

マフラーの流体騒音及び損失に関する研究

木 村 雄 吉*・山 田 和 文**

Exhaust Noise and Transmission Loss of Mufflers

Takeyoshi Kimura and Kazufumi Yamada

Exhaust noise of automobiles become one of the biggest problems of urban environment, and most governments put restriction on the pollution of the noise. The present investigation has carried out as the first step to solve these problems.

In this paper, the amplitude and phase of a sound pressure in the acoustic field of a muffler has been calculated by applying the principle of Huygens' elementary wave. The merit of the method can be easily calculated the interference, diffraction and reflection of a sound-wave. Moreover, a computer simulation of wave propagations has been carried out and the wave pattern has been successfully visualized by our method. It has been verified that the present calculating method is to be a useful one to develop and design mufflers.

1. 緒 言

公害に関する問題は世界的に取り組まなければならない課題となっている。環境汚染問題と共に騒音問題についても世界的な規模で規制が実施されている。とりわけ大型車に対する規制値については特に厳しく、例えば加速走行騒音規制を例にとれば昭和46年度には92 [dB]であったものが、平成4年度には81 [dB]となっている¹⁾。大型車の騒音源の大部分はエンジンおよび排気系からのものであり、この両者で60%を占めている。このことから排気系に関する騒音軽減の研究は重要であることがうかがえる。これら騒音の音源はエンジン等による排気系の固体振動によるもの^{2) 3)}、排気管尾部の共鳴音⁴⁾、排気流の乱れ、渦・衝突等の気流音⁵⁾、脈動による衝撃波音^{6) 7) 8)}などの流体騒音によるものに分けられる。その消音対策として、固体振動によるものは防振要素²⁾やフレキシブルパイプ³⁾の使用などがあり、流体騒音によるものにはエキゾースト・マニホールドマフラー¹²⁾やマフラーの形状^{9) 10)}の改善などがその対策法とされている。騒音対策の基本は騒音源の振動を極力減少させることであるが、一端発生した騒音の除去法としては、干渉による消音、可聴音域外への振動数の変換などが考えられるが、現在のところはマフラー形状及び反射板などによる干渉効果、マフラー材質などによる防振効果などのパッシブな制御が主である。なお、自動車用マフラーのアクティブ制御に関する研究については現在のところそれほど進んでいない¹¹⁾。

流体と音響に関する出版物としては数多くあるが、音響場の解析法や、数値シミュレーションの研究例は極めて少ない。解析的な手法としては音波を平面波とし、流れの影響を無視した場合の4端子回路モデルを用いたシミュレーション手法がある^{12) 13)}。波動方程式の離散化による

数値シミュレーションとして境界要素法を用いて透過損失を求める方法がある^{14) 15) 16)}。これらの理論は種々の形状の消音器の性能の概要や傾向を知るうえではすぐれた方法といえるが、音波の干渉、回折、反射などの音波の伝播パターンを知るには適しているとはいえない。

そこで我々は波動を波面から生ずる二次波群の包絡面が伝播波面であると考えたホイヘンスの素波理論を用いて音響場の数値シミュレーションを求める方法を開発してきた。この方法によると干渉、回折、反射による音波の先頭波の波動パターンを比較的容易に知ることができるという利点がある。

消音器の設計には音響場内における音波の伝播パターンを知ることが重要である。本研究では最も簡単な単一空洞形マフラーについて、その内部の音波の伝播状況および透過損失に関して素波法による数値シミュレーションを行い、従来理論との比較を行いホイヘンスの素波法の妥当性を確かめることを目的としている。

2. 格子素波法

2. 1 ホイヘンスの素波法

音波が伝播する場の解析法として波動方程式を用い音響場を離散化して解く方法が種々提案されている。しかし、音波の先頭波の伝播、音圧の位相、境界壁での反射、スリット出口における回折などの現象のシミュレーションを得る方法としては適していない。

音響学において音波の干渉、回折、反射などの物理的な説明として、ホイヘンスの素波理論がうまく適応されることはよく知られている。ホイヘンスの素波理論は、ある時刻における波面が与えられるとき、その波面が伝播して新たに作る波面は初期波面上の無限点から発生する二次波（素波）が伝播したときの先頭波の包絡面で与えられるという理論である。本論文においては、ホイヘンスの素波の考え方を微小時間あるいは微小区間において、逐次波面を追跡する方法を用いる。

2. 2 格子法

格子法は数値計算において離散化された粒子の運動を追跡して流れ場を求めるような問題に適している。この方法は場全域を格子に区分し、その格子のメッシュ内で離散化粒子の物理量を平均値或いは按分値として記憶し運動及び場の情報を得るものである。代表的な格子法として、流れ場の計算における格子渦法がある^{17) 18) 19) 20)}。粘性流れにおいて、特に物体背後に剥離を伴うような場合に有効な手法である。境界層を渦に置き換え、物体から次々と流出させて、その離散化された渦を速度ベクトルとともに移動させて、全流出渦の軌跡を追跡し流れ場を求めるものである。この方法はナビエ・ストークスの方程式を使用しないで流れ場を求めるもので、差分法などと比較しても極めてよい一致を示している。この渦流れを追跡する場合、渦は物体から次々と発生するためその個数は膨大となる。このため記憶容量が増え、計算時間が長くなる。格子渦法はこの欠点を補うため見いだされた手法で、流れ場を格子状に分割し、その中に入った渦から、その誘導速度ベクトル、状態量を算出し全格子内に記憶させる。このため記憶数は有限個の格子数のみでよいわけである。計算精度を上げるためには格子数を増やすほど精度は良くなる。

しかし、格子内の任意位置の渦強度を按分法によって中央位置の値に換算することによって計算精度を上げられることが確かめられた。これより格子数を増やすことなく極めて精度の高い流れの場のシミュレーションを得ることができる。

ホイヘンスの素波は流れの速度ベクトルおよび音波の変動速度ベクトルによって移動するのであるが、このことは流れ場における渦糸の運動によく類似している。また、自動車マフラーのような境界壁で囲まれた音響場の数値シミュレーションについては格子法が非常に適している。従って、本研究ではこれらのことに着目し、素波理論と格子法を組み合わせた格子素波法を試みた。

2. 3 数値計算

- (1) 図 2. 1 は一般的な音響場境界、格子区分の一例及び記号説明を示している。音響場境界を物理座標 x , y で入力し、騒音の入口座標および出口座標を入力する。
- (2) 音響場境界内の格子を作成し、各格子座標を示す番地 i , j を設定する。
- (3) 音響場状態量の初期値を入力する。入口における初期騒音の強さ I 、素波の進行の微小時間 Δt 、音波の波長 λ 、音響場密度 ρ 、音速 c 、音響場境界壁での反射率 CR などである。

なお、音の強さ I は

$$I = p^2 / (\rho_0 c) \quad (2.1)$$

で表される。ここに p は音波の変動圧力、 ρ_0 は空気密度、 c は音速である。

- (4) 入口における入射騒音を素波で表す。素波個数 N 及び各素波面 ΔA_{0n} を入力する。
- (5) 各素波を $\Delta r = c \Delta t$ だけ進行させる。この進行は各素波について、音響場出口に達するか、或いは反射によって素波の音の強さが 0 になるまで繰り返し進行させる。従って進行後の素波の位置が境界内か外かを判断し、境界内であれば素波の位置を物理座標 $x_{m, n}$, $y_{m, n}$ で記憶させる。
- (6) 素波の位置から次ぎの素波面 $\Delta A_{m, n}$ を求める。素波面 $\Delta A_{m, n}$ および出力 $W_{m, n}$ から騒音強さ $I_{m, n}$ が得られ、これより算出される圧力 p を格子番地に記憶させる。ここでの記憶は以後の他の素波との干渉などのため重要である。なお、出力 $W = I \cdot A$ であるから、

$$I_{m, n} = W_{m, n} / \Delta A_{m, n} \quad (2.2)$$

となる。

- (7) 繰り返しループによって元に戻り、素波を進行させる。
- (8) 進行後の素波が音響場境界内か外かを判断させ、境界外であればそこが音響場出口なのか、境界壁を通過して外にでたのかを判断させる。出口であれば以後その素波は進行を停止する。境界壁であれば鏡面反射をさせる反射後の圧力 p_r は $CR = p_r / p_i$ (p_i は入射圧力) より求められ、音の強さ I が算出される。この I が 0 になれば素波は消滅し反射は終了したものとする。
- (9) I が 0 でなければ反射素波は境界内の素波として再び素波進行のループに入り、素波位置、素波面を算出し、圧力 p を格子 i , j に記憶させる。
- (10) 全素波が音響場出口に達するか、反射によって消滅するまで計算は繰り返される。計算

終了時には全格子に圧力値 p が記憶されており、これより境界内の音圧分布、SPL 分布、境界出口における音圧レベル等が算出され、透過損失 TL が算出される。

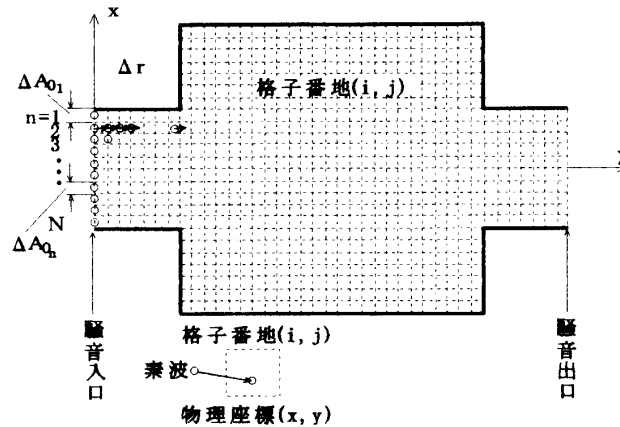


図2. 1 格子素波法における音響場境界と格子

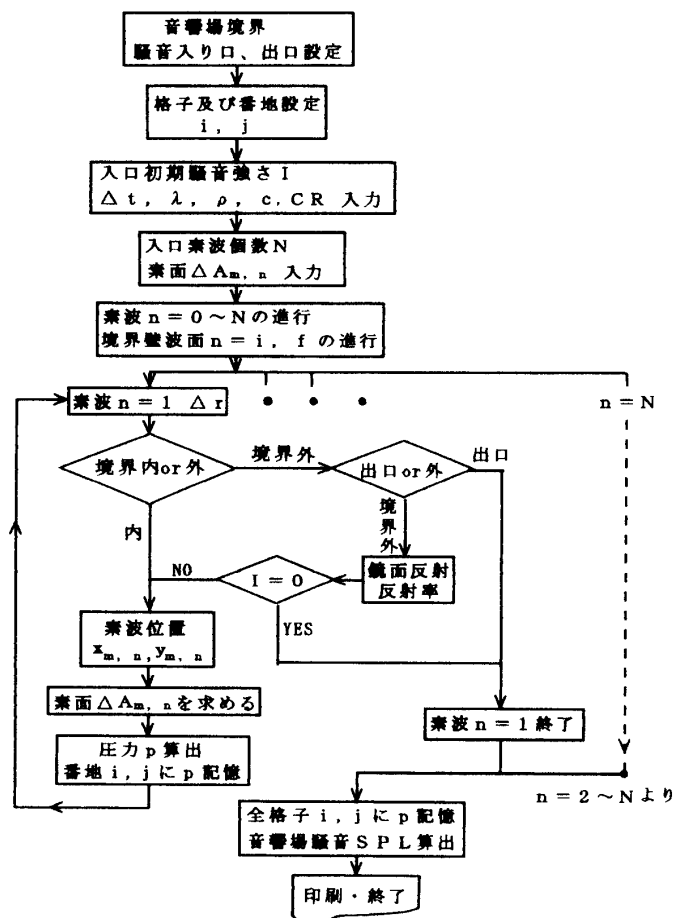


図 2. 2 格子素波法の流れ図

3. 単一空洞型マフラーの透過損失

3. 1 透過損失の数値シミュレーション

数値シミュレーションに用いられたマフラーは入口管から円筒状の拡大管を経て、出口管に排気される最も単純な単一空洞型マフラーである。入口管内径 $d_1 = 25 [\text{mm}]$ 、長さ $l_1 = 150 [\text{mm}]$ 、拡大管内径 $d_2 = 75 [\text{mm}]$ 、長さ $l_2 = 340 [\text{mm}]$ で、出口管は入口管と同一寸法である。

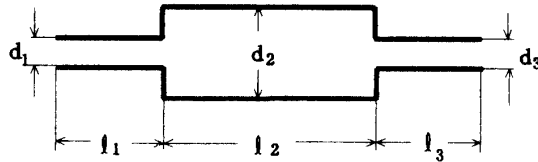


図3. 1 単一空洞型マフラー

透過損失 TL は次のように定義される。

$$TL[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{W_1}{W_3} \quad (3.1)$$

ここに W_1 は入射音の出力、 W_2 は透過音の出力である。

なお、本研究における格子素波法と従来から広く使用されている消音器理論とを比較するため、福田ら²⁴⁾ による膨張型1段空洞の消音器理論を用いる。この理論は入射音が空洞部で膨張したとき、その出力は保存され、一部は透過して出口へ向かうが、他の一部は拡大管端で反射し消音される。なお、出口管からの反射は無いものとする。このとき式(3.1)は

$$TL = 10 \cdot \log \left[1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2(k l_2) \right] \quad (3.2)$$

となる。 m は拡大管面積比で $m = (d_2 / d_1)^2$ で与えられる。また $k = 2\pi f / c$ で、ここに f は周波数、 c は音速である。

計算に用いた諸量は以下の通りである。音速 $c = 340 [\text{m/s}]$ 、拡大管側壁での反射率 $CR_x = 0.5$ 、拡大管端面での反射率 $CR_y = 1.0$ 、入口管／拡大管の面積比 $m = 9$ 、拡大管入口での素波数 $N = 19$ 、周波数 $f = 50 \sim 10,000 [\text{Hz}]$ の範囲で計算を行った。

格子素波法による周波数 f に対する透過損失 TL の数値シミュレーション結果を図3. 2に示す。実線は格子素波法による結果であり、点線は既存の消音器理論式(3.2)をプロットしたものである。

消音器理論および格子素波理論とも非常によく一致している。 $500 [\text{Hz}]$ 、 $1000 [\text{Hz}]$ 、 $1500 [\text{Hz}]$ 、 $2000 [\text{Hz}]$ 等 $500 [\text{Hz}]$ 間隔で透過損失 TL が0になっているのは、長さ 340 mm の拡大管

内で音波が共鳴して消音されずに出口から放射されるからである。一方、250[Hz]、750[Hz]、1250[Hz]等においては干渉によって打ち消しあい透過損失は最大となる。低周波領域では消音器理論に比して格子素波法の値が大きくなっており、高周波領域ではその逆に消音器理論の値が大きくなっていることが分かる。別の見方をすれば、消音器理論における最高値は周波数によって変わらず同じ値を示している。これに対し、格子素波法では周波数が低くなるに従い透過損失が大きくなる。即ち、よく消音されていることを示している。このことは音の回折現象が低周波数で顕著になることと一致しており、回折によって広がった音波が拡大管壁で吸収され、消音効果が大きくなったことを意味する。このように格子素波法は回折現象を含めて音響場のシミュレーションを行っていることが大きな特徴であるといえる。

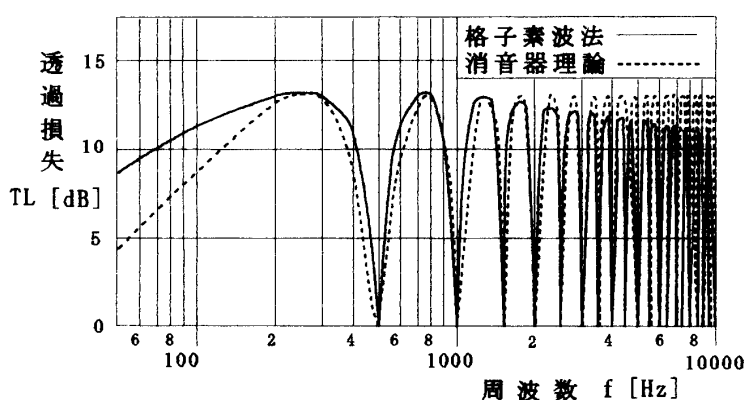


図3. 2 単一空洞型マフラーの透過損失

3. 2 音波伝播の数値シミュレーション

拡大管内を伝播する音波波面の可視化シミュレーションを行う。計算に使用するマフラーは前項と同一寸法である。また、計算条件も前項と同様である。図3. 3にマフラー内の音波の伝播状況を示す。素波が拡大管入口から放射される時刻を $t = 0$ とし、その後の時間経過は次の通りである。

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| (a) 図: $t = 1 \times 0.001/16$ [s] | (b) 図: $t = 2 \times 0.001/16$ [s] |
| (c) 図: $t = 4 \times 0.001/16$ [s] | (d) 図: $t = 6 \times 0.001/16$ [s] |
| (e) 図: $t = 8 \times 0.001/16$ [s] | (f) 図: $t = 10 \times 0.001/16$ [s] |
| (g) 図: $t = 12 \times 0.001/16$ [s] | (h) 図: $t = 14 \times 0.001/16$ [s] |
| (i) 図: $t = 16 \times 0.001/16$ [s] | (j) 図: $t = 18 \times 0.001/16$ [s] |

拡大管長さは0.34[m]で、音速は340[m/s]であるから (i) 図 $t = 0.001$ [s] で音波は管端に達し、その後は反射を繰り返す。

(a) 図は入口管から出た素波が球面状に回折して広がっている。(b) 図で拡大管側壁に到達し反射している様子が表されている。(c)、(d) で球面が徐々に平面波に移って行く様子がわかる。(e) から (h) で先頭波は殆ど平面波になり、また側面での反射波は反射率の影響で

次第にその音圧を減少していく。(i)で先頭波は管端に達し、(j)図から反射波(黒丸)となる。なお、格子素波法では各点における波面の音圧、位相が各時刻について番地(i, j)に記憶されているので、各点での透過損失だけでなく、音波の干渉状況が把握できる。

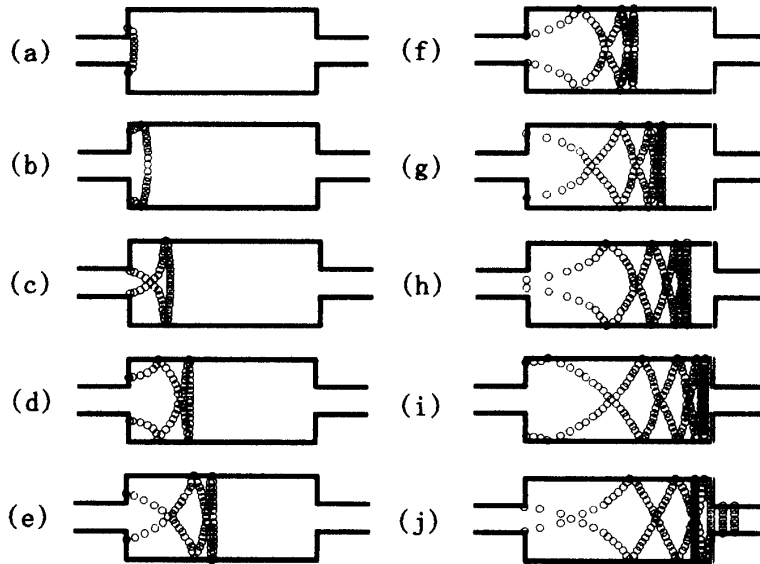


図 3. 3 マフラー内の音波の伝播

4. 結 言

本論文では騒音に関する基本的な問題を根本から研究することを目的としたものである。従って、騒音の低減を直接取り扱うものではなく、騒音の実体を把握することによって、今後の騒音低減のための重要な知見を得ようとするものである。

従来、音響場の解析手法としては平面波を用いることが多かった。これは一次元的な近似手法であって、自動車用消音器のように複雑な形状の三次元的なものへの応用には限界がある。従って、大局的に傾向を見る上では有効であるが、音響場の根本的解明にはならない。また、将来有望視されるアクティブ制御においても、現在までは平面波近似のもとに解析され、応用が行われているが、実際の複雑な音響場において制御を行う場合には、音響場内の音波パターンを正確に把握しなければならない。

以上のように音響場の解明を正確に行うためには音波を三次元的に取り扱わねばならない。三次元波動方程式を複雑な境界条件のもとに解くことは今のところ困難である。また、将来有望視されるアクティブ制御においても、現在までは平面波近似のもとに解析され、応用が行われているが、実際の複雑な音響場において制御を行う場合には、音響場内の音波パターンを正確に把握しなければならない。三次元の音波の伝播の算出法として、ホイヘンスの素波の考えを用いることは非常に有望な手段である。特にコンピューターによる数値シミュレーションによって音響場の音波パターンを知るには最適の手段であるといえる。

本研究では素波の原理を用いて、音響場全域を格子に区分けし、素波の位置及び状態量を各格子上で記憶させる格子素波法を開発研究した。コンピューター計算を簡単にするため消音器形状を

対称形とした。格子素波法による透過損失の数値シミュレーションの結果と従来自動車消音器に広く用いられている理論解析法による結果は非常に良く一致しており、本格子素波法が消音器の音響場解明に有効であることが明らかとなった。

また本研究では最も簡単な単一空洞形消音器内部の音波の伝播状況の数値シミュレーションを行い、消音器音響場における音波の状態量の可視化が可能なことを示した。さらに音響の先頭波の進行状況のシミュレーションを求め、今後の消音器研究のための考察に有効な手段となることを確認した。

参考文献

1. 環境庁大気保全局、自動車環境対策第1課、自動車環境対策第2課：「日本の自動車環境対策」、1999.4
2. 平野、戸井田、斉藤、稲川、中村：「大形車の排気騒音低減に関する研究」、三菱重工技報、Vol.14, No.4, 1977,65-73
3. 有田、太田、中野、栗生、入江：「大型トラックの排気騒音低減に関する研究」、三菱重工技報、Vol.20, No.1, 1983,1-9
4. 板垣、本多、二宮、小林：「自動車の消音器で発生する流体騒音の解析」、自動車技術会学術講演会前刷集 912, 1991,1.9-1.12
5. 宰若、中島、桑村：「消音器内で発生する気流音について」、日野技報、No.33, Mar.1984,78-73
6. 東山、岩本：「脈動流により誘起される管端部下流における排気騒音の実験的研究」、自動車技術会、学術講演会前刷集 974, 1997, 209-212
7. 松村修二：「排気管内の衝撃波の生成とそれに誘起される排気騒音の解析」、自動車技術会、学術講演会前刷集 924, 1992,49-52
8. 木村、石浜、戸田：「排気管系脈動の解析について」、自動車技術会、1977,771-776
9. 細見、小川、今川、外園：「エキゾーストマニホールドマフラの開発」、自動車技術会学術講演会前刷集 924, 1992,45-48
10. 小嶋、中村、福田：「気流を伴う消音器に関する研究」、日本機械学会論文集B編、Vol.53, No.486, 1987,623-629
11. 大沼、小沼、杉村、西村：「ディーゼルエンジン排気音のアクティブコントロール」、三菱重工技報、Vol.30, No.4, 1993,361-364
12. 福田基一：「消音器の理論」、内燃機関 10 巻 113 号、1971.8,74-80
13. 福田基一：「騒音総論」、日本機械学会第 649 回講習会、1987,1-16
14. 境界要素法研究会編：「境界要素法の理論と応用」、コロナ社、1986
15. 田中俊光、藤川猛、阿部亨、宇津野秀夫：「境界要素法による二次元音場の解析（消音器モデルへの適用）」、日本機械学会論文集C編、Vol.50, No.453, 1984, pp.848-857
16. 田中俊光、宇津野秀夫、増田輝男、神崎奈津夫：「境界要素法による音場の解析（第3報、三次元音場の伝達マックス形解法と大型脈動音消音器への適用）」、日本機械学会論文集C編、Vol.53, No.491, 1987, pp.1443-1449
17. 葛原、木村、盧：「渦糸近似法における非定常力および力の計算」、日本航空宇宙学会誌、Vol.36, No.417, 1988,473-479
18. 葛原、木村、王：「Vortex in Cell 法による回転円柱周りの流れ」、日本航空宇宙学会誌、Vol.42, No.481, 1994,116-124
19. 葛原、木村、小川、細川：「格子渦法による粘性流の解析に関する研究」、日本機械学会論文集B編、Vol.63, No.614, 1997,3209-3215
20. 葛原、木村、小川、細川：「格子渦法における粘性拡散に関する研究」、日本機械学会論文集B編、Vol.64, No.619, 1998,670-676

(平成13年12月5日受理)