

## 研究論文

## 発破における超低周波音の低減化

福井久明<sup>\*</sup>, 高橋 稔<sup>\*\*</sup>, 山本雅昭<sup>\*\*\*</sup>

隧道発破で騒音公害の対象となる 20 ヘルツ以下の超低周波音の低減化を目的とし、直径 10mmφ のポリエチレン製エアークャップシートを強固に巻きつけ、その円柱状ロールを遮音構造体とし、音波進行の直角方向に対して直径の異なる円柱の単層体および複層体を各々設置し爆発音の遮音効果を測定した。白砲内で起爆された含水爆薬 50g の爆発音を小型坑道(径 1.6m, 長さ 6.6m)を通し他端に設置された遮音構造体から 10m 地点での 16 ヘルツ周波数音圧レベルは、遮音体無設置に対し約 20dB の低減効果が認められた。一方、125Hz から 2kHz の周波数領域では 10dB 前後の低減化効果であった。この効果を確認するため、残響室-無響室間の遮音壁をこの遮音構造体を用い、各周波数毎の正確な音圧レベル測定をおこなった。その結果も中心波長 12.5Hz の超低周波域において、単層および複層共に、無響室内の遮音体背後 50cm において 11~14dB の低減化効果が確認された。

一方、複数個ノズルから水シャワーを放出し、発破音の遮音効果を同様に測定したが、16~8K オクターブバンド中心周波数帯のいずれにおいてもその低減化効果は認められなかった。

## 1. はじめに

発破サイトの周辺或いは隧道発破においては抗口より 400~500m の遠隔地点でも障子、窓ガラス等建具のがたつきからくる物的被害および心理的、生理的不快感によるクレームの発生があり、発破工法の一つの隘路となっている。特に隧道発破においては抗口方向に位置する数 100m 域での家屋に集中し、超低周波音が 90~100dB を越える場合、特にその問題が発生しやすいとの報告が多い<sup>1)</sup>。

隧道発破による騒音・低周波音の低減対策として一般に用いられている方法は、質量則にもとづく防音扉の設置であり、基本的に遮音体の重量を増やすことで対応している。鉄の防音扉へコンクリート覆工することより、さらに面密度を上げ低減増大効果を行っている例もあるが作業性等に難点があり、通常扉を二重、三重として防音対策をおこなっているのが現状である<sup>2)</sup>。

一方、隧道断面全体に空気袋を均一に設置し音響エネルギーのみを透過させ遮音効果を生み出す方法<sup>3)</sup>、泡による爆発音の消音<sup>6)7)</sup>等の報告はあるが、いずれの場合も高周波騒音については効果は得られているが、低周波域の騒音については、ほとんど効果が認められていない。

本研究は膜振動による吸音特性に着目し、ポリエチレン製エアークャップシート円柱積層体を遮音構造体として超低周波音の低減化を目的としたものである。

一般にビニルレザーのような薄い膜状物質は、その背後に適当な空気層を設けて枠を張ると音波の入射によって振動する。このとき材料は振動し、この運動エネルギーは熱エネルギーに変換され空気中に放熱される。即ち板振動としてエネルギー変換される部分と、入射した空気の振動が材料に衝突し内部で拡散し互いに打ち消しあいながらエネルギーが吸収される空気粘性による両者のエネルギー交換で吸音がおこなわれているとする考えである<sup>8)9)</sup>。

## 2. 実験結果

## 2.1 爆発音の測定方法

精密騒音計を遮音構成体から正面 5m および 10m に設置し、各々 1/3 オクターブバンドで 20 秒間の最大値測定(Lmax)をおこなった。

精密騒音計: RION NA-27 (JIS L1505-1988 に適合)

仕様: 測定範囲 28~130dB

2003年4月14日受付

2003年4月21日受理

<sup>\*</sup>(株)ロックス・ジャパン

〒101-0032 東京都千代田区岩本町 2-16-9

TEL 03-3863-0748

FAX 03-3863-0749

<sup>\*\*</sup>日立プラント建設(株)技術開発本部 松戸研究所

〒271-6101 千葉県松戸市上本郷 537

TEL 04-7361-6101

FAX 04-7361-5405

<sup>\*\*\*</sup>旭化成(株)化薬事業部 化薬研究所

〒882-0015 宮崎県延岡市水尻町 304

TEL 0982-22-6313

FAX 0982-22-6317

周波数範囲 20~12,500Hz  
 分解周波数 12.5~12,500Hz  
 (1/3 オクターブバンド)  
 自己雑音レベル 20dB 以下(A 特性)  
 時定数 FAST(125ms), SLOW(IS)

爆発音測定の実験坑道と測定器位置の関係を下図に示す。

2.2 遮音構造体

遮音材の構造はエアークャップシートを Table 1 に示す積層方法で遮音効果を測定した。

各遮音材ユニットは小型坑道排気出口に Fig. 3, Fig. 4 に示す木製枠中に設置し、爆発音の測定をおこなった。

なお、遮音構造体内部のユニットは実験毎に交換した。

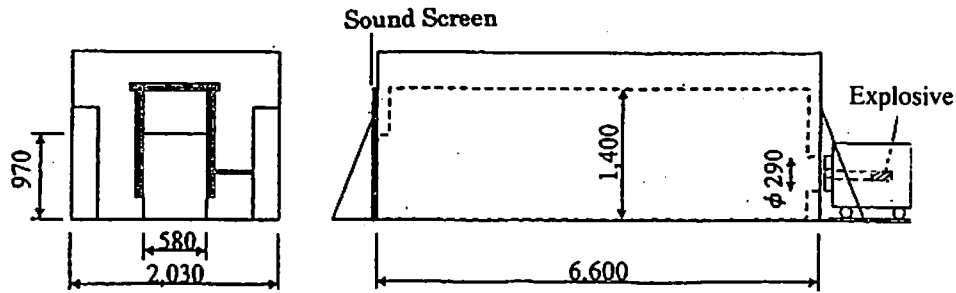


Fig.1 Small tunnel for explosion test and exhaust portion

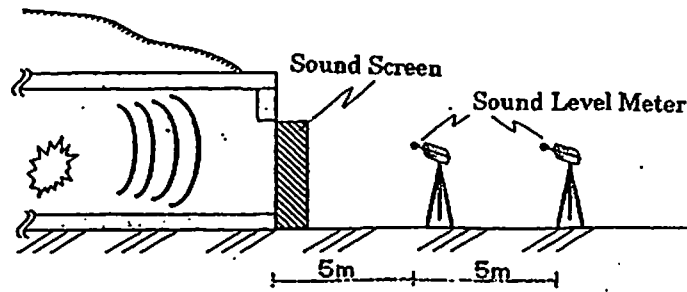


Fig.2 Measurement position of each sound level meter

Table 1 Structure and size of sound screen

Exp.No	Size of Screen Unit	Structure of Screen (plan view)	Material
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dia * Length * Wgt &lt;16cm * 1.0m * 2.0kg&gt;</li> <li>• Single Layer * 3 Rolles</li> </ul>		Air Capsule Sheet ①Material: Polyethylene ②Capsule Dia.: 10mm Φ
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dia * Length * Wgt &lt;6cm * 1.0m * 400g&gt;</li> <li>• 3 Parallel Layer * 26 Rolls</li> </ul>		
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wide * Length * Wgt &lt;60cm * 1.0m * 750g&gt;</li> <li>• Flat Pile * 14 Sheets</li> </ul>		
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 Nozzles</li> <li>• Water Volum &lt;40~60l/min&gt;</li> </ul>	Water Shower	—————
5	—————	Wooden Flame only (without Sound Screen)	—————

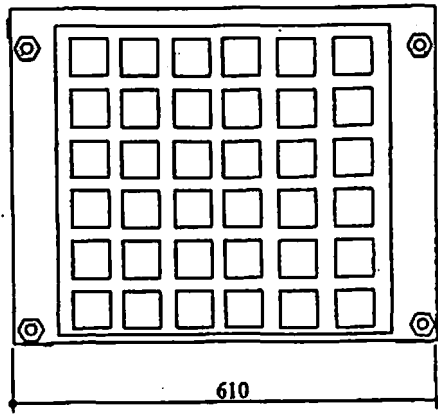


Fig.3 Front view of screen frame

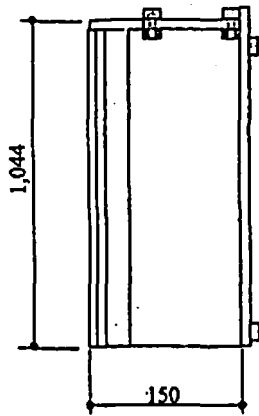


Fig.4 Side view of screen frame

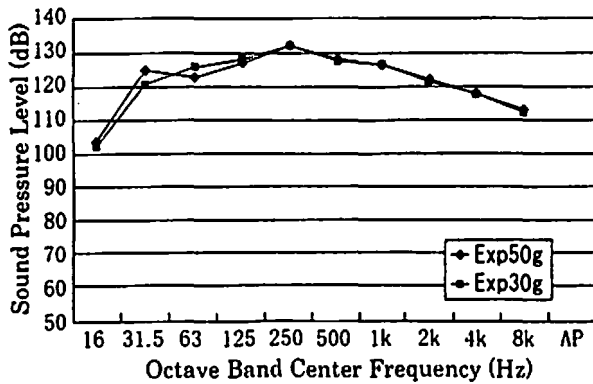


Fig.5 Comparison of sound pressure level occurred by 50g and 30g of explosive

### 2.3 測定結果

騒音発生エネルギーレベル設定として、含水爆薬(サンベックスえのき)30gと50gを白砲内起爆し、遮音構造体を取付けず、坑道正面の2m地点で音圧レベルを測定した。その結果30gと50gでは薬量の違いによる音圧レベルの差は認められなかった。

そこで本研究では、以降50gの薬量設定で騒音測定をおこなった。

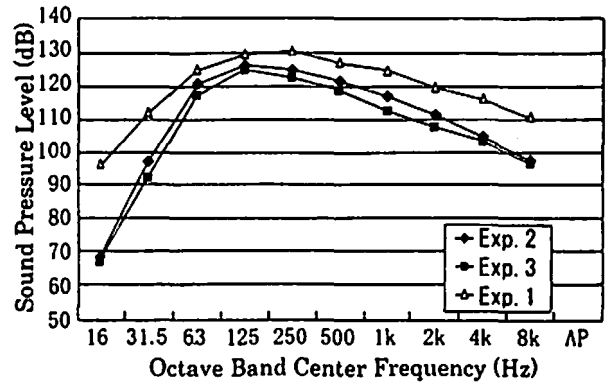


Fig.6 Result of sound pressure level with sound screen composed by single roll pile (2), parallel roll pile (3) of and without sound screen (1)

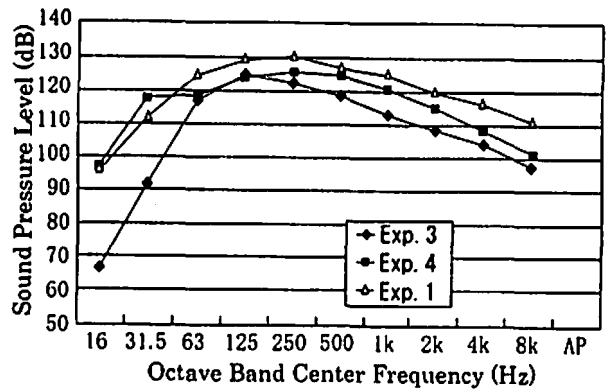


Fig.7 Result of sound pressure level with sound screen composed by parallel roll pill (3), flat sheet pile (4) and without sound screen (1)

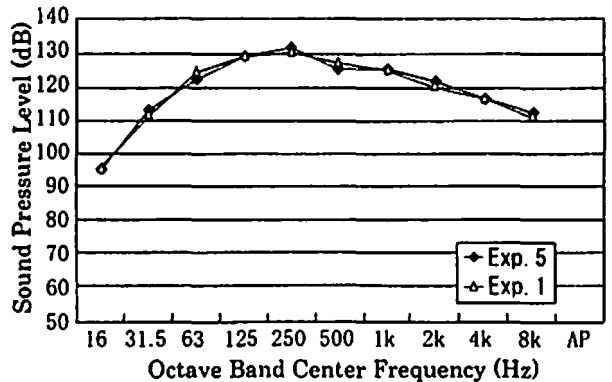


Fig.8 Water shower effect for the purpose of decreasing sound pressure level (5)

Fig.6～Fig.8に、遮音構造体としてエアークャップシートのロール状単層と複層、平板積層、および水シャワーの効果について、遮音体正面から10m地点での音圧レベル測定結果を図示し、各々遮音体無設置の場合と対比した。またTable2には、5mおよび10m地点での16Hz、31.5Hz中心周波数での音圧

Table 2 Measurement result of sound pressure level with several type of sound screens and without sound screen

Exp.No	Type of Screen	Measurement Point from Screen				Decreased Ratio
		5m		10m		
		16Hz	31.5Hz	16Hz	31.5Hz	
1	Straight (Without Screen)	96 <sup>dB</sup>	115 <sup>dB</sup>	72 <sup>dB</sup>	104 <sup>dB</sup>	Control
2	Single Roll Pile (Dia.16cm×3P)	68	98	64	90	10~20%
3	Parallel Roll Pile (Dia.6cm×23P)	67	92	54	82	20~30%
4	Flat Pile (14 Sheets)	97	116	74	103	≒0%
5	Water Schower	96	114	—	—	≒0%
Ref	Aluminum Plate	81	102	54	86	10~25%

レベル測定値と遮音体無設置と対比した音圧レベルの減少率を示す。

遮音材から5m地点での音圧レベルは、オクターブバンド中心波長16Hzで、円柱単層、複層共に約30%の減少であり、中心波長31.5Hzでは、単層で20%、複層で15%の減少を示している。一方、エアキャップシートの平積層は16Hz~31.5Hz、超低周波領域ではその効果は観測されなかった。

Table 2に10m地点での測定値を示すが、同様に円柱単層で20~25%、複層で12~14%の減少を示しているものの平積層の効果は認められなかった。さらに低周波領域における水シャワーの効果は、本研究では確認されなかった。次に固体遮音材としてアルミ板(1mm厚)を用いて同様に測定した結果、10~25%の範囲で低減効果は認められるものの、アルミ板は大幅に変形している。従って低周波域の音圧エネルギーは、アルミ板変形をおこなう力学的エネルギーへ部分的に変換されたものと考えらる。

2.4 無響室による遮音特性の評価

超低周波領域の音圧レベルが、エアキャップシートの円柱積層体で20~30%も低減することは、著しく興味のあるまた新しい現象の発見と云える<sup>10)</sup>。

そこで、この現象を音響的観点から解析するため、残響室-無響室を用いた正規な音圧レベル測定をおこない、その結果を報告する。

2.4.1 実験条件

(a) 試験室

日本板硝子環境アメニティ(株)、竜ヶ崎研究所音響実験棟にて測定した。(残響室容積:727m<sup>3</sup>、無響室容積:347m<sup>3</sup>)

(b) 音源

低周波数に帯域制限した(200Hz以下)ピンクノイズ<sup>11)</sup>を用い、さらに帯域通過フィルターを用いて5~50Hzへ帯域制限した信号で超低周波域での音圧レベルを測定した。

Table 3 Experimental sound screen between reverberation room and anechoic room

Experimental Screen	Structure	Unit Size & Number of Pieces	Total Wgt.
Cond.1	Single Roll Layer	(1) Roll Size Dia. 20cm, Length 1.0mm (2) Number of Roll 10	60Kg (6 Kg * 10)
Cond.2	Parallel Roll Layer	(1) Roll Size Dia. 15cm, Length 1.0mm (2) Number of Roll 20	60 Kg (3 Kg * 20)
Cond.3	Flat Sheet	(1) Sheet Area 1.0mm * 2.0mm (2) Number of Ply 55 Sheets	60 Kg (1.1 Kg * 55)

音源スピーカーは口径 38cm で、低音域で出力を得るためコーン紙を大きくするように設計されたものを使用し、これを4機マウントしたスピーカー・システムにて測定した。

(c) 測定方法と評価方法

残響室内の平均音圧レベル(エネルギー密度) $D_0$ と無響室側での音圧レベル  $D_1$ の差を求め、評価量  $1L = D_1 - D_0$ として遮音材としての効果を評価した。

無響室内では、遮音材の試験体中心表面から 10cm ~50cm の近傍音圧レベル値を各々測定した。

(d) 試験体仕様

試験体は、両面をパンチングメタルとしたアルミ枠筐体(H200×W1000×D200)を用い、遮音構造となるエアークャップシートの円柱体および板状体を各々アルミ筐体に挿入し、遮音構造体とした。(Photo 1に示す。)このアルミ枠筐体を残響室-無響室間の遮音壁として設置し音圧レベル差異を測定した。

遮音構造体として Table 3 に示す3種類の試験体を製作し評価した。筐体に挿入した円柱状ユニットを Photo 2 に示す。

試験に供したエアークャップシートは宇部フィルム C-80S で、キャップ直径 10mm, 高さ 4 mm のものを用いた。

2.4.2 実験結果

遮音構造体としてエアークャップシートの単層円柱体(Cond. 1), 複層円柱体(Cond. 2), 平積層(Cond. 3)を用いた場合の残響室と無響室間の音圧レベル差(1L)を Fig.9~Fig.11 に示す。また Cond. 1での残響室および無響室での実測値を Table 4 に示す。

残響室と無響室での平均音圧レベル差 1L 値測定

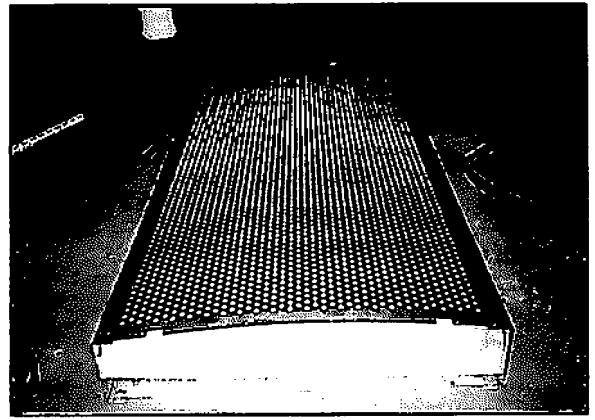


Photo 1 Experimental sound screen assembled by aluminum frame

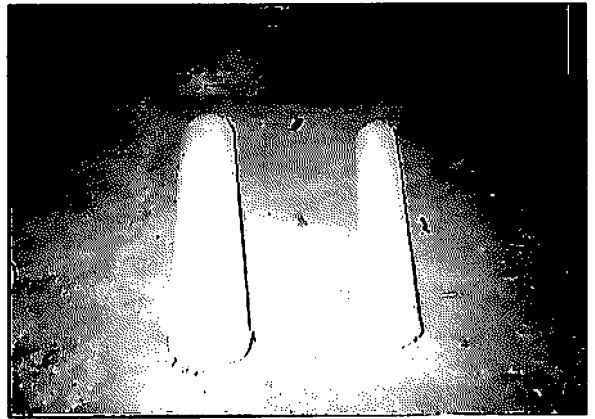


Photo 2 Unit of sound screen L: Cond 1, R: Cond 2

結果から、エアークャップシートの円柱単層方式では 6.3~25Hz の範囲で 10~20dB の低減効果を持ち、20dB 近傍に 1L 値のピークを示している。また円柱複層方式は 6.3~31.5Hz の範囲でやはり 10~20dB

Table 4 Measurement result with sound screen composed by single roll layer (cond. 1)  
Measurement point behind sound screen (A) : 10 cm, (B) : 50 cm

Frequency (Hz)	(A) : 10cm			(B) : 50cm		
	$D_1$	$D_0$	IL	$D_1$	$D_0$	IL
5	11.73	6.39	5.34	8.86	7.88	0.98
6.3	18.06	5.27	12.79	15.2	8.54	6.66
8	17.53	4.3	13.23	17.96	7.24	10.72
10	16.4	4.12	12.28	17.27	7.34	9.93
12.5	36.19	21.62	14.57	37.86	24.64	13.22
16	36.55	20.34	16.21	38.07	23.41	14.66
20	35.27	15.9	19.37	39.06	18.77	20.29
25	15.66	4.58	11.08	20.12	6.91	13.21
31.5	10.83	5.74	5.09	15.04	8.23	6.81
40	4.99	2.77	2.22	8.32	4.3	4.02
50	7.23	3.77	3.77	10.45	5.1	5.35

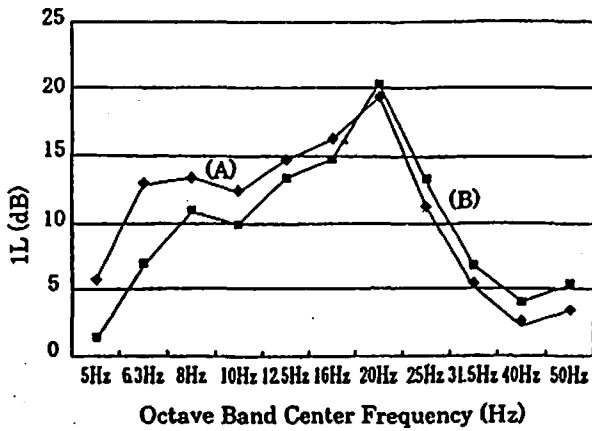


Fig.9 Measurement result by single roll (Cond. 1)  
(A): 10 cm, (B): 50 cm behind screen

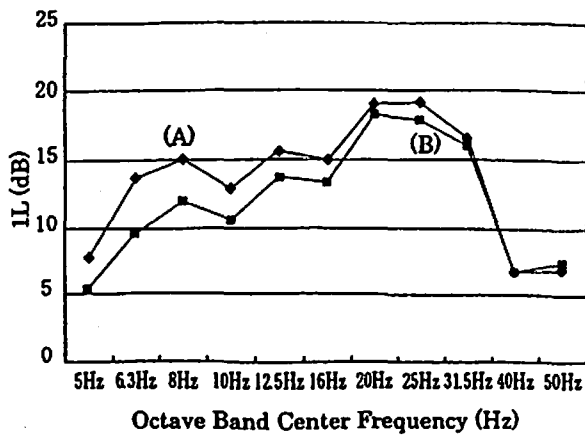


Fig.10 Measurement result by parallel role (Cond. 2)  
(A): 10 cm, (B): 50 cm behind screen

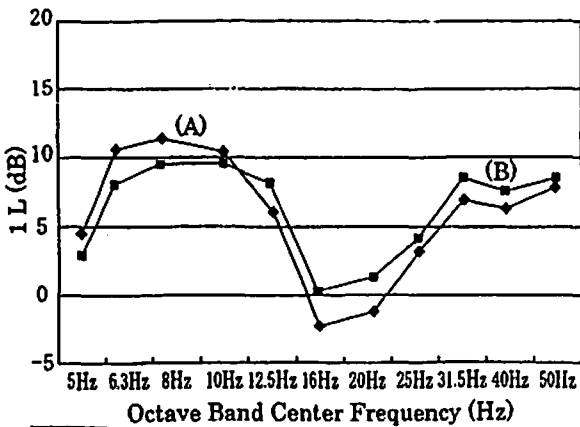


Fig.11 Measurement result by flat sheet pile (Cond. 3)  
(A): 10 cm, (B): 50 cm behind screen

の低減効果を示し、その特性はブロードでありピークのすそ野は広がっている。一方、シートの単純積層方式ではその低減効果は 10dB 以下であり、円柱方式に比べ劣っている。

この音響評価結果は、爆薬から発生する低周波領域の音圧レベル測定結果とほぼ同一であり、単層および複層共に超低周波帯での遮音構造として有効であることが裏付けられた。

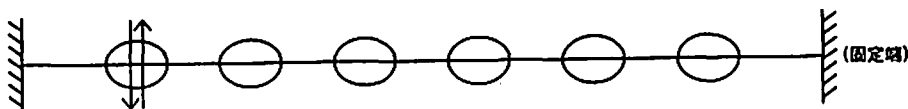
3. まとめ

エアーキャップシートの円柱構造体が超低周波帯で、10~20dB 程度音圧レベルを低下させる現象の理論的解析は甚だ困難と考える。金属板等による遮音特性は音波進行方向に対する単位面積当りの重量(密度と厚み)で決まる重量則が適用され、一方、多孔質材料による吸音特性は繊維の隙間や細孔中の空気が振動し、その際摩擦抵抗が働きエネルギーの一部が熱エネルギーに変換され吸音効果が生じるとする考え方である。

本研究における効果は前者の重量則は考察の対象外であるものの、吸音特性については一般には高い周波数領域ほどその効果があり、また吸音材中に存在する細孔は連続気泡体 (Open Pore) の場合にその特性が得られている<sup>13)</sup>。一方、本研究で用いられたエアーキャップシートは、独立気泡体 (Closed Pore) の分布構造であって、従来技術と異なった構造をもち、かつ低周波領域においてその効果が見出されている。

この特異な現象に対する要因として、(1)独立気泡体である単位体積当りのエアーキャップ数とその立体構造および(2)高分子材料であるシート素材の粘弾性特性に係る因子が考えられる。まず素材の粘弾性特性として、インダクタンス(L)、抵抗(R)、時間遅れ系(ダッシュポット)などの要素でネットワークモデルを組立てることは本研究では難しいと考える。その理由として素材に入射する振動周波数が低いこと、またエアーキャップは一体構造でなく点在構造からなりたっているため上記の要素では表現できない。

そこで、一つの仮説として下図に示すような風船モデルとも云うべき力学的ユニットを考えLとRと三次元構造効果を考える。単純なモデルをして一次元モデルで縦一列に風船がプラスチックの糸で繋がったような構造体である。



$n$  : 空気の粘性抵抗が極めて大きく、固有振動数が大幅に下がる。

このモデルによる振動モードを定性的に考察すれば、音圧による励振エネルギーがエアークャップの垂直面に与えられた時、大きな $\eta$ が作用し、共振周波数が大幅に低下すると考えられる。

次に、風船のサイズは波長に比べて極めて小さいため風船の周りの気圧の変動は殆んど同相とみなすことができるため、断熱的熱力学の式が適用可能である。

$$PV^{\gamma} = RT \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{仕事は, } \int [PV^{\gamma} dp + (\gamma - 1) PV^{\gamma} dV] \quad \dots\dots (2)$$

即ち、元の体積に対して最大収縮した時の圧力がおこなった仕事、つまりこの仕事で失うエネルギーの量が吸音の大小を決めることとなる。

さらに、構造上の要因として、平面多層構造よりもロール構造の方がエアークャップ軸が種々な方向に分布しているため、音波のエネルギーを効率よく分散吸収しているものと考えられる。

即ち、エアークャップシートのロール積みは、数10ヘルツから数ヘルツの周波数に共振周波数を分布させた構造体となり、低周波に対する吸音体としての優れた性能を示すものと考えられる。

#### 4. 謝 辞

本研究における音響実験室での測定は、日本板硝子環境アメニティ(株)、溝口耕三様の多大なご尽力をいただき感謝申し上げます。また爆薬での

低周波音測定に当っては、戸田建設(株)、岡村光政課長からのご指導をいただき謝意を表します。

#### 文 献

- 1) 吉竹伸治, 外山純, 火薬と保安, 26, 3(1994)
- 2) 井上堯之, 雑喉謙, トンネルと地下, 34, 325 (1993)
- 3) 山本和彦, 広野進, 山本雅昭, 今田孝治, 橋爪清, 新海清之, トンネルと地下, 24, 495 (1993)
- 4) 大江章雄, 脇谷慎一, 熊取谷晃吉, 木山雅和, 長谷川渡, 高田重隆, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, p65~68(1993)
- 5) 松岡喜総, 清正稔, 井清武弘, 鈴木忠, 公害, 17, 267(1972)
- 6) 和田有司, 小出浩平, 田村昌三, 小林直太, 國川明輝, 大橋正満, 吉田忠夫, 工業火薬, 50, 174(1989)
- 7) Richard Raspet, J. Aconstical Society of America 74, 1757(1983)
- 8) 唐澤誠, 「音の科学」p64(1997)日本実業出版社
- 9) 難波精一郎, 「音の科学」p46(1989)朝倉書店
- 10) 特願 2000-334642 「遮音構造体」
- 11) 日本音響学会編「音響用語辞典」p508(1998)コロナ社
- 12) 新環境管理設備事典編集委員会「騒音・振動防止機器活用辞典」p48(1995)産業出版

## Decrease of infrasound pressure by blasting

Hisaaki Fukui<sup>\*</sup>, Minoru Takahashi<sup>\*\*</sup>, and Masaaki Yamamoto<sup>\*\*\*</sup>

For the purpose of decreasing Infrasound Pressure occurred by blasting, New Model of Sound Screen is investigated. This Sound Screen is composed by Roll Layer of Air Capsule Sheet made from polyethylene. Slurry explosive of 50g charged in Ballistic Chamber is initiated toward small size tunnel (1.6m Dia. × 6.6m Length) and above Screen is set with it's opposite site. After blasting, it is measured that sound pressure level is decreases about 20 dB at 16 Hz center frequency behind 10 m remote of the Screen. To confirm this effect, the following experiment is carried out by Acoustic Method.

This Screen is set for the partition between Reverberation Room and Anechoic Room.

By putting out Infrasound Frequency restricted 5~50 Hz range by loud speaker, it is also confirmed that Sound Pressure Level decreases about 11~14 dB behind 50 cm point from the partition in Anechoic Room.

<sup>\*</sup>Rox · Japan Co., Ltd, 2-16-9 Iwamotocho, Chiyoda-Ku, Tokyo 101-0032, JAPAN

<sup>\*\*</sup>Matsudo Research Laboratory, Hitachi Plant Co. Ltd., 537 Kamihongo, Matsudo City, 271-0064, JAPAN

<sup>\*\*\*</sup>Explosives R & D Center, Explosive Division, Asahi Corporation, 304 Mizusiri Nobeoka City, 882-0015, JAPAN)