

エタノール含有燃料に対するサクションフィルタの 早期目詰りのメカニズム研究と長寿命フィルタの開発

Analysis of Mechanism of Early Clogging of Suction Filter with Use of Ethanol Blended Fuel and
Development of Long-life Filter

荒井 進 吾*

Shingo ARAI

安 藤 秀 昭*

Hideaki ANDO

伊 藤 淳*

Atsushi ITO

木 下 敬 太*

Keita KINOSHITA

石 井 翼*

Tsubasa ISHII

梅 林 不二夫*

Fujio UMEBAYASHI

要 旨

エタノール含有燃料に対応した長寿命サクションフィルタを開発した。小型二輪車の燃料供給系システムにおいて、サクションフィルタは燃料ポンプやインジェクタ、調圧レギュレータ等の部品を燃料中のダストから保護する機能を担っている。従来のサクションフィルタは、ガソリンと比較して、エタノール 25% 含有ガソリンではフィルタ寿命が 50% 低下することが分かっている。本研究では燃料中のエタノール濃度とダスト分散状態が相関関係を持つことに加え、エタノール含有燃料中で分散状態となったダストが多層構造のサクションフィルタを通過する過程で再凝集し、最も目の細かい最下層に集中捕捉される早期目詰りのメカニズムを明らかにした。新しく開発した長寿命フィルタはろ過層で生じる流れ場がダスト凝集の原因であることを応用し、上層に流れ場を起こし凝集を促進させる凝集促進層を追加した。これにより、多層フィルタの目の粗い上層部でのダスト捕捉を可能とし、目の細かい最下層への集中捕捉を防ぎ、従来フィルタに対し、寿命を 2 倍に延ばすことを達成した。

ABSTRACT

The authors have developed a long-life suction filter to cope with fuels containing ethanol. In the fuel system of small motorcycles, the suction filter protects parts such as the fuel pump, injector, pressure regulator, etc. from dusts in the fuel. It is known that in conventional suction filters, when compared with neat gasoline, the filter life is shorter by 50% if it is used with a fuel containing 25% ethanol. In addition to the study on the correlation between the ethanol concentration and the dust dispersion in the fuel, our study has clarified how the early clogging occurs, i.e., the dusts dispersed in the ethanol-containing fuel coagulate again when passing through the multi-layered suction filter, and trapped predominantly by the lower-most layer having the finest mesh-size. Considering that the cause of dust coagulation is the flow field that occurs in the filter layer, the coagulation acceleration layer that accelerates coagulation by creating flow fields, placed in the upper layer, has been added in the newly developed long life filter. The new filter permits trapping of dusts in the coarse upper layer of the multi-layered filter, preventing concentration of trapping in the fine, lower-most layer, thus doubling the filter life when compared to the conventional filter.

1. まえがき

今日、地球環境問題、原油価格の高騰、化石燃料依存脱却等を背景として自動車用のガソリンにエタノールを混合させた燃料の販売が、世界的に拡大しており、今後もエタノール含有ガソリンを主流とする地域が増加する可能性が高まっている。こうした状況の中、小型二輪車の燃料供給系システムにおいて、燃料ポンプの吸引側に設けられた

サクションフィルタがエタノール含有燃料によって早期に目詰りしてしまう事象が生じていた。サクションフィルタの目詰りは走行性能の低下に直結する。したがって、エタノール含有燃料使用に対しては予想される短めのフィルタ寿命を基準としてサービス店での定期交換が設定されていた。しかし、顧客の負担軽減の観点から、エタノール含有燃料に対応した長寿命フィルタが求められていた。

そこで本研究では、エタノール含有燃料による早期目詰

*二輪 R&D センター

まりのメカニズム解明をおこない、それを元にエタノール含有燃料においても従来のガソリンと同等以上の寿命を持つ、長寿命サクションフィルタを開発することを目的とした。

2. 小型二輪車燃料供給系システムの概要

本章では小型二輪車の燃料供給系システムについて説明する。小型二輪車におけるサクションフィルタは、Fig. 1のように、燃料ポンプやインジェクタ、調圧レギュレータ等の部品を、燃料中のダストによるダメージから保護するために設置している。小型二輪車では、Fig. 2のように、メインフィルタをコスト削減と小型化の観点から廃止し、吸引側のサクションフィルタのみを設置する構造が主流である。ただし、メインフィルタを持たない構造においてはサクションフィルタの早期目詰まりが懸念となる。

小型二輪の場合、サクションフィルタの目詰りが生じると、フィルタと燃料ポンプ間の圧力損失が大きくなり、走行性能に支障をきたす可能性がある。このため、サクションフィルタにはより多くのダストを捕捉しつつも、早期に目詰まりしない特性が要求される。Fig. 3に示す通り、サクションフィルタは目の大きさが異なる不織布を重ね合わせることで、さまざまな粒径のダストを大きさごとに

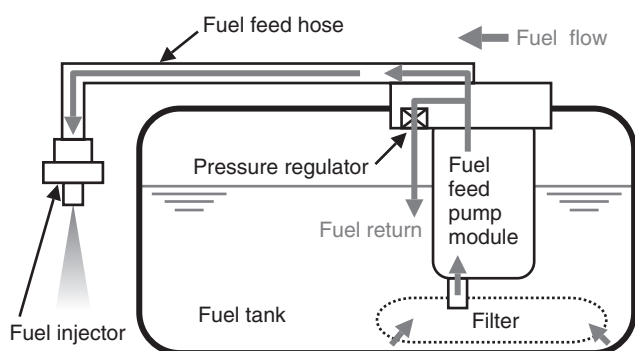


Fig. 1 Structure of fuel supply system on small motorcycles

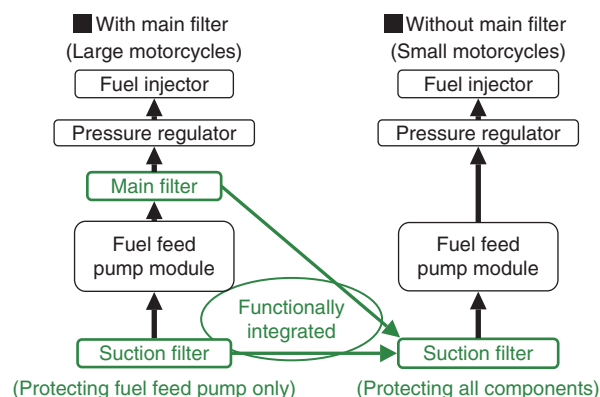


Fig. 2 Schematic diagram of fuel supply system for small motorcycles

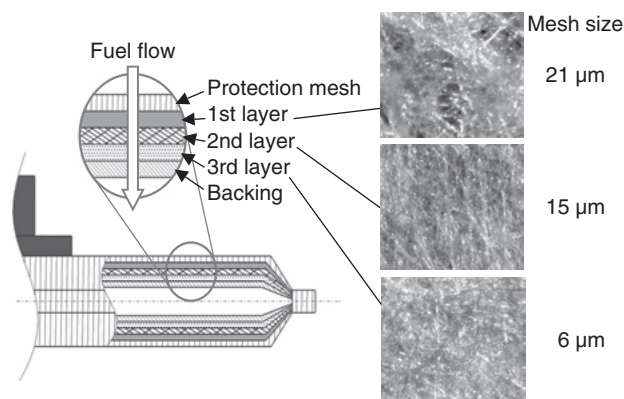


Fig. 3 Typical structure of multi-layered nonwoven fabric filter

各層で立体的に捕捉する構造になっている。なお、以後本稿におけるフィルタという表現は、この多層構造の燃料サクションフィルタを指す。

3. エタノール含有燃料によるサクションフィルタの早期目詰まり事象と課題

Fig. 4に示すようにガソリン使用下では問題が発生しなかったフィルタが、エタノール 25% 含有ガソリン (以下、E25 と表記する) においては早期に目詰まりし、フィルタ交換距離間隔が半減する事象が確認された。早期目詰りを起こしたフィルタを観察すると Fig. 5 のようになっており、不織布の目が一番細かい (6 μm) 層にダストが集中的に捕捉されていることが分かった。ここで我々は、エタノール含有率により、燃料中におけるダストの分散状態に違いがある点に着目した。Fig. 6 には E25 とガソリン中にダストを投入した時の状態を示した。これからわかるように、ガソリン中では、ダストが大きな粒状態で沈殿するのにに対し、エタノール燃料中では、ダストは塊にならず、細分化される傾向にあることが確認できる。

以上を踏まえ、エタノール含有燃料中ではダストは分散されやすい特性を持ち、燃料フィルタの一つの層へ集中捕

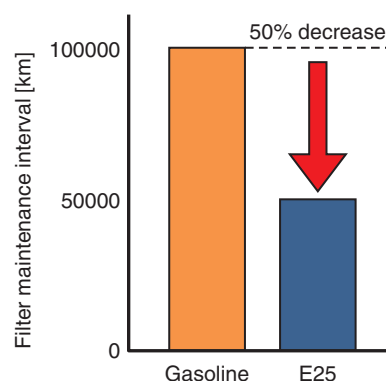


Fig. 4 Filter maintenance interval

捉されることで、早期目詰まりが発生するものと推定し、次に挙げる3点を着眼点とした。

- (1) 燃料中のエタノール濃度とダスト分散の関係の把握。
- (2) 燃料中ダストの分散状態がフィルタ目詰まりに与える影響とそのメカニズム解明。
- (3) エタノール燃料に対応できる長寿命燃料フィルタの考案。

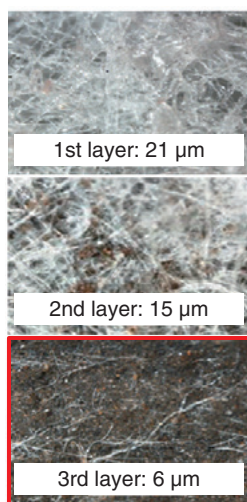


Fig. 5 States of filters in E25

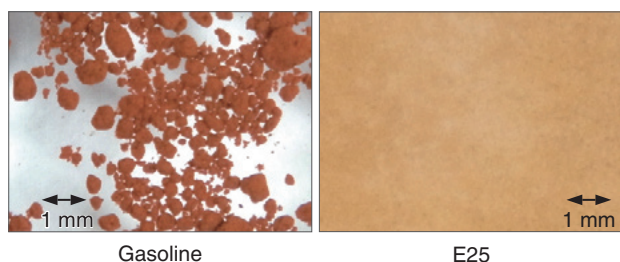


Fig. 6 Comparison of state of dispersion of dust particles in fuel

4. 燃料中のエタノール濃度とダスト分散の関係の把握

燃料中ダストの分散と凝集の状態を評価し、メカニズムの解明をおこなうには、分散、凝集状態の数値化が必要とされる。本章では、燃料中ダストの性状と分散評価方法、分散メカニズムについて紹介する。

4.1. 燃料中のダストについて

自動車用燃料中には微細ダストが多く含まれている。そのダスト数は地域によって差異はあるものの、1 ml 中に 1 μm 以上の粒子が 40000 から 300000 個含まれている。Fig. 7 に燃料中ダストの累積粒度分布（個数基準、各国平均値）を示す。燃料中のダストの 99% は、フィルタの最小目粗さよりも細かい 5 μm 以下である。10 μm 以下の微

小ダストはコロイド分散系と呼ばれる粒子系に分類され、液中では重力や浮力の影響を受けにくく液相に漂う性質を持つ。また、燃料中のダストの 50% から 80% は SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 の 3 成分から成る。これは一般的な土壌の成分であり、風などで舞い上がって流通や給油の過程で燃料内に入り込むと考えられる。

4.2. 燃料中ダストの分散状態

燃料中に含まれるダストの分散状態は、レーザ回折散乱法による粒度分析測定装置で計測できる。同一の試験粉体 JIS8 種を同じ濃度で燃料に混合し、エタノール含有率ごとに計測した結果を Fig. 8 に示す。この計測結果に示す中位径とはダスト分散状態を定義する値であり、ここでは個数基準による計測法を採用している。中位径 D50% が 0.6 μm であれば溶液中のダスト粒子の 50% は 0.6 μm 以下の径であると定義され、数値が小さいほど分散状態にあると言える。この測定結果により、ガソリン中のエタノール濃度が上がるにつれてダストの中位径は小さくなり、エタノール 100% 中ではガソリンに比べて約 1/4 の中位径になることがわかる。すなわち、燃料中のダストはエタノール濃度が上がるほど分散すると言える。

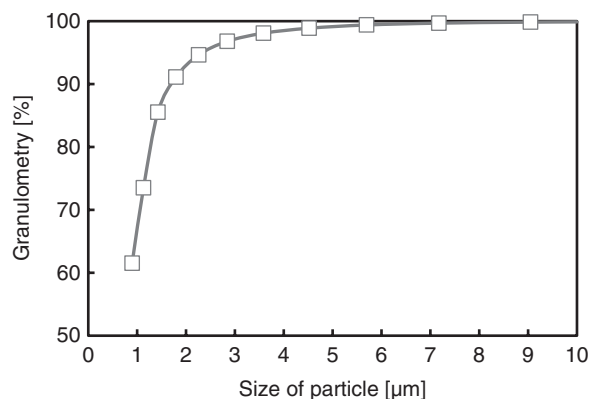


Fig. 7 Cumulative particle size distribution of average dust particles in fuel in major countries (Particle count basis)

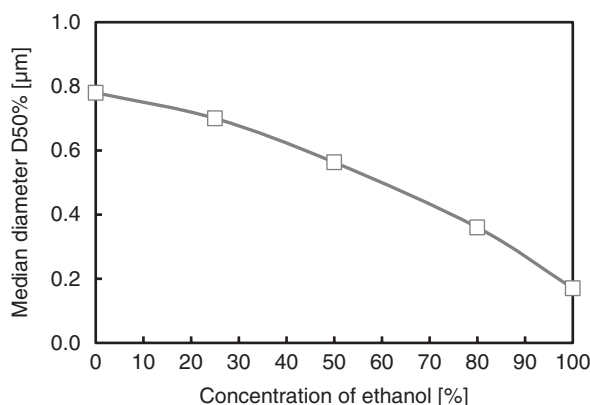


Fig. 8 Ethanol concentration in gasoline and median diameter of dust particles contained in fuel

5. 燃料中ダストの分散状態がフィルタ目詰りに与える影響とそのメカニズム解明

ダストの分散状態がフィルタ寿命に及ぼす影響を、実機を用いて確認するには、10 万 km 相当の走行テストが必要となるため、フィルタ寿命の試験はフィルタ単体にて実施することが实际的である。ここではフィルタ寿命の評価手法と得られた結果について紹介する。

5.1. 単体試験装置の紹介

今回、用いたフィルタ寿命単体試験装置の概略図を Fig. 9 に示す。図のように試験燃料中にサクションフィルタを浸し、燃料ポンプを駆動させる。そして一定間隔で JIS8 種ダストを試験粉体として投入する。サクションフィルタにダストが詰まっていくとフィルタと燃料ポンプ間の吸入圧力（フィルタ圧力損失）が上昇する。この圧力損失が 30 kPa を越えた時点でのダスト投入量からフィルタ寿命を評価した。以下フィルタ圧力損失を圧損と表記する。

5.2. フィルタ寿命とエタノール濃度との相関

Fig. 9 の試験装置を用いて測定したエタノール濃度別でのフィルタ寿命と、中位径 D50% の結果を合わせると Fig. 10 のようになり燃料中のダストが分散状態であるほど、フィルタ寿命は短くなることが分かった。

また、早期目詰りが発生した E25 で単体テストしたサクションフィルタを分解し、各層のダスト捕捉状態を確認した結果、Fig. 11 のように実機でのフィルタ目詰まり発生時と同様に、ダストが一番目の細かい 6 μm の層に集中補足されていることが分かった。

5 章で述べたようにダストの 99% 以上はフィルタの最小目粗さよりも細かい 5 μm 以下の粒子で構成されている。それにもかかわらず、なぜろ過層を通過可能であるはずの 6 μm の層にダストが集中して捕捉されるのかという疑問

に着目した。

フィルタの目よりも小さいダストが捕捉されるメカニズムを解明すべく、最も目の細かい単層 (6 μm) のみのフィルタと量産仕様である 3 層の多層構造フィルタを用意し、E25 にてフィルタ寿命テストを実施した。それぞれのフィルタで投入ダスト量に対するフィルタの圧力損失の関係を Fig. 12 に示す。その結果、単層フィルタよりも多層構造フィルタのほうが、フィルタ寿命が短かった。単層フィ

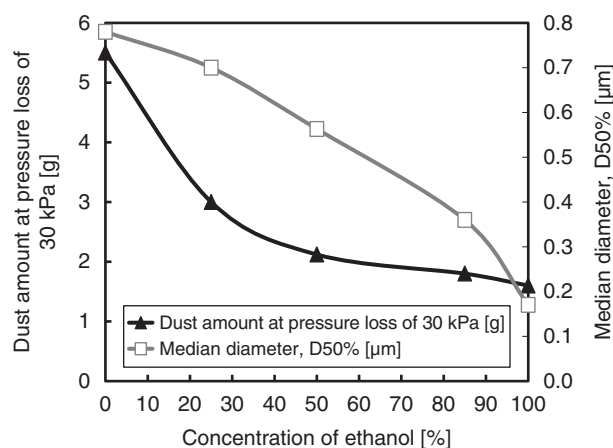


Fig. 10 Relationship between amount of dust particles and median diameter, D50%

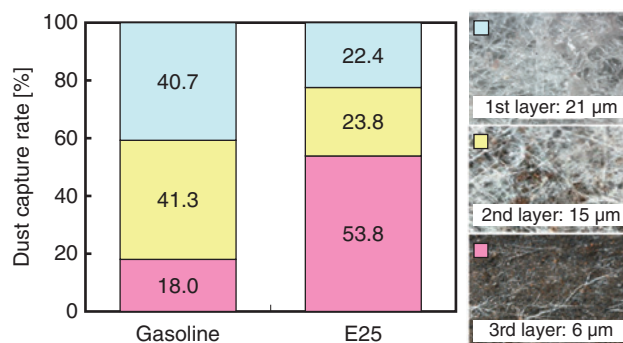


Fig. 11 Comparison of capture efficiency of filter in gasoline and E25

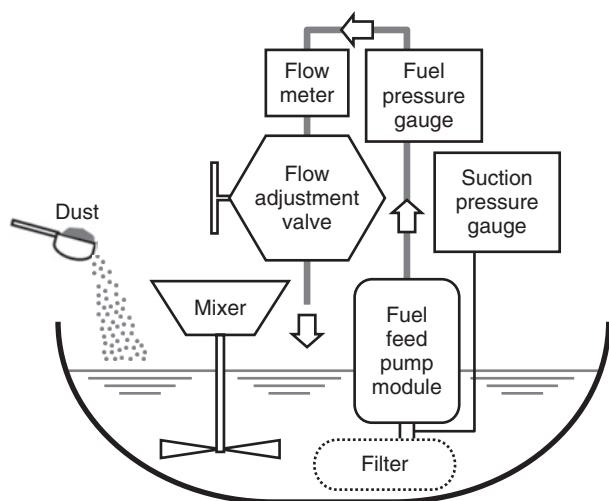


Fig. 9 Schematic view of filter test

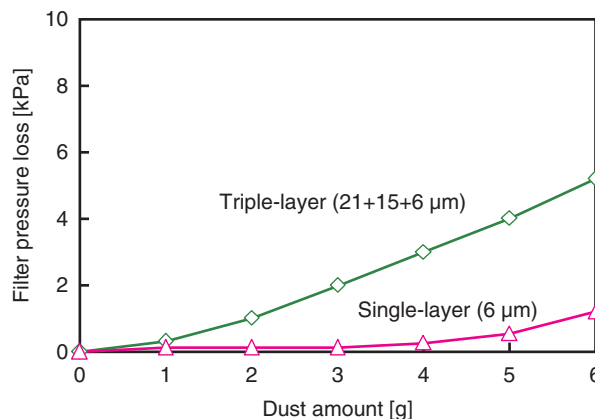


Fig. 12 Pressure loss for different filter structures

ルタの圧損がダスト 6 g 投入しても圧損 1.0 (kPa) 程度しか上がらないのは、燃料中に 90% 以上ある 5 μm 以下のダストがろ過層をすり抜けてしまうためであると考えられる。一方、多層構造では本来すり抜けるはずのダストが捕捉されていた。これはダストが多層構造のろ過層を通過する際に凝集し、目の細かい最下層で集中的に捕捉される事象であると推定した。そこでコロイド分散系である燃料中ダストに作用する力学に着目した。

5.3. 液中コロイド粒子に作用する力

コロイド化学ではコロイド粒子の分散・凝集は粒子間の斥力と引力のバランスで考えるのが一般的である。コロイド粒子を分散させる代表的な力は静電的反発力による斥力である。静電的反発力でコロイド粒子が反発する様子を Fig. 13 に示す。液中のコロイド粒子は表面に帯電することで対イオンが付着し、同符号のイオン層を形成した粒子間に静電的反発力が作用する。

コロイドを凝集させる力としては van der Waals (ファンデルワールス) 力が作用する。van der Waals 力によってコロイド粒子が凝集する様子を Fig. 14 に示す。原子間や分子間と同様、分子の集合体であるコロイド粒子にも van der Waals 力が引力として働き、その大きさは粒子間距離の六乗に反比例する。

静電的反発力 (斥力) を V_R 、van der Waals 力 (引力) を V_A とし、これら二つの合力をトータルポテンシャル (V_{total}) と呼ぶこととする。コロイド粒子の分散と凝集はこのトータルポテンシャルによって決まる。これを DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 理論と呼ぶ⁽¹⁾。

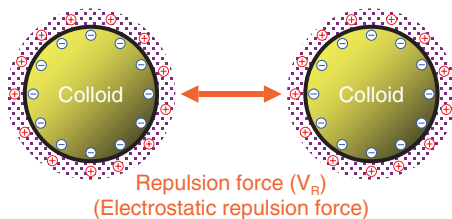


Fig. 13 Schematic representation of electrostatic repulsion force

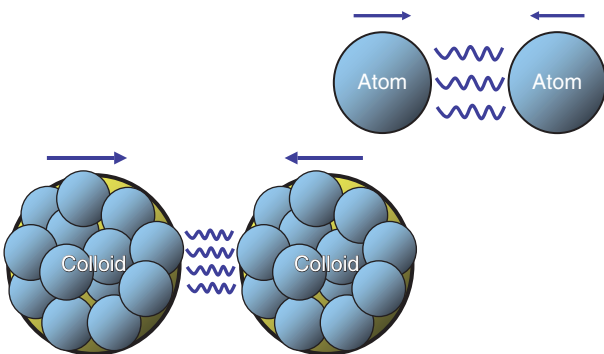


Fig. 14 Schematic representation of van der Waals force

Fig. 15 に粒子間に作用する斥力、引力、 V_{total} と粒子間距離との関係を示す。粒子間距離が縮まると、静電的反発力の影響が大きくなり反発しあう。しかし、van der Waals 力は粒子間距離の六乗に反比例する性質を持つため、粒子距離がさらに縮まりおよそ 5 nm 以下になると、 V_{total} は引力側に転化するとされる⁽¹⁾。このことから、粒子の接触・衝突が生じ、粒子間の距離が十分に縮まると、 V_{total} が引力となり、粒子の凝集につながる⁽⁴⁾。

5.4. 溶液の極性とコロイド粒子の分散と凝集

静電的反発力は溶液中のイオン濃度に大きく影響を受ける。イオンは水に溶け込む形で存在するため、溶液の極性によってコロイド粒子への作用に違いが生じることが粉体工学で分かっている。

ガソリンは非極性溶媒であり、液中の水分濃度が極めて低い疎水性の溶液である。水分の少ないガソリン中では Fig. 16 のようにコロイド粒子表面に付着するイオンも少なくなる⁽¹⁾。そのため、静電的反発力は弱くなり、van der Waals 力が支配的となり、コロイド粒子が凝集しやすくなる。

一方、エタノールは極性溶媒で、水とガソリンの両方に混ざり、エタノール分子は水分子を吸着した親水基を軸としてコロイド表面に立って吸着し、層を形成するとされて

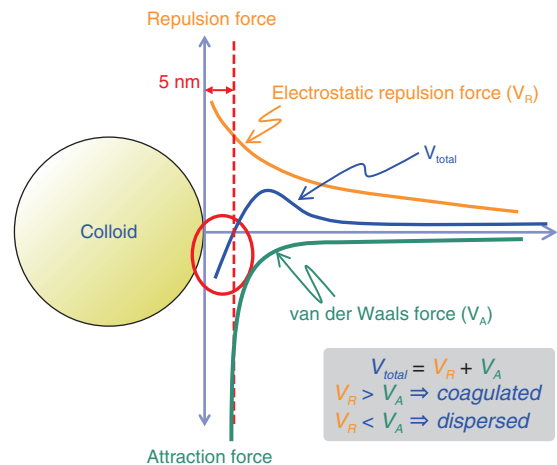


Fig. 15 Interactive action of repulsion and attraction forces and DLVO theory

Because few ions are present, the van der Waals force has a strong effect

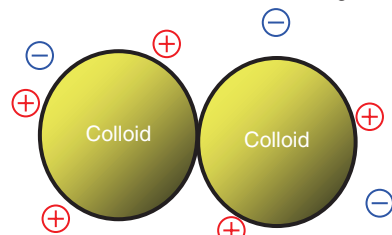


Fig. 16 Mechanism of coagulation in gasoline

いる⁽²⁾。その様子を Fig. 17 に示す。このエタノール分子による吸着層自体が斥力を生じる原因となりコロイド粒子同士の凝集を阻むため、分散しやすくなる⁽²⁾。それ故に、エタノール濃度が下がれば、コロイド表面に付着するエタノール分子による吸着層の影響が弱くなり、ダスト同士は凝集しやすくなる。

5.5. 多層構造フィルタの目詰り発生のメカニズム

DLVO 理論によると、分散していたダストを凝集させるには粒子同士の距離を近づかせる必要がある。液中でダストの距離を近づけさせるには、流速に速度勾配が発生する流れ場が必要である。流れ場の発生は円筒のような単純な形状の中の流れにおいても確認できる。円筒内の流速は円筒壁面と中心で異なるために速度勾配のある不均一な流れ場となる。この流れ場によって速度の異なるダスト同士の距離が近づくことで液中コロイドの凝集作用が働く⁽⁴⁾。Fig. 18 にその様子を図示する。同様に、不織布で構成されるフィルタろ過層においても、Fig. 19 に示すように、不均一な流れ場がいたるところで発生する。このことから、ダストはフィルタ繊維を通り抜ける過程で衝突を繰り返し、

凝集が進むと推定される。

ガソリンおよび E25 燃料でのフィルタにダストが捕捉される様子を Fig. 20 にイメージ図として示す。ガソリンにおいては燃料中のダストはある程度凝集した状態にあり、目の粗い上層でも捕捉される。そのため、ダストの大きさごとに各層で立体的に捕捉できるため、特定の層にダストが集中することなく、多層構造を有効に使える。一方、E25 では分散状態のダストがフィルタを通過する過程でフィルタ内部の流れ場によって、凝集しながらろ過層を移動し、結果として最下層の最も目の細かい層に集中捕捉される。これがガソリンとエタノール含有燃料でフィルタ寿命に差が生じる原因である。

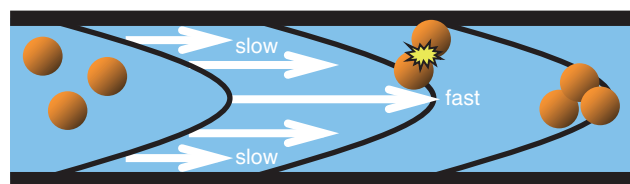


Fig. 18 Schematic representation of flow fields in cylinder

Amphipathic molecules form micelles surrounding core dust particles and are surface-active

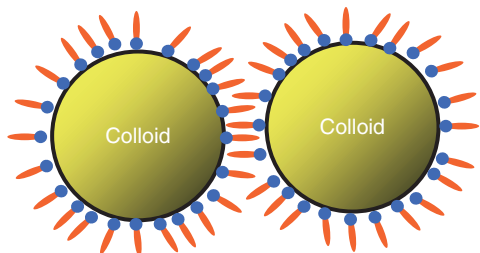


Fig. 17 Mechanism of dispersion in ethanol blended fuel

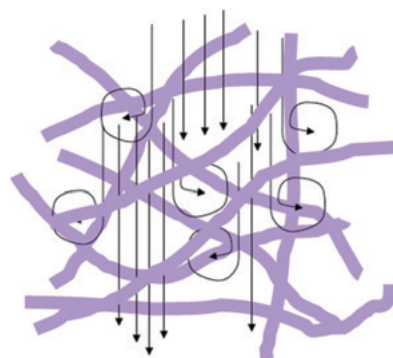


Fig. 19 Schematic representation of flow fields in suction filter

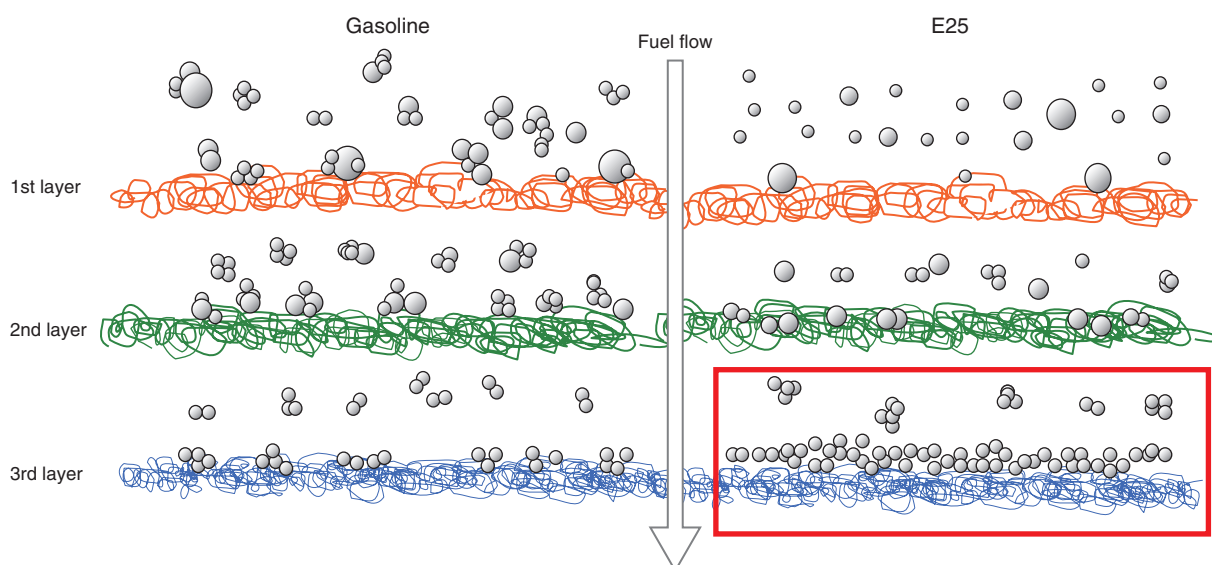


Fig. 20 Schematic representation of dust capture by the filter

以上より、エタノール含有燃料で早期に詰りが生じるプロセスは以下の3要素にまとめられる。

- (1) 燃料中でダストが分散状態にある。
- (2) ダストがフィルタを通過する過程で凝集する。
- (3) 目の細かい最下層に集中する。

6. エタノール燃料に対応できる長寿命化フィルタの考案

6.1. 凝集促進層の考案

フィルタ寿命の低下の原因は目の細かい最下層へのダスト集中であり、それより上層のフィルタを有効に活用できないことにある。そこでフィルタを通過する過程でダストが凝集するというメカニズムを積極的に応用するために、フィルタの上層に海綿状の層を追加した。この層はダストがろ過層に達する前に凝集をある程度促進させることがねらいである。その働きを示したイメージ図を Fig. 21 に示す。ここでは、この層を凝集促進層と呼ぶこととし、この層を追加することにより既存のフィルタ構成を大きく変更することなく、寿命向上することをねらった。

6.2. 凝集促進層の仕様決定

凝集促進層のねらいは流れ場を生み出すことで、分散状態にあるダストを衝突させ、凝集させることである。それ故に、凝集促進層自体はダストの捕捉を目的としない。凝集促進層のイメージ図を Fig. 22 に示す。促進層の孔は流れ場を生み出し、この孔径の違いは流れ場の強弱に、凝集促進層の厚さはダストの流れ場滞留時間に影響を与える。

寿命向上効果が最大となる仕様を選定するにあたり、厚さと孔径という二つのパラメータを考慮し、ダストが促進層を通過するまでに通り抜ける不織布の平均穴数はいくつになるかという観点から凝集効果を評価した。ここで促進層の厚さを平均孔径で割ったものを通過孔数として定義する。

この通過孔数を指標として凝集促進構造の最適仕様を検討した結果を Fig. 23 に示す。通過孔数と圧力損失 30 kPa に達するダスト量の関係から、通過孔数 30 前後が最も効果が大きいことが分かる。

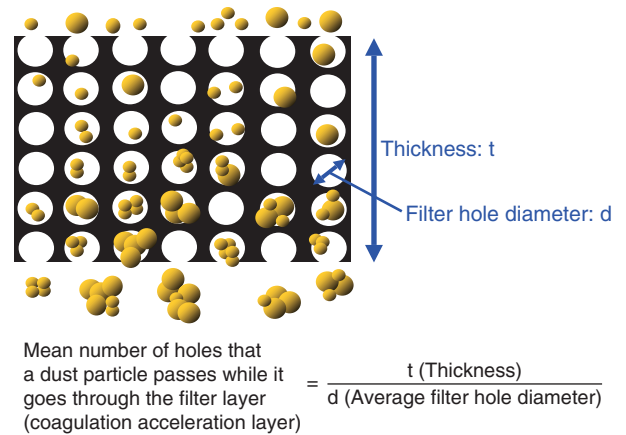


Fig. 22 Schematic representation of coagulation acceleration layer

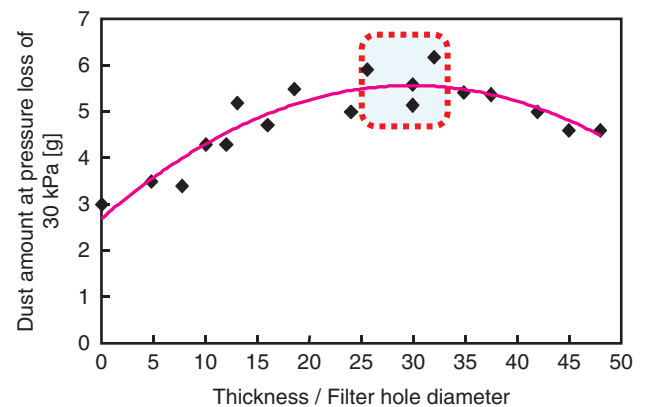


Fig. 23 Relationship between conditional parameters of coagulation acceleration layer and dust amount at predetermined pressure loss

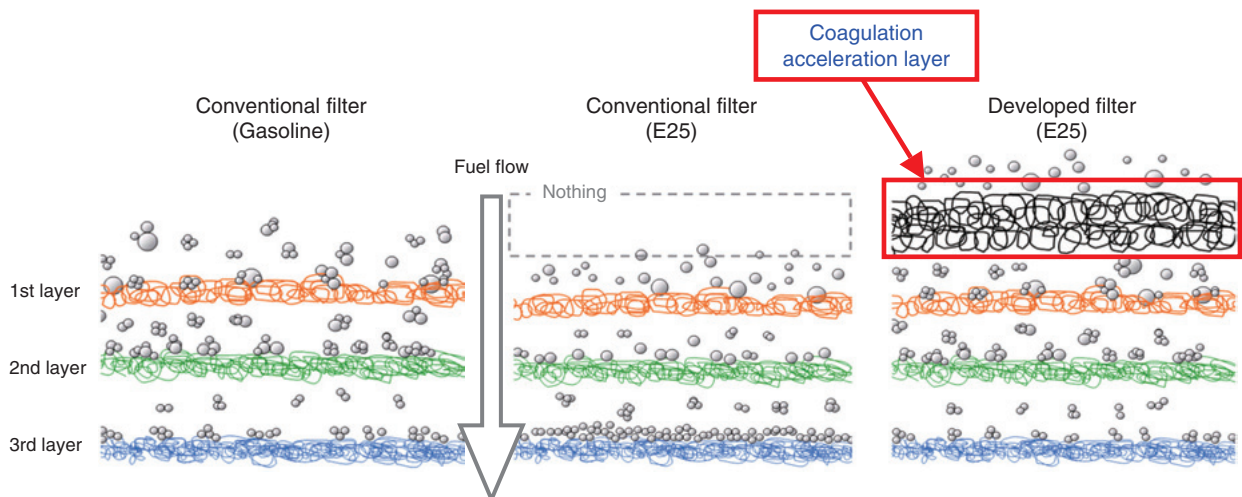


Fig. 21 Schematic representation of effect of coagulation acceleration layer

7. 効果の確認

Fig. 23 の試験結果を踏まえ、通過穴数を 30 個とした凝集促進層を付与した新型フィルタを開発した (Fig. 26)。さらに E25 燃料にて従来仕様のフィルタとフィルタ寿命比較を実施した。確認の結果を Fig. 24 に示す。新型フィルタは表面積を大きくすることなく従来フィルタの 2 倍の寿命向上を達成した。ろ過層別のダスト捕捉割合も Fig. 25 に示すとおり最下層に集中することなく、ガソリン同等の捕捉割合を達成することができた。

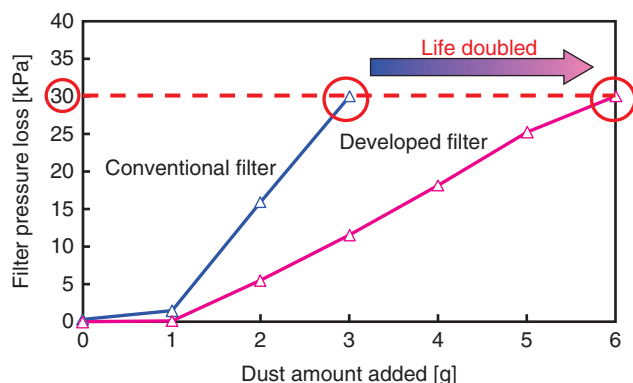


Fig. 24 Comparison of pressure loss between developed filter and conventional filter

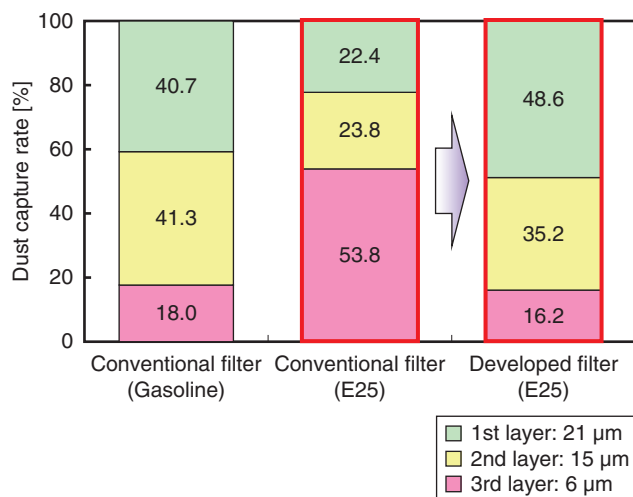


Fig. 25 Comparison of filter capture efficiency

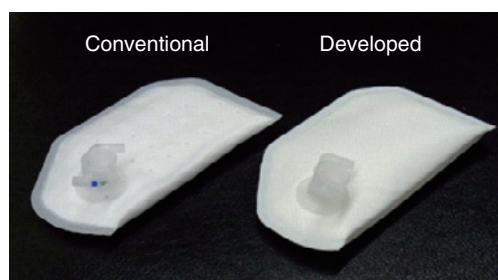


Fig. 26 External view of newly developed filter

8. まとめ

エタノール含有燃料での早期目詰りのメカニズムを明らかにすると共に、エタノール含有ガソリンを主流とする市場に対応できる、長寿命サクションフィルタを開発した。早期目詰りのメカニズムとして

- (1) アルコール燃料ではダストが分散し、ダストが多層構造フィルタを通過する過程で凝集する。
- (2) 凝集したダストが目目の細かい下層へ集中捕捉されることでフィルタ寿命が短くなる。

ということが解明され、この知見に基づいて最外層に凝集促進層を追加した新型フィルタを開発し、同サイズで寿命を 2 倍に向上させることを実現した。

参考文献

- (1) 石田尚之, 東谷公, 森康維: 粉黛工学叢書, 第 4 巻, 液相中の粒子分散・凝集と分離操作 第 1 章 日刊工業新聞社, p.10-43(2010)
- (2) Shinto, H., Miyahara, M., Higashitani, K.: Interaction forces between colloidal particles in alcohol-water mixtures evaluated by simple model simulations, *Langmuir*, 16, p. 3361-3371(2000)
- (3) Higashitani, K., Matsuno, Y.: Rapid Brownian coagulation of colloidal dispersions, *J. Chem Eng. Japan*, Vol. 12, p. 460-465(1979)
- (4) Higashitani, K., Miyafusa, S., Matsuda, T., Matsuno, Y.: Axial change of total particle concentration in Poiseuille flow, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 77, p. 21-28(1980)

著者



荒井進吾



伊藤 淳



石井 翼



安藤秀昭



木下敬太



梅林不二夫