

非平衡乱流粘性表現に基づく圧縮性乱流モデリング

Compressible turbulence modeling based on the nonequilibrium
turbulent-viscosity representation

吉澤 徹 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
 藤原仁志 航空宇宙技術研究所 〒180-0012 東京都調布市深大寺東町 7-44-1
 半場藤弘、西島勝一 東京大学生産技術研究所
 熊谷幸裕 気象庁 〒100-8112 東京都中央区大手町 1-3-4

Akira Yoshizawa, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

Hitoshi Fujiwara, National Aerospace Laboratory, Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo 180-0012

Fujihiro Hamba and Shoiti Nisizima, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Yukihiro Hamba, Japan Meteorological Agency, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8112

A compressible turbulence model of the Reynolds-mean type is presented on the basis of a turbulent-viscosity representation for the Reynolds stress with nonequilibrium effects incorporated through the Lagrange derivative of turbulence quantities. Explicit turbulent compressibility effects occur in the combination with the nonequilibrium effects. As a result, the present model fulfills the requirement that turbulent compressibility effects appear prominently in free-shear layer flow, while vanishing in channel flow. The model is applied to free-shear layer flows and is confirmed to reproduce the observed suppression of the growth rate.

高速乱流のもっとも典型的圧縮性効果の一つに混合層成長の著しい低下がある (Fig. 1)。この特性は、圧縮性による乱流エネルギー散逸の増加や密度揺らぎのレイノルズ応力への寄与として説明がなされてきた。しかし、一様剪断乱流や混合層の直接数値計算より、圧縮性によるエネルギー散逸の増加は乱流強度減少の主要原因でなく、圧力揺らぎに起因する乱れの生成効果の低下によることが指摘された。また、溝乱流のように圧縮性効果が少ない場合でも、壁面近傍では強い温度勾配により大きな密度揺らぎが発生し、密度揺らぎのみでは圧縮性効果を十分説明できないことも判明した。これらに起因する従来の圧縮性乱流モデルの欠陥は、混合層成長の低下は説明できるが、溝乱流に適用すると過大な圧縮性効果を生むという欠陥として現れる。

以上のことから、圧縮性乱流モデルは、少なくとも次の2点を満たすことが要求される。

(a) 溝乱流においては、モデルの圧縮性効果は平均密度変化を通して現れ、新たに付加される乱流圧縮性効果は自動的に消失する。

(b) 提案されるモデルは、観測される混合層の成長率抑制を再現できる。

溝乱流と混合層のもっとも大きな差異は、主流方向の乱流特性の変化、すなわち非平衡性にある。本研究においては、この点に注目し、すでに非圧縮性乱流で提案されている非平衡乱流粘性表現に圧縮性効果を乱流マッハ数を通して組み入れる。その結果、乱流粘性率 ν_T は以下

の形式で表現される：

$$\nu_T = \left[1 + C_N \left(1 + C_M M_T^2 \right) \frac{1}{K} \frac{D}{Dt} \left(\frac{K^2}{\varepsilon} \right) \right]^{-1} \nu_{TE} \quad (1)$$

ここで、 D/Dt はラグランジュ微分、 K は乱流エネルギー、 ε はエネルギー散逸率、 M_T は乱流マッハ数、 ν_{TE} は平衡状態での乱流粘性率

$$\nu_{TE} = C_\nu K^2 / \varepsilon \quad (2)$$

である。

乱流粘性モデル (1) を通常の2方程式 ($K-\varepsilon$) モデルに組み込み、定数として

$$C_\nu = 0.09, C_N = 0.8, C_M = 120 \quad (3)$$

を採用する。その結果、Fig.1のように混合層の成長率低下が説明できる。

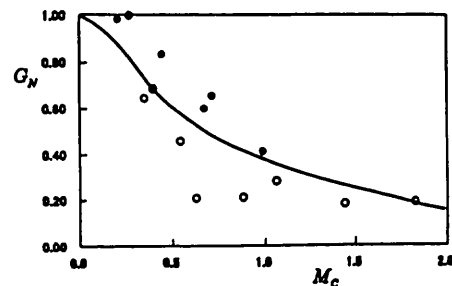


Fig. 1. Growth rate of mixing-layer flow. Symbol, observations; line, present model.