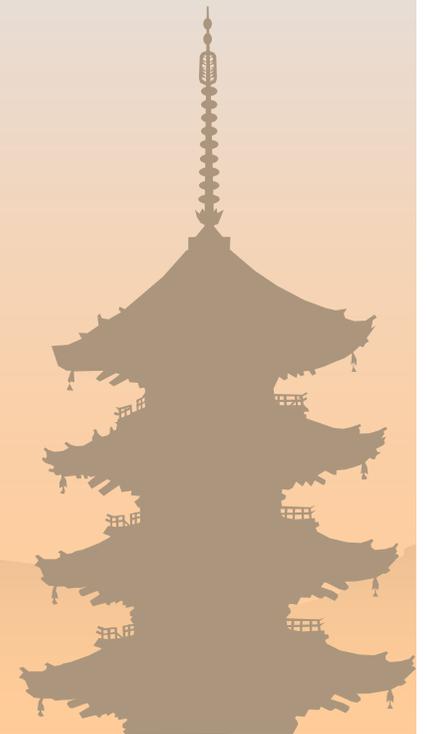


・シェルは、何故強い？

簡易実験

・キーワード:

シェル(構造)、シェル・空間構造、
減衰、減衰定数





厚生年金新潟市体育館のHPシェル(スパン72m,出板厚40cm)



大田区立体育館のHPシェル(スパン75m,出板厚30cm)

厚生年金新潟市体育館

1960年(昭和35年)竣工

鉄骨HPシェル

構造: 日本大学・加藤渉、西村敏雄

東京都大田区体育館

1965年(昭和40年)竣工

4枚組合せ鉄骨HPシェル

構造: 日本大学・加藤渉、西村敏雄

注) HP: Hyperbolic Paraboloidal
(双曲放物面の)



Hyperbolic Paraboloidal Shell 双曲放物シェル (HPシェル、ブカレストの駅舎)



円錐形シェル

(千葉県総合運動場体育館、零のガウス曲率、
構造:加藤渉・西村敏雄)



円錐形シェル(内部)



日本大学生産工学部

(円筒形シェル、零のガウス曲率、
構造:加藤渉・本岡順二郎・西村敏雄)



Translational Sell (Hiraka dome)

推動シェル(平賀ドーム、青森県平賀町)



市村記念館(佐賀市)



重層構造物 とシェル構造物の一例



写真1. 重層構造物の一例(日大文理学部研究棟)
振動解析担当:新宮清志(1979年竣工)



写真2 シェル構造物の一例(日大生産工学部実験棟)
構造担当:加藤渉・本岡順二郎・西村敏雄(1959年竣工)



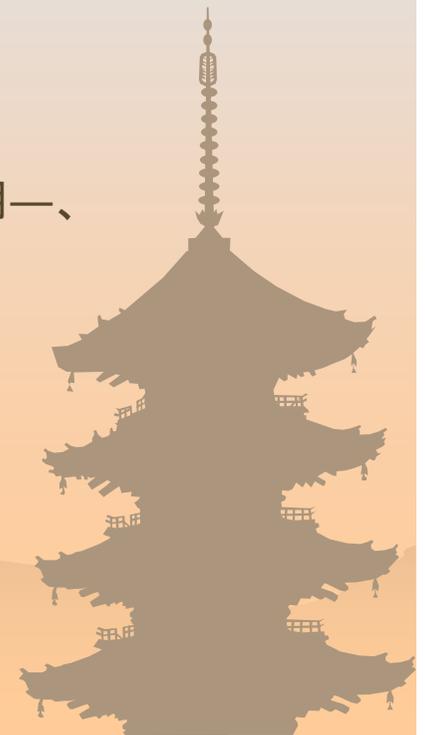
振動制御・免震

- [1] 1960年代初頭:カルマンによる現代制御理論
- [2] 1970年代:Yangによる制御理論の建築物・土木構造物への適用
- 重層構造物等の制震(振)・免震・防振・除振に関して、多くの研究

[3] 武田寿一:構造物の免震・防振・制振、技報堂出版、1988

[4] 海洋都市開発研究会:アクティブ制御—最新事例と海洋都市への応用—、日刊工業新聞社、1992

[5] 篠原正宣、他15名:ミニ特集 建築・土木における制御技術、計測と制御、計測自動制御学会、Vol.31, No.4, pp.461-508, 1992



振動制御・免震(つづき)

●シェル・空間構造の応答制御・免震研究:

新宮研究室の研究が先駆的・先導的

- [6] K.Shingu, T.Kawanishi and M.Harumoto:A Study on Active Control of a Conical Shell Subjected to Seismic Forces, International Association for Shell and Spatial Structures, East Germany, pp.33-42, 1990
- [7] 新宮清志・船本大蔵:動的外力を受ける**シェル**構造物および質点系の**ファジィ**制御、日本機械学会論文集(C編)、第58巻550号、pp.1742-1747、1992
- [8] 新宮清志・福島欣哉:上下動地震を受ける**シェル**構造物の**免震**および**ファジィ**振動制御、日本機械学会論文集(C編)、第60巻577号、pp.2000-3005、1994
- [9] 新宮清志・平塚聖敏:建築構造物の免震および知的制御 —**免震シェル**構造・ラーメン構造への**ファジィ**および**ニューロ**応用— (小特集)、シミュレーション (日本シミュレーション学会機関誌)、第16巻3号、pp. 157-165、1997
- [10] 新宮清志:**シェル**構造物の**振動制御**への**ファジィ**理論の応用、日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.2、pp. 162-169、1997



シェル・空間構造の減衰について、殆ど解かっていないことが明らかになった。



減衰定数評価に関する研究

- 減衰は様々な要因が複合的に作用しており、理論的に算出することができない

- **重層構造物・塔状構造物：**

多くの実測による減衰評価や減衰マトリクスの提案が行われてきた

[11] 日本建築学会：建築物の減衰、丸善、2000



減衰定数評価研究の歩み(日本建築学会の動きを中心に)

- 1995年の建築学会大会では、構造部門(荷重運営委員会)PDで「建築物の減衰評価—大地震や大型台風時の精度良い応答予測に向けて」が開催



重層構造物や搭状構造物の減衰については相当のデータが収集されていたが、シェル・空間構造物の減衰に関するデータは皆無

- 1998年4月:「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」が発足



減衰定数評価研究の歩み(日本建築学会の動きを中心に) (つづき)

- 「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」
(1998-1999年度) (主査:新宮清志、幹事:入江寿弘・川島孝幸・谷口与史也)
- 「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」
(2000-2001年度) (主査:新宮清志、幹事:入江寿弘・谷口与史也)
- 「シェル・空間構造物の応答制御・減衰機構小委員会」
(2002-2005年度) (主査:新宮清志、幹事:立道郁生・谷口与史也)
- 「応答制御と減衰小委員会」
(2006-2007年度) (主査:新宮清志、幹事:立道郁生・谷口与史也)



書籍「シェル・空間構造の減衰と応答制御」の出版

2008.3.25



日本建築学会大会(東海、2012)

シェル・空間構造物の減衰評価に関する研究 -4棟の構造物の振動実験による減衰評価-

○新宮清志・日本大学 特任教授・工博

石山雄介・研究当時日本大学 大学院生・(現 大林組)・修士

平塚聖敏・日本大学 理工学研究所 研究員・博士

湯川正貴・大林組・修士



重層構造物

固有振動特性、地震・風応答性状の把握を目的とし、多数の振動実験および研究報告が行われ、データが蓄積されている。

■微小振幅の場合には規模・構造・材質等により大まかな減衰定数を推測可能となりつつある。



2. 目的

- シェル・空間構造物に関する振動実験や研究は多くない



減衰特性を明確化するに至っていない



更にシェル・空間構造物での
振動実験を行なうことが必要である

本研究では

- シェル・空間構造物を対象に振動実験を行う
- 減衰定数を明らかにしデータベース作成の一助とともにデータベースの充実を図る
- 得られた結果を既往研究に追加し、減衰傾向分析を行なう



3. 対象構造物



写真1 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館

■3.1. 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館

- ・RCシェル屋根
- ・シェル屋根半径:11.60m
- ・ライズ :8.11m
- ・シェル厚 :0.08m



写真2 習志野市総合教育センター・プラネタリウム館

■3.2. 習志野市総合教育センター・プラネタリウム館

- ・RCシェル屋根
- ・シェル屋根半径:9.75m
- ・ライズ :8.70m
- ・シェル厚 :0.08m



3. 対象構造物



写真3 市川市現代産業科学館

■ 3.3. 市川市現代産業科学館

- ・鉄骨円錐形状シェル屋根
- ・シェル屋根半径: 13.93m
- ・高さ : 21.65m
- ・ライズ : 6.51m



写真4 日本大学理工学部スポーツホール

■ 3.4. 日本大学理工学部スポーツホール

- ・鉄骨張弦梁構造
- ・長辺 : 74.00m
- ・短辺 : 58.00m
- ・高さ : 20.98m



4. 実験方法

■本研究では対象構造物に対して以下の実験を行った。

- ・衝撃加振実験
インパルスハンマー加振
錘落下加振(15kg)

- ・常時微動観測

■計測機器

- ・サーボ型速度計
1点につき鉛直1方向、水平2方向



付写真1 インパルスハンマー



付写真2 サーボ型速度計

4.1. 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館

■ 衝撃加振実験

錘落下実験(錘質量15kg)

サンプリング周波数:200Hz

サンプリング個数 :4000個

計測時間1回 :20 秒

計測回数 :40回

■ 常時微動観測

サンプリング周波数:200Hz

サンプリング個数 :3,600,000個

計測時間 :5 時間

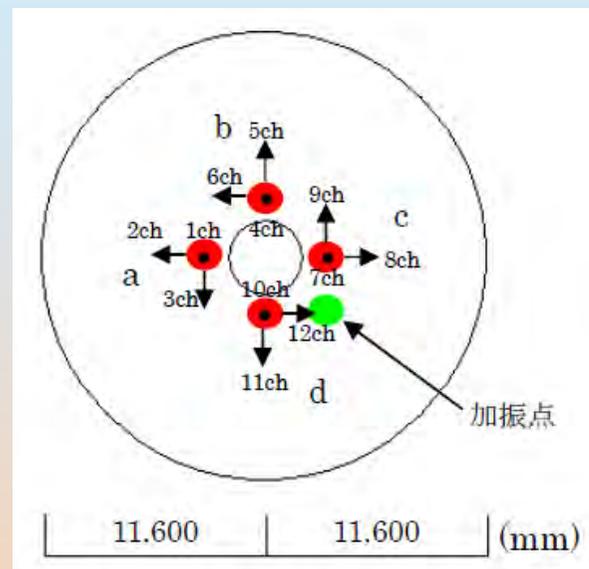


図1 計測機器配置平面図



付写真3 実験風景

4.2. 習志野市総合教育センター・プラネタリウム館

■ 衝撃加振実験

錘落下実験(錘質量15kg)

サンプリング周波数:200Hz

サンプリング個数 :4000個

計測時間1回 :20 秒

計測回数 :50回

■ 常時微動観測

サンプリング周波数:200Hz

サンプリング個数 :2,600,000個

計測時間 :3 時間30分

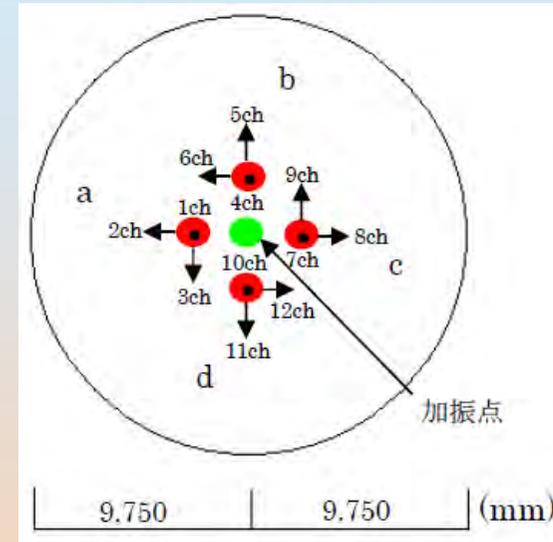


図2 計測機器配置平面図



付写真4 実験風景

4.3. 市川市現代産業科学館

■ 衝撃加振実験

インパルスハンマー加振

サンプリング周波数: 200Hz

サンプリング個数 : 4000個

計測時間1回 : 20 秒

計測回数 : 30回

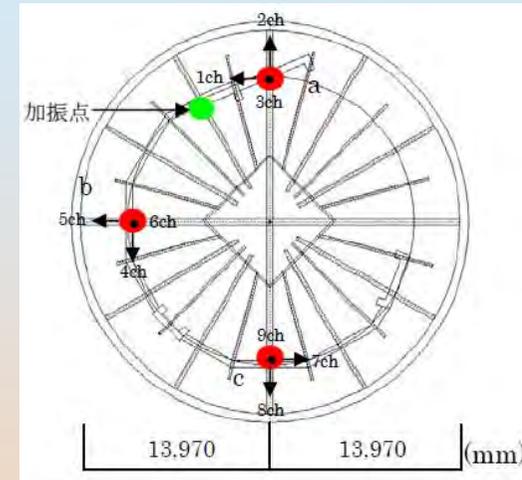


図3 計測機器配置平面図



付写真5 実験風景

4.4. 日本大学工学部スポーツホール

■ 衝撃加振実験

インパルスハンマー加振

サンプリング周波数: 200Hz

サンプリング個数 : 4000個

計測時間1回 : 20 秒

計測回数 : 30回

■ 常時微動観測

サンプリング周波数: 200Hz

サンプリング個数 : 3,600,000個

計測時間 : 5 時間

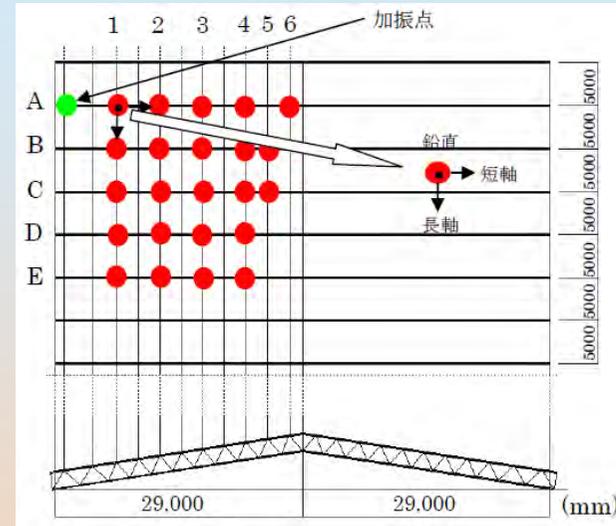


図4 計測機器配置平面図



付写真6 実験風景

5. 減衰評価方法

□5.1. カーブフィット法での評価

- ・衝撃加振実験から得られたデータより自由振動波形を取り出す
- ・式(1)に示す包絡線のパラメーターを自由振動波形に近似することで減衰定数を算出する

$$V_n = A \exp(-hn \Delta t) \quad \dots (1)$$

V_n : サンプル番号n番目の時の速度 (cm/s)

A: 初期速度 (cm/s)

h: 減衰定数 (%)

n: サンプル番号

Δt : サンプル間隔

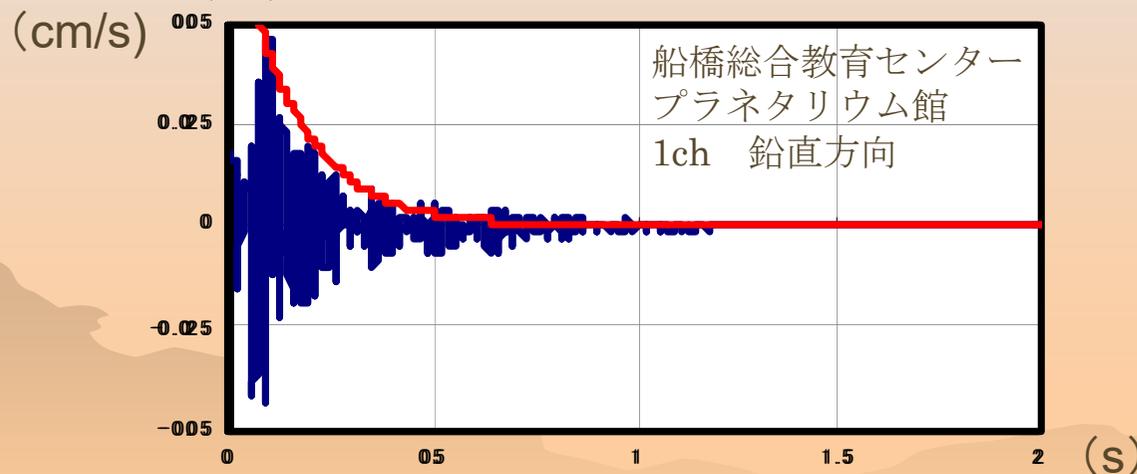


図5 自由振動波形の一例

(船橋市総合教育センター・プラネタリウム館衝撃加振実験)

□5.2. RD法での評価

- ・常時微動観測では実験から得られた速度波形にWelch法を使いパワースペクトル密度を算出する

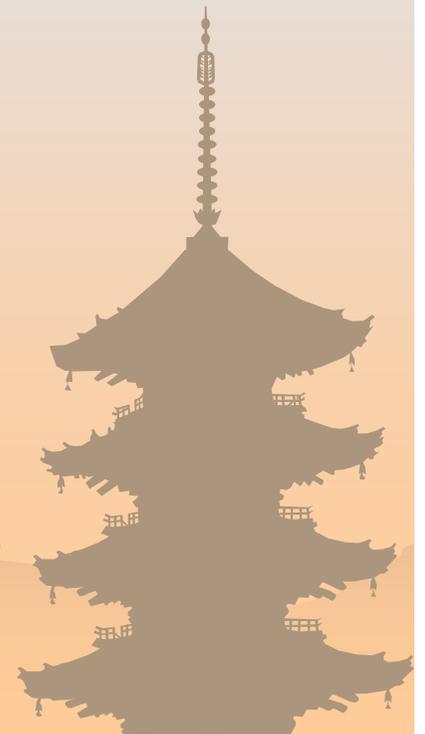


- ・算出したパワースペクトル密度から卓越振動数を求める



図6 Welch法より求めたPSD一例

(船橋市総合教育センター・プラネタリウム館常時微動観測)



□5.2. RD法での評価

- ・常時微動観測では実験から得られた速度波形にWelch法を使いパワースペクトル密度を算出する

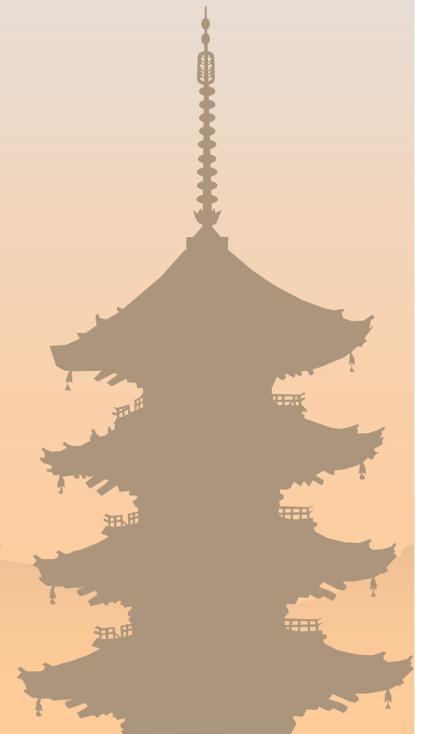


- ・算出したパワースペクトル密度から卓越振動数を求める



図6 Welch法より求めたPSD一例

(船橋市総合教育センター・プラネタリウム館常時微動観測)



□5.2. RD法での評価

- ・パワースペクトル密度で求めた卓越振動数に
±0.05Hz幅のデジタルバンドパスフィルターをかける
- ・フィルター処理後の波形をアンサンブル平均し
7000回重ね合わせをして自由振動波形を作る

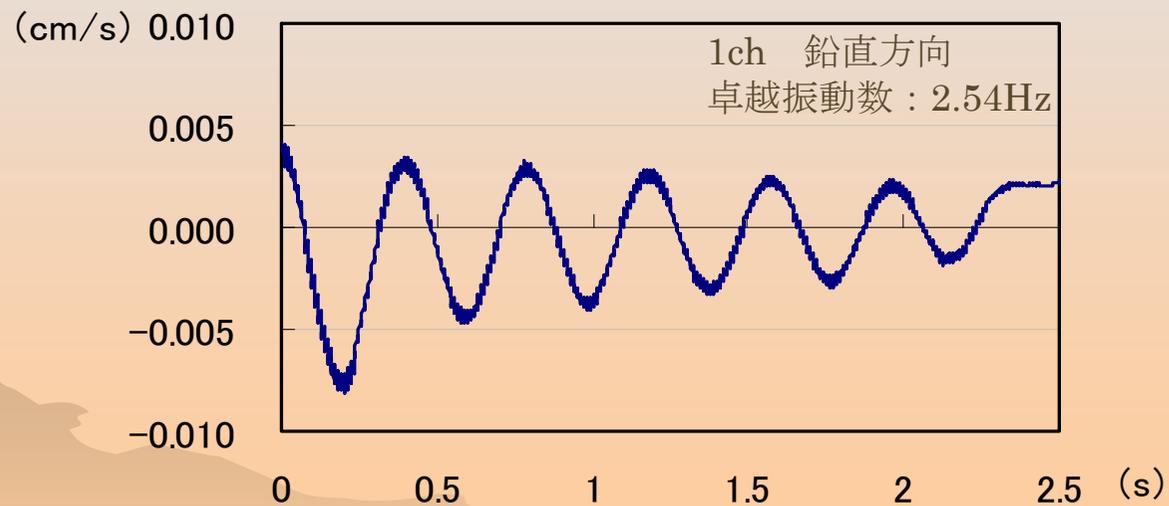


図7 RD法により得られた自由振動波形の一例
(船橋市総合教育センター・プラネタリウム館常時微動観測)



6. 実験結果

□6.1. 衝撃加振実験

■6.1.1. 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館

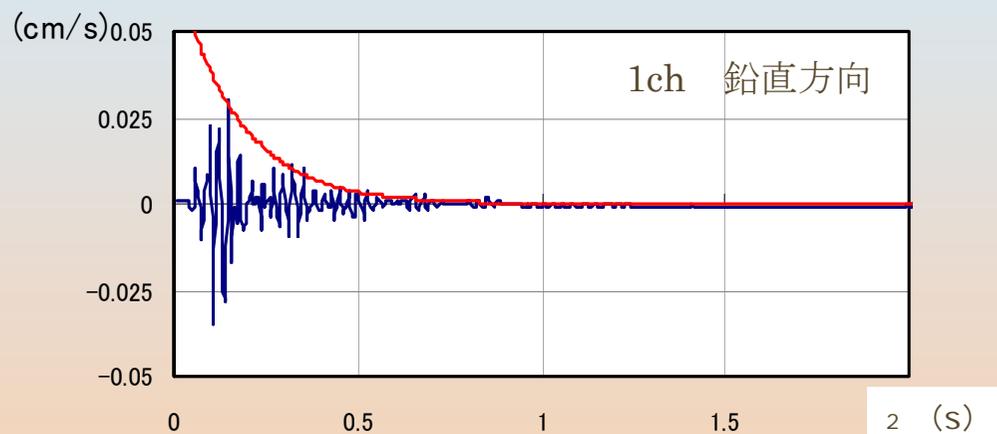


図9 包絡線を引いた波形

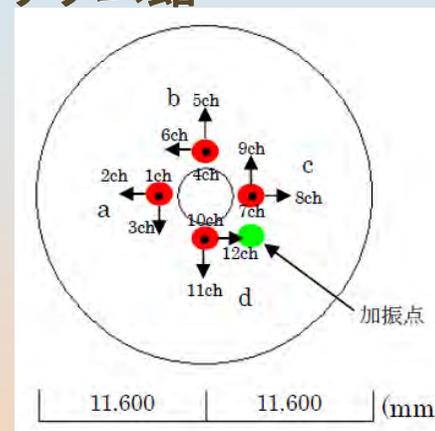


図1 計測機器配置平面図

表1 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館 衝撃加振実験による減衰定(%)

計測点 a		計測点 b		計測点 c		計測点 d	
1ch	3.48	4ch	3.04	7ch	3.56	10ch	3.60
2ch	3.23	5ch	3.28	8ch	3.26	11ch	3.26
3ch	3.09	6ch	3.20	9ch	3.20	12ch	3.69
平均	3.27		3.20		3.34		3.52
全体平均	3.3						

■ 6.1.2. 習志野市総合教育センター・プラネタリウム館

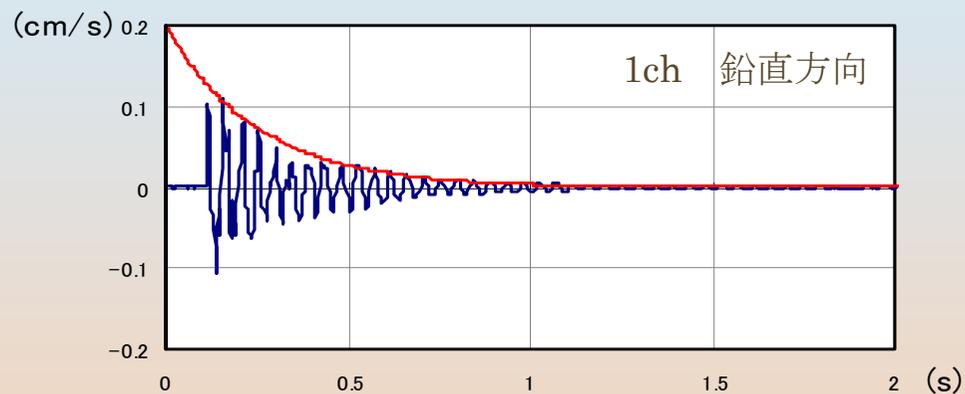


図10 包絡線を引いた波形

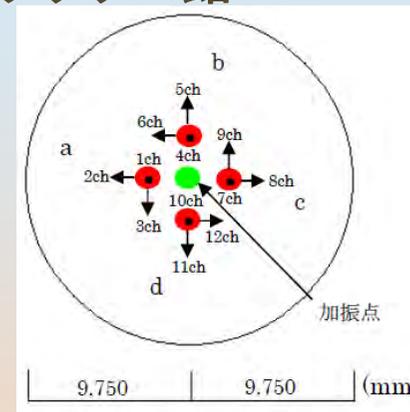


図2 計測機器配置平面図

表2 習志野総合教育センター・プラネタリウム館 衝撃加振実験による減衰定数(%)

計測点 a		計測点 b		計測点 c		計測点 d	
1ch	2.51	4ch	3.76	7ch	3.36	10ch	1.89
2ch	5.76	5ch	5.27	8ch	7.30	11ch	4.60
3ch	3.23	6ch	2.55	9ch	3.42	12ch	3.40
平均	3.83		3.86		4.69		3.30
全体平均	3.9						

6.2.3. 市川市現代産業科学館

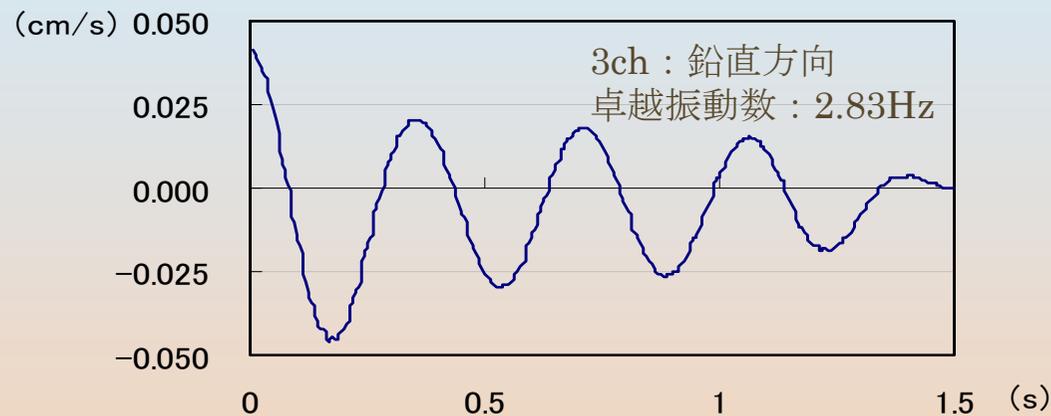


図15 RD法によって得られた自由振動波形

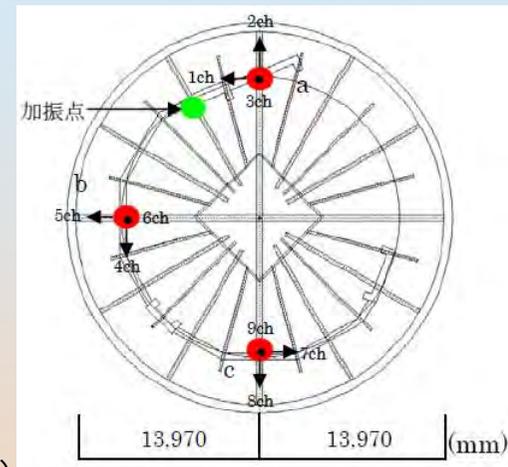


図3 計測機器配置平面図

表7 市川市現代産業科学館 常時微動観測による減衰定数(%)

計測点a		計測点b		計測点c	
1ch	0.98	4ch	1.15	7ch	1.31
2ch	0.99	5ch	1.34	8ch	0.75
3ch	1.12	6ch	1.16	9ch	1.16
平均	1.03		1.21		1.07
全体平均	1.1				

■6.2.4. 日本大学工学部スポーツホール

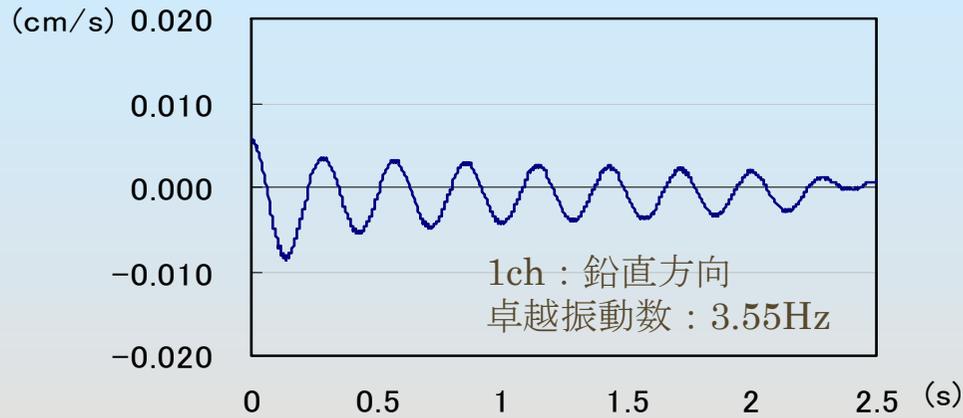


図16 RD法によって得られた自由振動波形

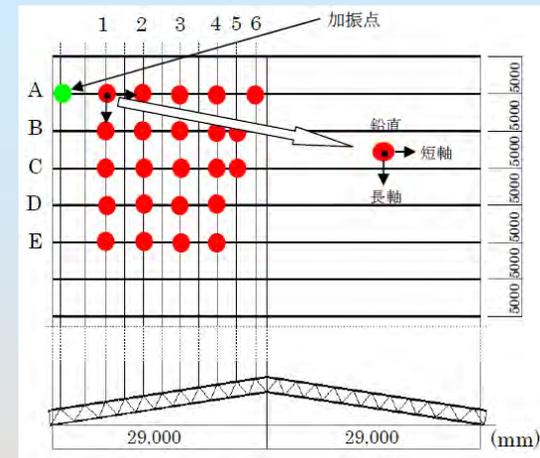


図4 計測機器配置平面図

表8 日本大学工学部スポーツホール 常時微動観測による減衰定数(%)

	1通り	2通り	3通り	4通り	5通り	6通り
A通り	1.07	1.19	1.13	0.87	—	0.83
B通り	1.32	1.20	1.27	1.29	1.13	—
C通り	1.23	1.30	1.23	1.30	1.26	—
D通り	1.12	1.45	1.12	1.00	—	—
E通り	1.01	—	—	—	—	—
平均	1.15	1.29	1.19	1.12	1.20	0.83
全体平均	1.1					

7. 結果と考察

□7.1. 衝撃加振実験

- 船橋総合教育センター・プラネタリウム館(3.3%)と習志野市総合教育センター・プラネタリウム館(3.9%)は形や大きさ、構造が類似しているという点もあり減衰定数は互いに近い値を取っている
- 市川市産業科学館(1.6%)は、既往研究である千葉県総合運動場体育館(鉄骨円錐形シェル)の結果(衝撃加振実験:1.9%、人力加振実験:1.6%)の結果と近い値となっている
- 日本大学工学部スポーツホール(2.9%)は鉄骨造であるために、RC造である、船橋・習志野のプラネタリウム館(3.3%、3.9%)よりも低い値となっている

□7.2. 常時微動観測

- 船橋市総合教育センター・プラネタリウム館(1.3%)と習志野市総合教育センター・プラネタリウム館(1.2%)は衝撃加振と同じように、常時微動観測でも互いに近い値を取っている
- 市川市現代産業科学館(1.1%)は、既往研究である千葉県総合運動場体育館(鉄骨円錐形シェル)の結果(常時微動観測:1.7%)の結果と近い値となっている
- 日本大学スポーツホール(1.1%)は、同じS造の市川市現代産業科学館(1.1%)と同じ値で、RC造の船橋市総合教育センター・プラネタリウム館(1.3%)と習志野市総合教育センター・プラネタリウム館よりも値が小さくなった
- 全体的に衝撃加振実験では対象構造物毎に減衰定数に違いがあったが常時微動観測では、4棟とも近い値となった



8. 減衰傾向分析

■シェル・空間構造物の減衰特性の検討を行なうために
減衰傾向分析を行なう

■データベースの紹介

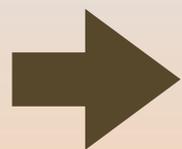
■データベース1
(立道、2004年)

37件



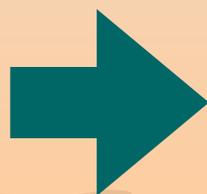
■データベース2
(新宮・平塚・湯川、2009)

48件



■データベース3
(新宮・平塚・湯川・大塚、2011)

51件



54件



8. 減衰傾向分析

付表1 データベース一覧

No.	発表年	建物名称	構造	No.	発表年	建物名称	構造
1	1974	名古屋国際展示場	鉄骨	28	2000	高岡法科大学大学院講堂	鉄骨
2	1978	西日本総合展示場	鉄骨	29	2000	恐竜ホール	鉄骨
3	1981	ポートピア81' 国際広場大屋根	鉄骨	30	2000	富山運動公園	鉄骨
4	1985	建設省建築研究所・実大構造物実験棟	鉄骨	31	2000	めろんドーム	空気膜
5	1985	日大理工スポーツホール	鉄骨	32	2001	下関水族館	鉄骨
6	1986	EXPO'85南ゲートドーム	鉄骨	33	2001	早稲田実業国分寺校舎体育館	鉄骨
7	1987	沖縄コンベンションセンター展示棟	鉄骨	34	2001	長野オリンピック記念アリーナ	鉄骨
8	1988	ス座世界総本山御本殿	鉄骨	35	2002	静岡スタジアム エコパ	鉄骨
9	1989	なら・シルクロード博空気膜展示館	空気膜	36	2002	六本木庁舎屋上ドーム	鉄骨
10	1989	なら・シルクロード博展示館	木造	37	2002	小笠山総合公園メインアリーナ	鉄骨
11	1990	(海と島の博覧会)マーメイドボウル	木造	38	2003	アイビードーム	木造
12	1990	横浜アリーナ	鉄骨	39	2002	岡山ドーム	鉄骨
13	1991	酒田市国体記念体育館	鉄骨	40	2004	千葉県総合スポーツセンター・体育館	鉄骨
14	1991	花と緑の博覧会「自然・科学館」パーゴラ	木造	41	1996	パークドーム熊本	空気膜
15	1995	関西国際空港ターミナルビル	鉄骨	42	2005	しもきた克雪ドーム	鉄骨
16	1995	熊本ドーム模型実験	空気膜	43	2005	大垣市総合体育館	RC
17	1995	グリーンドーム前橋	鉄骨	44	1999	きらら元気ドーム	鉄骨
18	1995	光が丘ドーム	鉄骨	45	2004	中国木材 名古屋事業所	木造
19	1996	大阪プール	ケーブル	46	2009	千葉県総合スポーツセンター・武道館	鉄骨
20	1996	長野スピードスケート会場模型	鉄骨	47	2009	大田区体育館	鉄骨
21	1998	小松ドーム	鉄骨	48	2009	日本大学生産工学部津田沼キャンパス11号館	RC
22	1998	札幌コミュニティドーム	鉄骨	49	2009	豊橋市某学校体育館	鉄骨
23	1998	テンショングリッドドーム	鉄骨	50	2011	船橋市総合教育センター・プラネタリウム館	RC
24	1999	北九州メディアドーム	鉄骨	51	2011	明星大学実験棟8号館	鉄骨
25	1999	北檜島小学校体育館	鉄骨	52	2012	習志野市総合教育センター・プラネタリウム館	RC
26	1999	菟道小学校体育館	鉄骨	53	2012	市川市現代産業科学館	鉄骨
27	1999	某木造円筒ドーム	木造	54	2012	日本大学理工学部スポーツホール	鉄骨

8. 減衰傾向分析

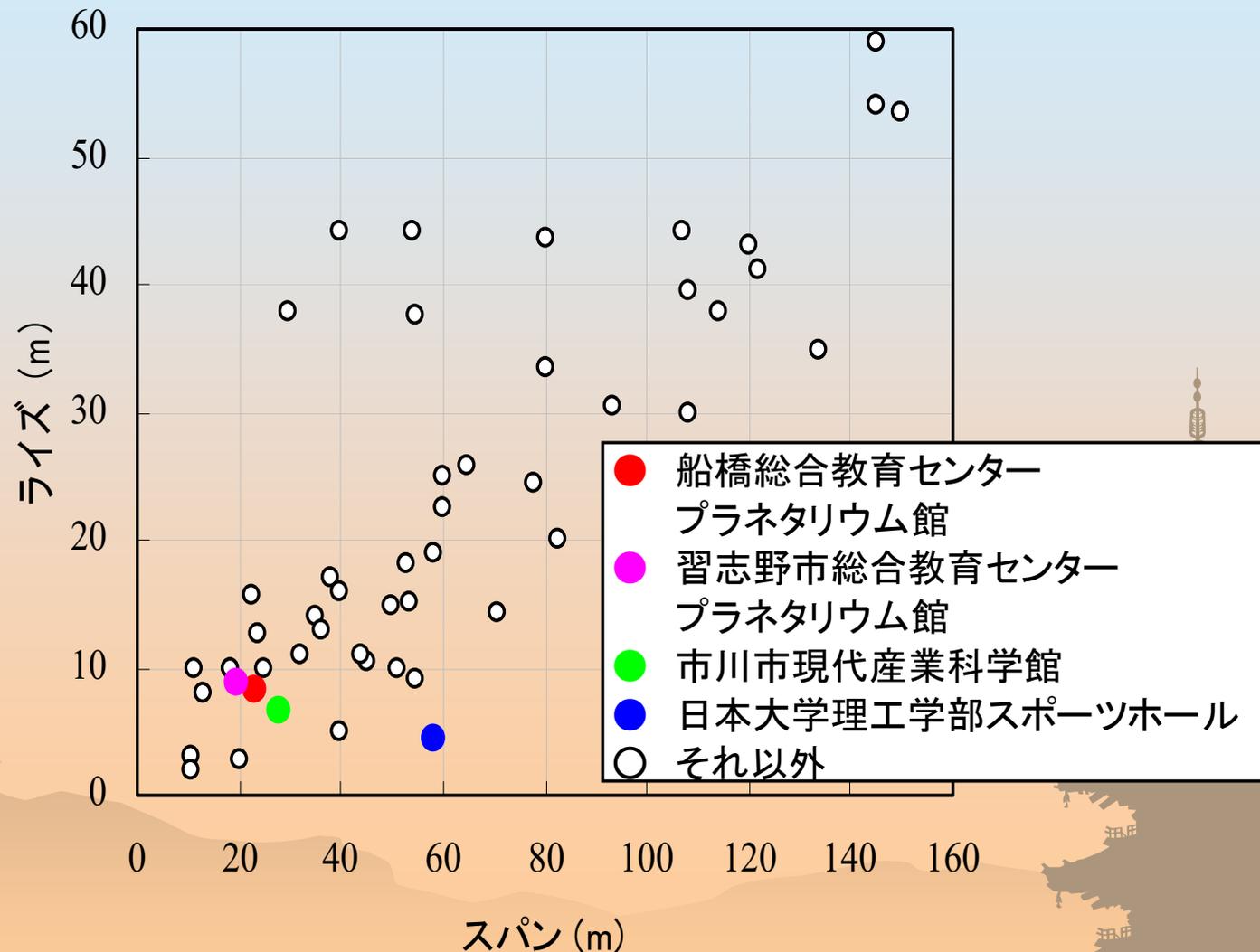


図17 本データベースにおけるライズ-スパン分布図

8.1. 規模による検討

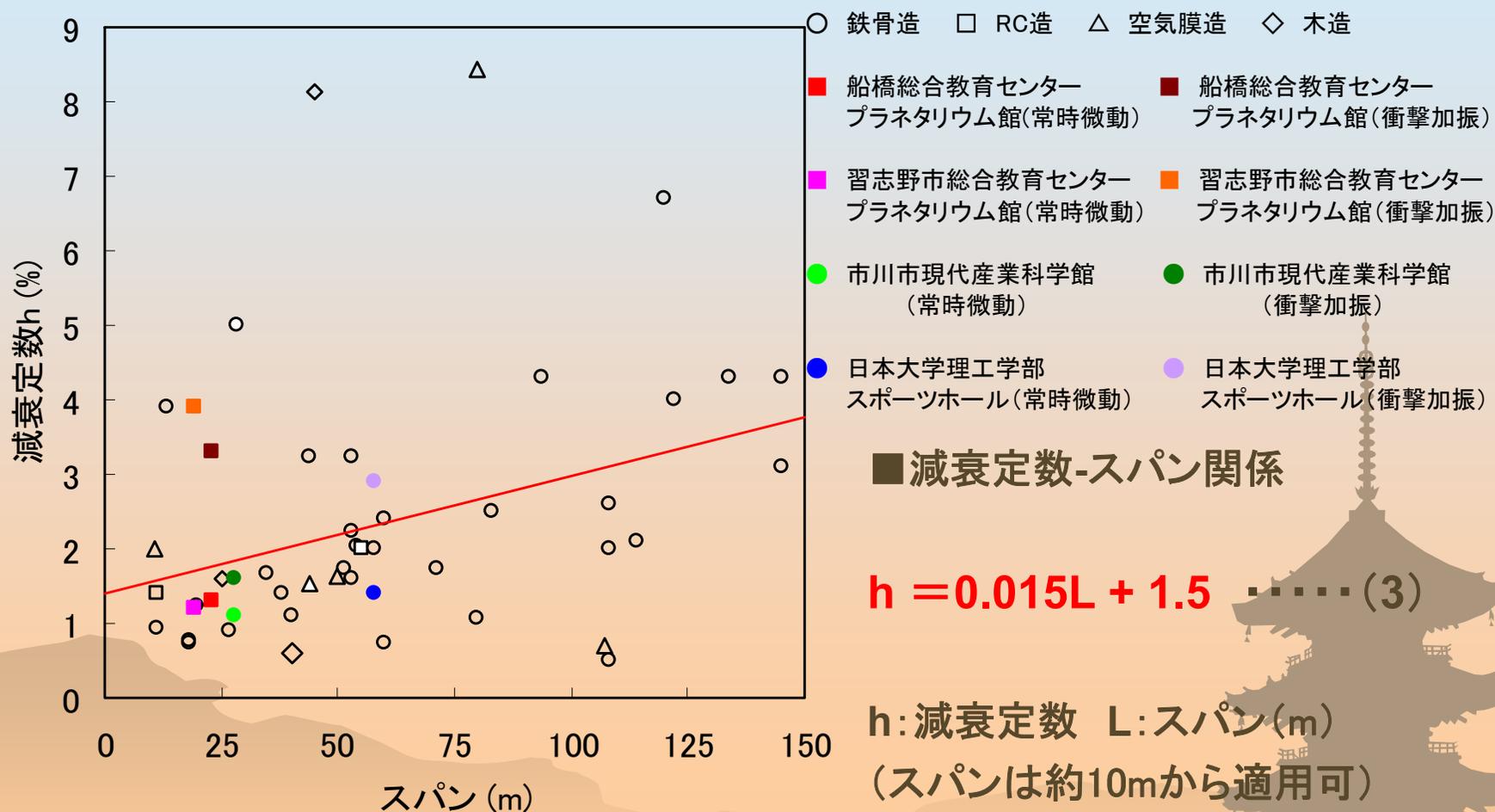
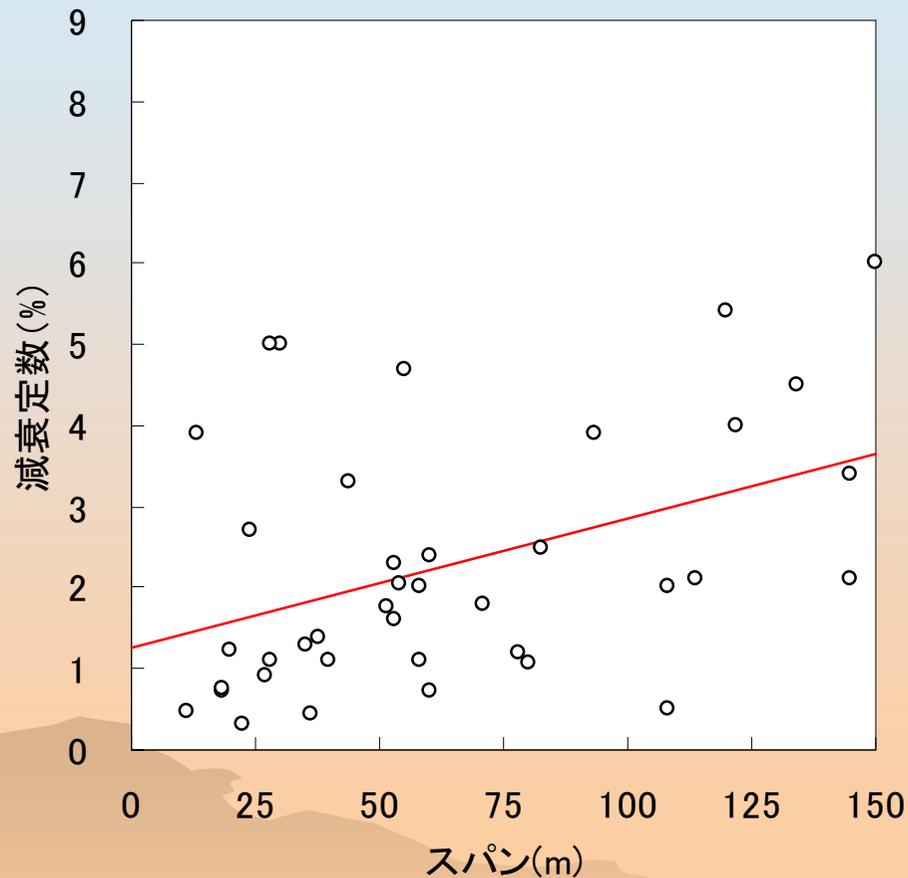


図18 減衰定数-スパン関係

■ 8.1. 規模による検討



■ 鉄骨造だけの減衰定数-スパン関係
鉄骨造だけは割とばらつきも少なく、
数も多いので、鉄骨だけで近似直線を
引く

$$h=0.016L+1.2$$

h:減衰定数 L:スパン(m)
(スパンは約10mから適用可)

付図1 鉄骨造における減衰定数-スパン



■ 8.2. 振幅依存性の検討

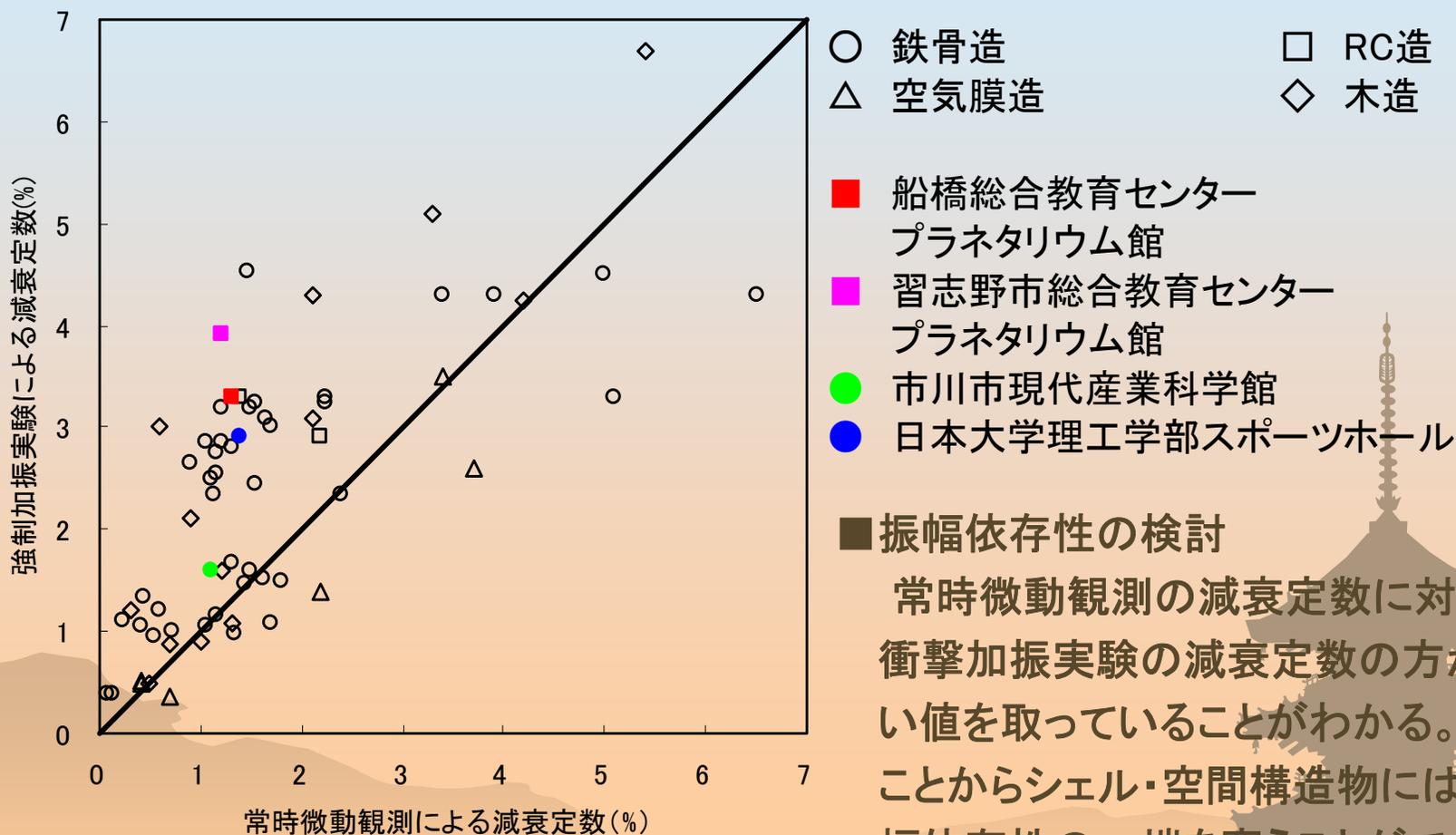


図20 減衰定数の振幅依存性の検討

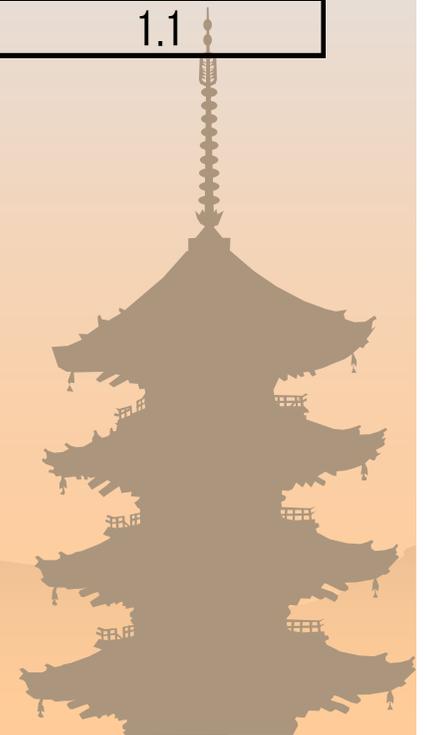
減衰定数 まとめ

付表1 本研究で得られた減衰定数

	船橋シェル屋根	習志野シェル屋根	市川円錐形状シェル屋根	スポーツホール
衝撃加振実験	3.3	3.9	1.6	2.9
常時微動観測	1.3	1.2	1.1	1.1

本研究で得られた減衰定数の推定式

$$h = 0.015L + 1.5$$



今後に向けて・・・

- ・さらにデータ収集を行い、分析を進める。
- ・微小振幅→
やや大きい振幅の振動、大振幅の振動、経年変化、減衰行列

●「建築物の減衰機構とその性能評価小委員会」

(主査・中村尚弘、幹事:佐武直紀・吉田昭仁)

- ・重層構造物を中心にシェル・空間構造なども扱っている。
- ・シェル・空間構造の減衰については、この委員会の中で話題提供などしている。
- ・1～2年後を目処に、
「建築物の減衰」の新訂版が出版予定(「**建築物の減衰と振動**」)。



ま と め

1) シェル構造の強さの秘密

2) シェル構造の応用分野

3) シェル構造の振動、減衰

4) 今後に向けて



ご清聴ありがとうございました

