

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760110
 研究課題名（和文）タイヤ騒音など流体・構造連成現象に起因する騒音を低減するための数値的研究
 研究課題名（英文）Computational Study to Reduce Noise Caused by Fluid-Structure Interaction Including Tire Noise
 研究代表者
 畠山 望（HATAKEYAMA NOZOMU）
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50312666

研究成果の概要:流体と弾性構造体の連成現象により発生する流体音の数値解析手法を確立し、タイヤ騒音に代表される騒音の低減につながる技術開発に貢献することを目的として、スーパーコンピュータ上での大規模計算を可能とする流体音の三次元直接数値計算プログラム、弾性体の接触を計算する有限要素法プログラム、原子レベルの接触状態を非経験的に計算する量子分子動力学法プログラムという、各スケールにおける要素計算技術の開発に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	420,000	3,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体，流体工学，シミュレーション工学，応用数学，公害防止・対策

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境騒音問題の中でも、最も身近でありながら改善がなかなか進まないのが、自動車の騒音である。走行速度にも依存するが、自動車騒音の約 50～80 パーセントまでもが、タイヤ周辺から発生している。ハイブリッド車などエンジン周辺から発生する音が抑制される技術革新は進んでいる一方で、タイヤ騒音を減らすための路面も含めた対策が非常に難しいことが、その背景にある。

(2) 自動車・鉄道・航空機などの交通輸送機関や、各種空調システムのファンの騒音などは、流れが物体と干渉することによって生じ

る「流体騒音」がほとんどである。自動車のドアミラーや新幹線のパンタグラフから発生する騒音は、鈍頭物体が一様流中に存在する場合にカルマン渦列と同期して発生するエオルス音である。また、新幹線のパンタカパーからは、フィードバック機構による特定周波数のキャビティ音が発生する。これらを抑制する技術開発には、数値流体力学(CFD)と音響学的類推(AA)を用いた騒音予測手法が大きな役割を果たしてきた。しかしながら、これらは全て固定された剛体まわりの流体計算によるものであり、移動する弾性体であるタイヤから発生する音の数値解析は非常

に少ない。

(3) 流体と剛体の連成現象としての流体音に関しては、物体が移動する場合も含めて、国内外で数値的研究が盛んに行われている。しかしながら、流体と弾性構造体の連成により発生する流体音の数値解析例は、ほとんど報告されていない。タイヤ騒音に限ると、国内ではタイヤメーカーが数値解析を行っているようである。最近の数値的学術研究としては Kim らによる論文 (Journal of Acoustic Society of America, 119, 3799-3812, 2006) が挙げられるが、タイヤを弾性体として直接解いた計算ではない。国外では、飛行機のランディングギアによる騒音の研究が増えている。2006 年 5 月にボストンで開催された第 12 回 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference では、エアバス A340 の実機やボーイング 777 の縮小モデルによる実験報告を中心に、ランディングギアのセッションが設けられたほどである。しかし接地状態における騒音特性はさほど重要視されておらず、数値計算による研究 (AIAA Paper, 2004-2887) では、使用する乱流モデルを変えると AA による予測に大きな違いが現れるという、ほぼ自明な事実が報告されている程度である。

(4) これまで研究代表者は、非定常圧縮性ナビエ・ストークス (NS) 方程式の直接数値シミュレーション (DNS) を用いて、流れと物体の干渉や衝撃波と渦の干渉により発生する音の研究を進めてきた。LES などの乱流モデルを用いずに、NS 方程式をそのまま高精度かつ高解像度で解いて場全体の情報が得られるため、理想的な実験に相当する研究と言える。その反面、計算負荷が大きく、単純形状物体まわりの解析に対象が限られてしまい、近年ようやく翼型まわりの流れから発生する音の DNS に成功したという状況にある。一方、これら DNS による検証を経ることにより、AA に基づいて物体近傍の流体運動から遠方音圧場を予測する、精度の高い理論近似式を導出することができている。これらの成果を踏まえ、解析手法を工学的に有用な段階へと発展させるにあたり、タイヤなどの変形移動する複雑形状物体まわりの流れから発生する音を解析対象として取り上げたいと考えるに至った。

2. 研究の目的

(1) 流体と弾性構造体の連成振動現象により発生する流体音の数値解析手法を確立し、最終的にはタイヤ騒音を低減する技術開発に貢献することを目的としている。

(2) 流体・構造連成現象の数値計算自体はありふれた物であろうが、構造を弾性体として遠方の音場を求めることを目的としている点、また同時に圧縮性 DNS により理想的な実

験計測に相当する計算も行うという点が本研究の特色となる。しかし、対象として取り上げたタイヤ騒音は、実現象に対応した数値計算が非常に困難である。ミクロスケールの摩擦音、メソスケールのトレッドパターン内部空間の膨張・圧縮による破裂音、マクロスケールのタイヤ後流への渦放出に伴う流体音などが混然となって発生する、マルチスケールの現象であることがその理由である。本研究は、騒音発生に関わるこれら全てのスケールの現象を同時に計算する手法の開発を目的としており、タイヤ騒音問題解決の第一歩として以上の意義があると考えている。

3. 研究の方法

(1) 新たに近傍の運動を解く計算コードを開発して遠方音場の理論式を組み合わせた解析手法を軸にしつつ、高精度圧縮性 DNS コードを三次元の複雑現象へ適用できるように改良を進める。前者の計算コードには、弾塑性体との連成解析を容易にする有限要素法 (FEM) を採用する。後者については、Immersed Interface Method (IIM) と呼ばれる手法が有望であるが、実際 DNS によりタイヤの系を解析するのは到底不可能である。しかし、AA の適用条件とされてきた低マッハ数かつ音源がコンパクトな系であっても、AA による理論近似式が遠方音場を再現できない場合があることが、DNS によって初めて明らかになってきたという経緯がある。理論式を改良していくためにも、シンプルな系における DNS のサポートが必要である。

(2) 高精度な流体音三次元直接数値計算コードの開発については、それまで二次元のみであった圧縮性ナビエ・ストークス方程式用 DNS コードに対して、複雑な三次元数値解析を可能とするような拡張を行う。このコードは、空間微分に 8 次精度 Padé 型コンパクト有限差分法、時間発展に 4 次精度 Runge-Kutta 法という、非常に高精度なスキームを用いた数値解法に拠っている。格子幅の変化に非常に敏感であるため、十分に滑らかな構造格子を生成して三次元計算を行うことになる。流体音の DNS を行うには、(i) 音圧が大気圧に比べて非常に小さいために高い精度が要求される、(ii) 遠方の音圧を得るために広い計算領域を必要とする、(iii) 計算境界からの数値的反射を取り除かなければならない、などの条件を満たす計算コードのみならず、非常に大きな計算機資源、すなわちスーパーコンピュータ (SC) が必須となる。達成できるレイノルズ数にも限界があるため、現状では DNS のみで現実的なタイヤ騒音を模擬することは不可能であり、低マッハ数で有効とされている AA に基づく理論予測などと組み合わせる必要がある。

(3) FEM による弾塑性体解析コードの開発と計算については、一般的なワークステーションでも可能ではあるが、実現象のシミュレーションを狙った大規模計算を可能とするよう、SC への最適化も行っていく。タイヤの物性や形状に合わせた数値解析を行うには、トレッドパターンの幅や深さを代表長さとするレイノルズ数が数千程度である一方、タイヤ径を代表長さとするレイノルズ数は数十万にも達するため、マルチスケール手法の開発が必須となる。研究代表者が所属する東北大学では、流体科学研究所未来流体情報創造センターに大規模計算を可能とする SC が設置されており、これを利用する。

(4) タイヤとアスファルトのような弾塑性体同士の接触を解析するためには、摩擦係数などのマクロ物性値が必要となる。原子レベルの大規模量子化学分子動力学(QCMD)計算を用いて物性を予測する手法を発展させてマルチレベル化することによって、弾塑性体同士の接触界面の現象を非経験的にマイクロレベルから計算できるようになる。渦運動に抛らないと考えられる摩擦音など、ミクロスケール現象に伴う音の解析を進めることで、新たな騒音発生メカニズムを探るとともにマルチスケール解析手法を確立していくことが出来るようになる。

4. 研究成果

(1) 流体と弾性構造体の連成現象により発生する流体音の数値解析手法を開発し、タイヤ騒音に代表される騒音の低減につながる技術開発に貢献することを目的として、まず流体音のDNSを可能とする三次元圧縮性コードの開発を行った。ベクトル SC を用いた音の大規模シミュレーションを行い、最も基本的な渦構造である渦輪の運動により発生する流体音について、非常に高精度な計算が可能であることを確認した。

(2) 弾性体の接触を数値的にシミュレートするFEMプログラムのコーディングを行った。球や六面体などの構造を有限要素に分割するモデラーと、応力やひずみの解析結果を視覚化するビジュアライザの開発も同時に進め、プリ・メイン・ポストの各プロセス毎に基本的機能を実装したプログラム群を完成させた。これらをさらに発展させ、大規模モデルの解析への対応と、節点および要素単位に細かく摩擦力・凝着力が設定できるように改良を進め、市販の汎用FEMソフトと比較してマルチスケール化にも対応できる非常に柔軟な界面对応型FEMシミュレータとすることができた。

(3) QCMD 計算により、原子レベルで摩擦・接触解析を非常に高速に実行できる手法の開発を進め、これをベクトル SC に最適化する

ことに成功した。理想的なモデルではなく、より本物に近い、複雑な界面構造に対する量子化学計算が可能となり、原子レベルの界面物性情報を非経験的に定量的精度で予測できるようになった。量子論的な手法を加えることにより、非経験的にマイクロレベルの摩擦音を解明する数値解析的な基盤が整ってきたといえる。

(4) FEM も SC 上で性能が出るよう開発を進めることによって、マルチレベルのシミュレーションの各要素技術を SC 上で揃えることができた。これにより、接触状態のマクロ物性を原子レベルから非経験的に求めてマクロレベルのFEMへと繋げるシミュレーション技術が完成してきた。最終的に、QCMDにより求まるマイクロ物性をFEMへとボトムアップする、マルチスケール・マルチレベルのシミュレータとなった。

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 3 件)

- ① N. Hatakeyama, A. Nomura, Y. Sasaki, K. Chiba, H. Hata, K. Okushi, A. Suzuki, M. Koyama, H. Tsuboi, A. Endou, H. Takaba, M. Kubo, C. A. Del Carpio, M. Kitada, H. Kabashima and A. Miyamoto, "Ultra Accelerated Quantum Chemical Molecular Dynamics Study on Mechanochemical Reaction of Micro-Bubble Induced by Shock Wave," Clean Technology 2008, 491-494, 2008, 査読無。
- ② Akira Endou, Tasuku Onodera, Sayaka Nara, Ai Suzuki, Michihisa Koyama, Hideyuki Tsuboi, Nozomu Hatakeyama, Hiromitsu Takaba, Carlos A. Del Carpio, Momoji Kubo and Akira Miyamoto, "A Theoretical Study of Dynamic Behavior of Diphenyldisulphide Molecule on Fe Surface: Novel Ultra-Accelerated Quantum Chemical Molecular Dynamics Approach," Tribology Online, 3, 280-284, 2008, 査読有。
- ③ Yoshitaka NAKASHIMA, Nozomu HATAKEYAMA and Osamu INOUE, "Three-Dimensional DNS of Sound Generation by Oblique Collision of Vortex Rings," AIAA Paper, 2007-3502, 1-8, 2007, 査読無。

[学会発表] (計 3 件)

- ① N. Hatakeyama, A. Nomura, Y. Sasaki, K. Chiba, H. Hata, K. Okushi, A. Suzuki,

M. Koyama, H. Tsuboi, A. Endou, H. Takaba, M. Kubo, C. A. Del Carpio, M. Kitada, H. Kabashima and A. Miyamoto, "Ultra Accelerated Quantum Chemical Molecular Dynamics Study on Mechanochemical Reaction of Micro-Bubble Induced by Shock Wave," CTSI Clean Technology 2008, 4 June 2008, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, USA.

② 島山 望, 教敦其木格, 森田祐輔, 小野寺 拓, 鈴木 愛, Sahnoun Riadh, 古山通久, 坪井秀行, 遠藤 明, 高羽洋充, Del Carpio Carlos A., 久保百司, 宮本明, 「超高速化量子分子動力学法のマルチスケールトライボシミュレータへの応用」, トライボロジー会議 2008 春, 2008 年 5 月 13 日, 国立代々木オリンピック記念青少年総合センター, 東京.

③ Yoshitaka NAKASHIMA, Nozomu HATAKEYAMA and Osamu INOUE, "Three-Dimensional DNS of Sound Generation by Oblique Collision of Vortex Rings," 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), 22 May 2007, Associazione Italiana de. Aeronautica e Astronautica (AIDAA), Rome, Italy.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島山 望 (HATAKEYAMA NOZOMU)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50312666

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし