

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360353
 研究課題名（和文） 大次元問題高速解析法を用いたマルチ接合界面設計システムの開発
 研究課題名（英文） Development of Design System for Multi-Joint Interface by Using High-Speed Numerical Method for Ultra-Lager Scale Problems
 研究代表者
 芹澤 久（SERIZAWA HISASHI）
 大阪大学・接合科学研究所・准教授
 研究者番号：20294134

研究成果の概要：金属－セラミックス－高分子間の同材および異材間の新接合技術の効率的な開発のために有用なマルチ接合界面設計システムの開発を目的として、複雑現象を高速で解析可能な大次元問題高速解析法を開発し、本解析法を用いて、従来の構造解析ソフトでは困難あるいは不可能であった、発砲アルミニウムの力学特性や鋳造部品の熱変形の解析に成功するとともに、電磁シーム圧接法による鉄－アルミニウム合金接合体の接合性可否の主要因子を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 材料加工・処理

キーワード：接合、シミュレーション工学、モデル化、制御工学、計算機システム

1. 研究開始当初の背景

高度IT社会においては、電子デバイスの更なる高集積化や、生態環境への影響を制御するための電磁波制御デバイスの開発が求められている。また先端医療分野においては、血管内を直接稼動して治療を行うようなナノ生態医療用マイクロマシンの開発が求められている。これらのナノおよびマイクロスケールの機器設計および開発においては、これまでは不可能とされていた金属－セラミックス－高分子間の同材および異材接合技術の開発が必要不可欠である。これらの新接合技術の効率的な開発のためには、実験的手法だけでなく、計算機を用いた計算科学的手法も必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、計算科学的手法に基づいたナノレベルでの組織制御により、様々な金属－セラミックス－高分子間の同材および異材接合技術を開発するとともに、開発した新接合技術を用いて、高集積電子デバイス、電磁波制御デバイス、ナノ生態医療用マイクロマシンなど、様々なニーズに応じたナノ・マイクロ機械を設計することである。この最終目標を達成する上で必要不可欠であり、しかも効率的な新接合技術の開発のために有用な、大次元問題高速解析法を用いたマルチ接合界面設計システムの開発が、本研究課題の目的である。

3. 研究の方法

(1) 金属-セラミックス-高分子間の同材および異材接合界面における複雑現象を効率的に解析する手法として、従来は二次元等方弾性体のみにおいて適用可能であった、自己相似階層分散型演算法に基づいた大次元問題高速解析法を改良し、異材および三次元問題に適用可能な解析法の開発を行った。また、従来は1台のパーソナルコンピュータを用いて、約1億自由度の問題が解析可能な大次元問題高速解析法に対して、並列化アルゴリズムを開発し、更なる高速化を図った。

(2) 接合界面の評価において必要不可欠な接合強度を、相対的評価ではなく、直接、数値解析により予測ならびに評価するために、表面の現象を直接モデル化した界面要素を、大次元問題高速解析法に導入するとともに、解析法の実証を行った。

(3) 異材接合体の接合性を解析的に検討する問題の一例として、電磁シーム圧接法による鉄-アルミニウム合金接合体を対象に、大次元解析を行い、接合性の可否について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 自己相似階層分散型演算法は、図1に示すように、数値解析において、場を支配する偏微分方程式を連立方程式に変換して解析する際、全体に対応した大次元連立方程式を解くのではなく、5~100次元程度の同じ形の小規模な連立方程式を、階層的に繰り返し解くことにより解を求める方法である。

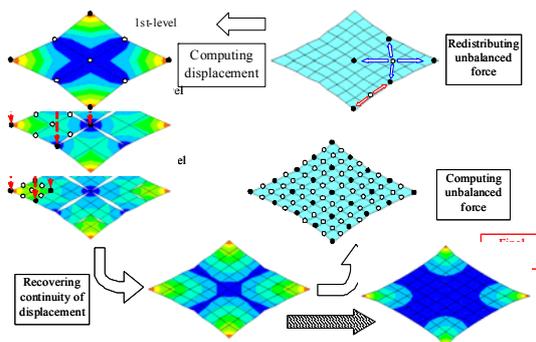


図1 自己相似階層分散型演算法の概略図

解析対象となる問題が均質体の場合には、解くべき小規模な連立方程式が、階層に関係なく同一であるが、本研究の解析対象である異材の場合には、各階層での剛性行列を最下層から順番に構築する必要があり、上位階層の剛性および節点力を、下位階層の剛性および節点力から静的縮約を用いて決定する方法を構築した。また、各階層内で小規模な連立方程式に分けて解析することにより発生する、分離された各領域間に生じる変位の不

連続性を解決する手法として、隣り合う領域間の節点剛性比に対応した節点変位修正法を構築した。これら新たな二種類の方法により、異材などの不均質体に対しても、自己相似階層分散型演算法に基づいた大次元問題高速解析法を適用することが可能となった。なお、開発した不均質体が解析可能な本解析法は、極端な例として、解析対象のモデルの一部が空間的に存在しない場合には、単にその部分の剛性を0として解析を実施することが可能である。つまり、有限要素法を用いた複雑な構造物を対象にした解析において必要な、メッシュ分割生成の困難さが、本解析法においては不必要であり、新たな解析法として、非常に将来有望であると期待される。

さらに、本解析法の適用例として、図2のような発泡アルミニウムの力学特性解析を実施した。具体的には、先進のX線CTスキャンデータより、直接、図3のような解析モデルを生成し、モデル全領域を大次元問題高速解析法における解析領域として設定し、両端引張り条件下での変位分布を図4のように得ることに成功した。



図2 発泡アルミの外観図

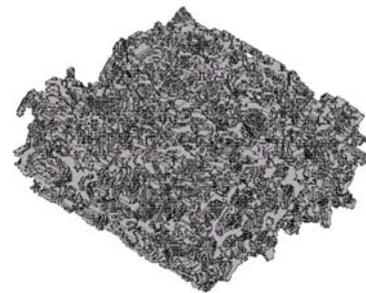


図3 X線CTスキャン結果より生成した解析モデル

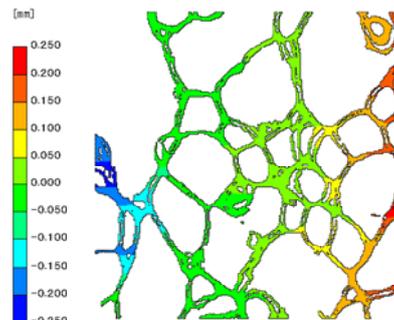


図4 両端強制変位により生成した発泡アルミニウム内の変位分布図

(2) 自己相似階層分散型演算法に基づいた大次元問題高速解析法では、各階層内でモデル全体を小領域に独立に分離して解析を実施する手法であるため、解析時間の高速化の一つとして、並列化が有効な手法であると考えられる。そこで、二次元問題を例に、最上位階層の領域を4 x 4の16領域に分割し、それぞれの領域を、8台のパーソナルコンピュータを用いて、並列的に解析し、さらに最上位階層を1台にパーソナルコンピュータにより解析する手法を開発し、1台のパーソナルコンピュータのみを用いた場合とで、解析速度の比較を行った。解析精度に相当する自由度と解析速度の関係を図5に示す。本解析手法においては、8台の並列化されたパーソナルコンピュータと最上位階層を解析する1台のパーソナルコンピュータとの間のデータ転送を、高速のネットワーク回線を用いたが、同一コンピュータ内で行われるデータ転送速度よりも遅いため、約1万自由度までは、1台のコンピュータのみの解析のほうが高速であった。しかしながら、約百万自由度においては、並列化により約5.6倍の高速化を図ることができた。最近の先進コンピュータのような1台のコンピュータ内に同時に8個の計算処理を可能な計算能力を持つコンピュータを用いた場合には、今回のような並列化したコンピュータ間のデータ転送速度の問題は解消され、並列化した処理数に応じた高速化が図れると期待され、本解析法で用いた並列化が非常に効果的に働くことが期待される。

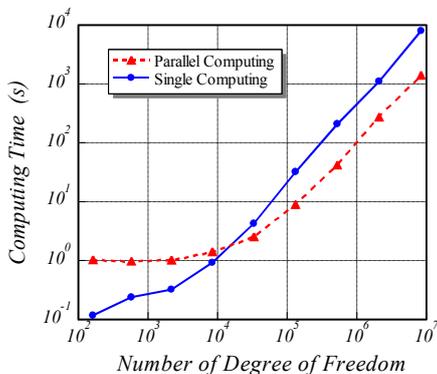


図5 並列化による解析速度の変化

(3) 三次元の不均質材料が解析可能であり、並列化も可能な自己相似階層分散型演算法に基づいた大次元問題高速解析法を開発したが、本解析法では、下位階層で発生する残差力を上位階層に配分する方法、ならびに開発した各階層内で分離された領域間に生じる変位の不連続性を解決するための節点変位修正法に対して、明確な理論的裏づけがないために、一部の問題において収束性が極めて悪いという現象が生じる。そこで、自己相似階層分散型演算法においては、各階層にお

いける小領域ごとに行っていた解析を、各階層の節点ごとに解析する手法に改めた、新たな階層型マルチグリッド法に基づいて大次元問題高速解析法を開発を行った。本解析法では、節点ごとにおける釣合方程式および残差力の計算式を、エネルギー原理である最小ポテンシャルエネルギー原理に基づいて導出しており、理論的裏づけが明確化されている。本解析法の概略図を図6に示すが、この図に示す通り、自己相似階層分散型演算法では生成した、小領域間の変位の不連続性は存在しない。

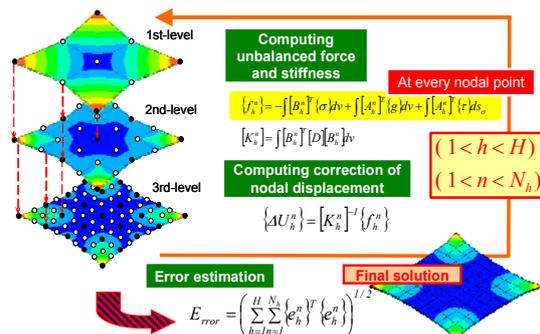


図6 階層型マルチグリッド法概念図

二次元正方形板の4頂点に強制変位を付与させる二元問題、ならびに立方体の8頂点に強制変位を付与させる三次元問題を対象に、自己相似階層分散型演算法 (FMG法) および階層型マルチグリッド法 (HMG法) に基づいた大次元問題解析法の解析速度について比較を行った結果、図7、8に示すように、二次元問題においては、同程度の解析速度であったが、三次元問題においては新たに開発したHMG法の方が10分の1程度にまで、低速化する結果となった。この結果は、本研究の開発目標である、大次元問題高速解析法とは相反する結果であるが、複雑形状を対象にした解析においては、HMG法でなければ解析不可能な問題もあり、実現象を対象にした解析においては、HMG法の方が将来的に有望であると考えられる。

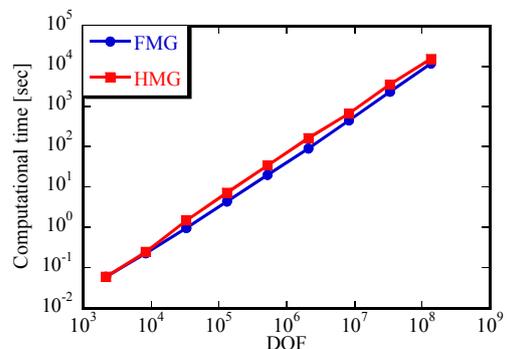


図7 二次元問題でのFMG法とHMG法との解析速度の比較結果

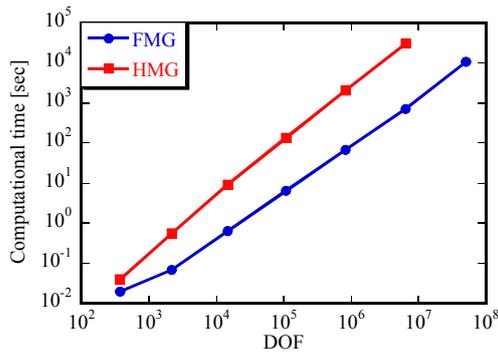


図8 三次元問題でのFMG法とHMG法との解析速度の比較結果

また、本解析法と汎用有限要素法との比較検討を目的として、構造物内に不均一特性が発生する、鋳造部品の熱変形解析を行った。汎用有限要素法としては、ABAQUSを用いた。図9に両解析法を用いて得られた、鋳造後のミーゼス応力分布図の一例を示す。両者の分布図はほぼ同じ結果となっており、階層型マルチグリッド法に基づいた大次元問題解析法の解析精度が保障できることを明らかにした。

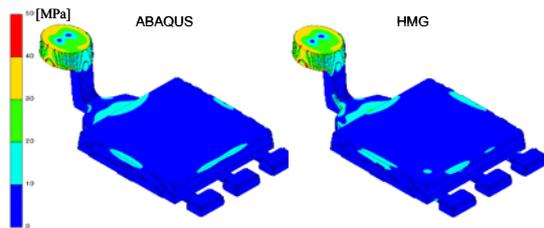


図9 ABAQUSおよびHMG法で得られた鋳造部品のミーゼス応力分布図

さらに階層型マルチグリッド法は、自己相似階層分散型演算法と同様、小領域への分割数、つまり解析時の階層が増えるほど、解析モデルの総要素数が増え、解析精度も向上することから、解析精度が解析時間に及ぼす影響について検討した結果を表1に示す。

表1 ABAQUSとHMG法との解析時間の比較

Level of HMG	Total number of D.O.F. (ratio)	Total number of elements	Computational time (sec)	
			HMG (ratio)	ABAQUS (ratio)
7	97,293 (1.0)	22,816 (1.0)	30 (1.0)	166 (1.0)
8	548,247 (5.6)	145,975 (6.4)	217 (7.7)	1567 (9.4)
9	3,371,991 (35)	983,387 (43)	1338 (45)	unavailable

総要素数2万以上のいずれの場合についても、開発した階層型マルチグリッド法の方が解析時間が短時間であり、しかも総要素数100万の場合には、ABAQUSでは、1台のパーソナルコンピュータでは解析することができなかったが、本解析法では解析することができた。つまり、汎用有限要素法と比較して、高速で高精度な解析が可能であることを実

証することができ、今後、本研究の最終目標である様々な種類の材料から構成される接合構造体だけでなく、様々な複雑構造物の現象を解析する上で、新たに開発した階層型マルチグリッド法に基づいた大次元問題解析法が、非常に有用であると考えられることを明らかにした。

(4) 接合体の接合強度も含めて、様々な破壊現象を、直接、数値解析的に予測可能な手法の一つである、表面の現象を直接モデル化した界面要素を、開発した階層型ハイブリッド法に基づいた大次元問題解析法に、図10に示すような概念に基づいて導入した。具体的には、階層型ハイブリッド法の最下層における、破壊が生じる可能性がある想定される一部の要素について、その要素内に、通常の有限要素と界面要素とを含む構造を仮定して解析する手法である。

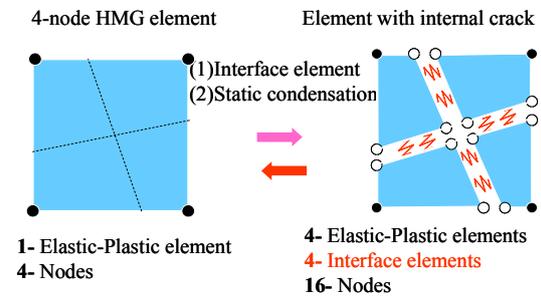


図10 一つの要素内部に界面要素を導入する手法の概念図

本解析法の実証を目的として、図11に示すような、二次元平板上に三方向の亀裂と円形の亀裂が想定した問題を対象に、解析を行った。解析で得られたミーゼス応力分布図を図12に示す。いずれの場合も想定した亀裂の一部、あるいはすべてが剥離した解析が行われており、剥離した部分においては、応力の伝播がなく、物理的に正しい解析が可能であることを実証することができた。本手法は、階層型ハイブリッド法における最下層の任意の要素に、破壊が生じる可能性がある想定した解析が可能であることから、本研究の最終目標である様々な種類の材料から構成される接合構造体の接合強度を、数値解析的に予測可能な手法として有望であると考えられる。

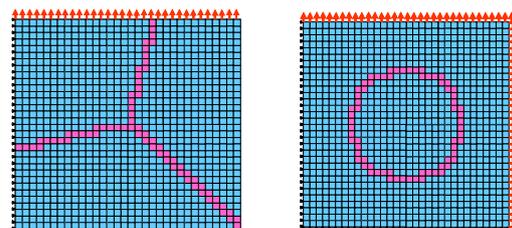


図11 亀裂を想定した解析モデル

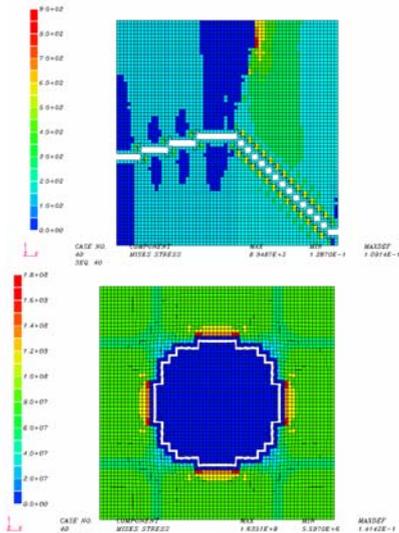


図 1 2 亀裂を想定した解析例

(5) 鉄とアルミニウム合金とは、同じ金属材料であるにも係わらず、材料学的に両者の間には、脆い金属間化合物が生成するため、その接合が困難なことが知られているが、最近、両者を接合する手法の一つとして、電磁シーム圧接法が提案されている。しかしながら、その接合メカニズムは不明であるため、現状では、実験的な試行錯誤により接合条件を決定しており、本研究課題である最適な接合界面設計システムの解析対象として適当であると考えられる。そこで、実験的に接合条件の主要因子として考えられている、接合角度および接合速度が、接合プロセスに及ぼす影響について、解析を行った。なお、解析に際しては、鉄に対してアルミニウム合金が大きく変形することが実験的に分かっているため、鉄はラグランジュモデルを用いて、アルミニウム合金はオイラーモデルを用いてモデル化し、オイラー・ラグランジュ連成法による大次元解析を行った。

その結果、接合条件により、図 1 3 に示すように、接合界面近傍に生成する塑性ひずみ分布が 2 種類に分離されることが分かった。なお、接合条件と分離される形態との対応を表 2 に示す。

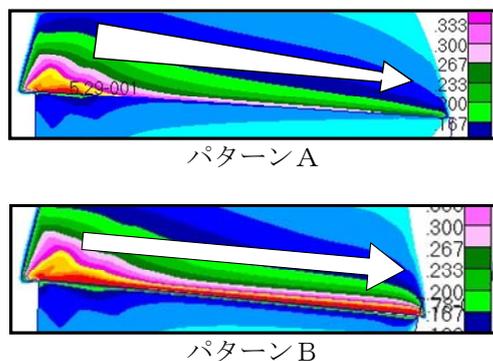


図 1 3 接合界面近傍の塑性ひずみ分布

表 2 接合角度および接合速度が塑性ひずみ分布に及ぼす影響

Collision Angle	Collision Velocity			
	100 m/s	200 m/s	300 m/s	500 m/s
0.5 degree	A	A	A	A
1 degree	A	A	A	A
2 degree	B	A	A	A
3 degree	B	B	A	A
5 degree	B	B	B	A
7 degree	-	B	B	B
10 degree	-	-	B	B

また、実験的に本解析で得られたパターン B に相当する塑性ひずみ分布が得られる条件において、良好な接合が得られていることが分かっていることから、この界面近傍の塑性ひずみ分布形態が、接合性の可否を決定する主要因子であると考えられることを実証した。さらに本解析結果より、パターン A とパターン B の境界領域が、最も省エネルギーで接合を生成する条件であることも明らかになっており、これまで実験的な手法でしか同定することのできなかった最適な接合条件を、解析的に同定した結果として、本解析結果は非常に意義のある結果と考えられる。

今後、本研究で開発した、様々な演算法に基づいた大次元問題高速解析法は、これまでは接合が困難とされてきた、金属-セラミックス-高分子間の同材および異材接合技術の開発において、最適な接合界面を設計する上で非常に有用な解析法であると考えられ、その社会的意義も極めて高いと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① H. Serizawa, A. Kawahara, S. Itoh and H. Murakawa, "Development of a New Computational Method for Solving Inhomogeneous and Ultra Large Scale Model", Corrosion, Wear, Fatigue and Reliability of Ceramics, Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol.29, Issue 3, (2008), pp.173-179, 査読有り。
- ② H. Murakawa and H. Serizawa, "Arrest Analysis of Propagating Brittle Crack in Welded Structure", Proceedings of International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading 2008, (2008), pp.67-71, 査読無し。
- ③ S. Itoh, K. Taguchi, Y. Umemoto, H. Serizawa and H. Murakawa, "Hierarchical Multi-Grid Method for Ultra Large Scale Problem Based on

Variational Theorem”, Proceedings of the 15th International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'08), (2008), pp.49-55, 査読無し.

- ④ H. Murakawa, H. Serizawa and S. Itoh, “Hierarchical Multi-Grid Method for Ultra Large Scale Computation”, Proceeding of 2007 International Forum on Welding Science and Engineering, (2007), pp.155-159, 査読無し.
- ⑤ H. Murakawa, H. Serizawa, M. Tejima, K. Taguchi and S. Itoh, “Stress Analysis of Geometrically Complex and Ultra Large Scale Model by Fractal Multi-Grid Method”, Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials II, Ceramic Transactions, Vol.198, (2007), pp.21-26, 査読有り.
- ⑥ H. Murakawa, K. Taguchi, M. Shibahara and H. Serizawa, “Fractal Multi-Grid Method for Ultra Large Problems Based on Hybrid Variational Principle”, Proceedings of the 2007 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science, (2007), pp.1902-1907, 査読無し.
- ⑦ H. Murakawa, H. Serizawa, M. Tejima and K. Taguchi, “Fractal Multi-Grid Method for Ultra Large Scale Mechanical and Thermal Simulations”, Transactions of JWRI, Vol.35, No.1, (2006), pp.71-75, 査読無し.

[学会発表] (計3件)

- ① 芹澤 久, “電磁圧接法における力学的接合メカニズムに関する解析的検討”, 日本金属学会 144 回大会, 東京工業大学(東京), 2009/3/29,
- ② H. Serizawa, “Numerical Simulation of Interface Formation in Magnetic Pressure Seam Welding”, The IUMRS International Conference in Asia 2008, Nagoya, Japan, 2008/12/10.
- ③ 芹澤 久, “電磁圧接法における力学的接合メカニズムに関する基礎的検討”, 日本金属学会 143 回大会, 熊本大学(熊本), 2008/9/24.

6. 研究組織

(1)研究代表者

芹澤 久 (SERIZAWA HISASHI)
大阪大学・接合科学研究所・准教授
研究者番号：20294134

(2)研究分担者

村川 英一 (MURAKAWA HIDEKAZU)
大阪大学・接合科学研究所・教授
研究者番号：60166270
柴柳 敏哉 (SHIBAYANAGI TOSHIYA)
大阪大学・接合科学研究所・准教授
研究者番号：10187411