

## 米国におけるエタノール燃料採用の歴史:政策、経済、ロジスティクス

ケリー・ジョシソン<sup>a</sup>、クリスティー・モリアーティー<sup>a</sup>、テレサ・アレマン<sup>a</sup>、ダニロ・サンティニ<sup>b</sup>

a 国立再生可能エネルギー研究所 (NREL)

b アルゴンヌ国立研究所

NRELは、持続可能なエネルギーのための同盟社が運営する、米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー局の国立研究所である。

(注) 本和訳は原文を非公式に和訳したものです。ご不明な点や詳細、参考文献につきましては、以下のリンクにある原著をご参照ください。

<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/76260.pdf>

### 前編

#### エグゼクティブ・サマリー

エタノールは、米国で研究、開発、および展開されてきたすべての代替輸送燃料の中で最大の市場シェアを達成した。将来の燃料と製品に適用可能な、エタノール採用の歴史から学ぶことのできる教訓は多い。

エタノールは3つの主要な混合レベルでガソリンの一部を置き換え、それぞれに対応する車両、装置、利益、および政策がある。最初の混合レベルはE10(10%エタノール燃料)であり、今では米国内で販売されるほとんどすべての純ガソリン(E0)を置き換えた(U.S. Energy Information Administration 2016)。これは、エンジン性能、エネルギー安全保障、健康、大気質、および気候保護に関連する多くの要素から動機付けられた、数世代にわたる政策によってもたらされた。エタノールは、オクタン価の高さが一貫してその推進力となってきた。なぜなら、オクタン価が高いことによりエンジンの高性能化を可能にするからである。初期の政策(1973~1979年)は主に、石油輸出国機構(OPEC)加盟国から供給される石油への依存度を減らしたいという願望が動機となっていた。1980年代の燃料政策は主に、鉛に取って代わる可能性のあるオクタン価向上剤の推進を追求するものであった。基準汚染物質の低減は、1990年から2005年に講じられた措置の包括的な目標であった。2005年から現在までの燃料政策は主に、エネルギー安全保障と気候保護という目標によって動機付けられている。これらの政策は通常、特定の技術に依存せず各期間で多くの燃料と添加物を推進するものであった。しかし、エタノールは、これら4つの期間すべての政策環境で成功をもたらしたその品質により、費用対効果が高いことが特定された唯一の燃料である。

エタノールの第2の市場はE85を介するものである。E85は、51%~83%のエタノールを含有する燃料を指すマーケティング用語である。この燃料にはエタノール濃度が高いという利点があるが、レギュラー・ガソリン車に適合しないという欠点があり、

フレックス燃料車(FFV)でしか使用できない。FFVは、E0からE85までのあらゆる混合レベルを使用可能である。したがって、E85の消費量を増やそうとする取り組みの多くは、自動車メーカーにFFVの製造を、ドライバーにFFVの購入を、給油所にE85の販売設備を整えることを奨励することを目指すものであった。

エタノール消費の3番目となる最も新しい市場は15%エタノール(E15)である。E15市場は、一般的なガソリン車によるエタノール消費を増やすために、E10市場を基礎として構築されている。E15市場構築の取り組みは主に、車両と給油設備の適合性試験、E15を使用可能にするための適用除外の付与、E15販売店への要求、および販売店へのE15購入設備導入の奨励からなっていた。

#### 1.はじめに

エタノールは、米国で研究、開発、および展開されてきたすべての代替輸送燃料の中で最大の市場シェアを達成した。将来の燃料と製品に適用可能な、エタノール採用の歴史から学ぶことのできる教訓は多い。本レポートは、エタノールが今日の市場シェアを達成するために要したおよそ50年間について記述したものである。

今日、消費されるエタノールの多くは3つの燃料市場で利用されている。最も大きなものはE10(10%エタノール燃料)市場である。エタノールをガソリンに加える動機付けと戦略は時とともに変化したが、E10が純ガソリン(E0)をほぼ完全に置き換えることになった。E10市場開発の多くと重なったのが、ガソリン、E85、またはその中間のあらゆる混合物を使用できるフレックス燃料車による、E85(85%エタノール燃料)市場を創出する動きであった。最後に、エタノールでガソリンを置き換える比較的最近の取り組みにおいて、混合レベルをE10からE15(10.5%~15%エタノール燃料)に上げるための進歩があった。

#### 2.E10

ほとんどすべてのガソリンに10%レベルのエタノールを混合することが、これまで突出して大きなエタノール市場であり、現在、米国内で販売されているほとんどすべてのガソリンが10%のエタノール(E10と呼ばれる)を含有している(U.S. Energy

Information Administration 2016)。これは、エネルギー安全保障、健康、大気質、および気候保護に関連する多くの要素から動機付けられた、数世代にわたる政策によってもたらされた。さらに、エタノールはオクタン価が高いことにより圧縮比、したがってトルクを増大させるため、エンジンの高性能化を可能にする。オクタン価向上剤の初期の需要は、ガソリンから四エチル鉛 (TEL) を除去するために生じた。初期の政策 (1973～1979年) は主に、石油輸出国機構 (OPEC) 加盟国から供給される石油への依存度を減らしたいという願望が動機となっていた。1980年代の燃料政策は主に、鉛に取って代わる可能性のあるオクタン価向上剤の推進を追求するものであった。基準汚染物質の低減は、1990年から2005年に講じられた措置の包括的な目標であった。2005年から現在までの燃料政策は主に、エネルギー安全保障と気候保護という目標によって動機付けられている。これらの政策は通常、特定の技術に依存せず各期間で多くの燃料と添加物を推進するものであった。しかし、エタノールは、これら4つの期間すべての政策環境で成功をもたらしたその品質により、費用対効果が高いことが特定された唯一の燃料である。

## 2.1.1973～1980年：エネルギー安全保障がエタノール使用の動機付けに

1970年代、米国では国内原油生産量が減少し始め、価格が上昇し、輸入が急増した。トウモロコシ加工業者とトウモロコシ農家は、国産ガソリンの供給量を拡大し、低いトウモロコシ価格を上昇させるガソリン添加物としてエタノールを市場に出す機会を認識した。ネブラスカ州もまた、GMが1970年に無鉛ガソリンの将来に備えるための計画を発表したのと同じ早い時期にオクタン価向上剤の潜在性を認識していた可能性があり、「農産物産業利用委員会」を1971年に設置した (Round 1973)。

OPECによる1973～1974年の原油禁輸措置がこの新たなエタノール／農業の政治的影響力を刺激し、外国産油への米国の依存度を低減するための手段としてのエタノールの使用拡大を推し進めた。1975年、国内燃料生産を推進する州／地域イニシアティブのうち1つの例において、ネブラスカ州は30数台の車両で10%エタノール混合物のフィールド試験を開始した (Bechtold 1987)。ほどなく、主に税関連の金銭的インセンティブが1978～1981年の期間に中西部諸州と連邦レベルで出現した。石油価格が急騰し、国内石油生産量が減少した1975～1981年頃、全米トウモロコシ生産者協会 (トウモロコシ売上高からの天引きによって間接的に資金が供給される)、全米ガソール・ロビー、およびその後は新たに設立された再生可能燃料協会が、エタノールに有利な州法、連邦法、およびインセンティブを求める圧力をかけた。法律、インセンティブ、規制の変更、および科学的、工学的メリット分析という険しい道を経て、エタノールは市場の中で「膠着状態」にあった。

議会は、1978年にE10 (ガソリン部分を含む) を自動車燃料に対する連邦物品税の課税対象から外すことにより、エタノール市場を押し上げた (Energy Tax Act 1978)。25州がこれに倣い、州のガソリン物品税のすべてまたは一部からE10を除外した。相手先商標製品製造会社 (OEM) は、エンジンにペーパー・ロックを生じるガソリン／エタノール混合物の揮発性上昇に懸念を示したが、E10は大気浄化法 (CAA) 211 (f) の燃料認可に基づいてガソリンに「実質的に類似」していると米環境保護庁 (EPA) が1979年に決定したため、E10は燃料として法的に認められた (Federal Register 1979)。

燃料販売店、およびその給油機に対する管轄権を有する当局は、E10 (歴史的にガソールと呼ばれていた) が給油機に及ぼす可能性のある影響を懸念していたため、アンダーライターズ・ラボラトリーズ (UL) は、当初1930年に書かれたエタノール混合規格 UL 87 を1978年に改訂した。追加試験なしで最大10%のエタノール混合物の導入を許容するこの規格は、2015年に最初の改訂が行われ (UL 87a)、10%を超える混合物に対応するようになった (Brooke Higginbotham、著者への2016年1月5日付けEメール・メッセージ)。その場合、より高いパーセンテージ・レベルの混合物には追加試験が要求された。

1979～1981年に起きた石油価格の高騰が、エタノールに有利な法制の新たなうねりを引き起こした。石油会社は当初、1979年の第2次石油価格ショックの後、エタノールを混合する新たな取り組みに抵抗したため、議会は1980年にガソール競争法を制定してこれに応えた。この法律は、石油会社から差別された場合にエタノール会社が受けることができる補償を3倍にするものであった (Morris 1992)。議会は物品税の免除措置をすべての低エタノール混合物に拡大し (のちの含酸素添加剤要件にとって重要)、混合業者がそれを所得税控除と見なせるようにして措置をさらに柔軟なものにした (Crude Oil Windfall Profits Tax 1980)。さらに、1980年のエネルギー安全保障法は、さまざまなメカニズムを通してエタノール生産施設の建設に10億ドルを超える資金を提供した。同時に、アーチャー・ダニエルズ・ミッドランド社は、エタノールを (化学物質ではなく) 燃料として、鉄道、平底荷船、およびトラックによる輸送料金を下げるように交渉した。1980年代を通して行われたこれらの政策と交渉の結果、相当量のエタノールが、主にコーン・ベルトでガソリンにスプラッシュブレンドされた。しかし、E10は経済性に問題を抱えていた。含酸素添加剤用混合基材は当時生産されていなかったため、最終燃料のオクタン価は車両が利用できるオクタン価より高く、したがってオクタン価を上げたことによる恩恵は無駄になった。

## 2.2.1980～1990年：脱鉛によりオクタン価向上剤の使用が必要に

エタノール市場は、ガソリンからTELが除去されたときに開かれた。TELやその他のオクタン価向上剤がないとエンジン

性能(トルクおよび出力)は低下する。TELは2つの理由によりガソリンから除去された。1つ目は、重要なオゾン先駆物質である一酸化炭素(CO)、炭化水素、および窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の排気管からの排出量を大幅に低減する可能性のある技術である、触媒コンバーターを使用できるようにするためであった。TELを除去しないと、触媒が損傷したり「毒で汚染」されたりして触媒コンバーターが効果を失う。TELを低減する2つ目の理由は、排気管からのTEL排出が主に子どもの学習障害と行動上の問題を引き起こす問題であるという科学的確実性が着実に大きくなっていったことであった(Splitter, Pawlowski, およびWagner 2016)。

### 2.2.1. オクタン価向上剤としての芳香族化合物

TELが1980年代を通してガソリンから段階的に除去されるにつれ、精製所は主にガソリンの芳香族化合物成分を1979年の22体積パーセントから1990年には33体積パーセントを増やして、失われたオクタン価を埋め合わせた(Morris 1992)。芳香族化合物はオクタン価を向上させるための最も安価な選択肢であったため、精製業者は当初、芳香族化合物を選択した(表1)。揮発性は、ガソリンがどの程度容易に蒸発するかを表す計測基準であるリード蒸気圧(RVP)で測定する。蒸発したガソリンは地表面でのオゾン形成に寄与するため、EPAは1989年(芳香族化合物の使用量が大幅に増加した期間の終わり近く)にRVPの規制を開始した。こういった制限は夏季のガソリンに適用され(オゾン形成は温度に左右されるため)、州ごとに異なるが、一般的な制限はRVPが9ポンド/平方インチ(psi)を超えてはならないとするものである。

### 2.2.2. オクタン価向上剤としてのメタノールとMTBE

段階的な脱鉛によって失われたオクタン価を精製所が埋め合わせるための2番目に一般的な選択肢は、メタノールを添加することであった。1980年代のメタノールの唱道者と研究者に

は、中東の供給管理が新たに勢力を得たOPEC加盟国によって奪われる中で、企業の存続を求めている主要な「天然ガスに富む」化石燃料生産者が含まれていた。

メタノール、またはメタノールを主成分とする液体燃料を燃料とする車両を導入するための技術的、法的な段取りをつける非常に重要な取り組みがあった。重要な法制は、米国の19都市にメタノールを導入するという、ジョージ・H・W・ブッシュ大統領による1990年の議会への提案であった。この取り組みは、メチルトert-ブチル・エーテル(MTBE)と混合されて保有車両全体に販売されたガソリンが、排気管からの排出量が少なく、メタノール給油施設の数が少ないメタノールを燃料とする車両のゆっくりした市場浸透と同様に排出量を低減できることが示されたときに終わった(National Research Council 1991, Bechtold, Goodman, およびTimbario 2007)。

メタノールは、競合する代替燃料に照らしたさらなる評価に委ねられ、1986年までに市場から完全に消えた(Peoples 1991)。メタノールはMTBE生産材料の1つであるため、1980年代にメタノールを支持していた既存のメタノール生産者は今やMTBEベースの改質ガソリンを推進した。天然ガスはメタノールの主原料である。したがって、天然ガスに富む化石燃料エネルギー会社は、既存のエンジンに使用する液体燃料のベースとしての天然ガスの使用という目標を間接的に達成することになった。

この時点で、MTBEが一般に好まれるオクタン価向上剤となった。石油会社はエタノールよりMTBEを好んだ。これは主に、MTBEが精製所の副産物とメタノールの組み合わせから生産され、精製所複合施設内で加工され、パイプラインに入り、したがって精製業者の管理下に置くことができるためである。その上、MTBEは既存のインフラを使用していた。MTBEの使用量は、プレミアム・ガソリンに重点を置くことの一環として1985~1999年の間、特に夏季に急速に増加した(図1参照)(Colucci 2013)。

表1 オクタン価向上剤、燃料、およびその1991年湾岸価格

オクタン価市場		
化学物質	実際のAKI	価格(ドル/ガロン)
メタノール	115	\$0.37
n-ブタン	91	\$0.37
イソブタン	121	\$0.41
エタノール(連邦E10優遇税制あり)	110	\$0.61
トルエン	103	\$0.75
キシレン	106	\$0.75
メチルトert-ブチル・エーテル(MTBE)	110	\$0.98
ベンゼン	101	\$1.13
エタノール(優遇税制なし)	110	\$1.15
燃料市場(ガソリン・ガロン等価物[GGE]当たり価格)		
燃料	オクタン価(R+M)/2	価格(ドル/GGE)
ガソリン	87	\$0.52
エタノール(連邦E10優遇税制あり)	110	\$0.93
エタノール(優遇税制なし)	110	\$1.75

出典:オクタン・ウィーク、1992年1月6日、米国エネルギー情報局(1992)

### 2.2.3. オクタン価向上剤としてのエタノールの使用

エタノールは、TELの除去によって失われたオクタン価を埋め合わせるための第3の方法であった。1985年6月、大手石油企業の中でアモコ社だけが、中西部7州でオクタン価向上剤として特にエタノールとともに使用するための低オクタン有鉛ガソリン混合基材を生産した(Bechtold 1987)。当然ながら石油大手の影響力は大きく、ウィリアムズ社のパイプラインが中西部の8カ所のターミナルでサブオクタン(85オクタン)有鉛ガソリン・グレードを1985年7月に追加し、次いで同年10月に「通常製品」として出荷することにつながった。最

最終的に、この使用がエタノールの高オクタン特性を利用し、そのニッチ市場が燃料からオクタン価向上剤に移った。この市場シフトはエタノールに有利であった。なぜなら、そのためにエタノールは一般にガソリンより高価で普及度が低い添加剤と競合するようになったからである(表1参照)。この時点で、エタノールの高いオクタン価が精製業者により実現され、精製業者は含酸素添加用基材を87 AKIから84 AKIに落とすことによってコストを削減できた(SmithおよびMorris 2012)。

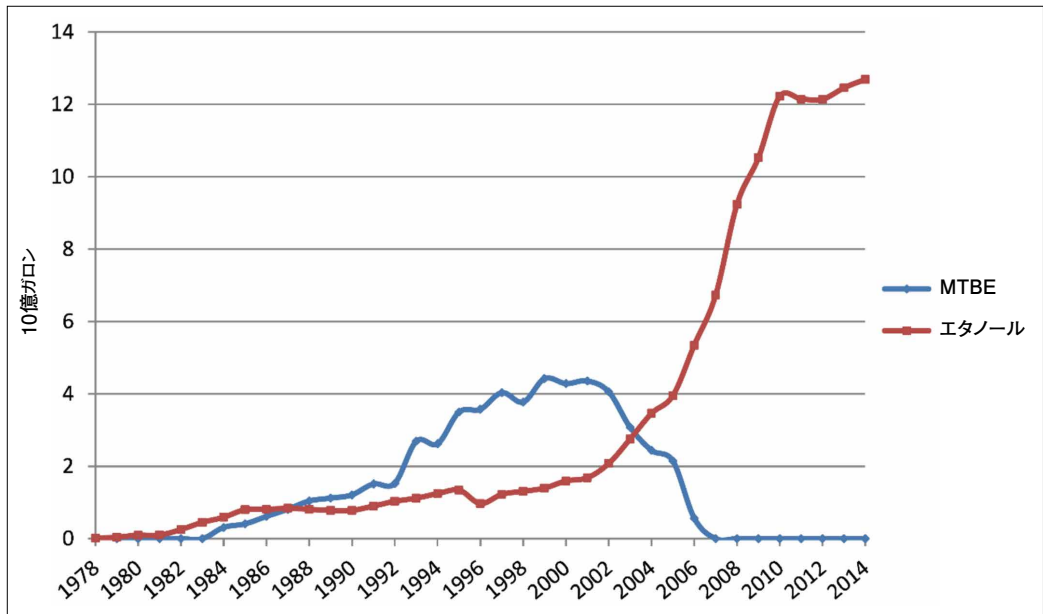


図1 米国の年別含酸素添加剤消費量、1978～2014年

出典：1978～1991年データ：Morris(1992)、1992～2014年データ：EIA年間エネルギー展望

者は含酸素添加用基材を87 AKIから84 AKIに落とすことによってコストを削減できた(SmithおよびMorris 2012)。

オクタン価向上剤としてのエタノールの長所にもかかわらず、図1は1985～1990年にその使用が停滞したことを示している。これには次の4つの主要な理由があった。

1. ドライバーが、自分の車両へのエタノールの適合性に懸念を持つようになった。燃料噴射装置が1985モデル年に導入されたが、これにはガソリン中の不純物(主にオレフィンおよびジオレフィン)によって詰まるという多くの問題があった。エタノールが多くの市場に同時に入ったため、これらの不具合の原因とされた。そのため、一部の車両所有者マニュアルにエタノールに対する警告が記載されるようになり、全米計量会議は、ガソリン・スタンドに「アルコールを含有しない」と掲示することを推奨した。1986年までに28州でこれらの掲示が義務付けられた(Herman 1989)。
2. 企業平均燃費(CAFE)基準のための米国運輸省道路交通安全局(NHTSA)の燃費試験システムが、エネルギー密度が低いという理由でエタノール混合物を不利に扱った。CAFEを最初に実施して以来、エタノールと、ガソリンに行ったその他の変更に合わせて、NHTSAは燃費の会計方法を変更した。1988年、NHTSAは、当時使用されていたさまざまな認証燃料の発熱量のわずかな違いを補正するために、CAFEの計算に「R因子」を導入した(Sluderら2014、EPA 2014)。NHTSAは、このR因子によってE10の低い発熱量を説明できるようになったが、さらに高いエタノール混合物を含有する燃料が不利にならないように調整する必要があることが最近の研究で示された(SluderおよびWest 2013、Sluderら2014)。
3. エタノールはガソリンのRVPを上昇させる。ガソリンのRVPは9psiという規制限度を超えていた(実際には、E10混

合物での1psiの蒸気圧増加を許容するEPAの適用除外により、E10の実用上の限度は10psiである)。これは主に、エタノールを低RVPの混合基材にマッチブレンドする(これは生産コストを上昇させたであろう)代わりに、既存のガソリンにスプラッシュブレンドしたためである(MathPro Inc. 2011)。これに対応して、議会はE10(あらゆるエタノール混合物の中でRVPが最も高い)に、RVPの限度から1psiの適用除外を与えた。これは1990年の改正CAAで成文化された。

4. ガソリン価格が1985年に急落し、エタノールの競争力が低下した。1929～2016年の間で最も低い3年ガソリン価格は1986～1988年のものであった。

(次号に続く)

- 1 実際のアンチノック・インデックス(AKI)と混合AKIは基材の炭化水素組成によって変わり、極めて非線形性であることがある。非線形オクタン混合に関する優れた議論がGhosh、Hickey、およびJaffe(2006)に示されている。
- 2 E15、E20といった、より高いエタノール混合物での蒸気圧の上昇がE10の場合より統計的に高いことは分かっていない。

ネットワークに関するご意見、  
ご感想をお寄せ下さい。



**U.S. GRAINS COUNCIL** アメリカ穀物協会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号  
第3虎の門電気ビル11階

Tel: 03-6206-1041 Fax: 03-6205-4960  
E-mail: Japan@grains.org

本部ホームページ (英語) : <https://www.grains.org>  
日本事務所ホームページ (日本語) : <https://grainsjp.org/>