

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

C21/Rev 1.0

第21回

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

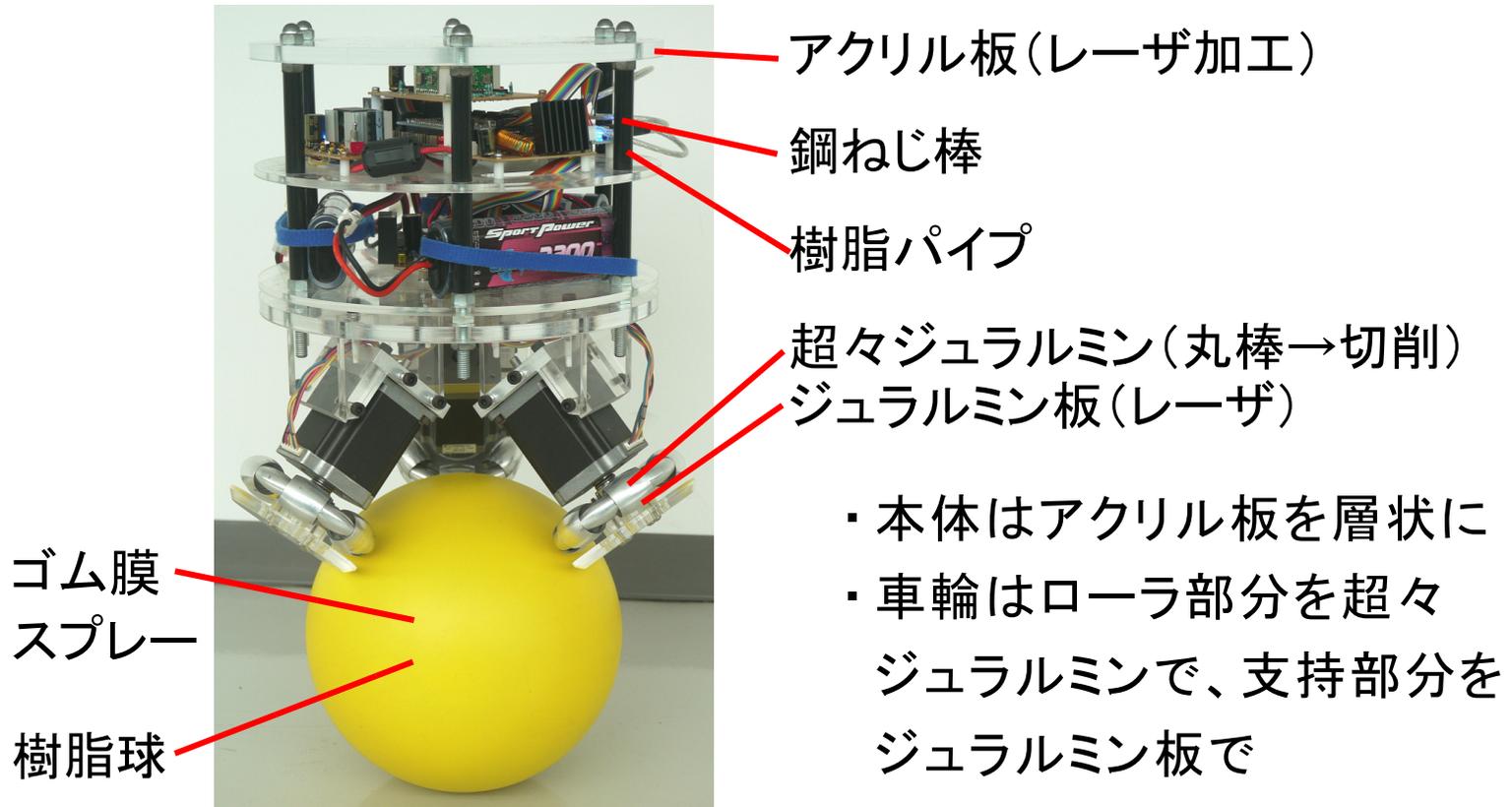
- ・ ロボメカづくりにありがちな材料
- ・ 材料の特性 と 選定の根拠
- ・ 代表的な材料の特徴

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

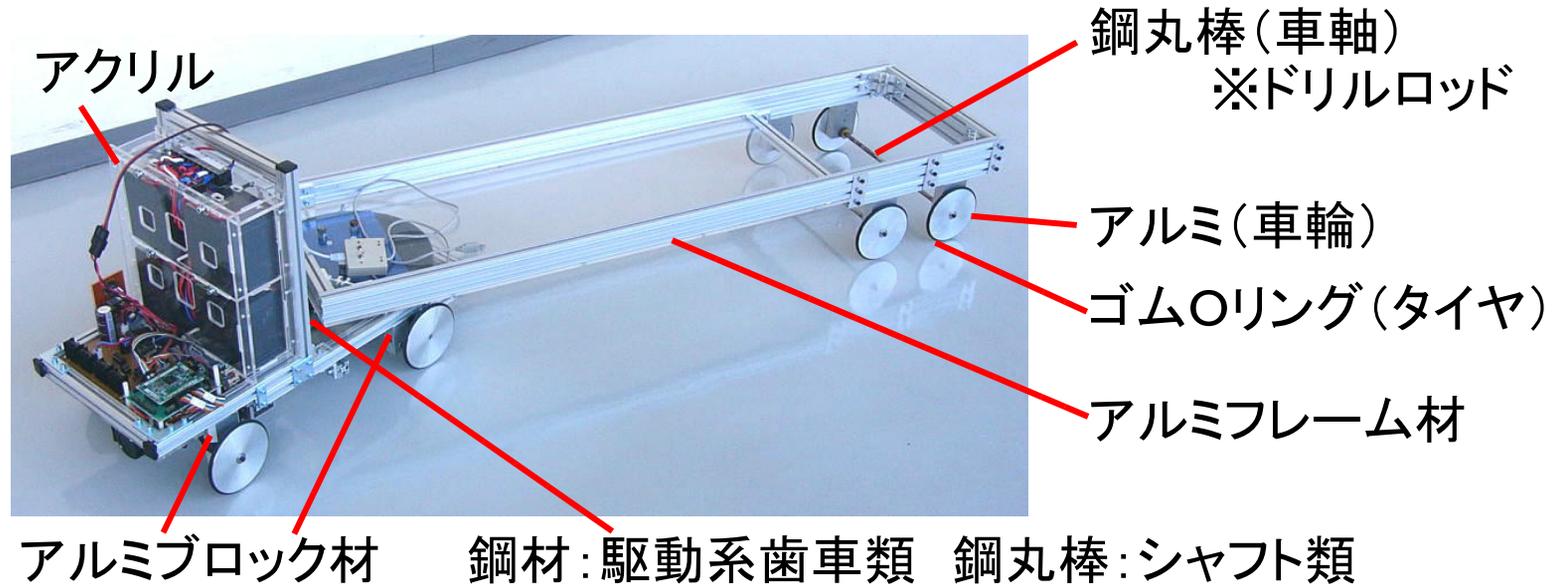
ロボットの材料

○ 玉乗りロボットの場合



ロボットの材料

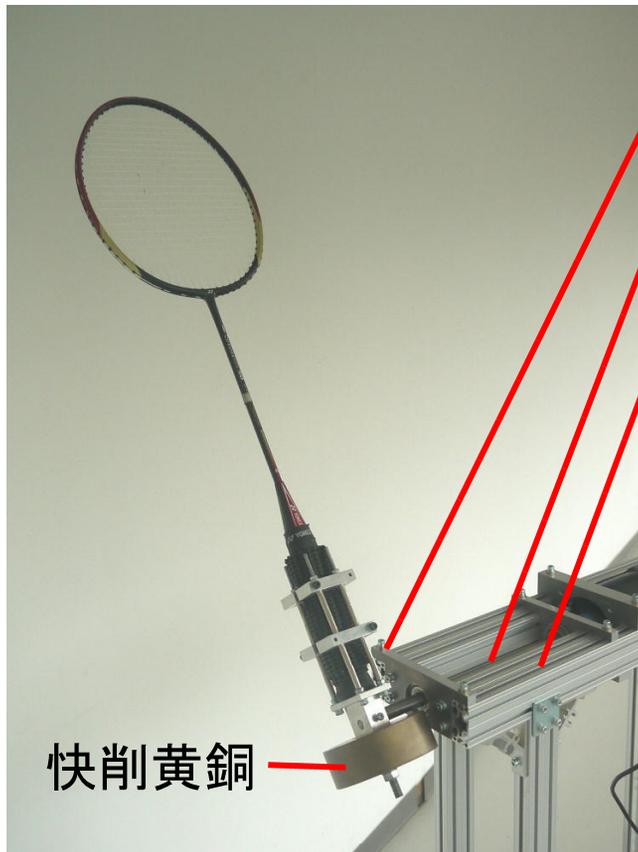
○ トレーラーロボットの場合



- ・ 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



超々ジュラルミン板 (駆動系保持)

鋼丸棒 (ドリルロッド: 駆動軸)

アルミフレーム (構造支持)

- ・ ラケットの釣り合い錘は、密度を考えて黄銅で
- ・ 構造はアルミフレーム材
- ・ 機構保持部は超々ジュラ

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**=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

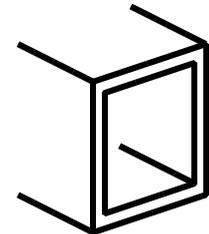
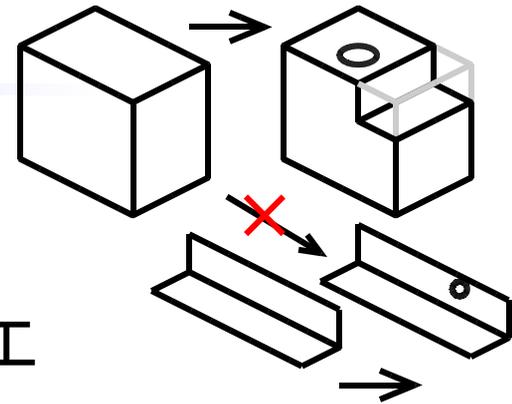
◇ 機械部品の加工 = 除去加工

- ・ 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

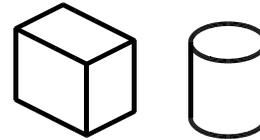
- ・ 商品としての入手性
- ・ 定尺（流通単位、安くなる単位、対：切り売り）
- ・ 材料の特性に起因する制約

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～2mm～10mm～）
- ・加工板材（メッキ、塗装、パンチング等）



アングル



チャンネル

◇棒材

- ・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
- ・ 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

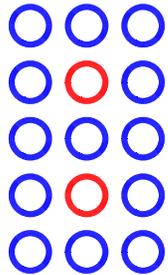
- ・合金化(ステンレス)
- ・めっき(亜鉛、クロム系)、塗装



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

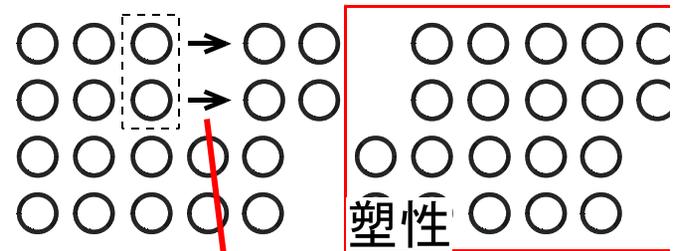
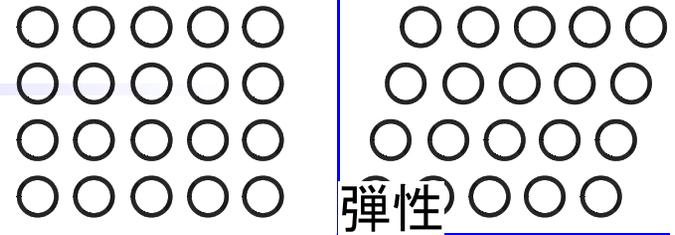
○ 引張系の強さ

◇ 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

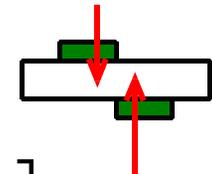
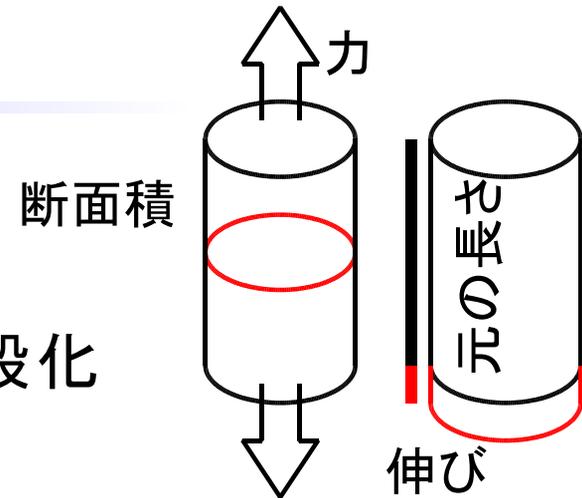
材料形状に依存しない一般化

◇ 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

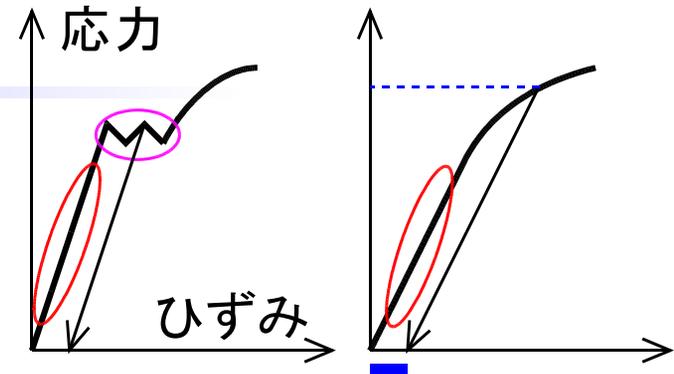
○ 引張：弾性の限界

◇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

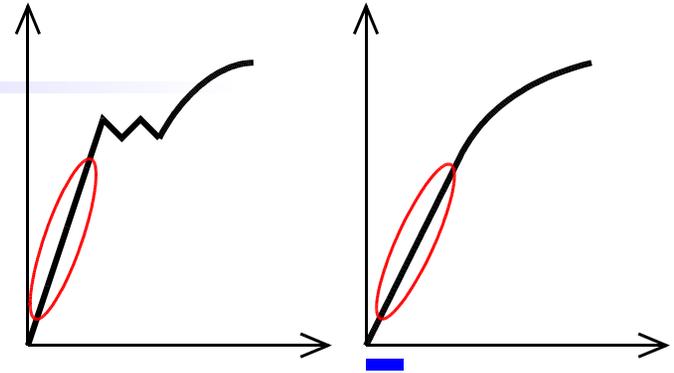


材料の選択：強さ

○ 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 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

資料によって値に若干違い

参考：機械工学便覧B4他 ネットでも様々あり

※鋼材(SS400)

密度 7.9 235M/206G

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
- ※ 塩ビは安いが悪るところ多し + 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）



ウレタン／ニトリル

◇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

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

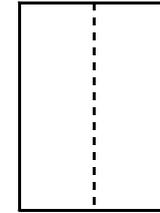
- ・ロボメカづくりにありがちな材料
- ・材料の特長と選定の根拠
- ・代表的な材料の特徴

テーマ2: 形状と強度

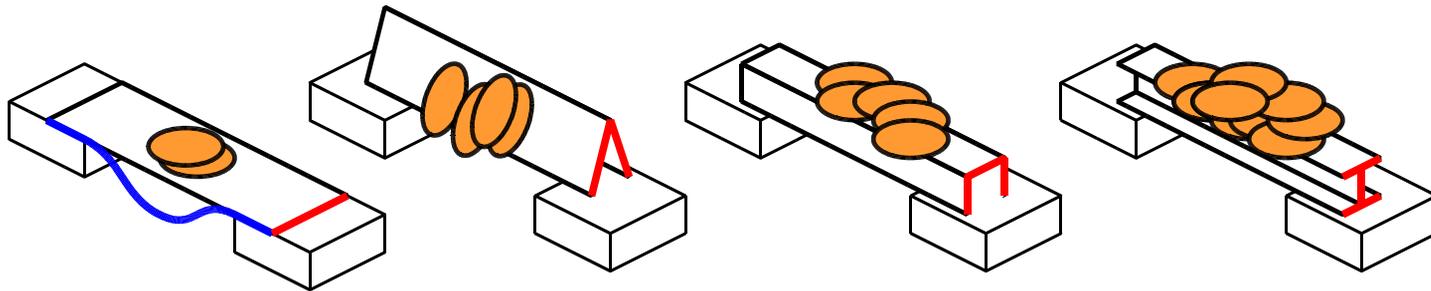
- ・形でかわる部材の強さ
- ・強度とたわみ

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

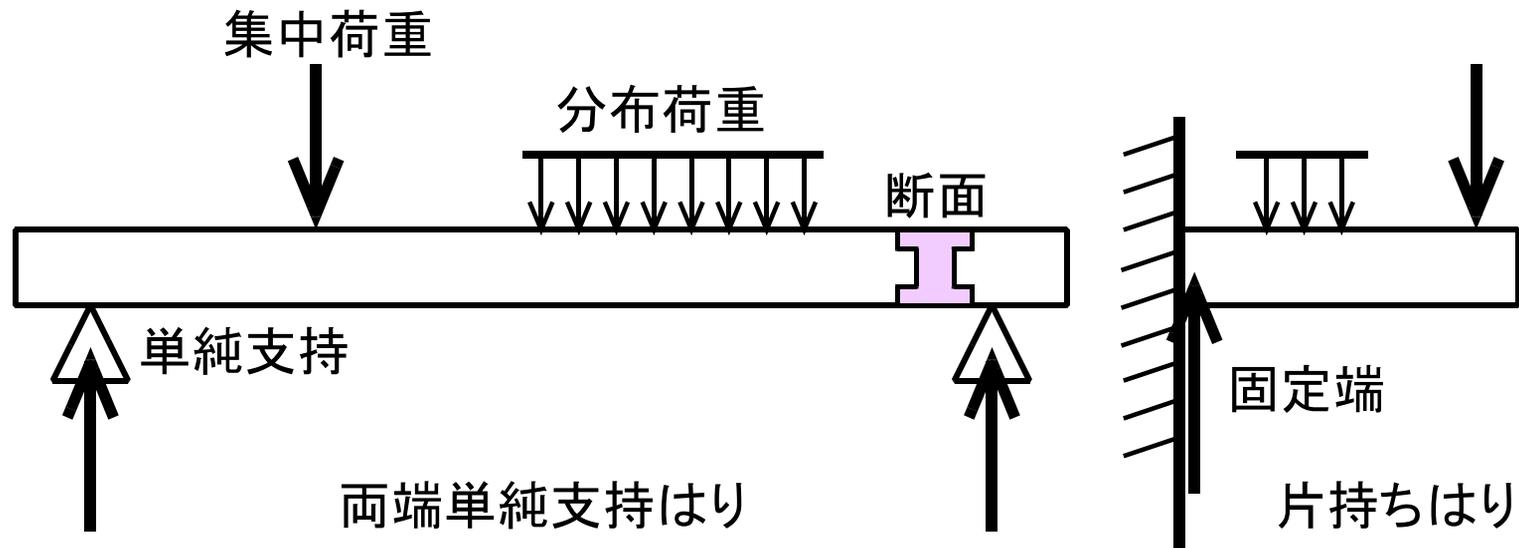
・材料力学の基本

材料の形と強さ

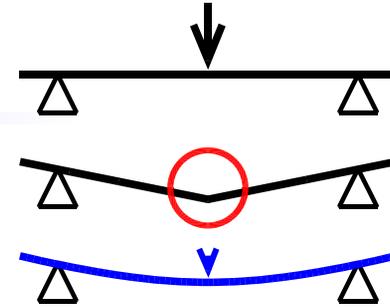
○ はり構造

◇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

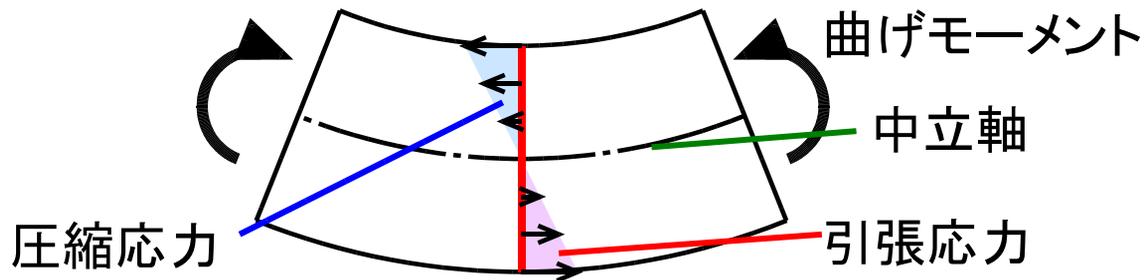
- ・ 曲げ応力 → 材料強度と比較
- ・ 縦弾性係数 → たわみ → 位置誤差など

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

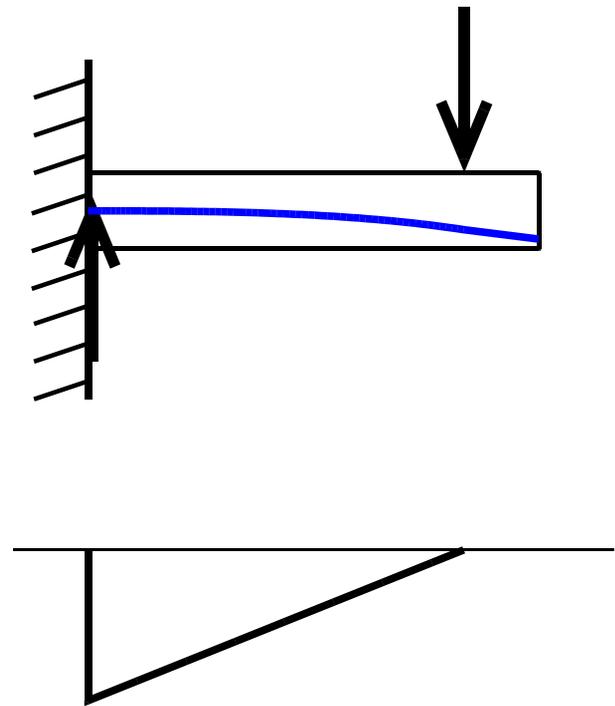
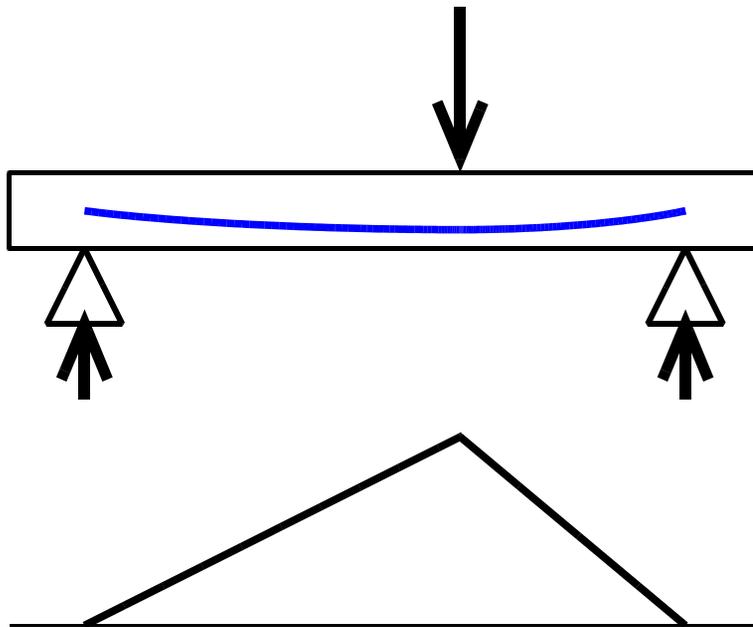
- ・力(集中荷重、分布荷重)→せん断力
→曲げモーメント(はりの位置の関数)

◇実践的手段

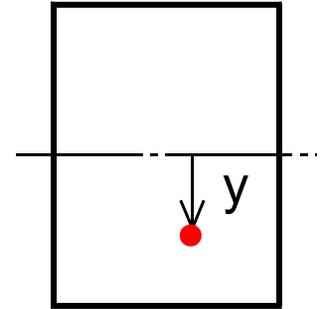
- ・すでに**主要なパターンの解析例**がある
- ・複雑な場合も**重ね合わせ**の原理で。
※個々の力に対する結果を単に合算

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

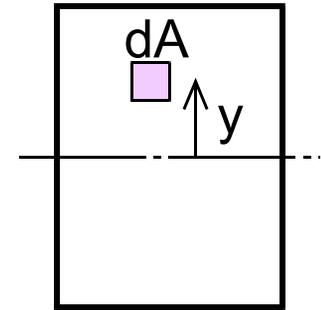
断面2次モーメント

○ 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

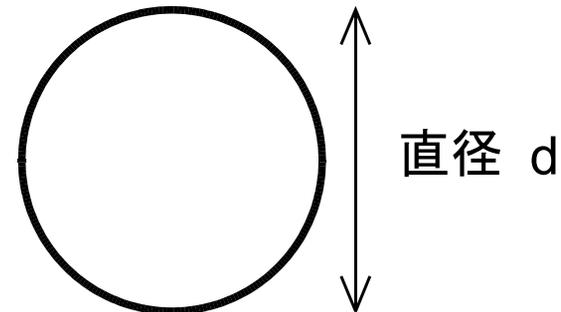
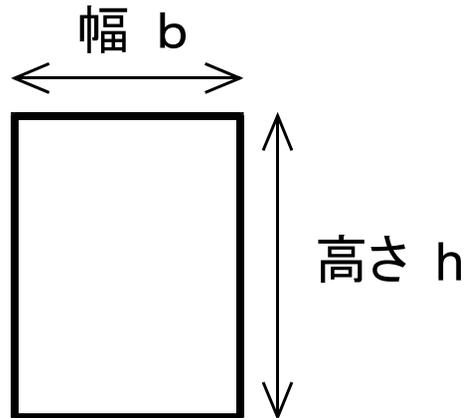
- ・ 大きいほど、応力が小さくなる
→ 塑性変形しない、たわまない
※ 一般に断面も大きくなる = 重くなる
- ・ 縦長の断面のほうが良い y^2

断面2次モーメント

○ 基礎的形狀の断面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



$$\text{断面2次モ} = (1/12) bh^3$$

$$\text{断面2次モ} = (\pi / 64) d^4$$

$$\text{断面係数} = (1/6) bh^2$$

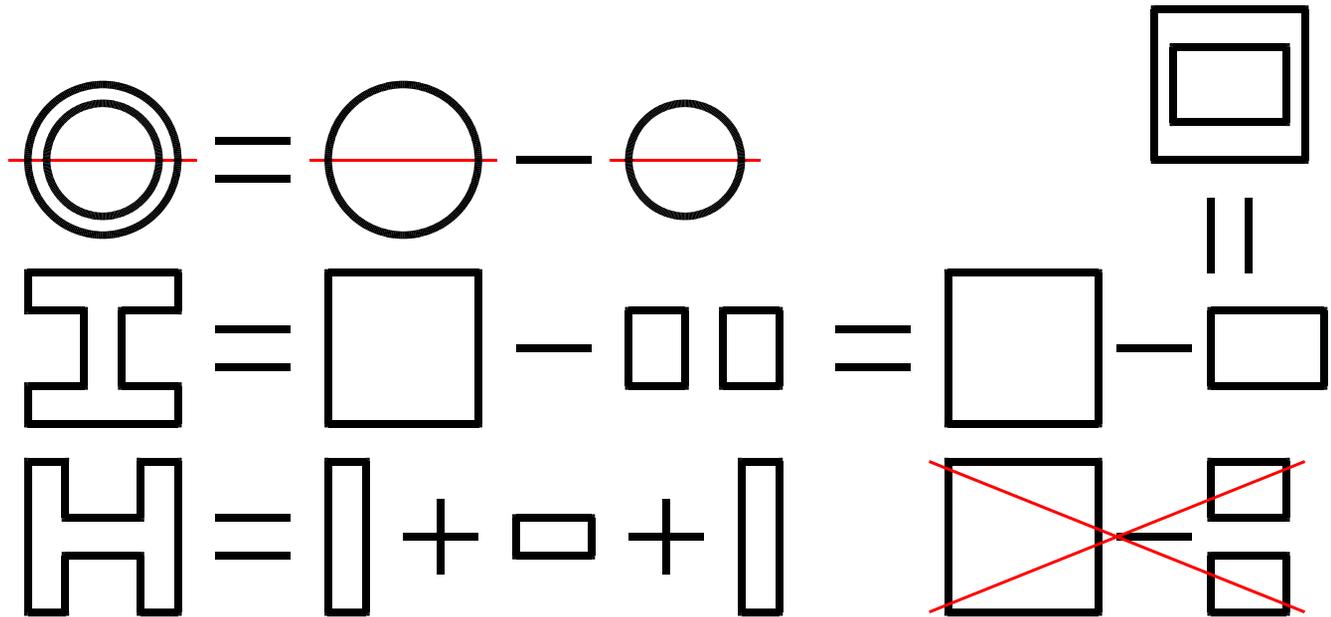
$$\text{断面係数} = (\pi / 32) d^3$$

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

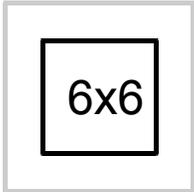
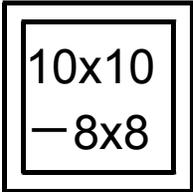
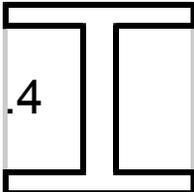
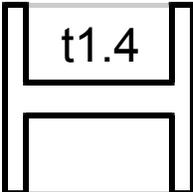
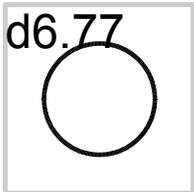
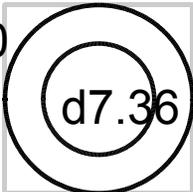
◇実践的

- ・ 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)

断面二次モーメント

○ 断面二次モーメントの比較

◇ 同一断面積(36)での 断面二次モと断面係数

	角棒 108, 36		角パイプ 492, 98
	工型 538, 108		H型 215, 43
	丸棒 130, 30		丸パイプ 347, 69

たわみの計算

○ 曲げモーメントから計算

◇定義

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

◇計算方法

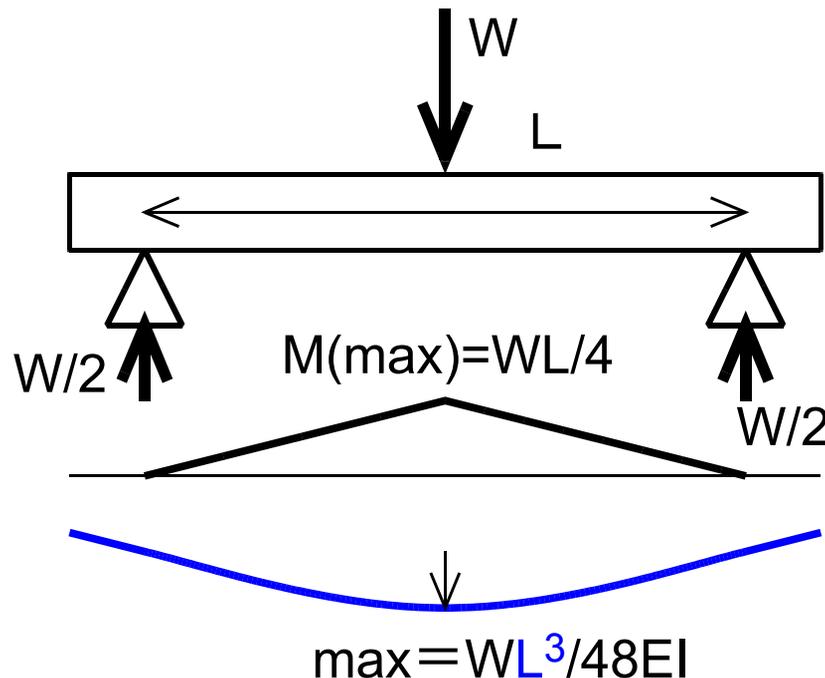
- ・微分方程式を解く(ありがちな試験問題)

◇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

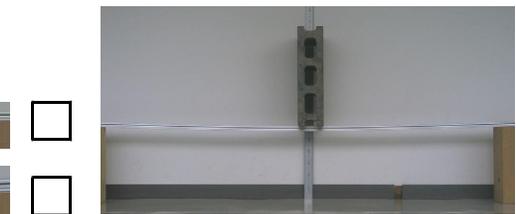
○ 3点の荷重(対称)の場合



- ・ 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



- アルミフレーム材
- 20x20/20x40
- スパン 1600mm
- 荷重9.5kg
- メーカーI 1:2.0:7.3

横/5 縦×2



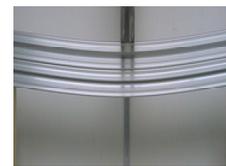
I



I×2



I×8※



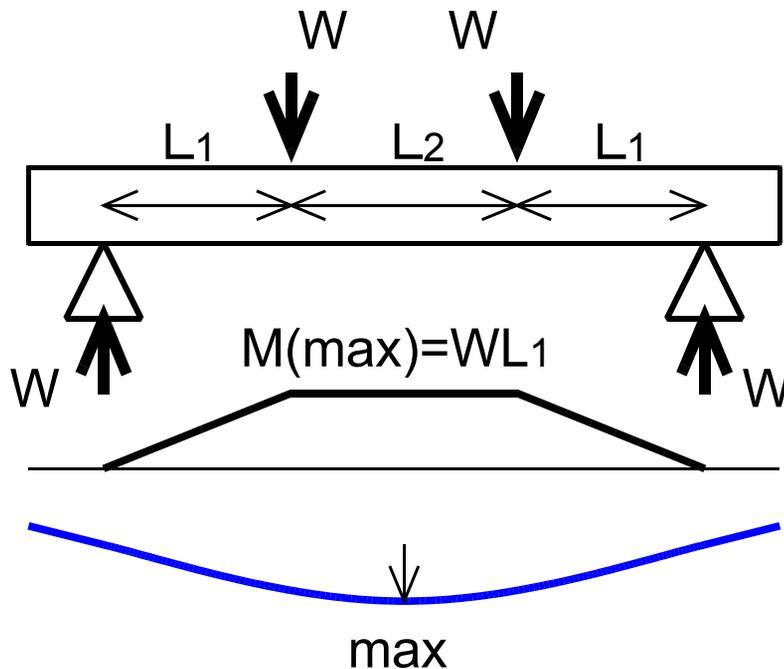
I×2



I×2

曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

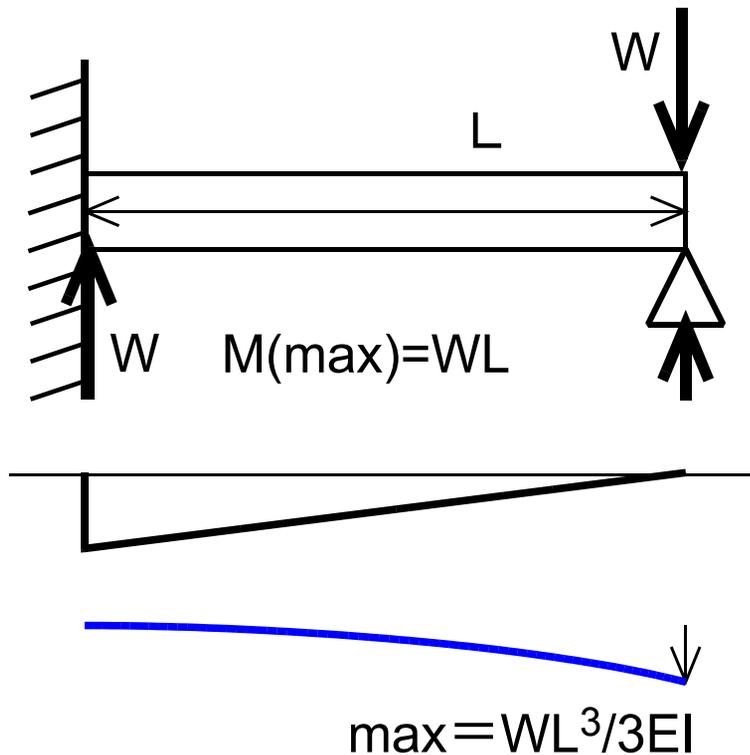
○ 純曲げ



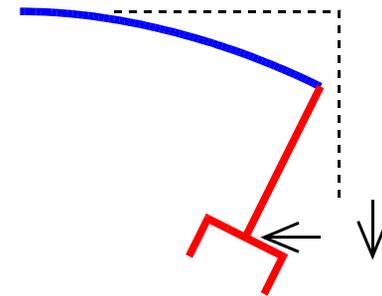
- ・ 中央部に
曲げモーメントが
一定の区間がある
→ 応力・ひずみ均一
→ 荷重計測にも
- ・ たわみ量は略

曲げモーメント・曲げ応力・たわみの例

○ 片持ちばり

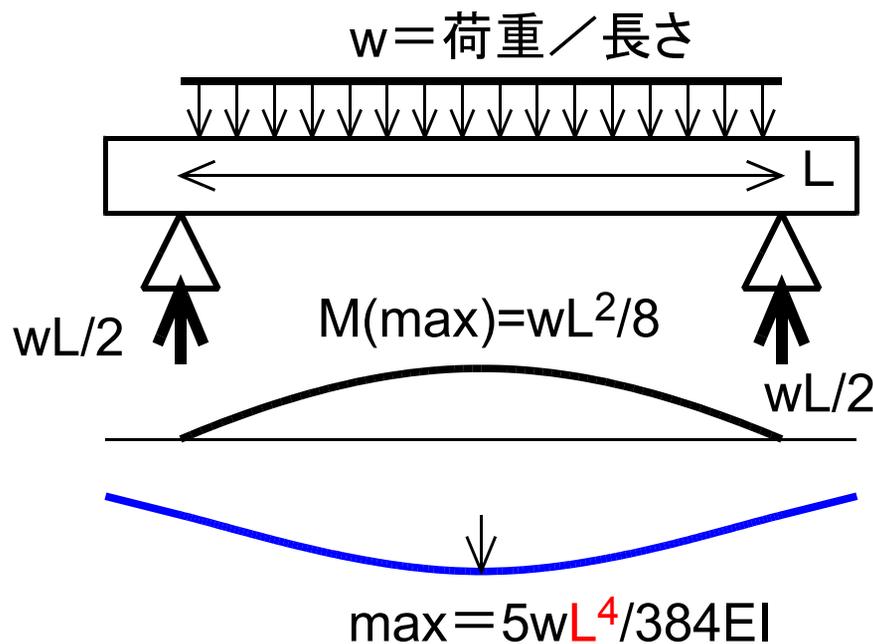


- ・ 根元に最大の曲げモーメント
→ 根元破断可能性
- ・ 先端がたわみ最大
 L の3乗に比例
- ・ 傾きも発生



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

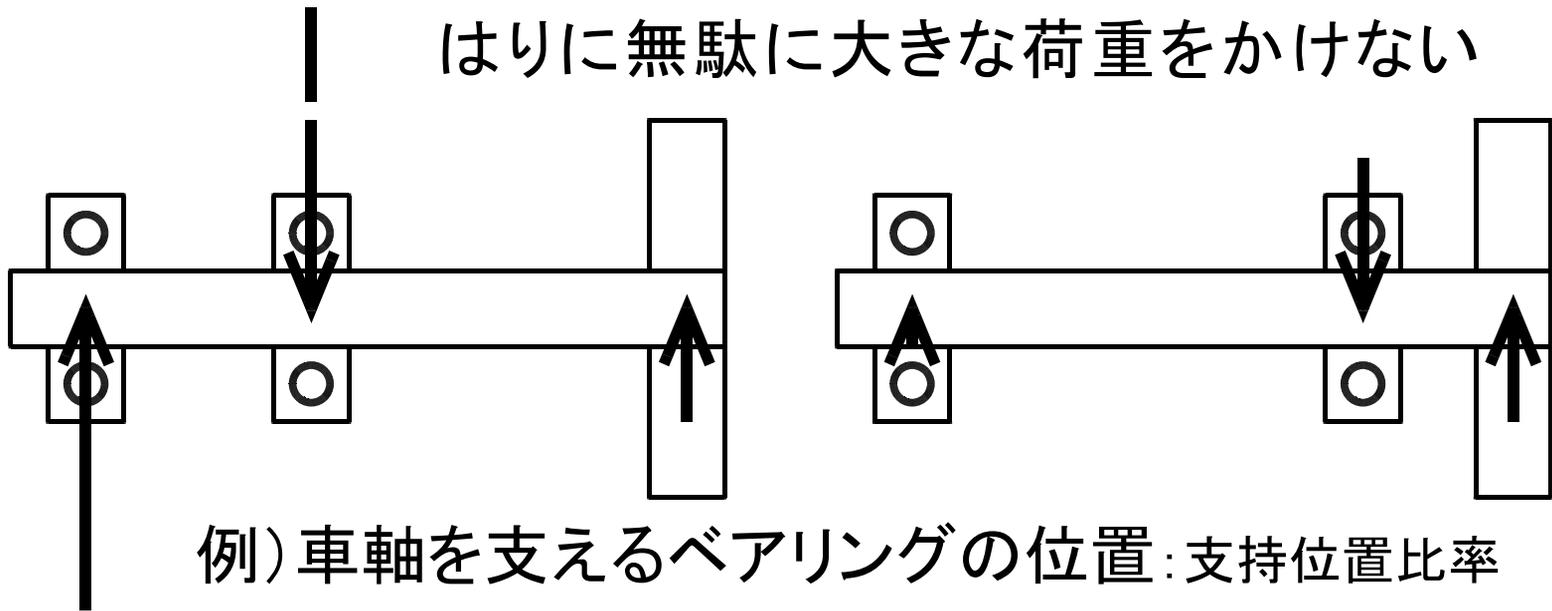
曲がらないはりをつくるために

○ 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

はりに無駄に大きな荷重をかけない

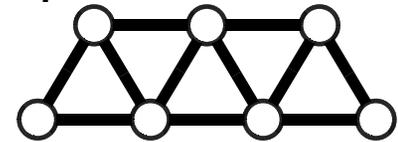


曲がらないはりをつくるために

○ 断面2次モーメントを改善する

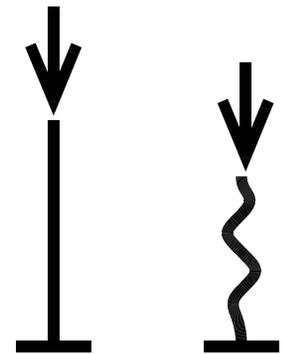
◇ はりの断面形状を意識する

- ・ 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)