

# 平成 25 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：強風防災

研究期間：H25 ～ H26 [平成 26 年度も研究継続]

課題番号：133006

研究課題名（和文）：衝撃的な事象（隕石等）による風工学的問題に関する研究

研究課題名（英文）：Wind engineering studies for the damage prediction of a meteoroid impact.

研究代表者：野津 剛

交付決定額（当該年度）：560,000 円

## 1. 研究の目的

2013 年 2 月 15 日、ロシア連邦ウラル連邦管区のチェリャビンスク州付近で隕石の影響で周辺建物に甚大な被害が発生した。被害の要因は上空を隕石が超音速で移動し、爆発的に分裂したことにより発生した衝撃波によるもので、複数の建築物の屋根や窓ガラスに大きな被害が発生した。隕石が市街地の上空に接近する発生確率は非常に小さいが、仮に接近した際には上空で強烈な衝撃波が発生するため、市街地全体（今回のケースでは半径約 100km）に被害が生じることになる。このような衝撃的な事象により地上構造物に作用する衝撃荷重の算定や、構造物の被害予測、さらには減災への提案などはある意味で風工学が関係する分野とも考えられる。そこで本研究課題では、これまで研究を行ってきた水素ガス爆発を対象とした爆風圧の伝播解析や構造物の応答解析技術を活用し、隕石のような衝撃的な事象を対象に衝撃荷重の評価、被害予測を行うことを目的とする。

## 2. 研究の方法

以下の 3 項目について研究を進める。

### 1) 文献調査

接近する隕石の大きさ、密度などの情報から地表面での衝撃波の影響を予測する算定方法について、関連する研究調査、既往の論文調査等から検討する。

### 2) 衝撃波伝播解析コードの整備と予備解析

衝撃波伝播を計算する解析コードの整備を行う。ここでの解析コードは、衝撃的な事象の対象を広くとらえるために、ガスの燃焼過程を含んだガス爆発のような事象も解析可能なものとする。また、既往の爆発実験を参考に予備解析を実施する。

### 3) 研究集会の開催

建設、風工学以外の分野で行われている爆発現象や衝撃波・爆風圧の伝播に関する実験的、解析的研究、あるいはそれらによる構造物の応答解析、衝撃荷重の評価、被害予測等に関する研究の現状を把握し、発展させるため研究集会を開催する。

## 3. 研究成果

研究成果は以下のとおり。

### 1) 文献調査

既往の論文（G.S.Collins et al., 2005）によれば、隕石の大きさや、密度、地球への接近速度などがわかれば、地上に伝播する衝撃波による力を既往の爆発実験および理論式からある程度予測可能である。また、既往の研究から隕石の大きさ毎に落下頻度（風工学の再現期間に相当）がわかるため、被害予測において風工学的な検討が可能であることが分かった。

参考論文：Gareth S. C., Jay M., and Robert A. M., Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth, Meteoritics & Planetary Science 40, Nr 6, 817-840 (2005)

## 2) 衝撃波伝播解析コードの整備と予備解析

水素ガスの爆発現象を対象とした解析コードを整備し、既往の水素ガス爆発実験を再現することで予測精度の検証を行った。

### 2-1) 乱流燃焼モデル

乱流燃焼モデルとして Flamelet 法と G 方程式をカップリングさせた部分予混合乱流燃焼モデルを用いる。Flamelet 法は、解析空間において混合分率の輸送を解き、流れ場の混合分率を元にあらかじめ作成した Flamelet データベースを参照することで火炎温度及び化学種質量分率を求めるモデルである。

### 2-2) 解析手法と解析条件

乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルとし、モデル定数  $C_s$  を 0.1 とした。時間積分には 1 次 Euler 陰解法、移流項の離散化には MUSCL 法を使用した。本解析で用いた解析モデルは、幅 4.6m、奥行 4.6m、高さ 3.0m の立屋で、壁の一つに面積 5.4  $\text{m}^2$  の正方形の開口部が設けられている。建屋内は、水素濃度 18% の水素と空気の混合ガスで満たされており、後壁面近傍で着火を行った。

側壁の圧力センサー設置位置で圧力の時間変動を計測し、実験結果との比較を行った。解析格子はヘキサメッシュとし、建屋内では一辺 5cm の正立方体とした。総格子点数は約 400 万点である。

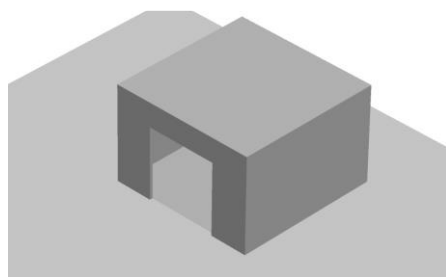


図 1：解析モデル

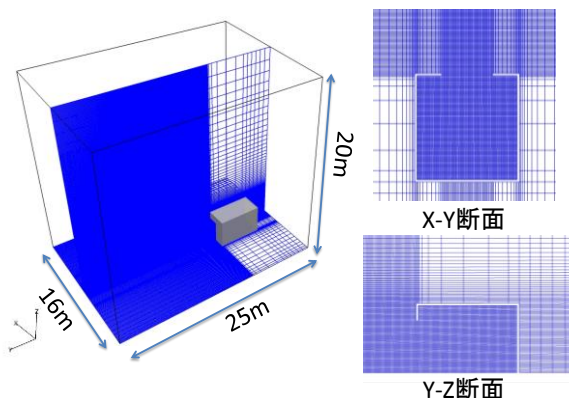


図 2：解析格子

### 2-3) 解析結果

図に火炎面の時間変化を示す。爆発による室内での圧力上昇に伴い建屋外部に水素混合ガスが押し出され、建屋外部領域でも爆発が継続していることがわかる。

着火後、建屋内の圧力は徐々に上昇し、火炎が開口部に到達し外部で爆発が起こるタイミングで第一圧力ピークが見られた。その後、建屋内の未燃ガスが消費される過程で圧力のヘルムホルツ振動が減衰していく様子見られた。解析結果は、実験結果と比べ圧力ピーク値を過小評価しているが、圧力振動の位相は良好な一致が見られた。

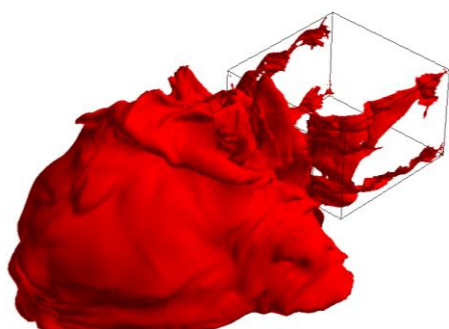


図 3：計算された火炎面

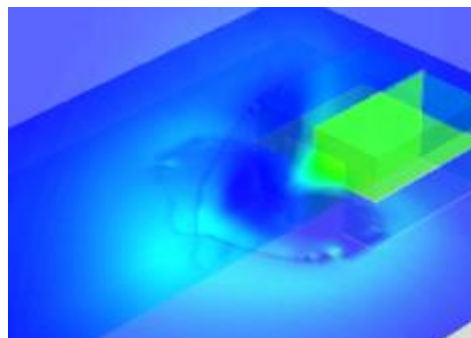


図 4：計算された圧力波

### 3) 研究集会の開催

研究集会の発表内容は以下のとおり。

#### ①漏洩水素ガスの爆発実験と解析 (武野 計二 (豊田工業大学))

液体水素の燃焼に関する概要と、高圧水素の噴出における着火時の影響について発表があった。解放空間での予混合気の火炎伝播速度は高々75~90m/s程度であるとの報告があった。

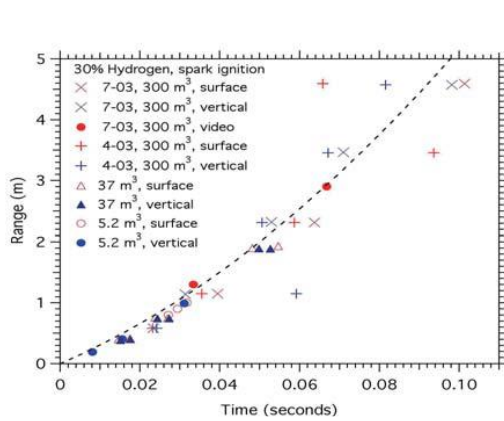


図5：火炎先端位置の時間変化

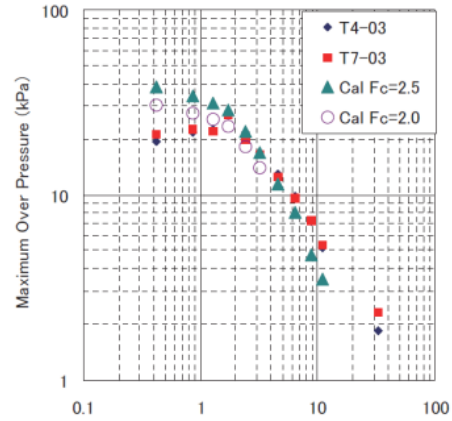


図6：換算距離と最大過圧の関係

#### ②水素ガス爆発実験による周辺への影響評価 (野津 剛 (清水建設株))

水素ガス爆発による RC 障壁への影響評価について、基礎的な爆発実験および実規模を想定した爆発実験を実施して得られた結果について発表があった。爆風圧を精度良く再現できれば、RC 壁の挙動、ひび割れ発生を数値解析により精度良く評価できるとの報告があった。



図7：基礎的爆発実験

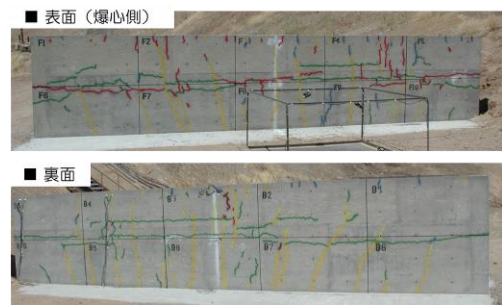


図8：爆発実験後のひび割れ状況

#### ③FronFlow/Red による燃焼、爆発の機能 (日比 一喜 (株フローデザイン))

FronFlow/Red に組み込まれている各種燃焼モデルの紹介とその適用について発表があった。半閉鎖空間を対象としたガス爆発は、拡散燃焼と予混合燃焼の連成であるため部分予混合燃焼としてモデル化が必要であるとの報告があった。

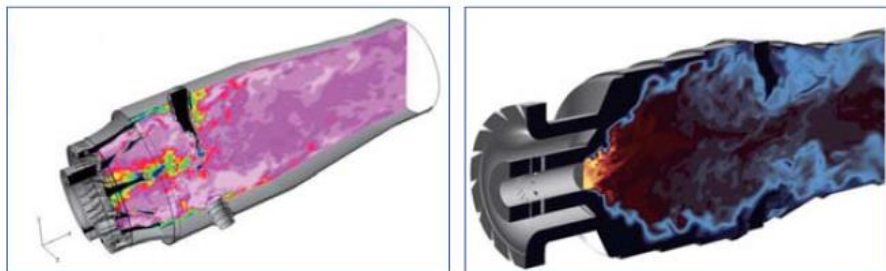


図9：LES フレームレット燃焼モデルによるガスタービン燃焼解析

④次世代交通インフラにおける衝撃的事象の解明と対策 (小川 隆申 (成蹊大学))

水素ステーションおよび超高速鉄道に関する衝撃的な事象について、現象の解明と対策について発表があった。それぞれの事象に適した数値解析手法を用いることで、これらの衝撃的な現象を再現することが可能になったとの報告があった。

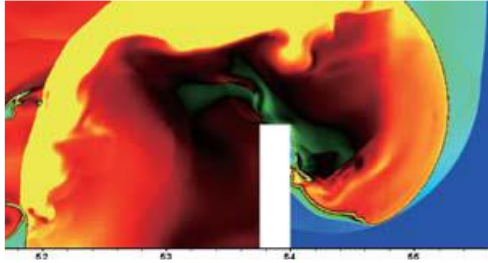


図 10 : DDT のメカニズムの解明

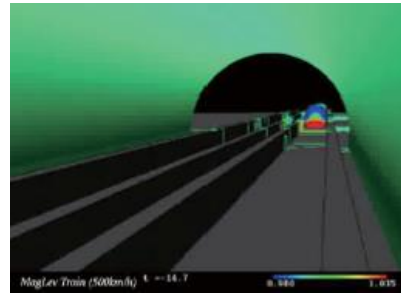


図 11 : 高速列車トンネル突入時の数値解析

⑤爆風と水の干渉による爆風圧減衰効果に関する数値解析 (松尾 亜紀子 (慶應義塾大学))

地下式火薬庫を対象として、爆発事故を想定した数値解析を行い火薬庫内での現象の再現と、水による爆風圧低減のメカニズムについて発表があった。爆風圧の低減には、熱輸送、運動量輸送、水による阻害効果が重要であるとの報告があった。

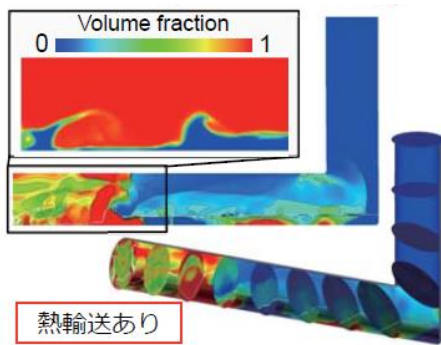


図 12 : 火薬庫内の流れ場

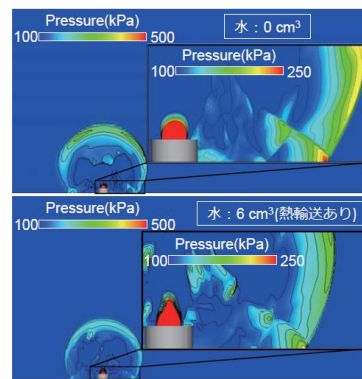


図 13 : 火薬庫周辺の流れ場

⑥第三の荷重としての衝撃荷重 (濱本 卓司 (東京都市大学))

日本建築学会荷重指針改訂案に衝撃荷重が盛り込まれることになり、耐衝撃設計の概要についての紹介があった。衝撃荷重としては、衝突荷重(自動車、脱線列車、小型飛行機、ヘリコプター、フォークリフト)と爆発荷重(内部爆発、外部爆発)を対象としているとの報告があった。

表 1 : 対象とする衝突現象

衝突体	対象とする作用
自動車	道路に隣接する建築物の柱や壁への衝突。駐車場での衝突・落下も考慮する。
脱線列車	鉄道に隣接する建築物の柱や壁への衝突。軌道の終端部を乗り越えた衝突も考慮する。
小型飛行機	高さ60m以上の高層建築物への衝突。飛行場及び飛行経路の近傍の地域に限定する。
ヘリコプター	ヘリポートとして設計された屋上への緊急着陸荷重。
フォークリフト	作業中のフォークリフトの建物への衝突。

表 2 : 対象とする爆発現象

分類	対象とする現象
内部爆発	密閉/半密閉空間に漏洩した可燃性ガス(メタンガス、プロパンガス、都市ガス)が、静電気、スイッチ火花、ライター等より着火する場合。
外部爆発	危険施設(火薬工場、各種プラント、水素エネルギーステーション等)に建築物が隣接している場合。爆源として、可燃性ガス、水蒸気、粉塵、火薬/爆薬を想定。

#### 4. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔その他〕

研究集会配布資料（衝撃的事象による風工学的問題に関する研究集会）

#### 5. 研究組織

##### (1) 研究代表者

野津 剛 清水建設(株)技術研究所

##### (2) 研究分担者

菊池 浩利 清水建設(株)技術研究所

佐々木 澄 清水建設(株)技術研究所

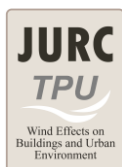
伊藤 靖晃 清水建設(株)技術研究所

ファム・フック 清水建設(株)技術研究所

小野 梓 清水建設(株)技術研究所

日比 一喜 株式会社数値フローデザイン

拠点



文部科学省共同利用共同研究拠点・東京工芸大学・風工学研究

# 衝撃的な事象による風工学的問題

## に関する研究集会

平成 25 年 2 月 15 日、ロシア連邦ウラル連邦管区のチェリャビンスク州付近で衝撃波が発生し、建築物建築物の屋根や窓ガラスに大きな等に甚大な被害をもたらしました。上空を隕石が極めて高速で移動して爆発的に分裂したことが原因です。このような衝撃的事象は、隕石のみでなく、石油、天然ガス、水素ガスなどの貯蔵施設や化学プラント等での火災、事故による爆発、テロによる爆破事件などでも発生し、爆風圧によって建築物や人体へ甚大な損傷が及ぶことがあります。発生確率は必ずしも高くはありませんが、一端発生した際の周辺への影響は極めて激甚であり、被害は広範囲に及びます。

被害を最小限に留め、減災へつなげるためには、現象の物理的メカニズムの解明、シミュレーション技術の開発などが必要となります。しかし、爆発等の衝撃的事象による爆風圧荷重の評価や被害予測に関する建設工学的、風工学的研究は、必ずしも十分ではありません。

そこで、将来の関連被害低減につなげることを目的として、種々の分野で行われている爆発現象や衝撃波・爆風圧の伝播に関する実験的、解析的研究、あるいはそれらによる構造体の応答解析、衝撃荷重の評価、被害予測等に関する研究の現状を把握し、発展させるため、下記のとおり、研究集会を開催することと致しました。

奮ってご参加いただき、活発なご議論を期待するところです。

### 記

主 催 東京工芸大学・風工学研究拠点

と き 平成 26 年 2 月 12 日（水）13:00～17:00

と ころ 清水建設技術研究所（東京都江東区越中島 3-4-17）

電話：03-3820-5504

URL：<http://www.shimz.co.jp/about/network/giken.html>

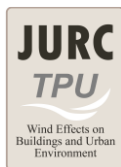
最寄駅：JR 京葉線・越中島駅 2 番出口 徒歩 10 分

地下鉄東西線・門前仲町 2 番出口 徒歩 15 分

参加申込 参加ご希望の方は、下記の江藤宛 email でお申し込み下さい。

参加費は無料ですが、事前に「お名前」と「ご所属」をご登録願います。

問 合 先 東京工芸大学工学部・建築構造Ⅱ研究室 秘書・江藤美鶴  
電話：046-242-9547, Email：etoh@arch.t-kougei.ac.jp



東京工芸大学風工学共同研究拠点 研究集会

## 衝撃的な事象による風工学的問題に関する研究集会

### プログラム（案）

13:30-13:40	開会挨拶，趣旨説明 田村 幸雄（東京工芸大学工学部 建築学科）
13:40-14:10	漏洩水素ガスの爆発実験と解析 武野 計二（豊田工業大学熱エネルギー工学研究室）
14:10-14:40	水素ガス爆発実験による周辺への影響評価 野津 剛（清水建設㈱技術研究所）
14:40-15:10	FronFlow/Red による燃焼、爆発の機能 日比 一喜（株式会社数値フローデザイン）
10分休憩	
15:20-15:50	次世代交通インフラにおける衝撃的事象の解明と対策 小川 隆申（成蹊大学理工学部システムデザイン学科）
15:50-16:20	爆風と水の干渉による爆風圧減衰効果に関する数値解析 松尾 亜紀子（慶應義塾大学理工学部機械工学科）
16:20-16:50	第三の荷重としての衝撃荷重 濱本 卓司（東京都市大学工学部建築学科）
16:50-17:00	閉会挨拶 田村 幸雄（東京工芸大学工学部 建築学科）