

乱流燃焼場からの音の発生機構とその予測

東京工業大学 宮内敏雄, 店橋護

1. はじめに

高効率・低環境負荷ガスタービン燃焼器の開発において、希薄予混合燃焼の際に生じる振動燃焼や燃焼騒音等を予測し、制御することが重要となる。本研究では、乱流燃焼の直接数値計算を行い、乱流燃焼場からの音の発生機構を解明し、それらを予測可能な音響学的モデルを開発することを目的としている。本年度は、一段階不可逆反応の場合について二次元時間発展反応性圧縮性混合層のDNSを行い、音の発生機構に対する発熱の影響を明らかにするとともに、音響学的アナロジーに基づく予測手法を評価した。

2. 反応性混合層における音の発生機構

本研究では、一段階不可逆反応($A+B \rightarrow 2P$)の場合について、反応性圧縮性混合層の直接数値計算を行い、せん断層からの音の発生機構に対する熱発生の影響を検討した。非反応性混合層と同様に、大規模渦の roll-up 過程では、比較的高い周波数の圧力変動がせん断層から発生しており、大規模渦の合体過程では、大きな振幅を持つ圧力変動が生じている。しかし、反応性混合層の場合、圧力変動は非反応性の場合に比べて大きくなり、圧力変動の最大値は非反応性の場合の約4倍となる。

音響学的アナロジーとして、Lighthill⁽¹⁾は連続の式と運動量保存式から、次のような斉次音響波動方程式を導いた。

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{1}{M^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (1)$$

ここで、 T_{ij} はLighthillの乱流応力テンソル

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \frac{1}{M^2} \delta_{ij} \left(\frac{1}{\gamma} p - \rho \right) - \frac{1}{\text{Re}} \tau_{ij} \quad (2)$$

である。右辺の第一項はReynolds stress成分、第二項はエントロピー成分、第三項は粘性成分である。本研究では、それぞれの成分を T_R 、 T_E 、 T_V とし、DNS結果を用いて各音源項の大きさを比較した。著者らの以前の研究⁽²⁾において、非反応性混合層の場合には渦運動に起因するReynolds stress成分が主要な音源であることを明らかにした。反応性混合層の場合、音源項のエントロピー成分が他の二成分よりも非常に大きな値を有しており、化学反応に伴う発熱によるエントロピーの変化が主音源となっている。音源項のエントロピー成分はroll-upした大規模渦が合体する期間にピークを示す。

Powell⁽³⁾は渦運動によって音が発生するという機構を提案し、次のような音響波動方程式を導いた。

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{1}{M^2} \nabla^2 \rho' = \nabla \cdot (\rho \omega \times \mathbf{u}) \quad (3)$$

この式は音の発生に対する渦の役割を表わしている。本研究ではLighthillのアナロジー(式(1))、Powellのアナロジー(式(3))を用いて予測した圧力変動とDNSの結果の比較を行った。音響学的アナロジーを用いて遠方音場を予測する場合、予測結果は予測の際に設定する音源領域の大きさに大きく影響される。音源領域の大きさが小さい場合、DNSの結果と比べて、Lighthillのアナロジーによって予測される圧力変動は非常に大きな値を示し、Powellのアナロジーによる予測は小さな圧力変動を示す。これに対して、音源領域の大きさを十分確保した場合、Powellのアナロジーによって予測される圧力変動はDNSの結果より小さいが、Lighthillのアナロジーによる圧力変動はDNS

の結果と良く一致する。ただし、非反応性の場合、Powellのアナロジーは音源領域を小さく設定してもDNSの結果を良く予測する。これらのことから、音響学アナロジーを用いて遠方場の圧力変動を予測する場合、音源領域の大きさが非常に重要なパラメータであることが明らかとなった。

Lighthillの音源項のエントロピー成分はReynolds stress成分よりも非常に大きい。したがって、エントロピー成分が、音の発生に対して重要な役割を果たすことが予測される。そこで、Powellの音源項とエントロピー成分からなる以下のような音響学的アナロジーを考える。

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{1}{M^2} \nabla^2 \rho' = \nabla \cdot (\rho \omega \times \mathbf{u}) + T_E \quad (4)$$

図1は本研究で提案したアナロジー(式(4))を用いて予測した圧力変動の時間変化とDNSの結果を示している。音源領域の大きさに関わらず、新たに提案したアナロジーによって予測される圧力変動はDNSの結果と良く一致している。

3. まとめ

本研究では、反応性混合層のDNSと音響学的アナロジーによる音場の予測を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 化学反応に伴う発熱がある場合、反応性混合層から発生する音は発熱がない場合よりも非常に大きい。この際、Lighthillの音源項のエントロピー成分が支配的であり、Reynolds stress成分と粘性成分の寄与は小さい。
- (2) 音源領域が小さい場合、LighthillのアナロジーはDNSの結果よりも非常に大きな圧力変動を、Powellのアナロジーは小さな圧力変動を予測するが、音源領域を大きく設定した場合、Lighthillのアナロジーによって予測される圧力変動はDNSの結果と良く一致する。
- (3) Powellの音源項とエントロピー成分から成る音響波動方程式を提案した。この方程式は音源領域の大きさに依存せず、遠方場の圧力変動を良く予測できる。

今後、上述の研究を二次元から三次元に拡張するとともに、詳細化学反応機構等を考慮に入れていく予定である。

参考文献

- 1) M. J. Lighthill, Proc. R. Soc. Lond., A 211(1952), 564.
- 2) 李・店橋・宮内, 日本機械学会論文集印刷中, (2000).
- 3) A. Powell, J. Acoust. Soc. Am., 36 (1964), 177.

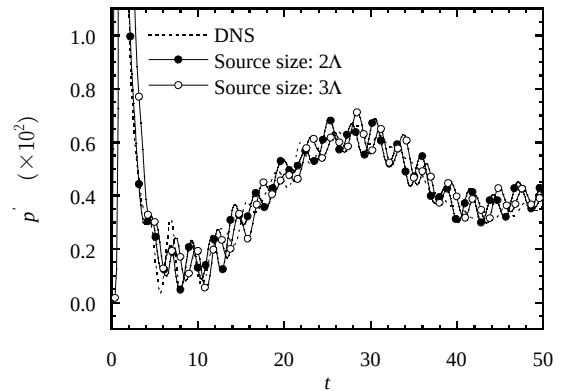


図1 本研究で提案したモデルによる圧力場の予測