

歯車技術の基礎知識 (1)

— 歯車の役割の理解 —

北 條 春 夫*

1 はじめに

歯車はトルクや速度の変換、さらに軸の向きや位置の変換といった役割があるが、昨今では歯車を介さずにモータによるダイレクトドライブ化が進んでいる。これは、動力源となる電気モータ（以降モータ）技術の進化が著しいことによる。

サーボモータが普及し、工作機械では、主軸はベルト駆動からダイレクトドライブに、テーブルはボールねじを使用した駆動へと変化してきた。

自動車においては、内燃機関（以降エンジン）駆動のものに加えて、電動自動車（Electric Vehicle：EV）やハイブリッド自動車（Hybrid EV）が市場に投入され、変速機を省略することも多いためか、「歯車はいらない」といった誤解もある。一方トラック、バスといった大型自動車では歯車による動力伝達が主流である。

歯車を使うか否かは、機械が目的を達成する際の運転性能（歯車はどうしても振動しやすい）と、コスト（製造コストと運転コスト）、設置スペースや重量のメリット、さらには安全性も考慮して決められる。

今日では、大学で歯車を教えることがほとんど無くなった。また、歯車についての知識を得るための書籍にも恵まれない。あたかも完成した技術と思われがちである。実際には、省燃費のための損失低減、トータルコスト低減のための高強度化や長寿命化の課題は今でも重要な技術課題であるし、実際のところ数多くの機械に当たり前のように使われている。

しかし歯車あるいは歯車装置を設計するのは一

筋縄では行かない。多くの要因が絡んでいるからである。これは専門家に任せながらも、歯車の設計、運転の本質は理解しておくべきである。そこで今日の歯車を取り巻く技術について解説を加えることとする。

ここではまず、動力伝達に関しての歯車の存在価値を、単純な力学に基づき移動機械の例も考えながら一度確認することから始める。

その後、歯車の幾何学基本事項、強度設計の本質、運転性能、へと話を展開する予定である。

筆者略歴：1976年3月東京工業大学大学院修士課程修了後、同大学助手、助教授、教授、2016年3月定年退職。この間、平行軸歯車の騒音の可視化、発生メカニズム、振動の研究に主として取り組む。日本機械学会の歯車の研究分科会（RC）に研究者側委員、主査としても参画。独、仏、日本、それに中国において開催される国際会議に、インターナショナルメンバとしても参画してきている。自動車技術会技術担当理事、日本機械学会副会長等を歴任。

2 歯車利用における力学と原動機の関わり

機械は、出力側で目的に合わせた運動を作り出して負荷を動かす。そこではまず力が必要で、その結果としてなにがしかの仕事をする。この負荷の様子を再確認し、原動機とのマッチングについてまとめる。

* Haruo Houjoh 東京工業大学 名誉教授 工博

2.1 クレーンとモータによる駆動

図1は、クレーンが荷を吊り上げる姿である。動滑車によって引き上げる際、質量 m [kg] の荷には重力 F [N] ($=mg$, g は重力加速度) が作用し、これをある高さ h [m] まで吊り揚げるから、その位置エネルギーの上昇分 mgh [J] の仕事をする。適切な時間内に上記の仕事をするため、ある上昇速度 v で上昇させる。このための仕事率は、

$$P = F \cdot v = mgv \text{ [W または J/s]} \quad (1)$$

となる。なお現実には釣りフックや、滑車、ワイヤなどの質量も考慮する必要がある。クレーンでは動滑車の利用により n 本のワイヤをかけて吊るので、ワイヤ張力は $1/n$ になる代わりに、ウィンチドラムによるワイヤの巻き込み速度は n 倍となる。なおここでは起動停止の大きな加速度は生じないものとしている。

このワイヤの巻き取りをドラムに取り付けたモータで行うことを考える。モータの出力トルク特性は横軸を回転速度として、一般的に図2のように表せる。出力トルクはステータとロータの間に作用する電磁力に比例するが、低速の範囲では供給電流の限界により定トルク特性となる。なおモータのトルク T は体積力として発生するので、

$$T \propto i \cdot D^2 \cdot L \quad (2)$$

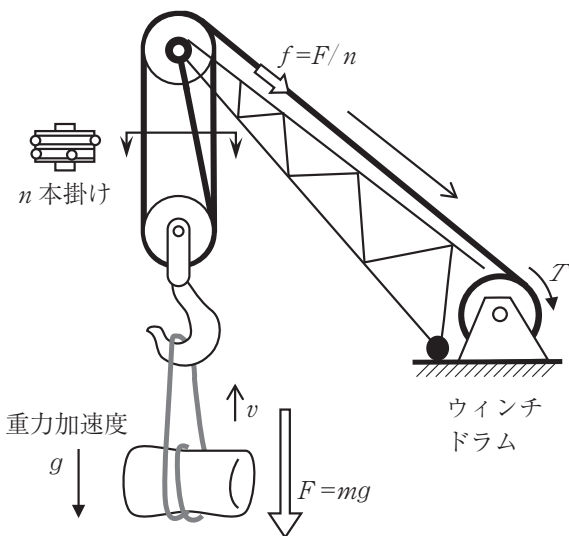


図1 クレーンで重量物を吊り上げる力学

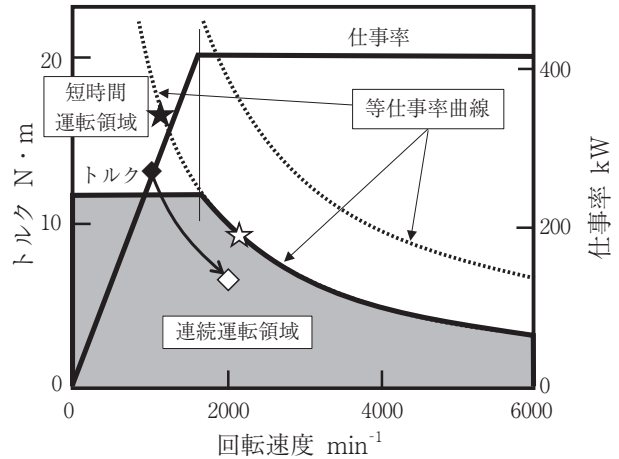


図2 ACサーボモータのトルク特性の例

なる関係がある。ここで i は電流, D は直径, L は軸方向長さである。また永久磁石が用いられる場合はその磁力にも関係する。

一方高速領域になると、モータの発熱量が限界を迎えてしまい、最大トルクは定仕事率曲線に沿って減少し、その上逆起電力が回転を妨げる方向に作用する。

吊り上げ荷重とドラムの運転トルクは比例するから、図2において吊り上げ速度ごとに最大トルク、すなわち最大吊り上げ荷重が定まる。モータの回転速度が低いときの最大荷重は、モータの定トルク特性で定まり、この条件ではモータの最大仕事率、すなわち最大のポテンシャルを活用しないことになる。図の★や◆印の荷重は、そのままでは定常運転できないが、それぞれの印を通る等仕事率線上を移動させると、このモータの許容運転範囲の中に同じ仕事率の運転点が見つけれられる。

結局このモータを使うなら、モータの回転を速くして最大仕事率で運転すればよい。このためには、動滑車の数を増して掛けるロープ本数 n を増してロープの張力を下げ、巻き込み速度を速くするか、減速機を用いてモータの回転速度を高める(図2中の☆◇印)。◇印の場合には、まだモータの能力に余裕があることとなり、モータの小型化も可能となる。

2.2 マシニングセンタの主軸とモータ

図3は、工作機械において刃物が加工物を切削してゆく概略図である。切削加工では通常、切込み量と切削速度が主要な加工条件である。刃先

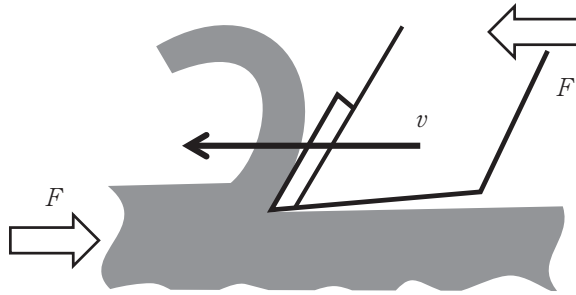


図3 金属を刃物で切削する単純力学モデル

は工作物に食い込んで、切削抵抗 F を受ける。切削速度 v で進みながら加工を行うから、クレーンの場合と同じ力学で理解できる。

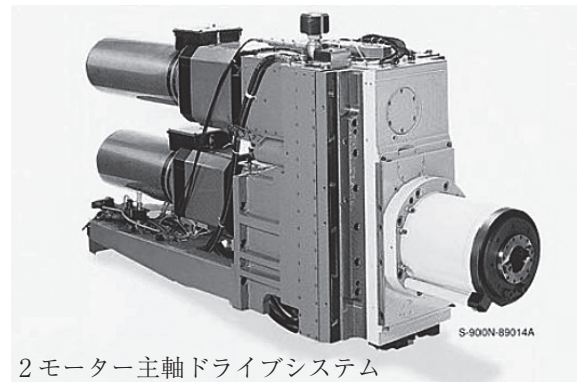
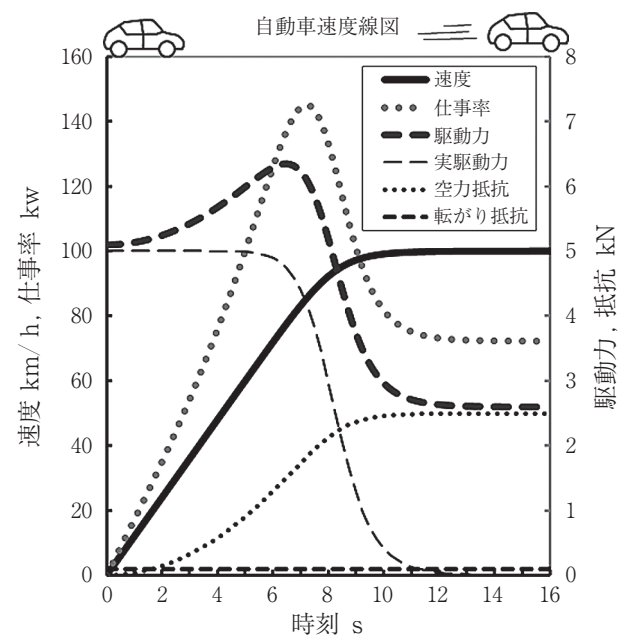
フライス加工では、 n 枚の刃物が回転して工作物の表面を削り取るので、図3の動きが半径 r の円周上に離散的に生じる。一般に粗加工では切込み量を多くして低速で切削し、仕上げでは切込み量を小さくして切削速度を高くする。この時仕事率は概ね一定の傾向になる。よって、モータから主軸を直接駆動すると、トルク特性を低速度から高速度まで活用でき、都合が良い。近年スピンドルモータはこれだけの性能がある。また、歯車を使わずに済めば、振動が生じにくくなるので、きれいな仕上がり面が得られるメリットもある。

しかし、大型のフライス盤やホブ盤といった除去量がさらに大きな加工をする工作機械においては、トルクが不足気味となることが多い。この場合、大きな切削力を発生させるために減速機を用いる要求が今日でもある。

図4はその一例であるが⁽¹⁾、重切削時には、別のモータから歯車減速機を介してダイレクトドライブモータを補助している。主軸モータの低速高トルク化を図るのも一案ではあるが、モータの直径が大きく重くなるという寸法上の問題が生じやすく、さらにモータのコストの問題がある。

2.3 自動車の場合

前記の2例は、定常的な運動における力学であったが、自動車は常に力と速度が変動して関わりあう。図5は、自動車が平地において停止している状態から、発進して加速してゆく様子を表すグラフで、縦軸は速度、駆動力（タイヤと地面

図4 横中ぐり盤の主軸構造例⁽¹⁾、下段が、ダイレクトドライブモータ、上段が減速機用モータ図5 自動車の発進から巡行までの速度と駆動力⁽²⁾

間に作用する自動車を前進させる力)と仕事率を、横軸に時間を示している。単純化して発進から一定の加速度で増速し、後に滑らかに定速度に推移するものとして描いている⁽²⁾。

発進後ほぼ10秒以降では、走行抵抗と呼ぶ反力につり合う一定の駆動力を発揮して、定速走行する。走行抵抗は、転がり抵抗 f_{dr} と、車両が風圧を受ける空気抵抗 f_{da} と、坂道を登るときの勾配抵抗 f_{d0} の和である。

10秒までの加速の領域では、駆動力は走行抵抗に釣り合う成分に加えて、加速度と質量に比例する推進力として費やされる。加速度を α [m/s²]とすると、駆動力は

$$F = m\alpha + f_{dr} + f_{da} + f_{d\theta} \quad (3)$$

仕事率は、

$$P = Fv = f_{\alpha}v + (f_{dr} + f_{da} + f_{d\theta}) \cdot v \quad (4)$$

ここで $f_{\alpha} \equiv m\alpha$ は慣性抵抗と呼ばれるとなる。空力抵抗が速度の2乗に比例し無視できないため、駆動力は図のように上昇気味となり、加速度が小さくなり始めるのに遅れて駆動力も減少してゆく。このあたりで仕事率最大となる。

自動車を駆動する往復ピストン方式のエンジンは、回転速度に対して概ねトルク一定の傾向を持つ。燃焼室内の圧力と体積の関係が $p-v$ 線図に描け、理論上は1サイクル当たりの仕事量が定まるからである。現実には各種の抵抗や熱拡散、燃焼速度の影響などがあるため、**図6**の例のような曲線になる。エンジンは、回転速度ゼロからの運転ができないことと、低回転速度での出力トルクが小さいことが特質である。トルクは燃焼させる混合気の量に比例すると考えられるから、エンジンの排気量や過給量に対して比例的に増加する。

さて、自動車には通常、変速機および終減速機が用いられている。ここでは6速の手動変速機を搭載した、縦置きエンジンで後輪駆動の自動車を例にとり、その速度や加速度と駆動力の関わりを示す。自動車の駆動系のスケルトンは**図7**のようになる。エンジン回転速度とタイヤ回転速度の関係は、その間にある動力伝達系の減速比によって決まる。ここでは、概ね**表1**のようになる。

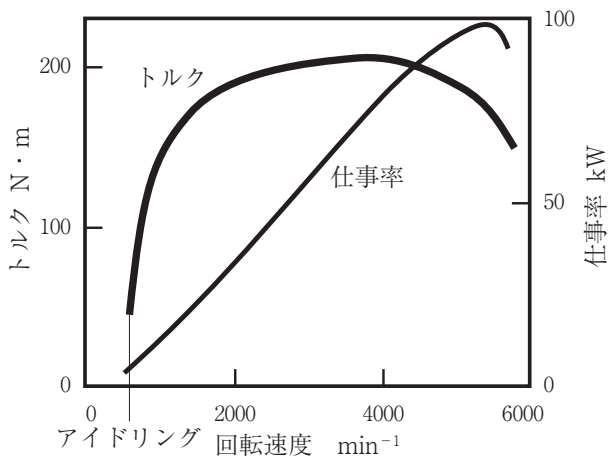


図6 エンジンのトルク特性の例

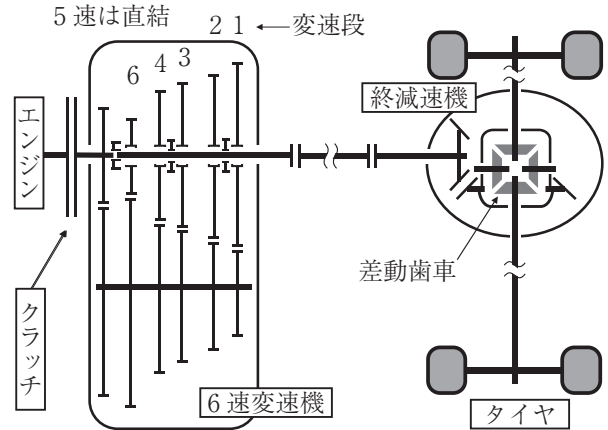


図7 自動車の動力伝達系の概要、後退は省略

表1 エンジンとタイヤの間の減速比

	1速	2速	3速	4速	5速	6速
総減速比	14.4	8.67	6.17	4.67	3.83	3.17
各段の減速比	3.76	2.26	1.61	1.22	1	0.83

この総減速比は変速機と終減速機との組み合わせで得られる。

駆動力とエンジンの回転速度の関わりは、車両の速度を横軸にとって示す走行性能線図(**図8**)にまとめられる。なお、ここでは概数計算が容易なように、自動車の質量を1.5t、内燃機関最大回転速度を6,000min⁻¹、外周長さを2m(タイヤ外径637mm)とする。縦軸は、左軸が駆動力と走行抵抗で、右軸はエンジン回転速度(毎分あたり回転数)である。駆動力は変速段ごとに、走行抵抗は路面の勾配ごとに示している。単純に見れば走行抵抗より高い駆動力が得られるところで、その差に見合った加速度で推進することができる。

図5において、発進以降の一定加速度の範囲では、停止状態からクラッチを滑せて(半クラッチで)エンジン回転速度を高めて所要のトルクを発生させて伝え、その後は5kN~6kNの駆動力で加速してゆく。しかし50km/hでエンジン回転速度が限界を迎えるが、それより手前でトルクも減り始めるので例えば40km/hで2速へ変速(シフトアップ)する。その時の仕事率は約60kWであり、エンジンの最大仕事率は使っていない。

2速に変速後、加速度を維持するのに必要な駆動力は6kN程度であるが、図8からわかるよう

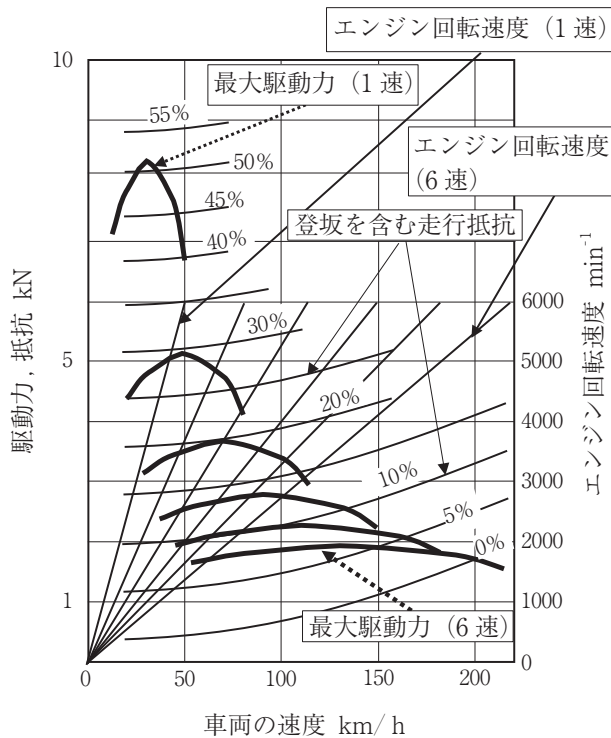


図8 自動車走行性能線図

に2速ではこのトルクを発生できない。またこの事例では、80km/h程度になれば必要な駆動力は4kN程度に低下するので2速での加速が可能にも見えるが、すぐにエンジン回転速度の限界を迎えてしまう。このように、図5の加速条件を実現するのは少々無理なようなので、加速の後半では、少し小さな加速度にしなければならない。

またこの加速条件の下では、エンジンが公称の最大仕事率を發揮する瞬間はない。また最高速度は、その時の走行抵抗と駆動力が一致する点によって規定される。したがって、最大仕事率がいくらという表現のみでこの自動車の加速走行性能を的確に判断することはできない。また、性能を發揮させるために歯車による減速比をち密に設定する必要がある。

図7の縦置きエンジンでは終減速機にハイポイドギヤが広く用いられ、回転軸の方向を90度転換させる役割を持つ。俗にデフと呼ぶのは、この歯車の内部にかさ歯車を用いた差動装置(Differential gears)と一緒に組み込まれるためである。横置きエンジンでも終減速機と差動装置は変速機内に収められる。終減速機は変速機の大きさ(中心距離)を小さくすることにも貢献する。

2.4 ロボットアームの駆動

ロボットアームの運動は、自動車の直線運動を回転運動に置き換えれば同様に理解できる。質量に相当するのはアームの慣性モーメントである。停止しているアームを急に起動させると、大きな運転トルクが必要となるが、起動時の加速に必要な仕事率は小さい。急減速時も同様であり、減速機付きのモータが活躍している。

2.5 まとめ

以上のように力と速度(またはトルクと角速度)と仕事率の関連性を理解して、原動機と負荷の間に歯車を使うべきか否かを考える必要がある。なお、ここでは、原動機の効率最良となる運転については無視をした。

3 航空機の減速装置

航空機用エンジンは、重量に対する出力仕事率の観点から、軽量で高回転速度のガスタービンエンジン(ジェットエンジン)が多用されるのはよく知られている。また、推進のための駆動系のレイアウトや、効率化の視点で歯車が活用されており、大変興味深いので紹介する。これに加えて、軽量化と強度の両立が重要な観点である。

3.1 ヘリコプタ

揚力を発生させるヘリコプタのメインロータは、その先端速度が音速を超えることができない。その結果ロータ軸の回転速度は概ね200~400min⁻¹である。シングルロータのBK117(ドクターヘリでも著名)では、2基のエンジン内の歯車で6000min⁻¹に減速されたそれぞれの出力が、図9に示すように、まずスパイラルベベル歯車で減速と軸の向きを変換して、最終のはすば歯車でさらに減速し所定の回転速度を得る構造となっている。

タンデムロータ式ヘリコプタCH47⁽⁴⁾では、尾部に置いた2基のエンジン出力を合成してから、前と後ろのメインロータに同じ回転速度で逆向きの回転を伝達する(図10)。細かい説明は省略するが、かさ歯車に前後で異なる軸角を与え、2段遊星歯車を組み合わせて所定のロータ軸配置と減速比を得る。

3.2 ティルトロータ垂直離着陸機

近年運用されているV-22のメカニズムを紹介

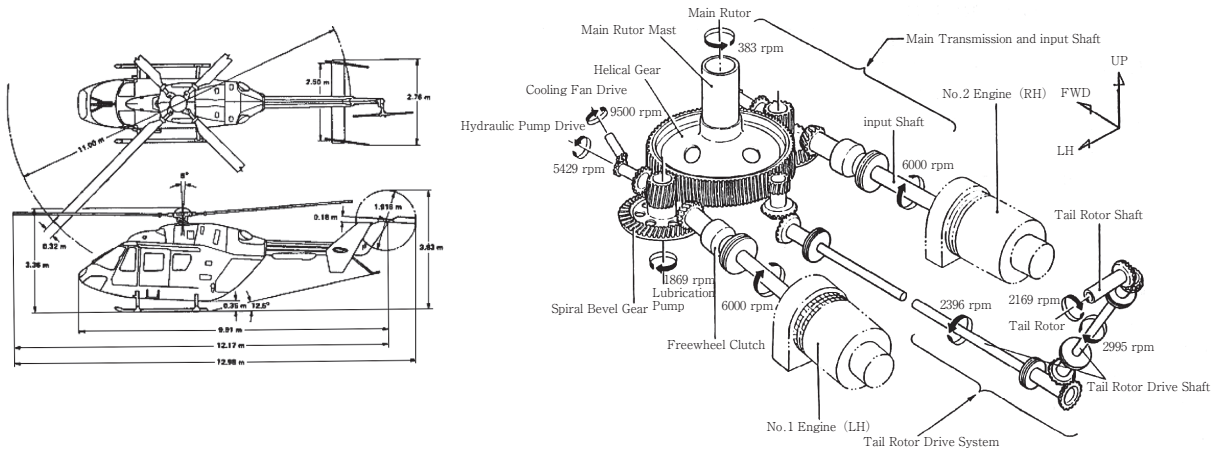


図9 川崎重工 BK117 ヘリコプタとその駆動系⁽³⁾

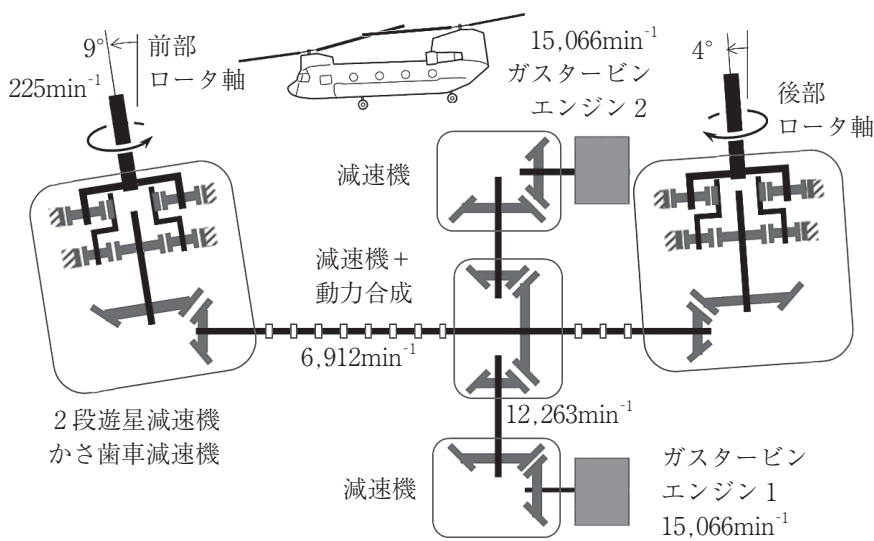


図10 Boeing CH47 タンデムロータヘリコプタの駆動系概略図 (文献を元に著者作成)

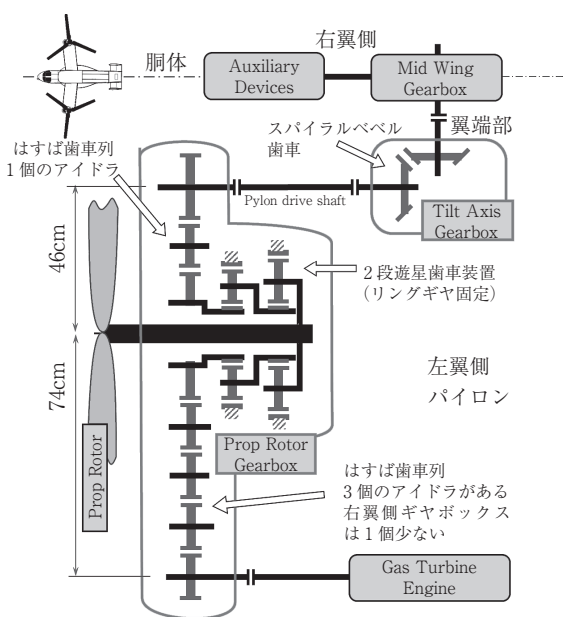


図11 Bell-Boeing V22 の駆動系概要 (左側部分のみを記載, 文献を元に著者作成)

する⁽⁵⁾。図11は、その駆動系の概要図である。入手できる資料の図からは細かくは把握できないので、スケルトンを記述から書き起こした。左右のロータ（プロップロータと呼ぶ）が、互いに逆向きに、かつ同期して回転する。CH47と違ってエンジンはそれぞれのロータ軸部分に主減速機（Proprotor Gearbox）と一緒に搭載される。ロータの傾角の中心軸上に置かれスパイラルベベル歯車で構成される Tilt Axis Gearbox, 固定翼中央部に Midwing Gearbox を通じて左右の軸が接続されている。

ロータ軸と、エンジン軸あるいは左右連結用軸との間隔をコンパクトな構造の中で確保するために、アイドラギヤが用いられているのが大きな特色で、歯車の使い方を象徴している。ロータ自体は、ロータ軸上に設けた2段遊星歯車装置で減速

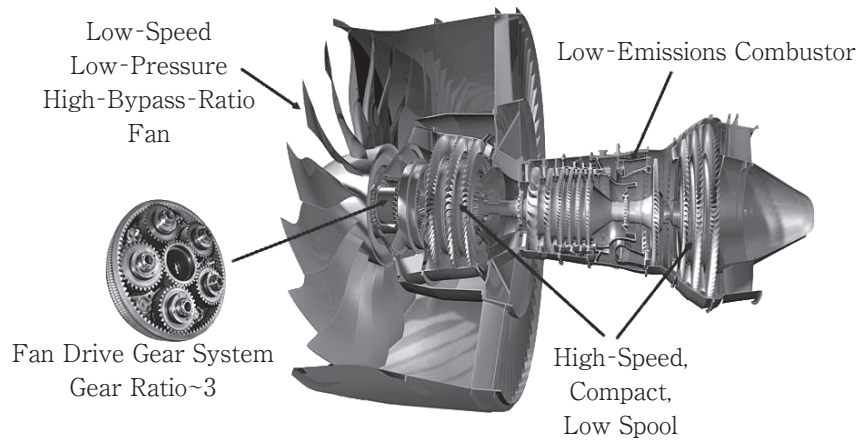


図12 Pratt and Whitney ギヤードターボファン (GTF) エンジン

されて回転する。

3.3 飛行機のギヤードターボファン (Geared Turbo Fan) エンジン⁽⁶⁾

これは国産のジェット旅客機 Space Jet (旧 MRJ) にも搭載される (図12)。ファンジェットの効率化のためにファンは大きくし、回転速度は遅くしたい。一方低圧タービンは燃焼ガスからのエネルギー回収のために高速で回したい。そこで、タービンエンジンの出力軸 (低圧タービンとコンプレッサー) を歯車で減速して大口径のファンを回す。このために、スター形配置の遊星減速機 (内歯車減速機) が軸の前方に置かれる。ここでは減速比は3である。単にバイパス比を確保するだけでなく、バイパス流れの速度を遅くし、効率をさらに向上させる工夫である。

4 おわりに

以上のように、機械の働きのために力や速度の要求仕様があるが、有効に機能するためには仕事率も重要である。原動機の性能がそのまま仕様を満足できるなら、歯車はいらないことになるが、効率面の検討も必要である。また寸法の制約や機構上の制約から、回転軸の方向を適切に変える必要があるときには、歯車にその役割を求める

ことになる。

参考文献

- 1) 安田工業(株)マシニングセンターカタログ「YBM Series」
- 2) 近森順 (編) : 自動車工学の基礎, 名古屋大学出版会, 2018
- 3) 増江達哉 : BK117型ヘリコプタの開発について, 日本航空宇宙学会誌32-362, pp.142-148 (1984.3)
- 4) www.chinook-helicopter.com/standards/
- 5) Charles J. Kilmain, et. al. V-22 Drive System Description and Design Technologies, American Helicopter Soc. 51st Annual Forum, 1995, pp.1384-1403
- 6) Chris Hughes : The Promise And Challenges Of Ultra High Bypass Ratio Engine Technology and Integration NASA Presentation at AIAA Aero Sciences Meeting January 4-7, 2011. www.nasa.gov.