

材料力学2024 シーズン2

第7話 複雑なはりの問題 後編

2024年6月28日（金）

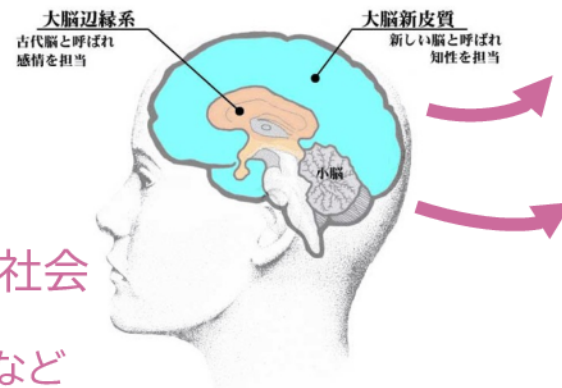
中谷 彰宏

教科書「渋谷陽二，中谷彰宏，材料力学，(2017)，コロナ社」
1, 2, 3, 4, 10, 11章（春学期の授業）を学習し終えて、
5, 6, 7, 8, 9, 12, 13章（夏学期の授業）をこれから学ぶ諸君のために

人間と情報機械の共生の時代 未来の工学を先導するためには



現代・未来
ポスト工業社会



古い脳

(大脳辺縁系)

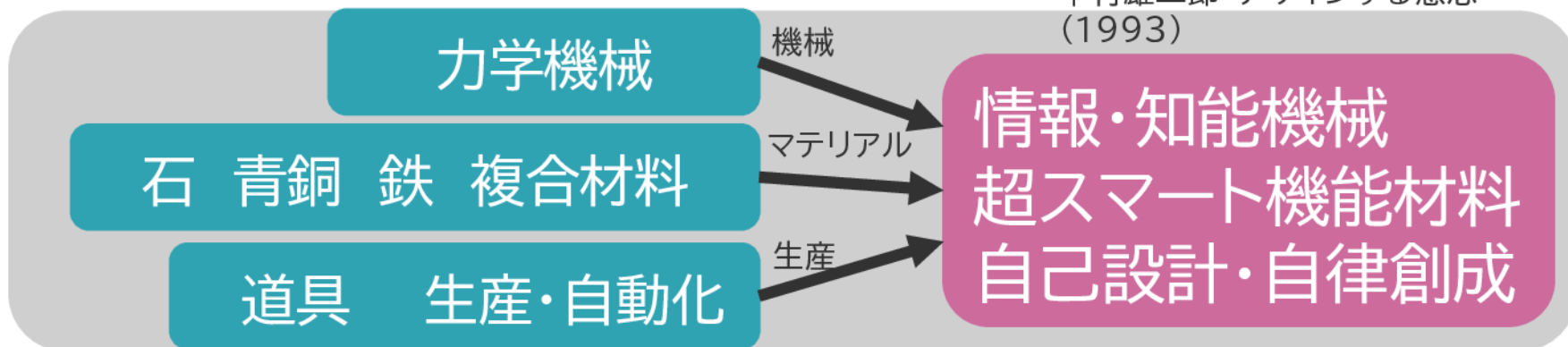
新しい脳

(大脳皮質・連合野)

Society 5.0 など

脳機能の飛躍的で体系的な外化

中村雄二郎“デザインする意志”
(1993)



要素間のつながりはますます複雑化し、要求される機能はますます多様化

知能・機能創成工学：異分野融合研究によって未来の工学を先導する学問

工学と技術そして夢 人や社会と科学の結びつきを希求する

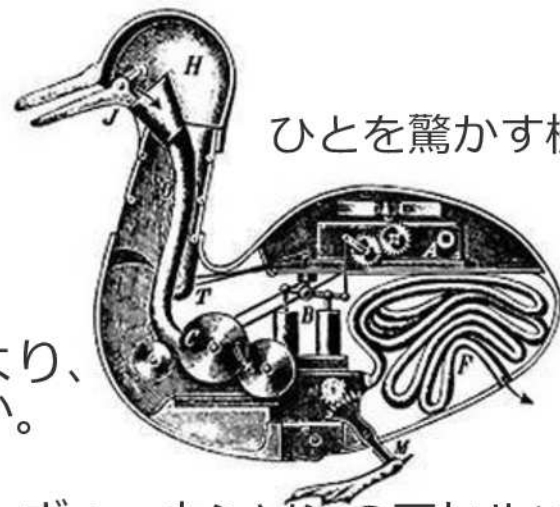
“遊び”から始まる機械

(西垣通、「機械幻想論」、1990)

機械とは本来“生産のための実用具”というより、
むしろ“消費のための遊具”ではないだろうか。



ライト兄弟の初の有人飛行(1903)
夢の実現のための機械



ひとを驚かす機械

ヴォーカンソンのアヒル(1738)

いかなる機械も、それが“実用機械”というレッテルを貼られたとたんに、新鮮なリアリティ（＝異次元をもたらし魔力）を喪失し、逆に古いリアリティ（＝日常的現実）を押しつけるものになってしまう。・・・機械が魔力を失うとは、我々が更にいっそう魅力的な新型の機械を希求していることの証左でもある

歴史の証言

夢があれば工学はあとからついてくる！

入学したてのワクワク感を思い出して
機械工学を好きになろう！

バウハウス (Bauhaus 1919年、ドイツ・ヴァイマル)



融合教育の理念と実践の14年間が その後の芸術界に多大な影響を与えた

総合的な教育：工芸・写真・デザインなどを含む美術
と建築に関するを行った学校

表現傾向やその理念はモダニズム建築や近代芸術
に大きな影響

その流れを汲む合理主義的・機能主義的な芸術の代
名詞に

先導的融合工学

社会の変化を先導する学問統合の場



バウハウスの教育課程図

グロースピウスのバウハウスの設立宣言（1917）

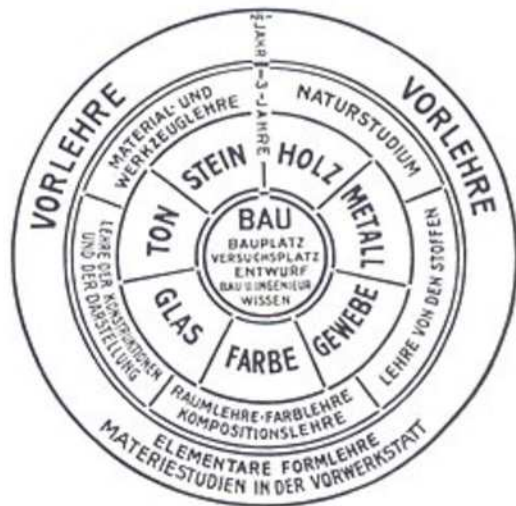
（利光功、「バウハウス-歴史と理念」、1970）

建築家、彫刻家、画家、我々はみな工芸にたち帰らなくてはならない。芸術というのは、決して1つの専門によって成り立つものではない。

芸術家と工芸家の間に、何ら本質的な違いは存在しない。

ぜひとも、われわれは、工芸家と芸術家の間の壁を排した新しい組織を作ろう。

われわれは、手を携えて未来を見通した新しい構造を模索し、構築しようではないか。



アーティストな研究者（ファーガソン、「技術屋の心眼」、1995）

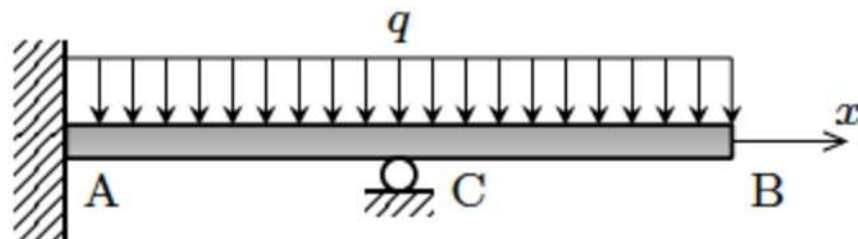
今日、大半の技術者は、科学者と呼ばれると喜ぶが、芸術家と呼ばれることには抵抗を感じている。芸術は退廃的で瑣末なものであり、・・・ハード・サイエンスの持つ厳密性や工学にはあるとされている客観性を欠いている、というわけである。しかし、・・・、技術者の図面は、芸術家のデッサンや絵画と重要な特質を共有している。技術者も芸術家もどちらも白紙から始める。どちらも、心眼で見たビジョンをその上に移していく。

例題：直接積分法（たわみの方程式から始める方法）

せん断力分布，および曲げモーメント分布は，

$$V(x) = R_A - qx + R_C H(x - l)$$

$$M(x) = M_A + R_A x - \frac{1}{2}qx^2 + R_C \langle x - l \rangle$$



たわみの方程式，およびその積分は， C_1 ， C_2 を積分定数とすると

$$EIy'' = -M_A - R_A x + \frac{1}{2}qx^2 - R_C \langle x - l \rangle$$

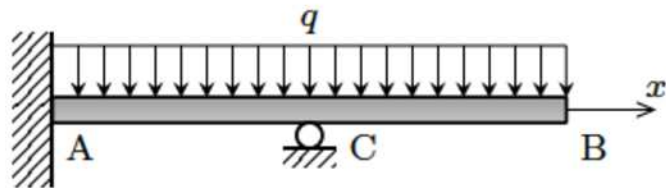
$$EIy' = -M_A x - \frac{1}{2}R_A x^2 + \frac{1}{6}qx^3 - \frac{1}{2}R_C \langle x - l \rangle^2 + C_1$$

$$EIy = -\frac{1}{2}M_A x^2 - \frac{1}{6}R_A x^3 + \frac{1}{24}qx^4 - \frac{1}{6}R_C \langle x - l \rangle^3 + C_1 x + C_2$$

ここで，付帯条件は， $y'(0) = 0$ ， $y(0) = 0$ ， $y(l) = 0$ である．

例題：直接積分法（たわみの方程式から始める方法） conti.

まず, $y'(0) = 0$, $y(0) = 0$ より, $C_1 = 0$, $C_2 = 0$. 一方, $y(l) = 0$ より



$$EIy(l) = -\frac{1}{2}M_A l^2 - \frac{1}{6}R_A l^3 + \frac{1}{24}ql^4 = 0$$

また力・モーメントのつり合いは, $V(2l) = 0$, $M(2l) = 0$:

$$V(2l) = R_A - 2ql + R_C = 0$$

$$M(2l) = M_A + 2R_A l - 2ql^2 + R_C l = 0$$

なので, 不静定反力を点 C の反力として, $X = R_C$ と置くと,

$$R_A = -X + 2ql, \quad M_A = Xl - 2ql^2$$

$y(l) = 0$ に代入すると,

$$EIy(l) = -\frac{1}{2}(-Xl + 2ql^2)l^2 - \frac{1}{6}(X - 2ql)l^3 + \frac{1}{24}ql^4 = 0$$

$$X(\equiv R_C) = \frac{17}{8}ql, \quad R_A = -\frac{1}{8}ql, \quad M_A = \frac{1}{8}ql^2$$

例題：直接積分法（たわみの基礎式から始める方法）

たわみの基礎式，およびその積分は， C_1 ， C_2 ， $C_3(\equiv -R_C)$ ， C_4 ， C_5 を未知定数とすると

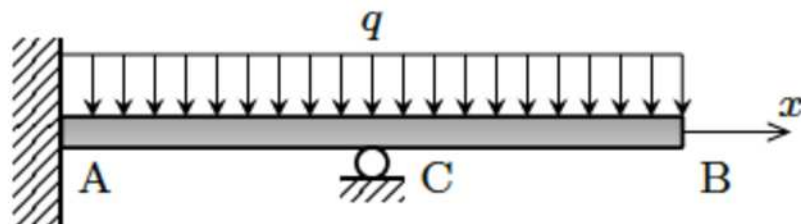
$$EIy^{(4)} = q$$

$$EIy^{(3)} = qx + C_1H(x-l) + C_2$$

$$EIy'' = \frac{1}{2}qx^2 + C_1\langle x-l \rangle + C_2x + C_3$$

$$EIy' = \frac{1}{6}qx^3 + \frac{1}{2}C_1\langle x-l \rangle^2 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4$$

$$EIy = \frac{1}{24}qx^4 + \frac{1}{6}C_1\langle x-l \rangle^3 + \frac{1}{6}C_2x^3 + \frac{1}{2}C_3x^2 + C_4x + C_5$$

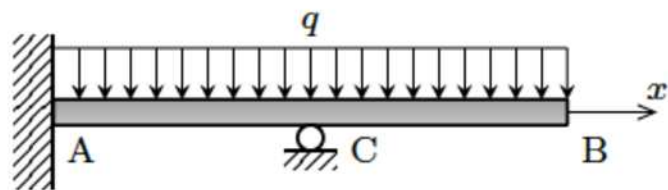


付帯条件は， $y'(0) = 0$ ， $y(0) = 0$ ， $y(l) = 0$ ， $y''(2l) = 0$ ， $y^{(3)}(2l) = 0$ である。

例題：直接積分法（たわみの基礎式から始める方法） conti.

まず, $y'(0) = 0$, $y(0) = 0$ より, $C_4 = 0$, $C_5 = 0$ である.

次に, $y(l) = 0$, $y''(2l) = 0$, $y^{(3)}(2l) = 0$ より, C_1 , C_2 , C_3 を得る.



$$\begin{cases} EIy(l) = \frac{1}{24}ql^3 + \frac{1}{6}C_2l^3 + \frac{1}{2}C_3l^2 = 0 \\ EIy''(2l) = \frac{1}{2}q(2l)^3 + C_1l + C_2(2l) + C_3 = 0 \\ EIy^{(3)}(2l) = q(2l) + C_1l + C_2(2l) = 0 \end{cases}$$

$$C_1 = -\frac{17}{8}ql, \quad C_2 = \frac{1}{8}ql, \quad C_3 = -\frac{1}{8}ql^2$$

点 A の反力 R_A , 支持モーメント M_A , および, 点 C の反力 R_C は

$$R_A = -EIy^{(3)}(0) = -C_2 = -\frac{1}{8}ql$$

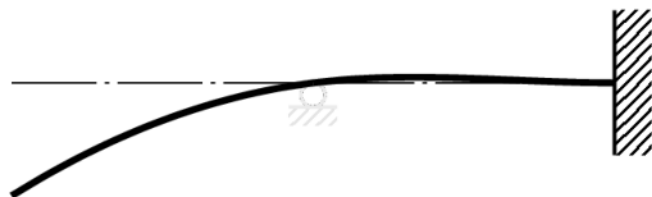
$$M_A = -EIy''(0) = -C_3 = \frac{1}{8}ql^2$$

$$R_C = -C_1 = \frac{17}{8}ql$$

固定支持と移動支持によって支持される張出しはり (自由端に負のモーメントが作用する例)

1 次不静定→不静定反力（あるいは不静定内力）を1つ選ぶ

移動支持の反力 R_C を選んだ場合



(動画)

移動支持 c を取り去る

点 c のたわみを δ となるの条件を満たすように

R_C を決定する。

正解（最終的な答え）は唯一。異なるパラメーター空間（1パラメーター族という）の中でそれぞれ答えを満たす解を求めている（正解は空間の交点に相当）。

固定支持 B の反モーメント M_B を選んだ場合



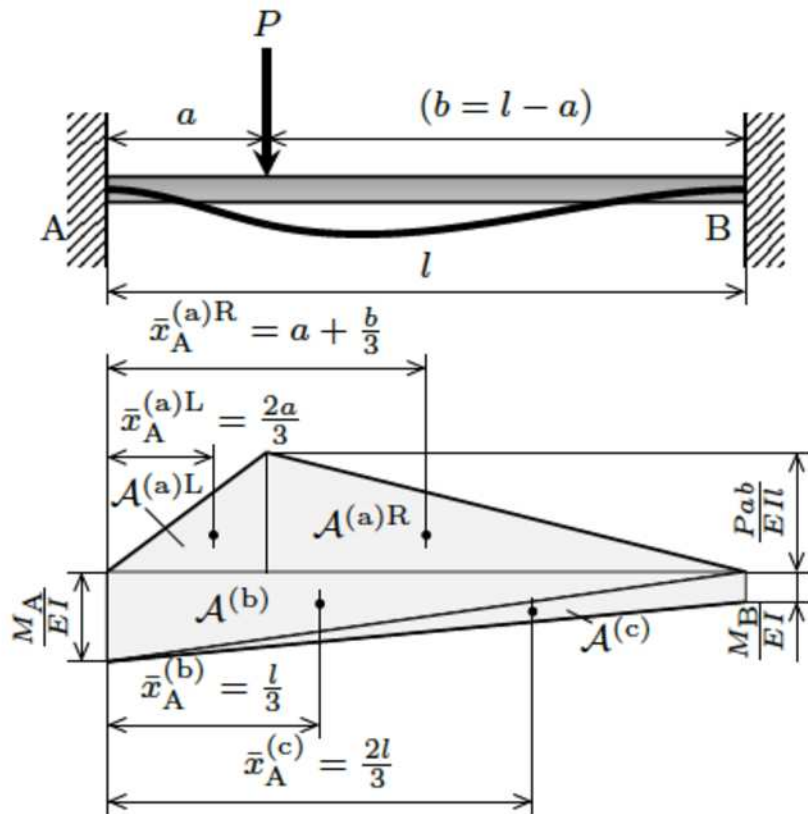
(動画)

固定支持 B を回転支持に変更する

点 B のたわみ角が 0 となるの条件を満たすように

M_B を決定する。

両端固定はり（モーメント面積法）



2 次の不静定：単純支持とし、
 不静定内力として M_A と M_B を考えモーメント面積法を適用
 点Aの接線と点Bの接線のなす角が0から、 $\theta_{BA} = 0$
 点Bの接線は点Aを通るから、 $t_{AB} = 0$

$$\mathcal{A}^{(a)L} = \frac{1}{2} \left(\frac{Pab}{lEI} \right) a, \quad \bar{x}_A^{(a)L} = \frac{2}{3}a,$$

$$\mathcal{A}^{(a)R} = \frac{1}{2} \left(\frac{Pab}{lEI} \right) b, \quad \bar{x}_A^{(a)R} = a + \frac{1}{3}b$$

$$\mathcal{A}^{(b)} = \frac{1}{2} \left(\frac{M_A}{EI} \right) l, \quad \bar{x}_A^{(b)} = \frac{1}{3}l$$

$$\mathcal{A}^{(c)} = \frac{1}{2} \left(\frac{M_B}{EI} \right) l, \quad \bar{x}_A^{(c)} = \frac{2}{3}l$$

$$\theta_{BA} = \mathcal{A}^{(a)L} + \mathcal{A}^{(a)R} + \mathcal{A}^{(b)} + \mathcal{A}^{(c)}$$

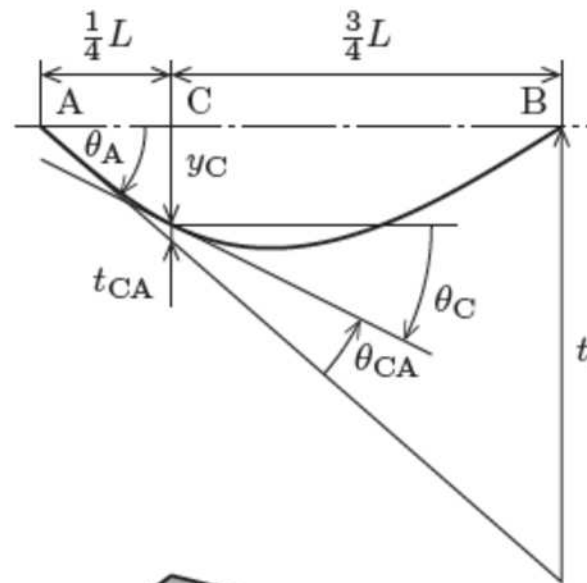
$$t_{AB} = \mathcal{A}^{(a)L} \bar{x}_A^{(a)L} + \mathcal{A}^{(a)R} \bar{x}_A^{(a)R} + \mathcal{A}^{(b)} \bar{x}_A^{(b)} + \mathcal{A}^{(c)} \bar{x}_A^{(c)}$$

図 8.5 モーメント面積法による両端固定はりの解法 したがって

$$M_A = -Pab^2/l^2, \quad M_B = -Pa^2b/l^2$$

集中荷重が作用する単純支持はりの 荷重作用点でのたわみとたわみ角（モーメント面積法）

AB間にモーメント面積法を適用



$$\mathcal{A}_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{3PL}{16EI} \right) \frac{L}{4} = \frac{3}{128} \frac{PL^2}{EI}$$

$$\bar{x}_{B1} = \frac{5}{6}L$$

$$\mathcal{A}_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{3PL}{16EI} \right) \frac{3L}{4} = \frac{9}{128} \frac{PL^2}{EI}$$

$$\bar{x}_{B2} = \frac{1}{2}L$$

$$t_{BA} = \mathcal{A}_1 \bar{x}_{B1} + \mathcal{A}_2 \bar{x}_{B2} = \frac{7PL^3}{128EI}$$

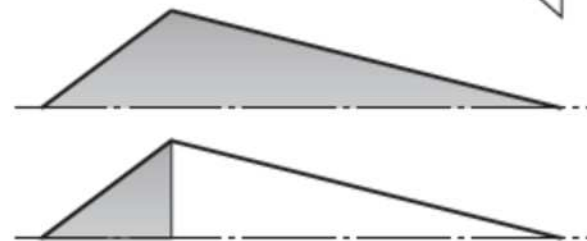
$$\theta_A = \frac{t_{BA}}{L} = \frac{7PL^2}{128EI}$$

AC間にモーメント面積法を適用

$$\bar{x}_{A1} = \frac{1}{6}L \quad \bar{x}_{C1} = \frac{1}{12}L \quad t_{CA} = \bar{x}_{C1} \mathcal{A}_1 = \frac{1}{512} \frac{PL^3}{EI}$$

$$y_C = t_{BA} \cdot \frac{1}{4} - t_{CA} = \frac{3}{256} \frac{PL^3}{EI}$$

$$\theta_C = \theta_A - \theta_{CA} = \frac{PL^2}{32EI}$$



連続はりの影響係数と三連モーメントの式

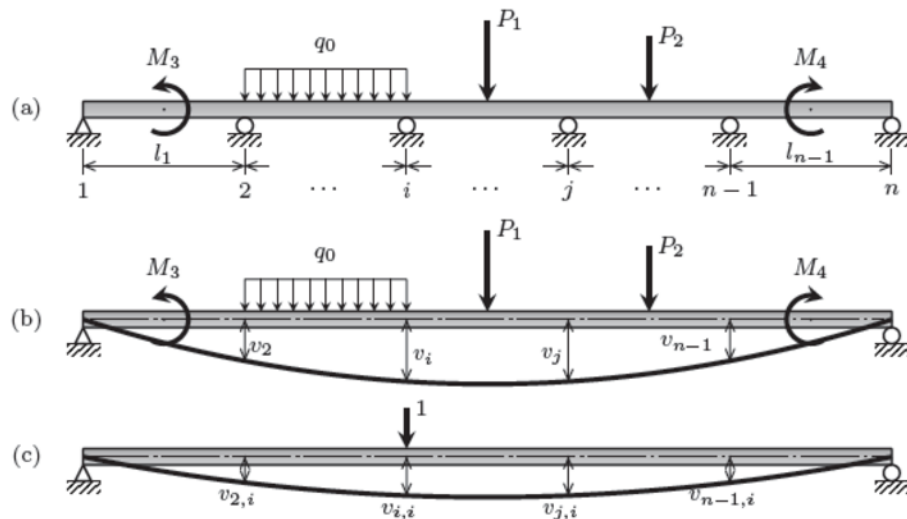


図8.6 連続はり重ね合せによる解法

$$\begin{bmatrix} v_{2,2} & v_{2,3} & \cdots & v_{2,n-1} \\ v_{3,2} & v_{3,3} & \cdots & v_{3,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n-1,2} & v_{n-1,3} & \cdots & v_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

反力を未知数に選ぶとフルマトリクスになってしまう

支点曲げモーメントを未知数に選ぶと疎行列に→解析的にも数值的にも有利

どこか1点に単位荷重 1 を加えると、その点とそれ以外のすべての点のたわみとの関係がわかる。

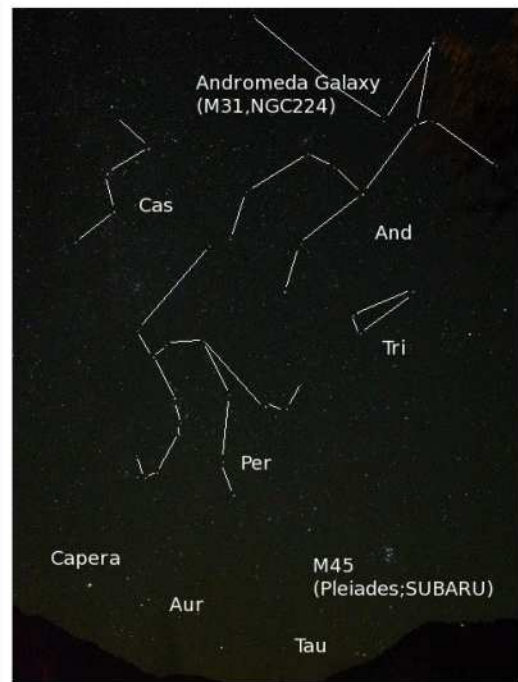
線形システムでは、それがあらかじめわかっているならば、その関係を用いて重ね合せの原理により問題を解くことができる。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \vdots \\ & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ & & \ddots & \\ \vdots & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

すばるとすばる望遠鏡（ハワイ島マウナケア山）

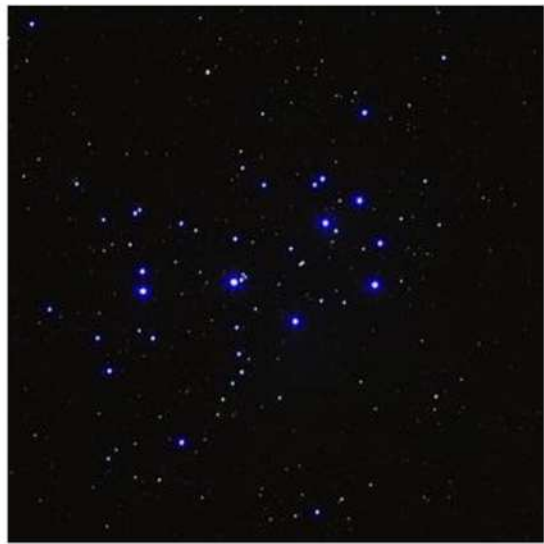
すばる（プレアデス散開星団M45）

「星はすばる...」（清少納言：枕草子）



富山の星空

(2010/9研究室旅行 AN)



すばる

(2013/12/29 AN)

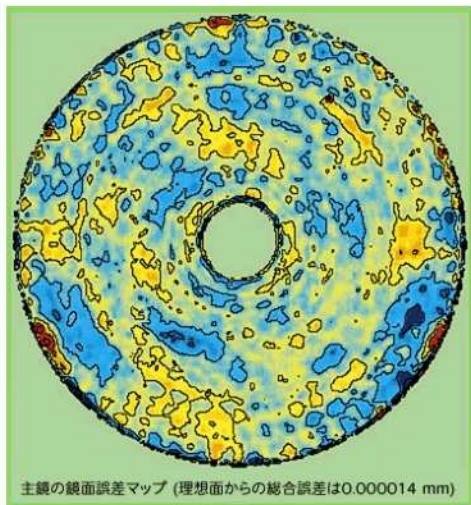
すばる望遠鏡

有効径 8.2 m, 厚さ20cm,
鏡面精度 0.012 μm , 質量 22.8ton
鏡の形状をコンピュータ制御



<https://www.subarutelescope.org/>

影響係数：すばる望遠鏡を支える材料力学



主鏡の仕様

<https://www.subarutelescope.org/>

有効口径: 8.2 メートル

厚さ: 20 センチメートル

重さ: 22.8 トン

材質: ULE ガラス (超低熱膨張ガラス)

研磨精度: 平均誤差 0.012 マイクロメートル

焦点距離: 15 メートル

「はり」を二次元に拡張した「板」構造

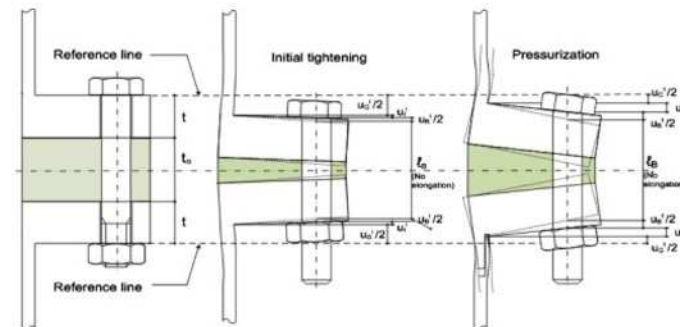
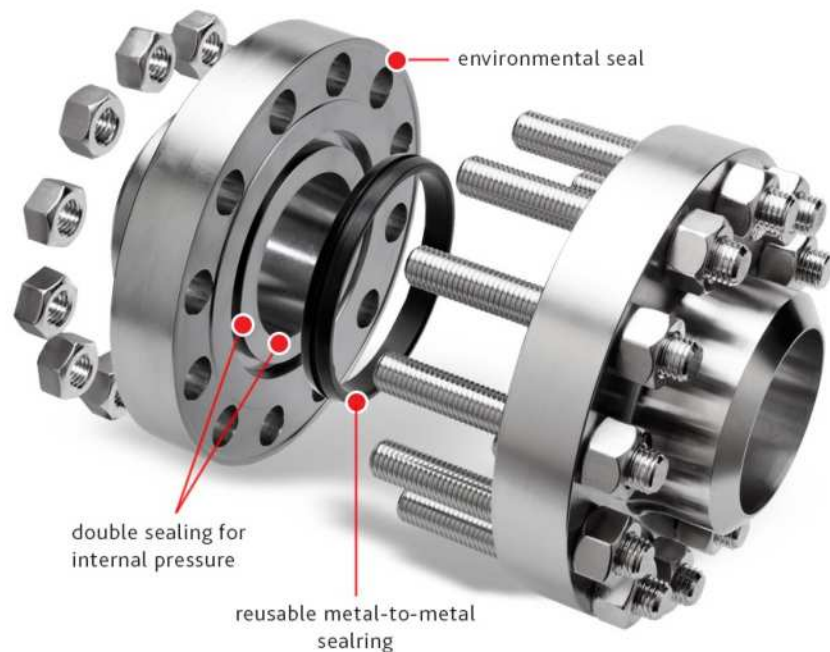
密度 2.205g/cm^3 、ヤング率 73GPa



能動光学系：261 本のアクチュエーター（ロボット指）が主鏡を支え、望遠鏡がどの方向を向いても、常に鏡を回転放物面に保つ。

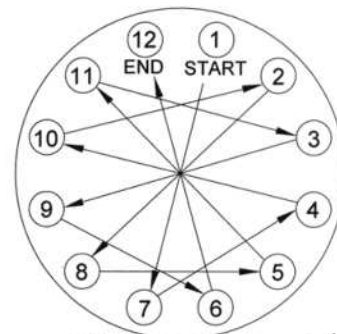
→二次元の「連続はり」

影響係数 ; フランジ締結体の締め付け



flange rotation 現象の解析モデル

Bouzid, Galai, J. Press. Vessel Technol, 2011



<http://www.jikuryoku.net/tejyun.html>

<http://www.fogt.com/Compact-Flange-Vector-SPO.html>

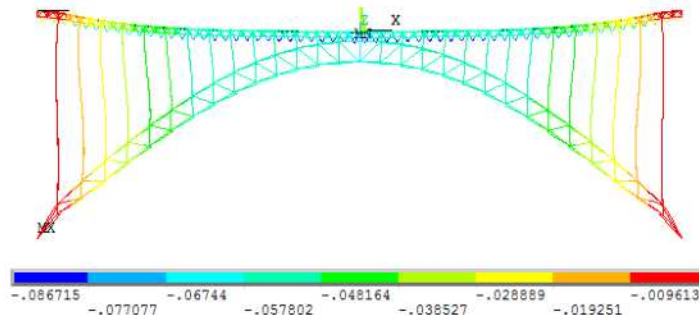
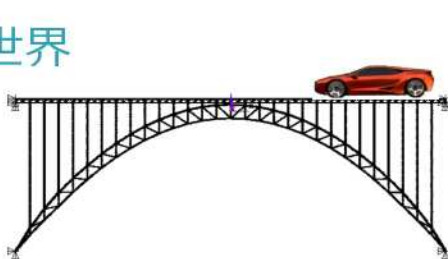
あるボルトの締め付け量や軸力が、別のボルトの変位や軸力に影響する。

均一に締結するためには、全ての方程式を同時に満たす解を求める必要がある

影響係数：カーボンナノチューブから移動荷重を受ける橋まで

要素間の相互作用を考慮して，系全体を理解する

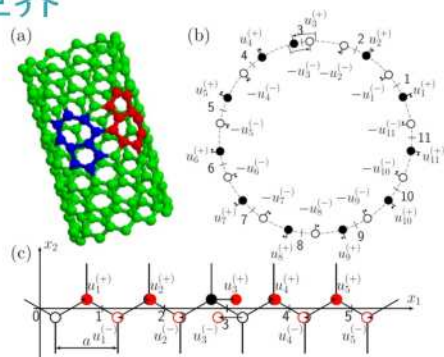
大きな世界



(Lei, Yang, Shi, Li, 2009)

移動荷重直下のたわみが他の位置のたわみや部材の内力にどのように影響するか

小さな世界



(Lei, Nakatani, 2017)

$$E_{\text{total}}(\mathbf{u}) = E_{\gamma} + E_b + E_{\Omega}$$

格子欠陥の局所変位が別の部位の変位にどのように影響するか

クラペイロンの3連モーメントの式

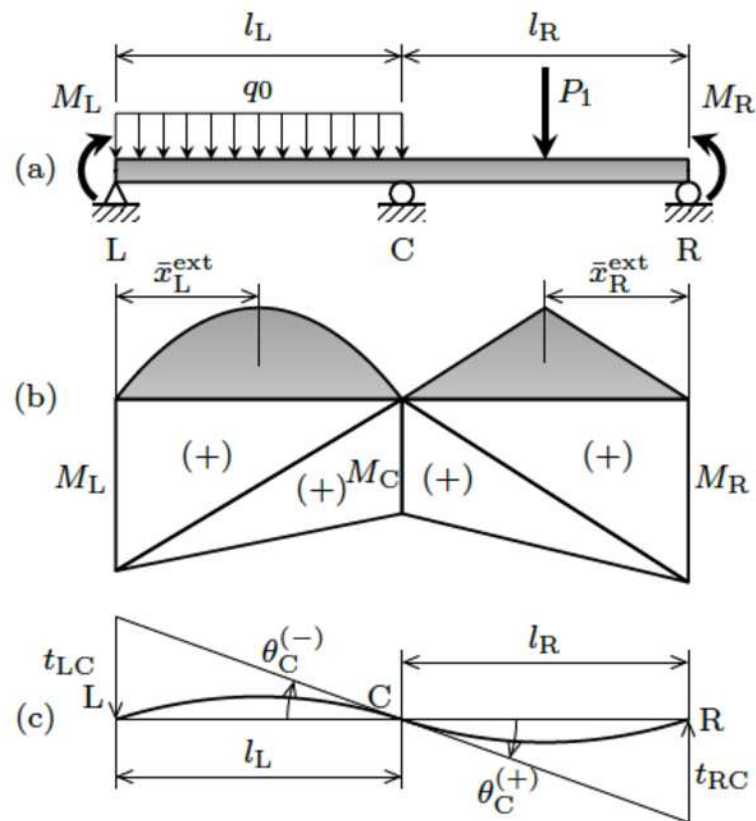


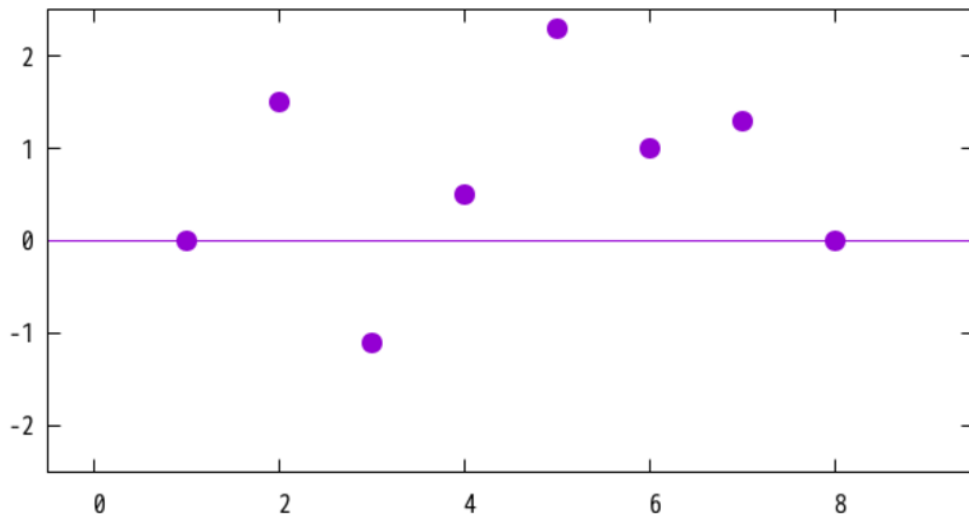
図8.7 連続はりから切り出した三つの支点を有するはり

$$l_L M_L + 2(l_L + l_R) M_C + l_R M_R = -6 \left(\frac{A_L^{\text{ext}} \bar{x}_L^{\text{ext}}}{l_L} + \frac{A_R^{\text{ext}} \bar{x}_R^{\text{ext}}}{l_R} \right)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \vdots \\ & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ & & \ddots & \\ \vdots & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

支点曲げモーメントを未知数に選ぶと連立一次方程式の解を容易に求めることができる（疎行列は解析的にも数値的にも有利）

スプライン補間 (spline interpolation) と連続はり



(動画)

スプライン曲線：離散点を雲形定規でなめらかに結ぶことに相当する曲線

離散点の座標は、曲げ剛性一定条件下の連続はりの理論で、たわみが規定されたもの（内力として反力が発生している）、あるいは、集中荷重を加えた結果、たわみが生じた結果とみなすことができる。

曲げエネルギー最小。つまり一番無駄のない形に対応している

両端に追加点を設け、それらを限りなく近づけると固定端の条件になる

雲形定規（二階微分が連続な曲線） 滑らかな曲線

4点を通る曲線（3次式）で補間

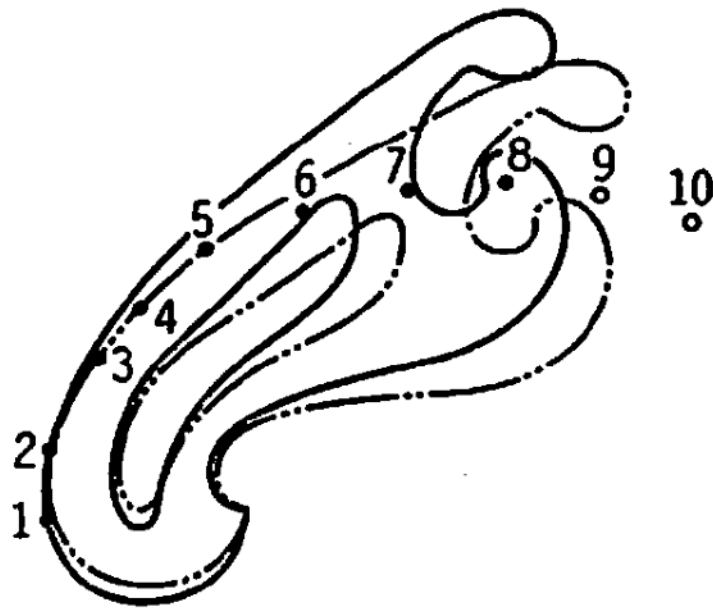
$$x(t) = a t^3 + b t^2 + c t + d$$

$$y(t) = e t^3 + f t^2 + g t + h$$

(t はパラメーター)



付図 1・5 雲形定規

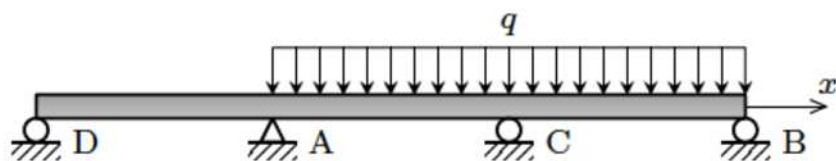
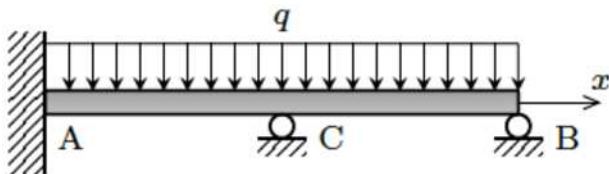


JISに基づく標準製図法 pp. 194, 201

4点をすべてを曲線で結ぶのではなく、
中間の2点だけを描いて、順にずらしながら
区分的に滑らかな曲線を描く

三連モーメントの式の適用例

支点 A の左側に移動支持された支点 D をとり、点 D, A, C, B をそれぞれ、1, 2, 3, 4 と番号をつける。三連モーメントの式を適用する



$$l_1 M_1 + 2(l_1 + l_2)M_2 + l_2 M_3 = -6 \left\{ \frac{A_1^{\text{ext}} x_1^{\text{ext}}}{l_1} + \frac{A_2^{\text{ext}} (l_2 - x_2^{\text{ext}})}{l_2} \right\}$$

$$l_2 M_2 + 2(l_2 + l_3)M_3 + l_3 M_4 = -6 \left\{ \frac{A_2^{\text{ext}} x_2^{\text{ext}}}{l_2} + \frac{A_3^{\text{ext}} (l_3 - x_3^{\text{ext}})}{l_3} \right\}$$

いま、 $l_2 = l_3 = l$ であり、荷重条件より、

$$M_1 = M_4 = 0, \quad A_1^{\text{ext}} = 0$$

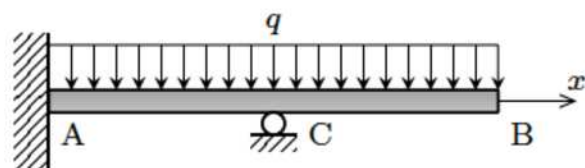
$$A_2^{\text{ext}} = A_3^{\text{ext}} = \frac{2}{3} M_{\text{max}} l = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{8} q l^2 \right) l = \frac{1}{12} q l^3$$

$l_1 \rightarrow 0$ の極限をとり

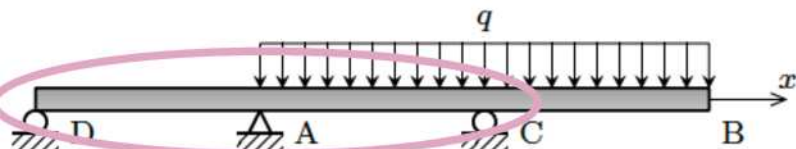
$$\begin{cases} 2M_2 + M_3 = -\frac{1}{4} q l^2 \\ 2M_2 + 4M_3 = -\frac{1}{2} q l^2 \end{cases}$$

$$M_2 = -\frac{1}{14} q l^2, \quad M_3 = -\frac{3}{28} q l^2$$

三連モーメントの式の多少無理矢理な適用例



支点 A の左側に移動支持された支点 D をとり、点 D, A, C をそれぞれ、1, 2, 3 と番号をつけ、区間 D-A-C にのみ三連モーメントの式を適用する（点 B は支点ではないのでたわみは未知であり公式の適用の際は別途考えなければならない）。



$$l_1 M_1 + 2(l_1 + l_2)M_2 + l_2 M_3 = -6 \left\{ \frac{A_1^{\text{ext}} x_1^{\text{ext}}}{l_1} + \frac{A_2^{\text{ext}} (l_2 - x_2^{\text{ext}})}{l_2} \right\}$$

いま、

$$M_1 = 0, \quad l_2 = l, \quad A_1^{\text{ext}} = 0, \quad A_2^{\text{ext}} = \frac{2}{3} M_{\text{max}} l = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{8} q l^2 \right) l = \frac{1}{12} q l^3$$

であり、 $l_1 \rightarrow 0$ の極限をとり

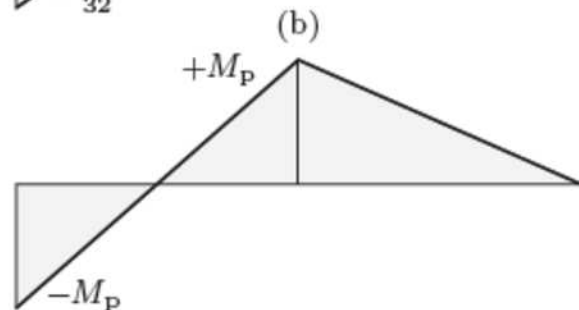
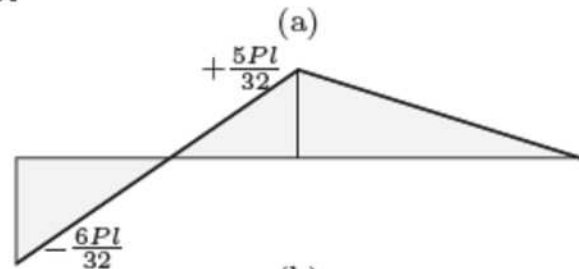
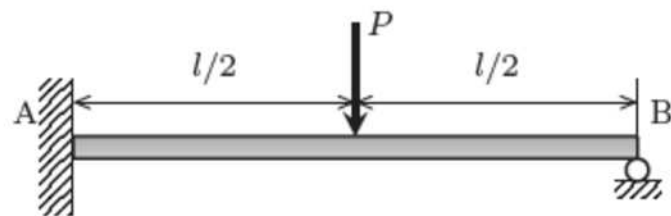
$$2M_2 + M_3 = -\frac{1}{4} q l^2$$

区間 CB の分布荷重からの寄与により $M_3 = -q l^2 / 2$ があるので

$$M_2 (\equiv M_A) = \frac{1}{8} q l^2$$

極限解析と極限荷重

弾・完全塑性（材料力学 5章の章末p.106演習問題〔5.6〕）



(c)

図8.8 極限荷重

$$\sigma = \begin{cases} -\sigma_Y & (\varepsilon < -\sigma_Y/E) \\ E\varepsilon & (-\sigma_Y/E \leq \varepsilon < \sigma_Y/E) \\ \sigma_Y & (\varepsilon \geq \sigma_Y/E) \end{cases}$$

全塑性曲げモーメント

$$M_p = A_t y_t \sigma_y + A_c y_c \sigma_y$$

塑性ヒンジ（塑性関節）

モーメントは増加せずに曲率のみが増大する
除荷に対しては弾性的挙動を示す

はり、不静定次数と同数までの塑性ヒンジの形成では崩壊しないが、不静定次数 + 1 個の塑性ヒンジの形成により崩壊する。

極限解析により、極限荷重、崩壊機構を解析する。

曲りはり

中立軸の位置は図心を通らない

応力分布・ひずみ分布は線形ではない

矩形断面では曲率半径の内側で高い応力

断面の代表寸法に比べて曲率半径が大きい時には曲率の影響を無視できる

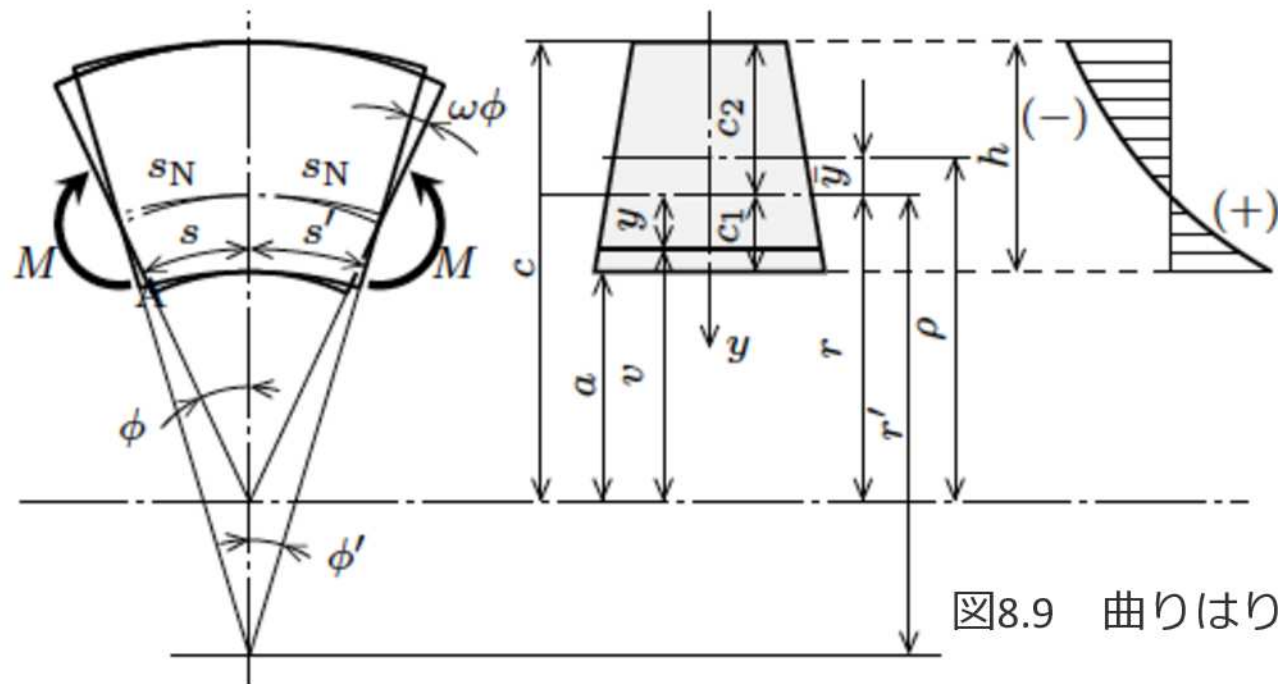


図8.9 曲りはり

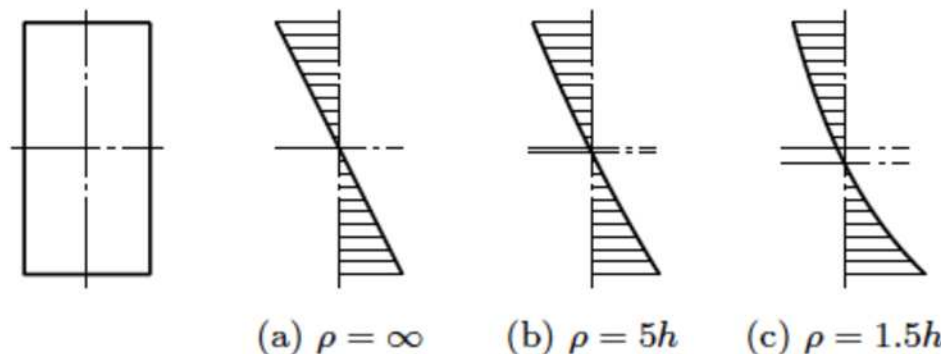


図8.10 長方形断面の曲りはりの応力分布

現実の問題：不確かさを伴う問題

〔8.2〕 Galileo は、著書「新科学対話」¹⁾の中で、次のような問題を取りあげている。「大きな大理石の柱が二つの支点で単純支持されていた。ある職人が、自重で柱が壊れないかと心配し、第三の支点を中央に加えることを思いついた。これはよいアイデアに思えたが、何ヶ月か後に新しく設けた支点の上部にき裂が発生した。」(問図 8.1) ガリレオはこのメカニズムについて論じている。曲げ応力の観点からさらに詳しく論じなさい[†]。

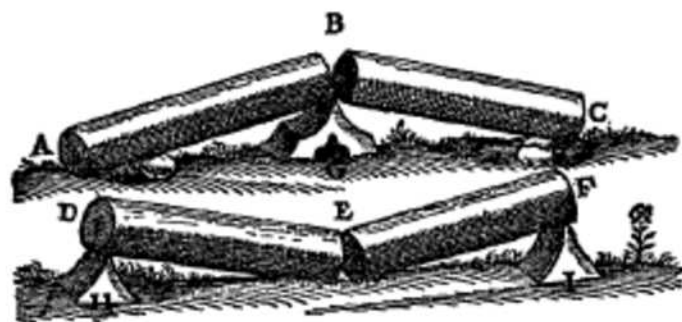


図 8.11 問図 8.1

- 1) Galileo Galilei, *Dialogues Concerning Two New Sciences*, 1638 (Translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio, 1914, Macmillan).

[†] 一般に冗長さのある構造（不静定構造）は安全性を高めるとされるが、この例のように適用を誤るとかえって危険を助長する場合があることに注意しておくべきである。

変形によって支持点が移動する不静定問題

〔8.5〕 問図 8.2 のように、半径 R の円弧状のはりが点 A で固定されている。荷重 P を徐々に増加させていくとき、荷重作用点の変位を δ とするとき、 P と δ の関係を求めなさい。ただしはりは、ヤング率 E 、断面は幅 b 高さ h の長方形とする。また $R \gg L$ である。

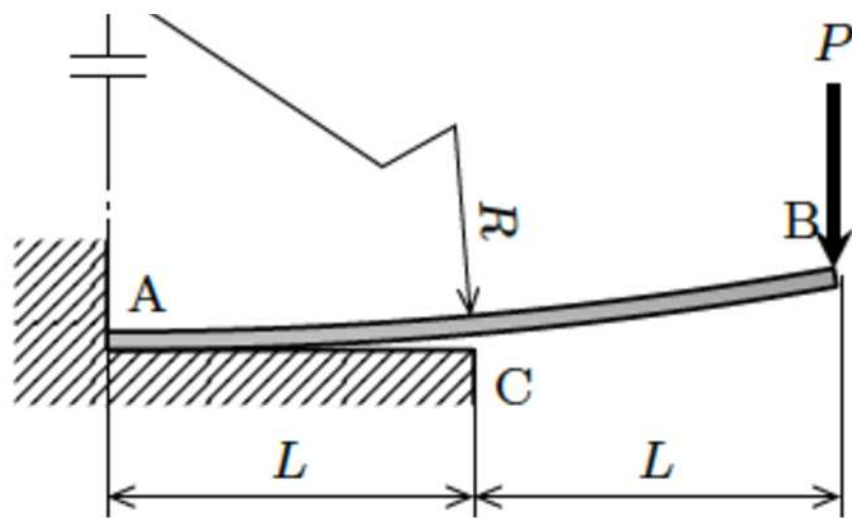


図 8.12 問図 8.2

浮力によって支持される不静定問題

〔8.6〕 問図 8.3 のように，3つの浮きによって支えられたはりに集中荷重 P を受けるとき，点 A, B, C における反力と曲げモーメントを求めなさい。ただし，はりの曲げ剛性を EI ，浮きの断面積を A ，水の単位体積あたりの重さを w とする。

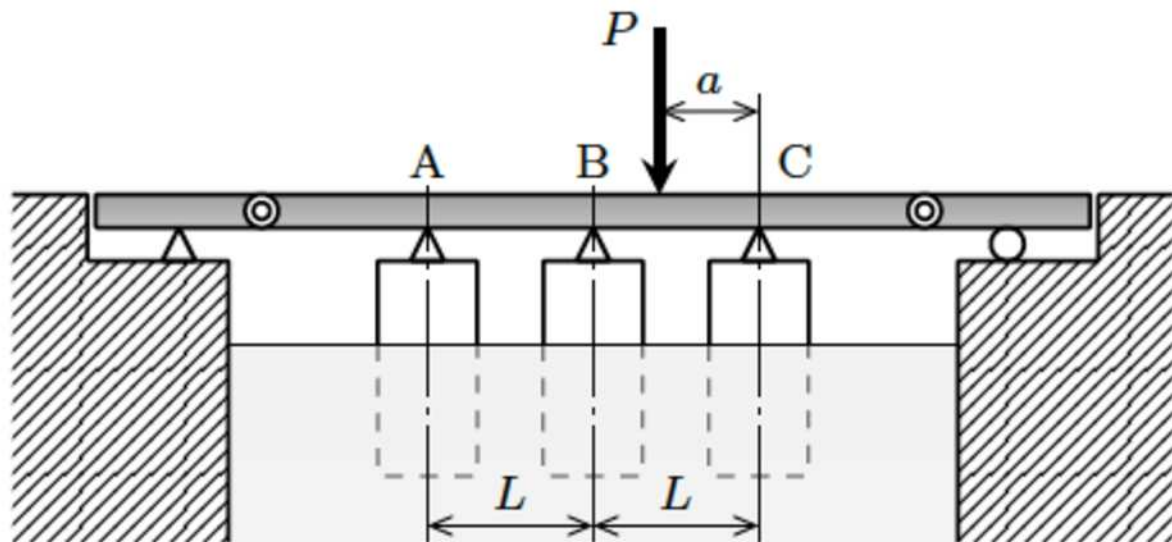
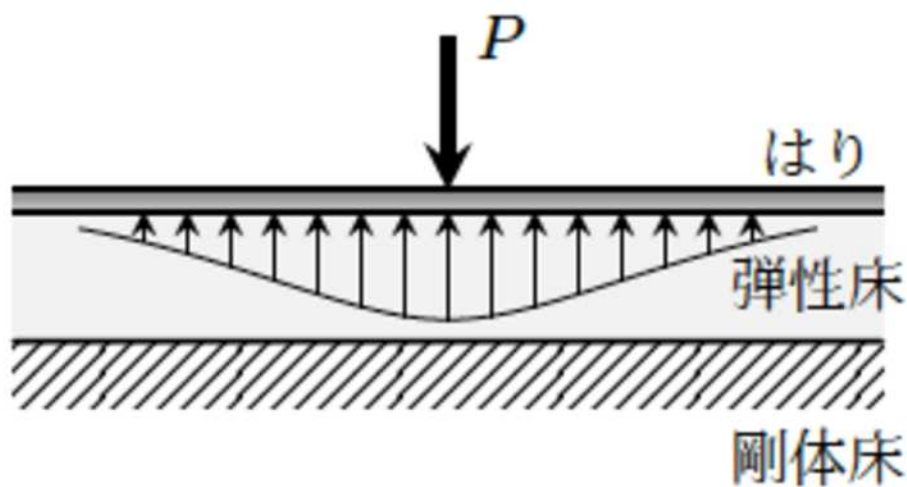


図 8.13 問図 8.3

弾性床

〔8.7〕 問図 8.4 のように，弾性床におかれた曲げ剛性 EI の無限に長いはりが，集中荷重 P を受けるとき，たわみ曲線とはりの曲げモーメント分布を求めなさい。ただし，弾性床ははりのたわみに比例した反力（図に分布荷重として示している）をはりに及ぼすものとする。



断面の核(core or kernel of section)

〔8.8〕 幅 b 、高さ h の長方形断面を有する短い柱が床におかれている。(1) 端面 (y_1, z_1) に x 方向の軸圧縮荷重 P が作用するとき、断面の x 方向の垂直応力分布 $\sigma(y, z)$ を求めなさい。(2) $y-z$ 平面で $\sigma(y, z) = 0$ となる軌跡を求めなさい。(3) 小問 (2) で求めた直線が断面内を通らない条件を表す (y_1, z_1) の領域を求めなさい (このような領域を核 (kernel) という)。(4) 自重を考えると、核の大きさを論じなさい。

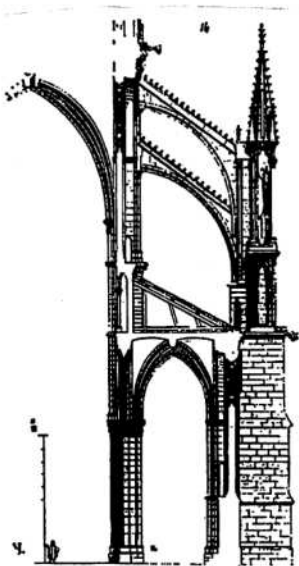
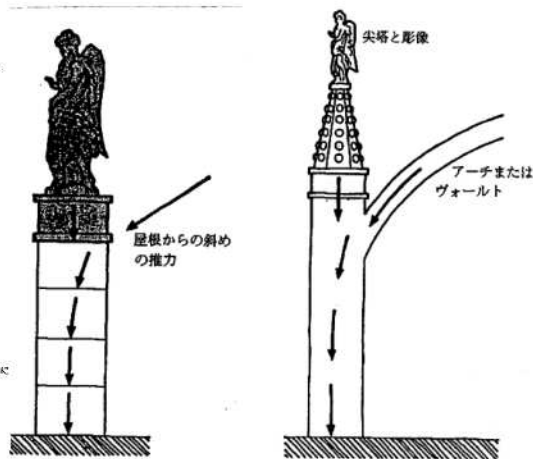
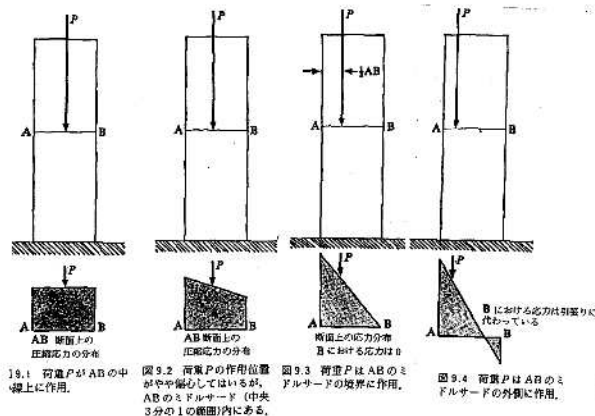


図 9.18 リームズ大寺院のフライング・バットレス (Viollet-le-Duc による)。



彫像や尖塔はなんのためにあるのか



次回

材料力学2024 シーズン 2

第8話 ねじり 前編

2024年7月2日 (火)

Coming Soon . . .