

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360059

研究課題名（和文） 高速マルチスケール動的解析法の開発とパワーMEMS設計への応用・検証

研究課題名（英文） Development of Fast Multiscale Dynamic Simulation Method and Its Application and Verification in Power MEMS Design

研究代表者

高野 直樹（TAKANO NAOKI）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10206782

研究成果の概要（和文）：基本構造の多数繰返しからなる構造体の高速動的解析法の開発と、マイクロガスタービンエンジン MEMS 燃焼器の設計・加工・燃焼実験を目的としている。モデル縮約により PC で並列高速計算が行える上に、荷重条件の不確かさを考慮して低確率でしか起きない事象も逃さずに予測できる実用的手法と、保炎器の約 1,000 個ものノズルの整列不整の影響を予測する確率均質化法などを開発した。燃焼実験において約 1150K～1350K の安定燃焼を確認できた。

研究成果の概要（英文）：This study aims at the development of fast dynamic analysis method for a structure consisting of very large number of repeated unit microstructures and at the design, fabrication and experiment of MEMS combustor. With the use of model order reduction technique, a developed computational method is practical because it allows fast computing by parallel processing on a standard PC and also because it is capable of predicting the phenomena that may occur with very low probability considering the uncertainties of loading condition. Also stochastic homogenization method was developed that can predict the effect of misalignment of approximately 1,000 nozzles in the flame holder. In the experiment, stable combustion with the temperature 1150K to 1350K was confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：計算力学、MEMS、材料力学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：動的解析、モデル縮約法、マルチスケール解析、MEMS、不確かさ

1. 研究開始当初の背景

1990年代後半から複合材料など不均質体のマルチスケール解析が盛んに研究され、研究代表者は均質化法の実問題における検証や均質化法の欠点を補う重合メッシュ法の

提案などを行い、この分野をリードしてきた。しかし、研究代表者も含め、解析はすべて静的解析にとどまっていた。そこで、本研究では動的マルチスケール法を確立し、高速化を図ることで実用性も兼ね備えた手法開発を

目的とした。

適用分野も従来の複合材料だけでなく、微視的な繰返し構造からなる一般的な構造体に拡大すべく、今後の市場拡大が期待される MEMS 分野に注目し、中でも実現が極めて困難とされたパワーMEMS の一つであるマイクロガスタービンエンジンへの適用を計画した。MEMS 燃焼器の数値解析・設計事例は米国やフランスでいくつか報告されていたものの、マルチスケールの立場での事例はなく、単純化されたモデルで実施されるにとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究では、微視的な基本構造の多数繰返し構造からなる構造体の動的解析を高速に行うべく、マイクロモデルとマクロモデルを用いる高速マルチスケール動的解析法の提案を第一の目的とする。

ここでは、周期的な微視構造の特性を反映したマクロ特性の予測、マクロな境界条件下でのマイクロ挙動の予測を行う。境界条件には、単なる力学問題だけでなく、熱 - 流体 - 構造連成も視野に入れる。さらに、微視構造中に含まれる不確かさを考慮した信頼性設計手法の基礎とする。こうした解析は計算コストが膨大となることが予想されるため、モデル縮約による高速化を図る。

次に、上記手法をパワーMEMS の一つであるマイクロガスタービンエンジンの MEMS 燃焼器の設計に応用し、有効性を検証することを第二の目的とする。実際に MEMS 加工による製作と燃焼実験を行う。

3. 研究の方法

大別して、(1)高速マルチスケール動的解析法の開発と(2)MEMS 燃焼器の実験を同時並行して行う。

(1) 高速マルチスケール動的解析法の開発

モデル縮約法と研究代表者の独自手法である重合メッシュ法を核とし、以下の項目について検討を行う。

モデル縮約法と重合メッシュ法の併用解法の開発

Arnoldi 法に基づくモデル縮約法と重合メッシュ法を併用したマルチスケール法を提案し、その有効性を示す。

荷重条件の不確かさを考慮したモデル縮約法

運転時の信頼性を考えた設計ツールとして、荷重条件の不確かさを加味した手法への発展を探る。

低確率でしか発生しない事象に焦点を当てたサンプリング法の開発

複数の不確かさのパラメータの組合せにより起こりうる想定外の事故を逃さず予測できるよう発展させる。

確率均質化法の開発

重合メッシュ法のマクロモデルに用いる均質化特性の解析においても、ミクロ構造中に含まれる不確かさを考慮した確率均質化法の開発を行う。

エッチングシミュレーション

MEMS 燃焼器の設計には構造解析と熱流体解析の両者が必須である。ここでは、熱流体解析ソフトウェアを応用し、独自モジュールを追加することにより、新たなエッチングシミュレーション法を開発する。

(2) MEMS 燃焼器の製作および実験

冷却流分岐型予混合燃焼器の設計・製作および燃焼実験を行う。このため、以下の項目に取り組む。

燃焼流の解析

流体解析により保炎器に設置される約 1,000 個のノズルを通過する燃焼流の解析を行い、逆流が起きないことを確認するとともに、ノズル通過後の渦の解析を行い、着火点の決定と燃焼が持続するか否かの検証を行う。

冷却流路の設計

冷却流の流れ解析を行い、冷却流路の設計を行う。

熱流体 - 構造連成解析

連成解析により熱変形や、ノズル周辺の詳細な応力解析を行う。

MEMS 燃焼器の製作と燃焼実験

MEMS プロセスにより燃焼試験機の製作と実験を行う。

4. 研究成果

「研究の方法」の各項目に対応して、以下に研究成果をまとめる。

(1) 高速マルチスケール動的解析法の開発

以下には、開発した解析法の概要と、MEMS 燃焼器設計への応用をまとめて示す。

モデル縮約法と重合メッシュ法の併用解法の開発

Arnoldi 法に基づくモデル縮約法と重合メッシュ法を併用したマルチスケール法により、MEMS 燃焼器の保炎器に約 1,000 個設けるノズルをモデル化した。静的応答下で精度検証を行った後、動的解析を行い、ノズル周辺の応力を詳細に求めることができた。

なお、重合メッシュ法の計算で問題となる数値積分法についても基礎研究を行い、高精度計算手法を提案した。

荷重条件の不確かさを考慮したモデル縮約法

荷重の時間変化と荷重方向に不確かさを考慮し、モデル縮約法の一つの BSOAR(Block Second Order Arnoldi)法を用い、メモリ削減による並列化が高速動的モンテカルロシミュレーションに有効であることを実証した。10,000 ケースのモンテカルロシミュレ-

シオンが通常の PC で経過時間約 100 h で実行できた。モデル縮約法で問題となる基底ベクトルの決定に要する時間は、モンテカルロシミュレーションにおいて問題にならないことを見出した。

低確率でしか発生しない事象に焦点を当てたサンプリング法の開発

の動的モンテカルロシミュレーションにおいて、 10^{-4} という低確率でしか発生しない事象を逃すことなく予測できるサンプリング法 (Stepwise Limited Sampling: SLS) を提案した。 の例題においてさらに3倍の高速化を達成することができた。下図 1 は、例題として解析した門形フレーム構造に対する Goodman 線図であり、SLS で予測した結果は疲労限度線に近い応力域にプロットされている。これは、下図2のように、荷重値と荷重方向というパラメータの組合せの範囲を限定したサンプリング法により効率的に得られる。事故発生が想定外とならない信頼性向上に寄与する実用的手法を開発した。

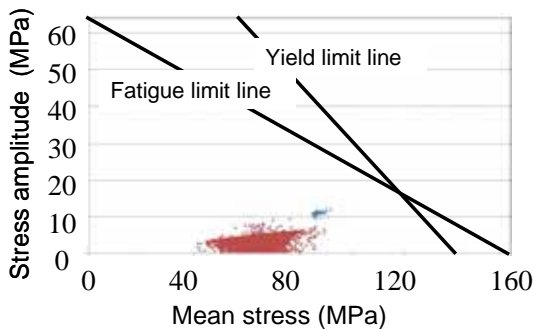


図 1 新規サンプリング法による結果

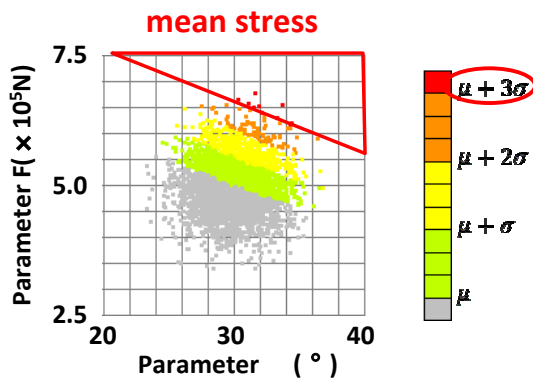


図 2 新規サンプリング法の典型例

確率均質化法の開発

1 次展開に基づく確率均質化法において、ミクロ構造における素材のヤング率に正規分布を仮定してマクロ特性に及ぼす影響を予測することができた。本研究で制作した MEMS 燃焼器では接着剤を用いて組み立てていることから、接着剤のヤング率のばらつきの影響を計算した。また、保炎器ノズルの周期配列に加工上の理由でずれが生じた場合に、マクロ特性に与える影響も予測すること

ができた。

エッチングシミュレーション

MEMS は加工プロセスと形状を同時に設計する必要があるため、設計支援ツールとしての新たなエッチングシミュレーション法を開発した。従来のエッチングシミュレーションと異なり、エッチャントの流動場を計算することができ、プロセス中のミクロ挙動の理解にも寄与することができた。本シミュレータは、市販 CFD コード STREAM (株式会社ソフトウェアクレイドル製) の付加モジュールとして、産業界にも提供できる形に仕上げた。付加モジュールとは、計測不可能なエッチャントの特性を、予備試験から応答曲面法を用いて自動同定するものである。

(2) MEMS 燃焼器の製作および実験

図 3 に示すように、上記および「研究の方法 (2) ~ 」の解析により設計した冷却流分岐型予混合燃焼器を、MEMS プロセスの ICP-RIE 加工と接着により製作を行った。図 4、5 には製作した燃焼器を、図 6 には実験装置を示す。保炎器のノズル前後で逆流が起きないことを確認し、着火点は流入口から一番遠い燃焼器端部に設置することを決定した。熱応力解析結果に基づき必要な補強を行った。また、冷却流がよどむことがないように流路設計を行った。図 7 に示す通り、当量比 0.6 ~ 0.8 の広範囲の条件下で着火後数秒以内の実測温度として約 1150K ~ 1350K の安定燃焼を確認することができた。

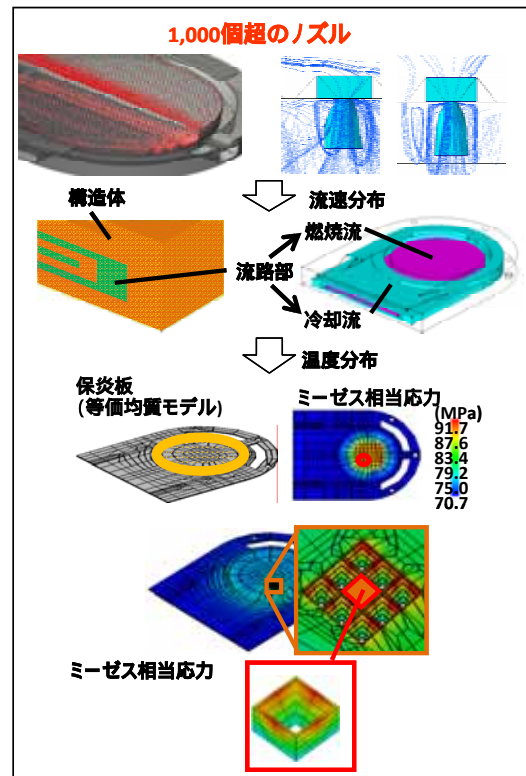


図 3 MEMS 燃焼器保炎器の熱流体 - 構造連成解析のためのマルチスケールモデリング

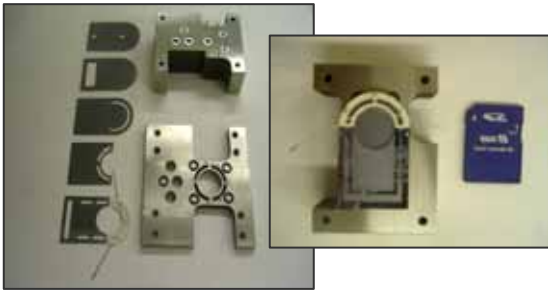


図4 製作したMEMS 燃焼器

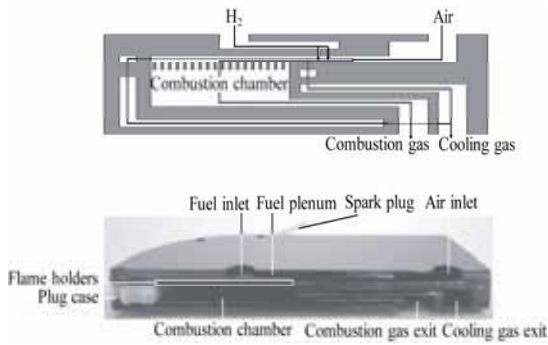


図5 MEMS 燃焼器の断面構造

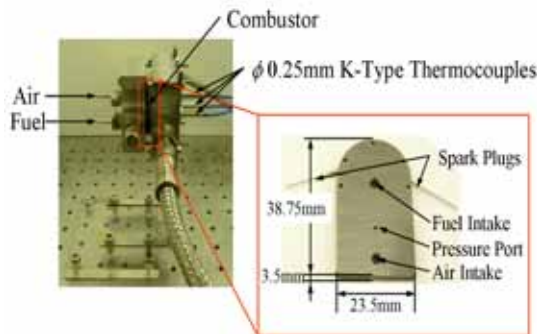


図6 燃焼実験のセットアップ

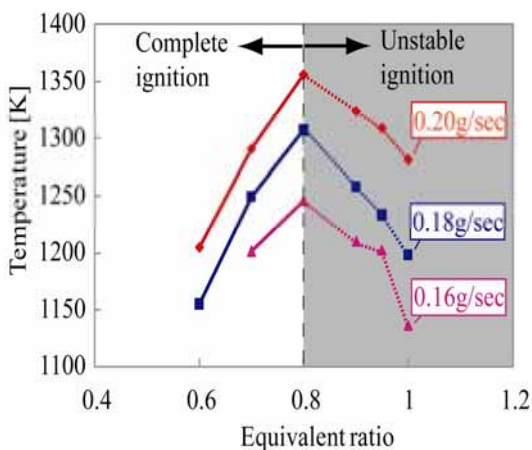


図8 燃焼実験結果

(3) その他の研究成果

研究室HPを新設して情報発信を開始した。
 重合メッシュ法の実用化への取り組み

市販のイメージベース有限要素解析プログラム VOXELCON (株式会社くいんと製)に、研究代表者の成果をもとに重合メッシュ法の機能が搭載された。精度検証に研究分担者の山東も寄与した。発表論文〔雑誌論文〕は、重合メッシュ法の活用事例として取り上げられた (http://www.quint.co.jp/jp/pro/vox/vox_exm_u01_h.htm)。

IWACOM-11におけるMEMSシミュレーションに関するセッションの企画

2010年3月29日~31日に横浜で開催された2nd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-11)において Multiphysics for Micromachines and Micromaterials というオーガナイズドワークショップを企画し、フランス ONERA やカナダ Sherbrooke 大学におけるパワーMEMS研究との情報交換を行いつつ、広く情報発信を行った。IWACOM-11のHPは以下にある。

<http://www.jsces.org/IWACOM/index.html>

不確かさのモデリング・シミュレーションに関する学会活動

日本計算工学会のHQC分科会(HQCはHigh Quality Computingの略)と連携し、計算工学講演会において不確かさのモデリング・シミュレーションのオーガナイズドセッションを企画し、情報発信を行うだけでなく、当該テーマの普及、多くの研究者の参入を促す活動を行った。国際会議においても、2012年9月開催のECCOMAS(ウィーン)同11月開催のICMS2012(神戸)において同様のミニシンポジウムを企画した。特に、後者では確率マルチスケール法をテーマとした新しい企画であり、MEMS以外にも生体なども含め幅広い分野への拡大のきっかけとなることが期待される。

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5件)

山東篤, 自動メッシュ分割を用いて重合メッシュ法の連成項を高精度に数値積分するための積分範囲の適切な分割方法, Transactions of JSCES (日本計算工学会論文集), 査読有, Vol. 2011, (2011), Paper No. 20110011.

N. Takano, K. Sato, T. Toriyama, T. Yamazaki and S. Uesugi, Calibration of wet etching parameters for sacrifice layer of MEMS, Journal of Computational Science and Technology, 査読有, Vol. 5, (2011), pp.106-119.

山東篤, 自動メッシュ生成を用いた重合メッシュ法における連成項の数値積分, 日本機械学会論文集(A編), 査読有, Vol. 76,

(2011), pp.600-609.

N. Takano, K. Fukasawa and K. Nishiyabu, Structural strength prediction for porous titanium based on micro-stress concentration by micro-CT image-based multiscale simulation, 査読有, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, (2010), pp.229-235.

A. Sando, N. Takano, M. Asai, T. Toriyama, S. Kido and J. Korvink, Reduction of finite element mesh and model order for fast dynamic analysis of global/local problem, 査読有, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 3-3, (2009), pp.572-583.

[学会発表](計12件)

鈴木翔・高野直樹・浅井光輝, Monte Carlo simulation of dynamic problem using model order reduction technique, 日本機械学会第24回計算力学講演会, 2011年11月8日, 岡山.

鈴木翔・高野直樹・浅井光輝, モデル縮約による高速動的解析法のモンテカルロシミュレーションへの適用可能性, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月12日, 東京.

N. Takano and M. Asai, Fast dynamic analysis considering uncertainty by model order reduction technique, The 11th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM-11), 2011年7月25日, Minneapolis, MN, USA.

山崎透・上杉誠一・高野直樹・佐藤健一・鳥山寿之, MEMS ウェットエッチングシミュレータの開発, 日本計算工学会第16回計算工学講演会, 2011年5月25日, 柏(千葉).

高野直樹・浅井光輝・深澤健, 荷重条件の不確かさを考慮した高速動的解析法に関する研究, 日本計算工学会第16回計算工学講演会, 2011年5月25日, 柏(千葉).

山東篤・名手裕喜, 不連続関数の数値積分における積分範囲の分割方法に関する考察, 日本計算工学会第16回計算工学講演会, 2011年5月25日, 柏(千葉).

鈴木翔・高野直樹・鳥山寿之, Model order reduction for practical multi-physics and multi-scale analysis of MEMS gas turbine engine, 電気学会第27回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 2010年10月14日, 松江(島根).

佐藤健一・高野直樹・鳥山寿之, 犠牲層ウェットエッチングにおける物理パラメータのキャリブレーション, 日本機械学会

2010年度年次大会, 2010年9月7日, 名古屋(愛知).

山東篤・名手裕喜, デローニー四面体分割を用いた三次元重合メッシュ法における連成項の数値積分, 日本計算工学会第15回計算工学講演会, 2010年5月26日, 博多(福岡).

深澤健・高野直樹・西藪和明・川崎雄介, 重合メッシュ法によるポラスチタン部材のマイクロ応力基準強度予測, 日本機械学会M&M2009材料力学カンファレンス, 2009年7月24日, 札幌(北海道).

高野直樹・西藪和明・川崎雄介, 重合メッシュ法によるポラスチタン部材のマイクロ応力基準強度予測, 日本計算工学会第14回計算工学講演会, 2009年5月14日, 東京.

城戸詳治・山田雄貴・古谷明・鳥山寿之・高野直樹・金哲晃, MEMS ターボ機械用燃焼器の流体・構造解析, 日本機械学会M&M2008材料力学カンファレンス, 2008年9月17日, 南草津(滋賀).

[図書](計0件)

[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

<http://www.takano.mech.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 直樹 (TAKANO NAOKI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 10206782

(2)研究分担者

鳥山 寿之 (TORIYAMA TOSHIYUKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30227681

山東 篤 (SANDOU ATSUSHI)

和歌山工業高等専門学校・知能機械工学

科・講師

研究者番号：50435442

(3)連携研究者

該当なし