

生産工学実験報告書  
実験テーマ:T2「熱移動と損失」  
サブテーマ:T2-3「爆轟波の伝播」

横浜国立大学工学部生産工学科（第二部）  
0447011：田村 和也（2班）

実験日：2007/11/9  
第一次提出日：2007/11/16  
第二次提出日：2006/11/26  
第三次提出日：2006/11/27

# 1 たしがき

なんだかみなさんレポートを参考にしてるらしいけど担当教官にはきっとばれていますよ。きちんと自分で考えて使いましょう。

# 2 実験目的

デトネーションとは、燃焼反応と化学反応が平行して起こる燃焼形態の一つである。具体的に、火炎は 1000 ~ 3000[m/s] (マッハ 4 ~ 6) の衝撃波に化学反応のエネルギーが保持されることによって燃焼が進む。本実験ではステンレス管内を伝播する爆轟波の伝播速度を計測することにより、燃焼の速度測定の原因とオシロスコープの取り扱いを学ぶ。

また、流体力学における保存則と熱力学の状態方程式に基づいた解析により、爆轟波の理論伝播速度と実験値の比較を行い、熱流体の基礎理論の復習を行う。更には実験における安全性についても喚起する。

# 3 基礎理論

実験当日の天候は雨、気圧は 101.6[kPa]、気温は 17.4°C(=290.3[K]) であった。数値はこの条件の下実験が行われたとして議論を行う。

## 3.1 ランキン・ユゴニオの式の導出

初期圧  $p_1$ 、密度  $\rho_1$ 、流速  $u_1$ 、の媒質中速度  $U$  の爆轟波が進むことを考える。その波面直後の添え字を 2 と表すと、その検査面では連続の式 (質量保存則)

$$\rho_1(U - u_1) = \rho_2(U - u_2) \quad (1)$$

運動量保存の式

$$p_1 + \rho_1(U - u_1)^2 = p_2 + \rho_2(U - u_2)^2 \quad (2)$$

ベルヌーイの式 (エネルギー保存の式) は、比エンタルピー  $H = E + pv$  ( $E$ : 比内部エネルギー) を導入すると

$$E_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2}(U - u_1)^2 = E_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2}(U - u_2)^2 \quad (3)$$

$$H_1 + \frac{1}{2}(U - u_1)^2 = H_2 + \frac{1}{2}(U - u_2)^2 \quad (4)$$

これらより

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) (p_2 - p_1) \quad (5)$$

非容積を  $v$  とすれば

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) \quad (6)$$

比エンタルピーの定義から

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (7)$$

反応熱を内部エネルギーから差し引けば

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) + Q \quad (8)$$

エネルギーは  $dE = c_v dT$ , 対象気体を理想気体として, 状態方程式  $p v = RT$  から  $T$  を消去して代入すると

$$\left(\frac{c_v}{R} + 1\right) (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) + Q \quad (9)$$

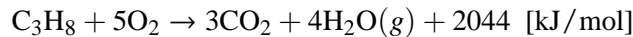
定容比熱の定義  $c_v = R/(\kappa - 1)$  から

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (p_2 - p_1) = Q \quad (10)$$

導出終了.

### 3.2 伝播速度の基礎式と理論伝播速度

本実験における燃焼反応は



ここでプロパン, 酸素それぞれの分子量は [1, p.125] によれば 44.1 [kg/kmol], 32.0 [kg/kmol] であるから, 混合気の分子量を  $M$  とすれば

$$M = \frac{1 \times 44.1 + 5 \times 32.0}{6} = 34.0 \times 10^{-3} \text{ [kg/mol]}$$

これより混合気 1[kg] あたりの発熱量は

$$Q = \frac{2044}{6 \times 34 \times 10^{-3}} = 10.0 \text{ [MJ/kg]}$$

本実験において  $p_1 = 1016 \times 10^2$  [Pa],  $T_1 = 290.3$  [K] であるので

$$v_1 = \frac{RT_1}{Mp_1} = \frac{8.314 \times 290.3}{204.1 \times 10^{-3} \times 1016 \times 10^2} = 1.163 \times 10^{-1} \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

ランキン・ユゴニオの式を  $p_2$  について整理すれば

$$p_2 = \frac{Q + \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} - \frac{1}{2}\right) p_1 v_1 - \frac{1}{2} p_1 v_2}{\left(\frac{\kappa}{\kappa-1} - \frac{1}{2}\right) v_2 - \frac{v_1}{2}}$$

ここで  $\kappa = 1.26$  として実際に値を代入すれば

$$p_2 = \frac{10.01 \times 10^6 + 51.35 \times 10^3 - 50800 v_2}{4.346 v_2 - 0.05815} = \frac{10070962 - 50800 v_2}{4.346 v_2 - 5.815 \times 10^{-2}} \text{ [Pa]}$$

これが本実験におけるユゴニオ曲線となる.  $p_2, v_2$  の値は, この曲線の  $(v_1, p_1)$  を通る接線を引いたときの接点の値である. ここで

$$f(x) = \frac{10070962 - 50800x}{4.346x - 5.815 \times 10^{-2}}$$

$$g(x) = f'(a)(x - a) + f(a) \quad (a = \text{const.})$$

とすれば, 求める点  $v_2$  における接点の  $x$  座標は

$$g(v_1) = p_1 = f'(v_1)(x - v_1) + f(v_1)$$

を満たす. これより接点の座標は  $(0.0649, 4.496 \times 10^7)$  であるので, 圧力に対して単位変換を施し,  $v_2 = 6.49 \times 10^{-2} \text{ [m}^3/\text{kg}], p_2 = 45.0 \text{ [GPa]}$  である. これらの様子を下図 1 に示す.

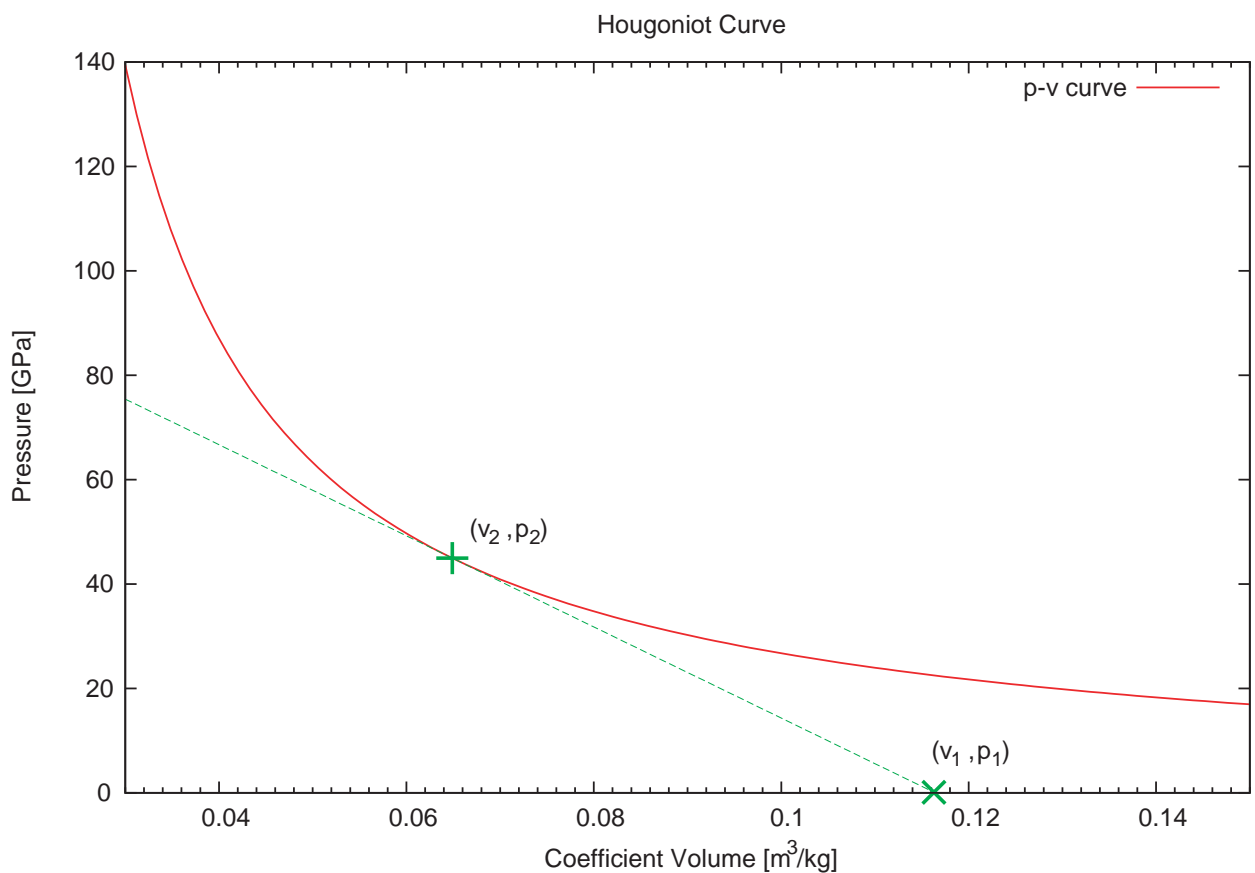


図 1 ユゴニオ曲線と接線

また, これらの諸条件から  $T_2 = 1.19 \times 10^4 \text{ [K]}$  である. また, デトネーション波の理論伝播速度は  $D = v_1 \sqrt{(p_2 - p_1)/(v_1 - v_2)} = 3.44 \times 10^4 \text{ [m/s]}$  である.

## 4 実験装置及び実験方法, 実験結果

### 4.1 実験装置

本実験において使用する燃焼ガスはプロパン：酸素=1:5の混合気である。これを下図2に示すデトネーション波管本体まで導き、デトネーション波管端部に設置したプラグによって点火を行う。また、伝播速度計測用に探極を設けてある。なお、理論混合比を満たすための減圧弁、流量測定装置、バルブ等は適宜取り付けてある。

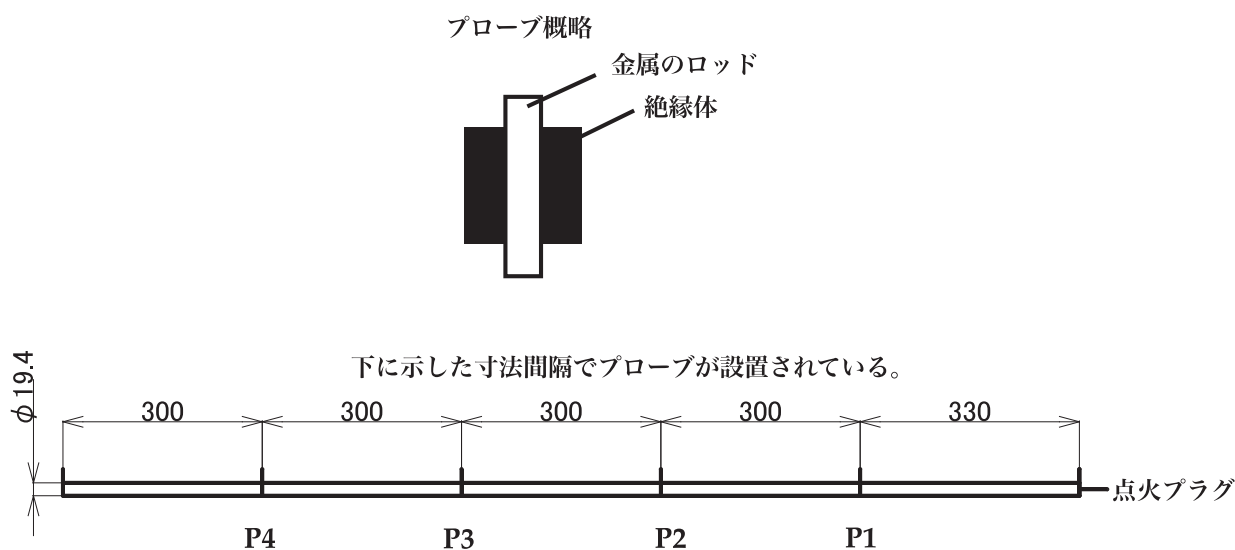


図2 デトネーション波管概略図(管は内径 $\phi 19.4$ のステンレス円管)

### 4.2 デトネーション波伝播速度の測定方法

デトネーション管に金属のロッドを差し込んだ探極(プローブ)を用い、プローブを抵抗とした並列回路を組む。デトネーション波は空気と異なり導体であるため、燃焼ガスの導通により出力電圧は降下する。これをオシロスコープで測定すればよい。

参考 参考として本実験で用いた設定値の諸元を下表1に示す。

表1 オシロスコープ設定値諸元

掃引時間	100 [ $\mu\text{s}/\text{div}$ ]
トリガレベル	14 [V]
電圧偏向感度	2 [V/div]

## 4.3 流量の測定原理

### 4.3.1 ノズルにおけるチョーキング

[1, p.157] によれば,

大気中に気体を放出する場合では約 2 気圧以上の全圧があればノズルはチョークし

とある. 本実験においてはプロパン 170[kPa(g)], 酸素 230[kPa(g)] より, 3 気圧弱と 3 気圧強のため双方ともチョークする. この時スロート部断面積を  $A$  とすれば流量  $\dot{m}$  は

$$\dot{m} = A \sqrt{\kappa \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \frac{p_1}{v_1}}$$

となり, 上流側のみの圧力で決定される.

### 4.3.2 補:ベンチュリ管

流量測定装置としてベンチュリ管があるが, 本実験の場合は流体が非圧縮性流体と見なせない (そもそも気体である) ため, 一般にベンチュリ管の測定原理は適用できない.

## 4.4 実験結果

オシロスコープに出力された曲線を CSV データからプロットしたものを下図 3 から 6 に示す。

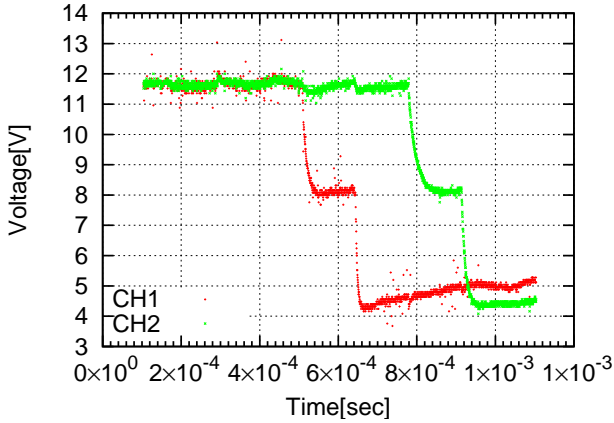


図 3 1 回目の爆轟における時間と電圧データ

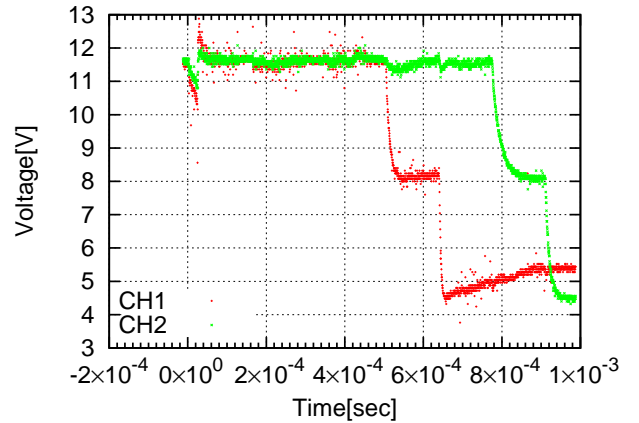


図 4 2 回目の爆轟における時間と電圧データ

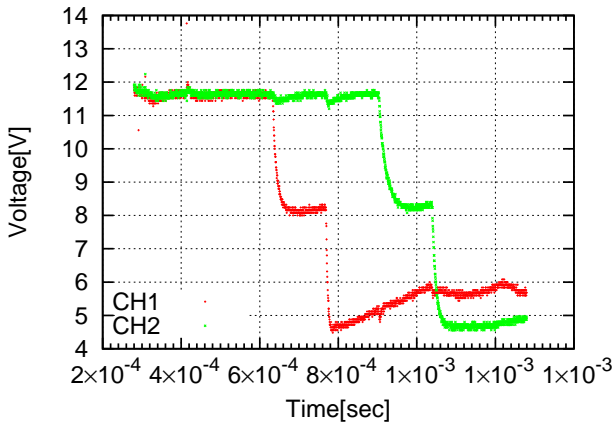


図 5 3 回目の爆轟における時間と電圧データ

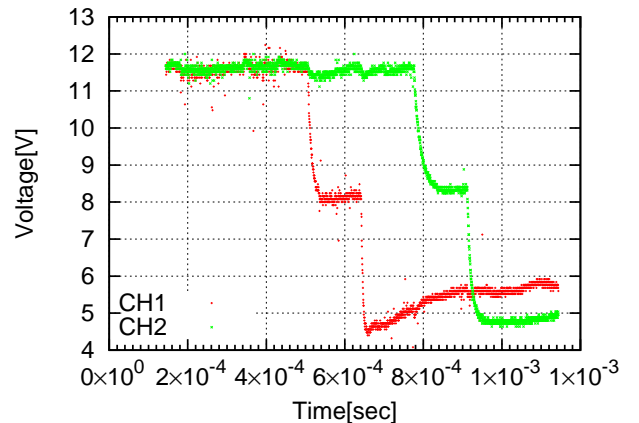


図 6 4 回目の爆轟における時間と電圧データ

これよりプローブ通過時間を読み取りプローブ通過速度を算出したものを下表に示す。爆速はおむね 2200 [m/s] であった。

表 2 プローブ通過時間 [ $\mu\text{sec}$ ] と爆速 [m/s]

プローブ	1 発目		2 発目		3 発目		4 発目	
	通過時間	爆速	通過時間	爆速	通過時間	爆速	通過時間	爆速
P1-2 間	136	$2.21 \times 10^4$	136	$2.21 \times 10^4$	134	$2.25 \times 10^4$	134	$2.23 \times 10^4$
P2-3 間	139	$2.16 \times 10^4$	135	$2.22 \times 10^4$	137	$2.19 \times 10^4$	136	$2.20 \times 10^4$
P3-4 間	130	$2.30 \times 10^4$	135	$2.22 \times 10^4$	134	$2.24 \times 10^4$	134	$2.24 \times 10^4$

また、プローブ位置と到達時間の関係を表 3 に示し、そのプロット結果図 7 をみると傾きが爆速の 1 次関数で近似される事が分かる。

表 3 プローブ位置 [mm] と到達時刻 [ $\mu\text{sec}$ ]

距離	1 発目 到達時刻	2 発目 到達時刻	3 発目 到達時刻	4 発目 到達時刻	平均 到達時刻	爆速 [m/s]
330	509	505	635	507	539	
630	644	640	769	642	674	$2.23 \times 10^4$
930	784	776	906	778	811	$2.19 \times 10^4$
1230	914	911	1040	912	944	$2.25 \times 10^4$

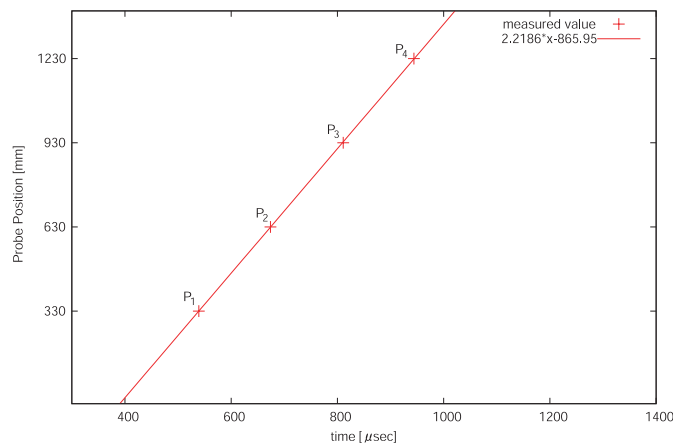


図 7 プローブ位置と到達時間の線型関係

さらにプローブ位置と爆速の関係式を下図 8 に示せば、殆ど  $2.20 \times 10^4$  [m/s] で一定である。

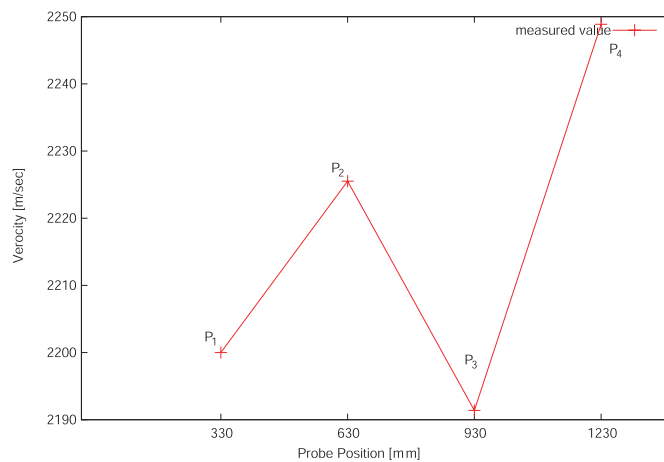


図 8 プローブ位置と爆速の関係



## 5 理論伝播速度と実際の実験における誤差の考察

理論伝播速度は  $3.44 \times 10^4$  [m/s] であり、実験値は  $2.22 \times 10^4$  [m/s] であった。この誤差の原因を考察する。誤差として考えられるものは

- ・ 対象気体を理想気体としたこと。
- ・ 管摩擦による影響。
- ・ 読み取り誤差。
- ・ 燃焼ガスの混合状態。
- ・ 燃焼ガスの爆轟中の科学的組成。
- ・ 何らかの理由で燃焼ガスが量論混合気ではなく、希薄混合気の状態にある。
- ・ 熱解離による未燃物の解離。

であるが、前3つは本実験において、さほど大きな要因とは言えないと考えられる。その理由として、気液  $p-v$  線図で空気は室温で理想気体としてかなり良い近似を得る、また対象が燃焼ガスであり粘性の影響は殆ど考えなくて良いからである。本実験では燃焼中の温度が 12000[K] であり、非常に高温である。この状態での燃焼が正常に行われているかどうかを考察してみる。12000[K] 上で化学組成が変わらないと仮定して、測定した爆速から改めて  $p_2$  を求めると

$$p_2 = \frac{D^2(v_1 - v_2)}{v_1^2} + p_1 = \frac{(2219)^2(0.1163 - 0.0649)}{0.1163^2} + 101600 = 1.881 \times 10^7 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

これより発熱量は

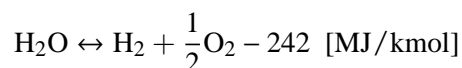
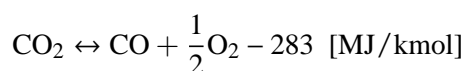
$$Q = \frac{\kappa}{\kappa - 1}(p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{2}(v_1 + v_2)(p_2 - p_1) \\ = 4.17 \text{ [MJ/kg]}$$

これを理論値と比較すると

$$\frac{4.17}{10.0} \times 100 = 41.7 \text{ [%]}$$

よって実際には理論熱量の 41.7[%] しか発熱していなかったことが分かる。このことは、高温、高圧下においては生成物の燃焼特性は本報告書の基礎理論で示したものと異なるということを示していると考えられる。

本実験では燃焼温度は  $1 \times 10^4$  [K] オーダであり、非常に高温であるから、基礎理論で示した化学反応式が正常に行われ無い。即ちブラウン運動と分子間衝突、分子内原子の振動の増大により、既燃物のうちのいくらかが熱解離して未燃物 CO や H<sub>2</sub> を生じていると考えられる。この反応は



と言う吸熱反応であるため、これが発熱量が低下している原因と考えられる。[1, p.138-140] によれば、本実験においてこの熱解離の影響は無視できないが、その解析は煩雑である。

## 6 結論

- ・ 理論伝播速度  $3.44 \times 10^4$  [m/s] に対し, 実測では  $2.20 \times 10^4$  [m/s] であった.
- ・ 理論発熱量に対し 41.7% しか発熱していない. これは高温下での解離を考慮しない燃焼と異なることが示していると考えられる.
- ・ 本実験では熱解離による影響が大きく, 熱解離の解析の煩雑さと関連して爆轟波の解析, 制御は困難である.

## 参考文献

- [1] 角田, 氏家, 河野, 岡島監修「工業熱力学 基礎編」, 東京大学出版会, 2004
- [2] 豊倉, 亀本共著「流体力学」, 実教出版, 1976