

推薦のことば

本書の著者である飯島晃良氏は、大学にて熱力学、内燃機関等の講義を担当し、学生たちとともに高効率エンジンのための燃焼研究を行う現役の教員である。

内燃機関のシステムの高度化、複雑化、電動化、社会から求められる環境性能等の高レベル化等に対応するために、社会全体を巻き込んで、総力を挙げての研究開発が繰り広げられている。そのような中において、エンジン内で何が起きているのかは一層見えにくく、ブラックボックス化しつつあり、新たなアイデアを生み出しやすい環境に向かっているとは決して言えないと思われる。

高効率でクリーンなエンジン技術を生み出すためには、エンジン内で何が起きているのかを理解することが第一歩である。

本書は、大学における内燃機関の教育・研究の経験を通じて蓄積してきた、「エンジン技術者としてのスタートラインに立つには何を身につけるべきか？」を具体化するために書かれたものである。ハイブリッド車などの電動化と組み合わせたエンジンシステムの開発が推進されている現在においては、それらに携わる電気・電子系技術者や動力伝達系技術者にも、エンジンの原理を十分に理解することが求められている。そのような方々がエンジンを学ぶ書籍としても本書は好適であろう。

将来、高効率でクリーンなパワートレイン研究開発の最前線を切り拓く、次の世代の若いエンジニアや学生を育てるための初めの一歩として、また、若い方々が自動車産業などに従事したいという夢を育てるためにも、本著『基礎から学ぶ高効率エンジンの理論と実際』は役立つものと確信している。

日本大学名誉教授

庄 司 秀 夫

はじめに

ガソリンエンジンは、乗用車、二輪車などの比較的小型の動力源として用いられ、人々の生活を便利にする道具として世界中に普及しています。

また、環境・エネルギー問題との結びつきも強いため、社会的にも非常に関心が高く、世界的に高度でかつ速いペースで開発競争がくり広げられ、日々新しい技術を生み出しながら進化を続けています。

例えば昨今、「高圧縮比化」「リーンバーン」「大量 EGR」「低温燃焼」「直噴」「多段噴射」「過給ダウンサイジング」「ダウンスピーディング」「レスシリンダー」「高膨張比（アトキンソン、ミラー）サイクル」「可変動弁技術」「遮熱」「可変圧縮比」「HCCI 燃焼」など、多様な技術を耳にします。これらの技術を知り、さらにその先の製品を開発するためには、原理の理解が不可欠です。

しかし、自動車メーカーなどでエンジン関係の部署に配属される新入社員の方々の多くは、大学時代に内燃機関を専攻していません。その上で、最先端の研究開発を担当することになります。そのため、数多の技術に対して、まずはその理屈（理論）を理解することが必要になってきます。

「なぜこのような設計で燃費が良くなるのか？」

「そもそも燃費は何に支配されているのか？」

「異常燃焼とは何なのか？」

など、原理を理解することで、研究開発技術者としての基盤を築くことが大切です。そうすれば、新たな技術の創生にもつながるはずです。

本書は、主に次のような方々の入門書となるように、わかりやすくまとめました。

- エンジン技術者（特に、大学でエンジンを学んでいない方）
- エンジンの基本原理を学びたいと考えているエンジン部品の供給メーカーの方
- 「最新エンジン技術がなぜ有効なのか？」などエンジン技術に興味がある一般の方
- 大学・高専・専門学校等でエンジンを学ぶ学生

各章を読み進めることで、

「最新技術がなぜ有効なのかが理解できる」

「今後どうあるべきかを提案できる」

「技術論文やより専門的な書籍を読めるようになる」

などの効果が期待できます。

本書が、エンジン技術を学ぶ読者の皆様のお役に立つことを心より願っております。

最後に、本書を出版するにあたりお世話になったグランプリ出版の木南ゆかり氏、山田国光氏に感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

飯島晃良
御茶ノ水にて

目次

推薦のことは 日本大学名誉教授 庄司秀夫 3

はじめに 4

第1章 自動車用パワートレインの現状と課題9

1-1 地球温暖化と内燃機関 9

1-2 EVシフトでCO₂は減らせるのか 10

1-3 リアルワールドでの高効率クリーン化 11

第2章 エンジン性能の表わし方13

2-1 エンジン軸動力性能測定 13

2-1-1 トルクと出力 13

2-1-2 平均有効圧力 16

【コラム：平均有効圧力比較】 21

2-1-3 正味燃料消費率と正味熱効率 22

2-1-4 体積効率と充てん効率 24

2-2 シリンダ内圧力測定 25

2-2-1 指圧線図と p - V 線図 25

2-3 シリンダ内圧力を駆使する 28

2-3-1 図示と正味の違い 28

第3章 エンジンの熱効率を支配しているのは何?31

3-1 理論熱効率 31

3-2 実際のエンジン動作と p - V 線図 40

3-3 実エンジンの各種損失とその低減 42

第4章 ガソリンエンジンの低燃費化技術49

4-1 高圧縮比エンジン 49

4-2 リーンバーン 55

4-3 EGR(排ガス再循環) 59

4-4 可変動弁技術 61

4-5 ガソリン筒内直接噴射 67

4-6 高膨張比エンジン 69

4-7 可変圧縮比エンジン 75

第5章 有害排出ガスのクリーン化79

5-1 有害排出ガスの基本特性 79

5-1-1 排ガス規制 79

5-1-2 HC、CO、NO_xの基本特性 80

5-2 排ガスのクリーン化手法 87

5-2-1 燃焼によるクリーン化 87

5-2-2 後処理装置によるクリーン化 88

【コラム：触媒急速暖気の悩ましさ!?!】 91

第6章 ガソリンエンジンの燃焼 93

- 6-1 ガソリンエンジンの正常燃焼 93
 - 6-1-1 火炎伝播 93
 - 6-1-2 エンジン内火炎伝播 94
- 6-2 ガソリンエンジンの異常燃焼 97
 - 6-2-1 ノッキングと異常燃焼 97
 - 6-2-2 低温酸化反応と高温酸化反応 109

第7章 HCCI 119

- 7-1 HCCI燃焼とは 119
- 7-2 HCCIの利点と課題 124
 - 7-2-1 HCCIの利点 124
 - 7-2-2 HCCIの課題 125
- 7-3 HCCIの課題克服に向けた研究開発 131
 - 7-3-1 運転領域の拡大 131
 - 7-3-2 異常燃焼(HCCIノッキング)メカニズム 141

重要用語解説 149

協力 158

謝辞 159

第1章 自動車用パワートレインの 現状と課題

1-1 地球温暖化と内燃機関

地球温暖化やエネルギーセキュリティ問題などを背景に、自動車の燃費低減が一層求められています。図1.1に、各国の燃費規制⁽¹⁻¹⁾を示します。自動車の燃費およびCO₂排出規制は年々強化されており、これらに対応するためにハイブリッド車をはじめとした電動化技術の導入が進んでいます。

しかしながら、ハイブリッド車のCO₂排出源は内燃機関です。従来のエンジンのみならず、ハイブリッド車の燃費をさらに良くするためには、高効率で高性能なエンジンの開発が必要です。

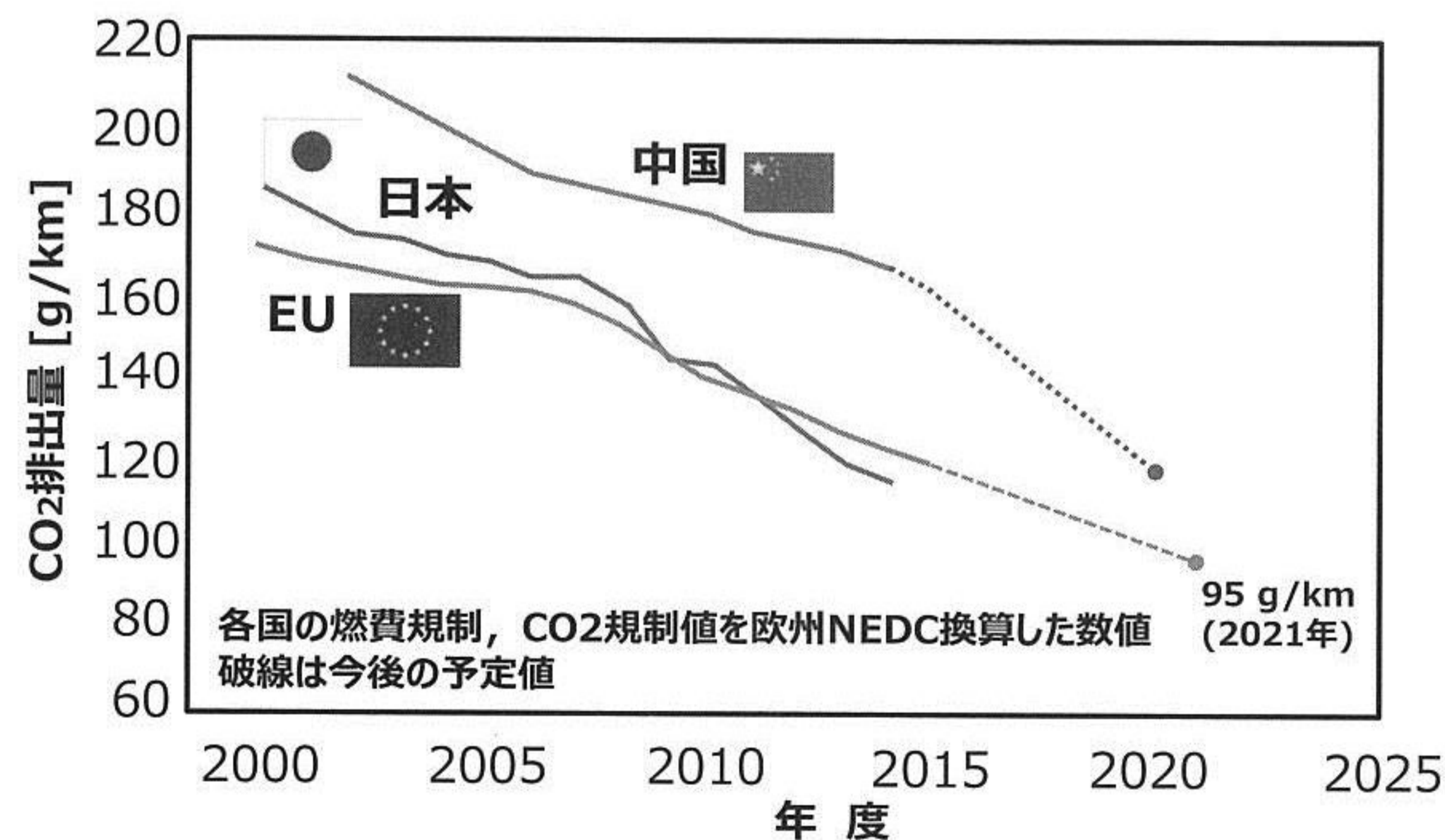


図1.1 各国の燃費規制⁽¹⁻¹⁾

図2.1に示すように、エンジンの出力軸が毎分の回転速度 N [rpm] で回転しています。このとき、クランク軸からの半径 r [m] の位置で力 F [N] を発生していた場合、軸トルクは次のように算出されます。

$$T = F \cdot r \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (2.1)$$

具体的には、動力計を用いて軸トルクを測定・算出します。動力計の原理は、エンジンの出力軸に何らかの方法でブレーキをかけ、その際に動力計に加わるモーメントから、軸トルクを測定するものです。例えば、図2.2のように、単純にブレーキシューのような摩擦面で挟み込むことを考えます。今、エンジンにブレーキ(負荷)をかけることで、ある回転速度 N [rpm] でエンジンが定常運転しているとします。その際、エンジンの軸トルクによって、出力軸中心から半径 r の位置で接線方向に力 F を発生します。このとき、動力計の腕の長さ ℓ の位置で生じる力 f によるモーメント $f \cdot \ell$ は、エンジンの軸トルクと釣り合っています。よって、 f [N] を天秤、ロードセルなどの荷重計で計測することで、軸トルクが求められます。

$$T = F \cdot r = f \cdot \ell \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (2.2)$$

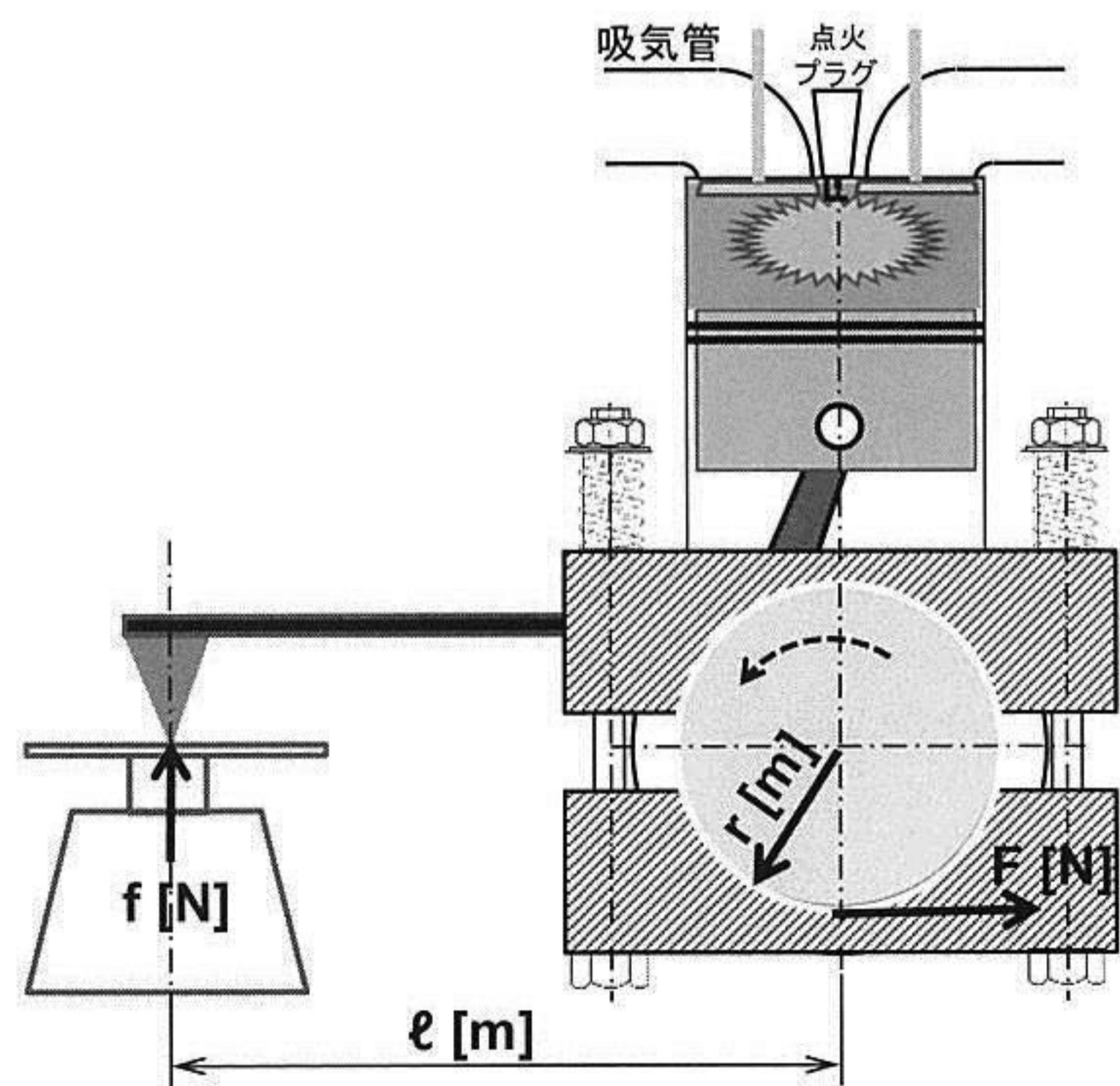


図2.2 動力計の原理 (プロニーブレーキ動力計)

動力計でのブレーキ力を調節することで、エンジンを運転する様々な負荷と回転速度でエンジンを運転することができるため、それらの各条件でのトルクが算出されます。

また、各条件での回転速度を併せて測定することで、後述するように軸出力が算出されます。

このように、動力計によってエンジンに負荷(ブレーキ)をかけてエンジンの軸動力を測定するため、これらのデータから算出される軸トルク、軸出力、正味平均有効圧力、正味熱効率などを、英語では Brake Torque、Brake Power、Brake Mean Effective Pressure、Brake Thermal Efficiency などと呼びます。

なお、図2.2のように、摩擦リングでブレーキをかける動力計をプロニーブレーキ式動力計といいます。このほかにも水の攪拌抵抗でブレーキをかける水動力計、渦電流によって電磁的にブレーキをかける渦電流式電気動力計、直流モーターや交流モーターで負荷をかける電気動力計などがあります。

出力 P [W] は、単位時間当たりの仕事です。仕事 W は力と距離の積です。例えば、図2.2で示した半径 r の出力軸が1回転したときの仕事 W_{1rev} は、半径 r の点が1回転する際に進む距離が $2\pi r$ (円周) なので、次のように表わされます。

$$W_{1rev} = \text{力} F \times \text{半径} r \text{の円周} = 2\pi r F = 2\pi T \quad (2.3)$$

つまり、トルク T の回転体が1回転したとき、 $2\pi T$ の仕事をします。出力 P [kW] を求めるには、1秒当たりの仕事を求めればよいので、1秒間の回転回数 $N/60$ [s^{-1}] を W_{1rev} に掛ければよいので、次のようになります。

$$P = \frac{2\pi T N}{60 \times 10^3} \quad [\text{kW}] \quad (2.4)$$

式(2.4)に示すように、出力 P は軸トルク T と回転速度 N の積に比例します。つまり、エンジンを高出力化するには、軸トルク T を増加させるか、回転速度 N を増加させるか、あるいはその両者を増加させるかであることがわかります。

$$P \propto T \cdot N \quad (2.5)$$

図2.3に示すように、トルク T と回転数 N で示した座標系に等出力線(出力一定の線)を描くことができます。この等出力線上に、例えば同じ出力であったとしても、

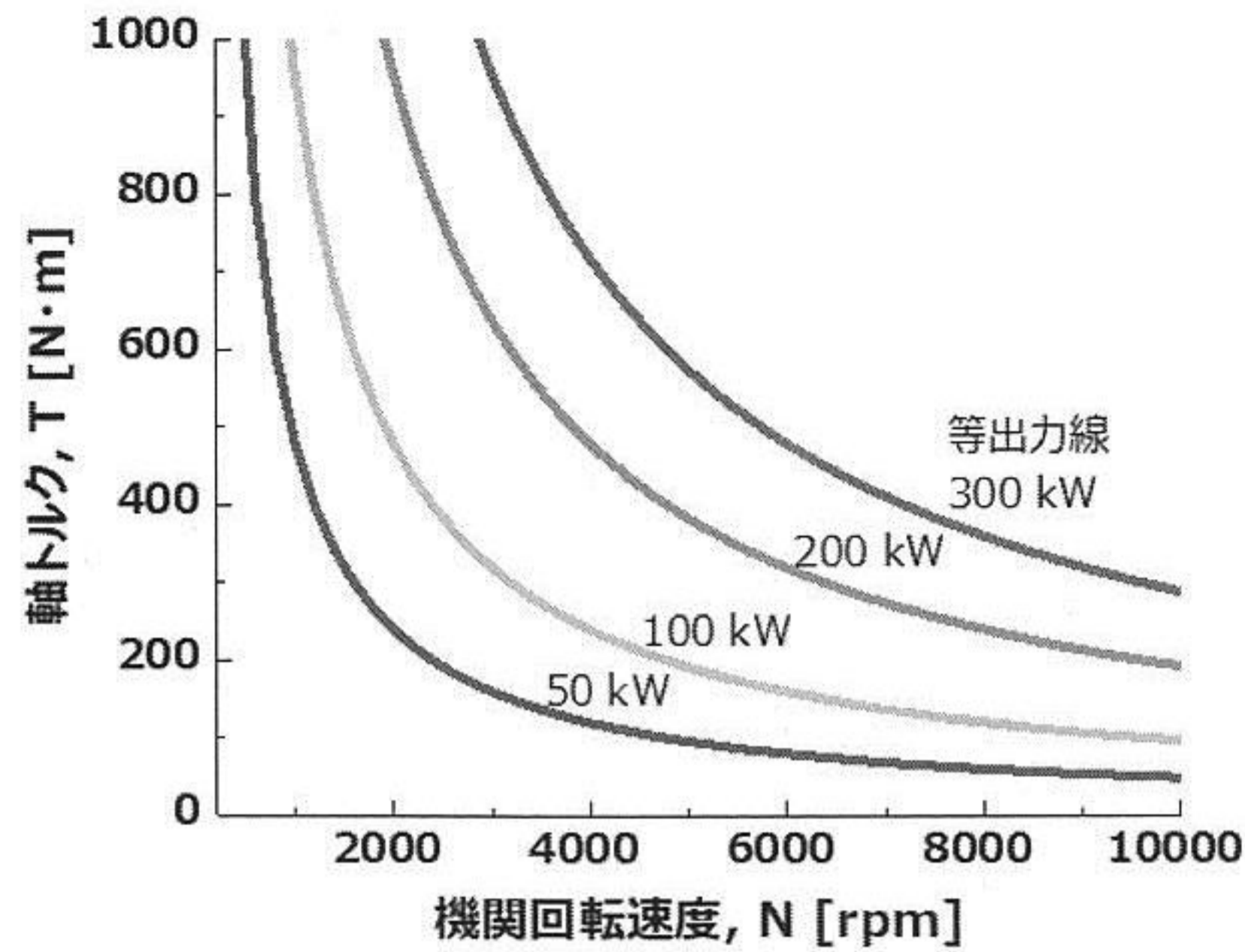


図2.3 トルク T -回転速度 N 線図上に描いた等出力線

二輪車と乗用車、あるいは乗用車とトラックのように、同程度の出力で排気量が異なるエンジンを比較すると、小型のエンジンは回転速度で出力を確保し、大型のエンジンは主にトルクで出力を確保していることがわかります。これらの物理的な意味は、後述する平均有効圧力をもとに考えるとより明確になります。

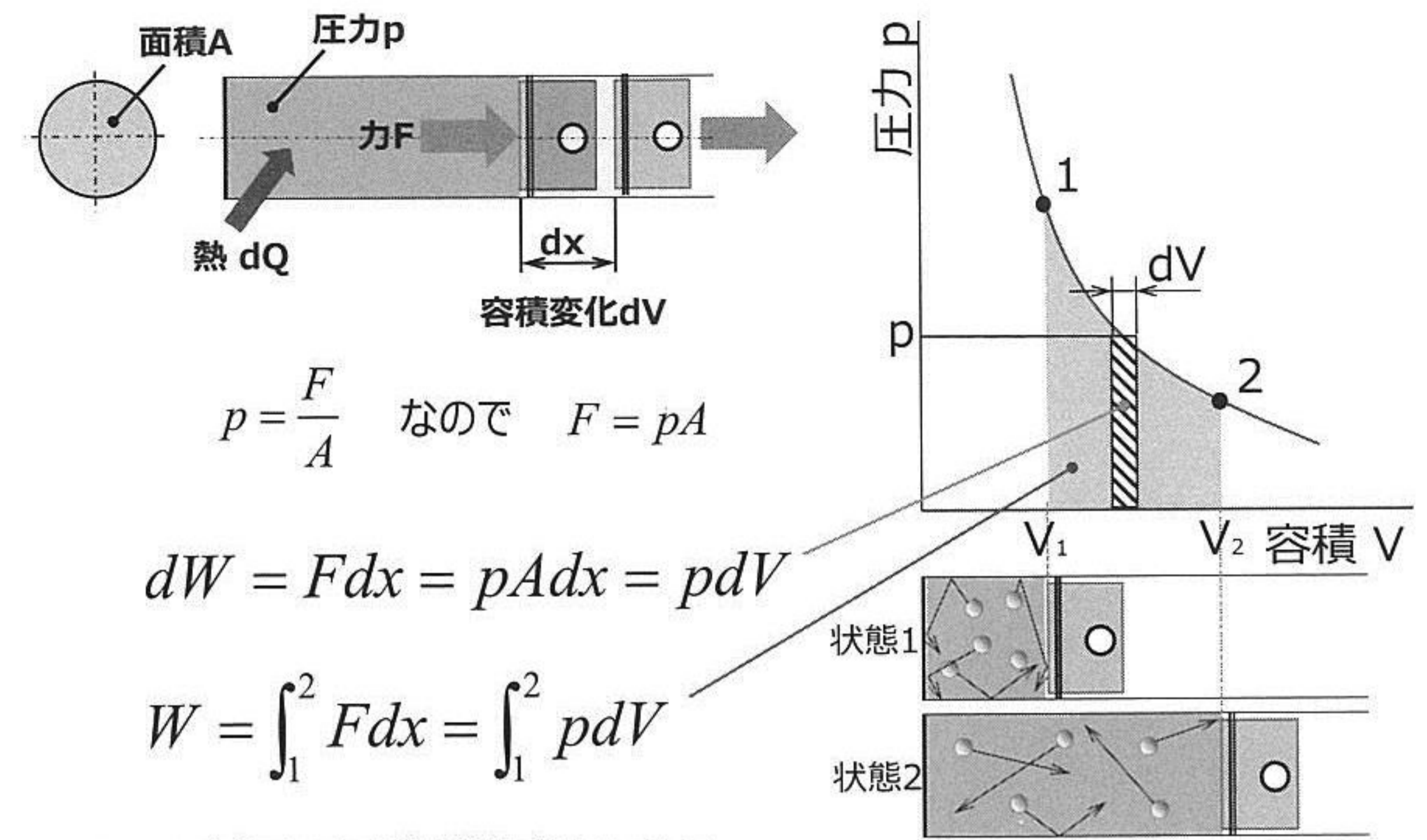
2-1-2 平均有効圧力

燃焼室内でガソリンと空気の混合気が燃焼すると、発熱して高温高压の燃焼ガスになります。圧力 p のガスがピストンに仕事をするすることで、エンジンに軸トルクが発生します。ガスがピストンにする仕事を図2.4を用いて考えます。

今、シリンダ内に圧力 p [Pa] のガスがあります。ここに燃焼によって微小な発熱 dQ [J] が起こり、面積 A [m²] のピストンに仕事をして dx [m] だけ膨張したとします。このとき、ピストン頂面に加わる力 F は、パスカルの原理によって $F = pA$ になります。よって、このときの微小仕事 dW は、次のようになります。

$$dW = \text{力} \times \text{距離} = Fdx = pAdx = pdV \quad (2.5)$$

よって、上死点(状態1)から下死点(状態2)まで膨張したときの仕事 W は、次のように表わされます⁽³⁻¹⁾。



✓ p-V線図の面積が仕事 W になる

図2.4 気体が行う仕事

$$W = \int_1^2 pdV \quad (2.6)$$

この仕事 W を p - V 線図で説明すると、図2.4の状態1から状態2の状態変化の曲線と横軸に挟まれた面積 $V_1-1-2-V_2$ であることがわかります。つまり、ガスがピストンにする仕事 W は、 p - V 線図の面積で表わされます。

同じ考え方で、圧縮行程ではピストンがガスに対して仕事をしているので、マイナスの仕事になります。つまり、エンジンの1サイクルの動作でガスがピストンにする仕事は、図2.5に示すように1サイクル中の p - V 線図の面積で表わされます。

$$W = \oint pdV \quad (2.7)$$

ピストンになされた仕事 W は、クランク機構によって回転仕事に変換され、エンジンに軸トルクが発生します。つまり、エンジンが発生するトルク T は、 p - V 線図の面積に比例します。よって、 p - V 線図で考えると、軸トルクを増加させるには次の2つの方法があります。

- ① p - V 線図を p 方向に広げる⇒高燃焼圧力化(高平均有効圧力化)
- ② p - V 線図を V 方向に広げる⇒大排気量化

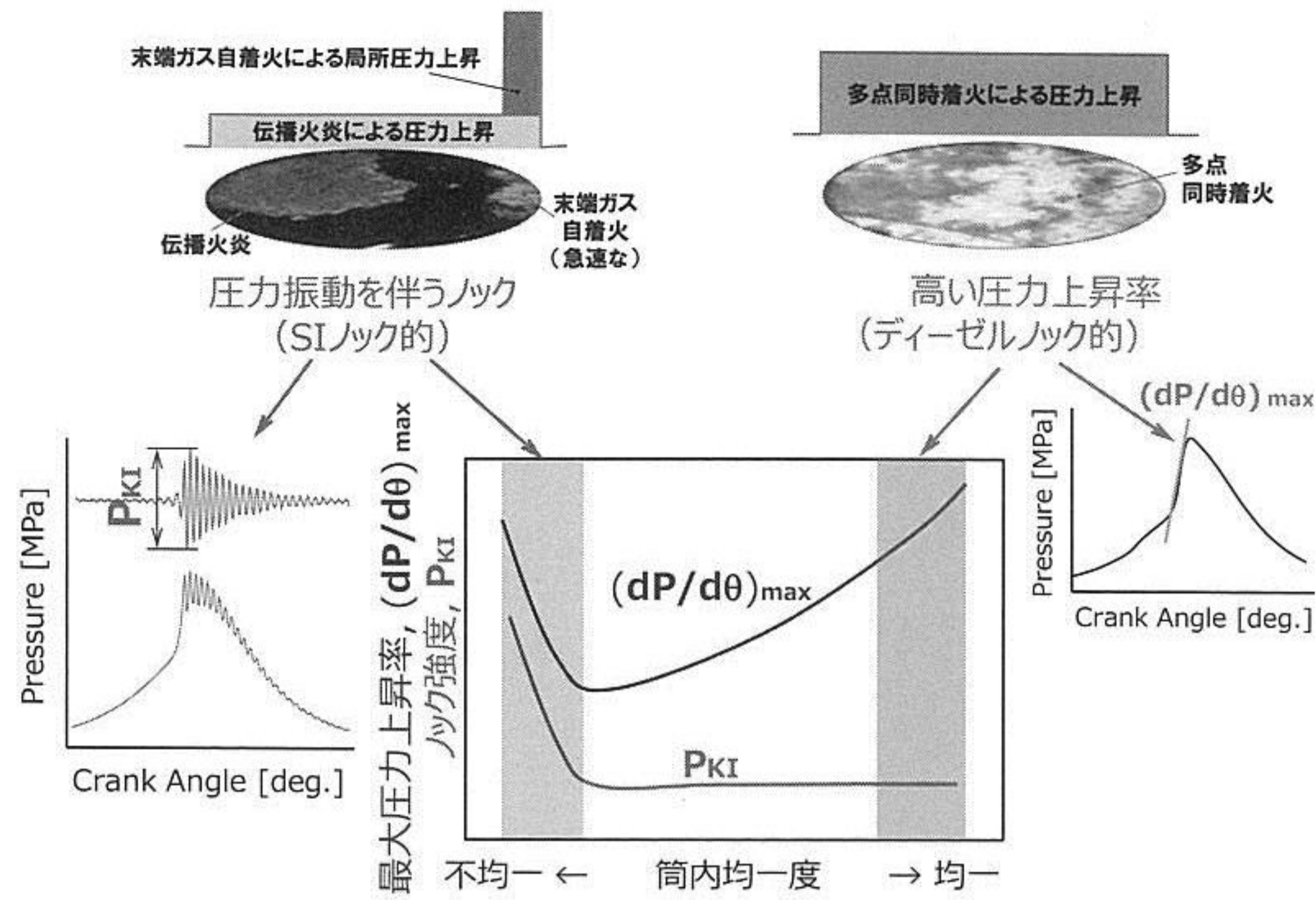


図7.22 HCCIノッキングの特性

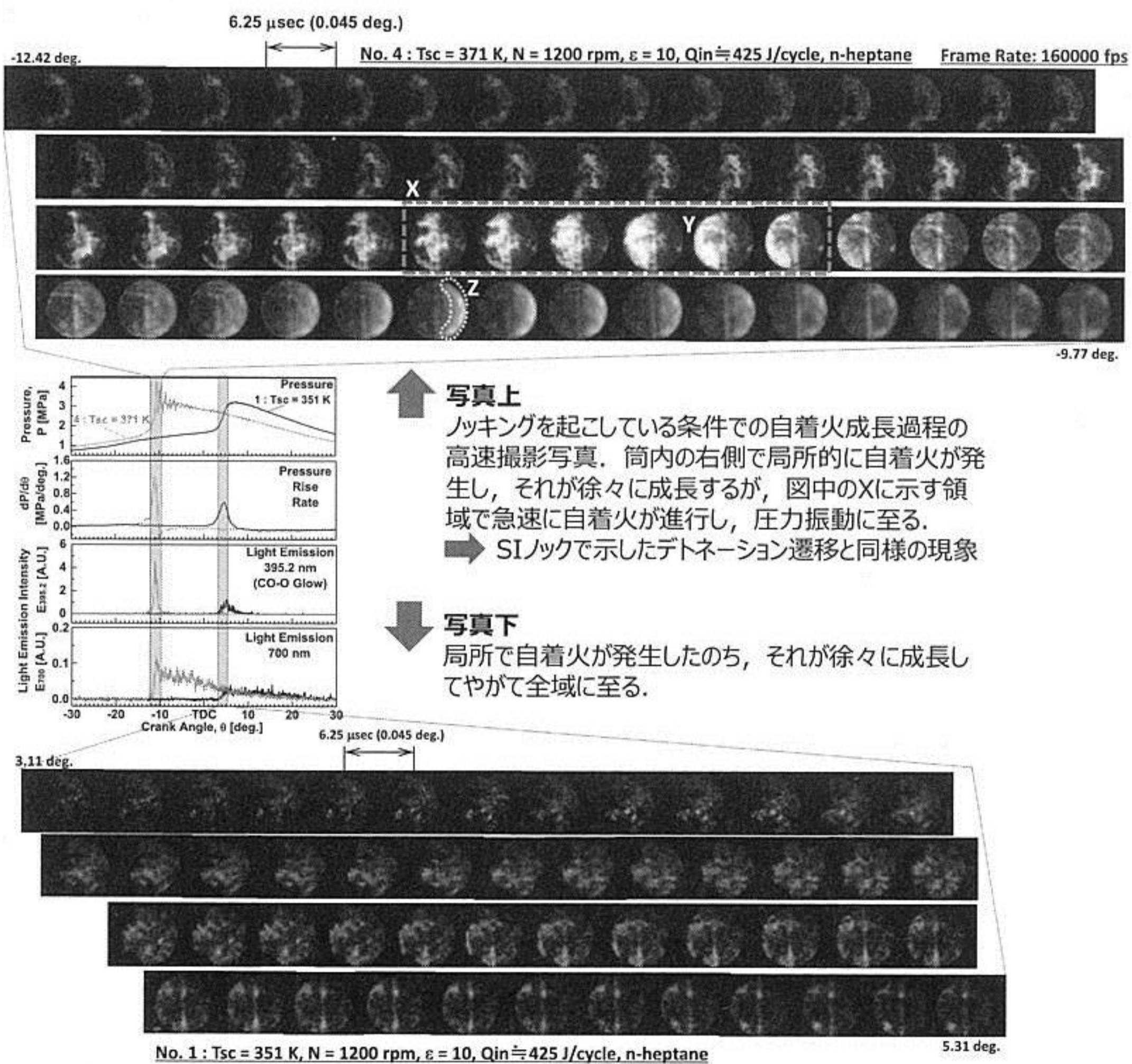


図7.23 HCCIノッキングの燃焼可視化 (7-40)

ち、それが徐々に成長し、やがて全域に至っています。ただし、SIの火炎伝播と比べると非常に短い時間で燃焼が完了します。

一方で、ノッキングが生じる条件では、局所的に自着火が始まり、それが徐々に成長するところまでは同じですが、その後、図7.23の領域Xに示すところで、高輝

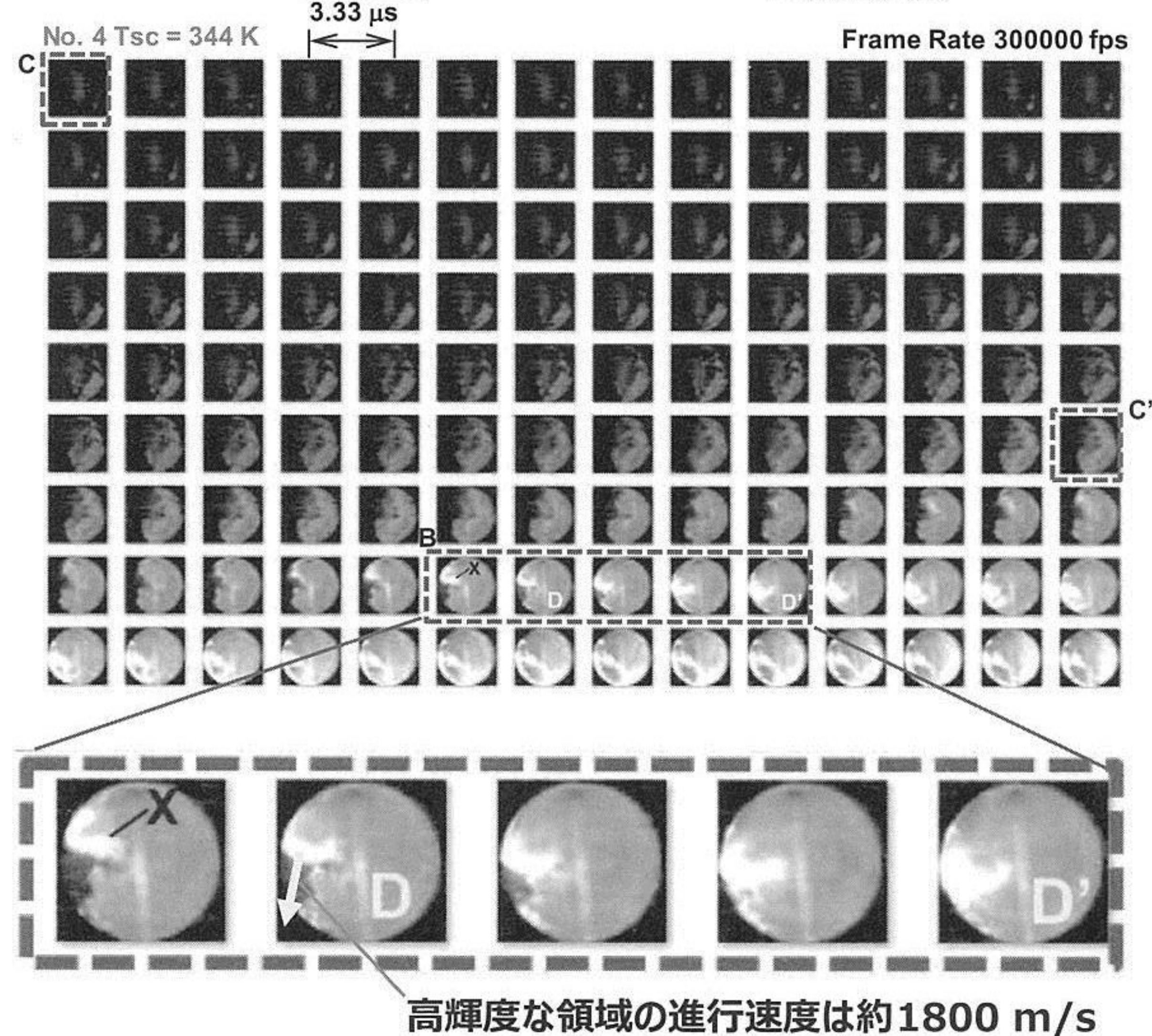
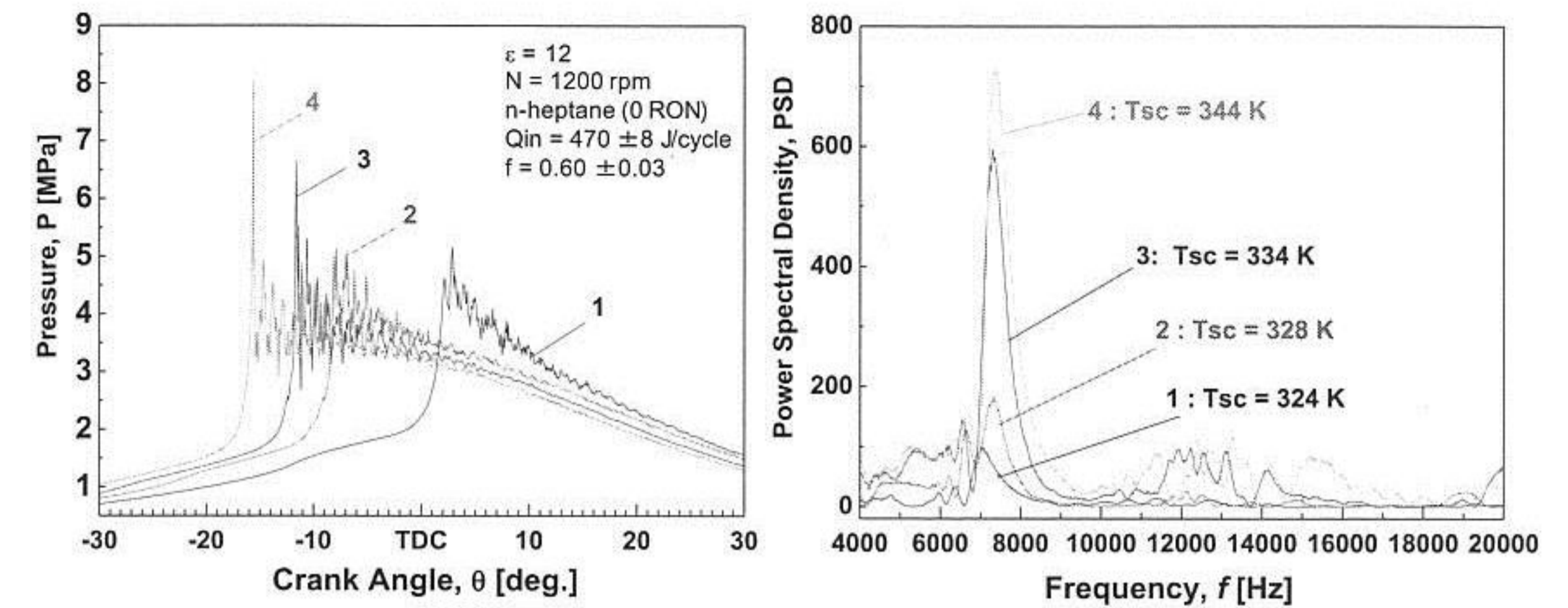


図7.24 HCCIノッキングにおける自着火成長過程の高速観察 (7-43)

本書刊行に際し、写真提供・助言等ご協力をいただいた方々

株式会社本田技術研究所 野口勝三氏、笠井聡人氏、渡邊生氏、西田憲二氏

早稲田大学 山口恭平氏

交通安全環境研究所 鈴木央一氏

株式会社堀場製作所 西川雅浩氏

マツダ株式会社 山川正尚氏、山本博之氏、漆原友則氏、養祖隆氏

元・日産自動車株式会社 村中重夫氏

日産自動車株式会社 菊池勉氏

株式会社SUBARU 石田礼氏

京都大学 石山拓二教授

慶應義塾大学 飯田訓正教授、横森剛准教授、山本英継氏、小松浩幸氏

スズキ株式会社 安藤真彦氏、中間健二郎氏、森俊一氏、小島啓氏、三沢一仁氏

千葉大学 森川弘二氏、金子誠氏

ボッシュ株式会社

株式会社キャタラー

謝 辞

本書は、筆者が大学での内燃機関の研究や教育を通じて得たものや感じたことをきっかけとして、大学でエンジン研究室に配属されてから現在に至るまでに学んだことをもとに執筆しました。

まずは、内燃機関の研究テーマを与えていただき、現在も継続してご指導をいただいている、恩師の庄司秀夫日本大学名誉教授並びに大学関係者に感謝の意を表します。また、日ごろから学会、研究活動等でご指導・ご支援をいただいている大学の先生方、企業や研究所の方々に、この場をお借りして御礼申し上げます。

本書で紹介した実験データなどにかかわる研究は、庄司研究室および飯島研究室の学生達とともになされました。これらの研究に取り組んでくれた学生、OB・OGの皆様に感謝の意を表します。

執筆にあたっては、早稲田大学の山口恭平氏、堀場製作所の西川雅浩氏、交通安全環境研究所の鈴木央一氏に、走行モードに関する助言や資料の提供をいただきました。また、本田技術研究所の野口勝三氏に可変技術に関する助言や資料の提供をいただきました。同じく本田技術研究所の笠井聡人氏、渡邊生氏に、高膨張比エンジンに関する助言や資料をいただきました。この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。

なお、本書に掲載されているデータの一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新的燃焼技術」(管理法人:JST)、JSPS 科研費 JP16K18034 および日本大学理工学部先導研究推進助成金の助成を受けて実施されました。

著者受賞歴

- SAE/JSAE Small Engine Technology Conference (SETC2018) High Quality Paper(優秀論文賞)／2018年
- JSAE/SAE Small Engine Technology Conference (SETC 2017) The Best Paper(最優秀論文賞)／2017年
- 日本燃焼学会論文賞／2016年
- 日本機械学会エンジンシステム部門ベストプレゼンテーション賞／2016年
- 自動車技術会春季大会学術講演会 優秀講演発表賞／2016年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2015年
- 第37回日本大学理工学部学術賞／2014年
- 日本機械学会エンジンシステム部門 ベストプレゼンテーション賞／2013年
- 日本エネルギー学会奨励賞／2013年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2013年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2012年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2011年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2010年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2009年
- 日本機械学会奨励賞(研究)／2009年
- 第58回自動車技術会賞 浅原賞学術奨励賞／2008年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2006年
- 小型エンジン技術国際会議(SETC) High Quality Paper(優秀論文賞)／2004年

〈著者紹介〉

飯島晃良 (いじま・あきら)

日本大学理工学部機械工学科准教授。博士(工学)、技術士(機械部門)。2002年日本大学理工学部機械工学科卒業。2004年同大学院理工学研究科機械工学専攻修了。

2004年富士重工業株式会社(現SUBARU)入社。2006年より日本大学理工学部にて研究と教育にあたり、SAE/JSAE Small Engine Technology Conference (SETC 2017) The Best Paper 最優秀論文賞(2017年)、日本燃焼学会論文賞(2016年)など数々の賞を受賞。

2016年には海外派遣研究者としてカリフォルニア大学バークレー校訪問。著書に『ポイントチェックで最速合格！乙4類危険物試験』『基礎から学ぶ熱力学』(ともにオーム社)、『らくらく突破乙種第12356類危険物取扱者合格テキスト+問題集』(技術評論社)、『革新的燃焼技術による高効率内燃機関開発最前線』(NTS)、『機械工学キーワード120』(コロナ社)など多数。

基礎から学ぶ

高効率エンジンの理論と実際

2018年12月25日初版発行

著者 飯島晃良

発行者 小林謙一

発行所 株式会社グランプリ出版

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-32

電話 03-3295-0005(代) FAX 03-3291-4418

印刷・製本 モリモト印刷株式会社

組版 株式会社サンセイ