

JAXA事務棟1号館 講堂 平成22年11月26日

ソニックブーム長距離非線形伝播 CFD解析ツールの開発の進捗状況

酒井武治
名古屋大学

内容

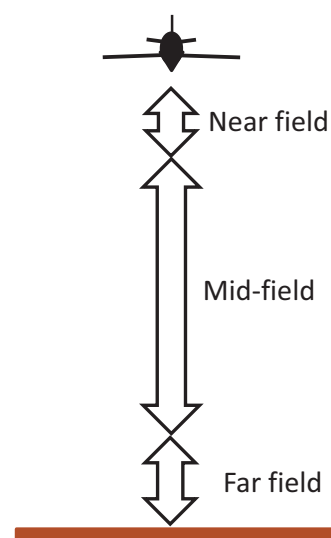
- ・本研究の位置づけとこれまでの成果
- ・詳細振動励起反応過程を組み込んだCFD法の開発
- ・初期平面衝撃波が分散される過程のシミュレーション
- ・まとめ

静粛超音速機技術の研究開発に おける本研究のターゲット

・中間場でのソニックブームの伝播過程の 正確な評価

- 近傍場圧力波形の詳しい情報が
予測できる
- 遠方場での大気乱流の影響を
明らかにしたい

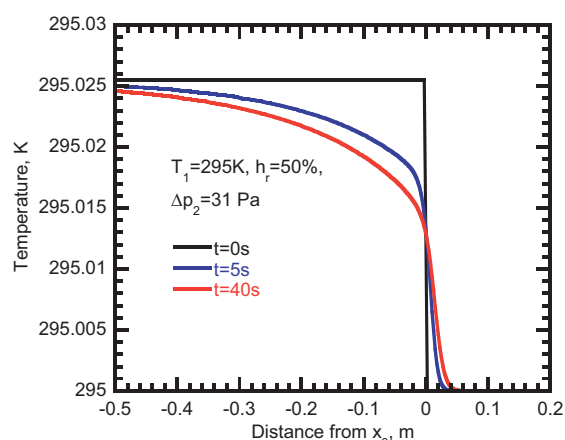
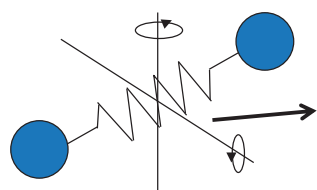
・他のブーム伝播解析コードにおける 分子振動緩和モデルの検証



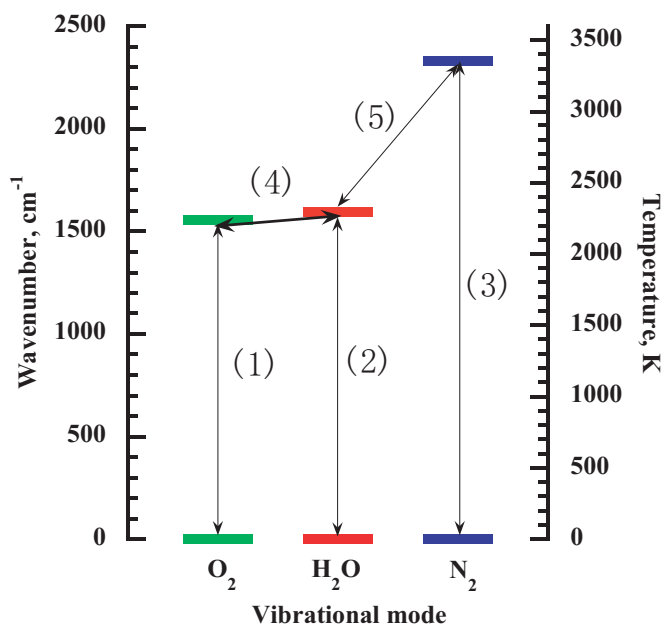
振動エネルギー緩和過程を考慮した 1次元圧縮性粘性流れ場コードの開発 (FY21-)

- 並進-回転モードと振動モードのエネルギー交換過程をモデル化し計算
- $a_e < u_s < a_f$ での波の分散特性を開発したCFDで調べ厳密解と良好な一致
- 球面衝撃波伝播問題での実験を程よく再現
- バーガス方程式による計算結果(山本ら, 2010)とよく一致

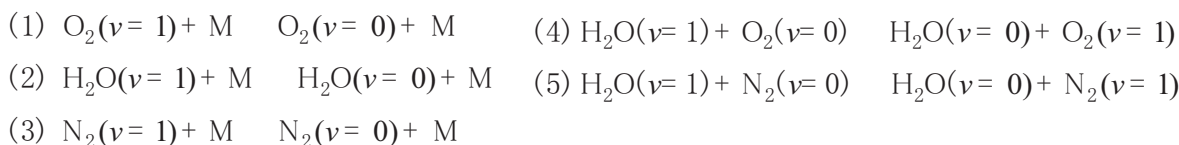
並進・回転・振動モード



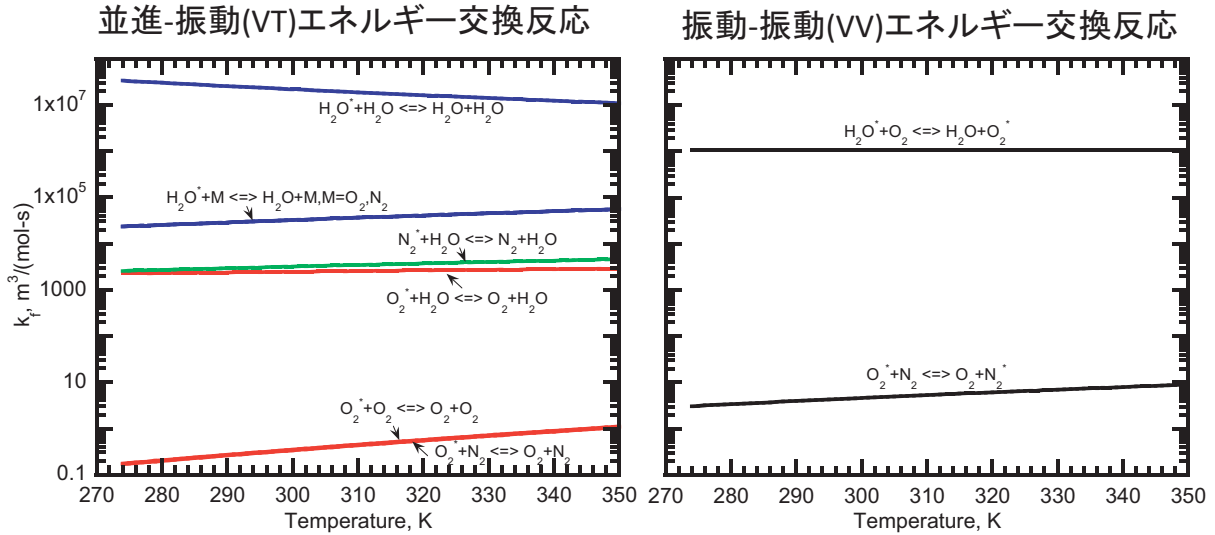
分子の振動エネルギー準位と遷移



- 並進-振動エネルギー、振動-振動エネルギー交換反応が寄与



振動励起反応レート(Bass, 1980)



- 空気化学種の振動励起反応は水分子の寄与が大きい
 - 水分子のVT反応速度は高い
 - 水分子-酸素分子VV反応速度が高い
 - 衝撃波背後ではH₂O励起→O₂励起→→N₂励起

目的

- 長い距離を伝播する衝撃波の分散特性に振動-振動エネルギー交換過程がどの程度影響するか明らかにする

- 水蒸気を理想気体として含む空気混合気体に対し、基底・第一励起準位間の振動励起反応過程を含めたCFDコードの構築

計算方法(Present model)

•1次元オイラー方程式

- 化学種質量・運動量・全エネルギー保存式
- $O_2(v=1)$, $N_2(v=1)$, $H_2O(v=1)$ の質量保存
- 9振動励起反応
- 詳細釣り合い条件から逆反応レートを評価
- 各化学種の質量分率と元素種の保存関係から
基底状態($v=0$)の化学種密度を求める
- 移動格子有限体積法
- AUSM-DVスキーム、MUSCL法
- 2段階ルンゲクッタ法
- 飽和蒸気圧・温度・相対湿度から絶対湿度を求める

計算方法(Sakai 2009 model)

- 質量・運動量・全エネルギー・振動エネルギー保存式
- Landau-Teller型振動緩和式(振動緩和時間はBassら(1995))

$$\frac{de_{v_i}}{dt} = \frac{e_{v_i}^*(T) - e_{v_i}(T_{v_i})}{\tau_i}, \quad e_{v_i}(T) = \frac{R\theta_{v_i}}{\exp(\theta_{v_i}/T) - 1}$$

$$\frac{1}{\tau_{O_2}} = \frac{2\pi p}{p_{ref}} \left\{ \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \left[9 + 28000h \exp \left(4.17 \left\{ \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \right) \right] \right\}$$

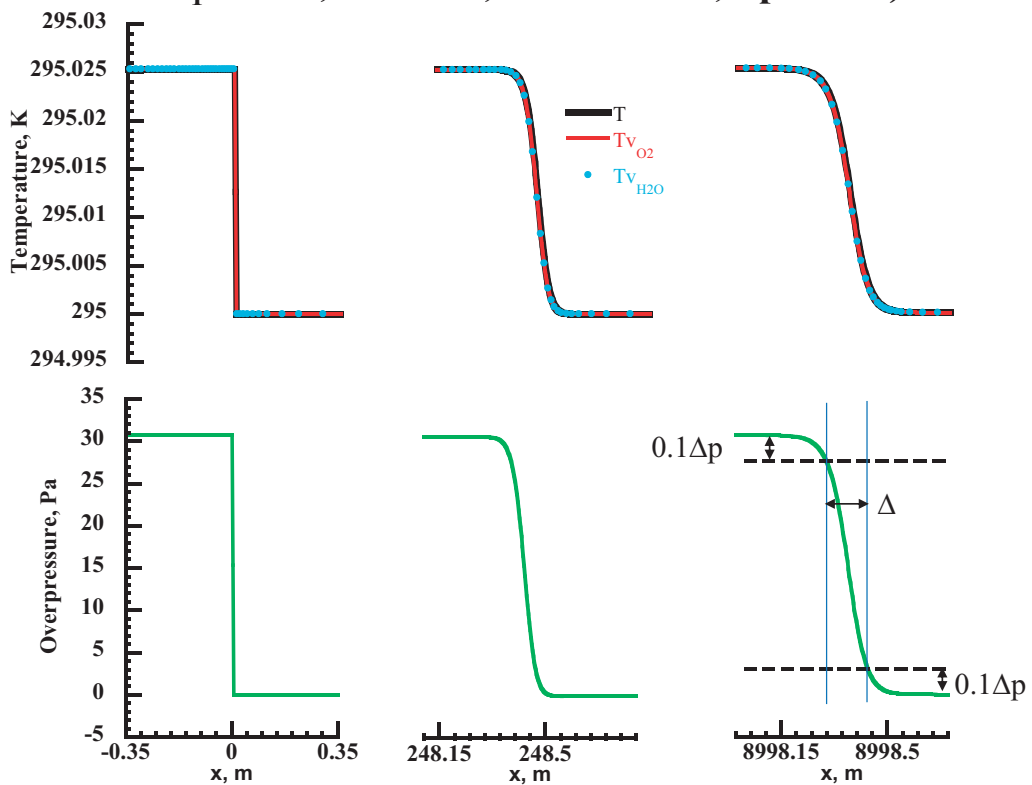
$$\frac{1}{\tau_{N_2}} = \frac{2\pi p}{p_{ref}} \left\{ 24 + 4040000h \frac{0.02 + 100h}{0.391 + 100h} \right\}$$

h : 絶対湿度%

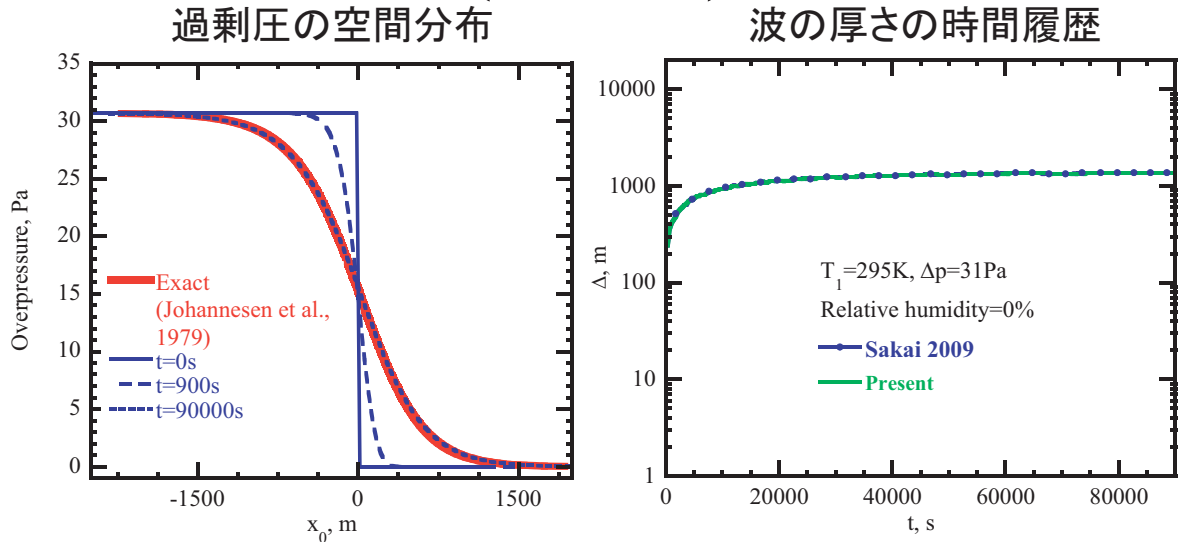
p_{ref} , T_{ref} : 標準状態での圧力と温度

O₂+H₂O混合気

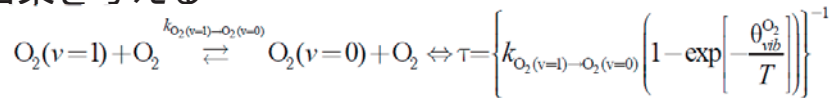
波が十分に分散される条件での計算結果
 ($T_1=295\text{K}$, $hr=50\%$, $Me=1.00013$, $\Delta p=31\text{Pa}$)



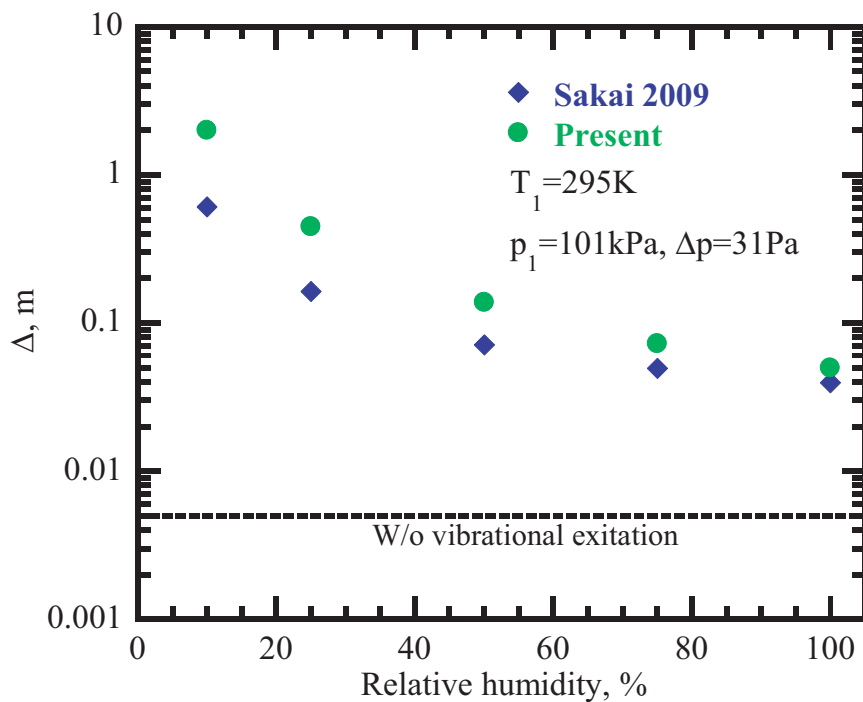
首尾一貫した条件での両モデルの計算結果 (100% O₂)



•同一の振動励起過程を二つのモデルを使って計算しても
同じ結果を与える



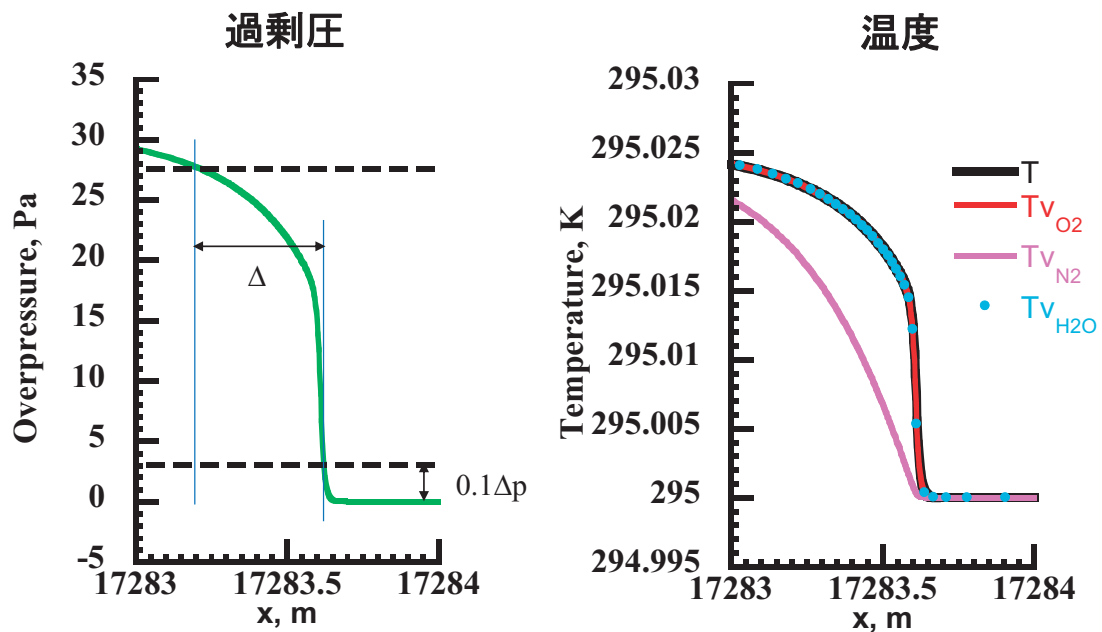
分散された波の厚さの湿度依存性



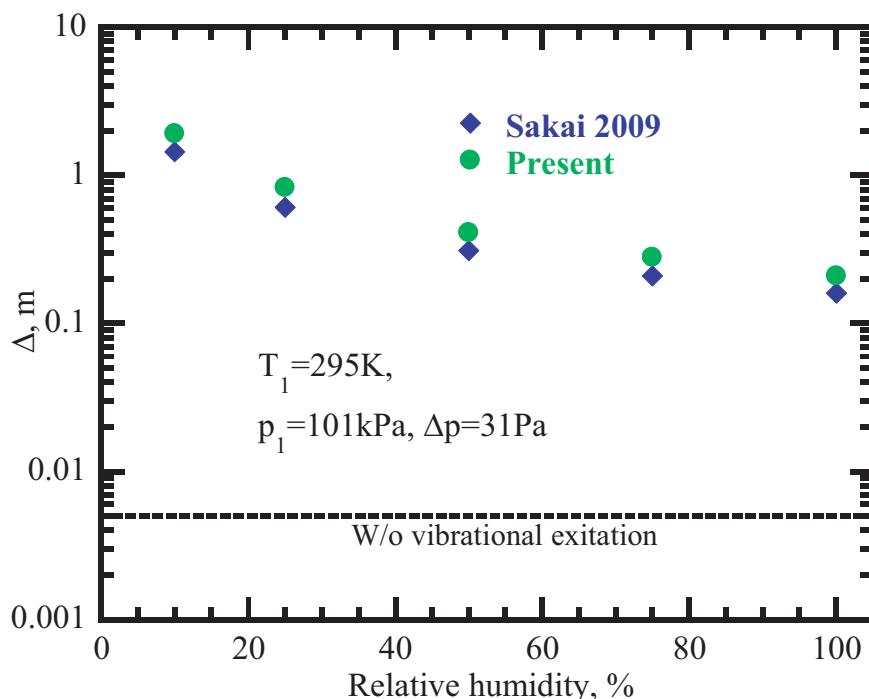
•相対湿度が10%で約3倍、100%で約1.2倍

N2+O2+H2O混合気

過剰圧と温度の空間分布(t=50s) ($T_1=295\text{K}$, $hr=50\%$, $Me=1.00013$, $\Delta p=31\text{Pa}$)



分散された波厚さの湿度依存性



まとめ

- 空気 + 水蒸気混合気での振動励起詳細反応を含めたCFDコードを開発
 - 湿度が低いと $\Delta \rightarrow$ 大
 - 平面衝撃波伝播問題における1条件に対し、
 $\Delta(\text{Present}) = 1.3 \times \Delta(\text{Landau-Teller緩和式})$
 - 実在大気の湿度範囲内では、N₂-O₂間の振動-振動交換反応の分散特性への寄与は小さい