

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25600153

研究課題名(和文) 構造力学と連続体力学を繋ぐメタモデリング理論の構築と有限要素法への応用

研究課題名(英文) Development and application of meta-modeling to establish link between continuum mechanics and structural mechanics

研究代表者

堀 宗朗 (HORI, MUNEO)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00219205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、建設産業の構造物を対象に、メタモデリング理論を構築し、ソリッド要素を使った有限要素法の優位性を示すことが目的である。連続体のラグランジュアンを利用し、代入する変位関数に制約を与えることで、多様なモデリング(数理問題)が導出されることを証明し、これをメタモデリング理論として確立した。

モデリングに基づき、数値解析も多様なものが可能である。ラグランジュアンの正解を与える数値解析手法がソリッド要素モデルを使う有限要素法であることを証明した。これは、構造要素モデルを使う有限要素法は、メタモデリング理論の観点からは近似解であることを意味する。ソリッド要素との比較は意味がないことを証明した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present study is to establish a meta-modeling theory, in order to indicate superiority of solid element FE analysis. Using a Lagrangian of a continuum, we prove that it is possible to make various modeling (posing a mathematical problem) by restring the argument of the Lagrangian and taking variational with respect to the restricted argument. This is the base of the meta-modeling theory.

The meta-modeling theory enables us to use various numerical analysis methods, each of which is to solve a distinct modeling. It is proved that solid element FEM analysis provides an exact solution of a continuum. This implies that other numerical analysis methods such as structure element FE analysis is an approximation of the solid element FE analysis. Comparison of a solid element EF analysis with structure element FE analysis is meaningless in the view point of the meta-modeling theory.

研究分野：応用力学

キーワード：連続体力学 構造力学 計算力学 有限要素法 ラグランジュアン ハミルトニアン

### 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の進歩は、ソリッド要素を使った大規模有限要素法解析を可能とした。部材実験が必要な梁・板要素等を使う構造モデルと比較して、連続体モデルは設計コストを大幅に削減する。しかし、建設産業では連続体モデルの利用は限定的である。

ソリッド要素有限要素法の利用を推進するため、構造力学と連続体力学の優劣を理解することが必要とされる。構造力学が連続体力学の巧妙な近似解法であることを示すことで、通常、利用される構造要素モデルと比較した、ソリッド要素モデルの優位性を証明することが望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究は、建設産業の構造物を対象に、メタモデリング理論を構築し、ソリッド要素モデルの優位性を示す。さらに、メタモデリング理論に基づき、ソリッド要素モデルの前処理・求解・後処理の改良を試みる。

連続体のラグランジュアンを対して、それに使われる変位関数に適切な制約を与える場合、制約を受けた変位関数に固有の数理問題がラグランジュアンから導出される。この数理問題の導出をモデリングと称し、同一のラグランジュアンからさまざまなモデリングが可能であることがメタモデリング理論の要諦とする。

メタモデリング理論に基づく前処理の改良とは、ソリッド要素モデルの設定の際に、構造要素モデルの特性を移植することである。求解の改良では、ソリッド要素モデルの共役勾配法の初期値として、構造要素モデルの解を使うことである。後処理の改良では、ソリッド要素モデルの解を構造要素モデルの解に近似し、断面力等が算出しやすいようにすることである。

### 3. 研究の方法

#### 平成 25 年度

前処理と後処理の改良に関して、構造要素モデルとソリッド要素モデルの単純化-複雑化関係と近似-精緻関係を利用することを試みる。前処理では、CAD から自動構築される構造要素モデルを出発点とし、構造要素をソリッド要素に置き換え、構造要素で単純化された複幾何形状を忠実に表現することでソリッド要素モデルを構築する。同様に、後処理では、膨大なソリッド要素モデルの解を構造要素モデルの解に近似する方法を確立する。近似は変位関数を制約することで行う。

ソリッド要素モデルの前処理・後処理を自動化するモジュールが必要である。モジュールを設計し、コード化に着手する。

#### 平成 26 年度

前処理・後処理の自動化のためのコード作成を進める。それと同時に、求解の改良に着

手する。大規模なソリッド要素モデルの有限要素法解析では求解に共役勾配法が用いられる。共役勾配法はマトリクス方程式の誤差を最小とする繰り返し計算のアルゴリズムであり、適切な初期値を与えると誤差が早く 0 に収束する。この初期値に、構造要素モデルの解を使う。

#### 平成 27 年度

前年に引き続き、共役勾配法の適切な初期値となるような、構造要素モデルの解を内挿してソリッド要素モデルの解の構築を目指す。なお、部材内では内挿で概ね十分であろうが、部材の接合部には特段の工夫が必要である。単純化と近似の結果、構造要素モデルの接合部の解は、そのままソリッド要素モデルの解に精緻化できないからである。応力集中部も同様である。

#### 平成 28 年度

本研究の副産物となった、連続体のハミルトニアンの利用を検討する。従来のハミルトニアンと異なり、連続体のハミルトニアンは時間と空間の微分を含む。有限要素法の定式化と効率的な数値解法を検討する。

#### 研究体制

本研究の具体的な作業は、理論構築とその理論に基づくコード作成である。理論構築は研究代表者が個人で行う。コード作成も研究代表者が行う。コード作成に関しては、適宜、専門家のアドバイスを受ける。

### 4. 研究成果

本研究の最大の成果は、建設産業に関わる数値解析において、連続体力学に基づくソリッド要素有限要素法解析の優位性を示すことができた点である。この成果は、本研究の根幹となるメタモデリング理論が完全な形で構築されたことによっている。

構築されたメタモデリング理論の要諦は、構造力学は連続体力学と完全に同一の物理則を採用していること、しかし、数理的近似の結果、異なる数理問題を解いていること、の二点である。連続体力学のラグランジュアンの変位関数に、適切な制約という数理近似を施すことで、柱・梁・曲がり梁・板・シェルの準静的・動的状態の支配方程式が導出される。この意味で、構造力学は連続体力学の近似解法と考えている。

近似解法でありながら、連続体の幾何形状が、柱・梁・曲がり梁・板・シェルである場合、構造力学の近似解は、連続体力学の正解に非常に近くなる。この意味で構造力学は連続体力学の巧妙な近似解法である。

#### メタモデリング理論と有限要素法

有限要素法の研究開発は長い歴史を持つが、連続体力学と構造力学の関係に立ち戻り、構造要素モデルを使ってソリッド要素モデルを

使う有限要素法の改良を試みた研究は新機軸である。従来、考慮もされなかったこの改良が可能であることを示す理論的根拠が、構造力学を連続体力学の巧妙な近似理論と位置付けるメタモデリング理論である。数値解析の観点では、メタモデリング理論は、ソリッド要素モデルの近似化が構造要素モデルであり、構造要素モデルの精緻化がソリッド要素モデルであることが厳密に証明された(図1参照)。

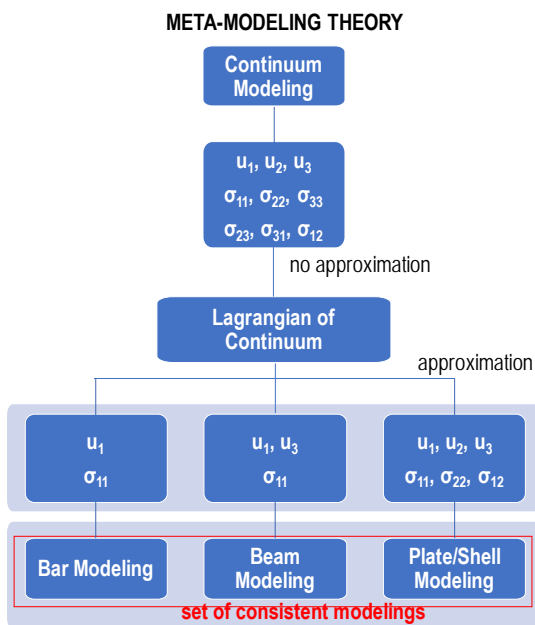


図1. メタモデリング理論の概要

メタモデリング理論に基づいて、ソリッド要素を使う有限要素法の前処理・求解・後処理を独立したモジュールとして作成した。特に、後処理のモジュールは有効である。通常、ソリッド要素の解は、ガウス点に応力テンソルが蓄積されるため、構造解析に必要な断面力を計算するためには、応力テンソルの空間分布を内装し、断面でのトラクション分布を推定することが必要であった。本研究で開発された後処理のモジュールでは、節点の変位ベクトルから、柱・梁・板等の制約された変位関数を計算し、この計算された変位関数から断面力を計算するものである。大規模なソリッド要素モデルの数値解でも、容易に変位関数を計算することが可能であり、その結果、断面力の算定も各段に効率的となった。

#### 接合部の取り扱い

構造設計の観点からは、接合部の精緻化・近似化が難しいことが判明した。構造力学では、接合部は境界条件や線形・非線形バネとしてモデル化される。変位・トラクションが滑らかに連続する接合部では、上記のような簡略化された取り扱いを精緻化することは容易である。しかし、橋梁構造物の支承のように、滑りという変位の不連続性を扱う場合には、精緻化は不可能である。むしろ、ソリッド

要素モデルの解を近似化し、適切なバネやダッシュポットに置き換えることのほうが有効である。

変位が不連続となる接合部に対し、ソリッド要素モデルを使った解析によってその構造特性を分析し、適切なバネやダッシュポットを構築するという近似化は、実は、接合部の部材実験と同様である。荷重と変位の関係を計測し、そこからバネやダッシュポットの特性を決定するという部材実験である。

精緻なソリッド要素モデルを使う接合部の数値実験は、実際の接合部の部材実験の代替となることは自明である。勿論、大きな荷重を受ける場合の、非線形挙動を再現・予測するためには、部材の詳細な材料特性の他、異種部材の接触界面での滑り特性を正確に設定する必要があり、これは容易ではない。しかし、滑り特性の効果が小さい一定の範囲の荷重であれば、比較的簡略な滑り特性を設定する数値実験は有効である。

#### 連続体のハミルトニアン導出

連続体力学と構造力学の関係とソリッド要素モデルと構造要素モデルの関係を明確にするという当初の予想を超えて、メタモデリング理論は、連続体力学そのものの進展をもたらした。これは連続体のハミルトニアン導出である(ハミルトニアン導出と、導出されたハミルトニアンの利用のため、研究期間を延長した)。

古典的解析力学の枠組みでは、ハミルトニアンは時間の関数となる物理量に対して、ラグランジュアンから導出される。さらに、ラグランジュアン方程式は時間微分を含む正準方程式に変換される。連続体の場合、時間と空間の関数となる変位という物理場を対象とするため、ハミルトニアン導出に空間微分が必要となる。連続体のハミルトニアンの正準方程式は、時間と空間の微分を含み、さらに、時間と空間の微分演算子は共役な関係にあり、高い対称性を持つことが示された(図2参照)。

連続体のハミルトニアンは、運動量ベクトルと歪テンソルの関数となり、正準方程式は運動量ベクトルと歪テンソルの時間微分が、ハミルトニアンの歪テンソルと運動量ベクトルに関する勾配の空間微分になる。この共役関係は数値解析にも利用できる。運動量ベクトルと歪テンソルを独立に時空間で離散化すると、離散化された二つの物理量の正準方程式を時空間で解くことが可能となる。

共役な物理量を独立に離散化した上で、正準方程式を時空間で解くという解法は、4次元解法としても新機軸であると思われる。また、有限要素法と個別要素法の関連を明示する粒子離散化手法有限要素法(PDS-FEM, Particle Discretization Scheme)として研究開発されてきた離散化手法の拡張ともなっている。

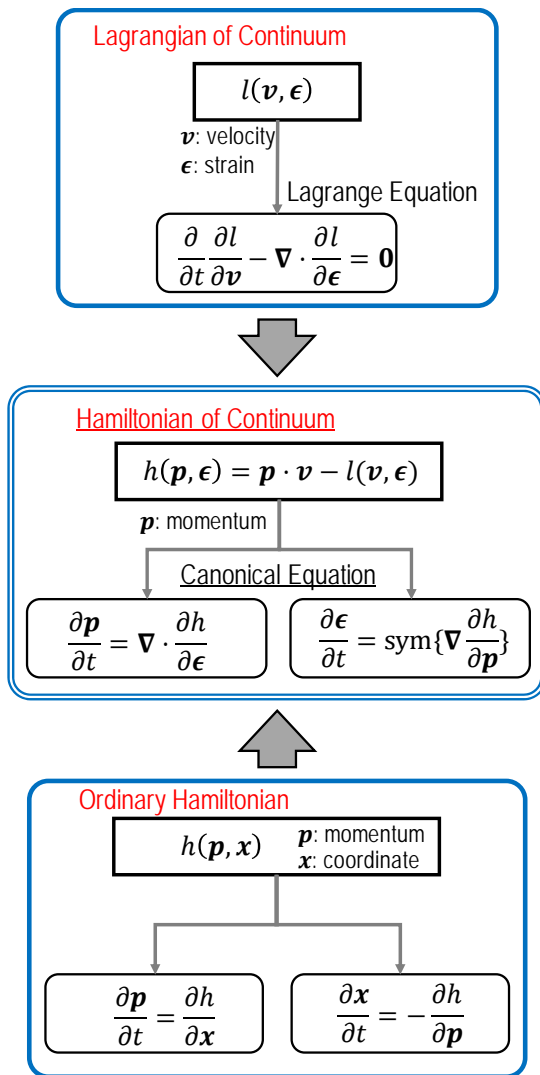


図2. 連続体のハミルトニアン

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件, 全て査読有)

1. J. A. S. C. Jayasinghe, M. Hori, M. R. Riaz, N. Tamechika, M. L. L. Wijerathne, T. Ichimura: Application of Meta-Modeling for Quality Assurance of Automated High Fidelity Bridge Structure Models, Journal of Civil Engineer, 72, 98-102, doi: 10.2208/jscejsee.72.I\_98, 2016.
2. S. Tanaka, M. Hori, T. Ichimura: Hybrid Finite Element Modeling for Seismic Structural Response Analysis of A Reinforced Concrete Structure, Journal of Earthquake and Tsunami, 10, 1640015, doi: 10.1142/S1793431116400157, 2016.
3. K. Fujita, T. Yamaguchi, T. Ichimura, M. Hori, L. Maddegadara: Acceleration of Element-by-Element Kernel in Unstructured Implicit Low-order Finite-element Earthquake Simulation using OpenACC on Pascal GPUs, Third Workshop on Accelerator Programming Using Directives, WACCPD'16 Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Programming Using Directives, 1-12, doi: 10.1109/WACCPD.2016.6, 2016.
4. T. Miyamura, S. Tanaka, M. Hori: Large-Scale Seismic Response Analysis of a Super-High-Rise-Building Fully Considering the Soil-Structure Interaction Using a High-Fidelity 3D Solid Element Model, Journal of Earthquake and Tsunami, 10, 5, 1640014, doi: 10.1142/S1793431116400145, 2016.
5. A. Sahin, R. Sisman, A. Askan and M. Hori, Development of integrated earthquake simulation system for Istanbul, Earth Planets Space, 68, 115, doi: 10.1186/s40623-016-0497-y, 2016.
6. M. Hori, L. Wijerathne, T. Ichimura, S. Tanaka: Meta-Modeling for Constructing Model Consistent with Continuum Mechanics, Journal of Japan Society of Civil Engineers, A2, 1, 269-275, 2015, doi: 10.2208/journalof-jsce.2.1\_269.
7. T. Ichimura, K. Fujita, P. E. B. Quinay, L. Maddegadara, M. Hori, S. Tanaka, Y. Shizawa, H. Kobayashi, K. Minami: Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, doi: 10.1145/2807591.2807674, 2015.
8. Miyamura, T., Akiba, H., Hori, M.: Large-scale seismic response analysis of super-high-rise steel building considering soil-structure interaction using K computer, International Journal of High-Rise Buildings, 4, 1, 75-83, doi: 10.1142/S1793431116400145, 2015.
9. J. A. S. C. Jayasinghe, S. Tanaka, L. Wijerathne, M. Hori, T. Ichimura: Automated construction of consistent lumped mass model for road network, Journal of Japan Society of Civil Engineers, 71, 4, I\_547-I\_556, 2015, doi: 10.2208/jscejsee.71.I\_547.
10. M. L. L. Wijerathne, M. Hori, T. Okinaka, H. Sakaguchi: Application of PDS-FEM for Simulating 3D Wing Crack Growth, Applied Mechanics and Materials, 553, 730, doi: 10.2208/jscejam.69.I\_125, 2014.
11. S. Homma, K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, S. Citak and T. Hori: A physics-based Monte Carlo earthquake disaster simulation accounting for uncertainty in building structure parameters, Procedia Computer Science, 29, 865, doi: 10.1016/j.procs.2014.05.077, 2014.
12. T. Ichimura, K. Fujita, S. Tanaka, M. Hori, M. Lalith, Y. Shizawa, H. Kobayashi: Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation, SC14: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 26, doi: 10.1109/SC.2014.7, 2014.
13. X. Lu, B. Hana, M. Hori, C. Xiong, Z. Xu: A coarse-grained parallel approach for seismic

- damage simulations, *Advances in Engineering Software*, 70, 103, doi:10.1016/j.advengsoft.2014.01.010, 2014.
14. M. Hori, L. Wijerathne T. Ichimura, S. Tanaka: Meta-Modeling for Constructing Model Consistent with Continuum Mechanics, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, A2, 275, doi: 10.2208/journalofjsce.2.1\_269 2.1\_269, 2014.
  15. H. O-Tani, J. Chen, M. Hori: Automatic Combination of the 3D Shapes and the Attributes of Buildings in Different GIS Data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 70, 2, 639, doi: 10.2208/jscejam.70.I\_631, 2014.
  16. J. A. S. C. Jayasinghe, S. Tanaka, L. Wijerathne, M. Hori, T. Ichimura: Rigorous Conversion of Solid and Beam Element Solutions Based on Meta-Modeling, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 70, 2, I\_233, doi: 10.2208/jscejam.70.I\_223, 2014.
  17. 田中 聖三・古宇田 剛史・堀 宗朗・孫 方 涛: ソリッド要素有限要素法を用いた RC 構造部材の弾塑性破壊解析の可能性, *コンクリート工学論文集*, 25, 199, doi: 10.3151/crt.25.191, 2014.
- 〔学会発表〕(計 15 件)
1. M. Hori: UNCERTAINTY AND PREDICTABILITY - UTILIZATION OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING FOR UNCERTAIN PROBLEMS -, FUKUSHIMA SESSION, Enhancement of Risk-Informed Decision Making against External Natural Events Toward Practical Implementations – 2016 ANS Winter Meeting and Nuclear Technology Expo Nevada, USA, November 8-12, 2016.
  2. M. Hori, T. Ichimura, K. Fujita and L. Wijerathne: EARTHQUAKE HAZARD AND DISASTER SIMULATION USING URBAN AREA MODEL OF 10.7x10<sup>9</sup> DE-GREE-OF-FREEDOM, Exascale Computing XXIV ICTAM, Montreal, Canada, 21-26 August, 2016.
  3. M. Hori: REGIONAL SCALE MODELING IN JAPAN - INTEGRATED EARTHQUAKE SIMULATION, Regional Scale Earthquake Hazard and Risk Assessments, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA, March 28, 2016.
  4. M. Hori, M. Riaz, H. Motoyama, H. Akiba and Y. Ohtsuka: CONSISTENT MODELING FOR SSI ANALYSIS USING HIGH PERFORMANCE COMPUTING, 10th Nuclear Plants Current Issues Symposium Assuring Safety against Natural Hazards through Innovation & Cost Control, Marriott City Center, North Carolina, USA, December 11-14, 2016.
  5. M. Hori: APPLICATION OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING TO EARTHQUAKE HAZARD AND DISASTER ASSESSMENT, 1st International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, November 29, 2016.
  6. M. Hori: APPLICATION OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING TO EARTHQUAKE HAZARD AND DISASTER ESTIMATION, UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami, UK Embassy, Tokyo, Japan, August 1, 2016.
  7. M. Hori: Application of High Performance Computing to Seismic Structural Response Analysis of Nuclear Power Plant Building, Civil Nuclear Energy Research and Development Working Group (CNWG) Technical Meetings, Argonne National Laboratory, Illinois, USA, January 27-29, 2015.
  8. M. Hori: Application of High Performance Computing to Earthquake Engineering, COMPDYN 2015 (5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering), Crete, Greece, May 25-27, 2015.
  9. M. Hori: Application of High Performance Computing to Earthquake Engineering Problems, UCBNE at the Pacific Rim Forum on Earthquake Resilience of Nuclear Facilities, California, USA, June 8-9, 2015.
  10. M. Hori: Seismic Structural Response Analysis of Nuclear Power Plant Building Using High Performance Computing, SMiRT-23 (Structural Mechanics in Reactor Technologies 2015), Manchester, UK, August 10-14, 2015.
  11. M. Hori: High Performance Computing Challenges of Japan, 2015 ANS Winter Meeting and Nuclear Technology Expo, Washington, DC, USA, November 8-12, 2015.
  12. M. Hori, T. Ichimura, W. Lalith and S. Tanaka: Development of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster Estimation, COMPSAFE2014, Sendai International Center, Sendai, Japan, April 12-14, 2014.
  13. M. Hori: The Great East Japan Earthquake Disaster and integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster estimate, 14th IACMAG, The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Kyoto International Center, Kyoto, Japan, September 22-25, 2014.
  14. M. Hori: Utilization of Super Computer Simulation for Earthquake Disaster Mitigation and Reduction TIMES 2014, The International Emergency Management Society, Toki Messe, Niigata, Japan, October 20-23, 2014.
  15. M. Hori: Application of High Performance Computing to Earthquake Engineering Problems, The 14th Japan Earthquake Engineering Symposium, Special Session, Makuhari Messe, Chiba, Japan, December 4-6, 2014.

〔図書〕(計2件)

1. M. Hori (Section Editor), Encyclopedia of Earthquake Engineering (Beer, M., Kougioumtzoglou, I.A., Patelli, E., Au, I.S.-K., Eds.), 308-489, Springer-Verlag, 2015.
2. S. Yoshimura, M. Hori, & M. Ohsaki (Eds.), High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake/Tsunami Engineering, 1-467, Springer International Publishing, 2015.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

1. 東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/LsETD>
2. 東京大学地震研究所 堀 - 市村 - ラリスグループ, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sensing\\_and\\_simulation/J/index](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sensing_and_simulation/J/index)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 宗朗 (Hori Muneo)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：00219205