

ガソリン EGR システムにおける デポジット堆積メカニズム*

Mechanism of Deposit Accumulation on Gasoline EGR System

菊池 源基
Genki KIKUCHI

宮川 雅志
Masashi MIYAGAWA

稲吉 成彦
Naruhiko INAYOSHI

山本 吉章
Yoshiaki YAMAMOTO

Exhaust Gas Recirculation (EGR) system reduces exhaust emissions and improves fuel efficiency. The number of the EGR system installed vehicle has been increasing. Deposit in the EGR system is a major issue causing deteriorates of the product functions. In this study, influence of fuel compositions and their chemical structures on the deposit accumulation was investigated. It was clear that the accumulation speed of EGR deposit was affected carbon number and the chemical structure of the aromatic.

Key words :

Heat engine, Fuel, Emissions gas, EGR deposit, Deposition mechanism

1. まえがき

排ガス規制の厳格化や地球温暖化への対策のため、Exhaust Gas Recirculation (EGR) システム搭載車が増加している。排ガスによるデポジットは、システム内のあらゆる場所に付着し、製品機能を悪化させる。また、デポジット内に気化した潤滑油なども含んでおり、その成分や特性は複雑である。これまでディーゼル由来の EGR デポジットに関する研究は、多く報告されている¹⁾⁻⁴⁾。しかし、ガソリン由来のデポジットの研究報告の多くは、Injector (INJ) で生成するデポジット^{5) 6)}であり、EGR デポジットの研究報告はほとんどない。加えて、近年のガソリン燃料動向として、分解ガソリンが市場のガソリンに多く含まれていることが明らかになっている⁷⁾。分解ガソリンは、需要の少なくなった重油を分解し、ガソリン規格内の蒸留特性にし、ガソリンに混合するものであり、今後もさらに

増え続けると予想される。また、それに伴いオクタン価向上の目的で、改質ガソリンも増加の傾向にあり⁷⁾、ガソリン EGR デポジットの性状は、今後さらに悪化する傾向にある。

三ツ井ら⁶⁾は、ガソリン直噴 INJ のデポジットに寄与する燃料成分として芳香族に着目し、燃料中の芳香族成分増加と共に INJ 噴射量が低下することを明らかにした。このことから、ガソリン EGR デポジットでも同様に芳香族が起因因子であると推定される。よって本論文では、EGR デポジットにおよぼす燃料中の芳香族成分の影響について、調査した結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 供試燃料

市場ガソリンとして、JIS 規格で規定された日本認証試験用燃料⁸⁾を基準として Test fuel 1 とした。市

* (公社)自動車技術会の了解を得て「2015年秋季大会学術講演会講演予稿集」より一部加筆して転載

Table 1 Properties of test fuels

Property		Test fuel 1	Test fuel 2	Test fuel 3	Test fuel 4
RON	-	90.8	93.5	93.6	94.2
Total Aromatics	Vol.%	24.7	47.6	48.0	30.0
Aromatic C6-C9	Vol.%	19.1	26.5	26.7	20.2
Aromatic C10	Vol.%	3.9	9.9	1.3	5.0
Aromatic C10+	Vol.%	1.7	1.2	10.0	4.9
10% Distillation Temp.	℃	54.5	59.0	61.0	58.5
50% Distillation Temp.	℃	94.0	99.0	101.0	104.5
70% Distillation Temp.	℃	120.0	127.0	131.0	130.0
90% Distillation Temp.	℃	166.0	176.5	214.0	183.5

場ガソリンの燃料分布を参考に、芳香族を 20～50% の範囲で、Test fuel 2 は芳香族の炭素数 C10 を、Test fuel 3 には、炭素数 C10 以上を 10vol.% 混合させた。また、芳香族総量および芳香族の炭素数を変化させた Test fuel 4 を設定した (Table 1)。ここで、本試験燃料をエンジン試験で使用するため、オクタン価は可能な限り同一に揃えた。

2.2 テストエンジン

V6 3.5L エンジンでのデポジットをサンプリング対象とした。また、EGR システムは High Pressure Loop-EGR である。EGR システムの概略を Fig. 1 に示す。

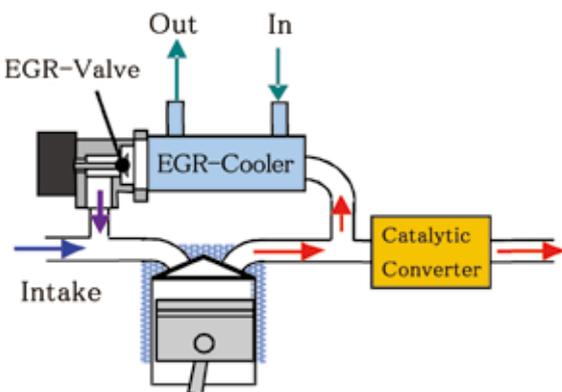


Fig. 1 Schematic of EGR system

2.3 EGR デポジットサンプリング方法

Fig. 2 にデポジットのサンプリング略図を示す。EGR クーラと EGR バルブの間にデポジットをサンプリングする長方形 (6×29mm, 材料:SUS444) のテストピース (TP) を挟めるフランジを設置し、試験時間ごとに TP を取り出し、デポジットのサンプリングを行った。

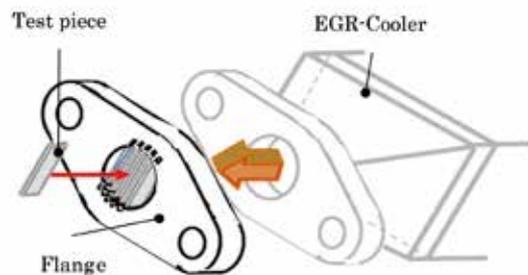


Fig. 2 Schematic of deposit sampling

2.4 デポジットの分析手法

TP に付着したデポジットの膜厚を測定するため、レーザー顕微鏡 (キーエンス VK-X100) を用いた。測定方法としては、付着したデポジットの任意の 6 ラインを選択し、基材とデポジットの距離を膜厚とした。また、採取したデポジットはクロロホルムにて抽出を行い、顕微 FT-IR (JASCO FT-IR 660 plus) にて定性分析を、GC-FID (島津製作所 GC-2010) にて劣化度の比較を行った。

2.5 オートクレーブ試験によるデポジット検証実験

今回の評価に用いたオートクレーブ試験機を Fig. 3 に示す。本試験機は、温度・圧力・ガス雰囲気を制御できる試験機である。試験温度は 100℃、試験時間は 8h、圧力は 0.9MPa、ガス雰囲気は NO_x:3000ppm (N₂ バランス) で試験を行い、評価燃料のデポジット生成量および劣化の度合を評価した。

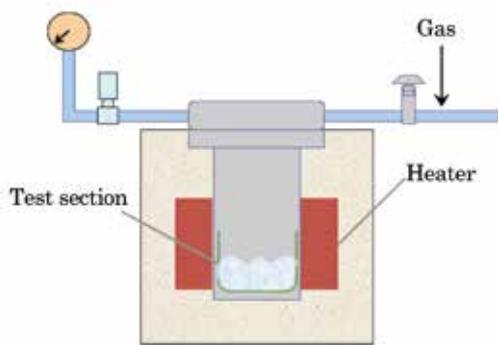


Fig. 3 Schematic of autoclave unit

3. 実験結果および考察

3.1 EGR デポジット精査

Test fuel1 を用いエンジン試験を行ったところ、設置した TP にデポジットの堆積が確認できた。付着した TP の膜厚を測定するため、レーザー顕微鏡にて膜厚を測定した結果、試験時間が増加するにつれて、デポジットの堆積量が増加していることが確認できた (Fig. 4)。

上記のデポジットを回収し、顕微 FT-IR にて分析を行った結果、カルボニル化合物 (1700cm^{-1}) に加え、芳香族成分 (1600cm^{-1}) のピークが確認できた (Fig. 5)。また、試験時間 30h と 120h で比較すると構成成分は同等であるが、芳香族のピーク強度が 120h では強いことが分かった。

今回の結果より、芳香族がガソリン EGR デポジットの起因子であると推定される。

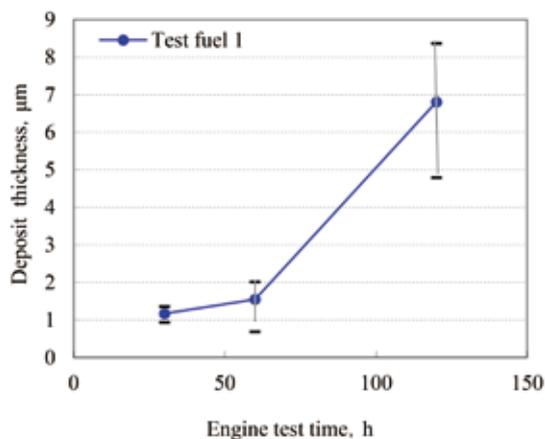


Fig. 4 Relationship between deposit thickness and engine test time

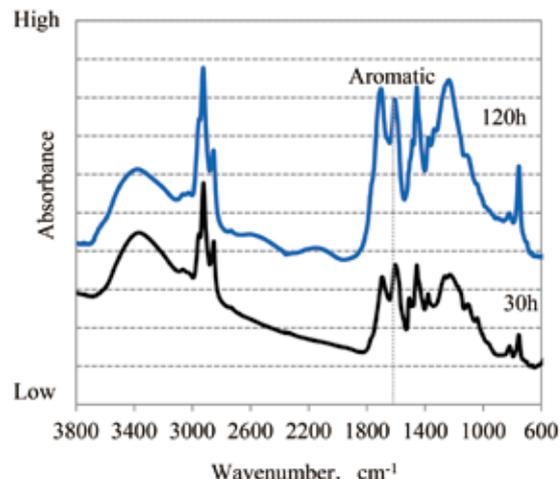


Fig. 5 FT-IR spectra of deposit for each engine test time

3.2 デポジット起因子の検討

ガソリン燃料中に含まれる基油を分類すると大きく分けて、芳香族 (アロマ)、オレフィン、パラフィン、ナフテンの4つの成分からなる。

燃料中含有成分の構造から類推して、芳香族は極性が高く他の燃料成分と比較し、SUS444 への吸着性が高いと推定される。

吸着性は表面自由エネルギーの差で示すことができる⁹⁾。燃料基油については、溶解度パラメータより表面自由エネルギーを算出し、相手材は既に表面自由エネルギーが明らかになっている3種類の液体を SUS444 に滴下し、接触角を測定、拡張フォークスの式より表面自由エネルギーを算出した。燃料基油の表面自由エネルギーおよび基材の表面自由エネルギー差が小さければ小さいほど吸着力は強くなることが知られている。

吸着性を評価した結果、燃料基材に含まれる成分の中で最も SUS444 に吸着するのは、芳香族であることが分かった (Fig. 6)。これは、芳香族が持つ極性の影響が寄与しており、芳香族が材料へ最初に吸着すると考えられる。よって、芳香族のより詳しい検討が必要である。

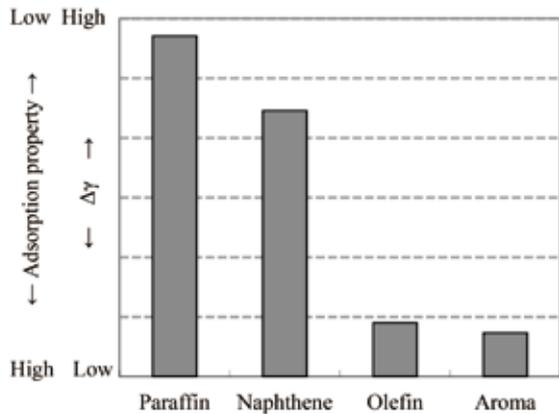


Fig. 6 Adsorption property of each fuel components

3.3 芳香族によるデポジット堆積性の検討

市場ガソリン分布よりガソリン中に含有する芳香族は全体の20～50 vol.%であり、炭素数はC6～C11程度のものが含まれる。また、炭素数は同じでも構造異性体が多く存在する。

よって、下記2つの項目についてEGRデポジットの堆積性におよぼす影響を調査した。

- ① 芳香族の炭素数による影響
- ② 芳香族の化学構造による影響

3.3.1 芳香族の炭素数による影響

芳香族の炭素数によるデポジット堆積性の影響を評価するため、炭素数を調整したTest fuel 1, fuel 2, fuel 3を用い、オートクレーブ試験にて、残渣量を調査した。炭素数を調整するにあたり、炭素数C10およびC11の芳香族を含有させると、燃料性状である70%蒸留温度(T70)付近で温度が上昇し始め、90%蒸留温度(T90)にて10℃以上の差が生じる(Table 1)。これは、炭素数の大きい成分は、沸点が高いためである。そこでT90に対するデポジット堆積量を評価した。

試験の結果、T90が高いほど、オートクレーブ試験で生成したデポジットの生成量が多いことが分かった(Fig. 7)。これより、炭素数が大きい成分が燃料中に含まれるほど、デポジット堆積量が増加する傾向が分かった。

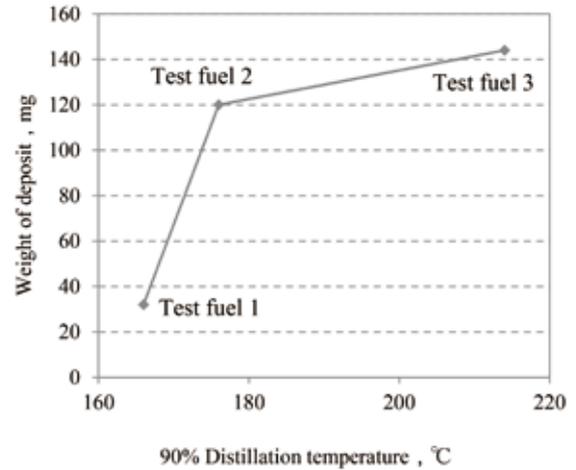


Fig. 7 Relationship between amount of deposit and 90% distillation temperature

3.3.2 芳香族の化学構造による影響

芳香族の化学構造により、熱や排気ガス成分などによる劣化の受け方が異なると推定される。劣化生成物であるデポジットの堆積性の検討の一つとして、構造異性体による劣化の影響を調査した。

評価するにあたり、結合乖離エネルギーの異なる代表的な5つの化学構造を選択した¹⁰⁾(Table 2)。Test fuel1に分類した試薬を5.0vol.%混合させ、同様なオートクレーブ試験機を用い加熱劣化を行った。劣化度の測定にはGC-FIDを用いた。

Table 2 Bonding dissociation energy for each chemical structure of aromatic

Sample	Bonding dissociation energy	Structure
A	348 kJ/mol ⁻¹	
B	357 kJ/mol ⁻¹	
C	357 kJ/mol ⁻¹	
D	375 kJ/mol ⁻¹	
E	468 kJ/mol ⁻¹	

試験の結果、結合乖離エネルギーと劣化度には相関があり、結合乖離エネルギーが低いほど、劣化が進行する結果となった(Fig. 8)。

よって、芳香族の化学構造によって、デポジットの堆積性が異なることが推定され、エンジン試験にて堆積性の確認を行った。

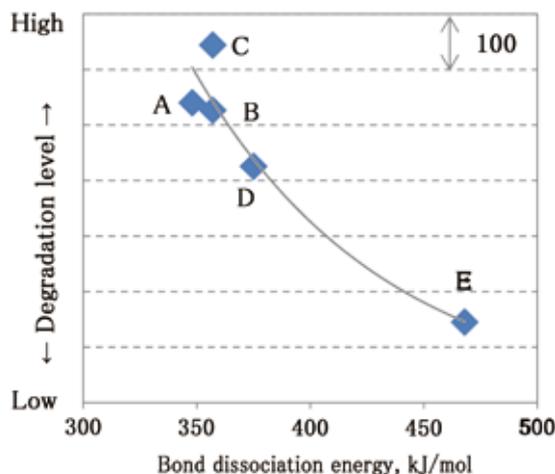


Fig. 8 Relationship between degradation level and bonding dissociation energy

3.4 エンジン試験によるデポジット堆積性確認

芳香族による堆積性の検討結果より、市場ガソリン燃料分布を参考にして、炭素数および化学構造を加味した Test fuel 4 を製作、エンジン試験にて、デポジットの堆積性の確認を行った。

Fig. 9 にエンジン試験の結果を示す。Test fuel 4 は Test fuel 1 と比較し、30 時間において約 4 倍の堆積性があり、120 時間後では、約 5 倍の EGR デポジット堆積を確認できた。これよりデポジットの堆積性には、芳香族の炭素数および化学構造が寄与することが明らかとなった。

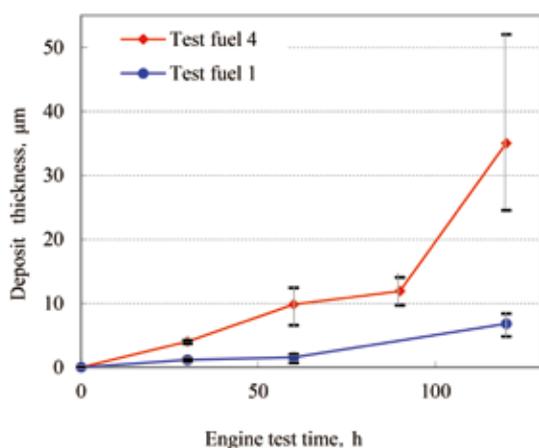


Fig. 9 Relationship between deposit thickness and engine test time for each test fuel

4. まとめ

Test fuel 1 を使用したエンジン試験で生成したデポジットの成分分析により、ガソリン燃料中の芳香族成分に着目し、実験的手法で芳香族によるデポジット堆積性への影響を調査することで、下記の結論を得た。

1. 芳香族がガソリン EGR デポジットの起因子である。
2. ガソリン EGR デポジット堆積性には芳香族の炭素数が寄与する。
3. 芳香族の結合乖離エネルギーが低い化学構造ほど、ガソリン EGR デポジットが堆積しやすい。

参考文献

- 1) C. Scott Sluder : Hydrocarbon and Particulate Matter in EGR Cooler Deposits: Effects of Gas Rate, Coolant Temperature, and Oxidation Catalyst, SAE International J. Engines, Vol. 1, Issue 1, p.1196-1204 (2008)
- 2) Ho Teng : Physicochemical Characteristics of Soot Deposits in EGR Coolers, SAE International (2010), 2010-01-0730
- 3) 古川尚稔 : ディーゼル機関における EGR システムのデポジットの特性について, JSAE Symposium, p.87-95 (2013)
- 4) 松野真由子 : ディーゼルエンジンにおける EGR デポジットの詳細解 (第 1 報), 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, p.2166-2171 (2015)
- 5) Tsuyoshi Ashida : Effects of Fuel Properties on SIDI Fuel Injector Deposit, SAE Technical Paper (2001), 2001-01-3694
- 6) 三ツ井祐太 : ガソリン直噴エンジンのインジェクタデポジットに対する燃料性状の影響, 自動車技術論文集, Vol.41, No.4, p.823-826 (2010)
- 7) 平井晴乙 : アジアを中心とした世界石油製品需給分析, IEEJ (2008)
- 8) 日本工業規格, JIS B 8008-5 (2009)
- 9) 分根聖司 : スプライン用高潤滑グリースの開発, 信頼性・保全性シンポジウム発表報文集, Vol.40, p.241-246 (2010)
- 10) David R. Lide : HANDBOOK OF CHEMISTRY and PHYSICS, CRC Press, p.9-63-9-76 (2005)

著者



菊池 源基

きくち げんき

材料技術部
燃料対応，トライボロジーに関する
基盤技術開発に従事



宮川 雅志

みやがわ まさし

クーリング開発部
パワトレイン冷却の熱交換器開発に従事



稲吉 成彦

いなよし なるひこ

材料技術部
材料強度，トライボロジー，電気材料に
関する基盤技術開発に従事



山本 吉章

やまもと よしあき

パワトレインコンポ事業部
パワトレインコンポ事業部の技術戦略及び
企画に従事