TOPICS

燃焼の直接数値シミュレーション（DNS）の使い道 –実験解析手法の評価–

1. はじめに

流体や燃焼の分野における数値的な研究手法の一つとして，直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation：DNS）がある．このDNSは，現象を支配する方程式（Navier-Stokes方程式）のいずれの項もモデル化することなくそのまま解くという，厳密な数値計算手法である．DNSは，流体や燃焼における詳細な物理を調べたり，他の数値的手法（RANS，LES等）で必要とされるモデルを作成したりするのに用いられている．著者は，他に燃焼のDNSの使い道がないかと考えた．

機械工学における多くの分野での研究がそうであるように，燃焼分野でもまた，その研究手法として，理論，実験，数値計算がある．理論研究の場合，実現象における特性量について解析解が得られる仮定のもとに定式化を行い，そこから得られる結果はその仮定のもとでは厳密である．実験研究の場合，実現象における特性量を測定や解析可能な物理量で定義し，そこから得られる結果は定義や測定，解析に伴う誤差が含まれる．数値計算を用いた研究の場合，実現象における特性量を支配方程式から算出し，そこから得られる結果は，モデルを必要とする手法（RANS，LES等）を用いると，空間や時間の離散化に伴う誤差に加えてモデル化に伴う誤差も含まれる．一方，モデルを必要としないDNSを用いれば，モデル化に伴う誤差はなく，時間と空間ともにそれらの最小スケールを解像できるようにすることから離散化に伴う誤差は極めて小さい．このことから，実現象を最も正確に表現できるDNSを用いて，実験における解析手法を評価することができそうである．

2. 評価手法

乱流予混合燃焼のDNSを実行して構築したデータベースを用いて実験解析手法の評価を行う．データベースの乱流予混合火炎の可視化例を**図1**に示す．乱流予混合燃焼のデータベースからは関連するあらゆる物理量や特性量の算出が可能である．実験で得られる物理量や光学計測における解像度，測定時間間隔など，可能な限り実験と同様な条件とし，実験解析と同じ定義で特性量を算出する．つまり，DNSデータベースを用いて実験における測定や解析を模擬することにより，実験解析手法を評価しようとするものである．

3. 評価例[1]

ここでは，乱流予混合火炎において重要な特性量の一つである火炎変位速度について実験解析の評価を行う．Lewis数（物質拡散に対する熱拡散の比）が1.0，既燃気体に対する未燃予混合気の密度比が5.00の乱流予混合燃焼のDNSデータベースを用いる．火炎面は反応進行度変数

$$c_T = \frac{T - T_u}{T_b - T_u}$$

の等値面で定義される．ただし，Tは温度，T_uは未燃予混合気の温度，T_bは既燃気体の温度である．ここで，火炎変位速度u_dとは，火炎面が流れに対して移動する法線方向の速度であり，次式で定義される．

$$u_d = (\boldsymbol{w} - \boldsymbol{u}) \cdot \boldsymbol{n}$$

ただし，$\boldsymbol{w}$は火炎面の速度，$\boldsymbol{u}$は流れの速度，$\boldsymbol{n}$は火炎面の法線方向単位ベクトルである．実験ではこの式に従ってu_dを求めることは計測技術上，不可能であるため，たとえば**図2**に示されるように，火炎面上のある点において，計測を行う二つの連続する時刻のうち，前の時刻における局所流速の法線方向成分を用いることにする．この実験での計測，解析手法をDNSデータベースにより模擬して得られたu_dをu_d^g，上式から厳密に得られたu_dをu_d^bと定義する．実験で火炎面を同定するのによく用いられるシリコンオイル滴の蒸発温度500Kに対応するc_T=0.167の等値面を火炎面としたときの，u_d^bとu_d^gの相関は**図3**に示す結合確率密度関数（jpdf）で表される．図より，u_d^bとu_d^gの間にやや正の相関が見られるが不明瞭である．火炎面を，化学反応速度が最大となるc_T=0.690の等値面としたときの同様なjpdfを**図4**に示す．図より，u_d^bとu_d^gの間には明確な正の相関が見られる．このことから，実験においてu_dを求める際に火炎面とする適切なc_Tの等値面が明らかとなった．

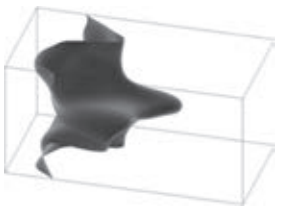


図1　DNSデータベースの乱流予混合火炎の可視化例

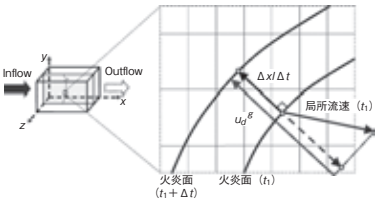


図2　実験での計測を模擬した火炎変位速度の定義

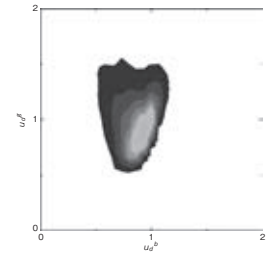


図3　u_d^bとu_d^gの相関（c_T=0.167）

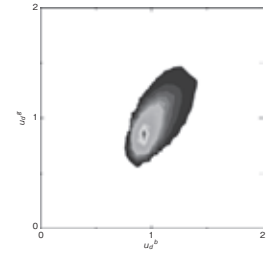


図4　u_d^bとu_d^gの相関（c_T=0.690）

4. おわりに

このように，燃焼のDNSは実現象を理解するための研究手段として極めて有効であり，ここで紹介した実験の模擬による評価は，過去の実験結果も有効利用することが可能である．

機械工学のどの分野においても，同様な考え方が可能であり有効ではないだろうか（すでに実施済みでしたらご容赦を）．

（原稿受付　2014年3月11日）

〔坪井和也　岡山大学〕

●文　献

（1）森下真吾・坪井和也・冨田栄二，火炎変位速度の実験的解析手法に関する乱流予混合火炎の3次元DNSデータを用いた評価，第51回燃焼シンポジウム講演論文集，(2013-12)，518-519.