

## 論文の内容の要旨

論文題目     ダイナミック・サブグリッド・スケール・モデルに基づく Full Way Coupling 法による  
                  固気混相乱流のラージ・エディ・シミュレーション

氏名     雷     康     斌

### 1. 緒言

乱流中に固体粒子が混入する系は、粉体輸送や燃焼器、化学反応器内の流れ、汚染物質の大気や海洋中での拡散、血液の流れなど、流体力学、環境工学、生体工学など広い分野に関連する問題である。その流れ場の微細構造における固体粒子と乱流渦間の相互作用による乱流変調や粒子の滞留時間、乱流拡散、堆積量と粒子の半径、形状、密度分布などの複雑非定常現象の解明は、将来のあらゆる方面での貢献が期待される。しかしながら、実用的な数値計算のほとんどすべてが RANS に基づいた  $k-\varepsilon$  モデルを適用したものであり、これらにはそれぞれの実験条件に即した相互作用モデルや解析手法が提案されているものの、物理的な根拠の乏しい実験式・経験式も含まれており、必ずしも普遍的な詳細解析を展開していくには適していない。本研究では、これらの混相乱流モデルの欠点を克服し、実用的な非定常、高レイノルズ数の固気混相乱流予測の工学要請に応えるため、ラージ・エディ・シミュレーションに注目して、流体と粒子の GS 成分および SGS 成分の相互作用を考慮するダイナミック固気混相乱流モデルを構築した。さらに粒子間衝突の影響も考慮する普遍性の高い Full Way Coupling を新しい固気混相乱流ラージ・エディ・シミュレーション予測手法として提唱した。これらの数値解析法を用いて、粒子の乱流拡散や乱流の粒子運動による変調などの特徴的な現象について LES の視点から系統的に検討し、媒質と分散相の GS 成分、SGS 成分および粒子間衝突の間の相互作用を明らかにした。

### 2. Dynamic Random Walk SGS モデルの提案

固気混相流の LES 数値解析において気相の流れ場は直接には GS 成分でしか与えられないため、気相でモデル化されている SGS 成分からの影響を如何に固体粒子の運動へ与えるかという問題が生じる。この問題を解決するために本研究では流体乱れ成分が局所等方性および正規分布の統計特性をもつと

仮定して、流体 SGS 成分の運動エネルギー  $k_s$  を正規乱数によりラグランジュ的にスケーリングし、LES 計算における流体 SGS 成分  $u'_i$  に対して局所的な渦スケール強さを表現し得る Lagrange 型 Dynamic Random Walk (DRW) SGS Coupling モデルを以下のように提案した。

$$u'_i = L_{Gaussian}(\sqrt{2/3k_s}) \quad k_s = \frac{C_{vt}}{C_\varepsilon} \Delta^2 |\bar{S}|^2 \quad (1)$$

式(1)の次元解析長さスケールに関する係数  $C_{vt}/C_\varepsilon$  は流れ場高周波の相似性を利用する Germano's Dynamic Procedure(1991)によって次のように定められる。

$$C_{vt}/C_\varepsilon = C_S^{4/3} = \left[ \frac{1}{2\Delta^2} \frac{\langle \widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \rangle}{\langle |\bar{S}| \bar{S}_{ij} - \alpha^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} \rangle} \right]^{2/3} \quad (2)$$

$L_{Gaussian}$  は標準偏差  $\sqrt{2/3k_s}$  でスケーリングした正規乱数で、本研究ではBox and Mullar法で与えた。

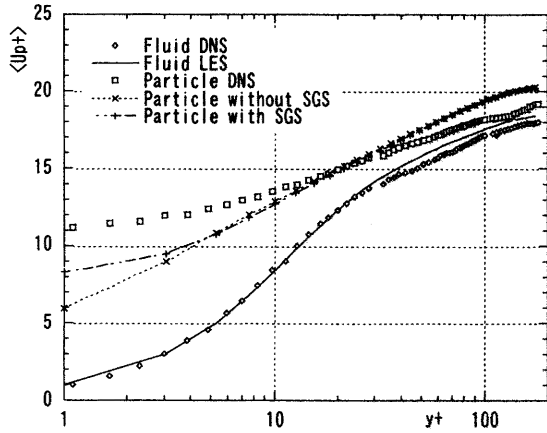


図1 70  $\mu\text{m}$  Copper粒子の主流方向平均速度分布

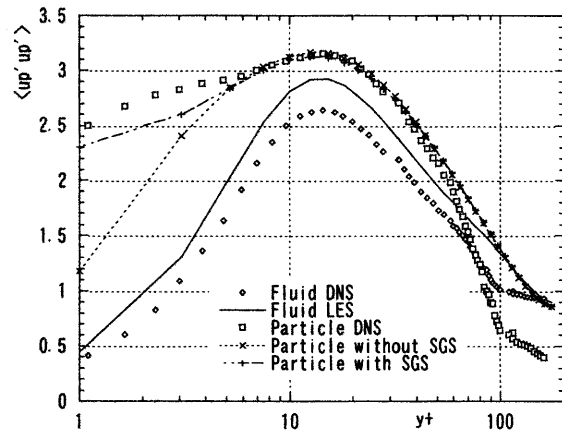


図2 50  $\mu\text{m}$  Glass粒子の主流方向乱れ強度分布

提案したモデルの効果を検証するために、DNS データ(Rouson & Eaton, 1997)と比較した計算結果 70  $\mu\text{m}$  Copper 粒子の主流方向速度分布を図 1 に、50  $\mu\text{m}$  Glass 粒子の主流方向乱れ強度分布を図 2 に示す。提案したモデルによる LES 計算結果は壁近傍において DNS の結果に近付き、改善されていることが分かる。また乱流の SGS 成分から固体粒子運動への影響について調べた結果、固体粒子の運動に及ぼす SGS 成分の影響は粒子の緩和時間によって選択的に働くなどの新しい知見を得た。

### 3. Dynamic Two Way Coupling SGS モデルの提案

Two Way Coupling による乱流変調について、粒子からの作用を粒子の流体から受ける抗力の反力として評価し、固気混相乱流 LES における粒子の影響を考慮した非圧縮性流体の運動方程式が次式のように導かれる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - F[N(\bar{u}_i - \bar{u}_{pi}) + \overline{n u'_i} - \overline{n u'_{pi}}] \quad (3)$$

また、式(3)の中に現れる SGS 応力  $\tau_{ij}$  については、湯ら(1997)により提案された粒子運動の影響を考慮した渦粘性 SGS モデルの欠点を改良し、普遍性、実用性を有するダイナミック Two Way Coupling SGS モデルを以下のように提案した。

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \cong -2\nu_T \bar{S}_{ij}$$

$$= -2C_{\nu T}^{3/2} \Delta^2 \left[ \frac{|\bar{S}|^2 + \frac{F}{\sigma_s} \frac{\partial \bar{N}}{\partial x_i} (\bar{u}_i - \bar{u}_{p_i})}{1 + \frac{2FN(1-b)}{\sqrt{3/2\alpha_1 a + \sqrt{C_v C_e} |\bar{S}|}}} \right]^{1/2} \bar{S}_{ij} = -2(C_{ms} \Delta)^2 g(\bar{u}_i, \bar{u}_{p_i}, \bar{N}) \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$C_{ms}^2 = C_{\nu T}^{3/2} = \frac{\langle \widetilde{u_i u_j} - \widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} \rangle}{2\Delta^2 \langle g(\bar{u}_i, \bar{u}_{p_i}, \bar{N}) \bar{S}_{ij} - \alpha^2 g(\widetilde{\bar{u}_i}, \widetilde{\bar{u}_{p_i}}, \widetilde{\bar{N}}) \widetilde{\bar{S}_{ij}} \rangle} \quad (5)$$

Kulick & Eaton(1994)の実験条件を参照して提案したSGS モデルにより LES 解析を行い、乱流の粒子による変調について、Kolmogorov 長さスケールより小さな粒子を混入することにより流れ場の乱流強度が減少し、その減少の割合は粒子のストークス数、質量混入比および壁からの距離に依存するという実験結果が数値解析でも定性的に再現されたが、実験現象の定量的な再現ができないなどを確認した。

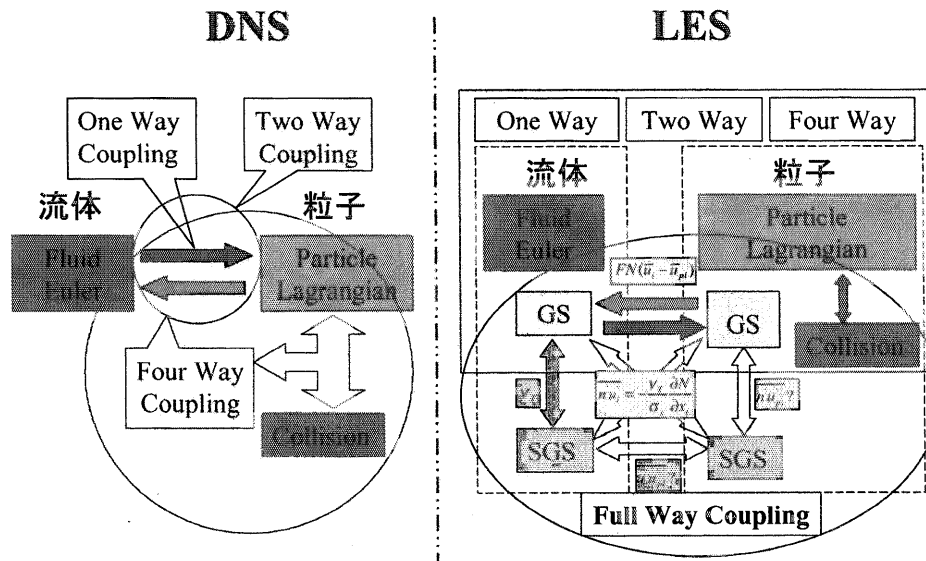


図3 固気混相乱流数値解析におけるDNS と LES のカップリング

#### 4. 固気混相乱流の LES における Full Way Coupling による定式化の構築

固気混相乱流の直接数値解析(DNS)に対しては、流体運動から粒子運動への影響を片方だけ考慮する One Way Coupling と、粒子による乱流の変調に関わる流体と粒子両方の相互作用を考慮する Two Way Coupling、および粒子間衝突の影響をも考慮する Four Way Coupling と分類されている。ここで、固気混相乱流の LES に対しては、流体と粒子の両方とも空間フィルター操作によって GS 成分と SGS 成分に分けられるため、流体と粒子の相互干渉は図3に示すように DNS より一層複雑になり、GS と SGS の両方による粒子拡散と乱流変調をそれぞれ議論する必要がある。

本研究においては流体と粒子の GS 成分のカップリングおよび粒子間衝突を考慮するだけでなく、本研究で開発したダイナミック SGS モデルにより流体と粒子の SGS 成分のカップリングをも考慮した新しい Full Way Coupling 解析手法を提案した。ここでは、乱流 GS 成分による粒子の拡散運動をラグランジュ追跡法によって計算し、乱流 SGS 成分による粒子の拡散運動を本研究で提案したダイナミック Random Walk Model を用いて解析する。また、粒子の GS 成分による乱流変調は直接的に数値解析

によって予測され、粒子の SGS 成分による乱流変動は本研究で提案したダイナミック・カップリング SGS モデルを用いて評価される。さらに粒子間の衝突による粒子の拡散運動は力学の運動量保存則に従い、決定論的な方法によって直接計算(DNS)される。

Full Way CouplingによるLES検証解析については、粒子の拡散運動および乱流の変調に対してDNSデータや実験データにみられる特徴をほぼ再現することが検証された。しかし、Kulick&Eatonら(1994)の実験結果で報告された粒子運動による乱流強度の大幅減衰や、粒子平均速度の粒子質量混入比に対する依存性は再現できなかった。また、粒子間の衝突について、粒子の局所濃度のみならず、緩和時間にも支配される。すなわち、局所的な粒子数密度が大きくとも、ある程度緩和時間の小さい粒子 (Kolomogrov 時間スケールに基づく粒子ストークス数  $St_k < 10^{-2}$  の粒子) はほとんど衝突しないことが数値シミュレーションによって予測された。これらの知見から、固気混相乱流のDNSにおいて粒子・流体の相互作用として Elghobashi(1994)により示された分類を、LESモデリングの観点からより詳細に表わし修正したものとして、図4を得ることができる。

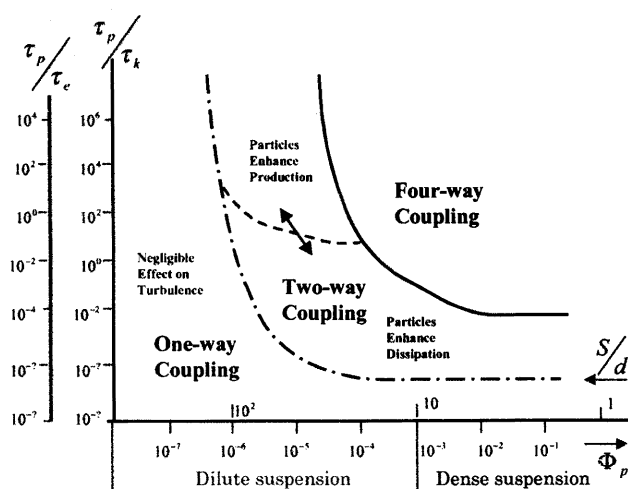


図4 本研究で提案した固気混相乱流の数値解析分類

## 5. 結論及び研究展望

- (1) 固気混相流のLESにおける流体・粒子相互作用を考慮するダイナミックSGSモデルを提案した。
- (2) それらによって、更に粒子衝突を入れたオイラー・ラグランジュ法による固気混相乱流のLESにおけるFull Way Coupling解析手法(定式化)を構築した。
- (3) 乱流中の固体粒子の拡散や固体粒子による乱流変動について、固気混相乱流のLESにおけるSGS成分、SGS成分及び粒子間衝突の働きを系統的に考察して、従来の研究結果が数値解析により確認され、また幾つかの新しい知見も得た。
- (4) 本研究で提案した固気混相乱流のDynamic SGSモデルに基づくFull Way Coupling LES解析手法は、将来エンジン噴霧燃焼器、微粉炭焼却炉、粉体空気輸送、固気二相旋回分離、大気塵埃汚染などの複雑な固気混相乱流場への適用を想定している。これらの解析手法を、より複雑な形状を持つ流れ場(バックステップ流れ、噴霧燃焼器内流れなど)や、工業的な問題にしばしば現れる高レイノルズ数の固気旋回流、石炭ガス化炉の微粉炭流等に試みる必要がある。