

機械要素設計

歯車の強度計算

締結・接合要素

ねじ締結

第13回

配布用資料について

1. 引用した図，写真，表などを割愛しました.
2. 計算式など教科書を読めば分かる部分は割愛しました.
3. 従いまして，授業時の内容よりかなり少ない資料になっていることを御了承下さい.

Technical terms

- Involute curve
- Gear tooth surface
- Rolling contact
- Backlash
- Module
- Height of a tooth
- Surface pressure strength
- Bending strength
- Stress
- Wearing
- Fatigue failure
- Pitching
- Scuffing
- Dynamic Load
- Carbon alloy steel
- Cast iron
- Brass alloy
- Aluminum alloy
- Stainless steel
- Durability
- Accuracy
- Poly-acetal resin
- Nylon resin
- Corrosion resistance
- Lubrication
- Surface roughness

(復習) 歯車の基本形状

- インボリュート曲線

- 歯車の歯面の曲線の基本(ピッチ円に巻きつけられた糸をほどいた曲線)
- 理想的には噛み合ったときに接触面における相対運動(滑り)が生じない(転がり接触のみ)
- 直線の刃物で歯面を加工できる(ラック&ピニオンにおいてラックの歯型は直線である)

実際には

1. 加工精度による形状の誤差, ばらつき
2. トルクによる歯の変形
3. 加工法による転移の必要性和形状変化
4. バックラッシの必要性和断続的接触

などの問題により,

理想的には噛み合ったときに接触面における相対運動
(滑り)が生じない(転がり接触のみ)

が成り立たない.

理想的な歯車

1. 必要な精度による歯面形状
2. 十分な強度の材料の選択
3. 仕様を満たす出来る限り小さいモジュール(細かい歯)の利用

モジュール大		モジュール小
歯丈分, 大きくなる	歯元のモーメント	歯丈分, 小さい
厚い	歯の厚さ	薄い
大きくなる傾向	転移量	小さくて済む
大きくなる傾向	バックラッシ	小さくてよい
大きくなる	振動, 騒音	小さい

歯車強度設計で考慮すべき要素

摩耗	<ul style="list-style-type: none">• 長期間の使用による通常の摩耗• 過負荷や高温など異常環境下における異常摩耗• 形状の変化により他の破壊要因を促進
折損	<ul style="list-style-type: none">• 寿命超過による疲労破壊• 衝撃など過負荷による歯元から破壊• 不適切な加工・処理による強度不足
ピッチング	<ul style="list-style-type: none">• 面圧の高さ, 疲労による歯面のくぼみ・破壊
スカuffing	<ul style="list-style-type: none">• 歯面の焼き付きによる溶着, 剥離破壊

歯車の設計法（選定法）

1. 目的, 対象を明らかにする
 - 動力伝達, 位置決めなど
2. 動力, 伝達方法などを決定する
 - 負荷特性, 負荷変動, 回転方向
3. 使用環境の条件を明らかにする
 - 温度, 潤滑, 振動, 組み合わせ
4. 歯車の形式を選定する
 - 平歯車, はすば歯車...
5. 歯車強度を計算し歯車を選定する

歯車の強度計算

1. 歯車の**材料**から検討
2. 歯車の**曲げ強度**（歯元応力）から検討
 - ルイスの式（1892年）：歯を二次曲線形状の片持ち梁として近似して解析
 - 伝達トルクに対し歯の根元に加わる**応力**（**曲げモーメント**）を検討
3. 歯車の**面圧強度**（疲れ強さ）から検討
 - ヘルツの式（1881年）：歯面を円筒形として近似し弾性接触したときを解析
 - 伝達トルクによる歯面の**面圧**を検討

○歯車発明は紀元前
○インボリュート歯車
利用は1765年

1. 歯車の材料

何の為に選定するか？

- 開発する装置の機能実現のため、使用状態・使用環境を考慮し、適した材料を選定

選定のポイント

- 利用条件と材料固有の特性を考える

例) 高温・低温, 真空, 動作時間, 低騒音, 低振動, 潤滑油利用の可否, 負荷変動(イナーシャの大きさ), メンテナンス頻度, 信頼性(不具合の深刻さ)……

1. 歯車の材料

分類	分類	主な材料	大まかな特徴
金属	鉄鋼系	炭素鋼, 鋳鉄, 合金鋼(ステンレス)	大動力を伝達する機器向けの高強度 長時間動作を要求される機器向けの高耐久性
	非鉄鋼系	黄銅, アルミ合金	動作を重視した機器向けの高精度 慣性力低減を重視した機器向けの軽量
非金属	樹脂	ポリアセタール, ナイロン	小型, 軽量, 安価, 静音, 使用環境への影響低減(非潤滑)など上記以外の目的

樹脂歯車の特徴

主な特徴

1. 小型・軽量
 - 比重が軽い
2. 低騒音
 - 振動吸収性に優れる
3. 耐食性
 - 薬品に強い
4. 自己潤滑性
 - 潤滑油が不要
5. 生産性がよく安価
 - 金型の利用, 射出成型

考慮すべき点

1. 発熱(低熱伝導率)
 - 金属歯車との組み合わせ, 潤滑剤の利用
2. 熱膨張・吸湿性
 - バックラッシュと軸間距離で調整
3. 締まりばめ時の破損
 - 変形可能だが形状に注意
4. 潤滑
 - 負荷が大きい場合樹脂を侵さない潤滑剤
5. 冷却時の変形
 - 変形を防ぐ形状の工夫, 成形後の破面加工
6. 一体成型
 - 樹脂歯車の大きな利点

2. 歯車の曲げ強度（歯元応力）

何の為に計算するか？

- 歯が曲げモーメントによって折れない強度を持たせるため
（折損防止）

計算のポイント

- 一枚の歯を片持梁と考え、歯先に作用する力によって歯元に発生する曲げ応力を計算（ルイスの式）
- 噛み合って回転すること自体が繰り返し荷重と考える

3. 歯車の面圧強度（疲れ強さ）

何の為に計算するか？

- 歯面に加わる接触圧（面圧）によって歯面が破壊されない強度を持たせるため（ピッチング、スポーリング防止）

計算のポイント

- 歯面を円筒面と考え、噛み合った線接触部における弾性変形と面圧を計算（ヘルツの式）
- 圧力角 20° 分だけ傾いた状態での接触を考える

特徴的な要素

幾何学的形状, 弾性材料力学観点だけでなく

- 歯面の接線方向の滑り速度
- 歯面の粗さ, 精度, 表面処理
- 潤滑状態(動粘度)

についても数多くの係数を考慮

4. 歯車の焼き付きへの強さ

2つの歯面

- 潤滑油膜を介し、滑り転がり接触

金属同士の直接接触の問題

- 接触圧力、滑り速度等の運転条件がある限界を超えると、油膜または境界層が破断

表面破壊

- 接触により2面が融着し、剥離

原因

- 運転条件、歯車幾何、材料、潤滑油等、歯車の運転に関わるすべての因子その関係は複雑、難解で解析困難、解析モデルはない

歯車強度設計で考慮すべき要素

1. 摩耗	<ul style="list-style-type: none">• 通常の摩耗でも、幾何的条件(形状)が大きく変化• 形状の変化により他の破壊要因を促進
2. 折損	<ul style="list-style-type: none">• 強度条件のほか、加工法、材料の状態、運用状態に依存• 想定外の負荷・環境も原因
3. ピッチング	<ul style="list-style-type: none">• 上記同様
4. 焼き付き・スカuffィング	<ul style="list-style-type: none">• 各要素に起因する不具合、最終的には熱により破壊

変形

曲げ応力

面圧

熱

その他の工夫

実際の使用状態に対応した歯面の調整

1. 歯形修正（歯厚を僅かに追加）
2. クラウニング（歯面を僅かに樽型に）
3. エンドレリーフ（歯面両端を面取り）

一体成型は理想形態か？

- 飛行機などでは複合材を利用し、**一体成型**もしくはそれに近い構造を持った部位が極めて多い。
- 応力を分散でき、**形状や構造を最適化**したものを利用出来る可能性が大きい。

性能に大きく寄与する軽量化、
運用コスト(メンテナンス)を
低減する高信頼性化、など大
きなメリット



機械の設計を大きく変える可能性
があるだろうか？

2→6年の重整備で済むようになった

飛行機と自動車

	中大型旅客機	小型～ビジネス ジェット	自動車
部品点数	300万点	10～100万点	3万点
年産(世界)	1,000機	2,000機	78,000,000台
価格(新品)	7,500,000,000～ 30,000,000,000円	300,000,000～ 3,000,000,000円	1,000,000～ 30,000,000円
運用状態	恒常的な万全の整備 を要す 規定運行時間まで中 古機体でも運用可能	恒常的な整備を要す 規定運行時間まで中 古機体でも運用可能	定期的な点検整備を 受ける車体から相当 ラフな運用の車体も ある
事故後の扱い	小事故は修理, それ 以上は廃棄	小事故は修理, それ 以上は廃棄	かなりの事故でも修 理される車体もある

一体成型が最適解ではない場合

以下のような場合、一体成型、一体構造が
適さない

- 消耗品の定期的な交換
- 不具合による修理・部品交換
- 故障・事故後も修理・使用継続
- 追加部品による調整・機能追加
- 既存機器・設備への置換，増設



締結手段を講じることを前提とした設計を行う必要性

締結を必要とする主な応用分野

機械・乗り物

- 自動車
- 鉄道
- 船舶
- 航空機
- 宇宙
- 建設機械
- 産業機械
- 生産設備

メカトロ機器

- ロボット

エレクトロニクス

- 情報家電
- 計測・測定器

その他

- 建物・プラント等の構造物
- 医療機器
- 医療検査機

Technical terms

- Single piece
- Fastener element
- Assembling
- Part replacement
- High reliability
- disassembling
- Bonding
- Adhesion
- Welding
- Relative motion
- Added value
- Looseness

部材締結技術

構成する各部品及び構造物の各部材を結合

締結の特徴

- 組立て・分解が可能
 - リベットによる接合の場合を除く
 - 接着, 溶着, 溶接などは締結には含まれない

リベットでも分解, 再組み立ては可能だが容易ではない.
これを繰り返すことも基本的に想定されていない.

リベットの材質劣化を検査するには電流を流し, その応答で判定.

部材締結技術

部品と部品、部分と部分の被締結部を、

- ボルト
- ナット
- 小ねじ
- タッピンねじ
- リベット
- ピン

等の部品を用いて締結する技術

締結機能を有する部品を総称して締結用部品

他にもある

英語表記(基礎編)

- Bolt

- Screw / Screw thread

- Nut / Screw nut

- Vise

- Tapping screw

- Rivet

- Pin

部材締結技術の現状

	現状	課題
ア. 軽量化	機械製品は一様に軽量化が進む傾向	大量の締結用部品が使用されている 輸送機械等では、強度維持, 軽量化
イ. 新素材 部材締結	セラミックスや炭素繊維 等新素材の多用	軽量化や高機能化、高感性化 新素材の部材は締結が難しい
ウ. 製品信 頼性	日本製品に対する高い 信頼性を今後も維持	強度設計と緩み機構、 緩み防止 設計 品質とメンテナンス性の向上 トレーサビリティ向上
エ. 環境負 荷低減	環境への責任 リサイクル性に配慮	ねじ部品は分解可能な締結方法 製品, 部品, 部材のリサイクル
オ. 生産性 向上	新興国のメーカーのコス ト競争力, 世界的に市場 拡大	高い労働コストの競争力を維持 限られた労働力で高い付加価値 締結作業効率化は生産性向上
カ. 高強度 化	高付加価値	耐久性の向上及び軽量化、コスト削減 に繋がる部材の高強度化

部材締結技術の背景をまとめると

製品の高性能化, 高機能化, 高付加価値化, 優れた意匠

扱いの難しい新素材の利用, 多種多様・複合した材料の利用

締結材自体の高機能化, 高付加価値化

締結部品に求められること(1)

- 機械の高性能化に寄与
 - 軽量化, 部品点数減少
 - 扱いの難しい新素材の締結
 - 高耐久性, 高信頼性による事故防止
- 生産性向上
 - 容易で効率的な組み立て性, 工程改善
 - 高付加価値, 多品種生産, 短納期
- 環境
 - 環境負荷物質を削減
 - 解体性を容易にしてリサイクル
 - メンテナンス性を向上して廃棄部品の低減
 - 生産時の省エネルギー化

締結部品に求められること(2)

- トレーサビリティ

- 使用履歴情報を把握して保守, 改善に利用
- 生産時の履歴により改善に利用
- 締結部品の状態からこれらの情報を再現可能



高付加価値につながる
優れた品質である証

- 製品そのものの状態を確認する仕組み
 - 製造時の情報の伝達・蓄積する仕組み
- 製造から使用, 廃棄まで情報を第3者が追跡可能

機械部品同士の結合（事例）

シュパンリング

ヒンジ

リベット

溶接

スプライン

カヌークリップ

プラスティリベット

機械部品同士の結合（相対運動の可否）

1. 相対運動可能な結合

－ 回転や並進など常に運動する部分

- ・ 軸受, スライダ(摺動)機構など

－ 開閉, 脱着する部分

- ・ ヒンジ, ツメ, 冑など

2. 相対運動が不可能で分解可能な結合

- ・ ネジ, キー, スプライン, ピン, 楔(シュパンリング)など

3. 相対運動が不可能で分解を想定しない結合

- ・ リベット, 溶接, 接着, 溶着, はめあいなど

リベットは全く分解しないとも言いきれない

機械部品同士の結合（分解の可否）

• 永久結合

- 一度結合したら、再度分解することを前提としない
 - はめあい, 焼きばめなど部品構造部材の変形を利用
 - 接着, リベットなどを介在させて結合
 - 溶接, 溶着など構造物同士を結合（不可逆）

• 非永久結合

- 点検, 整備, 補修のため, 組み立て後も分解することを前提とする

- 摩擦による締結力を利用して結合
- 幾何的な形状を利用して結合

受け止められる力
(トルク)に限界

方向により抜け落ち
てしまう危険性

分解を想定する締結要素

求められる機能

- 確実な締結
 - 決められた締結力を決められた期間発揮
 - 緩みなど自己分解を起こさない
- 必要な時に分解可能
 - 工具等を利用することで分解，着脱が可能
- 再度運用が可能
 - 再組み立て，再使用が可能

締結要素を扱う汎用ハンドツール

Spanner

Hexagon wrench

Ratcheted
box wrench

Phillips screwdriver

Offset wrench

Box wrench

Electric screwdriver

Air impact
wrench

工具を確実に操作できる部品形状を考慮した設計は極めて重要

締結要素を扱うハンドツール

- 汎用的な工具・設備を利用できれば基本的にはよい
 - 高付加価値のために工具を限定したり, 専用工具を前提にする設計も場合により有効
-
- 汎用的な工具の中には上のような締結部品を劣化させるものも少なからず存在
 - 設計時の工夫でこれらの利用を避ける形状も可能(ざぐりなどでボックスレンチやアーレンキーの利用を促す)

演習

本日の授業を参考に,

A) 関心のある製品, 部品の例を挙げ

B) 締結要素を具体的に3種類(箇所)挙げ

C) それぞれについて

- どのような役割(機能)を果たし

- どのように使われているか

- 特に特徴的な性質はどのようなものか(何故か)

説明せよ.

配布した用紙に回答のこと.