研 究

船体構造物の放射雑音低減に関する研究* (第 2 報 : 減衰材貼付範囲による雑音低減効果に関する実験的検討)

堤 厚博, 岡本 慶雄**

(防衛庁技術研究本部第一研究所)

(平成 6 年 11 月 14 日受付け)

In order to study the effect of damping layer applied to the ship hull structure on the radiated noise reduction, an experimental study on the vibration and acoustic intensity characteristic of rectangular steel plate with a damping layer was carried out.

The Summary of the results is :

- (1) Radiated noise reduction due to vibration is lower for the plate contacting with water than for that in air.
- (2) A damping layer is less effective near the point of excitation for high frequency range. But except of that, vibration reduction effect increases with increasing area of a damping area.
- (3) As the measuring position is distinct from the point of excitation, its acoustic intensity level decreases more and more.

1. 緒 論

艦艇の雑音を低減することは、索敵能力の向上、被探知防止等の観点から非常に重要な課題となっている。そこでこれまでに、船殻構造の音響特性^{1),2)}を始め、主機・補機等の改良及びそれらの振動低減のための支持用防振ゴムの使用、船殻外板への減衰材の使用等の方法が取られてきた。

このうち減衰材については、古くから使用され、振動低減効果のあること^{3)~6)}が明らかにされているものの、それを船殻に貼付した場合の振動及び音響特性について、詳細には明らかにされていない⁷⁾と思われる。特に、現在の減衰材施工方法は、主機等の周りに部分的に貼付しているに過ぎないため、その振動・音響特性は、明らかではない。

そこで、本研究では、減衰材を部分的に貼付した船殻の振動・水中音響特性を把握するため、その基礎研究として、長方形板に減衰材を貼付し、1/3オクターブバンドで加振した際の振動状態とその水中

音響特性を調べ、減衰材を貼らない場合と比較して、振動及び水中音響特性がどのように変化するかについて検討した。また、合わせて減衰材貼付範囲による影響についても検討した。

2. 減衰材貼付平板の減衰係数(ロスファクター)の測定

今回用いた減衰材は、艦艇に使用されている通称ハルダンパーと呼ばれるエポキシ系の厚さ 16 mm のものである。減衰材を船殻に貼る場合でもその減衰特性が重要であるが、通常減衰材単独での減衰特性は、求められず、鋼板に貼ってその減衰係数(ロスファクター)を測定するのが普通である。

測定する方法も、円板や細長い平板に減衰材を貼り、対数減衰率を測定する方法やハーフパワーバンド法を用いて、ロスファクターを求める方法等があるが、今回は、細長い長方形鋼板に減衰材を貼り付け、ハーフパワーバンド法によって、ロスファクターを求めた。

減衰材の減衰特性を求める実験は、幅 30 mm、厚さ 6 mm、長さが 200 mm、300 mm の鋼板に厚さ 16 mm の減衰材を貼付し、それを加振器に設置し正弦波により加振し、鋼板に取り付けた振動ピックアップによりその固有振動数を調べ、ロスファク

* Study on the radiated noise reduction from the ship hull structure (Part2)
(Experimental study of the damping area of steel plate on the radiated noise reduction).

** Atsuhiko TSUTSUMI, Yoshio OKAMOTO (The 1st Reseach Center, TRDI, JDA).

図1 周波数毎のロスファクター値 (22℃)

ターを求めた。図1に今回用いた減衰材貼付鋼板の、22℃(室温)における各周波数ごとのロスファクターの値を示した。

3. 減衰材貼付長方形板の振動・水中音響特性

図1に示したような減衰特性をもつ減衰材を四辺を溶接した縦1200 mm, 横600 mm, 厚さ6 mmの鋼板製の長方形板に貼付し, 強制振動させ, 振動加速度レベル, 水中に放射される水中音響インテンシティレベルを求めて, 減衰材の貼付されていない長方形板のそれらと比較を行った。減衰材貼付にあたっては, これを部分的に貼付した場合と全面に貼付した場合との比較も行っている。

3.1 実験方法

実験は, 四辺をワイヤによって支持した長方形板を1/3オクターブバンドの周波数(中心周波数, 125 Hz, 250 Hz, 500 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 6.3 kHz, 8 kHz)で加振させ, 長方形板表

図2 減衰材貼付範囲と加振位置

面に接着した振動計で振動加速度を, 水面下20 cmの位置に設置した水中マイクロホンにより水中音響インテンシティをそれぞれ計測している。

また, 振動計測は, 空中につった状態と接水させた状態の両方で行い, 接水させた状態では, 水中音響インテンシティ計測結果とも比較を行っている。図2に長方形板と減衰材の貼付範囲を示した。減衰材の貼付範囲は, 図に示したように長方形板の全面積に対する割合で, 1/32, 1/8, 1/1とし, 加振器の周りに貼付している。図3には振動計と加振器の位置関係を示した。振動計は, 減衰材を1/8と1/1貼付した状態では, 図に示すようにほぼ全面に貼付しているが, 貼付していない場合や1/32貼付した状態では, 図3の設置位置の右下1/4の部分及び加振器の位置とその下3点の位置しか振動計が設置されていない。そこで設置されていない点は, 対称性を考慮して補間することにした。

また, 図4には, 接水した状態での加速度計測及び水中音響インテンシティ計測の際の装置構成図を示した。振動計測と水中音響インテンシティ計測では, 同じ周波数分析器を使うことができないため, それぞれ別の周波数分析器を使っている。また, 計測結果表示では, 結果表示プログラムが同じ計算機に入力されているので, 同じ計算機を使用している。

3.2 実験結果及び考察

以下に空中でつった状態及び接水した状態での振動レベル, また, 水中音響インテンシティレベルを示す。振動レベルについては, 振動加速度を加振力で割ったアクセランスを用いて単位加振力当たりの加速度レベルを表示している。アクセランスの表示にあたっては, 平板上での加速度計の値を基に, スプライン関数で補間し, 三次元表示したものである。従って, モード解析を行ったものではない。なお, 提示した周波数は, 各場合について二つ(1 kHzと8 kHz)であるが, 低周波数領域と高周波数領域の代表値を示した。表示の結果は, 水中音響インテ

図3 振動計設置位置と加振位置

図4 測定装置構成図

ンシティの表示と同様とした。

図5に、空中でつった状態での1 kHzと8 kHzについてのアクセラランス値の比較結果を示した。順次、減衰材の貼付範囲を増やした結果について示している。1 kHzでは、端部(X方向のX1のラインと、X9のライン)での振動レベルが高くなっており、減衰材の貼付にほとんど関係していないことから、この範囲の周波数に、端部が振動する固有モードがあることが推定される。また、8 kHzでの周波数では、加振点近傍の振動レベルが高くなっていることから、局所的な振動であることが分かる。加振点近傍を除いて、振動レベルを減衰材を貼っている場合と貼っていない場合とで比較すると、貼っている場合は、著しくその振動レベルが低下していることが分かる。特に、1/32程度の貼付でもその効果は大きい。

図6には、接水した状態で減衰材の貼付範囲を変えた場合のアクセラランス値の比較検討を示した。1 kHzでは、接水しているため端部での振動レベルの絶対値は、大きくなく、空中の場合と異なる。また、8 kHzで加振点近傍の振動レベルが高く、局所的な振動が現れているのは、空中の場合と同様の現象である。このことは、言い換えれば、接水してい

ても、また、減衰材を貼付していてもレベルの差はあるにしろ、局所的な振動が存在することを示している。この振動を消すためには、剛性を高くするなどの工夫が必要と考えられる。空中の場合と比較すると、一部を除いて全体のレベルが小さくなっていることから、接水の影響が認められる。減衰材の貼付範囲による影響は、貼っていないものと比較すると、1/32程度貼付しただけでも、その効果は見られるものの、貼付範囲を増やしても、その効果はほとんど認められず、空中の場合の結果と異なっている。また、空中の場合に減衰材の効果が大きいのは、減衰の効果と減衰材の負荷重量の効果が考えられる。減衰材の比重が1.6程度であるため、水の比重より若干重くなっている。従って、接水している場合よりもその効果は、大きいことが考えられる。実際に、図5の減衰材の無い場合の空中でのアクセラランス値と、図6の接水した状態でのアクセラランス値を比較すると、図5の空中の方が低いことが分かる。仮に、比重1.6の減衰効果のない液体が負荷した状態を考えると、そのときのアクセラランス値と、図5のアクセラランス値との差が、減衰材の減衰効果のみを示すことになる。なお、両図で振動状態が多少違うのは、減衰材が全面に隙間なく貼られて

$$0 \text{ dB} = 1 \text{ m s}^{-2} / N$$

減衰材無し

1/32 減衰材貼付

1/8 減衰材貼付

1/1 減衰材貼付

図5 減衰材貼付によるアクセラランス値の比較 (空中)

減衰材無し

1/32減衰材貼付

1/8減衰材貼付

1/1減衰材貼付

図6 減衰材貼付によるアクセランス値の比較(接水)

いないことと、接水した状態が均一な負荷質量の効果だけでなく、減衰効果も加わり振動状態をより複雑にしているためと考えられる。

図 7 に水中音響インテンシティ値の比較結果を示した。この値は、参考のために計測したため、減衰材の貼付範囲が 1/8 の場合と 1/1 の場合だけしか取っていない。また、このインテンシティは、アクティブインテンシティであり、リアクティブインテンシティは、放射エネルギーの流れに関係しないので示していない。

必要があろう。減衰材を全面貼付 (1/1 貼付) した 8 kHz の場合のインテンシティレベルは、1/8 貼付の場合と比較してレベルは小さくなっている。1 kHz の場合では、接水状態からも推定されるように加振部付近の局部振動の影響のために、加振部付近のインテンシティが高く、反対側に行くに従って小さくなるような、なだらかな傾向を示していると考えられる。

次に、加振点及び全体平均 (全計測点を算術平均したもの) での周波数ごとの傾向を比較したものを、

図 7 水中音響インテンシティ値の比較

1 kHz では、減衰材を貼付した部分のインテンシティレベルが、極度に低下している。これは加振位置周りの放射がほとんどないことを示しているが、図 6 の接水状態のアクセランス値は、そのような状態にはなっていない。しかし、減衰材の貼付部分で、対称的に二つの振動レベルの高い山が見られ、これらの振動の位相がこの範囲内で反対となり、水平方向成分のみが残る形となり、山の間の谷部分のみが強調されたことが考えられるが、これについては、この範囲での放射特性を、更に詳しく検討する

図 8～図 13 に示した。図 8 及び図 9 は、空中におけるアクセランス値の比較である。空中では、全面積の 1/32 だけ貼付しただけでも、20 dB～30 dB もアクセランス値が減少し、低減に効果のあることが分かる。加振点では、低周波帯域の場合に、減衰材貼付範囲が増えるほど、アクセランス値は減少し、高周波帯域になると、その傾向は薄れる。全体平均でもほぼ同様の傾向を示すが、減衰材の全面貼付の場合だけは、高周波帯域においてもアクセランス値の低減効果は大きい。減衰材を全面貼付し

た全体平均の場合のみ、他の傾向と異なるが、後述する接水した状態と比較すると、高い周波数 (4 kHz 以上) の場合のみ異なる傾向となっている。空

中においては、全面貼付の影響が高い周波数 (4 kHz 以上) で効いていることを示している。

図 10 及び図 11 は、接水した状態でのアクセラ

図 8 空中での加振点の場合

図 10 接水時の加振点の場合

図 9 空中での全体平均の場合

図 11 接水時の全体平均の場合

図 12 加振点直下のインテンシティ値

図 13 全体平均のインテンシティ値

ンス値の比較である。空中の場合と比較すると、減衰材貼付による振動低減効果は、明らかに悪く、貼っていない場合と 1/32 貼付の結果と比較しても、その減衰効果は、加振点で最大 10 dB 程度、全体平均で最大 15 dB 程度である。しかし、その示す傾向は、減衰材貼付の有無にかかわらず、加振点でも全体平均でも同様に、周波数が高くなるにつれて漸増する。また、減衰材を貼付してあれば、貼付範囲の大きさによらず、ほぼその値は同じとなった。空中の場合と比較して、両方の場合ともアクセラランス値が低く、一部を除いて、傾向もほぼ同じである。これは、接水による効果が、減衰材貼付と似ていることを示している。すなわち、付加質量の効果によって、低周波帯域のアクセラランス値が低減し、減衰の効果によって、減衰材貼付と似た効果をもたらす（特に高周波帯域で）ためと考えられる。減衰材の貼られていない場合の空中と接水のアクセラランス値を全体平均で比較すると、最大 35 dB 程度、最小 15 dB 程度接水時のアクセラランス値が低い。空中で減衰材を全面貼付した場合と、接水時で減衰材の貼られていない場合を比較すると、減衰材を貼られた空中の場合のアクセラランス値の方が最大 40 dB (8 kHz 帯域) ~ 最小 10 dB (500 kHz 帯域) 程度低い値となり、この差が、減衰材貼付状態と接水

状態とのアクセラランス値の違いとなっている。つまり、付加質量の効果は、低周波帯域で効き、その効果は、比重の差 1.6 (減衰材) と 1 (水) の違いとして表れていると考えられる。一方、高周波帯域では、水の減衰効果に比べて、減衰材の減衰効果があるかに大きいために、25 dB ~ 40 dB もの差になったものと考えられる。

図 12 及び 13 は、水中音響インテンシティ値の比較である。インテンシティ値は、前にも述べたように、減衰材の貼付範囲が、1/8 と 1/1 の場合しか計測していない。また、このインテンシティ値は、アクティブインテンシティ値を示し、更にその中でも正值 (positive) と負値 (negative) があるため、それらについても区別を行った。なお、図 12 では、正值のみであったため、負値については、示されていない。また、減衰材の貼付されていないときのインテンシティ値は、加振力が小さな値しか取れなかったため、減衰材の貼付された場合と加振力は、異なると考えられるものの、傾向を示すためにここに揚げた。

図 12 の加振点直下 20 cm のインテンシティ値は、減衰材貼付の有無にかかわらず、ほとんど変化はなく、僅かに高周波帯域で減衰材貼付範囲の大きい方が、インテンシティ値の小さい傾向が見られる程度

である。1 kHz で減衰材貼付範囲が $1/8$ の場合、インテンシティ値が小さい傾向が見られるが、前に述べたような理由が考えられる。全体平均の図 13 には、そのような傾向はない。加振点真下では、振動レベルと同様に 2 kHz までは周波数が高くなるにつれて右上がりの傾向がある。

図 13 の全体平均では、500 Hz まではインテンシティ値が負値となり、反射による音圧の方が高くなり、インテンシティ値の絶対値が極度に小さくなるが、これは無響水槽の特性⁸⁾とも一致し、水槽壁面による反射が大きくなったためと考えられる。500 Hz 以上では、減衰材貼付範囲によって、顕著な傾向は、見受けられない。 $1/1$ 減衰材を貼付した場合は、1 kHz 以上では、次第にインテンシティ値が小さくなる傾向があるだけである。近距離音場のインテンシティ値は、平板接水部の音圧とは違い、平板各部の振動の節間隔や振動の腹の速度によって正負の値 (dB 値で) を取り、周波数によるよりも、減衰材の貼付範囲によって、その影響を受けるため、周波数による傾向が出にくく、インテンシティ値の傾向が、明らかな傾向をもたなかったものと考えられる。

4. 結 論

減衰材を部分貼付した船殻の振動・音響特性を把握するため、その基礎研究として、長方形板に減衰材を貼付し、 $1/3$ オクターブバンドで加振した際の振動状態と水中音響特性を調べ、減衰材を貼らない場合と比較して、それらがどのように変化するかについて検討した。また、合わせて減衰材貼付範囲による影響についても検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 空中では、減衰材の貼付効果は大きく、加振点付近を全面積の $1/32$ 程度貼付しただけでも、振動低減効果があった。
- (2) 空中における場合も接水している場合も振動レベルは、減衰材の貼付範囲を広げるほど振動低減効果は、大きくなる傾向があるものの、接水した 4 kHz 以上 (場合によっては、2 kHz 以上) の周波数帯域では、局部振動が支配的となり、加振器周辺では、その効果は余りない。
- (3) 接水している場合は、接水した水の影響のために、減衰材貼付の効果は、空中ほど大きくなく、部分貼付しても、全面貼付しても大きな差はない。特に、加振点付近に貼付する場合は、減衰材貼付範囲を大きくしても、その

効果はほとんど変わらない。このことは、艦艇での減衰材貼付範囲を考える上で、参考になると考えられる。

- (4) 水中音響インテンシティは、全面貼付した場合には、4 kHz 以上の周波数帯域でも、局部放射の状態はなく、加振点付近を頂点として、反対側に行くにつれて、なだらかになる傾向を示した。また、1 kHz 以上では、減衰材を貼付した場合、加振点直下でも、全体平均でその傾向は、一部を除いて似ている。

あとがき

今後、減衰材を全面に貼付した場合について、減衰材の特性を変えた場合や、板厚を変化させた場合等について、振動特性がどのように変化するかについて、数値シミュレーションを行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 岡本慶雄他, “船殻構造モデルの音響特性に関する基礎研究 (第一報) (曲面板の音響放射率について)”, 防衛庁技術研究本部技報, 第 6524 号 (1994.7).
- 2) 岡本慶雄他, “直交異方性板の音響特性についての実験的研究”, 防衛庁技術研究本部技報, 第 6499 号, (1993. 12).
- 3) Jeromme E. Ruzicka, “Structural Damping”, (The American Socoiety of Mechanical Engineers, 1959) pp. 50 - 65.
- 4) Leo L. Beranek, “Noize and Vibration Control”, (McGRAW - HILL Book Company, New York, 1971) pp. 434 - 475.
- 5) J.C. Snowdon, “Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems”, (John Willy & Sons, New York, 1968) pp. 134 - 192.
- 6) E.E. Unger et.al, “Structure - Borne Sound”, (Springer - Verlag, New York, 1973) pp. 178 - 185, pp. 306 - 310.
- 7) 堤 厚博, “減衰材料付き梁の縦波の伝達に関する基礎的研究”, 防衛庁技術研究本部技報, 第 5545 号, 一般, (1989. 6).
- 8) 堤 厚博, “音源を水面中央に設置した場合の無響水槽の音響特性について”, 海洋音響学会誌第 18 巻第 2 号 (通巻 62 号), pp. 22 - 35. (1991. 4)