ガスタービン燃焼器の燃焼性能に及ぼすシラン添加効果*

塚本達郎^{*1}, 長谷川 進^{*1}
佐藤順一^{*2}, 新岡 嵩^{*1}Effect of Silane Addition on Combustion Performance
of Gas Turbine CombustorTatsuro TSUKAMOTO, Susumu HASEGAWA,
Jun'ichi SATO and Takashi NIIOKA

Lean blow-off limit and ignitable limit were studied experimentally to understand the effect of silane addition on the combustion performance of the gas turbine combustor. The fuel employed was methane. Silane concentration was varied up to 5%. The results show that silane addition to methane extends both the lean blow-off limit and ignitable limit considerably, and that this effect is more remarkable in the region of higher air velocity. It is concluded that silane addition makes the flame stable and promotes combustion reaction in the wide range of fuel-air ratio. However, silicon dioxide produced by silane burning adheres to the inner side of the combustor and accumulates around the fuel injection holes.

Key Words: Combustion, Gas Turbine Combustor, Blow-off Limit, Ignition, Silane

1. 緒 言

モノシラン(SiH_4 :以下単にシランと呼ぶ)は非常に反応性が高く、空気と混合するだけで自発着火して燃焼するので非常に危険であるが、その高反応性をうまく利用できれば有用である。スペースプレーン用スクラムジェットエンジンの燃焼室では、空気流速が非常に大きいために火炎の安定化および着火が困難である。そこで、燃焼室内に反応性の高いシランを噴射したり、燃料にシランを添加することによって、火炎を安定化したり着火を促進したりすることが考えられている⁽¹⁾。また、シランは半導体製造過程で用いられており、微量ではあるが半導体工場での廃ガスにシランが含まれる。危険を回避するため、水置換により水素などへ転換することも行われているが、水素も安全であるとはいえない。そこで、燃料希薄である廃ガスに他の燃料を混入して積極的にシランを燃焼させて、安全な物質に変えてから排出することが考えられる。

ここでは、燃料への少量のシラン添加が燃焼および

着火現象に及ぼす効果を調べるために、高負荷の小形ガスタービン燃焼器を用いて、燃料のメタンにシランを混入した場合の火炎吹飛び限界および着火限界の測定を行った。これは、シラン添加による二つの限界の拡大効果をねらったものである。また、シランを添加して燃焼させる場合の安全性ならびに問題点を検討した。

2. 実験装置および方法

実験に用いた小形ガスタービン燃焼器を図1に示す。燃焼器は、ライナ径約70 mm、ライナ長さ約200 mm、ケーシング内径100 mmの偏流缶形である。燃焼用空気はケーシングの側面から導入される。燃焼用空気が側面から導入され、それが燃焼器ライナの空気孔に直接当たるとライナ内の流速分布に偏りが生じやすい。そこで、ライナの周囲にパッフルすなわちアウトライナを取付けた。導入された空気はアウトライナの外側を流れ、燃焼器頭部へ導かれる。一次燃焼域への空気は、燃焼器頭部のスワラおよび側面の空気孔から供給される。スワラの角度は45°である。燃焼ガスは直径2 mmで6孔の多孔噴射弁を用いてライナ内に噴射される。噴射角は90°である。燃料ガスとしてはメタンを用いた。着火にはエネルギー16 J、6スバ

* 原稿受付 平成2年7月18日。

^{*1} 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。^{*2} 正員、石川島播磨重工業(株)技術研究所 (〒135 東京都江東区豊洲3-1-15)。

ーク/sの容量形スパークプラグを用いた。

図2に実験装置全体の概略を示す。送風機からの空気は、整流筒を通して側部より常温常圧で燃焼器に流入する。このとき空気流量は整流筒出口に置いたピトー管によって測定した。メタンは流量をオリフィス流量計で測定した後に燃焼器へ供給される。シランは、4倍の窒素で希釈されたもの(シラン20%+窒素80%)を用いたが、この程度希釈されていても空気中に放出されるだけで、自発着火して欲しいの炎と白煙(SiO_2)を出して燃焼する。したがって、シランの配管に空気が存在すると、管内で燃焼して危険であるので、シランの配管系は真空ポンプで引いた後に窒素でパージできるようになっている。シランは、オリフィス流量計によって流量を計測された後に燃焼器入口直前でメタンと混合される。

吹飛び限界の測定は以下のように行った。メタンの流量を所定の値に調整して、空気流量を安定限界内にして着火し、空気流量を徐々に増加して、火炎が吹き飛ぶ空気流量を求めるのが通常である。しかし、シランを混入した場合には、シランの流量が微量であるために、空気流量を変化させると燃焼器内の圧力の微小変化によってシランの流量も変化してしまい、測定誤差が大きくなる。このため、空気流量を一定にし、メタンあるいはシランの流量を減少させるという方法で吹飛び限界を求めた。なお、燃料過濃限界は、実用上必要

図1 実験に用いたガスタービン燃焼器

図2 供給系の概略図

なくまた実験上危険を伴うため、ここでは希薄限界のみ測定した。

着火限界の測定は、空気、メタンおよびシランの流量を所定の値に調整した後に、火花放電させて行った。エネルギー16 Jの火花を6回/s放電させた。測定においては、最初の火花放電開始後5 s以内に着火し、放電を停止しても引き続き燃焼が持続する場合を着火するとした。したがって、5 s放電しても着火しないか、着火しても放電を停止すると燃焼が持続しない場合には着火限界外とした。着火限界も吹飛び限界同様、希薄限界のみ測定した。

また、燃焼器出口断面における温度分布を線径0.3 mmのクロメル-アルメル熱電対を用いて測定した。なお、使用した送風機の性能上、測定は吹飛び、着火限界とも空気流量800~5 000 L/minの範囲で行った。

3. 実験結果および考察

3・1 火炎吹飛び限界 図3に火炎吹飛び限界の実験結果を示す。2章で述べたように、空気流量を一定にし、吹飛び時のメタンとシランの流量をプロットしたものである。ある空気流量に対して、実線の右上側のシラン流量とメタン流量の組合せでは火炎は安定し、左下側では吹き飛ぶ。したがって、シランを添加することによって、同じ空気流量でも少ないメタン流量まで吹き飛ばないことがわかる。図3の実験結果から内挿によってシランの添加量をパラメータにして、実験結果を整理しなおしたものが図4である。縦軸がメタン流量、横軸が空気流量である。シランを添加していない場合には、前述のとおり空気流量を増大させて吹飛び限界を調べられるので、実験点も示されている。図4中、たとえば1% SiH_4 +4% N_2 addedの曲線

図3 シラン添加時の吹飛び限界

は、縦軸に示されたメタンの流量に1%のシランと4%の窒素が含まれている場合の結果である。図4から、シランの添加によって同時にその4倍の窒素が加えられているにもかかわらず、吹飛び限界がかなり拡大していることがわかる。図5は、図4の縦軸を燃空比に横軸を代表空気流速に変換したものである。ただし、燃空比を求めるときの燃料流量にはシランと窒素が含まれており、また代表空気流速は空気流量をライナの断面積で除した値である。

燃焼器内での火炎の吹飛び現象は、液体燃料の蒸発特性時間、空気力学的特性時間(燃料と空気の混合時間および燃焼器内の滞留時間)、化学反応の特性時間などの特性時間によって整理できる⁽²⁾。気体燃料を用いた場合には、このうち空気力学的特性時間 τ_a と化学反応の特性時間 τ_c の競合によって吹飛び現象が支配されると考えられる⁽³⁾。すなわち、相対的に τ_a が大きければ火炎は安定し、 τ_a が小さければ吹き飛ぶ。ここで用いた燃焼器では燃料噴出速度が十分に大きく、燃料と空気の混合は良好であると思われるので、燃料と空気の混合時間は無視して、 τ_a として燃焼器内の滞

留時間を取り、 τ_c として密度を総括反応速度で割って表すと、 τ_a および τ_c はそれぞれ次のように表される。

$$\tau_a = L/V, \quad \tau_c = \rho/\dot{\omega}$$

ここで、 L は燃焼器長さ、 V は空気流速、 ρ は混合気密度、 $\dot{\omega}$ は化学反応速度である。つまり、 $\rho V/\dot{\omega} L < 1$ であれば吹飛びは生じない。

燃料に添加物を混入することによる吹飛び限界拡大の理由としては、単位燃料流量あたり発熱量の増大または化学反応の促進が考えられる。図5の吹飛び曲線において、もし燃料の発熱量が増大したとすると、その効果は燃料流量割合の増加すなわち燃空比の増加と等しいので、限界が図5の下方へ広がって、同じ空気流速でもより燃料希薄な領域まで保炎できるようになると考えられる。また、化学反応が促進される場合には、 $\dot{\omega}$ が増加するので同じ燃空比でもより大きな空気流速まで保炎できるようになり、限界が図5の右へ移動する。図5の縦軸の燃料流量は、メタンと添加物の合計流量を表しており、添加物を加えた場合にはメタンの流量は減少していることになる。燃料の真発熱量はメタンが803 kJ/mol、シランが1426 kJ/molであるので、たとえばメタンにシラン5%+窒素20%が含まれる場合には、発熱量は674 kJ/molとなり、メタンだけの場合よりも減少している。したがって、図5では限界は右のほうへ広がっているとみるべきであり、シラン添加はその高反応性による総括的な反応速度の増加の効果があると考えてよい。

図5において、 $V=10$ m/sの付近で吹飛び限界が急に変化する領域があり、シランを添加した場合も同様の傾向である。この領域は図4においては傾きが急に変化している空気流量3000 L/minの領域に相当する。また $V>10$ m/sでは、シラン添加の効果がより顕著であることがわかる。燃料噴射口から噴出した燃料は、その周囲から流入した空気と混合して、噴射口近くで保炎されて燃焼しているが、空気流速が大きくなると保炎位置が下流へ移動する。ここでは、 $V=10$ m/sにおいてこの保炎位置の移動が起こり、安定性はより悪くなって、図5のように限界が急激に上方へ移動したと考えられる。また、安定性の悪い領域であるためシラン添加効果が大きく、空気流速の大きいところほど下方への限界の広がりやの程度は大きくなる。

図6に燃焼器出口断面の温度分布の測定結果を示す。シランの添加によって出口断面における温度は全体的に上昇し、より均一になっている。これはシランの反応促進効果のために保炎位置が上流側へ移動し、燃焼器内で反応、混合とも十分に行われるためであると考えられる。

図4 吹飛び限界(空気流量に対する燃料流量)

図5 吹飛び限界(代表空気流速に対する燃空比)

図6 燃焼器出口断面の温度分布

3・2 着火限界 図7に着火限界の測定結果を示す。吹飛びのときと同様に、縦軸は燃空比で、横軸は代表空気流速である。なお、シランを添加しない場合だけ実験点を入れてあるが、シラン添加の場合は、吹飛び限界のときと同様の内挿によって求めた。つまり、空気流量を一定にし、メタンとシランの流量を変化させて着火する限界を求めることを、数種類の空気流量に対して行った結果である。シランを添加することによって、同じ空気流量でも少ないメタン流量まで着火することがわかる。図7中の破線は、シランを添加しない場合の吹飛び限界を示している。着火限界の空気流速に対する変化は、吹飛び限界とほぼ同様であり、シランを添加した場合の限界の広がり方も同じような傾向を示す。着火の場合も吹飛び限界と同様に空気流速10 m/s付近で限界の急激な変化がみられるが、この原因としては、この空気流速を境にして保炎位置が移動していることが考えられる。空気流速が大きいほどシラン添加の効果が大きくなるのは、吹飛び限界の場合と同様の理由による。

3・3 シラン添加の問題点 安全性確保のためにシラン供給の配管系が複雑になったが、手順どおり行えば実験は危険なく行えた。また、シランの添加によって異常燃焼など生じることもなく、図5および図7にみられるように、より火炎の安定性が増すことがわかり、これはシランの燃焼処理の立場からも歓迎すべきことである。ただ唯一の問題点は、シランの燃焼によって生成される二酸化けい素(SiO_2)が、燃焼室壁面および燃料噴射口に付着することである。このため、長時間燃焼させるとその厚さが増して、燃焼器内部の流れが変化することが予想される。実際、総燃焼時間

図7 着火限界の測定結果

約1 hの後に、燃料噴射口の直径2 mmの穴の周りには厚さ約5 mmの SiO_2 がたい積しており、圧力損失増大のため燃料の上流圧力を高くする必要があった。また、ライナの二次空気取入れ用の穴の周囲にも約1 mmの SiO_2 がたい積した。ここで実験した範囲では、 SiO_2 のたい積は吹飛び限界および着火限界にはほとんど影響はなかったが、さらに長時間の燃焼では影響がでることも予想される。したがって、定期的な燃焼器の清掃が必要となる。また燃料噴射部、二次空気取入れ孔などに SiO_2 のたい積にくい設計が要求される。

4. 結 論

小形ガスタービン燃焼器を用いて燃料のメタンに少量のシランを加えた場合の希薄側の吹飛び限界および着火限界の測定を行い、以下のことがわかった。

- (1) シランの添加は吹飛び限界および着火限界の拡大に大きな効果がある。またその効果は、空気流速が大きいほど顕著である。
- (2) 高反応性のため危険であるシランは、長時間燃焼させると燃焼器内に SiO_2 が析出するという問題点はあるものの、燃料に混入することによって安全に燃焼処理することができる。

本研究の一部は、鹿島学術振興財団および大日本スクリーン製造(株)の研究助成によるものであり、ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Northam, G. B.,ほか3名, *Proc. AIAA ASME SAE ASEE 22nd Joint Propuls. Conf.* AIAA-86-1396 (1986).
- (2) Plee, S. L. and Mellor, A. M., *Combust. Flame*, **35** (1979), 61-80.
- (3) Sato, J. and Sato, Y., *Proc. ASME JSME Thermal Eng. Joint Conf.* 4 (1983), 227-231.