

戦闘用ヘルメットの強度と安全性の改善

MIT Man-Vehicle Laboratory は Abaqus FEA を用いてヘルメットライナー設計の調査、改良を行い、爆発事件がもたらす外傷性脳損傷の防止に貢献



図 1. 米陸軍の高性能戦闘用ヘルメット (ACH)
(画像: アメリカ陸軍提供)

爆発事故をシミュレーションすることで、被験体を危険にさらすことなく、重要かつ現実的なデータが得られる。

Andrew Vechart 氏
マサチューセッツ工科大学
Man-Vehicle Laboratory,
研究者

米陸軍のヘルメットは軍装品の中でも象徴的存在です。物語にも出て来る鋼鉄製の M1 ヘルメットは、第二次大戦中の 1942 年に導入され、頭部の保護はもちろんのこと、腰掛け、洗面器、そして食器としても活躍しました。その後 40 年間、米軍兵士の標準仕様であったのですが、素材、人間工学設計、防弾技術などの発展に伴い、1985 年、M1 ヘルメットはついに 29 層のケブラー製 PASGT (Personnel Armor System for Ground Troops) ヘルメットに置き換えられ、さらに 2003 年には、軽量ケブラー/トワロン製の ACH (Advanced Combat Helmet) になりました (図 1 参照)。ヘルメットライナーも、初期の圧縮紙、プラスチック、レーヨン製から、ナイロンなど高強度の合成繊維でできたあご紐付きの最新のサスペンション式ウェビングシステムへと進化しました。

頭部損傷の危険防止は、改良型の防弾ベストの開発とともに、今日ますます重要度が増えています。防弾ベストはほとんどの米軍部隊で日常的に用いられおり、爆発による死者数の削減に貢献してきましたが、その結果、生存者においては非致死性の外傷性脳損傷 (TBI) が増加する傾向となりました。1992 年設立の防衛・退役軍人脳損傷センター (DVBIC) によると、2001 年以来 150,000 人以上の米兵が TBI と診断されています。また一部の専門家によると、イラクやアフガニスタンで 4 ヶ月間戦闘に参加した全部隊の少なくとも 30 パーセントは、脳損傷の危険性がある爆発にさらされた経験を持つそうです。

TBI は、地雷、迫撃砲、ロケット推進型手榴弾、自爆爆弾、そして最も多くは即席爆発装置 (IED) によって引き起こされています。これらすべてが、毎秒 1,600 フィートで伝播する衝撃波を発生させるものです。脳損傷といっても脳しんどうから貫通傷まで程度はさまざまですが、圧倒的に多いのは軽中度 (89 パーセント) に属するもので、肉体的、認知的、情緒的、あるいは行動上の症状を伴います。過去の戦争では、TBI は砲弾ショックや戦闘神経症に分類

され、心的外傷後ストレス障害 (PTSD) にも関連付けられてきました。今日、TBI は戦闘から戻った兵士の代表的な創傷となっています。

この現実に対処するため、軍当局はこのような衰弱性傷害の発生頻度と重症度を低減する ACH ライナーの開発計画を立ち上げました。

ヘルメットライナーの設計課題

1970 年代から、ヘルメットライナーの製造法に関するアイデアに事欠くことはありませんでした。空気や液体を満たしたチャンバーを利用するなど、数え切れないくらいの特許やデザインが生み出されました。しかしそれらは、主にオートバイ、スキー、ホッケー、フットボール、乗馬など、スポーツに関係したものであり、爆発 (衝撃波を受けること) に対してではなく衝撃 (物にぶつかること) に対する保護に焦点を合わせたシステムでした。

また、どのような材料が最も高い爆風減衰効果をもたらすかについても、さまざまな仮説が唱えられました。機械的な特性が材料境界面での衝撃波の挙動に大きく影響します。すなわち、音響インピーダンスの不一致が、反射および透過する衝撃波の割合を決定します。これに対し、積層複合材、多孔質材料、発泡スチロール、硝酸ビニル発泡体、グリセリンなどが候補に挙げられ、一方で、空隙率、密度、熱容量などの材料特性が爆風の軽減に有効な要因として提案されてきました。

爆発時におけるライナー材料とヘルメット-頭部の接触シミュレーション

マサチューセッツ工科大学 (MIT) Man-Vehicle Laboratory の Laurence Young 博士 (<http://web.mit.edu/aerastro/www/people/lry/>) によるヘルメットおよびライナーシステムに関する研究も、最初はスポーツ分野から始まりました。しかし、彼の研究室が米海軍研究所 (ONR) から ACH ライナー設計の改良に関する 3 年契約を獲得した 2007 年に、方針は転換されました。またそのとき、有限

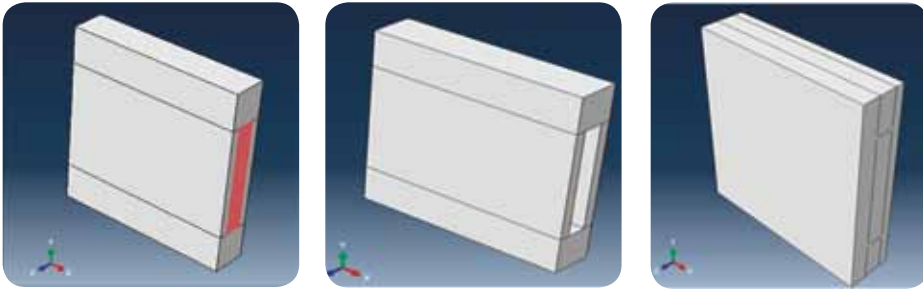


図 2. 簡略化された平板モデルのシミュレーションでは、z 方向左から爆発力を受けたときの、固体と流体のヘルメットライナー用充填材の有効性がテストされた。固体の充填材（発泡体、ガラスビーズ、エーロゲル）は赤色で示す（左図）。流体の充填材（水、グリセリン）のシミュレーションでは、連成オイラー・ラグランジュ（CEL）解析が用いられた。モデルの固体部分にはラグランジュ記述（中央図）、流体の充填材部分にはオイラー記述（右図）が用いられる。透過圧の値が安定になる爆発後 2 ミリ秒までの解が計算された。

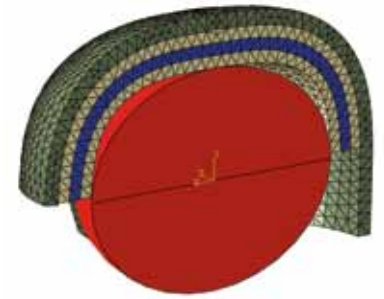


図 3. ヘルメットおよび頭部のモデルは、ヘルメットとライナー充填材のベンチマーク評価を容易にするため簡略化された。

要素解析 (FEA) の技術が、設計改善案を評価する主要なツールとして認定されました。

MIT チームは大学院生を中心に編成されました。その中で 2009 年後半から 2011 年前半までチームに在籍した Andrew Vechart 氏と Rahul Goel 氏は、卒業あるいは他のプロジェクトに移るまでの一時的な参加者でした。そのため Vechart 氏は次のように話しています。「我々には、短期間で習得可能な、サポートとドキュメントも充実した FEA ソリューションが必要でした」他にもいくつかの重要な要件がありました。「ソフトウェアは、ヘルメット、頭部、および空気との間の複雑な非線形接触問題を取り扱えることが条件でした。また、空気中を伝播する爆風のシミュレーションに優れていることも条件でした」と Vechart 氏は語っています。その他にも、快適性、適合性、感触などの設計課題がありました。結果としてチームは、Abaqus を選択しました。Abaqus は、これらの要件をすべて満たしただけでなく、その爆発のモデリングおよび解析機能が研究論文などで頻繁に引用されていたことが決定理由となりました。

Vechart 氏は次のように語っています。「爆発事故をシミュレーションすることで、被験体を危険にさらすことなく、重要かつ現実的なデータが得られます。また、爆発物を取り扱うための特殊な設備や許可も必要ありません」

爆発事故に対するさまざまな充填材の有効性を評価するため、チームは、最初に簡略化したライナーモデルで解析してみることにしました。それは、エネルギー吸収性の高いビニルニトリル発泡体で作られたサンドイッチ平板のモデルです。平板内の空洞は、さまざまな充填材（水やグリセリンなどの流体、発泡体やガラスビーズあるいはエーロゲルなどの固体）を入れるためのものです（図 2 参照）。これらのテストから得られた結果が、空洞のない純発泡体のベンチマークケースと比較されました。チームは、Abaqus の CONWEP エアブラスト機能を用いて、解析から爆風媒体（空気）を除外し計算時間を節減することができました。そして彼らは、流体の充填材のリアルな挙動を解析するために、Abaqus の連成オイラー・ラグランジュ (CEL) 解析機能を用いました。

次に彼らは、簡略化したヘルメットとライナーのモデルを作成し、やはり簡略化した疑似頭部モデルと組み合わせました（図 3 参照）。チームは再び CEL シミュレーションを用いて、衝撃波による比較的複雑な音場と構造の相互作用 (FSI)、すなわち、高い爆風レベル、短時間の現象、圧縮性の影響、そしてある程度までの非線形性まで効果的に再現することができました。

どちらの解析においても、ジオメトリのモデリングから、非線形のマルチフィジックスシミュレーションの実行、そして結果のポスト処理まで、すべてのプロセスで Abaqus が用いられました。計算には 64 ビット版 Windows XP と 8 GB RAM を搭載した Intel Core 2 Duo 3 GHz プロセッサが用いられ、主に興味のあるピーク透過圧を見るため爆発後 2 ミリ秒までの解が計算されました。

結果の評価と今後のシミュレーション

シミュレーション結果を実験データと比較検証するため、パデュー大学 Zucrow 研究所の協力を得て、シミュレーションに用いられたものと同等の制御爆発と、典型的な IED 爆発 (20 フィート離れた位置での 50 ポンドの TNT 爆発) に近いものが衝撃波管によって再現されました。シミュレーションで得られたピーク圧力は、TBI を引き起こすのに十分な大きさ (50 psi) でしたが、致命的なレベルには至っていませんでした (100 psi で 1 パーセントの致死率とされています)。

Young 博士によると、プロジェクトは再帰的であり、実験、モデル、そしてまた実験と、それぞれ前の情報に基づいて改良を加えながら進行しました。Young 博士は次のように話しています。「FEA モデルは一連の実験を計画し評価するために有効なツールです」

純発泡体のライナーにおいて、衝撃波がライナーにぶつかったときのピーク負荷圧と立ち上がり時間、ならびにモデル背面での透過圧に関して、シミュレーション結果と試験結果の間で十分な一致が見られました。さまざまな固体および流体の充填材に対して透過圧を比較した結果、ガラスビーズ、水、およびグリセリンが最も低いピーク圧であることが解析で示されました。たとえばガラスビーズは純発泡体の場合より 80 パーセント

低い値でした。また、これらの結果 (実験データとは部分的に一致) から、ガラスビーズ、グリセリン、および水に対する立ち上がり時間と圧力勾配は、最高の爆風減衰効果を示すものであることが分かりました。

Vechart 氏は次のように話しています。「検証が目的であったため、我々は比較的単純なモデルを使用しました。将来は、実際のヘルメット形状とライナー溝形状を用いて、CT または MRI スキャンデータに基づくリアルな頭部モデルと組み合わせた数値モデルを開発したいと思っています」Vechart 氏は、シミュレーションを活用することにより、エンジニアリングチームはより優れたライナーとより保護能力の高いヘルメットを開発できるようになるだけでなく、医学チームも外傷性脳損傷の診断および治療法についてより深く理解できるようになると確信しています。

詳細は以下をご覧ください

www.mvl.mit.edu

www.simulia.com/cust_ref