

## 格子ボルツマン法と人工的な流入変動風を組み合わせた新しい建築工学LESモデルの開発

Development of a new architectural engineering LES model by introducing a combination of lattice Boltzmann method and artificial inflow turbulence

名古屋大学大学院環境学研究科 准教授 飯塚 悟

### (研究計画ないし研究手法の概略)

本研究は、建築工学（建築環境工学・建築構造工学）分野におけるLES（Large-Eddy Simulation）の実用化・汎用化の促進を目的とした研究である。LESはCFD（Computational Fluid Dynamics：計算流体力学）手法の1つで、様々な学問分野で取り扱われる多くの乱流場解析において、現在汎用的に用いられているCFD手法のRANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes equations）モデルよりも高精度な解が得られることで知られている。高精度解析・予測が可能となる利点から、古くより、LESは次世代汎用CFD手法として多大な期待を集めてきている。しかし、非定常かつ3次元性の強い複雑乱流場を対象とする工学的応用では特に、LESの実用化・汎用化は未だ十分に進んでいない。その大きな理由として、①RANSモデルに比べて計算負荷が遥かに大きいこと、②流入境界条件としての変動風（流入変動風）の生成・導入が難しいこと、の2点が挙げられる。①の多大な計算負荷の問題は、計算機資源の向上や並列処理技術のさらなる進展に伴い、解決に向かっていくものと考えられる。②の流入境界条件は解析の出発点であり、流下領域の空気流動や熱輸送・物質輸送は流入変動風の性状に大きく依存する。つまり、LESの成功には適切な流入変動風の生成・導入が欠かせない。

LESのための流入変動風の生成方法は、①別途もしくは同時の流体解析を行う方法、②目標とする乱流統計量を満足する流入変動風を流体解析なしに人工的に生成する方法、の2つに大別される。①の方法は実際に流体解析を行うため、流体の支配方程式（連続式（質量保存則）や運動方程式（運動量保存則））を満足する流入変動風を生成できる一方、使用する解析手法により目標とする乱流統計量を必ずしも満足しないことや、計算負荷が大きくなるといった欠点を持つ。これに対し、②の人工的に流入変動風を生成する方法は、流体解析を必要としないので計算負荷が小さく、また、生成段階において目標とする乱流統計量を満足できることが大きな利点である。研究代表者はこれまで、目標とする乱流統計量を満足するスペクトルを規定し、規定したスペクトルのフーリエ逆変換に基づいて人工的に流入変動風を生成する方法の開発や、Reynolds応力のCholesky分解に基づいて人工的に流入変動風を生成する方法の開発に取り組み、建築工学分野で取り扱うLESへの適用性・有用性を検討してきた。人工的に生成する流入変動風は、目標とする乱流統計量を満足した流入境界条件として生成できる一方、通常、解析領域に流入した直後に物理的ではない乱れの減衰が生じるという大きな問題を持つ。このような非物理的な乱れの減衰は、人工的に生成する流入変動風が流体の支配方程式を必ずしも満足していないことに起因している。

本研究では、その問題解決を目指して、格子ボルツマン法と人工的に生成する流入変動風を組み合わせた新しい建築工学LESモデルを開発する。研究代表者がこれまでに用いてきた有限差分法に基づくLESの場合、流体の支配方程式（連続式と運動方程式）を同時に満足させるために、圧力のPoisson方程式を解いて圧力・速度修正を行っている。有限差分法LESにおいて人工的に生成する流

入変動風を導入する場合、その性状が流入直後に変化してしまうのは、圧力のPoisson方程式を解いて圧力・速度修正を行う段階（Poisson方程式を解くための境界条件の取り扱いも含む）で主に生じていると考えられる。本研究で導入する格子ボルツマン法は、連続式や運動方程式を陽に解かず、圧力のPoisson方程式を解く必要もないため、流入境界条件として与える人工的な変動風が解析領域内においても適切に維持されることが期待できる。研究代表者が知る限り、このようなLESモデルの開発は世界初の取り組みである。

本研究で導入する格子ボルツマン法は、流体を多数の仮想粒子の集合体と捉え、各粒子の衝突と並進を通して全体の流れ場を再現する数値解析手法である。格子ボルツマン法における支配方程式は粒子数密度の分布関数 $f_a$ の時間発展方程式であり、これは(1)式のように記述される。

$$f_a(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t) - f_a(\mathbf{x}, t) = -\frac{\Delta t}{\tau} (f_a(\mathbf{x}, t) - f_a^{eq}(\mathbf{x}, t)) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{e}_a$ は粒子速度ベクトル、 $f_a^{eq}$ は平衡分布関数、 $\Delta t$ は時間差分間隔、 $\tau$ は緩和時間である。本研究では、粒子速度ベクトル $\mathbf{e}_a$ に対して、3次元27速度モデルを導入した。平衡分布関数 $f_a^{eq}$ は(2)式のように与えられる。

$$f_a^{eq} = w_a \rho \left( 1 + 3\mathbf{e}_a \mathbf{u} + \frac{9(\mathbf{e}_a \mathbf{u})^2}{2} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2} \right) \quad (2)$$

ここで、 $w_a$ は重み係数、 $\rho$ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトルである。緩和時間 $\tau$ については、分子動粘性係数 $\nu$ を与える(3)式から求める。

$$\nu = C^2 \left( \tau - \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、 $C$ は音速である。研究代表者がこれまでに用いてきた有限差分法LESの場合と同様、格子ボルツマン法のLES化においても、subgrid scaleモデルの導入が必要となるが、本研究では標準Smagorinskyモデルを導入した。後述するように、本研究では等方性乱流場を解析対象とするため、Smagorinsky定数は0.15とした。

流入変動風の生成方法は、目標とする乱流統計量を満足するスペクトルを規定し、規定したスペクトルのフーリエ逆変換に基づいて人工的に流入変動風を生成する方法の1つである、波数空間の3次元エネルギースペクトル（Karman型3次元エネルギースペクトル）に基づく方法（Leeら（Physics of Fluids, 1992））を導入した。本方法は、人工的な生成方法であるが、生成する流入変動風に対して連続式（質量保存則）を課することができる利点を有している（ただし、他の人工的な生成方法と同様、生成された流入変動風は運動方程式（運動量保存則）を必ずしも満足しない）。

以上の格子ボルツマン法と人工的に生成する流入変動風を組み合わせた新しい建築工学LESモデルは、等方性乱流場解析を対象としてその適用性・有用性を検討した。代表長さを $D$ 、代表速度を $U_0$ としたときのReynolds数（ $= U_0 D / \nu$ ）は22,000、解析領域は $4D(x_1) \times 2D(x_2) \times 2D(x_3)$ （ $x_1$ ：主流方向、 $x_2$ ：主流横断方向、 $x_3$ ：鉛直方向）、時間差分間隔 $\Delta t$ は $0.001D/U_0$ と設定した。解析格子に関しては、 $64(x_1) \times 32(x_2) \times 32(x_3)$ の解析格子を基本格子とし、全ての空間方向の格子数を2倍ずつ（計8倍）とした細分格子、4倍ずつ（計64倍）とした細分格子も使用した。流入境界条件には、上述の方法により人工的に生成した乱流強度10%および20%の流入変動風を用いた。流入境界条件以外の境界条件としては、流出境界条件に勾配0条件、側面境界条件および上下面境界条件に周期境界条件を課した。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

図1は、生成段階における流入変動風の性状を確認した例で、流入変動風の各成分 ( $u_1, u_2, u_3$ ) の縦相関 (時間相関) から求めた波数 (周波数) スペクトルと、目標とするスペクトル (Karman型 3次元エネルギースペクトルを1次元スペクトルに変換したもの) を比較したものである。流入変動風は、Taylorの凍結乱流の仮定を用いて $x_1$ 方向軸 (波数 $k_1$ 方向軸) を時間 $t$ 軸 (周波数 $\omega$ 軸) に置き換え、流入境界面 ( $x_2 - x_3$ 断面) における時系列データとして生成している。図1において、①主流方向成分 $u_1$ については、時系列データ (時間相関) から求めた周波数スペクトルを $x_2 - x_3$ 断面平均したもの、②主流横断方向成分 $u_2$ については、 $x_2$ 方向の縦相関から求めた波数スペクトルを $x_3$ 方向平均および時間平均したもの、③鉛直方向成分 $u_3$ については、 $x_3$ 方向の縦相関から求めた波数スペクトルを $x_2$ 方向平均および時間平均したものを示している。図1 (1) は乱流強度10%で基本格子用に生成した流入変動風から求めたスペクトル、図1 (2) は乱流強度20%で基本格子の64倍の細分格子用に生成した流入変動風から求めたスペクトルである。

図1 (1)、(2) の結果ともに、人工的に生成した流入変動風の各成分から求めたスペクトルの形状の差は小さく、乱れの等方性が適切に再現されている。また、それらのスペクトルは目標とするKarman型スペクトルと良く対応している。このように、目標とする乱流統計量を十分に満足する流入変動風を、付加される計算負荷がほとんどなく簡易に生成できることが、人工的な流入変動風の生成方法の最も大きな利点である。

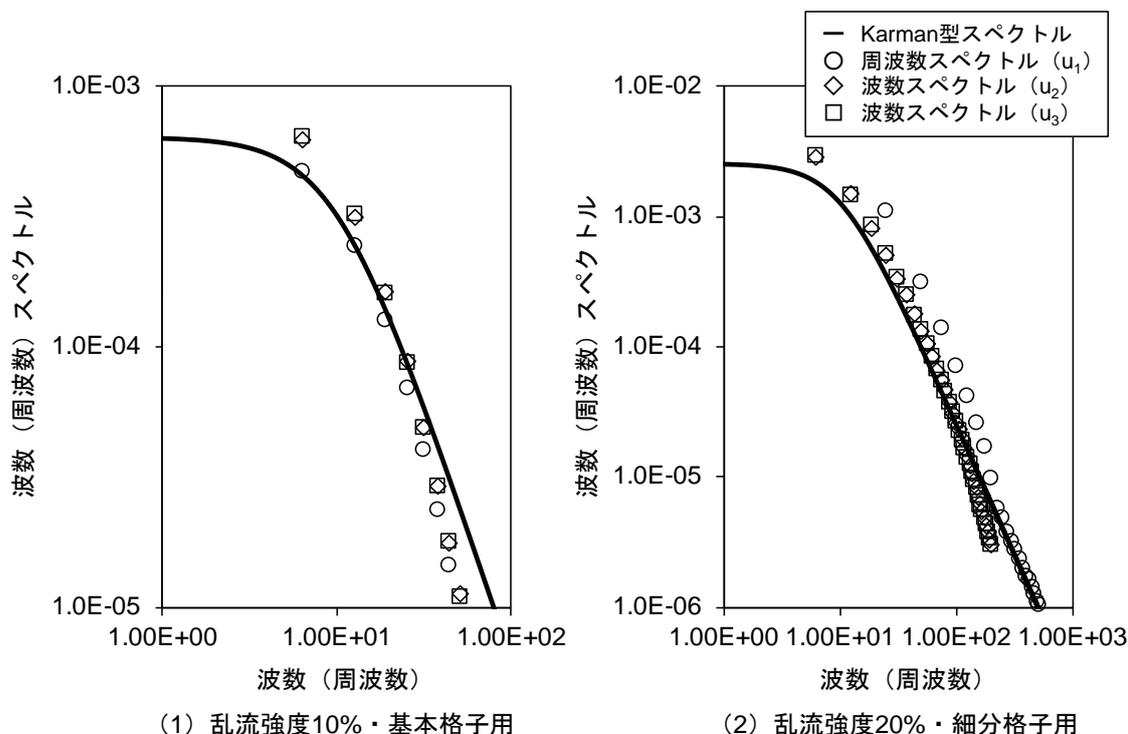
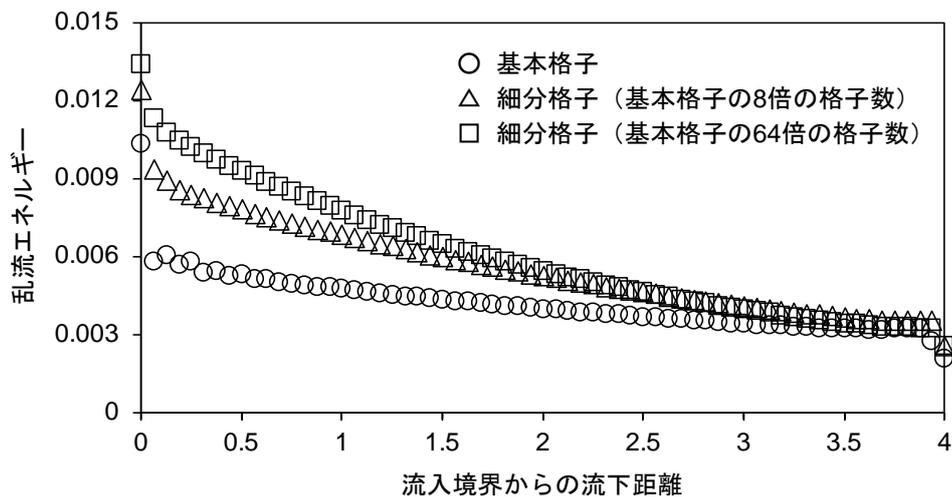


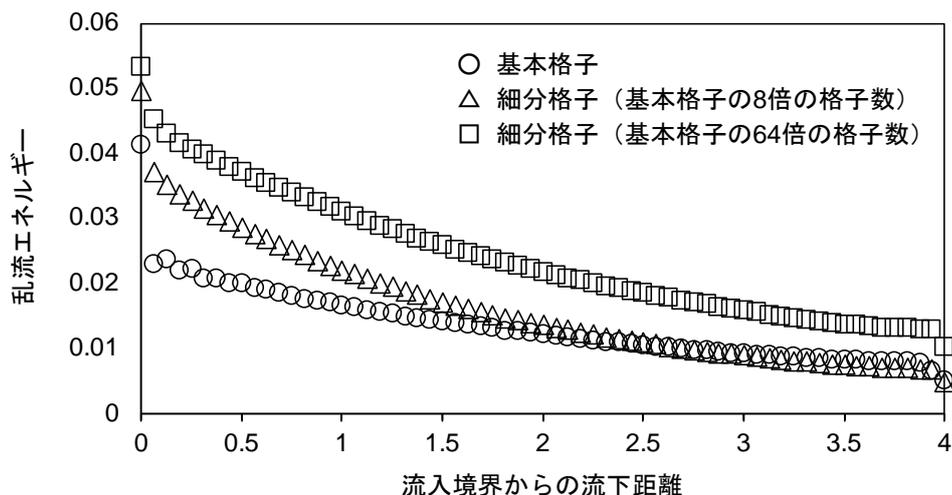
図1 波数 (周波数) スペクトルの比較 (生成段階における流入変動風の性状)

図2は、生成された流入変動風の流下性状を確認した例で、乱流エネルギーの主流 ( $x_1$ ) 方向の減衰過程を比較したものである。同図に示す乱流エネルギーの値は、 $x_1$ 方向軸に直交する鉛直断面 ( $x_2 - x_3$ 断面) の平均値としている。図2 (1) が乱流強度10%で基本格子用および細分格子用に生成した流入変動風の流下性状の比較、図2 (2) が乱流強度20%で基本格子用および細分格子用に生

成した流入変動風の流下性状の比較である。図2 (1)、(2) の全ての結果において、流入直後に乱れの大きな減衰が生じている。流入境界から少し離れた位置からの減衰過程と比較しても、流入直後の乱れの減衰が特に大きくなっていることが見て取れる。つまり、有限差分法LESに流入変動風を導入する場合と同様、格子ボルツマン法LESに流入変動風を導入する場合でも非物理的な乱れの減衰が生じていることになる。しかし、そのような非物理的な乱れの減衰が生じる原因・メカニズムは、有限差分法LESの場合と格子ボルツマン法LESの場合では異なると考えられる。有限差分法LESの場合の考えられる原因・メカニズムは既述の通りであるが、格子ボルツマン法LESの場合の原因・メカニズムは今のところ解明できず、その詳細解明のための検討を今後も引き続き進めていく必要がある。



(1) 乱流強度10%の流入変動風



(2) 乱流強度20%の流入変動風

図2 乱流エネルギーの減衰過程の比較 (生成された流入変動風の流下性状)

また、図2 (1) (流入変動風の乱流強度が10%の場合) と図2 (2) (流入変動風の乱流強度が20%の場合) を合わせて比較すると、共通した解析格子依存性が見て取れる。図2 (1)、(2) の結果ともに、使用する解析格子が細かいほど、流入直後の非物理的な乱れの減衰度合いが小さくなっている。流入直後の乱流エネルギーの減衰率 (流入境界位置 ( $x_1/D = 0$ ) から基本格子の流入第1格子位置

( $x_1/D = 0.0625$ ) の間の乱流エネルギーの減衰率) を算定すると、使用する解析格子が同じ場合、減衰率は同じで、流入変動風の乱流強度が10%の場合、20%の場合ともに、基本格子を用いた場合が44%、基本格子の8倍の細分格子を用いた場合が25%、基本格子の64倍の細分格子を用いた場合が16%の減衰率となっている。以上のように、解析格子依存性は流入直後において顕著に見られているが、流入境界から少し離れた位置からの減衰過程においても解析格子依存性が生じている。有限差分法LESに流入変動風を導入する場合の解析格子依存性との比較も含めて、格子ボルツマン法LESにおける解析格子依存性についてさらに詳細に検討していく必要がある。今後、上述した問題（非物理的な乱れの減衰や解析格子依存性）の詳細解明を行い、それらの改善策の検討を行うことにより、本研究で提案する格子ボルツマン法と人工的に生成する流入変動風を組み合わせた新しい建築工学LESモデルの改良を図っていく予定である。

#### **（ 発 表 論 文 ）**

現段階ではなし。