論文

圧縮着火によるパンチレス衝撃打抜き性に及ぼす燃料量の影響

加藤 正仁*

Effect of Amount of Fuel for Punchability in Punchless Impact Punching
by Compression Ignition

Masahito KATOH*

(Received on August 5, 2019)

In this study, punchless punching by the compression ignition of octane and the effect of varying the amount of fuel on punchability were investigated. In the experiment, the compression in compression ignition was applied using a drop hammer. As the amount of fuel increased, the variation in the initial height of the hammer required for completing the piercing could be divided into the following four parts on the basis of the amount of fuel. In the first part, corresponding to the smallest amount of fuel, the height exhibited a large decrease. In the second part, the height decreased by a small amount. In the third part, the height increased. Finally, in the fourth part, corresponding to the largest amount of fuel, the height remained constant. The four parts were believed to be caused by differences in the chemical reactions. Moreover, the optimum amount of fuel for punching was the largest amount of fuel under the conditions of the first part.

Key words: high-energy-rate forming, workability, piercing, drop hammer, compression ignition, octane, fuel, HCCI, incomplete combustion.

1. 緒言

金属薄板のプレスによる適切な打抜きにはダイスとパンチのクリアランスを均一に保持することが必要である。特に、非常に薄い板や箔の複雑異形状への加工では、ダイスとパンチの作成や、それらの適切な設置や保持は容易ではない。この問題を回避する方法として、ダイスのみを用いて、被加工材より軟らかい媒体を介して衝撃力を加えて打抜き、パンチレス衝撃打抜きが考えられる。このような工法として、電磁衝撃力による樹脂シート媒体での打抜き¹⁾、爆薬の爆発による水媒体での打抜き²⁾などが提案され、研究されてきた。筆者らも PVA ゲルを加工媒体としてアルミニウム薄板を打抜き方法について報告した³⁾。しかし PVA ゲルの除去作業は樹脂シート等と比較してはるかに容易であるとはいえ、加工後に媒体を除去する工程は避けられない。また、爆薬を使う方法は安全確保のために設備が過大になり、かつ作業手順が煩雑となる。加工媒体の除去作業が最も容易なのは、媒体として気体を使う方法である。加工媒体として気体を用いた方法として、超高压ガスを用いた方法が報告されている^{4),5)}が、最大 200 MPa の超高压ガスをタンクに貯蔵して使用することから、超高压ガスに対す

る安全確保のための法規制を考慮すると取り扱いが面倒である。とはいえ、加工シリンダに気体を入れて単純に落ついとピストンで圧縮しようとしただけでは十分な超高压が得られることは期待できない。

しかしながらこの圧縮空気中で適当な燃料を爆発的に燃焼させれば、衝撃力が得られると期待される。燃料を爆発させる衝撃加工の例としてペトロフォージがあるが、これは爆発で生成した気体で直接加工するのではない。

ところで、自動車用ガソリンエンジンの燃焼方式として、予混合圧縮着火 (HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼が注目されている。筆者はこの燃焼方式を応用することで、特別な点火装置を用いずとも燃料の爆発的燃焼による打抜きが成立し得ると考えた。この方法は、シリンダ内に空気とともに燃料を注入し、ピストンの高速圧下で断熱圧縮することで HCCI 燃焼させるものである。HCCI 燃焼では通常の燃焼と異なり全体がほぼ同時に燃焼し、燃焼ガスは衝撃的な圧力上昇を示すと期待される。そこでシリンダ下に被加工材の金属薄板と金型を設置すればパンチレス衝撃打抜きや張出し加工が可能であると期待される。筆者は落ついによるピストン圧下での実験を行い、この工法が成立し得ることを確認した⁶⁾。この工法は超高压ガスや爆薬を使う従来の気体媒体の衝撃加工法と比較して、燃料量の調整で加工力を制御できる特徴があり、これらより装置構造や操作を簡略化できる可能性がある。そこでこれを HCCI 燃焼を使用した新たな衝撃加工法として提

*産業技術総合研究所 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564, Japan.
E-mail: Katoh.m@aist.go.jp

案したい。しかし、本工法を実用化するためには、どのような現象が起きているのかや、燃料量その他のパラメータが加工にどのような影響を及ぼすかを明らかにする必要がある。そこで本報では、適切な燃料量を検討するとともにどのような現象が起きているのかを把握するために、燃料量を変えて打抜き加工を行い、打抜きに必要な落つい高さを測定する実験を行った結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

打抜き用金型は外径 30 mm の冷間加工用工具鋼 (SKD11) 製で直径 4 mm と 6 mm の異径の 2 孔を打抜くものである。それぞれの孔の中心間隔は 10 mm である。それぞれの孔には孔より直径が 0.2 mm 細い工具鋼製の円柱状のノックアウトを挿入した。なお、ノックアウト上面はいずれの孔においても型表面より 2 mm 下となるようにした。金型を金型ホルダに収めた金型部外観写真を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Die and die holder

Fig. 2 Structure overview of working cell

Fig. 3 Drop-hammer type impact press system

Fig. 2 は加工治具概略図を示したものである。治具は下側の金型部と上側の加圧部で構成される。治具のうち金型とノックアウトを除く部分は、入手が容易な機械構造用金属材料の中で、最も熱伝導率が小さく断熱性が高いステンレス鋼 (SUS304) 製とした。加圧部は内径 24.0 mm のシリンダブロックと加圧ピストンで構成される。燃焼ガス圧をシールするため、ピストン下端から 1 mm の位置にピストンリングを設けた。また、ピストン上部のフランジがシリ

ンダブロック上部に突き当たる下降限界において、ピストン下面とシリンダブロック下面が同一平面となるようにした。金型部は Fig. 1 に外観を示すように、ダイホルダと金型で構成される。被加工材円板は金型部と加圧部の間にはさんでボルトで締め付けることで保持した。シリンダと被加工材の間には外径 40 mm、穴径 24 mm の高密度炭素シート (厚さ 0.3 mm) を挿入しガスシールとした。装置シリンダ内径は 24.0 mm であるので、ピストンストロークを 30.0 mm (初期内部高さ 30.3 mm) とし、その結果シリンダ内部、すなわち燃焼室の初期容積は 13.7 ml である。

ピストンの急速圧下は Fig. 3 に示す落つい装置によって行った。本装置は直径 65 mm × 200 mm の鋼製の落つい用錘の中心にあけた直径 15 mm の穴に、直径 12 mm の金属パイプ製の安全ガイドを通し、手で錘を持ち上げて落下させるものである。落つい用錘の質量は 4.917 kg である。

2.2 被加工材および燃料

被加工材は公称厚さ 0.3 mm (実測 0.27 mm) のアルミ板 (A1050) の母材から切り出した直径 40 mm の円板である。すべての被加工材試料は同一の母材より切り出した。

燃料としてレギュラーガソリンの主成分のひとつであるオクタン (n-オクタン、示性式: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$, 以下、オクタンと表記) を使用した。添付文書によると、オクタンは沸点が 125 °C、発火温度が 210 °C、爆発範囲が空気に対して 1.0~6.5 vol.% である。また分子量は 114.23 で比重は 0.70 g/ml である。以上のデータを用いて 1 mol の気体の体積を 22.4 l として計算すると、13.7 ml の空気に対する爆発範囲のオクタン量は 1.0~6.5 μl となる。

潤滑剤の燃焼が実験結果に影響しないように、潤滑剤には油ではなく液体せっけんを使用した。

2.3 実験操作

実験操作は以下の手順で行った。

- (1) まず加工セルに被加工材試料をセットし、上下部を締結した後、所定量の燃料をシリンダ内、すなわち燃焼室に注入。ピストンリング部に潤滑剤を塗布してからピストンを挿入し、ピストンのフランジとシリンダブロックの間に高さ 30 mm のスペーサを挿入し、燃焼室の初期高さを所定の 30.3 mm に調整した。
- (2) 燃料を気化させて空気と均一に混合するために、これを 90 °C の送風恒温槽で 0.5 h 加熱した。
- (3) 加熱後、落つい用錘の穴にガイドシャフトを通してピストンと連結、錘を所定の初期高さまで持ち上げてスペーサを取り除き、直ちに錘を離すことで加工を行った。

Fig. 4 Classification of fracture pattern of worked samples

なお実験条件としては、燃料量を 0~14 μl の範囲において 1 μl 間隔で変え、それぞれの燃料量において錘の初期高さを 0.1 m を初期値に 0.1 m 間隔で増加させた。加工後の試料の状態を観察し、加工部を Fig. 4 に示すように全破断、

部分破断および無破断の3種類の状態に分類した。全破断は2つの穴の全周が完全に打抜かれた状態、無破断はくぼみだけで2つの穴の周のどこにも亀裂が観察されないもの、部分破断はそれ以外とした。実験は燃料量と錘の初期高さの組み合わせの条件毎に3回ずつ行い、それぞれ多数回発現した状態を各条件での判定とした。各燃料量で、錘の初期高さが3条件連続で全破断の判定となる安定打抜き条件までと、0.6 m以下の全ての高さ条件について実験した。

3. 実験結果

Fig. 5 は燃料量と落つい用錘の初期高さに対して加工後の状態の判定結果を示したものである。燃料量を0 μl から増やしていくと、安定打抜き条件となる錘の初期高さが燃料の増加とともに約3 μl までは急激に低くなり(領域Ⅰ)、その後約5~6 μl まで徐々に下がり(領域Ⅱ)、さらなる燃料の増加とともに打抜きに必要な錘の初期高さが高くなって行く傾向を示す(領域Ⅲ)。ただし、10 μl を超えると安定打抜き条件は燃料量の影響を受けない(領域Ⅳ)。この結果から、加工の準備として錘に与える必要のある仕事を最小限にし、かつ燃料量が最小となる最適加工条件は、本装置条件では約5~6 μl であると言える。

Fig. 5 Map of results of fracture pattern

なお、加工治具に14 μl の燃料を入れて加工実験と同等の90 $^{\circ}\text{C}$ で0.5 hの保持を行った後に内部を観察したところ、燃料は全量気化し残留していなかった。このことから本実験の条件の範囲では燃料蒸気が飽和した可能性は排除できるので、領域Ⅳにおいて打抜きに必要な錘の高さが燃料量の影響を受けない理由は他に求めなければならない。

また、領域Ⅰに相当する実験条件ではススの発生は認められなかったが、他の条件ではピストン下面や被加工材上面がススの付着によって曇るのが観察された。

4. 考 察

4.1 断熱圧縮による発火

圧縮前に、燃焼室に空気とともに封入された燃料のオクタンは揮発し混合気となる。落つい用錘によりピストンは急速に圧下され、燃焼室内の混合気は圧縮され昇温する。このときの挙動はオットー機関、すなわち通常の4サイクルガソリンエンジンの圧縮工程そのものである。この過程は理想状態では断熱圧縮であるから式(1)の関係がある⁷⁾。

$$T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1} \quad (1)$$

T_1 : 圧縮前の温度 (K)

T_2 : 圧縮後の温度 (K)

v_1 : 圧縮前の燃焼室容積

v_2 : 圧縮後の燃焼室容積

κ : 比熱比

これを変形すると式(2)となり、圧縮後の温度は圧縮前の温度と圧縮比および気体の比熱比より容易に求めることができる。

$$T_2 = T_1 \alpha^{\kappa-1} \quad (2)$$

α : 圧縮比= v_1/v_2

また圧力は体積減少、すなわち圧縮比分の圧力上昇である α 倍に式(2)で求まる温度上昇による圧力上昇に相当する $\alpha^{\kappa-1}$ 倍を乗じた値となるので式(3)の関係となる。

$$p_2 = p_1 \alpha^{\kappa} \quad (3)$$

p_1 : 圧縮前の燃焼室内の気圧

p_2 : 圧縮後の燃焼室内の気圧

Fig. 6 は本実験装置を用いて燃焼が無いとの条件で計算したシリンダ内部の温度および圧力(ゲージ圧)の計算値をピストンストロークに対して示したものである。ここでは空気の比熱比 $\kappa = 1.387$ ⁸⁾として計算した。

Fig. 6 Calculated gauge pressure and temperature with no fuel (initial height in combustion chamber = 30.3 mm)

燃料のオクタンの発火温度は210 $^{\circ}\text{C}$ =483 K、初期温度は90 $^{\circ}\text{C}$ =363 Kなので $T_1 = 363$, $T_2 = 483$ と $\kappa = 1.387$ を式(2)に代入して整理すると $\alpha = 2.09$ が求められる。ちなみにこのときの内部圧力は式(3)より2.78 気圧 (0.282 MPa)である。実際の実験ではピストンのシールが完全ではないので、発火するのはピストンをより圧下した位置であると予想できるが、いずれにしても圧下しきってから発火するというわけではなく、圧下の途中で発火することが理解できる。

発火した後にピストンはさらに圧下されて、初期の位置を基準に圧縮比101まで圧下される。すなわち $101/2.09 = 48.3$ の圧縮がさらに行われる。そのため単純計算では温度はさらに4.49倍、圧力は約217倍に上昇すると算出される。

以上の計算から、断熱とガスシールが完全であれば燃料を全く使用しなくても燃焼室内の温度および圧力は約1900 $^{\circ}\text{C}$ および600 気圧 (61 MPa)となる。そして全く燃料を使用しなくても落つい用錘の初期高さ1.0 m以上で安

定打抜き条件となっている。

4.2 燃焼反応

混合気の断熱圧縮による発火に続いて燃焼反応が起きるが、この燃焼反応の相違が Fig. 5 に現れたような 4 領域の発現の原因のひとつであると考えられる。以下に、どのような燃焼反応が起きていたかについて考察したい。

本実験の現象は、基本的にオクタン燃焼である。通常のオクタンの燃焼は完全燃焼で CO_2 を発生する反応式

と、不完全燃焼で CO を発生する反応式

の 2 つの反応が考えられる。燃料が少なく、雰囲気中に十分に酸素がある実験条件では式(4)の完全燃焼が優勢であると思われるが、燃料が多く酸素欠乏となるにしたがって反応式(5)の不完全燃焼が優勢となっていくであろう。

気体の標準状態における体積は 22.4 l/mol であり、大気中の酸素濃度は 21% であるので 13.7 ml の空気中の O_2 量は $(0.0137/22.4) \times 0.21 = 0.0001284$ mol である。反応式(4)の反応においては 1 mol の C_8H_{18} に対して 12.5 mol の O_2 が必要であり、さらにオクタンの分子量 = 114.23、オクタンの比重 = 0.70 g/ml の値を使ってこの酸素量に見合うオクタンの量を求めると、 $0.0001284/12.5 \times 114.23/0.70 = 0.00168$ ml = 1.68 μl となる。

同様に反応式(5)の反応においては 1 mol の C_8H_{18} に対して 8.5 mol の O_2 が必要であるので、この酸素量に見合うオクタンの量は $0.0001284/8.5 \times 114.23/0.70 = 0.00247$ ml = 2.47 μl となる。Fig. 5 に示されるように、これらのオクタン量以下ではオクタン量の増加に伴って安定に打抜き可能となるのに必要な落つい用錘の初期高さが急激に減少する領域 I となっている。すなわちこの間は十分に酸素があり、燃料のオクタンが増加した分の全量が、反応式(4)または(5)に従って燃焼し、燃料量の増加に伴って加工力が増加したと考えられる。すなわち燃料の量を調整できることで加工力を調整できると期待できる。

領域 I については以上のように解釈でき、領域 I における燃料量の上限で安定打抜きに必要な錘の高さは 0.3 m となり、燃料を用いないときの約 1/3 となる。しかしオクタン量が 2.47 μl を超えると燃焼室内の酸素はほぼ完全に無くなり、燃料量を増やしても加工性は向上しないだろうと予想された。しかしながら実験結果はさらなる燃料量の増加での加工性の向上 (領域 II) を示している。すなわち燃焼により CO 、 CO_2 や H_2O を発生する前記 2 つの反応式以外の反応が起きていると考えられる。

一般に酸素が十分ある状態であってもこれら燃焼ガス中の反応生成物は約 1700 K 以上では熱化学方程式(6)および(7)に示すような解離熱の吸熱を伴う熱解離反応も起きる⁹⁾。

この熱解離反応は雰囲気中の O_2 量が少なくなるほど大きくなると考えられるが、領域 I では燃料が不足している状態であるのでこれで生じた O_2 は他の反応に寄与することなく存在するだけで、熱解離反応による温度低下が起きたままであると考えられる。逆の見方をすれば、さらに燃料量を増やせば、この O_2 を使用してさらに発熱反応を起こすことが可能であると予想できる。そのような反応が起きているのが領域 II であろう。

その反応は大幅に酸素欠乏した状態での不完全燃焼であるので、反応式(8)や(9)のようにオクタン中の炭素と水素のいずれか一方のみが優先的に酸化される反応と予想される。

これらの式のいずれになるかは反応式(10)の平衡反応がどちらに進むかで判断できる。

もし反応式(10)の反応が右に進めば反応式(8)となり左に進めば反応式(9)になる。前述した反応式(4)や(5)について求めたと同様に 13.7 ml の空気中の酸素に対応するオクタン量を求めてみる。反応式(8)では 1 mol の C_8H_{18} に対して 4 mol の O_2 が必要であるので $0.0001284/4 \times 114.23/0.70 = 0.00524$ ml = 5.24 μl となる。一方、反応式(9)では 1 mol の C_8H_{18} に対して 4.5 mol の O_2 が必要であるので $0.0001284/4.5 \times 114.23/0.70 = 0.00466$ ml = 4.66 μl となる。反応式(8)による方が領域 II の最大値に近いが、双方の数値が近いので、実験的にいずれかと断定することは出来ない。そこでいずれの反応式なるかについて熱力学的データより考えてみたい。

Fig. 7 Ellingham diagram for carbon and hydrogen

Fig. 7 は炭素、水素および酸素の 3 元素が関係する反応式について 1 mol の O_2 で整理した標準自由エネルギー変化と温度の関係式¹⁰⁾から作成したエリಂಗム図である。図中に示す CO を生成する場合の直線①および H_2O を生成する場合の直線④の交点の温度である 943 K (670 °C) 以上の高温では直線①が下になるので反応式(10)が右に進み、低温では直線④が下になるので左に進む。燃焼した状態では燃焼ガスは高温になると考えられるので、反応式(8)の反応となって C_8H_{18} 分子中の C が優先的に酸化され、H は H_2 として雰囲気中に残ることになる。13.7 ml の空気中の酸素に見合うオクタン量も、前述のように領域 II の上限とおお

むね一致する 5.24 μl であることから、領域Ⅱの反応はこれであると推測できる。なお、このときの打抜きに必要な錘の高さは 0.2 m であり、燃料を用いないときの約 1/5、領域Ⅰの燃料量の上限での約 2/3 となる。ちなみにこの反応での燃焼ガス雰囲気中には CO と H₂ が残留しているが、低温となると反応式(10)の反応が左に進み、C を発生すると考えられる。先述したように領域Ⅰ以外ではススの発生が認められるがそれはこうして冷却時に生成した C なのであろう。なお、被加工材にススが付着すると加工後の製品洗浄等によるススの除去工程が必要となる。

次に、燃料の自己発火時の燃焼ガスの温度と圧力がどの程度になるかを見積もることとした。Table 1 はこれを見積もるために必要なデータとして、機械工学便覧⁸⁾や化学便覧¹¹⁾より発火温度の 493 K に近い 500 K での定圧比熱 C_p 、比熱比 κ を関係するガス種について抜粋したものとこれから計算した定積比熱 C_v である。

Table 1 Specific heat capacity at constant pressure C_p , specific heat ratio κ ^(8),11), and specific heat capacity at constant volume C_v at 500 K

	C_p (kJ/kg K)	κ	C_v (kJ/kg K)
air	1.031	1.387	0.7433
N ₂	1.055	1.399	0.7541
Ar	0.5207	1.667	0.3124
CO ₂	1.0152	1.230	0.8254
CO	1.064	1.387	0.7671
H ₂	14.52	1.397	10.39
H ₂ O	1.983	1.313	1.510

本実験のピストンは落つい用錘により燃焼時の膨張が制限されているので燃焼反応は定積反応とみなせる。このため、燃焼時に外部に仕事をしないので、温度上昇は燃料の単位質量当たりの反応熱と燃焼ガスの定積比熱のみから求めることができ、圧力や燃焼室の容積の影響を受けない。そこで単純化のために 1 mol の C₈H₁₈ の燃焼で考えることにする。また、空気の組成は N₂=78%、O₂=21%、Ar = 1% として計算する。

完全燃焼で CO₂ を生成する反応式(4)の反応の場合、すなわち本実験装置でオクタンを 1.68 μl 使用した場合、1 mol の C₈H₁₈ の燃焼で 8 mol の CO₂ と 9 mol の H₂O が発生する。C₈H₁₈ の 1 mol 当たりに消費する O₂ は 12.5 mol、O₂ の分子量は 32.0 であるので 400 g の O₂ を消費することとなる。空気中の O₂ が 21% であるから 1905 g の空気 (N₂=1486 g, O₂=400 g, Ar=19 g) が 1 mol の C₈H₁₈ に見合うこととなる。反応生成物は CO₂=8 mol=352 g, H₂O=9 mol=162 g であるから燃焼ガスの質量はこれらの N₂, Ar, CO₂ および H₂O の質量を合わせた 2019 g となる。ここで、混合ガスの平均の比熱は構成成分のガス種それぞれの比熱をガス種の割合で案分したものであると仮定する。Table 1 に示す定積比熱 C_v と燃焼ガスにおける各ガス種の割合から燃焼ガスの平均の定積比熱 C_v を計算すると 0.8234 kJ/kgK、また比熱比 κ = 1.365 が求まる。理科年表¹²⁾より、オクタンの燃焼熱、すなわち反応式(4)の反応熱 ΔH は 5470 kJ/mol であるので、温度上昇 ΔT = 5470000/2019/0.8230 = 3290 K である。

これをオクタンの発火温度の 210 °C に加え、燃焼ガスの温度は 3500 °C と求められる。なお、この反応によって反応にかかわらないガス種も含めて、燃焼室内の分子数は 1.05 倍となる。温度上昇による圧力上昇である 7.81 倍も含めて 4.1 節で求めた発火時の圧力 2.71 気圧 (275 kPa) に乗じると瞬間的に圧力が約 22 気圧 (2.3 MPa) に上昇することになる。この位置からさらにピストンが最も下まで下がり、そこからの圧縮率が 48.3 であるので、温度は約 15000 °C、圧力は約 4500 気圧 (460 MPa) と算出される。

一方の CO を発生する不完全燃焼の反応式(5)の反応すなわち本装置で 2.47 μl のオクタンを使用した場合において同様に計算する。この場合 1 mol の C₈H₁₈ の燃焼で 8 mol の CO₂ と 9 mol の H₂O が発生する。C₈H₁₈ の 1 mol 当たりに消費する O₂ は 8.5 mol=272 g であり、1295 g の空気 (N₂=1010 g, O₂=272 g, Ar=13 g) が 1 mol の C₈H₁₈ に見合うこととなる。反応生成物は CO が 8 mol=224 g, H₂O が 9 mol=162 g であるから燃焼ガスの質量はこれらの N₂, Ar, CO および H₂O の質量を合わせた 1409 g となる。ここでの燃焼ガスの平均の定積比熱 C_v = 0.8390 kJ/kgK、比熱比 κ = 1.390 である。CO の生成熱=110.5 kJ/mol、CO₂ の生成熱=393.5 kJ/mol である¹¹⁾ので、反応式(4)の反応熱 5470 kJ/mol とあわせて C₈H₁₈ が不完全燃焼する反応式(5)の反応熱を計算してみると、反応熱 ΔH は 5470-8×(393.5-110.5) = 3206 kJ/mol となり温度上昇は 2710 K、これを発火温度に加えて 2920 °C となる。この反応での分子数は 1.18 倍に増加し、温度が 6.61 倍になることと併せて発火時の圧力に乗じると燃焼によって上昇した圧力は約 21 気圧 (2.1 MPa) となる。これをさらにピストン最下部まで圧下した時の温度および圧力はそれぞれ、約 14000 °C と約 4800 気圧 (480 MPa) と求められる。

ただし、現実にはこれだけの高温では周囲との温度差が大きいので、完全断熱という仮定に無理があり、またシールもこの圧力に耐えないと思われるので、温度と圧力はこれらの単純計算ほどには上昇しないだろう。

また、上記の 2 つ反応式についてのいずれの計算でも熱解離による吸熱は全く考慮していないので、ピストンの発火位置からのさらなる圧縮による燃焼ガスの温度上昇で、燃焼後に残留した H₂O の熱解離が進むと思われるので、より到達温度と圧力は低くなるはずである。しかしながら、いずれでも局所的に非常に高温高压となるであろうことは想像できる。

さらに反応式(9)に整理できるオクタン量が 5.24 μl の場合についても求めてみると 1 mol の C₈H₁₈ の燃焼で 8 mol の CO₂ と 9 mol の H₂ が発生する。C₈H₁₈ の 1 mol 当たりに消費する O₂ は 4 mol=128 g であり、610 g の空気 (N₂=476 g, O₂=128 g, Ar=6 g) が 1 mol の C₈H₁₈ に見合うこととなる。反応生成物は CO=8 mol=224 g, H₂=9 mol=18 g であるから燃焼ガスの質量はこれらの N₂, Ar, CO および H₂ の質量を合わせた 724 g となる。ここでの平均の燃焼ガスの定積比熱 C_v は 0.9940 kJ/kgK、比熱比 κ = 1.395 である。H₂O の解離熱=241.94 kJ/mol である⁷⁾ので、上述した C₈H₁₈ が通常の不完全燃焼する反応式(5)の反応熱 3206 kJ/mol とあわせて反応式(9)の反応熱を計算すると、反応熱 ΔH は 3206-4.5×483.88 = 1029 kJ/mol となり温度上昇は 1430 K、こ

れを発火温度に加えて約 1640 °C となる。こちらの反応では H_2O の熱解離は終了している。

こちらの反応式では分子数増加が 1.60 倍、温度による上昇が 3.40 倍なので燃焼時の圧力は約 15 気圧 (1.5 MPa) となると予想される。ここからピストンを下まで押し込んだ時の温度と圧力は約 8600 °C と 3400 気圧 (340 MPa) となる。

こちらの場合も、治具等への熱伝達とシールの漏れを考慮して、これよりも低い値にはなるが、前述の領域 I とは異なり、燃焼時に H_2O の熱解離は終了しているため、燃焼後の圧縮での熱解離の影響は考えなくてもよい。そのため領域 I より打抜き性が向上したのであろう。

以上が領域 II で起きていると考えられる現象である。

ところで、よく知られているように高級炭化水素は高温において、より低級な炭化水素に熱分解する。これらの燃焼ガス程度の高温であれば、酸素を全量消費しても燃焼反応に寄与でないオクタンが残留し、このオクタンが熱分解を起こすことが十分に予想される。燃料量が増加すれば吸熱反応量は単純に大きくなる。一般的に熱分解は吸熱反応であるので領域 III を示したと考えてよいだろう。

この場合、燃料量が増加するにつれて燃焼ガス温度が低下し吸熱反応が抑制される。そして温度がある程度まで低下するような燃料量になると、熱分解する燃料量の増加による吸熱反応の増加と温度低下による吸熱反応の抑制が平衡し、その結果、領域 IV を生じたと考えられる。

ただし、以上の領域 I ~ IV で起きていると考えられる現象は熱力学的データからの推測であり、本実験の範囲では実験的に確定することはできない。

4.3 加工への適用条件

以上の結果からオクタンの圧縮着火による爆発的燃焼を衝撃打抜きに応用する条件について検討する。前述したように領域 II の最大の燃料量、すなわちオクタンと O_2 がモル比で 1:4 となる空燃比とすると、最小の燃料で、必要な落つい錘高さを最低にできる。この条件は燃料中の炭素原子量だけの影響を受け、水素原子の影響を受けないので炭化水素全般に拡張できる。すなわち 1 分子中に炭素原子を x 個含む炭化水素を燃料とした場合、炭化水素と O_2 のモル比が $2:x$ となるような空燃比を選択すればよい。しかしながらこの条件では加工後にススが被加工材に付着するのでその除去工程が必要となる。

ススの除去を必要としない条件を考えると炭化水素中の炭素原子が全て酸化されて CO になり、かつ水素原子が H_2O となる空燃比、すなわち領域 I の上限の燃料、オクタンの場合反応式(5)で示される反応中のオクタンと O_2 のモル比である 1:8.5 となる空燃比を選択すればよい。しかしこの条件であっても打抜きに必要な落つい用錘の初期高さは燃料を全く使わないときの約 1/3 で済む。なお、領域 I においては燃料量を変化させることにより加工力を制御できるのではないと思われる。

5. 結 言

燃料の HCCI 燃焼を使用した新たな衝撃加工法の実用化を図るために、オクタンを燃料として HCCI 燃焼による爆

発的燃焼を起こさせてアルミ薄板のパンチレス打抜き実験を行った。圧縮を落ついによって行った場合、燃料の増加に伴って順に、打抜きに必要な落つい用錘の初期高さが急激に減じる領域 I、徐々に減じる領域 II、増加する領域 III、停滞する領域 IV の 4 つの領域に分けられることが判った。それぞれ、以下の現象が起きていると推定できる。領域 I では空気中の酸素量に対して燃料が少なく、全燃料が燃焼している。次の領域 II では燃焼ガスの熱解離によって生じた酸素が燃料中の炭素を優先的に酸化し、酸素を十分に消費する。また領域 III では酸素が完全に消費され、高温により過剰な燃料が熱分解している。さらに領域 IV では熱分解する燃料量の増加による吸熱反応の増加と温度低下による吸熱反応の抑制が平衡している。燃料量と必要な錘の初期高さと打抜きの可否から判断すれば、領域 II の上限、すなわちオクタンと O_2 がモル比で 1:4 となる空燃比が最も効率がよい。炭化水素に一般化すると 1 分子中に x 個の炭素原子を含む炭化水素の場合炭化水素と O_2 がモル比で $2:x$ となる空燃比がよい。しかし領域 II ~ IV においてはスが発生し、加工後の被加工材からススを除去するための洗浄等の作業が必要となる。このため燃料量を領域 I の上限、すなわちオクタンと O_2 がモル比で 1:8.5 となる空燃比とするとよい。しかしこの条件であっても打抜きに必要な錘の初期高さは燃料を全く使わないときの約 1/3 で済む。また領域 I においては燃料量の変化により加工力を制御できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Sano, T., Murakoshi, Y., Matsuno, K. & Takeishi, H.: J. Mater. Process. Technol., **30-3** (1992), 341-350.
- 2) Fujita, M., Mochihara, M., Nakiyama, Y., Hokamoto, K. & Itoh, S.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **37** (1996), 705-710.
- 3) Katoh, M. & Aihara, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **60** (2019), 27-32.
- 4) Murata, M., Uede, Y., Masuda, S. & Suzuli, H.: Proc. 44th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (1993), 253-256.
- 5) Murata, M., Uede, Y. & Suzuki, H.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **35** (1994), 829-834.
- 6) Katoh, M.: Proc. 69th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2018), 357-358.
- 7) Tasaka, H.: Nainen-Kikan 3rd. edition, (2015), 29-30, Morikita-shuppan.
- 8) JSME.: JSME Mechanical Engineers' Handbook, **A6** (1987), 163, Maruzen.
- 9) Niioka, T., Kono, M. & Sato, J.: Nensho-Gensho-no-Kiso, (2001), 176-180, Ohmsha.
- 10) Jpn. Inst. Met. & Mat.: Hitetsu-Kinzoku-Seiren, (1980), 315-321, Jpn. Inst. Met. & Mat.
- 11) CSJ.: Kagaku-Benran Kiso-hen 4th. edition, **II** (1993), 233, Maruzen.
- 12) NAOJ.: Chronological Scientific Tables 2018, (2018), 516, Maruzen.