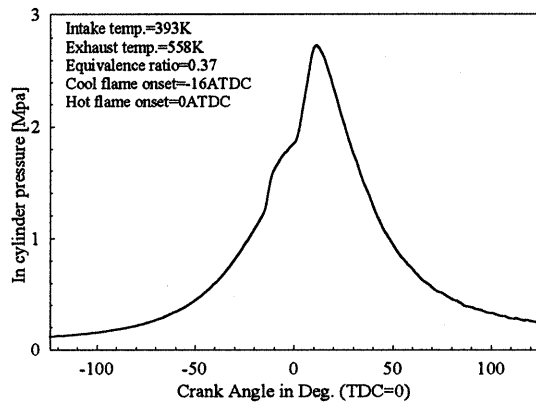
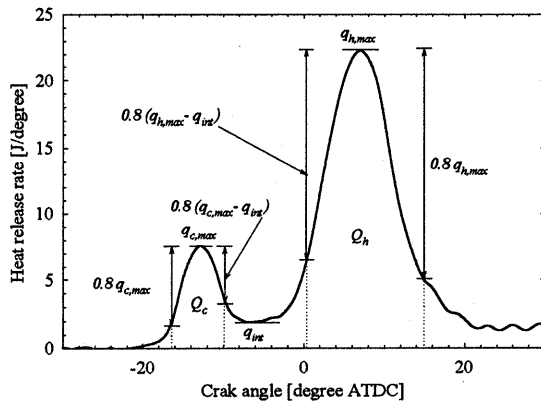


図2に、この装置から取った典型的な圧力線図を示した。ジメチルエーテルを使った予混合圧縮着火機関での燃焼は、混合気が滞留している温度帯によって、二つの着火現象が現れる。最初の着火は比較的低温領域で発生するため、冷炎もしくは低温酸化反応と呼ばれる。冷炎は温度がさらに高くなるにつれて、低温酸化反応の特性によって縮退してしまう。その後、さらに圧縮され燃料が持っているエネルギーの大半が消費される段階の火炎が現れる。これを熱炎と呼ぶ。熱力学の第一法則に基づいて、圧力線図を解析し、化学的なエネルギーの変換率を求め、熱発生率解析を行う。図 2(a)で表した圧力線図を熱発生率から見ると、図の2(b)のようなふたつのピークを得ることができる。冷炎、熱炎各々の熱発生率ピーク値の 20%にあたるクランク角度を発生時期及び終了時期、さらにその差を発生期間として定義した。なお、冷炎での熱発生量も定義により、熱発生の開始から終了までの積分から求めた。

冷炎の発生時期はほぼすべてのパラメーターによって変化する。しかし、冷炎が発生した時点での温度と圧力をもって整理してみると図3の結果となる。エンジンのように温度と圧力が外部圧縮によって連続に変化する場合、着火時期を温度と圧力で決定したとしても、その空間的に平均を表す温度と圧力自体がもつ物理的意味は小さくなる。むしろ、着火時の圧力は圧力の時間履歴をよく代表できる実用的には意味のある物理量である。解析の結果、圧縮開始時の吸気に対する情報から冷炎着火までの温度挙動をある程度予測ができ、予め求めておいた温度—圧力の着火条件との交差点から冷炎の着火時期を決めることが可能であることを確認した。



(a)



(b)

図 2 実験から得られる典型的な圧力線図(a) 及び 圧力線図から得られた熱発生率線図、冷炎と熱炎の 存在及び着火時期、火炎の終了時期 (b)

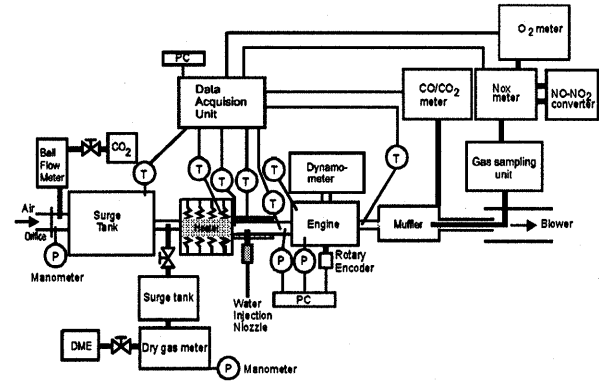


図 1 この研究で使われた実験装置の概略図

る、着火時の圧力は圧力の時間履歴をよく代表できる実用的には意味のある物理量である。解析の結果、圧縮開始時の吸気に対する情報から冷炎着火までの温度挙動をある程度予測ができ、予め求めておいた温度—圧力の着火条件との交差点から冷炎の着火時期を決めることが可能であることを確認した。

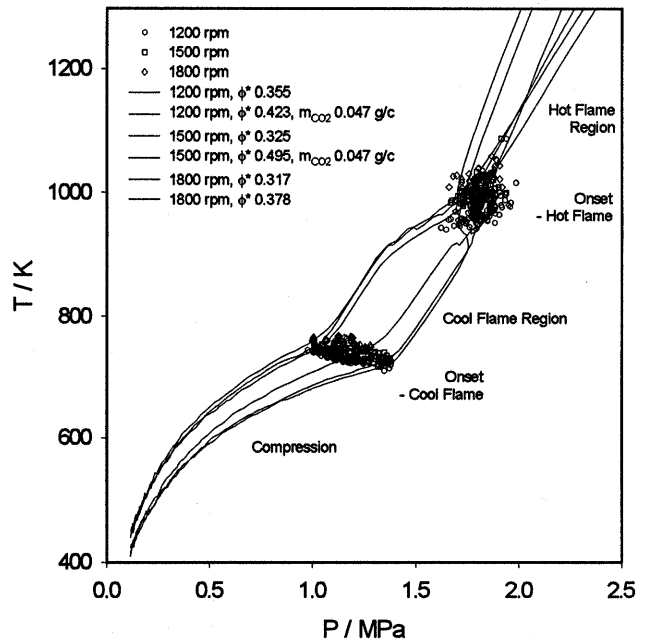


図 3 3種類のエンジン回転数に対する冷炎と 熱炎の温度と圧力で表した着火時期

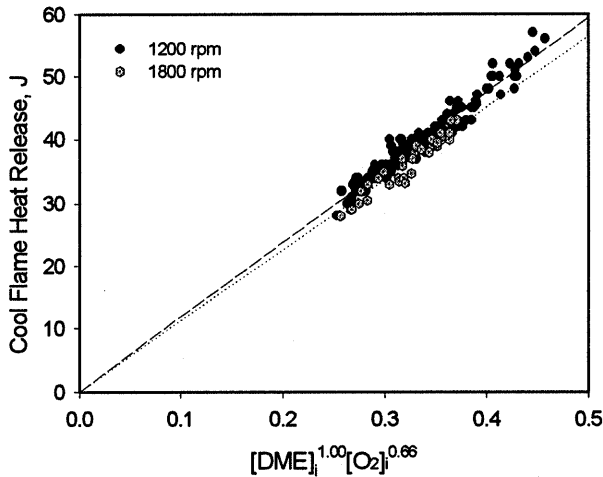


図4 燃料及び酸素の初期濃度からなるパラメーターによる冷炎での熱発生量

説明することができる。ジメチルエーテルの場合、冷炎反応の開始は燃料分子から1個の水素を取り出すことから始まり、2回の酸素分子添加によって連鎖反応が起きることが知られている。ここで、燃料濃度は水素が1個切断されたラジカルの量に影響し、そのラジカルに酸素が添加された過酸化物の量が存在する酸素の濃度によるのである。同じ運転条件では高速回転の場合、冷炎での熱発生率比がかなり低くなるのは図9から見てもわかる。しかし、回転数によって吸気の充填効率が低くなる点を考え合わせると、酸素濃度の低下が高速回転時の冷炎低下の主要な原因と考えられる。

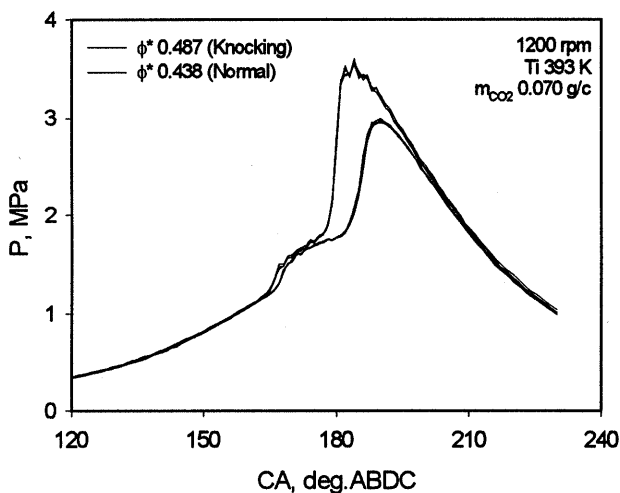


図5 燃料投入量の増加による、正常燃焼からノッキングへの変化

変動が発生したときをノッキングとした。[図5]

実験によって確認した結果を吸気温度の影響に関しては図6(上段)、二酸化炭素投入の影響は図6(中段)に示した。実際の結果は二酸化炭素投入のほうがより広い負荷範囲をもつことが分かった。この違いの原因は前述した冷炎での熱発生量であると言える。つまり、二酸化炭素を投入した場合、燃料投入量を上げても冷炎での熱発生がより少ないからである。

特に、冷炎での熱発生量は主要な結果のひとつとしてまとめたが、冷炎での熱発生量は混合気を高温、高圧にし冷炎終了後の圧縮過程を支配するだけでなく、冷炎での反応によって大量のラジカルなど反応性の高い中間生成物が作られるのである。冷炎での反応過程によって熱炎の発生時期が急激に変わる様子を図7の計算結果から示した。冷炎の発生時期の予測と冷炎での熱発生から熱炎の発生時期を決めることもできる。つまり、冷炎の発生時期

吸気温度、二酸化炭素投入およびエンジンの回転数に対して、同じ投入燃料量範囲をもつデータセットの冷炎での熱発生量の例を図4に示した。この図からも分かるように、二酸化炭素の投入量を増やせば増やすほど、また回転数を上げれば上げるほど全体投入燃料が持つエネルギーに対する冷炎での熱発生量の割合が小さくなるのがわかる。二酸化炭素の冷炎抑制効果に関して詳しく調べるため、CHEMKIN による解析を行った。その結果、予混合圧縮着火機関のような希薄燃焼をさせる環境での冷炎の発生量は、燃料の初期濃度と酸素濃度の影響を最も強く受けることが分かった。これは二酸化炭素の代わりに、不活性ガスである窒素を投入した実験結果からも確認された。(図10)冷炎での熱発生量と燃料および酸素の初期濃度の関連は、低温酸化反応のメカニズムから

図4に燃料濃度及び酸素濃度を組合せたものを横軸にとった冷炎での熱発生量を整理した結果を示したが、回転数の影響は酸素だけではなく冷炎が滞留する温度-時間履歴とそれに従う熱発生波形の変化が影響を及ぼしているため、高回転においてやや小さめになるのが分かる。

冷炎での熱発生量を基準に取り、エンジンの回転数、吸気温度および排気ガス再循環の模擬として二酸化炭素の投入量を主要パラメーターとして、熱炎の発生開始からノッキングまで燃料を投入量を変化させ、圧力データを解析した。熱炎の発生開始とノッキングの判断は、圧力モニター用のオシロスコープにより、熱炎による圧力上昇が確認された時点で熱炎の発生開始とし、熱炎発生後圧力波形に波のような

と発生熱量が吸気条件とエンジンの回転数に依存することが分かったため、吸気条件を代表する温度、二酸化炭素投入量、燃料投入量および酸素濃度とエンジン回転数をもって熱炎の発生時期を一義的に決定することが可能である。その結果を図8に示した。

このように熱炎の発生時期に大きく関わっている冷炎での熱発生は、エンジンの回転数に影響を受けることを図4の整理から確認した。この実験結果を計算によって確認するため次のような体積変化を与えて、計算を行った。つまり、まず実験で使ったエンジン(圧縮比 8.1)と同じ体積変化を与え、冷炎での総熱発生量を求めた。(図9の実線)この計算と同じ初期条件を持つ混合気に対して、冷炎の発生までは同じ体積変化を与え、その後体積変化を凍結させた場合の結果を図9の点線で表した。このような計算によって冷炎の発生までの温度及び圧力の時間履歴を一定にし、冷炎領域での体積変化だけの影響を調べることが可能になった。計算結果から分かるように冷炎発生時の体積変化は冷炎の熱発生に影響を及ぼし、熱発生量が減ることが明らかになった。

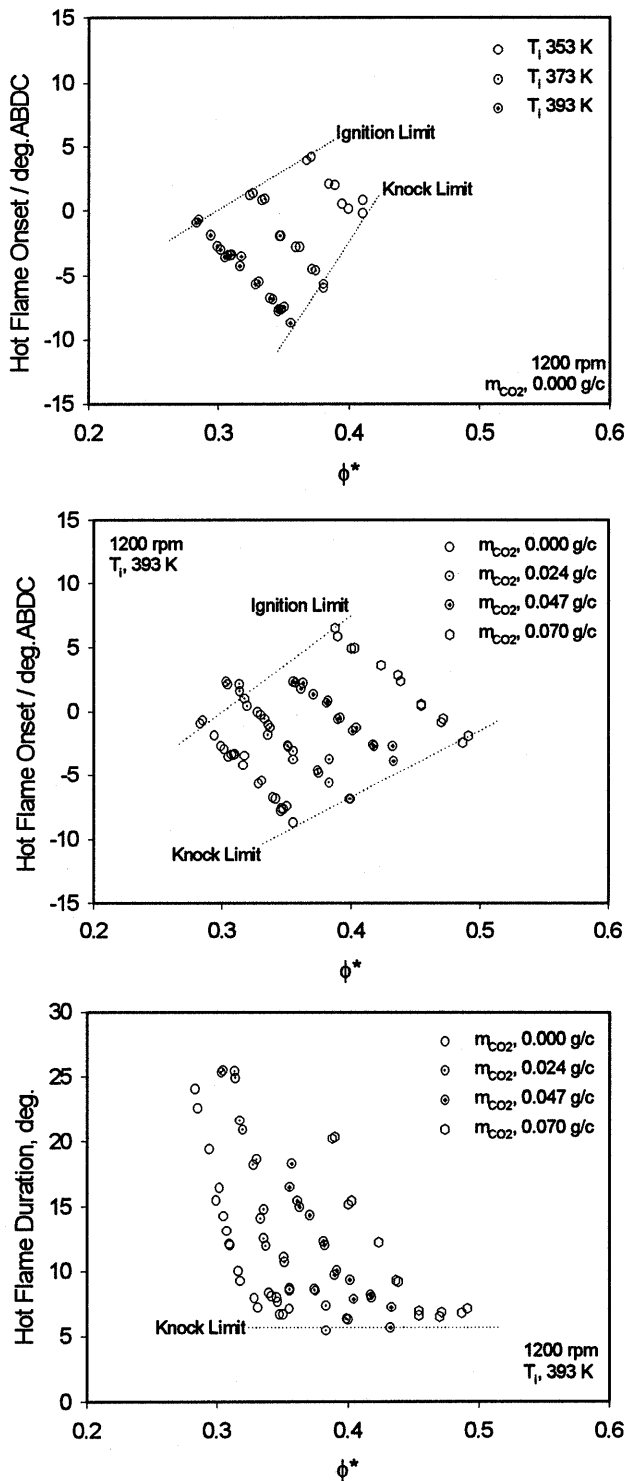


図6 初期温度変化によるノッキング限界及び着火限界の変化(上段)、二酸化炭素添加による限界の変化(中段)及び二酸化炭素添加時の燃焼期間(下段)

排気ガス再循環(EGR)はエンジンで簡単に用いられる手段であるため、窒素酸化物の低減のためすでに広く使われている。EGRが予混合圧縮着火機関の着火時期に及ぼす影響を調べるため、二酸化炭素を添加した計算結果と、添加した二酸化炭素と同じモル分率の窒素、空気及び水に入れ替えた計算結果の比較を図10に表した。冷炎での熱発生量は酸素の希釈効果として説明できるが、熱炎の発生時期は単に不活性ガスの比熱だけでは説明できないことが分かる。つまり水に入れ替えた場合、その高比熱にも関わらず熱炎の発生時期が窒素に入れ替えた場合とほぼ同等であることである。これは単分子分解反応である過酸化水素(H2O2)の分

と発生熱量が吸気条件とエンジンの回転数に依存することが分かったため、吸気条件を代表する温度、二酸化炭素投入量、燃料投入量および酸素濃度とエンジン回転数をもって熱炎の発生時期を一義的に決定することが可能である。その結果を図8に示した。

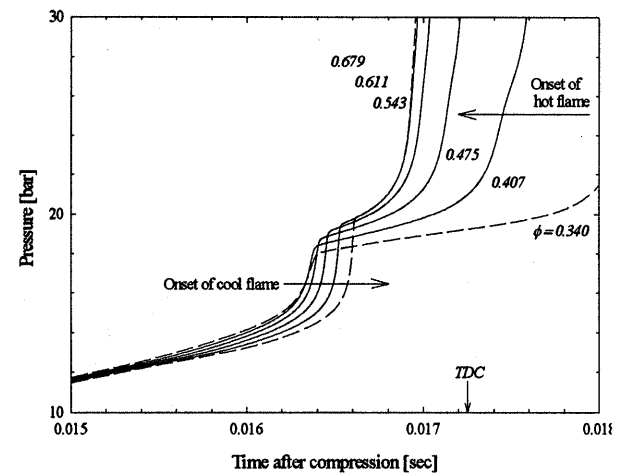


図7 燃料投入量による冷炎での熱発生増加及び熱炎発生時期の変化

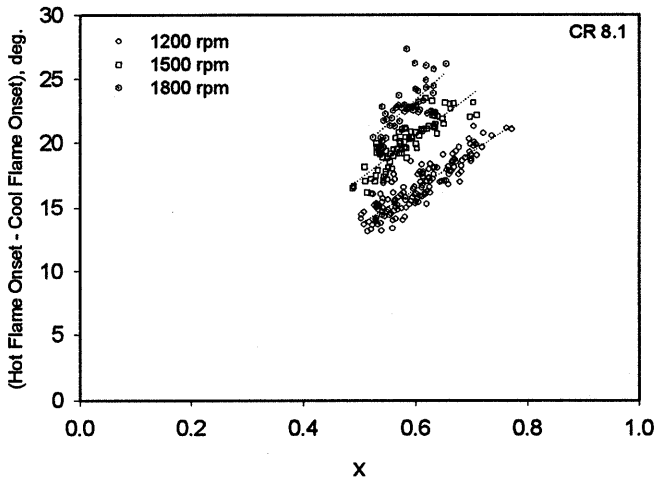


図8 冷炎から熱炎までの遅れ予測

ができる。つまり、同じ負荷条件でも熱炎の発生時期によって、ノッキングにも正常な燃焼にも変化するということである。冷炎の発生時期と熱発生量をもって熱炎の発生時期を制御することが可能なことは、予混合圧縮着火での高負荷運転がある程度可能性を示している。

以上のように、ジメチルエーテルを燃料とした予混合圧縮着火機関での着火及び燃焼の一般的な特性を調べた結果、次のような知見が得られた。1) 冷炎の発生時期は混合気温度履歴に依存する、2) 冷炎での熱の発生は燃料、酸素の初期濃度及びエンジンの回転速度に依存する、3) 過酸化水素の分解は熱炎発生トリガーであり、その圧力依存性により高圧であるほど、水の分率が高いほど熱炎の発生時期は大幅に早くなる、4) 吸気温度低下と二酸化炭素の添加によりもっと高負荷まで運転が出来るが、二酸化炭素添加の場合その希釈効果により運転可能な負荷の範囲も広がる。

解反応 ($H_2O_2 + M \rightarrow OH + OH + M$) の圧力依存性を用いて説明することが可能であった。

理想的に均一な混合気の場合、ある着火条件に達すると空間内の全ての混合気が一気に燃えてしまうことになる。この面から見ると、予混合圧縮着火ではノッキングを避けるのは不可能だが、実際の場合には空間的な温度分布を持ち、燃料と空気の混合も分子的な水準まで混合されているとは考えられないため、混合気の燃焼には理想的な状態よりは長い燃焼期間をもつことになる。特に、全体的に希薄な混合気の場合には、様々な不均一性の影響を受けやすくなると推測できる。実際のデータを見ると上死点以後の膨張過程に入ってから熱炎が発生すると、燃焼期間をより長くすることができる。

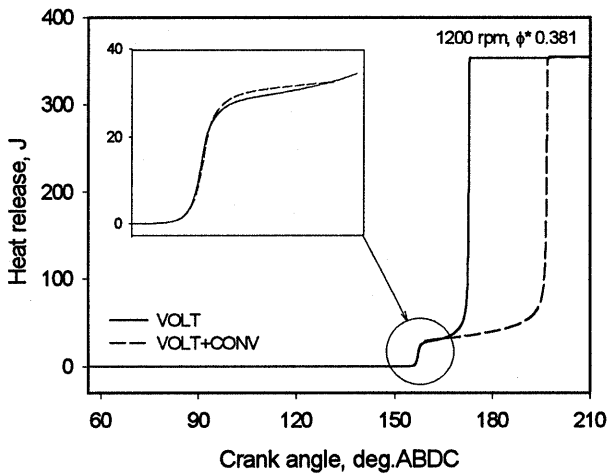


図9 体積変化が冷炎での熱発生に及ぼす影響 (計算結果)

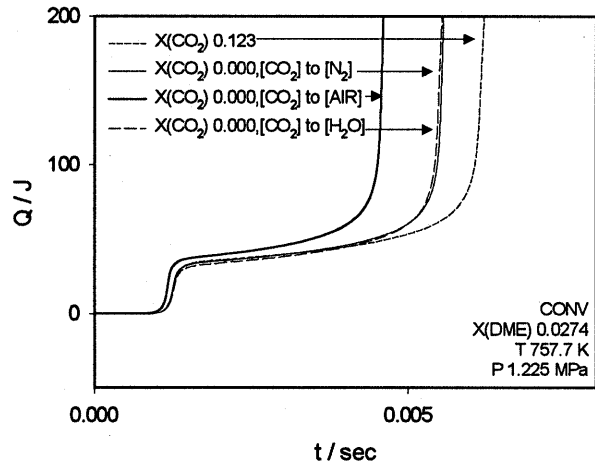


図10 不活性ガスの種類による冷炎での熱発生量及び熱炎の発生時期