

エレクトロニクス実装技術誌の面白話題一2

JAXAの開発が進むロケット技術の数々、環境対策の切り札として開発中の電動航空機や航空の安全性向上技術、鉄道ではリニアモーターカーなどの技術革新を紹介します。注目話題として、**ジェット機のジェットエンジンは、爆発した気体を噴射して進む？ それは一昔前の話です。リニアモーターカーは、飛行機の種類です。**

目次

1. 開発進む宇宙ロケット技術———— P 1
2. 航空機の安全性、電気飛行機の技術開発—— P 9
3. リニアモーターカーは飛行機か？———— P 1 5

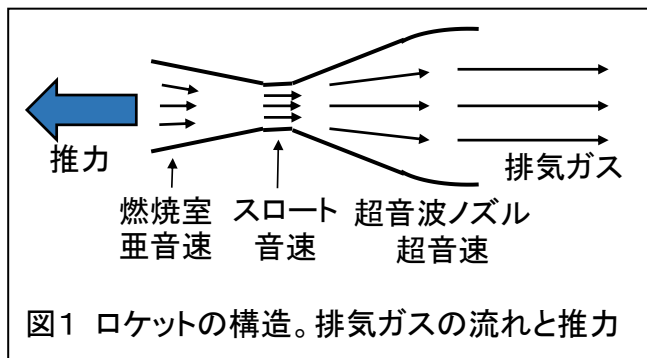
開発進む宇宙ロケット技術

相模原にある宇宙航空研究所開発機構(JAXA)の宇宙科学研究所を訪問し、ロケット技術について取材した。「はやぶさ2」を小惑星まで運ぶのに、固体燃料ロケット、液体燃料ロケット、イオンエンジン(電気推進ロケット)などが使われたので、それらのロケットにどんな技術が用いられているかを報告する。

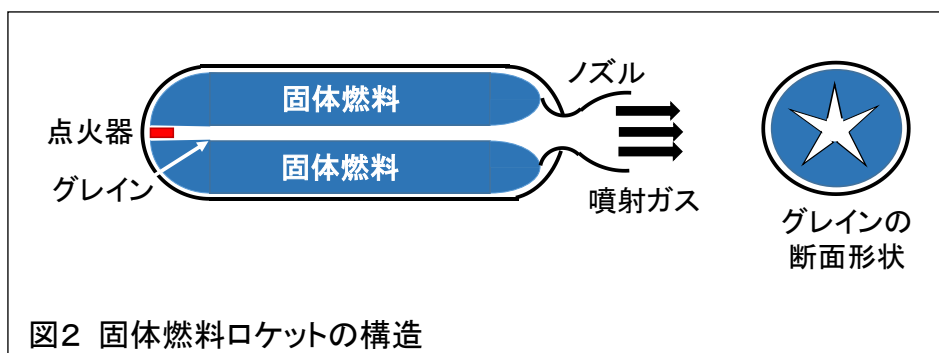
1. 固体燃料ロケット

まず、ロケットの形状について考えてみよう。ロケットは、排出されるガスの反動で推進されるので、排出ガス量が多くて排出速度が大きいほど大きな推力が得られる。運動方程式では、 $\text{推進力} = \text{ガス量} \times (\text{排出速度})^2$ となり、排出ガスの流れをできるだけ高速にするため、ロケットの構造は、図1のように先細り管と末広がり管を組み合わせた構造になっている。

ここで少々難しい話がある。私達の日常では、太い管から細い管に気流が流れると流速は早くなる。川の流れでも狭いところほど流れが速い訳である。ところが、圧縮性のある流れになるとこれが逆になり、狭いところで減速し、広いところで加速する。筆者は今一つこの理屈が分かりませんが、面白い説明をしてもらった。自動車でも4車線の道路が2車線のトンネルに入ると車の速度は遅くなるが、そこを過ぎて6車線に広がると速度が速くなる。この原理をラバールノズルと言って、ロケットの形状は図1のように末広がりラバールノズルになっている。



固体燃料ロケットの燃料は、燃焼温度を高めるためアルミニウムの微粉末、酸化剤として過塩素酸アンモニウム、バインダーとしてポリブタジエン合成ゴムが用いるのが一般的で、JAXAのイプシロンロケットに使われている固体燃料もこの組み合わせである。ポリブタジエンは、 $-\{CH_2-CH=CH-CH_2\}-$ の高分子で、勿論燃料となる。これらを十分に攪拌して均一化して容器に流し込み詰める。巨大な燃料であるが、燃焼面積を広げるため図2のように中央にグレインと言う貫通孔が開けてあり、上から下までほぼ同時に着火できるように小型ロケットとも言うべき着火機器が設けられている。また、単なる円形の貫通孔では燃焼が進むにつれて表面積が拡大して、最初と最後では推力に大きな差ができてしまう。そこで、図2右のように断面が星型になっている。(この形は単純な星型でなく、企業秘密だそうである)。ロケットは地上に近いところでは重力の影響を大きく受けるので、なるべく早く重力の影響を脱するように、最初から大きな推力で上昇する方が有利である。点火には、電気によるエネルギーによって小さな火薬を発火させる。燃焼は $3000^{\circ}C$ 程度の高温となる。進行方向の変更には、噴出ノズルの角度を変えて行うことができる。



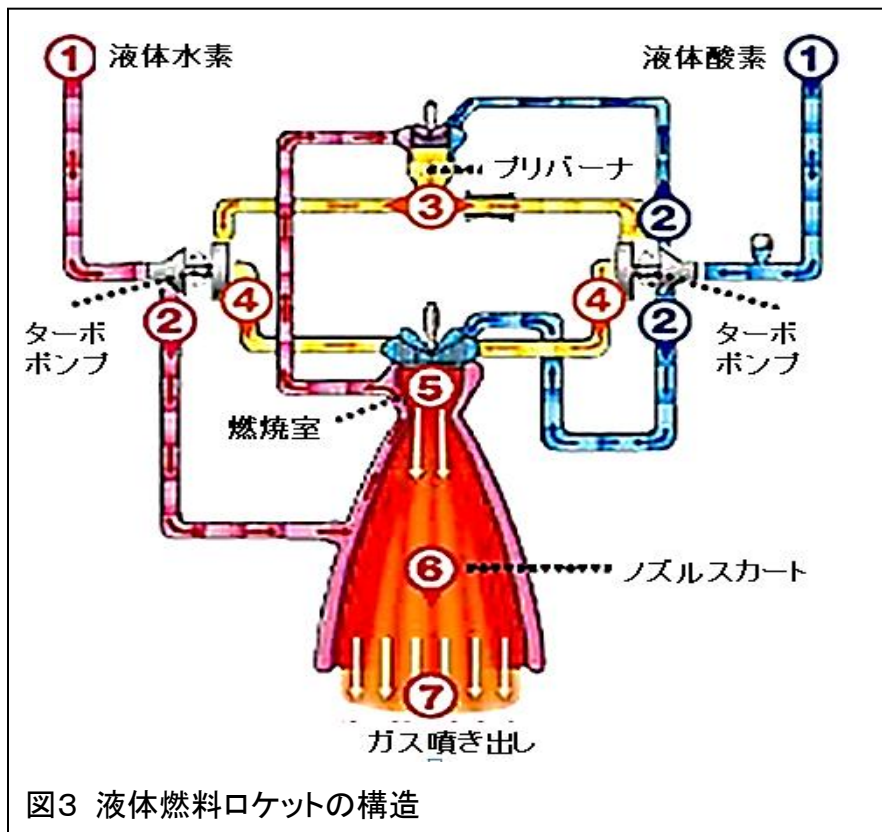
2. 複雑な構造の液体燃料ロケット

燃料となる液体水素やメタンと酸化剤となる液体酸素を、エンジンの燃焼室で適宜混合して点火し燃焼させて推力を発生させるロケットである。液体水素と液体酸素を混合・点火する機構の例を図3に示す。燃焼過程はかなり複雑で、液体水素と少量の液体酸素を小型の燃焼室のプリバーナーで燃焼させ、その高温ガスによってタービンを

駆動し連結されたターボポンプを回す。それぞれのターボポンプでは、液体水素と液体酸素に圧力を掛けて高圧の燃焼室へ送り込む(約20MPaまで昇圧)。ターボポンプは極低温で動作しなければならない上に、駆動タービン側は高温になるため、極端な温度差の環境で確実に動作する信頼性が求められ、ターボポンプの設計は非常に難しく、各国のノウハウとなっている。

図4は、真空ポンプ用のターボポンプの構造であるが、液体材料を濃縮する場合もほぼ同様なので参考までに載せておく。液体水素の圧縮用ターボポンプでは、回転数が700/sec(数値の間違いではありません)と言うから物凄い。

液体水素は沸点が -253°C (20°K)と言う極低温の燃料なので、燃料タンクには断熱を施さねばならず、極低温による金属の収縮、脆化を考慮しなければならない。しかも極力軽くする必要があり、アルミニウム合金製のタンクの厚さはわずか2~3mmと聞いてびっくり。巨大なタンクは壊れないように、図5のような三角型リブが入っている。燃料対ロケットの重量比は、缶ビールの缶対ビールの比と同じ程度だそうで、重量のほとんどは燃料である。噴射される燃焼室やノズルは極めて高温となるので、液体水素の通った配管をぐるぐる取り巻いて冷熱する構造になっている。ノズルからの噴出速度は 4km/sec と言う高速である。液体燃料は一般に燃焼ガスの平均分子量が小さく、固体燃料に比べて相対的に推力は小さいが、推力が可変、燃焼停止や再着火などの制御を行うことができる。ただし、構造が複雑になり、打ち上げまでの点検作業も大変であるが、打ち上げた後の増速量の制御などは簡単である。



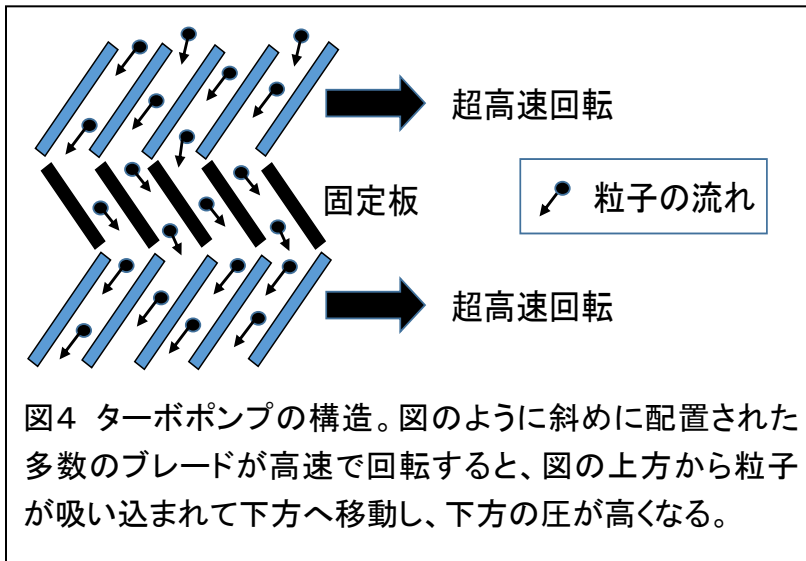


図4 ターボポンプの構造。図のように斜めに配置された多数のブレードが高速で回転すると、図の上方から粒子が吸い込まれて下方へ移動し、下方の圧が高くなる。

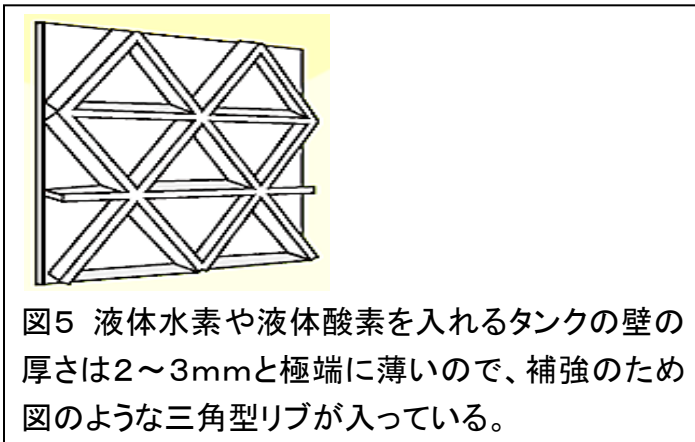
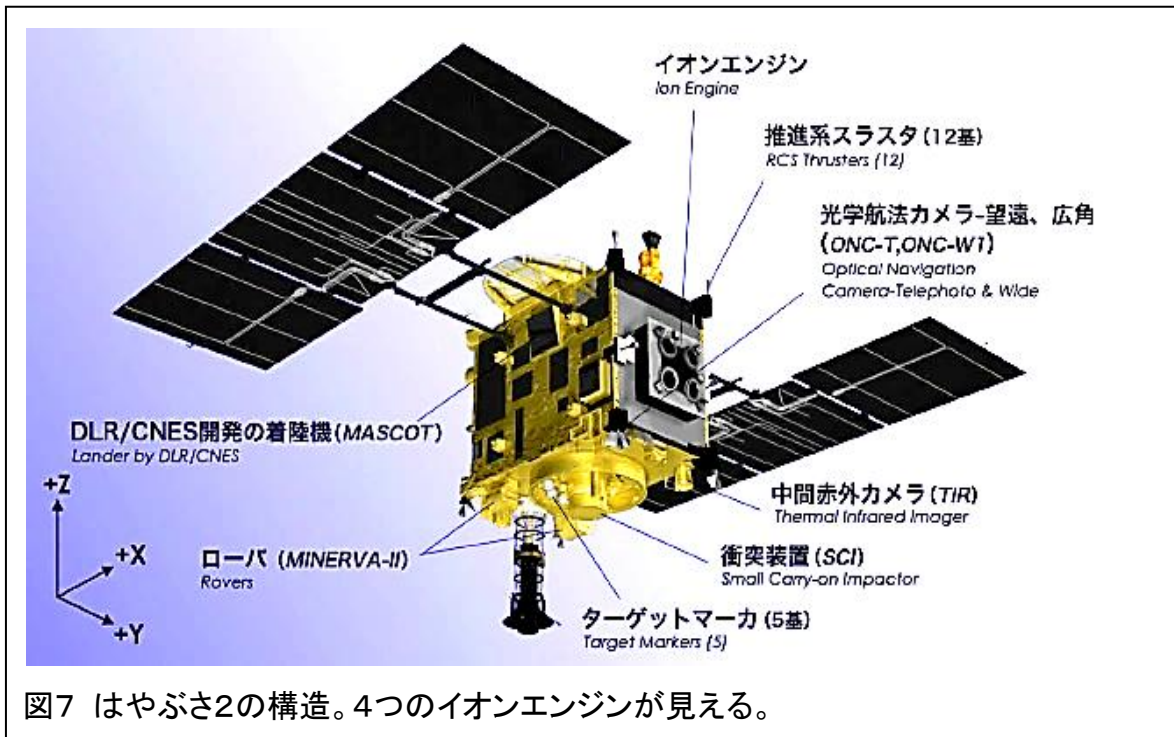
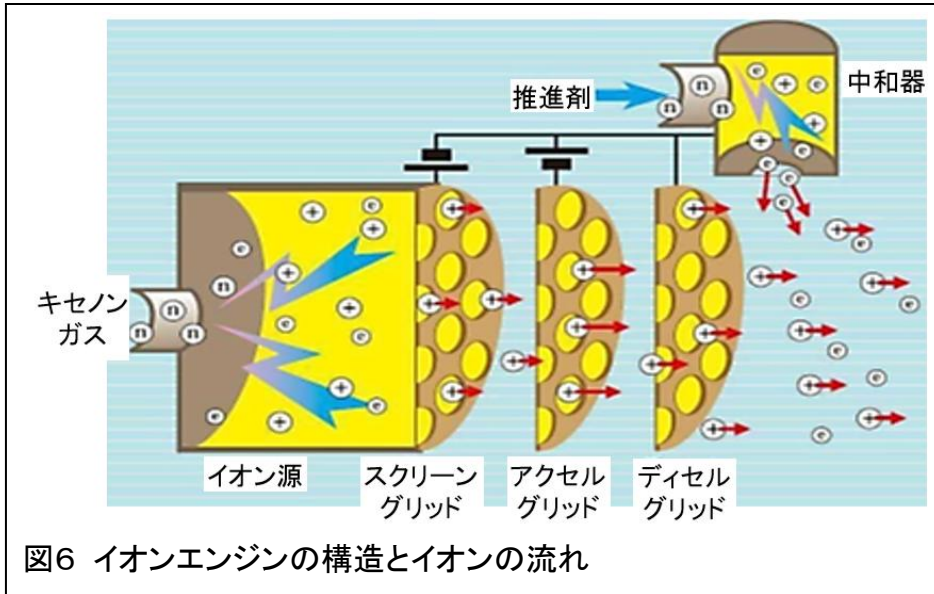


図5 液体水素や液体酸素を入れるタンクの壁の厚さは2～3mmと極端に薄いので、補強のため図のような三角型リブが入っている。

3. イオンエンジン(電気推進ロケット)

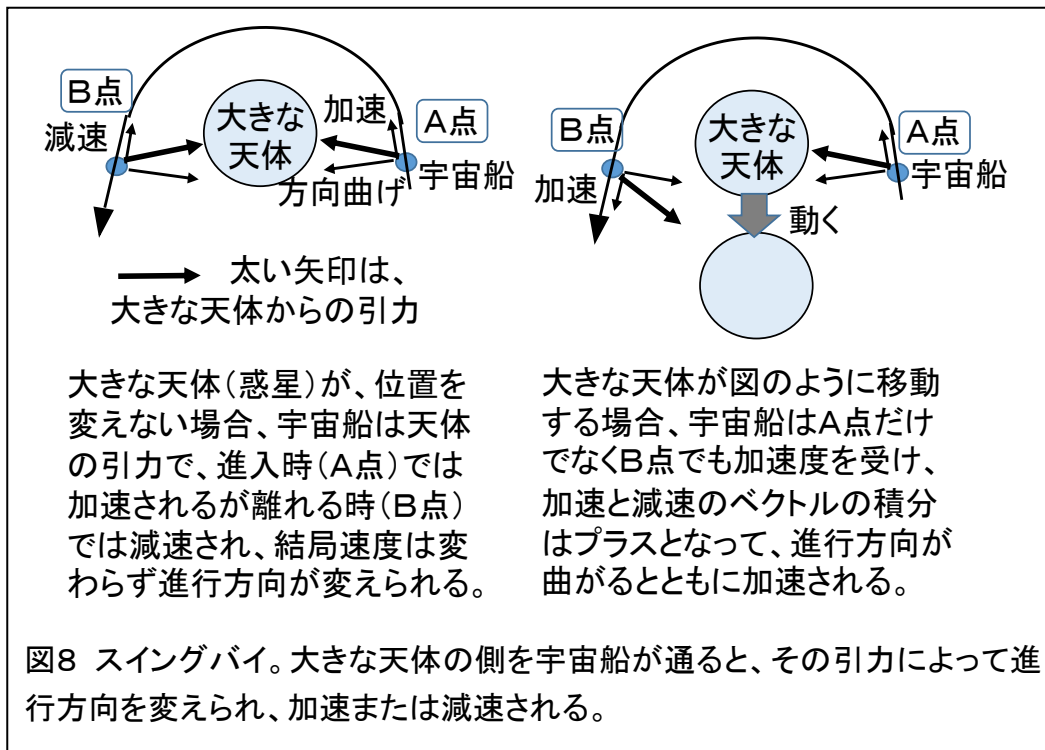
「はやぶさ」でも「はやぶさ2」でも、宇宙を航行するのにイオンエンジンが活躍したことはご存知でしょう。イオンエンジンは、探査機上のように限られた電圧下では液体燃料や固体燃料のロケットに比べれば、はるかに少ない推力しかないが、数万時間とか長い期間にわたって使用することができ、燃費が良いため惑星間の航行や静止衛星の軌道維持に用いられる。図6がその構造で、キセンのような不活性ガスを高周波の電磁エネルギーでプラズマ化してプラス電荷のキセノンイオンと電子を発生させる。プラスイオンは、図6のように1.5kVの電圧で加速され、電子で中和した後、高速ガスとなってノズルから噴出される。

「はやぶさ」が小惑星に着いた時、上空から撮影し更に着地・離陸するためには極めて微妙な動きを制御したり、瞬間的な推力を出す必要がある。これには、イオンエンジンでなく、スラスタと呼ばれる化学燃料(ヒドラジンなど)の噴射が用いられる。「はやぶさ2」では12個のスラスタで姿勢制御されている。図7は、「はやぶさ2」の写真で、4つイオンエンジンが見える。



4. 燃料不要で加速・減速;スイングバイ

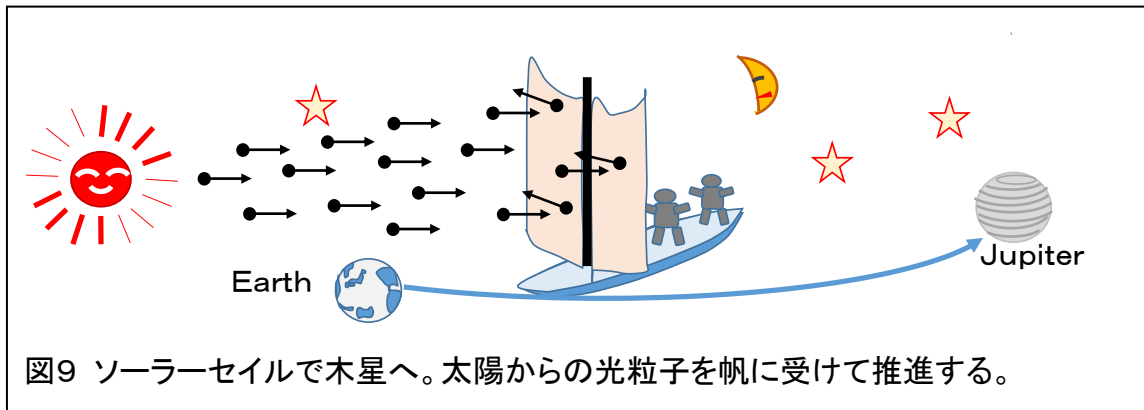
地球のような大きな天体の側を小さな宇宙船が通ると、天体の引力によって軌道が変えられる。更に上手い条件を選べば、加速や減速することもできる。これをスイングバイと言ってはやぶさ2でも利用されている。図8にスイングバイの原理を示す。



4. 今後の夢、KEANOS

宇宙の仕事は夢一杯で話題豊富であるが、ここではソーラーセイルを取り上げてみよう。「皆さん、光は波ですか？粒ですか？」そんな議論が過去には永年行われたが、現在の物理学では、光は波の性質もあり、粒の性質も持っているとされている。その粒の性質を利用したのが、ソーラーセイルである。水上のヨットが帆に空気の粒子の運動エネルギーを受けて動くように、宇宙船でも帆に太陽からの光の粒子の運動エネルギーを得て推進できる。すでに2010年に金星を通る「イカロス」で実験は成功している。

JAXAが計画している次の宇宙ヨットは、帆の大きさが50m角と言う大きなもので、極薄のポリイミド樹脂の上にアルミニウムの薄膜を張って光の反射率を良くしている。この巨大な帆に太陽電池を貼り付け、その電力でイオンエンジンを動作させることも併用されて、地球から7.5億kmもある木星圏まで行こうと言う訳で、「OKEANOS」と名付けられており、図9にポンチ絵を描いてみた。木星の近くになると太陽から非常に遠いので、光のエネルギーも弱くなってしまうが、それまでに受けたエネルギーの積分値はかなり大きい。海上のヨットの場合は、帆に受けた力と海面からの反作用がつりあって一定速度になるが、宇宙のソーラーセイルの場合は、真空中の航行なので帆に力が加われば、その積分値で加速されるので、微弱な光エネルギーだけでも徐々に大きな値となり実用になる。



最後にJAXAが世界に誇る液体燃料ロケットHⅡ-Bと、固体燃料ロケット・イプシロンを紹介しよう。HⅡ-Bは、液体燃料ロケットが2段になっており、先端は積み荷(ペイロードと呼ばれる)である。第1段の側面には、4個の固体ロケットがブースターとしてついており推力を向上させている。1段目と2段目のつなぎは、外部から輪を締め付けて固定されている。切り離すときには、輪の一部を爆破する。ロケットの重量に対してペイロードの重量比は、通常1%とか極めて小さい。振動を与えないように非常に神経を使っている。HⅡ-Bの全長は57mで諸外国のロケットとほぼ同じであり、衛星打ち上げ能力8トンの世界の最高に近く、宇宙船に物資を運ぶ「こうのとり」に使われている。これまでの打上げ成功率は、HⅡ-Aと合わせて46回で45回成功しており、世界の主なロケットの中では最高の成功率となっている。また、HⅡ-A/Bの後継となるH-3ロケットの第1段に使われる新型エンジンであるLE-9が開発されており、2020年には実用化される。

イプシロンは3段の固体ロケットで、全長26mと小型であるが強力な推力で、かつHⅡ-A/Bのブースターとの部品共通化などで安価に製作できるJAXAが世界に誇るロケットである。世界的に小型のペイロードの需要が増える傾向にあり、その対応に適している。

図10に、HⅡ-Bとイプシロンの勇姿を載せる。

宇宙関係のビジネス規模が数十兆円になり、益々発展すると言われているが、その基本となるのは優れたロケットであるから、今後もJAXAのロケット技術開発に期待したい。

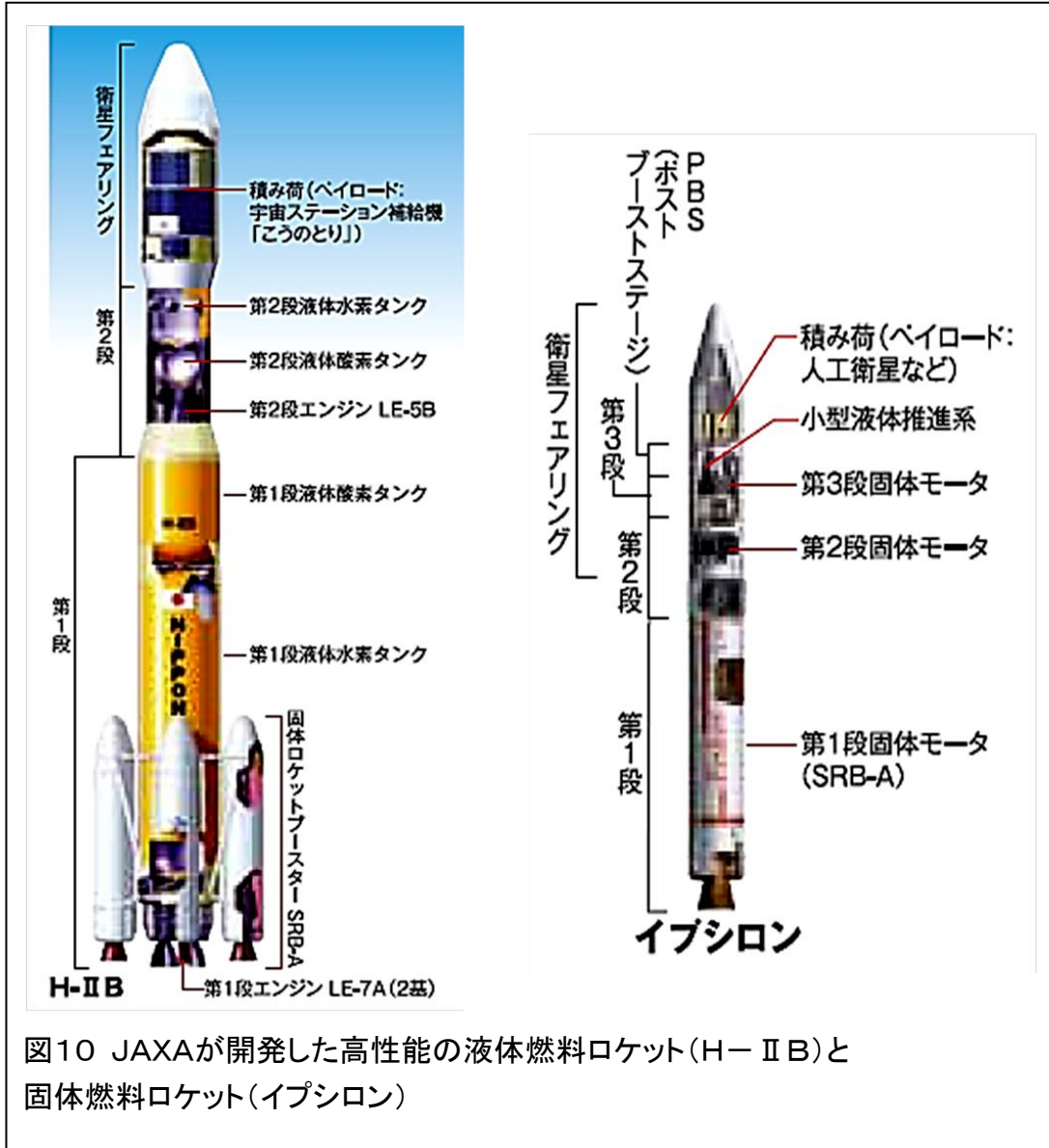


図10 JAXAが開発した高性能の液体燃料ロケット(H-II B)と固体燃料ロケット(イプシロン)

航空機の安全性、電気飛行機の技術開発

JAXAの正式名称は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構であって、宇宙に関する研究だけでなく航空についての研究も活発に行われている。エンジン系統の話題、航空の安全、環境対策、次世代の航空機など、興味ある話題を取り上げて紹介する。

1. ジェットエンジンの改革

航空機のエンジンは、地球温暖化の対策、環境基準の強化などのため、燃費が良く、CO₂(二酸化炭素)やNO_x(窒素酸化物)等の排出量の削減が求められている。今後20年間で航空輸送量が約2倍に増加すると予測される中、次世代エンジン技術の開発によって、環境に対する社会的ニーズに対応するとともに、我が国の航空エンジン産業の国際競争力を強化するための研究が行われている。

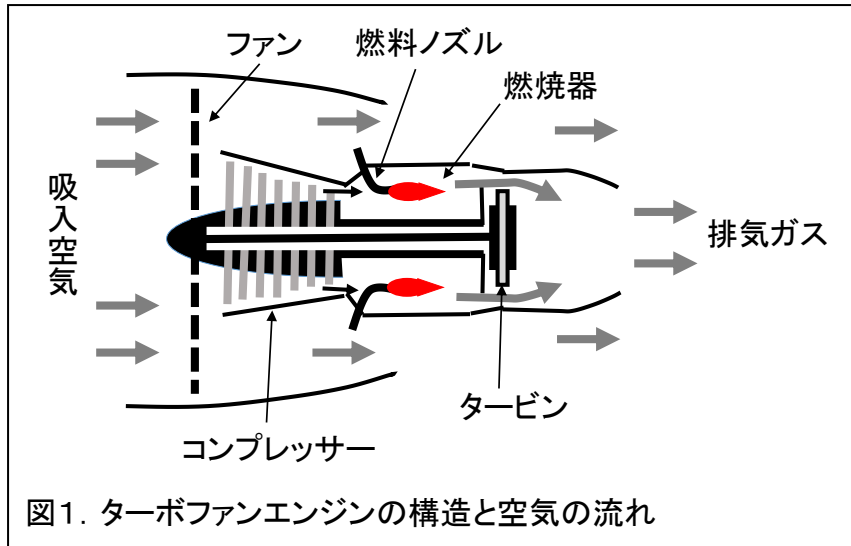
1-1. ターボファンエンジンの構造

現在の大型ジェット旅客機は、ほとんど全てターボファンエンジンを搭載している。そこで、ご存知かも知れないが、まずターボファンエンジンの構造と動作を図1で簡単に説明しよう。ターボファンが発明される以前は、歴史的にはファンのないターボエンジンであった。図1のコンプレッサーで空気が30倍ほど圧縮されると、ボイル・シャルルの法則(注参照)により約500°Cまで高温になる。燃焼室で燃料ノズルから出た液体燃料(ケロシン)は、蒸発後に高温の火炎と混ざって燃焼し、排気ガスとなって後方へ噴出される。この時、タービンも回転させコンプレッサーのブレードを回転させる。排気ガスは200m後方でも20m/sec程度の風速で、大気を切り裂く騒音となる。

そこで、図1のように前方にファンをつけたのがターボファンエンジンである。このファンによってエンジンの推力が上昇するとともに、騒音も減少することになった。現在実用化されているターボファンエンジンではファンからの推力が大きく、タービンからの排出ガスの数倍以上の推力である。即ち、ジェット機と言うよりプロペラ機と言った方が正しいわけである。(私の周りの友人に聞いたところでは、こんな話は誰も知らなかった)。

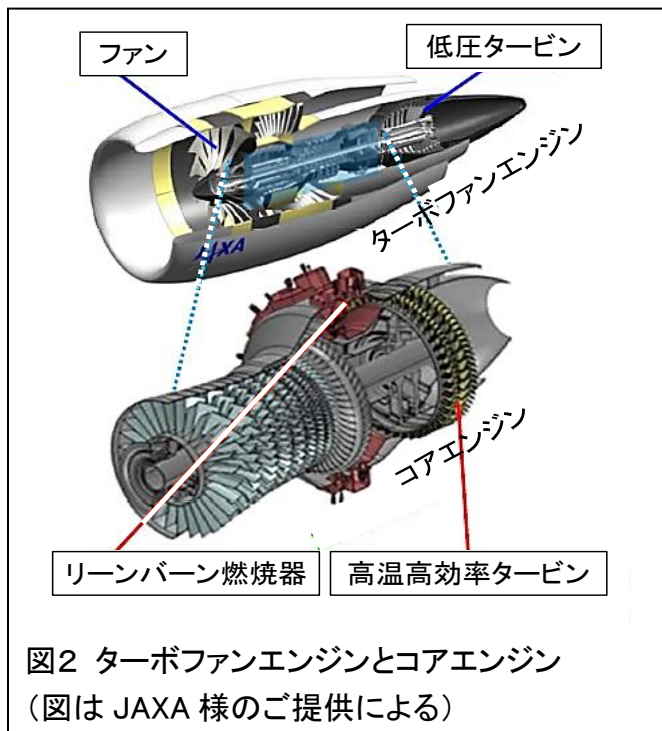
ご参考;ボイル=シャルルの法則
気体の圧力は、体積に反比例し絶対温度に比例する

$$P = k \frac{T}{V} \quad P \text{は圧力、} V \text{は体積、} \\ T \text{は絶対温度、} K \text{は定数}$$



1-2. ターボファンエンジンの改革

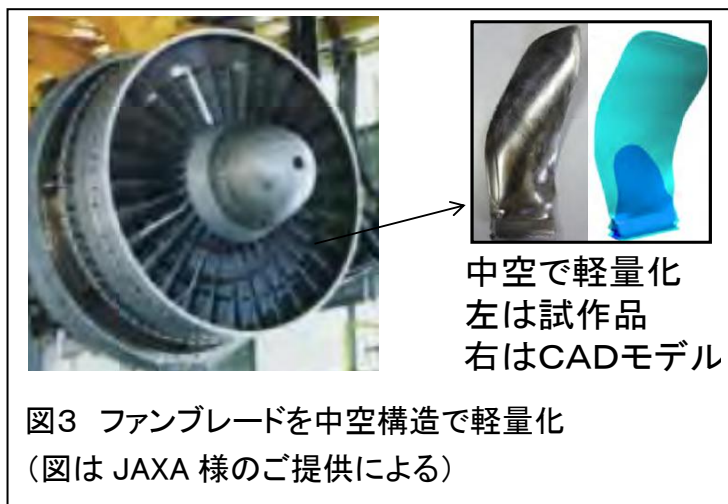
2016年時点で、日本の航空機エンジン関連メーカーの世界シェアは6.6%弱である。図2に示すファンや低圧タービンなどが主な担当となっている。今後、シェアを伸ばすには、既存の分担分の技術を高度化して競争力を強化するとともに、高度な技術を要するエンジン・コア部に関する技術開発を手掛ける必要がある。このため、JAXAでは高負荷圧縮機、リーンバーン燃焼器、高温高効率タービンを開発し、燃費消費量や窒素酸化物排出の低減の研究を行っている。



1-2-1. さらなる高バイパス比化のための軽量化

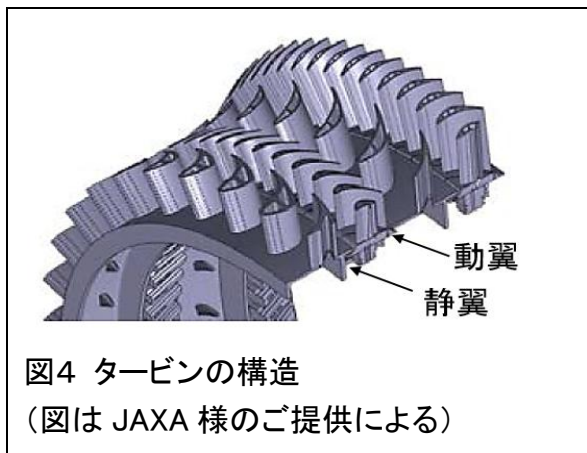
ターボファンエンジンは、CO₂ 排出削減やエンジンの騒音低減のため、高バイパス比化、即ちエンジンのジェット部分の空気流入量よりファン部分の空気流入量を大きくする技術が一層進むことが予想される。高バイパス比化に伴ってファンとそれを回転させる低圧タービンが大型化されて重量増になり、かえって燃費増になる可能性があるため、軽量化技術を導入することが求められる。JAXAでは、(1)ファン空力効率1ポイント以上の向上と、(2)ファン+低圧タービンの10%軽量化を可能とし、耐久性や信頼性で従来と同等となる高効率軽量ファン技術と軽量低圧タービン技術を開発し、実証試験によりその有効性を確認している。

更に、ファンの軽量化のため炭素繊維強化プラスチックCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)を用いた中空構造のファンブレードの開発が行われた(図3)。ファンブレードは離陸時の鳥衝突による破損が最も危険となるため、鳥に相当するゼラチン塊による高速衝撃試験を行って、そのブレードが十分耐えることが確認された。



1-2-2. 高圧圧縮機および高圧タービンの高負荷化

高圧圧縮機は、多段の軸流圧縮機に加え、最終段に斜流圧縮機を適用することで、圧力比20以上を目指している。高圧タービンは図4のような構造で、固定翼(図の静翼)と回転翼(図の動翼)から成り、高圧圧縮機の回転させる駆動力を発生する。航空エンジンで最も過酷環境である超高温(1600℃)に曝される高圧タービンへの適用を目標に、長時間高温耐酸化性能を有する耐熱複合材料を検討している。その材料として、高耐酸化耐熱性のセラミックス基複合材料を適用した冷却設計技術の開発を進めている。特に長期に亘り高温過酷環境下で使用される高温大気中疲労寿命の向上に主眼を置いている。シンプルな冷却構造の適用により複雑な冷却機構を必要としなくなるようなタービン翼の開発を目指してしている。

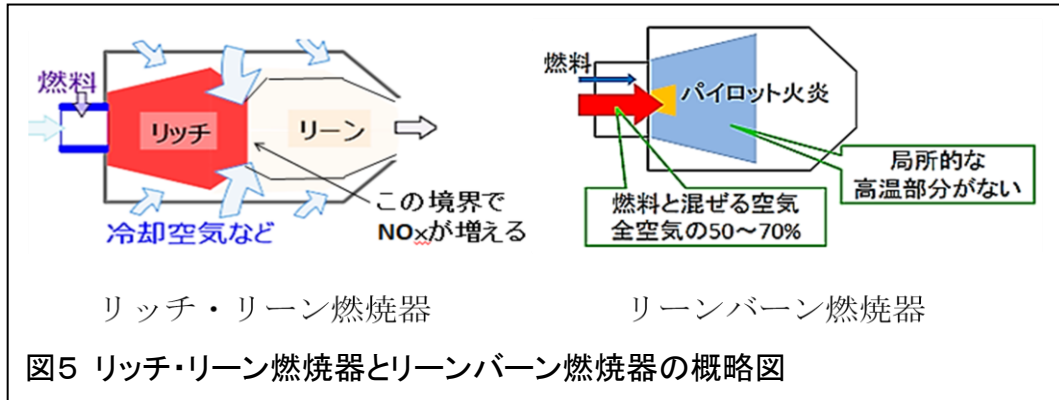


1-2-3 タービン材料の変革

航空機エンジンの更なる軽量化と高推力化のため、燃焼ガスで駆動する高圧タービンの構成材料を、現在の Ni 基耐熱合金(密度 $8\text{g}/\text{cm}^3$ 程度)から SiC 繊維/SiC 複合材料などのセラミックス基複合材料 CMC(Ceramic Matrix Composites)、密度 $2\sim 3\text{g}/\text{cm}^3$)に置き換えることを目指した研究開発を行っている。CMC 製タービンの実用化に当たっては、更なる高強度化、耐酸化性の向上、低コスト化、超高温での変形挙動のモデル化等、解決しなければならない課題が数多く残されている。JAXA では、CMC の超高温での耐久性や変形挙動を予測するための解析モデルを構築するとともに、必要となる超高温材料試験装置の開発や試験方法の標準化(JIS 規格化及び ISO 規格化)を進めている。

1-2-4. リーンバーン燃焼でNO_x対策

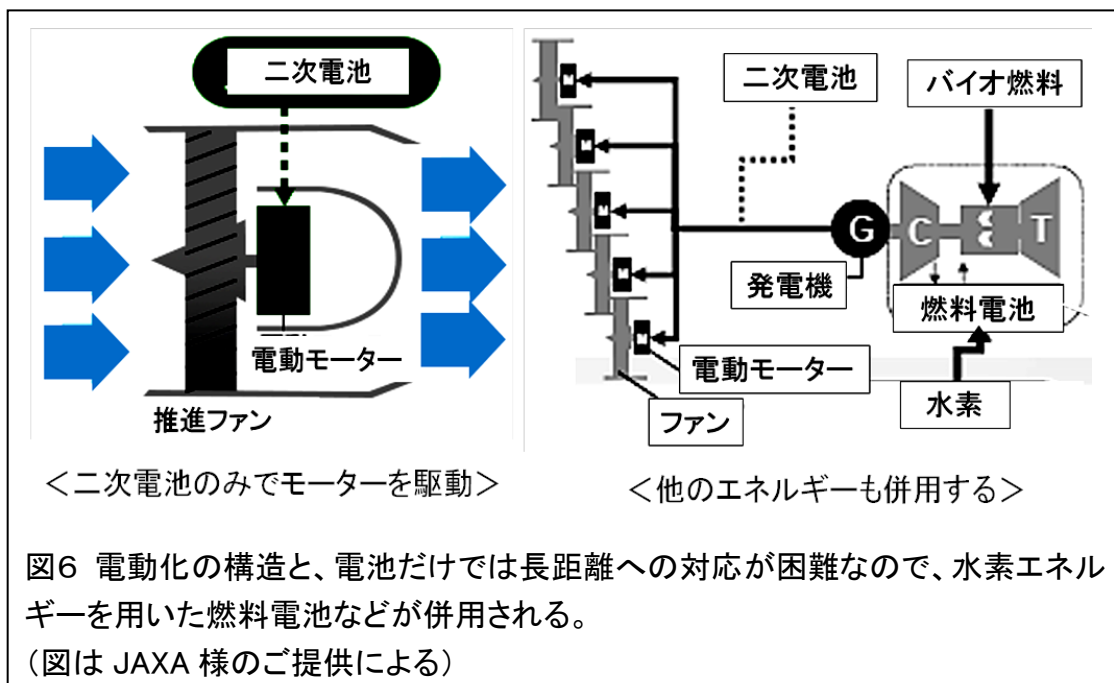
ジェット燃料(ケロシン)を燃焼する時の燃料対空気の比が約1:15なら丁度完全燃焼になるが、それより空気を多くした燃焼(希薄燃焼)をリーンバーン(Lean burn)と呼んでいる。従来のエンジンではリッチ・リーン燃焼器が使われていて、高濃度の燃料ガスを燃焼させた後に急速に冷却空気と混ぜるが、その境界でNO_xが多量に発生する。リーンバーン燃焼器では燃料ガスと空気を混ぜた後に燃焼するので、燃料リッチな部分がなくて高温にならず、NO_xの発生が抑えられる。図5はリッチ・リーン燃焼器とリーンバーン燃焼器を比較した概念図である。燃料と空気の比率と火炎温度の関係は図8のようになっており、空気の比率を大きくするほど火炎温度が低くなり、NO_xの発生が少ないので、リーンバーンではNO_x発生が従来以上に抑えられる。JAXA では既に産業界と連携してリーンバーンを可能とする燃焼器の研究開発が進められており、研究室レベルでは多くのデータが蓄積されている。今後は実用化を目指した JAXA の技術実証プロジェクトを通して産業界の実力が向上することが期待される。

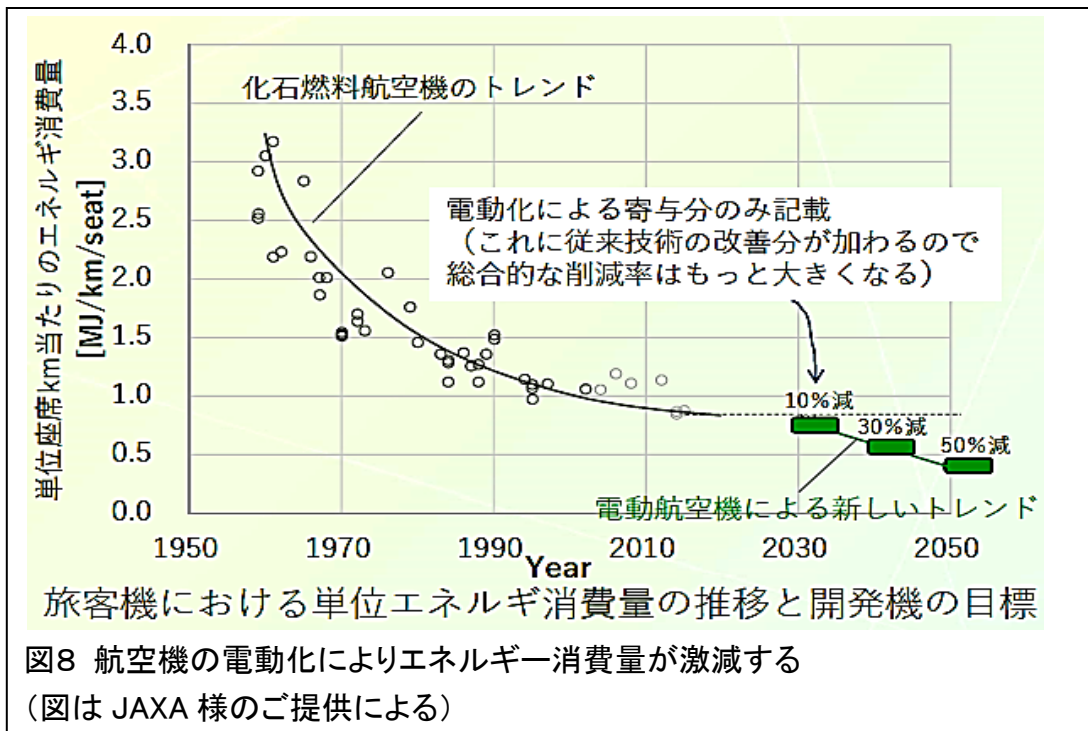
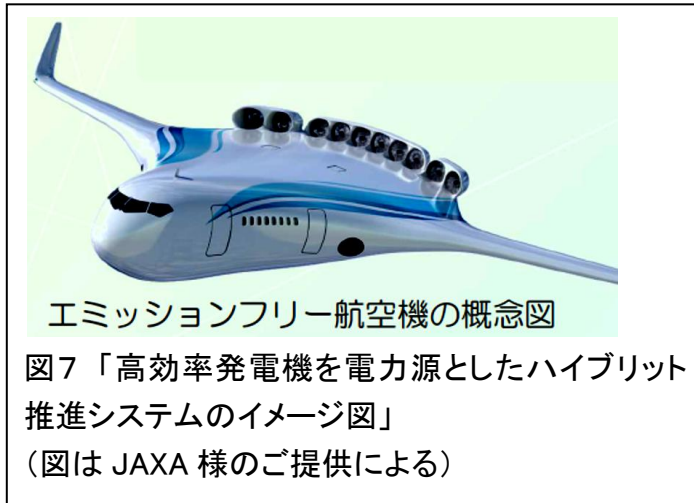


2. 航空機の電動化

航空機の電動化が、エネルギー消費量の削減や騒音の低減のため検討されている。現在の大型航空機では、東京からニューヨークへ飛ぶと150トンのケロシンが消費されてしまう。CO₂排出が削減のため、電動化が重要テーマである。

電動化の構造としては、図6左のように、電池の電力でモーターを回し、ファンを回して風力を得るものである。電池は能力の高いリチウムイオン電池を用いたとしても大型機を長距離飛ばすのは無理で、小型機用となるだろう。一方、図6右のように、水を供給して燃料電池の電力を利用すると、水素の量を増やすことにより、飛行距離を伸ばすことができる。また、水素以外に環境に優しいバイオ燃料を用いる案もある。本格的な大型機も図7に示すような構想があつて、後方にファンを並べた構造が考えており、この方が空気の流れが効率的になるそうである。図8は、2030年以降の電動化によるエネルギー削減の計画である。





リニアモーターカーは飛行機か？

鉄道技術研究所の研究内容を紹介します。

1. リニアモーターカーの開発

鉄道総研の最大の業績は、リニアモーターカーの技術を完成したことであろう。新幹線が東京・大阪間に開通した1960年代、次世代の鉄道について、時速500km/hで東京・大阪間を1時間で結ぶような新技術について色々議論された。当然、線路の上を車輪が回るのでは粘着力不足(車輪が空回りする)により、この速度は実現できないので、車体を浮かすことが考えられた。既にイギリスやフランスでは、ホーバークラフトのように空気で浮上するホーバーカーが試作されていたが、騒音が大きく実用化は無理であった。ドイツでは、初期には超電導方式も検討されたが、通常の電磁石による方式のリニアモーター車の開発が進められた。日本では地震が多いこともあって、10cmの浮上が必要と考えられ、そのために必要な磁力を得るには強力な磁石が必要であった。そこで、超電導による磁石の使用が決定された。世界中のだれも開発していない未知の技術への挑戦であった。

1-1. 超電導による磁石

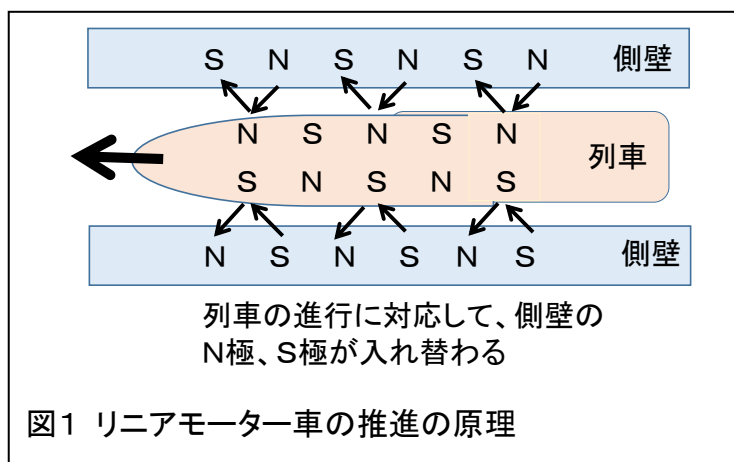
超電導現象は、1911年オランダのオンネスにより発見された。液体ヘリウムの温度(絶対温度4度、即ち -269°C)まで冷却すると、水銀の電気抵抗がゼロになることを発見した。その後、超電導の現象はいくつかの物質で発見されたが、何故そんな現象が起こるのか長い間、不明であった。それを理論的に解明したのはバーディーン、クーパー、シュリファールの3名でその頭文字からBCS理論と言われ1957年であった。超電導物質をループ状にして電流を流すと、抵抗がゼロなので永久に電流が流れ、発生する磁場も永久に続くので通常の磁石と同じように使えるわけである。リニアモーターカーで使用されている超電導電磁石のコイルは、ニオブ・チタン(NbTi)合金系の極細線を数千本束ねて銅に埋め込まれた超電導線のループ(巻線)で、磁束密度は約5T(テスラ)の強力な電磁石を構成することができる。超電導状態を維持するためには、液体ヘリウムの入った容器に入れ、輻射シールド板が設けられ、その外側は液体窒素で(-196°C)に冷却され、内部は真空で断熱されている。

1-2. リニアモーターカーの構造

リニアモーターカーが進行するには、3つの力が必要である。即ち、前方に推進する力、車体を浮上する力、側壁から左右にぶれないようにガイドする力。これらを車両内に設置した超電導磁石で行っている。

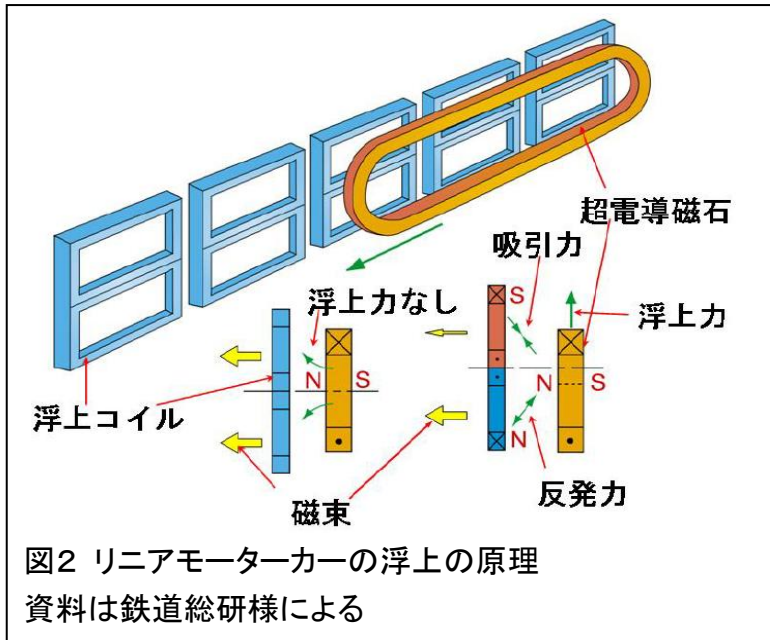
1-2-1. 超電導磁石による推進力

まず、前方へ推進する力は、図1のように軌道側壁に設置されているコイルの磁場と、車内の超電導による磁場による力によって行っている。前方のコイルには電流を流さなくてはならないが、これは車内からでなく本部からコントロールしている。本部では、列車がどの位置にいるかを知って、その列車のある場所のコイルに電流を流す。本部で正確な車両位置を知るため、車両の発信機から一定周波数の信号を送る。軌道側壁のアンテナは車両側から発信した信号を受信し、この信号を合成して正弦波を構成する。正弦波の数をカウントすれば、列車の絶対位置が検知できて、その精度は数 cm と非常に正確である。従って、リニアモーターカーでは、運転手は居ても居なくても関係なく、運転は本部が行っている。



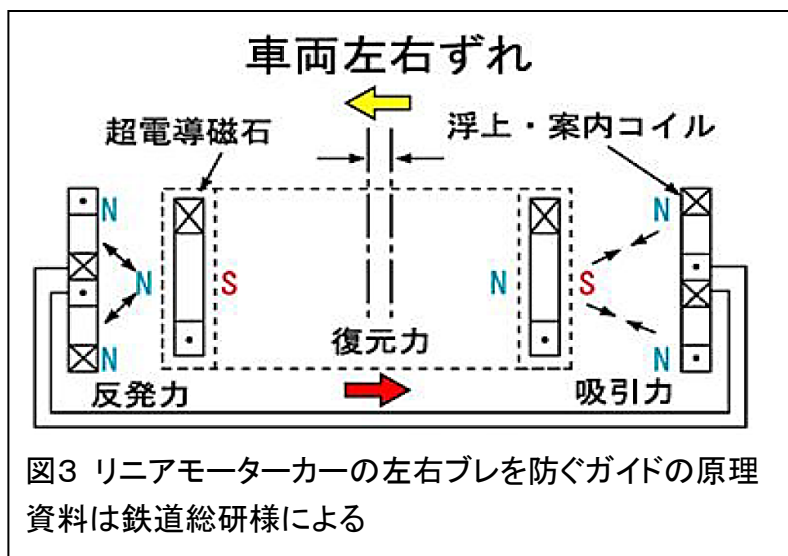
1-2-2. 超電導磁石により浮上

電磁誘導の原理を中学校で習った覚えがあるでしょう。コイルに磁石を近づけたり遠ざけたりするとコイルに電流が発生するという原理である。リニアモーターカーが進行すると、側壁に設置されているコイルに電流が流れ磁場が発生する。浮上コイルは、上下二つのコイルが8の字型に接続され、垂直な側壁に配置されている。車両の超電導磁石が浮上コイルに近づくと、8の字型コイルにそれぞれ逆向きの誘導電圧が発生して互いに打ち消しあい、結局、誘導電流は流れず浮上力も発生しない。一方、超電導磁石が浮上コイルの中心より下方だと、上側のコイルよりも下側のコイルに発生する誘導電圧が大きくなり、超電導磁石と同極になって反発力が発生し、逆に上側のコイルは異極になって吸引力が発生し、結局、図2のように車両に浮上力が働くことになり、一定の浮上を保って進行する。ただし、駅を出た直後など低速の時には、側壁のコイルの電流値が低く十分浮力が得られないので、ゴム製のタイヤを出して、一般に電車のように線路の上を走行することになる。



3-2-3. 超電導磁石により左右のブレをガイド

図3は、車両がどちらかの側壁に近づいていると、反発して正常な位置に戻す力が働き、左右のブレを修正するガイドの原理である。車両が左右どちらかに片寄った場合には、近づいた側と遠ざかった側でガイドコイルが発生する誘導電圧に差が生じて電流が流れる。その結果、近づいた側のコイルと超電導磁石との間に反発力、遠ざかった側のコイルとの間には吸引力が発生して、超電導磁石を中央に押し戻す。こうして、常に車両は側壁の中央を走るようにガイドされる。このガイドも浮上力と同様、車両の速度とともに大きくなり、高速になるほど車両の姿勢は安定する



1-3 リニアモーターカーについて雑感

筆者は長年ソニーで働き、数々の世界初と言われる商品に関係してきた。その経験から良く分かるが、鉄道総研の研究者が世界初のリニアモーターカーを開発されるのにどれだけ苦労があったか、部外者には想像もできない。図4は世界で初めての超電導磁石の電磁誘導浮上で走行したリニアモーター実験車である。研究者にとって、この世界初の実験車の成功がどれほど嬉しかったことか。

リニアモーターカーは超高速以外に、どんな急坂でも登れると言う大きな特徴がある。そこで筆者の独断であるが、山谷の多い日本の国土のどこでもトンネルを掘らず陸橋など掛けずに走れるわけで、新幹線網よりリニア鉄道網を作った方が安価ではないかと思われる。また、メンテナンスが非常に簡単なのも大きなメリットである。騒音も風切り音のみでパンダグラフや線路からの騒音がなく、快適な乗り物と思われる。空中に浮いた状態で超高速走行するので、一種の飛行機と言っても良いわけで、航空法の規制に従うのだろうか？(Joke!)

鉄道総研は、時速200km/hの壁を破る新幹線の技術を実現し、更に550km/hを実現したリニアモーターカーの技術を完成させ、世界の鉄道界の技術を牽引してこられた。正に世界に誇るべき成果である。

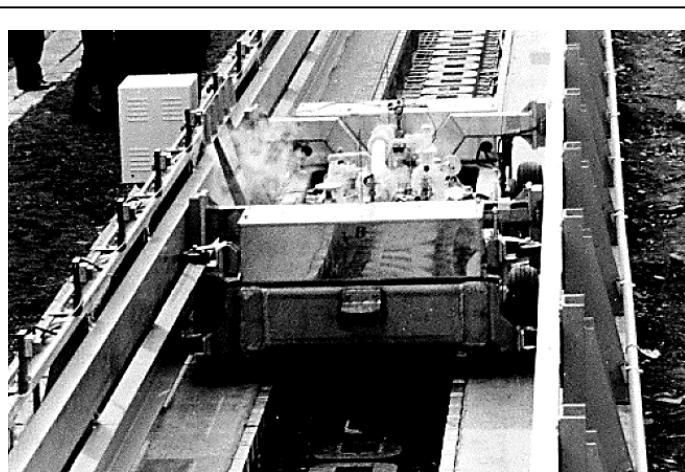


図4 世界初の電磁誘導浮上で走行したLSM200
資料は鉄道総研様による

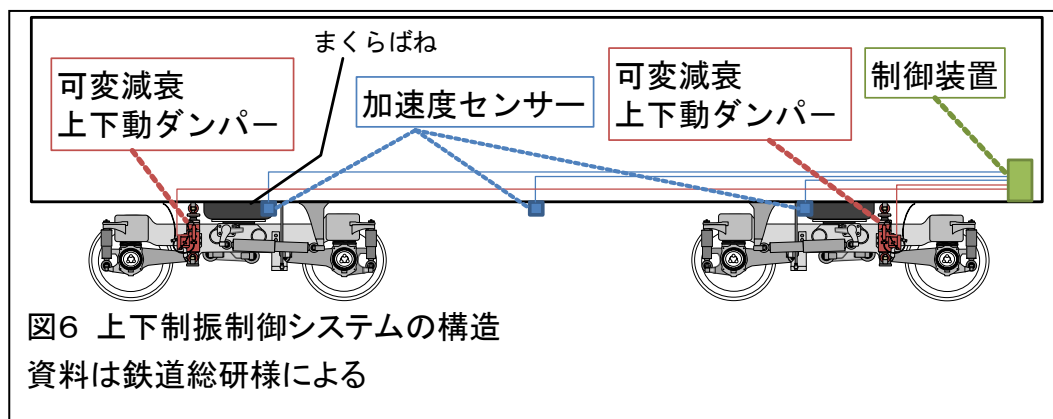
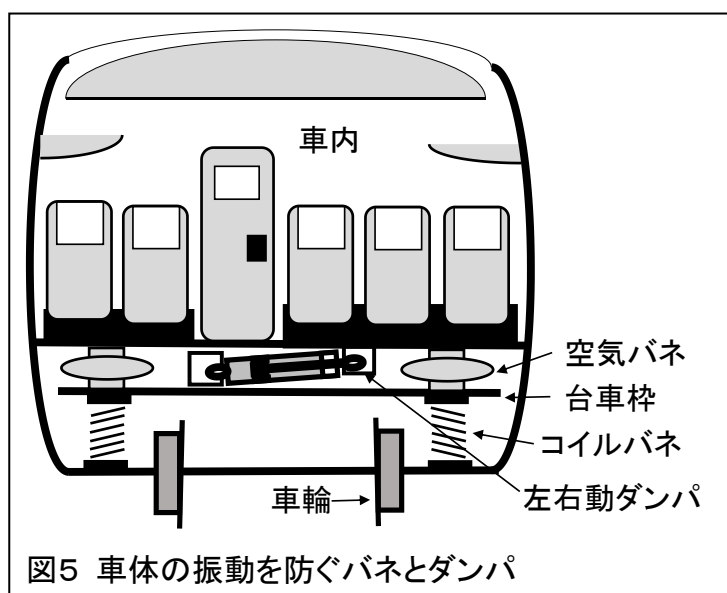
鉄道総研では、乗り心地の改善や、安全対策面でも技術開発されている。

1. 乗り心地の改善

列車の速度が高速になるほど、左右、前後、上下への振動が多くなってしまふ。そこで、これらの振動を軽減して乗り心地を良くするため、車体の床下にはバネやダンパが使われており、その構造を図5に示す。これらの改善には種々の研究が行われているが、一例として上下制振制御システムを示す。

レールの継目通過に伴って発生する1～2Hzの上下方向の車体剛体振動が乗り心地に大きな影響を与えている場合がある。このような振動に対して、台車枠と車体間のばね系(2次ばね系)に制御技術を導入することにより上下の振動を抑制するシステムを開発した。可変減衰機能を持つ上下方向の油圧ダンパを空気ばねと並列に取り付け、このダンパの減衰力を加速度センサで測定した車体の振動に合わせて制御し、振動を抑制する(図6)。

他にも乗り心地改善の数々の技術開発が行われているが、省略させて頂く。

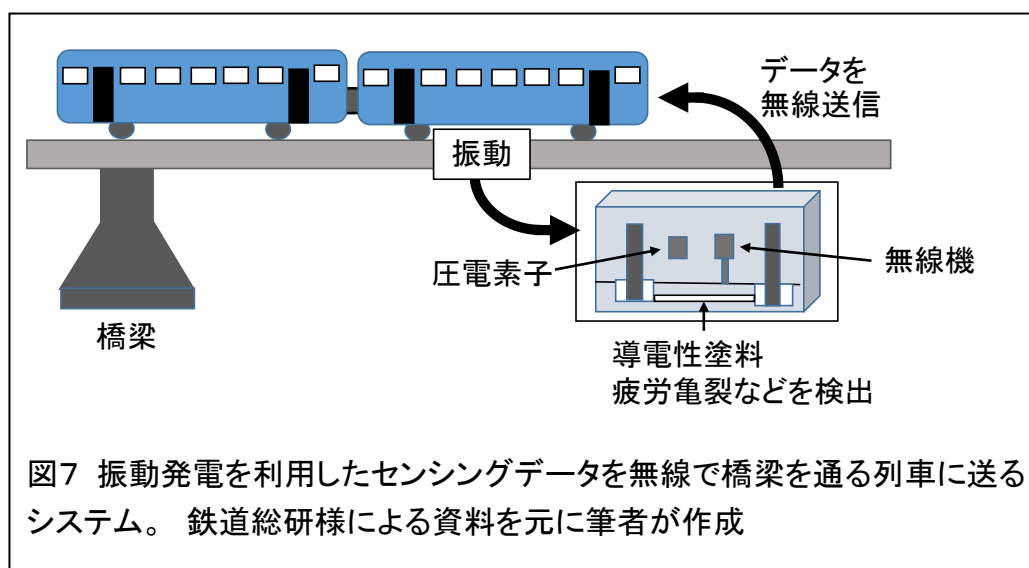


2. 安全運転に関連した研究

列車を安全に走らせることは、最重要な研究テーマである。昔から各種の安全対策が行われているが、まだまだ研究テーマが多い。その幾つかを紹介する。

2-1. 橋梁メンテナンスのIoT化

橋梁を列車が通過する時、振動発電を利用してセンシング結果の無線送信を行うモニタリングシステムが開発された。無線で送信されたセンシング結果は、橋梁上を通過する列車で受信する。疲労き裂などの異常が発生していれば、センシング結果の無線送信を図7のように受信して対策を取ることができる。試作したプロトタイプシステムを実際に橋梁に設置し、列車通過時の動作を検証した。振動発電で得られた電力は、電気二重層キャパシタに充電することで、得られた電力のみで、2年以上にわたり測定が継続して行われることを確認した。現在、一般社会でもトンネルや橋などの社会インフラのIoTによるメンテナンスが話題となっているが、エネルギーハーベスティングを用いた今回の研究は、その先駆けと言える。



2-2. 早期地震警報の高度化

巨大地震が発生した場合、走行中の列車は直ぐに止めなければならない。気象庁から緊急地震速報が配信されているが、それとは別に鉄道総研でも速報を出すための技術開発が続けられている。鉄道の地震計でP波(一次波)を捉えて、それより遅れて来るより大きなS波(二次波)を予測する訳である。従来システムでは、通常、初期微動2秒間分のデータに基づき地震諸元を推定している。より早く・正確に警報を出すために、P波初動1秒間の上下動加速度データに1次関数をフィッティングさせ、その傾きから震央距離を推定する手法(C-Δ法)を開発した。また、新しい震央方位

推定手法としてP波変位波形の最初の半波長分のデータ(可変長データ)に対して主成分分析を行なう手法を開発した。これらの手法を組み合わせ、最短1秒のデータで警報を出力することが可能となった。さらに、システムの信頼性向上を目指したノイズ識別手法も開発され、これらの新たなアルゴリズムを実装した地震計が現在、鉄道で活用され始めている。

2-3 地震対策ダンパ

地震対策ダンパは、常時は通常の左右動ダンパと同様、乗り心地の向上のために機能し、地震時には極端に大きなピストン速度に応じて、より大きな減衰力を発生し、地震動による大きな車体の振動を減衰して脱線に対する安全性が向上する。この地震対策ダンパでは、特別な制御装置などは必要なく、現行の左右動ダンパとの容易な置き換えが可能である。電磁弁付きと電磁弁が付いていないタイプの地震対策左右動ダンパの写真を、それぞれ図8に示す。

大型振動試験装置による実台車加振試験の結果、地震対策ダンパを装備した場合には、現行のダンパを装備した場合に比べ、大きな加振振幅まで輪重がゼロにならない(=車輪が飛び上がらない)ことが分かり、脱線に対する安全性が向上することが確認された。また、新幹線車両に実装し最高速度320km/hまでの走行試験の結果、フルアクティブ振動制御に対し正常に動作すること、現行の左右動ダンパを装備した場合と変わらない乗り心地を実現できることが確認された。



2-4. 地震の被害の軽減

地震が起こった場合の被害を軽減することも重要で、そのための研究が行われている。一例として河川橋脚や店舗利用高架橋などで、一般的な耐震補強の実施が困難な場合、地震エネルギーを吸収する制震ダンパを適用する事例が増加している。橋

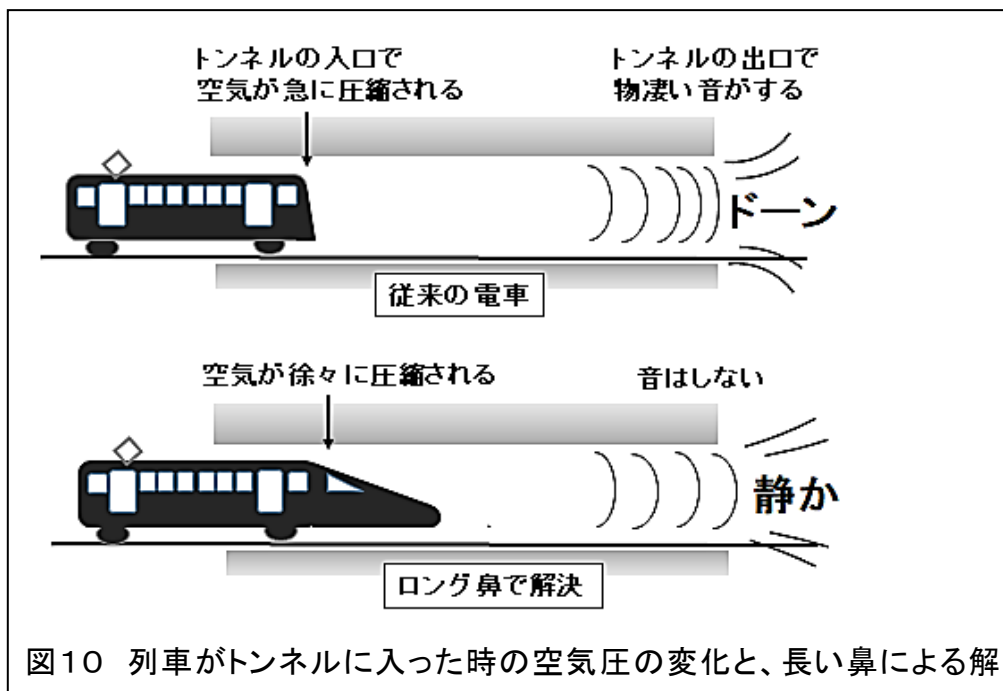
脚上部に対する部分的な工事のみで大幅な耐震性の向上が可能である。図9のような制震ダンパによる補強を行う際に必要となる設計法と設計手引きを作成した。



3. その他の数々の研究から幾つかを紹介する

3-1. 列車の形状

新幹線の開発を進んだ当時、思わぬ問題点が続出した。例えば、図10のように高速でトンネルに入ると、空気圧が急増し車内の気圧も高くなって耳ツンと言われる現象が発生する。さらに山陽新幹線以降のスラブ軌道トンネルでは、トンネル出口で空気圧が上昇してドーンという衝撃音が発生する。この対策として図1下のような長い鼻で空気圧が急増しない構造が開発され、現在もこのような長い鼻の車両が走っている。

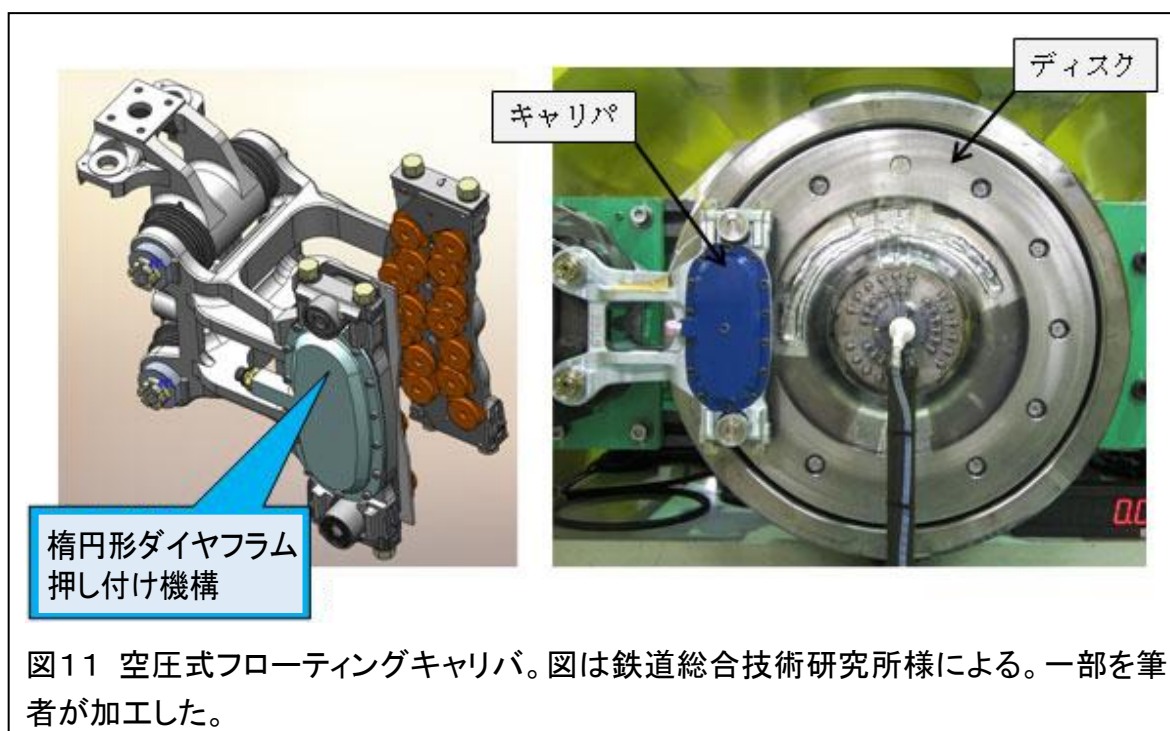


3-2. ブレーキ

鉄道にとって最重要な技術は、動かす動力よりブレーキであろう。従来からの機械ブレーキの一つとして、図11のようなブレーキディスクと呼ばれる回転体に対してブレーキライニングを押し付けることによって摩擦力を発生させて止まる方式がある。しかし、色々な場面で簡単にはブレーキが効かない場合もあり、多くの研究がなされているが、その一つの新幹線用空圧式フローティングキャリパを紹介する。

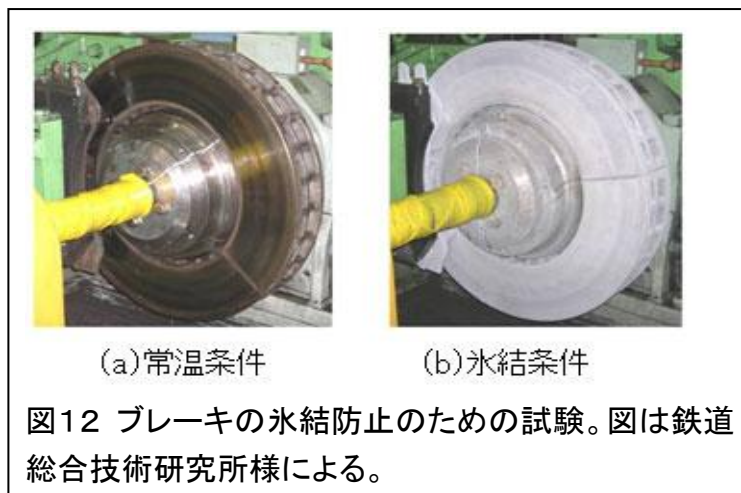
ブレーキディスクを任意の力で挟み、ブレーキ力を得る装置をキャリパと呼ぶが、新幹線の油圧キャリパと互換性を持ち、空油圧変換装置(増圧シリンダ)を用いないシンプルでメンテナンス性に優れた空圧式フローティングキャリパが開発された。

本装置では、テコや歯車といった仕組みを用いず大きな力を直接伝えることができる「楕円形ダイヤフラム押し付け機構」を作動アクチュエータとして用いている。ダイヤフラムは空気圧を押し付け力に直接変換できる図11のような単純な機構で、薄くて気密性の高いゴム膜を用いるため製作形状の自由度が大きい。そのため、限られたスペースを有効に利用できる楕円形状にすることで、油圧式キャリパと同等の大きさに構成することができた。



ブレーキディスクの摩擦面が氷結すると、ブレーキの効きが悪くなり問題である。氷結状態を実験的に再現して効き具合を調査した。図12のように、厚さ0.5mmの氷結層を形成し、ブレーキ開始温度を -20°C として低温・氷結状態を模擬した台上ブレーキ試験を行った。制動直後はディスクとライニングの間の摩擦係数が極めて低いため、約25秒までの間はトルクが出ない。その後、氷雪が破碎されて摩擦面が接触を始め、

摩擦熱による温度上昇とともにトルクが回復する。氷雪の介在による摩擦面のすべりはブレーキ初速度及び押付力が小さいほど顕著な傾向を示し、ブレーキ性能は、氷雪破碎の促進により上昇する傾向が確認された。なお、摩擦係数の低下率は押付力に依存せず、初速度125km/hが約50%、165km/hが約7%であった。



地震等の緊急時における高速で走行中の新幹線の停止距離を短縮することは非常に重要なので、図13のような空気抵抗を利用した小型のブレーキ装置を研究している。試作機を用いた風洞試験により、従来よりも装置の大幅な小型化と、最適配置による編成全体でのブレーキ力向上が可能になり、抵抗板からの渦励振が小さく、走行安定性や地上設備への影響が抑えられている。本装置が既存の電気ブレーキやディスクブレーキの高速時におけるブレーキ力を補完することで、車輪・レール間の摩擦力によらず、安定したブレーキ力が得られ地震等の緊急時における高速からの停止距離の短縮を目指している。



3-3. 回生ブレーキによる発電

走行中の列車は車輪や車軸は回転しているので、その回転を利用して発電するもので、電力が取り出されるだけでなく、ブレーキとしての作用も利用されている。ただし、

この技術は以前から実用されていて鉄道総研で開発したわけではない。筆者の極端な意見であるが、列車が駅を出発してある速度に達しモーターへの電力を切ったまま次の駅まで走った場合、線路との摩擦や向かい風の抵抗がなく、回生の効率が100%なら、列車を駆動した時のエネルギーをほとんど全て回収できて電力ゼロで走行できることになる。自動車業界で注目されている電気自動車でも航続距離を伸ばすため必須の技術となっている。

3-4. パンダグラフ

現在の電気鉄道は、電気のエネルギーでモーターを回し、車輪を回転させている。新幹線は交流2.5万V、在来線は交流2万Vもしくは直流1500V、750Vであり、地上を走行する電気鉄道では図14のように上方に張られたトロリー線にパンダグラフが接することにより得ているのはご存知の通りである。パンダグラフの大きな問題点の一つとしては、200km/h以上の高速鉄道では主要な騒音発生源の一つになっていることである。このため、新幹線用パンダグラフは空力騒音が発生しにくい形状となっており、さらに16両の長い列車でもパンダグラフはたったの2台となっている。

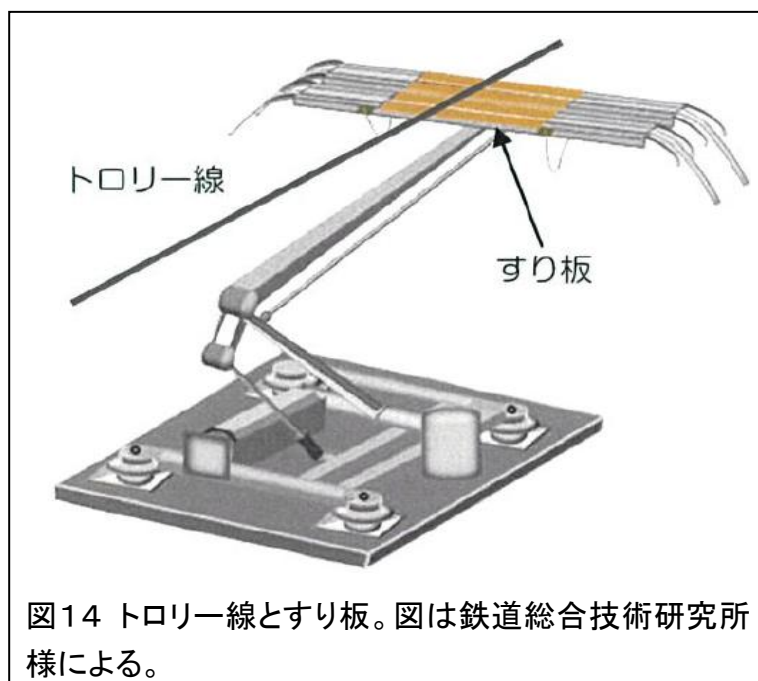
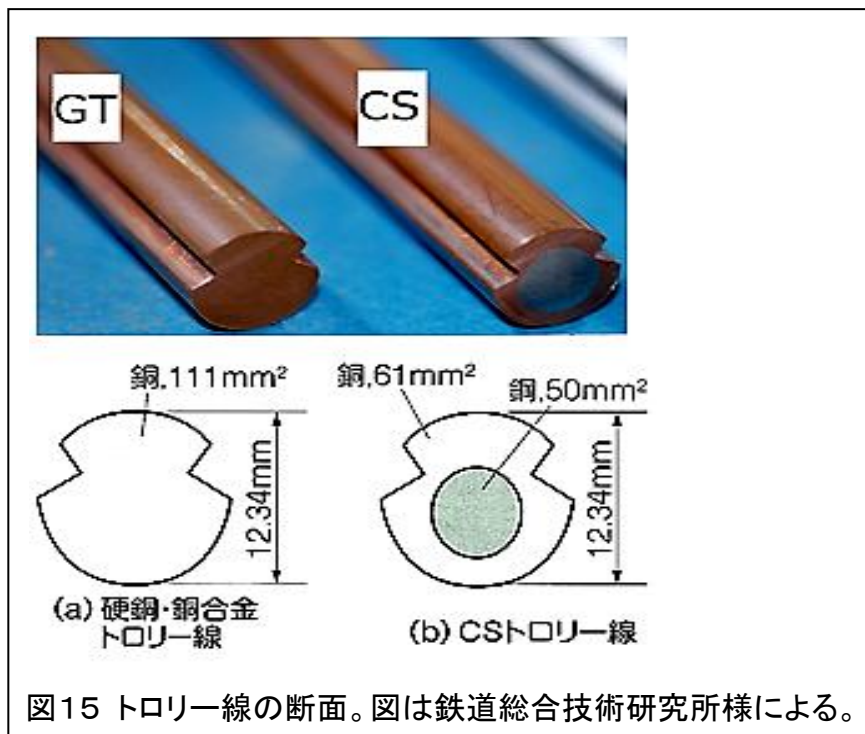


図14 トロリー線とすり板。図は鉄道総合技術研究所様による。

3-5. トロリー線

トロリー線にはパンダグラフ通過のたび曲げひずみが発生し、列車の速度向上等に伴ってトロリー線が疲労する恐れがある。その対策として、トロリー線の断面形状を変更してひずみを低減することを検討した。図15に断面を示すように円に対して金具でつかむための溝を設けたものが一般的であるが、パンダグラフが通る度に曲がりが生じてひずみが発生する。下面(摺動面)は、疲労き裂が生じても摩耗で除去される

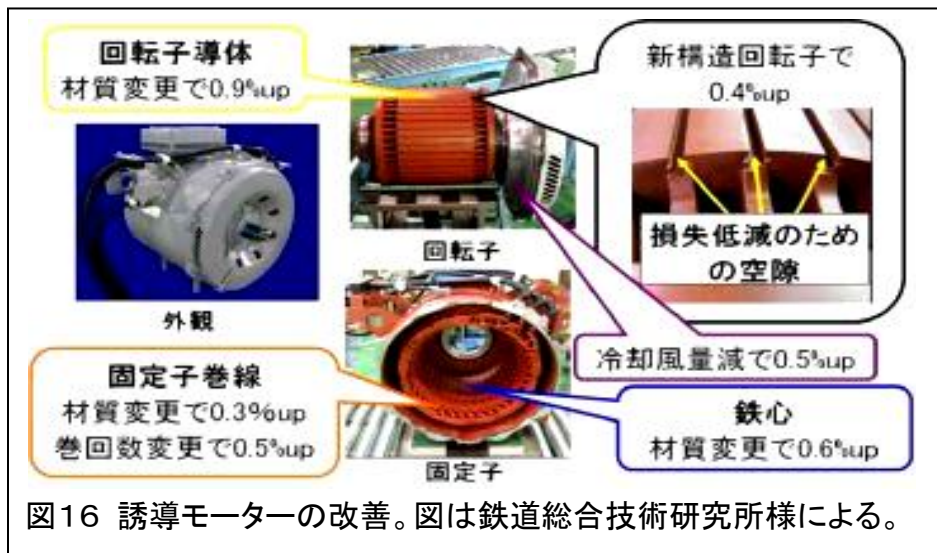
ので破断に至る懸念は小さい。因みに、パンダグラフが1万回通過して摩耗は0.01mm程度である。上面に発生するひずみが問題になり、風洞試験も交えて検討されている。現在は図6のような断面形状のトロリー線が用いられている。



3-6. モーター効率化

現在広く用いられている誘導モーターの効率を向上するための研究開発を行った。材料の選定等の基本的な設計手法により高効率化を図る事を検討し、次に磁界解析を行い、回転子導体の表面において、出力に寄与せずに損失を発生させる電流が流れていることを明らかにし、これを低減する新しい回転子構造を考案した。そして、高効率誘導電動機を試作し(図16)、性能を評価した結果、その効率は約96%であり、従来機に比べて約3%効率を向上できた。走行シミュレーションにより電車で使用した場合の省エネ効果として消費電力量を6~11%削減できることが分かった。

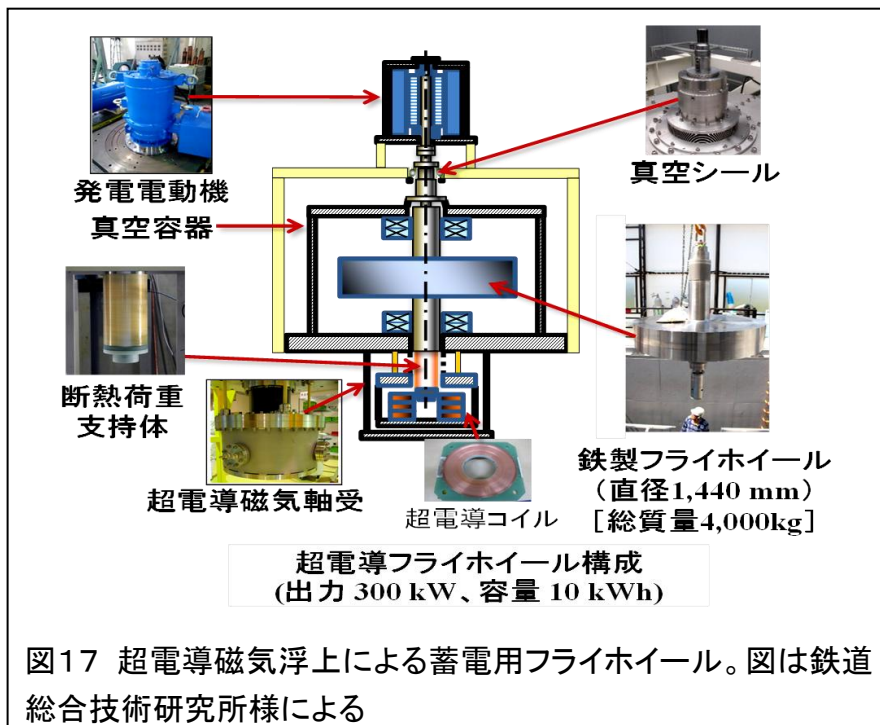
鉄道総研の開発ではなく、民間の企業の開発であるが、モーターを駆動する回路の電力用素子として、シリコンによるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に替わって、内部抵抗が小さいSiC(炭化ケイ素)によるトランジスタが新幹線に採用され出した。SiCは量産が難しくてもまだコストが高いが、乗り物と限らず多くの電源回路に使われれば、省エネ効果が大きい。



3-7. 蓄電用フライホイール

太陽光発電や風力発電など自然エネルギー発電を鉄道の運転用電源として活用することが考えられているが、気象条件によって発電電力が変動するため、安定に電力を供給可能なシステムが要求される。

エネルギーを蓄える方法として、フライホイール(はずみ車)の回転運動を利用する方法がある。軸受の摩擦で回転運動が徐々に減少するのを防ぐため、超電導磁気軸受けによってフライホイールを浮かせれば摩擦がゼロの運動となる。既に実証実験が行われており、電車の回生エネルギーの蓄電への応用が検討されている(図17)。



まとめ

日本の鉄道の始まりは、明治5年(1872年)新橋—横浜間であり、それ以来日本全国に鉄道網が貼りめぐらされた。第2次大戦後、東京—大阪間を特急が6時間半で走るようになり、戦後の復興に大いに寄与した。その時、国鉄総裁になった十河信二氏は、狭軌鉄道の限界を悟り、将来を見て広軌の新幹線の建設を主張し、もはや自動車と航空機の時代であると言う周囲の猛反対を押し切って新幹線の建設を推進した。現在、新幹線の無い日本は考えられない。新幹線によって、どれほど日本の産業が発達し、生活が豊かになったかを考える時、十河氏のご努力に感謝するとともに、将来を見る目の素晴らしさに感嘆せざるを得ない。