

# 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

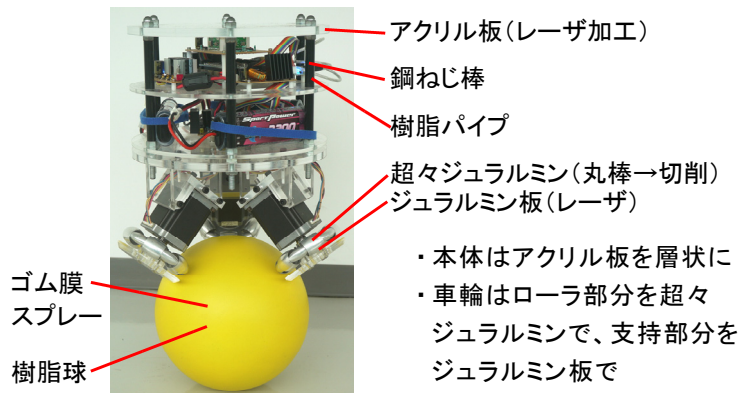
- ・ロボメカづくりにありがちな材料
- ・材料の特性と選定の根拠
- ・代表的な材料の特徴

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

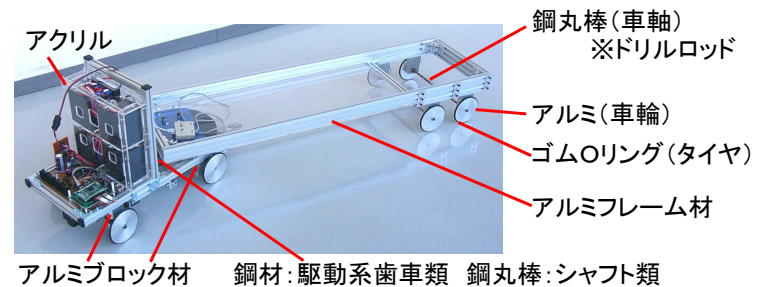
## ロボットの材料

### ○ 玉乗りロボットの場合



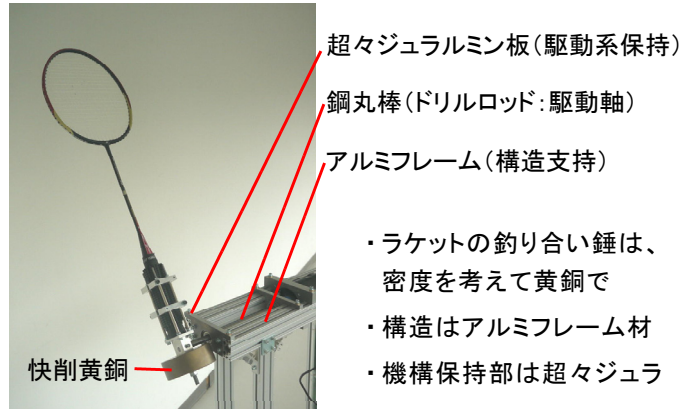
## ロボットの材料

### ○ トレーラーロボットの場合



## 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 (=しんちゅう) 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

- ・引っぱりに対する強さ（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＝バネ的性質（力/変形量）  
※曲げ:たわみにくさ
- ・せん断、表面硬さ、繰り返し

## 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う、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

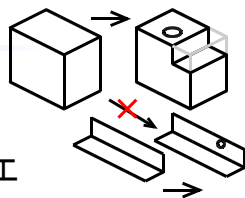
- ・鉄よりアルミが苦手

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

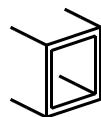
#### ◇機械部品の加工＝除去加工

- ・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

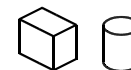
- ・商品としての入手性
- ・定尺（流通単位、安くなる単位、対：切り売り）
- ・材料の特性に起因する制約

例)棒状に向けた材料、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～1mm～10mm～)
- ・加工板材 (メッキ、塗装、パンチング等)

#### ◇棒材

アングル

- ・角棒 丸棒 アングル チャネル H型

チャンネル

- ・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
- ・その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

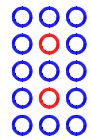
- ・合金化（ステンレス）
- ・めっき（亜鉛、クロム系）、塗装



## 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  
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

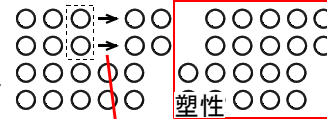
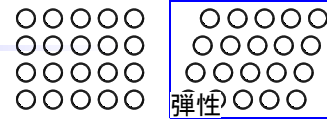
### ○ 引張系の強さ

#### ◇ 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

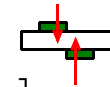
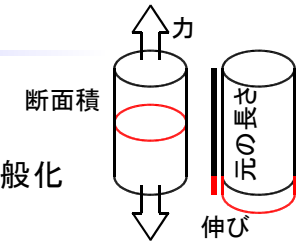
材料形状に依存しない一般化

#### ◇ 応力

- ・力 ÷ 断面積  $[N/m^2 = Pa]$  ※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  $[m/m = \text{単位なし}]$
- ・伸びの比率
- ・ひずみも複数種類ある



## 材料の選択：強さ

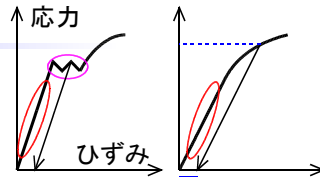
### ○ 引張：弾性の限界

#### ◇ 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

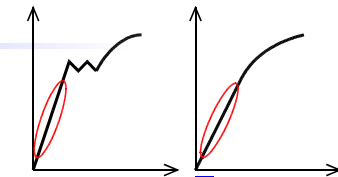


## 材料の選択：強さ

### ○ 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、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 <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	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
- ※ 塩ビは安いですが劣るところ多し + 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

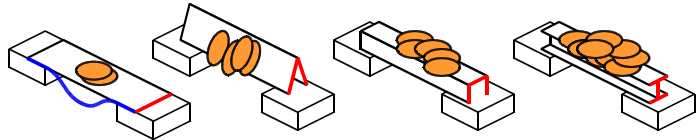
#### テーマ2: 形状と強度

- ・ 形でかわる部材の強さ
- ・ 強度とたわみ

## 材料の形と強さ

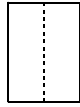
### ○ はがきの実験

◇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

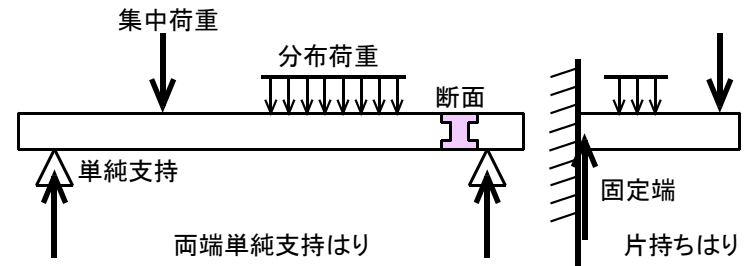


## 材料の形と強さ

### ○ 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?

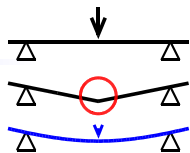
◇はりのたわみ

・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

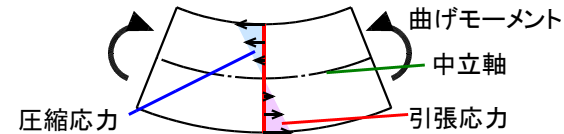
- ・ 曲げ応力 → 材料強度と比較
- ・ 縦弾性係数 → たわみ → 位置誤差など

## 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

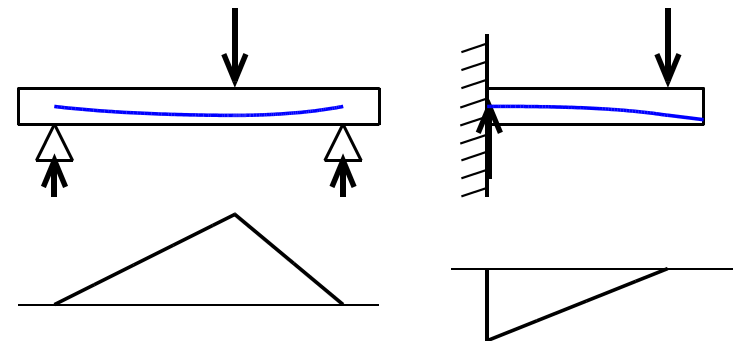
- ・ 力(集中荷重、分布荷重) → せん断力  
→ 曲げモーメント(はりの位置の関数)

#### ◇実践的手段

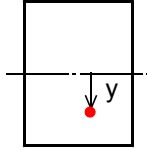
- ・ すでに**主要なパターン**の解析例がある
- ・ 複雑な場合も**重ね合わせ**の原理で。  
※ 個々の力に対する結果を単に合算

## 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

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

◇ 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

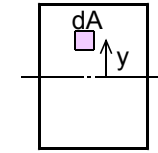
## 断面2次モーメント

### ○ 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

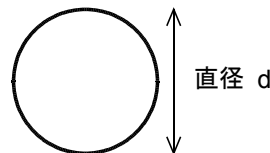
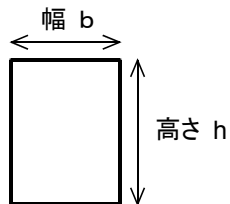
- ・ 大きいほど、応力が小さくなる  
→ 塑性変形しない、たわまない
- ※ 一般に断面も大きくなる = 重くなる
- ・ 縦長の断面のほうが良い  $y^2$

## 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



$$\text{断面2次モ} = (1/12) bh^3$$

$$\text{断面2次モ} = (\pi/64) d^4$$

$$\text{断面係数} = (1/6) bh^2$$

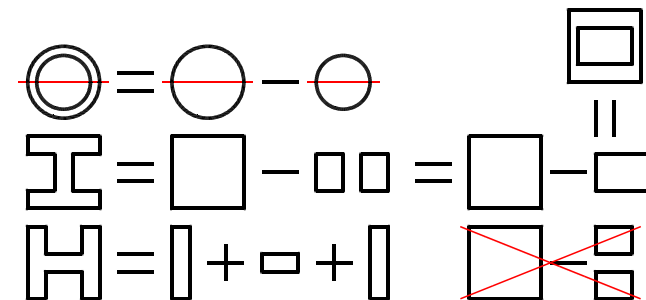
$$\text{断面係数} = (\pi/32) d^3$$

## 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

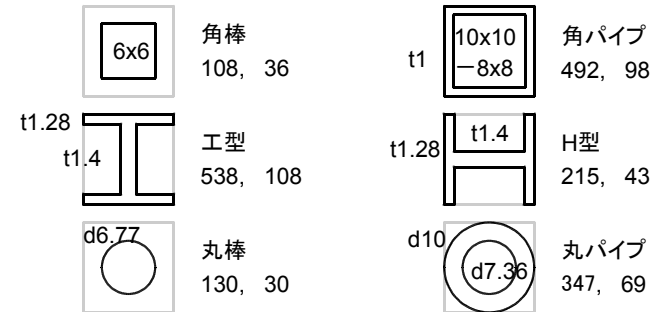
#### ◇実践的

- ・ 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

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

#### ◇計算方法

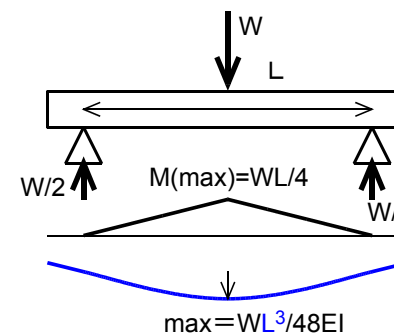
- ・ 微分方程式を解く(ありがちな試験問題)

#### ◇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

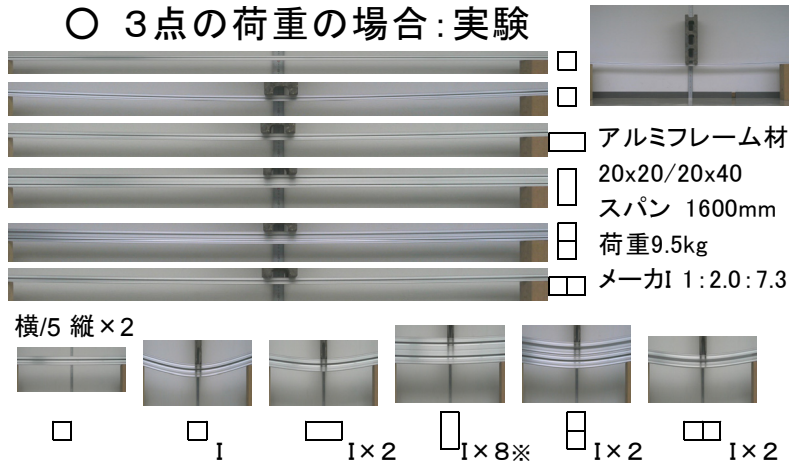
### ○ 3点の荷重(対称)の場合



- ・ W: 荷重
- ・ L: 支点間長さ
- ・ E: 縦弾性係数
- ・ I: 断面2次モ
- ・ 中央の荷重のところで最大のたわみ
- ・ Lの3乗に比例

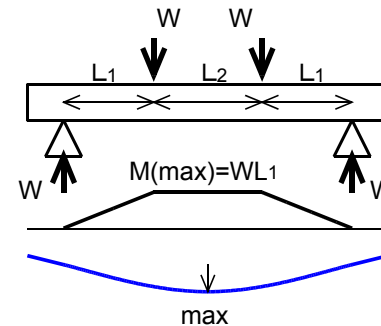
## 曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

### ○ 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

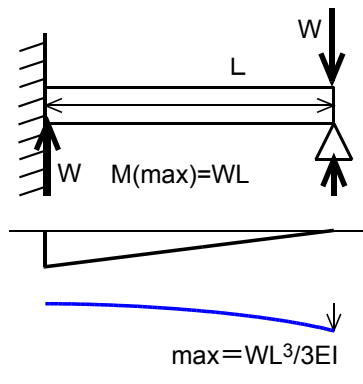
### ○ 純曲げ



- ・中央部に曲げモーメントが一定の区間がある  
→ 応力・ひずみ均一  
→ 荷重計測にも
- ・たわみ量は略

## 曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

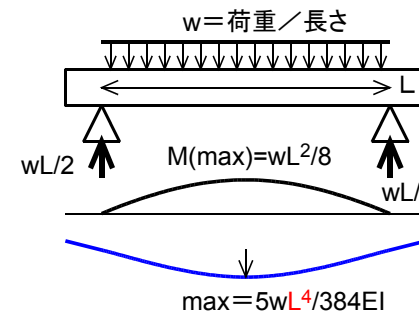
### ○ 片持ちばり



- ・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)



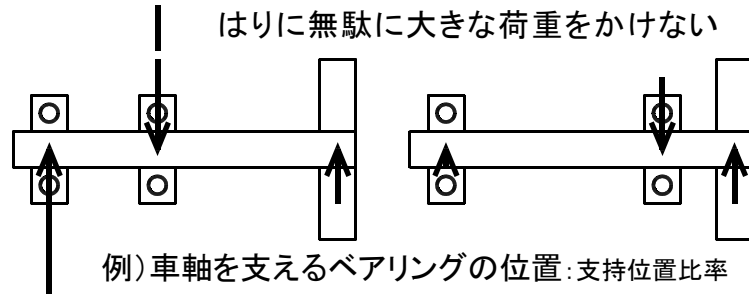
- ・たわみに長さLが4乗で効く  
= 2倍の長さ  
→ 16倍のたわみ
- ・応力は2乗で効く
- ・太くするだけでは対策効果が薄い  
← 自重も増える

## 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



## 曲がらないはりをつくるために

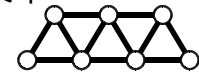
### ○ 断面2次モーメントを改善する

◇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

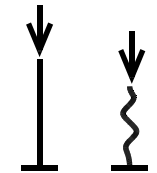


◇座屈に注意

・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)