

## ダブルベース推進薬の浸食燃焼（第2報）

石原 教\*, 久保田浪之介\*

固体推進薬の浸食燃焼を燃焼表面近傍の燃焼波構造に注目し、実験的に研究した。実験は、ホトグラフ法により浸食燃焼速度を測定すると同時に、燃焼表面近傍の温度分布の測定を行った。用いた推進薬は、基本組成のダブルベース推進薬と、ニッケル粒子1%含有させた推進薬の2種類である。ニッケルを含有させることにより、ストランド燃焼速度をかえずに、高温反応ガス層を燃焼表面へ近づけることができる。すなわち、燃焼波構造が著しく異なる状態で浸食燃焼を調べた。その結果、両推進薬の浸食燃焼速度、浸食燃焼の threshold 値および燃焼表面の温度分布が等しくなることが明らかとなった。すなわち、平行ガス流の存在による燃焼ガスのミキシングが、ダークゾーンの反応速度を加速させ、ダークゾーンの厚みを急激に減少させることが、本研究により明らかとなった。

## 1. はじめに

固体推進薬燃焼表面上に高速ガス流が存在すると、推進薬の燃焼速度は、ガス流が存在しない状態の燃焼速度に比べ、著しく増加する。この現象は、固体推進薬の浸食燃焼と呼ばれ、推進薬長 $L$ と推進薬内孔径 $D$ の比( $L/D$ )の大きな内面燃焼形式のロケットモータで顕著に表われる。ロケットモータの設計で充填率の向上を図る際、あるいは大推力を必要とする際に、特に浸食燃焼速度の予測が必要である。近年、ロケットモータの高推力化、高速度化の要求に伴い、浸食燃焼を利用したノズルレスロケットの研究が盛んに行われ<sup>1)~7)</sup>、浸食燃焼速度の予測および浸食燃焼の詳細な発生機構の解明が重要になってきている。しかしながら、浸食燃焼の発生が、ロケットモータ内の高温高压高流速な場で起こるため、燃焼波構造の測定が困難であり、詳細な研究がなされていない。

前報<sup>8)</sup>では、観測窓付二次元燃焼器を用い、燃焼表面と気相の観測を可能にし、浸食燃焼速度の測定を行った。その結果、浸食燃焼の発生していない平行ガス流領域でも燃焼表面上で燃焼ガスの強いミキシングが存在することを見出した。

浸食燃焼速度は、気相から燃焼表面への熱移動量によって決定される。この熱移動量は、平行ガス流速、燃焼圧力、表面からのガス吹き出し速度、そして燃焼表面上の燃焼波構造等により大きく影響を受ける。本

研究では、燃焼波構造の著しく異なる2種類のダブルベース推進薬を試製し、両推進薬についての燃焼波構造および燃焼速度への影響に注目し、固体推進薬浸食燃焼の発生機構の考察を行った。

## 2. 実験

## 2.1 実験方法および装置

浸食燃焼速度の測定は、前報と同様な観測窓付二次元燃焼器を用いた。推進薬試料は、長さ120mm、幅20mm、高さ25mmのものを使用した。推進薬試料側面への火炎の侵入を防ぐために、本研究では、厚さ0.5mmのアクリル樹脂およびエポキシ系接着剤で保護を施してある。

燃焼表面のガス流速および燃焼圧力は、前報同様に求めた。燃焼速度に重要な燃焼表面上の温度分布は、線径100 $\mu\text{m}$ のPt-Pt/13%Rh熱電対を推進薬中に埋め込むことより測定を行った。推進薬に埋め込んだ熱電対を模式的にFig. 1に示す。推進薬中の熱電対のX線写真を、Fig. 2に示す。平行ガス流は、推進薬表面を左方から右方へ流れ、燃焼が進むにつれ、燃焼面が下方に移動し、熱電対が頭を出してくる。したがって、燃焼表面上の温度分布は、熱電対の温度履歴(温度 $T$ -時間 $t$ カーブ)の時間軸と燃焼速度 $v$ との積をとり、座標変換することで求める。

## 3. 推進薬

燃焼表面近傍の燃焼波構造の著しく異なる推進薬にED-2、ED-4を選んだ。その組成をTable 1に示す。推進薬ED-2は、ダブルベース推進薬である。推進薬ED-4は、推進薬ED-4を基本組成とし、ニッケル粉(粒径約3 $\mu\text{m}$ )を1%含有させたものである。こ

昭和59年9月28日受理

\*防衛庁技術研究本部第3研究所  
〒190 立川市栄町 1-2-10  
TEL 0425-24-2411

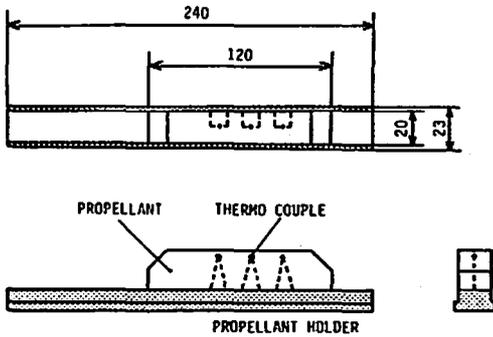


Fig. 1 Configurations of the test propellant specimens.

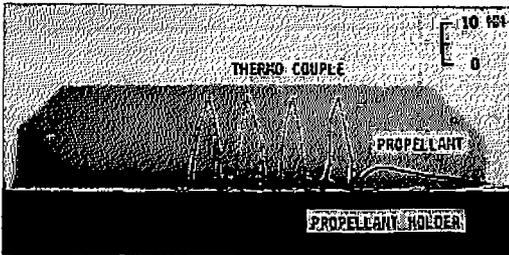


Fig. 2 X-ray photograph of thermocouples embedded in test propellant specimen.

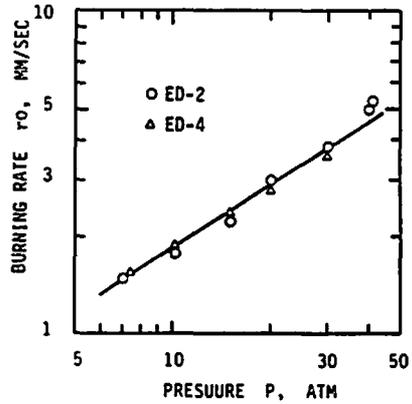


Fig. 3 Burning rate of the propellant specimens. (ED-2, ED-4).

Table 1 Specification of the propellant formulations used for this study (wt%).

Prop.	NC	NG	DEP	Ni
ED-2	50.4	36.6	13.0	—
ED-4	49.9	36.2	12.9	1.0

NC ; Nitrocellulose DEP ; Diethylphthalate  
 NG ; Nitroglycerine Ni ; Nickel (dia.  $3\mu\text{m}$ )

これらの推進薬の平行ガス流速  $0\text{m/sec}$  の燃焼速度 (ストランド燃焼速度) を Fig. 3 に示す。このようにニッケル粒子は、ストランド燃焼速度に影響を及ぼさない。燃焼速度は、圧力  $20\text{atm}$  で  $2.9\text{mm/sec}$  であり、圧力指数は、 $0.7$  である。しかしながら燃焼状況は、Fig. 4, Fig. 5 に示すように著しく異なる。Fig. 4 にはストランド燃焼状況を、Fig. 5 には燃焼表面近傍の温度分布を示す。温度分布は、推進薬中に埋め込まれた線径  $5\mu\text{m}$  の Pt-Pt/10% Rh 熱電対により測定したものである。Fig. 4, Fig. 5 から明らかのように、推進薬中のニッケル粒子により、燃焼表面上の未輝炎層 (ダークゾーン) の厚みが減少し、輝炎層 (フレイムゾーン) が、燃焼表面へ接近している。この現象は、ニッケルのダークゾーンでの触媒反応によるもの

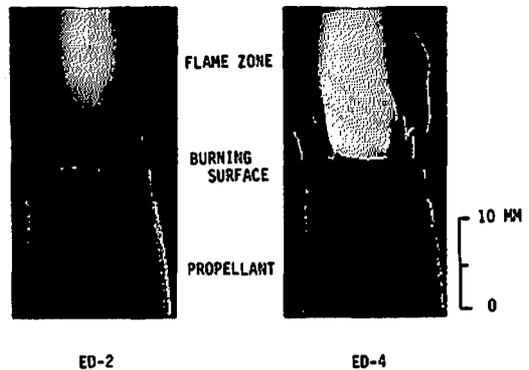


Fig. 4 Photographs of propellant specimens burning without crossflow.

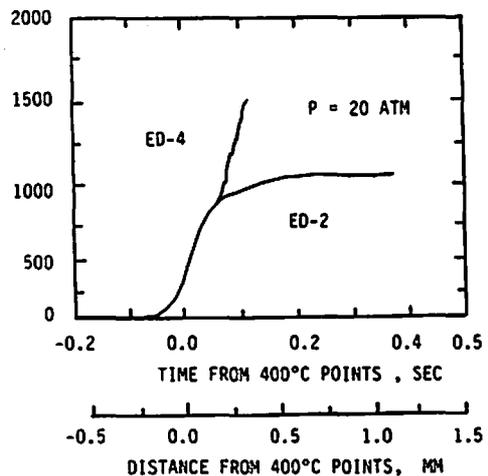


Fig. 5 Temperature profiles on burning surface without crossflow.

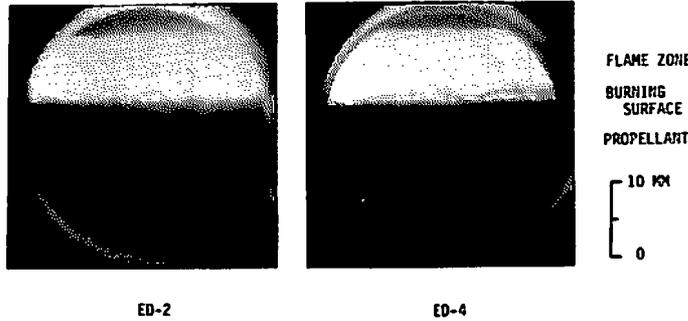


Fig. 6 Photographs of propellant specimens burning with crossflow.

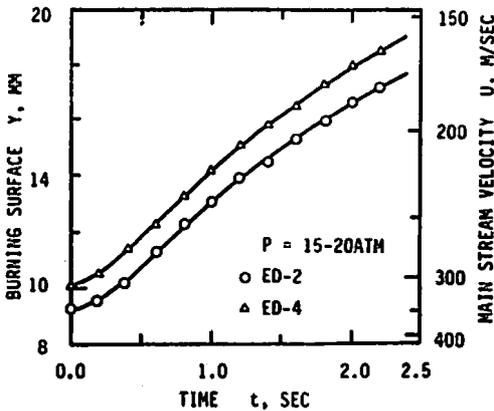


Fig. 7 Variation of burning surface location and crossflow velocity.

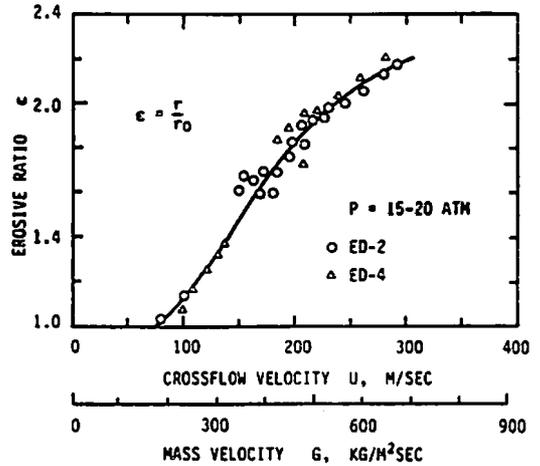


Fig. 8 Effect of main stream velocity and mass velocity on erosive burning ratio.

としてよく知られており<sup>9)</sup>、ニッケルが輝炎発生のための反応時間を著しく短縮していることがわかる。したがって、ガス流速0m/secの状態では、両推進薬の燃焼表面からの分解ガスの吹き出し速度は、等しくなる。しかしながら、ニッケル入り推進薬 ED-4 では、ダブルベース推進薬 ED-2 に比べ、より燃焼表面近くに高温の輝炎が形成されている。

ガスジェネレータ用推進薬は、前報とほぼ同様な組成の推進薬で、圧力振動抑制剤としてアルミニウム粉(粒径2 $\mu$ m)を3%含有させている。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 浸食燃焼速度

Fig. 6 に浸食燃焼試験装置の観測窓よりの推進薬燃焼状況を示す。左の写真がダブルベース推進薬 ED-2、右の写真がニッケル入りダブルベース推進薬 ED-4 である。それぞれ平行ガス流は、燃焼表面を左から右へ約300m/secで流れる。推進薬 ED-2 では、ストランド燃焼で観察されたダークゾーンが減少し、フレイムゾーンが表面へ接近した様子が観測されている。

観測窓を通し測定した燃焼表面位置の時間的変化を Fig. 7 に示す。縦軸には、合せてその燃焼表面の位置に対応する平行ガス流速を示した。Fig. 7 の接線の傾きが、その時点での燃焼速度を表わす。推進薬 ED-2 および ED-4 では、燃焼速度がほぼ等しいことが明らかである。Fig. 7 では、平行ガス流速は、250 m/sec 付近であるが、平行ガス流速100~300m/sec の範囲で調べた結果を Fig. 8 に示す。縦軸の浸食率  $\epsilon$  は、燃焼速度  $r$  をガス流速がない状態の燃焼速度  $r_0$  で無次元化したものである。Fig. 8 には、燃焼圧力20 気圧とし、計算により求めたガス密度によりガス質量流速に換算した横軸を合せて示した。ガス温度は、26 30°K、ガス分子量は、24.6 を用いた。Fig. 9 から明らかのようにガス流速が、100m/sec を越えると浸食燃焼が顕著になり、250m/sec 付近では、浸食率  $\epsilon$  は、両推進薬とも  $\epsilon = 2$  に達する。推進薬 ED-4 はストランド燃焼で、燃焼表面近くに高温領域が存在したに

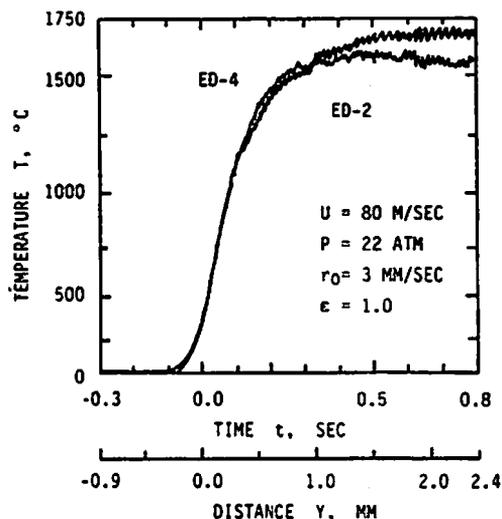


Fig. 9 Temperature profiles on burning surface with crossflow.

もかわらず、浸食燃焼速度および threshold 値は、推進薬 ED-2 に等しいことが明らかとなった。

このようにダークゾーンの温度分布が異なる推進薬 ED-2、ED-4 の浸食燃焼速度が等しい理由として次のことが考えられる。推進薬の燃焼表面での温度傾斜を律速する反応が、フィズゾーン内の燃焼表面の極近傍にあり、その反応層が、フィズゾーンの厚さに比べ、極めて薄い反応層のため、フレイムゾーンの燃焼表面への接近が浸食燃焼速度に影響を及ぼさなかった。あるいは、平行ガス流の存在により、ダークゾーン内の乱れが増加し、ダークゾーン内の反応速度が増大した。その結果、推進薬 ED-2、ED-4 の燃焼表面近傍の温度分布がほぼ等しくなり、浸食燃焼速度に差が生じなかったかのいずれかである。次の 4.2 項では、熱電対による温度分布の測定から、これらの結果を検討する。

#### 4.2 燃焼表面の温度分布

Fig. 9 に線径  $100\mu\text{m}$  の熱電対で測定した推進薬燃焼表面近傍の温度分布を示す。ガス流は、約  $80\text{m/sec}$  の速度で表面を流れる。したがって、浸食燃焼が発生していない、threshold 値以下のガス流速である。Fig. 5 はガス流速  $0\text{m/sec}$  の温度分布で、燃焼表面近傍の急激な温度上昇のあるフィズゾーンとその後に続く温度上昇の緩やかなダークゾーンが、ダブルベース推進薬 ED-2 に観察されている。それに対して Fig. 9 は、threshold 値以下の流速条件でも推進薬 ED-2 のダークゾーンが消滅し、推進薬 ED-4 の温度分布とほぼ等しくなることを示している。使用した熱電対の線

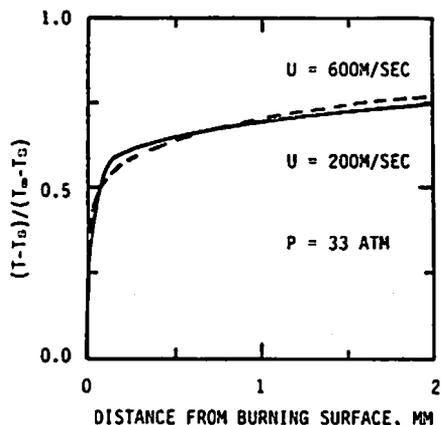


Fig. 10 Temperature profiles on burning surface with crossflow.

径が  $100\mu\text{m}$  と太く、熱電対の時定数が大きく、そして空間的分解能が悪いことを考えると、平行ガス流のためにダークゾーン内へ乱れが侵入し、ダークゾーンで燃焼ガスのミキシングが発生していることが、温度分布の上からも明らかである。このミキシングにより、ダークゾーンの反応速度が増加し、推進薬 ED-2 でダークゾーンの厚みが急激に減少したのである。しかしながら、推進薬 ED-4 の場合には、平行ガス流がない状態でも、ニッケルの触媒効果により、ダークゾーン内の NO の環元反応が加速され、ダークゾーンの厚みが減少している。その結果、燃焼ガスのミキシングによる効果が、明確に表われなかったのである。すなわちダブルベース推進薬 ED-2 とニッケル入り推進薬 ED-4 の浸食燃焼速度および threshold 値が等しくなる理由として、平行ガス流による燃焼ガスの乱れが推進薬 ED-2 のダークゾーン内へ侵入して反応速度を著しく増加させた結果、両推進薬の燃焼表面上の温度分布が等しくなったことが考えられる。

#### 4.3 実験結果と従来のモデルとの比較

推進薬の燃焼速度は、燃焼表面での熱平衡によって決定される。すなわち、燃焼表面における固相内への熱移動量、燃焼表面での反応による発生熱量、そして気相より燃焼表面への熱移動量が燃焼速度を決定するのに重要な役割をはたしている。特に浸食燃焼では、気相より表面への熱移動で機構を解明することが研究の焦点となっている。過去に浸食燃焼について数多くの研究結果が報告されているが、燃焼波構造に注目して行った研究の代表例として King<sup>10)</sup>、Wu, Kumar, Kuo<sup>11)</sup>等の研究がある。King は、平行ガス流の存在により、燃焼表面上の乱れが増大し、有効熱伝導率の増加によって燃焼表面への熱のフィードバック量が増

え、燃焼速度が増加すると考えた。Cold Flow での有効摩擦係数の測定結果より、有効熱伝導率を予測し、Flame Sheet Model を用い、ダブルベース推進薬の浸食燃焼速度を予測している。実験値ともよい一致を見るが、燃焼速度の決定に重要な燃焼表面気相の温度分布変化が示されていない。したがって、モデルの正当性を示すための検討が必要である。Wu, Kumar, Kuo,らは、燃焼表面上における乱れのモデルに  $K-\epsilon$  Turbulent Model および Spalding の Eddy Break Up Model を適用し、ダブルベース推進薬の浸食燃焼速度を求めている。これらは、Brick, Osborn の実験結果ともよく一致しており、燃焼表面上の温度分布についても検討している。浸食燃焼の発生機構で重要な温度分布の変化を示しているのは、この報告が唯一のものである。Wu らの結果を座標軸を変換し、Fig. 10 に示す。浸食燃焼速度は、ガス流速 200m/sec では、5.9mm/sec, 600m/sec では、11.9mm/sec となっている。Wu らは、ニトログリセリン 49%, ニトロセルロース 39% からなる推進薬を用いており、ガス流速 0m/sec の燃焼速度は、約 4.7mm/sec である<sup>10)</sup>。したがって、ガス流速 200m/sec の浸食率は、 $\epsilon = 1.3$ , 600m/sec では  $\epsilon = 2.5$  となる。Wu らの温度分布には、燃焼表面近傍の温度傾斜の急峻なフィズゾーン、それに続く温度上昇が緩慢なダークゾーンが表われている。しかしながら、本研究によって得られた温度分布の結果(Fig. 9)によると、ガス流速が、80m/sec で、threshold 値以下にもかかわらず、燃焼ガスのミキシングによるダークゾーンの消滅現象が表われている。したがって、Wu らの理論においては、用いられた物理、化学的パラメータや、Eddy Break Up Model の適用等に関して、実験結果をもとにした検討が必要であることがわかる。すなわち、浸食燃焼発生機構の解明とそのモデル化には、流れと燃焼波との相互影響を詳細に調査する必要がある。

##### 5. まとめ

浸食燃焼速度に重要な気相から燃焼表面への熱のフィードバック量は、平行ガス流速、燃焼圧力、表面からのガス吹き出し速度、燃焼表面上の燃焼波構造等のパラメータにより決定される。本研究では、ガス流速 0m/sec の際、ガス吹き出し速度が等しいが、燃焼波構

造の大きく異なるダブルベース推進薬 ED-2 とニッケル粉 1% を含有させた推進薬 ED-4 を用い、ホトグラフ法により浸食燃焼速度の測定を平行ガス流速 0 ~ 300m/sec の範囲で行った。同時に推進薬中に埋め込んだ熱電対により燃焼表面の温度分布を測定した。推進薬 ED-4 の高温反応層は、推進薬 ED-2 に比べ、燃焼表面近傍に存在する。しかし、浸食燃焼速度は、どちらの推進薬も同様で、ガス流速が 100m/sec を超えると顕著に衰われ、250m/sec 付近では、ストランド燃焼速度の 2 倍に達した。

この現象は、燃焼表面近傍での燃焼ガスのミキシングにより、ダークゾーンの反応速度が増大し、ダークゾーン厚みを急激にダブルベース推進薬 ED-2 で減少させたためである。その結果、ニッケルを含む推進薬 ED-4 の温度分布に近づき、浸食燃焼速度が、両推進薬で等しくなったことが明らかとなった。このダブルベース推進薬のガス流による温度分布の変化は、Wu らの Eddy-Break-Up モデルを用いて求められた温度分布は著しく異なることも明らかとなった。

##### 文 献

- 1) S. Nahon, AIAA Paper 84-1312 (1984)
- 2) J. C. Traigneau, P. Kuentzmann, AIAA Paper 84-1469 (1984)
- 3) R. K. Rout, H. S. Mukunda, V. K. Tain, AIAA Paper 84-1437 (1984)
- 4) C. D. Mikkelsen, G. P. Roys, Journal of Spacecraft, Vol. 21, No. 1, p. 41 (1984)
- 5) M. K. King, AIAA Paper 82-1200 (1982)
- 6) M. K. King, AIAA Paper 82-1202 (1982)
- 7) R. Arora, X. Wu, F. X. White, K. K. Kuo, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 20, No. 1, p. 43 (1983)
- 8) 石原敦, 久保田浪之介, 工業火薬協会誌, Vol. 44, No. 6, p. 334 (1983)
- 9) N. Kubota, Propellants and Explosives, Vol. 3, p. 163 (1978)
- 10) M. K. King, AIAA Journal, Vol. 20, No. 10, p. 1432 (1982)
- 12) X. Wu, M. Kumar, K. K. Kuo, Combustion and Flame, Vol. 53, p. 49 (1983)

## Erosive Burning of Double-Base Propellants (II)

by Atsushi ISHIHARA\* and Naminosuke KUBOTA\*

An experimental study on erosive burning of double-base propellants has been conducted in order to elucidate the role of the luminous flame on the burning rate augmentation. Two types of propellants were examined: a conventional double-base that was used as a base propellant and a 1.0% nickel added propellant. The measurements of erosive burning rate were done with a windowed micro-rocket motor and the measurements of the temperature profile near the burning surface were done with fine micro-thermocouples embedded in the propellant samples.

The nickel additives make the luminous flame significantly close to the burning surface without any change in the strand burning rate characteristics. Though the two propellants showed remarkably different burning flame structure, the observed threshold velocity and erosive ratio were approximately the same for both types of propellants. The diffusional mixing caused by the crossflow gas increased the chemical reaction in the gas phase and the flame standoff distance of the base propellant. The nickel added propellant was not influenced by the crossflow gas and as the result the both propellants showed the same erosive property.

(\*Rocket Propulsion Laboratory, Third Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency, 1-2-10 Sakae, Tachikawa, Tokyo 190 Japan)

### ニュース

#### "EXPLOSION & EXPLOSIVES"

##### の Dr. Damon 氏退任

米国鉱山局の Dr. Glenn H. Damon 氏は永らく「工業火薬協会誌」中工業関係報文の選択英訳誌 "EXPLOSION & EXPLOSIVES." の刊行担当者として活躍され、協会はその御厚意に深く感謝をしています。

博士は最近御夫人を亡くされ、また御自身健康を害されて、この英文誌の仕事 Dr. Earle Amey

氏に托されました。Dr. Damon 氏は約30年前日米工業火薬交換試験以来、永い間の御協力には深く感謝します。併せて博士の御健康の御回復を祈ります。また後任の Dr. Amey 氏には宜しくこの仕事の継続にご協力下さる様御願ひします。

(Dr. Damon 氏の手紙より)

※尚、会員で海外会社訪問の時にはこの英文版をおみやげに御持ち下さい。

(連絡先: 吉田迄)