

航空機の発達と その構造材料の変遷 (第2回)



C-ASTEC 中澤隆吉/中菱エンジニアリング 伊原木幹成

2.2 アルミニウムの工業生産

アルミニウムは地球上では酸素と結合した酸化アルミニウム(Al_2O_3)の状態が存在し、その鉱石はボーキサイトと呼ばれています。このボーキサイトからアルミニウムを工業的に量産するようになった歴史は浅く、19世紀後半に次の2つの方法が相次いで発明されてからです。まず、1886年にアメリカ人のチャールズ・マーティン・ホールとフランス人のポール・エルーが夫々独自にアルミニウムの精錬法を開発しました。彼らの方法は、氷晶石とフッ化ナトリウムを混合した融剤にボーキサイトから精製した酸化アルミニウムを溶解させ、それを電気分解して陰極に金属アルミニウムを得る方法で、2人の名前を冠してホール・エルー法と呼ばれています。次に、1888年にオーストリア人のカール・ヨーゼフ・バイヤーがボーキサイト鉱石から酸化アルミニウムを高濃度に精製するバイヤー法を開発しました。ボーキサイト鉱石の酸化アルミニウム濃度は40~60%程度で、残りは二酸化ケイ素、酸化鉄、二酸化チタンなどです。そこで酸化アルミニウム濃度を上げるために、高温の水酸化ナトリウムで酸化アルミニウムを水酸化アルミニウムにして溶解し、溶解しない他の物質を濾過して除去し、その後冷却して沈殿した水酸化アルミニウムを加熱・脱水して高濃度の酸化アルミニウムを得る方法がバイヤー法です。この2つの方法により、アルミニウムの工業的な大量生産が可能になりました。

産業革命は蒸気機関による動力が重要な役目を果たしたことは広く認められていますが、この頃から産業基盤として電力が供給され始め、アルミニウムの電気分解が工業的に成立できるようになりました。

アルミニウムは酸素との結合が強いため、容易に安価で大量の金属アルミニウムを生産できなかったため、それまでは希少な珍しい金属でした。例えば1855年、ナポレオン3世が開催したパリ万国博覧会で、晚餐会に出席した各国の公賓に対して貴重品とってアルミニウム製食器が紹介された逸話が残っています⁴⁾。この解説文をお読みの読者は、アルミニウム製食器と言え、直ぐに小学校の給食を思い出すのではないのでしょうか。当時と現在のアルミニウムの価値の変化は一目瞭然です。

アルミニウムが本格的に工業的に大量生産されるようになったのは20世紀初頭で、ライト兄弟の人類初飛行と同じ頃でした。アルミニウムは比重が2.7と小さく、鉄の比重7.8の約1/3と、金属としては非常に軽量です。しかし、純アルミニウムの強度は低く、構造材料として使用できる水準ではありませんでした。そこで、軽量のアルミニウムの強度を向上するための合金開発が行われました。当時はいわゆる鉄、即ち炭素鋼の熱処理による硬化が広く知られていました。それで研究者はアルミニウムに他の元素を加えた合金を製作し、熱処理してその強度を向上しようとしていました。炭素鋼は高温に加熱して室温の水に急冷する焼入れ処理を行うと、直ぐに硬化します。この現象から金属は焼入れ処理すると直ぐに硬化すると先入観が生じていました。研究者は鉄と同様にアルミニウム合金に焼入れ処理を行い、直ぐに硬度を測定しましたが、大きな効果は得られませんでした。炭素鋼とアルミニウム合金では硬化の機構が異なるためですが、当時は誰もそのようなことを想像することができませんでした。

強度の高いアルミニウム合金は、ベルリン近郊の理工学中央研究所に所属していたアルフレート・ヴィルムにより半ば偶然に発明されたと言われています。1906年9月、ヴィルムは、アルミニウムに銅を合金化した試料を土曜日の夕方に焼入れ処理を行いました。そして焼入

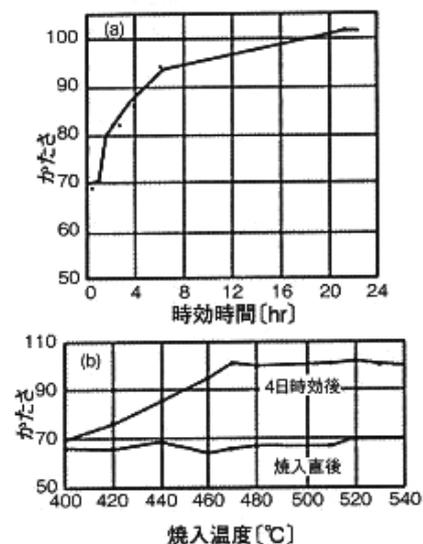


図4 Al-Cu合金の時効硬化曲線⁵⁾

れ後、直ぐに硬さを測定しないで、月曜日に測定することにして帰宅しました。日曜日を楽しんだあとに月曜日に出勤して測定した時、試料の硬さが大きく上昇しているのに気が付きました。今では大学生でも知っているAl-Cu合金の自然時効現象ですが、当時はその理由は不明でした。その後ヴィルムは時間が鍵と推定し、時効硬化曲線を取得し、硬化が間違いない物理現象であることを確信しました。図4にヴィルムが取得した時効硬化曲線を示します。ヴィルムは1909年にこの合金の特許を申請し、1912年にドイツで特許が成立しますが、1909年に時効硬化現象を研究論文にまとめて発表し、世界にアルミニウム合金の時効硬化現象が公表されました。同年、ドイツのアルミニウム会社がヴィルムの合金特許を購入し、販売した合金の商品名がジュラルミンです。これ以降、ジュラルミンは高力アルミニウム合金の代名詞として定着するようになりました。販売されたジュラルミンは数種類ありましたが、その強度は400MPa程度で、十分軟鋼に匹敵する強度でした。そのため軽量で高強度の材料として注目され、当時の飛行機の構造材料としても十分使用できる強度水準に達していました。

3. 第一次世界大戦後～第二次世界大戦

3.1 全金属製飛行機の出現

第一次世界大戦の飛行機の構造は、複葉機が主であり、木製の骨格にキャンバス布を張ったラーメン構造でした。機体によっては木製の骨格を鉄製に変更した機体もありました。しかし、1909年のジュラルミンの工業化によりジュラルミンを使用した飛行機や飛行船を製造する動きが起きました。1914年頃からドイツのツェッペリン社が飛行船の骨格にアルミニウム合金を使用し始め、1918年にはユンカーズ社が全金属製の飛行機:J Iを初めて製造しました。しかし、この頃の機体の構造は相変わらず鉄骨のラーメン構造のままで、外皮にキャンバス布の代わりにアルミニウム合金の波板を張り付けたものでした。図5に胴体構造の例を示します。この外皮のアルミ

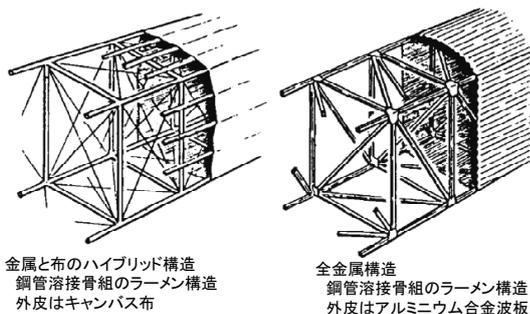


図5 飛行機外皮の金属化³⁾

ニウム合金化による利点として機体の耐候性が著しく向上したとされています。キャンバス布は雨や露により水分を吸収して重くなり、また当時使用されていた接着剤の膠が水分により剥がれる問題もありましたが、アルミニウム合金の外板によりこれらの問題は解決され、運用性が格段に向上したとされています。

一方、飛行機の翼の空力的な研究も進みました。初期は鳥の翼をまねた薄い翼が良いと考えられており、そのために構造体としての翼の剛性を高くすることはできませんでした。そこで、複葉機にして2枚の主翼間に支柱を立ててステーを張って剛性をもたせるのが構造的に容易に成立する手法でした。しかし、風洞試験の結果から厚い翼でも成立することが判明しました。この結果、構造体としての翼の剛性を高くすることが可能となり、片持ちの単葉機が強度上成り立つようになりました。最初に設計された厚い翼は、それまでの胴体構造様式の延長上のトラス・ビーム構造の桁でしたが、その後上下のビーム間に薄板を張って剪断荷重を取るワーグナー・ビーム桁が開発され、現在の金属製飛行機の主構造様式である、セミ・モノコック構造の原点が完成しました。図6に従来のトラス・ビーム桁とワーグナー・ビーム桁の構造例を示します。トラス・ビーム桁では上下に平行な2本の鋼管とそれらに垂直な短い鋼管を溶接で結合して正方形を作り、対角線方向にワイヤを張る構造でしたが、ワーグナー・ビーム桁では上下のビーム、垂直方向のビーム、薄い板を全てジュラルミンで構成します。これにより、トラス・ビーム桁と同等の強度を軽量で実現することができました。この軽量化により大型の輸送機の製造も可能になりました。

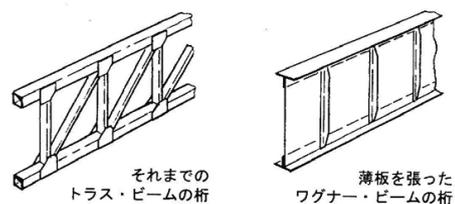


図6 トラス・ビーム桁とワーグナー・ビーム桁³⁾

参考文献

- 3) 久世紳二:「旅客機の開発史」,(社)日本航空技術協会,(2006), 32, 60, 57, 56, 3, 183.
- 4) 桜井弘:元素111の新知识 第2版増補版, 講談社ブルーバックス,(2009).
- 5) 八太秀周, 吉田英雄:航空機用アルミニウム合金展伸材の歴史, JFA, 45, (2014) 28.

注:本連載は6回に分けて掲載されております。項目、図番号および参考文献は第1回から連続しています。