

防衛装備庁 陸上装備研究所 弹道技术研究部 終末効果・防護研究室

各種装甲車両の開発・改修事業への応用が期待される、セラミックス等の軽量高機能材料を用いた装甲構造の数値解析能力及び設計能力の向上を目的として、令和6年度に当室室員をフランホーファー研究機構エルンスト＝マッハ研究所(EMI)に派遣し、派遣先職員と共にセラミック耐弾板の数値解析精度向上のための研究¹⁾を行った。

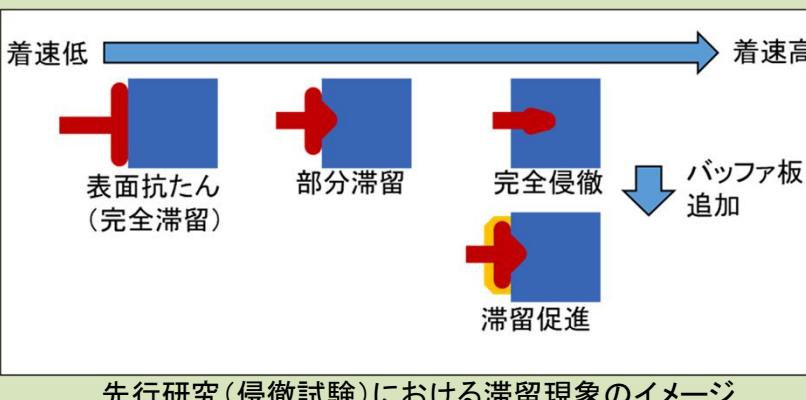
フランホーファー研究機構エルンスト＝マッハ研究所(EMI)

フランホーファー研究機構は欧洲最大の応用研究機関であり、ドイツ各地にEMIを含む75の研究所を有する²⁾。エルンスト＝マッハ研究所(EMI)では主に高速力学(飛翔体、爆発物、レーザー)の研究を実施しており、そのために必要な様々な設備及び高度な技術を有している。

侵徹試験及び数値解析モデル

- EMIの先行研究(侵徹試験)^{3)～5)}を再現する数値解析モデルの構築を目的とした。
- 侵徹試験は侵徹体の滞留現象を焦点としたものであった。滞留現象はセラミックス表面において侵徹体が放射状に被侵食・流出する現象であり、侵徹力が激減することからその促進はセラミックスの耐弾性能向上に大きく寄与する。滞留現象は着速が低い場合に強く発生(完全滞留)し、高速になるにつれて限定的になり(部分滞留)、最終的にはほとんど発生しなくなる(完全侵徹)。また、セラミックス前方にバッファ(緩衝)板を設置することで促進される。
- タンゲステン重合金(WHA) 侵徹体を均質圧延装甲(RHA) バックストップに張り付けた炭化ケイ素(SiC)セラミックス耐弾板に衝突させ、着速約400m/s～1900m/sの広い速度域における侵徹長[†]等を評価した。一部試験条件においては銅(Cu)バッファ板をSiC耐弾板前方に設置した。
- LS-DYNAを用いて、形状モデル、材料モデル(後述)、着速等を設定し、侵徹試験を再現した。

*セラミックスの様な脆性材料における侵徹長の計測が困難なため、RHAバックストップにおける侵徹長を計測し、評価に用いた。



先行研究(侵徹試験)における滞留現象のイメージ

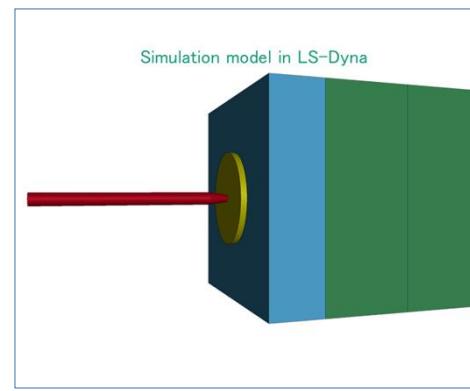
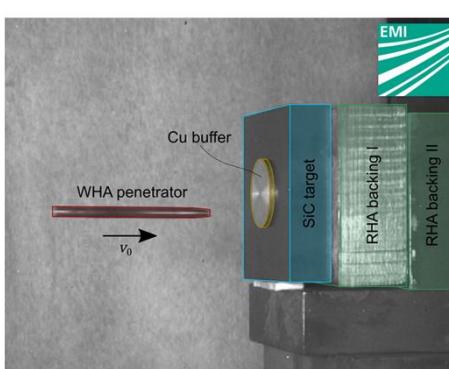
構成物詳細

侵徹体	: WHA製、長さ90mm、直径6mm (先端部テーパーあり)
耐弾板	: SiC製、常圧焼結、厚さ25mm
バックストップ	: RHA製、厚さ40mm、最大2枚使用
バッファ板	: Cu製、厚さ3mm

試験条件

着速	: 約400m/s～1900m/s
撃角	: 0°

侵徹試験条件



侵徹試験写真(左)と数値解析モデル(右)

計算手法

有限要素数値解析 (陽解法)

解析時間範囲

衝突時～衝突後300 μ s

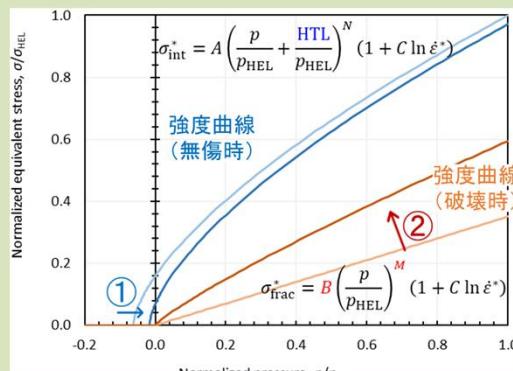
要素分割数

侵徹体	: 36, 288
耐弾板	: 2, 000, 000
バックストップ	: 2, 304, 000
バッファ板	: 230, 208

数値解析条件

材料モデル

- WHA侵徹体、RHAバックストップ及びCuバッファ板（全て金属材料）の材料モデルには、Johnson-Cook構成則及び破壊則を適用した。公開文献の情報を基にパラメタを設定した。
- SiC耐弾板の材料モデルには、Johnson-Holmquist-2（JH-2）構成則及び破壊則を適用した。公開文献の情報⁶⁾を基にしつつも、いくつかの推定に基づいたパラメタの改良を行った。



SiC材料モデルパラメタの改良

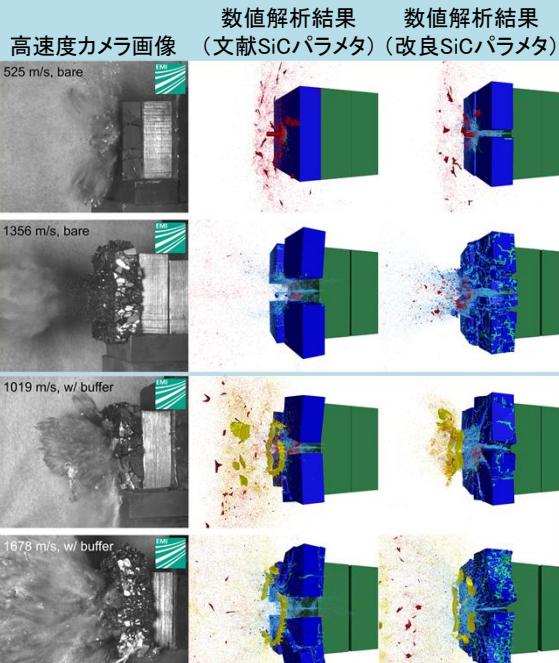
①き裂の進展に大きな影響を及ぼす上に、文献によってその値に大きなばらつきのある最大引張強度(Hydrostatic Tensile Limit, HTL)について、先行研究において用いた耐弾板が耐弾グレードでなく一般グレードのものであったことも考慮して、文献値よりも低い値であると推定し、当該パラメタを低く設定した。

②弾着点近傍で閉じ込められた残留物のロッキング効果により、破壊された耐弾板の強度低下がある程度抑制されると推定し、耐弾板の破壊時強度曲線におけるパラメタ(B, M)を、無傷時強度曲線の対応するパラメタ(A, N)に近い値に設定した。

侵徹試験結果（高速度カメラ画像）と数値解析結果との比較

代表的な試験条件4件

テスト番号	バッファの有無	着速 [m/s]	離軸角（ピッチ）[°]	離軸角（ヨー）[°]
13053	なし (bare)	525	0.3	0.9
13059	なし (bare)	1356	-0.3	0.1
13055	あり (w/buffer)	1019	-1.7	0.6
13056	あり (w/buffer)	1678	-0.4	-0.6



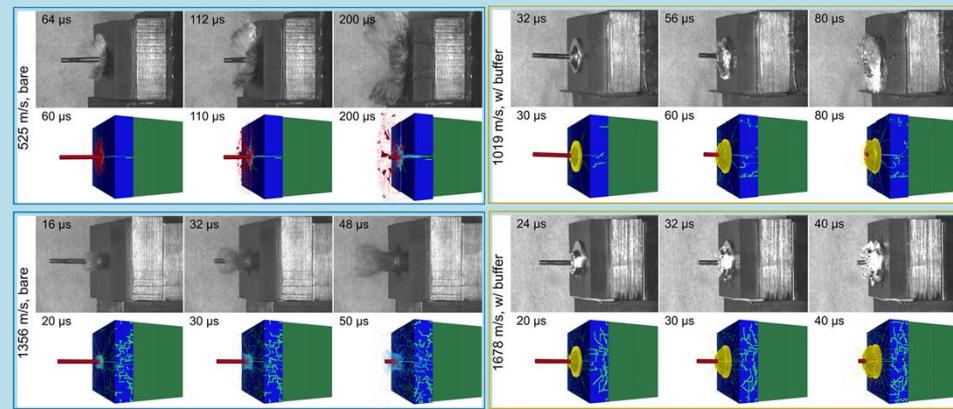
侵徹試験結果（高速度カメラ画像）と
数値解析結果との比較（衝突後300 μs）

・本展示においては侵徹試験22条件から代表的な4条件を抽出し、主にそれらについての結果を説明する†。

・侵徹試験結果（高速度カメラ画像）と数値解析結果との比較から、改良SiC材料モデルパラメタの使用により、き裂の伝播及び飛散物のパターンのみでなく、バッファ板の変形についても、良好な再現性が可能になることが分かった。

・例外として、バッファなし、着速525m/sのケースにおけるき裂の伝播の再現が良好でなかったが、これは低い着速・小さい撃角・構造メッシュ等により生じた、対称面近傍におけるき裂が原因と推定され、非構造メッシュを用いる等の改良によって再現能力が向上すると考えられる。

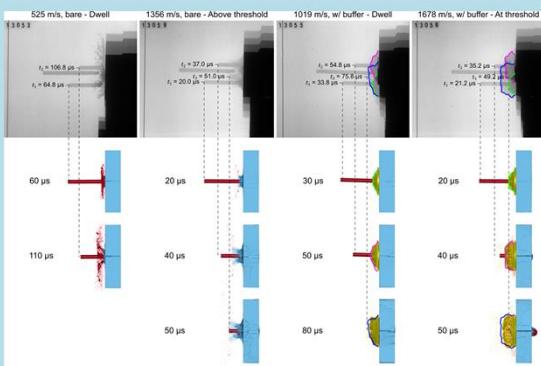
†実際には全22条件の数値解析を実施している。



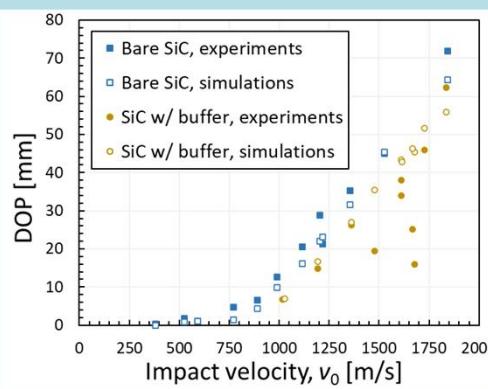
侵徹試験結果（高速度カメラ画像）と
数値解析結果（改良SiCパラメタ）との比較（衝突後16～200 μs）

侵徹試験結果(X線画像及び侵徹長)と数値解析結果との比較

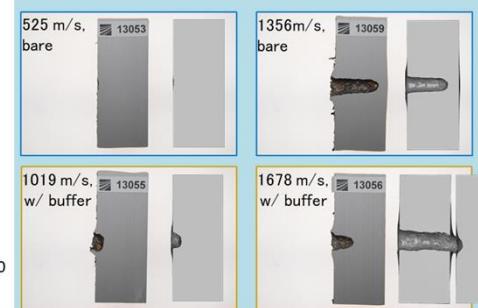
- 侵徹試験結果(X線画像)と数値解析結果との比較から、侵徹体の後端位置、デブリ飛散やバッファ板の変形についても、良好に再現できていることが分かった。
- 全22条件を用いた比較から、侵徹長においても数値解析シミュレーション結果は良好な再現性を示すことが分かった。例外として、着速1500m/s～1700m/sにおけるCuバッファ板による滞留現象の促進については再現できていなかったものの、SiC耐弾板の材料モデルパラメタの最適化を行う余地があるとともに、WHA侵徹体の材料モデルについてもSiC耐弾板と同様に改良を行うことで同現象を再現できる可能性がある。



侵徹試験結果(X線画像)と
数値解析結果(改良SiC)との比較



侵徹試験結果(侵徹長(DOP))と
数値解析結果(改良SiC)との比較



侵徹試験結果(断面観察)と
数値解析結果(改良SiC)との比較

まとめ・今後の目標

- セラミックス耐弾板に対する侵徹試験の再現のために、一般で入手可能な材料モデルのみを用いて数値解析モデルを作成した。
- 特にセラミックス耐弾板に対しては、いくつかの推定に基づく材料モデルパラメタの改良を行い、オリジナルのパラメタよりも再現能力を飛躍的に向上させた。
- 数値解析モデルは、一部例外はあるものの、広範な着速域においてセラミックスのき裂進展、デブリの飛散、滞留現象及び侵徹長の良好な再現を同時に実現した。
- バッファ板による滞留現象の促進については再現できなかったが、侵徹体の材料モデルパラメタも含めた複数のパラメタの最適化を行うことで、再現できる可能性がある。
- 効率的な複数のパラメタの最適化を行う際に、機械学習アルゴリズム及びそれ等を用いた数値解析による逆解析(逆最適化)が有効であると考えられる。
- 本研究によって得られた知見等を活かして、自衛隊における装甲車両の装甲構造の数値解析能力及び設計能力の向上に努める。

参考文献

- Ikeda, S., S. Signetti, and A. Heine. 2025. "Challenges in hydrocode modeling of projectile impact onto ceramic armor in a velocity regime comprising interface defeat, partial dwell, and full penetration". Proceedings of the 34th International Symposium on Ballistics, pp. 1463-1474.
- “フランホーファー研究機構とは” <https://www.fraunhofer.jp/ja/aboutus/FhG.html>
- Behner, T., A. Heine, and M. Wickert. 2016. "Dwell and penetration of tungsten heavy alloy long-rod penetrators impacting unconfined finite-thickness silicon carbide ceramic targets", Int. J. Impact Eng., 95:54-60.
- Behner, T., A. Heine, and M. Wickert. 2017. "Extended Investigation of the Dwell Effect for an Unconfined Silicon Carbide Ceramic against Tungsten-Heavy-Alloy Rods", Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics, pp. 2138-2147.
- Behner, T., and A. Heine. 2019. "Influence of lateral dimensions, obliquity, and target thickness toward the efficiency of unconfined ceramic tiles for the defeat of rod penetrators", Int. J. Impact Eng., 123:77-83.
- Cronin, D. S., K. Bui, C. Kaufmann, G. McIntosh, and T. Berstad. 2003. "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna", Proceedings of the 4th European LS-DYNA Users Conference. Stuttgart: DYNAmore GmbH, pp. D-1-47-60.