

砲身エロージョン予測技術

Prediction of Gun Barrel Erosion



赤松 塁*
Rui Akamatsu



松山 孝男**
Takao Matsuyama

要 旨

砲身のエロージョンは熱と化学反応により砲身内面が損耗してゆく現象である。実射撃によるエロージョン発生傾向の把握に代わる、エロージョンの定量的な予測技術の開発に着手した。火砲の内部でごく短時間に進行するエロージョン現象に対し、一般的な反応速度論的モデルの構築は困難なため、平衡論をベースとする化学反応として考え、温度・圧力をボルツマンの公式によりエネルギーに置き換える扱いを試みた。

火薬の燃焼ガスの分子と砲身内面の Fe 原子が反応する確率を、統計力学と反応試験を基に推定し、火薬の燃焼計算・伝熱計算・弾丸の運動計算との連成を繰り返してエロージョン量を求めた。本手法により実在火砲のエロージョン量を計算した結果、報告されている射撃後の砲身のエロージョン量と精度良く一致した。

— Synopsis —

Gun erosion is a phenomenon in which the bore surface of a gun barrel is worn due to heat and chemical reactions. We have been developing a method for the quantitative simulation of gun erosion as an alternative to the observation of bore surfaces for erosion after actual firing. Since it would be difficult to construct a general kinetic model for the gun erosion that proceeds in extremely short periods, an attempt to consider chemical reactions based on the equilibrium theory, where temperature and pressure are converted to energy with aid of the Boltzmann's equation, has been taken.

Reaction probabilities between the molecules of propellant gas and iron (Fe) atoms on the bore surface were evaluated by means of statistical mechanics and solid-gas reaction experiments, and they were then subjected to the coupled analysis with program modules for the propellant gas combustion, the heat transfer in the gun barrel and the projectile kinetics in the bore, the iteration of which resulted in the amount of erosion per fire round. Application of this simulation method for an actual gun has shown a good agreement with the reported gun barrel erosion after firing.

1. 緒 言

火砲の基本構造は、図 1 に示すように片側が閉鎖された円筒構造物において、閉鎖端側の薬室に火薬を配置し、火薬と開放端の間の砲腔内に弾丸を配置した構造となる。火薬を燃焼させると、発生した燃焼ガスが急激に膨張し弾丸の加速を開始する。弾丸は膨張する燃焼ガスにより加速し

つつ開放端すなわち砲口側に移動し、同時に燃焼ガス自体もまた砲腔内の弾丸の移動とともに砲口側に拡散する。このとき砲身に相当する円筒の内表面と燃焼ガス流が接触し、ガスの熱と化学的作用により砲身内表面にガスエロージョンが発生する。弾丸が砲口から離脱すると同時に、弾丸で閉鎖されていた砲内が開放された状態となり、燃焼ガスが急速に外部に放出され、エロージョン現象も終了する。

*: 広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

** : 特機本部
Ordnance Business Headquarters

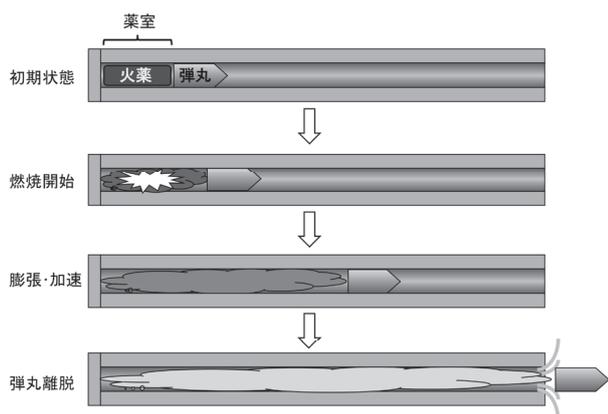


図1 火砲模式図

このガスエロージョンは、ミクロ的なモデルとして考えた場合、高温高压気体の分子が固体壁面に衝突して化学反応により固体の原子を取り去る現象と考えられ、ガス成分の化学的性質の影響を強く受けると考えられる。

このような火薬の燃焼ガス成分とエロージョンの関係に関する研究は過去に数例報告されている。Lawton はサンドエロージョンの考え方を基本として、30mm 砲身と数種類の発射薬の組み合わせでの射撃試験結果を多変量解析し、エロージョンに対する燃焼ガス成分の影響は $H_2 > H_2O > CO > CO_2 > N_2$ の順であると報告した^[1]。また、Kimura は前述のガス成分ごとのエロージョン影響度合いを化学的作用と熱的作用に分離し、化学的作用の影響は $CO_2 > CO > H_2O > H_2 > N_2$ の順であると述べている^[2]。

しかしこれらの手法は特定の火砲システムまたは燃焼試験装置であるエロージョンポンプを対象としたものであり、ガス成分と反応生成物の量の関係が明確にされておらず、研究対象以外の火砲システムのエロージョン予測にそのまま適用することは困難であると考えられる。

したがって、現在では火砲のエロージョンを予測するためには、個別の砲種毎に典型的な弾薬や射撃パターンによる射撃を数百～数千回繰り返し、実際にエロージョンを発生させてその傾向を把握するという実験的な手法を採らざるを得ない。しかし、この手法は膨大な費用と時間を必要とし、火砲の開発コストを増大させる大きな要因となっている。そこで我々はエロージョン現象の化学反応をモデル化し、理論的にエロージョンを予測する技術の開発に着手した。しかし、火砲のエロージョン現象は射撃過程の数ミリ秒という短時間の中で急速に進行し、一般的な反応速度論的モデルの構築が困難なため、平衡論をベースとする化学反応として考え、温度・圧力はボルツマンの公式によりエネルギーに置き換えて扱うことを試みた。

この手法は、ガス分子衝突速度や壁面温度と反応確率の関係、統計力学や反応試験をもとにした分子・原子モ

デルにより予め求めておき、燃焼計算で得られるガス状態、伝熱計算で得られる壁面温度と連成して反応量（エロージョン量）を算出するものである。既報^[3]では燃焼試験装置であるエロージョンポンプに関するエロージョンの予測計算を実施しており、一部計算を簡易化しているものの、計算結果は試験結果と比較的近い値を示し、本計算手法が一定の妥当性を持つことが確認されている。

本研究ではエロージョンのモデルを発射薬燃焼ガスとの化学反応による砲身素材 (Fe) の除去に限定し、反応条件の厳密化、未知パラメータの取得等によって上記のエロージョンの予測計算手法をより定量的なものとし、さらに一般的な火砲を対象とした燃焼 - 伝熱 - 反応連成ソルバを作成し、実在火砲のエロージョンを精度よく予測することができた。本論文はその予測計算手法および計算結果の評価について述べる。

2. 計算方法

火砲のエロージョンの予測計算手法は以下のようにになる。火薬の燃焼ガスの気体分子との化学反応により内表面の金属原子が除去される現象を、図2のような気体分子と金属原子の衝突、反応、脱離のモデルとして考える。

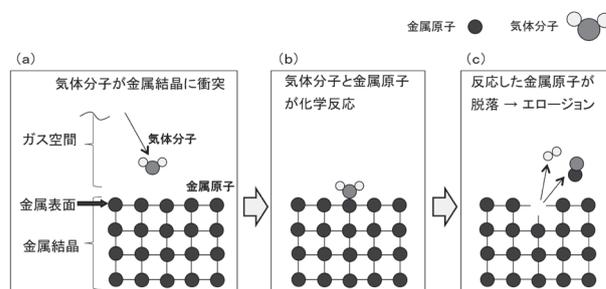


図2 化学反応によるエロージョンモデル

まず図2 (a) に示すように、ガス中に含まれる気体分子がある運動エネルギーで金属表面に衝突する。このとき気体分子の持つエネルギー、金属原子の持つエネルギー、および衝突時の分子の姿勢などの条件により決まる確率にしたがい化学反応を起こす (b)。次に気体分子と化学反応を起した金属原子は酸化物等の反応生成物となり金属結晶から脱離する (c)。この一連のプロセスの累積によりエロージョンが発生すると仮定し、金属原子の脱離量を予測計算する。

この反応モデルのシミュレーションのために必要な計算は、ガス種、成分比、温度、圧力といったガスの状態を求めるための燃焼計算、弾丸の運動計算、内表面の温度を求めるための伝熱計算、およびこれらの結果を基にエロージョン量を求める反応計算の四項目である。

これらを連成して砲内面のエロージョンを計算するためのソルバの構成を図3に示す。これは燃焼および燃焼ガスの流動現象(燃焼計算モジュール)、弾丸の運動(運動計算モジュール)、燃焼ガスから砲身への熱伝達および砲身の熱伝導(伝熱計算モジュール)、砲身内表面での化学反応(反応計算モジュール)を連成して解くものである。これらを連成させることにより砲内圧力、弾丸速度など砲身の主要諸元とエロージョン量を同時に計算することが可能になる。

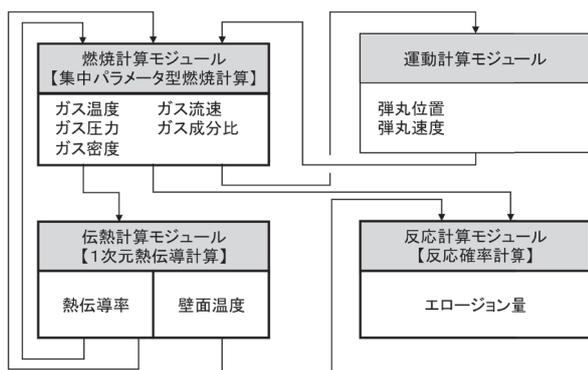


図3 エロージョン計算ソルバ概念図

燃焼計算モジュールは薬室と移動する弾丸後方の砲腔部を計算対象空間とし、燃焼計算方法は集中型パラメータ燃焼計算手法を採用した。計算された燃焼ガス温度、密度、圧力、流速、成分比率等は伝熱計算モジュール、運動計算モジュールおよび反応計算モジュールに受け渡される。

運動計算モジュールは、燃焼ガス圧力による弾丸の加速、移動などの運動および弾丸運動に伴う燃焼計算空間の拡大を計算し、その結果は再び燃焼計算モジュールに受け渡される。

伝熱計算モジュールは計算対象範囲を複数の半径方向断面に分割し、それぞれの断面について一次元熱伝導計算手法により温度変化を計算している。一次元で処理しているのは、主たる熱伝導は半径方向であることおよび計算負荷の低減を図るためである。また、固体の熱物性値(熱伝導率、比熱)の温度依存性にも対応可能である。熱伝達率は燃焼計算モジュールで得られたガス温度、密度、圧力、流速、成分比などから算出される^[4]。計算された表面温度および熱伝達率は熱損失計算のため燃焼モジュールに、表面温度は反応確率計算のため反応計算モジュールに受け渡される。

反応計算モジュールは伝熱計算対象断面と同じ面を計算対象とし、ガス分子の壁面への衝突回数、反応確率等から反応分子個数を求めエロージョン量、反応熱量を算出するものである。反応熱量は伝熱計算モジュールに受け渡される。単位時間、単位面積あたりの壁面への衝突モル数(Q)は(1)式のとおりである。

$$Q = \frac{1}{2} \frac{P}{N_A kT} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 N_A はアボガドロ数、 k はボルツマン定数、 m は気体分子の質量、 P 、 T は各々圧力(分圧)とガスの絶対温度である。

エロージョン速度(R_E)は(2)式のとおりであり、これを数値積分することによりエロージョン量が得られる。

$$R_E = Q \cdot R_R \cdot N_r \cdot \frac{m}{\rho} \dots \dots \dots (2)$$

$$R_R = R_c \cdot R_a$$

ここで、 R_R は反応確率、 N_r は1反応当りの除去原子数、 m は壁面材料(砲身内表面材料)の原子量、 ρ は壁面材料の密度である。

反応確率 R_R は、ガス分子が反応に必要なエネルギーを有する確率 R_c と、ガス分子の壁面原子への衝突姿勢が適正である確率 R_a の二つの積となる。このうち R_a は物質固有の値であり反応試験等により別途特定する。ここでは、ガス分子が反応に必要なエネルギーを有する確率 R_c の計算手法について検討する。

壁面材料の金属原子と燃焼ガス分子が反応する場合は、壁面の金属原子と燃焼ガス分子が有しているエネルギーの合計が、化学反応に必要なエネルギー以上となる必要がある。

$$E_m + E_g \geq E_a \dots \dots \dots (3)$$

E_m は金属原子が持つ内部エネルギー(エンタルピー)、 E_g はガス分子が持つ運動エネルギー、 E_a は反応に必要な活性化エネルギーを示す。金属原子のエンタルピーは温度に依存するが、火砲では燃焼ガス温度が短時間で大きく変化し、燃焼ガスと砲身内面は熱平衡状態にならず壁面温度(内表面温度)はガス温度と一致しない。そこで、伝熱計算により計算された最表面セルの温度を壁面温度 T_s とすると、反応に必要なガス分子のエネルギー E_g は式(4)となる

$$E_g(T_s) = E_a - E_m(T_s) \dots \dots (4)$$

エネルギーを分子の速さに変換すると、反応に必要な分子速度 v_g は式(5)で表される。

$$v_g = \sqrt{\frac{2E_g(T_s)}{m}} \dots \dots \dots (5)$$

ガスの分子速さについては、その分布関数をマクスウェル-ボルツマン分布より求めることができ、分子の速さを v とすると、式 (6) で表される。

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{m}{2kT} v^2 \right) \dots (6)$$

式 (6) の気体分子の速さ分布 $f(v)$ から、壁面に衝突する気体分子の速さ分布 $f'(v)$ を求めると式 (7) が得られる。

$$f'(v) = 2 \left(\frac{m}{2kT} \right)^2 v^3 \exp\left(-\frac{m}{2kT} v^2 \right) \dots (7)$$

ここで、 v が v_g 以上となる確率はガス分子が反応に必要なエネルギーを有する確率 R_e と等価であり、次式で表される。

$$R_e = \int_{E_g(T_s)}^{\infty} f'(v) dv$$

$$= \int_{E_g(T_s)}^{\infty} 2 \left(\frac{m}{2kT} \right)^2 v^3 \exp\left(-\frac{m}{2kT} v^2 \right) dv \quad (8)$$

式 (8) の反応に必要なエネルギーを有する確率 R_e および、ガス分子の壁面原子への衝突姿勢が適正である確率 R_a によって反応確率 R_R を計算する。

以上の方法により、ガスに含まれる気体の種類毎に Q および R_R を求め、 N_f 、 m 、 ρ 等の物性値から式 (2) のエロージョン量 R_E を計算する。

3. 計算諸元の取得

(1) 砲身諸元と対象材料

計算の対象として米国の 105mm 戦車砲 M68 および同火砲で初期に使用された M392 (APDS 弾) 相当の弾薬を想定した。発射薬は M30 組成、薬量 5.6kg、弾丸 5.9kg とし、表 1 に示す砲身諸元および表 2 に示す発射薬諸元で計算を行った^{[5][6]}。なお、砲身に使われる素材は化学反応計算においては鉄 (Fe) として扱う。ただし、伝熱計算においては熱物性の比較的近い CrMo 鋼の物性値を使用する。また、燃焼ガス組成は発射薬組成から化学平衡計算によって求められるが、基本的に H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 N_2 の 5 つのガス種で構成される。

表1 105mm 戦車砲 M68 の燃焼・熱計算諸元

	薬室部	砲腔部
長さ	0.6m	4.7m
内面材料	CrMo 鋼	CrMo 鋼
砲軸方向分割数	6	47
半径方向分割数 ／分割範囲(内表面 面からの距離)	10／0-10mm	10／0-0.1mm 10／0.1-1mm 10／1-10mm

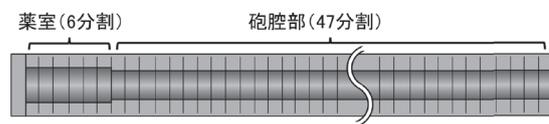
表2 発射薬の計算諸元

発射薬種類	M30
発射薬組成 (質量%)	ニトロセルロース = 28% ニトログリセリン = 23% ニトログアニジン = 48%
燃焼温度	3040K
火薬の力	1.1kJ/g
比熱比	1.2
コボリウム	1.1cm ³ /kg
比重	1.7
燃焼ガス組成(モル比)	H ₂ =13%、H ₂ O=24%、CO=27%、 CO ₂ =8%、N ₂ =28%

(2) メッシュの分割

燃焼計算にあたっては薬室 6 分割、砲腔 47 分割と合わせて砲身全長 5.35m の領域を 53 分割した。また、伝熱計算のための要素分割は薬室部の 6 断面各々について、表面から厚さ 10mm の範囲を 10 分割した。また砲腔部の 47 断面については、内表面温度を精密に計算するため分割数を増やし、表面から 0.1mm を 10 分割、次の 1mm を 10 分割、その次の 10mm を 10 分割し、合計で表面から厚さ 11.1mm の範囲を 30 分割した。これらを図 4 に示す。

燃焼計算の要素(長手方向分割図)



伝熱計算の要素(内表面付近、半径方向分割図)

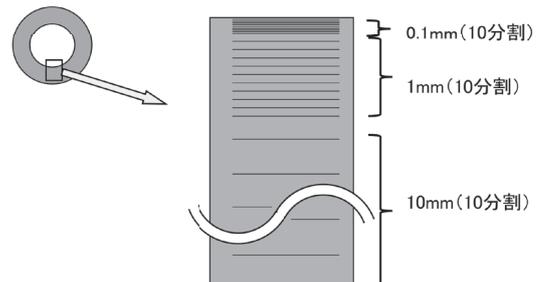
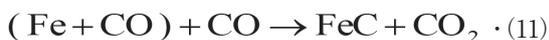


図4 燃焼計算および伝熱計算モデルの要素分割

(3) 化学反応の仮定

化学反応過程については議論が必要であるが、本報ではシミュレーションの最初の試みとして各ガス種とFeとの反応はそれぞれ単独の過程によるものと仮定した。

燃焼ガスに含まれる5種類のガス種のうちH₂およびN₂は、高温反応試験の結果、他の3種のガス種に比較し著しく反応速度が小さいため^[7]計算対象から除外し、H₂O、CO₂、COの3種のガス種のみ反応計算対象とした。化学反応に伴う壁面材料のFe原子除去のメカニズムは、H₂OおよびCO₂については強い酸化反応により生成したFe酸化物が壁面から脱落・除去されたと考え、反応した酸素原子1個に対して鉄原子の除去数を1とした。一方、COによる反応による壁面材料Feの除去については、COガスとの反応によりFeが浸炭され、浸炭されたFeは融点が降下するため、射撃時の温度上昇によって熔融除去されたと考えた。その際COはFeに極めて容易に吸着することから、ガスに曝されたFe表面には速やかにCO分子が吸着し、2つ目のCO分子の接近によって反応が進行するものとした。すなわち想定する化学反応式は(9)、(10)、(11)式のとおりである。



(4) 化学反応諸元の取得

化学反応に関する計算諸元は以下のように求めた。

H₂O、CO₂、COの3種の気体について、図5に示す試験装置^[7]を用いてFeとの高温反応試験を実施した。

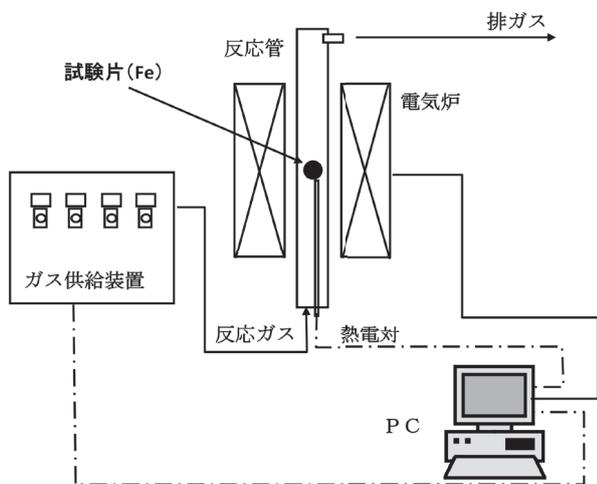


図5 反応試験装置

試験で得られた1073K、1273K、1473Kの三種の温度での反応速度の値のアレニウスプロット(図6)により活性化エネルギーを求め、H₂O、CO₂、COのガスについて各々約45kJ/mol、35kJ/mol、100kJ/molの値を得た。

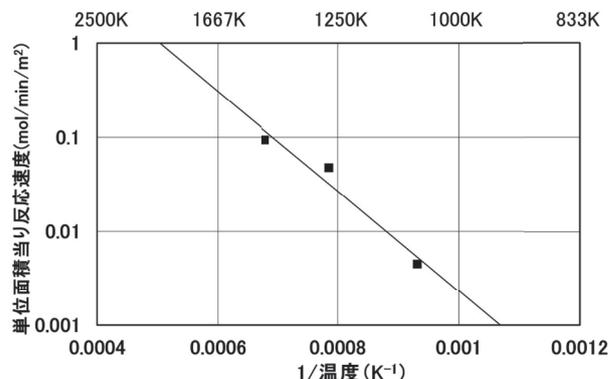


図6 反応試験結果のアレニウスプロット例(CO)

反応するために必要な気体分子のエネルギーは、上記の活性化エネルギーから反応相手のFeのエンタルピーH_{Fe}を減じた値となる。Feのエンタルピーは温度に依存し、図7に示すような関係^[7]が得られている。

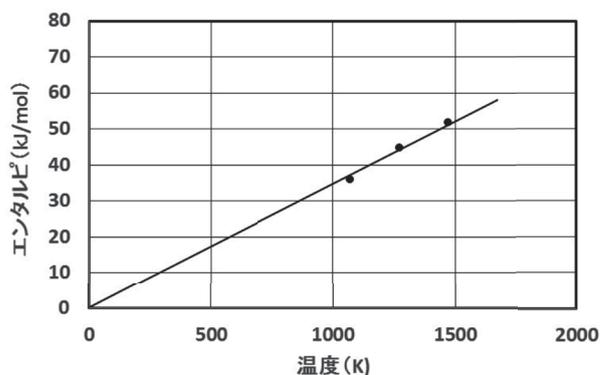


図7 純鉄のエンタルピーと温度の関係

ガス分子が反応するためには、分子のもつ運動エネルギーがある閾値(E_a - H_{Fe})を超え、かつFe原子と衝突するガス分子の向きが適切な範囲にあることが必要である。分子が反応し得る衝突姿勢となる確率を、エネルギー的な閾値(E_a - H_{Fe})を超える分子数(統計力学計算により求める)と、実際にFeと反応した分子数(試験により求める)との比較からCO₂、CO、H₂Oについて算出し、各々5.2 × 10⁻⁵、1.8 × 10⁻⁴、1.3 × 10⁻⁷の値を得た。以上によって得られた計算諸元を表3に示す。

表3 化学反応計算諸元

ガス	H ₂ O	CO ₂	CO
反応に必要なエネルギーE _a	45 kJ/mol	35 kJ/mol	100 kJ/mol
衝突姿勢が適切な確率	1.1×10 ⁻⁷	4.7×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁴

また化学反応に伴うFe原子除去数、除去メカニズムおよび温度閾値を表4に示す。

表4 化学反応に伴う鉄原子除去数

ガス	H ₂ O	CO ₂	CO
反応原子	O	O	C
Fe除去原子数: N _r	1個	1個	10個
温度閾値	—	—	1420K
除去メカニズム	酸化	酸化	浸炭+溶融

H₂OとCO₂の反応および壁面物質除去の計算においては、式(9)、(10)にしたがい、除去されるFe原子数は1とし、このとき壁面温度は鉄原子のエンタルピーとして計算され連続的に変化するため温度閾値は特に存在しない。一方、COと反応して浸炭されるFeの場合、Fe原子とC原子の比率の変化に応じて様々な温度で様々な除去数になると考えられ、一般的な除去原子数と温度閾値を求めるのは難しい。ここではFe-C二元状態図^[8]から、液相が出現する最も低い温度である共晶温度1420Kを温度閾値とし、その温度で最もC濃度が少ない、γ相-共晶-液相の三重点に対応するFe/C比10を除去原子数として設定した。

以上の条件を用いて燃焼ガス中のH₂O、CO₂、COの三種の気体分子によるエロージョン量を各々計算し、それらの合計を当該砲身のエロージョンとし、予測計算を行った。

4. 計算結果および考察

図8に砲身内圧力(薬室部)の計算結果および実測結果を示す。計算結果は薬室後端部、実砲のデータ^[9]は薬室中央部の計測結果のため、最大圧力がわずかに異なるが、圧力の値・時刻履歴共に計算結果と実砲の計測結果はほぼ一致した。

図9に弾丸速度の計算結果を示す。計算結果の右端の値は砲口離脱時の弾丸速度にあたり、これが実砲の砲口初速の値^[6]と一致した。圧力および弾丸速度の計算結果が実砲と一致したことから、火薬の燃焼計算および砲内弾道計算は実砲を適切に再現できたと考えられる。

図10に砲腔起端部付近の内表面温度の時間変化を示す。実砲の内表面温度の履歴は計測が困難であるが、

M68 砲身の射撃後内表面には白層と呼ばれる熱変態相が生成していることから、α→γ変態温度(約1073K)以上の温度に到達していることが確認されている^[10]。今回の計算結果は内表面温度が1073Kを大きく超えていることから、実砲と同程度の温度に達していると考えられ、伝熱計算は概ね実砲を再現できたとみなせる。

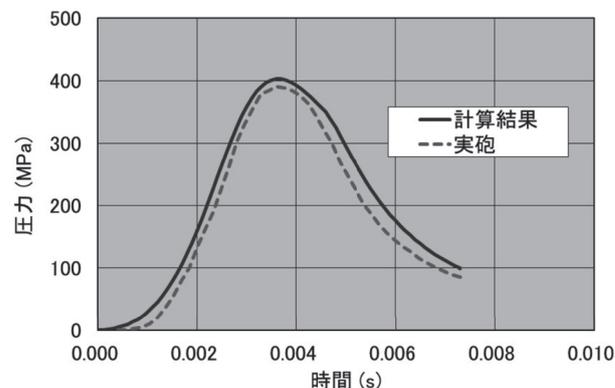


図8 薬室圧力の時間変化

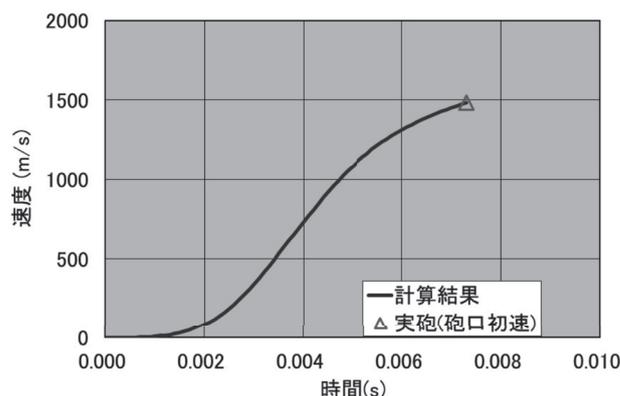


図9 弾丸速度の時間変化

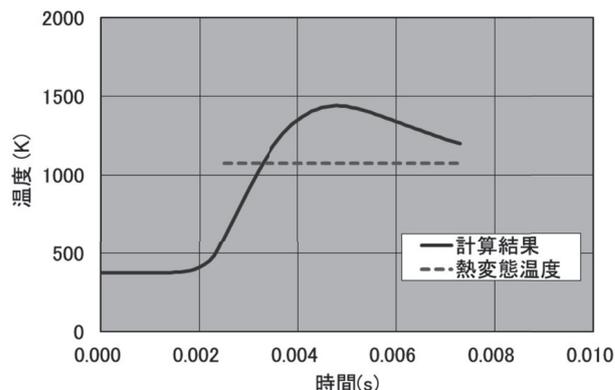


図10 起端部内表面温度の時間変化

以上の燃焼・伝熱・弾丸運動計算の結果をもとに、反応計算を行い、エロージョン量と砲身位置の関係を示した結果を図11に示す。図の実砲のデータは、射撃120回後のエロージョン量の実測値であり^[11]、計算結果は射撃1

回当たりのエロージョン量を計算により求め、これを120倍した値である。なお、薬室に当る0m(砲尾端)から0.6mの範囲は、薬きょうにより砲身内面が燃焼ガスに暴露されずエロージョンが発生しないため、計算範囲から除外した。

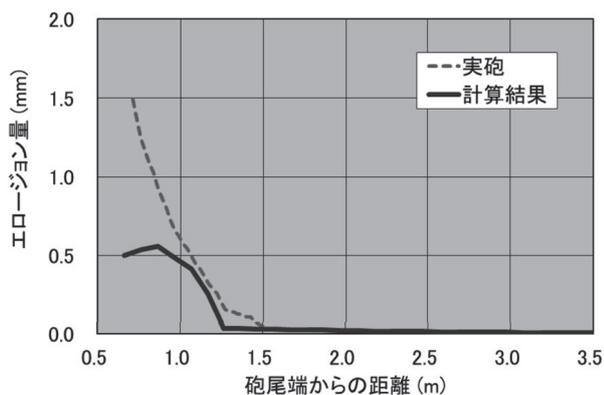


図11 射撃120回後のエロージョン量

計算結果はエロージョンの発生位置、エロージョン量ともに実砲のデータに概ね一致している。実砲では砲尾端から1.5m位置から5.3m(砲口)の範囲ではエロージョンが出現せず、1.5mから0.7mの範囲にかけてエロージョンが出現しているが、計算結果は1.0m以上の範囲で実砲とほぼ同様の傾向を示し、エロージョン量の値についても概ね近い値を示している。弾丸の弾帯がライフルに食い込み始める0.7m～1.0mの範囲については、弾帯材の加工発熱や摩擦熱により実砲のエロージョン量が計算値よりも大きくなったと推測される。今回の計算では加工・摩擦による発熱を考慮していなかったため0.7m～1.0mの範囲の実砲データは再現できなかったが、この範囲を除き、実砲のエロージョン量と計算値は非常に良く一致した。

以上のように、平衡論をベースとする分子・原子レベルでのミクロな反応計算モデルからマクロ的なエロージョン量を予測する手法によっても、エロージョン量を精度よく予測できることが示された。

今後は計算の基本となる分子・原子レベルの化学反応の精緻化に加え、加工熱・摩擦熱等の条件をモデルに加えることで実砲により近い条件を再現し、さらに汎用性の高いエロージョン予測を実現できると考える。

5. 結 言

実際の火砲M68を対象として平衡論をベースとする分子・原子反応モデルを基にした燃焼-伝熱-反応連成ソルバを作成し、このソルバによる計算結果と試験結果を比較し次の結論を得た。

- (1) 燃焼および伝熱計算は実砲のデータにはほぼ一致した妥当な結果が得られた
- (2) 分子・原子レベルの化学反応の詳細モデル化によるエロージョンの定量的予測計算により、実砲のエロージョン量を概ね予測可能となった
- (3) 摩擦発熱等の要因をモデルに加えることにより、さらに汎用性の高いエロージョン予測が可能である

今後、より多くの弾薬や砲種において計算手法の検証を進めてデータベースを拡充し、計算精度のさらなる向上に取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- (1) B.Lawton, "Thermal and Chemical Effects on Gun Barrel Wear", Proceedings of 8th International Symposium on Ballistics, 1984, Vol.2, 27-33.
- (2) J.Kimura, "Hydrogen Gas Erosion of High-Energy LOVA Propellants", Proceedings of 16th International Symposium on Ballistics, 1996, Vol.1, 307-315.
- (3) 松山孝男, 吉田宏之, "エロージョンメカニズムの研究 (第一報)" 弾道学研究, 第18号, 2009, 14-18.
- (4) 西上雅, 山本和弘, 松山孝男, 笠松潤一, 渡邊正基, "めっき砲身のエロージョンに関する研究 (第2報)", 弾道学研究, 第13号, 2004, 17-22.
- (5) 弾道学研究会編, 火器弾薬技術ハンドブック(2012年改訂版) 防衛技術協会.
- (6) Timothy L.Brosseau and J.Richard Ward, "Measurement of Heat Input Into The 105mm M68 Tank Cannon Firing Rounds Equipped With Wear-Reducing Additives (AD-A056368)" TECHNICAL REPORT ARBRL-TR, 02056, 1978.
- (7) 松山孝男, 吉田宏之, "エロージョンメカニズムの研究 (第二報)" 弾道学研究, 第19号, 25-29, 2010.
- (8) 日本金属学会・日本鉄鋼協会, 鉄鋼材料便覧, 1967, 丸善.
- (9) Douglas E.Kooker and Carl W.Nelson, "Numerical Solution of Three Solid Propellant Combustion Models during a Gun Pressure Transient," AD-A035250, BRL Report No.1953, 1977.
- (10) 日本防衛装備工業会, 兵器と技術 材料特集号, 1991, 4-25.
- (11) Allan A.Albright and Glenn S.Friar, "Analysyi of Wear Data from 105mm M68 Gun Tubes in Field Service," AD-A015461, Technical Report WVT-TR, 75047, 1975.