

日時： 2012年2月11日(土) 13:30-16:50

場所： 名古屋国際センター 第1研究室

出席者： 25名

小島晋爾(主査, 名城大学), 村瀬英一(講師, 九州大学), 西田憲二(講師, 本田技術研究所), 高橋周平(幹事, 岐阜大学), 調尚孝[追: 河野正顕, 金原賢治, 古野志健男] (日本自動車部品総研), 大平哲也 (スズキ自動車), 金子誠(富士重工), 田村守淑(東邦ガス), 中島邦彦(ユニバンス), 鬼頭俊介 (豊田高専), 内田睦[代: 高島良胤](大阪ガス), 井原禎貴(岐阜大学), 野田進(豊橋技術科学大学), 若井和憲(岐阜大学), 古谷正広 (名古屋工業大学), 太田安彦 (元名古屋工業大学), 長谷川国生 (元ダイハツ工業), 高野孝義(豊田工業大学), 中村俊秋(豊田自動織機), 久保賢明[追: 寺地淳] (日産自動車), 佐々木覚 (デンソー)

## 議事

### 1. 話題提供

(1) 九州大学大学院工学研究院機械工学部門 教授 村瀬英一氏 (13:30-15:00)

#### 「点火の歴史とジェット点火」

##### 要旨：

点火は大きく強制点火と自己着火の2つに分けられる。また、工業的な用途に対してもボイラーやガスタービンのように起動時に1回だけ点火が必要な場合もあれば、ガソリンエンジンのように毎サイクル点火が必要な機関もある。ガソリンエンジンの点火は、現在では電気火花(スパーク)を利用して行われているが、現在の形を取るまでに、歴史的には多くの変遷を経ている。もっとも初期の点火方式は火焰式と呼ばれ、タイミングに合わせて開閉する間隙を通して、火炎を直接予混合気に接触させることによって点火を行っていた。また、これより50年ほど遅れて、熱管式と呼ばれる点火法も考案された。これは、現在のディーゼルエンジンのグロープラグに通ずる点火法であり、バーナーで加熱した金属管を利用して熱面点火を行うものである。一方でこれらと並行して、電気火花を利用した点火装置も考案されてきた。ごく初期では低電圧式の火花放電であったが、バイブレータ式、マグネット式と高電圧化していき、接点開閉器式では30~40kVの高電圧を用いて火花放電させている。現在では機械的な要素をトランジスタで置き換えた電子式が主流となり、また各気筒ごとにイグニッションコイルを設置したものが増えてきている。

このような高電圧を利用した火花点火(SI)方式は量論比の予混合気の点火には最適であるが、一方で最近注目されている高EGRや希薄予混合気、成層燃焼などを利用した条件においては、点火の強化が求められる。点火強化の手法としては、2プラグによる2点点火、プラズマイグナイタ、トーチセル、CVCC等が考案されてきた。これらの手法においては、日本メーカの物のみが発用に至っていることは興味深い。点点火としてのスパークプラグにおいては、放電エネルギーの増加、長時間放電、複数回放電、電極間距離の増加、多点点火などの対策が挙げられる。また、最近ではレーザーのブレイクダウンを利用した方法や、非平衡プラズマを利用した方法も研究されている。一方で、容積的点火手法として、トーチ点火やジェット点火が挙げられる。ジェット点火にはプラズマジェット(PJ)点火とパルスジェット(PFJ)点火があり、両者ともキャビティとオリフィスからなっている。PJにおいては、コンデンサにブレイクダウンしない程度の電圧で充電し、放電時の絶縁破壊を利用して高エネルギーをキャビティ内に供給し、オリフィスから噴出した高エネルギーのガスが予混合気を点火する。このとき、最大で0.9J程度のエネルギーを供給するため、電極の摩耗が課題となる。PFJでは、キャビティ内に過濃予混合気(当量比1.5)を充填し通常火花点火することで、オリフィスから活性種を含むジェットが噴出され、予混合気を点火する。

大気圧の静止雰囲気メタン-空気希薄予混合気(当量比0.8)に対して、SI、PJ、PFJの3つを比較したところSIと比べて、PJ、PFJともに圧力履歴において燃焼終了時間が大幅に短くなった。また、PJは燃焼前期において $dP/dt$ が大きい、PFJでは燃焼後期で $dP/dt$ が大きくなるという特徴がみられた。スワール中での点火特性を比較したところ、SIにおいて非常に燃焼期間が短くなったのに対し、PJではかえって燃焼期間が長くなった。これは、PJの吹き出し速度が大きすぎたことが原因と考えられる。また、希薄燃焼限界をそれぞれ比較した結果では、PFJが最も希薄で点火できたのに対し(当量比0.42以下)、PJではSIと同程度(当量比:0.65-0.7)であった。これも、PJの吹き出し速度が大きすぎることから起因していると考えられる。RCMを用いて、高温・高圧場においてSIとPFJを比較したところ、オリフィス径が4mmの条件ではSIに比べて燃焼期間が短縮したものの、2.5mmと小さすぎる場合には、かえって燃焼期間が増加した。このため、オリフィスからの吹き出し速度が重要であることが分かる。

PFJをHCCI燃焼の点火時期制御に応用した研究も行った。HCCIでは初期温度によって着火時期が大きく影響を受ける。このため、PFJと組み合わせることにより点火タイミングを制御する(HCCJI)ことを試みたところ、HCCI単独では大きく点火時期がばらついた条件においても、圧力履歴を比較的そろえることができることが分かった。また、ロータリーエンジンにおいても、このようなキャビティとオリフィス状の形状により、興味深い現象が観察

された。ロータリーエンジンではプラグホールと呼ばれるキャビティに相当する小さな部屋の中で火花点火する構造となっている。点火位置は通常2か所あるが、騒音対策としてトレーリング側ではプラグホール出口が絞ってある構造になっている。このプラグホール近傍を詳しく観察したところ、圧縮されたプラグホール内に入った予混合気がプラグホールより噴き出す過程において、火炎がプラグホール近傍に保炎される現象が見られた。

Q.1 PJ 点火において、PFJ 点火と比較して火炎成長時に、火炎面にあまりしわが観察されないのはなぜか？

A.1 実験装置の制約から、PFJ においては最初に希薄な予混合気の噴出があるため、PFJ 点火においてしわが顕著に見られたものと考えられる。

Q.2 過去に採用されていた熱管式の点火装置においては、どのように点火タイミングをはかっていたのか？また、現在のグロープラグと異なり、燃焼室からへこんだキャビティ形状となっているが、これは点火性能に何か効果があるものなのか？

A.2 実際にどのようにして点火時期を制御していたかは不明である。

Q.3 トーチ点火に比べて PFJ においてはオリフィス穴径が小さいとのことであるが、消炎距離程度に小さいのか？

A.3 完全に失火していないので、消炎距離よりは大きい、消炎距離に近い大きさではある。

Q.4 HCCI において、火炎伝播と自発点火との違いはどのようにとらえればよいのか？たとえば、圧力履歴などから判別することは可能なのか？

A.4 オリフィスからジェットが出た直後においては、ジェット周囲では火炎伝播と考えられるが、その後の時刻においては自発点火が生じていると考えられる。圧力履歴から顕著な違いが見られるわけではない。

Q.5 自発点火時期を火花点火で制御することはできないのか？

A.5 スパークプラグから離れた位置には効果が届かないので、難しいと思う。

Q.6 PJ においてはなぜ大きなエネルギーを必要とするのか？

A.6 平衡プラズマを作る必要があるためである。

(2) 本田技術研究所二輪 R&D センター第2開発室 西田憲二氏 (15:10-16:30)

「成層自着火燃焼とそれを適用した二行程ガソリン機関に関する研究」

要旨：

モーターサイクル用エンジン、とりわけ2ストローク自着火燃焼の研究に長年携わって来た。「AR 燃焼」というのは商品名であって(ホンダのオートバイ CRM250 として量産化された技術)、学術名称ではない。ホンダは、2ストロークエンジンを用いた商品からの撤退を宣言しているが、研究としては、軽量コンパクト、高トルク、高出力という2ストロークエンジンの長所を活かして、車両用エンジンの燃費改善に応用できないかと追求し続けて来た。本日は、成層自着火燃焼とその実用化を目指した2ストロークガソリン機関に関する研究について紹介する。

直噴均一混合気のエンジンは、低速低負荷域において自着火を維持できない。4ストロークエンジンの場合は、火花点火で対処できるが、2ストロークエンジンの場合は、どうしようもない(不整燃焼)。この課題を解決するために、成層自着火燃焼を研究することにした。これを我々は SCAI (Stratified Charge Auto-Ignition) と呼んでいる。

まず、従来型の2ストロークエンジンの問題点として、2ストロークエンジンは、吸入新気を用いて残留ガスを掃気するというガス交換を行う。例えば、全負荷では、既燃ガス以上の新気質量を必要とする。つまり一部の新気が排気ポートから排出されてしまう。これを吹き抜けと呼んでいるが、高負荷であるほど、この吹き抜け量が多くなり、エンジン熱効率の低下と HC 排出の原因になっている。

二つ目の問題は、低負荷で残留ガス割合が非常に大きくなるために火花点火による燃焼が不可能になることである(不整燃焼：火炎伝播の維持ができないか、または火花をとばしても燃えないことを総称)。

これらの問題を解決するために、まず均一給気の自着火燃焼機関を試みた。

空気だけで掃気を行い、燃料を直接噴射して混合気を形成することにより、吹き抜けによる未燃燃料の排出を無くすことができる。また、残留ガス割合（掃気効率の逆数＝内部 EGR 率）を適切に制御することにより、残留ガスの熱を利用して自着火をさせて、不整燃焼を防止できる。

吸気スロットルと排気弁開口部の面積を調節可能な排気弁を用いることによって、残留ガス割合を上げることができる。これにより、ECU を用いて最適な自着火時期に制御することができた。エンジンボア  $\phi 60$  に対して  $\phi 30$  の石英窓ガラスと高速度ビデオカメラ（毎秒 9000 コマ）を用いて、スキッシュエリアを除く燃焼室内のトップビュー可視化撮影を行った。御覧になっている映像は、白黒ビデオ輝度を 8 ビットで画像処理したものである：①SI の不整燃焼（IMEP 200 kPa, 3000 rpm, コマ/2 degCA）：途中で火炎が消滅，②①と同負荷の AR 燃焼（非常に高速な燃焼），③SI 燃焼（IMEP 300 kPa：不整燃焼なしの限界），④③と同負荷の AR 燃焼（SI より高速な燃焼）。

一方、エンジン回転数 v.s. IMEP はこのようになっている：全負荷では均一給気 SI 燃焼でよいが、均一給気自着火（AR 燃焼）の場合、燃焼領域は、無負荷 IMEP（不整燃焼：高回転では 100 kPa；低回転では 200 kPa）～高負荷 IMEP:600 kPa となり、無負荷 IMEP が高過ぎて車両に使用できない。

何故このような自着火限界が生じるのかという点については、EGR 率と残留ガス温度との関係を調べると、高 EGR の低負荷ほど残留ガス温度が低くなっている。一方、自着火温度は概ね 1050 K になっているため、低負荷において自着火限界が生まれる。また、均一給気 SI 燃焼では、300 kPa 弱で失火が起きる。

このような問題を解決するために、成層自着火燃焼というものを考案した。

自着火限界における掃気効率と、筒内充填時の実測新気温度、及び排気から見積もった残留ガスの温度をもとに、圧縮開始時において均一混合気が形成されるとした場合、その温度は 525 K と推定され、それが圧縮上死点では 1020 K になる。すなわち、自着火温度に達しない。一方、新気の半分だけを残留ガスと混ぜることができるのであれば、その温度は 580 K になって、圧縮上死点では 1130 K となる。すなわち、自着火させることができる。何処かで自着火させて火炎形成のきっかけにできれば、全体の燃焼は可能になるので、如何に最初の自着火を起こすかが重要になる。したがって、「成層自着火燃焼」（新気の一部を残留ガスと混合させること）によって、低負荷限界を伸ばせるはずと考えた。（燃焼場の当量比は 1 である。）

筒内に不均一な温度分布を作るために、まず CFD を用いて検討した。なお、発想の原点には、アイドル時を含めて低回転低負荷では、新気で前サイクルの混合気を掃気するときに、決して均一には混ざっていない（「層状掃気」）という経験がある。

燃焼室内のガス温度分布に対しては、燃焼室形状が重要になる。直噴弁下に高温部を作りたいという狙いで検討を始めたタイプ A において、圧縮上死点の燃焼室中心部に高温部を作ることができた。一方、タイプ B では、全くそうっていない。こうなる理由は、タイプ A では、掃気流がタンブルとなって残留ガスを中心部に巻き込んでいることに対して、タイプ B ではタンブルが形成されないことである。タイプ A では、排気側に燃焼室をオフセットさせていることがポイントである。

混合気形成に関しては、圧力容器内の噴霧の可視化で検討した。オービタルのエアアシスト直噴弁（空気圧は 5 bar；上流に通常の噴射弁を配置して燃料を調量）を用いて、貫徹力の弱い 10  $\mu$ m 程度に微粒化された噴霧を形成したが、モーターサイクルのような小さな燃焼室でも壁面付着の少ない混合気形成が可能である。霧囲気圧 0 bar, 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa の場合を比較すると、噴射後 4 ms 後の画像では、霧囲気圧が高くなるほど小さな噴霧になっている。これは丁度、圧縮上死点前 90degCA で噴射する場合に相当する。

以上の様なガス温度分布と噴霧の検討結果をもとに、250 cc の水冷単気筒エンジンを試作した。燃料はレ

ギュラーガソリンで、6500 rpm において 23 kW の出力を発生する。幾何学的な圧縮比は 14.2 である。冷却水温 85~90°C でベンチ試験した。

自着火していることは、火花点火なしでエンジンが廻ることで確認できる。成層すなわち混合気形成において不均一ができていたことの確認は次の様に行った：新気の一部だけが残留ガスと混合しているのであれば、排気中の空気量は均一混合の場合と比べて増えるはずである。したがって、排気管内の O<sub>2</sub> 濃度(%)を調べれば、次式で定義される空気利用率を求めることができる：

$$\text{空気利用率} = \frac{M_f^*}{M_f} = \frac{21 - O_2^*}{21 - O_2}$$

ただし、\*印は成層の場合を表し、\*印のないものは均一燃焼の場合である。

しかし、これだけでは、均一給気のリーンバーンと成層燃焼とを区別することができない。そこで、燃焼場はつねに当量比が 1 となるようにする。

A/F を振ったとき、均一ストイキ燃焼では CO<sub>2</sub> 濃度が最大になって、CO はおよそ 0.4~0.5 % 程度になる。成層 SI 燃焼では、この A/F と排気組成との関係が、そのままリーン側に移動するような特性が得られる。例えば、A/F 25 近傍でも、燃焼場がストイキになると、CO<sub>2</sub> 濃度が最大になり、燃焼場がリッチになると、CO 濃度が 2 % であるとか 3 % になったりする。

それゆえ、CO<sub>2</sub> 濃度が最大となるようにすれば燃焼場の当量比が 1 であることが保証される。そこで、まず均一燃焼になるような燃料噴射時期から試験を開始した後、排気中の酸素濃度をもとに上記の空気利用率を求めながら、徐々に噴射時期を遅らせ、空気利用率及び IMEP との関係調べた。その結果、ある範囲では、空気利用率及び IMEP は変化しないが、(3000 rpm, 給気比 24 % においては) 上死点後 210 degCA 近傍から急激に低下する。したがって、この低下する領域が成層自着火燃焼の領域と判断される。

そこで、もう少し広い運転範囲で、最適な空気利用率の条件(燃料噴射時期)との関係を調べた。その結果、低負荷ほど燃料噴射時期を遅くして、空気利用率が低い方がよい(成層度合を高めた方がよい)ということがわかった。

さらに、均一給気 SI (HCSI), 成層給気 SI (SCSI), 均一自着火 (HCAI), 成層自着火 (SCAI) という 4 種類の燃焼方式について、負荷と給気比及び掃気効率との関係を調べた。(3000 rpm では) SCAI の給気比及び掃気効率は、HCAI の場合よりも若干高いが、SCSI に比べたら十分低いという特徴がわかる。SCSI では、正常な火炎伝播を可能とするために、残留ガスがほとんど無くなる十分な掃気(給気比)が必要である。

SCAI を HCAI と比較すると、燃費 (ISFC) はほぼ同じで、炭化水素 (HC) の排出が低減 (IMEP 200 kPa で 60 % 低下) されており、コンパクトな混合気形成によって壁面付着が防止されていると考えられる。NO<sub>x</sub> についても従来どおりの自着火燃焼の利点を確保しつつ、より低負荷まで運転条件を拡大できている。ただし、厳しい眼で視れば、掃気効率が若干下がっている分、ほんの少しではあるが NO<sub>x</sub> は増える傾向にある。

何故、こんなに燃費が良いのかという理由については、P-V 線図上で 4 ストロークエンジンと AI を比較すると、(1)AI は等容度が非常に高く、(2)ブローダウン時期の可変(低負荷側で排気弁開度を小さくしていること)により膨張比を拡大していることが挙げられる(低負荷側で膨張比は 13-14 である)。

結局、SCAI は HCAI に対して、回転数で 1000 rpm だけ低回転側に運転領域が拡大した。また、例えば 3000 rpm において、運転領域は 60 kPa 低負荷側に拡大し無負荷で運転が可能になった。

前半の話をまとめると、

(1)空気利用率を定義して、排気分析から実験的に成層自着火燃焼を確認した。

- (2)成層自着火燃焼は、均一自着火燃焼と比べて、同一負荷において給気比及び掃気効率が若干高い。
- (3)成層自着火燃焼は、均一自着火燃焼と比べて、ISFC と NO<sub>x</sub> はほぼ同等で、HC は最大 60%改善した。
- (4)成層自着火燃焼では、均一自着火燃焼と比べて、運転範囲を低速低負荷側へ大幅に拡大できた。

しかし、アイドル近傍では不整燃焼の問題がまだ残っている。そこで、アイドルは SCS<sub>I</sub> で対応することにして、上記 4 種類の燃焼方式を使い分けてエンジンをコントロールするエンジンを試作した。問題は、アイドル近傍の SCS<sub>I</sub> から SCA<sub>I</sub> に移行させる際に、排気弁開度を急激に小さくする必要があり、実用化のための課題になっている。すなわち、非常に高速の排気弁コントローラが必要である。

圧縮比 10 の 4 ストロークエンジン (125 cc 空冷; アジア向け低燃費型エンジン) と比べると、アイドル (A/F 40) でも安定な燃焼 (IMEP の COV 13 %) を実現し、同等の燃費と HC を実現できている。

そこで、さらに 4 ストロークエンジンのベンチ単体試験結果と相対比較を行い、完成車モード燃費とエミッションを試算した。すなわち、ECE40 モードを 7 種類の運転パターンに分割し、それぞれについて相対比較を行い試算した。

低燃費化のポイントは、2 ストロークエンジンの高トルク、高出力という長所を使ってダウンサイジングすることである。125 cc の 4 ストロークエンジンに対して、90 cc までダウンサイジング (30 %) が可能であると見積もることができた。この場合、最大出力ではなく、低回転側のトルクが同等であって、走行性能、加速性能が同等であることを目安にした。正味出力と BSFC のグラフから、4 種類の燃焼方式は、二つの回転数で議論できることがわかる。また、このダウンサイジングにより 22 % の燃費向上が可能である。同一排気量でも、トルクメリットを残したまま、8 % の燃費向上が期待できる。エミッションについても、ダウンサイジングにより、Euro3 の NO<sub>x</sub> をほぼクリアし、HC も改善できる。

後半の話をまとめると、

- (1)あらゆる運転領域で不整燃焼のない 2 ストロークガソリンエンジンを実現できた。
- (2)比トルクは、4 ストロークエンジンに対して 1.7 倍で、約 30 % のダウンサイジングが可能である。
- (3)ECE40 モードの試算結果から、燃費は約 20 % の改善、HC は 15 %、NO<sub>x</sub> は約 80 % の低減が見込まれる。
- (4)ただし、掃気効率の可変制御で構造上の課題が見出された。

とはいえ、今後の展望として、2 ストロークエンジンの未来は明るいとはいえない。我々が 2 ストロークエンジンの量産化ができないのは、次の様な理由による: 排気が空気過剰になるので、NO<sub>x</sub> の浄化ができない。したがって、エンジン出口で NO<sub>x</sub> を減らさねばならないが、それは中負荷域では困難である。我々が市場に大きく展開できなくなったきっかけは、Euro3 規制である。ECE40 モードという最高速 50 km/h までの範囲では AR 燃焼でエミッションはほとんどクリアできた。しかし、ハイウェイモード (最高速 120 km/h) にエミッション規制 (NO<sub>x</sub> 0.15 g/km) が入るとリーン NO<sub>x</sub> 触媒が無いと駄目である。

ただし、最近、レンジエクステンダー用エンジンとして最後に残るのは 2 ストロークエンジンではないかという主張が欧州のある先生からなされている。したがって、後処理の問題さえ解決すれば、究極のエンジンは 2 ストロークエンジンではないかという議論も盛り上がっているようだ。そういうことを目指して今後も頑張りたい。

Q1: BSFC であれば、ポンプフリクションも考慮していることになるが、均一給気と成層給気との間で、エアコンプレッサの働きが異なると、ポンプ仕事も考慮する必要があるのでは、ISFC だけの議論ではいけないのではないか？

A1: 最終的な燃費比較のBSFCにはエアアシスト式直噴弁用エアコンプレッサの駆動ロスを含めています。ISFCは正の仕事のグロス値です。なお、直噴弁のアシストエア量は排気量の約2% (マス割合) です。

Q2: CFD の検討結果は 3000 rpm の場合のみ紹介頂いたが、他の回転数ではどうなのか？

A2: 高回転数になるほどよく混ざるので、成層自着火はできない。ただし、高回転側では、成層自着火を使う必要がないので低負荷でも均一混合で問題ない。成層自着火が成立している条件では、低回転側でタンブル自体は弱くなるであろうが、3000 rpm の場合と同様であると理解して頂いてよい。実際、B タイプでは使いものにならない。なお、ガスサンプリング等による詳細な成層状況の分析はできていない。

Q3: 従来型の2ストロークエンジンでは、排気脈動を使って掃気を行うためにサイクル変動が大きくなると理解しているが、このエンジンではサイクル変動は問題ないのか？

A3: COV 5% を低負荷限界にしている。これを超えると、いっきに COV が増大することを経験している。COV 5% では、失火は起きていない。

Q4: 膨張比を大きくしているので、排気温度が下がって触媒活性が低下するのではないのか？

A4: 我々は触媒温度 300 °C を一つの目安としている。アイドル持続時には少し厳しいが、ECE40 モード運転時には触媒の活性は維持されていた。

Q5: 燃料噴射の回数は1サイクルに1回だけか？

A5: 1回だけです。

Q6: エアシストの温度は？

A6: 常温です。コンプレッサによる断熱圧縮分の加熱はある。以上の結果は、暖機状態の実力で、冷間始動では、SI の運転領域を拓ける必要がある。

Q7: 図の In-Cylinder A/F というのは G/F のことではないのか？

A7: いや、In-Cylinder A/F を求めて、この図を作成している。

Q8: かつて、ディーゼルの2サイクル燃焼を手掛けたが、潤滑の問題でピストンリングが焼き付くという問題が出た。ユニフローで掃気ポートをシリンダに入れ、頭上弁で排気する構造であった。HCCI 的に NOx を減らすことはできたが、耐久試験で駄目になった。

A8: このエンジンは空気予圧式シニューレ型 (モーターサイクル用エンジンの通常の形式) で、潤滑については、ケースやシリンダに直接給油している。ソレノイド型のオイルポンプで、ソレノイドを duty 制御することによって極めて微小な流量をコントロールできる。これは MIKUNI 製品が市販されており、2ストローク直噴エンジン (スノーモービル及びマリポート) に使われている。モード運転で、6000 km/L の走行が可能で、4ストロークエンジンと (ガス交換比率を考慮すると) ほとんど同等のオイル消費を実現できている。空気掃気なので、ガソリンで洗い流されることがなく、油膜形成が非常に良い。我々の耐久試験はクリアできている。

Q9: Q7に戻るが、成層状況の直接的な指標にはなっていないのではないか？

A9: 確かに、温度場の成層に関する分析にはなっていない。しかし、混合気形成における空気利用率については分析できている。

## 2. 連絡事項(16:30-16:50)

(1) 小島主査から本研究会終了の挨拶と、次期研究会で交代する委員の紹介があった。

(2) 調委員（次期研究会主査）より「エネルギー多様化時代のエンジン技術研究会」に関する案内があった。

## 3. 懇親会（東天紅名古屋店 17:20-19:20）

研究会終了後、2011年度懇親会を行った。21名の参加があり、相互の親睦を深めた。

以上