

仙台市/仙台市産業振興事業団
 ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー
 第21回 C21/Rev 1.0

ものを形づくる 材料と強度の基礎知識

仙台市地域連携フェロー
 熊谷 正朗
 kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
 ロボット開発工学研究室 RDE

今回の目的

○ ものを形にするときの選択と計算

テーマ1: 材料

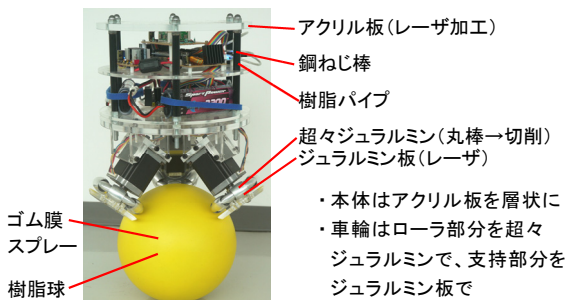
- ・ロボメカづくりにありがちな材料
- ・材料の特性と選定の根拠
- ・代表的な材料の特徴

テーマ2: 形状と強度

- ・形でかわる部材の強さ
- ・強度とたわみ

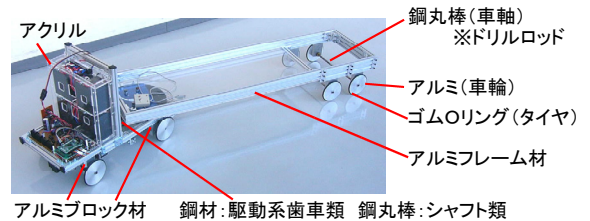
ロボットの材料

○ 玉乗りロボットの場合



ロボットの材料

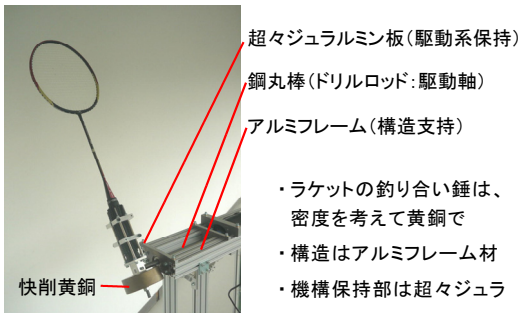
○ トレーラーロボットの場合



- ・汎用のアルミフレーム材で車体の主要構造を組み立て
- ・主にアルミ系ブロックで支持部品を作成し、組み付け
- ・車軸、および歯車類(市販品)は鋼材

ロボットの材料

○ バドミントンロボットの場合



ロボット・メカトロ機器で使う材料

○ 金属系 一般に切削加工、一部鋳造

◇一般的

- ・アルミ (アルミ合金、ジュラルミン)
- ・鉄系 (鋼、ステンレス)
- ・黄銅 (=しんちゆう) 銅系合金

◇特殊用途

- ・銅
- ・マグネシウム合金 チタン合金

ロボット・メカトロ機器で使う材料

○ 合成樹脂系 切削加工/射出成形/重合

◇身の回りのプラスチック・ゴム

- ・アクリル 塩ビ
- ・ABS PET
- ・合成ゴム (および天然ゴム)

◇機械材料系 (エンジニアリングプラスチック)

- ・ポリカーボネート
- ・ポリアミド (MCナイロン: 青い樹脂)
- ・ポリアセタール (POM、ジュラコン)

材料の選択

○ なにを目的に選ぶか

◇機械的機能

- ・「強さ」
- ・形と大きさ
- ・加工整形手段

◇対人、耐環境的機能

- ・見た目、手触り、アレルギー
- ・劣化、耐水/塩/薬品

◇コスト

材料の選択: 機械的機能

○ 強さ

◇強さにはいろいろある → 詳細は後ほど

- ・ 引っ張りに対する強さ (力)
→ (1) 壊れる(破断)までの強さ
(2) 変形が残らない限度
※曲げ: 折れない/曲がらない
- ・ 伸びにくさ = パネ的性質 (力/変形量)
※曲げ: たわみにくさ
- ・ せん断、表面硬さ、繰返し

材料の選択: 機械的機能

○ 密度(重さ・質量)

◇重力と関係 運動の加減速と関係 → C17

- ・ 質量 = 体積 × 密度
 - ・ 往々にして「この大きさ・形が必要」
例) なにかを挟む治具、ツマミ
→ 軽くするには密度を下げる
 - ・ 軽さと強さ → 比強度 = 引張強さ/密度
- ◇材料の価格は「円/kg」が一般的
※配達されて驚く材料の重さ

材料の選択: 機械的機能

○ 加工のしやすさ

◇加工のしやすさはコストに響く

- ・ 加工そのもの
- ・ 加工後の組み立て手段
※目的とする形にも強く依存

◇問題:

- 「豆腐と鉄はどちらが加工しやすい？」
- ・ 切るだけなら、豆腐 ※人による
 - ・ 一辺10.0mmの立方体をつくるとしたら？

材料の選択: 機械的機能

○ 加工のしにくさ

◇材料の硬さ

- ・ そもそも強くて切ったり削ったりできない
- ・ 割れやすい(脆性)

◇材料の柔らかさ

- ・ 加工精度が出せない 固定しにくい

◇耐熱性 → 加工熱による変成や変形

◇不均質さ → 加工の安定性低下

→ 豆腐の加工は難しい!

材料の選択: 選択の事例(加工)

○ 玉乗りの車輪の試作は黄銅で



◇玉乗りロボットの車輪

- ・ 比較的複雑形状、強度はそれほど不要
- ・ 学内工場に相談したところ
「アルミはダメだと思ふ、黄銅ならOK」

◇その理由は？

- ・ アルミはやわらかいから
(加工時の変形、伸びるような削れ方)
- ・ 快削黄銅は加工しやすく、形状作りやすい

材料の選択: 選択の事例(加工)

○ レーザー加工機のための材料選び

◇直感的印象

- ・ 鉄が切れるならアルミはもっと切れるだろう

◇実際

- ・ 鉄よりアルミが苦手

例) 本学の加工機:

鉄10mmOK、アルミ3mmが厳しい

- ・ アルミも純アルミはNG、銅も金、銀も

→ 反射率と熱伝導性

材料の選択: 機械的機能

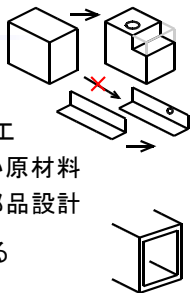
○ 材料の形

◇機械部品の加工 = 除去加工

- ・ 最終的に欲しい形に近い原材料
- ・ 原材料の形を活かした部品設計

◇材料の形状には制約がある

- ・ 商品としての入手性
- ・ 定尺 (流通単位、安くなる単位、対: 切り売り)
- ・ 材料の特性に起因する制約
例) 棒状に向いた材料、板にできない材料



材料の選択: 機械的機能

○ 材料の形の例

◇塊

- ・ 直方体 太い棒(角、丸) 厚板

◇板材

- ・ 薄板 (0.2mm ~ ?mm ~ 10mm ~)
- ・ 加工板材 (メッキ、塗装、パンチング等)

◇棒材
L アングル
U チャンネル

- ・ 角棒 丸棒 アングル チャンネル H型
- ・ 押し出し(フレーム材、サッシ)



材料の選択: 機械的機能

○ 摩擦係数と耐摩耗性(滑りやすさ)

- ◇全般に滑りやすい
 - ・金属、樹脂とも摩擦係数は小さめ
 - ・中でも適する樹脂あり: **自己潤滑性**
 - ・擦ることで削れないかどうか
 - ・逆に摩擦が必要なときの対策(ゴム等)
- ◇金属同士の張り付きリスク
 - ・潤滑油無しで金属同士を擦ると
しっかりと張り付いてしまう場合あり

材料の選択: 耐環境性

○ さび

- ◇機能的に影響するさび
 - ・問題になるのは主に**鉄**
 - ・さびの進行による形状の変化(穴)や
寸法が減少することによる**強度の低下**
※特に後述のような薄い構造の場合
- ◇対策
 - ・合金化(ステンレス)
 - ・めっき(亜鉛、クロム系)、塗装



材料の選択: 補足

○ 合金 (金属材料の大半が合金)

- ◇単一元素の材料ではなく、複数を混ぜる
 - ・それぞれの領域があるのではなく、
結晶内に原子が混在・整列している
 - ・機能付加、強度upなど
- ◇合金の例
 - ・鋼=鉄+炭素 ステンレス=鉄+クロム
 - ・黄銅=銅+亜鉛 (+鉛→快削黄銅)
 - ・ジュラルミン=アルミ+銅など(+**熱処理**)

材料の選択: 耐環境性

○ 酸化 (※さびも酸化の一つ)

- ◇機能には影響が少ない酸化の場合
 - ・主には、見た目が良くない 例)硬貨
 - ・表面特性の変化 例)滑らかさ、導電性
- ◇酸化で保護する (不動態)
 - ・アルミやステンレス (自然にできる)
 - ・アルマイト処理
 - ※あえて厚い酸化層をつくる+着色もできる
 - ※アルマイト加工すると寸法変わる
 - ※鉄の黒染めも意図的な酸化膜

材料の選択: 耐環境性

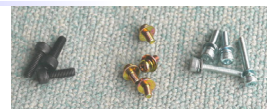
○ 金属の接触による酸化の進行

- ◇複数の金属の**接触**で**単独以上の酸化**
 - ・酸化するものと酸化しないもの
 - ・接触の例)異なる材料/ねじで締める
 - ・電池と似た現象が生じる(絶縁で低減)
 - ・水分があると特に
- ◇意図的に使う例
 - ・亜鉛めっき鋼板(トタン)
亜鉛自体の保護力+亜鉛が先に酸化

材料の選択: 耐環境性

○ トラブル事例

- ◇現象
 - ・黄銅の部品を締めていたネジが、ほかの部分のものに比べて、くすむのが早い。
 - ・超々ジュラルミンの部材を締めていた黒ネジ(黒染め)に赤い粉がたくさん噴いた。
- ◇対策
 - ・クロメート系のめっきネジに交換



材料の選択: 耐熱性

○ 主に樹脂材料

- ◇樹脂材料は使用可能温度が比較的低い
 - ・例)アクリルやABSは100度弱
 - ・多くの樹脂:**熱可塑樹脂**
=温度が上がると柔らかくなる
→強度の低下、変形など
 - ・加工にも影響
→**加工中に融ける**→機能、仕上がりに
例)アクリルのタップ加工他

材料の選択: 対人特性

○ 見た目や手触り

- ◇表面の美しさ
 - ・金属の酸化は一般に見た目の悪化
→**塗装、めっき等**
 - ・樹脂の場合は**耐紫外線**に注意
- ◇手触り、冷たさ、暖かさ
 - ・仕上げの表面粗さの追求、調整
※段差が0.05mmもあれば、かなり感じる
 - ・主に熱伝導率

材料の選択: 強さ

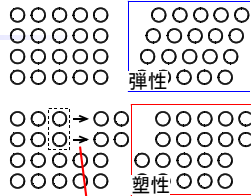
○ 引張系の強さ

◇ 破断する強さ

・ここまで使用は論外

◇ 弾性と塑性(そせい)変形

- ・材料にかけている力を取り除いたときに
→ 元の形にもどる: 弾性変形の範囲
→ 何らかの変形がのこる: 塑性の範囲
- ・一般には弾性の範囲で使う必要あり



材料の選択: 強さ

○ 応力とひずみ

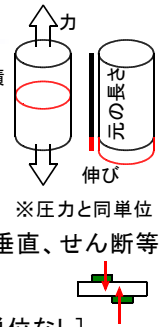
材料形状に依存しない一般化

◇ 応力

- ・力 ÷ 断面積 [N/m²=Pa] ※圧力と同単位
- ・方向によって複数種あり(垂直、せん断等)

◇ ひずみ

- ・伸び ÷ 元の長さ [m/m=単位なし]
- ・伸びの比率
- ・ひずみも複数種類ある



材料の選択: 強さ

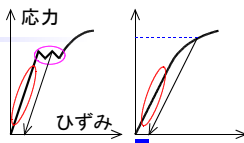
○ 引張: 弾性の限界

◇ 鉄系素材など

- ・あるところまでは応力とひずみは **比例**
- ・あるところで急に変形が始まる: **降伏**
降伏応力で強度を評価

◇ アルミ系素材など

- ・明確な境界が無い
- ・力を除去して、ひずみが **0.2%残る点**: **耐力**
によって強度を評価

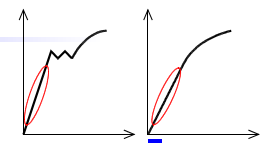


材料の選択: 強さ

○ 伸びにくさ: バネ的

◇ 弾性変形の範囲で

- ・ **縦弾性係数(ヤング率)**
= 垂直応力 ÷ ひずみ (グラフの傾き)
- ・ 同係数が高いほど **伸びにくい**
= 同じ力に対して **変形しにくい**
= **たわみにくい**
- ・ 合金化で降伏応力、耐力は大きく変わるが
縦弾性係数はあまり変わらない



材料の例

○ 鉄系

◇ 鋼(種類多い)

- ・ ○ 強い、安い △ 重い × 錆びる
- ・ 汎用、欠点の錆びも対策は豊富

◇ ステンレス鋼

- ・ ○ 錆びにくい ○ × 硬い
- ・ 厨房機器、食品まわりで多用される

◇ 特殊な鋼材

- ・ 珪素鋼板 → モーター、トランスなど

材料の例

○ アルミ系

- ・ アルミ(純、合金) ジュラルミン(合金+熱)
- ・ ○ 軽い × 弱い ~ ○ 強い △ 高い

◇ 主な種類 (4桁の番号で区別する)

- ・ 1000番台: 純アルミ系 アルミ板など
- ・ 5000番台: 合金 塊状のアルミに多い
- ・ 6000番台: 合金 押し出し材(棒、サッシ)
- ・ 2017: ジュラルミン 2024: 超ジュラルミン
- ・ 7075: 超々ジュラルミン

材料の例

○ アルミ と ジュラルミン

アルミ	密度 2.7t/m ³ (g/cm ³)	密度 2.8	ジュラルミン
	耐力/縦弾性係数	耐力/縦弾性係数	
	A1100 29MPa/69GPa	A2017 275MPa/73GPa	
	A5052 88MPa/71GPa	A2024 324MPa/74GPa	
	A6063 54MPa/69GPa	A7075 505MPa/72GPa	
	伸びる、曲げやすい	固い、曲げると割れる	

板化等加工、熱処理で耐力上がる ※鋼材(SS400)
資料によって値に若干違い 密度 7.9 235M/206G

参考: 機械工学便覧B4他 ネットでも様々あり

材料の例

○ 銅系

◇ 銅

- ・ ○ 電気、熱伝導、ろう付け × 高い重い
- ・ メカ部品としては、あまり見かけない
配管などで活躍

◇ 黄銅(銅+亜鉛)

- ・ ○ 加工しやすい ◎ 美しさ △ 高い重い
- ・ 快削黄銅(+鉛) 切削性がとてもよい
- ・ 機械部品: 歯車などで使われる



◇ アルミニウム青銅(銅+アルミ)

材料の例

○ 樹脂系 (経験あるもの)

◇ アクリル

- ・ ○ 素材として多い、接着しやすい、きれい
- △ 加工熱で融ける、割れる、高い
- ・ 当方ではロボットの材料として多用
- ※ 塩ビは安いけど劣るところ多し + 塩素問題

◇ MCナイロン

- ・ ○ 強め 加工しやすい 自己潤滑 △ 高い
- ・ 機械部品の材料として手頃



ジュラコン
POM/ポリアセタール



材料の例

○ 樹脂系 (経験あるもの)

◇ ゴム

- ・ ○ 伸縮性、摩擦(ものによる) △ 劣化
- ・ ロボットの車輪他
- ・ 種類多く、向き不向きも様々、選定難

◇ ポリプロピレン (PP)

- ・ ○ 安い (100円ショップで豊富)
- × (○) 難接着性 ※ ホットメルトは使える
- ・ 手軽になにかを覆う場合などに



ウレタン/ニトリル

材料の選択: 選択の事例

○ 黄銅 と 超々ジュラルミン

◇ 直感的印象

- ・ 超々ジュラルミンは軽くて強そう、
- でも **高そう** (実際アルミよりかなり高い)

◇ 同じ部品作るには値段が同じ ※ 時価、なので状況次第

- ・ kg 価格 → 黄銅:ジュラ = 1:3
- ・ 密度 → 黄銅:ジュラ = 3:1
- ・ 同じ体積の値段 = $3 \times 1:1 \times 3 = 1:1$

◇ 軽い! 強い! それでいて同じ値段

今回の目的

○ ものを形にするときの選択と計算

テーマ1: 材料

- ・ ロボメカづくりにありがちな材料
- ・ 材料の特長と選定の根拠
- ・ 代表的な材料の特徴

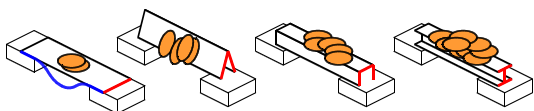
テーマ2: 形状と強度

- ・ 形でかわる部材の強さ
- ・ 強度とたわみ

材料の形と強さ

○ はがきの実験

◇ 葉書半分で強い構造を作る (昔見たなにか)



- ◇ 同じ材料(質量)でも形状で強さが変わる
- ・ 材料力学の基本

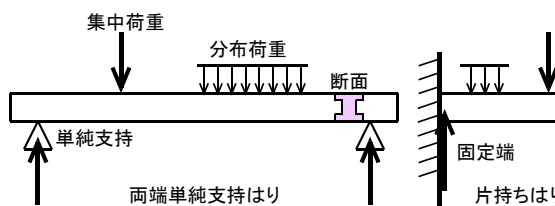


材料の形と強さ

○ はり構造

◇ 細長い棒状に力が作用する

- ・ 各種構造部、ギアボックスのシャフトなど



材料の形と強さ

○ はりの断面形状と強さ

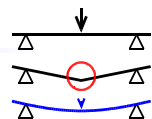
◇ 強度そのもの

- ・ はりにかかる荷重で **塑性変形** しないか?

◇ はりの **たわみ**

- ・ 荷重に対してどの程度たわむか?

荷重、はりの長さ(力の作用点)、
材料の{降伏応力、耐力}、縦弾性係数、
断面形状による **断面2次モーメント** に依存



材料の形と強さ

○ 機械設計ではりの強度計算は **必要か?**

◇ 必要性

- ・ 設計の妥当性、安全性の確認、精度
- ・ ぎりぎりまで軽量化したい

◇ 必要ではなかった場合も実際には多い

- ・ 感覚的な寸法が意外にオーバースペック

◇ それでも知る必要

- ・ 問題になるケース、箇所に **気づくため**
- ・ 問題の検証と対策

材料の形と強さ

○ 強度計算のステップ

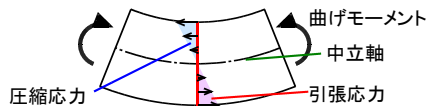
- 1: **曲げモーメント**の計算
 - ・ はりの各部に作用する曲げる力の算出
→ 強度の十分さ、たわみの計算
- 2: **断面2次モーメント**の計算
 - ・ 断面形状から計算する曲がりにくさ数値
- 3: **曲げ応力** と **たわみ曲線**
 - ・ 曲げ応力 → 材料強度と比較
 - ・ 縦弾性係数 → たわみ → 位置誤差など

はりの変形モデル

○ 曲げモーメントと応力分布

◇ポイント

- ・ 応力分布は上下位置に対して直線的
どこかに応力ゼロの面(**中立軸**)
- ・ 図では、下端で**引張**、上端で**圧縮**の最大
- ・ 応力で部分ごとに伸び縮み → 円弧状に



曲げモーメント

○ はりの長さ、力のかかり方、大きさから

◇教科書の原理的計算

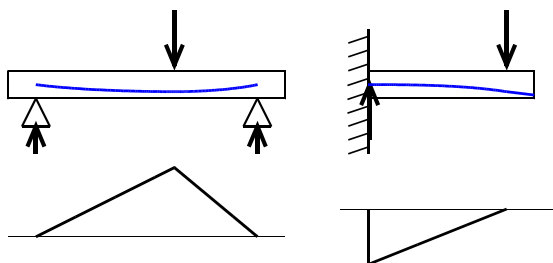
- ・ 力(集中荷重、分布荷重) → せん断力
→ 曲げモーメント(はりの位置の関数)

◇実践的手段

- ・ すでに**主要なパターン**の解析例がある
- ・ 複雑な場合も**重ね合わせ**の原理で。
※個々の力に対する結果を単に合算

曲げモーメント

○ 曲げモーメントの例



曲げモーメント (塑性変形判定)

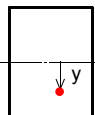
○ 曲げモーメントと応力の関係

◇応力

- ・ 応力 = $\frac{\text{曲げモーメント} \times \text{上下位置}}{\text{断面2次モーメント}}$

◇断面係数 = 断面2次モ ÷ 表面位置

- ・ 最大応力 = 曲げモ ÷ 断面係数
これが降伏応力(耐力)以下ならOK



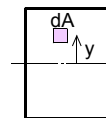
断面2次モーメント

○ 曲げモーメントと応力の関係

◇定義

$$\int y^2 dA$$

※微小領域面積に位置2乗、積算



◇性質

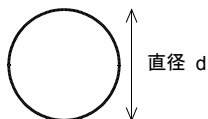
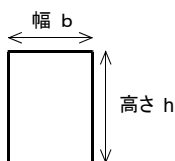
- ・ 大きいほど、応力が小さくなる
→ 塑性変形しない、たわまない
- ※一般に断面も大きくなる = 重くなる
- ・ 縦長の断面のほうが良い y^2

断面2次モーメント

○ 基礎的形状の断面2次モーメント

長方形と円

※原理的に長さの4乗相当になる



断面2次モ = $(1/12)bh^3$

断面2次モ = $(\pi/64)d^4$

断面係数 = $(1/6)bh^2$

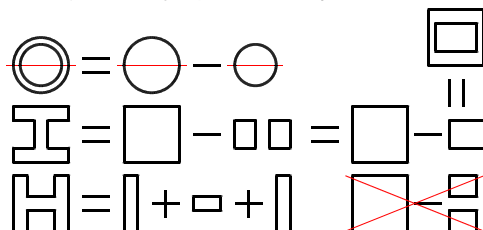
断面係数 = $(\pi/32)d^3$

断面2次モーメント

○ 断面2次モーメントの加減算規則

◇中立軸が共通なら単なる加減算

※すべての要素が上下対称



断面2次モーメント

○ 断面2次モーメントを求める

◇教科書的

- (1) 積分の計算
- (2) 加減算

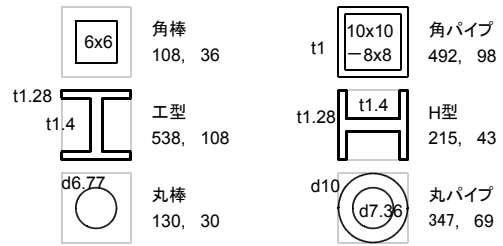
◇実践的

- ・ 主要な形状は**計算式あり**
- ・ +加減算
- ・ メーカーで示している(フレーム材など)

断面2次モーメント

○ 断面2次モーメントの比較

◇同一断面積(36)での 断面2次モと断面係数



たわみの計算

○ 曲げモーメントから計算

◇定義

・ はり形状曲率 = $-\frac{\text{曲げモーメント}}{1 \div \text{半径}} = -\frac{\text{曲げモーメント}}{\text{縦弾性係数} \cdot \text{断面2次モ}}$

◇計算方法

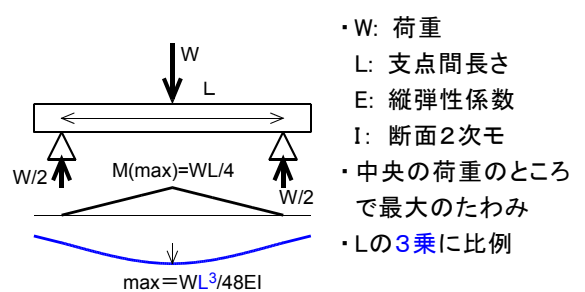
- ・ 微分方程式を解く(ありがちな試験問題)

◇実践的方法

- ・ 同じく、すでに計算した例が多数ある
- ・ および、重ね合わせできる

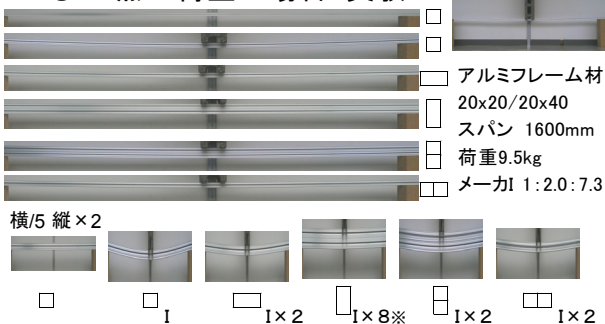
曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

○ 3点の荷重(対称)の場合



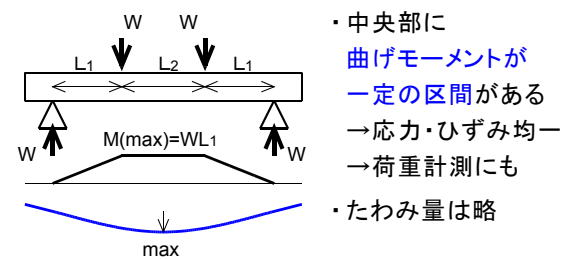
曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

○ 3点の荷重の場合: 実験



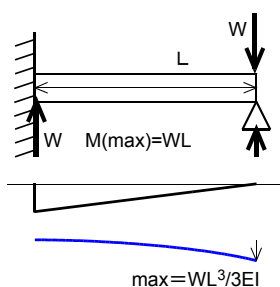
曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

○ 純曲げ



曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

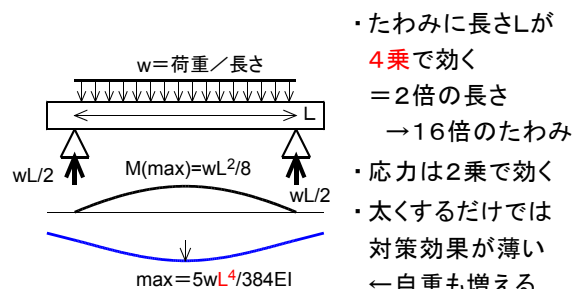
○ 片持ちばり



- ・ 根元に最大の曲げモーメント
- 根元破断可能性
- ・ 先端がたわみ最大
- Lの3乗に比例
- ・ 傾きも発生

曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

○ 分布荷重 (はり自身の重量など)



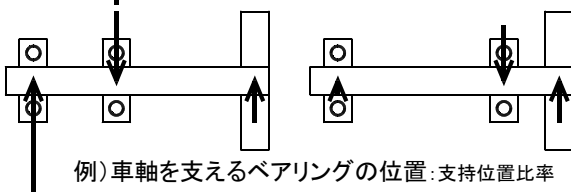
曲がらないはりをつくるために

○ 荷重のかかり方を無難にする

◇ はりを可能な限り短く

◇ 支持方法の変更

はりに無駄に大きな荷重をかけない



例) 車軸を支えるベアリングの位置: 支持位置比率

曲がらないはりをつくるために

○ 断面2次モーメントを改善する

◇ はりの断面形状を意識する

・ 主に曲げがかかる方向に対して長くする

・ 間を抜いて、両端に部材を集中

→ トラス構造はその一例

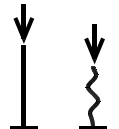


◇ 座屈に注意

・ 薄い部材に圧縮力をかけると、

曲がってしまう場合あり

※ はりは場所によっては圧縮



曲がらないはりをつくるために

○ 材料をよりよいものに

◇ 密度と降伏応力と縦弾性係数

・ はりによっては自重が無視できない

・ 同系の合金化等で降伏応力は上がる

→ 壊れにくくなる

・ 縦弾性係数は変わらない

→ たわみ変わらず(むしろ結果的に増える)

例) アルミ と 超超ジュラルミン

曲がらないはりをつくるために

○ ただし:

◇ ここまでの話は主に金属材料主体

・ 材料によっては引張に弱い(コンクリートなど)

・ 木材など不均質材料は

(1) 方向によって強度が異なる

(2) 弱いところから壊れる

・ 3次元プリンタは層間剥離

<実は実例用意しようとして失敗した

宿題

○ 実際にしらべてみましょう

◇ 5種類以上の材料について

・ 記号表記 と 組成(含まれる元素)

・ 降伏応力(耐力)と 縦弾性係数

・ 密度

・ 機能的特徴

・ 具体的な価格(形状と価格)

※ オークション系は禁止

まとめ

○ 材料の選択

・ 多様な材料があり、目的に応じた選択。

・ 機械的特性(強さ、加工のしやすさ等)

対人、耐環境特性。

・ 強さには大きく2種類ある

(1) 壊れない強さ(降伏応力、耐力)

(2) たわまない強さ(縦弾性係数)

それぞれ、影響は大きい。

まとめ

○ 材料の断面形状と強さ

・ はりの強さは、その断面で大きく変わる。

評価値: 断面2次モーメント、断面係数

・ 一般に力の向きに長く(重力方向なら縦長)

かつ、両端に集中させたほうが効果的。

パイプ構造は手軽に強い。

・ ただし、根本的なはりの使い方に注意。

参考文献: 機械工学便覧(日本機械学会)