

アンモニアを燃料とする火花点火エンジンの始動技術

Cold-start of Ammonia-fueled Spark Ignition Engine

本間 隆行^{*1} 竹内 正^{*1} 針生 聡^{*1} 竹内 秀隆^{*1}
 Takayuki Homma Tadashi Takeuchi Satoshi Hariu Yoshitaka Takeuchi

*1 開発第一部

要旨 温暖化防止という社会課題に対し、CO₂を出さない代替燃料として着目されているアンモニア燃料のみで動作可能なアンモニアエンジンを開発している。難燃性アンモニアに対し、アンモニアから改質により抽出した水素と混焼することで燃焼性を改善するエンジンシステムを構築するが、触媒反応による改質水素生成は冷間時に起きないため、始動時に未燃アンモニアが排出されることが課題である。改質器の早期暖機条件の最適化と後処理触媒の適用条件探索により、未燃アンモニア排出を抑制可能なエンジン始動を実現した。

キーワード: アンモニア燃料、冷間始動、改質水素、アンモニア排気

Abstract Ammonia is attracting attention as an alternative fuel that emits no CO₂ to prevent global warming. The ammonia engine has been developed that can be used with mono-ammonia fuel. The engine system was prepared that is co-fired ammonia with hydrogen reformed partially from ammonia, because ammonia has poor combustibility. The issue is to emit unburned ammonia at cold-start, because hydrogen production by catalytic reaction does not occur. Unburned ammonia emission could be controlled during cold-start of the engine system by optimizing early warm-up conditions for a reformer, and investigating applicable conditions for aftertreatment catalysts.

Keywords: Ammonia fuel, Cold start, Reforming hydrogen, Ammonia emission

1 はじめに

2021年にイギリスで開催された国連気候変動枠組条約第26回締約国会議(COP26)では、気候変動への強い危機感が示され、脱炭素化への取り組みが重要視されている。パワートレインの対応手段として、「蓄電池+モータ」、「燃料電池+モータ」と並び、「代替燃料+エンジン」もその一つであり、安価なエンジンをベースとして燃料変更でのCO₂削減の可能性を検討している。代替燃料として、アンモニア(NH₃)は炭素を含まないため、燃焼してもCO₂を出さないことから大型発電での利用検討が進められている。現状では化石燃料から作られているが、将来的には再生可能エネルギー利用などで製造するよう計画されている。

NH₃は化学肥料や工業利用等で古くから利用されており、輸送や貯蔵方法が確立されている。また、常温常圧で気体であるものの10bar程度の加圧により容易に液体になることから、エネルギー密度の観点でも有利であり、移動体への適用は稼働時間の面からも望まれる。しかし、刺激臭を伴う物質であり劇物であることから広く一般市民が使うものではなく、適切な管理・運用ができるプロ向け機器での利用が想定される。具体的なNH₃エンジンの適用イメージとしては、工場(屋外)におけるフォークリフトや、熱利用も含めた分散電源(コージェネレーション)などへの適用、工場以外

では、空港におけるトーイングトラクターやバス、物流を支える拠点間移動のトラックへの実装が考えられる。さらには建設機械や農業機械、屋外工事などで利用される発電機などにも適用可能と想定される。

2 NH₃エンジンシステム

2.1 燃料特性

NH₃は燃焼が遅く可燃範囲が狭いことから、非常に燃えにくい燃料である(図1)。エンジンに適用した場合は運転範囲が狭く、出力が大幅に低くなることが課題となる。そこで燃えやすく、同じく炭素を含まない水素(H₂)を混ぜることで改善を図る。

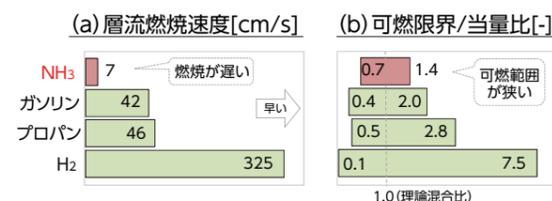


図1 NH₃燃料特性
Fig.1 Fuel properties of NH₃

2.2 オンボード改質と後処理

移動体用途を想定した場合、H₂の供給はH₂ボンベ利用が考えられるが、NH₃との2燃料補給や高圧タンクが必要となることから、ユーザ利便性・コストの観点より、NH₃からH₂を取り出す「燃料改質」を適用する。既存のエンジンに水色部分の改質システムを追加することで、改質器からエンジンが必要な分だけ、触媒反応によりH₂を供給できるオンボードシステムを構築した(図2)。ベースエンジンは排気量3.7L、直列4気筒、火花点火の当社製1FSを用いた。

NH₃を燃料とした場合、理想的に完全燃焼することができればエンジン排気成分は窒素と水のみとなるものの、実際には微量の未燃NH₃と窒素酸化物が排出される。そこで、後処理触媒としてガソリン・ガスエンジンで使用される一般的な三元触媒を用いた。なお、三元触媒とは炭化水素・一酸化炭素・窒素酸化物の3つの燃焼排気物質を量論比とすることで窒素・水・CO₂とし無害化する働きがある。一方、NH₃の場合は、炭素が存在しないものの、NH₃・H₂・窒素酸化物を量論比とすることで、窒素・水のみとなる酸化還元反応が同じ触媒にて起こるため、それを利用する。

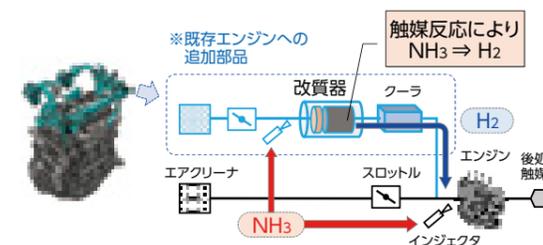


図2 NH₃エンジン概略図
Fig.2 Schematic of NH₃-fueled engine system

2.3 定常性能

構築したNH₃エンジンシステムの定常性能を評価した。回転数・負荷により最適なNH₃/H₂割合は変化するものの、回転数750~2550rpm(LPガス燃料適用時の動作範囲と同等)にて安定燃焼でき、最大トルクはNH₃の熱量や空気との混合比による目減りもありLPガス燃料動作比20%減となるが、概ね運転範囲をカバー可能であることが確認された。また、空気/燃料比(空燃比)を制御することにより、三元触媒後の未燃NH₃および窒素酸化物排気濃度をそれぞれ検出下限以下、56ppm以下まで同時浄化できることがわかった。

3 始動時の課題と対策

3.1 改質器の暖機

本システムに適用する改質器は自己熱改質式(ATR:Auto Thermal Reforming)である。図3に構造と作動イメージを示す。NH₃からH₂への改質は吸熱反応であり、触媒温度が高いほど改質効率は上がることから、持続的にH₂へ改質するには熱を供給し続けることが必要となる。ATR改質器では空気-NH₃の混合気を入れ、触媒にて一部のNH₃が酸化(燃焼)し、発生した燃焼熱を利用して残りのNH₃がH₂へ改質することが特徴である。

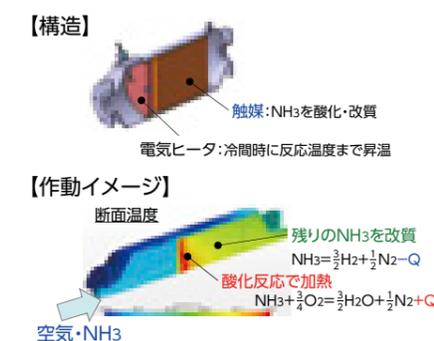


図3 ATR改質器の構造と作動イメージ
Fig.3 Structure and operation image for ATR reformer

一方、冷えている触媒に空気-NH₃の混合気を投入しても触媒反応は起きず、触媒活性が十分に得られる温度まで昇温する必要がある。そこで、触媒上流にヒータを付け空気-NH₃の混合気を流通しながら触媒活性温度まで加熱する。この時、NH₃エンジンを起動するためには、以下3つ条件を段階的に成立させる必要がある。

- ①改質触媒が活性温度以上
- ②改質H₂がエンジンシリンダ内燃焼に必要な量以上
- ③エンジンシリンダ内での空燃比が燃焼範囲内

条件成立までは安定的にNH₃が燃えず、供給するNH₃がそのままエンジン外へ排出されてしまう。従来のエンジンでは燃料供給から③のみ成立で起動するため、本NH₃エンジンシステムの課題は①・②を早期に実現すること、すなわち改質器を早期暖機することとなる。

3.2 後処理触媒での吸着

始動時は後処理用の三元触媒が暖機されていないため、触媒反応が起きずシリンダから排出された未燃NH₃がすり抜けてしまう。そこで、一般的なディーゼル車に使用されており、NH₃を吸着する機能を持つSCR(選択的触媒還元)触媒を適用する。NH₃排気を抑制する考え方を図4に示す。三元触媒の下流にSCR触媒を設置し、三元触媒暖機までNH₃を吸着する。一方で、排気温度上昇に伴いSCR触媒での吸着能力が下がるためNH₃が再放出されてしまうこと、また吸着したままではいずれ吸着限界を超えてしまい繰り返し使えないことが利用上の課題である。したがって、三元触媒暖機後は意図的にリーン(燃料不足)燃焼し、生成するNO_x(窒素酸化物)によってSCR触媒に吸着されたNH₃を無害化させる(SCR触媒再生)が、これは、一般的な尿素SCRシステムによるNO_x浄化と同じ化学反応を利用する。

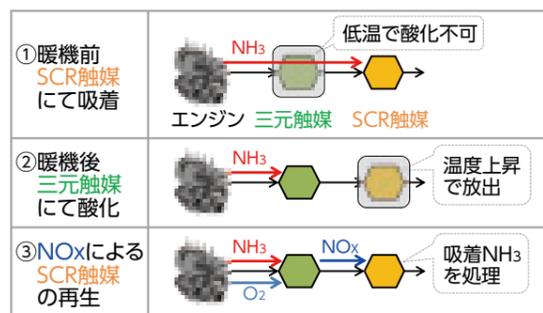


図4 後処理触媒でのNH₃排出抑制
Fig.4 NH₃ emission control with aftertreatment catalysts

4 始動条件の最適化

4.1 始動パラメータ

エンジン始動を成立させるためには、改質器の空燃比およびエンジンでの空燃比を適切に調整する必要がある。燃料量はインジェクタにて制御するため、エンジン制御ユニットからの指示により比較的制御性良く調量可能である。空気量はエンジンメイン側と改質器側の2つのスロットルの開度によって制御するため調量が難しい。例えば、片方を閉めると閉めた側は狙い通り空気量が減るが、もう一方は開度を変化せずとも、空気量が増えてしまう。そこで系統的にパラメータを振りやすく、始動現象の傾向を取得しやすくするため、改

質器側のスロットルをマスフローコントローラ(MFC)へ置き換え、空気を流量として設定可能となるよう実験系を変更し予備試験を実施した(図5)。最適化のパラメータとしてはヒータ予熱温度、改質器の空燃比、改質器の燃料流量である。

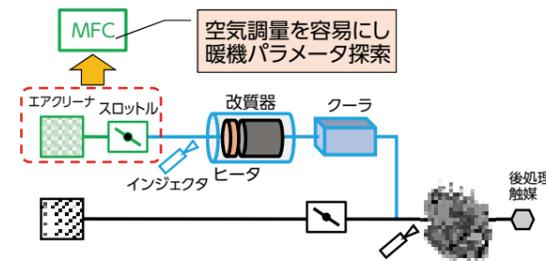


図5 始動条件探索の実験系
Fig.5 Experimental system for startup condition search

4.2 ヒータ予熱温度の影響

予熱温度と燃焼安定性の関係を調査した。事前加熱としてヒータが設定温度へ到達したと同時にエンジンスタートの回転を開始し、回転数が600rpmを超えた瞬間にヒータ電源をOFFする始動プログラムとした。1~4番気筒の図示平均有効圧(IMEP)を図6に示す。予熱温度200℃では初爆から約40サイクルまで、燃焼変動が大きく不安定であった。すべての気筒でIMEPがゼロとなる瞬間があるため、失火が頻繁に起きていることが確認された。一方、予熱温度400℃では初爆から時間に対する変動が少なく、各気筒にバラつきが少ないため安定して燃焼していることがわかる。

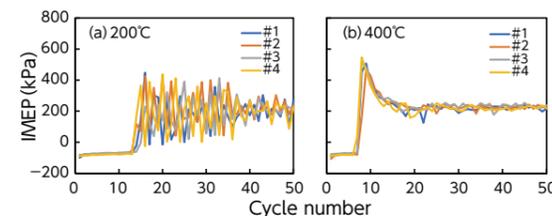


図6 ヒータ予熱温度がIMEPへ与える影響
Fig.6 Effect of pre-heating temperature on IMEP

4.3 改質器の空燃比の影響

空燃比と燃焼安定性の関係を調査した結果を図7に示す。空燃比の調整にあたり、NH₃量は固定して空気量のみ変更した。空燃比0.42の場合、全気筒においてIMEPがゼロ付近になるサイクルが多かったため、失火が多発していたと考えられる。空燃比を上げるに従い燃焼変動が小さくなり、空燃

比0.89の場合では、IMEP変動は小さくエンジン燃焼は安定していた。

以上の結果から、空気割合が多いほど改質器内での燃焼が促進し温度上昇するため、改質反応が促進されH₂生成量が増えたと考えられる。

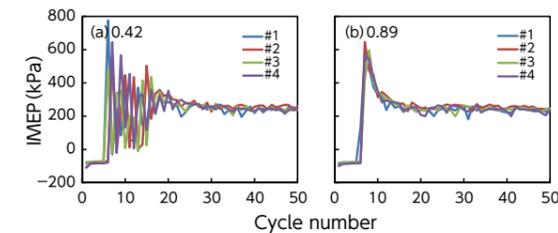


図7 改質器の空燃比がIMEPへ与える影響
Fig.7 Effect of air-fuel ratio for the reformer on IMEP

4.4 始動成立要件

始動パラメータである改質器の燃料流量も同様に影響を調査し、表1のとおり冷間始動の成立要件を導き出した。次に実験系をMFCからスロットルへ戻し、成立要件となるように改質器側スロットルの適合ならびにシステム全体のパラメータも微調整した。その結果、予備試験同等の始動性が得られることを確認した。

表1 冷間始動の成立要件
Table1 Requirements for cold-start of the engine

ヒータ予熱温度	400℃以上
改質器の空燃比	0.69以上
改質器の燃料流量	61 L/min以上

5 後処理触媒の適用条件探索

5.1 NH₃吸着容量

試験片サイズとしたSCR触媒に上流からNH₃を一定量で流入し、下流側のNH₃濃度を測定することで漏れ出てくるまでに吸着した量として見積もった(図8)。結果として体格2LのSCRを用いた場合3.3gのNH₃が吸着可能と判断した。また、最適化した条件により始動した場合の三元触媒からのNH₃排気濃度を測定した。その結果、すり抜けNH₃量としては約1gと見積もられ、吸着容量の1/3程度であることから、NH₃漏洩は起きにくいと判断した。

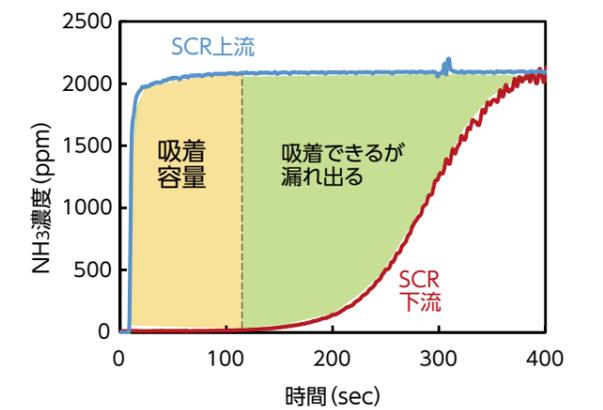


図8 SCR触媒のNH₃吸着可能量
Fig.8 NH₃ absorption capacity of SCR catalyst

5.2 NH₃排気とSCR触媒再生

上記予備実験の結果を元に、NH₃エンジンシステムの始動評価を実施した。空気過剰率λ=1.1のリーン燃焼となるように制御し、スタータONから3.1秒で1000rpmを超える噴き上がりを確認した。エンジン出口およびSCR触媒後におけるNH₃濃度を測定した結果が図9である。エンジン出口では噴き上がり直後から9000ppm程度と高い濃度だが、SCR触媒後では検出下限であった。その後6分間SCR触媒後からNH₃はほぼ排出されなかった。また、始動を繰り返してもNH₃が漏れてこないことから、SCR触媒再生ができていないことを確認した。

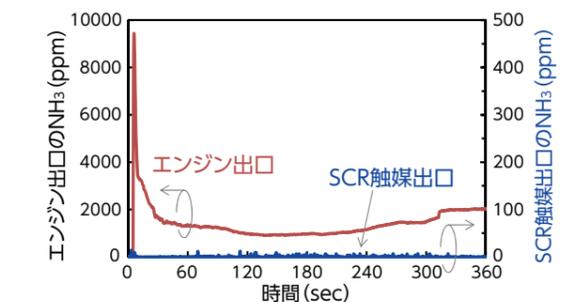


図9 始動時のNH₃排気
Fig.9 NH₃ emissions for cold start of the developed engine

6 まとめ

NH₃は燃やしてもCO₂を排出しない代替燃料候補の一つではあるが、難燃性燃料であることから、オンボード改質システムを追加することにより、改質H₂を用いて安定燃焼させるシステムを構築した。改質H₂を早期発生するためにヒータ予熱温度や改質器の空燃比といった始動条件を検討し、

最適化を図った。また、量産品の三元触媒とSCR触媒を流用し、NH₃の除害・吸着を時間差で利用することで繰り返しNH₃を漏らさずに始動が可能な後処理の適用条件を見出した。以上から、未燃NH₃排出を抑制可能なNH₃エンジン始動を実現できた。

謝辞

本成果は株式会社豊田中央研究所の協力により得られたものであり、本開発の一部は環境省「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の支援を受けて実施した。この場を借りて感謝申しあげる。

■著者紹介■



本間 隆行

竹内 正

針生 聡

竹内 秀隆

開発の経緯と開発者の思い

カーボンニュートラル実現に向けた取り組みとして、バッテリーによる電動化や燃料電池利用が拡大しつつある。脱内燃機関の動きの中、なぜアンモニアを燃料として使うのか、と感じる方も多いと思われるが、最近では特に発電・船舶分野にてアンモニア燃料化の流れが加速しており、既存内燃機関を活用したCO₂削減に向けた新たな手段の一つとして新技術開発に取り組んでいる。

ゼロからエンジン評価ベンチを立上げ、評価できるようになるまでにも相当の苦労があった。ここまで開発できたのは他社の協力も大きく、連携を密に進めてきた賜物だと思う。然るべきタイミングで世の中へ貢献できるように引き続き努力したい。