

学位論文

壁面音響乱反射率の  
実験室測定と数値解析に関する研究

Laboratory Measurement and Numerical Analysis  
of Acoustic Scattering Coefficients for Wall Surfaces

李 孝振

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻



壁面音響乱反射率の  
実験室測定と数値解析に関する研究  
Laboratory Measurement and Numerical Analysis  
of Acoustic Scattering Coefficients for Wall Surfaces

李 孝振



# 目次

目次	iii
図目次	vii
表目次	xvii
<b>第 1 章 序</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 既往関連研究	7
1.3 研究の目的	9
1.4 論文の構成	10
<b>第 2 章 ランダム入射乱反射率の測定法の構築</b>	<b>13</b>
2.1 はじめに	13
2.2 測定原理	13
2.3 ISO 17497-1 の測定方法及び留意点	15
2.3.1 残響室及び測定条件	16
2.3.2 測定手順	16
2.4 測定環境に関する基礎的検討	17
2.4.1 測定概要	17
2.4.2 結果と考察	23
2.4.3 他機関との比較	26
2.5 試料の適用条件に関する検討	27
2.5.1 試料端部処理について	28
測定概要	30
結果と考察	30

2.5.2	試料配置による影響	32
	測定概要	32
	結果と考察	34
2.6	インパルス応答の測定条件に関する検討	35
2.6.1	理論的考察	36
2.6.2	縮尺模型及び実大残響室における測定概要	46
	残響室等の設定条件	46
	インパルス応答の測定条件	50
2.6.3	結果と考察 -1/4 縮尺の場合-	52
	SS 信号による測定	52
	MLS 信号による測定	55
2.6.4	結果と考察 -1/1 縮尺の場合-	59
	SS 信号による測定	59
	MLS 信号による測定	59
2.7	まとめ	61
<b>第3章</b>	<b>各種壁面拡散体のランダム入射乱反射率特性の測定</b>	<b>63</b>
3.1	はじめに	63
3.2	リブ構造壁面の乱反射率特性に関する検討	63
3.2.1	角柱高さによる影響	64
	測定試料	64
	結果と考察	66
3.2.2	角柱配置による影響	67
	測定試料	68
	結果と考察	69
3.2.3	背後空気層による影響	70
	測定試料	70
	結果と考察	72
3.2.4	断面形状による影響	73
	測定試料	73
	結果と考察	74
3.2.5	吸音仕上げによる影響	75
	測定試料	75
	結果と考察	77
3.3	ブロック構造壁面の乱反射率特性に関する検討	78

3.3.1	被覆率による影響	78
	測定試料	78
	結果と考察	80
3.3.2	配置による影響	81
	測定試料	81
	結果と考察	81
3.4	まとめ	82
<b>第4章</b>	<b>垂直入射乱反射率の測定法の構築</b>	<b>85</b>
4.1	はじめに	85
4.2	測定理論	85
4.3	受音点位置の影響に関する検討	87
4.3.1	測定概要	87
4.3.2	結果と考察	90
4.4	試料の適用条件に関する検討	93
4.4.1	試料設置方向による影響	93
	測定概要	93
	結果と考察	95
4.4.2	試料形状による影響	101
	測定概要	101
	結果と考察	103
4.5	2次元ランダム入射乱反射率の測定法への応用	110
4.5.1	測定理論	110
4.5.2	測定概要	112
4.5.3	結果と考察	114
	残響曲線の性状	114
	残響時間の同定	116
	垂直入射乱反射率の同定	116
4.6	まとめ	119
<b>第5章</b>	<b>周期構造壁面の乱反射率特性の数値解析</b>	<b>121</b>
5.1	はじめに	121
5.2	数値解析手法	121
5.2.1	3次元音場における乱反射率	122
5.2.2	境界要素法の適用	123

5.3	凹凸形状による影響	125
5.3.1	解析方法	125
5.3.2	結果と考察	126
5.4	凹凸高さによる影響	132
5.4.1	解析方法	132
5.4.2	結果と考察	132
5.5	凹凸幅による影響	144
5.5.1	解析方法	144
5.5.2	結果と考察	145
5.6	建築音響設計における拡散体設定に関する検討	150
5.6.1	ランダム入射条件における拡散体	151
5.6.2	垂直入射条件における拡散体	152
5.7	まとめ	153
<b>第6章 総括</b>		<b>155</b>
<b>付録 A インパルス応答の測定条件に関する検討</b>		<b>159</b>
A.1	SS 信号による測定結果	160
A.1.1	2次元周期構造壁面の場合	161
A.1.2	1次元周期構造壁面の場合	166
A.2	MLS 信号による測定結果	171
A.2.1	2次元周期構造壁面の場合	172
A.2.2	1次元周期構造壁面の場合	177
<b>付録 B 周期構造壁面の乱反射率特性の数値解析結果</b>		<b>183</b>
B.1	凹凸形状による影響	184
B.2	凹凸高さによる影響	185
B.3	凹凸幅による影響	187
<b>発表論文一覧</b>		<b>191</b>
<b>参考文献</b>		<b>195</b>
<b>謝辞</b>		<b>201</b>

# 目次

1.1	The temporal and spatial characteristics of specular and diffuse reflections from surfaces. . . . .	2
1.2	The relative importance of three acoustic treatments for sound production, sound reproduction and noise control. . . . .	3
1.3	Schematic of the scattering coefficient. . . . .	3
1.4	New trend of room acoustic reverberation formula. . . . .	4
1.5	Sample rotation methods for measuring the surface scattering coefficients in a free field (left) and in a reverberation room (right). . . . .	6
1.6	Flow chart of this thesis. . . . .	12
2.1	Examples of room impulse responses and integrated impulse responses with/without rotating the test sample. . . . .	15
2.2	1/4 scaled reverberation room. . . . .	18
2.3	The location of loud speakers and microphones in the reverberation room. . . . .	18
2.4	The turntable (left) with fixed revolution speed and the test sample (right) setting on the turntable. . . . .	19
2.5	Specifications of the test sample with hemispheres on the base plate. . . . .	19
2.6	Measured random-incidence absorption coefficients of the hemisphere. . . . .	19
2.7	The measurement system block diagram. . . . .	21
2.8	Random-incidence scattering coefficients of the base plate, measured with changing signal lengths and numbers. . . . .	23
2.9	Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing revolution numbers. . . . .	23
2.10	Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing signal numbers on the fixed signal lengths. . . . .	24
2.11	Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with	

	changing signal lengths, on the fixed signal numbers. . . . .	25
2.12	Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing scales. . . . .	26
2.13	Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing scales, as shown in Table 2.7. . . . .	27
2.14	Illustration of the way to suppress the edge scattering from the uneven perimeter of a test sample. . . . .	28
2.15	Test samples of 1D rectangular surface with border setting around the base plate. $t$ and $h_b$ are thickness and height of the border, respectively. . . . .	29
2.16	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing border heights on the fixed sample heights (a) 10 mm, (b) 25 mm, (c) 35 mm and (d) 45 mm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis. . . . .	31
2.17	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing border thicknesses and materials on the fixed sample heights (a) 10 cm and (b) 25 cm. . . . .	31
2.18	Test samples of the rib structures with various arrangements. . . . .	33
2.19	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing arrangements on the fixed sample arrangements. . . . .	34
2.20	Processing of room impulse responses by the stepwise approach. . . . .	37
2.21	Contours of the minimum number of steps, that ensures $ \Delta s  \leq 0.05$ for the critical sample ( $\alpha_s = 0$ ). . . . .	40
2.22	Estimated scattering coefficients for three true values of 0.2, 0.5 and 1, with two typical numbers of steps of 60 and 120. . . . .	40
2.23	Processing of room impulse responses by the continuous approach. . . . .	42
2.24	Contours of the minimum revolution period ratio, that ensures $ \Delta s  \leq 0.05$ for the critical sample ( $\alpha_s = 0$ ): (a) with the typical truncation time $T_W = T_1/2$ , and (b) with the double time $T_W = T_1$ . . . . .	45
2.25	Estimated scattering coefficients for three true values of 0.2, 0.5 and 1 with $T_W = T_1/2$ , with two typical revolution period ratios of 100 and 300. . . . .	45
2.26	Two types of test samples in 1/4 scale. . . . .	47
2.27	Measured random-incidence absorption coefficients of the test samples in 1/4 and 1/1 scales. . . . .	47
2.28	Real-scale reverberation room at Yamaha Corp. in Shizuoka-ken, Japan. . . . .	48
2.29	The base plate and the test sample of block structure in 1/1 scale. . . . .	49

2.30	Measured reverberation times and equivalent absorption areas of two reverberation rooms in 1/4 and 1/1 scales. . . . .	50
2.31	Random-incidence scattering coefficients of the base plate, measured without and with the border on the fixed signal periods. . . . .	51
2.32	Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with SS signals in 1/4 scale. (a) $T_S = 2.73$ s, (b) $T_R = 81.9$ s/rev, and (c) $N = 30$ . . . . .	53
2.33	Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with SS signals in 1/4 scale. (a) $T_S = 2.73$ s, (b) $T_R = 81.9$ s/rev, and (c) $N = 30$ . Thick lines represent those numerically calculated with the directivity correlation method. . . . .	54
2.34	Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with MLS signals in 1/4 scale. (a) $T_S = 2.73$ s, (b) $T_R = 81.9$ s/rev, and (c) $N = 30$ . . . . .	56
2.35	Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with MLS signals in 1/4 scale. (a) $T_S = 2.73$ s, (b) $T_R = 81.9$ s/rev, and (c) $N = 30$ . Thick lines represent those numerically calculated with the directivity correlation method. . . . .	57
2.36	Energy decay curves after synchronized averaging of impulse responses, measured for the 1D periodic sample in the 2.5 kHz frequency band. (a) SS signals with $T_S = 2.73$ s, (b) MLS signals with $T_S = 2.73$ s, and (c) MLS signals with $T_R = 81.9$ s/rev. . . . .	58
2.37	Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with SS signals with $T_S = 5.46$ s in 1/1 scale. A thick line represents typical values measured with SS signals in 1/4 scale. . . . .	59
2.38	Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with MLS signals in 1/1 scale. (a) $T_S = 5.46$ s, (b) $T_R = 655$ s/rev, and (c) $N = 60$ . Thick lines represent typical values measured with MLS signals in 1/4 scale. . . . .	60
3.1	Test samples of the rib structure with different heights. . . . .	65
3.2	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with different heights. . . . .	66
3.3	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with combinations of different heights. . . . .	66
3.4	Test samples of the plate structure with different periods. . . . .	68

3.5	Test sample of the rib structure with different periods. . . . .	68
3.6	Random-incidence scattering coefficients of the plate, measured with different periods. . . . .	69
3.7	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with irregular periods. . . . .	69
3.8	Test samples of the rib structure with air layer. . . . .	71
3.9	Test samples of the cylinder structure with and without air layer. . . . .	71
3.10	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without air layer. . . . .	72
3.11	Random-incidence scattering coefficients of the cylinder structure, measured with and without air layer. . . . .	72
3.12	Random-incidence scattering coefficients measured with different shapes of the test sample, on the condition of $h = 25$ cm. . . . .	74
3.13	Random-incidence scattering coefficients measured with different shapes of the test sample, on the condition of total $h = 35$ cm with air layer. . . . .	74
3.14	Test samples of the rib structure with air absorption (sponge). . . . .	76
3.15	Measured random-incidence absorption coefficients of the test sample. . . . .	76
3.16	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 10$ cm. . . . .	77
3.17	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 25$ cm. . . . .	77
3.18	Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 35$ cm. . . . .	78
3.19	Test samples of the block structure with different coverage densities. . . . .	79
3.20	Random-incidence scattering coefficients of the block structure, measured with different coverage densities. . . . .	80
3.21	Test sample of the block structure with random layout. . . . .	81
3.22	Random-incidence scattering coefficients the block structure, measured with different layouts. . . . .	82
4.1	Illustration of the laboratory measurement method for measuring the normal-incidence scattering coefficient in a rectangular room. . . . .	86
4.2	1/4 scaled rectangular room, setting with absorbers on four side walls and the test sample on the floor. . . . .	88
4.3	Random-incidence absorption coefficients of the empty room and the absorber. . . . .	88

4.4	Specifications of the test sample. . . . .	89
4.5	Measured random-incidence absorption and scattering coefficients of the test sample. . . . .	89
4.6	The locations of source and receiving points (2 loud speakers and 5 microphones, total 10 measurements) in the 1/4 scaled rectangular room. . . . .	90
4.7	Energy decay curves of the room without test sample, measured for different source and receiving points. . . . .	91
4.8	Energy decay curves of the room with test sample, measured for different source and receiving points. . . . .	92
4.9	Specifications of the measurement condition by changing sample arrangements. . . . .	94
4.10	1/4 scale rectangular room with the test sample of Rib B setting on the floor. . . . .	95
4.11	Average energy decay curves with and without the test sample in 1/3 octave bands. The test samples of Rib A and B are arranged in two ways as Fig. 4.9(b). . . . .	96
4.12	Reverberation times estimated by different decay level ranges without the test sample. . . . .	97
4.13	Reverberation times estimated by different decay level ranges with the test samples of (a) Rib A and (b) Rib B. . . . .	98
4.14	Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Rib A and Rib B. Black lines represent the values obtained by numerical analysis. . . . .	100
4.15	Specifications of 1-dimensional test samples by changing the shapes and heights. . . . .	102
4.16	Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands. Type R and T are the rectangular and triangular shapes, respectively. . . . .	103
4.17	Reverberation times estimated by different decay level ranges without the test sample. . . . .	104
4.18	Reverberation times estimated by different decay level ranges with test samples by changing the shapes and heights. . . . .	105
4.19	Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Type R with $h = 4$ cm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis. . . . .	107
4.20	Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Type T with $h = 6$ cm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis. . . . .	108
4.21	Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times	

	in different decay level ranges for Type T with $h = 10$ cm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis. . . . .	109
4.22	Illustration of the laboratory measurement method for measuring two-dimensional random-incidence scattering coefficients. . . . .	111
4.23	Specifications of the empty non-rectangular room with two surfaces tilted. $\theta$ and $\varphi$ are tilted floor and wall surface angles, respectively. . . . .	112
4.24	Specifications of 1-dimensional test samples by changing the arrangement of test sample on the condition of Room 2. . . . .	113
4.25	Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 0 ( $\theta = 0^\circ$ , $\varphi = 18^\circ$ ). . . . .	114
4.26	Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 1 ( $\theta = 1^\circ$ , $\varphi = 19^\circ$ ). . . . .	115
4.27	Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 2 ( $\theta = 5^\circ$ , $\varphi = 21^\circ$ ). . . . .	115
4.28	Reverberation times estimated by different decay level ranges with and without test samples on the conditions of (a) Room 0, (b) Room 1 and (c) Room 2. . . . .	117
4.29	2D random-incidence scattering coefficients estimated from different decay ranges for the two sample arrangements. Black thick/dotted lines represent numerical results for 2D random/normal incidences. . . . .	118
5.1	Geometry of the numerical model. A plane wave impinges on a sample in the free field. $(\theta', \varphi')$ and $(\theta, \varphi)$ are the incidence and reflection angles, respectively. . . . .	122
5.2	Discretization of incidence and reflection angles. . . . .	122
5.3	Three types of samples with 1D periodic surface (15 periods). Type S: Sinusoids; Type T: Triangles; Type R: Rectangles. . . . .	126
5.4	Distribution of directional scattering coefficients at 250 Hz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	127
5.5	Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	127
5.6	Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	127
5.7	Distribution of directional scattering coefficients at 1.25 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	128
5.8	Distribution of directional scattering coefficients at 1.6 kHz calculated for	

	Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	128
5.9	Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	128
5.10	Distribution of directional scattering coefficients at 2.5 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	129
5.11	Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	129
5.12	Distribution of directional scattering coefficients at 4 kHz calculated for Types S, T and R. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	129
5.13	Random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R on the fixed condition of $h = 6$ cm. . . . .	130
5.14	Normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R on the fixed condition of $h = 6$ cm. . . . .	131
5.15	Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	133
5.16	Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	133
5.17	Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	134
5.18	Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	134
5.19	Random-incidence scattering coefficients calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	135
5.20	Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type S with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	136
5.21	Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	137
5.22	Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	137
5.23	Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	138
5.24	Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	138
5.25	Random-incidence scattering coefficients calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	139

5.26	Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type T with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	140
5.27	Distribution of directional scattering coefficients at $500$ Hz calculated for Type R with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	141
5.28	Distribution of directional scattering coefficients at $1$ kHz calculated for Type R with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	141
5.29	Distribution of directional scattering coefficients at $2$ kHz calculated for Type R with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	142
5.30	Distribution of directional scattering coefficients at $4$ kHz calculated for Type R with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. $\theta'$ and $\varphi'$ are incidence angles. . . . .	142
5.31	Random-incidence scattering coefficients for Type R ( $w = 10$ cm) with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. The results are calculated with the directivity correlation method and measured with reverberation room method. . . . .	143
5.32	Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R ( $w = 10$ cm) with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	142
5.33	Test sample of 1D rectangular surface ( $15$ periods) with various widths. $w$ , $L$ and $h$ are width, period and height of the test sample, respectively. . . . .	145
5.34	Distribution of directional scattering coefficients at $1$ kHz calculated for Type R ( $h = 4$ cm) with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm. . . . .	146
5.35	Distribution of directional scattering coefficients at $2$ kHz calculated for Type R ( $h = 4$ cm) with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm. . . . .	146
5.36	Distribution of directional scattering coefficients at $3.15$ kHz calculated for Type R ( $h = 4$ cm) with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm. . . . .	147
5.37	Random-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm, on the conditions of (a) $h = 2$ cm, (b) $h = 4$ cm, (c) $h = 6$ cm, (d) $h = 8$ cm and (e) $h = 10$ cm. . . . .	148
5.38	Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm, on the conditions of (a) $h = 2$ cm, (b) $h = 4$ cm, (c) $h = 6$ cm, (d) $h = 8$ cm and (e) $h = 10$ cm. . . . .	149
5.39	Averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w = 10$ cm) with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	150
5.40	Averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm. . . . .	150
5.41	Acoustic performance of 1D periodic surfaces, averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w/L = 50\%$ ). . . . .	151

5.42	Averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w = 10$ cm) with changing $h = 2, 4, 6, 8$ and $10$ cm. . . . .	152
5.43	Averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing $w = 15, 10, 5$ and $0$ cm. . . . .	152
5.44	Acoustic performance of 1D periodic surfaces, averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w/L = 50\%$ ). . . . .	153
A.1	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal periods. . . . .	161
A.2	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods. . . . .	162
A.3	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (1). . . . .	163
A.4	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (2). . . . .	162
A.5	Energy decay curves, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and angular step. . . . .	165
A.6	Random-incidence scattering coefficient, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal periods. . . . .	166
A.7	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods. . . . .	167
A.8	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (1). . . . .	168
A.9	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (2). . . . .	169
A.10	Energy decay curves, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed single period, revolution period and angular step. . . . .	170
A.11	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal periods. . . . .	172
A.12	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods. . . . .	173
A.13	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (1). . . . .	174
A.14	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (2). . . . .	175

A.15	Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and signal number. . . . .	176
A.16	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal periods. . . . .	177
A.17	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods. . . . .	178
A.18	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (1). . . . .	179
A.19	Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (2). . . . .	180
A.20	Energy decay curves, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and signal number. . . . .	181
B.1	Scattering coefficients of polar incidence dependence, $h = 6$ cm. . . . .	184
B.2	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type S. . . . .	183
B.3	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type T. . . . .	185
B.4	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R ( $w = 10$ cm). . . . .	186
B.5	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R, $h = 2$ cm. . . . .	187
B.6	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R, $h = 4$ cm. . . . .	187
B.7	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R, $h = 6$ cm. . . . .	188
B.8	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R, $h = 8$ cm. . . . .	188
B.9	Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R, $h = 10$ cm. . . . .	189

# 表目次

2.1	The Measurement conditions for the four different reverberation times. . . . .	14
2.2	Maximum scattering coefficients for the base plate alone. . . . .	16
2.3	Specifications of the reverberation room. . . . .	18
2.4	Comparison with 1/4 & 1/5 scaled measurement set-up and the ISO 17497-1. () are the values of ISO standard in the cases of $N = 4$ and $5$ . . . . .	20
2.5	Impulse response measurement conditions for various signal periods, signal numbers and revolution numbers. . . . .	22
2.6	Measurement conditions for various revolution numbers. . . . .	22
2.7	Comparison with the measurement setups of other institutions measured in different scales (test sample: hemispheres). . . . .	27
2.8	Measurement conditions for various border heights (Unit: mm). . . . .	29
2.9	Measurement conditions for various border thicknesses (Unit: mm). . . . .	29
2.10	Measurement conditions for various arrangements of the rib structure. . . . .	32
2.11	Measurement conditions in the previous papers. . . . .	36
2.12	Minimum numbers of steps required for $ \Delta s  \leq 0.05$ , with changing $s$ and $\alpha_s$ for a test sample, and $A_1/S$ for a reverberation room. . . . .	40
2.13	Minimum ratios of revolution period $T_R$ to reverberation time $T_1$ with a typical truncation time $T_w = T_1/2$ , required for $ \Delta s  \leq 0.05$ with changing $s$ and $\alpha_s$ for a test sample, and $A_1/S$ for a reverberation room. . . . .	44
2.14	Minimum ratios of revolution period $T_R$ to reverberation time $T_1$ with the optimal truncation time $T_w = \tilde{t}_c$ , required for $ \Delta s  \leq 0.05$ ( $\tilde{R}_c \leq -30(\text{dB})$ ), with changing $s$ and $\alpha_s$ for a test sample, and $A_1/S$ for a reverberation room. The ratios in parentheses are required for a supplementary condition: $\tilde{R}_c = -30(\text{dB})$ . . . . .	44
2.15	Specifications of the measurement set-up. . . . .	46
2.16	Conditions of the impulse response measurements in 1/4 scale (1 revolution). . . . .	49
2.17	Conditions of the impulse response measurements in 1/1 scale (1 revolution). . . . .	49

3.1	Measurement conditions for the rectangular surfaces with different heights. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height of the test sample, respectively. . . . .	64
3.2	Measurement conditions for the rectangular surfaces with combinations of different heights. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height of the test sample, respectively. . . . .	64
3.3	Measurement conditions for the plates with different periods. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height of the test sample, respectively. . . . .	67
3.4	Measurement conditions for the rectangular surfaces with combinations of different periods. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height of the test sample, respectively. . . . .	67
3.5	Measurement conditions for the rectangular surfaces with and without air layer. $w$ and $h$ are width and height, respectively. . . . .	70
3.6	Measurement conditions for the cylinders with and without air layer. $d$ and $h$ are diameter and height, respectively. . . . .	70
3.7	Measurement conditions with different shapes of the test samples, on the condition of $h = 25$ cm. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height, respectively. . . . .	72
3.8	Measurement conditions with different shapes of the test samples, on the condition of total $h = 35$ cm with the air layer. $L$ and $h$ are period and height, respectively. . . . .	73
3.9	Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 10$ cm. $w$ and $h$ are width and height, respectively. . . . .	75
3.10	Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 25$ cm. $w$ and $h$ are width and height, respectively. . . . .	75
3.11	Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total $h = 35$ cm. $h$ is the height. . . . .	75
3.12	Measurement conditions for the block structures with different coverage densities. . . . .	80
3.13	Measurement conditions for the block structures with different layouts. . . . .	81
4.1	Measurement conditions with and without the test sample. The test samples are arranged in two ways as Fig. 4.9(b). . . . .	93
4.2	Measurement conditions of various test samples by changing shapes and	

	heights. $L$ and $h$ are period and height of the test sample, respectively. . . . .	101
4.3	Measurement conditions with slopes of two surfaces. $\theta$ and $\varphi$ are tilled floor and wall surface angles, respectively. . . . .	112
5.1	Measurement conditions for 1-dimentional periodic test samples by changing the shapes. $L$ , $h$ and $w$ are period, height and width, respectively. . . . .	125
5.2	Measurement conditions for 1-dimentional periodic test samples by changing the heights. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height, respectively. . . . .	132
5.3	Measurement conditions for 1D rectangular surface by changing its widths. $L$ , $w$ and $h$ are period, width and height, respectively. . . . .	144



# 第1章

## 序

### 1.1 研究の背景

我々の周りには音が溢れており、日常生活を営む上で欠かすことのできない重要な要素の1つである。従って、コンサートホール・劇場・講堂等の大規模なオーディトリウムから録音スタジオ・音楽練習室・リスニングルーム等の小規模な音楽空間、さらには学校教室・オフィス・工場等の建築空間、駅・空港のコンコース・アトリウム・地下街・広場等の都市空間まで、音響設計は望まれる音環境を実現する上で極めて重要である。

実際の建築・都市空間の壁面には、音を拡散させる目的で多種多様な形状が用いられることが多く、またそのような意図のもとにつけられるものだけでなく、壁面のテクスチャーとしても実に様々な凹凸が存在する。平滑な壁面に囲まれた直方形のホールで音楽を聴くとき、その音は鋭く硬質で耳障りな響きとなり、カラーレーション、グレアと呼ばれる現象が生じる[1]。それに対して壁面に凹凸面がある場合、初期反射音は幾何学的な反射点からではなく、壁の広い範囲から発生して到達する。音波がこの不規則表面で反射する度に散乱されるため、室内で多数回の反射を繰り返した後は、音響エネルギーの空間分布が均一化する。すなわち、初期反射音が支配的ではなく、さらに、後部残響音が側方、頭上、そして前方などあらゆる方向から到来するように感じられる (Fig. 1.1)。以上のような壁面の凹凸による音響拡散は、室の全体形状、吸音率のみならず、室内音響特性に大きな影響を及ぼすため、音響設計において重要な検討項目である[2]。

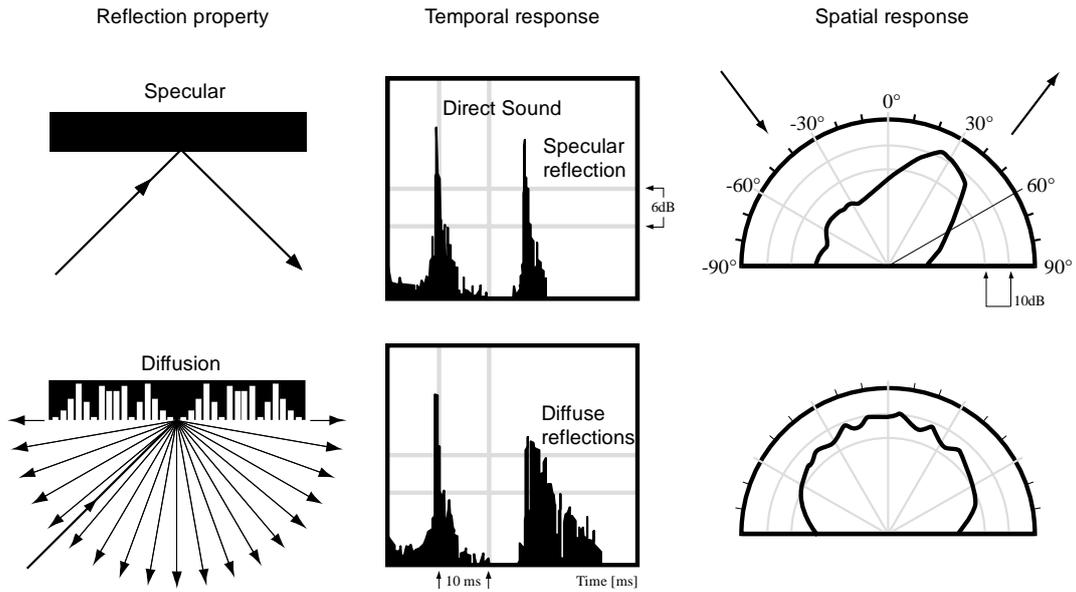


Fig. 1.1: The temporal and spatial characteristics of specular and diffuse reflections from surfaces [3].

従来の音響設計では、壁面の音響特性として吸音性制御のみを機軸として行われてきたが、それに加えて拡散性制御を新機軸に据えた二元的な音響設計手法 (Fig. 1.2) を考えると、より現実的な建築・都市空間の音響設計への適用が検討可能となる[3]。拡散性制御を導入する具体的な意義は、残響調整、音響障害の防止、音響効果の高品質化の3つの観点から捉えられる。従って、拡散性制御はコンサートホール・劇場等における響きを決定する非常に重要な役割を担うと共に、エコーが生じやすい会議室・学校教室等における音響障害の防止、さらに、音楽空間における高次感性印象の向上及び公共空間における音声明瞭度の確保に対する効果が期待される。

しかし、壁面の音響拡散性能は明確な形で定量化されていないのが現状であり、拡散の多少を定性的に推測する水準に止まっていて、曖昧な経験判断に依るところが大きく、効果的・効率的な設計が行われているとは言い難い。従って、指標や測定法が整備されている吸音率や透過損失のように、音響拡散性能の評価指標を確立することは音響設計上非常に重要であると考えられる。

近年、壁面の音響拡散の程度を表す一物理指標として乱反射率 (scattering coefficient) が提案され[4, 5]、ISO 17497-1 [6]では壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの割合として定義している。従って、反射指向特性の均一性[7, 8]は考慮されず、全反射エネルギーを  $E_{total}$ 、鏡面反射エネルギーを  $E_{spec}$  として次式により表される (Fig. 1.3)。

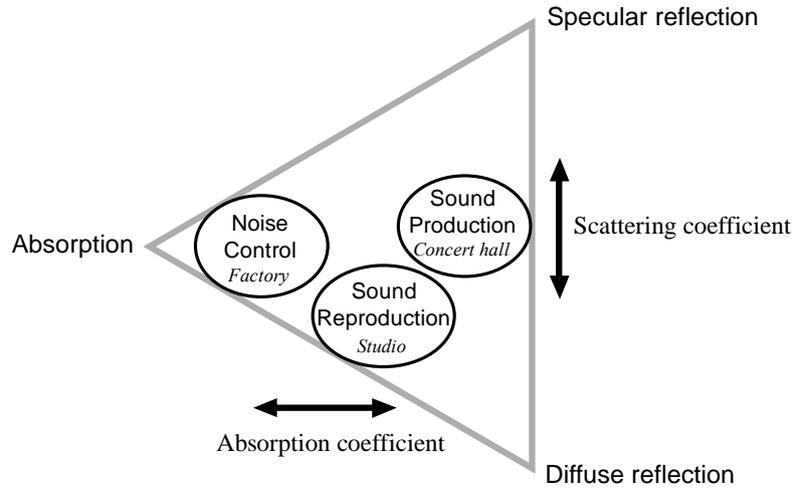


Fig. 1.2: The relative importance of three acoustic treatments for sound production, sound reproduction and noise control (modified from reference [3]).

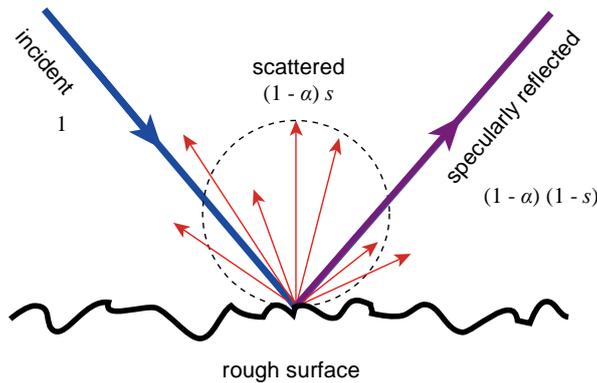


Fig. 1.3: Schematic of the scattering coefficient.

$$s(\theta', \varphi') = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} \quad (1.1)$$

乱反射率は音の入射条件によって変化するものであり、垂直入射乱反射率、斜入射乱反射率、ランダム入射乱反射率の 3 種類がある。垂直入射あるいは斜入射乱反射率は、単一の音波が入射するような状況での値として使用されるが、建築音響設計においては、拡散音場という理想的な状態が仮定されることが多いため、ランダム入射乱反射率が広く使われている。なお、拡散音場とは、音響エネルギー密度が一様かつ伝搬方向が等確立であると定義される。

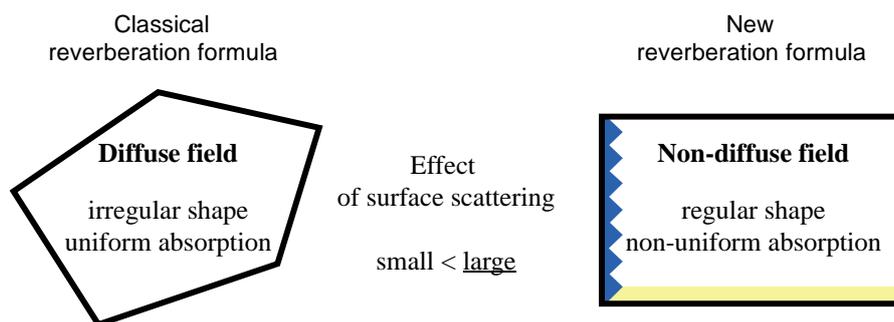


Fig. 1.4: New trend of room acoustic reverberation formula.

乱反射率の最も有効な利用法の一つとしては、幾何音響シミュレーションへの導入である[9, 10, 11, 12]。幾何音響シミュレーションは音の波動性を考慮せず、エネルギーの伝搬行程を幾何学的に取り扱うため波動音響的手法[13, 14, 15, 16, 17]に比べ厳密性に欠けるが、多くの計算機能力が不必要、計算時間が短い等の点から、大規模空間を扱う際の現実的手法として広く用いられている。従来の幾何音響シミュレーションでは壁面の音響特性として吸音率のみをパラメータとしていたが、凹凸寸法に対して波長が短い場合には、鏡面反射方向以外に乱反射する成分の割合が大きくなることから、CATT-Acoustic [18]、Odeon [19]等といった主な商用ソフトウェアでは既に乱反射率の入力を採用するようになっている。近年、幾何音響的手法における乱反射率の取り扱いや有効性についての検討がなされており[20, 21, 22]、拡散音場の仮定が成立しない空間の残響予測や壁面による拡散を考慮した騒音伝搬予測、各種音響物理量の推定等、幾何音響シミュレーションの適用範囲が広がっている。

また、乱反射率是非拡散音場の残響理論に適用できる。室内の残響理論はSabineの式[23]を起源とする拡散音場を仮定し、壁面の性質として吸音のみを考慮する理論が現在の音響設計でも幅広く使われている (Fig. 1.4)。一方、現実の建築・都市空間では細長・偏平な室形、吸音面の偏在、開口面を有する場合も多く、これらの空間では完全拡散音場から程遠い状態となる。このような非拡散音場では壁面の吸音性に加えて拡散性が残響に大きく影響を及ぼすことから、近年では、乱反射率の導入により壁面拡散を考慮した矩形室内非拡散音場の残響理論が提案された[24]。この新たな残響理論については実測[25]や数値解析[26]を通じた検討が進められており、残響予測の精度向上を図ろうとしている。

さらに、乱反射率は室内音響設計において鏡面反射成分の制御に重要な役割を担う。音の焦点やフラッターエコー等の鏡面反射が著しく生じる空間においては、拡散体を設置することによって音響障害を防止することができるが、拡散体の設計やその設置箇所を検討することを目的として乱反射率を利用することが可能と考えられる。

その一方で乱反射率のデータは乏しく、与えるべき数値が不明な場合が殆どであり、設計実務に応える形でのデータ整備が望まれている。

乱反射率は、測定または数値解析によって得られる。測定は実物によく近似した結果が得られるため予測精度の点からは優れているが、大掛かりな実験施設・音響測定機器が必要であり、また測定試料の製作にも費用・労力を要する。それに対して数値予測は、理想的な音場条件での検討が可能であり、規定の試料寸法が小さいため、計算機資源の観点から実用性も高い。しかしながら、測定においては、不確定な誤差が含まれやすく、また数値予測においても実測値との対応関係が明らかでない等の課題がある。従って、測定・数値解析の両面で比較検証を行い、乱反射率の定量化手法を整備する必要があり、これは学問的にも実務的にも極めて大きい意義を持つと考えられる。

乱反射率の算出法としては、試料回転法[4]と指向相関法[5]の2種類に分けることができ、前者は測定のみ、後者は測定と数値予測に用いられる。いずれの算出法も、鏡面反射成分の抽出が課題となる。算出の原理や方法については以下に示す。

#### 試料回転法

Vorländer *et al.* [4]は円形試料を回転させながら多数のインパルス応答を測定し、それらを同期加算することにより鏡面反射成分のみを抽出する測定法を、自由音場と残響室を想定して提案している (Fig. 1.5)。鏡面反射成分は、円形試料を回転させても干渉性が完全に保たれるが、散乱成分は非干渉性となるという仮定に基づき求められる。

#### ■ 自由音場法

特定方向の入射条件において試料を回転させながら複素反射係数  $r_i$  [27] を  $n$  回 (試料回転角の分割数) 計測し、加算平均により鏡面反射係数  $r_{\text{spec}}$  を求める (次式)。

$$r_{\text{spec}} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N r_i \quad (1.2)$$

鏡面反射係数は  $\alpha_{\text{spec}} = 1 - |r_{\text{spec}}|^2$  の関係にあることから、Eq. (1.1) により入射角依存乱反射率が算出され、その平均としてランダム入射乱反射率が求められる。

#### ■ 残響室法

試料静止状態と回転状態の残響室吸音率の測定を通して乱反射率を求める。ここで、残響時間測定には室内インパルス応答計測に基づくシュレーダー法を用いる必要がある。試料回転状態では散乱成分がインパルス応答の同期加算により相殺され、静止状態に比べて残響時間が短くなることに着目し、それぞれの状態の残響時間の差からランダム入射乱反射率を算出する方法である。

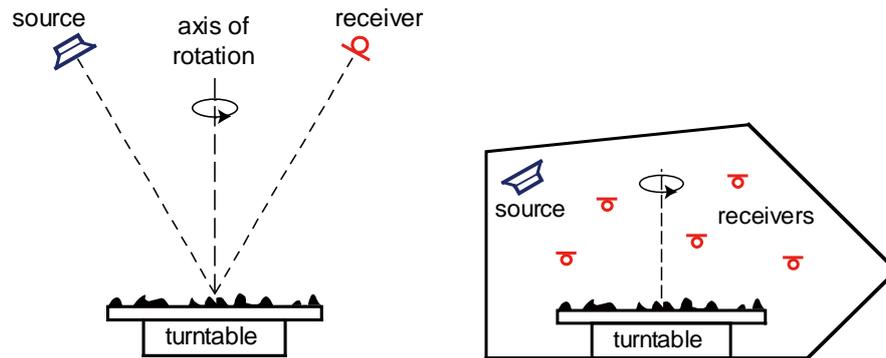


Fig. 1.5: Sample rotation methods for measuring the surface scattering coefficients in a free field (left) and in a reverberation room (right).

### 指向相関法

自由音場中の散乱指向特性から乱反射率を算出する方法であり、Mommertz [5]により提案されたものである。試料と同サイズの剛平板の反射特性を鏡面反射成分とみなし、試料設置時の反射指向特性との相関を取ることにより乱反射率を算出する方法であり、端部回折による影響が考慮されている。入射角依存乱反射率を平均することによりランダム入射乱反射率の算出が可能である。

自由音場法は斜入射反射係数の測定精度に依るところが大きく、現時点では試行段階にあると言える[73]。それに比べて残響室法は、乱反射率が統計入射平均値として得られることから比較的簡便で実用的が高く、ISO 17497-1 [6]に規格化されるまで至っている。ここ数年海外では乱反射率の残響室法測定に関する発表が増加しているが、その大半は 1/4~1/10 の縮尺模型による測定[28, 29, 30]であり、実物大の測定例[31, 32]は少ない。実大測定では試料回転装置が大掛かりとなるのが難点である上、反射性が前提となる試料では吸音を考慮する必要がないため、模型測定が普及していると考えられる。測定においては試料の端部処理や配置等の適用条件による影響に十分注意する必要がある他、インパルス応答の同期加算回数、回転速度等を適切に定める必要がある。

音響設計においては室内音場を拡散音場として扱うことが多く、上記の残響室法によるランダム入射値は非常に有用であると考えられるが、乱反射率は音波の入射条件によって変化するものであり、入射条件に応じた測定法を定める必要がある。特に、室内の平行壁間で生じるフラッターエコー等の音響障害の評価・抑制には垂直入射値が有用であり、その測定法も望まれている。Rindel *et al.*により垂直入射乱反射率を求める現場測定法[33]が提案されたが、平行壁面間の平行度や試料端部回折による影響

が大きく[34]、まだ試行段階にあると言える。

一方、指向相関法[5]では反射指向特性を求める必要があり、多点計測が必要となるため実測への適用は簡単ではないが、定式化は明解であり、数値解析では取り扱いやすい。また、ある方向からの入射波に対して乱反射率を算出するため、残響室法では得られない入射角に依存する値が求められる。近年、小坂ら[35, 36]、佐久間ら[37]により境界要素法を用いた数値解析手法が構築されたが、実測例が少ないことから測定結果との対応関係が不十分であり、より詳細な検討が要する。

## 1.2 既往関連研究

音響拡散体に関する研究は、まずエコー防止を目的とした石井の実験が挙げられる。当時アメリカの放送や録音スタジオで広く用いられていたポリシリンダー型拡散体 (poly-cylindrical diffuser) [38]が国内でも多用にされた時代であり、その設計指針が牧田ら[39]によって示された。一方、注目すべき大きな出来事は、M. R. Schröder により境界面上の音響インピーダンスを不連続にすることで、拡散反射を生じさせる拡散体の提案である[40, 41]。この後、Schröder 拡散体については解析例が多くみられ、その拡散体を基礎に更なる改良が継続した。拡散体の設計には、当初 M 系列を用いたが、平方剰余系列を用いることでさらなる高性能化を目指しており、さらに、Angus [42, 43]は、MPRG (Modulated Phase Reflection Gratings) と呼ばれる手法を開発し、短い周期でより広がりのある散乱特性が得られた拡散体を提案した。現在では、融合的な音場制御材として、拡散と吸音を交えた開発[44, 45, 46]が進められている。

1980年代以降、コンピュータ性能の向上に従い、音波散乱現象を数値的に求めることが可能となったことで、拡散体の音響拡散性能を表す評価指標が考案された。それらの指標は大別して2つの視点が基礎となる。1つは全方向に対して反射波がどれだけ均一に散乱したかという散乱指向特性の均一性の程度であり、もう1つは鏡面反射以外にどれだけ反射波が散乱したかという散乱エネルギーの割合である。

前者に関する研究としては、Rayleigh [47]による1次元周期正弦波形状の理論を基に、藤原ら[48]によって音波散乱特性の解析が行われ、拡散体の音波散乱効果を測る指標として拡散度  $D$  が提案された。高橋[49]は DNSD (Doubly Normalized Standard Deviation) という指標を用いた検討を行い、垂直入射条件について最適拡散体を提案した。横田[50]は CV という指標により、様々な拡散体の音波散乱性能を詳細に検討した。 $D$  及び DNSD は周期構造壁面の離散的な指向特性を前提とした指標であり、CV は変動係数を直接指標としたものである[84]。さらに、自由音場中の試料による散乱指向特性の均一性を表す指標として指向拡散度 (diffusion coefficient) が提案された。D'Antonio *et al.* [51]、Lam *et al.* [52]、Hargreaves *et al.* [7]により検討され、2012年

には ISO 17497-2 [53]にてその測定法が規格化されている。これらの指標は音波散乱に関する有用な情報であるが、幾何音響的手法における境界条件としては扱いつらく、適用が困難であるという問題点がある。

後者に関する研究としては、Vorländer *et al.* [4]、Mommertz [5]により乱反射率 (scattering coefficient) が定義され、自由音場と残響室を想定して測定法が提案されている。試行段階に止まっている自由音場法に対して、残響室法は ISO 17497-1 [6]にて規格化されるまで至っているが、まだ測定における不明な点が多く[12, 28]、現在までに詳細な検討が行われている。

残響室法によるランダム入射乱反射率の測定に関する研究としては、Vorländer *et al.* [4]は試料回転による測定法を提案し、縮尺模型実験を通してインパルス応答の同期加算回数等に関する基礎的検討を行い、測定法としての有効性を検証した。Gomes *et al.* [54, 55]は試料中に含まれる凹凸数の影響や円形試料だけでなく正方形試料への適用を検討し、試料の適用範囲を広げる成果を得た。Embrechts *et al.* [31]は基準円盤の乱反射率の抑制について検討を行い、地面と基準円盤間をコンクリートブロックで囲むことで、ターンテーブルからのノイズや回転下部の非対称性を抑制する効果があることを示した。Geetere *et al.* [32]は試料回転方法、測定待機時間、時変性等に起因する測定誤差要因を明確にした。また、Vorländer を中心とした以上のグループは測定結果の比較検討を行い、縮尺、試料適用条件、測定を行うに当たっての誤差要因等に関する様々な知見を得た[28]。さらに、Choi *et al.* [30, 56]は縮尺模型実験により、基準円盤の寸法、試料と地盤との空気層、試料の吸音条件による乱反射率の挙動を把握した。

しかし、以上の成果は確立しつつあるものの、試料端部による散乱や配置等の試料適用条件、また信号種類、同期加算方法、試料回転速度等のインパルス応答の測定条件については、まだ課題として残されている。

一方、残響室法では、室内音場の拡散性の向上に有用なランダム入射乱反射率が求められるが、建築空間において頻繁に用いられているリブ構造等の拡散体は入射角依存性が非常に強く、室内音響特性に及ぼす影響も大きいことから、入射角依存性を考慮した測定法が望まれている。

垂直入射乱反射率に関する研究としては、Rindel *et al.* [33]は垂直入射条件において基準平板と試料の残響時間を計測し、その差から垂直入射乱反射率を求める現場測定法を提案した。Schmich *et al.* [34]は、数値解析及び測定を通してその手法の妥当性を検討したが、平行壁面間の平行度によるところが大きく、まだ試行段階にある。

乱反射率の数値解析に関しては、Gomes *et al.* [55]による 2 次元境界要素法や Embrechts *et al.* [57]による Kirchhoff 近似を用いた解析が行われているが、実用的な予測手法として用いるためには課題も多い。また、小坂ら[35, 36]は Mommertz による乱反射率の定式化[5]に基づき、3 次元境界要素法を用いた数値予測法を構築したが、解

析対象の制限がある他、測定結果との詳細な比較検討も必要である。

壁面の乱反射率特性の定量化に関する研究は、殆ど残響室測定法に基づいて行われている。Jeon *et al.* [58]、Lee *et al.* [59]は半球やキューブを配列した壁面を対象とした縮尺模型測定を通し、試料の高さや被覆率による乱反射率特性を把握して最適拡散体を提案した。Lin *et al.* [60]は溝形状、溝深さ、挿入角度を変化させたバッフル付き壁面を対象とした実物大測定を行ったが、試料回転速度の設定条件により高音域における乱反射率が過大評価されている。Kim *et al.* [61]は、高さや被覆率を変化させた1次元、2次元、3次元周期構造壁面を対象とした縮尺模型測定を行い、高さや被覆率の変化によるランダム入射乱反射率特性をより詳細に検討した。

また、幾何音響解析における拡散音の取り扱いに関する研究としては、Heinz [62]は音線法による後期残響音のシミュレーションにおいて、鏡面反射と拡散反射をモンテカルロ法により確率的に適用し、壁面の拡散性を考慮している。藤原ら[63]は1次元周期構造の反射特性の解析結果をモンテカルロ法に基づいて適用し、その有効性を検証している。中川ら[64]は Fraunhoferの光回折理論から導かれた剛平板の音圧反射率を実効的な幾何反射係数として壁面拡散を扱っており、従来の音線法よりも精度よく測定値との良い対応を確認している。太刀岡ら[20, 21]は壁面周辺部による回折を考慮した等価乱反射率を幾何音響解析に導入することにより、吸音面が偏在する直方体室の残響時間予測がある程度可能であることを示している。杉原ら[22]は乱反射率の入射角依存性を反映させることにより予測精度の向上を目指している。波動音響解析による斜入射乱反射率を幾何音響シミュレーションに導入し、斜入射乱反射率の方向平均化による室内音響指標の計算値の誤差を把握している。

壁面拡散を考慮した非拡散音場の残響理論に関する研究としては、佐久間[24]が鏡像法による平田[65, 66]の残響理論に基づき、乱反射率を導入した矩形室内非拡散音場の残響理論を提案している。その理論について、安田ら[67]は吸音面の偏在した矩形室の数値解析、土屋ら[25, 68, 69]、楠井ら[26, 70]はそれぞれ壁面拡散を伴う平行壁面間の実測、波動音響解析、また、江田ら[71, 72]は矩形室の波動音響解析、幾何音響解析を行い、理論との対応関係及び拡散体が残響時間に及ぼす影響を検討している。羽入ら[74, 75]は室内の等価散乱面積と平均乱反射率を利用した拡散理論を提案し、空間全体の鏡面反射音と拡散音の比率の時間変化が予測できることを示している。

### 1.3 研究の目的

以上のような研究背景、既往関連研究の動向を踏まえ、本研究の目的を以下のように設定する。

- 壁面音響乱反射率の汎用的な定量化手法を構築・整備すること
- 実験室測定と数値解析を通して乱反射率の挙動を把握し、測定条件、測定における誤差要因等に関する知見を得ると共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を把握すること

なお、本研究では、拡散体として基本的な形状である 1 次元周期構造を主に対象とする。壁面音響乱反射率の定量化手法が整備されることで、将来的には、各種壁面の乱反射率データベースが構築され、それを基礎データとした幾何音響シミュレーションの精度向上や室内音響設計・拡散体設計における指針の確立が期待される。

## 1.4 論文の構成

本論文の構成を Fig. 1.6 に示す。

第 1 章では、研究の背景及び既往関連研究の概観を行った上で、本研究の目的について述べる。また、本論文の構成について示す。

第 2 章では、ランダム入射乱反射率の測定法を構築する。はじめにランダム入射乱反射率の測定原理について述べ、これに基づく ISO 17497-1 の測定方法及び留意点について具体的に述べる。次に、模型残響室における縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行い、他機関の測定結果との比較により本測定システムの妥当性を検証する。その後、縮尺模型残響室を用いた測定を通して、試料の端部処理や配置等の試料適用条件に関する検討を行う。試料端部からの散乱を制御する方法を提示すると共に、適切な設定条件を導く。最後に、インパルス応答の同期加算方法に関する理論的な考察を行った上で、インパルス応答測定における同期加算回数や試料回転速度等が乱反射率に及ぼす影響を縮尺及び実大測定を通して検討する。

第 3 章では、前章で構築したランダム入射乱反射率の測定システムを用いて各種壁面拡散体の乱反射率特性を把握する。一般的な拡散壁であるリブ・ブロック構造を対象とし、縮尺模型測定によるケーススタディを通して表面形状に起因する乱反射率の特徴を明らかにする。具体的には、リブ構造壁面に関しては角柱高さ、角柱配置、背後空気層、角柱形状、吸音仕上げによる影響を検討する。また、ブロック構造壁面に関しては被覆率や配置が乱反射率特性に及ぼす影響を調べる。

第 4 章では、残響室法とは全く異なる原理の垂直入射乱反射率の測定法を構築する。まず、新たに提案する垂直入射乱反射率の測定理論について述べる。その後、矩形室を用いた模型測定により実現し、本測定法の有用性を検討する。具体的には、異なる試料の設置方向や形状等による影響を検討し、試料適用条件や測定における誤差要因等、測定法の適用条件を整備する。最後にその応用として、縮尺模型測定を通して 2

次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較により測定法の適用可能性に関する知見を得る。

第5章では、波動音響解析により乱反射率を予測し、測定結果との比較検証を行うことで測定・数値予測の両面で乱反射率の定量化手法を整備する。具体的には、典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁面を対象として取り上げ、その凹凸形状、高さ、幅が乱反射率に及ぼす影響を数値解析により検討し、測定法の汎用性及び適用性の向上を図ると共に、その応用として音響設計上有効な拡散体設計を試みる。

第6章は総括であり、本論文の成果と共に今後の展望及び課題について述べる。

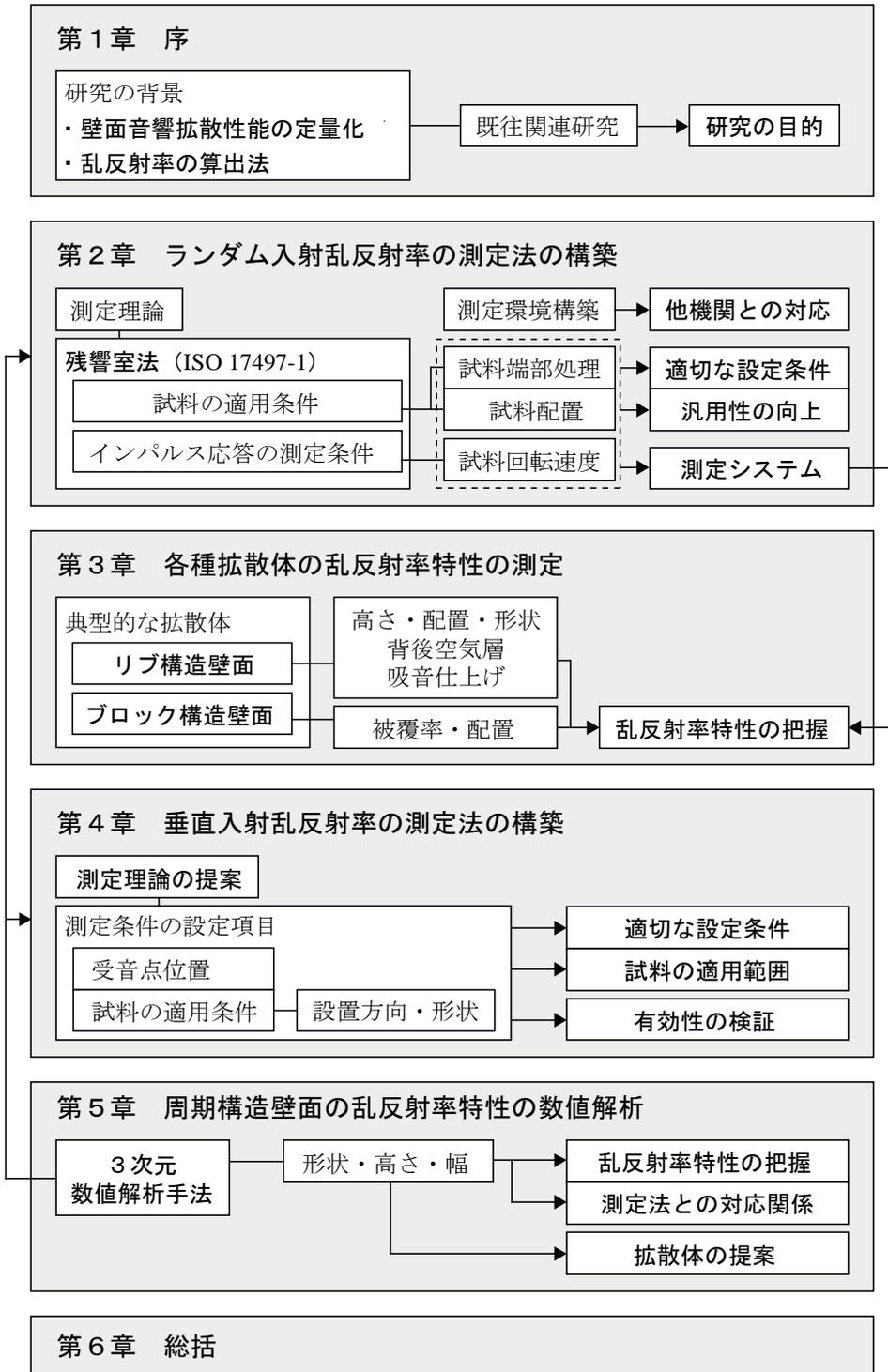


Fig. 1.6: Flow chart of this thesis.

## 第2章

# ランダム入射乱反射率の測定法の構築

### 2.1 はじめに

本章では、ランダム入射乱反射率の残響室法測定について、ISO 17497-1 [6]で明確にされていない試料の適用条件や測定における誤差要因等、測定条件に関する知見を得ることを目的とする。はじめに残響室法の測定原理について述べ、これに基づくISOの測定方法及び留意点について具体的に述べる。次に、模型残響室を用いた縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行い、他機関の測定結果との比較により本測定システムの妥当性を検証する。その後、縮尺模型残響室を用いた測定を通して、試料の端部処理や配置等の試料適用条件に関する検討を行う。試料端部からの散乱を制御する方法を提示すると共に、適切な設定条件を導く。最後に、インパルス応答の同期加算方法に関する理論的な考察を行った上で、インパルス応答測定における同期加算回数や試料回転速度等が乱反射率に及ぼす影響を縮尺及び実大測定を通して検討する。

### 2.2 測定原理

乱反射率は Fig. 1.3 に示すように、壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの割合として定義され、全反射エネルギー  $E_{\text{total}}$  と鏡面反射エネルギー  $E_{\text{spec}}$  は、それぞれ次式で表される。

Table 2.1: The Measurement conditions for the four different reverberation times.

Reverberation time	Test sample	Turntable
$T_1$	not present	not rotating
$T_2$	present	not rotating
$T_3$	not present	rotating
$T_4$	present	rotating

$$E_{\text{total}} = 1 - \alpha_s \quad (2.1)$$

$$E_{\text{spec}} = (1 - \alpha_s)(1 - s) = 1 - \alpha_{\text{spec}} \quad (2.2)$$

上式を Eq. (1.1) に代入すると以下の式が得られる。

$$s_r = 1 - \frac{1 - \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (2.3)$$

但し、 $\alpha_s$  : 試料表面の吸音率、 $\alpha_{\text{spec}}$  : 鏡面反射成分のみを反射エネルギーと見なした場合の吸音率 (specular absorption coefficient) である。完全鏡面反射では  $s_r = 0$  となるが、鏡面反射成分さえ存在しなければ  $s_r = 1$  となるので、必ずしも完全拡散反射を指すことにはならない。

上記 2 種類のランダム入射吸音率は試料静止状態と回転状態の残響室吸音率の測定 (ISO 354 [76]) を通して求められる。

$$\alpha_s = 24 \ln 10 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2 - c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (2.4)$$

$$\alpha_{\text{spec}} = 24 \ln 10 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4 - c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (2.5)$$

但し、 $V$ ,  $S$  は室容積と試料面積であり、 $T_i$ ,  $c_i$ ,  $m_i$  は各  $i$  条件における残響時間、音速、空気吸収係数である (Table 2.1)。

ISO 17497-1 の乱反射率の測定原理は、円形試料を回転させたとき、鏡面反射成分は干渉性が完全に保たれるが、散乱成分は非干渉性となるという仮定に基づいている。円形試料を回転させながら多数のインパルス応答を測定し、それらを同期加算することにより鏡面反射成分のみを抽出する。Fig. 2.1 に示すように、試料回転状態では散乱成分がインパルス応答の同期加算により相殺され、静止状態に比べて残響時間が短くなる ( $T_4 \leq T_2$ )。すなわち、見かけ上で鏡面反射成分以外は試料により吸音された

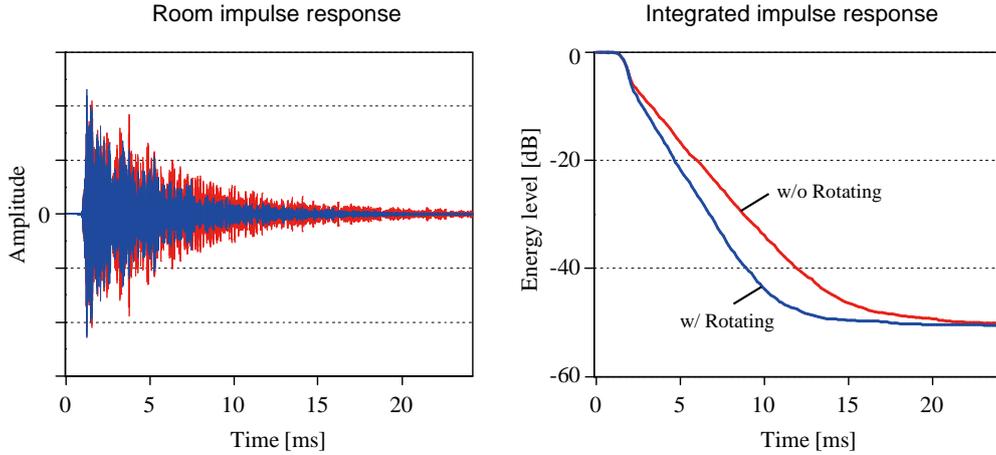


Fig. 2.1: Examples of room impulse responses and integrated impulse responses with/without rotating the test sample.

ことになり、静止状態で得られる  $\alpha_s$  よりも大きい  $\alpha_{\text{spec}}$  が得られる。試料なしの条件においては、 $T_3 \approx T_1$ 。最終的にこれらの値を Eq. (2.3) に代入することにより、ランダム入射乱反射率が直接求められる。

残響時間  $T_4$  の同定による乱反射率の測定誤差に関しては、Eq. (2.1), (2.3) により以下の式が得られる。

$$\Delta s = \frac{\Delta \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_s} \approx \frac{\Delta T_4}{T_4} \frac{\alpha_{\text{spec}} + A_1 / S}{1 - \alpha_s} \quad (2.6)$$

但し、 $A_1$  は空気吸収を含んだ部屋の等価吸音面積である。ISO 規定の試料吸音率の上限值は  $\alpha_s \leq 0.5$  であることから、乱反射率の絶対誤差は以下の範囲になる。

$$\frac{A_1}{S} \frac{|\Delta T_4|}{T_4} \leq |\Delta s| \leq 2 \left( 1 + \frac{A_1}{S} \right) \frac{|\Delta T_4|}{T_4} \quad (2.7)$$

室条件  $A_1/S = 1$  において  $T_4$  が 5 % の相対誤差を含む場合、乱反射率の絶対誤差は、最大 ( $s = 0.5$ ,  $\alpha_s = 1$ ) で理論的に 0.2 に達する。

## 2.3 ISO 17497-1の測定方法及び留意点

ISO 17497-1 [6]は、壁及び天井に設置される凹凸面のランダム入射乱反射率の測定法として、2004年に規定されたものである。得られた結果は、音響拡散特性の相互比較の目的や室内音響及び騒音制御に関する設計のための計算に利用される。

Table 2.2: Maximum scattering coefficients for the base plate alone.

Frequency( $f/N$ ), Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$s_{\text{base}}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10
Frequency( $f/N$ ), Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$s_{\text{base}}$	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.25

### 2.3.1 残響室及び測定条件

#### 残響室

室容積  $V$  は  $200 \text{ m}^3$  以上に推奨されているが、 $500 \text{ m}^3$  以上になると空気吸収の影響を受けることに注意が必要である。等価吸音面積は空気吸収を含め  $0.3V^{2/3} \text{ m}^2$  以下にする。温度・湿度を可能な限り一定に保ち、回転拡散板等を用いてはならない。

#### ターンテーブルと台盤

剛な円形平板をターンテーブル上に固定し、試料を乗せる台盤とする。台盤寸法は試料寸法以上とし、台盤は壁から  $1 \text{ m}$  以上離す。台盤自体の乱反射率は最大許可値以下 (Table 2.2) であり、台盤単体の乱反射率は次式より算出される。

$$s_{\text{base}} = \frac{55.3V}{S} \left( \frac{1}{c_3 T_3 - c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (2.8)$$

#### 試料

試料は直径  $3 \text{ m}$  以上の円形であること。しかし、1次元周期構造の場合には、試料端部の凹凸により乱反射率が過大評価される可能性があり、抑制する必要がある。また、正方形試料を用いる場合は一辺  $2.65 \text{ m}$  以上とし、台盤に試料を埋め込むこと。試料の凹凸深さは台盤直径の  $1/16$  以下、吸音率は  $0.5$  以下にする。

### 2.3.2 測定手順

#### 測定信号

音源信号は SS (Swept Sine) 信号や M 系列 (Maximum Length Sequence) 信号等の擬似ランダムノイズが推奨されているが、音源の種類の違いによる影響については明確にされていない。音源点は少なくとも  $2$  カ所を設け、音源間の距離は  $3 \text{ m}$  以上にする。

## インパルス応答の測定

測定は ISO 354 [76] に準じるものとし、試料の有無と回転の有無の組合せによる 4 条件 (Table 2.1) で行う。インパルス応答の同期加算方法に関しては、各々の回転角度で停止して静止状態で測定する方法 (Step 法) と連続的に試料を回転しながら行う方法 (連続法) があるが、その対応関係は明らかにはされていない。Step 法の場合は、60~120 方向 (6~3 度毎) の同期加算が必要であり、同期加算回数 72 回、5 度毎を推奨している。連続法の場合は、実物実験において総測定時間 60 秒 (信号長 5 秒、同期加算回数 12 回) という測定例は提示されているが、試料回転速度の制限は不明確である。

なお、測定は退室閉扉後 15 分以上経過した後に開始する。また、受音点は少なくとも 3 カ所を設け、試料から少なくとも 1 m 以上、室の表面と拡散板から 1 m 以上、いずれの音源からも 2 m 以上離れた位置に設置すること。測定は少なくとも 6 系統で行うこと。

## 残響時間の読み取り

逆二乗積分法 (-30 dB から積分) により 1/3 oct. band 毎 (100~5000 Hz) の残響曲線を求め、最小二乗近似より残響時間  $T_{15}$  (読み取り範囲: -5~-20 dB) を算出する。読み取り範囲の下端は、暗騒音レベルより 10 dB 高くなるようにすること。

## 2.4 測定環境に関する基礎的検討

本節では、ISO 17497-1 に準じて乱反射率測定システムの設定を行うにあたり、縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行う。また、他機関[4, 58]の測定結果との比較を通して本測定システムを検証し、乱反射率の測定環境を構築する。

### 2.4.1 測定概要

#### 残響室

アクリル板 (10 mm 厚) を用いて製作した 1/4 縮尺模型残響室を Fig. 2.2 に示す。容積 1.62 m<sup>3</sup> の直方体室であり、詳細は Table 2.3、Fig. 2.3 に示す。本残響室は地下室に位置することから外部からの影響は受けにくく、温度・湿度の変化は非常に小さいと言える。また、室内の拡散性を高めるため、曲面状のプラスチック製拡散板 10 枚を吊り下げて設置した。拡散板は固定されており、寸法は 200×400×1 mm である。

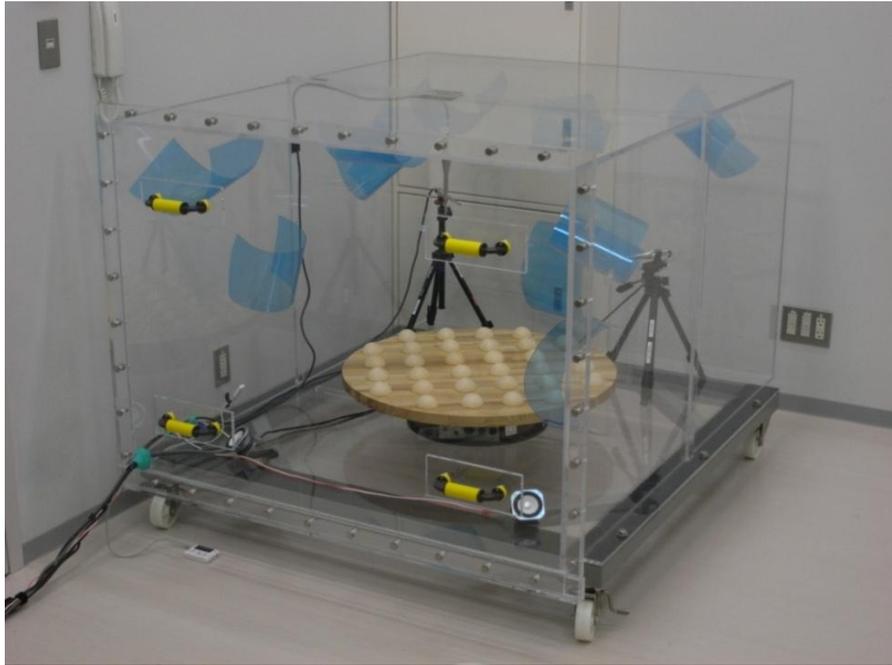


Fig 2.2: 1/4 scaled reverberation room.

Table 2.3: Specifications of the reverberation room.

Parameter	Detailed contents
$W \times L \times H$ [mm]	1,200 × 1,500 × 900
Thickness [mm]	10
Volume [m <sup>3</sup> ]	1.62
Total surface area [m <sup>2</sup> ]	8.46
Material	Acrylic

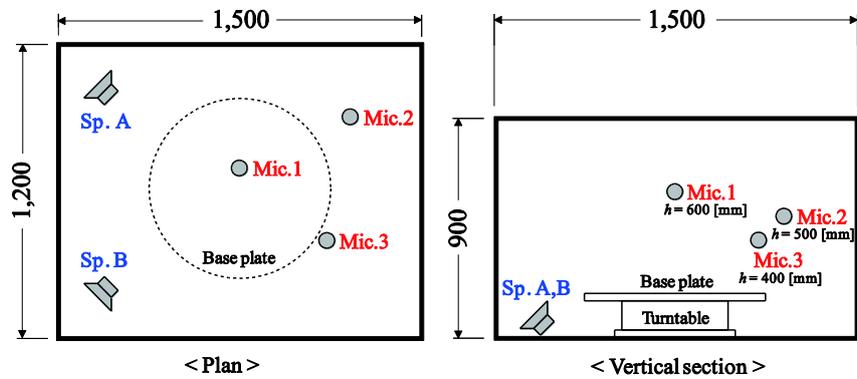


Fig. 2.3: The location of loud speakers and microphones in the reverberation room.



Fig. 2.4: The turntable (left) with fixed revolution speed and the test sample (right) setting on the turntable.

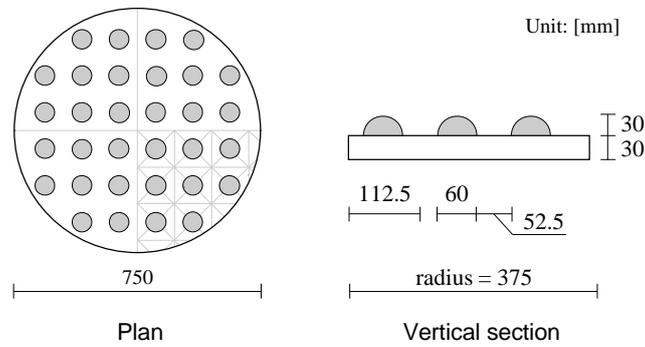


Fig. 2.5: Specifications of the test sample with hemispheres on the base plate.

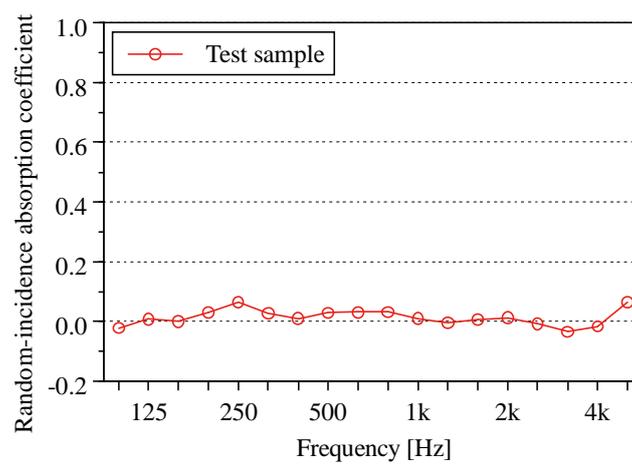


Fig. 2.6: Measured random-incidence absorption coefficients of the hemisphere.

## ターンテーブルと台盤

ターンテーブルは直径 354 mm、高さ 120 mm で、1 回転 80 秒に固定されている (Fig. 2.4)。また、実寸直径 3 m の 1/4 及び 1/5 縮尺で作成した木製円盤 (厚さ 30 mm、カバ集成材のウレタンクリア塗装) をターンテーブル上に取り付けて台盤とした。

## 試料

木製円盤の上面に木製半球 32 個を等間隔 (1/4 縮尺の場合は 52.5 mm) に配置して拡散体試料とした (Fig. 2.4, 2.5)。1/4 及び 1/5 縮尺において半球の寸法と配列は各縮尺で相似則を保ち、直径は各々 60 cm, 48 cm、高さは各々 30 mm, 24 mm である。また、残響室法吸音率の測定により求めた試料の吸音特性 (Fig. 2.6) は、全周波数帯域で 0.1 以下の非常に高い反射性であり、ISO の上限値 0.5 以下を満たす。その他、ISO 規定との比較表を Table 2.4 に示す。1/5 縮尺の場合は ISO に準じた設定になっているのに対し、1/4 縮尺の場合は室容積及び壁からの距離が基準外となる。

Table 2.4: Comparison with 1/4 & 1/5 scaled measurement set-up and the ISO 17497-1. () are the values of ISO standard in the cases of  $N = 4$  and 5.

Physical scale ratio	1/N (ISO)	1/4	1/5
Frequency, $f$ [Hz]	$N \times 100 \sim N \times 5k$	400 ~ 20k	500 ~ 25k
Volume, $V$ [m <sup>3</sup> ]	$V \geq 200 \text{ m}^3 \times N^{-3}$	1.62 (< 3.13)	1.62 (> 1.6)
Diameter of base plate, $d$ [m]	$d \geq 3 \text{ m} \times N^{-1}$	0.75 (= 0.75)	0.60 (= 0.60)
Structural depth of test sample, $h$ [mm]	$h \leq d/16$	30 (< 46.88)	24 (< 37.5)
Minimum distance to the wall, $e$ [m]	$e \geq 1 \text{ m} \times N^{-1}$	225 (< 250)	300 (> 200)
Evaluation range of decay curves	$T_{15}$ -5~-20 dB	$T_{20}$ -5~-25 dB	$T_{20}$ -5~-25 dB

## 測定系統

測定経路は残響室の隅に設置した無指向性のツイータースピーカ 2 箇所、マイクロホン 3 箇所の計 6 通りとし (Fig. 2.7)、擬似ランダム信号である M 系列信号によるインパルス応答測定を行った。インパルス応答測定システム AEIRM [77] を用いて測定したインパルス応答を室内音響指標分析システム AERAP [78] で分析し、残響時間  $T_{20}$  (-5~-25 dB) を同定した。なお、サンプリング周波数は 96 kHz とし、系統図は Fig. 2.7 に示す。

- 音源系：スピーカ (TECHNICS, EAS-7F10)、パワーアンプ (SONY, TA-F222ESJ)、測定用 PC (Dell, Latitude C400)、ドッキングステーション (Dell, C-Dock II)
- 受信系：1/4 インチコンデンサマイクロホン (RION, UC-29)、1/4-1/2 変換アダプタ (RION, UA-12)、1/2 インチコンデンサマイク用プリアンプ (RION, NH-05)、コンデンサマイク用コード (RION, EC-04B)、騒音計用ユニット (RION, UN-01A)、三脚、マイクスタンド

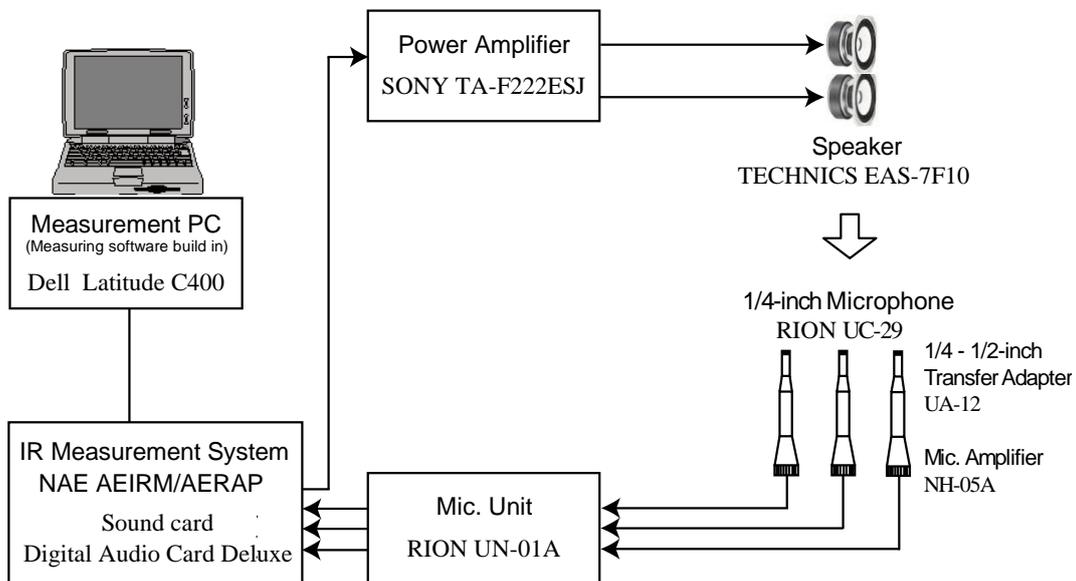


Fig. 2.7: The measurement system block diagram.

## 測定条件

縮尺については、Table 2.4 に示すように、比較検討のため 1/4 及び 1/5 の 2 条件を設定した。試料回転中のインパルス応答測定に関しては、同期加算条件の影響を調べるため、Table 2.5 に示す 6 条件を設定した。ここでは M 系列の信号長（測定間隔）を 2 水準とし、試料回転数を 1~4 回としている。但し、ターンテーブルの回転速度は 1 回転 80 秒に固定されている。なお、縮尺及びインパルス応答測定を行う前提として把握しておくべき基準円盤の乱反射率及び試料回転精度（Table 2.6）について検討する。

Table 2.5: Impulse response measurement conditions for various signal periods, signal numbers and revolution numbers.

Signal period [sec]	Angular interval [deg]	Signal number	Revolution number
0.68	3.07	117	Approx. 1 (0.998)
		234	Approx. 2 (1.996)
1.37	6.14	59	Approx. 1 (1.007)
		117	Approx. 2 (1.997)
		176	Approx. 3 (3.004)
		234	Approx. 4 (3.994)

Table 2.6: Measurement conditions for various revolution numbers.

Signal period [sec]	Angular interval [deg]	Signal number	Revolution number
0.68	3.07	115	Approx. 1 (0.981)
		116	Approx. 1 (0.990)
		117	Approx. 1 (0.998)
		118	Approx. 1 (1.007)
		119	Approx. 1 (1.015)
		120	Approx. 1 (1.024)

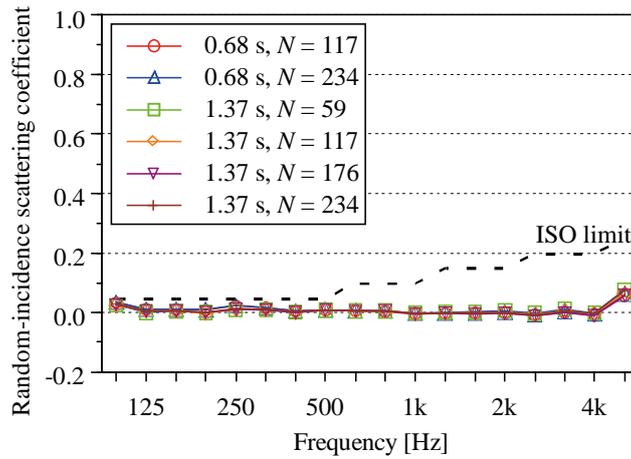


Fig. 2.8: Random-incidence scattering coefficients of the base plate, measured with changing signal lengths and numbers.

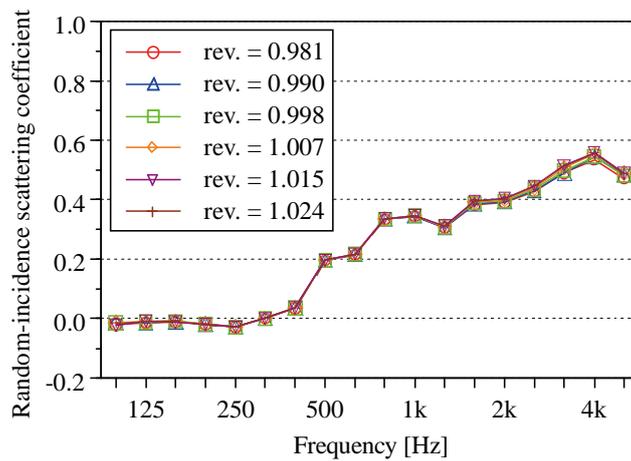


Fig. 2.9: Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing revolution numbers.

## 2.4.2 結果と考察

### 基準円盤の乱反射率及び試料回転における測定精度

1/4 縮尺において、Table 2.5 条件により測定した基準円盤の乱反射率を Fig. 2.8 に示す（周波数は実物換算）。測定値は全周波数帯域で 0.1 以下であり、ISO 上限値以下になることが確認された。1/4 縮尺・信号長 0.68 秒において、Table 2.6 の通り同期加算回数を 1 回転付近で変化させた場合の試料の乱反射率を Fig. 2.9 に示す。1 回転に対して約  $\pm 6$  度の範囲では乱反射率に影響は現れないことが分かった。

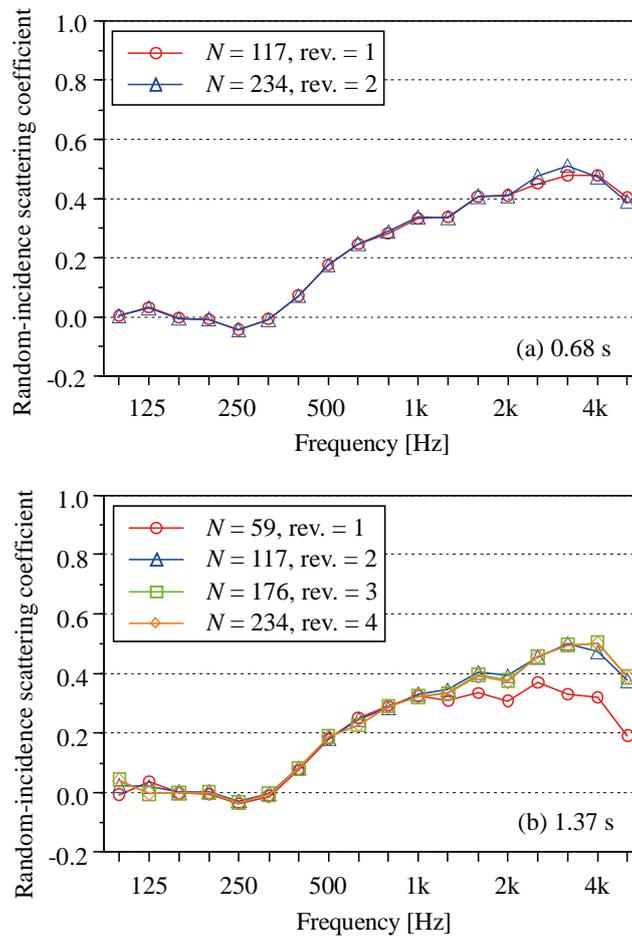


Fig. 2.10: Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing signal numbers on the fixed signal lengths.

#### 同期加算回数による影響

1/4 縮尺・信号長固定において、同期加算回数を変化させた場合 (Table 2.5) の乱反射率の測定結果を Fig. 2.10 に示す。信号長 0.68 秒においては、全周波数帯域で非常に良い対応を見せる。信号長 1.365 秒においては、2 回転以上 (同期加算回数 117, 176, 234 回) の場合ではほぼ一致する値を示したが、1 回転 (同期加算回数 59 回) では中音域まで一致するものの高音域で値が小さくなっている。SN 比の影響も考えられるが、信号長に対応する角度が ISO の規定する回転角度の離散化幅 3~6 度を若干上回っていることが影響した可能性がある。

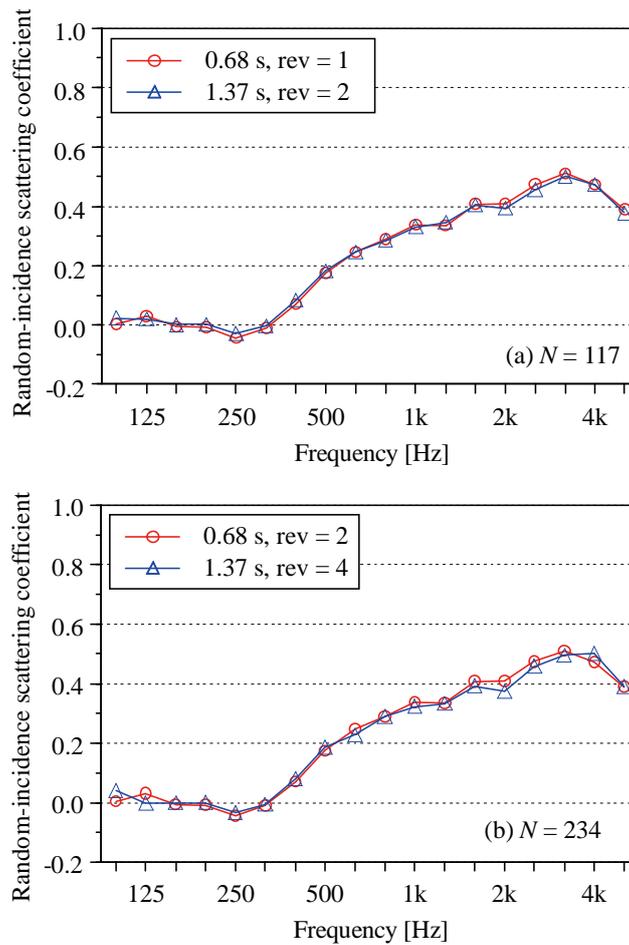


Fig. 2.11: Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing signal lengths, on the fixed signal numbers.

### 信号長による影響

1/4 縮尺・同期加算回数固定において、信号長を変化させた場合 (Table 2.5) の乱反射率測定結果を Fig. 2.11 に示す。同期加算回数 117 回においては、両者の値はほぼ一致し、1 回転の場合でも測定間隔が回転角度の離散化幅の範囲内であれば影響はないものと考えられる。特に信号長が 0.68 秒の場合は低音域で残響時間が短い、その影響もみられない。また、同期加算回数 234 回においても、同様の結果になることが確認された。

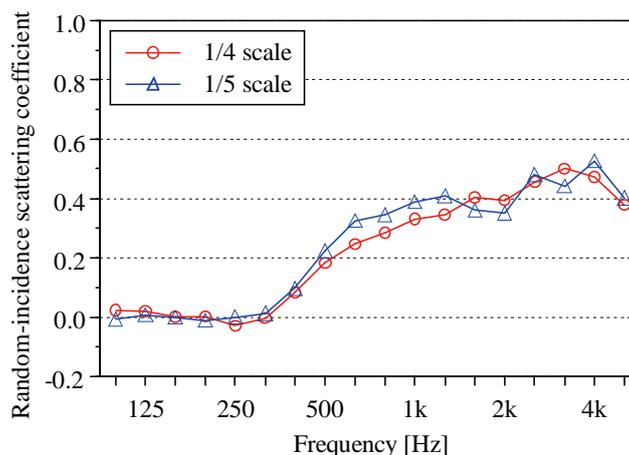


Fig. 2.12: Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing scales.

### 縮尺による影響

Table 2.5 の信号長 1.37 秒・同期加算回数 117 回における 1/4 縮尺及び 1/5 縮尺の乱反射率測定結果を Fig. 2.12 に示す。中音域で若干の乖離は生じているものの、全体的に両者は概ね良い対応を見せている。乖離の原因としては、室内音場の拡散性、壁面吸音や空気吸収の周波数特性等が考えられる。なお、今回の模型残響室では、1/4 縮尺と 1/5 縮尺の実物換算で、室容積は  $103.6 \text{ m}^3$ 、 $202.5 \text{ m}^3$  であり、壁から台盤までの距離は 0.9 m と 1.5 m に相当し、1/4 縮尺ではいずれも ISO の規格外となる (Table 2.6)。但し、空気吸収による高音域での測定精度の劣化は 1/4 縮尺の方が小さい。

### 2.4.3 他機関との比較

1/4 縮尺、信号長 1.37 秒、同期加算回数 117 回の測定条件 (Table 2.7) において、測定された半球のランダム入射乱反射率の測定結果を他機関の結果を併せて Fig. 2.13 に示す。平均乱反射率の計算では、実物換算 500~4k Hz (1/3 oct. band) の各帯域内で算術平均して求めた。

全体的に密度が 50 % まで増加するに従い、乱反射率値は高くなる傾向にある。本測定システムで用いた半球の高さは他機関に比べやや高いものの、密度 20.48 % における測定値は、他機関の結果と同程度の値を示し、よく対応していると言える。

以上の結果を踏まえ、以後では 1/4 縮尺で検討を行うこととする。

Table 2.7: Comparison with the measurement setups of other institutions measured in different scales (test sample: hemispheres).

Institution	Physical scale ratio	Structural depth [mm]
A [58], Republic of Korea	1/10	100/10
B [4], Germany	1/5	100/5
This system, Japan	1/4	120/4
	1/5	120/5

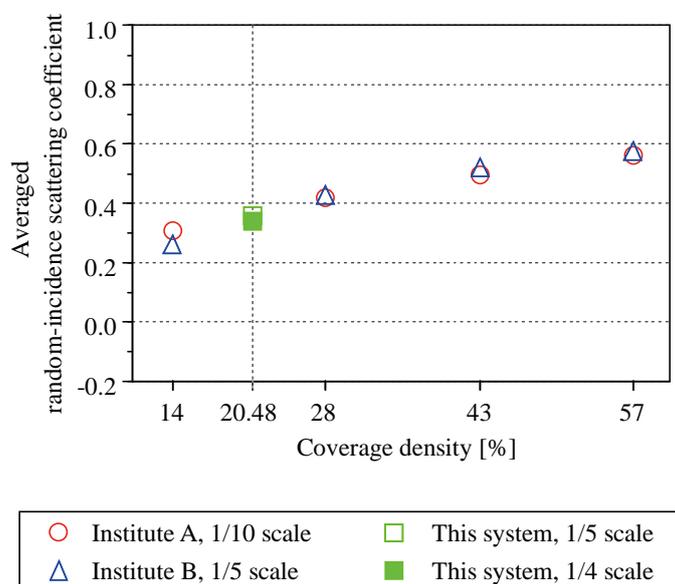


Fig. 2.13: Random-incidence scattering coefficients of the hemisphere, measured with changing scales, as shown in Table 2.7.

## 2.5 試料の適用条件に関する検討

ISO 17497-1 の残響室法について、前節では他機関の測定結果との比較を通して本測定システムの測定精度を検証した。しかし、乱反射率の測定法として確立するためには、測定試料の適用条件についての知見を得る必要がある。そこで本節では、1/4 縮

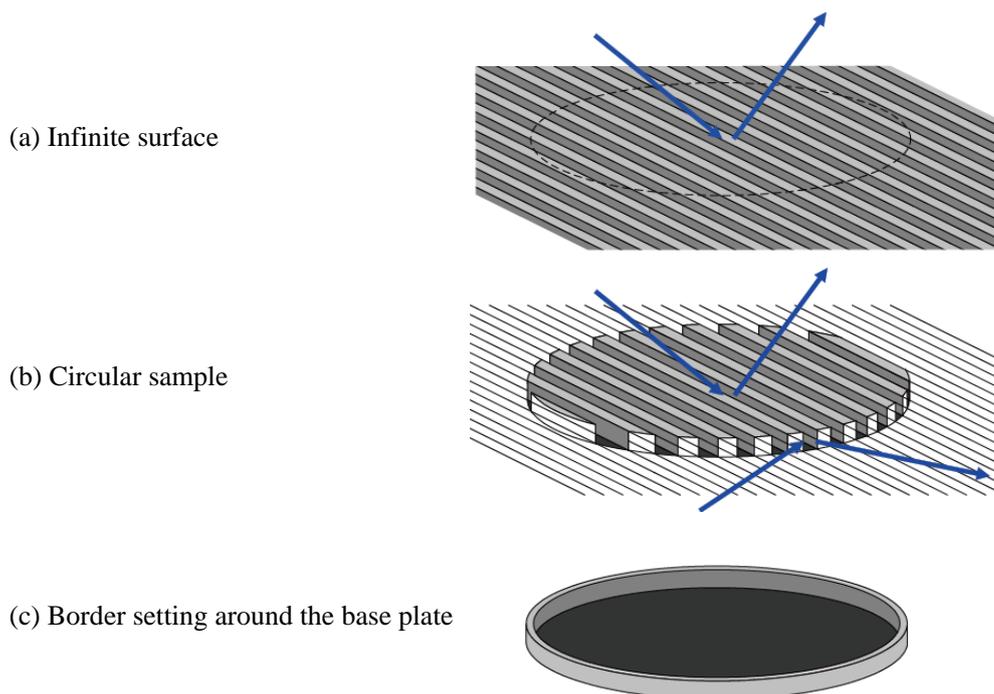


Fig. 2.14: Illustration of the way to suppress the edge scattering from the uneven perimeter of a test sample.

尺模型残響室を用いたケーススタディを通して、それらの設定条件が結果に及ぼす影響について議論し、適切な設定条件を導くと共に、まだ明確にされていない測定条件等に関する知見を得ることを目的とする。

### 2.5.1 試料端部処理について

乱反射率の測定では、有限寸法の試料を用いることで試料端部からの影響が含まれているにも関わらず、現在まではその影響程度について明らかにされていない。特に、建築・都市空間において頻繁に用いられている1次元周期構造壁を円形で切り取った場合は、試料端部の凹凸により乱反射率の測定値が過大評価される可能性が考えられる (Fig. 2.14)。そこで本節では、矩形波型の1次元周期構造壁を対象とした乱反射率測定を通して、試料端部による乱反射率の挙動を把握すると共に、その影響を防ぐ方法を提示する。また、その結果を数値解析の計算値と比較しながら、設定条件の妥当性を検討する。



(a)  $t = 1$  mm, Plastic

(b)  $t = 25$  mm, Wood

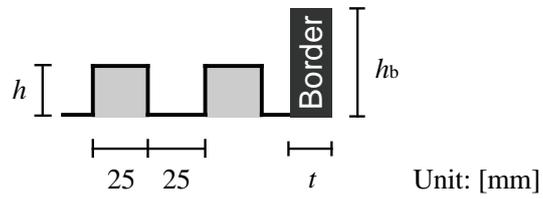


Fig. 2.15: Test samples of 1D rectangular surface with border setting around the base plate.  $t$  and  $h_b$  are thickness and height of the border, respectively.

Table 2.8: Measurement conditions for various border heights (Unit: mm).

Structural depth of test sample, $h$	Height of border, $h_b$
10	0
	50
25	0
	25
	50
35	0
	35
	50
45	0
	50

Table 2.9: Measurement conditions for various border thicknesses (Unit: mm).

Height of border, $h_b$	Thickness of border, $t$	Material
50	1	plastic
	25	wood

## 測定概要

測定方法は前節の検討で用いたものと同じとし、M 系列信号長は 1.37 秒、同期加算回数は 117 回で、残響時間は  $T_{20}$  を用いた。測定試料を Fig. 2.15 に示す。リブを配列した 15 周期構造壁面で、材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げである。Table 2.8 に示すように、試料の高さは ISO の試料高さ  $h/16 = 47.5$  mm 以内という規定値に準じて 4 水準と設定した。基準円盤に取り付ける枠の高さのパターンは、枠なし、試料の高さと同じ、ISO 試料高さの規定値の最大に設定して変化させた。枠の厚さについては Table 2.9 のように設定し、それらによる影響も検討する。

## 結果と考察

### ■ 枠の高さによる影響

枠の厚さ 1 mm (Fig. 2.15(a)) における枠の高さを変化させた場合 (Table 2.8) の乱反射率測定結果を Fig. 2.16 に示す。枠ありの場合は、枠なしに比べ乱反射率の値が低下しているものの、試料の高さ以上であれば、枠の高さに依らず全周波数帯域に渡ってほぼ一致した。ISO [6] の試料高さの規定値は  $h/16 = 47.5$  mm であるので、この値程度としておけば、試料高さに依らず、汎用的な設定と言える。よって、枠の高さを 50 mm に設定する。

### ■ 数値解析との対応

基準円盤枠なし・ありによる実測と数値解析 (枠なし) [35] の乱反射率を Fig. 2.16 に示す。 $h = 10$  mm の場合は、枠なし・あり、数値解析共により対応を示している。 $h = 25$  mm の場合では、枠なしの測定値が数値解析と比べて 500 Hz 以上で値が大きくなったが、枠ありの測定値は数値解析に近い値を示した。1 次元周期構造拡散体の基準円盤枠なしの値が枠ありの値より大きくなる理由は、拡散体の表面以外に側方からの音の散乱成分が乱反射率の測定値に含まれるためと考えられる。また、数値解析 (枠なし) と測定値 (枠なし) が乖離するのは、両者で乱反射率の算出法が異なることが考えられる。 $h = 10$  mm の枠なし・ありで乱反射率の差が小さい理由は、基準円盤面と拡散体との高低差 10 mm 程度では側方の散乱の影響が小さいためと考えられる。

### ■ 枠の厚さによる影響

枠の高さ 50 mm において枠の厚さを変化させた場合 (Table 2.9) の結果を Fig. 2.17 に示す。乱反射率値はほぼ一致することから厚さによる影響は少ないことが確認できた。

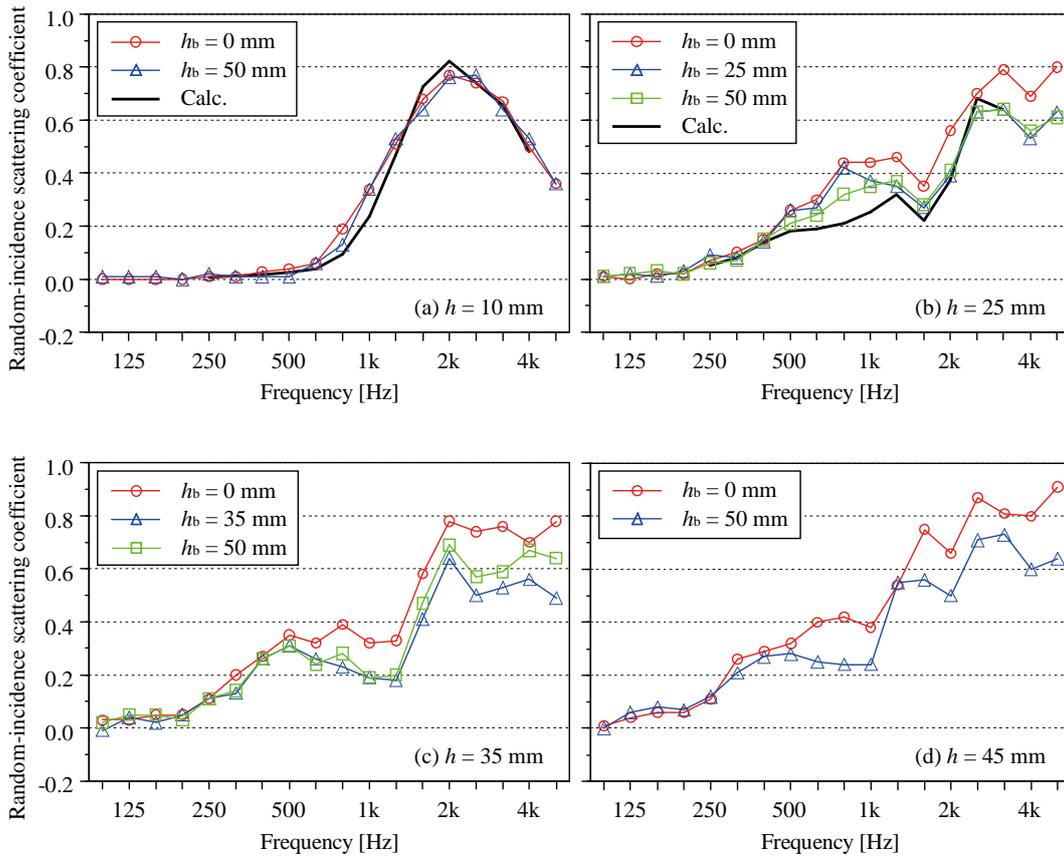


Fig. 2.16: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing border heights on the fixed sample heights (a) 10 mm, (b) 25 mm, (c) 35 mm and (d) 45 mm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

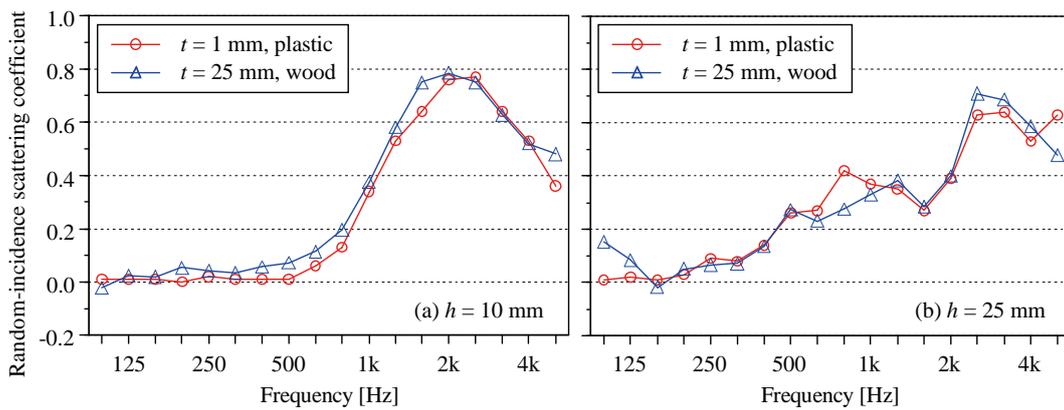


Fig. 2.17: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing border thicknesses and materials on the fixed sample heights (a) 10 cm and (b) 25 cm.

## 2.5.2 試料配置による影響

基準円盤上に設置する試料の配置が乱反射率に及ぼす影響については、まだ明確にされていないのが現状である。本節では、リブ状周期構造壁面を対象として取り上げ、試料の切り出し位置による影響を把握し、試料配置の適用範囲について考察する。

### 測定概要

1/4 縮尺模型残響室において測定を行う。測定方法は前節に示す通りである。測定試料は 25 mm 角（実寸 10 cm 角）のリブを配列した周期構造壁面とし、Table 2.10 及び Fig. 2.18 に示す通りリブの間隔と配置を様々に設定した。試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで、基準円盤に枠（プラスチック製、高さ 25 mm、厚さ 1 m）を取り付けた。なお、M 系列信号長は 1.37 秒、同期加算回数は 59 回、残響時間は  $T_{15}$  を用いた。

Table 2.10: Measurement conditions for various arrangements of the rib structure.

Type	Period of ribs, $L$ [mm]	Number of ribs
$L100$	100	8
$L100'$		7
$L150$	150	5
$L150'$		
$L200$	200	4
$L200'$		
$L200''$		3
$L250$	250	3
$L250'$		
$L500$	500	2
$L500'$		
$Luid$	unidentified	1
$Luid'$		
$Luid''$		
$Luid'''$		

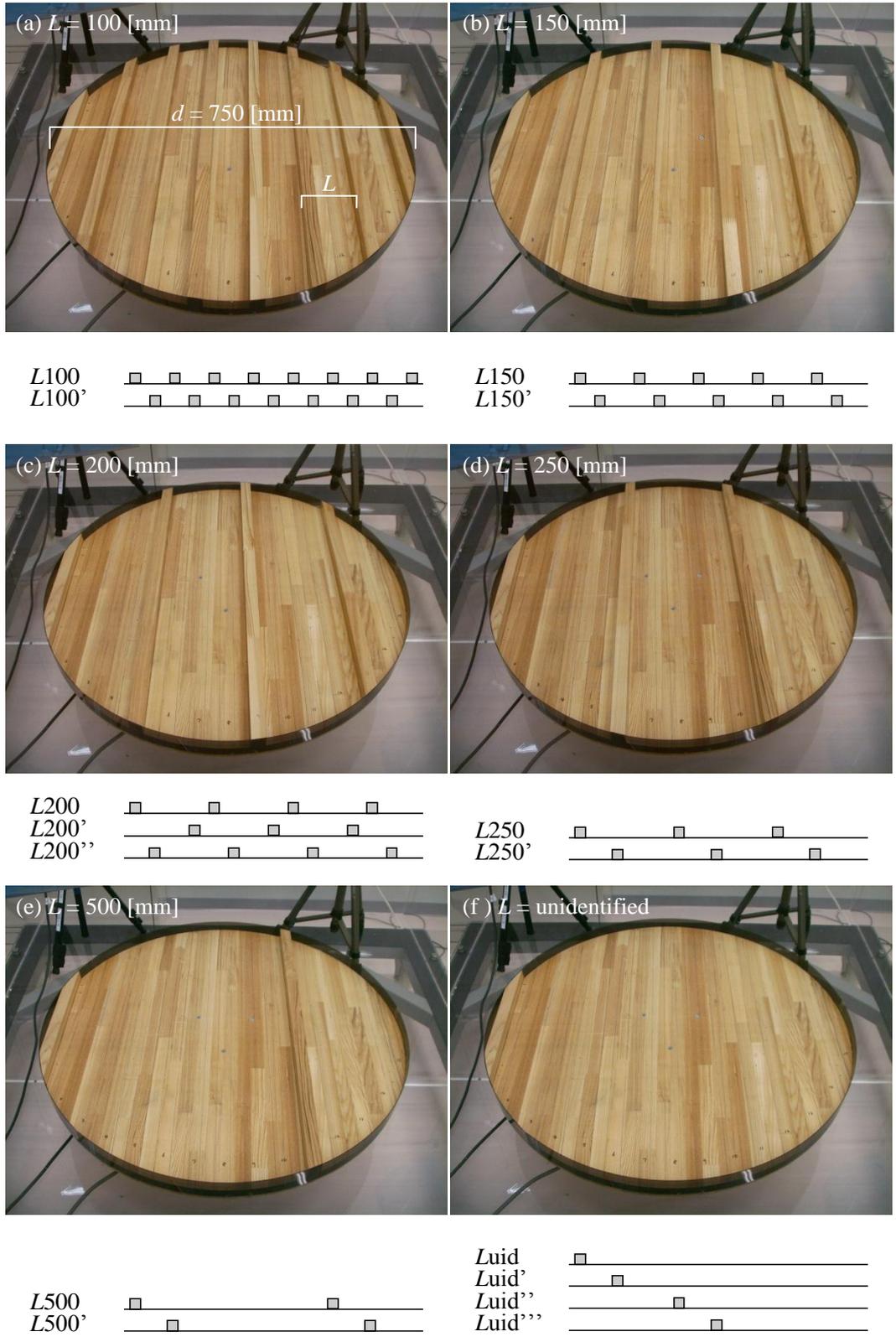


Fig. 2.18: Test samples of the rib structures with various arrangements.

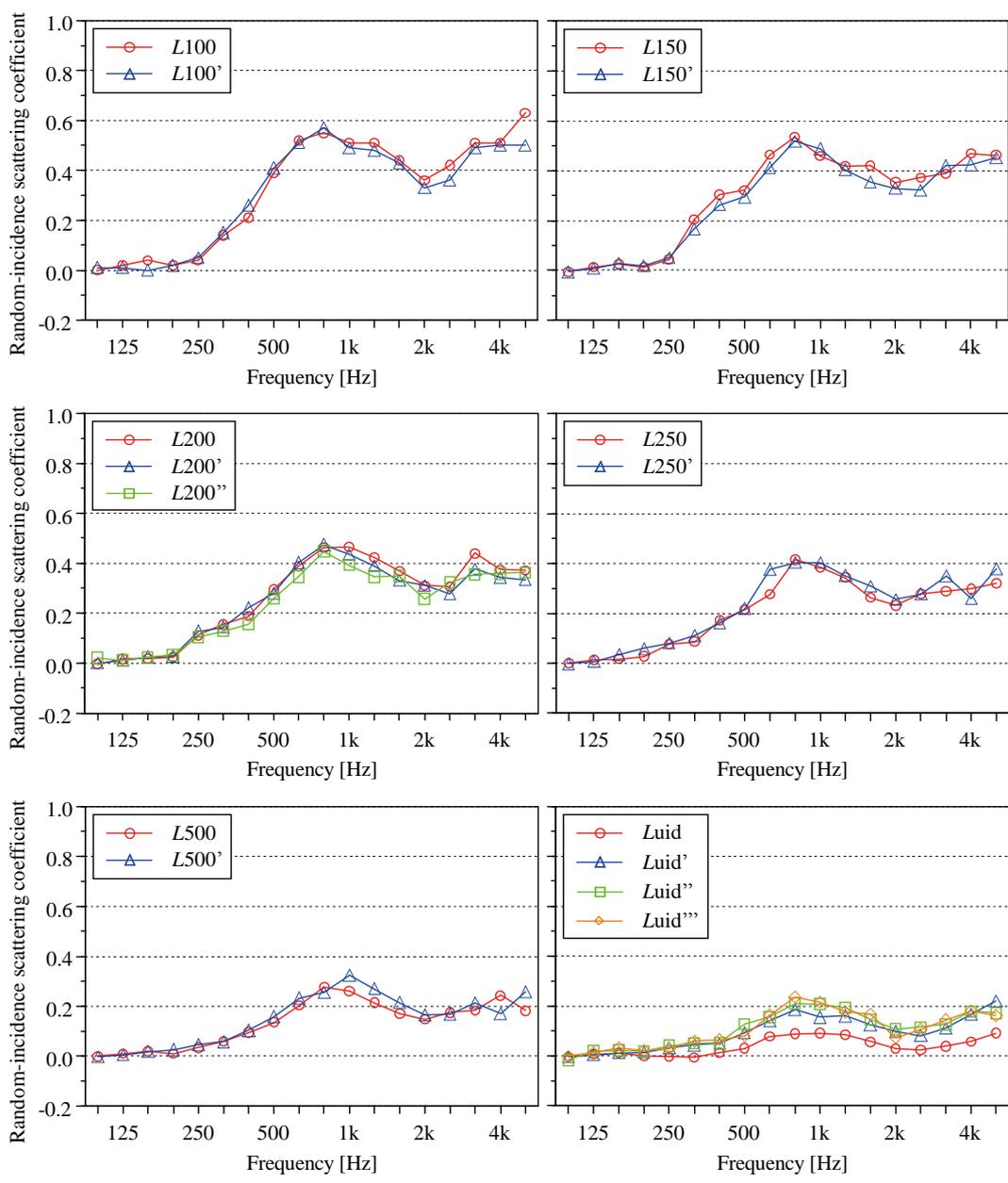


Fig. 2.19: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with changing sample arrangements on the fixed sample periods.

### 結果と考察

同じリブ間隔で試料面上のリブ配置を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 2.19 に示す。乱反射率への移動の影響は僅かに見られるものの、*Luid* を除いては 0.1 以内の差しか生じておらず、リブ状壁面の試料切り出し位置は測定上殆ど問題にならないことが示唆された。なお、リブ単体を試料とする場合、試料中心から半径の 3/4 以内に配置すると、配置の影響は 0.1 以内に収まるものといえる。

## 2.6 インパルス応答の測定条件に関する検討

ISO 17497-1 の測定法は、残響室において試料を回転させながら測定した多数のインパルス応答を同期加算することにより鏡面反射成分を抽出する原理からランダム入射乱反射率を算出する方法であり、インパルス応答の同期加算方法については以下の 2 通りがある。

- Step 法 (stepwise approach)  
各々の回転角度で試料を停止して静止状態で行う方法 (角度ステップに依存)
- 連続法 (continuous approach)  
連続的に試料を回転しながら行う方法 (回転周期に依存)

しかし、それら同期加算方法の対応関係はまだ明らかにされておらず、また試料の角度ステップ数や回転周期の制限についても不明確な部分が残されている。現在まで乱反射率の測定に関する研究発表は活発になされているが (Table 2.11)、多様な組み合わせの測定条件で行われており、前例になるものではなく、理論的・実験的にも検証されていないのが現状である。

Step 法に関して、ISO では 60~120 個 (6~3 度) の角度ステップが必要と規定しており、72 個 (5 度) を推奨している。この制限は初期の実験的研究 [4]に基づいており、一見問題がないように見受けられるが[28, 30, 54]、測定精度を完全に保証するとは言い難い。不十分な角度ステップ数が乱反射率の過小評価につながることは明確であり、その下限値の設定は大変重要である。しかし、ある角度間で測定した拡散反射成分 (時不変性が保たれる状態) が無相関であることを保証する上限値 (最小角度) については、明らかにされていない。

連続法に関して、ISO では MLS (Maximum Length Sequence) 信号のような疑似ランダムノイズ等を用いて試料を連続回転しながら行うと明記しているが、回転周期の制限については不明である。但し、実大実験において、回転周期 60 秒/回転 (信号長 5 秒、信号数 12) という一測定例は提示しているが、それに準じて行った乱反射率の測定値が高音域で過大評価された報告[60]がある。

連続法では 2 つのプロセスにより鏡面反射成分が抽出される。1つは一信号長内での相互相関によるプロセス、もう 1 つは 1 回転中で測定された多数のインパルス応答の同期加算によるプロセスである。試料回転周期の上限値は確実にあると考えられるが、信号周期に依るものか、信号数によるものかは不明である。

一方、ISO では指定されていないが、SS (Swept Sine) 信号を用いた連続法による測定が比較的多い[28, 32, 56]。この方法は各信号内の相互相関によるものではなく、

Table 2.11: Measurement conditions in the previous papers.

Inst.	Ref.	Scale	Method	Signal type	Signal period [s]	Number of signals	Angular interval [deg]	Revolution period [s/rev]
A	[4]	1/5	Cont	MLS	0.85	94	3.8	80
	[54]				1.48	54	6.7	
B	[32]	1/1	Cont	Log-SS	20	27	13.3	540
	[28]				16	35	10.3	560
C	[28]	1/1	Step	Log-SS	12	36	10	N/A
D	[12]	1/10	Step	MLS	N/A	72	5	N/A
	[61]		Cont		0.68	88	4.1	60
E	[30]	1/5	Step	Lin-SS	1.34	72	5	N/A
	[56]		Cont	Log-SS	1.34	79	4.6	105
F	[60]	1/2	Cont	MLS	5.1	16	22.5	81.6

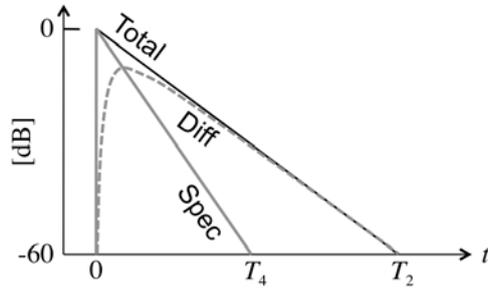
時間変調技術によるものであるため、むしろ、**Step** 法に似ていると言える。従って、その回転周期の制限は、**Step** 法と同様に、信号数（角度ステップ数）により定まると期待される。

以上の試料回転スキームにおいて、本節では、まず **Step** 法や連続法といったインパルス応答の同期加算方法について理論的な考察を行う。その後、**SS** 及び **MLS** 信号を用いた連続法による縮尺及び実大測定を通して、信号数や回転周期等のインパルス応答の測定条件を明らかにする。

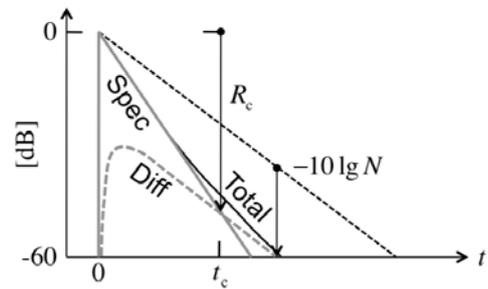
## 2.6.1 理論的考察

### Step 法

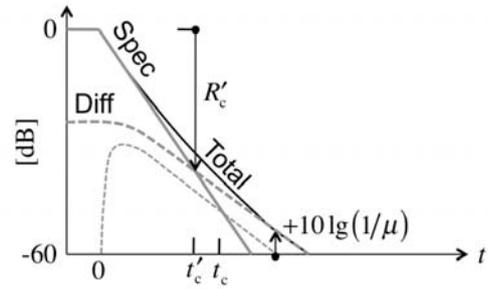
**Step** 法における 1 回の測定（信号種類に無関係）は、試料が各角度ステップに固定されて行われ、各音源位置・受音点の組み合わせでインパルス応答が求められる。インパルス応答のエネルギーは、鏡面反射成分と拡散反射成分の重ね合わされたものであり [4]、それらの合計と鏡面反射成分は異なる指数減衰から構成される。両成分間の独立性を仮定すると、 $i$  ステップの測定におけるインパルス応答のエネルギーは次式で表される。



(a) Energy impulse response (single)



(b) Energy impulse response (average)



(c) Energy decay curve

Fig. 2.20: Processing of room impulse responses by the stepwise approach.

$$I_{\text{total}}(t) = |h_i(t)|^2 \approx |h_i^{\text{spec}}(t)|^2 + |h_i^{\text{diff}}(t)|^2 = I_{\text{spec}}(t) + I_{\text{diff}}(t) \quad (2.9)$$

ここで、 $I_{\text{total}}(t) = I_0 e^{-6 \ln(10)t/T_2}$ 、 $I_{\text{spec}}(t) = I_0 e^{-6 \ln(10)t/T_4}$  であり、それぞれを Eq. (2.9) に代入することで拡散反射エネルギー  $I_{\text{diff}}(t) \approx I_0 (e^{-6 \ln(10)t/T_2} - e^{-6 \ln(10)t/T_4})$  が導かれる (Fig. 2.20(a))。  $T_2$ 、 $T_4$  はそれぞれ試料静止時、試料回転時の残響時間である。

全体（1回転）測定においては、鏡面反射成分と拡散反射成分はそれぞれ相関性、無相関性であると仮定すると、両成分のエネルギーはインパルス応答の同期加算  $N$  回で各々  $N^2$  倍、 $N$  倍増加する。従って、インパルス応答の同期加算後におけるエネルギー減衰は次式で表される。

$$\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t) \right|^2 \approx \frac{1}{N^2} \left( \left| \sum_{i=1}^N h_i^{\text{spec}}(t) \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^N h_i^{\text{diff}}(t) \right|^2 \right) \approx I_{\text{spec}}(t) + \frac{1}{N} I_{\text{diff}}(t) \quad (2.10)$$

但し、

$$\left| \sum_{i=1}^N h_i^{\text{spec}}(t) \right|^2 \approx N^2 I_{\text{spec}}(t), \quad \left| \sum_{i=1}^N h_i^{\text{diff}}(t) \right|^2 \approx N I_{\text{diff}}(t)$$

両成分は臨界時間  $t_c$ （鏡面・拡散成分が同等になる時間）において、 $I_{\text{spec}} = I_{\text{diff}}/N$  の関係になり（Fig. 2.20(b)）、

$$t_c = \frac{10 \log_{10}(N+1)}{60(1/T_4 - 1/T_2)} = \frac{\log_{10}(N+1)}{6(1-\mu)} T_4 \quad (2.11)$$

従って、鏡面反射成分の臨界時間における減衰レベルは次式で表される。

$$R_c = -\frac{10 \log_{10}(N+1)}{1-\mu} \quad (2.12)$$

但し、 $1/(1+S/A_1) \leq \mu \leq 1$  の条件における残響比は、

$$\mu = T_4/T_2 = (\alpha_s + A_1/S)/(\alpha_{\text{spec}} + A_1/S)$$

さらに、逆二乗積分法により得られる鏡面反射成分と拡散反射成分の残響減衰曲線は、それぞれ次式により表される（Fig. 2.20(c)）。

$$E_{\text{spec}}(t) = \int_t^{\infty} I_{\text{spec}}(\tau) d\tau = I_0 \frac{T_4 e^{-6 \ln(10)\tau/T_4}}{6 \ln(10)} \quad (2.13)$$

$$E_{\text{diff}}(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{N} I_{\text{diff}}(\tau) d\tau = I_0 \frac{T_2 e^{-6 \ln(10)\tau/T_2} - T_4 e^{-6 \ln(10)\tau/T_4}}{6 \ln(10)N} \quad (2.14)$$

ここで、 $E_{\text{spec}} = E_{\text{diff}}$  の場合における時間と減衰レベルは、以下のように変形される。

$$t'_c = t_c + \frac{\log_{10} \mu}{6(1-\mu)} T_4 \quad (2.15)$$

$$R'_c = R_c - \frac{10 \log_{10} \mu}{1 - \mu} \quad (2.16)$$

全反射エネルギーに関しては次のように表され、

$$E_{\text{total}}(t) = \frac{I_0}{6 \ln(10)} \left[ \left( 1 - \frac{1}{N} \right) T_4 e^{-6 \ln(10)t/T_4} + \frac{1}{N} T_2 e^{-6 \ln(10)t/T_2} \right], \quad (2.17)$$

その減衰レベルは次式により定まる。

$$R_{\text{total}}(t) = 10 \log_{10} \frac{E_{\text{total}}(t)}{E_{\text{total}}(0)} = R_{\text{spec}}(t) + 10 \log_{10} \frac{(N-1)\mu + 10^{(\mu-1)R_{\text{spec}}(t)/10}}{(N-1)\mu + 1} \quad (2.18)$$

但し、鏡面反射成分の減衰レベル  $R_{\text{spec}}(t) = -60t/T_4$  である。実際の測定では  $R_{\text{total}}$  が観測されるものの、測定誤差は  $R_{\text{spec}}$  の評価に関わり、後者に関して時間依存性を省略して表すと以下のように変形される。

$$\Delta R = 10 \log_{10} \frac{(N-1)\mu + 10^{(\mu-1)(R_{\text{total}} - \Delta R)/10}}{(N-1)\mu + 1} > 0 \quad (2.19)$$

乱反射率の測定誤差は、Eq. (2.6) により次式で表される。

$$\Delta s \approx -\frac{1}{v} \frac{\Delta T_4}{T_4} \approx \frac{1}{v} \frac{\Delta R}{R_{\text{total}}} \quad (2.20)$$

但し、 $0 \leq v \leq 1/(S/A_1)$  の条件において、 $v = (1 - \alpha_s)/(\alpha_{\text{spec}} + A_1/S)$  である。Eq. (2.19) の  $\Delta R$  における角度ステップ数は、次式で表される。

$$N = \frac{10^{(\mu-1)(R_{\text{total}} - \Delta R)/10} - 10^{\Delta R/10}}{\mu(10^{\Delta R/10} - 1)} + 1 \quad (2.21)$$

従って、上式にEq. (2.20)を代入すると、 $\Delta s$  における下限値は、次式により求められる。

$$N = \frac{10^{[\mu(1-v\Delta s)-1]R_{\text{total}}/10} - 1}{\mu(1 - 10^{-v\Delta s R_{\text{total}}/10})} + 1 \quad (2.22)$$

Table 2.12: Minimum numbers of steps required for  $|\Delta s| \leq 0.05$ , with changing  $s$  and  $\alpha_s$  for a test sample, and  $A_1/S$  for a reverberation room.

$A_1/S$	$s = 0.2$			$s = 0.5$			$s = 1$		
	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5
0.5	11	7	5	78	40	20	411	187	70
1.0	7	6	5	35	24	16	156	95	49
2.0	5	5	4	20	17	13	70	53	36

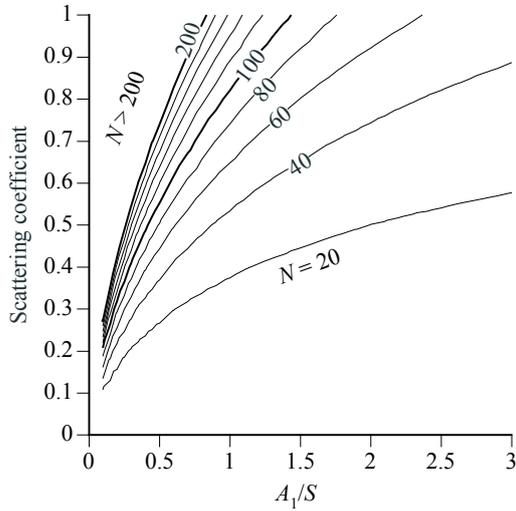


Fig. 2.21: Contours of the minimum number of steps, that ensures  $|\Delta s| \leq 0.05$  for the critical sample ( $\alpha_s = 0$ ).

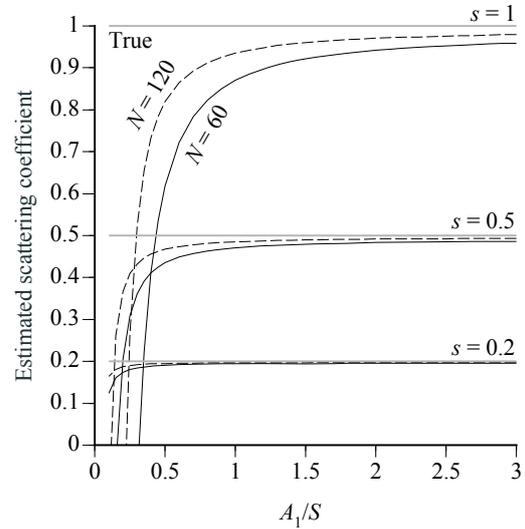


Fig. 2.22: Estimated scattering coefficients for three true values of 0.2, 0.5 and 1, with two typical numbers of steps of 60 and 120.

ISOに基づいて  $R_{\text{total}} = -20$  (dB) とし、異なる吸音率  $\alpha_s$ , 乱反射率  $s$  の試料に対して  $|\Delta s| \leq 0.05$  の条件を満たす角度ステップ数は、室の吸音条件  $A_1/S$  において理論的に推定できる (Table 2.12)。角度ステップ数は、乱反射率が高くなると増加し、 $\alpha_s$ ,  $A_1/S$ 、即ち、吸音が大きくなるに従い少なくなる傾向にある。

$\alpha_s = 0$  の条件において、 $s$ ,  $A_1/S$  を変化させた場合の角度ステップ数の推移を Fig. 2.21 に示す。ISO では角度ステップ数  $60 \leq N \leq 120$  が必要であると指定しているが、等価吸音面積  $A_1$  の下限値は不明である。従って、普通の残響室 ( $A_1/S \leq 1$ ) [6] における測定では、特に高い乱反射率の試料に対して乱反射率の過小評価をもたらす可能性がある (Fig. 2.22)。

## 連続法

連続法では、試料を連続的に 360 度回転しながら測定信号を定期的に繰り返して流し、1 回転で複数の測定が行われる。MLS 信号を用いる場合において、ある信号周期で 1 回測定されたインパルス応答のエネルギーを Fig. 2.23(a) に示す。それは、鏡面反射成分は相関性（時不変性）であるために保たれるが、拡散反射成分は無相関性（時変性）であることから定常ランダムノイズに変換されるという仮定に基づいている[79, 80]。従って、 $i$  番目の測定におけるインパルス応答のエネルギーは次式で表される。

$$\left| \tilde{h}_i(t) \right|^2 \approx \left| h_i^{\text{spec}}(t) \right|^2 + \left| n_i^{\text{diff}}(t) \right|^2 = I_{\text{spec}}(t) + \bar{I}_{\text{diff}} \quad (2.23)$$

ここで、拡散反射エネルギーは信号周期  $T_s$  で広がり、 $T_2$  より比較的長く、次式で表される。

$$\bar{I}_{\text{diff}} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_{\text{diff}}(t) dt \approx \frac{1}{T_s} \int_0^{\infty} I_{\text{diff}}(t) dt = I_0 \frac{1-\mu}{6 \ln(10)} \frac{T_2}{T_s} \quad (2.24)$$

また、インパルス応答の同期加算  $N$  回（信号数）における鏡面反射及び拡散反射エネルギーは、各々  $N^2$  倍、 $N$  倍増加され（Fig. 2.23(b)）、以下の式で表される。

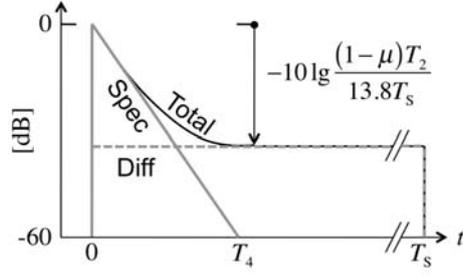
$$\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{h}_i(t) \right|^2 \approx \frac{1}{N^2} \left( \left| \sum_{i=1}^N h_i^{\text{spec}}(t) \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^N n_i^{\text{diff}}(t) \right|^2 \right) \approx I_{\text{spec}}(t) + \frac{1}{N} \bar{I}_{\text{diff}} \quad (2.25)$$

ここで、拡散反射成分は次式に変形できる。

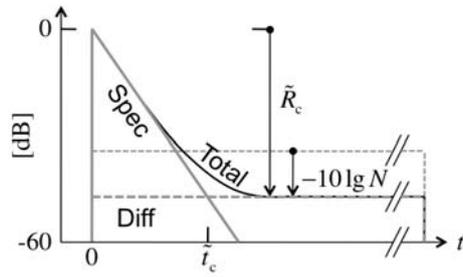
$$\frac{1}{N} \bar{I}_{\text{diff}} \approx I_0 \frac{1-\mu}{6 \ln(10)} \frac{T_2}{T_R} = I_0 \tilde{r}_c \quad (2.26)$$

但し、回転周期（1回転の時間） $T_R = NT_s$  である。 $I_{\text{spec}} = \bar{I}_{\text{diff}}/N$  の場合において、時間  $\tilde{t}_c = (T_4/6) \log_{10}(1/\tilde{r}_c)$  での鏡面反射成分の減衰レベルは  $\tilde{R}_c = 10 \log_{10} \tilde{r}_c$  であり、信号周期ではなく、回転周期に依存することになる。

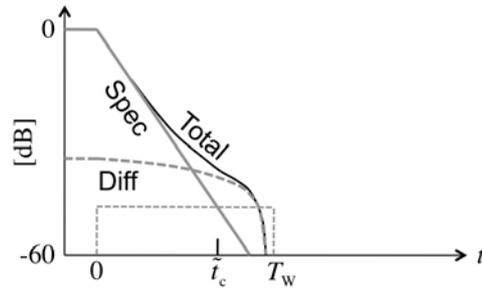
逆二乗積分法により残響減衰曲線を求める際、拡散反射エネルギー低減のため、同期加算後におけるインパルス応答のエネルギーを特定時間で切り出して積分する必要がある。切り出し時間  $T_w$  で求めた鏡面反射成分と拡散反射成分の残響減衰曲線は、それぞれ次式により得られる（Fig. 2.23(c)）。



(a) Energy impulse response (single)



(b) Energy impulse response (average)



(c) Energy decay curve (truncated)

Fig. 2.23: Processing of room impulse responses by the continuous approach.

$$\tilde{E}_{\text{spec}}(t) = \int_t^{T_w} I_{\text{spec}}(\tau) d\tau = I_0 \frac{T_4}{6 \ln(10)} \left[ e^{-6 \ln(10)t/T_4} - e^{-6 \ln(10)T_w/T_4} \right] \quad (2.32)$$

$$\tilde{E}_{\text{diff}}(t) = \int_t^{T_w} \frac{1}{N} \bar{I}_{\text{diff}} d\tau = I_0 \tilde{r}_c (T_w - t) \quad (2.33)$$

全反射エネルギーは  $\tilde{E}_{\text{total}} = \tilde{E}_{\text{spec}} + \tilde{E}_{\text{diff}}$  であり、その減衰レベルは次式で表される。

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{\text{total}}(t) &= 10 \log_{10} \frac{\tilde{E}_{\text{total}}(t)}{\tilde{E}_{\text{total}}(0)} \\ &= R_{\text{spec}}(t) + 10 \log_{10} \frac{1 - \left[ 10^{-6\beta} - \frac{\ln 10}{10} (60\beta + R_{\text{spec}}(t)) \tilde{r}_c \right] 10^{-R_{\text{spec}}(t)/10}}{1 - 10^{-6\beta} + 6 \ln(10) \beta \tilde{r}_c} \end{aligned} \quad (2.34)$$

ここで、 $\beta = T_w/T_4$  であり、Eq. (2.34)の后者は次式で表される。

$$\Delta \tilde{R} = 10 \log_{10} \frac{1 - \left[ 10^{-6\beta} - \frac{\ln 10}{10} (60\beta + \tilde{R}_{\text{total}} - \Delta \tilde{R}) \tilde{r}_c \right] 10^{(-\tilde{R}_{\text{total}} + \Delta \tilde{R})/10}}{1 - 10^{-6\beta} + 6 \ln(10) \beta \tilde{r}_c} \quad (2.35)$$

上式は Eq. (2.6) により、以下のように変換される。

$$\tilde{R}_c = 10 \log_{10} \frac{10 \left( 1 - 10^{-\nu \Delta s \tilde{R}_{\text{total}}/10} \right) + 10^{-6\beta} \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)}{\ln 10 \left( 1 - \nu \Delta s \right) \tilde{R}_{\text{total}} + 60\beta \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)} \quad (2.36)$$

従って、乱反射率の許容誤差  $\Delta s$  における  $\tilde{R}_c$  は、 $T_w$  により定まる。 $T_w = \tilde{t}_c$  (最適時間：臨界時間と一致させた場合の切り出し時間) で切り出して求める場合、次式のようになる。

$$\tilde{R}_c = 10 \log_{10} \frac{10 \left( 1 - 10^{-\nu \Delta s \tilde{R}_{\text{total}}/10} \right) 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} + 10^{\tilde{R}_c/10} \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)}{\ln 10 \left( 1 - \nu \Delta s \right) \tilde{R}_{\text{total}} - \tilde{R}_c \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)} \quad (2.37)$$

上式が  $\tilde{R}_{\text{total}} = -20(\text{dB})$ ,  $\tilde{R}_c \leq -30(\text{dB})$  の条件を満たす場合、乱反射率の測定誤差を評価するレベルと言える。最終的に、回転周期の下限値は Eq. (2.26) により次式で求められる。

$$T_R = \frac{1 - \mu}{6 \ln 10} 10^{-\tilde{R}_c/10} T_2 \quad (2.38)$$

従って、Eq. (2.36) を上式に代入することで、次式が導かれる。

$$T_R = \frac{1 - \mu}{\alpha_s + A_1/S} \frac{(1 - \nu \Delta s) \tilde{R}_{\text{total}}/60 + \beta \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)}{\left( 1 - 10^{-\nu \Delta s \tilde{R}_{\text{total}}/10} \right) 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} + 10^{-6\beta} \left( 1 - 10^{\tilde{R}_{\text{total}}/10} \right)} T_0 \quad (2.39)$$

Table 2.13: Minimum ratios of revolution period  $T_R$  to reverberation time  $T_1$  with a typical truncation time  $T_W = T_1/2$ , required for  $|\Delta s| \leq 0.05$  with changing  $s$  and  $\alpha_s$  for a test sample, and  $A_1/S$  for a reverberation room.

$A_1/S$	$s = 0.2$			$s = 0.5$			$s = 1$		
	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5
0.5	33	35	34	156	125	102	534	377	259
1.0	21	24	27	91	85	78	298	246	194
2.0	12	15	17	53	53	52	175	157	133

Table 2.14: Minimum ratios of revolution period  $T_R$  to reverberation time  $T_1$  with the optimal truncation time  $T_W = \tilde{t}_c$ , required for  $|\Delta s| \leq 0.05$  ( $\tilde{R}_c \leq -30(\text{dB})$ ), with changing  $s$  and  $\alpha_s$  for a test sample, and  $A_1/S$  for a reverberation room. The ratios in parentheses are required for a supplementary condition:  $\tilde{R}_c = -30(\text{dB})$ .

$A_1/S$	$s = 0.2$			$s = 0.5$			$s = 1$		
	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5	$\alpha_s = 0$	0.2	0.5
0.5	(21)	(10)	5	(36)	(19)	16	(48)	(28)	37
1.0	(12)	(7)	10	(24)	18	27	44	53	59
2.0	11	13	17	32	36	42	75	78	86

但し、空室の残響時間  $T_0 = 24 \ln 10 (V/c_1 S)$  である。ここで注目すべき重要な点は、回転周期の下限値は基本的に残響時間に比例することである。

異なる吸音率  $\alpha_s$ , 乱反射率  $s$  の試料に対して  $|\Delta s| \leq 0.05$  の条件を満たす  $T_R/T_0$  は、室の吸音条件  $A_1/S$  において理論的に推定できる。Table 2.12, 2.13 は、30 dB 以上の減衰が保証される鏡面反射成分に対してそれぞれ  $T_W = T_1/2$  (典型的時間：便宜的に設定した切り出し時間) と  $T_W = \tilde{t}_c$  (最適時間：臨界時間と一致させた場合の切り出し時間) で求めた  $T_R/T_0$  である。 $T_W = T_1/2$  では、Step 法の場合と同様に、乱反射率が増加するにつれて長い回転周期が必要となり、 $\alpha_s$ ,  $A_1/S$  が大きくなると短くなる傾向にある。それに比べて  $T_W = \tilde{t}_c$  では、回転周期が著しく短縮されており、特に  $\alpha_s$ ,  $A_1/S$  が小さいと顕著になる。

$\alpha_s = 0$  の条件において、 $s, A_1/S$  を変化させた場合の  $T_R/T_0$  の推移を Fig. 2.24 に示す。Step 法における角度ステップ数  $60 \leq N \leq 120$  と比較して見ると (Fig. 2.22)、 $T_W = T_1/2$

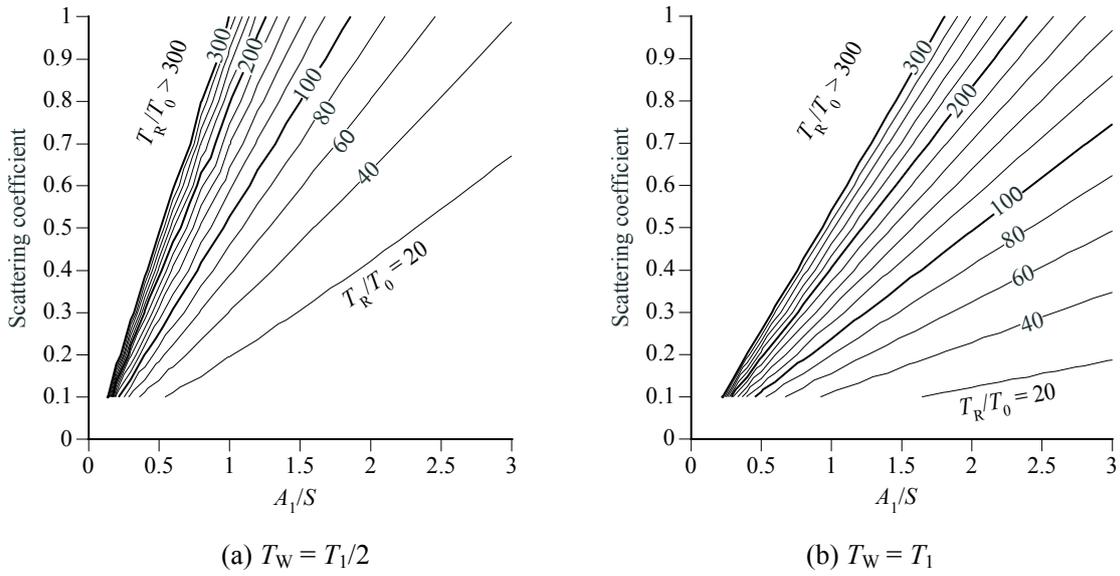


Fig. 2.24: Contours of the minimum revolution period ratio, that ensures  $|\Delta s| \leq 0.05$  for the critical sample ( $\alpha_s = 0$ ): (a) with the typical truncation time  $T_W = T_1/2$ , and (b) with the double time  $T_W = T_1$ .

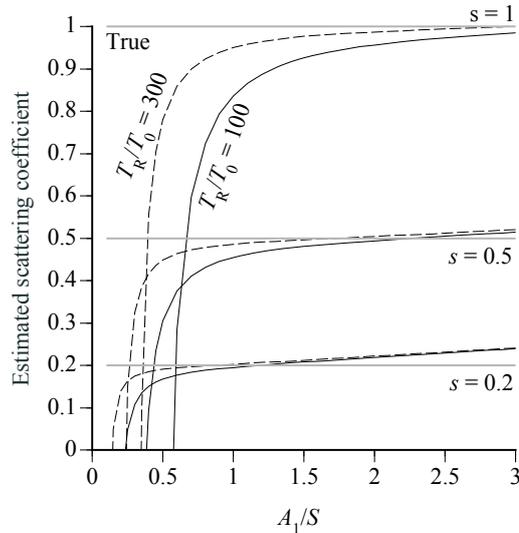


Fig. 2.25: Estimated scattering coefficients for three true values of 0.2, 0.5 and 1 with  $T_W = T_1/2$ , with two typical revolution period ratios of 100 and 300.

ではおよそ  $100 \leq T_R/T_0 \leq 300$  ( $0.5 < A_1/S < 2$ ) に相当し、 $T_W = T_1$  ではその 2 倍以上に増加している。また普通の残響室 ( $A_1/S \leq 1$ ) における測定では、特に高い乱反射率の試料に対して過小評価をもたらす可能性がある (Fig. 2.25)。

以上より、MLS 信号を用いる連続法による測定では、回転周期はインパルス応答の切り出し時間に大きく依存することが示唆された。

## 2.6.2 縮尺模型及び実大残響室における測定概要

### 残響室等の設置条件

測定は 2.3 節と同様に、1/4 縮尺模型の直方体残響室 (Fig. 2.2) において行った。

Table 2.15: Specifications of the measurement set-up.

		1/4 scale	1/1 scale
Reverberation room	Shape	Rectangular	Non-rectangular
	Volume [m <sup>3</sup> ]	1.62	270
	Total surface areas [m <sup>2</sup> ]	8.46	255
	Material	Acrylic	Concrete
	Diffuser	10 Plastic panels	None
Base plate	Diameter [m]	0.75	3
	Thickness [mm]	30	45
	Material	Wood	Wood
Border	Height [mm]	50	210
	Thickness [mm]	1	10
	Material	Plastic	Acrylic
Turntable	Model type	TT-1000 [81]	Self-made
	Air gap [mm]	170	-
2D Test sample (Block structure)	Height [mm]	25	100
	Period [mm]	50	200
	Number	161	161
	Material	Wood	Wood
1D Test sample (Rib structure)	Height [mm]	25	-
	Period [mm]	50	
	Number	15	
	Material	Wood	



Fig. 2.26: Two types of test samples in 1/4 scale.

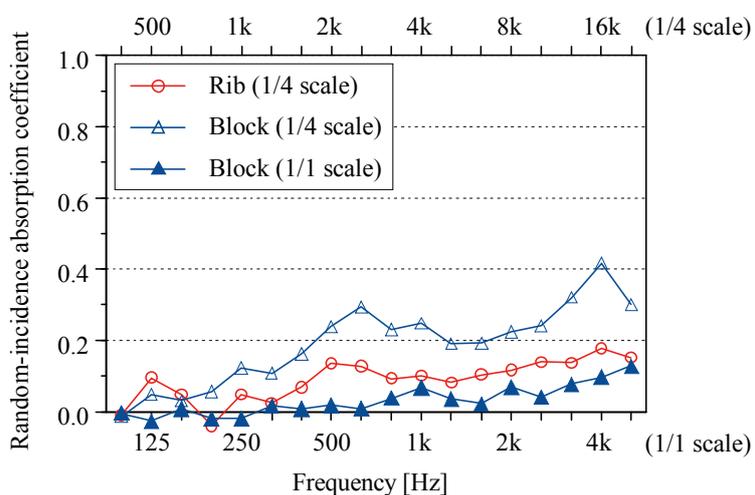


Fig. 2.27: Measured random-incidence absorption coefficients of the test samples in 1/4 and 1/1 scales.

詳細を Table 2.13 に示す。基準円盤の周囲にはプラスチック製枠（高さ 50 cm、厚 1 mm）を取り付け、ターンテーブル上に固定した。ターンテーブル (Nittobo Acoust. Eng., TT-1000) [81]は、回転周期の操作可能（4 秒～6 分/1 回転）なものを使用した。

測定試料は Fig. 2.26 に示すように、木製リブ 15 個を配置した 1 次元周期構造と、木製ブロック 161 個を格子状に均等配置した 2 次元周期構造とし、2 つの試料は同様に、高さは 25 mm、周期は 50 mm である。試料のランダム入射吸音率を Fig. 2.27 に示す。

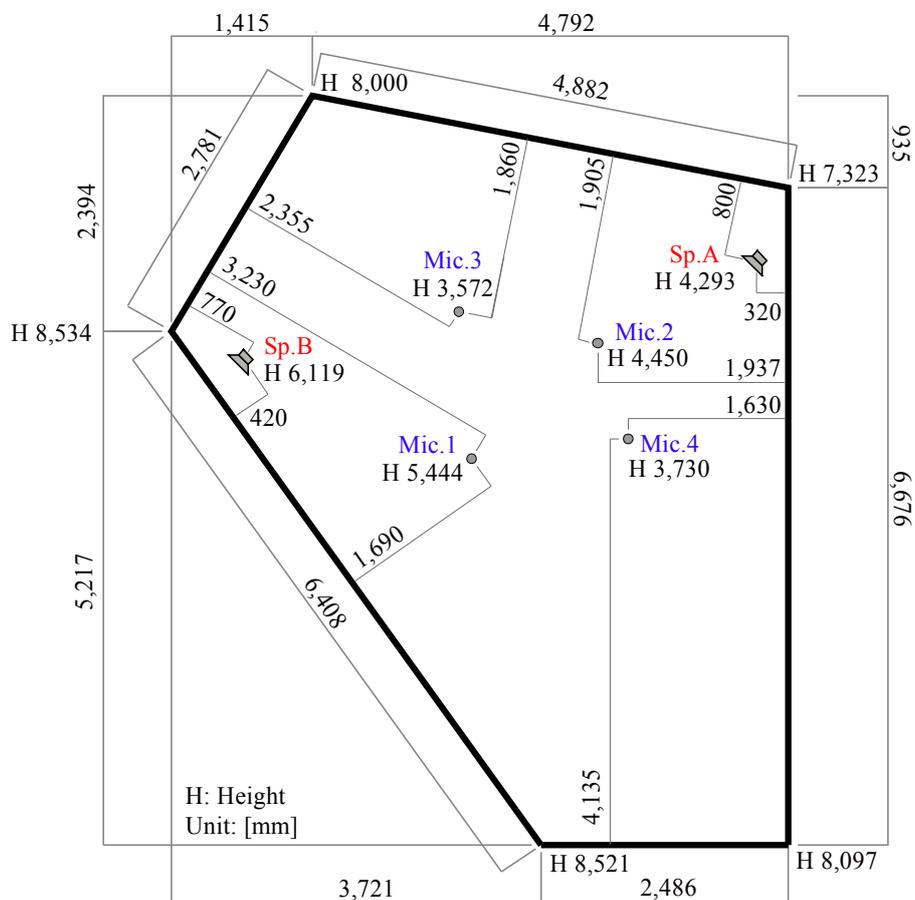


Fig. 2.28: Real-scale reverberation room at Yamaha Corp. in Shizuoka-ken, Japan.

実大測定は、容積  $270 \text{ m}^3$ 、表面積  $255 \text{ m}^2$ 、拡散板なしの不整形残響室 (Fig. 2.28) において行った。自作ターンテーブルの上に基準円盤 (直径  $3 \text{ m}$ 、厚さ  $45 \text{ mm}$ ) を設け、その周囲には回転装置下部の非対称性[31]と試料側方からの散乱の影響を防ぐために、アクリル製枠を地面から取り付けた (Fig. 2.29)。枠の高さは、ISO 規定の試料高さの最大値に近似して円盤上面から  $210 \text{ mm}$  とし、厚さは  $10 \text{ mm}$  とする。測定試料は、 $1/4$  縮尺で用いた 2 次元周期構造に類似する 161 個の木製立方体を基準円盤上に配列したブロック構造 (高さ  $100 \text{ mm}$ 、周期  $200 \text{ mm}$ ) とした。この試料のランダム入射吸音率特性は  $1/4$  縮尺に比べて全体的に低いことがわかる (Fig. 2.27)。

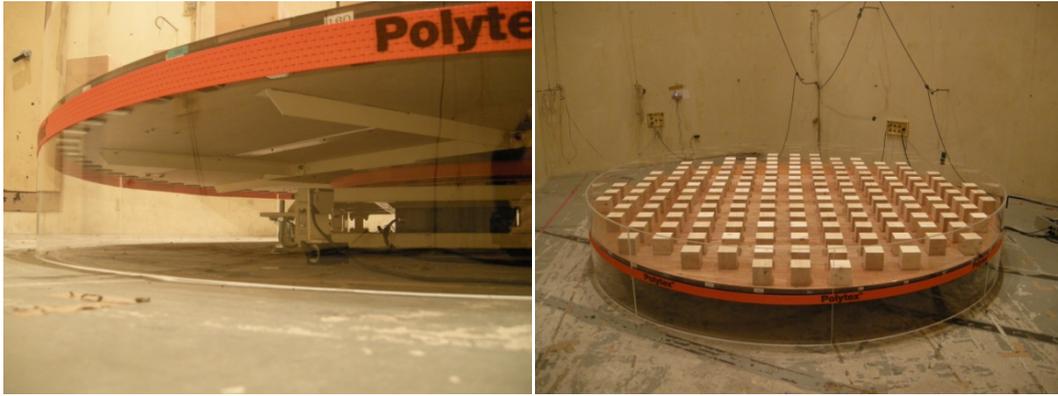


Fig. 2.29: The base plate and the test sample of block structure in 1/1 scale.

Table 2.16: Conditions of the impulse response measurements in 1/4 scale (1 revolution).

Signal period [s]	Revolution period [s/rev]								
	-	-	-	-	10.2	20.5	41.0	81.9	164
0.68	-	-	-	-	10.2	20.5	41.0	81.9	164
1.37	-	-	-	10.9	20.5	41.0	81.9	164	328
2.73	-	-	10.9	21.8	41.0	81.9	164	328	-
5.46	-	10.9	21.8	43.7	81.9	164	328	-	-
10.9	10.9	21.8	43.7	87.4	164	328	-	-	-
21.8	21.8	43.7	87.4	175	328	-	-	-	-
Angular interval [deg]	360	180	90	45	24	12	6	3	1.5
Number of signals	1	2	4	8	15	30	60	120	240

Table 2.17: Conditions of the impulse response measurements in 1/1 scale (1 revolution).

Signal period [s]	Revolution period [s/rev]				
	-	81.9	164	328	655
2.73	-	81.9	164	328	655
5.46	81.9	164	328	655	1311
10.9	164	328	655	1311	-
Angular interval [deg]	24	12	6	3	1.5
Number of signals	15	30	60	120	240

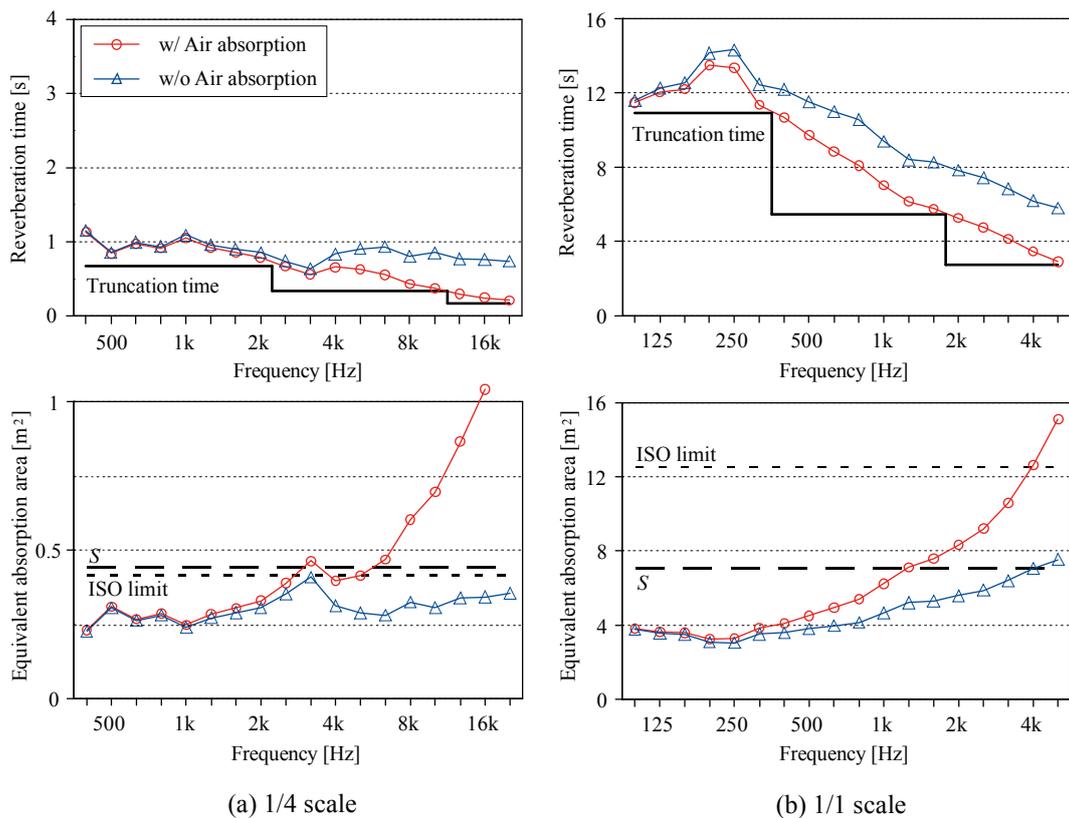


Fig. 2.30: Measured reverberation times and equivalent absorption areas of two reverberation rooms in 1/4 and 1/1 scales.

### インパルス応答の測定条件

連続法における試料回転速度の制限を検討するため、SS 及び MLS 信号を用いたインパルス応答の測定を行う。Table 2.16, 2.17 に、信号周期と回転周期を変化させた 1/4 及び 1/1 縮尺における測定条件をそれぞれ示す。信号周期はそれぞれ 6, 3 水準とし、1 回転中の信号数に応じて回転周期を変化させる。従って、1 回転当たりの信号数と角度ステップ数は反比例の関係になる。

測定経路は、1/4 縮尺ではスピーカ 2 箇所・マイクロホン 3 箇所の計 6 通り、1/1 縮尺ではスピーカ 2 箇所・マイクロホン 4 箇所の計 8 通りとしてインパルス応答の測定を行った。なお、測定は退室閉扉後 15 分以上経過した後に開始した。

Fig. 2.30 に 2 つの残響室で測定した残響時間  $T_1$  と等価吸音面積  $A_1$  を示す。空気吸収を含んだ  $A_1$  は、両方とも高音域で試料面積  $S$  より大きくなっている。ISO では、空室における  $A_1$  は、 $A_1 < 0.30V^{2/3}$  を満たす必要があると指定しており、1/1 縮尺では概ねその条件を満たすものの、1/4 縮尺では高音域で大幅に超える。また、残響時間

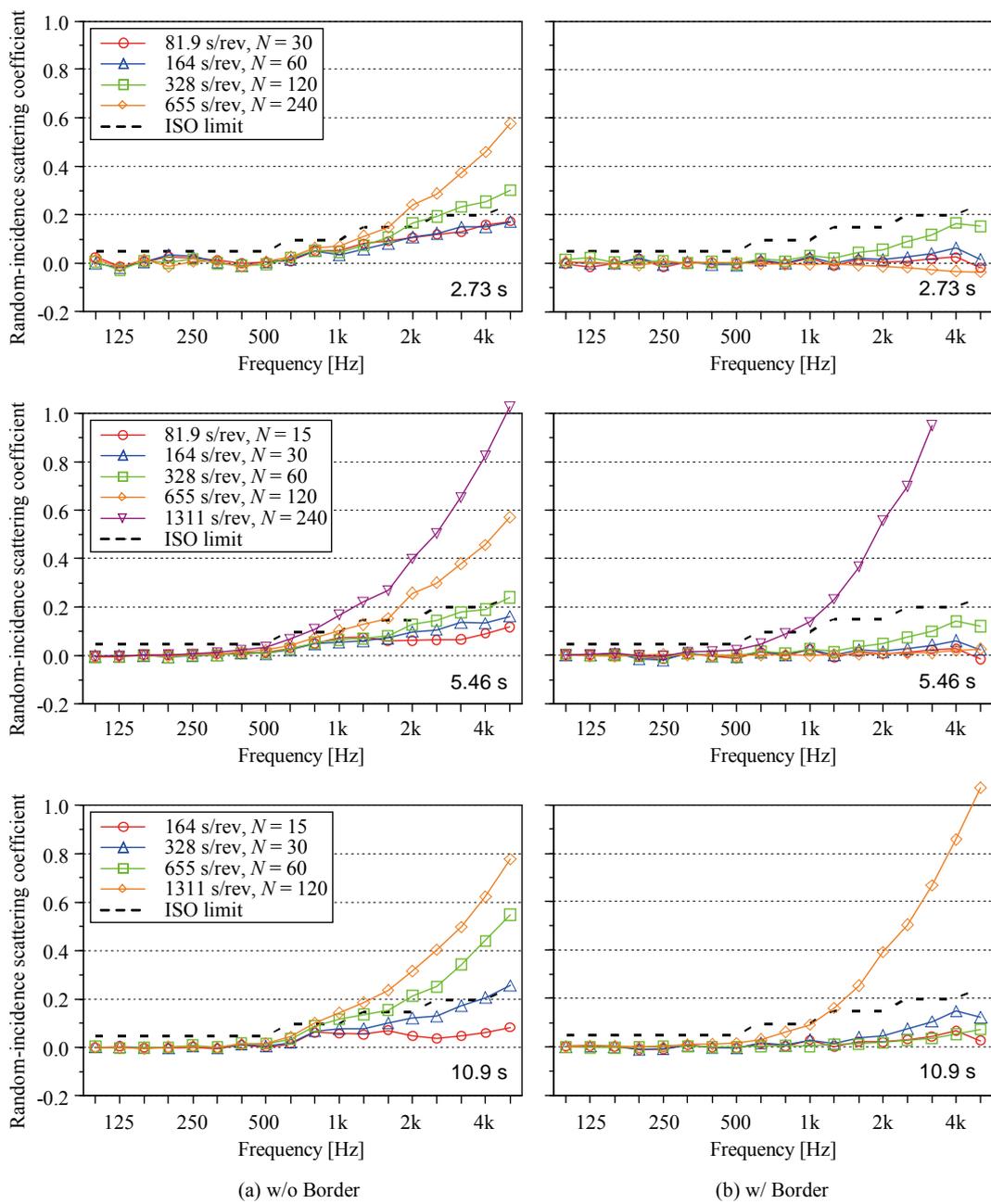


Fig. 2.31: Random-incidence scattering coefficients of the base plate, measured without and with the border on the fixed signal periods.

を見ると、1/4 縮尺で用いる信号周期は残響時間より長いのに対し、1/1 縮尺では特に低音域において短い。

逆二乗積分法により残響減衰曲線を求める際、ISO 規格では、同期加算後における

インパルス応答のエネルギーを -30 dB の時間で切り出して積分する必要があると指定しているが、本研究では異なる信号周期による影響を調べるため、切り出し時間を空室で測定した残響時間に応じて設定した。切り出し時間 (Fig. 2.30) は、1/3 oct. band 毎において  $T_1/2 \sim T_1$  の範囲になる最短信号周期で固定することで、全条件で 30 dB 以上の減衰が保証される。残響時間は、-5~-20 dB の範囲の最小二乗近似より得られる全系統の残響時間の平均値で算出した。

また、残響時間  $T_1$  と  $T_3$  から求める基準円盤の乱反射率を確認する必要がある。1/4 及び 1/1 縮尺において、その乱反射率は ISO 上限値以下となったが、1/4 縮尺では 20 kHz で、1/1 縮尺では最長回転周期である 1311 秒/回転で規定外となった。それぞれ空気吸収や時変性が原因として考えられる。Fig. 2.31 に、1/1 縮尺における基準円盤の乱反射率の測定結果を示す。枠ありの場合はなしと比べ、値が全帯域に渡って 0.1 以下に下がり、枠を設置することで、回転下部の非対称性が抑制される効果があることが分かる。1311 秒/回転の場合は、測定に長時間 (20 分以上) が掛かる場合には時変性の影響で乱反射率が過大評価されており、ISO の規定 (実大実験における回転周期 20 分/回転) は適切であると考えられる。

### 2.6.3 結果と考察 - 1/4 縮尺の場合 -

#### SS 信号による測定

2 次元周期構造 (ブロック構造) について、Table 2.16 の通り信号周期、回転周期、信号数を変化させた場合におけるランダム入射乱反射率の測定結果を Fig. 2.32 に示す (以降、周波数は実物換算)。

信号周期を 2.73 秒に固定した Fig. 2.32(a) では、全般に回転周期が 81.9 秒/回転 ( $N=30$ ) より短くなると、値は高音域から低下する傾向が見られる。回転周期を 81.9 秒/回転に固定した Fig. 2.32(b) では、信号周期が 2.73 秒 ( $N=30$ ) より長くなるにつれ、値は高音域から低下する傾向にある。信号数を 30 個に固定した Fig. 2.32(c) では、信号周期と回転周期を変化させたにも関わらず、値は殆ど変化していない。

以上より、SS 信号による測定では精度が信号数 (角度ステップ数) の下限値に依存することが示された。

1 次元周期構造 (リブ構造) についての同様の測定結果を指向相関法による解析結果と併せて Fig. 2.33 に示す。

測定値と計算値は算出方法の相違による影響があるものの、全体的に良く対応している。信号周期を固定した Fig. 2.33(a) を見ると、回転周期 81.9 秒/回転 ( $N=30$ ) における測定値は 2.5 kHz, 3.15 kHz で低下し始める。これは高い乱反射率に起因し

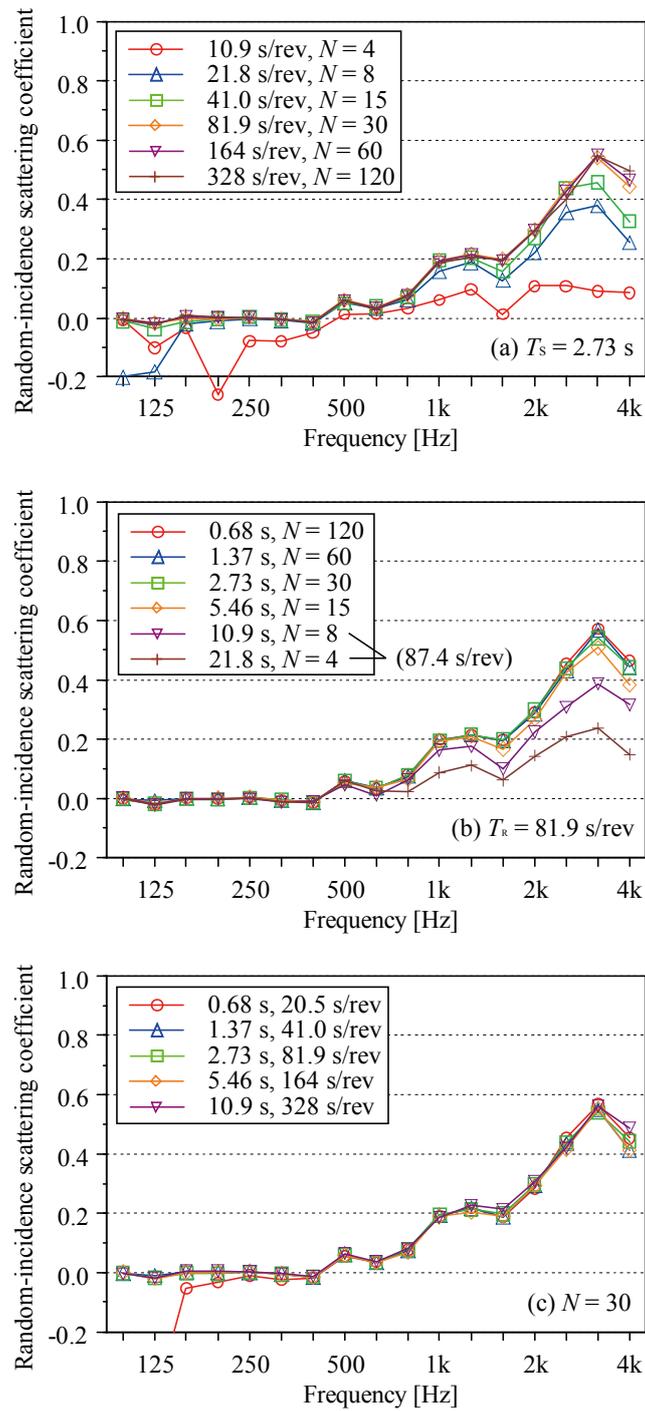


Fig. 2.32: Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with SS signals in 1/4 scale. (a)  $T_S = 2.73$  s, (b)  $T_R = 81.9$  s/rev, and (c)  $N = 30$ .

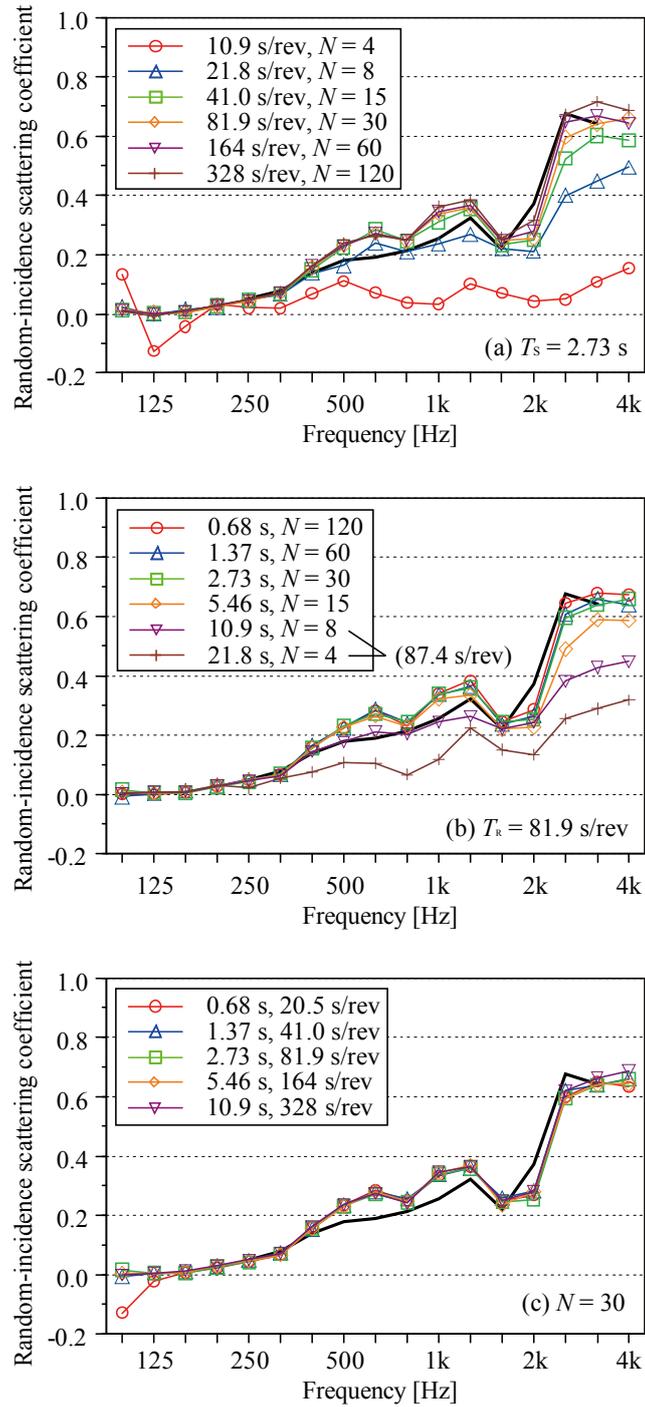


Fig. 2.33: Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with SS signals in 1/4 scale. (a)  $T_S = 2.73$  s, (b)  $T_R = 81.9$  s/rev, and (c)  $N = 30$ . Thick lines represent those numerically calculated with the directivity correlation method.

ているものと考えられる (Fig. 2.21)。

以上の検討により、Step 法における角度ステップ数 60~120 個 (ISO 規定) は SS 信号を用いる連続法に転用できるものと考えられる。

## MLS 信号による測定

2 種類の試料 (ブロック及びリブ構造) について、信号周期、回転周期、信号数を変化させた場合におけるランダム入射乱反射率の測定結果をそれぞれ Fig. 2.34, 2.35 に示す。

信号周期を 2.73 秒に固定した Fig. 2.34(a), 2.35(a) では、回転周期が 81.9 秒/回転より短くなるにつれ、値は高音域から低下する。回転周期を 81.9 秒/回転に固定した Fig. 2.34(b), 2.35(b) では、信号周期と信号数を変化させても値の変化は殆ど見られない。信号数を 30 個に固定した Fig. 2.34(c), 2.35(c) では、回転周期が 81.9 秒/回転より長くなると、値は高音域からやや低下する傾向にある。

回転周期及び信号を固定した場合では、SS 信号を用いた場合と比べて明らかに異なる傾向になり、MLS 信号を用いる連続法では回転周期の下限値が存在することが示された。

2.5 kHz におけるリブ構造の残響減衰曲線を Fig. 2.36 に示す。

SS 信号周期を 2.73 秒に固定した Fig. 2.36(a) では、全体的に回転周期が短くなるに従い減衰が小さくなる。一方、同じ信号周期で MLS 信号を用いた Fig. 2.36(b) では、回転周期が短くなるにつれ、より高いレベルで折れ曲がりが生じることがわかる。

SS 及び MLS 信号を用いた以上の結果は、それぞれ Step 法と連続法に基づく理論 (Fig. 2.20, 2.23) に対応する。

連続法に基づく理論において、残響減衰曲線は信号周期と信号数によらず、回転周期にのみ依存することを示した。しかし、回転周期を 81.9 秒/回転に固定した場合 (Fig. 2.35(b)) における残響減衰曲線 (Fig. 2.36(c)) では、信号周期が 5.46 秒より長くなると、より高いレベルで折れ曲がりが生じる。これは回転角度がある間隔より小さくなると、拡散反射成分が完全な無相関にならず、各々の測定において残され、定常ランダムノイズ (無相関) がより減少し、鏡面反射成分も同期加算回数に比例して減少するためであると考えられる。

従って、MLS 信号を用いる連続法による測定では、回転周期の下限値に加え、信号周期を短く設定 (より多い信号数) すると、測定精度を向上させることが示された。

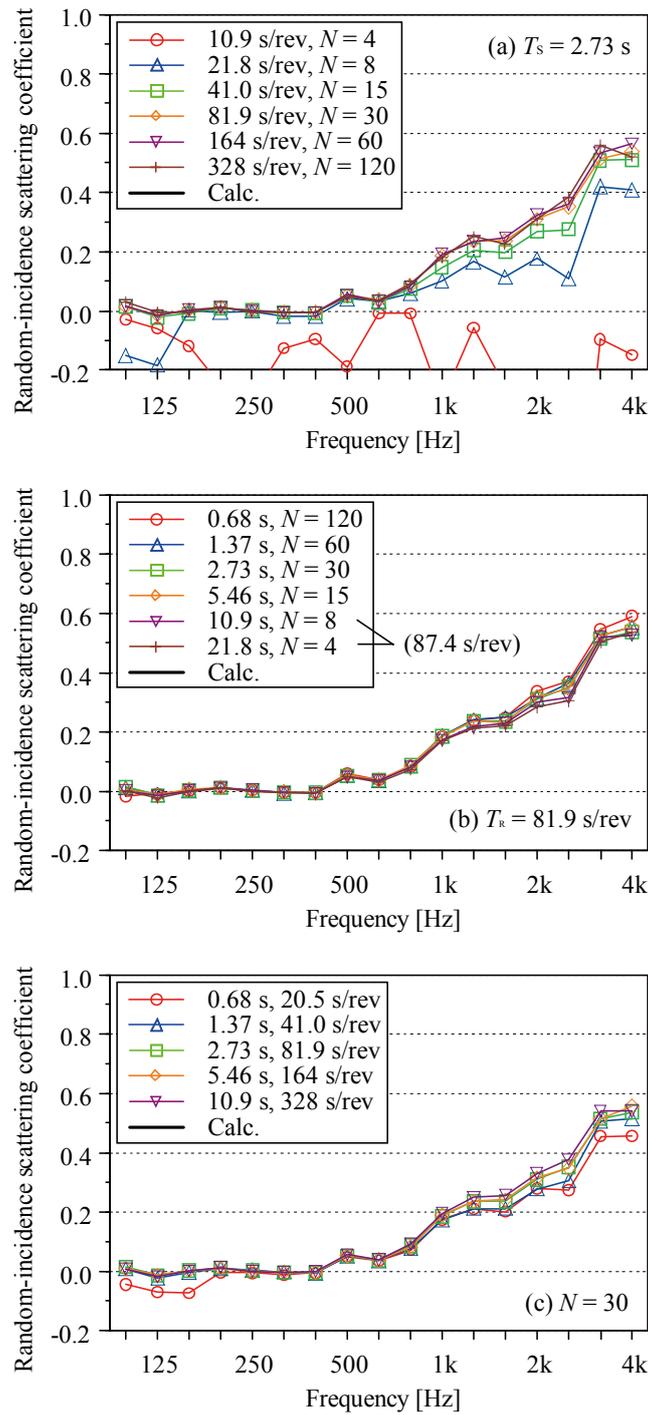


Fig. 2.34: Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with MLS signals in 1/4 scale. (a)  $T_S = 2.73$  s, (b)  $T_R = 81.9$  s/rev, and (c)  $N = 30$ .

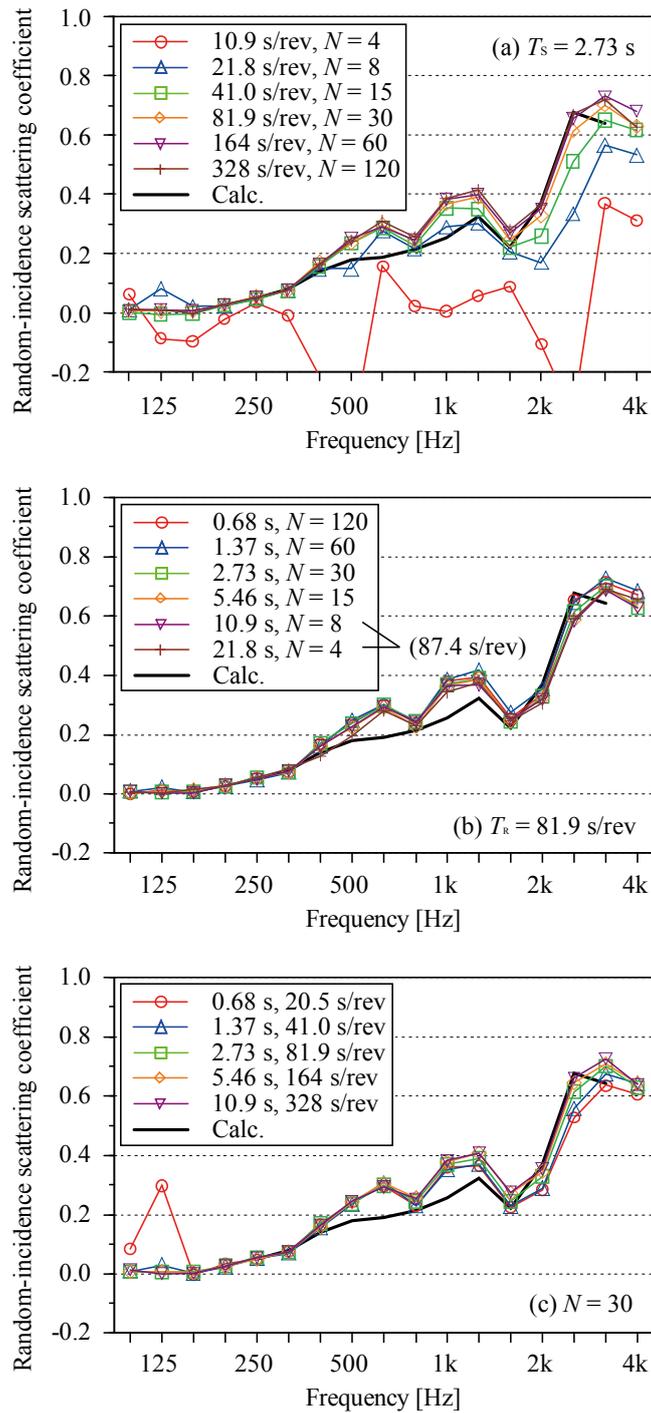


Fig. 2.35: Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with MLS signals in 1/4 scale. (a)  $T_S = 2.73$  s, (b)  $T_R = 81.9$  s/rev, and (c)  $N = 30$ . Thick lines represent those numerically calculated with the directivity correlation method.

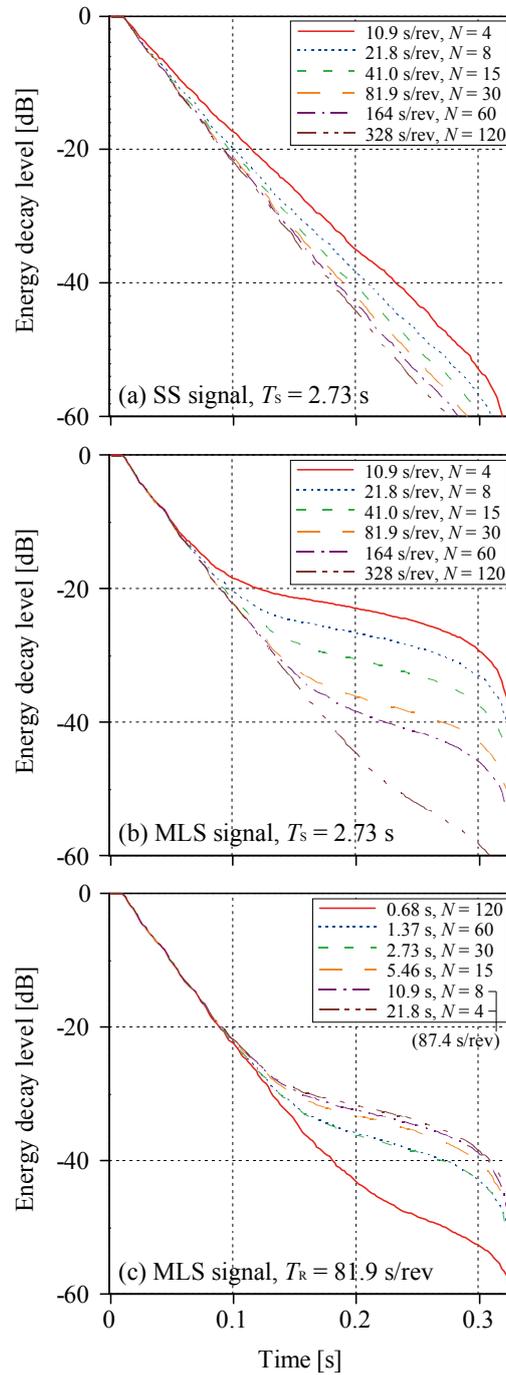


Fig. 2.36: Energy decay curves after synchronized averaging of impulse responses, measured for the 1D periodic sample in the 2.5 kHz frequency band. (a) SS signals with  $T_s = 2.73$  s, (b) MLS signals with  $T_s = 2.73$  s, and (c) MLS signals with  $T_R = 81.9$  s/rev.

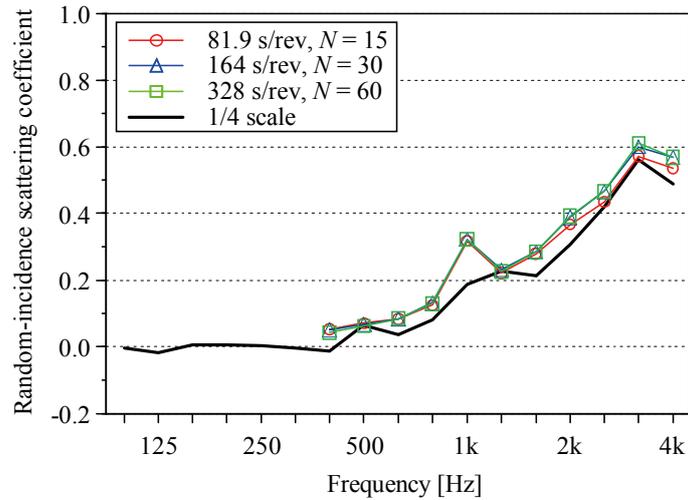


Fig. 2.37: Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with SS signals with  $T_s = 5.46$  s in 1/1 scale. A thick line represents typical values measured with SS signals in 1/4 scale.

## 2.6.4 結果と考察 – 1/1 縮尺の場合 –

### SS 信号による測定

2次元周期構造（ブロック構造）について、信号周期を 5.46 秒に固定して回転周期を変化させた場合におけるランダム入射乱反射率の測定結果を Fig. 2.37 に示す。なお、低音域における空室の残響時間は、信号周期より 2 倍以上長いことから測定外となる。

乱反射率は、全体的に 1/4 縮尺の場合（Fig. 2.32(a)）と同様の傾向にあるが、全音域にわたってやや大きい値を示している。それは室条件や試料吸音の相違によるものと考えられる。高音域における値は、信号数が 30 個より少なくなると低下しており、本条件では、164 秒/回転（ $N=30$ ）以上の回転周期が必要であると考えられる。

### MLS 信号による測定

2次元周期構造（ブロック構造）について、信号周期、回転周期、信号数を変化させた場合のランダム入射乱反射率の測定結果を Fig. 2.38 に示す。

信号周期を 5.46 秒に固定した Fig. 2.38(a) では、回転周期が 655 秒/回転より短いと高音域で値が低下する。回転周期を 655 秒/回転に固定した Fig. 2.38(b) では、信号周期が短くなるにつれて値が僅かに増加する。信号数を 30 個に固定した Fig. 2.38(c)

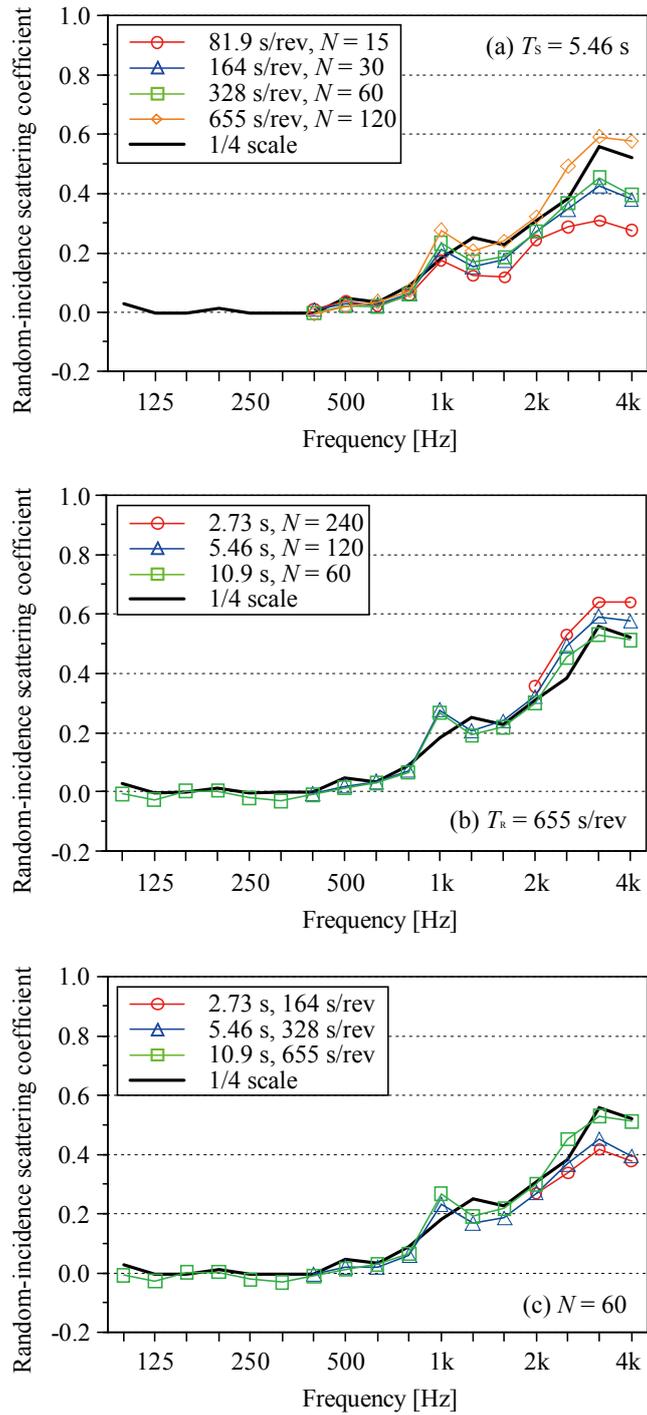


Fig. 2.38: Random-incidence scattering coefficients of the 2D periodic sample, measured with MLS signals in 1/1 scale. (a)  $T_S = 5.46$  s, (b)  $T_R = 655$  s/rev, and (c)  $N = 60$ . Thick lines represent typical values measured with MLS signals in 1/4 scale.

では、回転周期が 655 秒/回転より短くなると値は若干低下する。1/4 縮尺の場合 (Fig. 2.34) と比較してみると、Fig. 2.38(a), 2.38(c)では類似するものの、Fig. 2.38(b)では異なる傾向にある。その原因としては、実大測定での高音域における残響時間が 1/4 縮尺の場合に比べ 3 倍以上も長いと考えられる (Fig. 2.30)。連続法に基づく理論において、回転周期は部屋の残響時間と比例関係にあることから、1/1 縮尺における 655 秒/回転は十分ではないと考えられる。2.6.2 項で述べたように、1311 秒/回転での測定では時変性の影響を受けたことから、本測定条件における適切な回転周期は存在しないと考えられる。

以上により、実大測定は長時間の測定時間が掛かることで時変性の影響が強く、また MLS 信号より SS 信号の使用が望ましいことが示された。

## 2.7 まとめ

本章では、ランダム入射乱反射率の測定法について、試料の適用条件や測定における誤差要因等、測定条件を明らかにするための検討を縮尺及び実大測定を通して行い、測定法の汎用性を向上するための様々な知見を得た。

はじめに残響室法の測定原理について述べ、これに基づく ISO の測定方法及び留意点について具体的に述べた。

次に、模型残響室における縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行い、他機関の測定結果との比較により本測定システムの妥当性を検証した。

その後、縮尺模型残響室を用いた測定を通して、試料の端部処理や配置等の試料適用範囲に関する検討を行った。

測定試料を円形に切り取った場合に、試料端部の凹凸により過大に測定されていた乱反射率を、基準円盤に枠を取り付けることで抑制できることが示された。枠の高さは試料高さ以上必要であり、枠の厚さによる影響は小さいことが確認された。

また、試料の配置による影響は僅かであり、試料の切り出し位置は測定上殆ど問題にならないことが示唆された。一方、単体試料 (リブ) の場合は、試料中心から半径の 3/4 以内に配置すると、配置の影響は 0.1 以内に収まることがわかった。

最後に、インパルス応答の測定条件について、その同期加算方法を理論的に考察した上で、測定における信号周期、回転周期、角度ステップ数等が乱反射率に及ぼす影響を縮尺及び実大測定を通して検討した。結果は以下のようにまとめられる。

- Step 法では、信号の種類に関わらず、角度ステップ数の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音が小さいほど、増加する。
- SS 信号による連続法では、1 回転における信号数の下限値が存在し、それは

Step 法の角度ステップ数に対応する。

- MLS 信号による連続法では、部屋の残響時間に比例する回転周期の下限値が存在する。その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音が小さいほど、長くなり、またインパルス応答の切り出し時間に大きく依存する。

2つの同期加算方法による測定では、高い吸音性の部屋ほど、乱反射率の測定誤差が小さくなることが示されたが、一方で残響時間が短くなることに伴う別の測定誤差が生じる可能性がある。汎用的な測定方法としては、高い吸音性の残響室、例えば、等価吸音面積が試料面積の1~2倍範囲内となる部屋を使用し、角度ステップ数及びSS信号数を120個以上に設定すれば、乱反射率の測定誤差は5%以内に収まると考えられる。

現在、ISO 17497-1では部屋の等価吸音面積の制限が存在せず、規定されている角度ステップ数60~120個で測定を行う場合、普通の残響室や高い乱反射率の試料に対しては乱反射率の過小評価をもたらす可能性があり、注意する必要がある。

Step法による測定では、長時間の測定時間による時変性の影響をうけやすいことが予想されるが、連続法ではその影響が比較的小さく、より実用的であると考えられる。

連続法において使用する測定信号については、SS信号の方がMLS信号より実用性が高いことが示唆された。SS信号を用いる場合、乱反射率は信号数のみにより定まることから簡便である。MLS信号を用いる場合、回転周期は部屋の残響時間及びインパルス応答の切り出し時間にも大きく依存することから、測定条件の設定がより難しくなる。また、回転周期の下限値はSS信号を用いる場合に比べて長く、時変性に起因する別の問題が生じる可能性もある。

## 第3章

# 各種壁面拡散体のランダム入射乱反射率特性の測定

### 3.1 はじめに

前章では、ランダム入射乱反射率の測定法における測定条件を明らかにし、乱反射率測定システムを構築した。しかし、現時点で乱反射率の測定データは少ないことから、壁面の音響拡散性能は明確な形で定量化されていないのが現状であり、拡散の多少を定性的に推測する水準に止まっている。従って、曖昧な経験判断に依るところが大きく、効果的・効率的な設計が行われているとは言い難い。今後音響設計のためのデータ整備が望まれている。

そこで本章では、前章で構築したランダム入射乱反射率の測定システムを用いて各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べる。一般的な拡散壁であるリブ及びブロック構造を対象とし、縮尺模型測定によるケーススタディを通して表面形状に起因する乱反射率の特徴を明らかにする。具体的には、リブ構造壁面に関しては15条件を設定し、角柱高さ、角柱配置、背後空気層、角柱形状、吸音仕上げによる影響を検討する。また、ブロック構造壁面に関しては4条件を設定し、被覆率や配置が乱反射率特性に及ぼす影響を調べる。

### 3.2 リブ構造壁面の乱反射率特性に関する検討

一般的な拡散壁として角柱、円柱からなる1次元周期構造15種を対象として、断面形状・高さ・配列、空気層や吸音仕上げ等の試料条件と乱反射率の関係について、ケーススタディを通して検討する。基準円盤の周囲には、前章で確認したようにプラ

スチック製枠（高さ 50 mm、厚 1 mm）を設置し、試料側面による拡散・吸音の抑制を図った。1/4 縮尺模型の直方体残響室（Fig. 2.2）において測定を行い、測定方法は前章と同様である。なお、室内インパルス応答測定では MLS 信号を用い、信号長・同期加算回数、ターンテーブルの回転速度に関しては前章に示す通りである。

### 3.2.1 角柱高さによる影響

#### 測定試料

25 mm 角（実寸 10 cm 角）の角柱リブを配列した周期構造壁面とし、Fig. 3.1、Table 3.1 に示す通り高さを 4 水準として変化させた。また、高さが不均一な角柱を Fig. 3.1、Table 3.2 に示すように設定した。試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで、基準円盤に高さ 50 mm の枠を取り付けた。

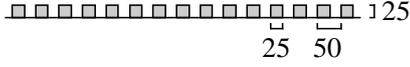
Table 3.1: Measurement conditions for the rectangular surfaces with different heights.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height of the test sample, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]
Type A	Rectangles	50	25	10
Type B				25
Type C				35
Type D				45

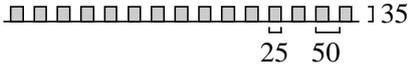
Table 3.2: Measurement conditions for the rectangular surfaces with combinations of different heights.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height of the test sample, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]
Type B	Rectangles	50	25	25
Type B'				25, 45
Type B''				10, 25, 45



Type A  10 Type B  125



Type C  135 Type D  145



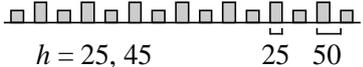
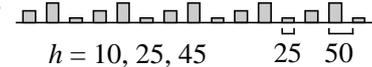
Type B'   $h = 25, 45$  25 50 Type B''   $h = 10, 25, 45$  25 50

Fig. 3.1: Test samples of the rib structure with different heights.

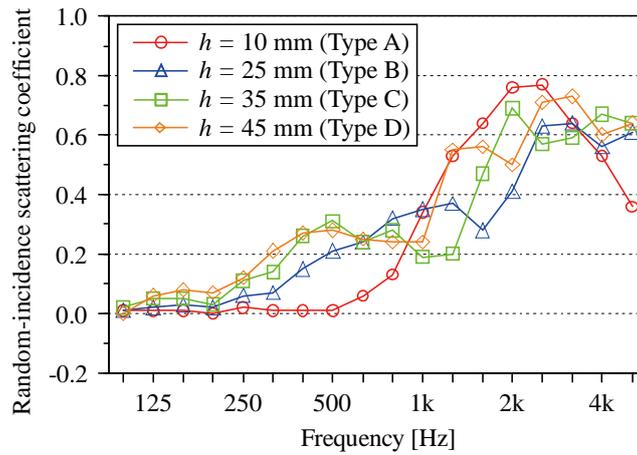


Fig. 3.2: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with different heights.

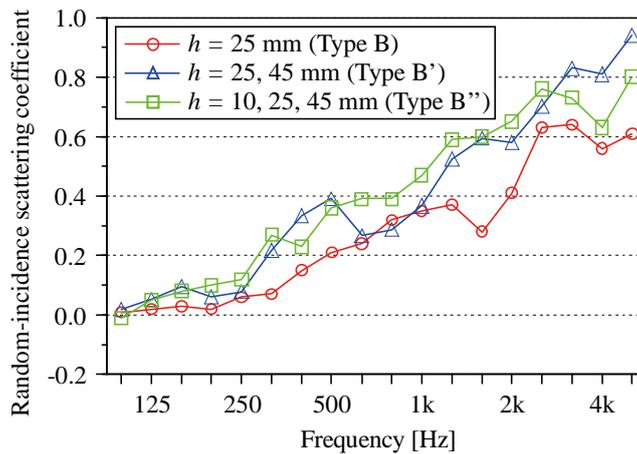


Fig. 3.3: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with combinations of different heights.

### 結果と考察

角柱構造において、高さを変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 3.2 に示す。高さが増加するに従い低音域の乱反射率は若干増大するものの、中高音域では特定周波数域での低下が生じている。この低下は角柱高さが半波長付近の周波数で生じており、高さの増加に伴い低音域に移動する傾向にある。高音域の乱反射率は高さ 10 mm で最も大きくなっており、周期 (50 mm) に比べ 20 % の高さで拡散効果が最大になることがわかる。

次に、異なる高さの角柱を組み合わせた場合における乱反射率の測定結果を Fig.

3.3 に示す。高さ一定の場合（Type B）に見られる周波数上のピーク・ディップが緩和され、高さの変動幅の増大と共に周波数特性がなだらかな単調増加に近づくことがわかる。

### 3.2.2 角柱間隔による影響

#### 測定試料

直立板リブ構造（高さ 25 mm、厚さ 1 mm）を対象として、その間隔を Fig. 3.4、Table 3.3 に示すように変化させ試料の間隔が乱反射率に及ぼす影響を検討する。試料材質はプラスチックである。

また、角柱リブ構造（高さ 25 mm）の間隔を Fig. 3.5、Table 3.4 に示す通り設定した。試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げである。

なお、基準円盤の周囲には、前項と同様に高さ 50 mm の枠を取り付けた。

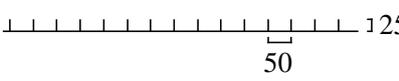
Table 3.3: Measurement conditions for the plates with different periods.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height of the test sample, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]	Number of periods
Type I	Plates	50	1	25	15
Type I'		25			30

Table 3.4: Measurement conditions for the rectangular surfaces with combinations of different periods.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height of the test sample, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]	Number of periods
Type B	Rectangles	50	25	25	15
Type B'''		$50 \pm 5, 15$			



Type I  125  
50

Type I'  125  
25

Fig. 3.4: Test samples of the plate structure with different periods.



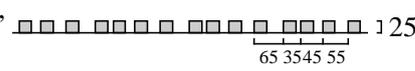
Type B'''  125  
65 3545 55

Fig. 3.5: Test sample of the rib structure with different periods.

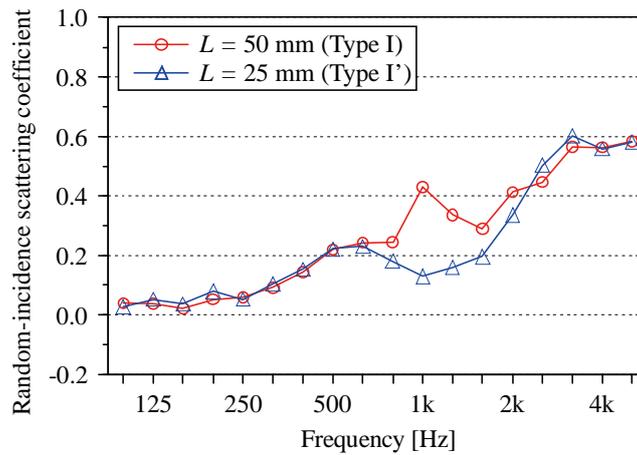


Fig. 3.6: Random-incidence scattering coefficients of the plate, measured with different periods.

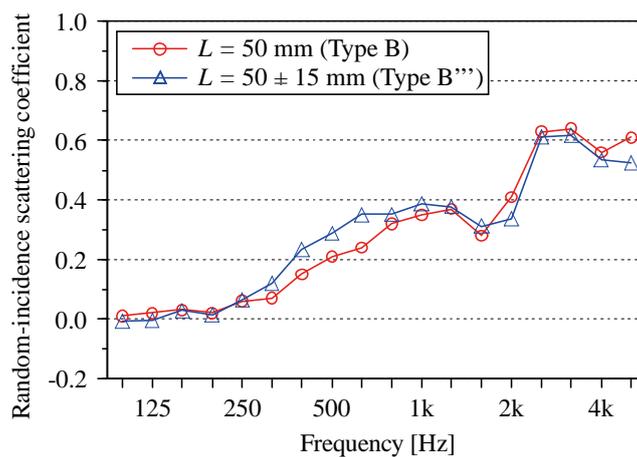


Fig. 3.7: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with irregular periods.

### 結果と考察

直立板リブ構造の間隔を変化させた場合における乱反射率の測定結果を Fig. 3.6 に示す。リブ間隔が25 mmの場合 (Type I') に対して 2 倍の間隔の場合 (Type I) は、中音域の乱反射率は増大、高音域では若干低下し、周波数特性が平坦化されている。角柱間隔が狭い場合、溝部分では音波進行が垂直方向に限定され位相干渉が顕著となるため、乱反射率の周波数特性にピーク・ディップが生じやすいものと考えられる。

角柱リブ構造の間隔を変化させた場合における乱反射率の測定結果を Fig. 3.7 に

示す。リブ間隔が 50 mm で一定の場合 (Type B) に対して、平均 50 mm として間隔を変化させた場合 (Type B'') は、周波数特性が若干平坦化する傾向が見られる。等間隔のリブ構造は音波の入射角度によって異音を発生するとの指摘[82]もあり、不等間隔は異音抑制と共に乱反射率の平坦化に有効と考えられる。

### 3.2.3 背後空気層による影響

#### 測定試料

角柱リブ構造 (高さ 35 mm) を対象として、その背後に空気層を Fig. 3.8、Table 3.5 のように設置して、空気層による乱反射率の挙動を把握する。また、円柱リブ構造 (直径 25 mm) も対象として、Fig. 3.9、Table 3.6 に示すように設定した。試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで、基準円盤に高さ 50 mm の枠を取り付けた。

Table 3.5: Measurement conditions for the rectangular surfaces with and without air layer.  $w$  and  $h$  are width and height, respectively.

	Shape	$w$ [mm]	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Air layer $h$ [mm]
Type C	Rectangles	25	35	35	0
Type C'				25	10

Table 3.6: Measurement conditions for the cylinders with and without air layer.  $d$  and  $h$  are diameter and height, respectively.

	Shape	$d$ [mm]	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Air layer $h$ [mm]
Type O	Cylinders	25	25	25	0
Type O'			35		10



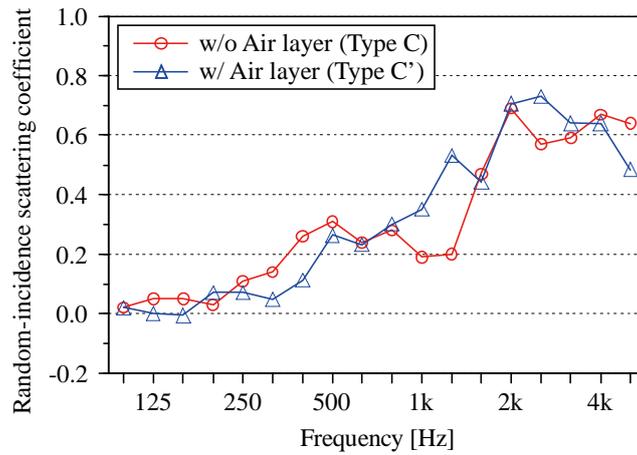


Fig. 3.10: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without air layer.

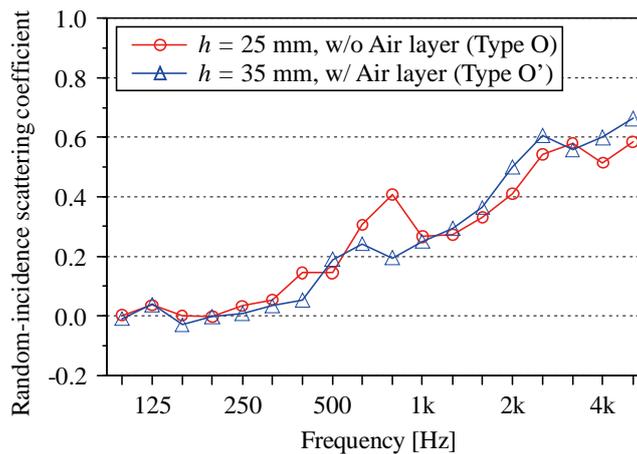


Fig. 3.11: Random-incidence scattering coefficients of the cylinder structure, measured with and without air layer.

### 結果と考察

角柱リブ背後に空気層を挿入した場合 (Type C') の乱反射率を空気層無しの場合 (Type C) と併せて Fig. 3.10 に示す。空気層の挿入により中高音域のディップは解消され、全体的に乱反射率は増大している。リブ背後の空気層を介した音波の回り込みが特定周波数の位相干渉を緩和するものと考えられる。

また、円柱リブ構造を対象とした同様の結果を Fig. 3.11 に示す。背後空気層の挿入はディップを緩和し、周波数特性の平坦化に有効であることが示された。

### 3.2.4 断面形状による影響

#### 測定試料

高さ 25 mm の試料において、断面形状を Fig. 3.1, 3.4, 3.9 及び Table 3.7 に示す通りに変化させて形状に起因する影響を検討する。また、空気層を含んだ高さ 35 mm の試料において、断面形状を Fig. 3.8, 3.9 及び Table 3.8 に示すように設定した。

なお、試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで、基準円盤に高さ 50 mm の枠を取り付けた。

Table 3.7: Measurement conditions with different shapes of the test samples, on the condition of  $h = 25$  cm.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]
Type B	Rectangles	50	25	25
Type I	Plates			
Type O	Cylinders			

Table 3.8: Measurement conditions with different shapes of the test samples, on the condition of total  $h = 35$  cm with the air layer.  $L$  and  $h$  are period and height, respectively.

	Shape	$L$ [mm]	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Air layer $h$ [mm]
Type C'	Rectangles	50	35	25	10
Type O'	Cylinders				

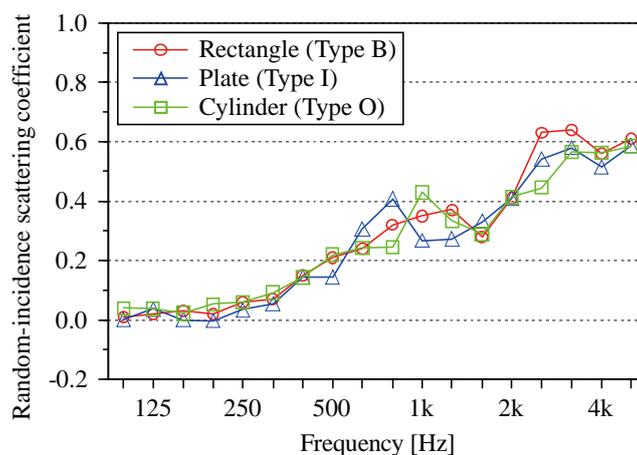


Fig. 3.12: Random-incidence scattering coefficients measured with different shapes of the test sample, on the condition of  $h = 25$  cm.

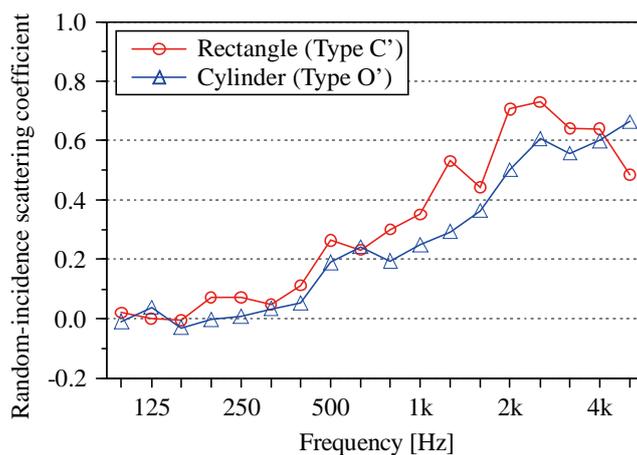


Fig. 3.13: Random-incidence scattering coefficients measured with different shapes of the test sample, on the condition of total  $h = 35$  cm with air layer.

### 結果と考察

高さ 25 mm (空気層無し) の試料において、断面形状を変化させた場合における乱反射率の測定結果を Fig. 3.12 に示す。周期 50 mm の場合では、角柱、直立板、円柱共に比較的類似した乱反射率特性となっている。

高さ 35 mm (空気層有り) の試料において、同様の結果を Fig. 3.13 に示す。空気層無しの場合に比べ全体的になだらかな周波数特性となっている。円柱 (Type O') の場合は角柱 (Type C') と比較して全体的に小さな値を示す。それは隅部が無いため、

端部回折や溝部共鳴による散乱が生じにくいためと考えられる。

### 3.2.5 吸音仕上げによる影響

#### 測定試料

Fig. 3.14 に示すように、吸音材を伴う角柱リブ構造を 3 種類設定し、Table 3.9, 3.10, 3.11 の測定条件で吸音材の有無による影響を検討する。角柱の材質は前項と同様のタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで、吸音性部分は高さ 10 mm のスポンジを使用した。なお、吸音材を伴う試料の吸音率は、いずれも中高音域における値が 0.4~0.6 であり、ISO [6]の上限値を超えている (Fig. 3.15)。

Table 3.9: Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 10$  cm.  $w$  and  $h$  are width and height, respectively.

	Shape	$w$ [mm]	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Sponge $h$ [mm]
Type A	Rectangles	25	10	10	0
Type A'					10

Table 3.10: Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 25$  cm.  $w$  and  $h$  are width and height, respectively.

	Shape	$w$ [mm]	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Sponge $h$ [mm]
Type B	Rectangles	25	25	25	0
Type B''''					10

Table 3.11: Measurement conditions for the rectangles with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 35$  cm.  $h$  is the height.

	Shape	Total $h$ [mm]	Sample $h$ [mm]	Air layer $h$ [mm]	Sponge $h$ [mm]
Type C'	Rectangle	35	25	10	0
Type C''		25	25	0	10



Type A' Type B''' 10 25 50



Type C'' 10 25 50

Fig. 3.14: Test samples of the rib structure with air absorption (sponge).

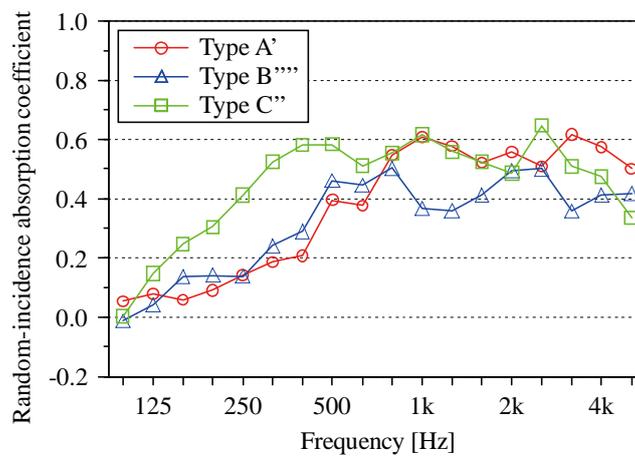


Fig. 3.15: Measured random-incidence absorption coefficients of the test sample.

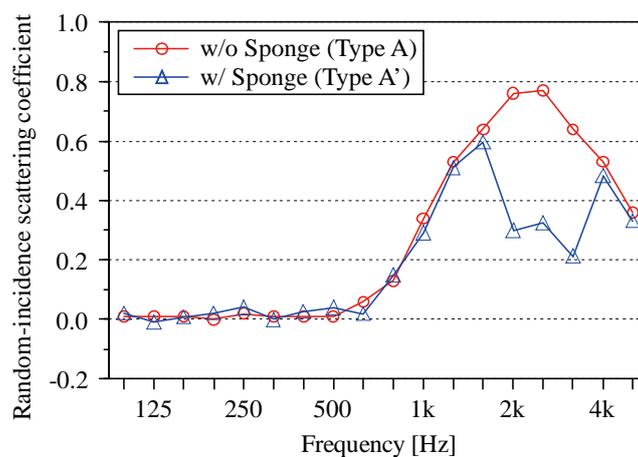


Fig. 3.16: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 10$  cm.

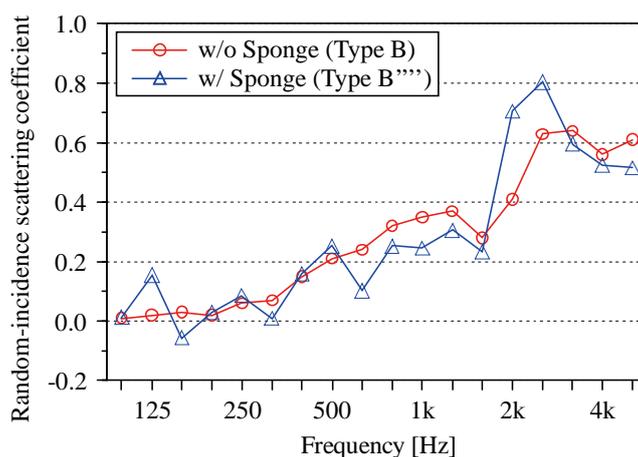


Fig. 3.17: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 25$  cm.

### 結果と考察

高さ 10 mm の角柱リブ構造について、吸音材の有無 (Table 3.9) による乱反射率の測定結果を Fig. 3.16 に示す。吸音材有りの場合、吸音材無しに比べて低中音域では概ね類似した特性を示している。但し、高音域では顕著な低下が見られる。

高さ 25 mm の試料について、吸音材の有無 (Table 3.10) による乱反射率を Fig. 3.17 に示す。全体的に同程度の値を示すものの、吸音材有りの場合は、吸音材無しに対し

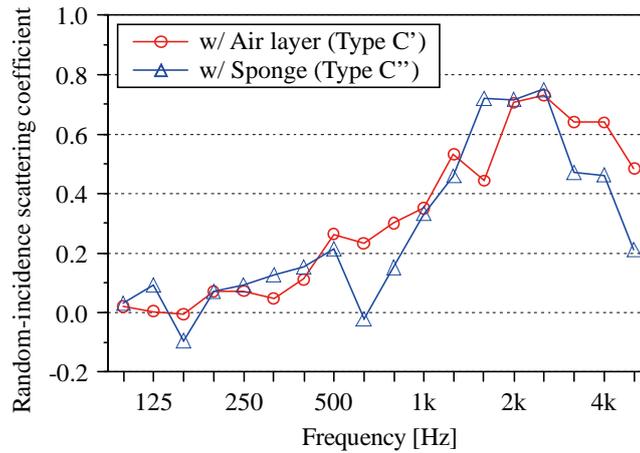


Fig. 3.18: Random-incidence scattering coefficients of the rib structure, measured with and without absorption (sponge), on the condition of total  $h = 35$  cm.

て中高音域で乱反射率の複雑な逆転現象が見られる。溝部において反射波が減衰し、位相干渉に変化が生じることに起因するものと考えられる。

また、背後吸音層を有する角柱リブ構造（総高さ 35 mm）について、吸音材有無（Table 3.11）による結果を Fig. 3.18 に示す。他の高さにおける結果と同様に、乱反射率の周波数特性は類似しているが、中高音域で値が大きく変動する。溝部あるいは背後層による位相干渉に変化が生じるためと考えられる。

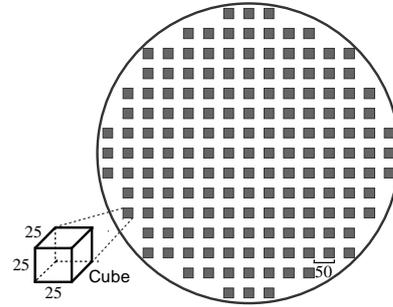
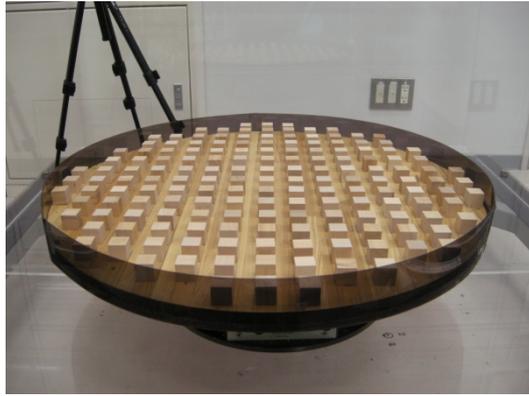
### 3.3 ブロック構造壁面の乱反射率特性に関する検討

本節では、ブロック構造壁面 4 種を対象とし、試料の被覆率や配置が乱反射率に及ぼす影響を調べる。測定は 1/4 縮尺模型残響室（Fig. 2.2）で行い、測定方法は前節と同様である。

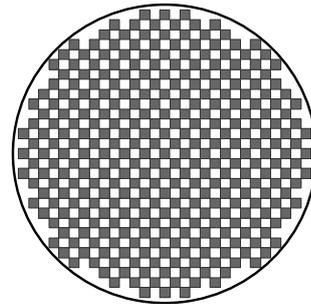
#### 3.3.1 被覆率による影響

##### 測定試料

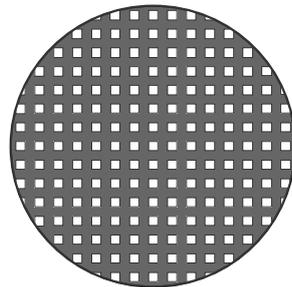
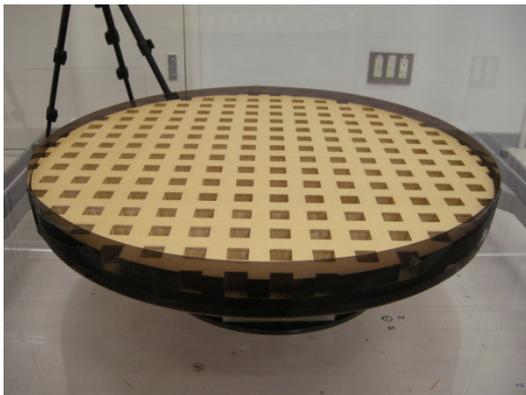
基準円盤上に木製立方体（25 mm 角）を均等配列したものであり、試料の被覆率を Fig. 3.19、Table 3.12 に示す通り様々に設定した。



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 3.19: Test samples of the block structure with different coverage densities.

Table 3.12: Measurement conditions for the block structures with different coverage densities.

	Shape	Size [mm]	Layout	Coverage density [%]	Number of sample
Type 1	Cubes	$25 \times 25 \times 25$	Grid	25	161
Type 2				50	325
Type 3				75	-

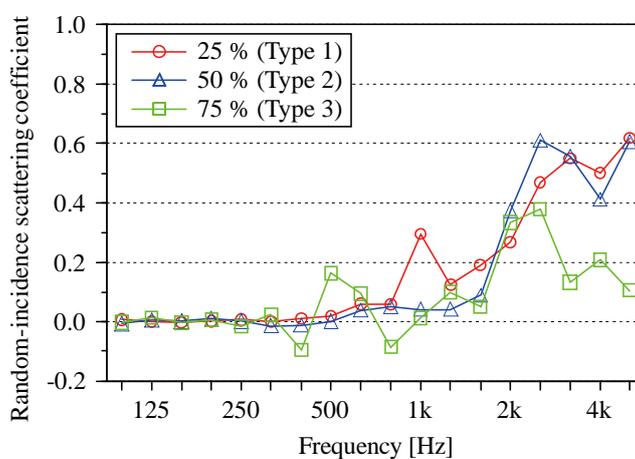


Fig. 3.20: Random-incidence scattering coefficients of the block structure, measured with different coverage densities.

### 結果と考察

立方体を等間隔に配置したブロック構造で被覆率を変化させた場合 (Table 3.12) の乱反射率を Fig. 3.20 に示す。なお、被覆率 75 % では凹みを等間隔に配置している。

被覆率 25 % と 50 % の場合は、高音域の乱反射率は同程度であるが、75 % の場合では大幅な低下がみられる。高い被覆率になるとブロック上面における鏡面反射が支配的になり、凹みにおける端部回折が生じにくくなったものと考えられる。また、いずれの場合も低中音域で乱反射率はかなり小さい傾向にある。

なお、最近の研究[61]では半球をランダム配置した拡散体について被覆率 50 % 程度で平均乱反射率が最大化する報告があり、上記結果とも概ね整合する。

### 3.3.2 配置による影響

#### 測定試料

木製立方体（25 mm 角）を等配列した前項の試料について、被覆率 50 % の試料を Fig. 3.21、Table 3.13 に示す通り変化させ、試料配置による影響を調べる。

#### 結果と考察

立方体の被覆率 50 % において、配置を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 3.22 に示す。ランダム配置（Type 2'）では交互配置（Type 2）に比べて中音域の乱反射率が顕著に増大し、同被覆率の立方体列状配置に相当する角柱リブ構造（Type B）の周波数特性に近づくことがわかる。

Table 3.13: Measurement conditions for the block structures with different layouts.

	Shape	Size [mm]	Layout	Coverage density [%]	Number of sample
Type B	Rectangles	25×25	Equal	50	15
Type 2	Cubes	25×25×25	Grid	50	325
Type 2'			Random		



Fig. 3.21: Test sample of the block structure with random layout.

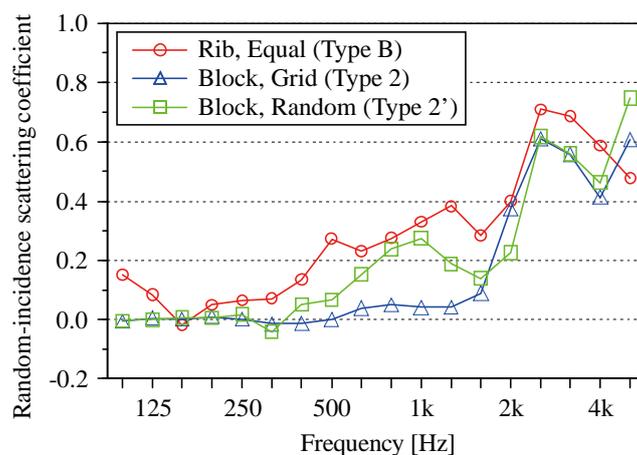


Fig. 3.22: Random-incidence scattering coefficients the block structure, measured with different layouts.

### 3.4 まとめ

本章では、前章で構築したランダム入射乱反射率の測定システムを用いて各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べた。特に、一般的な拡散壁であるリブ及びブロック構造を対象とし、縮尺模型測定によるケーススタディを通して表面形状に起因する乱反射率の特徴を明らかにし、拡散壁設計上で有用な知見を得た。

リブ構造壁面について、角柱高さ、角柱配置、背後空気層、角柱形状、吸音仕上げと乱反射率の関係として次の特徴が見られた。

- 角柱リブ構造の乱反射率は、角柱高さが半波長付近の周波数で低下し、そのディップは高さの増加に伴い低音域に移動する。
- リブ高さ及び間隔の非一様化や背後空気層の挿入は上記ディップを緩和し、周波数特性の平坦化に有効である。
- 円柱・直立板リブ構造の乱反射率は、角柱リブ構造に概ね近似しつつ、高音域に向けて緩やかに増加する。
- リブ構造の溝部または背後に吸音材を挿入した場合、吸音材無しの場合と比較的類似した乱反射率特性を示すが、周波数特性の非平坦化やディップが現れることもあった。

続いて、ブロック構造壁面について、被覆率や配列によるランダム入射乱反射率の特性は以下のようにまとめられる。

- 立方体ブロック構造の乱反射率は、低中音域で小さく、高音域のみで大きくなる。
- ブロックの被覆率は 25～50 % で高音域の乱反射率は同程度であり、それ以上の被覆率では低下する。
- ブロック被覆率 50 % では、ブロックの交互配置よりランダム配置の方が中音域で乱反射率が増大し、同被覆率の角柱リブ構造の周波数特性に近づく。



## 第4章

# 垂直入射乱反射率の測定法の構築

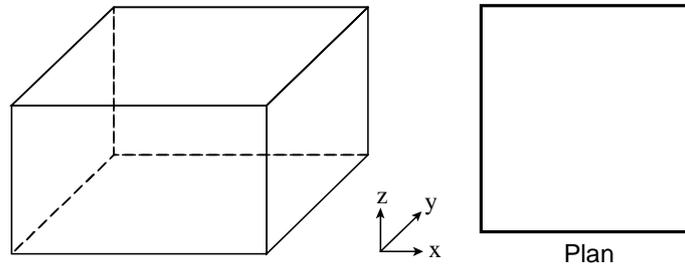
### 4.1 はじめに

前章では、第2章で構築した模型測定システムを用いて、これまで皆無であった各種壁面拡散体のランダム入射条件における乱反射率特性を明らかにした。そのデータベースは、室内音響設計において幾何音響シミュレーションの基礎データとして有用であると共に、拡散体の詳細設計の指針となると考えられる。

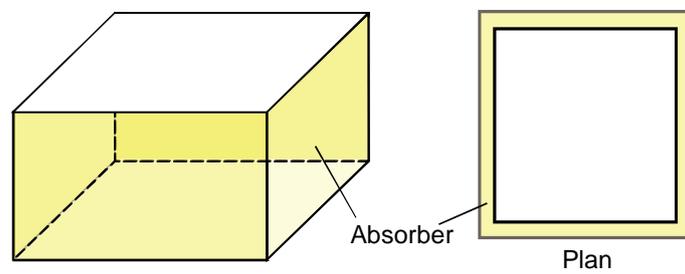
本章では、上記測定法とは全く異なる原理の垂直入射乱反射率の測定法を構築する。まず、新たに提案する垂直入射乱反射率の測定理論について述べる。次に縮尺模型測定により実現し、試料の適用条件及び測定パラメータが結果に与える影響について検討を行い、適切な設定条件を導く。また、数値解析結果との比較により本測定法の妥当性を検証する。さらにその応用として、縮尺模型実験により2次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較を通して、測定法の適用可能性に関する知見を得る。この測定法の確立により、新たな拡散性指標の測定が可能となり、室内音響設計上で重要な一つの手掛かりを提供することが可能となる。具体的には、この指標は室内の平行壁間で生じるフラッターエコー等の音響障害の評価・抑制に有用である。

### 4.2 測定理論

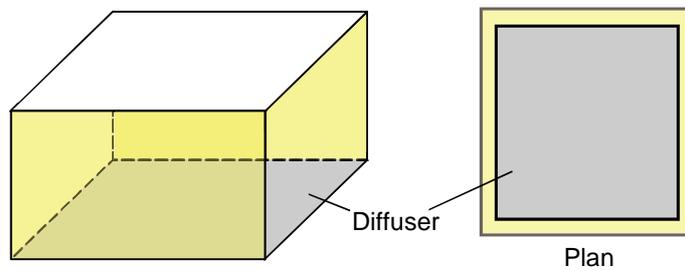
矩形室の四周壁面を吸音性、天井・床面を反射性とし、1次元音場が卓越する条件を作る (Fig. 4.1)。床面全面に試料を設置するものとし、試料設置前後の残響時間  $T_{1,0}$ 、 $T_{1,1}$  を計測する。鉛直方向の1次元音場を仮定すると次式が導かれる[24, 84]。



(a) An empty rectangular room.



(b) Generate a one-dimensional sound field (Alternate reflections between the floor and ceiling) by stalling highly absorbent materials on all side walls of the room.



(c) Install a test sample on the rigid floor and monitor the changes of reverberation times with and without it.

Fig. 4.1: Illustration of the laboratory measurement method for measuring the normal-incidence scattering coefficient in a rectangular room.

$$T_{1,0} = \frac{13.8L_z}{c\{-\ln(1-\alpha_0) + m_0L_z\}} \quad (4.1)$$

$$T_{1,1} = \frac{13.8L_z}{c\{-\ln\sqrt{(1-\alpha_0)(1-\alpha_n)(1-s_n)} + m_1L_z\}} \quad (4.2)$$

但し、 $L_z$  は  $z$  軸方向の平行壁面間の距離、 $c$ 、 $m$  は音速と空気吸収係数である。 $\alpha_0$  は天井・床面の垂直入射吸音率であり、 $\alpha_n$ 、 $s_n$  は試料面の垂直入射吸音率・乱反射率である。従って、試料面の垂直入射乱反射率  $s_n$  は次式で算出される。

$$s_n = 1 - \frac{1-\alpha_0}{1-\alpha_n} \exp\left\{\frac{27.6L_z}{c} \left(\frac{1}{T_{1,0}} - \frac{1}{T_{1,1}}\right) + 2L_z(m_1 - m_0)\right\} \quad (4.3)$$

### 4.3 受音点位置の影響に関する検討

本測定法ではまずインパルス応答を計測し、そこから残響時間及び垂直入射乱反射率を求めることとなる。従って、インパルス応答の測定結果に大きな影響を及ぼす受音点位置の設定は、本測定法における重要な設定項目である。そこで本節では、様々な音源・受音点を設け、設置位置による影響程度について検討する。

#### 4.3.1 測定概要

測定はアクリル板（10 mm 厚）を用いて製作した 1/4 縮尺矩形室（Fig. 4.2）で行った。周壁に使用した吸音材は厚さ 150 mm（実寸 60 cm）、密度  $25 \text{ kg/m}^3$  のウレタンフォームである。空室及び吸音材のランダム入射条件における吸音特性を Fig. 4.3 にそれぞれ示す。空室では全周波数帯域で強い反射性であること、また吸音材は非常に強い吸音性のものを使用し、1 次元音場の卓越する条件を実現した。

測定試料は 25 mm 角（実寸 10 cm 角）のリップを配列した周期構造壁面（Fig. 4.4）であり、材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げとし、1,200 mm×900 mm の床全面に設置した。ランダム入射条件における試料の吸音率及び乱反射率の特性を Fig. 4.5 にそれぞれ示す。

音源と受音点の設置位置を Fig. 4.6 に示す。音源は部屋の隅に設置し、受音点は直交格子状に配した。測定系統は音源点 2 箇所、受音点 5 箇所の 10 系統とし、SS 信号によるインパルス応答測定を行い、逆二乗積分法により 1/3 Oct. band 毎の残響曲

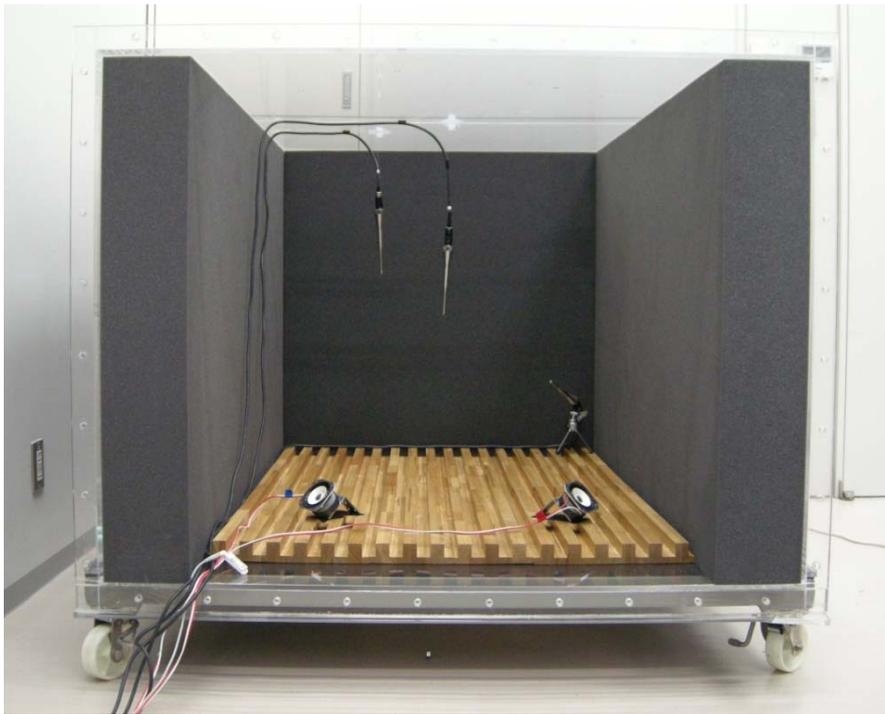


Fig 4.2: 1/4 scaled rectangular room, setting with absorbers on four side walls and the test sample on the floor.

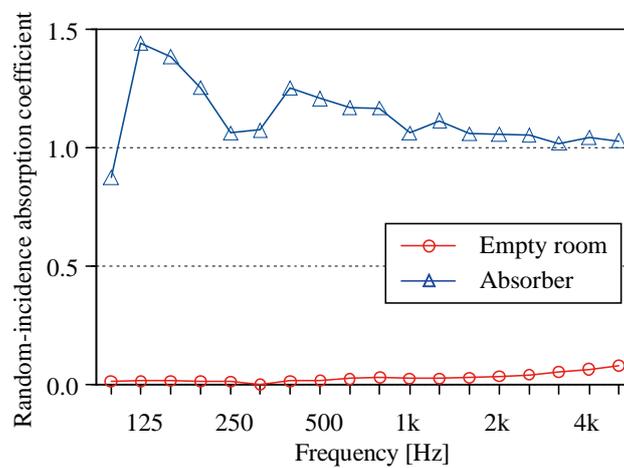


Fig 4.3: Random-incidence absorption coefficients of the empty room and the absorber.

線を求めた。なお、信号長は 1.37 秒、同期加算回数は 10 回、サンプリング周波数は 48kHz で行った。

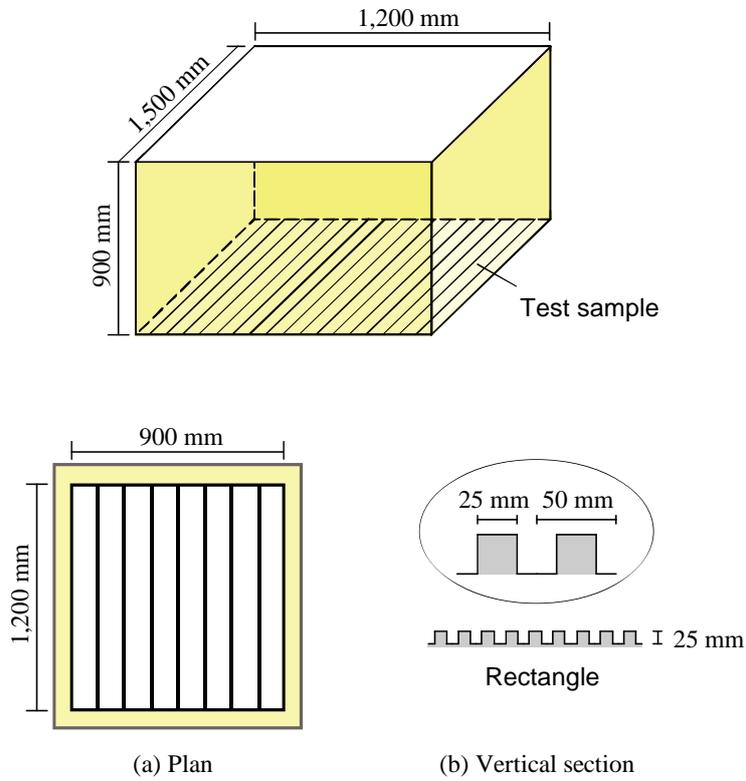


Fig 4.4: Specifications of the test sample.

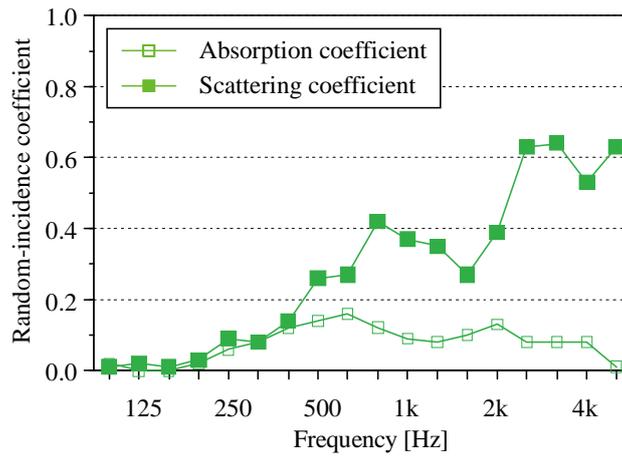


Fig 4.5: Measured random-incidence absorption and scattering coefficients of the test sample.

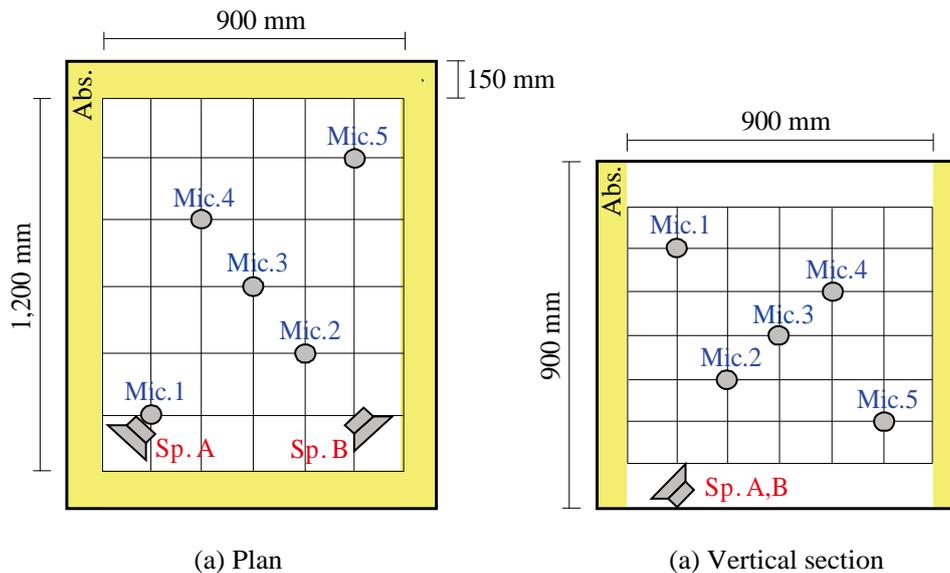


Fig. 4.6: The locations of source and receiving points (2 loud speakers and 5 microphones, total 10 measurements) in the 1/4 scaled rectangular room.

#### 4.3.2 結果と考察

試料設置前において、各受音点位置 (Fig. 4.6) で測定したインパルス応答から算出した矩形室の残響曲線を Fig. 4.7 に示す (周波数は実物換算)。黒線は各受音点で得られた 10 系統の残響曲線を算術平均したものである。各受音点位置における残響曲線は滑らかでなく、凹凸のある曲線となっている。受音点毎のエネルギーレベル差は見られるものの、周波数によらず減衰率は概ね一致していることから、受音点位置による影響は小さいものと考えられる。

上記と同様の各音源・受音点位置において、試料設置後における矩形室の残響曲線を Fig. 4.8 に示す。試料設置前の結果と同様に、各受音点位置における残響曲線は折れ曲がる特性を持ち、受音点毎で若干の差が見られる。しかしながら、それぞれの減衰率は同程度となり、残響曲線の平均値とも全音域で比較的によく対応していることがわかる。

以上の結果を踏まえ、次節の検討においては本検討で用いた音源・受音点位置を採用することとする。

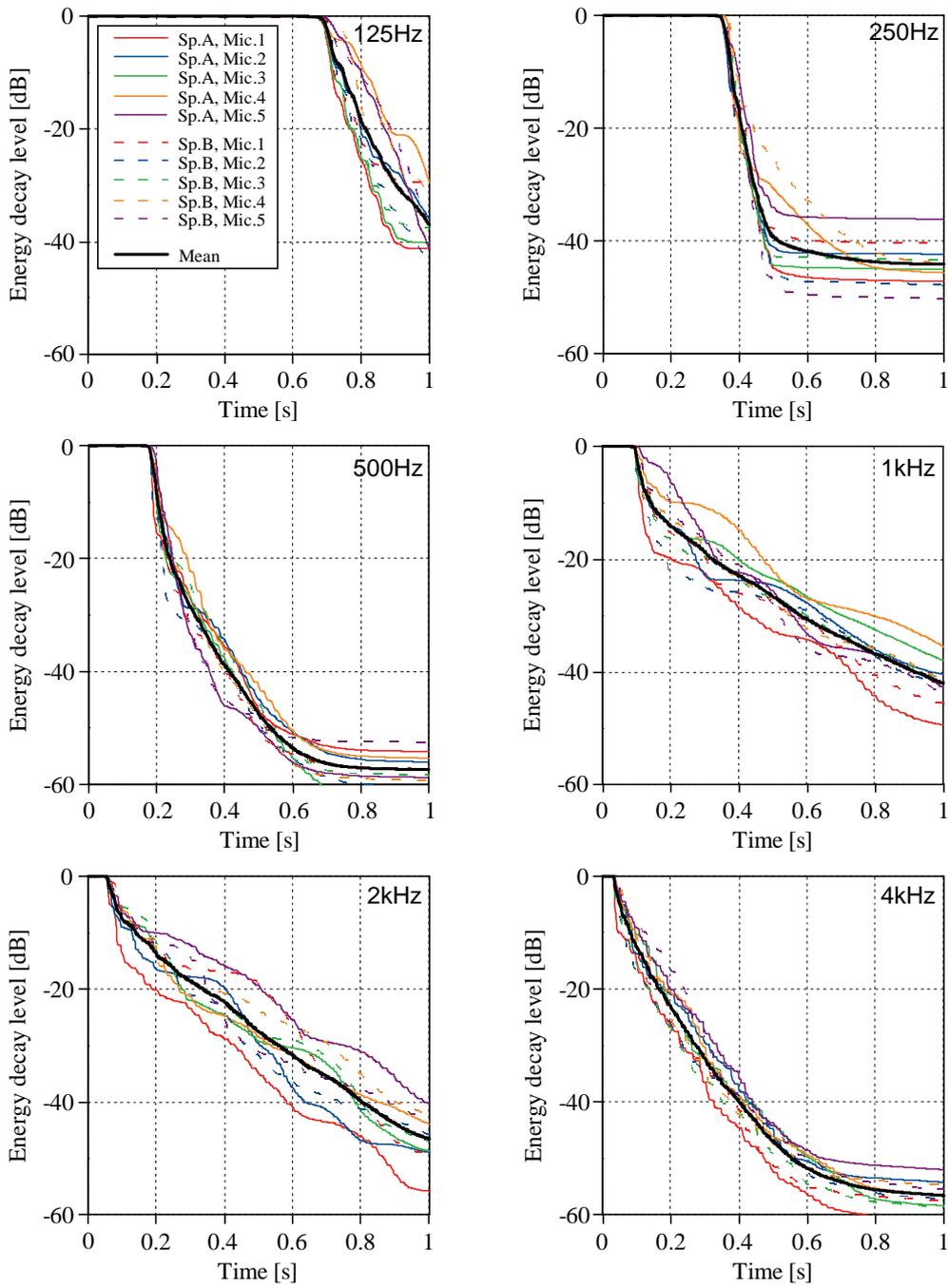


Fig. 4.7: Energy decay curves of the room without test sample, measured for different source and receiving points.

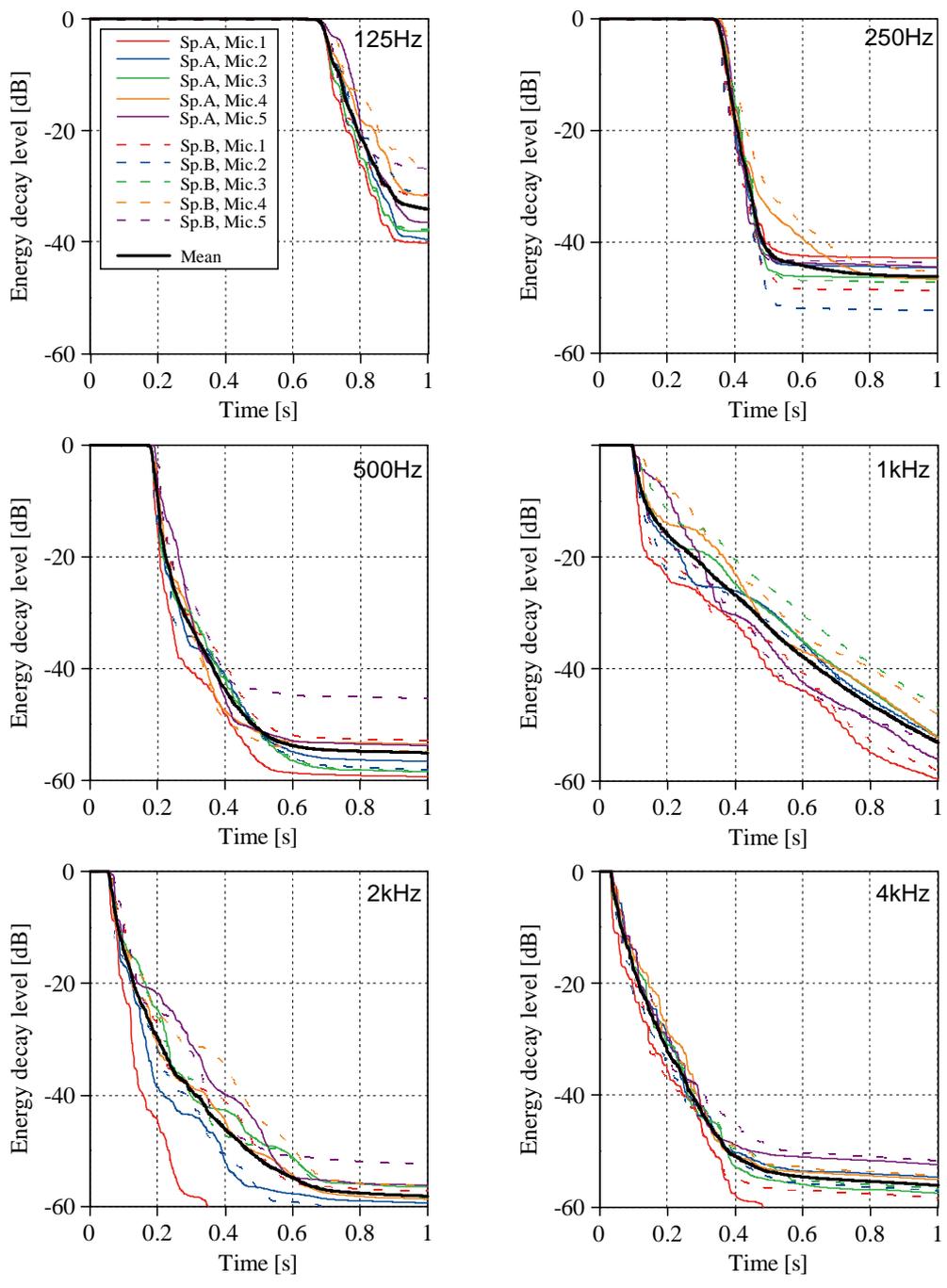


Fig. 4.8: Energy decay curves of the room with test sample, measured for different source and receiving points.

## 4.4 試料の適用条件に関する検討

垂直入射乱反射率を求める測定法を確立するためには、測定試料の適用条件を明らかにする必要がある。そこで本節では、前節 4.1 で提案した測定理論に従い、1/4 縮尺模型矩形室を用いたインパルス応答測定を通して、異なる試料の設置方向や形状による影響を調べ、差異の生じる要因等について検討する。インパルス応答から求めた残響曲線及び残響時間の挙動を把握し、それから同定する垂直入射乱反射率の測定結果を数値解析結果と比較しながら、測定法としての可能性を検証すると共に、適切な設定条件を導くことを目的とする。

### 4.4.1 試料設置方向による影響

平行壁面間の反射が卓越する垂直入射条件においては、試料の配置による乱反射率の変化は生じないと予想されるが、その影響度合いについて確認する必要がある。ここでは、反射指向特性が著しい 1 次元周期構造壁面を対象として取り上げ、異なる試料配置が乱反射率に及ぼす影響を検討し、試料の適用条件についての知見を得る。

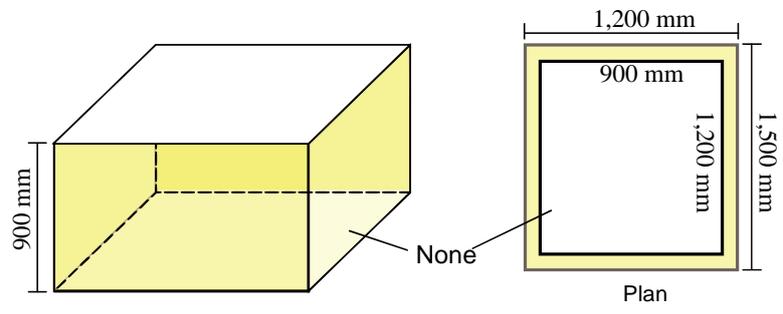
#### 測定概要

吸音材 (150 mm 厚) を設置した 1/4 縮尺模型矩形室の内寸法は 900 mm×1,200 mm×900 mm であり、その容積は 0.97 m<sup>3</sup> (実寸 62.21 m<sup>3</sup>) である。床全面に設置した測定試料は、前節と同様に、25 mm 角のリブを配列した 1 次元周期構造壁面を用い、その設置方向は床面の長手方向に対し平行 (Rib A)、長手方向に対し垂直 (Rib B) の 2 方向とした。測定条件及び試料設置方向の詳細は Table 4.1、Fig. 4.9 にそれぞれ示す。

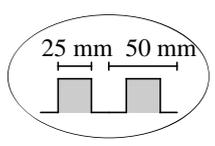
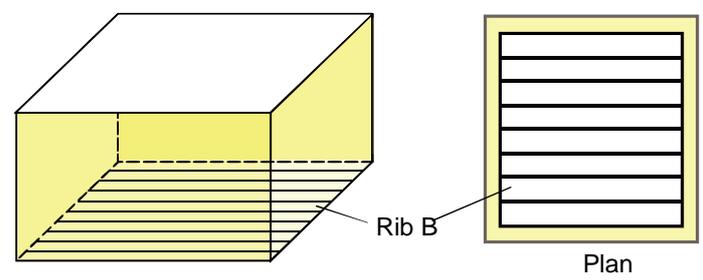
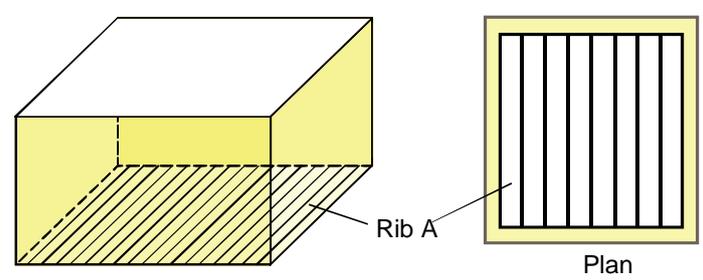
測定方法は前節と同様であり、SS 信号によるインパルス応答測定を行った。逆二乗積分法により 1/3 oct. band 毎の残響曲線を求め、指定範囲の最小二乗近似より得られる 10 系統の残響時間の平均値を算出した。なお、Eq. (4.3) による乱反射率の計算では、床面・試料面の垂直入射吸音率は非常に小さいと想定し、0 とした。

Table 4.1: Measurement conditions with and without the test sample. The test samples are arranged in two ways as Fig. 4.9(b).

	Absorber	Test sample
None	Polyurethane foam	Not present
Rib A		Rectangles arranged with rib A
Rib B		Rectangles arranged with rib B



(a) w/o Test sample



Rib  25 mm

(b) w/ Test sample

Fig. 4.9: Specifications of the measurement condition by changing sample arrangements.

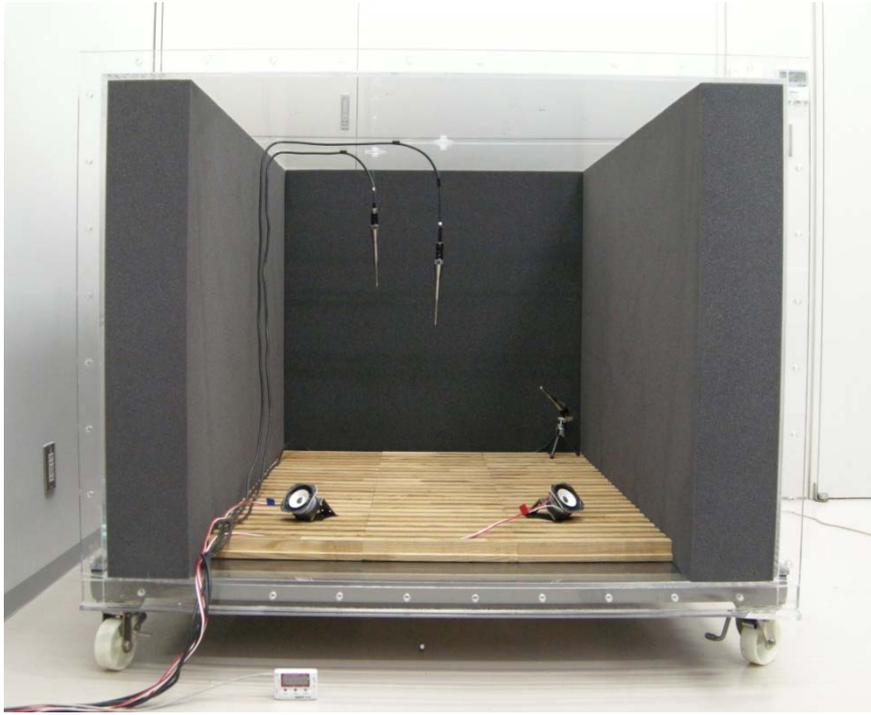


Fig. 4.10: 1/4 scale rectangular room with the test sample of Rib B setting on the floor.

## 結果と考察

### ■ 残響曲線の性状

試料設置前後における矩形室の残響曲線を Fig. 4.11 に示す。それぞれの残響曲線は 10 系統の残響曲線を算術平均したものである。試料設置前後共に、全音域における残響曲線は非拡散音場の影響により折れ曲がる傾向となっている。初期の減衰率は大幅に変化していて、後期に推移するに従い段々直線的な減衰を示す。

試料設置前に比べて設置後は、減衰量が高音域になるにつれて大きくなり、2 kHz 付近で最大となる。特にその帯域の残響曲線は大幅に湾曲する傾向が見られる。また、試料設置方向により変化量には僅かに差が見られるが、概ね一致していることが確認された。

なお、十分な SN 比が確保された区間を、125 Hz で 25 dB、250 Hz で 35 dB、500 Hz で 45 dB、1 kHz 以上で 50 dB と見なし、以降の残響時間の同定区間はそれぞれの範囲内に限定する。

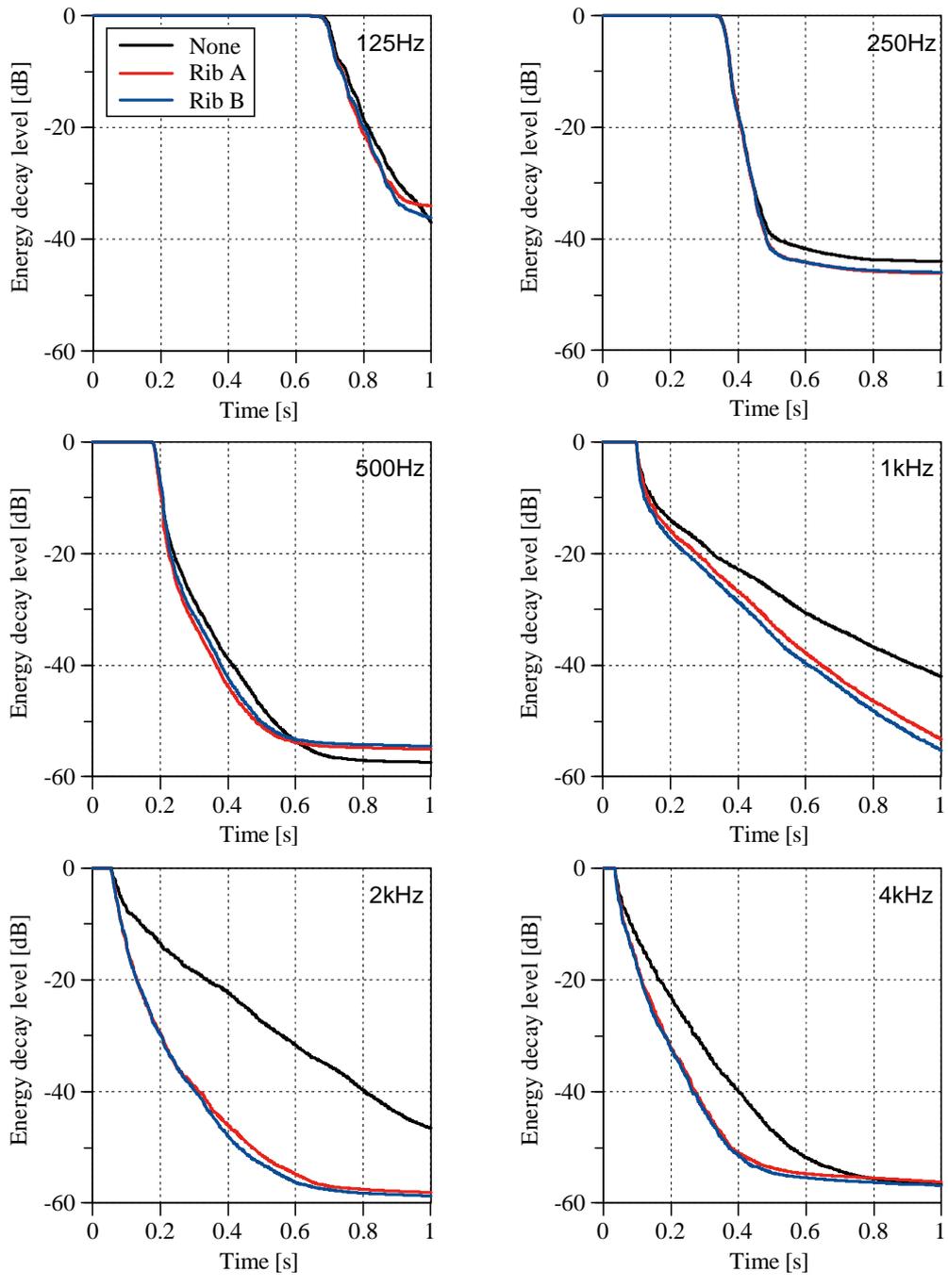


Fig. 4.11: Average energy decay curves with and without the test sample in 1/3 octave bands. The test samples of Rib A and B are arranged in two ways as Fig. 4.9(b).

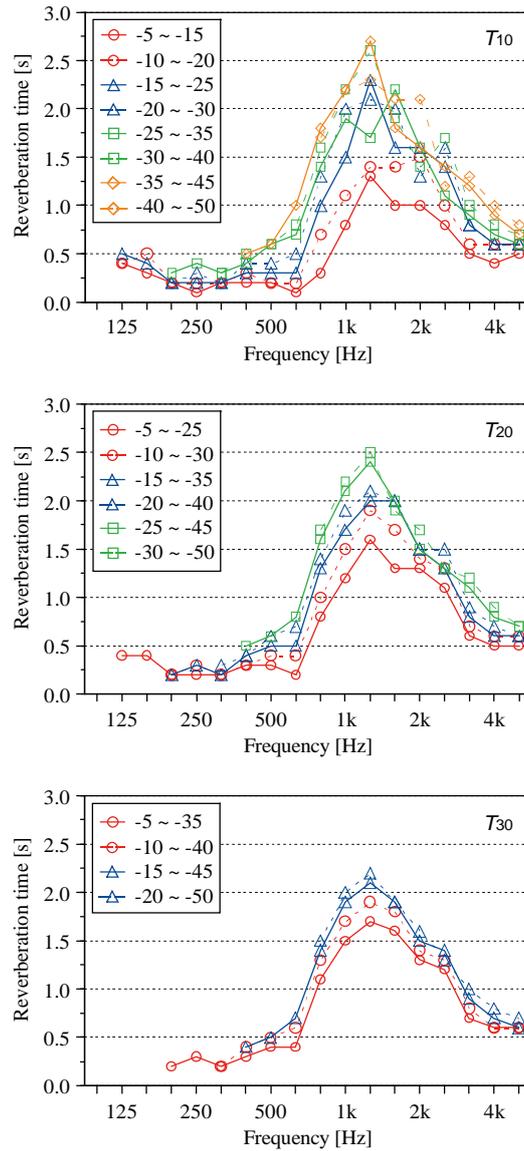


Fig. 4.12: Reverberation times estimated by different decay level ranges without the test sample.

#### ■ 残響時間の同定

試料設置前において、SN 比が確保できた残響曲線の範囲内で、10, 20, 30 dB 間隔で同定した残響時間（以下、 $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ）の結果を Fig. 4.12 に示す。全体的に、初期に対して後期の同定区間で残響時間が全音域で長くなっている。これは残響曲線が折れ曲がることに起因するものと考えられる。また、同定間隔が広がると値がそれぞれ近づく結果となり、その中で初期より後期の同定区間で残響時間毎の差が小さくなる傾向が見られた。

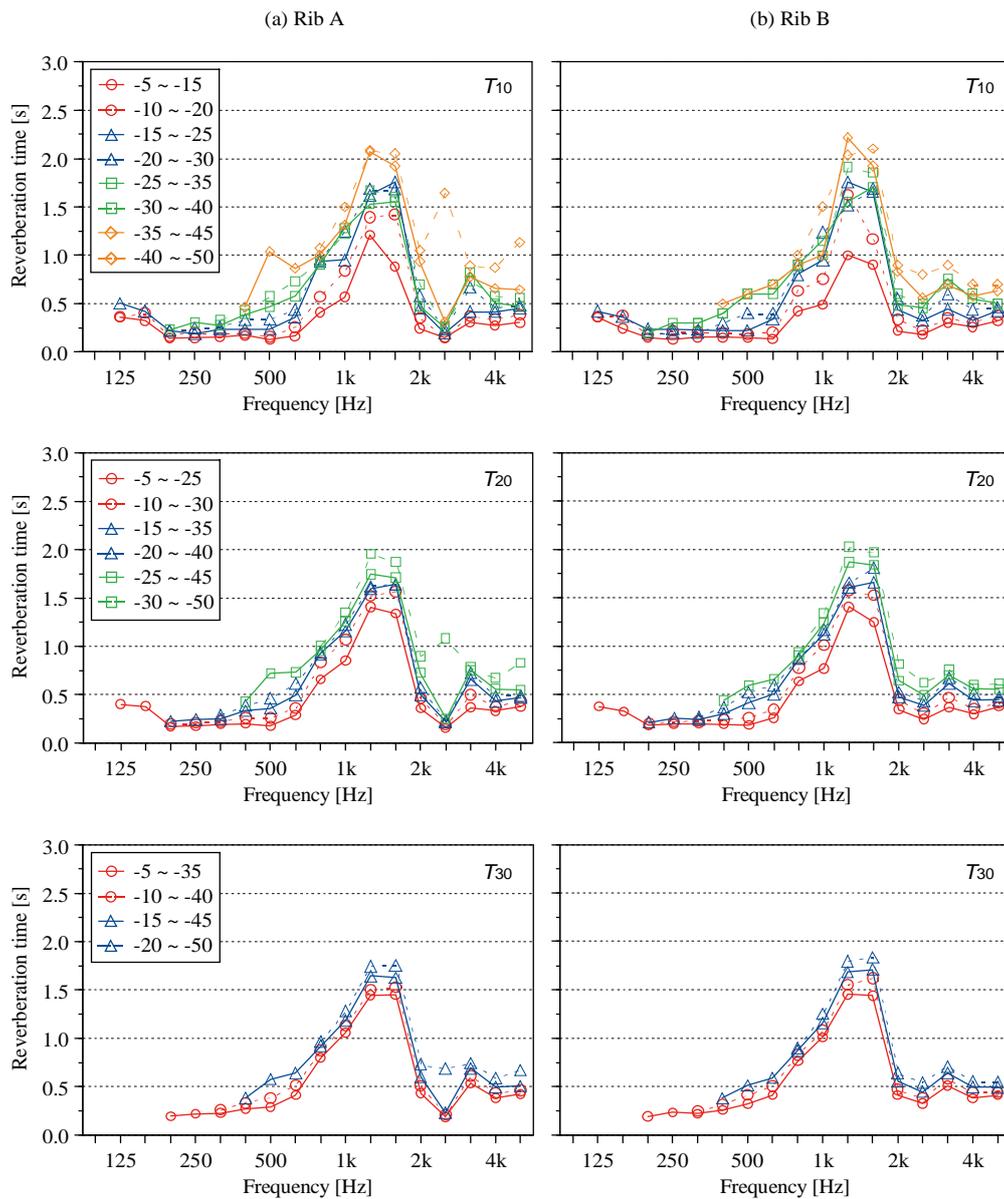


Fig. 4.13: Reverberation times estimated by different decay level ranges with the test samples of (a) Rib A and (b) Rib B.

試料設置後（Rib A, Rib B）において、上記と同様の間隔で同定した残響時間の結果を Fig. 4.13 に示す。試料設置前の場合と同様に、後期の同定区間で残響時間が長くなり、同定間隔が広がると値が概ね近づく傾向が見られた。試料設置前に比べて設置後は、2.5 kHz 付近で残響時間が非常に短くなる様子が見られる。

試料設置方向による大きな変化は見られないものの、Rib A の場合では 2.5 kHz 付近で残響時間の差が非常に小さくなっている。

## ■ 垂直入射乱反射率の同定

試料 (Rib A, Rib B) の垂直入射乱反射率について、上記の各範囲で同定した残響時間から算出した結果を Fig. 4.14 に示す。

乱反射率の測定値をみると、低音域では1次元音場として成立しておらず、測れていないことがわかる。全体的に、初期より後期の同定区間で値が低下し、同定間隔が広がると値が近づく傾向にある。

1 kHz 付近では乱反射率が概ね 0.1 以下の小さい値になり、同定区間による差異も小さい。しかし、2.5 kHz で急激に増加する傾向が見られ、同定区間による変動も大きく、最大 0.3 となっている。特に、そのピークは周期と波長が等しいときに生じていて、垂直入射乱反射率は  $L/\lambda = 1$  の関係になる周波数域で大きくなる特性を持つことがわかった。

試料設置方向を変化させた乱反射率特性は全音域で類似しており、設置方向による影響は小さいと言えるが、2.5 kHz で最大 0.2 の乖離が見られる。長手方向に対し平行方向に設置した Rib A の場合は、鉛直方向以外の反射成分が Rib B の場合に比べてより広い吸音面積に到達することが要因であると考えられる。

## ■ 数値解析結果との対応

第 5 章の波動数値解析による垂直入射乱反射率の計算結果を以上の測定結果と併記し、Fig. 4.14 に示す。

乱反射率の測定値は計算値と 1 kHz 付近で非常に良い対応を示し、特に、後期から同定した測定値ほど、計算値と近い結果となった。時間が経過すると共に、1次元音場が卓越する条件が満たされ、鉛直方向の反射線分のみが残されたためと考えられる。周波数特性が上がり始まる 2 kHz 付近でも、特に減衰レベルが  $T_{10}$  で -25~-35 dB、 $T_{20}$  で -15~-35 dB、 $T_{30}$  で -10~-40 dB の区間で算出した測定値は計算値と良い対応を示しており、SN 比が十分に確保された範囲内で後期から乱反射率を同定すれば妥当な結果が得られることがわかった。

一方で、2.5 kHz では、測定値・計算値共に急増しピークを持つものの、値の差が大きくなり 0.1 以上に達する。上記の周波数域とは異なり、初期から同定した測定値ほど、計算値と近づく結果となっている。急峻なピークを持つ周波数帯域でずれが生じた原因として考えられるのは、測定値は 1/3 oct. band 毎の中心周波数の結果である反面、計算値は 1/3 oct. band 毎の単一周波数の結果であるため、バンド値より大きくなったと考えられる。

試料設置方向の関しては、Rib B の場合に比べて Rib A の場合がより計算値と良い対応を示し、鉛直方向以外の反射成分がより広い吸音面積に到達することで、より1次元音場が卓越する条件になると考えられる。

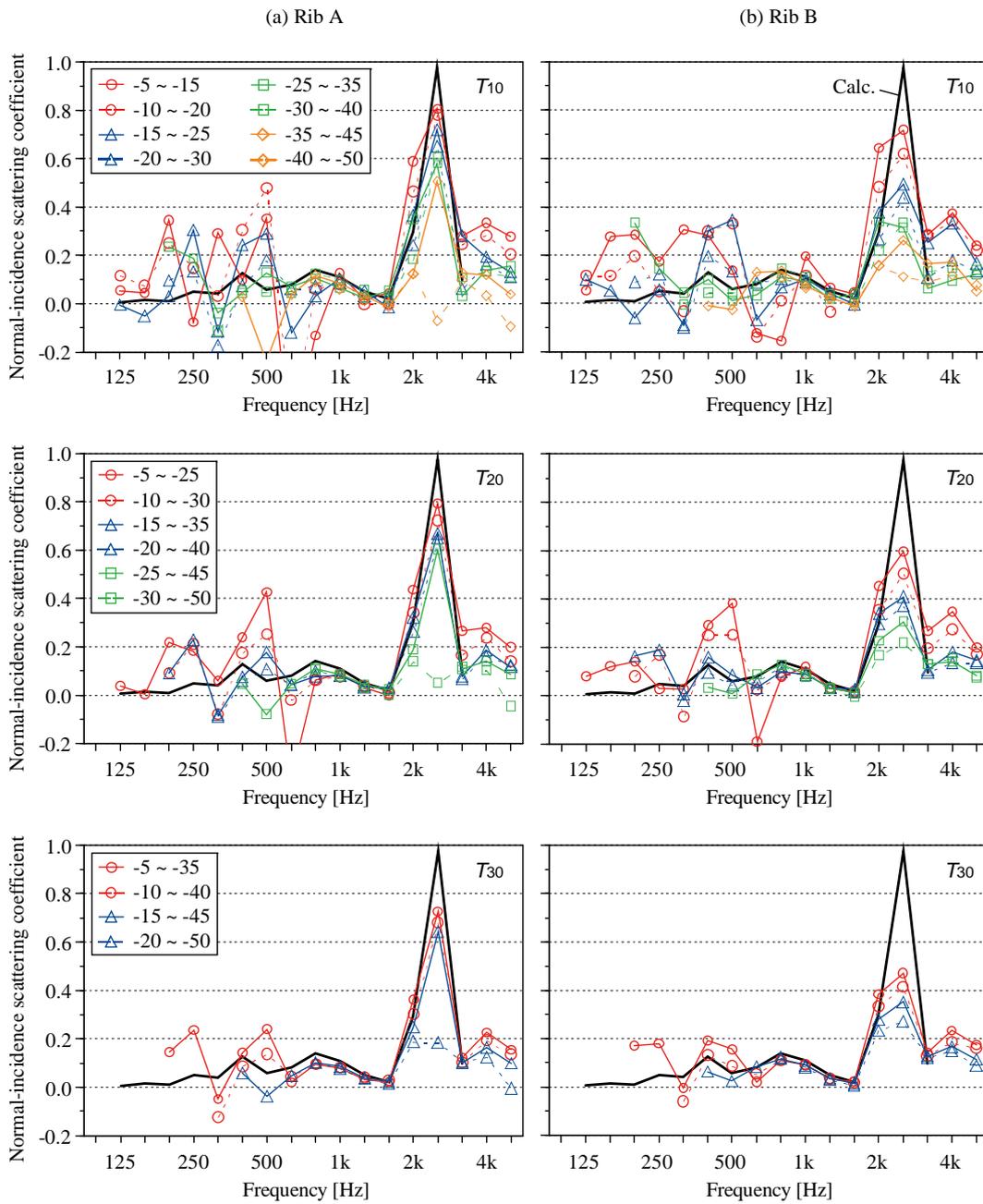


Fig. 4.14: Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Rib A and Rib B. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

以上より、垂直入射乱反射率の周波数特性は急峻なピーク・ディップを持ち、値が大きく変化するものの、測定値は計算値と比べピーク・ディップの位置が非常に良く対応し、また後期から同定した値は計算値と非常に良い対応を見せる等、測定法としての可能性が示唆された。

以上の結果を踏まえ、以降の検討では、試料設置方向は Rib A のように設定し、周波数分析は 500 Hz 以上とし、その結果のみを議論することとする。

#### 4.4.2 試料形状による影響

前項では、垂直入射乱反射率の測定理論に従った縮尺模型測定を通して、測定法としての有効性を検証すると共に、試料設置方向による影響を明らかにした。ここでは、試料形状に起因する音響拡散の程度を評価するのに十分な測定条件を得るため、異なる形状や高さを持つ 1 次元周期構造壁面を対象として取り上げ、測定法における試料の適用範囲に関する知見を得る。

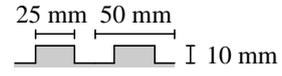
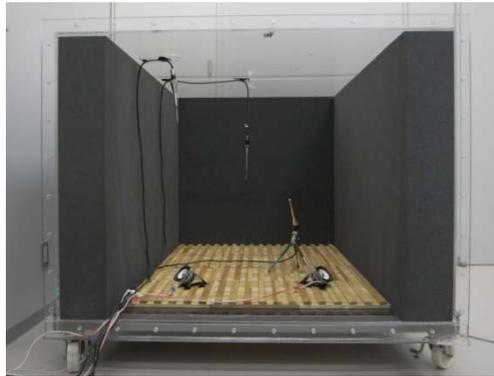
#### 測定概要

測定は、前項と同様の 1/4 縮尺模型矩形室で行い、測定の様子を Fig. 4.14 に示す。測定試料は、前項と同様の 1 次元周期構造壁面（周期 50 mm、幅 25 mm）を用いた。Table 4.2 のような試料の形状や高さが異なる 3 種類の壁面を対象とし、その設置方向は Fig. 4.15 に示すように設定した。

測定方法は前節と同様であり、Eq. (4.3) による乱反射率の計算では、床面・試料面の垂直入射吸音率共に 0 とした。

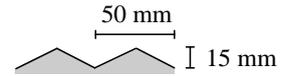
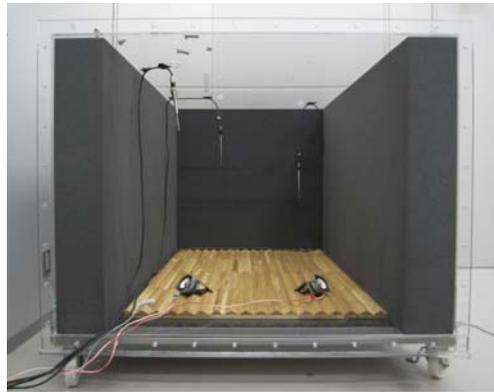
Table 4.2: Measurement conditions of various test samples by changing shapes and heights.  $L$  and  $h$  are period and height of the test sample, respectively.

Shape	Shape	$L$ [mm]	$h$ [mm]
Type R	Rectangle	50	10
Type T	Triangle	50	15
			25



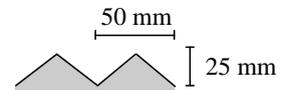
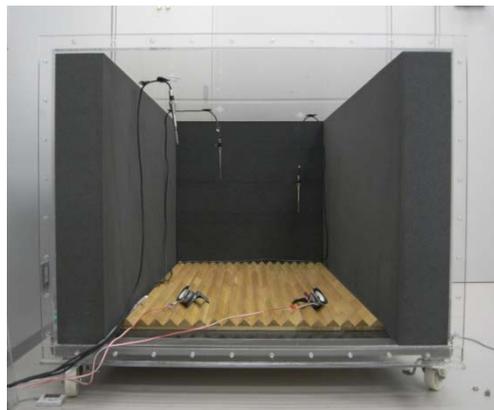
Vertical section

(a) Type R,  $h = 10$  mm



Vertical section

(b) Type T,  $h = 15$  mm



Vertical section

(c) Type T,  $h = 25$  mm

Fig. 4.15: Specifications of 1-dimensional test samples by changing the shapes and heights.

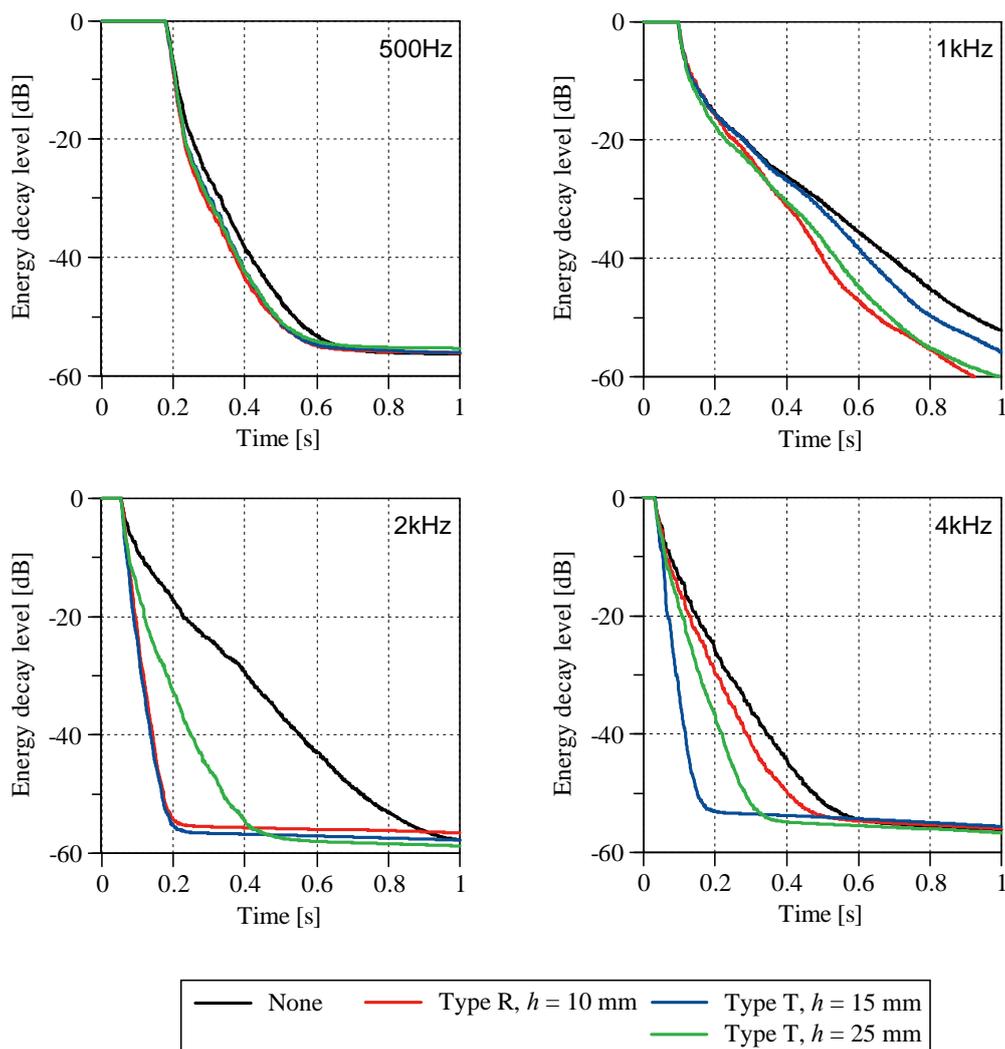


Fig. 4.16: Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands. Type R and T are the rectangular and triangular shapes, respectively.

## 結果と考察

### ■ 残響曲線の性状

試料の形状や高さを変化させた場合における矩形室の残響曲線を Fig. 4.16 に示す。それぞれの残響曲線は 10 系統の残響曲線を算術平均したものである。試料設置前後共に、初期の残響曲線は折れ曲がるが、後期に推移するに従い相対的に直線的な減衰を示す。試料設置前に比べて設置後は、500 Hz では減衰量が僅かに変化するものの、高音域になるにつれて大きくなり、2 kHz 付近で大幅に減衰している。

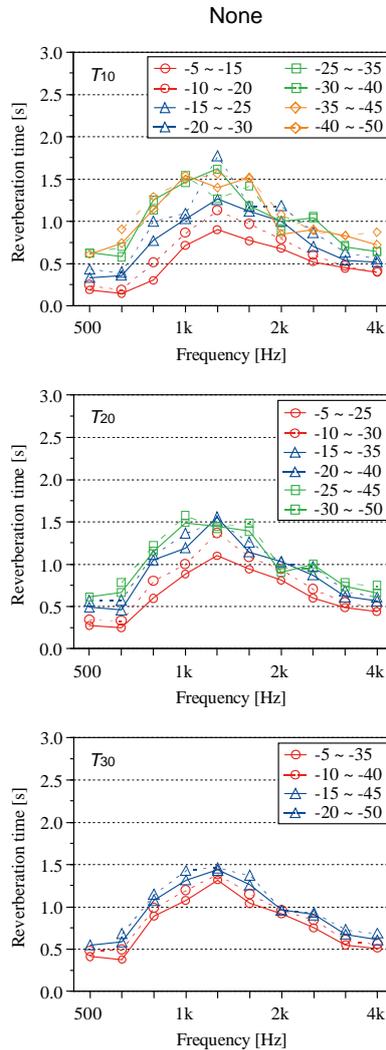


Fig. 4.17: Reverberation times estimated by different decay level ranges without the test sample.

#### ■ 残響時間の同定

試料設置前において、SN 比が確保できた残響曲線の範囲内で、10, 20, 30 dB 間隔で同定した残響時間の結果を Fig. 4.17 に示す。前項の検討結果と同様に、残響曲線の折れ曲がる特性により後期の同定区間で残響時間が長くなる傾向が見られた。また、同定間隔が広がると値の差が小さくなった。一方で、前項の結果より残響時間が全周波数帯域で短くなっていることがわかる。温度・湿度の変化による影響が表れたと考えられる。

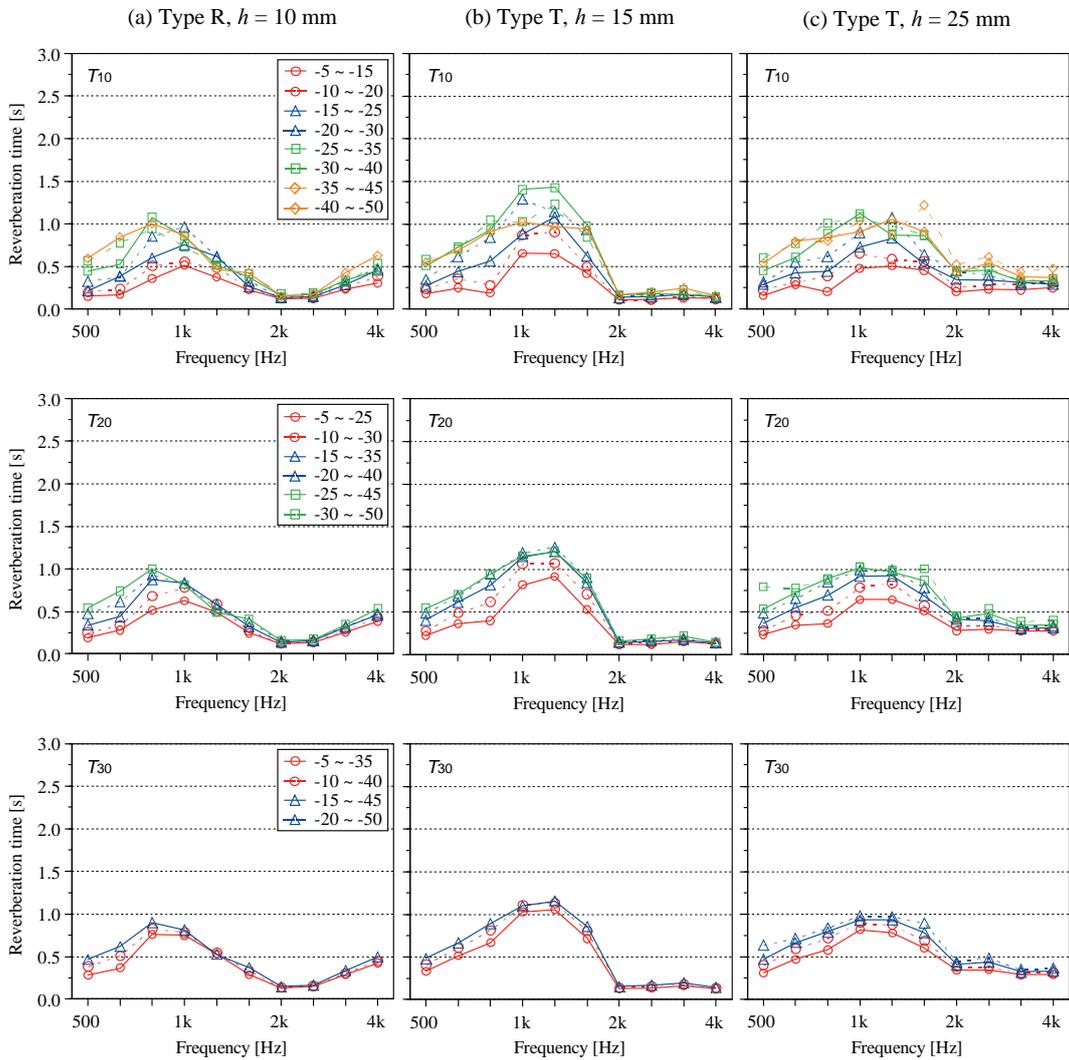


Fig. 4.18: Reverberation times estimated by different decay level ranges with test samples by changing the shapes and heights.

同様の同定区間において、試料設置後の残響時間の結果を Fig. 4.18 に示す。試料設置前に比べて設置後は、全周波数帯域で減衰しており、特に 2 kHz 付近で 3 種類の測定試料共に急激に低下する。その周波数域では、同定区間による残響時間の差も相対的に小さくなっている。

## ■ 垂直入射乱反射率の同定

各範囲 ( $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) で同定した残響時間から算出した試料 (Type R,  $h = 10$  mm) の垂直入射乱反射率の測定結果を Fig. 4.19 に示す。なお、図中の黒線は第 5 章の波動数値解析による垂直入射乱反射率の計算結果である。

乱反射率の測定結果を計算結果と比較して見ると、値の差が大きいところも見られるが、乱反射率の傾向は概ね一致している。

500 Hz 付近においては、初期より後期から同定した値は計算値と 0.05 程度の僅かな差は見られるが、よく対応していると言える。1 kHz, 1.25 kHz においては、同定した間隔が広がるに従い測定値の傾向が変わっており、およそ 0.1 程度の差が生じている。 $T_{10}$  で求めた測定値の場合は、後期から同定した値が計算値に近づく結果となっているが、 $T_{20}$ ,  $T_{30}$  で求めた測定値の場合は、逆に初期から同定した値が計算値と近似する傾向にある。残響曲線が直線的ではなく大幅に折れ曲がることに起因するものであると考えられる。周波数特性が急激に増加する 2 kHz 付近の差異については、前節でも確認したように、測定値は 1/3 oct. band 毎のバンド値、計算値は単一周波数の結果であるためと考えられる。

以上により、測定結果は計算結果と周波数特性の傾向、大きく傾きの変化する周波数が概ね一致していることから、全体的によく対応していると言える。

試料 (Type T,  $h = 15$  mm) の垂直入射乱反射率について、上記の各範囲で同定した残響時間から算出した測定結果を計算結果と併せて、Fig. 4.20 に示す。上記の結果と同様に、周波数特性が大きく変化する周波数帯域で非常によく対応しており、特に -25~-45 dB ( $T_{20}$ ) で同定した測定値は計算値と良く近づく結果となっている。全体的に、後期からの同定した値ほど、計算値に近づく結果となっている。3.15 kHz においては、0.3 以上の差が見られることから、計算機の計算容量の問題で計算されていない 4 kHz における結果は大きい値を示すことが予想できる。

試料 (Type T,  $h = 25$  mm) の垂直入射乱反射率について、同様の結果を Fig. 4.21 に示す。上記の結果と同様に、同定区間による測定値の変化は大きいものの、後期から求めた値ほど、計算値と良い対応を示している。他の試料と比べて、周波数特性が比較的穏やかであり、全周波数帯域で大きな変化がないためと考えられる。

乱反射率の周波数特性が異なる試料を対象とした以上の検討により、測定結果は計算結果と周波数特性の傾向や大きく傾きの変化する周波数が概ね一致していることから、全体的によく対応していると言え、本測定法の有効性を確認した。

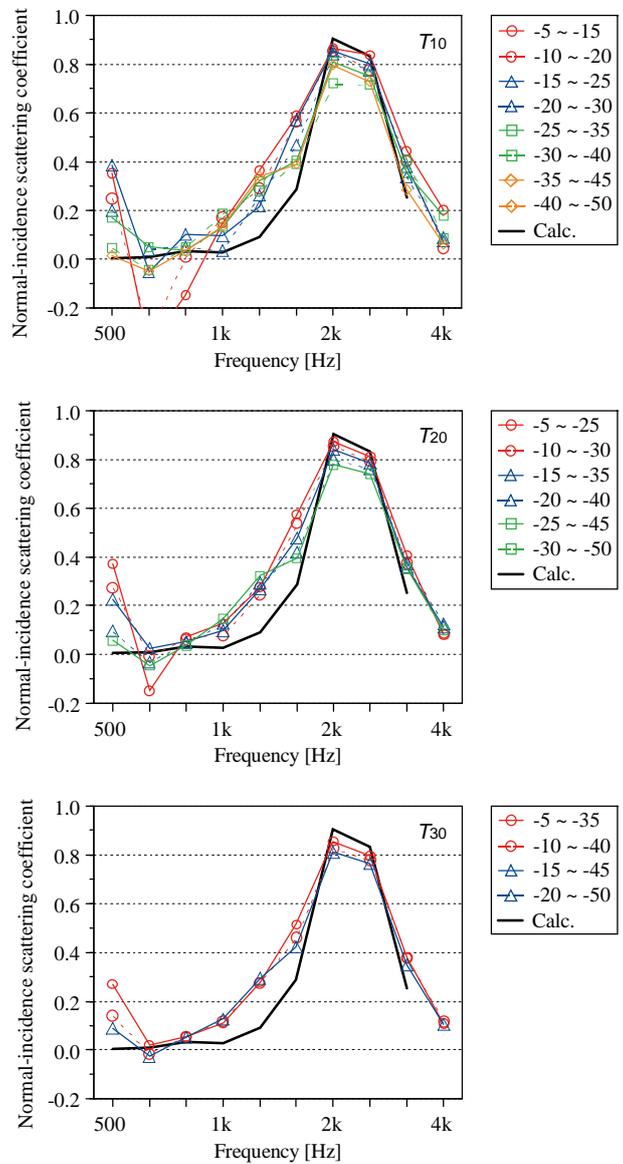


Fig. 4.19: Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Type R with  $h = 10$  mm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

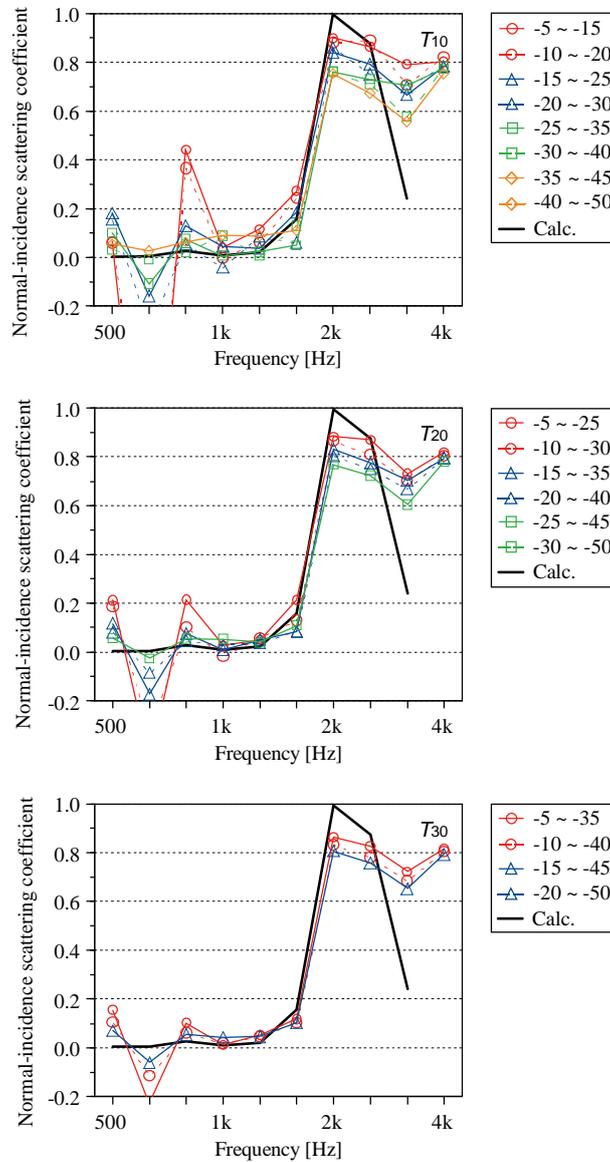


Fig. 4.20: Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Type T with  $h = 15$  mm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

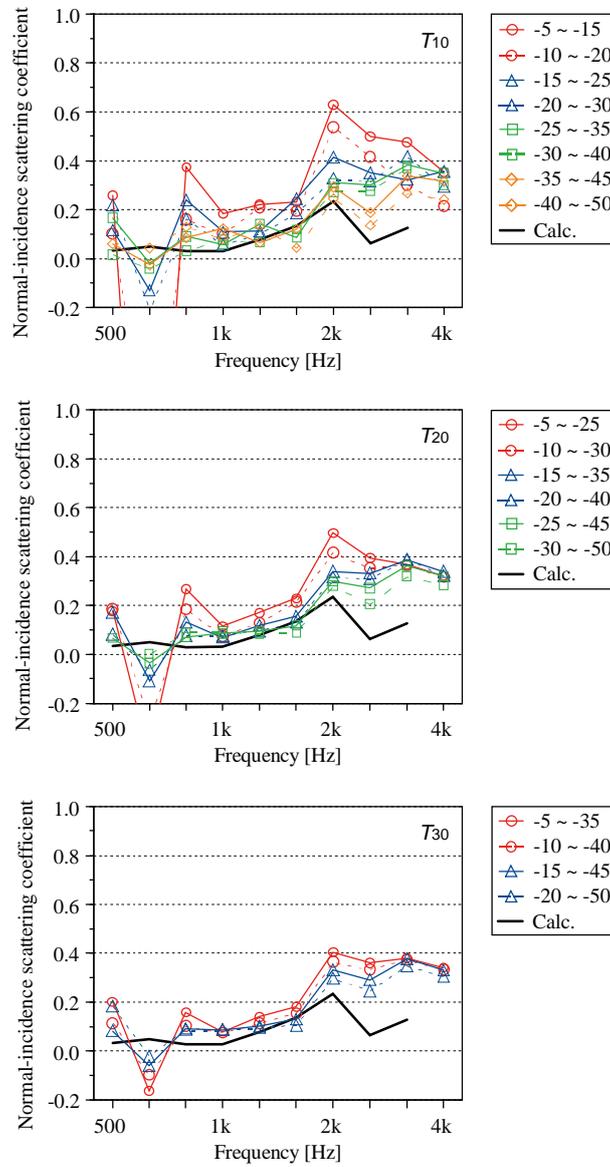


Fig. 4.21: Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Type T with  $h = 25$  mm. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

## 4.5 2次元ランダム入射乱反射率の測定法への応用

前節では、矩形室において 1 次元音場が卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を求める測定法を構築した。本節ではその測定法の応用として、縮尺模型実験により 2 次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較を通して、測定法の適用可能性に関する知見を得る。

### 4.5.1 測定理論

対向する平行壁面 2 面を吸音性、他の 4 面を反射性とし、2 次元音場が卓越する条件を作る (Fig. 4.22)。床面全面に試料を設置するものとし、試料設置前後の残響時間  $T_{2,0}$ ,  $T_{2,1}$  を計測する。2 次元拡散音場を仮定すると、以下の式が導かれる。

$$T_{2,0} = \frac{13.8\pi S}{cL\{-\ln(1-\alpha_0) + \pi m_0 S\}} \quad (4.4)$$

$$T_{2,1} = \frac{13.8\pi S}{cL\{-\ln(1-\bar{\alpha}) + \pi m_1 S\}} \quad (4.5)$$

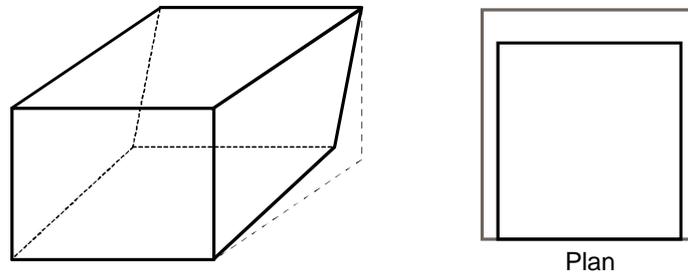
但し、 $S$ ,  $L$  は 2 次元音場の面積・周長、 $c$ ,  $m$  は音速と空気吸収係数である。 $\alpha_0$ ,  $\bar{\alpha}$  は試料設置前後の 2 次元平均吸音率で、次式で表される。

$$\bar{\alpha} = \frac{l_s}{L} \{\alpha_s + (1-\alpha_s)s_{r,2}\} + \frac{L-l_s}{L} \alpha_0 \quad (4.6)$$

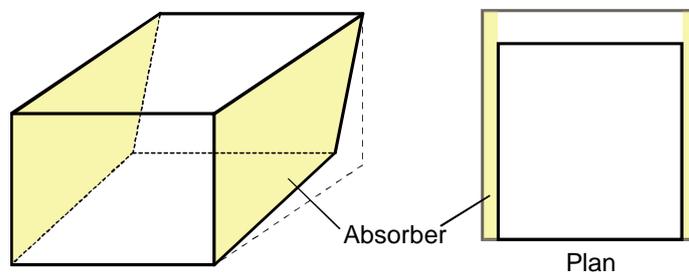
ここで、 $l_s$ ,  $\alpha_s$  は 2 次元面内の試料の長さ・吸音率であり、試料の 2 次元ランダム入射乱反射率は次式で算出される。

$$s_{r,2} = \frac{1-\alpha_0}{1-\alpha_s} \frac{L}{l_s} \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{13.8\pi S}{cL} \left( \frac{1}{T_{2,0}} - \frac{1}{T_{2,1}} \right) - \pi S(m_1 - m_0) \right\} \right] - \frac{\alpha_s - \alpha_0}{1-\alpha_s} \quad (4.7)$$

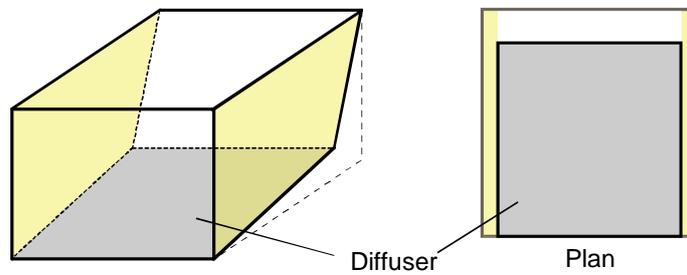
なお、本測定理論により求められる 2 次元ランダム入射乱反射率は、全反射エネルギーに対する面外方向への乱反射成分の割合に相当する。



(a) An empty non-rectangular room with surfaces (floor and one side wall) tilted.



(b) Generate a two-dimensional sound field by stalling highly absorbent materials on two opposite side walls of the room.



(c) Install a test sample on the rigid floor and monitor the changes of reverberation times with and without it.

Fig. 4.22: Illustration of the laboratory measurement method for measuring two-dimensional random-incidence scattering coefficients.

## 4.5.2 測定概要

アクリル板 (10 mm 厚) を用いて製作した 1/4 縮尺矩形室の対面にウレタンフォーム吸音材 (150 mm 厚、密度 25 kg/m<sup>3</sup>) を設け、2 枚のアクリル板 (2 mm 厚) を 3 通りの角度で設置し不整形室を作成する。詳細は Fig. 4.23、Table 4.3 に示す。角度については、壁を 1 度傾げるだけで 1 次元的な反射が生じなくなるという研究成果 [34] を反映して設定した。

測定試料 (25 mm 角 の木製リブを配列した周期構造壁面) は 1200 mm × 900 mm の床全面に 2 方向 (Rib A, Rib B) に配置した (Fig. 4.24)。

SS 信号で測定したインパルス応答から逆二乗積分法により 1/3 oct. band 毎の残響曲線を求め、指定範囲の最小二乗近似より残響時間を算出した。なお、試料設置前の吸音率は Eq. (4.1) より導出し (Fig. 4.23)、試料の吸音率は別途測定した残響室法吸音率を採用した。

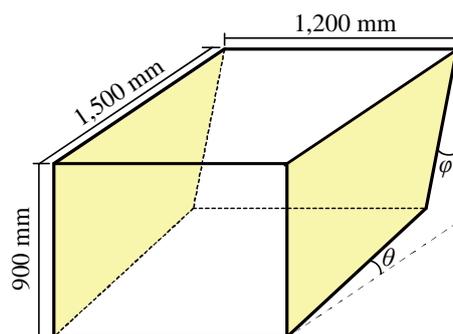
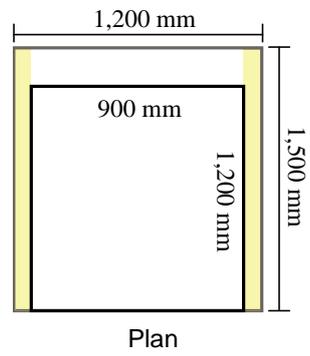
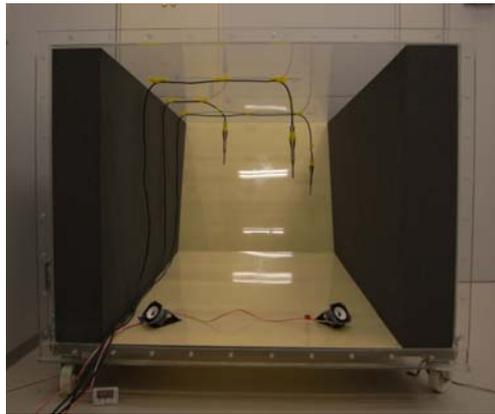


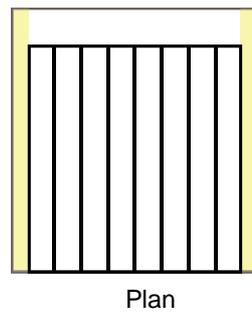
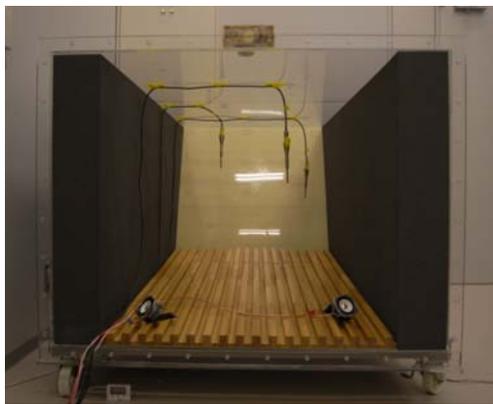
Fig. 4.23: Specifications of the empty non-rectangular room with two surfaces tilted.  $\theta$  and  $\varphi$  are tilted floor and wall surface angles, respectively.

Table 4.3: Measurement conditions with slopes of two surfaces.  $\theta$  and  $\varphi$  are tilted floor and wall surface angles, respectively.

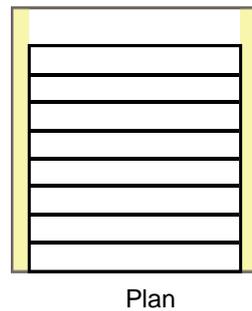
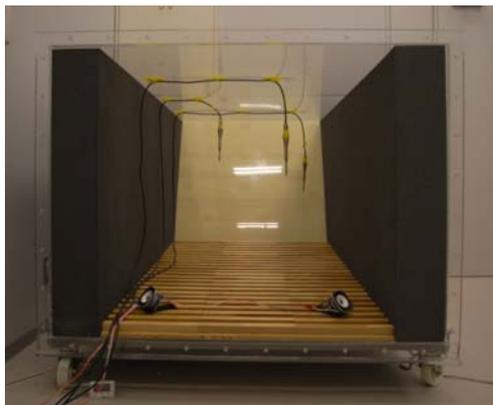
	$\theta$ [deg]	$\varphi$ [deg]
Room 0	0	18
Room 1	1	19
Room 2	5	21



(a) None



(b) Rib A



(c) Rib B

Fig. 4.24: Specifications of 1-dimensional test samples by changing the arrangement of test sample on the condition of Room 2.

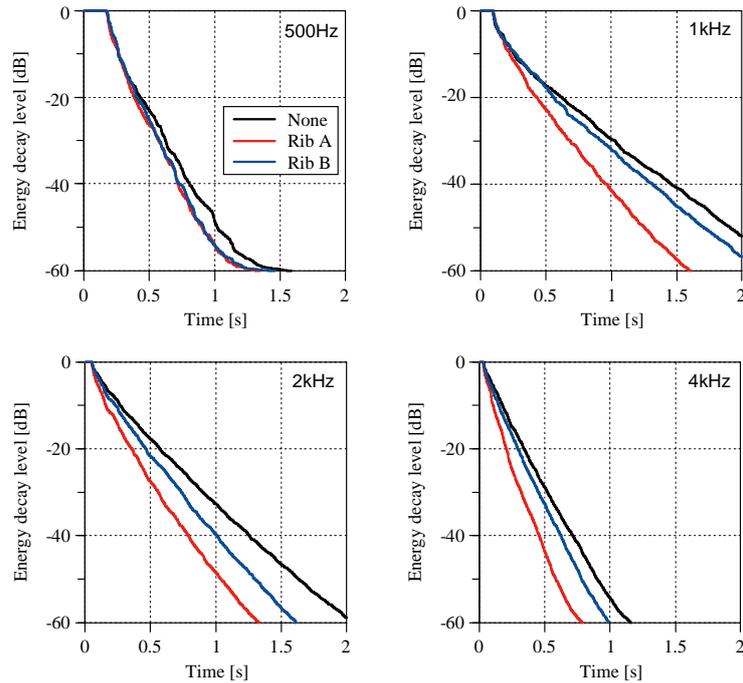


Fig. 4.25: Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 0 ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\varphi = 18^\circ$ ).

### 4.5.3 結果と考察

#### 残響曲線の性状

試料設置前後における 3 種類の各室の残響曲線を Fig. 4.25, 4.26, 4.27 にそれぞれ示す。周波数は実物換算したものである。

試料面の傾斜に起因する大きな差は見られない。また、各室同様に、試料設置前に比べて設置後はより減衰量が大きくなり、設置方向による影響も明らかに現れていることがわかる。特に、リブを吸音面に対して平行に設置した Rib A の場合は、減衰量が全周波数帯域でより顕著となり、リブによる乱反射成分が 2 次元音場の面外方向に大きいことが推察される。

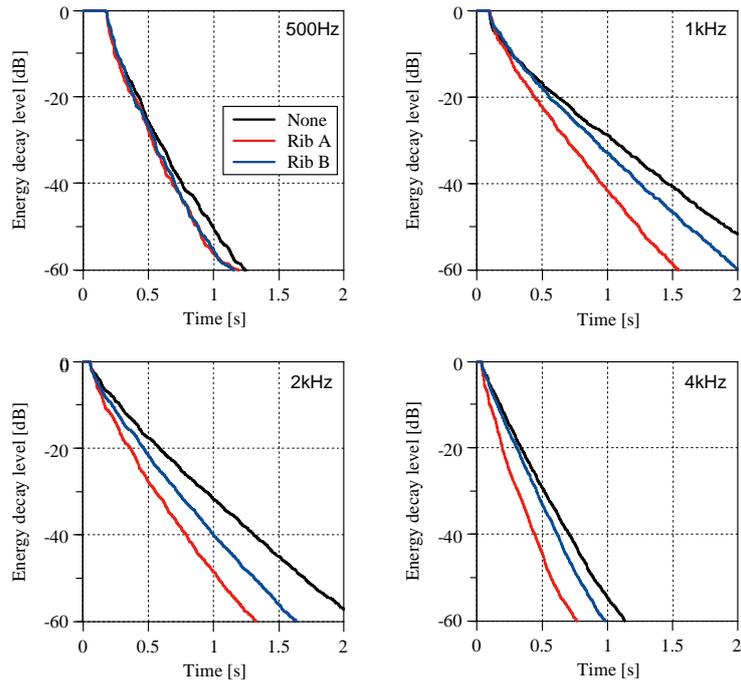


Fig. 4.26: Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 1 ( $\theta = 1^\circ$ ,  $\varphi = 19^\circ$ ).

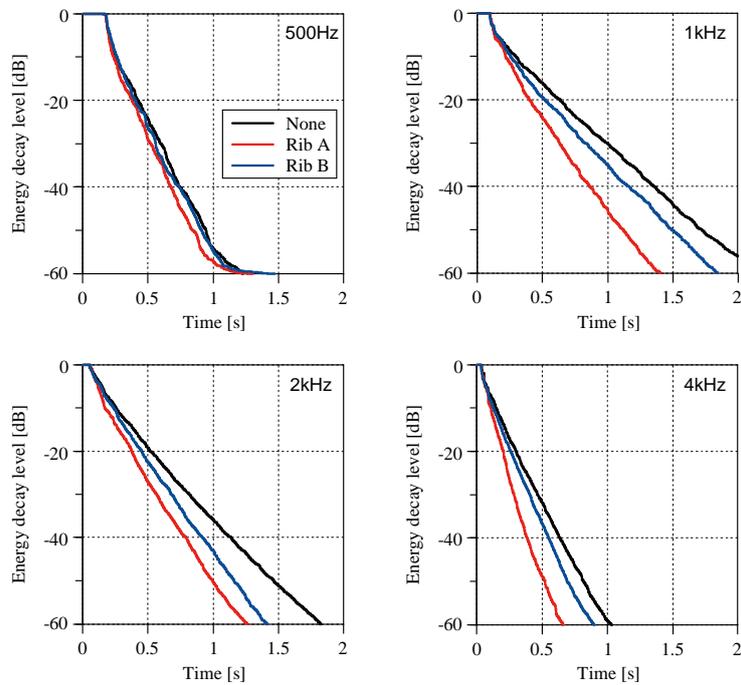


Fig. 4.27: Average energy decay curves with/without the test sample in 1/3 octave bands on the condition of Room 2 ( $\theta = 5^\circ$ ,  $\varphi = 21^\circ$ ).

## 残響時間の同定

10 dB の減衰区間 ( $T_{10}$ ) で同定した各室の残響時間を Fig. 4.28 に示す。

全ケースで、初期に対して後期で同定した残響時間は長くなる傾向が見られた。試料設置前に比べ、試料 (Rib A, Rib B) 設置後は残響時間が全周波数帯域で短くなり、Rib A の場合に顕著である。残響曲線の性状から確認したように、Rib A の場合は、2次元音場の面外方向の吸音面に乱反射成分が多めに到達することで、残響時間の低下がより顕著になったと考えられる。

## 2次元ランダム入射乱反射率の同定

上記の同定区間で求めた残響時間から算出した 2次元ランダム入射乱反射率を Fig. 4.29 に示す。図中、第 5 章の波動数値解析による垂直入射・2次元ランダム入射の計算値を併記する。

Rib A の測定値を計算値と比較して見ると、周波数特性の傾向や大きく傾きの変化する周波数が概ね一致していることから、比較的の良い対応を見せていると言える。吸音面に平行なリブ方向では乱反射成分が面外に向かうことから、2次元音場の面内に残るその成分が少なくなり、より乱反射成分を抽出しやすくなることに起因すると考えられる。

Rib A の結果を詳細に見ると、初期に対して後期で同定した乱反射率は値が全体的に低下し、計算値より高音域側にピークが推移している。2次元音場の減衰過程において、試料に対する入射エネルギーの角度分布の変化が原因として考えられる。Rib A の乱反射率の入射角依存性として、垂直入射に対して面内角度が大きくなると乱反射率が低下する傾向にあるため、後期では擦過入射に近い成分の割合が増加している可能性がある。

なお、試料面の傾斜が無い Room 0 では他の室より乱反射率が若干高いことから、2次元ランダム入射からの乖離が生じているものと推察される。

一方で、Rib B の測定値は計算値と全く異なり、ほぼ 0 となっている。吸音面に垂直なリブ方向では乱反射成分が 2次元音場の面内に残るため、見掛け上の値が極めて小さくなったものと考えられる。

本節で試行した乱反射率測定法は、2次元音場の面外への乱反射成分を同定するものであり、従来の乱反射率の定義 (非鏡面反射成分の割合) と異なる。リブ構造壁面の方向により測定値が異なることを例示したが、測定法として精度上の問題は大きいと考えられる。

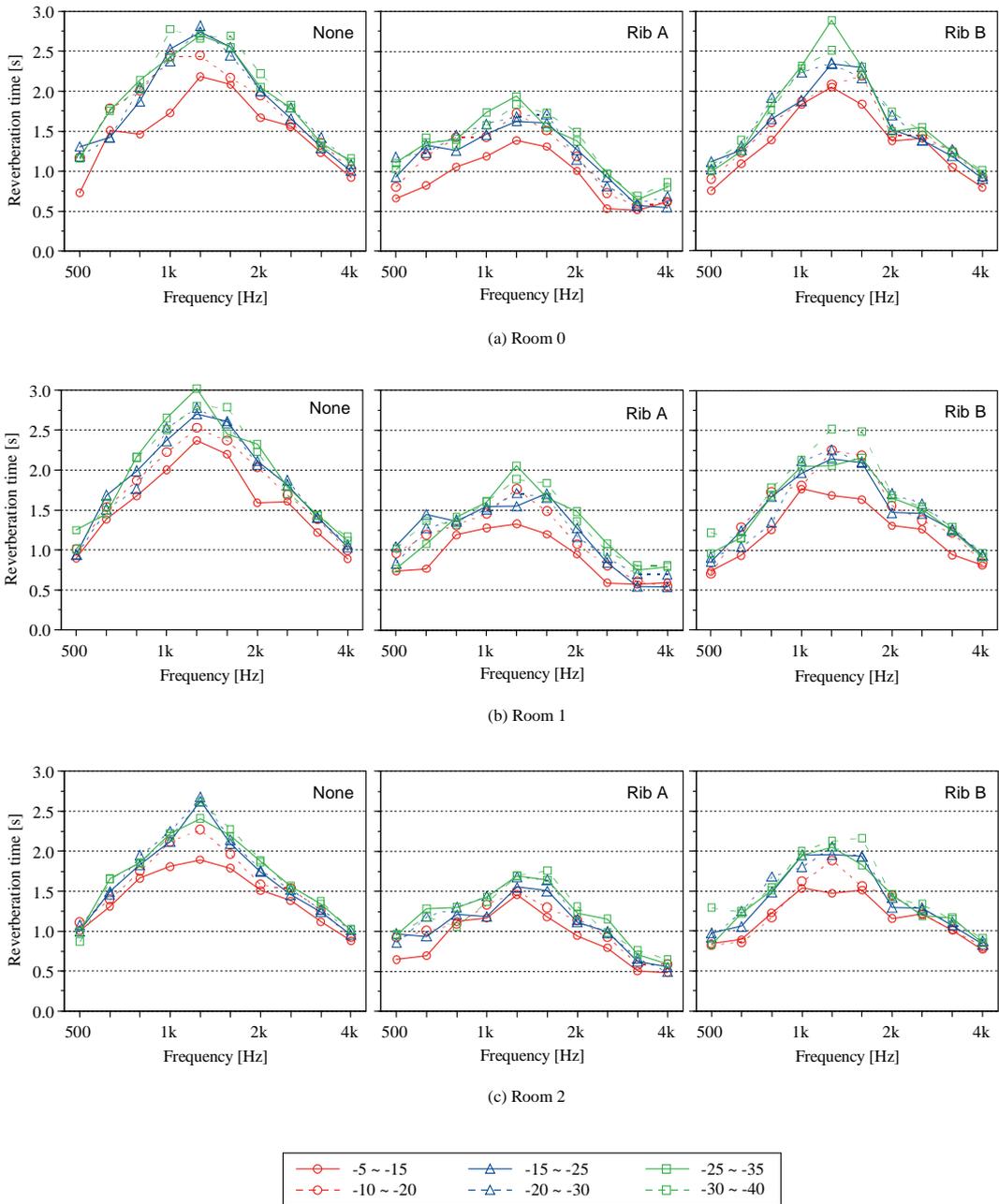


Fig. 4.28: Reverberation times estimated by different decay level ranges with and without test samples on the conditions of (a) Room 0, (b) Room 1 and (c) Room 2.

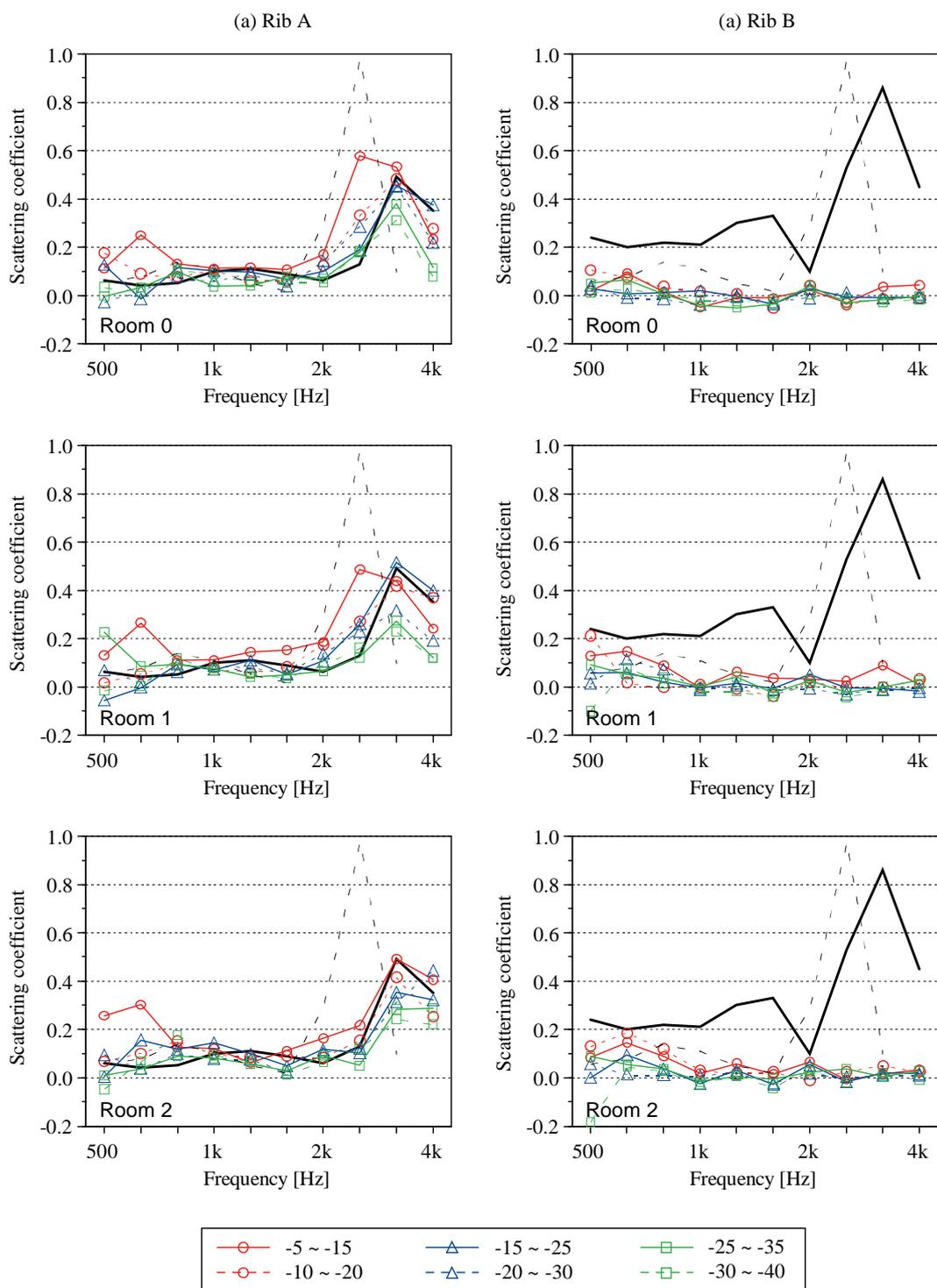


Fig. 4.29: 2D random-incidence scattering coefficients estimated from different decay ranges for the two sample arrangements. Black thick/dotted lines represent numerical results for 2D random/normal incidences.

## 4.6 まとめ

本章では、第 2 章の測定法とは全く異なる原理の垂直入射乱反射率の測定法を考案し、縮尺模型測定を通して試料の適用条件や測定における誤差要因等に関する検討を行い、数値解析結果との比較により測定法の汎用性及び有効性を検証した。

はじめに、新たに提案する垂直入射乱反射率の測定理論について述べ、矩形室において 1 次元音場が卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を求める測定法を提案した。

次に、縮尺模型測定により実現し、試料の適用条件や測定における設定条件について検討を行い、適切な測定条件を導いた。

受音点位置の影響に関して検討を行った。インパルス応答から求める残響時間の適切な評価のために、幾つかの受音点位置を設け、設定位置による影響に関して検討した。受音点毎のエネルギーレベル差は見られるものの、周波数によらず減衰率は概ね一致していることから、受音点位置による影響程度は小さいことを示した。

試料配置による影響に関しては、全周波数帯域で乱反射率特性が類似しており、設置方向による大きな変化は見られず、概ね一致していることが確認された。

乱反射率の周波数特性が異なる試料を対象として検討を行った。垂直入射乱反射率の周波数特性は急峻なピーク・ディップを持ち、値が大きく変化するものの、測定結果は計算結果とピーク・ディップの位置が非常に良く対応し、周波数特性の傾向や大きく傾きの変化する周波数が概ね一致していることがわかった。また、初期に対し後期から同定した値ほど、計算値と非常に良い対応を見せる等、本測定法の有効性が示唆された。一方、適用性及び汎用性の向上を図るためには、試料サイズや平行壁面間の距離等の設定条件についてのより詳細な検討が早急になされるべき課題であると考えられる。

最後に、以上の測定法の応用的な利用法として、縮尺模型実験により 2 次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較を通して、測定法の適用可能性に関する検討を行った。入射角依存性を考慮した測定法として、測定の試料方向により測定値が異なることは例示されたが、測定法として精度上の問題は大きいことが示された。



## 第5章

# 周期構造壁面の乱反射率特性の 数値解析

### 5.1 はじめに

第1章で述べたように、乱反射率の算出に関してはいくつかの方法が存在する。その中で小坂ら[35]は、Mommertzにより提案された指向相関法[5]に基づき、境界要素法（Boundary Element Method : BEM）を用いて乱反射率の数値解析手法を構築した。この手法は、鏡面反射成分の抽出原理という点において残響室法等といった他の測定法とは異なるものであるが、第2章及び第4章での測定結果との比較検証を行い、その対応関係を把握する等、測定・数値解析の両面で壁面拡散性状の定量化手法が整備された。

本章では、数値解析の簡便性からこの手法を採用し、各種周期構造壁面を対象としたケーススタディを通して、その乱反射率特性を調べる。はじめに、3次元音場における反射指向特性から乱反射率を算出する方法について述べ、境界要素法を適用した乱反射率の数値計算方法について概説する。次に典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁を対象として取り上げ、その断面形状、高さ、幅が乱反射率に及ぼす影響を具体的に検討する。その後、その乱反射率の特徴を最適化し、室内音響設計における拡散体の設計方針について考察する。

### 5.2 数値解析手法

Mommertz [5]は、自由音場中の散乱指向特性から乱反射率を算出する方法（指向相関法）として、次式を提案している。

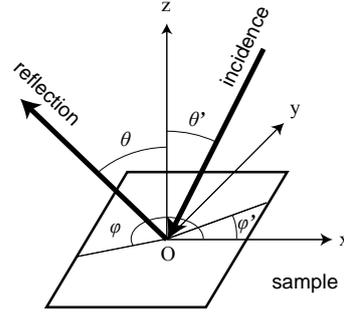


Fig. 5.1: Geometry of the numerical model. A plane wave impinges on a sample in the free field.  $(\theta', \varphi')$  and  $(\theta, \varphi)$  are the incidence and reflection angles, respectively.

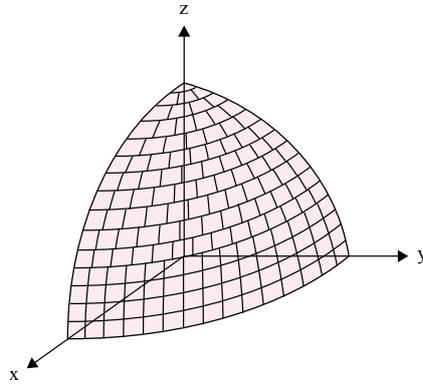


Fig. 5.2: Discretization of incidence and reflection angles.

$$s(\theta', \varphi') = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^N p_i \cdot \hat{p}_i^* \right|^2}{\sum_{i=1}^N |p_i|^2 \cdot \sum_{i=1}^N |\hat{p}_i|^2} \quad (5.1)$$

但し、 $p_i$  : 試料設置時の各方向における複素反射音圧、 $\hat{p}_i$  : 試料と同サイズの剛平板設置時の各方向における複素反射音圧、 $N$  : 総反射方向数、 $*$  : 複素共役である。試料設置時の指向特性との相関を取ることにより乱反射率を算出する方法である。

Mommertzによる乱反射率の定式化 Eq. (5.1) を 3 次元に拡張して、自由空間中の基準平板時及び試料設置時について、各入射条件における反射指向特性を求め、そこから入射角依存乱反射率を算出する。それらを全入射角に渡って重み付け平均することにより最終的にランダム入射乱反射率を計算する。

### 5.2.1 3次元音場における乱反射率

Fig. 5.1 に示すように平面波入射角  $(\theta', \varphi')$  及び反射角  $(\theta, \varphi)$  を定義する。平面波が自由空間中の試料に角度  $(\theta', \varphi')$  で入射するものとし、Fig. 5.2 のような極座標

における立体角の離散化を想定した場合、入射角依存乱反射率は次式で表される。

$$s(\theta', \varphi') = 1 - \frac{|R_{10}|^2}{R_{00} \cdot R_{11}} \quad (5.2)$$

$$R_{xy} = \sum_{i=1}^{N_\theta} \sum_{j=1}^{4N_\varphi^i} p_x(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) p_y^*(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) \sin \theta_{ij} \Delta \theta_{ij} \Delta \varphi_{ij} \quad (5.3)$$

但し、 $p_0$ ,  $p_1$  は基準平板時・試料設置時各々の反射波による複素音圧振幅であり、入射角及び反射角に関しては、 $\theta$  方向の分割数  $N_\theta$  をパラメータとして導入し、次式により離散方位  $(\theta_{ij}, \varphi_{ij})$ 、方位幅  $\Delta \theta_{ij}, \Delta \varphi_{ij}$  を設定する。

$$\Delta \theta_{ij} = \frac{\pi/2}{N_\theta}, \quad \theta_{ij} = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta \theta_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_\theta) \quad (5.4)$$

$$\Delta \varphi_{ij} = \frac{\pi/2}{N_\varphi^i}, \quad \varphi_{ij} = \left(j - \frac{1}{2}\right) \Delta \varphi_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, 4N_\varphi^i) \quad (5.5)$$

$$N_\varphi^i = \lceil N_\theta \sin \theta_{ij} \rceil \quad (5.6)$$

ランダム入射乱反射率  $\bar{s}$  については、Paris 公式[31]に基づくものとして、反射角同様に平面波入射角に対して立体角の離散化を適用すると次式が得られる。

$$\bar{s} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{N_\theta} \sum_{j=1}^{4N_\varphi^i} s(\theta'_{ij}, \varphi'_{ij}) \sin \theta'_{ij} \cos \theta'_{ij} \Delta \theta'_{ij} \Delta \varphi'_{ij} \quad (5.7)$$

## 5.2.2 境界要素法の適用

反射指向特性は、法線方向微分型積分方程式 (Normal Derivative Form : NDF) に基づいた境界要素法を用いて算出する。NDF の適用は、薄板のような薄い物体の音響散乱問題において大きな利点となることが知られており、特に厚みが 0 の物体の解析については、物体の両面の音圧差を未知数として解析することが可能となる[83]。解析対象である試料及び基準平板を厚さ 0 の剛面と仮定し、対象両面の音圧差を未知量とする。各入射条件の離散化方程式をまとめると、以下のように表される (一定要素を使用)。

$$\mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{D} \quad (5.8)$$

但し、 $\tilde{\mathbf{P}} = [\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_l, \dots]$ 、 $\tilde{p}_l$  は入射条件  $l$  における要素  $j$  両面の音圧差である。

行列  $\mathbf{A}$  の成分は次式により表される。

$$A_{ij} = \iint_{e_j} \frac{\partial^2 G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_q)}{\partial \mathbf{n}_i \partial \mathbf{n}_q} dS \quad (5.9)$$

但し、 $e_j$  は  $j$  番目の要素、 $\partial/\partial \mathbf{n}$  は境界面外向き法線方向微分である。

行列  $\mathbf{D}$  の成分は次式により表される。

$$\begin{aligned} D_{il} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} p_{Dl}(\mathbf{r}_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \exp(-j\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}_i) \end{aligned} \quad (5.10)$$

ここで、 $p_{Dl}$  は入射条件  $l$  における直接音成分であり、Fig. 5.2 のように入射角を設定した場合における単位振幅平面波は、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} p_{Dl}(\mathbf{r}_i) &= \exp(-j\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}_i) \\ &= \exp\{jk(\sin \theta_l' \cos \varphi_l' x_i + \sin \theta_l' \cos \varphi_l' y_i + \cos \varphi_l' z_i)\} \end{aligned} \quad (5.11)$$

但し、 $\mathbf{k}_l$  は入射条件  $l$  における波数ベクトルである。

従って、次式により全入射条件における解析対象両面の音圧差が一度に得られる。

$$\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D} \quad (5.12)$$

次に、試料中心から遠方一定距離の各反射角方向に受音点を想定すると、次式により各受音点における反射波の複素音圧振幅が全入射条件に渡って算出される。

$$\mathbf{P}^r = -\mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{P}} \quad (5.13)$$

但し、 $\mathbf{P}^r = [\mathbf{p}_1^r, \mathbf{p}_2^r, \dots, \mathbf{p}_l^r, \dots]$ 、 $p_m^r$  は入射条件  $l$  に対する受音点  $m$  の複素音圧振幅である。行列  $\mathbf{H}$  の成分は以下の式により表される。

$$H_{mj} = \iint_{e_j} \frac{\partial G(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_q)}{\partial \mathbf{n}_q} dS \quad (5.14)$$

最終的には、基準平板時・試料設置時各々で得られた  $\mathbf{p}_0^r, \mathbf{p}_1^r$  の各列ベクトルを Eq. (5.2) に代入して、各入射条件の乱反射率を算出し、続いて Eq. (5.7) によりランダム入射乱反射率を算出する。

## 5.3 凹凸形状による影響

本節では、建築・都市空間において頻繁に用いられている典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁面を対象として取り上げ、その凹凸形状による影響を数値解析により検討する。反射指向特性、乱反射率の入射角依存性及びランダム入射乱反射率の周波数特性を観察し、その特徴を明らかにする。

### 5.3.1 解析方法

ISO 17497-1 にて規定されている測定法では、試料を回転させながら多数のインパルス応答を測定し、同期加算することで鏡面反射成分を抽出するという原理から試料外形が円形でなければならない。それに対して本数値解析手法では、鏡面反射成分を抽出する原理が測定法とは異なり、必ずしも円形である必要はなく、正方形の試料でも結果に影響がないことが確認されている[35]。以上を考慮してここでは、メッシュの生成が容易、円形の試料に比べ要素数を少なくできるという数値解析の簡便性から正方形を採用することとする。

解析対象は、Table 5.1、Fig. 5.3 に示す 1 辺 3 m の周期構造壁面（15 周期）であり、凹凸形状が正弦波（Type S）、三角波（Type T）、矩形波（Type R）となる 3 種類を用いる。凹凸形状の周期  $L$  に対する高さ  $h$  の比を  $h/L = 30\%$  で一定として、凹凸形状による影響を調べる。

ここで、全ての壁面は音響的に全面剛として、試料厚さ 0 を仮定する。境界要素としては最小解析波長の 6 分の 1 以下の寸法の四角形一定要素を用いる。受音点は無限遠、入・反射角離散化パラメータは共に  $N_\theta = 30$ （3度間隔）に設定する。解析周波数は、周期  $L$  の波長  $\lambda$  に対する比  $(L/\lambda)$  が 0.1~2.0 の範囲の 1/6 oct. band 中心周波数である。

Table 5.1: Measurement conditions for 1-dimensional periodic test samples by changing the shapes.  $L$ ,  $h$  and  $w$  are period, height and width, respectively.

	Shape	$L$ [cm]	$w$ [cm]	$h$ [cm]	Number of periods
Type S	Sinusoid	20	-	6	15
Type T	Triangle				
Type R	Rectangle		10		

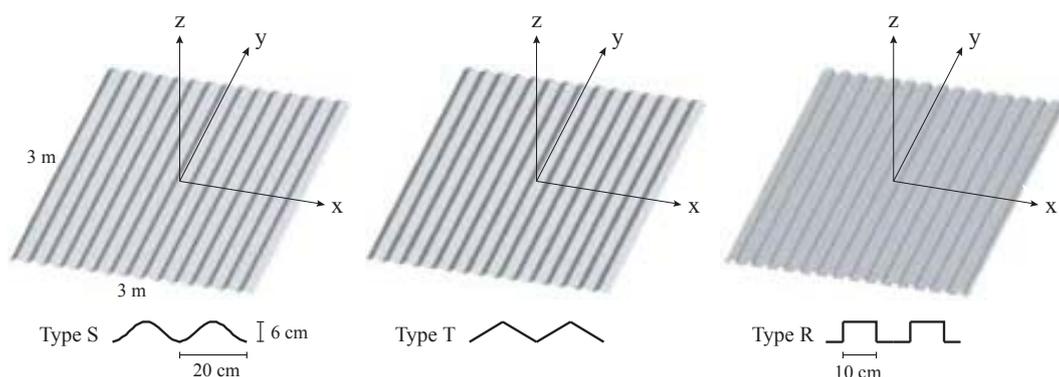


Fig. 5.3: Three types of samples with 1D periodic surface (15 periods). Type S: Sinusoids; Type T: Triangles; Type R: Rectangles.

### 5.3.2 結果と考察

#### 入射角依存乱反射率の分布

3種類の形状 (Type S, T, R) について、250 Hz, 500 Hz, 1 kHzにおける入射角依存乱反射率の解析結果をそれぞれ Fig. 5.4, 5.5, 5.6 に示す。凹凸の高さは一定 ( $h = 6 \text{ cm}$ ) とし、 $\theta$  は天頂角、 $\varphi$  は方位角である。

全周波数帯域で 1次元周期構造壁面の方向性が顕著に現れており、入射角が  $y$  軸に沿った場合ほど、極めて小さい値を示している。

250 Hz, 500 Hz, 1 kHzでは 0 に近い値を示して範囲が多く、凹凸形状に起因する分布の変化も小さく殆ど見られない。

1.25 kHz, 1.6 kHz, 2 kHzにおける同様の分布をそれぞれ Fig. 5.7, 5.8, 5.9 に示す。1.25 kHz, 1.6 kHzでは全体的に Type R でやや高い値を示しているが、形状による大きな分布の変化は見られず、傾向が概ね一致している。しかし、分布傾向は高周波数域に推移するに従い徐々に変化し、2kHz では Type R のみが著しく異なる分布になっている。

2.5 kHz, 3.15 kHz, 4 kHzにおける同様の分布をそれぞれ Fig. 5.10, 5.11, 5.12 に示す。Type S と T では入射角依存傾向が似ていて、高い値を示している領域が多くなっているものの、Type R では値の小さい範囲が広がっており、特にその範囲が明確なパターンとして現れている。

以上より、Type S と T では凹凸形状の違いによる影響は殆ど見られないのに対し、Type R では入射方向によって拡散性能が著しく変化するものと考えられる。

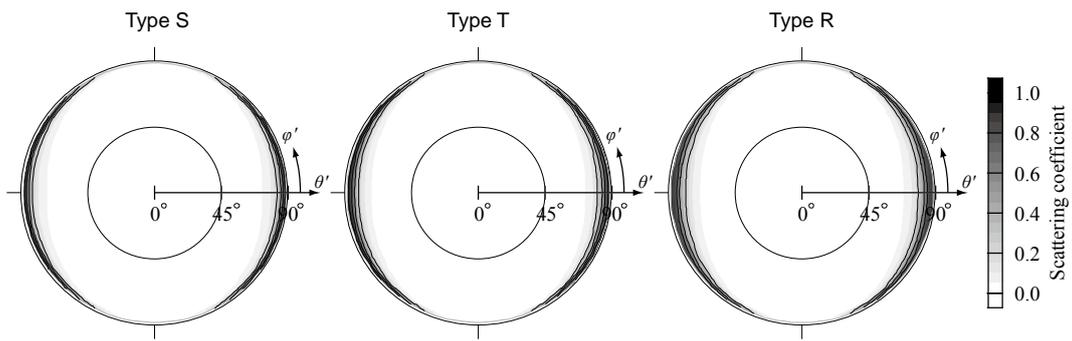


Fig. 5.4: Distribution of directional scattering coefficients at 250 Hz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

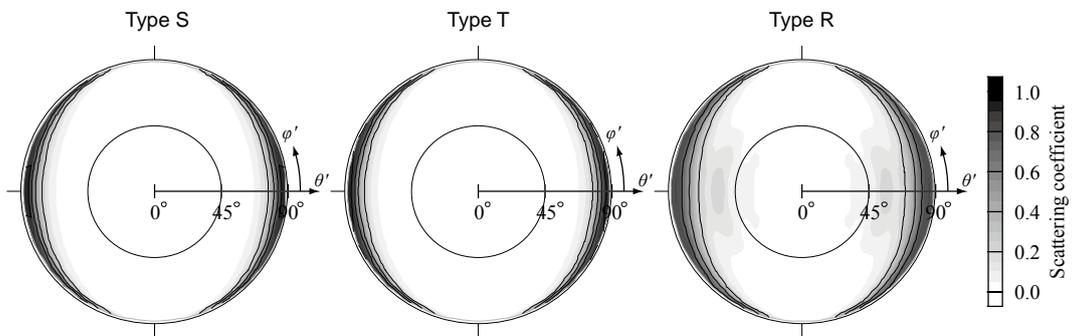


Fig. 5.5: Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

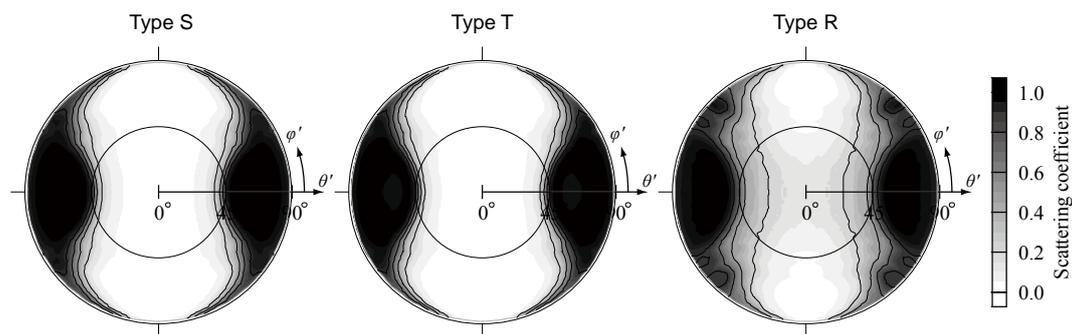


Fig. 5.6: Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

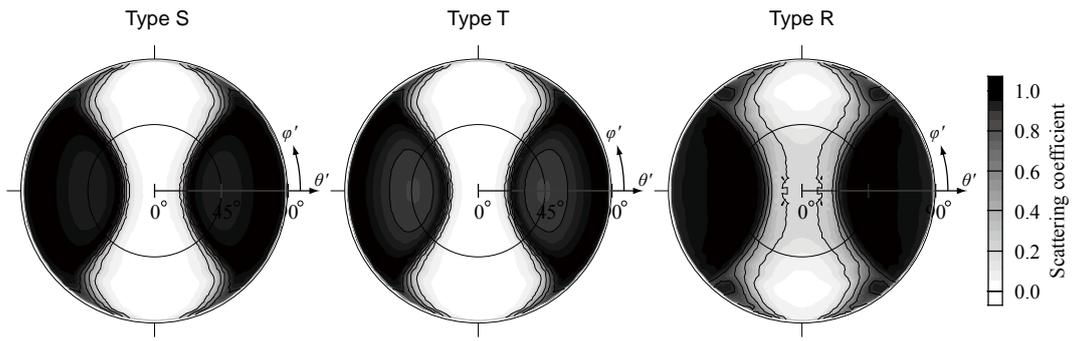


Fig. 5.7: Distribution of directional scattering coefficients at 1.25 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

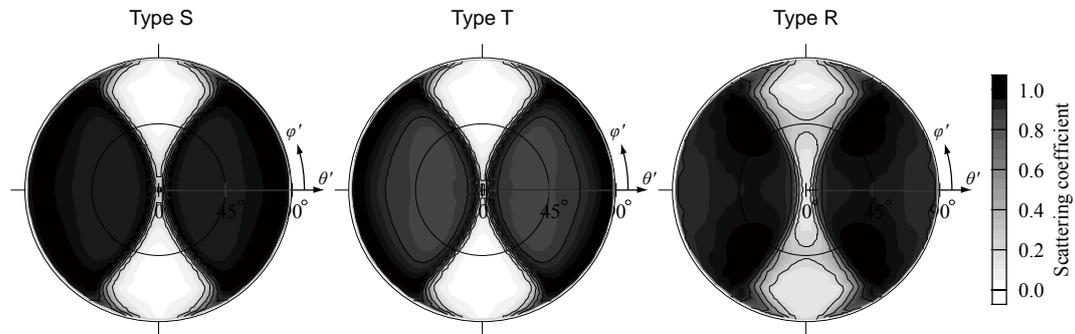


Fig. 5.8: Distribution of directional scattering coefficients at 1.6 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

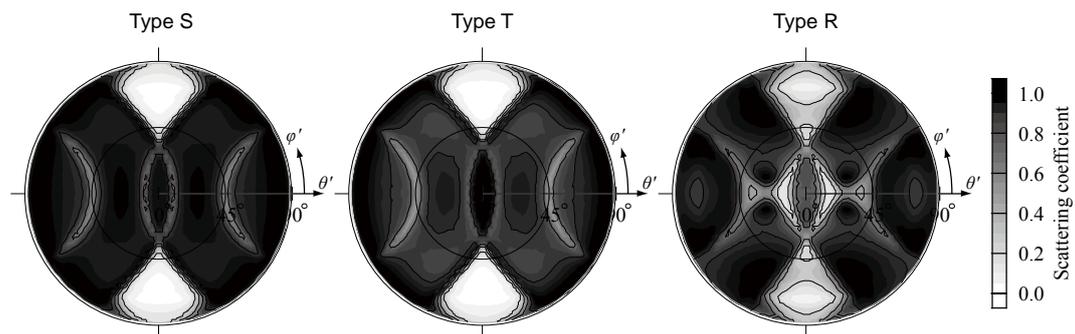


Fig. 5.9: Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

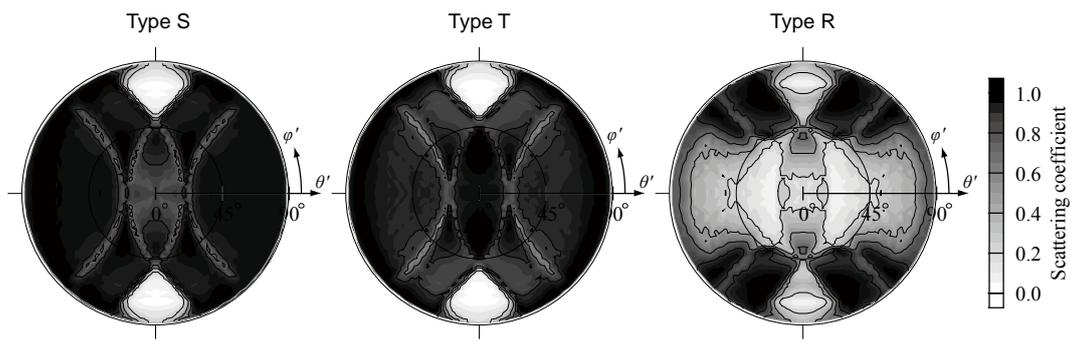


Fig. 5.10: Distribution of directional scattering coefficients at 2.5 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

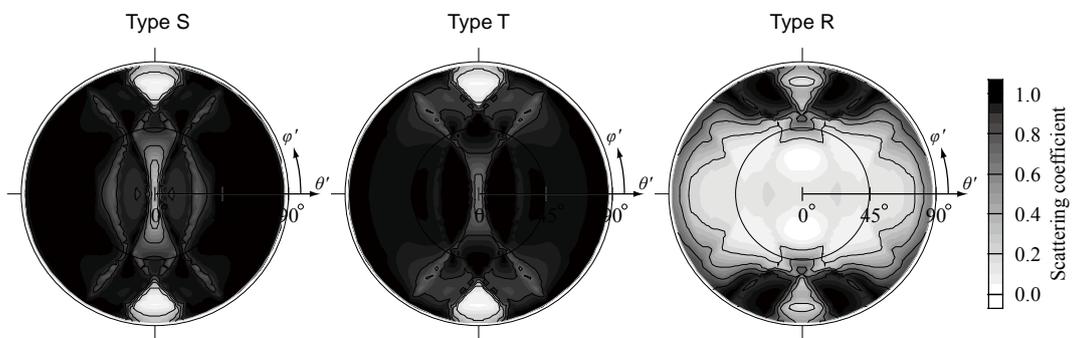


Fig. 5.11: Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

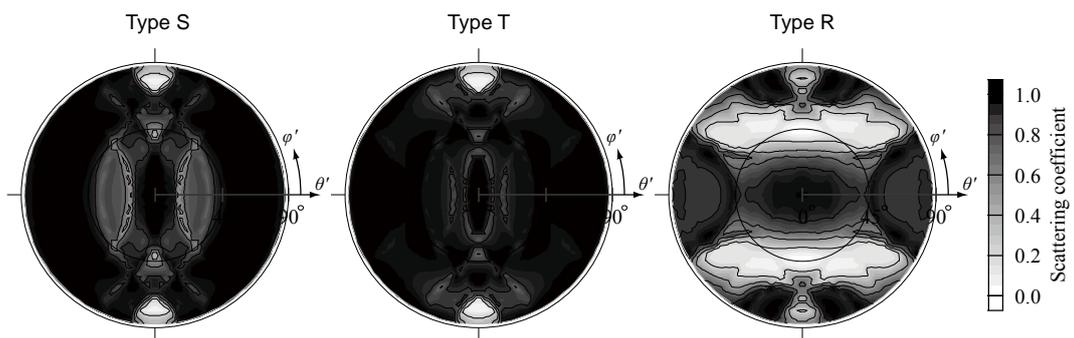


Fig. 5.12: Distribution of directional scattering coefficients at 4 kHz calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\phi'$  are incidence angles.

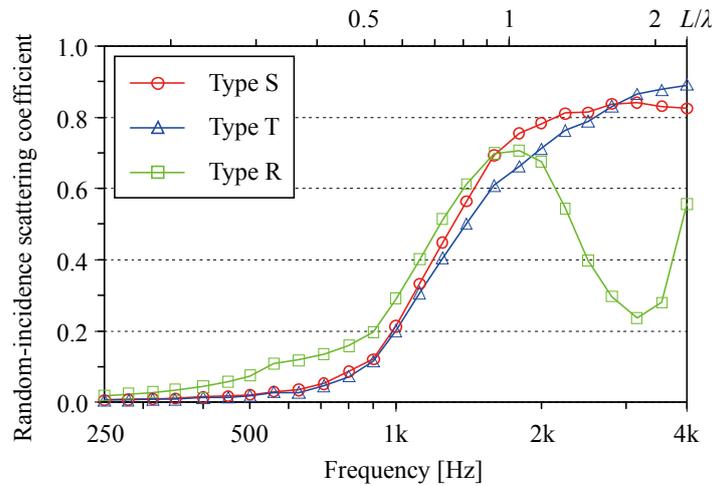


Fig. 5.13: Random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R on the fixed condition of  $h = 6$  cm.

### ランダム入射乱反射率

凹凸高さ  $h = 6$  cm における形状 3 種類のランダム入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.13 に示す。

全体的な周波数特性の傾向は、2 kHz 以下 ( $L/\lambda < 1$ ) においては類似し徐々に増加するが、以上の周波数帯域 ( $L/\lambda > 1$ ) に推移するに従い異なる傾向が見られる。

Type S と T は低中音域で値がほぼ一致する。2 kHz 付近では、Type S が Type T より値がやや大きくなり、4 kHz 付近で逆に小さくなるが、全体的に周波数特性は等しいと言える。

Type R は他より低中音域で値が大きく、高音域で大幅に減少する傾向が見られる。凹凸高さが半波長に相当する周波数で生じており、凸部上面と凹部下面からの反射波の位相が揃い、鏡面反射成分が増加するためであると考えられる。

以上の検討により、矩形波型壁は高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波型壁・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられる。

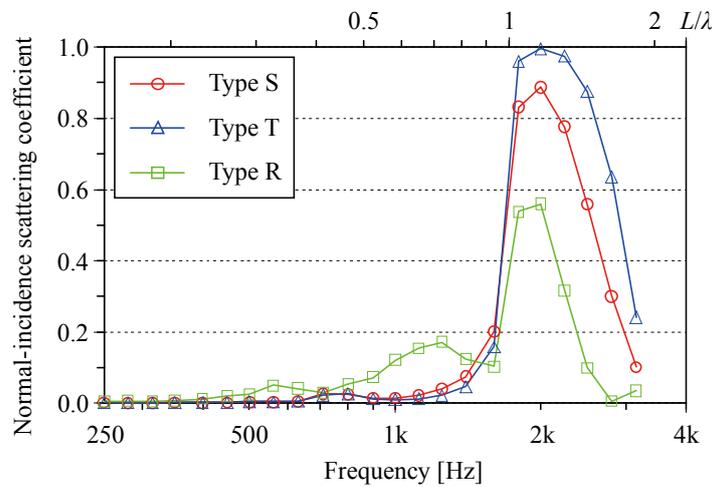


Fig. 5.14: Normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R on the fixed condition of  $h = 6$  cm.

### 垂直入射乱反射率

凹凸高さ  $h = 6$  cm における形状 3 種類の垂直入射乱反射率の周波数特性を Fig. 5.14 に示す。

垂直入射の場合においては全タイプ同様に、低音域で値がほぼ 0 に近いことがわかる。周期構造の寸法に対して波長が十分に長く、鏡面反射以外の反射成分が生じないことから、乱反射率はほぼ 0 になったと考えられる。500 Hz, 1 kHz では、Type R が他より大きい値を示し、それぞれ 0.1~0.2 程度となる。

一方で、 $L/\lambda = 1$  になる周波数帯域では、全タイプ同様に値が急増し、2 kHz で最大になる。特に Type S 及び T では大幅に高くなり、2 kHz ではほぼ 1 に近い値となる。低中音域で他より高い値を示した Type R では、値が比較的になくなり、0.5 程度となる。

以上の検討から、垂直入射乱反射率は穏やかな周波数特性を持たずに、特定の周波数帯域 ( $1 < L/\lambda < 2$ ) で急激に大きくなることがわかった。

## 5.4 凹凸高さによる影響

### 5.4.1 解析対象

前節で用いた正弦波 (Type S)、三角波 (Type T)、矩形波 (Type R) について、凹凸高さを  $h = 2, 4, 6, 8, 10$  cm ( $h/L = 10, 20, 30, 40, 50\%$ ) の 5 段階に変化させて凹凸高さに起因する影響を調べる。

境界条件は全面剛として、厚さ 0 を仮定する。最小解析波長の 6 分の 1 以下の寸法の四角形一定要素を用い、受音点は無限遠、入・反射角離散化パラメータ  $N_\theta$  は 30 に設定した。解析周波数は 1/6 oct. band 中心周波数である。

Table 5.2: Measurement conditions for 1-dimensional periodic test samples by changing the heights.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height, respectively.

	Shape	$L$ [cm]	$w$ [cm]	$h$ [cm]	Number of periods
Type S	Sinusoids	20	-	2, 4, 6, 8, 10	15
Type T	Triangles	20	-	2, 4, 6, 8, 10	15
Type R	Rectangles	20	10	2, 4, 6, 8, 10	15

### 5.4.2 結果と考察

#### Type S の場合

##### ■ 入射角依存乱反射率の分布

凹凸の高さを変化させた Type S について、500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3.15 kHz における入射角依存乱反射率の解析結果をそれぞれ Fig. 5.15~18 に示す。

500 Hz では、全体的に値が非常に小さく、0 に近い値を示す範囲が多いが、高さが高くなるに従い徐々に値が高くなる傾向にある。1 kHz でも同様に、高さの増加による分布の変化はなだらかで単調増加し、 $h = 10$  cm で最大となる。

2 kHz の場合は、500 Hz, 1 kHz の場合に比べ、高い値を示す範囲が比較的が多いが、高さの増加に従い分布が変化することがわかる。3.15 kHz でも同様に、値の低い領域が僅かに多くなる傾向が見られる。

以上より、Type S は高さの増加に従って分布の変化はあるものの、比較的になだらかな特性を持つことが推察される。

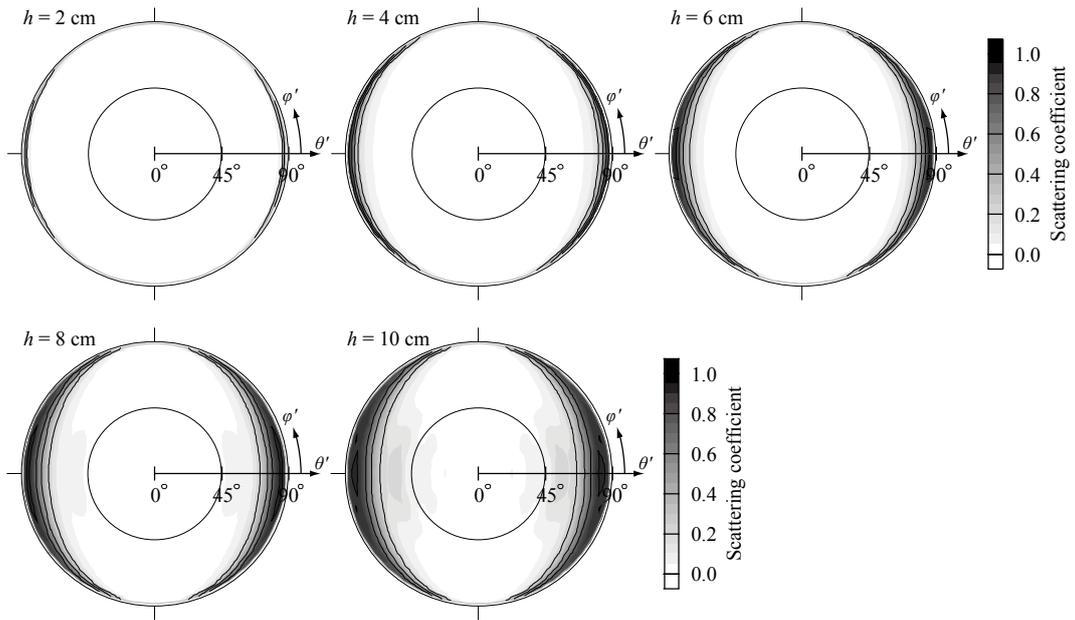


Fig. 5.15: Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

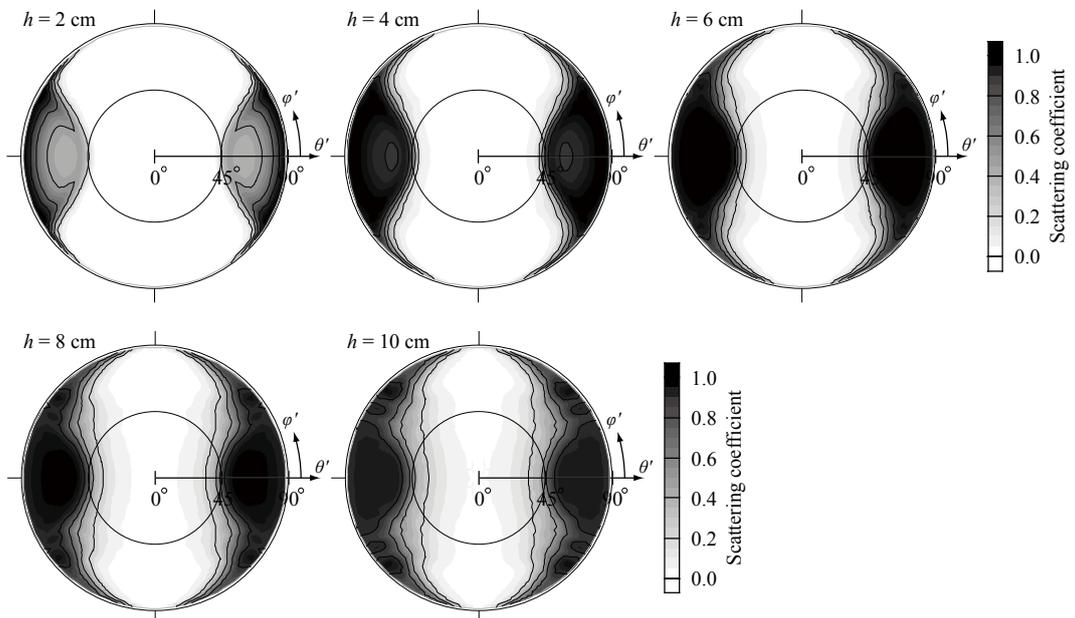


Fig. 5.16: Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

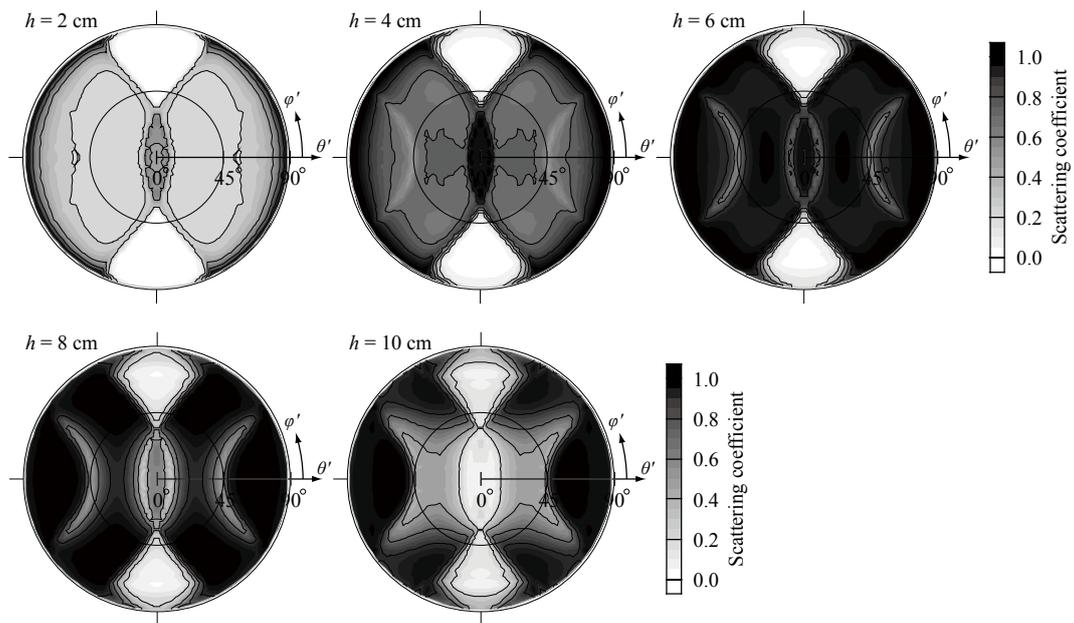


Fig. 5.17: Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

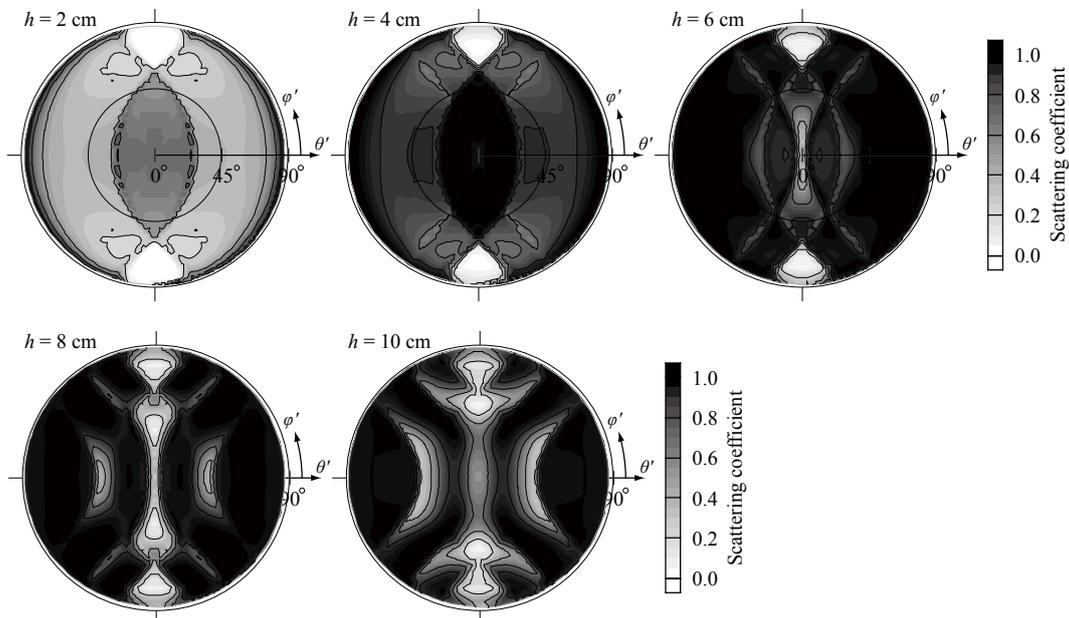


Fig. 5.18: Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

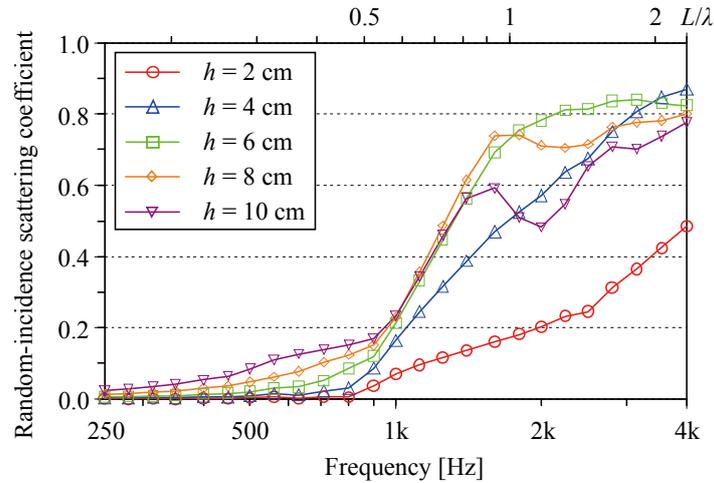


Fig. 5.19: Random-incidence scattering coefficients calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

#### ■ ランダム入射乱反射率

Type S において、凹凸の高さを変化させた場合のランダム入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.19 に示す。

全体的な周波数特性は、 $1$  kHz 以下 ( $L/\lambda < 0.5$ ) においては値が  $0 \sim 0.2$  の間で変動し低いが、その以上の周波数帯域では比較的大きくなり、最大  $0.8$  程度となる。

低中音域においては、 $h = 2$  cm では値がほぼ  $0$  に等しく、高さの増加に従い高くなり、 $h = 10$  cm で最大となる。

$1$  kHz 付近 ( $L/\lambda = 0.5$ ) では傾きが変化し、高音域においては、全体的に高くなるにつれて値が大きくなる傾向が見られる。但し、 $h = 8$  cm,  $10$  cm では  $2$  kHz 付近で値がやや低下している。ディップが生じる要因としては、凸部上面と凹部下面からの反射波の位相が揃い、鏡面反射成分が増加するためであると考えられる。特に、その現象は、凹凸高さが半波長に相当する周波数で生じるが、滑らかな形状であるため低音域側に移動したと考えられる。

以上の検討により、正弦波型壁は凹凸高さが高くなると、周波数の上昇に伴って比較的値が緩やかに増加していく傾向が見られた。ランダム入射条件における乱反射率は、低中音域においては  $h = 10$  cm で、高音域においては  $h = 6$  cm で最大となることがわかった。

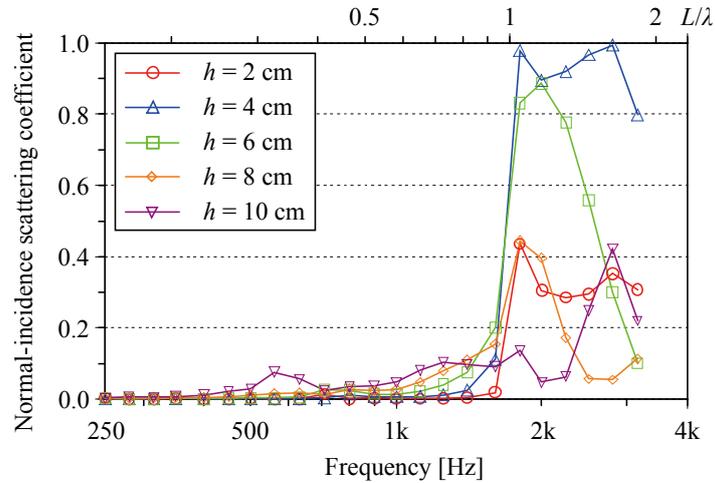


Fig. 5.20: Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type S with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

#### ■ 垂直入射乱反射率

Type S において、凹凸の高さを変化させた場合の垂直入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.20 に示す。

全体的な周波数特性は、 $L/\lambda < 1$  になる周波数帯域においては値が低く、 $1.8$  kHz ( $L/\lambda = 1$ ) で急激に傾きが変化し、 $1 < L/\lambda < 2$  で大きくなる傾向が見られる。

低中音域においては、非常に小さく  $0$  に近い値を示す。高音域においては、 $h = 2, 4, 6$  cm の場合、高さが増加するに従って値が高くなっているのに対し、 $h = 8$  cm 以上になると逆に低下する傾向にある。

以上の検討から、正弦波型壁は、 $L/\lambda < 1$  になる周波数帯域では  $h = 10$  cm で、 $1 < L/\lambda < 2$  になる周波数帯域では  $h = 4$  cm で垂直入射条件における乱反射率特性が最大になることがわかった。

#### Type T の場合

##### ■ 入射角依存乱反射率の分布

凹凸高さの異なる Type T について、 $500$  Hz,  $1$  kHz,  $2$  kHz,  $3.15$  kHz における入射角依存乱反射率の解析結果をそれぞれ Fig. 5.21~24 に示す。Type S の場合と同様に、高さの増加に従い微小な変化はあるものの、比較的なだらかな特性を示した。

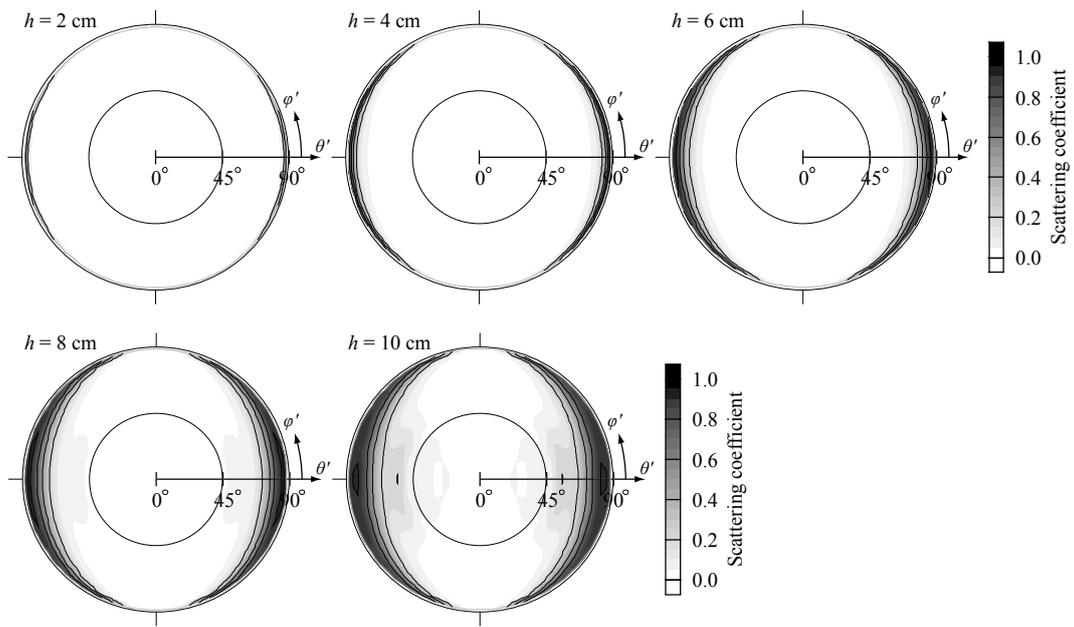


Fig. 5.21: Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

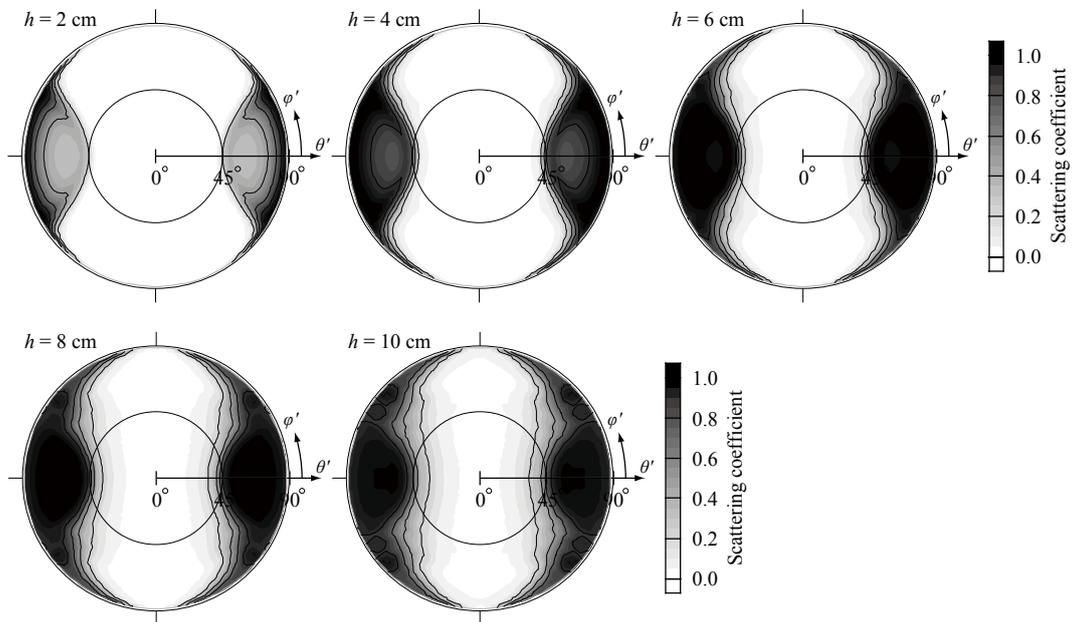


Fig. 5.22: Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

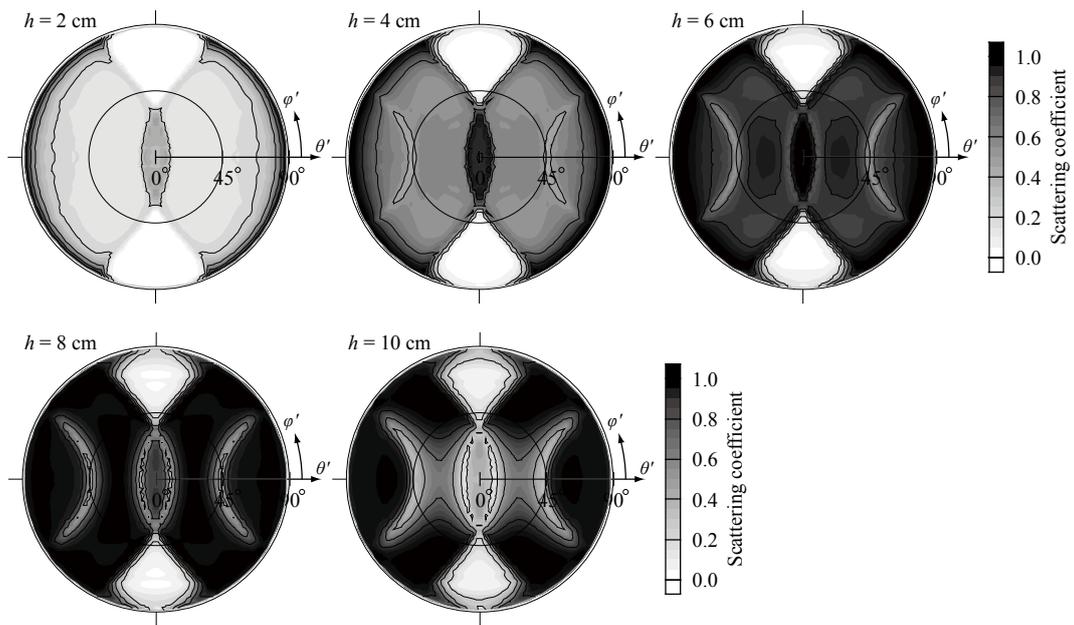


Fig. 5.23: Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

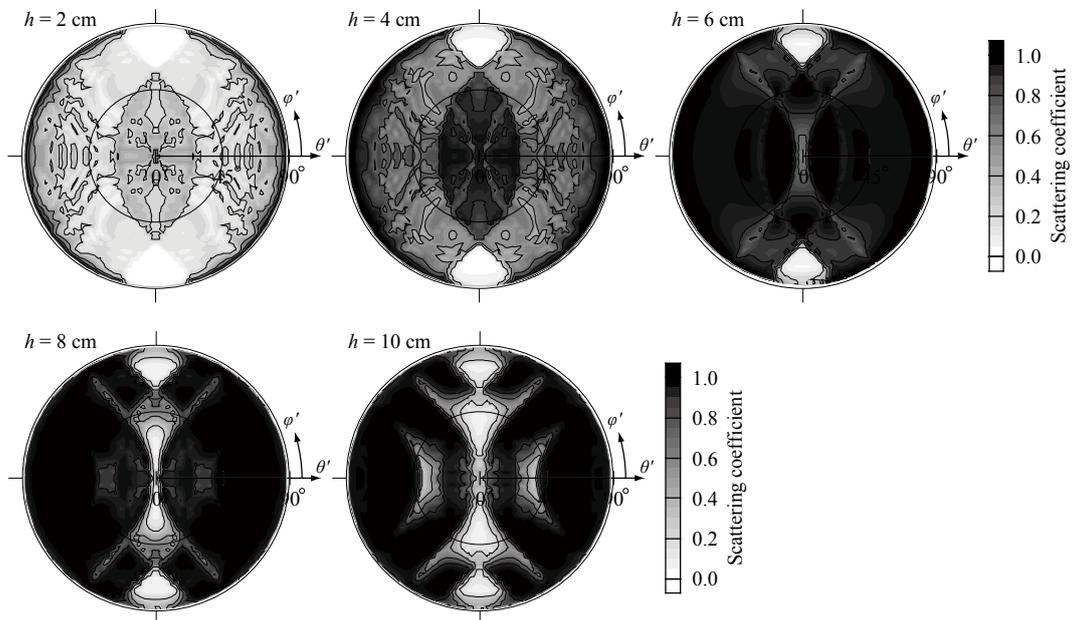


Fig. 5.24: Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

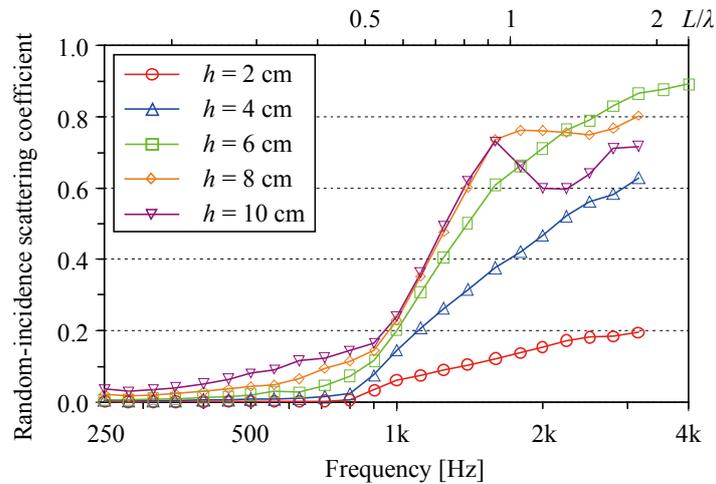


Fig. 5.25: Random-incidence scattering coefficients calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

#### ■ ランダム入射乱反射率

Type T において、凹凸の高さを変化させた場合のランダム入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.25 に示す。全体的に Type S と類似した周波数特性を持ち、高さが増加するに従い値が徐々に大きくなる。

1 kHz 以下 ( $L/\lambda < 0.5$ ) の周波数帯域では  $h = 10$  cm で値が大きくなり、1 kHz 付近 ( $L/\lambda = 0.5$ ) で傾きが変わるが、高音域においても凹凸高さが高くなるにつれ、値が大きくなる傾向が見られる。一方で、 $h = 8$  cm,  $10$  cm の場合におけるディップについては Type S と同様に、凹凸高さが半波長に相当する周波数付近で生じている。

以上の検討により、三角波型壁は高さが高くなると、周波数の上昇に伴って比較的値が緩やかに増加していく傾向が見られた。ランダム入射条件における乱反射率は、低中音域においては  $h = 10$  cm で、高音域においては  $h = 6 \sim 8$  cm で最大となることがわかった。

#### ■ 垂直入射乱反射率

Type T において、凹凸の高さを変化させた場合の垂直入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.26 に示す。全体的な周波数特性は Type S と同様に、 $L/\lambda = 1$  になる周波数帯域で急峻なピークを持つ。三角波型壁は、 $h = 6 \sim 8$  cm で高音域における垂直入射乱反射率が最大となることがわかった。

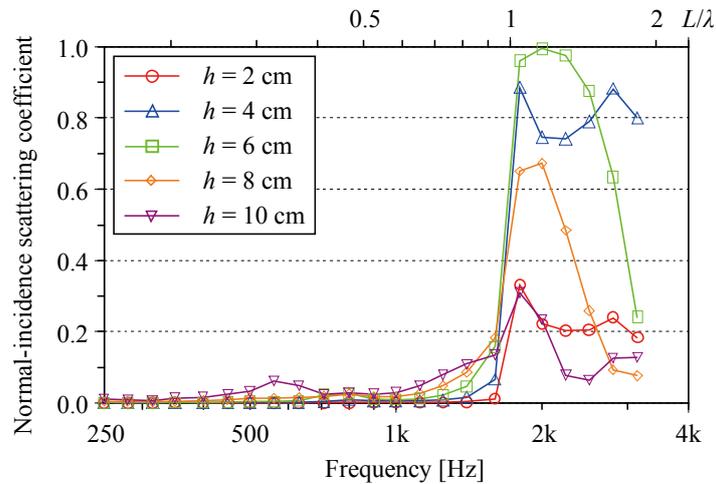


Fig. 5.26: Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type T with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

## Type R の場合

### ■ 入射角依存乱反射率の分布

凹凸高さの異なる Type R について、 $500$  Hz,  $1$  kHz,  $2$  kHz,  $4$  kHz における入射角依存乱反射率の解析結果をそれぞれ Fig. 5.27~30 に示す。

$500$  Hz においては、 $h = 2$  cm でほぼ  $0$  に近く白い範囲が殆どであるが、高さが増加するに従い値が高くなっている。特に、入射角が大きいほど値が大きい傾向にある。 $1$  kHz においては、 $500$  Hz の場合と比べ全体的に高い値を示す範囲が多くなっている。 $h = 2, 4$  cm でも高さの増加による影響が  $500$  Hz と同様である。一方で、 $h = 6$  cm 以上では高さの増加に従い分布が変化し、小さい値を示す範囲が僅かに多くなっている。それに対し、 $2$  kHz,  $4$  kHz の高音域においては、高さによる影響がより顕著になり、値の小さい範囲が広がっている。特に、その範囲が明確なパターンとして現れていることがわかる。

以上より、Type R は高さの増加に従って分布の変化が非常に大きく、入射方向によって拡散性能が著しく変化するものと考えられる。

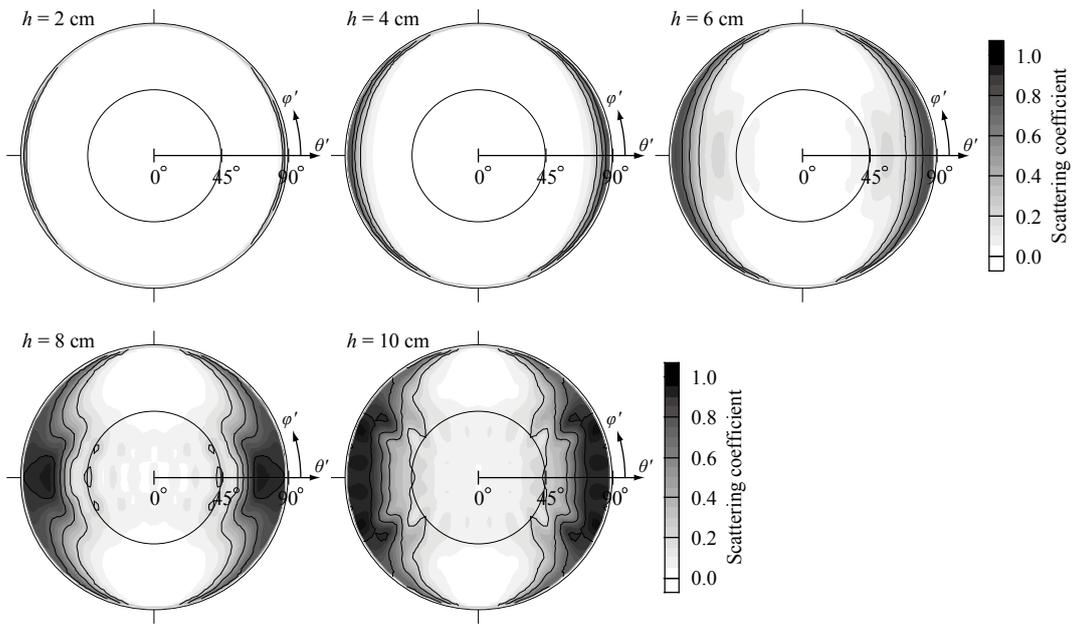


Fig. 5.27: Distribution of directional scattering coefficients at 500 Hz calculated for Type R with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

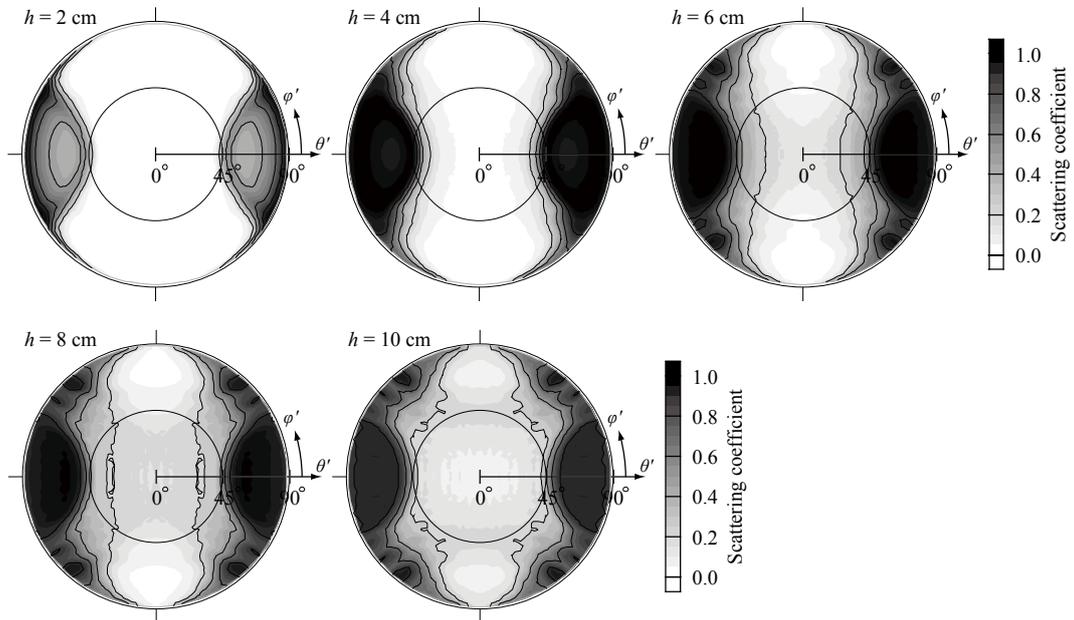


Fig. 5.28: Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type R with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

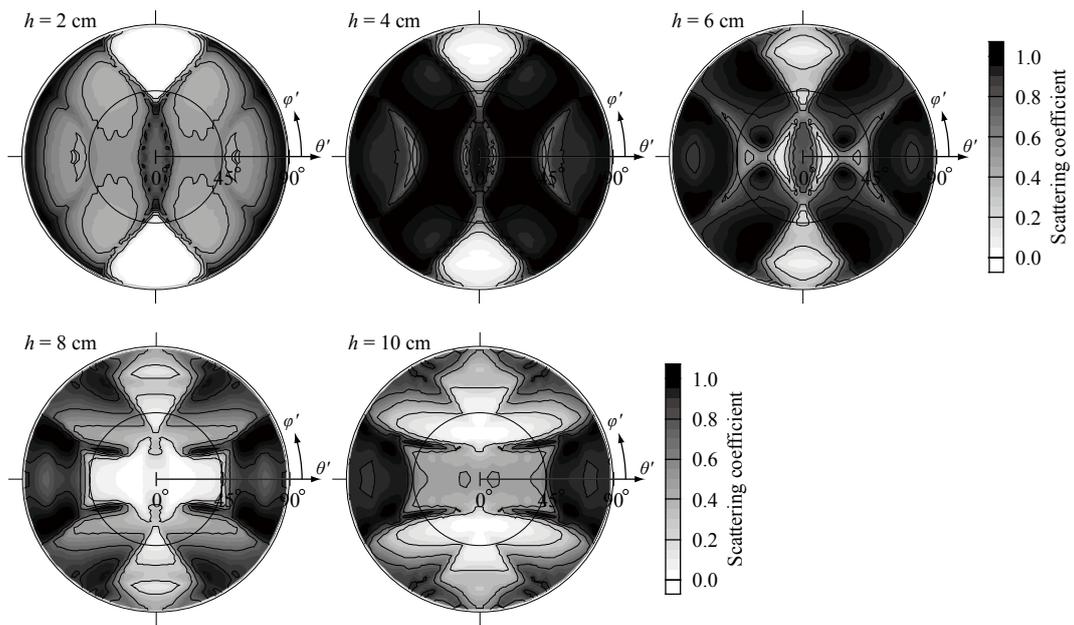


Fig. 5.29: Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type R with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

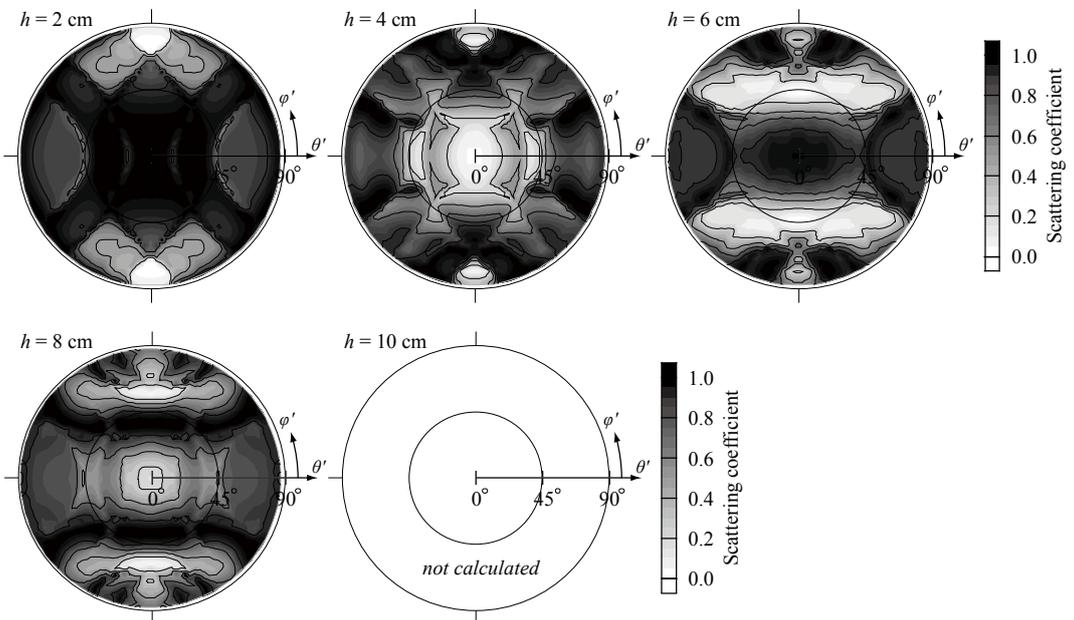


Fig. 5.30: Distribution of directional scattering coefficients at 4 kHz calculated for Type R with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

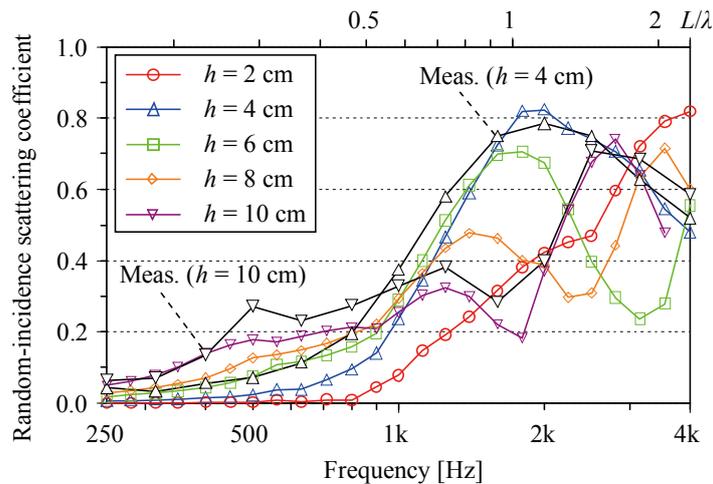


Fig. 5.31: Random-incidence scattering coefficients for Type R ( $w = 10$  cm) with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm. The results are calculated with the directivity correlation method and measured with reverberation room method.

#### ■ ランダム入射乱反射率

Type R ( $w = 10$  cm) において、高さのみを変化させたランダム入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.31 に示す。

低中音域においては、高さが高くなるにつれて値がやや大きくなり、 $h = 10$  cm で最大となる。高音域においては急峻なディップが生じており、 $h = 4$  cm で最大となる。特に、そのピーク・ディップは凹凸高さが半波長に相当する周波数で生じており、高さが増加すると共にピーク・ディップは低音域側に移動する傾向が見られる。

残響室法による測定結果を計算結果と併せて Fig. 5.31 に示す。測定値は  $h = 4, 10$  cm の場合のみの結果である。測定値は計算値に比べ、 $500$  Hz,  $1$  kHz 付近でおよそ  $0.1$  程度の差が大きい値を示すものの、全体的に良い対応を見せる。

#### ■ 垂直入射乱反射率

Type R ( $w = 10$  cm) において、高さのみを変化させた垂直入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.32 に示す。

低中音域の値は  $0.2$  以下で低く、 $h = 10$  cm で最大となる。Type S と T の場合と同様に、 $L/\lambda = 1$  付近で急上する特徴を持つ。特に  $2$  kHz 付近では変動傾向が激しく、 $0 \sim 1$  の間で大きく変化するものの、ランダム入射値と同様に  $h = 2 \sim 4$  cm で最大となる。

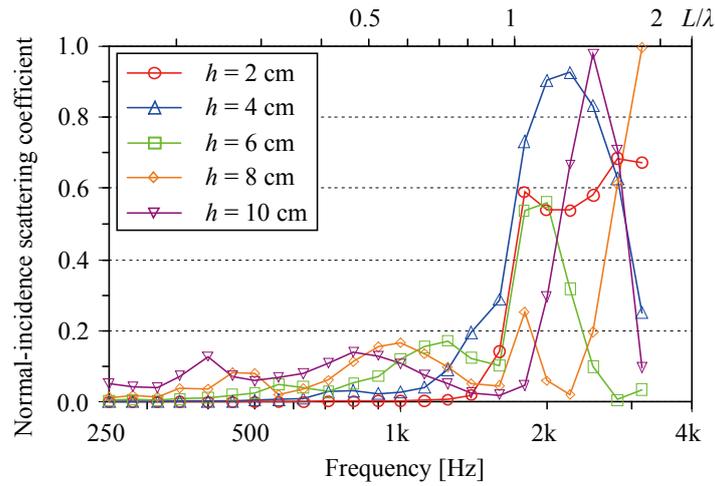


Fig. 5.32: Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R ( $w = 10$  cm) with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

## 5.5 凹凸幅による影響

### 5.5.1 解析方法

解析対象は矩形波型周期構造 (Type R, 15 周期) を用いる。詳細は Table 5.3、Fig. 5.33 に示す。凹凸の周期は  $L = 20$  cm で一定とし、各々の高さにおいて、幅を 15, 10, 5, 0 cm ( $w/L = 75, 50, 25, 0\%$ ) の 4 段階で変化させ、凹凸幅に起因する影響について検討する。なお、境界条件は前節と同様に、全面剛、厚さ 0 である。入射角・反射角に関する離散化パラメータ  $N_\theta$  は共に 30 とし、受音点は無限遠方を想定する。境界要素としては四角形一定要素を用い、要素サイズは最小解析波長の 6 分の 1 以下になるように設定する。解析周波数は 1/6 oct. band 中心周波数である。

Table 5.3: Measurement conditions for 1D rectangular surface by changing its widths.  $L$ ,  $w$  and  $h$  are period, width and height, respectively.

	Shape	$L$ [cm]	$w$ [cm]	$h$ [cm]	Number of periods
Type R	Rectangles	20	15	2, 4, 6, 8, 10	15
			10	2, 4, 6, 8, 10	
			5	2, 4, 6, 8, 10	
			0	2, 4, 6, 8, 10	

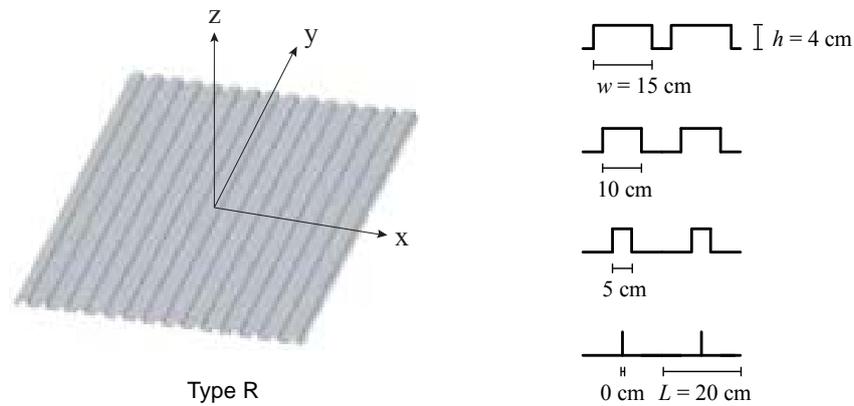


Fig. 5.33: Test sample of 1D rectangular surface (15 periods) with various widths.  $w$ ,  $L$  and  $h$  are width, period and height of the test sample, respectively.

## 5.5.2 結果と考察

### 入射角依存乱反射率の分布

凹凸幅の異なる Type R ( $h = 4$  cm) について、500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3.15 kHz における入射角依存乱反射率の解析結果をそれぞれ Fig. 5.34, 5.35, 5.36 に示す。

1 kHz においては、幅によらず類似する分布を示すが、 $w = 10$  cm の場合ほど、高い値を示す範囲が他より大きくなる。

2 kHz においては、幅による分布の変化は顕著になるものの、中音域と同様に  $w = 10$  cm で値が大きくなることがわかる。 $w = 15, 5$  cm の場合を比較して見ると、 $w = 15$  cm で入射角依存性も比較的小さく値も大きいことから、平面に対して凹面の方が凸面より拡散体としてより優れるものであると考えられる。3.15 kHz においても  $w = 10$  cm で他より値が大きくなっている。

以上の検討により、Type R ( $L = 20$  cm,  $h = 4$  cm) の場合においては、 $w = 10$  cm で拡散効果が最大となることが推察される。

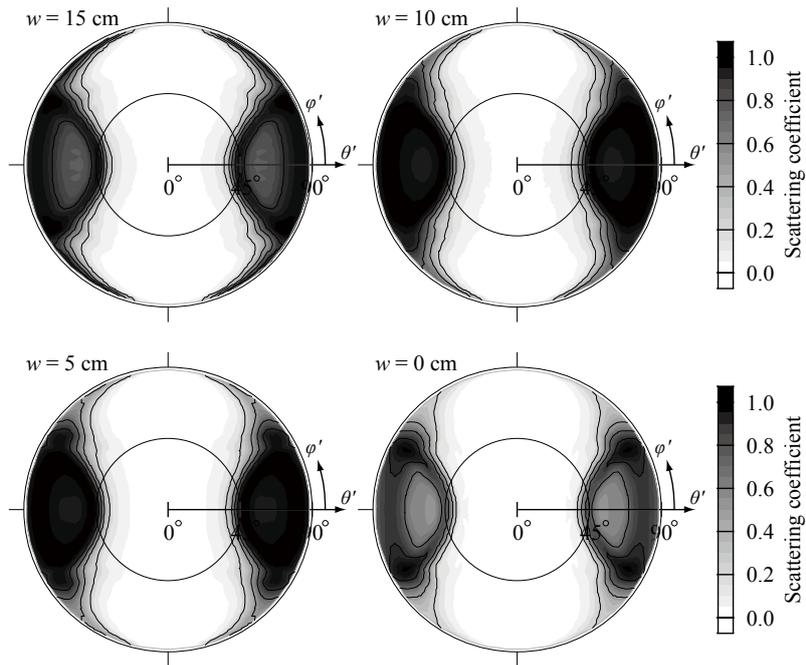


Fig. 5.34: Distribution of directional scattering coefficients at 1 kHz calculated for Type R ( $h = 4$  cm) with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm.

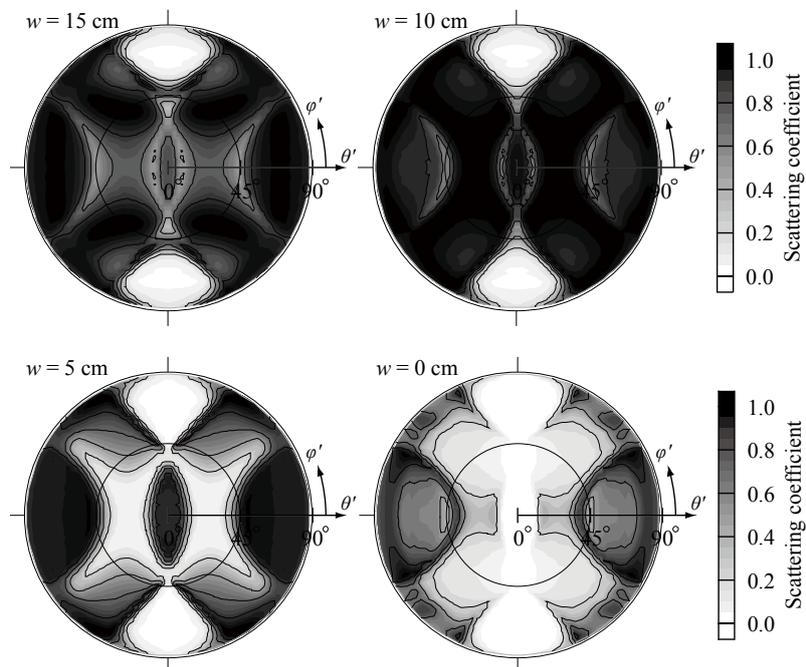


Fig. 5.35: Distribution of directional scattering coefficients at 2 kHz calculated for Type R ( $h = 4$  cm) with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm.

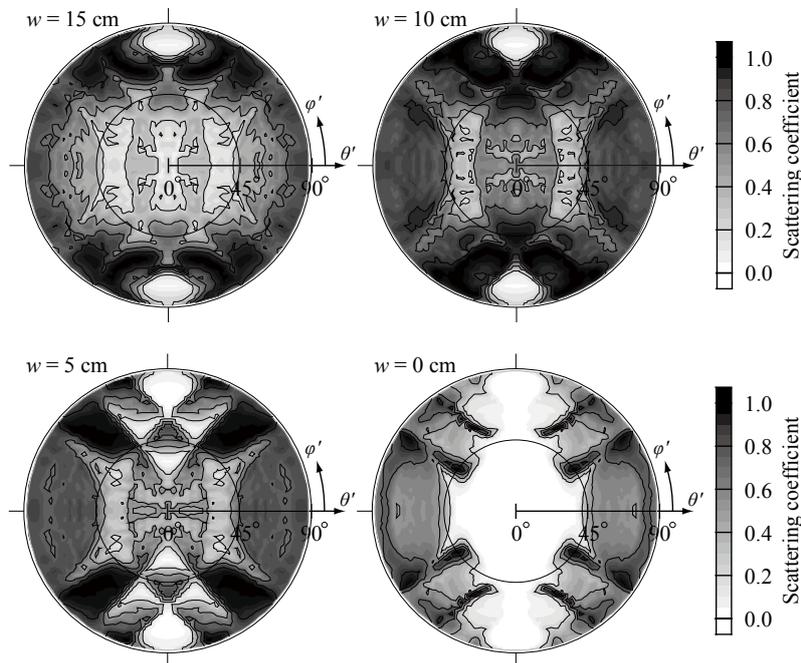


Fig. 5.36: Distribution of directional scattering coefficients at 3.15 kHz calculated for Type R ( $h = 4$  cm) with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm.

### ランダム入射乱反射率

凹凸高さ  $h = 2, 4, 6, 8, 10$  cm ( $L = 20$  cm) において、幅を変化させた場合のランダム入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.37 に示す。

凹凸高さによらず、 $w = 10$  cm で全帯域での乱反射率値が他より大きいことがわかる。 $w = 15$  cm の場合は  $w = 10$  cm に比べおよそ 0.2 程度の低下が見られるが、全体的に類似した傾向にある。また、 $w = 5$  cm の場合は  $w = 15$  cm に比べ比較的ピーク・ディップが生じている。幅が狭くなると垂直方向に音波がより進行され位相干渉が顕著になるためであると考えられる。 $w = 0$  cm の場合は、高さの増加に従い徐々に値が大きくなり、 $h = 10$  cm では他のケースとの周波数特性が同程度となり、値も概ね近似する傾向にある。

以上より、周期  $L = 20$  cm におけるランダム入射乱反射率は  $w = 10$  cm で拡散効果が最大となることが確認された。

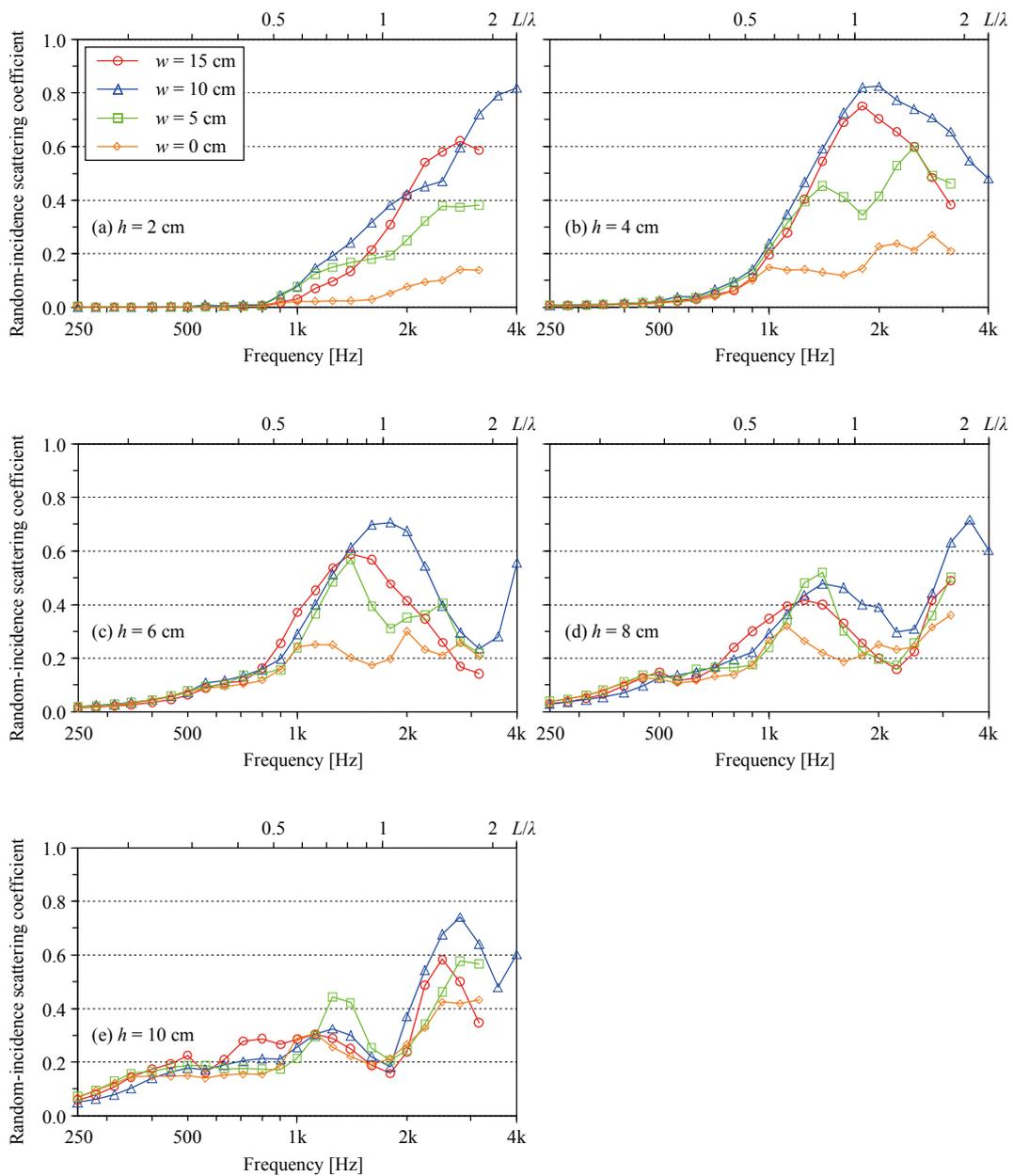


Fig. 5.37: Random-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm, on the conditions of (a)  $h = 2$  cm, (b)  $h = 4$  cm, (c)  $h = 6$  cm, (d)  $h = 8$  cm and (e)  $h = 10$  cm.

### 垂直入射乱反射率

凹凸高さ  $h = 2, 4, 6, 8, 10$  cm ( $L = 20$  cm) において、幅を変化させた場合の垂直入射乱反射率の解析結果を Fig. 5.38 に示す。

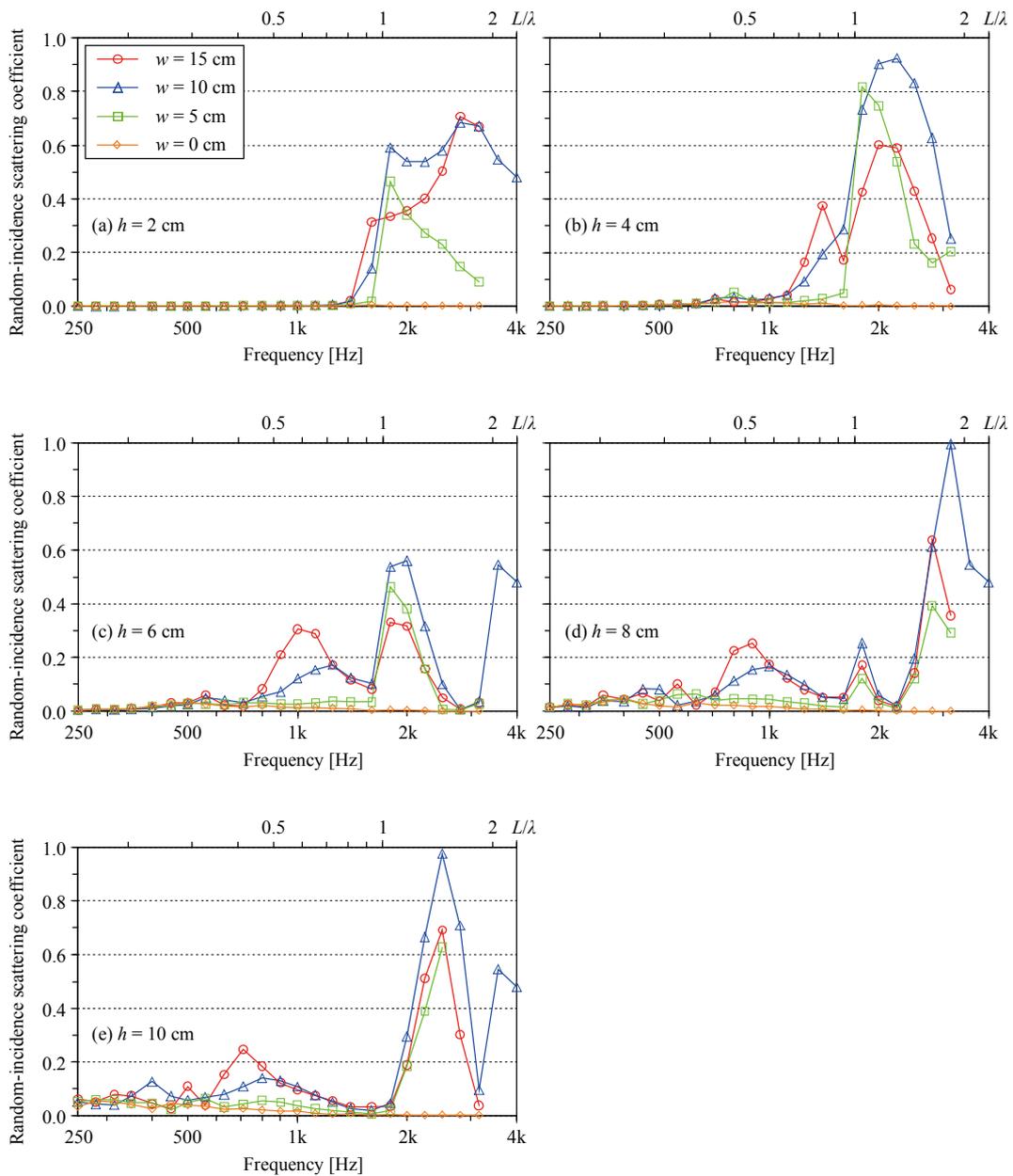


Fig. 5.38: Normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm, on the conditions of (a)  $h = 2$  cm, (b)  $h = 4$  cm, (c)  $h = 6$  cm, (d)  $h = 8$  cm and (e)  $h = 10$  cm.

垂直入射乱反射率は、ランダム入射条件の場合と同様に、高さによらず  $w = 10$  cm で最大値となることが確認された。なお、 $w = 0$  cm の場合は、高さの増加による変化は殆ど見られなく、全周波数帯域で極めて小さい値を示す。

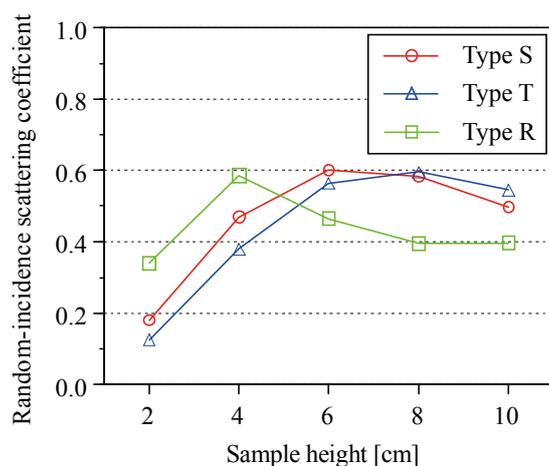


Fig. 5.39: Averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w = 10$  cm) with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

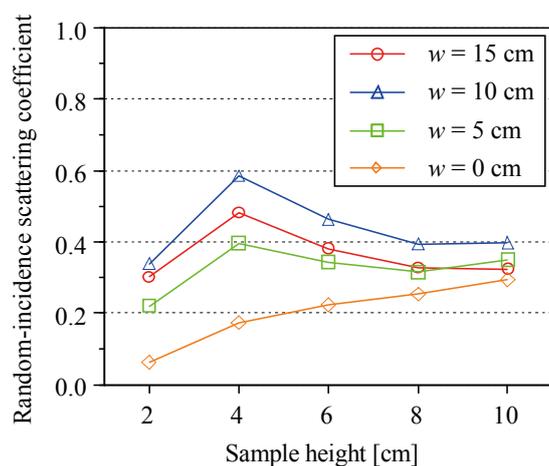


Fig. 5.40: Averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm.

## 5.6 建築音響設計における拡散体設定に関する検討

前節では、異なる形状、高さ及び幅を持つ周期構造壁面の乱反射率性能を定量化し、その特徴を明らかにした。本節では、その周期構造壁面を対象とし、室内音響設計において、壁面の拡散性能を最大化するための拡散体の設定について具体的に考察する。

### 5.6.1 ランダム入射条件における拡散体

凹凸形状 3 タイプにおいて、高さを変化させた場合の平均ランダム入射乱反射率の結果を Fig. 5.39 に示す。平均ランダム入射乱反射率の計算では、周期に対して半

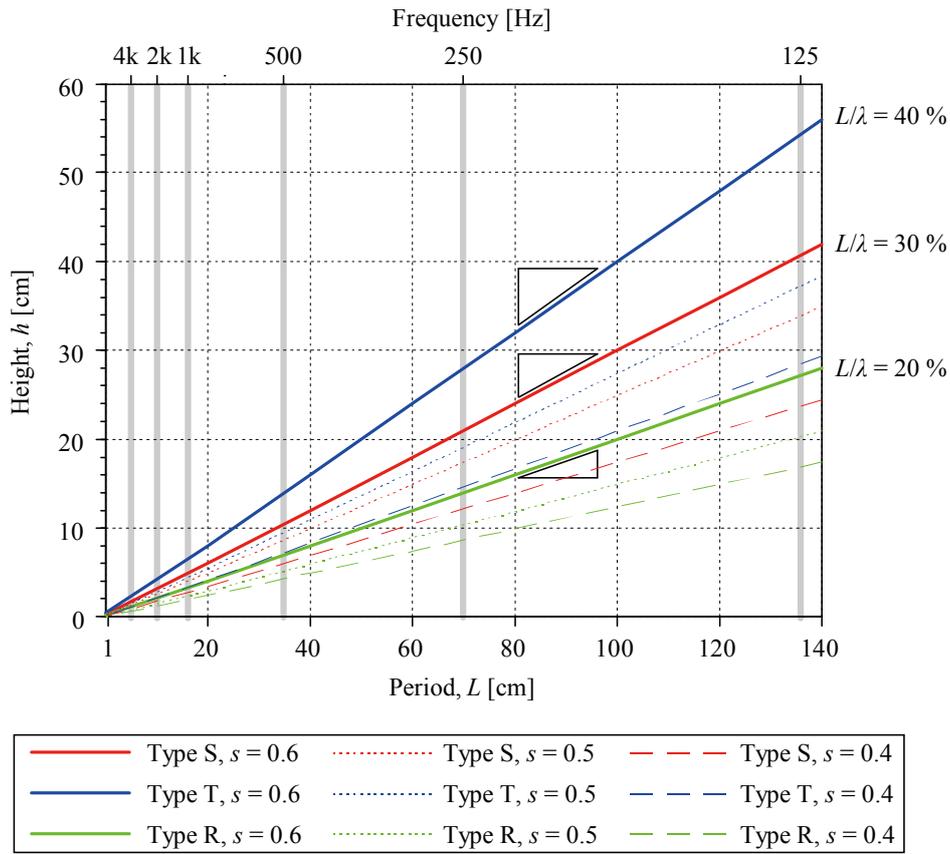


Fig. 5.41: Acoustic performance of 1D periodic surfaces, averaged random-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w/L = 50\%$ ).

波長になる周波数以上 ( $0.5 \leq L/\lambda \leq 2$ ) での値を算術平均した。全体的にみると、周期構造壁面の拡散性能を最大化するためには、Type S で  $h/L = 30\%$  程度、Type T で  $h/L = 40\%$  程度、Type R で  $h/L = 20\%$  程度に設定することが望ましいと考えられる。また Type R において、凹凸幅を変化させた場合における解析結果を Fig. 5.40 に示す。高さによらず  $w/L = 50\%$  ( $w = 10$  cm) で拡散効果が最大となることが確認された。

矩形波型壁では高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられが、実際の建築空間においては矩形波型壁が頻繁に用いられている。ここで、矩形波型壁を対象とし、大ホールの拡散性を向上するための拡散体の寸法を考えると (Fig. 5.41)、250 Hz 以上の制御では周期 70 cm, 幅 35 cm, 高さ 14 cm 程度、500 Hz 以上の制御では周期 35 cm, 幅 17.5 cm, 高さ 7 cm 程度に設定すると拡散効果が最大化されると考えられる。

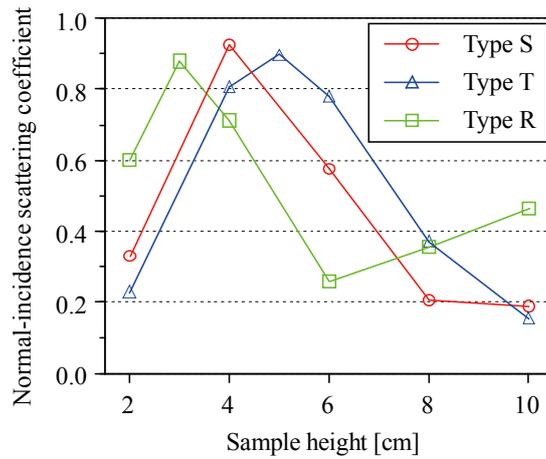


Fig. 5.42 Averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w = 10$  cm) with changing  $h = 2, 4, 6, 8$  and  $10$  cm.

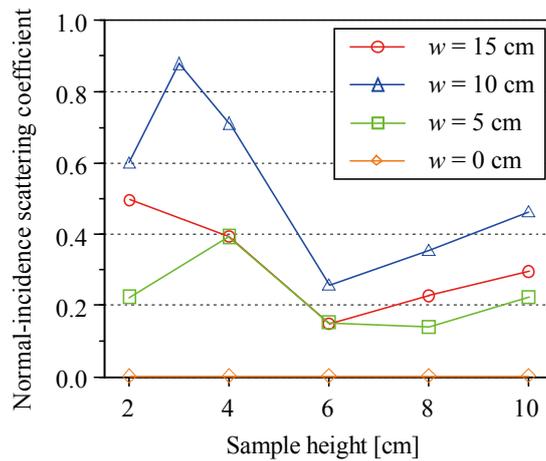


Fig. 5.43: Averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing  $w = 15, 10, 5$  and  $0$  cm.

### 5.6.2 垂直入射条件における拡散体

凹凸高さの異なる形状 3 タイプにおける平均垂直入射乱反射率の結果を Fig. 5.42 に示す。平均垂直入射乱反射率の計算では、周期が波長と同程度になる周波数以上 ( $1 \leq L/\lambda \leq 2$ ) での値を算術平均した。Type S, T 及び R でそれぞれ  $h/L = 20, 25, 15\%$  程度に設定すると、拡散効果が最大となり、乱反射率が 0.9 程度の非常に大きな値を示す。また、凹凸幅については (Fig. 5.43)、ランダム入射の場合と同様に  $w/L = 50\%$  に設定することが望ましいと考えられる。

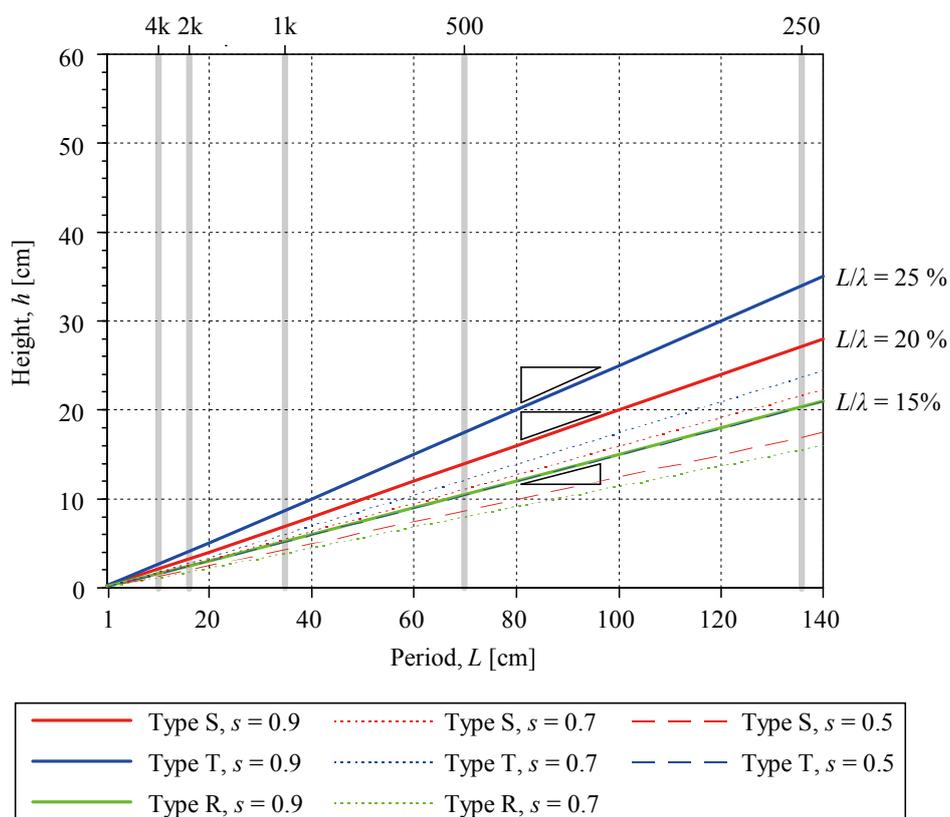


Fig. 5.44: Acoustic performance of 1D periodic surfaces, averaged normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w/L = 50\%$ ).

フラッターエコー等の音響障害を緩和するための拡散体は、矩形波型壁の壁面を対象として考える場合 (Fig. 5.44)、1 kHz 以上の制御は周期 34 cm, 幅 18 cm, 高さ 5 cm 程度、2 kHz 以上の制御は周期 17 cm, 幅 8 cm, 高さ 3 cm 程度に設定することが望ましいと考えられる。

## 5.7 まとめ

本章では、乱反射率の波動音響解析手法を用いて、典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁面の乱反射率特性を調べると共に、測定結果との比較検証を行い測定法の汎用性及び適用性を向上させた。さらに、その応用として音響設計上有効な拡散体を提案した。

はじめに 3 次元音場における反射指向特性から乱反射率を算出する方法について述べ、境界要素法を適用した乱反射率の数値計算方法について概説した。

次に正弦波、三角波、矩形波となる 3 種類の 1 次元周期構造壁面を対象として取

り上げ、その凹凸形状、高さ、幅による影響を具体的に検討した。

全体的に、矩形波型壁は高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波型壁・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられる。

周期構造壁面の拡散性能を最大化するための凹凸高さは、以下のように設定することが望ましいと考えられる。

- ランダム入射時においては、正弦波型で  $h/L = 30\%$  程度、三角波型で  $h/L = 40\%$  程度、矩形波型で  $h/L = 20\%$  程度とする。
- 垂直入射時においては、正弦波型、三角波型及び矩形波型でそれぞれ  $h/L = 20, 25, 15\%$  程度とする。

凹凸幅はランダム及び垂直入射の場合と共に  $w/L = 50\%$  に設定すると高さによらず拡散効果を最大化されることが明らかにされた。

最後に、周期構造壁面の汎用的な利用法として、建築空間において多く用いられている矩形波型壁を対象とし、音場の拡散性を向上やフラッターエコー等の音響障害を緩和するための拡散体を提案した。

## 第6章

# 総括

本研究は、壁面音響乱反射率の汎用的な定量化手法の構築・整備、及び実験室測定と数値解析を通して乱反射率の挙動を把握し、測定条件、測定における誤差要因等に関する知見を得ると共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を把握することを目的として行われた。本章では、本研究によって得られた成果を総括し、今後の展望及び課題について述べる。

**第1章**では、研究の背景及び既往関連研究の概観を行った上で、本研究の目的について述べた。

建築・都市空間における音響設計の重要性、壁面で反射される音波の散乱性状、即ち拡散性が室内音響特性に及ぼす影響について述べた上で、その問題点、壁面による音響拡散を考慮した音響設計の有効性について指摘した。また、壁面の音響拡散性能の評価指標を確立することも音響設計上有意義であることを述べた後に、音響乱反射率の定義、算出法や既往関連研究について概観し、本研究の位置づけを行った。

**第2章**では、ランダム入射乱反射率の測定法について、試料の適用条件や測定における誤差要因等、測定条件を明らかにするための検討を縮尺及び実大測定を通して行い、測定法の汎用性を向上させるための様々な知見を得た。

はじめに残響室法の測定原理について述べ、これに基づく **ISO 17497-1** の測定方法及び留意点について具体的に述べた。次に、模型残響室における縮尺及びインパルス応答測定に関する基礎的な検討を行い、他機関の測定結果との比較により本測定システムの妥当性を検証した。

その後、縮尺模型残響室を用いた測定を通して、試料の端部処理や配置等の試料適用範囲に関する検討を行った。測定試料を円形に切り取った場合に、試料端部の凹凸により過大に測定されていた乱反射率を、基準円盤に枠を取り付けることで抑制できることを示した。枠の高さは試料高さ以上必要であり、枠の厚さによる影響は小さい

ことが確認された。また、試料の配置による影響は僅かであり、試料の切り出し位置は測定上殆ど問題にならないことが示唆された。

最後に、インパルス応答の測定条件について、その同期加算方法を理論的に考察した上で、測定における信号周期、回転周期、角度ステップ数等が乱反射率に及ぼす影響を縮尺及び実大測定を通して検討した。Step 法では、信号の種類に関わらず、角度ステップ数の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加することがわかった。SS 信号による連続法では、1 回転での信号数の下限値が存在し、それは Step 法の角度ステップ数に対応することを示した。MLS 信号による連続法では、部屋の残響時間に比例する回転周期の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加するものの、インパルス応答の切り出し時間に大きく依存することを確認した。ISO 規定の角度ステップ数 60~120 個は普通の残響室、高い乱反射率の試料に対して、乱反射率の過小評価をもたらす可能性があり、連続法で用いる測定信号については、SS 信号の方が MLS 信号より実用的であることを示した。

第 3 章では、前章で構築したランダム入射乱反射率の測定システムを用いて各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べた。特に、一般的な拡散壁であるリブ及びブロック構造を対象とし、縮尺模型測定によるケーススタディを通して表面形状に起因する乱反射率の特徴を明らかにし、拡散壁設計上で有用な知見を得た。

リブ構造壁面について、角柱高さ、角柱配置、背後空気層、角柱形状、吸音仕上げによる乱反射率特性を調べた。角柱リブ構造の乱反射率は、角柱高さが半波長付近の周波数で低下し、そのディップは高さの増加に伴い低音域に移動することがわかった。リブの高さ変動、間隔の拡大・不均等化、背後空気層の挿入は上記ディップを緩和し、周波数特性の平坦化に有効であることを示した。また、円柱・直立板リブ構造の乱反射率は、角柱リブ構造に概ね近似しつつ、高音域に向けて緩やかに増加する傾向が見られた。リブ構造の溝部または背後に吸音材を挿入した場合は、吸音材無しの場合と比較的類似した乱反射率特性を示した。

その後、ブロック構造壁面について、被覆率や配列による乱反射率特性を調べた。立方体ブロック構造の乱反射率は、低中音域で小さく、高音域のみで大きくなる傾向が見られた。被覆率は 25~50 % で高音域の乱反射率は同程度であり、それ以上の被覆率では低下する傾向にある。またブロック被覆率 50 % では、ブロックの交互配置よりランダム配置の方が中音域で乱反射率が増大し、同被覆率の角柱リブ構造の周波数特性に近づくことを示した。

第 4 章では、第 2 章の測定法とは全く異なる原理の垂直入射乱反射率の測定法を考案し、縮尺模型測定を通して試料の適用条件や測定における誤差要因等に関する検討を行い、数値解析結果との比較により測定法の汎用性及び有効性を検証した。

はじめに新たに提案する垂直入射乱反射率の測定理論について述べ、矩形室において 1 次元音場が卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を求める測定方法を提案した。

次に、縮尺模型測定により実現し、試料の適用条件や測定における設定条件等の適切な測定条件を導いた。受音点位置に関しては、受音点毎のエネルギーレベル差は見られるものの、周波数によらず減衰率は概ね一致することを示した。試料設置方向による影響は小さいことを示した。また、乱反射率の周波数特性が異なる様々な試料を対象とした検討を行った。乱反射率は残響時間の同定区間により大きく変化するものの、初期に対し後期の残響曲線から同定した測定値は計算値と非常に良く対応することを確認した。

最後に、以上の測定法の応用的な利用法として、縮尺模型実験により 2 次元ランダム入射乱反射率の同定を試み、数値解析結果との比較を通して、測定法の適用可能性に関する検討を行った。入射角依存性を考慮した測定法であるため試料方向により測定値が異なることが例示されたが、測定法として精度上の問題が大きいことがわかった。

**第 5 章**では、乱反射率の波動音響解析手法を用いて、典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁面の乱反射率特性を調べると共に、測定結果との比較検証を行い測定法の汎用性及び適用性を向上させた。さらに、その応用として音響設計上有効な拡散体を提案した。

はじめに 3 次元音場における反射指向特性から乱反射率を算出する方法について述べ、境界要素法を適用した乱反射率の数値計算方法について概説した。

次に正弦波、三角波、矩形波となる 3 種類の 1 次元周期構造壁面を対象として取り上げ、その凹凸形状、高さ、幅による影響を具体的に検討した。全体的に、矩形波型壁は高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波型壁・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられる。周期構造壁面の拡散性能を最大化するための凹凸高さは、ランダム入射時においては、正弦波型壁で周期に比べ 30 % 程度、三角波型壁で 40 % 程度、矩形波型壁で 20 % 程度の高さとし、垂直入射時においては、正弦波型壁、三角波型壁及び矩形波型壁でそれぞれ 20, 25, 15 % 程度の高さに設定することが望ましいことが確認された。凹凸幅に関しては、高さによらずランダム及び垂直入射時と共に周期に比べ 50 % の幅で拡散効果が最大になることを示した。

最後に、周期構造壁面の汎用的な利用法として、建築空間において多く用いられている矩形波型壁を対象とし、音場の拡散性の向上やフラッターエコー等の音響障害を緩和するための拡散体の設定方法を提案した。

以上、本研究によって得られた成果を総括した。乱反射率は壁面の音響拡散を表す一物理指標として提案され、幾何音響シミュレーションの予測精度の向上や拡散体の性能評価ともなる等、室内音響設計の支援ツールとしての役割が期待されているが、手法上に未解明の部分が多く残されていた。本論文では壁面音響乱反射率の定量化手法の構築のみならず、その汎用性及び適用性を高めるための設定条件に関する知見を得ると共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べることを目的とした。測定・数値解析の両面での検討を行い、測定における誤差要因を明らかにし、適切な設定条件を提案、拡散体設計上で有用な知見を取得することができた。具体的には、ISO 17497のPart 1にて規格化されているランダム入射乱反射率の測定法について、測定精度・適用範囲に関する有用な知見を得ることができた。さらに、そのPart 3, 4にて現在規格化が進行中である斜入射乱反射率の数値予測や垂直入射乱反射率の測定法に対しても様々な知見を提供できるものと考えている。

今後、本研究にて構築し汎用性を向上させた測定法を用いて定量化された乱反射率を様々な予測や評価で利用されることを望む。

利用方法としては、乱反射率の定量化手法の構築により、各種壁面拡散体の乱反射率データベースが構築され、幾何音響シミュレーションの基礎データとして有用であると考えられる。幾何音響シミュレーションは設計実務において不可欠なツールであり、現実的手法として広く用いられている。近年、幾何音響シミュレーションにおける乱反射率の取り扱いや有効性についての検討が進められており、拡散音場の仮定が成立しない空間の残響予測や壁面による拡散を考慮した騒音伝搬予測、各種音響物理量の推定等、幾何音響シミュレーションの適用範囲が広がっている。

また、拡散体の性能評価や新たな拡散体の開発等、拡散体の詳細設計の支援ツールとしての役割が期待される。未だに明確な形で定量化されておらず、曖昧な経験判断に依るところが大きかった拡散体の設計が、より効果的・効率的に行われ、室内音響設計における残響調整、音響障害の防止、音響効果の高品質化等の目的で利用することも可能と考えられる。

当面の課題としては、垂直入射乱反射率測定における測定条件に関する検討が挙げられる。測定法としての適用可能性は示されたが、有効性及び汎用性の向上を図るため、試料サイズや平行壁面間の距離等の設定条件についてのより詳細な検討が早急になされるべき課題であると考えられる。

また、本研究では実験室測定結果を一貫として指向相関法による数値解析結果との比較を行ったが、算出法の差異による影響や測定誤差要因を詳細に把握するため、数値解析結果との精細な比較・検討を行う必要があると考えられる。

## 付録 A

# インパルス応答の測定条件に関する検討

- 第 2 章におけるランダム入射乱反射率及び残響減衰性状の測定結果を示す。
- 1/4 縮尺において、SS 及び MLS 信号を用いた連続法によるものである。
- 測定条件等については第 2 章 6 節を参照のこと。

## A.1 SS 信号による測定結果

- SS 信号を用いた連続法による測定結果を示す。
- 測定試料は、2 次元周期構造 (Fig. 2.26(a)) 及び 1 次元周期構造 (Fig. 2.26(b)) を用いた。
- インパルス応答の測定条件は Table 2.16 に示す通り、信号周期、回転周期、角度ステップを固定して設定した。

### A.1.1 2次元周期構造壁面の場合

ランダム入射乱反射率（信号周期固定）

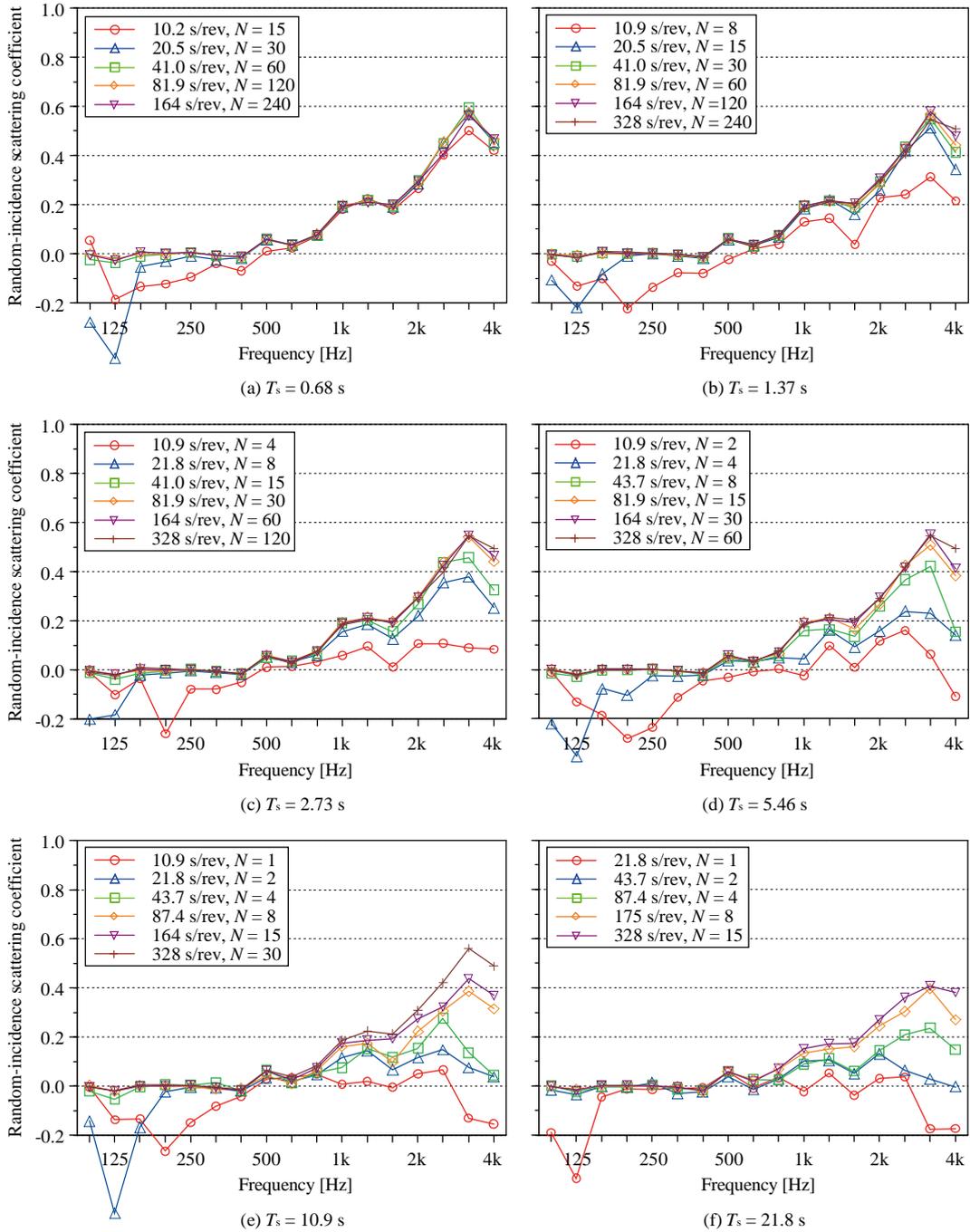


Fig. A.1: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal periods.

ランダム入射乱反射率（回転周期固定）

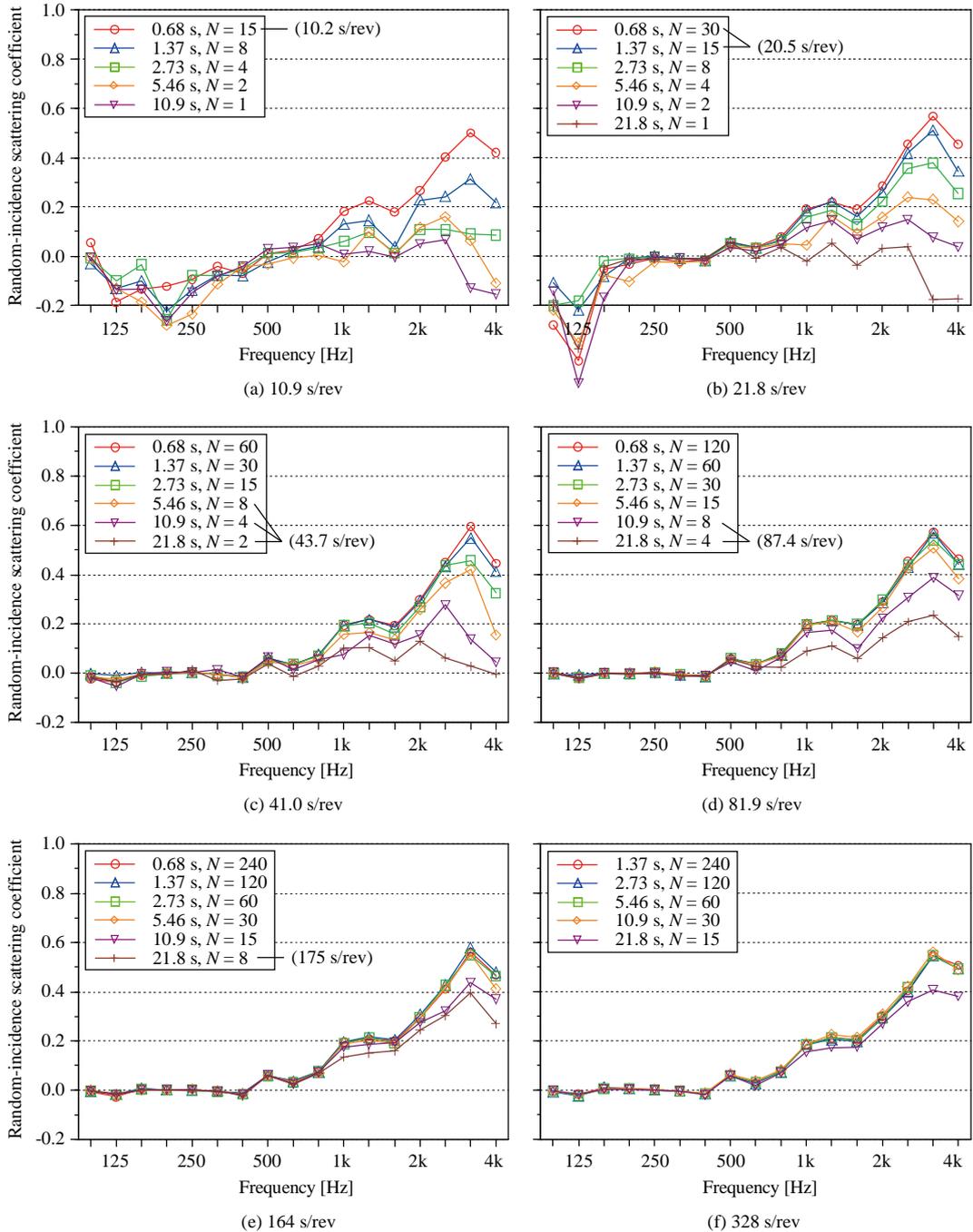


Fig. A.2: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods.

ランダム入射乱反射率（角度ステップ固定）

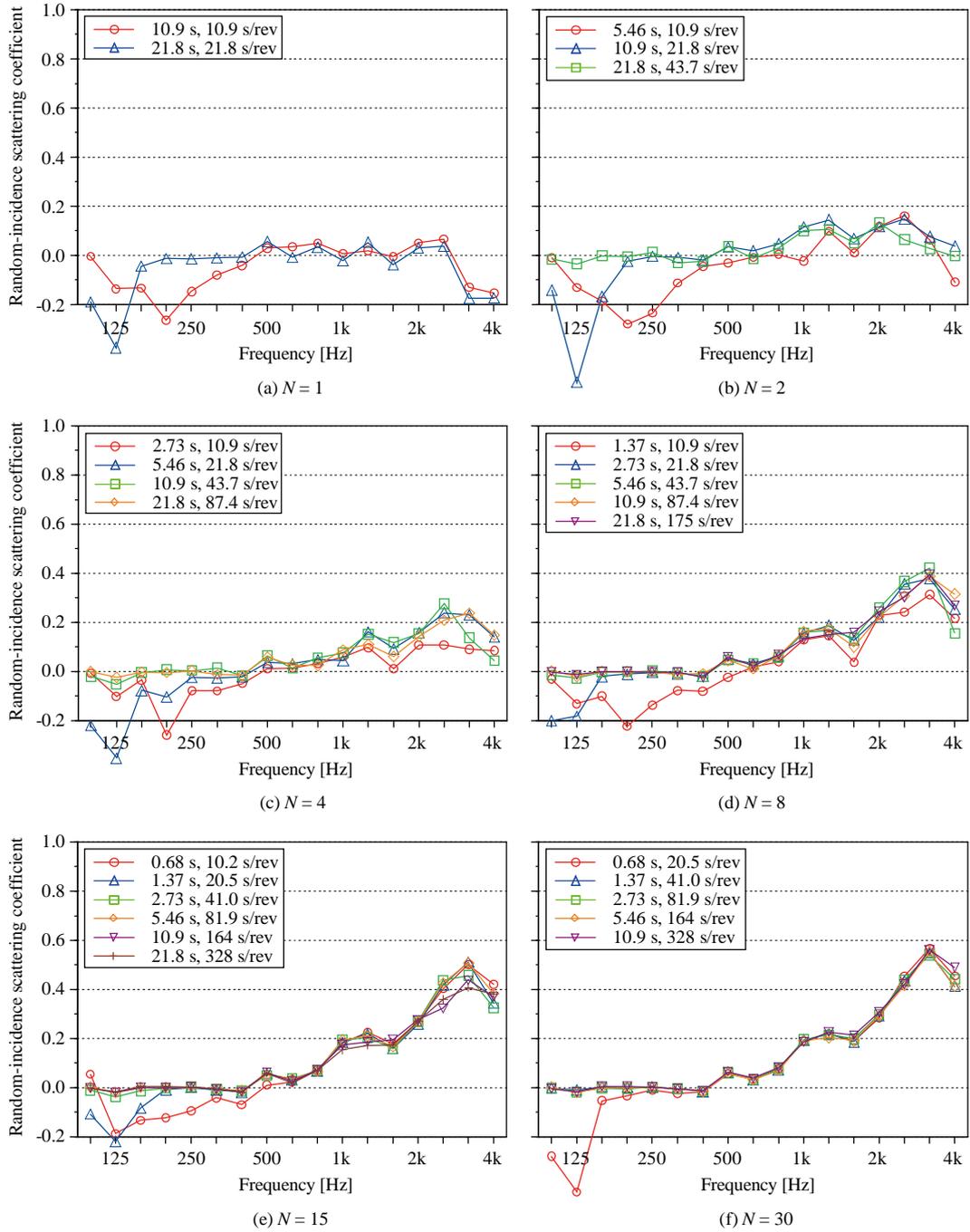


Fig. A.3: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (1).

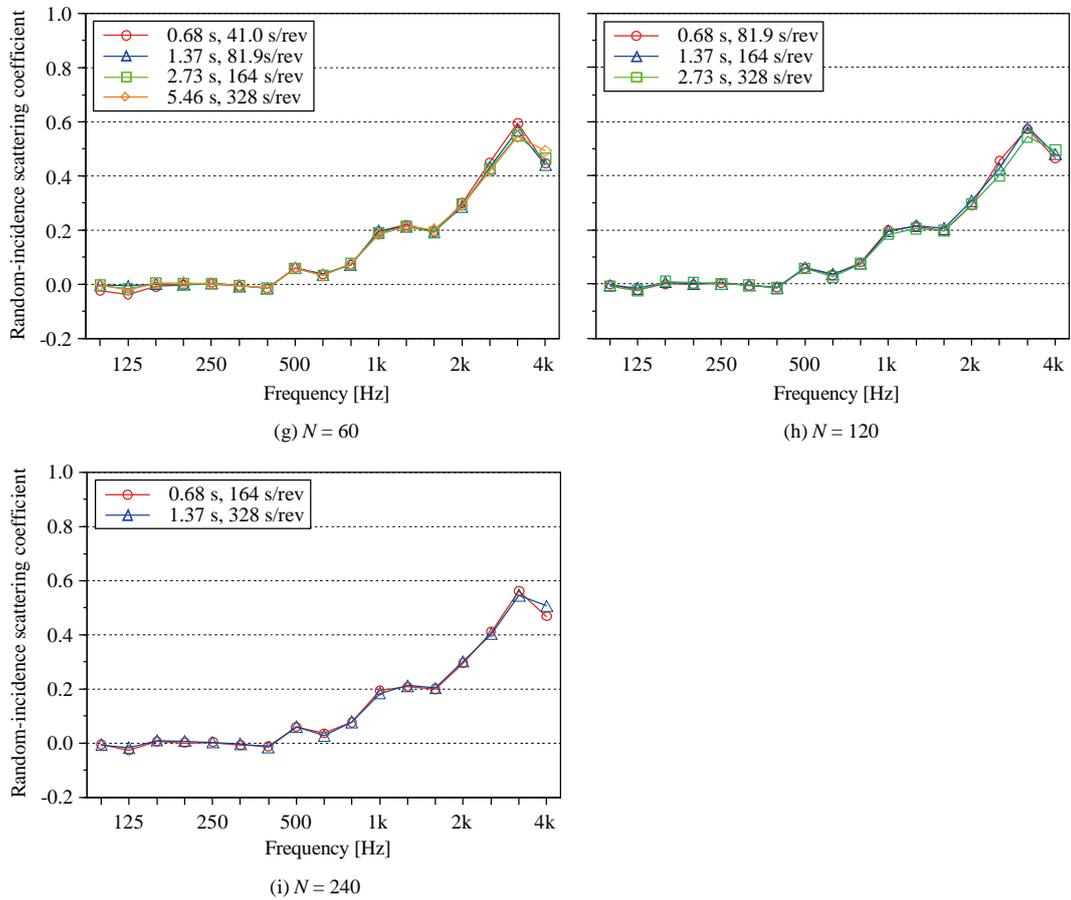


Fig. A.4: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (2).

残響減衰曲線（信号周期、回転周期、角度ステップ固定）

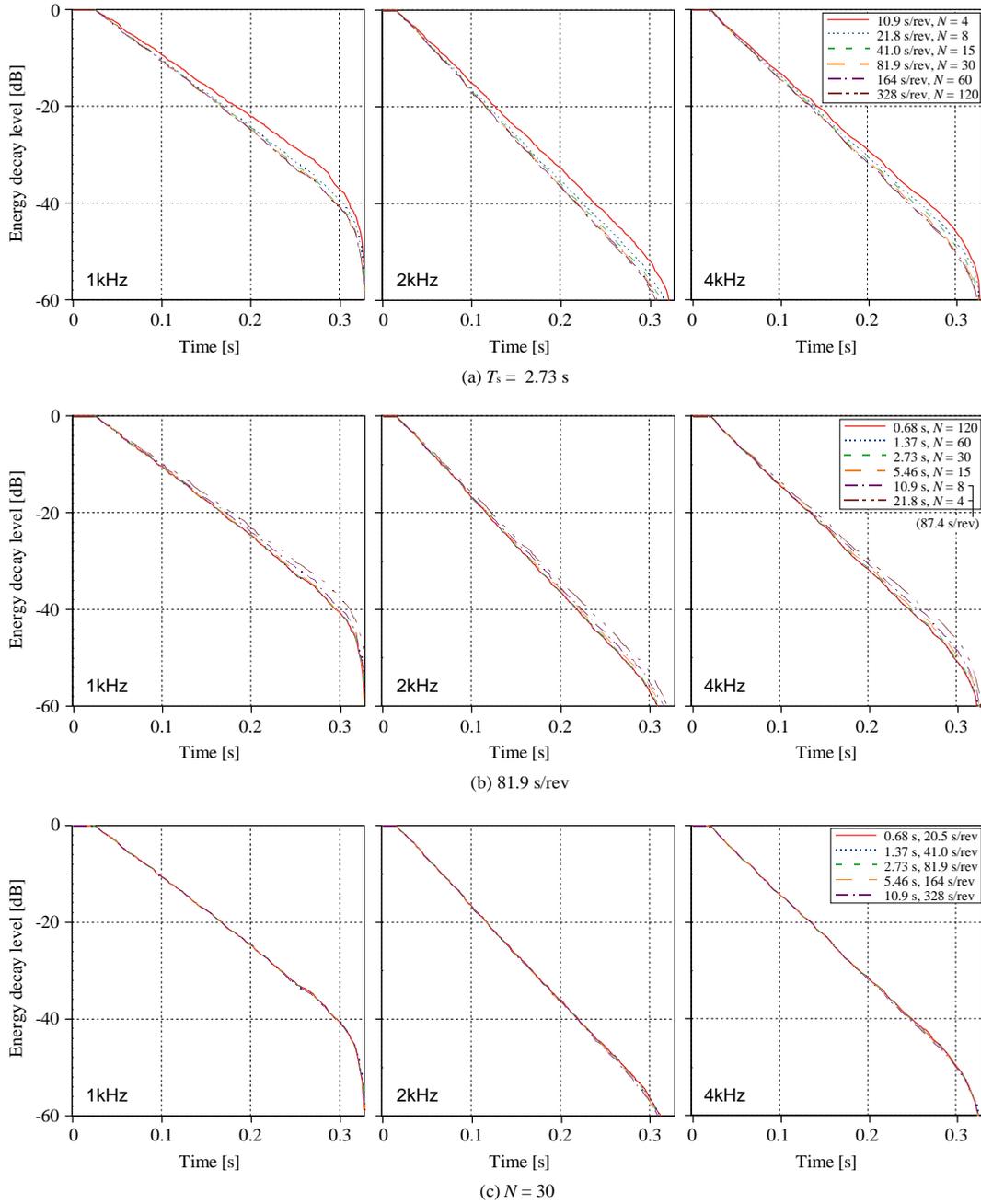


Fig. A.5: Energy decay curves, 2D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and angular step.

## A.1.2 1次元周期構造壁面の場合

ランダム入射乱反射率（信号周期固定）

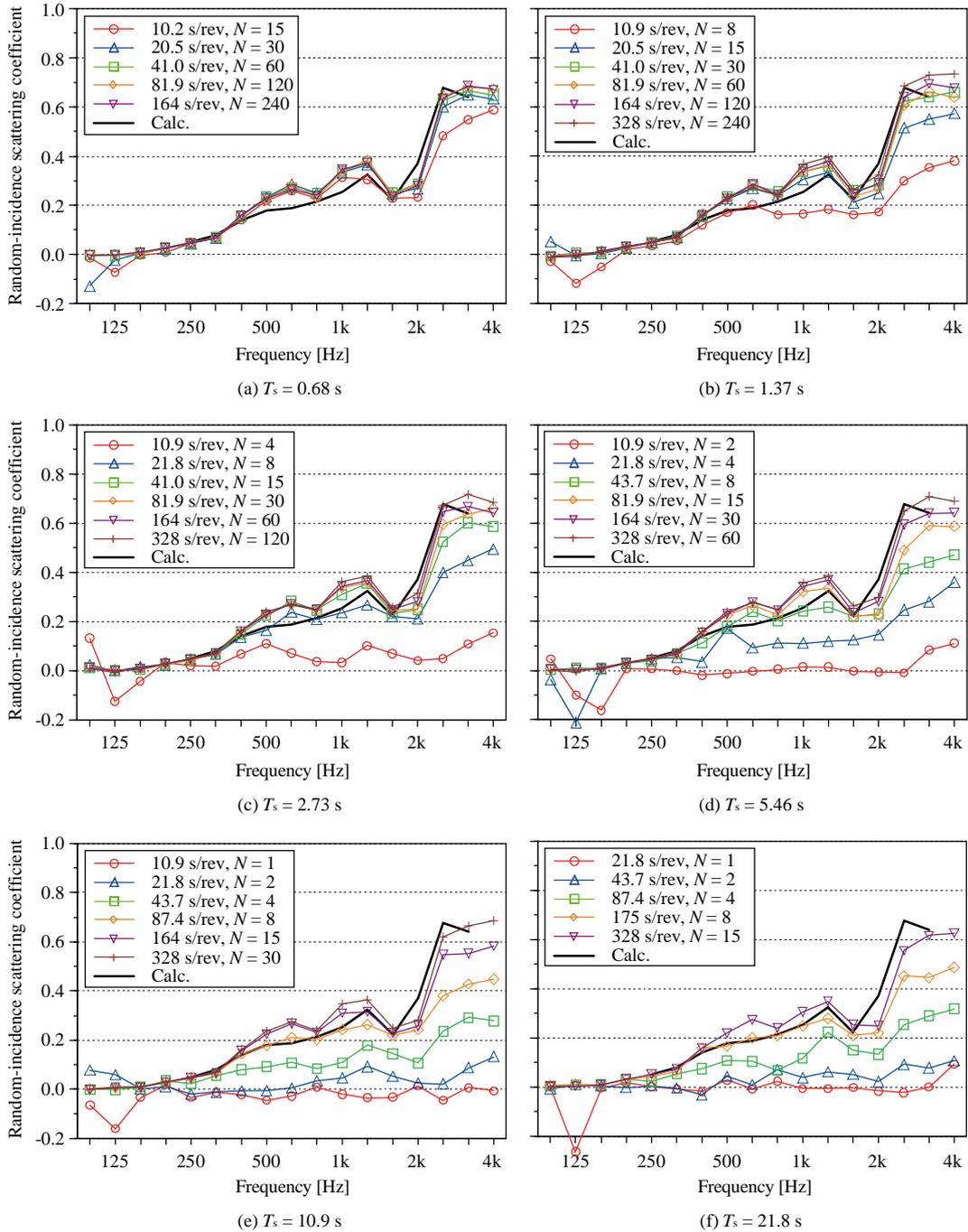


Fig. A.6: Random-incidence scattering coefficient, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed signal periods.

ランダム入射乱反射率（回転周期固定）

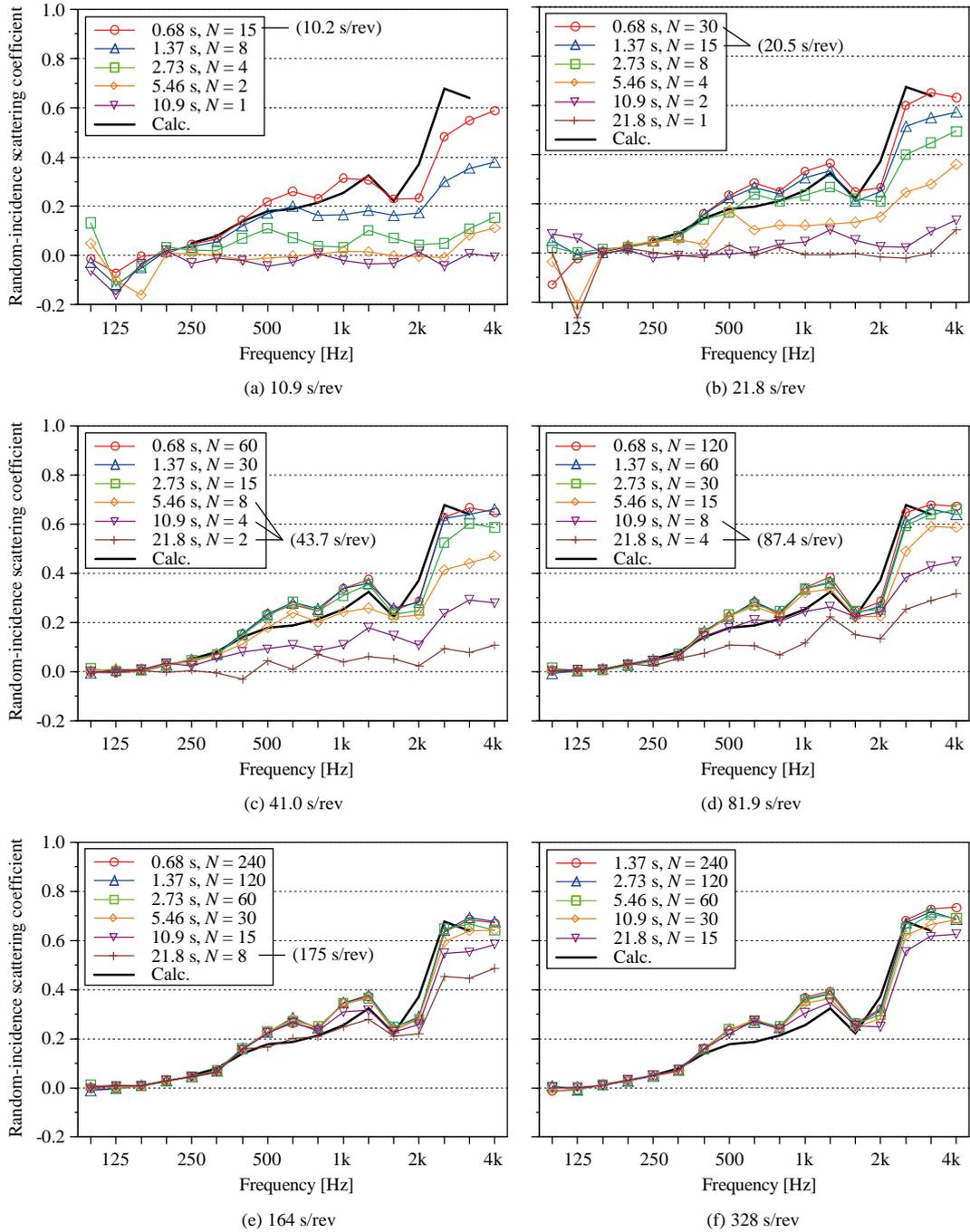


Fig. A.7: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods.

ランダム入射乱反射率（角度ステップ固定）

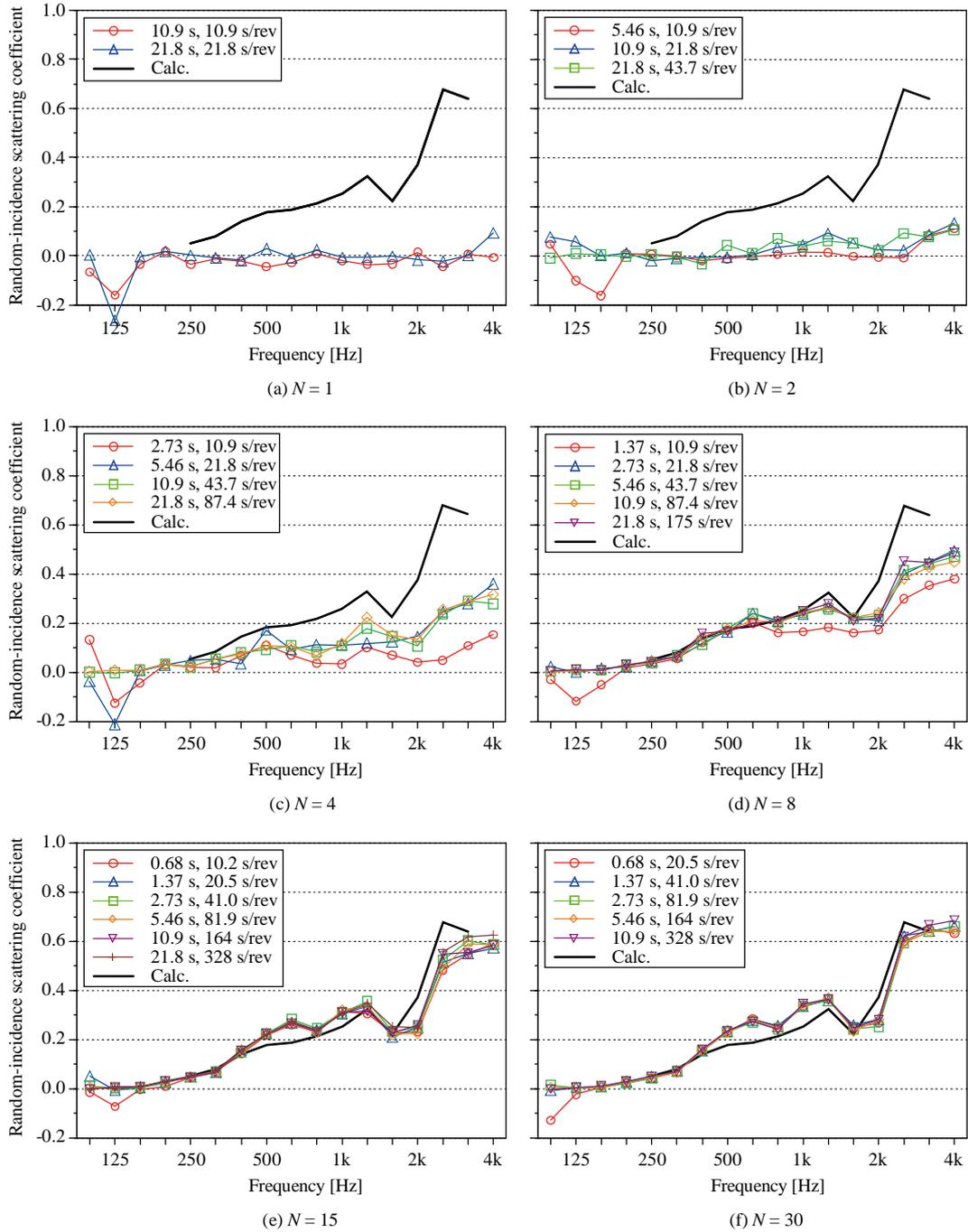


Fig. A.8: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (1).

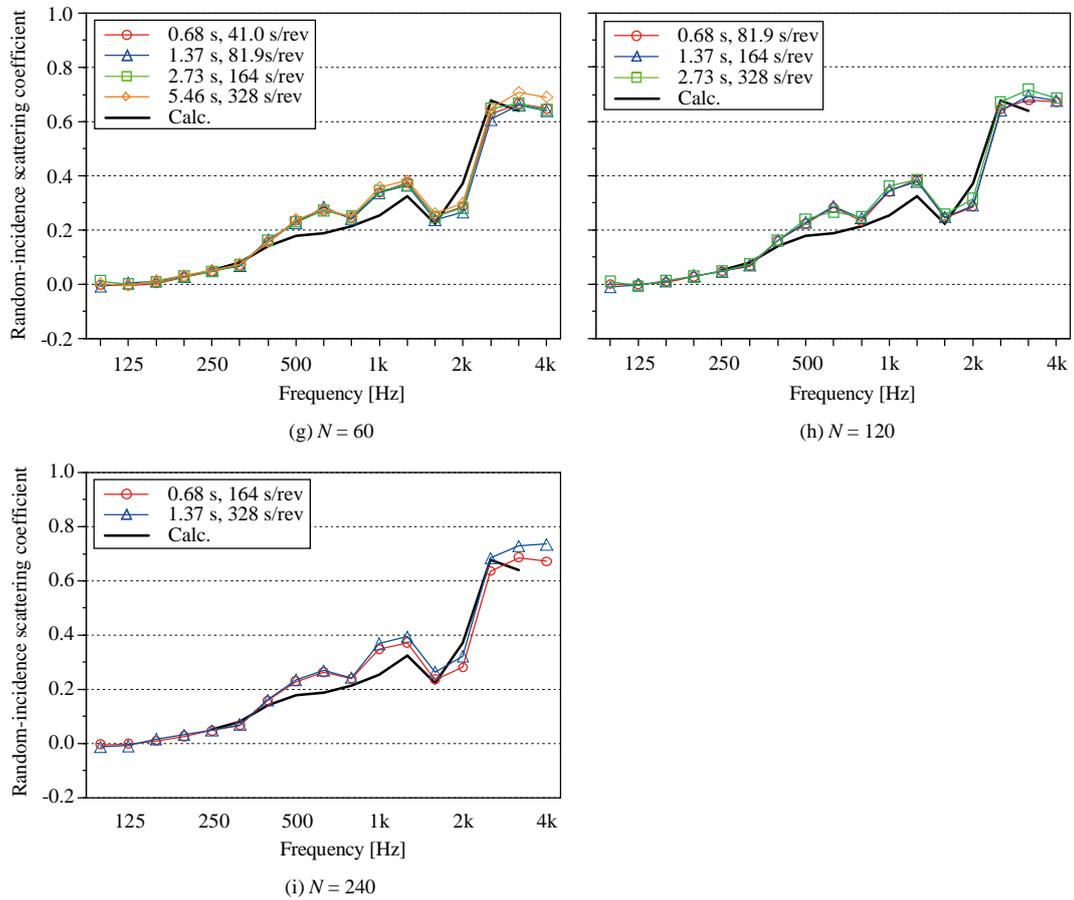


Fig. A.9: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed angular steps (2).

残響減衰曲線（信号周期、回転周期、角度ステップ固定）

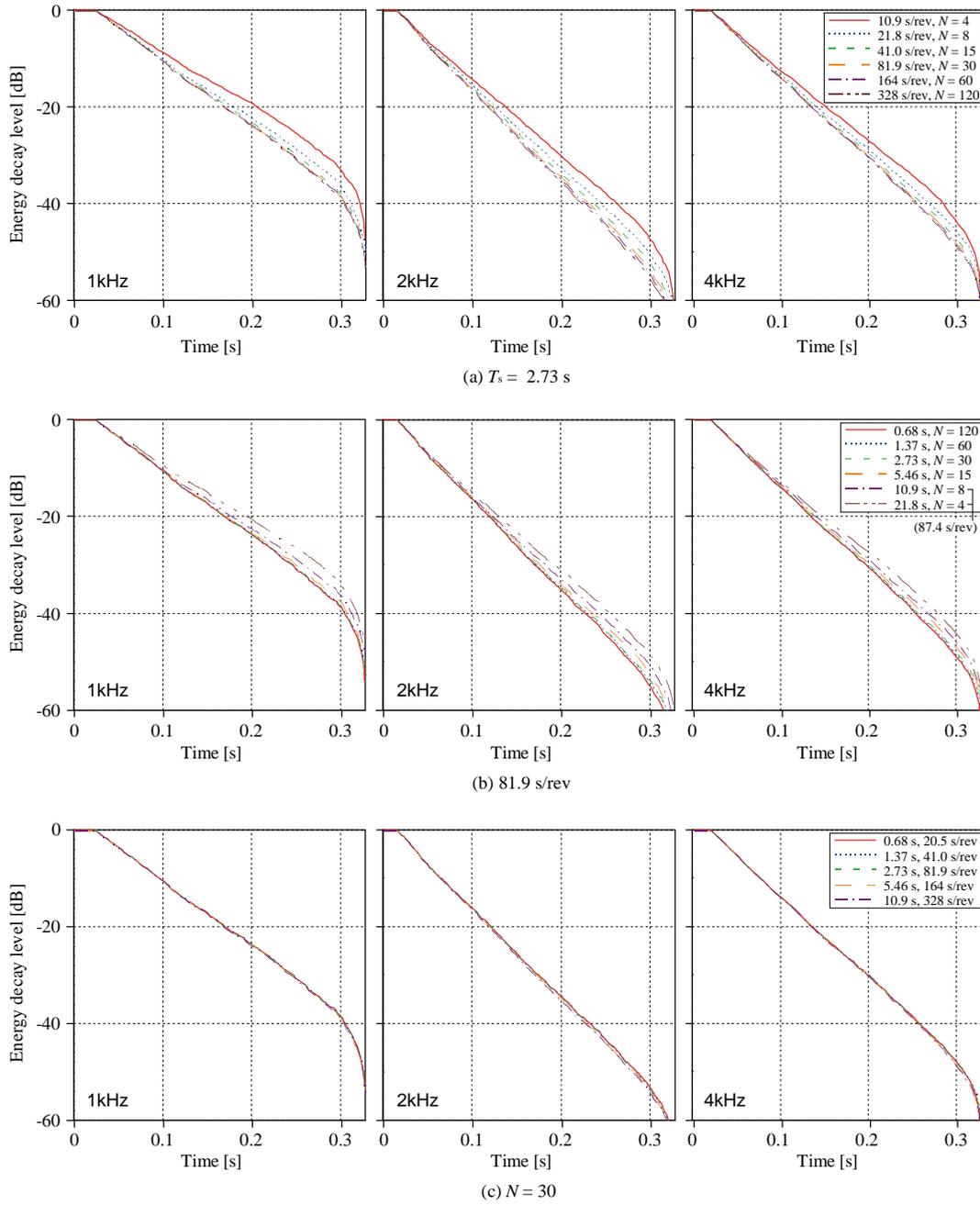


Fig. A.10: Energy decay curves, 1D periodic sample, SS signals, 1/4 scale, fixed single period, revolution period and angular step.

## A.2 MLS 信号による測定結果

- MLS 信号を用いた連続法による測定結果を示す。
- 測定試料は、2 次元周期構造 (Fig. 2.26(a)) 及び 1 次元周期構造 (Fig. 2.26(b)) を用いた。
- インパルス応答の測定条件は Table 2.16 に示す通り、信号周期、回転周期、信号数を固定して設定した。

## A.2.1 2次元周期構造壁面の場合

ランダム入射乱反射率（信号周期固定）

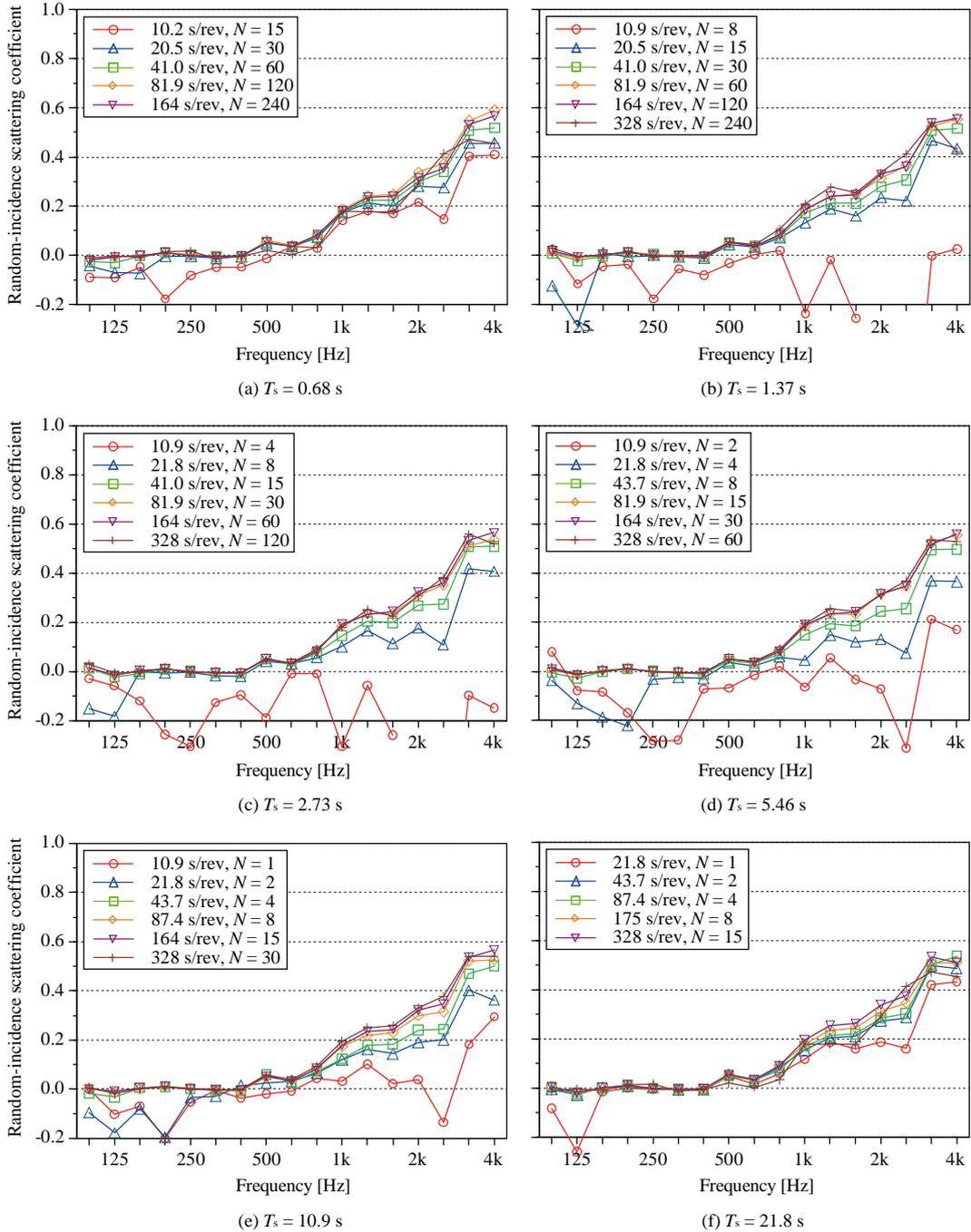


Fig. A.11: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal periods.

ランダム入射乱反射率（回転周期固定）

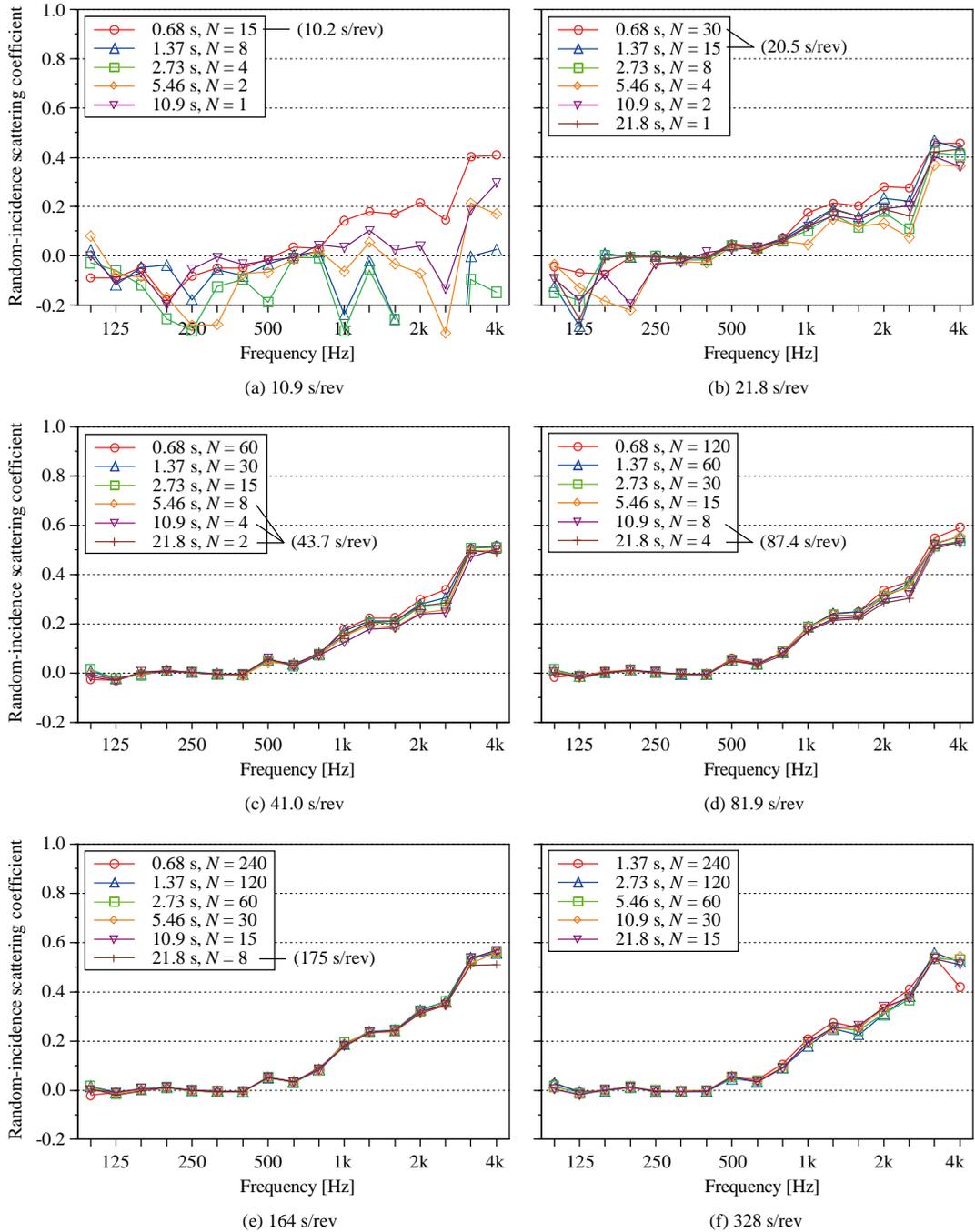


Fig. A.12: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods.

ランダム入射乱反射率（信号数固定）

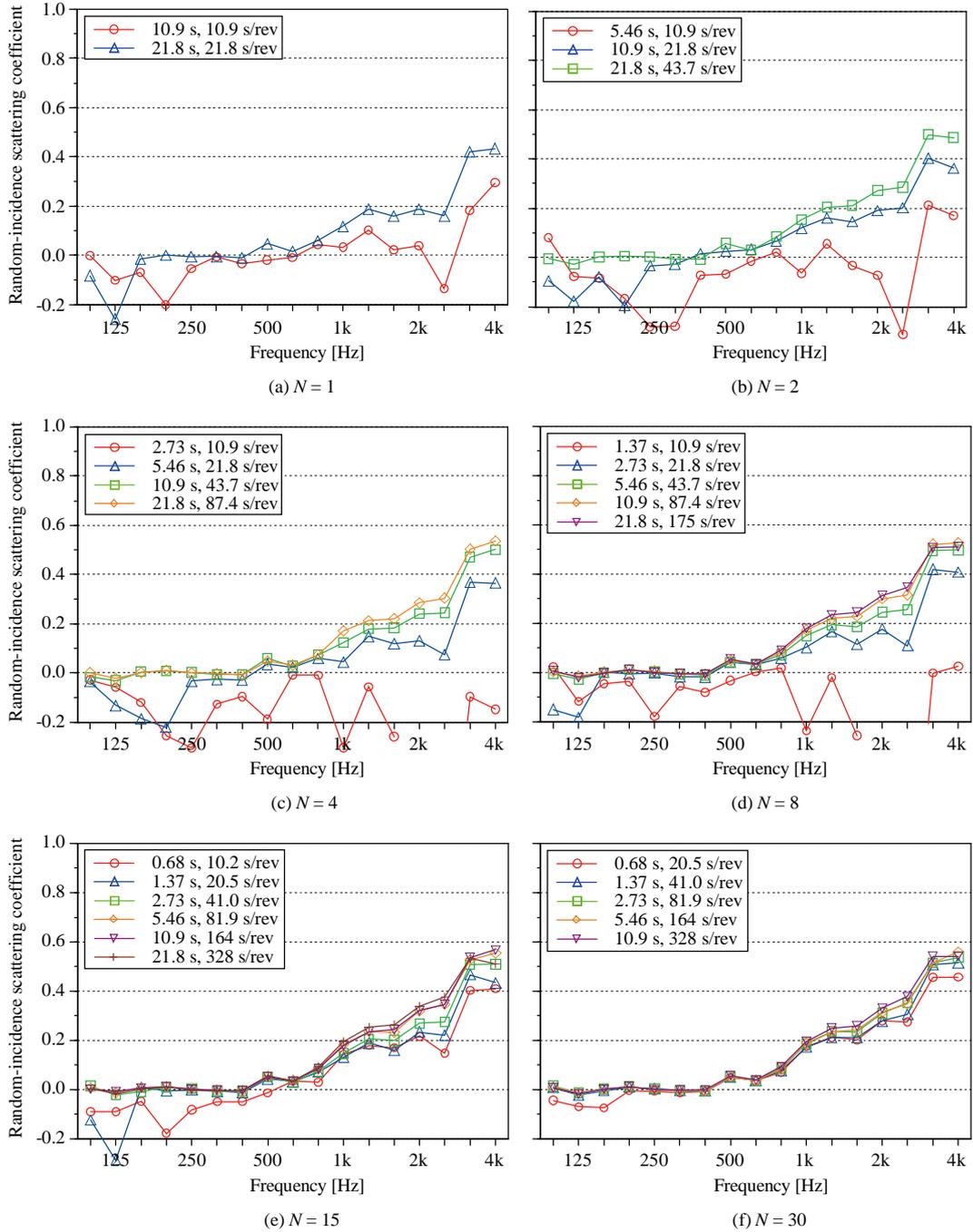


Fig. A.13: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (1).

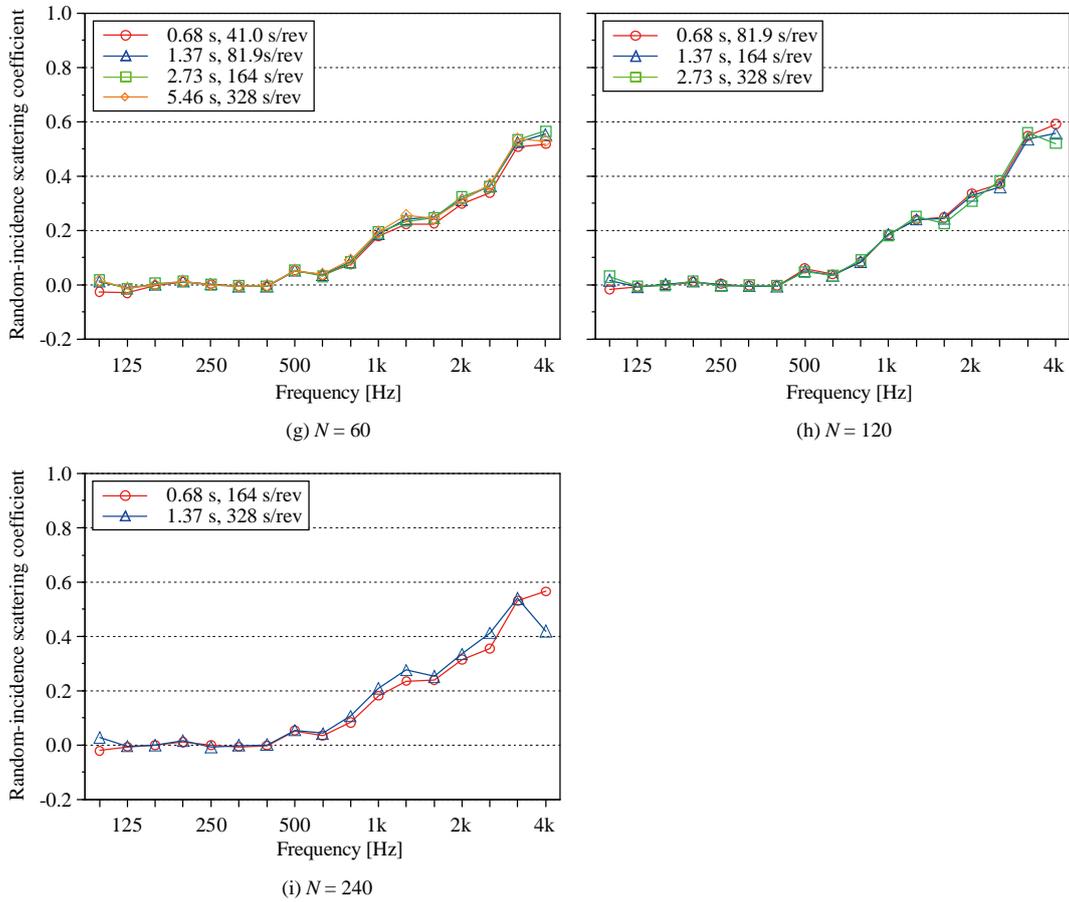


Fig. A.14: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (2).

残響減衰曲線（信号周期、回転周期、信号数固定）

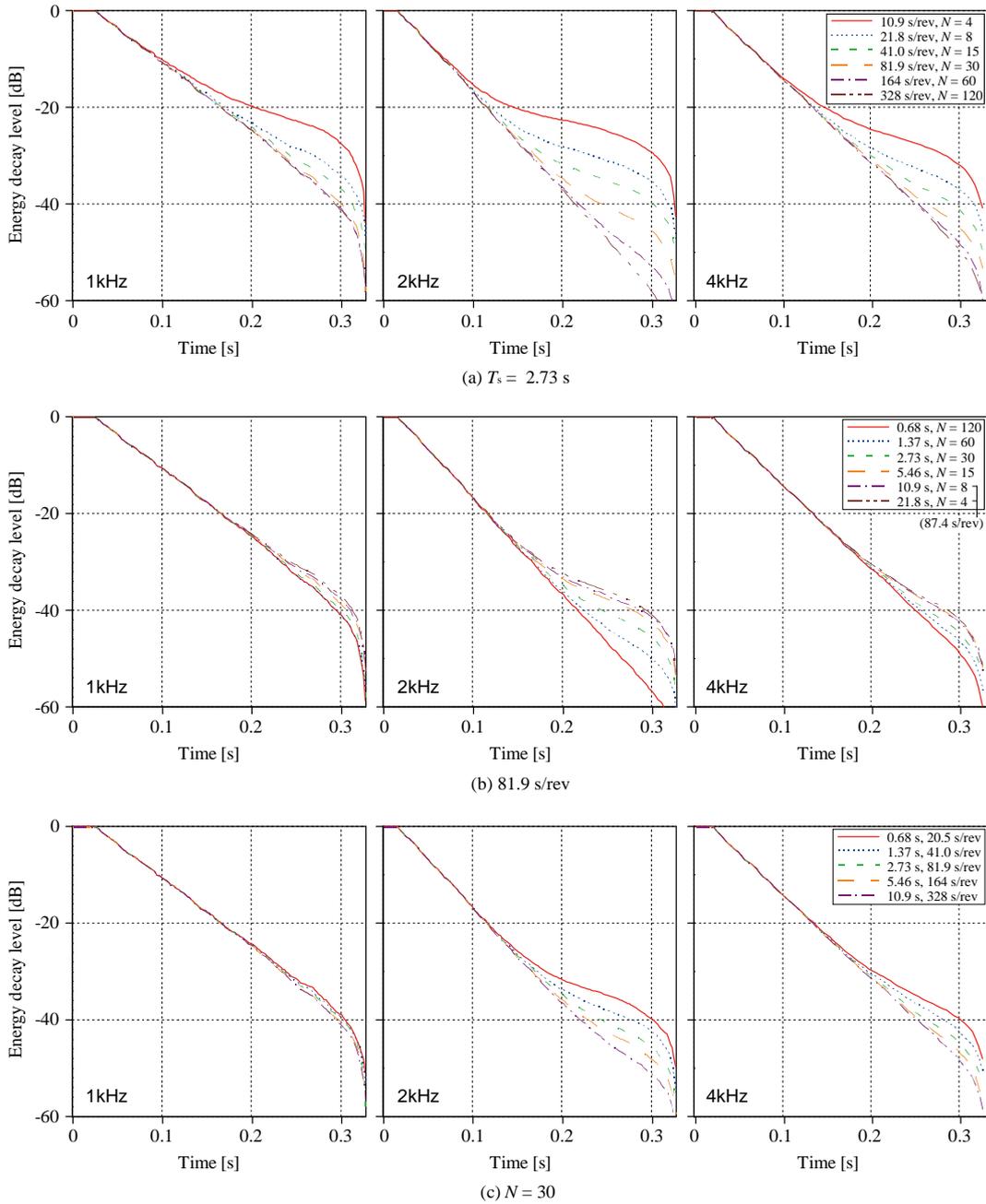


Fig. A.15: Random-incidence scattering coefficients, 2D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and signal number.

## A.2.2 1次元周期構造壁面の場合

ランダム入射乱反射率（信号周期固定）

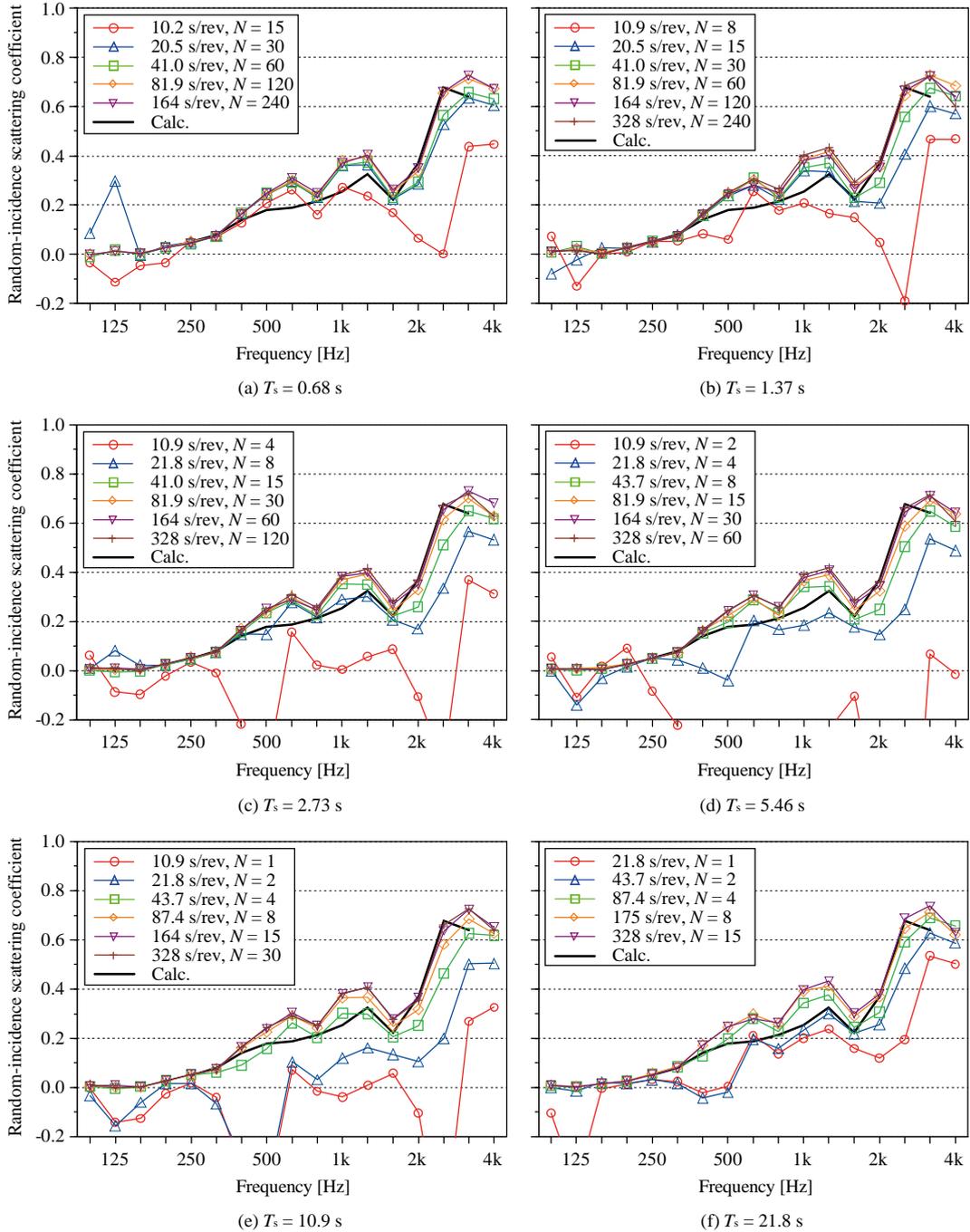


Fig. A.16: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal periods.

ランダム入射乱反射率（回転周期固定）

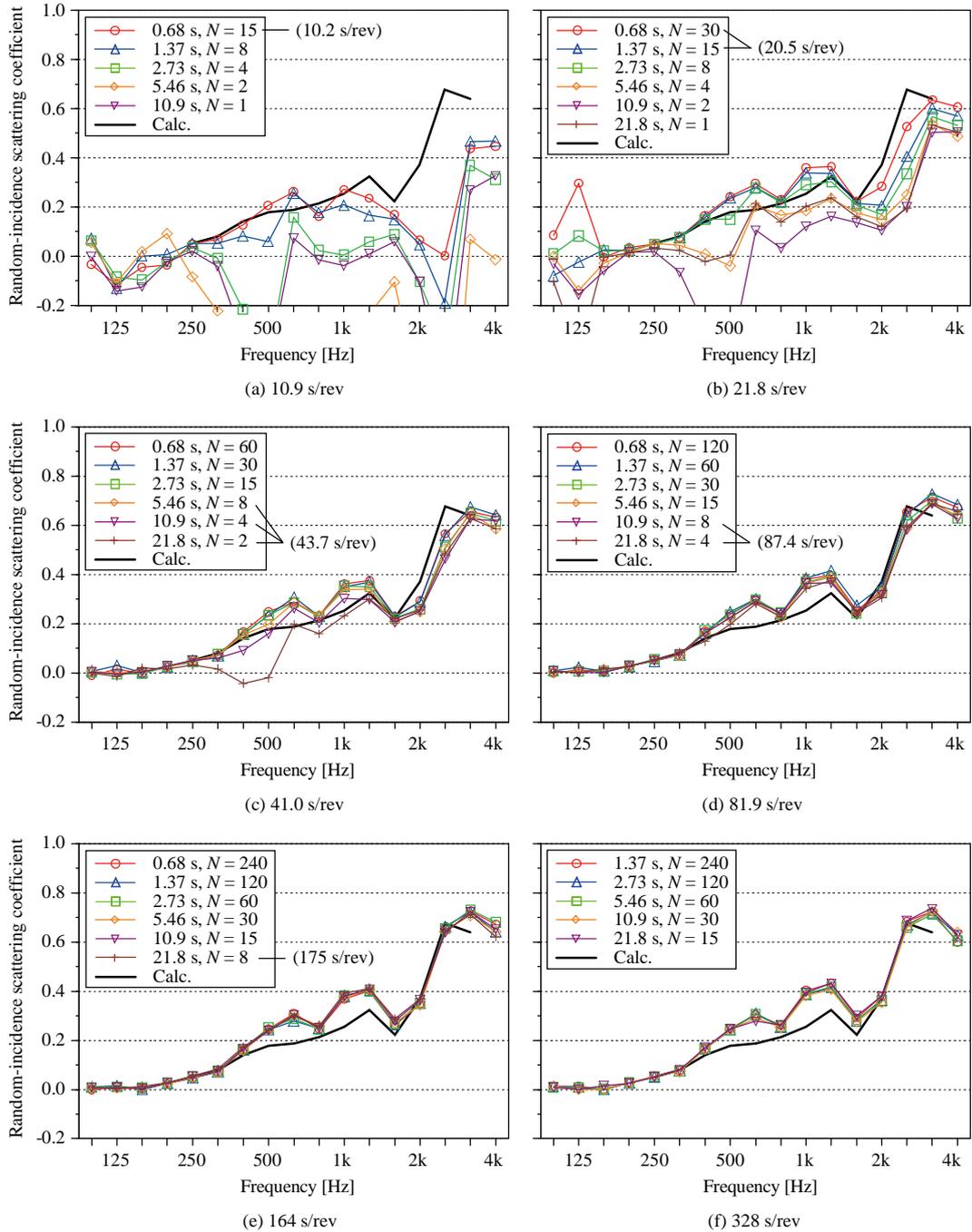


Fig. A.17: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed revolution periods.

ランダム入射乱反射率（信号数固定）

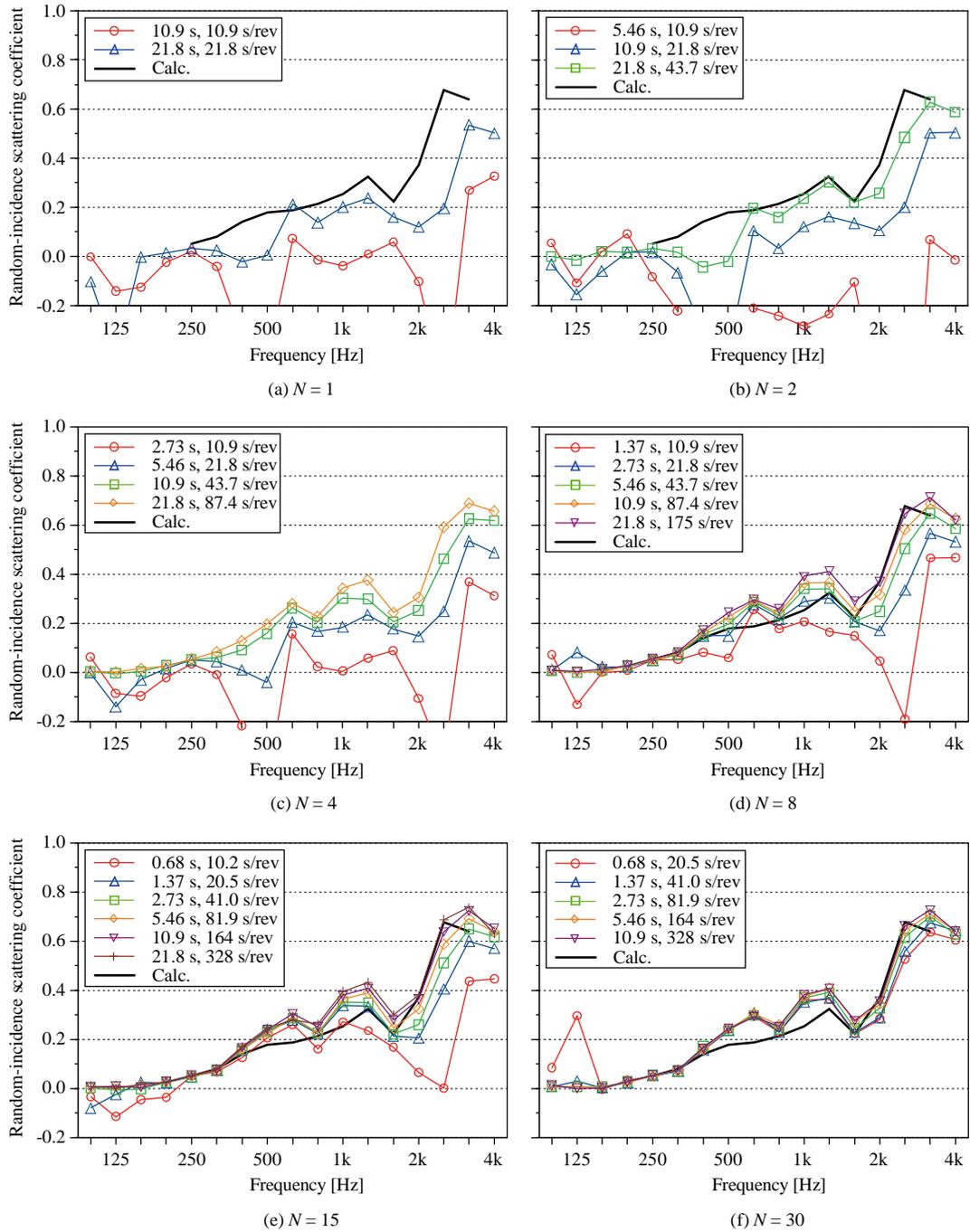


Fig. A.18: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (1).

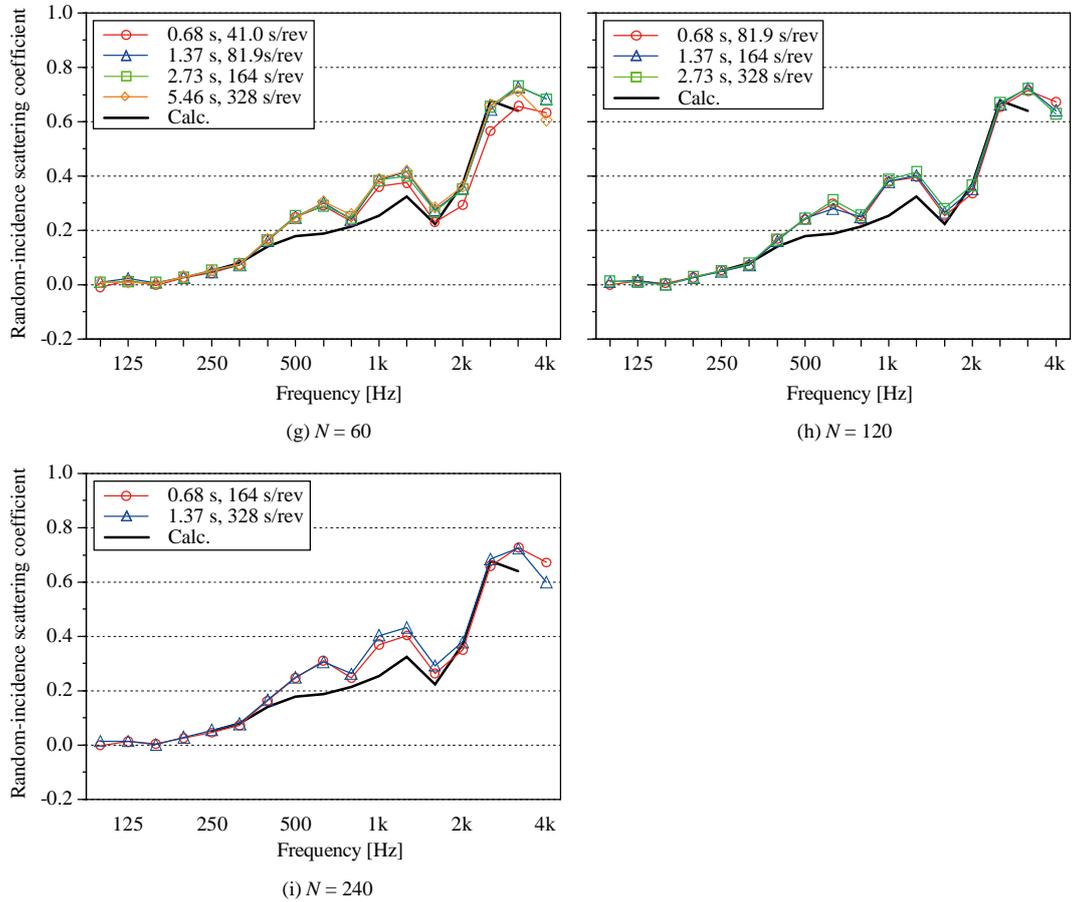


Fig. A.19: Random-incidence scattering coefficients, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal numbers (2).

残響減衰曲線（信号周期、回転周期、信号数固定）

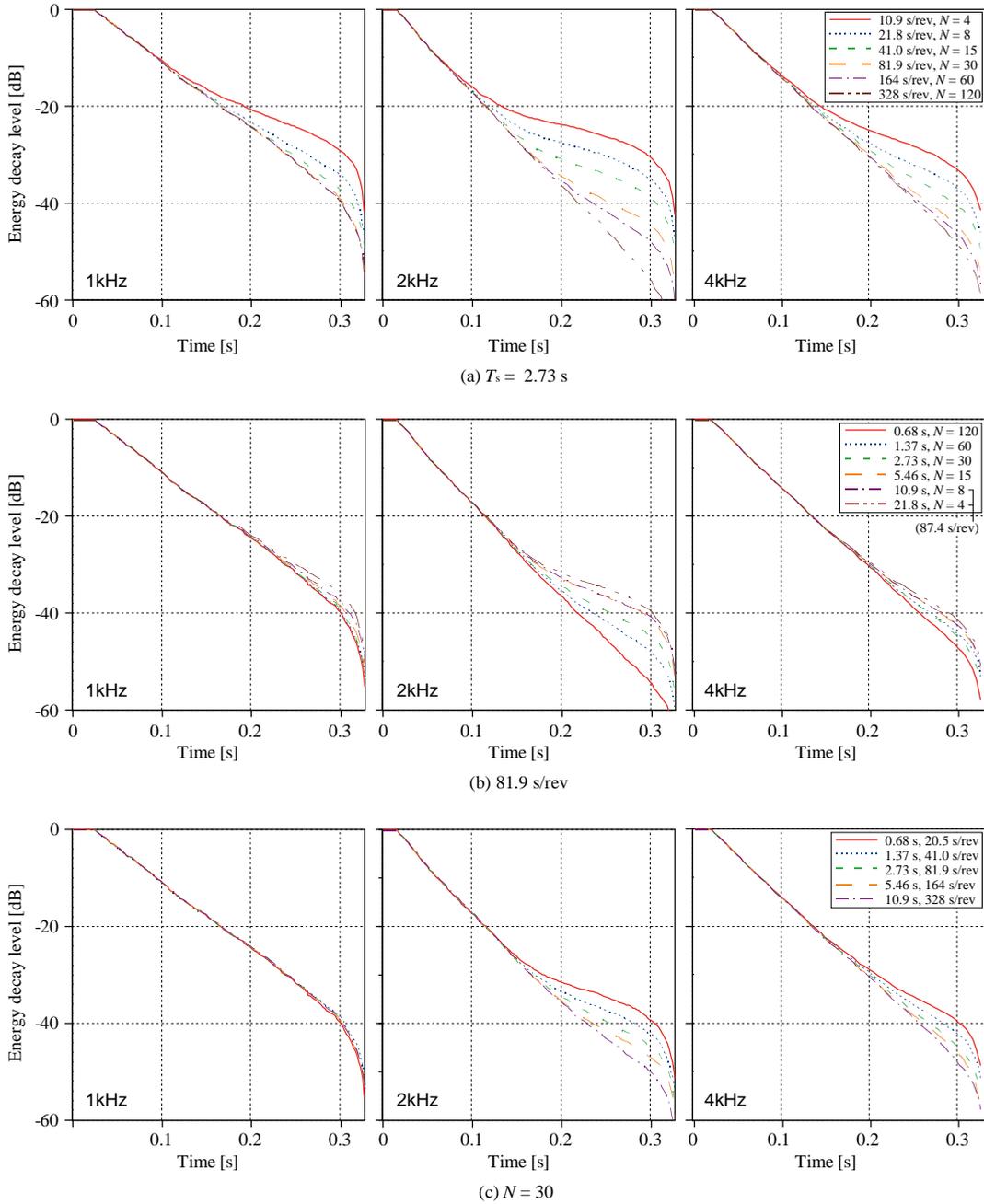


Fig. A.20: Energy decay curves, 1D periodic sample, MLS signals, 1/4 scale, fixed signal period, revolution period and signal number.



## 付録 B

# 周期構造壁面の乱反射率特性の 数値解析結果

- 第 5 章における入射角依存乱反射率の数値解析結果を示す。
- 計算条件等については第 5 章を参照のこと。

## B.1 凹凸形状による影響

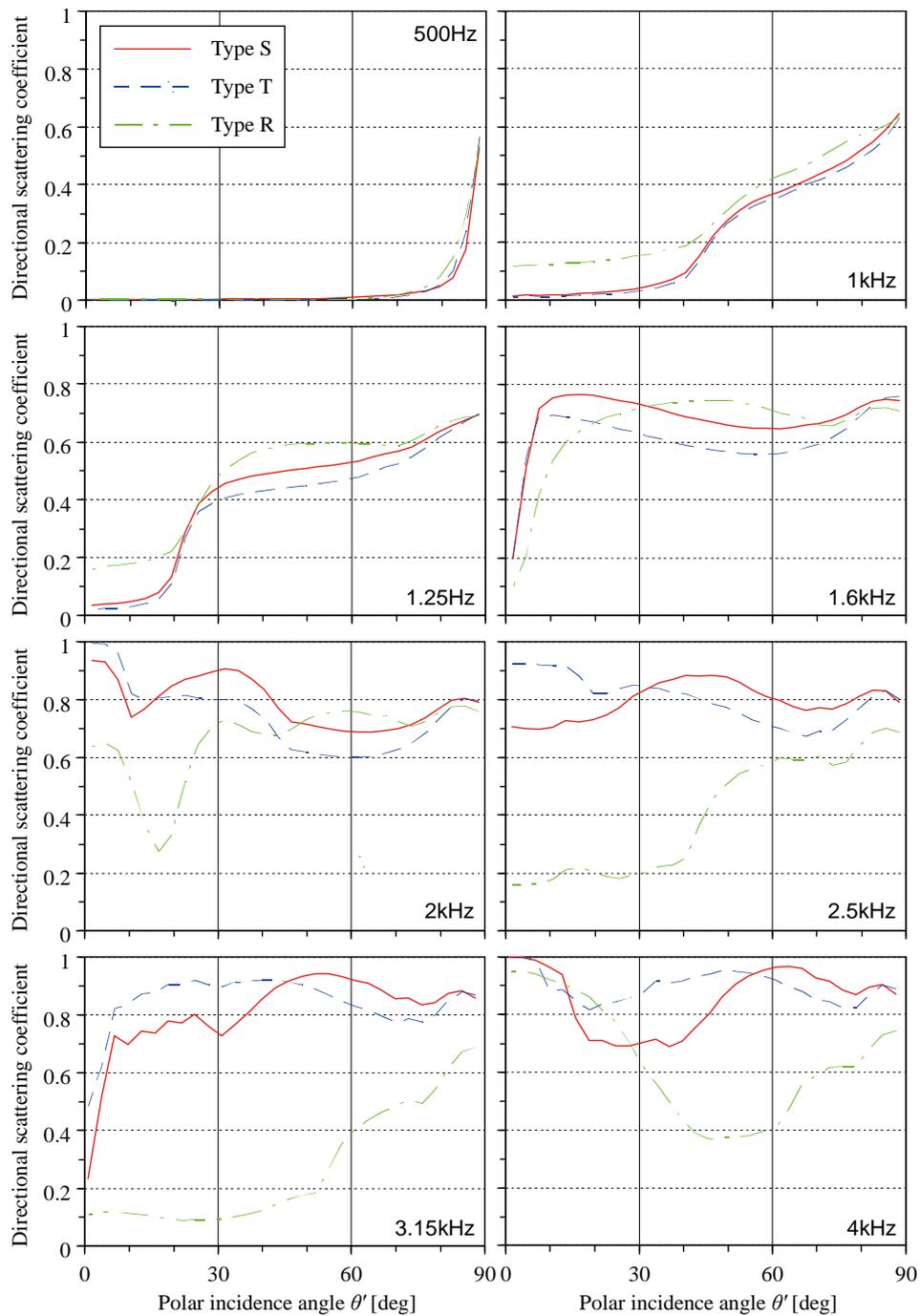


Fig. B.1: Scattering coefficients of polar incidence dependence,  $h = 6$  cm.

## B.2 凹凸高さによる影響

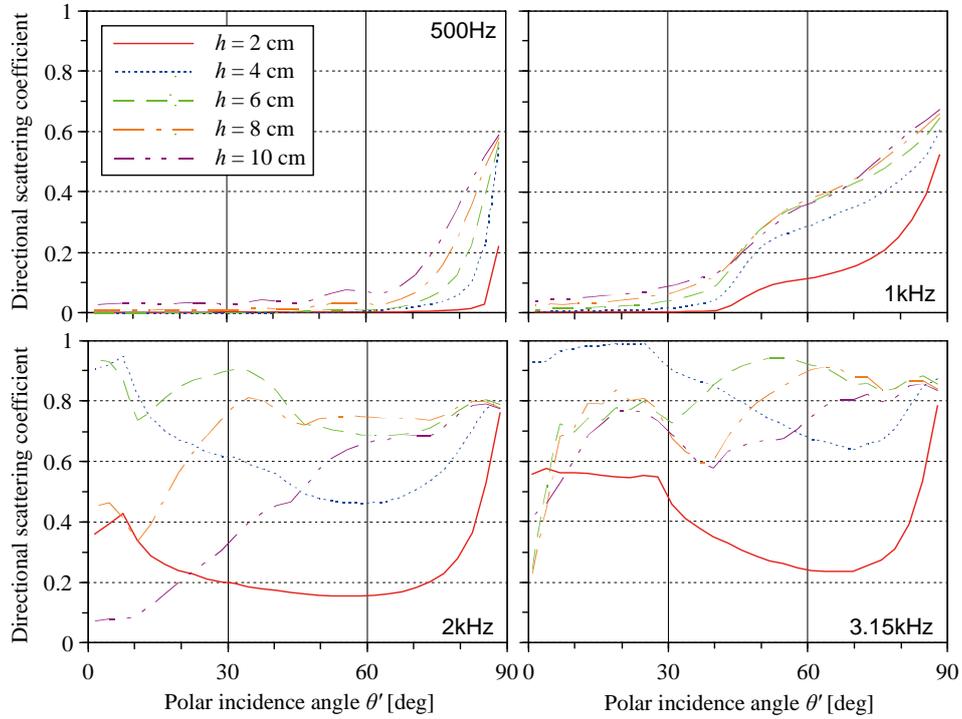


Fig. B.2: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type S.

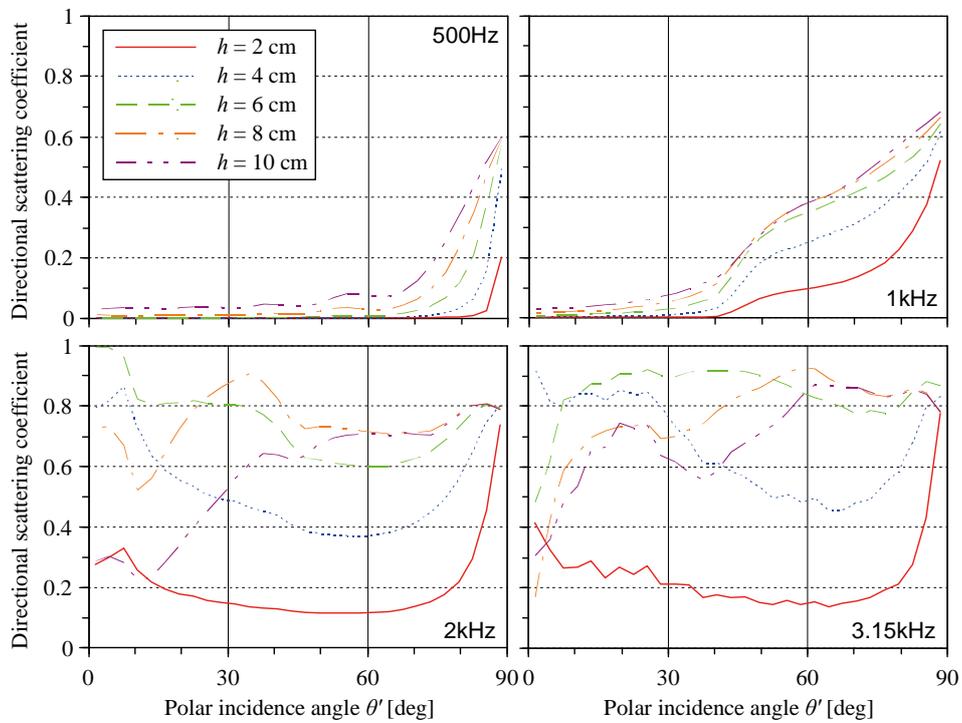


Fig. B.3: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type T.

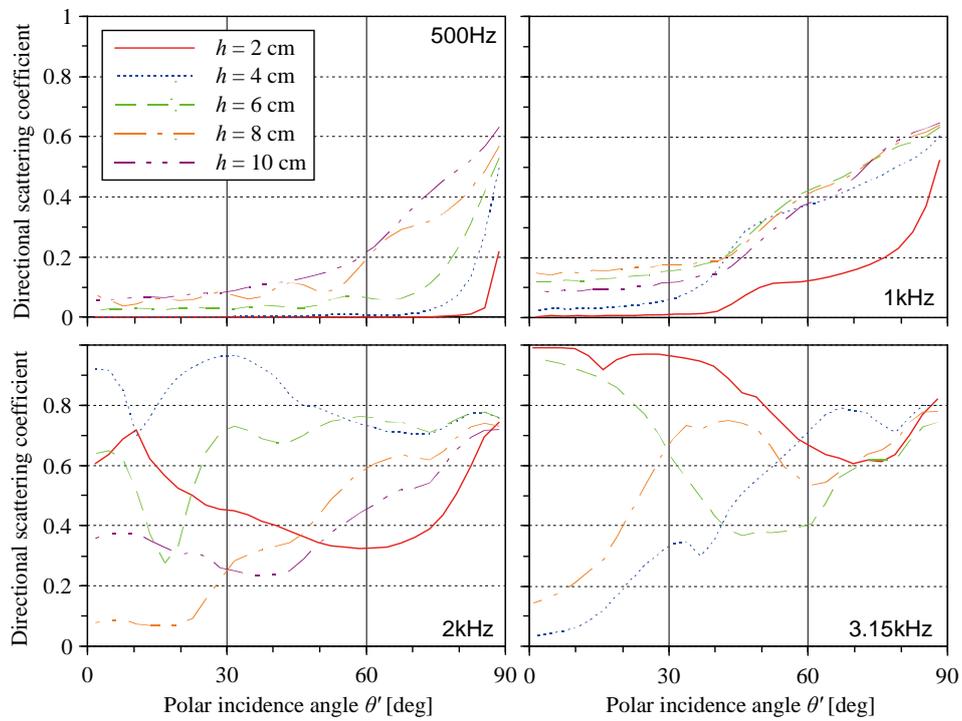


Fig. B.4: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R ( $w = 10$  cm).

### B.3 凹凸幅による影響

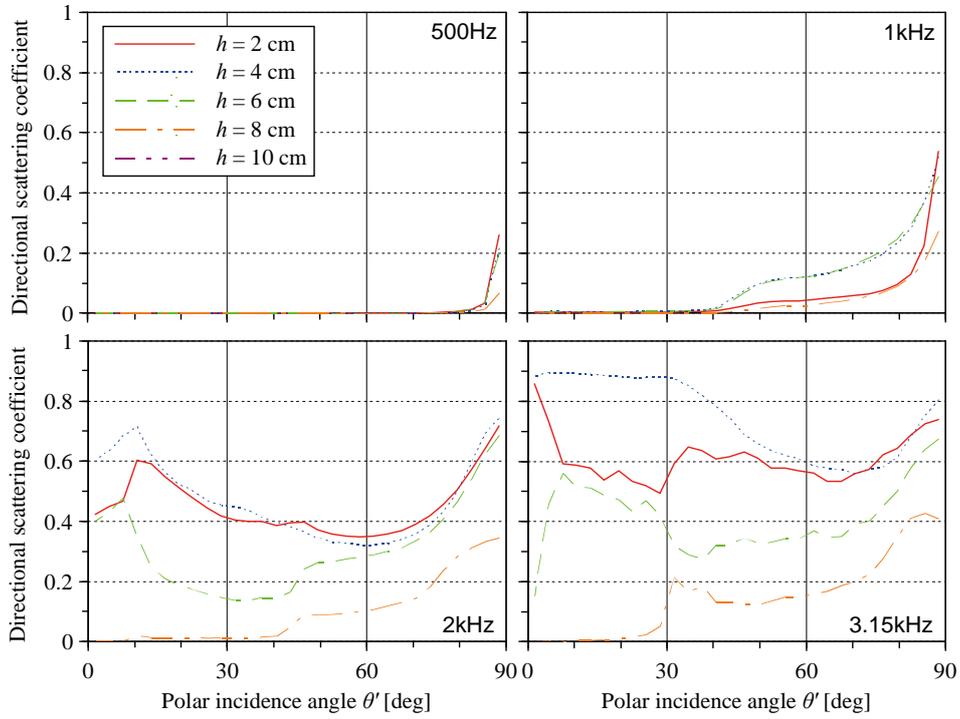


Fig. B.5: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R,  $h = 2$  cm.

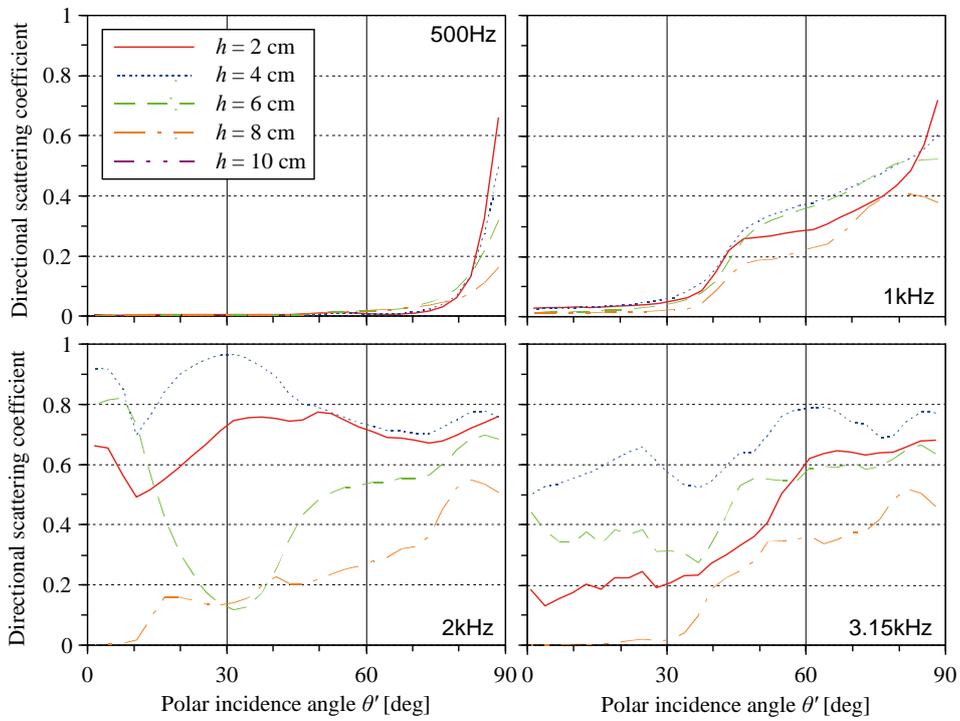


Fig. B.6: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R,  $h = 4$  cm.

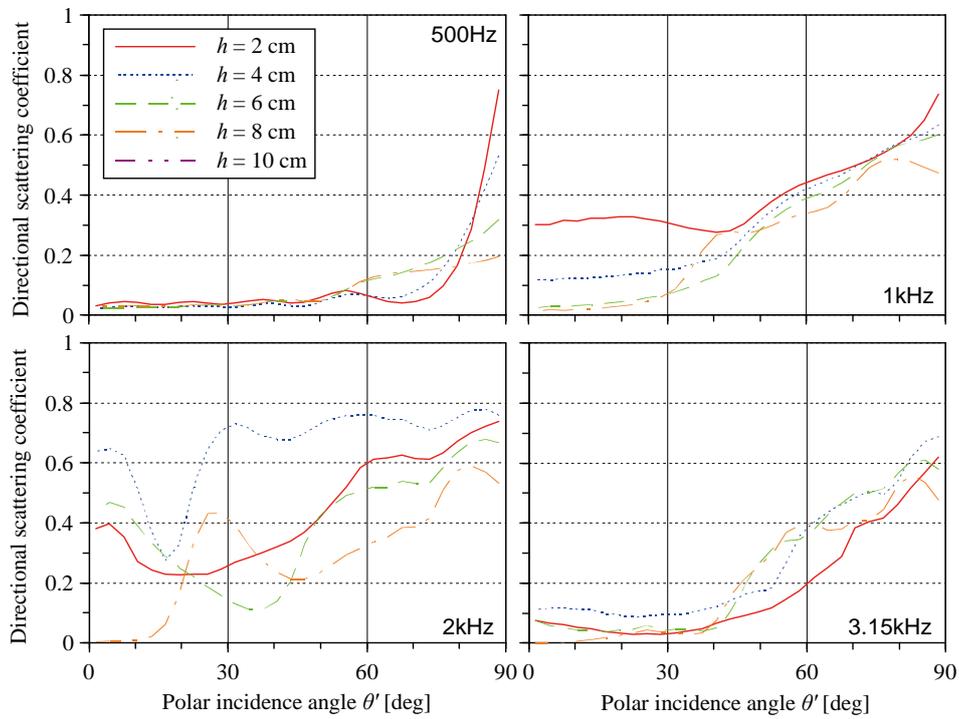


Fig. B.7: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R,  $h = 6$  cm.

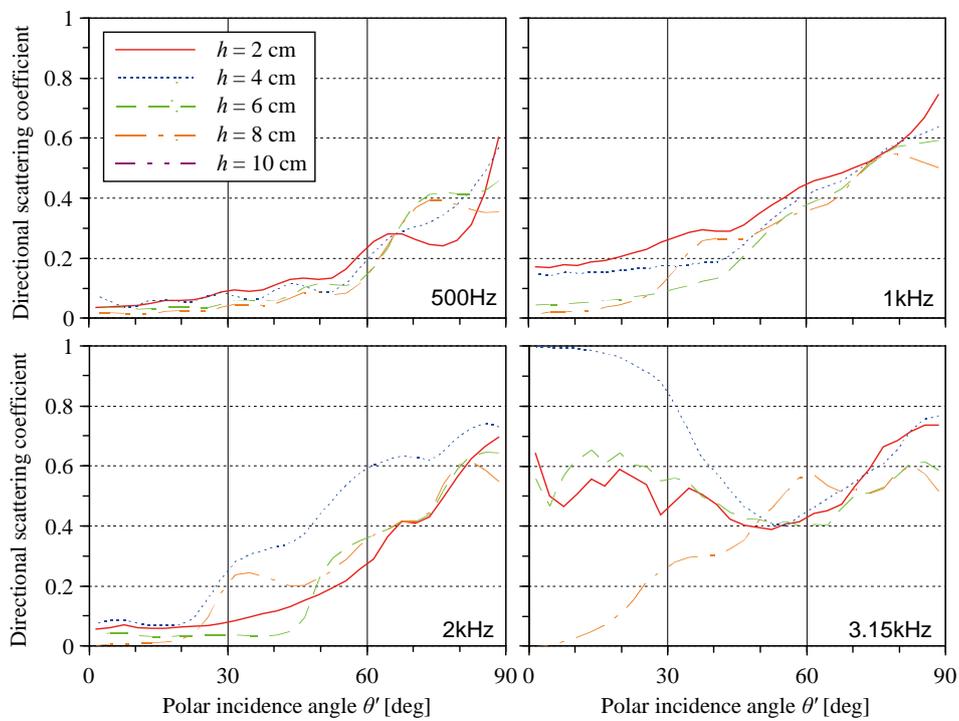


Fig. B.8: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R,  $h = 8$  cm.

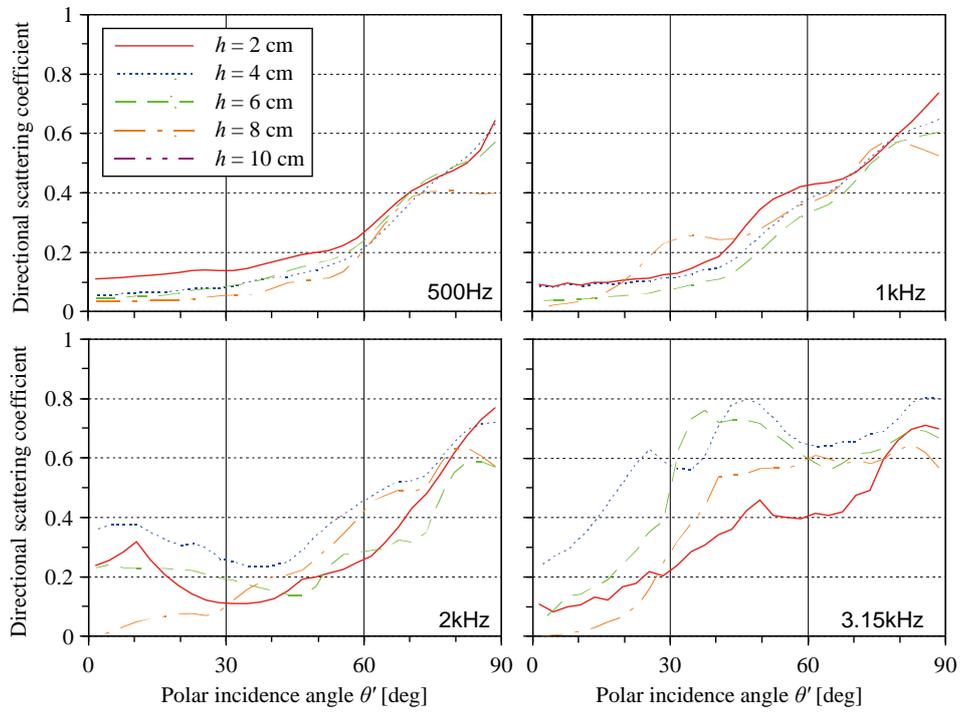


Fig. B.9: Scattering coefficients of polar incidence dependence, Type R,  $h = 10$  cm.



# 発表論文一覧

## A. 原著論文

- [1] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 縮尺模型によるリブ・ブロック構造壁面の乱反射率測定. 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. 41, pp. 175–178, 2013.
- [2] Tetsuya Sakuma, Hyojin Lee. Validation of the sample rotation scheme in the measurement of random-incidence scattering coefficients. *Acta Acustica united with Acustica*, 2013. (投稿済み)

## B. 国際会議論文

- [3] Hyojin Lee, Yuzo Tsuchiya, Tetsuya Sakuma. Issues on the reverberation room method for measuring the scattering coefficients - Border setting and revolution of test sample. *Proceedings of Inter-Noise 2010 (Lisbon, Portugal)*, No. 0663, 2010.
- [4] Hyojin Lee, Tetsuya Sakuma. Basic study on a laboratory measurement method of the normal-incidence scattering coefficient. *Proceedings of Forum Acusticum 2011 (Aalborg, Denmark)*, pp. 1841–1846, 2011.
- [5] Tetsuya Sakuma, Hyojin Lee. Error factors in the measurement of the scattering coefficient in full and small scales. *Proceedings the 162nd meeting of the Acoustical Society of America 2011 (San Diego, USA)*, Vol. 130, pp. 2355–2355, 2011.
- [6] Hyojin Lee, Tetsuya Sakuma. Characterization of scattering coefficients of periodical surfaces by numerical analysis. *Proceedings of Inter-Noise 2012 (New York City, USA)*, N. 756, 2012.
- [7] Tetsuya Sakuma, Hyojin Lee. Recent topics in acoustic scattering coefficient determination for wall surfaces. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2013 (Toronto, Canada)*, 2013.

### C. 国内会議論文

- [8] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1137–1138, 2008.
- [9] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その1 – 周期形状の効果 –. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 369–370, 2008.
- [10] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その2 – 吸音材を含む壁面の場合 –. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 371–372, 2008.
- [11] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その2 – 各種周期構造の拡散性 –. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1179–1180, 2008.
- [12] 土屋裕造, 李孝振, 江田和司, 佐久間哲哉. 壁面の音響拡散が室内に与える音響効果 – 縮尺模型実験による検討 –. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1093–1094, 2009.
- [13] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その1 – 基準円盤への枠の設置に関して –. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 309–310, 2009.
- [14] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その2 – 測定条件および試料寸法に関して –. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 311–312, 2009.
- [15] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その3 – 試料回転速度の影響 –. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1105–1106, 2009.
- [16] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定. 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2010–25, 2010.
- [17] 李孝振, 佐久間哲哉. 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その3 – リブ構造の配置の影響 –. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 307–308, 2010.
- [18] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その4 – 各種リブ・ブロック構造の拡散性 –. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1047–1048, 2010.
- [19] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法. 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2010–44, 2010.

- [20] 李孝振, 佐久間哲哉, 本地由和. 実大残響室におけるランダム入射乱反射率の測定 –測定条件に関する検討–. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1179–1180, 2011.
- [21] 李孝振, 佐久間哲哉, 本地由和. 残響室法によるランダム入射乱反射率の測定 –インパルス応答の同期加算方法に関する検討–. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1263–1264, 2012.
- [22] 李孝振, 佐久間哲哉. 垂直入射乱反射率の実験室測定法に関する基礎的検討. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1295–1296, 2011.
- [23] 清家剛, 李孝振, 佐久間哲哉. 2次元ランダム入射乱反射率の実験室測定法に関する基礎的検討. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1167–1168, 2012.
- [24] 李孝振, 佐久間哲哉. 周期構造壁面の乱反射率特性の最適化 –数値解析による形状検討–. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1169–1170, 2012.



## 参考論文

- [1] H. Kuttruff. Room acoustics. 4th edition, E. & F. N. Spon, 2000.
- [2] 前川純一, 森本政之, 阪上公博. 建築・環境音響学. 共立出版, 2011.
- [3] T. J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic absorbers and diffusers. 2nd edition, Chap. 2. Taylor & Francis, London, 2009.
- [4] M. Vorländer, E. Mommertz. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 187–199, 2000.
- [5] E. Mommertz. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 201–203, 2000.
- [6] ISO 17497-1:2004. *Acoustics—Sound-scattering properties of surfaces—*, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room. 2004.
- [7] T. J. Hargreaves, T. J. Cox, Y. W. Lam, P. D'Antonio. Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free field measures. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, pp. 1710–1720, 2000.
- [8] P. D' Antonio, T. Cox. Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 2: Prediction, Measurement and Characterization, *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 46, pp. 1075–1091, 1998.
- [9] 日本建築学会編. 室内音場予測手法 —理論と応用—. 日本建築学会, 2001.
- [10] M. Vorländer, International round robin on room acoustical computer simulations. *Proceedings of the 15th ICA*, Vol. 2, pp. 689–692, 1995.
- [11] I. Bork, A comparison of room simulation software – The 2nd round robin on room acoustical computer software. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 86, pp. 943–956, 2000.
- [12] T. J. Cox, B.-I. L. Dalenbäck, P. D'Antonio, J.-J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, M. Vorländer. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic

- surfaces. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 92, pp. 1–15, 2006.
- [13] 日本建築学会編. 音環境の数値シミュレーション —波動音響解析の技法と応用—. 日本建築学会, 2011.
- [14] 大鶴徹, 富来礼次, 豊増美喜, 高橋康夫. 有限要素法による大規模音場解析に関する研究 —中規模音楽ホールの試行的解析—. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 63–64, 2001.
- [15] 坂本慎一, 伊藤清之, 清宮拓磨, 大脇雅直, 橘秀樹. ホールの差分法解析および縮尺模型実験と実物測定との対応. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp. 69–70, 1999.
- [16] T. Sakuma, Y. Yasuda. Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, Part I: Setup and validation. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 88, pp. 513–525, 2002.
- [17] Y. Yasuda, T. Sakuma. Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, Part II: Examination of numerical items. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 89, pp. 28–38, 2003.
- [18] B.-I. Dalenbäck. CATT-acoustic ver. 9 User's manual. CATT, Gothenburg, 2011.
- [19] C. L. Christensen. Odeon room acoustics program ver. 11 User manual: Industrial, auditorium and combined editions. Odeon A/S, Lyngby, Denmark, 2011.
- [20] 太刀岡勇氣, 佐久間哲哉. 拡散係数を導入した幾何音響シミュレーションに関する検討 —シューボックス型ホールにおける拡散壁の影響—. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 769–770, 2006.
- [21] 太刀岡勇氣, 小坂慶之, 佐久間哲哉. 拡散係数を導入した幾何音響シミュレーションに関する検討 —非拡散音場の残響時間の予測—. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 823–824, 2006.
- [22] 杉原慎一郎, 井上尚久, 佐久間哲哉. 壁面の拡散性を考慮した幾何音響解析 —乱反射率の入射角依存性の反映—. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1297–1298, 2011.
- [23] W. C. Sabine. *Collected paper on acoustics*. Harvard Univ. Press, 1922.
- [24] T. Sakuma. Approximate theory of reverberation in rectangular rooms with specular and diffuse reflections. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, pp. 2325–2536, 2012.
- [25] 土屋裕造, 安田洋介, 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その3 —平行壁間残響に及ぼす壁面拡散の影響—. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1293–1294, 2011.
- [26] 楠井尚貴, 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その5 —平

- 行壁間残響の数値解析－. 日本音響学会研究発表会講演論文集（秋季）, pp. 1177–1178, 2011.
- [27] E. Mommertz. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, Vol. 46, pp. 251–263, 1995.
- [28] M. Vorländer, J. J. Embrechts, L. De Geetere, G. Vermeir, M. H. D. Gomes. Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 90, pp. 858–67, 2004.
- [29] J. Y. Jeon, J. K. Ryu, S. Sato, Y. H. Kim. Subjective and objective evaluation of the scattered sound in a 1:10 scale model hall. *Proceedings of Forum Acusticum*, 2005.
- [30] Y.-J. Choi, D.-U. Jeong. Some Issues in Measurement of the Random-Incidence Scattering Coefficients in a Reverberation Room. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 94, pp. 769–73, 2008.
- [31] J. Embrechts. Practical aspects of the ISO procedure for measuring the scattering coefficient in a real-scale experiment. *Proceedings of Forum Acusticum*, RBA-06-001-IP, 2002.
- [32] L. De Geetere, G. Vermeir. Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room. *Proceedings of Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.
- [33] J. H. Rindel, J. Y. Jeon. The new field method for measurement of the scattering coefficient. Personal communication and notes, 2003.
- [34] I. Schmich, N. Brousse. In situ measurement methods for characterizing sound diffusion. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, pp. 29–31, 2010.
- [35] Y. Kosaka, T. Sakuma. Numerical examination on the scattering coefficients of architectural surfaces using the boundary element method. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 26, pp. 136–144, 2005.
- [36] 小坂慶之. 壁面の音響拡散係数の数値予測に関する研究. 博士学位論文, 東京大学, 2004.
- [37] T. Sakuma, Y. Kosaka, L. De Geetere, M. Vorländer. Relationship between the scattering coefficients determined with coherent averaging and with directivity correlation. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 95, pp. 669–677, 2009.
- [38] J. E. Volkmann. Polycylindrical diffusers in room acoustical design, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 13, pp. 234–243, 1942.
- [39] 牧田 康雄. 建築音響. 日本放送出版協会, 1960.
- [40] M.R Schroeder. Diffuse sound reflection by maximum length sequences. *Journal of the*

- Acoustical Society of America*, Vol. 57, pp. 149–150, 1975.
- [41] M.R Schroeder. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, pp. 958–963, 1979.
- [42] J.A.S. Angus. Large area diffusers using modulated phase reflection gratings. *Proceedings of the 98th Convention Audio Engineering Society*, preprint 3954, 1995.
- [43] J.A.S. Angus. Using Grating Modulation to Achieve Wideband Large Area Diffusers. *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 143–165, 2000.
- [44] 本地由和, 栗原誠, 藤森潤. 小空間向け音場制御パネルの開発 - 音響管とバッフル面の組み合わせによる反射音の制御. 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2009–19, 2009.
- [45] 本地由和, 栗原誠, 藤森潤. 音響管開口とバッフル面の組み合わせにより生じる散乱特性の検討. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp.1121–1122, 2009.
- [46] 本地由和, 栗原誠, 藤森潤. 小空間向け音場制御パネル技術による室内モード抑制効果. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp.1161–1162, 2010.
- [47] L. Rayleigh. *The theory of sound*. Macmillan, 1929.
- [48] 藤原恭司, 増田潔. 周期構造を持つ壁面の乱反射特性について. 日本音響学会研究発表会講演論文集, 1989.
- [49] D. Takahashi. Development of optimum acoustic diffusers. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 16, pp. 51–58, 1995.
- [50] 横田考俊. 室内における音響拡散・反射体の効果に関する研究. 博士学位論文, 東京大学, 2001.
- [51] P. D’Antonio, T. J. Cox. Diffusor application in rooms. *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 113–142, 2000.
- [52] Y.W. Lam. Surface diffusion. *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 111–112, 2000.
- [53] ISO 17497-2:2012. *Acoustics–Sound-scattering properties of surfaces–*, Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field. 2012.
- [54] M. H. A. Gomes, M. Vorländer, S. Gerges. Aspects of the sample geometry in the measurement of the random-incidence scattering coefficient. *Proceedings of Forum Acusticum*, Sevilla, RBA-06-002-IP, 2002.
- [55] M. H. A. Gomes. Determination of the acoustical random-incidence scattering coefficient. PhD thesis, Federal University of Santa Catarina, 2002.
- [56] Y.-J. Choi, D.-U. Jeong. Effects of unspecified experimental conditions in ISO 17497-1 on the scattering coefficients measured in a scale model. *Acta Acustica united with*

- Acustica*, Vol. 97, pp. 75–81, 2011.
- [57] J. J. Embrechts, D. Archambeau, G. B. Stan. Determination of the scattering coefficient of random rough diffusing surfaces for room acoustics applications. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 87, pp. 482–494, 2001.
- [58] J. Y. Jeon, S. C. Lee, M. Vorländer. Development of scattering surfaces for concert halls. *Applied Acoustics*, Vol. 65, pp. 341–355, 2004.
- [59] S. C. Lee. Measuring scattering coefficients of reflecting materials in a reverberation chamber. PhD thesis, Hanyang University, 2004.
- [60] F.-M. Lin, P.-Y. Hong, C.-Y. Lee. An experimental investigation into the sound-scattering performance of wooden diffusers with different structures. *Applied Acoustics*, Vol. 71, pp. 68–78, 2010.
- [61] Y. H. Kim, H. S. Jang, J. Y. Jeon. Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients. *Applied Acoustics*, Vol. 72, pp. 899–905, 2011.
- [62] R. Heinz. Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail. *Applied Acoustics*, Vol. 38, pp. 145–159, 1993.
- [63] 藤原恭司, 吉村道彦, 増田潔. 周期構造壁を持つ室内の音場シミュレーション. 日本音響学会誌, Vol. 47, No. 1, pp. 2–12, 1991.
- [64] K. Nakagawa, T. Miyajima, Y. Tahara. An improved geometrical sound field analysis in rooms using scattered sound and a audible room acoustic simulator. *Applied Acoustics*, Vol. 38, pp. 115–129, 1993.
- [65] 平田. 矩形室音場の音像法による解析. 日本音響学会誌, Vol. 33, No. 9, pp. 480–485, 1977.
- [66] Y. Hirata. Geometrical acoustics for rectangular rooms. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 43, pp. 247–252, 1979.
- [67] 安田洋介, 佐藤正和, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その2 –吸音面が偏在した室の残響計算–. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1291–1292, 2011.
- [68] 土屋裕造, 佐久間哲哉. 平行壁間の残響特性に関する研究 その1 –縮尺模型実験による基礎的検討–. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学1), pp. 337–338, 2011.
- [69] 土屋裕造, 佐久間哲哉. 平行壁間の残響特性に関する研究 その2 –壁端部のエッジ反射の影響について–. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学1), pp. 181–182, 2012.
- [70] 楠井尚貴, 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その6 –2次

- 元矩形室残響の数値解析－. 日本音響学会研究発表会講演論文集（春季），pp. 1267–1268, 2012.
- [71] 江田和司，楠井尚貴，佐久間哲哉. 非拡散音場の室内残響に関する研究－2次元FDTD法解析による検討－. 日本音響学会建築音響研究会資料，AA2012–38, 2012.
- [72] 江田和司，佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その7－矩形室残響の鏡像法解析－. 日本音響学会研究発表会講演論文集（秋季），pp. 1157–1160, 2012.
- [73] 佐久間哲哉. 壁面の拡散性指標としての乱反射率の測定法, 日本音響学会誌 Vol. 65, pp. 569–573, 2009.
- [74] 羽入敏樹. 壁面の拡散反射性と音場拡散の関係. 日本音響学会建築音響研究会資料，AA2009–26, 2009.
- [75] 羽入敏樹，木村翔，橋本修，坂本吉宏. 音場の過渡応答に着目した拡散性の検討. 日本建築学会計画系論文集，Vol. 471, pp. 11–18, 1995.
- [76] ISO 354: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003.
- [77] インパルス応答測定システム，AEIRM. 日東紡音響エンジニアリング. <http://www.noe.co.jp/product/pdt2/ot/ot02.html>.
- [78] 室内音響指標分析システム，AERAP. 日東紡音響エンジニアリング. <http://www.noe.co.jp/product/pdt3/ot/ot03.html>.
- [79] M. Vorländer, M. Kob. Practical aspects of MLS measurements in building acoustics. *Applied Acoustics*, Vol. 52, pp. 239–258, 1997.
- [80] U. P. Svensson, J. L. Nielsen. Errors in MLS measurements caused by time variance in acoustic systems. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 47, pp. 907–927, 1999.
- [81] ターンテーブル，TT-1000. 日東紡音響エンジニアリング. <http://www.noe.co.jp/product/pdt1/m/m01.html>.
- [82] 服部暢彦，伊勢史郎. 周期的なりブ壁面により知覚されるスウィープ音について. 日本音響学会研究発表会講演論文集（春季），pp. 1005–1006, 2003.
- [83] 寺井俊夫. 積分方程式による建築の音場計算に関する研究. 博士学位論文，京都大学，1979.
- [84] C. F. Eyring. Reverberation time in dead rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 1, pp. 217–241, 1930.
- [85] 佐久間哲哉. 壁面の拡散性の解析及び評価法. 日本音響学会誌，Vol. 61, pp. 39–44, 2005.

# 謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻博士課程において、同専攻 佐久間哲哉准教授のもとに行った研究をまとめたものであります。筆者は東京大学に佐久間研究室が誕生して最初の外国人留学生であり、佐久間先生からは研究生として来日してから 6 年間、研究の進め方から博士論文の作成に至るまで、知識・経験不足の筆者に対し終始厳しくも優しいご指導を頂きましたこと、ここに心より感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 磯部雅彦教授、清家剛准教授、東京大学生産技術研究所 坂本慎一准教授、神奈川大学工学部建築学科 安田洋介准教授には、本研究の副査を担当して頂き、貴重なご意見及びご指摘を賜りました。特に安田洋介准教授には、研究に関するご助言にとどまらず、様々な形で筆者を支えてくださいました。ここに深く感謝致します。

佐久間研究室博士課程 土屋裕造氏には、研究すべてにわたり有益かつ貴重なご指導を賜り、本研究に実質的に貢献していただきました。ここに深く感謝申し上げます。

ヤマハ株式会社研究開発センター 藤森潤一氏、本地由和氏には、実大実験において多大なるご協力を賜りました。ここに感謝申し上げます。

日東紡音響エンジニアリング 松尾浩義氏には、本研究において貴重なターンテーブルを貸し出していただきました。ここに謝意を表します。

佐久間研究室の先輩である太刀岡勇氣さん、江川健一さん、上猶優美さん、三浦啓祐さん、萬木智子さん、後輩である江田和司君、孫媛媛さん、永井優花さん、安達光平君、杉原慎一郎君、三上雄一郎君、村田義明君、Clemens Buettner さん、芥川俊輔君、井上尚久君、楠井尚貴君、中島和博君、郭静さん、櫻田真章君、清家剛君、竹下圭悟君、吉高弘俊君、石川聡史さんにも謝意を表します。特に太刀岡勇氣さん、上猶優美さん、江田和司君、井上尚久君には、日常の議論を通じて多くの知識をいただきました。また清家剛君には、実験やデータの整理をお手伝いいただきました。どうも有り難うございました。

最後に、生活の様々な側面から大きな助けとなってくださった安昭炫さん、坂西朋子さん、そして、いつも筆者を遠く韓国から温かく見守ってくれた家族に心から感謝いたします。

2013 年 2 月 22 日