

特集 6
研究速報

平面衝突噴流の LES (第 2 報)

Large Eddy Simulation of Plane Impinging Jet

坪倉 誠*・小林 敏雄*・谷口 伸行*

Makoto TSUBOKURA, Toshio KOBAYASHI and Nobuyuki TANIGUCHI

1. はじめに

本研究においては前報で述べた平面衝突噴流の LES について、得られた統計量と実験値との比較を行う。また数値解析から格子スケールの乱流応力についての収支を求め、特に衝突壁面近傍における乱流応力 (レイノルズ応力) の輸送機構について調べる。

2. 衝突噴流の解析

解析手法は前報と同じである。以降、自由噴流の流れ方向を y 、壁噴流の流れ方向を x 、自由噴流のспан方向、即ち統計的に一様な方向を z とする。

ただし、自由噴流と壁噴流において座標を図 1 のように異なる方向にとっているのに注意されたい。ここで自由噴流に対する座標の原点は噴流軸のノズル出口、壁噴流に対する原点は自由噴流軸と壁面上との交点に設定されている。

2.1 実験条件

統計量の抽出に際して、より定量的評価を行う為に、前報で述べた各サンプル点における抽出方法に対して、同一点で 8 回統計量を取り、その平均値を統計量としている。

2.2 計算条件

SGS モデルとしては前報の DI モデルを採用し、ダイナミック SGS モデルにより求められる渦粘性係数のモデル定数は Meneveau らによるラグランジュ平均操作により平均し¹⁾、計算の安定化を図っている。

3. 統計量の比較

3.1 自由噴流の統計量

図 2 に自由噴流の主流方向 (y) の平均流速を示す。

LES による解析値と実験値は定性的には一致しているものの、実験値に対して LES は全体的に噴流領域が狭く

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

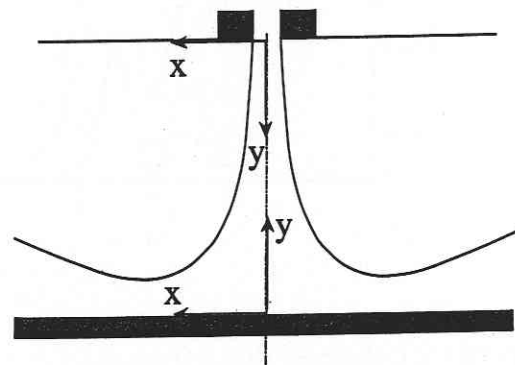


Fig. 1 Coordinate system

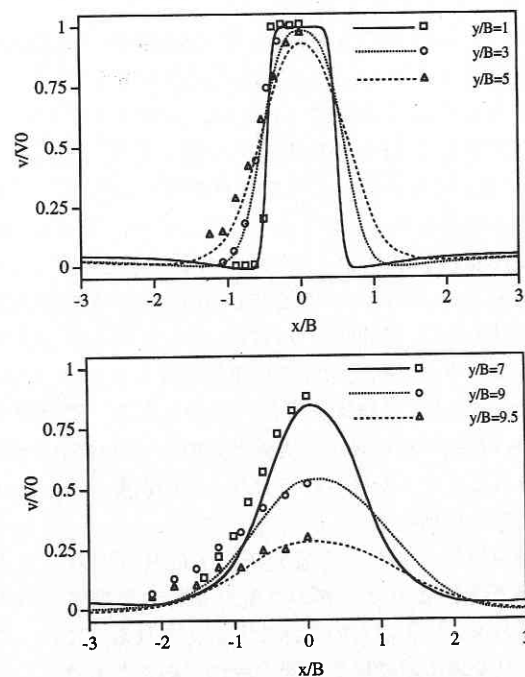


Fig. 2 Free jet's mean velocity (y direction)
(lines: LES, symbols: Experiment)

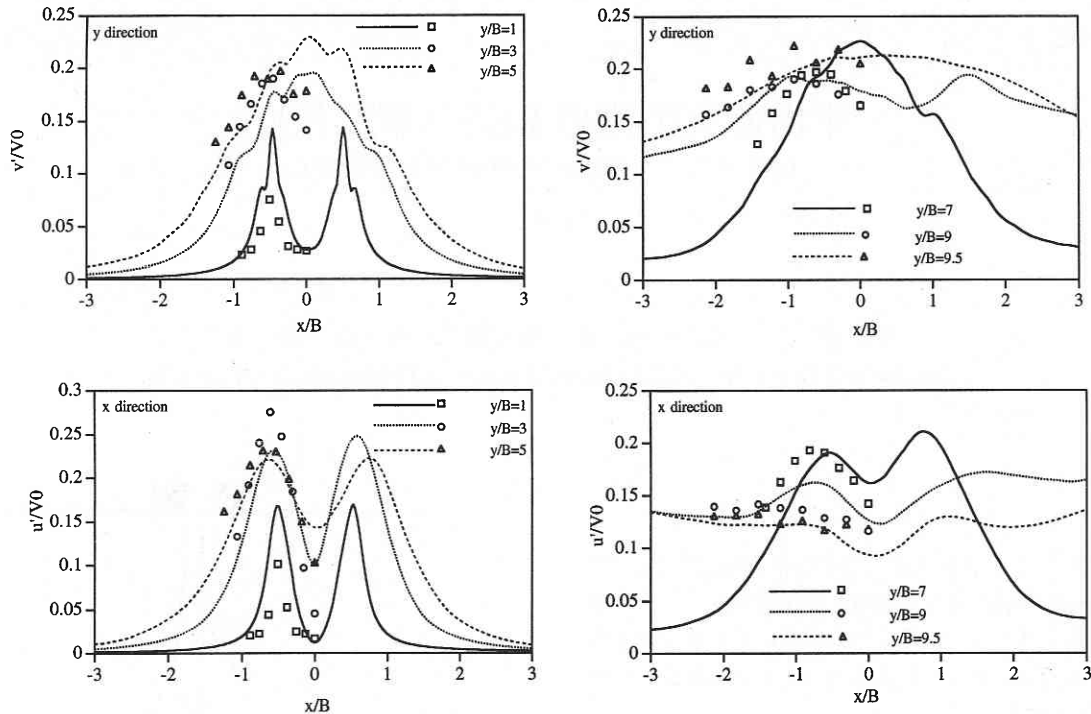


Fig. 3 Free jet's GS turbulent intensity (lines: LES, symbols: Experiment)

なっている。この領域の不一致は計算における入り口条件と実験値の条件の不一致による影響が大きいと考えられる(後述)。

図3に自由噴流の主流方向(y direction), および主流に垂直方向(x direction)のGS乱流強度を示す。

主流方向の乱流強度については, $y/B = 1$ において実験値と比較してLESの結果はやや過大評価している。これは, LESにおいては入り口条件の乱れとして, 二次元噴流の不安定なモードを与えたことにより, 実験と比較して乱流遷移が早くおこったためであると考えられる。 $y/B = 3$ から $y/B = 7$ における自由剪断層での乱流強度のピークはLESと実験値とでほぼ一致しているが, LESの結果は噴流中央で乱流強度の極小値がみられない。この領域においてLESの結果を可視化したところ, 遷移域で巻き上がった強い双子渦が, 実験と比較して流れ場の下流まで崩れることなく輸送されており, この影響があらわれたものと考えられる。

この原因の一つは, 不安定モードの乱れのみを与えたLES解析と, よりランダムな乱れを持つ実験値との入り口条件の違いによるものであると考えられる。また, この傾向は乱流場の組織構造の過大評価であるとも考えられ, この種の傾向は, スマゴリンスキーモデルに代表される等方型渦粘性モデルを用いたチャネル乱流場においてすでに

観察されており, 等方型渦粘性モデルの問題点の一つである。

壁近傍 $y/B = 9$, および $y/B = 9.5$ における実験値との一致は良好である。

主流に垂直な方向の乱流強度についても, 主流方向と同様な傾向を示しているが, この方向の乱流強度の実験値とLESの結果との差はそれほど大きくはない。

3.2 壁噴流の統計量

図4に壁噴流の主流方向(x)平均速度, 図5に壁噴流の主流方向(x direction), 壁に垂直方向(y direction)のGS乱流強度を示す。

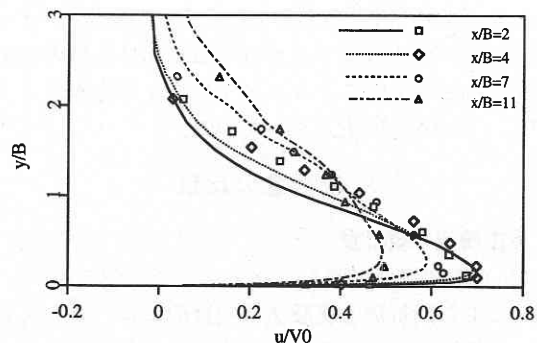


Fig. 4 Wall jet's mean velocity (x direction) (lines: LES, symbols: Experiment)

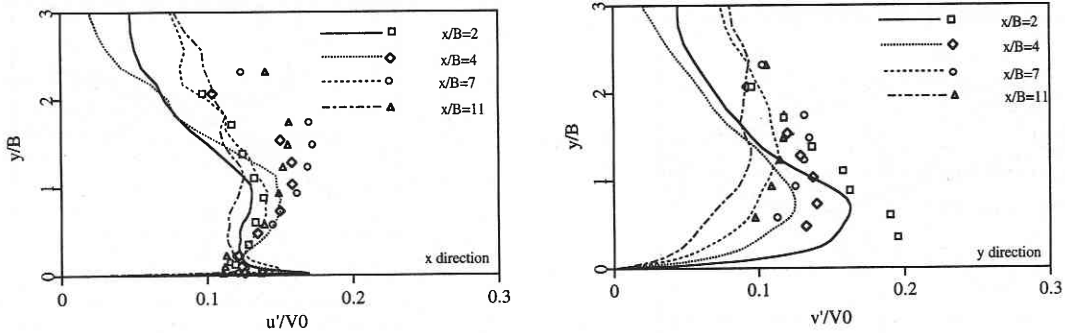


Fig. 5 Wall jet's GS turbulent intensity (lines: LES, symbols: Experiment)

平均流速については特に $x/B = 2$ において壁噴流の領域が実験と比較して狭くなっている。これは自由噴流においてその噴流領域が全体的に実験値と比較して幾分小さく評価されている影響であると考えられる。ただし、その後の発達是比较的良好である。

また特に乱流強度については x 方向、 y 方向とも $x/B = 2$ における分布が実験値と計算値で比較異なる為、その後の発達について壁から離れた領域においては特に x 方向の乱流強度については定量的に良好な一致とは言い難いが、定性的な傾向は捕らえられていると考えられる。

4. 衝突領域近傍のレイノルズ応力の収支

図 6 に GS (格子スケール) のレイノルズ応力の垂直応力成分についての輸送方程式の、自由噴流軸上 ($x/B = 0$) の収支を示す。ただし、 x 方向については他の収支と比較してスケールが異なることに注意されたい。

各項の算出に際して、SGS 応力による散逸は分子散逸項に、SGS 応力の拡散は乱流拡散項に加えている。

それぞれの応力について生成項が正となるのは壁方向の応力のみである。 y 方向の垂直応力 (R 22) の生成項は、 y 方向の主流が壁面により減速される結果利得として働き、壁近傍で主要な項である。ただし、壁面のごく近傍においては y 方向の垂直応力が壁面の影響で減衰し、これに伴い、生成項も主要ではなくなる。この時、壁剪断乱流と大きく異なるのは分子粘性による (ここでは渦粘性も含んでいる) 散逸は支配的ではなく、圧力歪み相関項 (Pre-S) が大きく負となり損失として働く。尚、この項と釣り合うのは利得として働く圧力拡散項となっている。

一方 x 方向の垂直応力 (R 11) の生成項は負となる。これは y 方向の速度の減速による x 方向速度の加速の結果である。この時、圧力歪み相関項は正となり x 方向垂直応力に対して利得として働く。 z 方向垂直応力 (R 33) に対しては、流れ場は統計的に一様であることから応力の

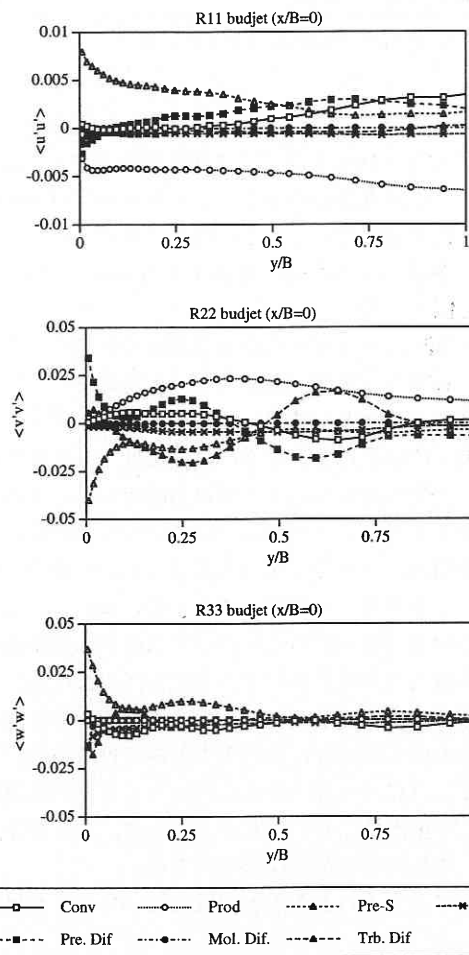


Fig. 6 GS Reynolds stress (Normal) budgets

生成項は零となる。この時、壁近傍では圧力歪み相関項が利得として働いている。

即ち平均場からエネルギーを獲得するのは y 方向垂直応力の生成項であり、このエネルギーは圧力歪み相関項により x 方向、 z 方向垂直応力に分配される。ただし、ここ

研究速報

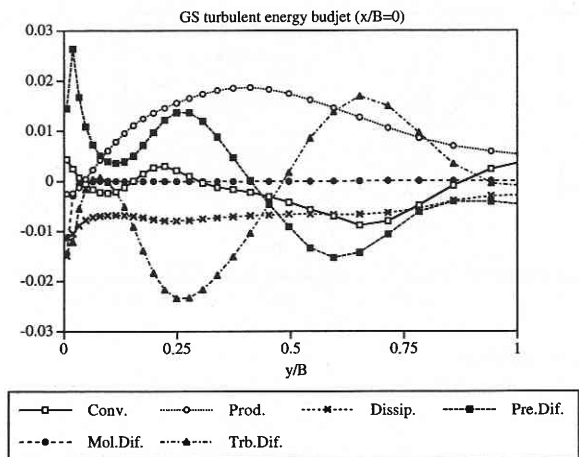


Fig. 7 GS Turbulent energy budgets

では z 方向により多く分配される. y, z 方向垂直応力が獲得したエネルギーは分子散逸により熱エネルギーに変換される一方, x 方向垂直応力はそのエネルギーを負の生成項により主流に返還している. この傾向は西野らによる可視化計測により調べられた軸対称衝突噴流の輸送機構²⁾と定性的によく似ている.

図7にGS乱流エネルギーの輸送方程式の各項の自由噴流軸上における収支を示す. 壁面のごく近傍においては圧力拡散項が主要利得項として働いており, これと釣り合う損失として働くのは主に分子粘性による拡散, 乱流拡散の両項である. 上述の西野らによる軸対称噴流においては, 生成項が損失として働くことが示されているが本研究における平面衝突噴流においては壁の極近傍において僅かに負値となったにとどまり, 主要項とはなっていない. エネルギー生成項の負値は軸対称噴流においては衝突噴流領域の比較的壁から離れた領域において, 主流方向の乱流強度に対して半径方向の乱流強度が逆転し大きくなるために起こる. 本研究においては図8におけるよどみ点近傍の統計量から明らかなように, y 方向の乱流強度と x 方向の乱流強度の逆転はごく壁近傍においてしかみられず, この結果乱流エネルギーの負の生成項は観察されない.

いずれにしても, このよどみ点領域においては流れ場の

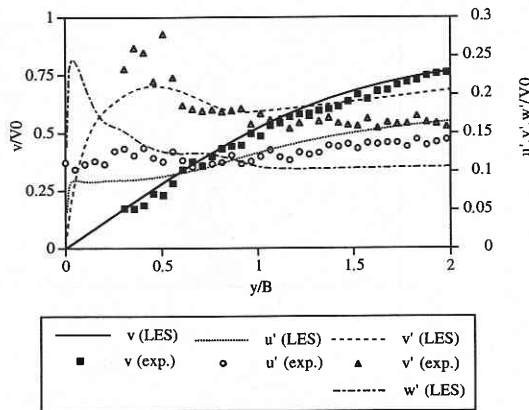


Fig. 8 Near wall statistics (LES)

分子粘性による散逸は支配的ではない.

7. ま と め

平面衝突噴流のLESを行い, 壁近傍のレイノルズ応力の輸送機構について調べた.

また, 遷移領域における統計量の実験値との不一致は入り口における実験値とLES解析の条件の不一致によるものであると考えられ, 特にLESにおける入り口条件について改善を要する. 現在, よどみ域における乱流場の非等方性をより厳密に再現できると期待される非等方型渦粘性モデルの適用を検討している.

謝 辞

本研究の一部は東京大学大型計算機センター研究開発プロジェクト「並列処理指向のスーパーコンピュータ利用」のもとに行われました. 記してここに感謝いたします.
(1996年10月31日受理)

参 考 文 献

- 1) C. Meneveau, T. S. Lund and W. Cabot, Proc. of the Summer program 1994 (CTR), pp. 1-29
- 2) 西野, 糟谷, 鳥居, 第11回生研 NST シンポ (1991), pp. 41