

## 航空機燃料の将来

### 1 概要

航空用燃料は現状では規格によって規定されており、原油由来の燃料が用いられている。こうした状況の下、昨今の原油価格の供給に関する不安定要因、化石燃料保全の要求ならびにその排気の影響への環境負荷への影響に向けた関心に併せて、航空用燃料も多様化が模索されている。航空機運航業界の燃料の確保、経済性運航、環境負荷低減に向けた取り組み、これらに対する今後想定される規制に関する現況をまとめる。当面の代替燃料としてバイオ燃料の導入が模索されているが、航空用燃料は、地上交通機関などと求められる要求条件、運輸部門の中での相対的な利用割合、遠隔地における供給安定性などといった特殊要件などが考慮されるべきであり、これら要件の下での検討状況について現状を理解した上で評価されるべきである。現在想定される代替燃料の中長期的展望を概観した後、具体的な取り組み事例として、バイオ燃料フライトを含むバイオ燃料の規格認証化への取り組みについて紹介する。なお、低炭素社会に向けた航空用燃料に関する議論の現状についても重要であり、補遺としてまとめている。

### 2 航空用燃料の現状と検討の背景

#### 2.1 航空用燃料の現状とその概要

昨今、航空用ジェット燃料のあり方については様々な検討や議論、将来像の模索が行われているが、その要因には複数ある。主として挙げられるのは、経済的側面と、環境負荷の側面である。

第一に経済的側面としては、単一の起源による原産地が偏在する化石燃料を用いていることにある。民間航空用ジェットエンジンに利用される通称ジェット燃料は、米国の標準化団体である米国試験材料協会 (American Society for Testing and Materials; ASTM International) による ASTM D-1655[1]等によって規格が定められているが、現状では原油を精製して作られ、性状としては灯油に似ている (ASTM の規格 (Jet-A 燃料の規格 D1655) 以外に、英国防衛省の規格 (Jet-A1 燃料の規格 Def Stan 91-91) がある。D1655 に Jet-A1 は参照されるが規定するのは英国防衛省である。両燃料は非常に似通っており、違いは析出点と添加物規定に限られる。本稿では、ASTM における規格を元に解説を行う)。今世紀に入ってから航空用燃料並びに原油価格は、ガソリン価格と比して激しい変動を繰り返すとともに、現在はやや落ち着いているものの、一時は高止まりしていた。その理由については必ずしも明確ではないが、技術革新によりエネルギー源の転換がすでに行われつつある自動車の場合と異なり、燃料に代わる後継の新たな燃料が開発されつつあるとの情報がないことが、航空用燃料の高騰状況への危惧が拭えない原因の一つと推定された。民間航空用だけでなく米空軍でも、代替燃料を模索しているが、直接的な理由は、戦略的に他国に依存しない燃料供給源を確保することにあると見られている。そのため米国の国内資源が相応にある石炭を用いる CTL が一つのターゲットだが、燃料多様化・地球環境保護の観点からバイオ燃料の導入に向けた試験的な取り組みも実施されている。米空軍は、2016年までに米国内米空軍使用航空燃料の 50%を代替燃料との混合燃料にする目標を設定している。後述する民間航空機用燃料規格には遅れるが認証に向けた取り組みも実施されているところである。自動車用燃料としては、植物由来の燃料 (エタノール) が一部の国で実用化されるなどの進捗を見せている。これと同様の動きが航空分野ですぐに起きない理由、その上でバイオ燃料の導入が積極的に模索されていることを後に述べる。

第二の要因として挙げられるのは、昨今、化石燃料由来の燃料の燃焼などによる CO<sub>2</sub> 排気が大気循環の中で地球温暖化の主要因の一つに数え上げられ、その排出抑制が政治的な課題にまで発展していることである。政治的観点からの規制などの動きは、現時点で方向性を断定的に示すことは困難であるが、最新の情報としての動向を本稿でも示すこととする。航空用燃料と他輸送機関用燃料を環境負荷の観点から比べた際に大きく異なる点は、ジェット燃料の品質規格が厳しく定められていることと、その中で現状輸送機関全体の中で占める割合は少ないものの今後その割合は漸増することが予想されていること、ならびに、航空機は高高度で高温の燃焼排気ガスを継

続的に排出するほぼ唯一の機械であることが挙げられる。航空機排気には、NO<sub>x</sub> などの環境影響を及ぼす排気成分があり、CO<sub>2</sub> の問題が俎上に上る以前から、航空業界では、排気の適正化に向けた努力を続けてきている。実際、ICAO は NO<sub>x</sub> などのエンジン排気、エンジンなどに起因する騒音の規制を定めている。CO<sub>2</sub> 排出についてはその低減は、燃料消費率の改善に繋がり、経済的な観点から運航業者のメリットになるために、(NO<sub>x</sub> などの) 規制を設けなくても当然のこととして製造メーカーは努力を続けて来ており、運航業者も効率的な運航努力は続けている。その点で、従来の排気適正化に向けた努力の上に、最近環境保護の観点から注目されている CO<sub>2</sub> 排出抑制に向けた取り組みが動機となってバイオ燃料を含む新規燃料導入などの具体策が重要視されている状況である。

以上のような要因に従って、特に今世紀に入り、バイオ燃料を中心とする石油代替燃料の在り方が注目されている。

## 2.2 ジェット燃料の規格

現在運航中のジェット燃料は、主にケロシンから成り、軽油とガソリンの間の留分として灯油と似た性状を持つ。民間エンジンの規格としては先述のように Jet-A と Jet-A1 があり、実際の航空機の安全・安定運航に供するなどの理由から、ジェット燃料としては米国工業規格 ASTM D-1655 に定められた規格に従う必要がある(軍用としては JP-8 がある)。規格の内訳としては、粘度、密度、引火点、氷点、発熱量、硫黄分、芳香族成分などで構成されている。また、同規格にあっては、燃料が石油由来であることが前提条件として提示されてきた。ジェットエンジンは重量、飛行条件などを勘案した上で最大限能力を発揮するように設計されているため、例えば発熱量が高ければ良いということではなく、規格の範囲内に燃料性状が止まっていることが重要である。引火点は取り扱い安全上の要件であり、高高度の低温環境を被るために氷点なども規格がある。特に国際線の運航に当たっては、自らの事業者のみで燃料を供給できるわけではないので、こうした規格を定め守られていることは安全上の前提要件となっている。また、後に述べるように、単にエンジンの作動だけではなく、現在のジェット燃料の規格が、燃料の精製、輸送、貯蔵などの要件に影響を及ぼしており、規格を変えることは容易なことではないことは特筆されるべきである。

表 1 ジェット燃料規格(最近検証された UOP によるバイオ SPK 燃料の代表的性質、水素燃料の参考比較値を併記) [2]

項目	ASTM 規格 (Jet-A/A1)	バイオ燃料(検証に用いた燃料と航空会社)			水素燃料 (参考)
		ジャトロファ	ジャトロファ/ 藻	カメリナ/ジャトロ ファ/藻	
		ニュージーラン ド航空	コンチネンタ ル航空	日本航空	
芳香族成分(体積%)	<25%(実際 12-19%)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
硫黄分(質量%)	<0.3%(実際 10ppm)	0.0001%	<0.0001%	<0.0001%	0.0%
引火点	38℃以上	46.5℃	46.5℃	46.5℃	-
氷点	-40℃以下/-47℃以下	-57℃	-54.5℃	-63.5℃	-
発熱量	42.8MJ/kg 以上	44.3MJ/kg	44.2MJ/kg	44.2MJ/kg	120MJ/kg
粘度(-20℃,mm <sup>2</sup> /sec)	8.0 以下	3.663	3.510	3.353	-
密度(15℃,kg/ m <sup>3</sup> )	775~840	749	748	752	71 (液体)

前節で示したように、運航業者をはじめとした関係者は現状の石油由来の燃料のみに頼らず、代替燃料供給の術を模索している状況である。ジェット燃料は通常原油を精製して作られるが、それ以外の方法で造られる燃料を代替燃料と呼ぶ。以下、次節において、代替燃料の分類ならびに相互比較、代替燃料候補の内注目を集めているバイオ燃料のあり方について述べる。

### 3 航空用燃料の中長期的展望

#### 3.1 代替燃料の分類と CO<sub>2</sub> 低減に向けた考え方

先に述べたように、代替燃料に向けた捉え方としては、燃料の選択肢を増やすことで経済的観点から燃料供給の効率化を図り、かつ国家戦略的リスクを軽減すること、また CO<sub>2</sub> 排出量低減など環境負荷に配慮することが考えられる。航空機用代替燃料として、エンジン・機体の換装も視野に入れた場合の分類の一つは、図 1 に示すようになる[3]。究極的には、水素を燃料とした航空機が最良の低炭素排出航空機として考えられるが、(容積の観点から、燃料として液体状態で用いることが想定されている)表 1 に示されるように水素燃料は重量あたりのエネルギー含有量として、現状のジェット燃料の約 2.8 倍と大きいのに対し、密度が低いために体積あたりで言えば約 4 分の 1 (ジェット燃料 34.6[kJ/L]に対し液体水素 8.5[kJ/L])である上に、燃料が極低温状態であることから、水素燃料の導入については、功罪ともに明確であり、システムとして成立させる検討が長らく進められているところである。また、水素そのものが燃焼時の環境負荷を小さく出来る一方で、燃料生産時から考えるとコスト・環境負荷の面からの課題もいまだ多いのが現状である。関連情報は後述するが、技術課題を持ち、エンジンならびに機体の換装を要する水素燃料の導入は、中期以上の展望を要するといえる。次に、液化石油ガス由来の燃料(プロパンやブタンなど)を直接燃料として用いることは、燃料状態が極低温ではなく取り扱いの意味では容易だが、燃料性状としての利点、安定供給の展望などに欠ける。メタノールやエタノールなど、地上輸送機関などでは既に燃料として実用化されている燃料ではあるが、含酸素燃料ということもあり、酸化剤を吸込空気として携行しないですむ航空用ジェットエンジンの利点が減じる。実際、重量あたりの発熱量も現用ジェット燃料の 6 割ほどであるとともに、燃料の金属腐食性、排気(アルデヒド多量排出)など克服すべき課題が多いといえる。ただし、エタノール燃料戦略を進めるブラジルでは Embraer 社がエタノールを燃料とするレシプロエンジンの一人乗り小型航空機(EMB-202A)を生産しており、実際に利用されていることに留意されたい。

そこで、当面代替燃料として有望視されているのが、4. バイオ燃料ならびに 5. 合成燃料である。ここに、3 のアルコールもバイオ燃料として得ることは可能だが、先に述べたようにアルコールは航空用燃料としてデメリットが大きく、航空用に想定したバイオ燃料といえ、以下述べるようにジェット燃料同等の性状を持った合成燃料とする見方が一般的である。4、5 両者とも、エンジンや機体の換装を要しない、Drop-in Fuel として導入することが考えられている(4、5 に焦点を当てた再分類は次節に示す)。

以上から、長期的視野に立てば(燃焼時の CO<sub>2</sub> 排出ゼロとなる)水素燃料の導入が技術的にありうるとしても、当面の取り組みとしては、直接原油に依存する割合の極力少ない、現状のジェット燃料規格に準じる性状を持つ燃料を経済的に安定供給する術をいかにして得るかということが着眼点であるといえる。今後国際航空においても、CO<sub>2</sub> 排出規制に向けた取り組みが活発化すると考えられるが、航空燃料の立場から CO<sub>2</sub> 排出低減に貢献する手段としては、カーボンニュートラル(Carbon Neutral)の考えに則ったバイオ燃料の導入にほぼ限定される。カーボンニュートラルとは、植物由来の燃料を用いた場合には、理論上、植物が吸収する CO<sub>2</sub> とエンジンで燃焼により排出される CO<sub>2</sub> が等量で相殺され、CO<sub>2</sub> 増大に寄与しない、とする考え方である。実際、京都議定書上は、バイオ燃料を用いた場合には CO<sub>2</sub> 排出はゼロとみなされ、その分 CO<sub>2</sub> 低減に寄与したとして CO<sub>2</sub> 排出権取引(京都議定書 17 条に規定された、温室効果ガス削減を補完するためのメカニズムの一つで、規定された排出枠保持者間で排出枠を移転する制度のこと)を得ることが出来、欧州の排出権取引市場において売買の対象になる。しかし、現実には、原料となる植物の栽培や輸送に伴い排出される CO<sub>2</sub> 量についてはカウントされておらず、CO<sub>2</sub> 低減効果の正味については明確な指標がない。原料生産にあたる上流から詳細に分析を行い、CO<sub>2</sub> の排出量を評価する LCA(Life Cycle Analysis)も研究が行われている。バイオ燃料については現在までのところ相当量 CO<sub>2</sub> の排出低減効果があるとする見方が大勢である[2][11])。また、バイオマスから合成ジェット燃料を製造する BTL(Biomass To Liquid)と石炭、天然ガスから製造する CTL(Coal To Liquid)、GTL(Gas To Liquid)との環境性、経済性の比較を行い、航空代替燃料としての可能性評価を行った調査研究も最近なされている[4]。

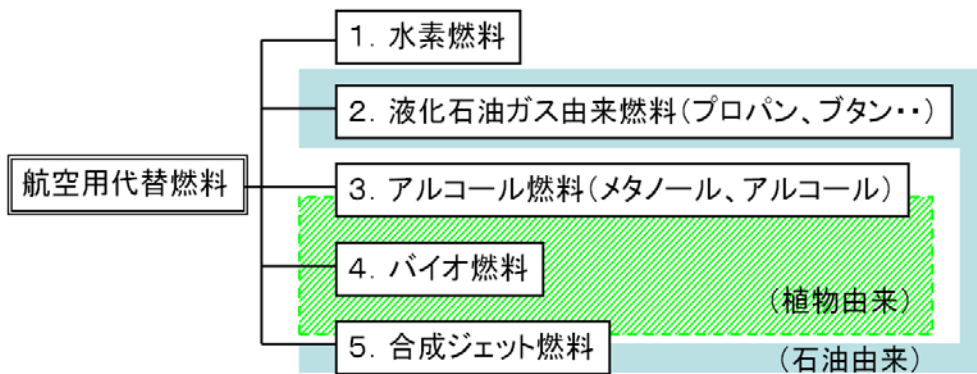


図1 航空用代替燃料の分類 (その1)

### 3.2 長期的スパンで捉えた代替燃料と航空機機体のあり方

3.1 で述べたように、長期的視野に立てば、航空用燃料として液体水素燃料ジェット航空機の導入はありうることである。実際、1988 年には、ロシア（当時のソ連）が Tu-154 の改造機（Tu-155）として水素燃料ジェットエンジンの飛行試験（巡航時のみ作動）を実施し、同年、米国では、Conrad 氏が Grumman-American “Cheetah” の改造機（エンジンは Lycoming 0320-E2D を原型）を用いて離着陸を含む全航程で水素レシプロエンジンにて飛行試験を成功させている。我が国を含む多くの国・機関等によって、30 年以上にわたりエネルギー危機が叫ばれる度に水素燃料の導入検討はなされてきた。海外における例としては NASA の出資による米国検討（Brewer）や欧州 EU における今世紀に入ってから概念検討プロジェクト Cryoplane などが挙げられる。包括的なレビューは文献[5]を参照されたい。

水素燃料航空機に向けた技術課題は、A)燃料タンクの軽量化、繰り返し使用時における信頼性確保・整備可能性、B)エンジンシステム、C)燃料供給系、D)巡航時の大気に及ぼす排気の影響評価が主たるものである。極低温の低密度燃料を如何にタンク内貯蔵し適切に推進系へ供給するかが水素燃料航空機の主要課題（課題 A～C）であり、機体の形状も燃料タンク形状に従い現状航空機とは大きく異なる可能性がある。水素燃料航空機は、CO<sub>2</sub> 排出ゼロであるが、（水素ジェットの排出ガスである）最大の温暖化ガスである水蒸気を従来の航空機よりも多く排出する。航空機は水蒸気を高空大気に直接排気するほぼ唯一の輸送機関であり、飛行機雲の及ぼす温暖化効果が未解明な現状では、水素燃料航空機に対して過大な期待を持つことは慎まねばならない（課題 D）。むろん、水素燃料導入の最大のネックは如何にして経済的に安定供給するかに係っており、地上機関における水素社会に向けた国民の意識改革を含むインフラ整備の是非が水素燃料航空機導入の鍵を握るともいえる。

水素を燃料とする航空機については、燃料電池利用についても最近盛んに研究されている。実際、2008 年にはボーイング社が燃料電池航空機の有人機実証（巡航時のみ）[6]を成功させ、2009 年には、ドイツ DLR が離着陸を含む全航程で水素燃料電池航空機飛行実証[7]を成功させている。ただ、燃料電池航空機の実証はいずれも小型機であり、水素ジェット航空機、水素燃料電池航空機ともに、燃料タンク・動力系の大幅な軽量化が旅客機の適用に必要なとなっている。概念検討レベルではあるが、ガスタービンと発電機構の組み合わせによる水素燃料利用を前提としたタービン発電複合型（Turbo-electric）推進系航空機については、NASA[8]や JAXA[9]で検討が進められているところである。なお、国際航空輸送協会（International Air Transport Association: IATA）の技術ロードマップ報告[10]において、技術展開の達成予想として、水素燃料の導入を 2020 年以前の中期、（推進系適用に限定しない）燃料電池利用を 2020 年以降の長期的展望としている。

### 3.3 Drop-in Fuel としての合成燃料とバイオ燃料

将来的には、エンジンや機体の再設計を前提とした新しい性状の燃料の導入がありうるが、当面の代替燃料としては、現状の ASTM D-1655 に準拠するものである。この規格は、原油由来であることを前提としてきており、その前提条件を外すには一定の認証手続きが必要である。この取り組みについては、4.2 に示す。ここでは、航空用に検討されている FT 法による合成燃料とバイオ燃料の概要を概説する。

ASTM D-1655 に任意に継ぎ足すことが出来る、つまり同等と満たされる燃料を Drop-in Fuel と呼ぶが、Drop-in Fuel として想定されている代替燃料の分類を、

図 2 に示す。

#### 【食用の油脂や糖類からの合成等（分類①）】

第 1 世代バイオ燃料と呼ばれる。食物油脂から主成分であるトリグリセリドのグリセリン部分をメタノール置換して得た脂肪酸メチルエステル（バイオディーゼル）が製造されているが、この延長でジェット燃料準拠の燃料生成が可能である。最初のバイオフライトでも燃料として採用されたが、食糧供給の逼迫を招くなどとの批判も多く、航空用燃料として導入される見通しはない。

#### 【植物廃棄物の発酵など(BTL 等)（分類②）】

木屑やわらなどのバイオマスを原料とする。航空用燃料としては、バイオマスから合成ガス（ $H_2$  と  $CO$ ）を発生させ、FT 法（Fischer Tropsch 法： $H_2$  と  $CO$  から液体炭化水素を合成する方法）によって液体炭化水素を合成するのが第一段階である。こうして出来るパラフィン系炭化水素は、主に軽油成分に近い組成の炭素数であり、ジェット燃料よりも炭素鎖が長い為、水素添加（Hydrogen Cracking）操作により炭素鎖に水素を導入することで切断し、炭素数調整を行う。廃棄物利用という好ましい側面を持つ一方で、収量や回収コストに難がある。

#### 【非食用植物の油脂からの合成（分類③）】

分類①の第一世代バイオ燃料が食物需給を逼迫させるとの懸念から批判を受けることに対応し、非食用燃料の導入を目指したもので、食用でない植物由来のバイオ燃料を総称して第二世代バイオ燃料と呼ぶことがある。油脂の原料が非食用の植物であることが特徴で、詳細は 4.2 に示される。栽培する作物としては、単位面積当たりの収量が大きいこと、通常の食物の耕作地に適さない環境でも生育できること、水を大量に消費するような環境負荷が小さいことなどから選定される。こうした燃料の具体例は、4.1 および 4.2 のボーイング等による取り組みの項で紹介する。

#### 【GTL と CTL（分類④・⑤）】

合成ガス（ $H_2$  と  $CO$ ）を天然ガス由来（GTL: Gas to Liquid）ならびに石炭由来（CTL: Coal to Liquid）で製造し、既述の FT 法によって液体炭化水素を精製した後に水素添加による炭素数調整を行い、ジェット燃料相当の燃料を得る。南アフリカでは、すでに CTL の手法開発に取り組み実用化させており、10 年以上ジェット燃料としての使用実績を持つ。CTL は多量の水を必要とするのが特徴である。中東のカタールでは、天然ガス資源が豊富であることから、GTL によって燃料を精製し、エアバス A380 での飛行実証試験を行っている。これらは、2.1 でいうところの経済的側面を重視したもので、燃料の供給源多様化に寄与するが、 $CO_2$  排出量でいえば GTL でジェット燃料と同程度、CTL で概ね 2 倍程度とされており、環境負荷低減には貢献しない。国内では、GTL は石油天然ガス・金属鉱物資源機構（Japan Oil, Gas and Metals National Corporation : JOGMEC）など、CTL は新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO）が開発を実施している。

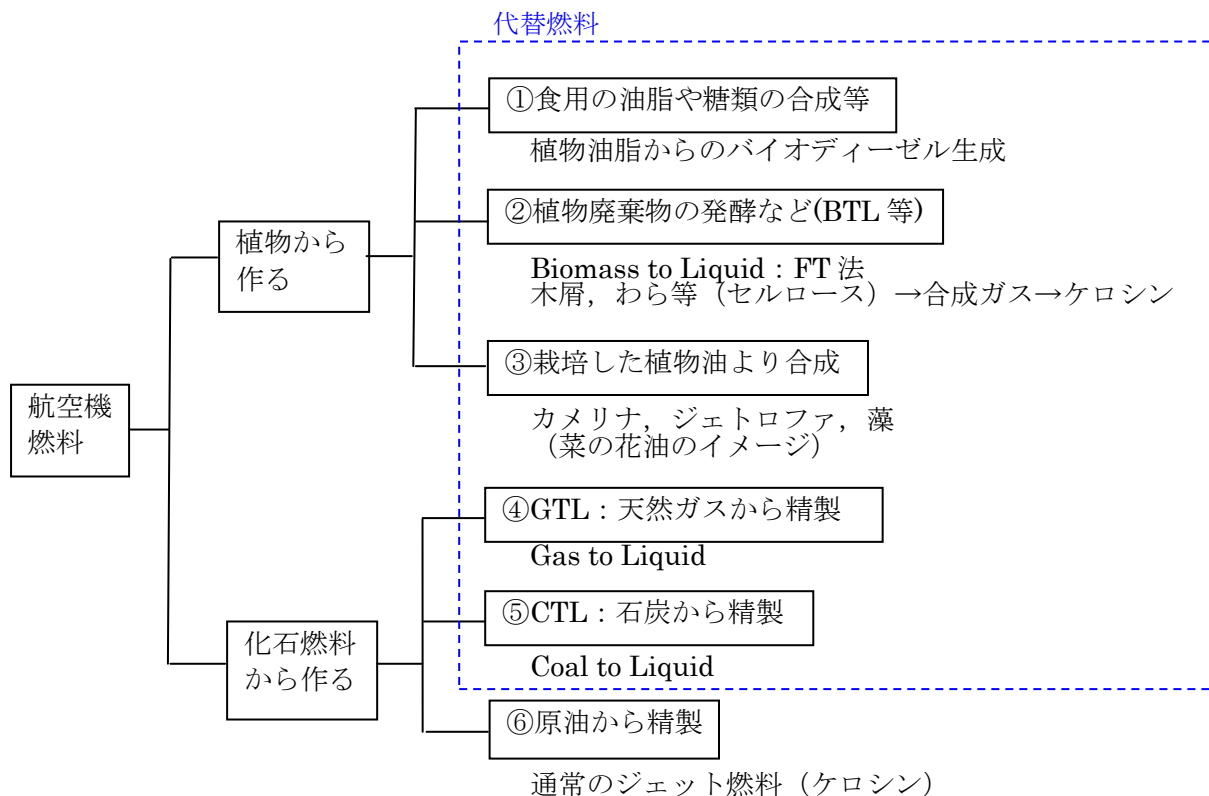


図2 航空用代替燃料の分類 (その2)

#### 4 航空機代替燃料の実用化に向けた取り組み例

前章までに、航空用ジェット燃料の将来についてのあり方が示されたが、本章では、バイオ燃料の航空機適用への試みを果たしているボーイングを中心とした取り組みについて説明する。バイオ燃料の規格準拠化に向けて、4つのエアラインによる試験飛行を実施し、関連データを蓄積している。また、FT法による合成燃料のASTM燃料準拠適合(2009年9月認証済み)を皮切りに、関連付けてバイオ燃料のASTM適合に向けた認証の取り組みを本原稿執筆時点で実施しているところである。

##### 4.1 ボーイングによるバイオフライト

ボーイング社は、4つのバイオ燃料を用いた飛行実証試験を行っている。このうち第一に行われたバージニアトランティック航空の飛行試験(エンジンはGE社製を利用;2008年2月24日実施)では、先述の第一世代バイオ燃料(ココナツ+ババス)を用いていること、また、高空での適応性(析出点)などでASTMの規格を満足していなかったため、次節に述べるASTM準拠に向けた根拠資料とはなっていない。このバージニアトランティック航空の試験を手始めに、表2に示す3つの飛行試験の計4つの飛行試験を実施している。エアラインの地域、機体・エンジンの組合せが重複せず、限られた機会に多くのパターンデータを取得できていることがわかる。また、エアラインの地域を分散させていることは、地域の代表的なエアライン(国)を選定することで、燃料導入に向けた担い手となる政府・機関関係者や世の中一般にも意識を共有することを期待してのことのようである。

また、燃料精製会社（UOP/日揮インターナショナル）との連携により、原料作物の確保から生成に至るプロセスを実際に実行し、各種試験に供している。実際の運用として、現状のジェット燃料に最大 50%の体積混合比として Drop-in Fuel の利用が想定されることを見越し、運転試験などは 50%混合燃料を基準として行われた。表 2 に示されるように、各飛行試験で用いられたバイオ燃料の原料が異なるが、各々の概要を表 3 に示す。バイオ燃料の評価試験結果については、その概要を表 1 に現用 ASTM 規格と併記して示してある。現用燃料とバイオ燃料の比較については、図 3 に示す現用燃料の構成とバイオ燃料の構成を用いて示す。現用の燃料は、約 8 割をパラフィンで構成し、その他に芳香族成分、オレフィン、微量の硫黄などが含まれる。バイオ燃料は、体積 50%を上限に混合し、パラフィン部分の代替となるものである。表 1 の比較から、現用燃料に比べ、バイオ燃料が芳香族成分を含まず、硫黄分もほとんど無いことがわかる。単純にエンジン排気の観点からすれば、芳香族成分はすすの原因であるため、その含有量が低いとすすの排出低減に寄与する可能性があり、硫黄分が少ないことで SOx 排出低減も期待できる。しかし、現状の燃料に含まれる芳香族成分の役割にも注意しなければならない。ジェット燃料を構成するために、一定量の芳香族成分が必要だが、これにはシール膨潤としての役割も含まれる。また、芳香族成分には燃料の密度を向上させる効果があり、表 1 に示されるように、選択されたバイオ燃料単独では ASTM 規格の密度要件に満たない（密度が小さい）ことから、芳香族を含む一定量の現用燃料と混合する必要がある。最近の航空機における燃料搭載量情報システム（Fuel System Quantity Indication System: FQIS）では、燃料の絶縁性を利用し燃料密度の推定から航空燃料量を算出しているが、その意味でも燃料が定められた密度範囲にあることは極めて重要である。このため、先行して認証された FT 法による合成燃料の規格において、最終的に混合される燃料の芳香族成分の最大・最小量を規定している（従来規定は芳香族成分の最大割合のみ規定）。このように適正な燃料の構成のために一定量の芳香族成分が必要であることを考えると、純粋にバイオ燃料のみに現用燃料を置換することは好ましくない可能性があるといえる。発熱量や密度といった物理特性については、バイオ燃料は ASTM 規格や現状の値と比較して、発熱量が若干高く密度が若干低い。このことは、航空機の性能改善に寄与する可能性があるが、エンジンと機体の換装をしないことがそもそもの要件なので、ASTM 規格から極力ずれないことが肝要である。

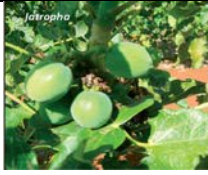

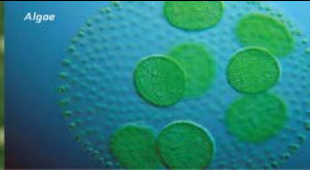
試験としては、燃料特性試験、エンジン運転試験、4 基または 2 基のエンジンの内の 1 基にバイオ混合燃料を用いた飛行試験を実施し、データを蓄積することで 4.2 に示す基準化のための評価資料と役立てられている。

飛行試験全般にわたり、バイオ燃料を用いた混合燃料について否定的なデータは出ていないという。ボーイング社は、燃料供給会社、エンジン会社、機体製造メーカー、エアラインがチームを組んでこうした取り組みを完遂出来たことに対し、今後のバイオ燃料導入に向けた前向きな成果ととらえている。

表 2 バイオ燃料フライト一覧（ボーイング実施分）[2]

エアライン	ニュージーランド航空	コンチネンタル航空	日本航空
機体	ボーイング 747-400	ボーイング 737-800	ボーイング 747-300
エンジン	ロールスロイス RB211-524G2-T	CFM インターナショナル CFM56-7B	プラットアンドホイットニー JT9D-7R4G2
原料作物	50%ジャトロファ	47.5% ジャトロファ、 2.5%藻	42%カメリナ、 8%ジャトロファ+藻
燃料供給元	UOP 社	UOP 社	日揮ユニバーサル/UOP
飛行試験日	2008 年 12 月 30 日	2009 年 1 月 7 日	2009 年 1 月 30 日

表 3 ボーイングバイオフライトに用いられたバイオ燃料原料の概要[11]

			
名称	ジャトロファ	カメリナ	藻
概要	低木の落葉樹 (南洋アブラギリ)	アブラナ科の草花	単位耕地面積あたりのエネルギー効 率が高い
用途	・実から油をとるが毒性 がある非食用 ・重油代替燃料	種子から油を絞る、ランプ油、 美容液、家畜飼料などに利用	
原産地、主栽培 地	中央アフリカ・東南アジ ア	北米・北欧・中央アジア	
その他の特徴	早魃に強く、植えて 3 年 で実がなり、10 年間、年 に 3-4 回収穫可能	乾燥地帯・痩せた土地ならびに 比較的高緯度で栽培可能	
課題	・温暖地に限定 ・現状手による収穫	・収穫量に限り ・穀物市場と関連	・コスト高
導入までの予測 年数	2-4 年	現在利用可能	8-10 年

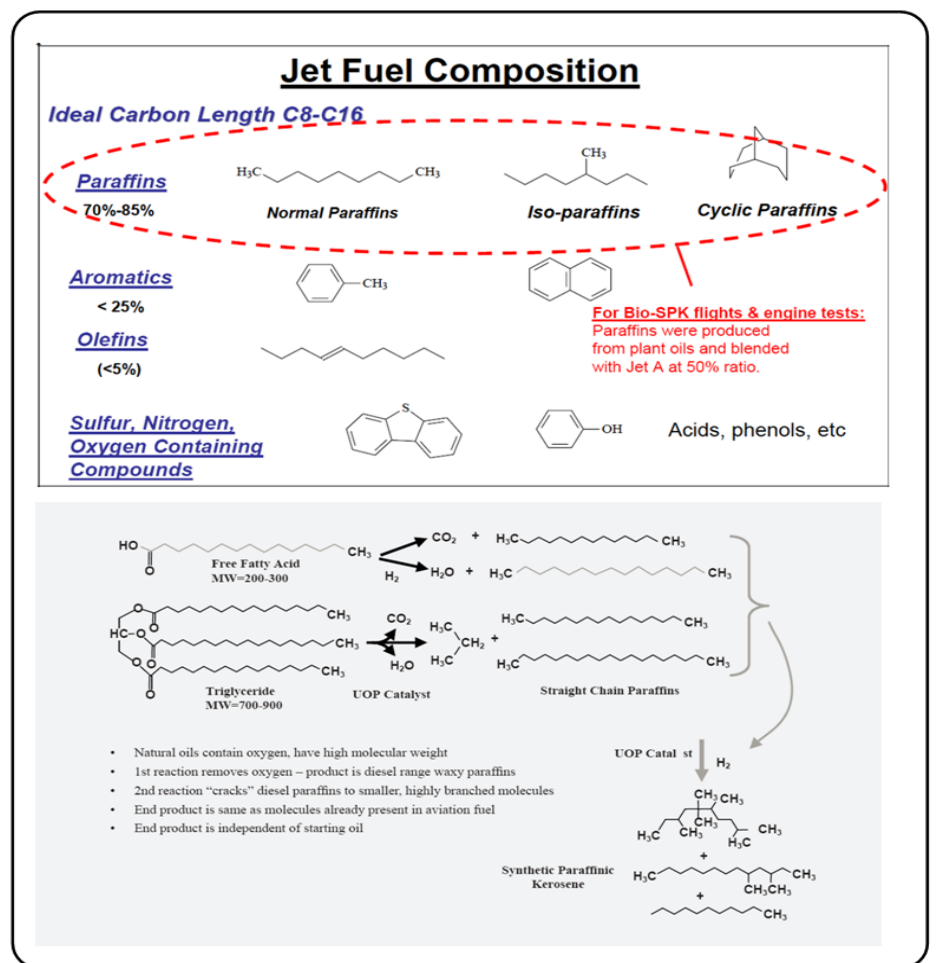


図 3 現状のジェット燃料の組成と UOP によるバイオフライト用燃料の精製過程[2][11]



## 4.2 代替燃料の基準化

先に示しているように、ジェット燃料としては、ASTM D1655 基準を満足する必要がある。バイオ燃料を含む代替燃料を実際に飛行に供するため、ボーイングを中心として取り組みがなされている。

図 4 には、既述の FT 法によるジェット代替燃料生成過程とバイオ燃料原料からのジェット代替燃料生成過程を比較として示す[12]。バイオ燃料原料からの生成としては、抽出した油脂成分である脂肪酸 3 つと三価アルコールであるグリセリンが脱水して出来たエステル（トリグリセリド）から酸素を除去し、水素添加によって燃料を得る。同図に示されるように、水素化処理の段階から FT 合成法とバイオ燃料由来の燃料の生成過程は類似しており、FT 合成法による燃料の基準化を第一段階として行った。

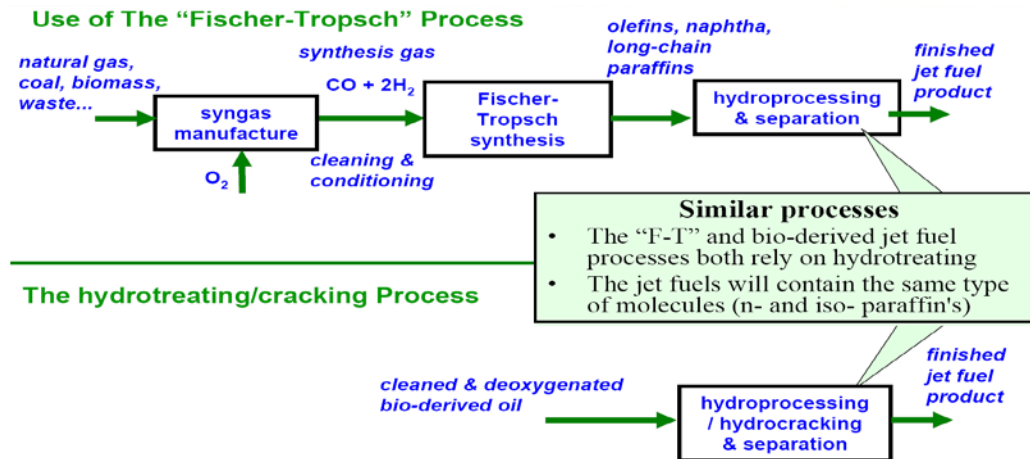


図 4 FT 法と UOP が用いたバイオ燃料（バイオ SPK 燃料）生成過程の比較[12]

燃料の認証についても、実施手順が ASTM D4054 として規定されている[2]。概要を図 5 に示す。第一段階として、FT 法による合成燃料としての認証を 2009 年 9 月に受け、ASTM D7566 として発行されている。上記のように、バイオ燃料の場合も、途中段階からの生成法は FT 法によるものと類似しているため、ASTM D7566 の記載追記の形で承認されるように、手続きが行われている。すでに参照データ 4.1 飛行試験や関連試験データにあわせ、エンジン試験などが実施され、エンジンメーカー並びにエアバス社で OEM 内部レビューを受診している段階であり、意識あわせが実施されている。その結果を受けて、最終的に 2010 年中に、ASTM D7566 のセクション A1.4.2.2 として認証を受けるべく手続きが順次進められているところである。

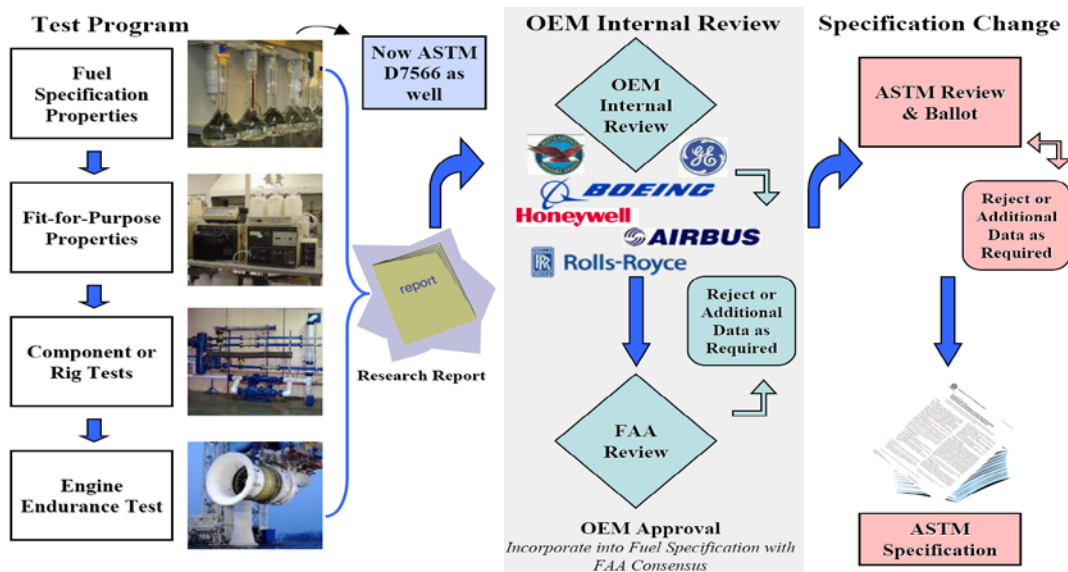


図 5 燃料の認証過程[12]

## 5 まとめ

以上本稿において、将来の航空機燃料について概説した。

現用航空機燃料は ASTM 規格により定められており、この規格に従って安全に安定した燃料供給が行われている。将来の石油エネルギー枯渇問題も含む昨今のエネルギー問題による石油に依存しない航空機燃料の模索、また地球温暖化問題に起因する直接または間接的な地球温暖化物質である CO<sub>2</sub> 低減のための代替燃料の模索が続けられている。

本稿では、中長期的な視点で望ましい航空機燃料のあり方を示しつつ、直面する上記問題を解決するために導入が検討されているバイオ燃料の概要、その導入に向けた取り組みについてトピックを選んで紹介している。

技術革新のみで航空機からの排出 CO<sub>2</sub> を削減させることには限度があり、中・長期的視点にも立った検討・技術革新の進捗を加速させるとともに、現実的な選択としての持続可能なバイオ燃料などの導入、排出権取引の実効的な運用などが求められるといえる。バイオ燃料の航空燃料としての規格が今年（2010 年）中の認証化を目指して取り組まれており、早ければ 2011 年か翌年にはバイオ燃料が市場投入される可能性がある。補遺において参考にまとめた国際的な枠組み・規制の枠組み動向をにらみつつ関連業界は重要な地球環境問題の一つである CO<sub>2</sub> 排出抑制に向けた具体的かつスピーディな取り組みがなされている一面を認識いただき、航空分野での幅広い環境負荷低減に向けた取り組みの強化とその幅広い理解を願うものである。

## 6 文献

- [1] Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, ASTM D-1655-08a, ASTM International.
- [2] Rahmes, T. F., Kinder, J. D., Henry, T. M., Crenfeldt, G., Leduc, G. F., Zombanakis, G. P., Abe, Y., Lambert, D. M., Lewis, C., Juenger, J. A., Andac, M. G., Reilly, K. R., Holmgren, J. R., McCall, M. J. and Bozzano, A. G., Sustainable Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene (Bio-SPK) Jet Fuel Flights and Engine Tests Program Results, AIAA 2009-7002, 9<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO) (2009).
- [3] Daggett, D., Hadaller, O., Hendricks, R. and Walther, R., Alternative Fuels and their Potential Impact on Aviation, NASA/TM-2006-214365 (2006).
- [4] 林希一郎, 土田和寛, 隈部和弘, 長谷川達也, 航空代替燃料としての CTL, GTL, BTL の比較研究, 環境情報科学論文集, 23, 227-232 (2009)
- [5] 水素燃料航空機検討調査会, 水素燃料航空機の国内外検討調査, 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-08-005(2008).
- [6] News Release, Boeing Successfully Flies Fuel Cell-Powered Airplane, ボーイング, 2008 年 4 月 3 日.
- [7] DLR Portal release, DLR motor glider Antares takes off in Hamburg – powered by a fuel cell, 2009 年 7 月 7 日.
- [8] Colloer, F., Subsonic Fixed Wing Project, N+3 (2030-2035) Generation Aircraft Concepts – Setting the Course for the Future, presented in Aviation and Alternative Fuels Workshop, ICAO, Montreal, 2009 年 2 月 11 日.
- [9] Okai, K., Yanagi, R., Tagashira, T., Nomura, H., Aircraft Propulsion System, United States Patent US7555893, 2009 年 7 月 7 日.
- [10] The IATA Technology Roadmap Report 第 3 版, 2008 年 6 月.
- [11] Beginners Guide to Aviation Bio Fuels
- [12] Kinder, J. D., Alternative Fuels, presented in Boeing Bio Fuel Workshop, Tokyo, 2009 年 10 月 27 日.

## 補遺 我が国国内航空における温室効果ガス低減に向けたとりくみと国際航空における ICAO における基準策定の動き（排出権取引に関連して）

4.2 で述べたような燃料規格の制定は、航空用燃料としての導入にあたり必要条件であるが、新しい燃料の導入には、価格面での利点やその他政策的な規制による必要性が背景として求められる。バイオ燃料は先に述べたように、京都議定書で言うところのカーボンニュートラルに該当し、排出権取引の対象としうるものである。現在、航空機から排出される CO<sub>2</sub> は、世界全体の排出量の 2%程度であり、その内国際航空による CO<sub>2</sub> 排出量は航空全体の約半分、つまり世界全体の排出量の約 1%程度である。国内航空については、1997 年に締結された京都議定書の目標達成計画において 1995 年を基準に全航空会社などに対して 2010 年に温室効果ガス排出約 15% 減（エネルギー消費原単位ベース（L/人キロ））が定められており、改正省エネ法でも 2006 年を基準に有効トンキロ（Available Tonne Kilometre: ATK）ベースで最大離陸重量 9000t 以上の会社に対して 3-5 年間で年 1%低減を定めている。その他、経団連環境自主行動計画や、全日本空輸、日本航空も独自の削減目標を定めているところである。国内航空会社は、環境への取り組みとして様々な自主的取り組みを進めているが、日本航空は 4.1 に記したようにバイオ燃料フライトに協力をしている。2008 年 9 月にボーイングを中心に結成された持続可能な航空用燃料ユーザーグループ（Sustainable Aviation Fuel Users Group）には、国内航空会社として日本航空に加え全日本空輸も参画している。

排出権取引を含む CO<sub>2</sub> 排出規制の動向は国際航空によるところが大きいため、本章では ICAO を中心とした国際航空に関する事項に限定する。京都議定書の段階で、国際航空に関する CO<sub>2</sub> 低減に係る環境規定は ICAO によるものとされているが、その後の進展について、執筆時点での現状をここで概説する。なお、ICAO における議論の包括的なレビューとしては、[A1]がある。

### A.1 国際航空での排出量規定のあり方と GIACC 設置への経緯

温室効果ガスとしての CO<sub>2</sub> 削減目標に関する京都議定書の記述では、国際航空からの温室効果ガスの排出量低減については、国連の専門機関である国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization: ICAO）を通じて活動すると定められており、国毎の削減目標の対象外とされている。そこで現時点では ICAO の活動ならびに決定が政策レベルとして一番重い位置づけを与えるものとなる。

京都議定書の決定に従い、ICAO は、既存の委員会において一定の活動を行ってきたが、10 年間で得られた成果は限定的であった。このような状況下で、環境問題の取り組みに積極的な欧州連合 EU は、2006 年末までに欧州発着の航空会社を EU 独自の排出権取引制度（European Union Trading Scheme: EU-ETS）に一方的に組み込む提案を行った。これに対して、ICAO では当時相手国との合意を前提とする別の枠組みの策定段階にあったため、米国・日本等の参加国は EU の提案に反対した。

こうした事態を受け ICAO は、2007 年 9 月の第 36 回総会の決議として、1)国際民間航空条約に「非差別原則」と京都議定書に基因する「共通だが差異のある責任 (common but differentiated responsibilities and respective capabilities: CBDR)」の両方の原則を尊重すべきこと、2)国際航空に関する燃料効率性ベースの世界的な意欲的目標を定めるなどの「行動プログラム」を策定すること、3)排出権取引を外国の運航者に適用する場合には当該国との合意を必要とすること、を決議した。3)について EU は留保している。このうち、2)の具体策を検討するため、審議官クラスをメンバーとするハイレベルなグループを設けることとし、これが GIACC（Group on International Aviation and Climate Change）である。

ここで「燃料効率性」指標 (fuel liter/RTK) は、燃料消費量について、各国間の隔たりが少ない値として燃料消費量を RTK で除した値として導入が提唱されたもので、我が国が各国の利害を調整するために積極的に提案した経緯がある。

## A.2 GIACC 最終報告書

2009年6月にICAO理事会に提出されたGIACC最終報告書は行動プログラムと議長サマリーからなるが、GIACCとしての合意が得られているのは前者のみである。この行動プログラムの主な項目として、①短期・中期・長期の目標設定、②GIACCが策定した政策バスケットの理事会での採択と深化の提言、③各国による自主的な行動計画の策定、策定・提出の勧告、④市場ベースの処置に関する申し送り、⑤ICAOに対する要請、がある。④の市場ベースの処置として、排出権取引に関する議論も行われているが、結局各国の調整が不調で合意には至っていない。以下では具体的な目標としての①を概説する。

目標としては、2012年、2020年、2050年をそれぞれ短期、中期、長期の目標年とし、いずれもそれまでに世界全体の燃料効率を年2% (Litre/RTK ベース) 改善することを掲げている。ここで、年2%の燃料効率改善を実施すれば、2005年比で短期(2010-2012年)に13%、中期(2013-2020年)に26%、長期(2021-2050年)に約60%の燃料効率改善を達成することになる。GIACCの目標は京都議定書と異なり、目標達成に向けた法的拘束力はない。また、京都議定書は、CBDRの原則により、気候変動に関する国際連合枠組み条約附属書I国に掲げられた日米欧などの先進諸国中心の締約国が目標達成義務を負っており中印は含まれないのに対して、GIACCの目標では広く締結国の履行を目指すものの各国別の割り当てを定めることが困難との理由から、締約国全体の目標として定められている。

## A.3 COP15 と今後の見通し

2009年6月にICAOのGIACC最終報告書が提出されているが、同時期には、IATAが、独自の排出目標設定に関する提言を行っている[A2]。

IATAの掲げる目標はICAO-GIACCにおけるのと同じように、短・中・長期の目標を掲げており、短期(2009-2020年)には年平均1.5%の燃料効率改善、中期(2020-2050年)には、炭素中立的な成長(Carbon neutral growth)を達成、長期(2050年-)には2005年比で50%のCO<sub>2</sub>排出削減達成、というものである。ICAO-GIACCにおける目標との主な相違は、当面の削減目標を低く定めている(2%→1.5%)ことと、炭素中立的な成長を明示していることである。GIACCにて、炭素中立的な成長も議論されたが、合意には至らなかったことが最終報告書に記されている。政治的な拘束力を決定するために一番近い立場にあるICAOに対して、IATAは業界団体として協力体制を維持しながら、現実的な目標策定に対する提言を行う立場にあるといえる。IATAは業界団体として先進国主導だが、ICAOは途上国も含むために両者では多少の考え方の相違はあるものの、お互いの協力関係は実効性のある基準策定等にとって前提になると考えられる。

A.2に示したGIACC最終報告書は、2009年6月にICAO理事会にて提出された同内容で承認されており、さらに10月のハイレベル会合にて追認された[A3]。このハイレベル会合における追認は、ICAOの理事会総会開催が2010年であり、ポスト京都議定書の議論に供される期待のある2009年に開催されたUNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change:気候変動に関する国際連合枠組み条約)のCOP15(Conference of Parties:第15回締約国会議)に向けてICAOとして出来るだけ高いレベルでの提言とする狙いがあった。ただ、実際のCOP15においては、各国の利害対立などの理由から、主要国の首脳が合意したコペンハーゲン合意(Copenhagen Accord)を「留意(Take note)」するという形で纏めるに留まり、国際航空を含む各論の議論には至らなかった。これを受け、ICAOは、各論としての議論には至らなかったものなお(京都議定書以来)国際航空に関するICAO自身の役割が保たれ、現状ICAOの提言(GIACC最終報告)が航空分野におけるCO<sub>2</sub>排出低減への最善の道であり、以後継続的に取り組みがなされる旨表明された[A4]。また、IATAも引き続きICAOのハイレベル会合の結果の支持、IATA自身の目標設定の履行、2010年9月に予定されるICAOの総会にて枠組み作りに協力しその結果が次回のCOP16にて案として提示されることを確認するとともにICAOの枠組みの下でのグローバルなスコープのセクター・アプローチを基本的立場として示し一部の地域内での解を批判する旨表明している[A5]。

4.2 に示したように、基準準拠に向けた取り組みの進む航空用バイオ燃料については、ICAO において最近の表明[A4]において航空分野がグローバルなレベルで持続可能な代替燃料を使用する最初のセクタになる可能性を示すなど期待感を表明しており、IATA 事務局長も、昨年(2009年)12月の講演において温暖化ガス排出低減に向けた取り組みとして、炭素中立的な成長とその後の排出量削減の有力な達成手段として図 A-1 に示すように持続可能なバイオ燃料の導入に言及している[A6]。

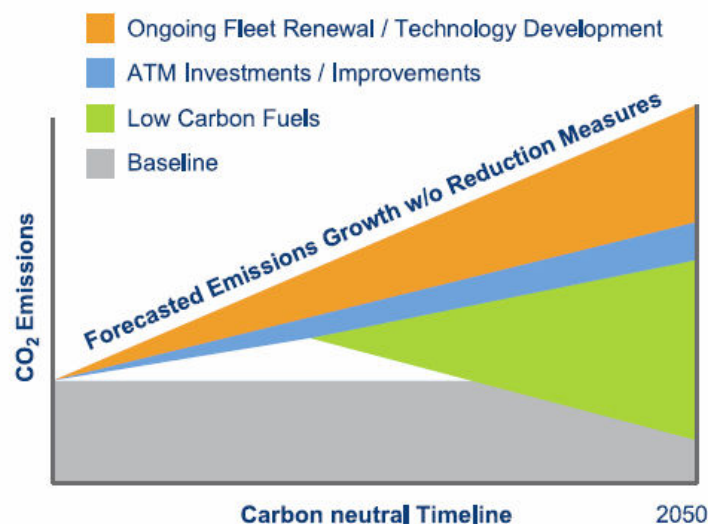


図 A-1 IATA の示す CO<sub>2</sub> 排出低減に向けた目標と達成手段 (本文中参考文献[10])

京都議定書においては、国別に目標が定められ、国内線のみが枠内であったのに対して、現状 ICAO で議論されているものは国際線の扱いにまで及んでおり、IATA は全般として国境主義を採らず、グローバルなスコープのセクトラル・アプローチによることを提言しているが、ICAO における議論の進捗を見ると、各国合意のある目標設定を定めるのは容易ではないと思われる。ICAO において議論が纏まり難い要因は、京都議定書において目標達成義務を負うのは日米欧先進諸国であったのに対して、現状では中国が CO<sub>2</sub> 総排出量首位 (2 位は米国) であって中国を含む各国が何らかの目標達成を求められていないこと、また、ICAO においては従来の非差別原則に加え京都議定書に基因する CBDR の原則、というお互いに矛盾する原則を尊重することにしておりそもそも各国合意を取ることが難しいことが原因と考えられる。

先述のように、EU では、EU 域発着の航空運航を EU-ETS に組み込むことにつき、すでに 2008 年 11 月に EU として加盟各国の法制化指令書 (Directive 101) を採択し、2010 年 2 月までに各国法制化手続きをとることになっている。その内容としては、航空部門は 2012 年から EU-ETS の対象となり、航空部門の排出量上限目標 (キャップ) は 2012 年には、2004-2006 年平均の 97%とし、次年度以降は 95%に下げられる (見直しの可能性あり)。2012 年には、各航空会社は、排出可能単位の 85%を無償で割り当てられる (15%はオークションでの購入を義務化)。超過分は排出権を購入することとなる。無償割り当て割合も引下げ見直しの可能性がある。とするものである。

今後の動向としては、ICAO は引き続き COP16 に向けて政府間合意としての規制策定に努力するとともに、IATA や ATAG (航空輸送アクショングループ) など航空関係団体との緩やかな連携を通じて、航空分野の開発企業や運航事業者等が中長期的視野に立ち自発的な取り組みを期することになるものと思われる。一方で EU では、2012 年に EU 地域に発着する航空運航を EU-ETS に組み込むとの指令が発効しており、米国でも排出権取引を内容とする方案が審議されている状態である。日本においても CO<sub>2</sub> 排出の 1990 年比温暖化ガス排出 25%低減を 2020 年に達成することを国際公約しており、いまだ具体的な規定が明確になっていない排出権取引についても動向に注意を払う必要がある。

### 補遺の参考文献

[A1] 日原勝也、岡野まさ子、鈴木真二、解説「国際民間航空と地球環境問題～ICAOにおける最近の議論と今後について～」、日本航空宇宙学会誌 57 巻 670 号、2009 年 11 月号。

[A2] Bold Industry Commitment on Environment, Carbon-Neutral Growth by 2020, Press Releases and Briefs, IATA, 2009 年 6 月 8 日。

[A3] ICAO News Release, States affirm intent to work through ICAO in tackling climate change, PIO10/09 (2009)

[A4] ICAO News Release, ICAO forcing ahead with plans to curb greenhouse gas emissions from international aviation, PIO16/09 (2009)

[A5] IATA Press Release, Copenhagen Agreement Step in Right Direction – Aviation Strengthens Commitment to Tough Targets, IATA Press Release No. 56, 2009 年 12 月 20 日。

[A6] Speeches, Remarks of Giovanni Bisignani at the Royal Aeronautical Society, Montreal, IATA, pressroom / speeches, 2009 年 12 月 1 日。