

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14024

研究課題名(和文) 風による飛来物の飛翔解析法の開発と衝撃力の評価

研究課題名(英文) Development of numerical method for flying debris in wind and evaluation of impact forces

研究代表者

野村 卓史(NOMURA, Takashi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50126281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：強風災害において連鎖的に被害範囲を拡大させる飛来物の飛翔挙動を解析するために、任意の形状、重量バランスを有する物体が飛翔する過程を、動的に変化する空気力を評価しながら解析することができ、かつ衝突時の衝撃力を評価できる新しい解析法を開発することを目的とした。そのような解析法に必要な解析技法として、飛翔体とともに移動する解析メッシュ、衝突時の衝突・反発過程と衝撃力評価、非適合メッシュに対する sliding interfaceの3つの手法を実現し、妥当な解が得られることを確認した。また、風洞の中で球模型を飛ばし、圧電型ロードセルで4点支持されたアルミ板に落下したときの衝撃力を測定した。

研究成果の概要(英文)：In order to analyze flight of flying debris which expands damage area in wind-induced disasters, we have tried to develop a new computational method which can analyze flying motion of object with arbitrary shape and load balance flies with dynamically changing fluid forces and can evaluate impact forces. We have developed three key numerical procedures: (1) Dynamically moving and tilting computational mesh which flies with the flying object; (2) A smooth time history of impact force over a set of multiple short time steps; (3) Sliding interface method over nonconforming meshes. Each of these method has been checked and revealed that adequate solutions can be obtained. In addition, a wind tunnel experiment has been conducted in which impact force of flying object falling on an aluminum plate can be measured by piezoelectric type load cells. The experimented flying objects were made by a 3D printer.

研究分野：風工学

キーワード：風災害 飛来物 衝撃力 構造流体連成解析 有限要素法 風洞実験 圧電型ロードセル 3Dプリンタ

1. 研究開始当初の背景

我が国では台風や竜巻の勢力が増す傾向にあり、強風による被害が甚大化している。強風災害では風の力の直接的な作用による被害のほかに、強風で吹き飛ばされた飛来物による被害がある。飛来物による破壊は新たな飛来物を生じ、連鎖的に被害範囲を拡大する。したがって飛来物の飛翔速度、飛翔範囲および衝突時の衝撃力を評価することは、強風災害の発生状況を分析し被害を低減するために重要である。

国内外の飛来物の飛翔解析の研究では、平板や球、棒などの基本的な形状の物体について、定常気流による風洞実験で得られた空気力係数を用いて剛体の運動方程式を解く飛翔解析が行われている。しかし、飛来物は瓦や木材の破片から大きなものでは自動車に至るまで、さまざまな形状と重量バランスを有する物体であり、それぞれについてそのつど風洞実験で空気力測定をすることは現実的でない。また、飛翔中の回転運動による飛来物の姿勢変化にともなう空気力の値が変わることに加え、既存の飛翔解析では、準定常の仮定が成立することを前提として定常空気力が用いられているが、本研究の予備的解析で準定常仮定が成立しないことを示す結果を得ていた。

すなわち、任意の形状、重量バランスを有する物体が、回転運動をとめないながら飛翔する過程を、動的に変化する空気力を評価しながら解析することができ、かつ衝突時の衝撃力を評価できる、そのような新しい解析法が求められている状況にあった。

2. 研究の目的

以上の背景のもと研究代表者は、図1のように、飛来物に作用する動的な空気力を評価するために十分な広さの流れ解析領域を設定し、この解析領域が飛翔する物体とともに移動する新しい解析法の着想を得た。この新しい数値流体解析法を開発することが本研究の目的である。

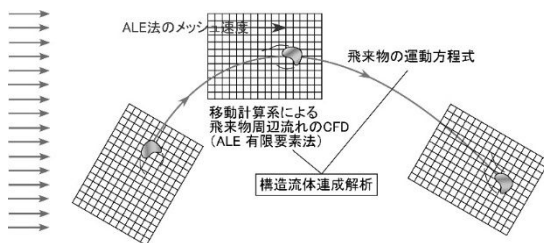


図1 飛翔体とともに移動する解析領域

この着想のベースには研究代表者らが推進してきた ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 有限要素法に基づく構造連成問題の数値流体解析法に関する研究(野村ら[土木学会論文集, 1992]など)の成果がある。

有限要素解析は任意の物体形状を扱うことができる。

開発する解析法の独自性は、飛来物に対する相対風速方向に常時向く解析領域、飛来物の回転運動を扱うための球面状 sliding interface にある。

また、衝突時の衝撃力を評価する過程を数値解析法に導入すること、および解析法を検証するために風洞実験を実施し、模型の飛翔軌跡と衝撃力を計測することも本研究の目的である。

2. 研究の方法

(1) 数値解析法の開発

構成する数値解析法は、ALE 法による Navier-Stokes 方程式を Hughes らの VMS 有限要素法で離散化して導出された流体の有限要素方程式と、時間積分法に Newmark-b 法を用いた剛体の運動方程式を独自の方法で連成させて解く構造流体連成解析法に基づいている。流体解析の有限要素に 8 節点六面体要素を用いた。

飛来物に対する相対風速方向に常時向く解析領域(図2)

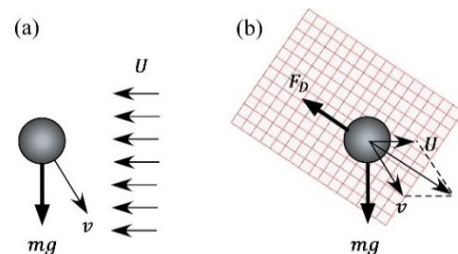


図2 風速Uの中を速度vで運動する球の相対風速と相対風速方向の解析メッシュ

図2に定義した相対風速を用いる解析過程を開発し、図3に例示したように、球の飛翔運動に球周辺の空気による流体力が影響することを考慮できる解析を実現した。

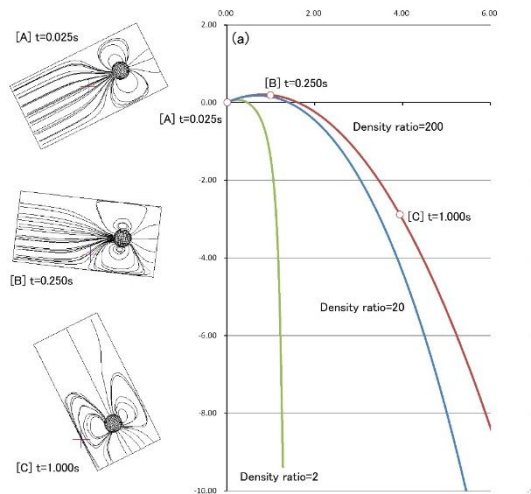


図3 空気中に放出された球(飛翔軌跡に対する密度比の影響と流線)

飛来物が地面に衝突したときの衝撃力と反発の過程

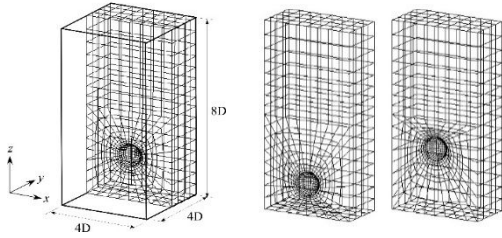


図4 空中を落下する球の解析メッシュとALE法によるメッシュ変形パターン

図4に示す解析モデルを用いて、空中を落下した球が剛な地表面に衝突して跳ね返る過程を対象とする解析過程を検討した。

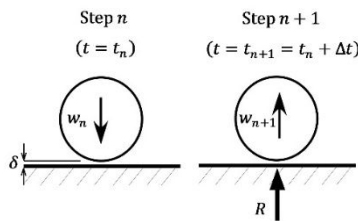


図5 球と地表面の距離が所定の微量 δ になったステップで与える反力 R

基本とする方法は図5に示すように球と地表面との距離があらかじめ設定した微小距離 δ になった次の積分ステップで反力 R を与える、というものである。このステップの球の速度がちょうどゼロになるように反力 R を決めると運動量保存、エネルギー保存を満足する解が得られることを新たに見出した。反力 R の値は積分時間ステップ間隔 Δt に依存した値になるが力積 $R\Delta t$ は常に同じ値になることも明らかとなった。

しかし図5のように衝突時の反力を1ステップだけに与えると、その後で解析領域内の圧力分布に数値振動を生じてしまった。そこで図6に示すように1積分ステップを細分化し、細分化された各時間積分ステップの反力を滑らかに変化させる方法を考案した結果、圧力の数値振動を抑制することができた。

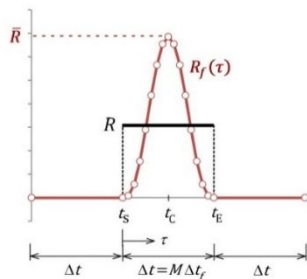


図6 細分化された一連の時間積分ステップに与えた反力の時間変化

図7, 8は解析の一例で、球周辺流体の抵抗の影響で球の跳躍高さが徐々に低くなる、妥当な解析結果を得ることができた。

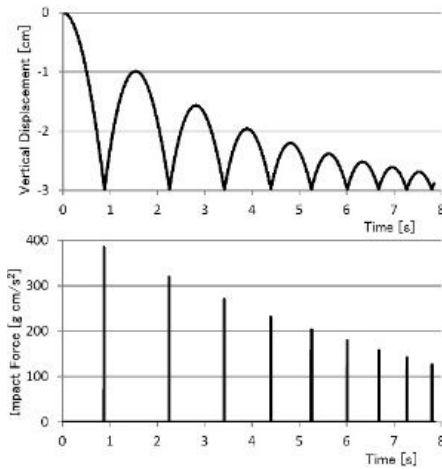


図7 空中を落下して地表面で跳ねる球の軌跡と衝突時の衝撃力

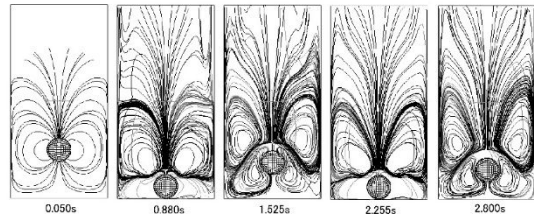


図8 図7の解析における流線

非適合メッシュに対する sliding interface の開発

Sliding interface は図9に示すように2つの解析領域(図9の例では外側の長方形領域とそこに置かれた円形領域)が有限要素節点を共有しない非適合状態の解析を目的とするもので、本研究では Bazilevs らの定式化を用いた。

図9に示すように、2次元移流拡散問題の滑らかな濃度分布を得ることができた。

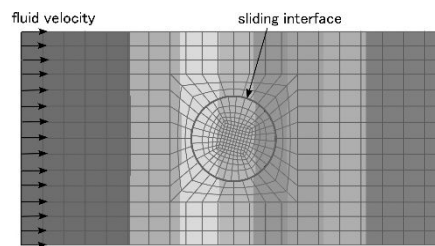


図9 移流拡散問題に適用した円周状 sliding interface と濃度分布

(2) 風の中で飛翔する物体による衝撃力の測定実験

解析法を検証するデータを得ることを目的として風洞実験を実施した。図10に実験法の概要を示す。風路面に配置したアルミニウム板を4つの圧電型ロードセルで支え、衝突時の衝撃力を測定した。またハイスピードビデオカメラで試験体の飛翔挙動を撮影した。

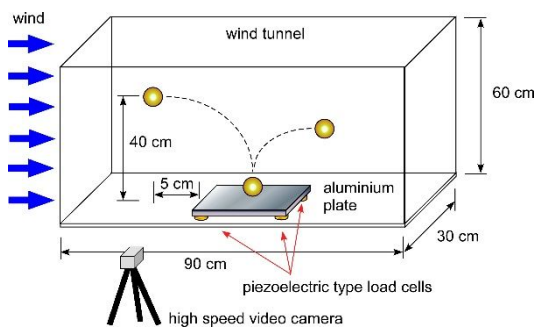


図 10 風洞実験法の概要

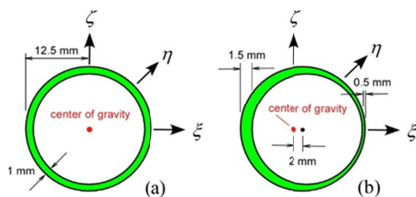


図 11 3D プリンタで作成した球模型

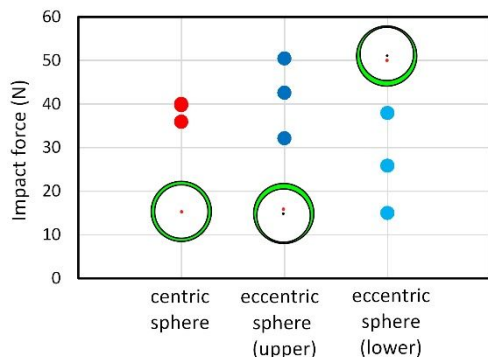


図 12 測定された衝撃力

飛翔させる試験体は図 11 に示す内部構造の球形模型を 3D プリンタで製作した。同じ空気力が作用しても重心位置が違ふことによって異なる飛翔挙動が得られることを狙ったものである。測定された衝撃力を図 12 に示す。偏心球は軌道が安定せず、衝撃力の値のばらつきが大きい、という結果が得られた。

4. 研究成果

以上述べた研究方法の結果得られた成果を以下にまとめる。

(1) 数値解析法

解析メッシュが飛翔体とともに移動し、解析メッシュの向きが常に気流速度と飛翔体速度の相対速度方向を向くように回転する解析法により、飛翔時の物体周辺の流れと空気力の作用を飛翔体の運動に取り込むことが可能であることが示された。

物体が地面等に衝突するときの衝突・反発過程を開発し、衝突時の衝撃力を精度良く評価できることを示した。非適合メッシュに対する sliding interface を 2 次元移流拡散解析であるが実現した。

(2) 風洞を用いた飛翔実験

風洞内で試験模型を飛翔させ、圧電型ロードセルで支えられたアルミニウム板上に落下させる実験を行い、衝撃力を評価できることを示した。

数値解析法では上述した 3 つの独自の解析技法を開発することに成功したが、これらをひとつの解析過程として統合するには至らなかった。今後の課題とし、その上で風洞実験を対象とした解析を実施していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

野村卓史, 渡邊光太郎, 酒井純生, 空气中を落下した球による衝撃力に関する数値流体解析, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, 2016, 271-276. 査読有

T. Nomura, K. Watanabe and J. Sakai, Numerical simulation of the impact force by a falling sphere in air, Proceedings of the 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Its Applications (BBAA VIII), Boston, USA, 2016, 89-1 ~ 89-10. 査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

T. Nomura, H. Hasebe, T. Iizumi and S. Kitoh, Experimental study on the impact forces of wind-blown, spheres, International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, 2018.

齊藤良平, 野村卓史, 長谷部寛, 3 次元膜状物体の作成と運動解析, 土木学会関東支部第 44 回技術研究発表会, 2017, I-55

T. Nomura, ALE finite element simulation of impact force from a sphere dropped in air, IACM 19th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2017), 2017.

野村卓史, 長谷部寛, 飯泉拓也, 木東将太, 小川ルイ子, 宮崎榛子, 風で飛翔する球による衝撃力の測定, 平成 29 年度土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会 2017 I-561.

大野卓実, 野村卓史, 空気中の物体の飛翔過程の解析, 平成 29 年度土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会, 2017, I-562.

T. Nomura, H. Hasebe, T. Iizumi, S. Kitoh, R. Ogawa and R. Miyazaki, Wind Tunnel Experiment to Measure Impact Forces of Wind-blown Spheres Colliding at the Ground, 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE9), 2017.

長井耀太郎, 長谷部寛, 野村卓史, スライディング境界条件を用いた非適合メッシュによる移流拡散解析, 土木学会関東支部第 43 回技術研究発表会, 2016.

長谷部寛, 長井耀太郎, 野村卓史, Sliding Interface を用いた非適合メッシュによる移流拡散解析, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016.

齊藤良平, 野村卓史, 長谷部寛, NURBS による 3 次元物体形状作成の試み, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016.

T. Nomura, Finite element simulation of the impact force by a falling debris in air, The 11th China-Japan-Korea International Workshop on Wind Engineering (CJK2016), 2016.

野村卓史, 渡邊光太郎, 空気中を落下した球による衝撃力, 平成 27 年度日本風工学会年次研究発表会, 2015

齊藤良平, 野村卓史, 長谷部寛, NURBS による物体形状作成と運動解析, 平成 27 年度土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

野村卓史 (分担), 朝倉書店, 気候変動の事典, 激化する竜巻・突風, 2017, 460.

6. 研究組織

(1) 研究代表者 野村 卓史(NOMURA, Takashi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 50126281

(2) 連携研究者 長谷部 寛(HASEBE, Hiroshi)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 60366565