



## 望遠鏡の発明

—— リッペルハイ、ガリレオ

### ● レンズの発明

航海技術は全地球的でグローバルな視野をもたらしましたが、同時に空の彼方にある宇宙や極微の世界にも科学的好奇心が向けられるようになっていきました。

望遠鏡の発明者は、前述(52ページ)のとおり、オランダ人のハンス・リッペルハイで、1608年頃に考案されました。1609年にはガリレオが天体望遠鏡を製作しました。ガリレオは自作の天体望遠鏡で、月のクレーター、金星の満ち欠けなどを発見しました。さらに木星の4大衛星が木星周辺を規則的に公転しているようすから地球の地動説のヒントを得ました。

レンズが人類史上いつ頃に登場したのかは、はっきりわかりませんが、12世紀頃までには水晶を磨いて凸レンズにした拡大鏡のようなものはあったようで、Reading Stoneと呼ばれていました。その頃からレンズ研磨技術が進み、メガネが普及し始めました。望遠鏡の発明者リッペルハイもメガネレンズの職人でした。

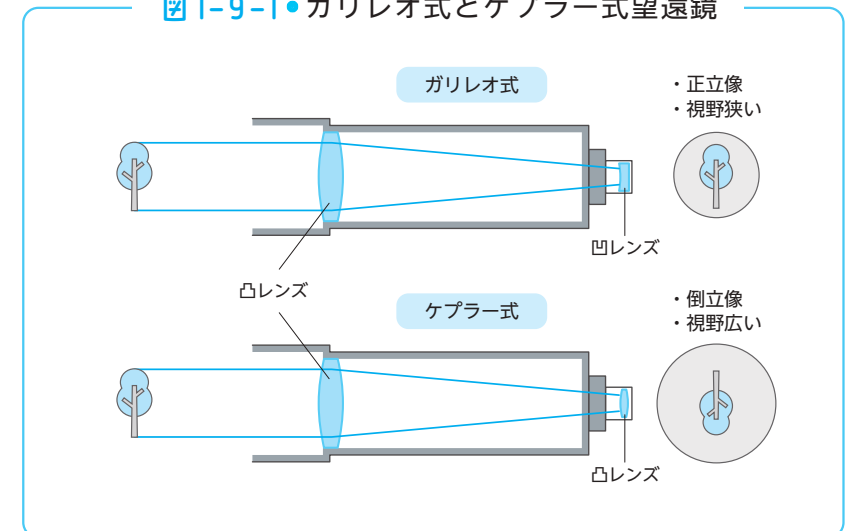
望遠鏡の機能は光学系と機械系に分けることができます。光学系とはレンズを組み合わせたシステムのことで望遠鏡本体に関わる技

術です。機械系は鏡筒を支え、目的の天体を導入したり、日周運動で動く星を追尾する機能を担う部分です。

### ● ガリレオ式望遠鏡

リッペルハイが考えた望遠鏡は2枚のレンズを少し離して光軸を合わせて配置し、一方から覗くことで遠くの景色が大きく見えるというものです。対物レンズ(対象物に近い方のレンズ)に凸レンズ、接眼レンズ(覗く方のレンズ)に対物レンズよりも小さな径の凹レンズを使った光学系でした。ガリレオの望遠鏡もこの方式でした。ガリレオ式望遠鏡は、正立像が見えるというメリットがありますが、視野が狭く高倍率を出すことが苦手(高倍率にすると視野が狭くなりすぎる)で天体観測用としては大きな欠点がありました。そこで考えられたのが接眼レンズにも凸レンズを使ったケプラー式望遠鏡です。この方式は、現在の屈折望遠鏡のほとんどが採用しています。

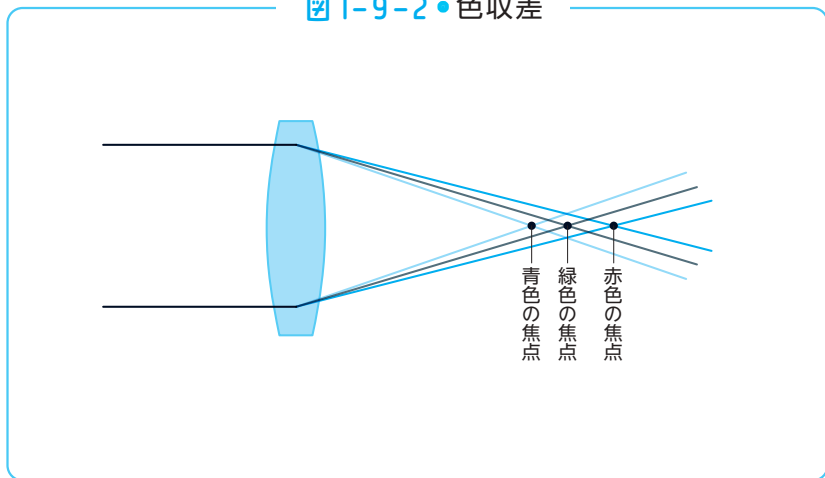
図 1-9-1 ● ガリレオ式とケプラー式望遠鏡



ケプラー式望遠鏡は、高倍率が得られるという大きな特長があります。倒立像になりますから地上の観測には向いていませんが、天体には上下は関係ないので観測の妨げにはなりません。ただ、視野が望遠鏡の動きとは逆方向に動くので慣れるまでけっこう大変です。これも、現在はコンピュータにより天体の自動導入と日周運動の追尾を行ないますから特に問題とはなりません。

望遠鏡の光学系には屈折系と反射系があります。前にも少し説明しましたが、屈折系は光をレンズに通して屈折(光の経路を変える)させて焦点を結ばせるのですが、問題は光の屈折率が色(波長)によって異なるため、色収差と呼ばれる色のにじみが見えることです。紫色などの波長の短い光の屈折率は1.34くらいですが、波長の長い赤色では1.32くらいです。そのため焦点を結ぶ位置が波長によってわずかに前後します。青色の部分で焦点を合わせると、対象物の周囲に赤いにじみが見え、赤色から黄色あたりで焦点を合わせると対象物の輪郭に紫色の光がにじんで見えます。

図 1-9-2 • 色収差



# 1-10



## レンズの色収差を克服する技術

### —— フランフォーファー ——

#### ● 色のつかない「色消しレンズ」

レンズには、軸上色収差と倍率色収差があり、この他、球面収差・歪曲収差・湾曲収差・非点収差・コマ収差などがあります。

これらの収差は次のようなものです。軸上色収差は光軸上の焦点の色によるズレ、倍率色収差はレンズ周辺を通過する光の波長の違いによるわずかな倍率の違いからくる色収差。

球面収差はレンズの中心部分を通過する光と周辺部分を通過する光の焦点距離がずれていることによって起こる収差。

歪曲収差は正方形が歪んで見えるような収差で横に縮む糸巻き型収差と横に広がる樽型収差があります。

湾曲収差は像面が湾曲したお皿の底に描かれた絵のように見える収差で、視野の中心部分と周辺でピントがずれる収差。

非点収差はレンズの横方向と縦方向の曲率が違うことによって生まれる収差です。

コマ収差は視野周辺で焦点が視野の外の方向に流れて見える収差です。

これらの収差の中でも特に色収差と球面収差は画質を大きく劣化





## 製紙技術と印刷技術

—— 蔡倫、グーテンベルグ

紙・印刷技術・火薬・羅針盤の発明は科学技術史上の4大発明といわれることがあります。もちろんこれは西洋のルネサンス期の頃までの話で、これ以降ここまで触れてきたとおり、数多くの技術が世の中を大きく変えてきました。それらの個々については後ほど章を改めて述べることにし、ここでは世界を中世から近世、そして近代へと押し進めてきた歴史上の重大な発明について書きます。

### ● 紙の発明

紙は後漢(西暦25-220年)の蔡倫<sup>さいりん</sup>という人が西暦100年頃に発明したといわれています。樹木の皮を湯で溶かし、漉いて薄い紙を作る技法です。実際は、紙は蔡倫の時代よりも前からあったという説もあります。日本に伝わったのは6世紀から7世紀頃の飛鳥時代で、日本最古の和紙は奈良の正倉院に収蔵されている西暦702年の戸籍を記した美濃和紙といわれています。

その後、和紙は日本独自の発展を遂げ、歴史上の出来事の記録や仏典の普及などに大きな役割を果たしていきました。ヨーロッパでは、古代エジプトよりさらに前の時代からパピルスや羊皮紙が使わ

れてきましたが、紙は12世紀中ごろに中国から伝わったとされています。紙は障子や襖などの建材として使われるほか、手紙(伝達)や記録などを担うメディアとしての役割も重要です。和紙に墨で書くことで記録を残したり、人に伝えたりできるようになったのです。また印刷技術が登場してからは紙を使って「情報」の大量生産(拡散・共有)が行なえるようになり、雑誌・書籍・新聞のような形となって情報が世間に広く浸透し、社会の動きに大きな影響を与えるようになっていきました。

紙が登場する前に使われていたパピルスはカミガヤツリという植物の繊維を編んで薄く延ばしたもので「漉き」という工程がないため紙には分類されていません。パピルスは紀元前30世紀頃からあったといわれ、役所の記録に用いられていました。パピルスはpaper(紙)の語源でもあり、紙の始まりはパピルスであるという考え方もありますが、前述のように水やお湯の中で漉くという工程がないため紙とは少し違います。植物の繊維が細かく絡み合わないので組織が壊れやすいのがパピルスの欠点です。これに対して紙、特に和紙は1000年以上も前のものが非常にきれいな状態で残っていることから、優れた記録媒体であるといえます。

### ● 印刷技術の発明

紙がメディアとして広まっていったのは、ドイツ人の技術者ヨハネス・グーテンベルク(1397-1468)が活版印刷技術を発明してからです。文字を表す活字1個1個を金属の型で鑄造し、それを並べて文章を作り、プレスにかけて紙にインクを押しつけて印刷するという、現在の印刷の基本技術が開発されていました。ちなみに現



在は活版印刷はあまり使われなくなりましたが、美術書や文芸書など読書の味わいを大切にする書籍では使われることもあります。

### 図 1-12-1 • グーテンベルクの印刷機



写真：アマナイメーجز

グーテンベルクの印刷技術の発明が社会に与えた最も大きなインパクトは、聖書の普及といわれています。印刷によって大量生産が行なえるようになり手頃な価格で、誰もが聖書を購入できるようになったのです。印刷技術によって作られた本は、新しい知識や考え方を広く普及させていく大きな力を持つようになりました。現在のインターネットやSNSなどのデジタルメディアに匹敵するような歴史上の大転換でした。

## 1-13



## 火薬と鉄砲の発明

— アルフレッド・ノーベル

### ● 火薬の発明

歴史を変えた大発明の一つとして、火薬と鉄砲の発明があげられます。火薬は主に武器として使われました。大砲や鉄砲の弾の他、現在のロケットやミサイルのような飛ぶ兵器の推進剤としても欠かせません。火薬を利用した高性能の兵器の発達が世界を変えていきました。兵器が世界を変えるというのは実に残念なことです。今も昔も変わらず強い軍事技術を持つ国が覇権を握るのです。ちなみに現代では、爆発したときの燃焼速度が音速以下のものを火薬といい、音速を超えるものを爆薬(炸薬)といいます。

火薬は一方で、平和のためにも利用されてきました。ダイナマイトのような大規模な破壊を行なうことができるものは、土木工事などに欠かせないものとなりました。災害を減らす治水工事やダム建設、建物を作るための斜面の破壊など、土木工事の効率を上げ作業を大幅にスピードアップすることができました。

ダイナマイトはよく知られているように、1896年に遺言によってノーベル賞を創設(授与は1901年から)したスウェーデンの化学者アルフレッド・ノーベル(1833-1896)が発明したものです。



ダイナマイトは、ニトログリセリンを珪藻土にしみ込ませて、安全に扱えるようにした爆薬です。ノーベルが開発した爆薬は兵器として戦争で大量に使われるようになり多くの兵士や市民の命を奪いました。ノーベルは心を痛め、ダイナマイトで得た莫大な資産を基金としてノーベル賞を設立しました。

それでは火薬はいつ頃発明されたのでしょうか。最初の火薬は中国で発明されたといわれています。紀元前という説もあれば6世紀頃という説もあります。最初の火薬は黒色火薬といわれるものでした。木炭・硫黄・硝石を一定の割合で混合したものです。13世紀頃には矢に火薬をつめて推進力とする、今でいうロケット砲が戦いで使われ始めました。14世紀頃には大砲が登場し、15世紀には最初の近代的な銃といえる火縄銃がヨーロッパで発明されました。

### ● 日本における鉄砲

火縄銃が日本に伝わったのは1543年、種子島に漂着したポルトガル人によるものとされています。日本人はすぐに鉄砲のメカニズムを調べて、同じものを作り始めました。ちょうど戦国時代であった日本では、鉄砲は画期的な威力を持つ新兵器としてあっという間に広がり、幾多の合戦で使われていきました。

1575年の長篠の戦いでは、武田勝頼の軍と徳川家康・織田信長の軍が戦い、徳川方は大量の鉄砲(火縄銃)を使い勝利しています。信長が発案したといわれる火縄銃三段撃ちが有名です。また、1614年の大坂冬の陣では、徳川家康が大口径・長射程の大砲で豊臣方の大坂城を砲撃したことが知られています。まさに科学技術を制するものが時代を制するといういい例といえるでしょう。

## 1-14



## 科学技術の先駆者

—— レオナルド・ダ・ヴィンチ

### ● 芸術と科学の天才

レオナルド・ダ・ヴィンチ(1452-1519)は、イタリア(現在のフィレンツェ)生まれの天才で、絵画・彫刻・建築・土木そして科学と幅広い分野で時代を超えた先進的な仕事をしました。

では、彼は科学の分野では、どのようなことに興味を持っていたのでしょうか。『レオナルド・ダ・ヴィンチの手記(下)』(杉浦明平訳、岩波文庫)の科学論に割かれたページ数を見ると、最も多いのが「水」58ページ、続いて「解剖学」で42ページ、「鳥の飛翔」33ページ、「地質と化石」26ページ、「天文」23ページ、「空気」18ページ、「力、運動」10ページ、

図 1-14-1・  
レオナルドの自画像



## ✈ トランジスタの発明・ 半導体集積回路の発達

—— ショックレー、バーディーン、ブラッテン

### ● 3本足の半導体スイッチ

20世紀前半は物理学の大飛躍の年代でした。後半はさらに加速しました。物理学・量子力学を工学的に応用した技術が猛烈な勢いで発展していったのです。そして、電力は照明や動力だけでなく、より高度な利用へと進んでいきます。それがデジタル技術です。ハードウェアとしてコンピュータが登場し、それを動かすソフトウェアが発明されました。ソフトウェアは目で見ても単なるアルファベット・数字・記号の羅列ですが、これがコンピュータに生命(いのち)を吹き込むのです。

明治の初め頃に世界中で発電所が設置され始め(1882年、エジソンが火力発電所開設)、照明がランプやろうそくから電灯に変わっていきました。また、工場などの動力も電気モーターが使われるようになり効率が格段に向上しました。

20世紀の半ばから電気の利用はまさに革命の変換を遂げました。トランジスタの発明により、半導体の利用が実現したのです。半導体はそれまでの真空管と違って、全固体なので、故障しにくく消費電力が小さく小型化が可能でした。半導体はラジオ信号の復調(検

波)や電力の増幅に欠かせないものです。トランジスタが登場した1950年代頃から、それまでの真空管式ラジオが続々とトランジスタ方式に代わっていきました。

真空管といっても世代によってはイメージできない方もいるかと思いますが、簡単に説明しておきます。真空管は内部を真空にしたガラスのチューブの中に電極を入れたものです。これまで説明してきた真空放電を行なうガラス管と基本的には同じ構造です。

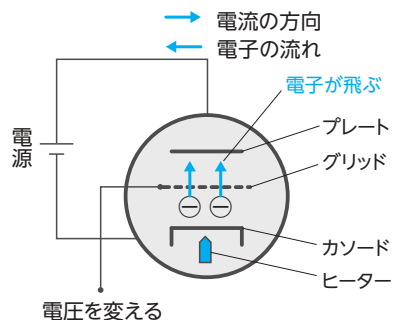
代表的な真空管である三極真空管の構造は次のようなものです。

カソード・グリッド・プレートと3種類の電極があって、ヒーターが熱せられると、カソード(陰極)から電子が飛び出しプレートへ飛んでいきます。グリッドにかかる電圧の大きさによって、飛んでいく電子(電流)をコントロールします。この機能を使うと、電流のオンオフを制御できるのでスイッチのように使うことができます。

図 5-1-1 • 真空管ラジオの内部



図 5-1-2・真空管の構造



真空管からトランジスタに代わったことで、時代はまた一段レベルアップしました。トランジスタを多数集積した集積回路(IC: Integrated Circuit)が作られるようになり、コンピュータが登場したことで社会が大きく変わったのです。コンピュータは人間よりもはるかに速く計算ができるので、さまざまな情報処理に使われるようになってゆき、テキストだけでなく画像や動画の処理もできるようになっていきました。プログラミングによって作られるソフトウェアは、人が持つあらゆるアイデアをコンピュータで実現できるようになりました。プログラミングは、20世紀半ば以降に登場した最も革命的な技術です。しかも、プログラミングは、小規模なサイズのものなら個人でも作成できます。これは非常に重要な点です。個人の知が集まって巨大な集合知を作り、それまでなかったような技術・文化・思想を作り上げていくことができるようになったのです。

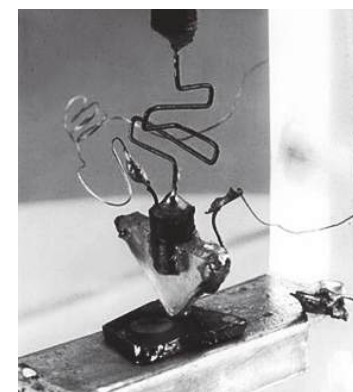
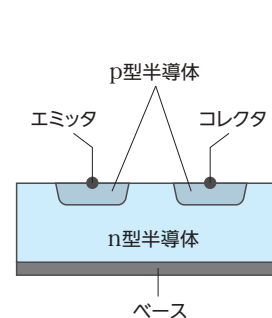
### ● トランジスタはどのようにして誕生したのか

科学技術史上極めて重要な発明であるトランジスタはどのようにして誕生したのでしょうか。トランジスタは1947年、アメリ

カの巨大通信会社AT&T傘下にあったベル研究所のウィリアム・ショックレー(1910-1989)、ジョン・バーディーン(1908-1991)、ウォルター・ブラッテン(1902-1987)が発明しました。

1947年、バーディーンとブラッテンは点接触型のトランジスタを作りました。点接触型とは半導体として作用する単結晶・高純度のゲルマニウムに電極を2本つけたもので、電極の細い針金が接していましたから点接触型と呼ばれています。ゲルマニウムの基板をベース電極といい、ここに接触させた2本の接点がエミッターとコレクターです。ベースとエミッターに電流を流すと、ベースとコレクターの間に大きく電流が流れることを二人は発見しました。

図 5-1-3・点接触型トランジスタの仕組み



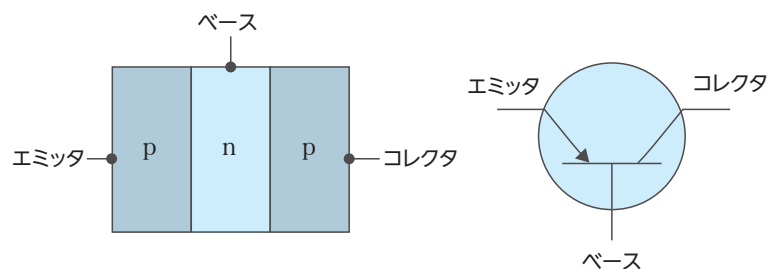
©Alcatel-Lucent

最初にベル研で、バーディーンとブラッテンが、点接触型のトランジスタの実験をしたとき、たまたまショックレーはその場にいなかったそうですが、二人の報告を受けたショックレーはものすごく興奮し、より安定して作動する面で接触する接合型(半導体材料を



貼り合わせて一体化したもの)のトランジスタを作りました。接合型は故障が少なく寿命が長く、製造しやすいのであったという間にラジオなどの電気製品に使われるようになっていきました。トランジスタの発明によって、この3人は1956年にノーベル物理学賞を受賞しています。原理の発見からたったの9年での受賞です。いかにこの発明が大きなインパクトを持っていたかがわかります。

図5-1-4・接合型トランジスタ



トランジスタは発明されてほどない1950年代には、日本でも東京通信工業(現在のSONY)がトランジスタの製造に成功。1955年に国産初のトランジスタラジオ(TR-55)として商品化しました。小型・軽量で故障しにくく低消費電力という特長を持ち、バッテリーで動くのでどこへでも持ち歩ける小型ラジオは大ヒットしました。

1956年には、当時SONYの研究者だった江崎玲於奈博士が、半導体研究の過程で量子力学的現象である半導体のトンネル効果を発見。エサキダイオード(トンネルダイオード)として商品化されました。トンネル効果とは、普通は電子が乗り越えることができないポ

テンシャルエネルギーの壁を量子の波動性によってすり抜けることをいいます。エサキダイオードは動作が速く、高周波の扱いに優れていたため、その後、通信機など幅広い分野で使われるようになりました。江崎博士は1973年、半導体のトンネル効果の発見により、ノーベル物理学賞を受賞しています。

### ● 半導体をスイッチとして使う

半導体は真空管に代わるものとして登場し、信号の検波や増幅に使われていましたが、電流のオンオフを電圧の変化によってスイッチングすることができるため、次第にデジタル回路で使われるようになりまし。トランジスタはいくらでも小さくできるので、トランジスタをシリコン基板の上に大量に並べた集積回路が作られるようになりました。これがICで、時代が進むとともにどんどん集積度が上がり、LSI (Large Scale Integrated circuit)やVLSI (Very Large Scale Integrated circuit)などという言葉が生まれてきました。現在の集積度は非常に高くなり、多いものでは1つのチップに数百億から数千億個以上のトランジスタが入っています。

集積回路の配線間隔は毎年のように狭くなり、LSI黎明期の1970年代にはプロセスルール(製造する際の配線間隔を表す)が10マイクロメートル(1マイクロメートルは1メートルの100万分の1)程度だったのが、現在(2024年)は2ナノメートルを下回り、さらに微細化されようとしています。原子の大きさ(直径)が約0.1ナノメートルなので、原子の大きさに近づきつつあるということです。

集積度の歴史には、ムーアの法則というものがあります。これは米インテル社の創業者で技術者のゴードン・ムーア(1929-2023)





が、1965年に半導体の集積度は1年で2倍になるとある講演会で発表し、実際そのとおりになっていったので、ムーアの法則として知られるようになりました。その後1年半で2倍になるとか、2年で2倍になるなど、いろんなバリエーションが出てきましたが、もともと「だいたい2倍」という意味での使い方では厳密なものではありません。しかし、現在に至ってもほぼこの予測は当たっているといえます。

それほどに集積度の向上というのは大切なことなのです。集積度を上げると、流れる電流を小さくできるので省エネになります。また発熱も少なくなり、結果として処理速度を上げることができるのです。

現代社会に欠くことができないデジタルインフラは半導体のおかげで成り立っており、その始まりが、トランジスタの発明だったのです。

## 5-2



## レーダーの発明、アンテナの発達、マグネトロン

—— 八木秀次

### ● 電波の活用とレーダーの発明

1896年にマルコーニが無線通信技術を実用化し、世界の距離をぐっと縮めました。電波技術はラジオ放送・テレビ放送と進化し、通信は短波帯(HF帯)から超短波帯(VHF帯)・極超短波帯(UHF帯)へと、より短い波長(高い周波数)の電波を使うようになっていきました。現在私たちが日常的に使っているスマートフォンは、一部でミリ波帯(30~300GHz、波長10~1ミリメートル)の電波(日本では5Gで28GHz帯を使用)を使うようになっています。さらに第6世代移動通信システム(6G)では、テラヘルツ帯(100GHz~10THz、波長3ミリメートル~30マイクロメートル)の電波を使うことも計画されています。

電波は最初は音声通信や放送への利用から発達してきましたが、それだけに使われているわけではありません。電波は次第に高い周波数(短い波長)が使われるようになっていきました。それには理由があります。周波数が高くなるほど、伝送できる情報量が多くなるのです。アメリカの情報工学者で数学者のクロード・シャノン(1916-2001)が提示した「シャノンの定理」が示すように、伝送



## ✈️ 航空技術の進歩と 超音速飛行機の登場

—— ライト兄弟

### ● ライトフライヤー号、初飛行の意味

1903年にライト兄弟が、史上初めての人が操縦する動力飛行機「ライトフライヤー号」を飛ばした後、飛行機は急激に進歩していきました。19世紀末から20世紀初頭は、小型軽量で馬力の大きなエンジン、主翼の揚力理論、操縦技術などが徐々に整い始めた時代でした。そのような先行研究を受けて世界各国の開発者がしのぎを削って人の乗れる飛行機の開発競争を行っていたわけですから、ライト兄弟の初飛行はまさに機が熟した出来事であったといえるでしょう。

ライト兄弟も、ただの技術的好奇心から飛行機を作ったのではなく、ビジネスとして展開することを考えていました。5年後の1908年には改良型のライトフライヤー A型機を製作、飛行持続時間は1時間を超えるまでになり、実用性が高まってきました。ライト兄弟が売り込んだ先は軍でした。軍は空から偵察したり、攻撃したりする用途に使えないかと考えたのです。初飛行からわずか10年余り後には第一次世界大戦(1914～1918年)が勃発。戦争中は相手国に勝つために必死の努力が行なわれるため航空技術は大き

く進展しました。

当時のドイツとイギリスの主力戦闘機の性能を比べてみると次のようになります。

### ● フォッカー D.VII

(ドイツ・フォッカー社製、1918年初飛行)

- ・最大速度：176 キロメートル毎時
- ・航続距離：450 キロメートル
- ・発動機：180 馬力レシプロエンジン
- ・最大飛行高度：7000 メートル
- ・最大離陸重量：880 キログラム
- ・乗員：1 名



### ● ソップースキャメル

(イギリス・ソップースアビエーション社製、1916年初飛行)

- ・時速：185 キロメートル毎時
- ・航続距離：455 キロメートル
- ・発動機：130 馬力レシプロエンジン
- ・最大飛行高度：6400 メートル
- ・最大離陸重量：660 キログラム
- ・乗員：1 名



この性能を見ると、わずか十数年前の初代ライトフライヤー号とは隔世の感があります。フォッカー機やソップースキャメル機の性能がどれくらいのものかということ、現代のプロペラを駆動するレシプロエンジン(ピストンの往復運動を回転運動に変換してエネルギーを得るエンジン)が1基ついた小型飛行機とほぼ同じくらいの



性能です。小型機のベストセラーで、世界中で4万機以上も売れているセスナ172型機の諸元は次のとおりです。

### ●セスナ 172

- ・最大速度：233 キロメートル毎時
- ・航続距離：1100 キロメートル
- ・発動機：180 馬力レシプロエンジン
- ・最大飛行高度：4267 メートル
- ・最大離陸重量：1157 キログラム
- ・乗員：4 名



©Peter Bakema

(注：シリーズによって若干数値に違いがあります。)

このように比べてみると、現代の一般向けの小型飛行機と同じくらいの性能を、第一次世界大戦時の飛行機がすでに実現していたことがわかります。大きな違いは、現在のような主翼が1枚の単葉機ではなく、2枚を持つ複葉機であったということです。当時は機体の構造や材料の強度が十分ではなかったため、強度を維持するために複葉機になっていました。戦闘機のような激しい機動を行なう飛行機は当時の機体でも6G（1Gの6倍の荷重）以上もかかったため強度が必要だったのです。また2枚主翼があると、舵の効きがよく、また1枚あたりは小さな翼面積でも必要な揚力が得られるので、空中戦などにおける機動性がよかったです。しかし空気抵抗は大きくなり、速度があまり出せません。

このようにライト兄弟のライトフライヤー号の誕生からわずか10年ほどで技術は目覚ましい進歩を遂げ現代の飛行機と同じくらいの性能を持つまでになったのです。

### ●プロペラ機の性能の限界

飛行機はさらに進化を続け、第二次世界大戦時には一つのピークを迎え、プロペラを搭載した飛行機が技術の限界まで到達しました。プロペラ機史上最強の飛行機といわれるリパブリックP-47サンダーボルト(初飛行：1941年)の諸元は次のようになっています。

### ●P-47D30

- ・最大速度：690 キロメートル毎時
- ・航続距離：1530 キロメートル
- ・発動機：2535 馬力レシプロエンジン
- ・最大飛行高度：1万2000 メートル
- ・最大離陸重量：6600 キログラム
- ・乗員：1 名



フォッカー D.VIIと比べると、速度が約4倍。最大重量が約7.5倍、エンジン馬力が約14倍にもなっています。20年ほどでここまで進化しました。P-47は同世代のP-51ムスタングと並んで、レシプロエンジン最後の世代の戦闘機です。

この後さらに飛行機は劇的な進歩を遂げます。ジェットエンジンと超音速機の登場が飛行機を大きく変えていきました。

第二次世界大戦時は、戦いに負けないようにするため、飛行機の性能を競い合った時代でした。しかも、こちらが性能を上げれば、相手方はさらにそれを上回る性能の飛行機を開発してきます。飛行機の主な飛行性能として、速度に関するものと飛行高度に関するものがあります。相手機よりも速い速度で飛ぶことができれば、追いかけても高速で離脱し振り切ることができます。高度について



も相手機よりも高い高度に到達できれば有利になります。しかし、レシプロエンジンにプロペラのついた機体には限界がありました。

エンジンの出力を高空でも維持するためには、ターボチャージャー(エンジンの排気を利用して空気を圧縮する方式)やスーパーチャージャー(エンジンの回転で圧縮機を回して空気を圧縮する方式)などの過給機を取り付けて、吸気圧(エンジンに取り込む空気の圧力)を増大させる方法があります。レシプロエンジンの出力はこのようなにして空気の薄い高高度でも、増大させることができますが、プロペラには致命的な欠点がありました。それは、大きな推力を出そうとしてプロペラの回転数を上げると、翼端が音速に達し衝撃波が発生してプロペラが破壊されてしまうのです。

例えば、セスナ172型機のプロペラの直径は1.9メートルですが、回転数が3410回転毎分になるとプロペラ先端の速度が音速を超えてしまいます。そのため同機では最大回転数が2700回転くらいに制限されています。

## ● 初めてのジェット機

プロペラ機には性能の限界があったため、それを乗り越える必要がありました。その結果できたのがジェットエンジンでした。ジェットエンジンは1929年にイギリスの技術者フランク・ホイットル(1907-1996)が発明しました。ホイットルの論文に影響を受けて、1939年にドイツのハインケルHe178が作られました。これが初めて飛行したジェット機ですが、まだ実用になるものではありませんでした。

初めての実用的なジェット戦闘機は、1941年に初飛行し1944年に運用が開始されたドイツのメッサーシュミットMe262です。飛行速度は約870キロメートル毎時と、プロペラ機では実現できない高速で飛ぶことができました。



ハインケルHe178

同時期には各国ともジェット戦闘機を開発し、イギリスはグロスターミーティア戦闘機を製造し、1943年に初飛行、1944年に運用が開始されています。

日本では1945年に国産初のジェットエンジンである「ネ10」を開発、このエンジンの改良型である「ネ12」及び「ネ20」を搭載したジェット戦闘機橘花を製造しました。橘花は1945年8月7日に初飛行しましたが、初飛行の約1週間後に終戦となったため、それが最初で最後の飛行となりました。

## ● ジェット旅客機の登場

第二次世界大戦後は戦闘機も爆撃機もほとんどがジェット機になっていきました。1952年には、「デハビラント・コメット」というジェット旅客機が商用運航を開始。ボーイング727(1963年初飛行)、ボーイング747ジャンボジェット(1969年初飛行)が登場しました。

しかし、すべての旅客機がジェット機に代わったわけではなく、一部の旅客機ではプロペラ機が使われ続けました。ただ以前のように

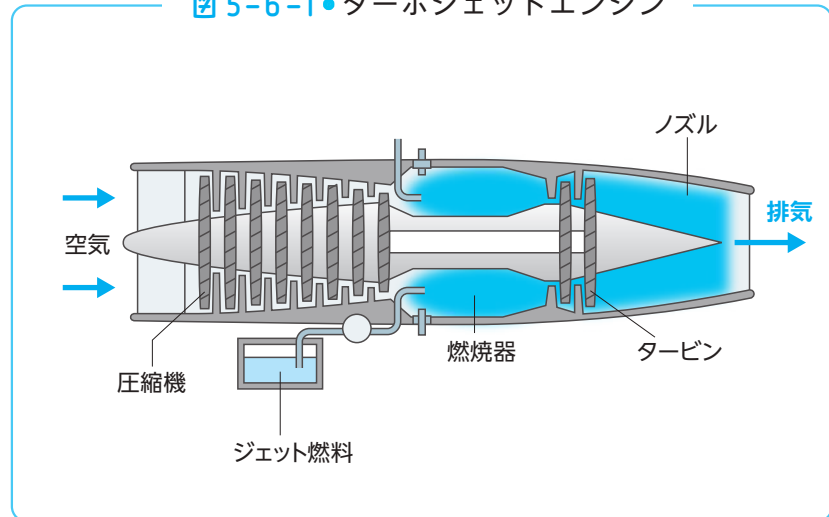


なレシプロエンジンのプロペラ機ではなく、ジェットエンジンを使ったターボプロップ機です。主に近距離路線で使われています。

旅客機がプロペラ機からジェット機に代わったことで、速度が音速近くの<sup>せんおんそく</sup>遷音速での巡航が可能となり、飛行高度も12キロメートル(4万フィート)といった、成層圏に近い高度を飛べるまでに進化しました。

ジェットエンジンそのものも戦後70年近くの間大きく進化してきました。初期のジェットエンジンは、ターボジェットエンジンと呼ばれ、エンジンの前方から吸い込んだ空気を加速して後方に吹き出し、その反作用で推力を得るものです。基本的な構造は簡単で、空気を吸い込む方から、圧縮機・燃焼器・タービン・排気ノズルから構成されています。圧縮機で空気を40倍くらいにまで圧縮し、それを燃焼室に送ってジェット燃料(灯油系の燃料)と混合し燃焼させます。そこで発生した高温高圧のガスでタービンを回し、ター

図5-6-1・ターボジェットエンジン



ビンの回転軸は、圧縮機とつながっていて圧縮機を回します。圧縮機に入るときの燃焼ガスの温度は摂氏1600度近い高温になります。タービンブレードは、冷却空気を取り入れるなどして冷却していますが、それでも摂氏1000度を超えます。

第二次世界大戦中の初期の戦闘機のジェットエンジンがうまく働かなかった原因の一つはこの高温に耐えることができる材料を作れなかったからです。現在はチタンの合金や耐熱セラミクスを使うことで、高温に耐えることができるようになっています。いくら冷却用の空気が流れていたとしても摂氏1000度にもなる環境で、10時間以上も飛行し続けるわけですから、その優秀さがわかります。

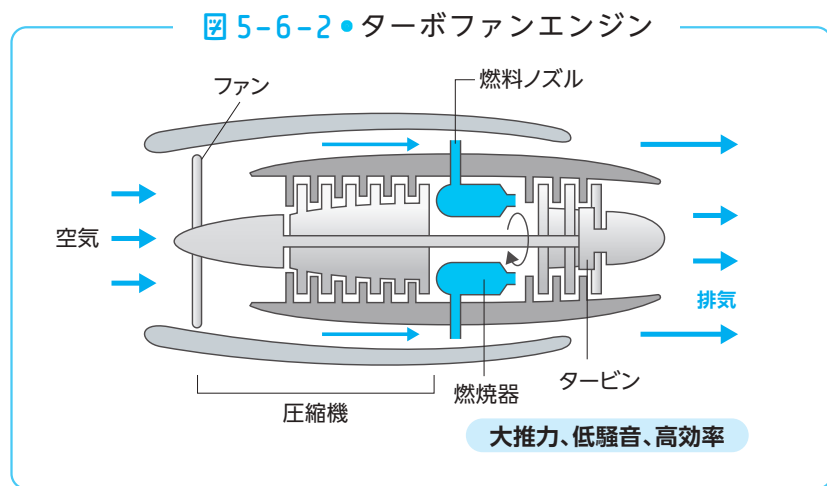
ターボジェットエンジンはジェット戦闘機や、ジェット旅客機では初期型のボーイング707(4発ジェット輸送機、1957年初飛行)に搭載(プラット・アンド・ホイットニー製JT3Cターボジェットエンジン)されました。ターボジェットエンジンはプロペラ推進のレシプロエンジン機よりもはるかに大きな推力を出すことができましたが、騒音が大きく燃費が悪いという欠点がありました。また、ターボジェットエンジンは排気の色が速すぎて、戦闘機のような高速機には向いているのですが、旅客機のような遷音速域以下の遅めの速度域では効率が悪いという欠点がありました。

### ●ターボファンエンジン

そこでこの欠点を補うために、ターボファンエンジンが開発されました。このエンジンは、圧縮機の前に大きなファンを取り付けて、ターボジェットエンジンの周りを包み込むように空気を流すことで、エンジンの冷却・騒音軽減・推力増強を行ないます。ターボ



ジェットエンジン内部に送られる空気の量とファンによってエンジンの外側を流れる空気の量の比をバイパス比といい、この比は時代が進むとともにどんどん大きくなっていっています。最新のターボファンエンジンは1:10を超えており、推力の大半がファンによって送られた空気によって得られています。空港などで旅客機を見ると、エンジンがずんぐりとしています。あれは前方に大きな送風ファンをつけているからで、ジェットエンジン本体はもっと細くて小さいです。



また、ターボファンエンジンは騒音が小さいことも特長です。最近、空港に離着陸するときの騒音が基準を超えていると乗り入れのできない空港もあるくらいです。ジェットエンジンの騒音はターボジェットの排気が周囲の空気との境界部分で渦が作られることで発生します。これをファンから流れる大量の空気で包み込み、噴流全体の速度を落として騒音が外に漏れないようにしているのです。

## ● 超音速機の開発

第二次世界大戦後に実用的なジェットエンジンが登場・発達して現在の便利で高性能な飛行機があるわけですが、もう一つの技術的トピックスは超音速飛行の実現でしょう。音速(マッハ1)を超えると、空気が円錐状に圧縮され、それがドーンという大きな衝撃音(ソニックブーム)となって地上に到達します。このとき、大きな抵抗(造波抵抗)が生まれます。しかし音速を超えて飛行することは人類の夢でした。

歴史上初めて水平飛行で超音速飛行に成功したのは、アメリカのベルX-1というロケットエンジン飛行機で、1947年のことでした。ロケットエンジンは、液体燃料か固体燃料を燃焼させて推力を得るもので、飛行機というよりミサイルのようなものです。ただ、人が乗って操縦できるため、飛行機に分類されます。

その後、1967年にはノースアメリカンX-15ロケット機(1959年初飛行)がマッハ6.7を記録しています。この飛行機が出した速度記録は今も有人飛行機としては最高速です。

ジェットエンジンを搭載した飛行機では、1948年にノースアメリカンXP-86 (F-86セイバー戦闘機の試験機)が「急降下中に」音速を超えています。

1950年代には米ソの冷戦構造が進み、互いに飛行機の世界競争を行なうようになっていきました。高速で相手国上空に進入し、偵察したり爆弾を落として超音速で離脱(逃げる)するという戦法が考え出されたのです。その頃の代表的な超音速戦闘機が日本の航空自衛隊でも採用されていたF-104Jです。この飛行機は最大速度が音速の2倍であるマッハ2とされています。時速でいうと毎時



2450キロメートルです。この後もF-15、F-16、F/A-18といった超音速戦闘機が登場しました。最高速度はどれもマッハ2程度となっています。

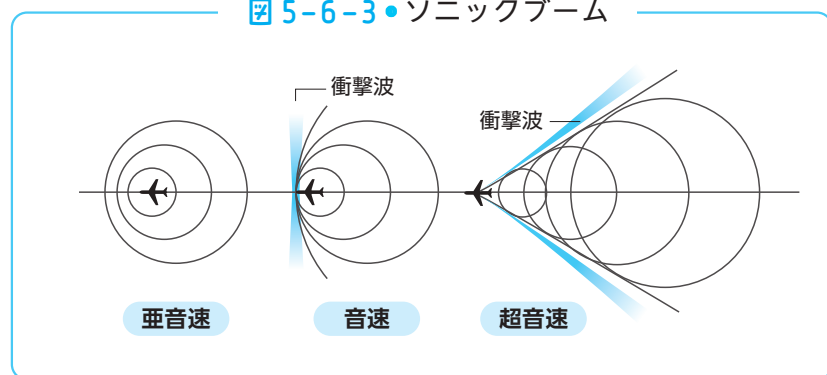
また最新の第5世代戦闘機のF-35やF-22も同じくらいの速度です。現在はレーダーでターゲットを捉えて目で見える距離をはるかに超えた距離から攻撃する戦法が取られることが多いので、超音速性能はそれほどには必要とされないのです。

最も速い飛行機は、ロッキード・マーチン社製のSR-71高高度戦略偵察機です。1964年に初飛行したこの飛行機の最大巡航速度はマッハ3.2といわれています。

## ● 旅客機も超音速に

旅客機で、超音速で飛べるのは、イギリス・フランス共同開発のコンコルドです。最大速度約マッハ2.04。1969年に初飛行、1976年から商用運航を開始し、2003年に運航を終了しています。民間機の超音速飛行には陸地の上で超音速飛行をしてはならないという規則がありました。衝撃波による大音響が地上の人々に騒音被害を

図 5-6-3・ソニックブーム



与えるからです。

そこで、コンコルドの運航終了後は、ソニックブームのできるだけ少ない飛行機を作る研究が進められてきました。その代表がアメリカのNASAがロッキード・マーチン社とともに開発中のX-59です。高度6万フィートをマッハ1.6で飛行する予定です。2020年代の半ばくらいには試験飛行が行なわれます。

また、アメリカの民間企業ブームテクノロジー社は70人前後の乗客を乗せてマッハ1.7で飛行する超音速旅客機の開発を進めており、2024年3月には初飛行に成功し、すでにエアライン数社から注文がきています。

この他、アメリカのNASAや日本のJAXAが研究中のものに、マッハ4から5で飛行できる極超音速機があります。このような高速になると、ソニックブーム対策の他、断熱圧縮による高温に耐える機体やラムジェット、スクラムジェットといった極超音速飛行用の新型のエンジンの開発が必要になります。また、エンジン冷却技術・機体の構造強度などクリアしなければならない問題がたくさんありますので、極超音速機が実現するのは少し先のことでしょう。

ラムジェットというのは、圧縮機を使わずに、音速を超えるような高速の空気の高圧を利用して、いわば「自然圧縮」して推力を得るエンジンです。低速では作動せず、遷音速域を超える超高速で効率よく動きますから、音速を超えるまでは通常のジェットエンジンで加速してやる必要があります。また、エンジン内を最初から最後まで超音速で空気が移動しますから、その中で燃料混合・着火・排気をスムーズに行なう技術を開発する必要があります。

スクラムジェットはラムジェットの発展形で、マッハ5程度の飛



行を可能にする自然吸気型のエンジンです。2004年には、NASAの無人スクラムジェット実験機X-43が、高度1万メートルで母機B-52爆撃機から切り離され、さらに高空まで上昇しマッハ9.68を記録しました。

超音速飛行の歴史年表（国名を指定したもの以外はアメリカ製）

1947年8月	X-1ロケット機。マッハ1.015（非公式記録）。
1947年10月	X-1ロケット機。マッハ1.06（公式記録）。
1948年	XP-86ジェット戦闘機。急降下で音速を超える。
1953年	スカイロケット機D-558-2。マッハ2.0。
1953年	YF-100ジェット戦闘機。マッハ1.38。
1953年	X-1Aロケット機。マッハ2.435。
1953年	ミグ19ジェット戦闘機（ソ連）。マッハ1.35。
1954年	F-104ジェット戦闘機。マッハ2.0。
1956年	X-2ロケット機。マッハ3.2。
1960年	X-15ロケット機。マッハ2.97。
1964年	SR-71ジェット偵察機（実用機）。マッハ3.2。
1967年	X-15ロケット機。マッハ6.70。
1969年	コンコルド超音速ジェット旅客機（仏・英）。マッハ2.04。
2004年	NASA無人スクラムジェット機。マッハ9.68。

## 5-7



## 現代の科学技術に名を残す 日本の研究者たち

—— 小川誠二、飯島澄男、福島邦彦

### ● fMRIで脳活動を見る

20世紀末の1990年代から21世紀にかけて脳の機能が続々と解明され、新しい知見が拓がっていきました。以前から脳の機能（どの部分がどんな情報処理を担当しているかなど）の概略はわかっていました。例えば、視覚情報を処理するのは大脳皮質の後方にある視覚野であるとか、記憶は海馬という部分で行なわれているといったことです。しかし、fMRIによって、その活動状態を高い空間分解能で詳しく調べることができるようになってきました。

この新しい脳機能科学に大きく貢献した技術がfMRI（functional Magnetic Resonance Imaging、機能的磁気共鳴画像法）です。これは、脳の活動状態を画像化する装置で、視覚や聴覚などなんらかの情報が脳内にインプットされたとき、脳のどの部分が活動しているかを詳細に可視化できます。病院で病理診断に使われているMRIとの違いは、静的な構造を見るのではなく脳の活動状態を時間経過とともに知ることができる点です。

強力な磁場の中に被験者を入れ、刺激によって起こる脳の血流の変化を捉え、特定の刺激に対してどの部分の活動が活発になるかを

