

## 2D9 液滴による音の減衰に関する研究

○清水 太郎、堤 誠司、高木 亮治（宇宙航空研究開発機構）

Study on Attenuation of Sound by Droplets

Taro Shimizu, Seiji Tsutsumi and Ryoji Takaki (JAXA)

Key Words: Wave, Multi-phase Flow, Fluid Dynamics

### Abstract

Attenuation of sound by droplets is analytically investigated. The scattering and absorption are considered as an attenuation mechanism. It is found that the absorption is superior to the scattering for fine droplets, such as fog or mist. Comparing with the experiment, the present analysis agrees well in the range of frequency where the assumptions are valid.

### 1. はじめに

ロケットエンジンから発生する空力的なノイズは、一般にジェットノイズと呼ばれる。亜音速では乱流ノイズが主な要因とされ<sup>1)</sup>、超音速では更に、screech<sup>2)</sup>やマッハ波的なノイズが加わり、古くから理論的・実験的に多くの研究がなされている。ロケットエンジンでは、固体・液体燃料エンジンを問わず、ノズルとそこから発生する噴流構造を持ち、その結果発生したジェットノイズは下流への指向性が強いものが支配的であると考えられている。しかし、特に打ち上げ時にノズル下方に地面があることで、様々な周波数のノイズが上方へと反射し、ロケット本体が受けるノイズパワーが最大になる。日本のロケットにおいても、近年クラスタ化など、これらの音源を増大させる要因を含む設計がなされており、ノイズパワーの増大が懸念されている。そのため、現在以下のような対策がなされている。

- ・ノズル下流に煙道を設置
- ・ノズル噴流や煙道内に散水をする

ノズルから出た噴流は、地中に設置された煙道を通して遠くの海上へと導かれる。つまり、ノズル

直下にある煙道の入口部は、ガスの通ることのできる穴となっており、噴流と物体の干渉によって発生する音を抑制し、また音の反射自体も防ぐと考えられている。一方散水によって、まずノイズ源となるジェットのパワーを水と衝突させることで減ずること（相互作用で、ジェットの運動量やエネルギーが減少）と、もう一つは、発生してしまった音が液滴と干渉することで減衰することが期待されている。しかし、現実的には、それぞれの効果の寄与については、定量的に十分理解されていない。そのため、JAXA では、メーカーや大学等と共同で音源の特定や効果的な減衰手法を確立するため、実機データや基礎試験、CFD などを利用し、解明を進めている。



第1図. H-IIA ロケット打ち上げの様子  
ノズルから発生する噴流が大きなノイズ発生源となっている

本研究の目的は、これまでに説明した要因のうち、ジェットノイズとして発生した音が液滴群によりどのように減衰するのかについて、理論的に効果の表式を整理・導出することと、基礎試験と比較しその有効性を評価することである。

## 2. 散乱と吸収の効果

音の液滴群による減衰の要因は、以下の2つが考えられる。それぞれについて詳しく説明する。

- ・液滴による音場の散乱効果<sup>3)</sup>
- ・音場から液滴への運動量、熱の移動及び、液滴の蒸発潜熱による吸収効果<sup>4,5)</sup>

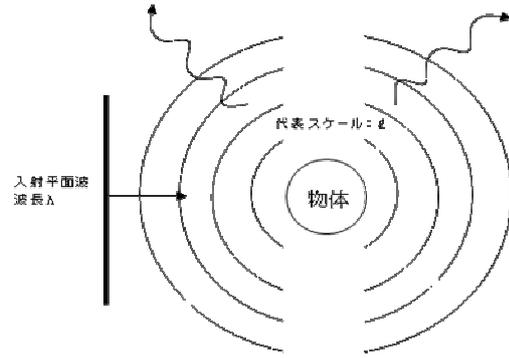
注) ここで議論する吸収の効果は音場エネルギーに対するもので、ジェットのパワーを減ずる効果ではない。

### 2.1 散乱の効果

散乱とは、気相中の物体（密度差のある場合を含む）の存在によって、気相を伝播してきた入射音波の一部が進行方向を変えることである（第2図）。その結果、音の減衰をもたらす。散乱は、物体の表面の形状にも依存する。そのため、多数の液滴の散乱を数値計算で解くには一般に困難を伴う。文献[3]では、1つの球に対する遠方場での散乱の効果が、散乱断面積 $\sigma$ （入射波の時間平均エネルギー流束密度に対する全散乱強度；面積の次元をもつ）で与えられている。他にもトーラス（ドーナツ）形状の散乱断面積も知られている<sup>6)</sup>。物体のスケールに対して散乱される音波の波長が長い場合、全散乱断面積は以下となる。

$$\sigma = \frac{4\pi\omega^4 R^6}{9a^4} \left\{ \left(1 - \frac{a^2 \rho_0}{a_p^2 \rho_{p0}}\right)^2 + 3 \frac{(\rho_{p0} - \rho_0)^2}{(2\rho_{p0} + \rho_0)^2} \right\} .$$

ここで $\omega$ は角周波数、 $R$ は球の半径、 $a$ は気相の音速、 $a_p$ は液相の音速、 $\rho_0$ は気相の密度、 $\rho_{p0}$ は液相の密度である。 $\omega$ の4乗に比例するのは、光のレイリー散乱と類似性がある。一方、これとは逆に波長が物体スケールに対して短い、短波長の極限では散乱は単に表面からの反射と非常に小さな



第2図. 散乱の模式図.

角度から回折される効果（バビネの定理）の和となり、1つの球に対する全散乱断面積は幾何学的な断面積を $S$ として、以下のように与えられる。

$$\sigma = 2S = 2\pi R^2$$

波長と周波数の関係がより一般的な場合は、さらに複雑な表式となるが、ここでは省略する。

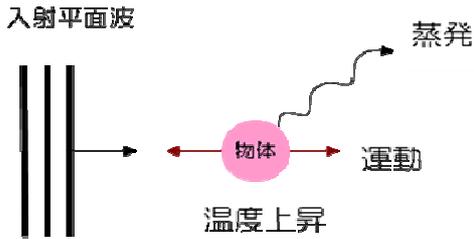
続いて、多数の球形の液滴が存在した場合の効果を見積もる。液滴群の数密度は気体分子数密度に比べて遥かに小さく、多重散乱の影響は小さいと考えられるため、ここでは2回の散乱までを考慮した不等式で評価する。散乱量の最大値は1度目の散乱に関わる全ての液滴の散乱断面積分が失われるとして評価した。最小値は平均場的な考えで、同様の散乱がもう1度起こり、その結果、2度散乱された音もとの方向に戻るとした。その結果以下が導かれる。

$$n_s \sigma - (n_s \sigma)^2 < \text{(期待される散乱量の割合)} < n_s \sigma$$

ここで、 $n_s$ は液滴群の面数密度である。実際は、光の散乱でよく知られる Lambert-Beer の法則に基づき、実験的に散乱による減衰の比例定数を求める必要がある。上式は Lambert-Beer の法則と同様、 $n_s \sigma$ が小さい範囲でのみ有効である。以上で液滴群の評価の準備ができた。

### 2.2 吸収の効果

前述の通り、吸収の効果は音波が入射することで、液滴の運動や、温度変化をもたらす、また液滴が気相へと蒸発することによる（第3図）。



第3図.吸収の効果の模式図

以下に導出の流れを示す<sup>5)</sup>。

- ・各相に対して支配方程式を記述する
- ・気相と液相とは、質量、運動量、エネルギーのやり取りをする
- ・Clausius - Clapeyron の関係式による蒸気圧（質量の移動）の見積もりや Stokes の抵抗則（球形を仮定した時）等のモデリングを行う
- ・長波長近似をし、多数の液滴の取り扱いを平均量として考慮する
- ・音波の変動が小さいことによる線形化
- ・周期振動解を仮定し微分方程式を代数方程式にする。解の存在を仮定、行列式をゼロとし、減衰・分散の係数を求める<sup>\*1</sup>

音波に対しては、すべての変動量は以下のような周期解を考慮すればよい。

$$\exp i(Kx/a - \omega t)$$

ただし、 $K$  は複素波数であり、

$$K = k_1 + ik_2$$

単位長さ当たりの減衰は、

$$\alpha = 2k_2 / a$$

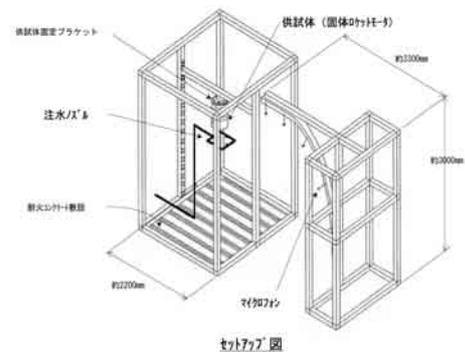
で与えられる。

上記は低周波音（数十 Hz）に対する空気中の水滴や、それより少し高い周波数に対する空気中のアルミナ粒子での検証例がある。ここではより広い周波数に対して適用してみる。

### 3. 基礎試験との比較

実機では様々な要因が混在するため、それぞれの寄与を独立に評価することは困難である。ここ

では、サブスケールの固体ロケットモータを用いた基礎試験の結果<sup>7)</sup>を用いて、液滴群による音の減音効果のみの評価を実施する。第4図は供試ノズルを含む計測系全体を示す。第5図は実際の試験中の様子であり、噴射ジェットにより水滴群が供試ノズルを取り巻いていることが見て取れる。第2項で示した表式により音の低減量の推算を行う。考える系は、水滴－水蒸気－空気とし、物性値は全て標準状態とした。その他に必要なパラメータとしては、まず数密度に関連し、液滴の気相に対する体積率については、雲や霧で典型的な値の  $k_v=0.01$  とした。次に液滴の半径については、実験で発生した噴霧の様子を観察すると、地面への沈降速度が非常に小さいことから、雲を形成する液滴径程度(1 ミクロン)と考え、その前後の半径を調べることにした。また、噴霧領域の厚さについても、実験では大気中に広がりを持つなど不明確であるが、ここでは試験のビデオ画像から供試体のスケールと同じ約 2m として評価を実施した。



第4図.試験供試体の概要（文献7より引用）



第5図.試験の様子（文献7より引用）

\*1 文献[5]には、最終結果の表記に間違いがある。

### 3.1 散乱効果の評価

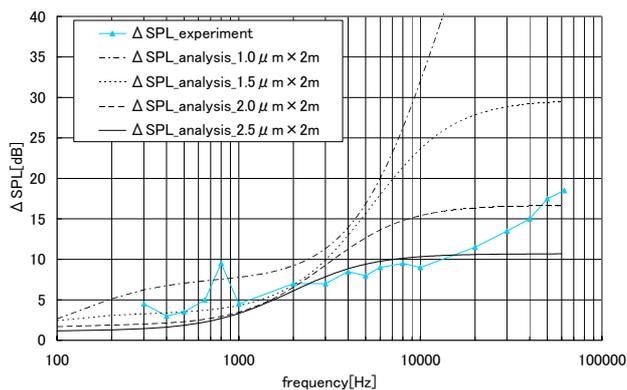
散乱の効果については、詳しい計算の結果、試験で計測されていない超高周波域を除くと非常に小さいことが分かった。これは散乱断面積の表式に液滴半径のべき乗に比例する項が含まれているため、液滴半径が数ミクロン程度と非常に小さい場合には、ほとんど無視できる程度の影響しか現れない。そのため、以下では 3.2 項の吸収の効果と実験結果を比較することにする。ただし、液滴のサイズが大きくなると、散乱の影響が顕著になってくる。

### 3.2 吸収効果の評価

吸収の効果について、第 6 図に実験と理論的に求めた低減量を SPL (sound pressure level) の変化量で比較した結果を示す。図中には計測結果と、液滴半径を 1~2.5 ミクロンの範囲で算出した結果を示した。これを見ると、液滴半径が 2.5 ミクロンの時が低周波から中周波領域 (~10000Hz) でまずまずの一致を示すことがわかる。一方、更に高周波になるに従い、特に大きな液滴径ほど低減効果の飽和が早く現れ、実験とのずれが大きくなっていく。この要因としては、理論的な表式の導出過程で用いた近似が破たんしていることや、液滴分布が未考慮であることなどが挙げられる(第 6 図から、小さな液滴が含まれると、高周波での吸収も大きくなると推察される)。吸収の効果に対して、理論的な扱いでは、液滴分布の影響が非線形となることから、導出は容易ではなく、今後の課題である。しかし、ここで適用した評価式で、実用上問題となる低~中周波数域で、ある程度低減量が予測できることが明らかになった。

## 4. まとめ

ロケット打ち上げ時のノイズパワー低減のため導入されている対策のうち、散水による音響低減効果の評価した。基礎試験で発生した小さな液滴群に対しては、吸収の効果が支配的であることが分かり、理論的な予測が有効であることを示した。条件毎に計算が必要な CFD によるアプローチに対し、理論解は適用範囲に制約があるものの、設計に対して有用な知見を



第 6 図. 周波数による平面音波の低減量 ( $\Delta$ SPL)

与えることができる。今後、より正確な試験条件で実施された計測結果と比較する予定である。

実機では、今回考察したミスト状の液滴よりも大きな液滴が発生している可能性もある。その場合には散乱の効果が顕著に表れてくると考えられる。低減量の正確な評価のためには、実機環境での液滴分布などの知見も不可欠である。

### 参考文献

- 1) Lighthill M. J., "Jet noise," AIAA J. 1, pp1507-1517, 1963.
- 2) Powell A., "On the mechanism of choked jet noise," Proc. Phys. Soc. London Sect. B 66, pp1039-1056, 1953.
- 3) Landau, L. D., Lifshitz, E. M., *Fluid Mechanics*, Section 78, Pergamon Press, New York, 1987.
- 4) Temkin S. and Dobbins, R. A., "Attenuation and Dispersion of Sound by Particulate-Relaxation Processes," J.A.S.A., Vol. 40, No. 2, pp317-324, 1966.
- 5) Marble F. E., "Some Gasdynamic Problems in the Flow of Condensing Vapors," *Astronautica Acta.*, Vol. 14, pp585-614, 1969.
- 6) Shimizu T., Watanabe Y. and Kambe T., "Scattered Waves Generated by Shock Wave and Vortex Ring Interaction," *Fluid Dynamics Research* 27, pp65-90, 2000.
- 7) 有田誠, 他, "水注入による高温超音速ジェット騒音の低減に関する実験," 流力騒音シンポジウム 2003.