

令和 5 年 5 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18770

研究課題名（和文）非定常流体シミュレーションを普及させる繰り返し計算のない陽的解法

研究課題名（英文）Explicit method for unsteady fluid dynamics simulation

研究代表者

池谷 直樹（Ikegaya, Naoki）

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70628213

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：建物周辺流れに対して、研究および実務用途において数値流体力学解析が積極的に活用されてきたが、瞬間風速分布を推定する非定常解析は計算負荷が大きい。そこで、本課題では、反復計算を伴う陰的解法である現在の数値流体解析手法を抜本的に見直すことで、非定常シミュレーションを普及させるために、陰的解法を代替する計算負荷の小さい陽的解法を提案する理論展開と様々な気流の条件を対象として陽的解法の有用性の確認を実施した。その結果、理論的な方法により仮想粒子を導入した擬似圧力に置き換えることで、陽的解法が可能であることを示した。さらに、複数の従来手法との比較により、提案手法が流れ場を適切に再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算負荷軽減法には、代数計算効率や計算機性能の向上などの計算機科学的方法が執られてきたが、本研究課題の遂行により、解析アルゴリズムを抜本的に改善することができた。これにより、長年適用されてきた非圧縮性流体の解析アルゴリズムを見直し、定常計算から非定常計算への転換のボトルネックを解決する足がかりを提供することができ、陽的解法の実用化に向けた大きなブレイクスルーをもたらすことができたと考えられる。また、提案手法の数値流体力学的な解釈だけではなく、明確な理論展開を行ったことにより、当該分野だけではなく、流体力学の発展に貢献できる成果を残した。

研究成果の概要（英文）：The velocity fields around buildings are solved using computational fluid dynamics approaches; however, unsteady simulations require huge numerical demands. Therefore, this research proposed a new calculation approach explicated determine the velocity field based on Eulerian governing equations. First, a new concept to consider the virtual particles is introduced to theoretically determine the propagation velocity of the sound wave and pressure values based on the numerical grid system. Second, the velocity fields were simulated using the proposed method and conventional method relying on implicit numerical approaches. The results clearly showed that proposed method can accurately reproduce the velocity field with shorter numerical simulation time. The study, therefore, was able to achieve the research aims targeted to propose a new methodology which theoretically reasonable to determine the pressure fields with less computational costs.

研究分野：建築環境工学

キーワード：陽的解法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

建物周辺における風速分布を多点同時把握できるという強みから、過去 30 年に渡って、研究および実務用途において数値流体力学解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) が積極的に活用されてきた。都市の風通しやスカラー拡散などの都市域全体を対象にするものから、ビル風のアセスメントや室内外気流と換気の評価などの建物を対象とするものまで、建築を取り巻くあらゆる空間スケールにおいて、CFD 解析は欠かすことのできない主要技術となっている。近年では、Reynolds-Averaged Navier-Stokes シミュレーションによる定常解析に加えて、ラージエディシミュレーションにより瞬間風速分布を推定する非定常解析の実用に向けた研究が積極的に進められているが、計算負荷が大きいことから、非定常数値シミュレーションが実務レベルで活用されるには時間がかかることが想像される。

大きな計算負荷は、時々刻々と変化する瞬間風速の取得という情報量の増加が一因であるが、それ以外の点で解決すべきボトルネックがある。それは、定常計算から開始された CFD 解析を基礎技術としているために、現行の計算アルゴリズムが非定常シミュレーションのために最適化されていないことである。建物周辺や屋内外の空気流動を扱う CFD 解析では、1m/s~30m/s 程度の常温常圧の気流分布を求める。この条件の音速は約 300m/s であることから、マッハ数 (気流速度/音速) は 0.1 以下となり、理論上は、空気の圧縮と膨張による密度変化を考慮の必要がない。これを根拠として、非圧縮性流体を仮定した連続式とナビエ・エトックス方程式を基礎方程式としている。この仮定は、理論上は合理的で、求解すべき変数と方程式を減らすことができるが、数値計算上は、非圧縮系解法に基づく圧力のポアソン方程式の反復計算を行う必要を生じさせてしまう。現在の非圧縮 CFD 解析の計算負荷は、このポアソン方程式の反復計算が大部分を占めることが知られている。この問題は、理論的には密度の時間変化を考慮する圧縮系解法を導入し、支配方程式を陽的離散化すれば回避することができるものの、建築周辺の空気流動を対象とした CFD 解析には、反復計算を必要としない陽的解法は未だ導入されていないという現状があった。

### 2. 研究の目的

以上のことから、反復計算を伴う陰的解法である現在の CFD 解析手法を抜本的に見直すことで、非定常シミュレーションを普及させるために、次の研究目標を設定した。すなわち、屋内外空気流動の非定常数値シミュレーションの普及のため、(1) 陰的解法を代替する計算負荷の小さい陽的解法を提案する理論展開を行い、非定常解法に特化した数値流体解析手法を提案すること、および (2) 様々な気流の条件を対象として陽的解法の有用性を示すことを目的として、陽的解法を実装した数値流体解析コードを開発すること、の二点である。

### 3. 研究の方法

(1) 理論展開を次の手順により行う。非定常計算において、盲目的に非圧縮系解法が適用されてきたのは、定常シミュレーションで開発された計算アルゴリズムが非定常シミュレーションにも継承されていることと非圧縮方程式体系が簡便であることに依ると考えられる。理論展開では、非圧縮性を仮定しない基礎方程式を見直すことで、空気の膨張と圧縮による密度変化を簡略的に表現した空気密度の最適な時間発展方程式を提案する。この際、気体分子運動論の概念を適用することで、本来分子の運動に伴う力積として定義される圧力を、計算格子幅と計算時間幅により定義される仮想粒子の力積として再定義する。この概念により、気体の状態方程式に変わる圧力-密度関係式を得る。これにより、圧縮系連続式、ナビエ・ストークス方程式、圧力-密度関係式からなる陽的 CFD 方程式体系を導出する。

(2) 応用展開を次の手順により行う。理論展開により開発した陽的 CFD 解法を、異なる流速条件のキャピティー流れに適用し、流れの速度と圧縮性により決定される音速が異なる条件での提案手法の有用性を確認する。まず、二次元キャピティー流れを対象として提案モデルの検証と実装を行う。次に、従来手法である圧力のポアソン方程式を求解する手法並びに格子ボルツマン手法の解析コードの実装を行い、提案手法の流れ場の再現性について議論する。次に、すでに提案されている擬似圧縮手法を取り上げ、計算パラメータとして設定されている音速を提案手法に置き換えた場合の流れ場の再現性に次いで議論する。以上を持って、提案手法による陽的解法の有用性を示すとともに、理論的にも整合性のとれた擬似圧縮解法の提案を完了する。

### 4. 研究成果

#### (1) 理論展開による圧力場の定式化

近年になり、格子ボルツマン方程式を基礎方程式とした全く新しい空気流動解析が行われ始めた。格子ボルツマン法は、完全陽的に速度場を求解することから、従来の非定常 CFD 解析に比べて計算負荷が極めて小さいと言われている。この事実は、同じ空気流動を求めているのにもかかわらず、微視的な格子ボルツマン法では完全陽的求解が達成され、一方で巨視的なナビエ・ストークス方程式に基づく解法では陰的な反復計算を行っていることを意味する。両手法の違いを熟考すれば、それは単に、下図の模式図に示すように、気体分子運動論に基づいた正確な圧力

を定義しているか、または、計算格子に最適な仮想圧力を用いているか、という巨視的状態量の捉え方の違いである。つまり、理論上は、計算格子間を移動する仮想粒子の概念を導入し、CFD解析における圧力の定義を見直せば、ナビエ・ストークス方程式に基づく非定常 CFD 解析においても、反復計算を伴わない完全陽的求解が達成できるはずである。

以上のことから、第一に、陽的解法により流れ場を求解する際の擬似音波に対する理論的根拠を与えることを目的として、格子ボルツマン法による圧力場と格子移動速度の関係を整理することで、仮想粒子を用いたオイラー型陽的解法の定式化を行なった。その結果、圧力  $p$  と密度  $\rho$ 、格子速度  $c$  は、図 1 に示す格子の取り方によらず、格子ボルツマン方程式から与えられるように  $p = \rho c^2 / 3$  により与えられることを示した。提案手法では、これをオイラー型の Navier-Stokes 方程式に導入することで、圧力場の変化速度を低速にし、流れ場を求解する程度の変動のみを取り扱う提案手法を Explicit Method with Virtual particle concept (EMV) として提案した。また、それに加えて、圧力場を仮想粒子によってのみ定義して良い理論的に根拠を与える目的で、分子動力学の概念に倣い、仮想粒子と分子のエネルギーおよび力積(圧力)を分離する概念を示し、分子の集合として定義した仮想粒子の体積内において、分子の内部エネルギーが分布を持たない、という条件を明確にしめした。以上により、理論展開を完成した。

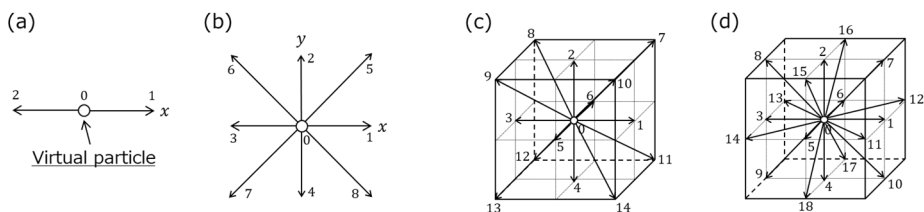


図 1 格子ボルツマン方程式による仮想粒子の移動格子と次元

## (2) 提案手法と従来手法による流れ場の比較

次に、提案手法 EMV と従来手法である SMAC および格子ボルツマン法 LBM の比較を行い、提案手法の妥当性を検証した。また、加えて、既往研究により結果を引用し相互比較を行った。解析には、天井部に移動壁を有するアスペクト比 1 の二次元キャビティを対象とした数値実験を行った。移動壁の速度、キャビティ幅を条件として、流れの Reynolds 数  $Re$  が異なる複数条件で検証を行った。計算格子数を 512 に設定し、有限体積法に基づき Staggered 格子を用いて離散化を行った。移流項の離散化には二次精度線形補間、時間項には一次精度 Euler 陽解法を適用した解析コードを作成し検証に用いた。図 2 に示す通り、提案手法が従来手法とよく一致していることが確認され、陽的解法により時間発展する CFD 手法を提案することができた。また、提案手法は従来手法に比べて解析時間が短く、物理的な根拠による式提案によりながらも、陽解法の利点を残した新しい方法として活用できる可能性が示された。

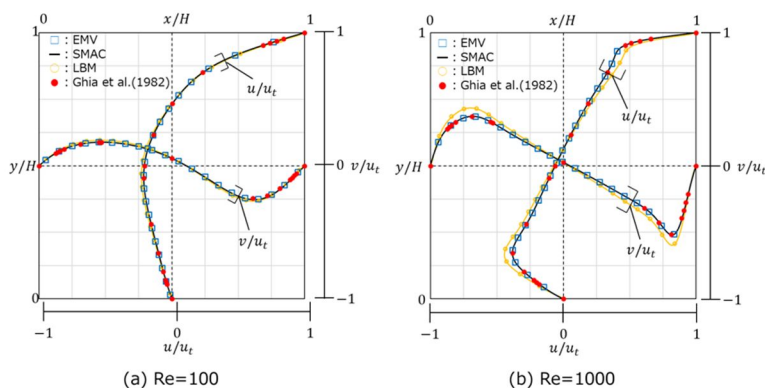


図 2 提案手法と従来手法の再現性の比較

## (3) 提案手法による音波伝播の差異に関する比較

次に、提案手法と従来手法の一つである擬似圧縮性手法との比較を行い、理論的解釈を持つ提案手法の優位性を確認した。図 3 はキャビティ中心における主風速のパワースペクトル密度の比較を示している。提案手法 EMV に加えて、従来手法の SAMC、および擬似圧縮性手法の ACM の比較をおこなった。流れ場の全体的な時間発展に寄与する低周波領域では、LBM を除く各手法でよく一致した結果が得られた一方で、高周波領域では、SMAC 法のスペクトルが滑らかに高周波側に減衰しているのに対し、圧縮性 CFD 手法では振動とピークを伴いながら減衰していることが確認された。このピーク周波数は疎密波の伝播を示す周波数と対応しており、流体の擬似圧縮性を考慮したことにより、音波の伝播に伴う流れ場の振動が見られることが確認された。加えて、提案手法ではこの音波の伝播速度が理論的な解釈により与えられるため、擬似的な音速を導入した圧縮性 CFD 手法による影響と数値的な振動を明確に区別できることが示された。

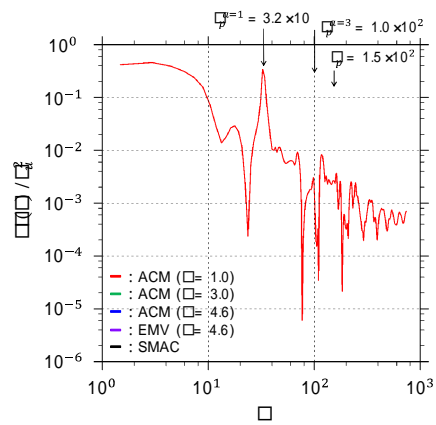


図3 提案手法 EMV とそれ以外の擬似圧縮性手法 ACM による流れ場のパワースペクトル密度

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ikegaya Naoki	4. 巻 182
2. 論文標題 Momentum-Flux Determination for Boundary Layers with Sufficient Fetch Based on Integral Equations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 225 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10546-021-00651-z	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H'ng Yin Mun, Ikegaya Naoki, Zaki Sheikh Ahmad, Hagishima Aya, Mohammad Ahmad Faiz	4. 巻 41
2. 論文標題 Wind-tunnel estimation of mean and turbulent wind speeds within canopy layer for urban campus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Urban Climate	6. 最初と最後の頁 101064 ~ 101064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.uclim.2021.101064	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagata K., Ikegaya N., Tanimoto J.	4. 巻 443
2. 論文標題 Consideration of artificial compressibility for explicit computational fluid dynamics simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110524 ~ 110524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110524	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okaze Tsubasa, Kikumoto Hideki, Ono Hiroki, Imano Masashi, Ikegaya Naoki, Hasama Takamasa, Nakao Keisuke, Kishida Takeshi, Tabata Yuichi, Nakajima Keigo, Yoshie Ryuichiro, Tominaga Yoshihide	4. 巻 202
2. 論文標題 Large-eddy simulation of flow around an isolated building: A step-by-step analysis of influencing factors on turbulent statistics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108021 ~ 108021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2021.108021	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirose C., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.	4. 巻 196
2. 論文標題 Indoor airflow and thermal comfort in a cross-ventilated building within an urban-like block array using large-eddy simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 107811 ~ 107811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2021.107811	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SANEMITSU Toshiki, IKEGAYA Naoki, HIROSE Chiyoko, TANIMOTO Jun, HAGISHIMA Aya	4. 巻 87
2. 論文標題 EFFECT OF MOMENTUM PROVISION IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ON TURBULENT STATISTICS IN URBAN BOUNDARY LAYER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 145 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.145	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HIROSE Chiyoko, IKEGAYA Naoki, HAGISHIMA Aya, TANIMOTO Jun	4. 巻 87
2. 論文標題 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR CROSS-VENTILATED AIRFLOW IN AN URBAN BUILDING	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 19 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------