

材料力学2024 シーズン2

第5話 はりのせん断応力

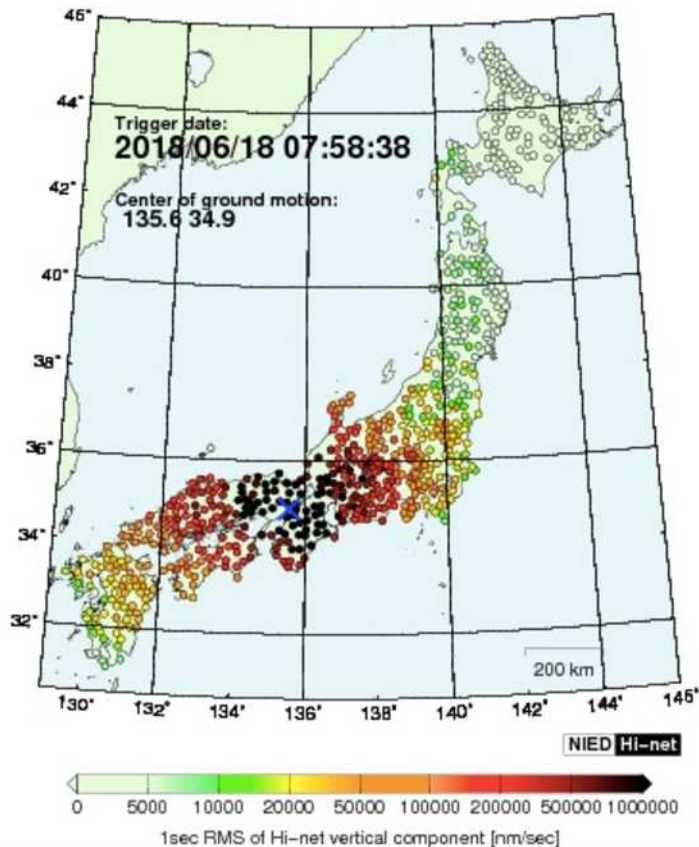
2024年6月21日（金）

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

大阪北部地震(2018.6.18)

Shake map of maximum amplitude

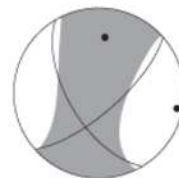


防災科学技術研究所 NIED
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2018年6月18日大阪府北部の地震 (F-netによるメカニズム解)

2018年6月18日7時58分頃の大阪府北部の地震のモーメントテンソル解析結果

- Mw 5.5, 深さ11km
- 東西方向に圧縮軸を持つ型



Mw = 5.5
Mo [Nm] = 2.36e+17
NP1: (149, 61, 21)
NP2: (49, 72, 149)

Var. Red = 93.54
Percent DC = 27
Percent CLVD = 73
Variance = 4.65e-07
RES/Pdc = 1.71e-08

— Obs
..... Syn.

Tangential

Radial

Vertical

YZK_f0.05.data_BH,287 Max Amp=1.37e-02 cm VR=94.0

SRN_f0.05.data_BH,31 Max Amp=1.36e-02 cm VR=92.0

OKW_f0.05.data_BH,242 Max Amp=1.37e-02 cm VR=94.3

●手動メカニズム決定結果 (暫定解)

発生時刻	走向	傾斜	すべり角	地震モーメント	緯度	経度	深さ	Mw	品質
2018/6/18 7:58	149/49	61/72	21/149	2.36E+17Nm	34.8	135.6	11 km	5.5	93.54

※緯度・経度は気象庁の緊急震源情報による

防災科学研究所(NIED)

平成30年(2018年) 大阪府北部を震源とする地震 クライシスレスポンスサイトより
2018.6.22 参照

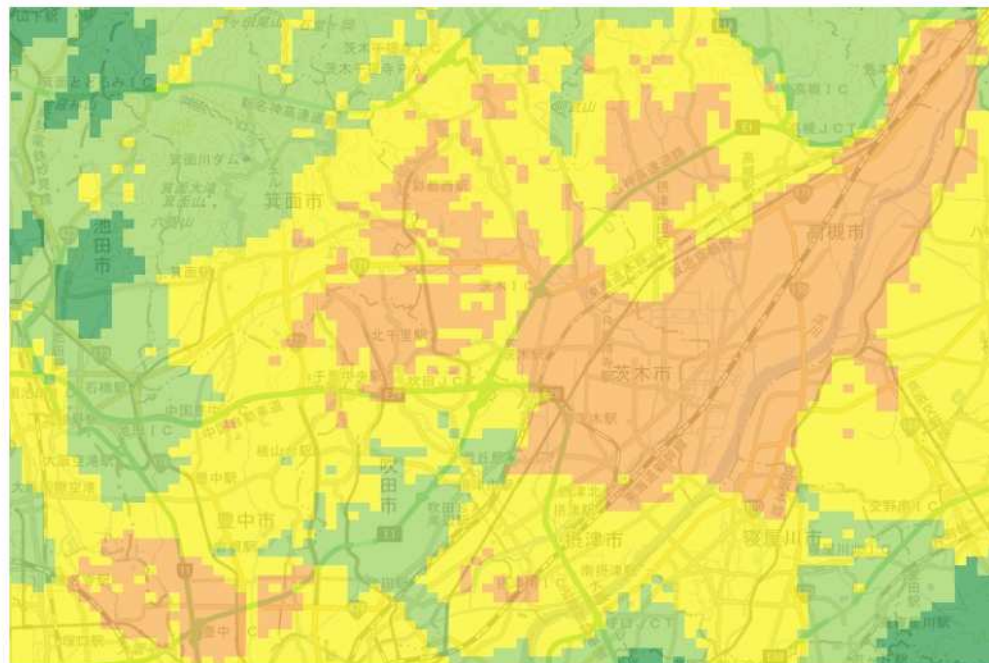
大阪北部地震(2018.6.18)

2018年6月18日大阪府北部の地震
震源域周辺の震源分布



・ M_{JMA} 6.1 (暫定値) が発生し、震源分布は4km四方の広がりを持つ

2018年6月18日7時58分頃に大阪府北部を震源とする M_{JMA} 6.1 (暫定値) の地震が発生し、大阪市北区、高槻市、枚方市、茨木市、其面市では最大震度6弱の揺れが観測された。防災科研Hi-netによる発震機構解は西北西-東南東圧縮の逆断層型を示す。震源分布は、4km四方の広がりを持つ。



各地のゆれ：震源に近い高槻市・茨木市、
大阪大学吹田キャンパスのゆれも大きかった

防災科学研究所(NIED)
平成30年(2018年)大阪府北部を震源とする地震 クライシスレスポンスサイトより
2018.6.22 参照

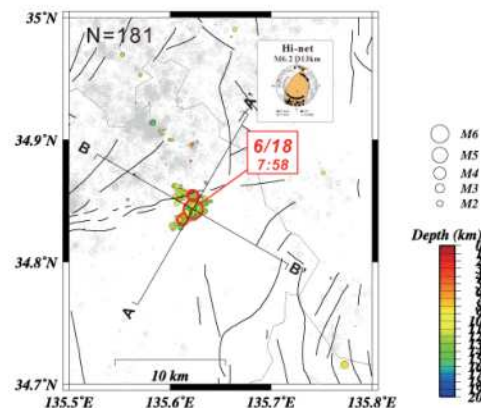


図1 Hi-net 定常処理による震央分布(2018年6月1日～18日10:13)。M3.6以上の地震を赤太線の丸で囲む。灰丸は2000年10月～2018年5月までの震源分布。

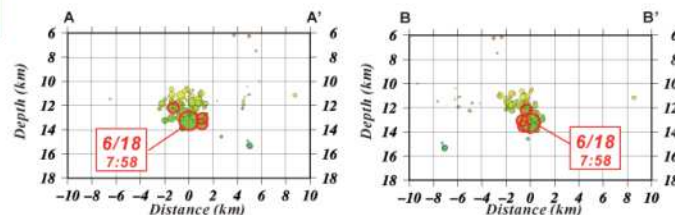


図2 図1の震源断面図。2018年6月1日以降に発生した地震を表示。M3.6以上の地震を赤太線の丸で囲む。

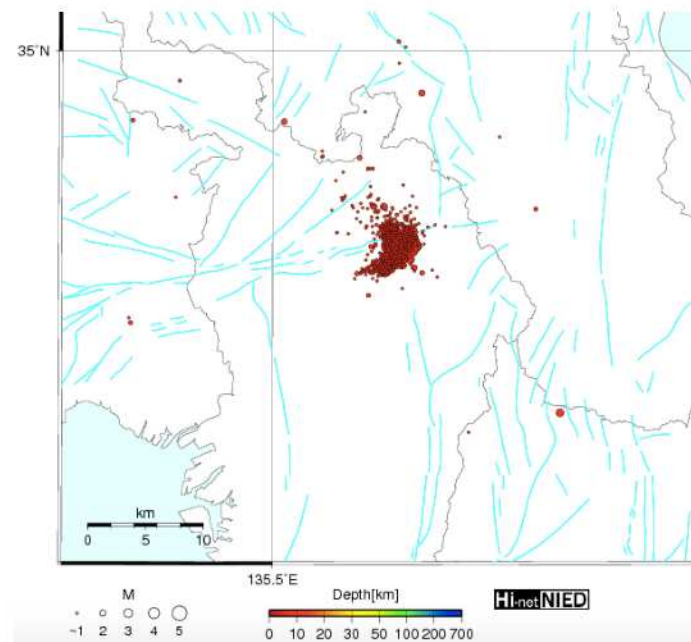
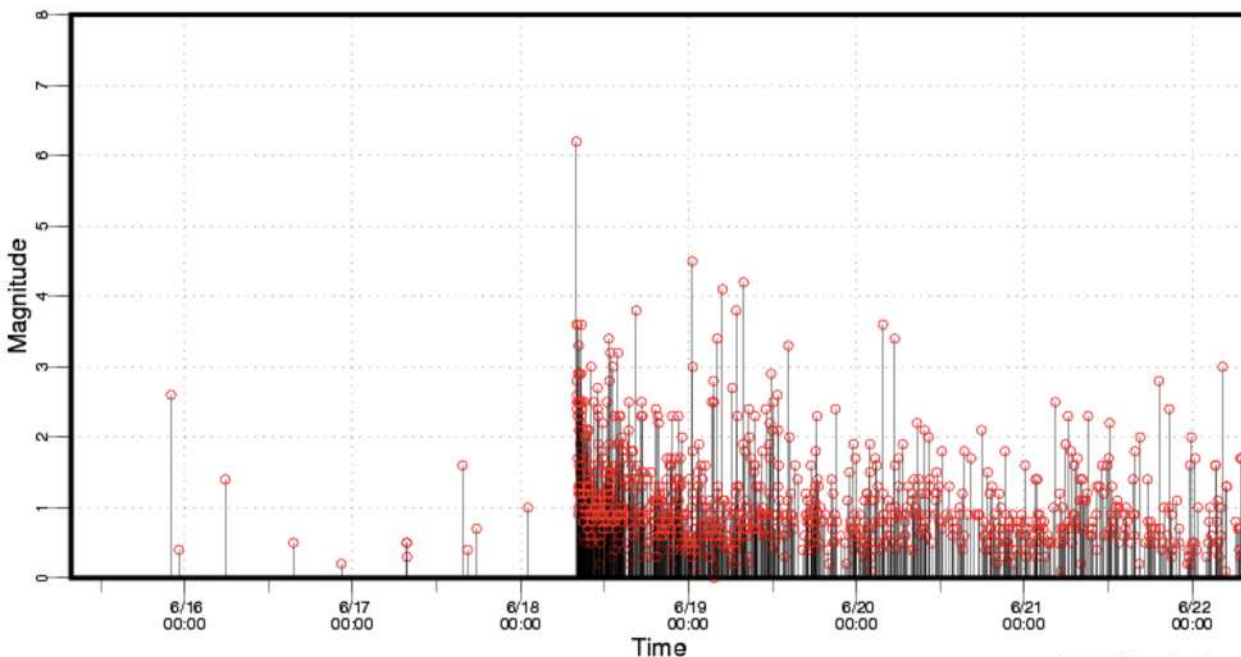
謝辞：解析には気象庁、京都大学、東京大学、名古屋大学、高知大学、産業技術総合研究所、静岡県等のデータを使用させて頂きました。

防災科学技術研究所資料

発生前・後の活動状況

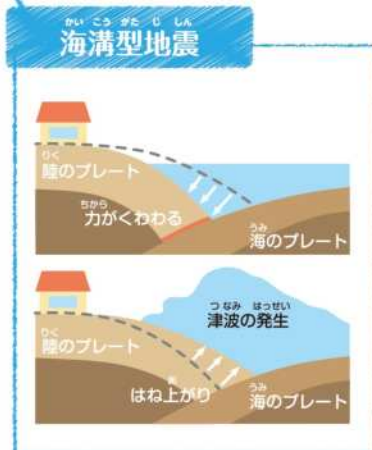
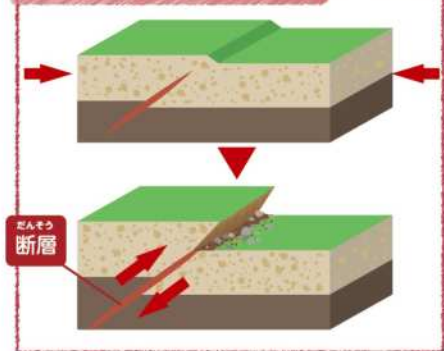
規模・頻度ともに典型的な指数関数的減衰
単独の断層による同一メカニズム

2018-06-15 07:45:00 ~ 2018-06-22 07:45:00

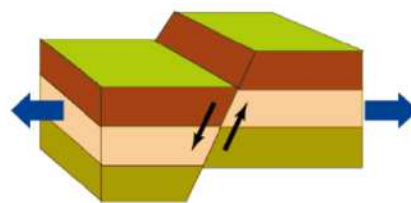


防災科学研究所(NIED)
平成30年(2018年) 大阪府北部を震源とする地震 クライシスレスポンスサイトより
2018.6.22 参照

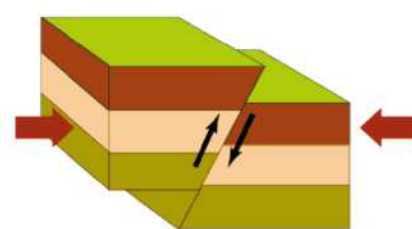
圧縮力と分解せん断応力 (応力の変換公式・モールの応力円)



縦ずれ断層 正断層

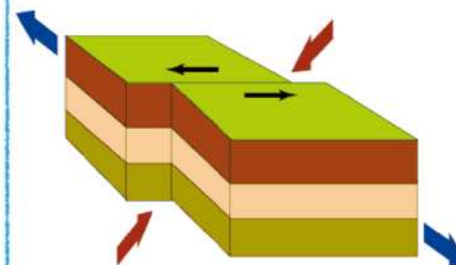


縦ずれ断層 逆断層

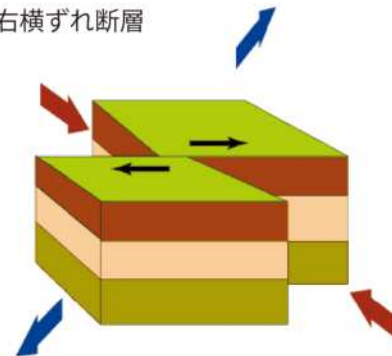


← 圧縮の力
← 伸長の力

左横ずれ断層

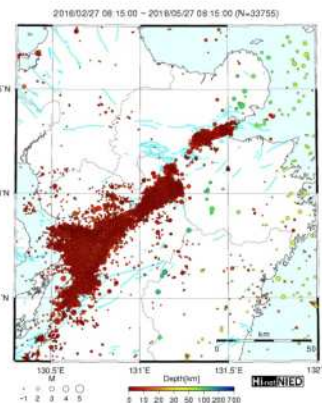


右横ずれ断層



地震調査研究推進本部事務局
(文部科学省研究開発局地震・防災研究課)より
2018.6.22 参照

ひずみエネルギーの解放過程としての地震 主としてせん断変形



2016年熊本地震

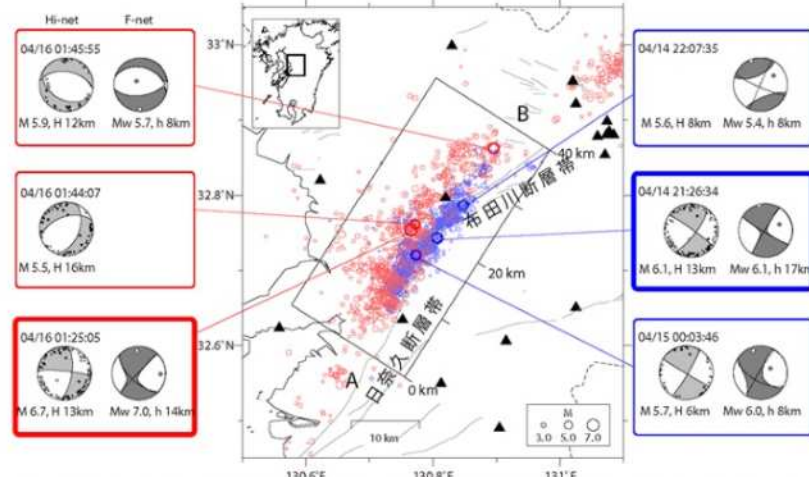
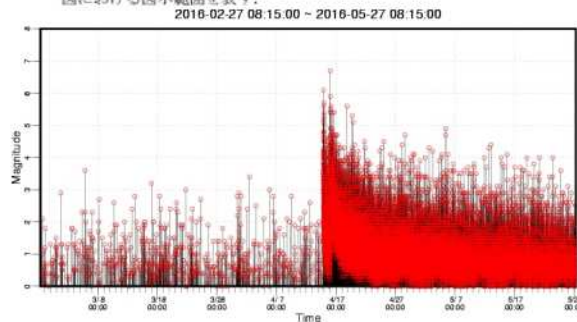


図1. 平成28年(2016年)熊本県熊本地方の地震の震源域近傍における震央分布(2016年4月14日21時~17日5時)。深さ30 km以浅の地震について、防災科研Hi-netにおける手動または自動検測震源による震央を丸印で示す。赤色は16日1時25分以降に、青色はそれより前に発生した地震であることをそれぞれ表し、太線による丸印はM5.5以上の地震であることを表す。観測点は三角印で示す。矩形領域は図2の時空間分布図における図示範囲を表す。



(NIED)

せん断変形
(NHK ONLINE)

圧縮変形
曲げ変形

(静岡新聞)



- 構成論 vs 現象論
- 理論(普遍知)獲得 vs ビッグデータ応用

熊本城長塀に見る非局所性と変形モードの拘束



(2016.8.8 AN)

変形の拘束は強固な構造の実現に利用されている。しかし、損傷時には広い範囲に変形が伝播する（長所でもあり短所でもある）。

このような非局所性を積極的に利用すると構造全体の外力に対する応答をさまざまに変化させることができる。

熊本城石垣の面外変形モード

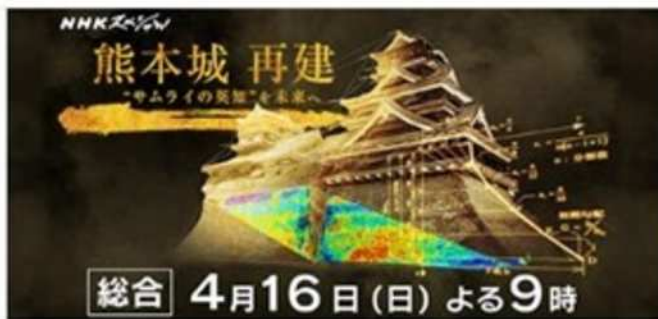


宇土櫓（17世紀(300余年前)築）
(2016.8.8 AN)

自重を力の源とする。
接触面の圧縮垂直応力
と、それに対応する
摩擦力に相当する
せん断応力のネット
ワークにより構造を形
成



戌亥櫓（2003年(13年前)再築）(2016.8.8 AN)



NHKスペシャル
熊本城 再建
“サムライの英知”を未来へ

通潤橋

自重を力の源とする.

接触面の圧縮垂直応力と、それに対応する摩擦力に相当するせん断応力のネットワークにより構造を形成



(2014/5/18 AN)



(2014/5/18 AN)

強度設計について考える



(2012/11/3 AN)



(2012/11/3 AN)

頑丈に壊れないようにつくる
壊れてくれるようにつくる

考えてみよう♪

ポアソン比

ヤング率 (弾性係数, 縦弾性係数)
剛性を定量的に定める

ポアソン比

弾性特性の定性的な特徴を定める



Thomas Young
(1773-1829)



Siméon Denis Poisson
(1781-1840)

ポアソン比の範囲 $-1 < \nu < \frac{1}{2}$

横弾性係数

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

ポアソン比が下限 (負) $\nu \rightarrow -1$

せん断変形しない材料 $G \rightarrow \infty$

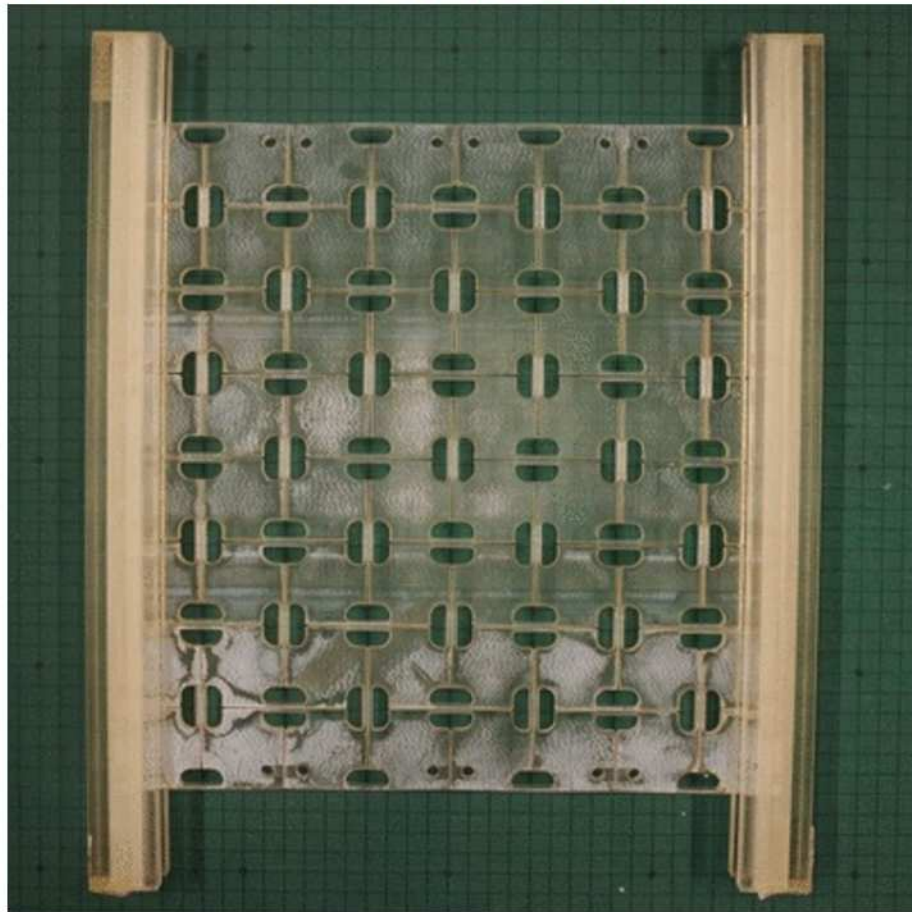
体積弾性係数

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

ポアソン比が上限 (最大) $\nu \rightarrow \frac{1}{2}$

体積変化しない材料 $K \rightarrow \infty$

切り紙の変形（例1） 負のポアソン比を持つ構造



正のポアソン比 多くの材料では伸長によって、荷重軸方向に垂直な方向に収縮する。

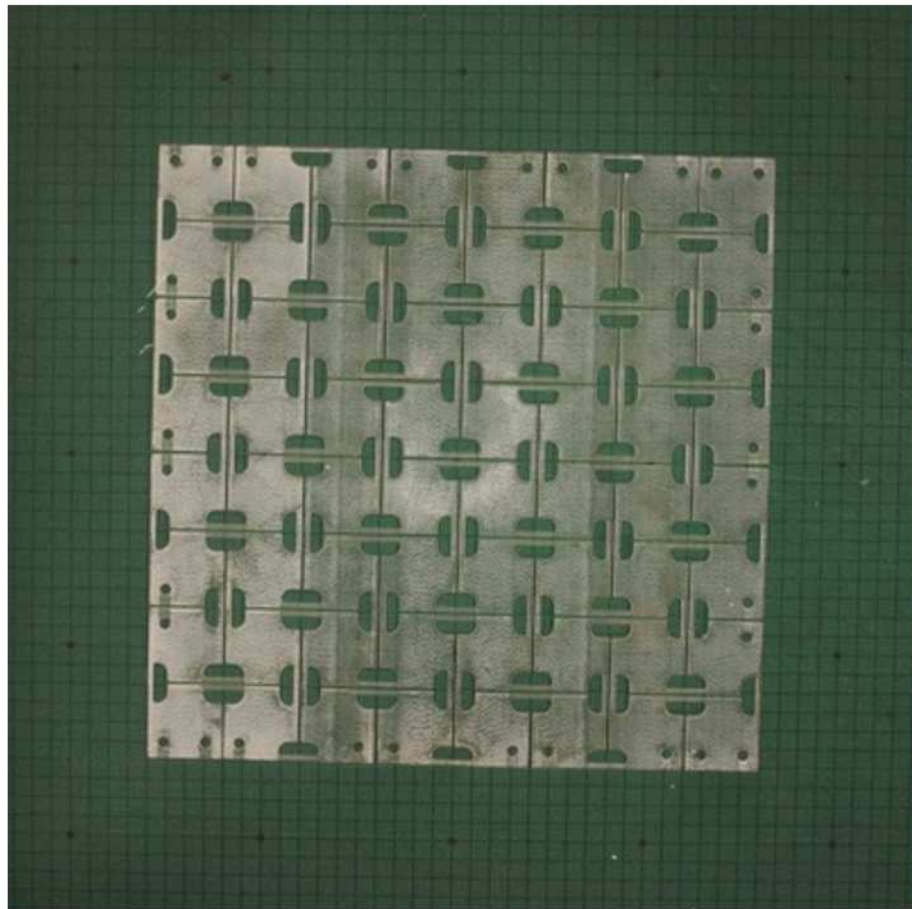
ポアソン比の範囲 しかし、熱力学は負のポアソン比を否定しない
 $(-1 < \nu < 0.5)$

オーゼティック構造 特殊な切り込みパターン（非適合性）を付与した構造では、負のポアソン比を示す

伸長によって、荷重軸方向に垂直な方向にも拡大する
 $(\nu \doteq -1)$

切り紙の変形（例2）

球を包むように丸めることができる薄板構造



紙の変形

等長変形 任意の二点について、変形前後で測地線上で測った距離が変化しない（面積一定条件よりも、より強い条件）

展開可能曲面 曲げる・折るといった操作で造形される曲面は、錐面、柱面など曲面全体のごく一部のカテゴリーに限定される

この切り紙の変形

オーゼティック構造 特殊な切り込みパターン（非適合性）を付与した構造では、局所領域で可能な面積変化を利用して球を包むように丸めることができる

ジャンク船における帆の構造の工夫



Junk (Ship) Wikipedia

Junk sails on a yellow sea ♪ 名曲La femme Chinoise
(Yellow Magic Orchestra, 1978)を聴いて想像して
みよう

Copyright (C) 2017-2024, Akihiro Nakatani, Osaka University



Junk under Full Sail on the Yellow Sea

ジャンク船（戎克、英: Junk。中国における船舶の様式の1つ。古くから用いられた木造帆船）：帆にたるみを持たせることにより応力を緩和し、安全性や操作性を確保した構造と考えることができる

Vionnetによるバイアス裁断の発明 (1920ごろ)



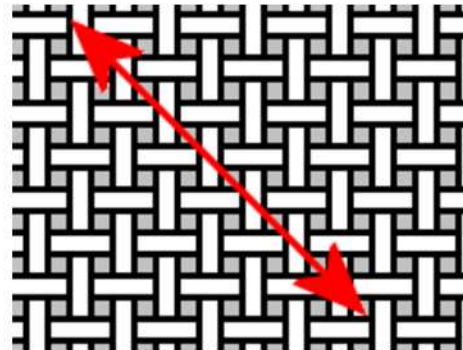
Madeleine Vionnet
(1876-1975)
from wikipedia



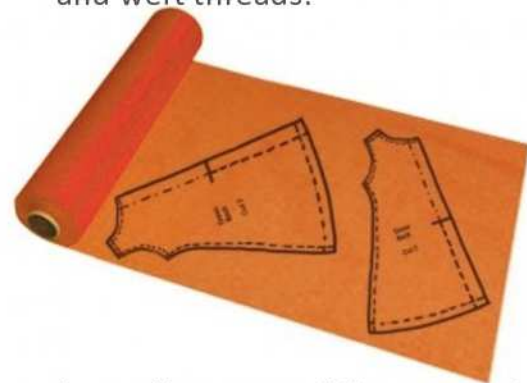
Dress by M. Vionnet



Vionnet evening gown,
embroidered silk net,
1931



The bias of a textile runs at 45 degrees to both the warp and weft threads.



<https://www.sewdifferent.co.uk/how-to-cut-fabric-on-the-bias/>

バイアス裁断せん断方向の伸びと縮みを利用

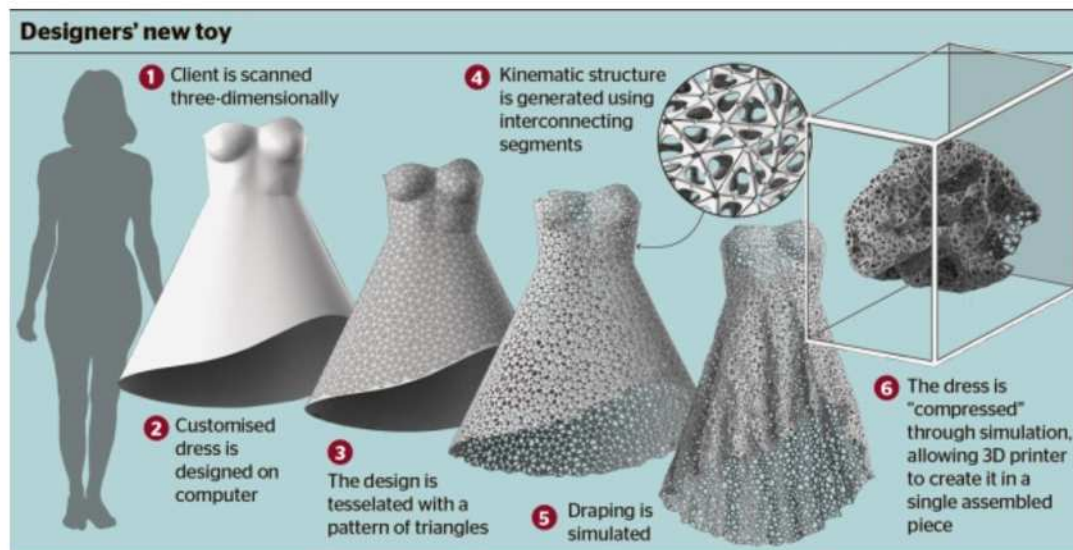
Vionnet 1920 (20世紀) から、100年後の現在2020 (21世紀)



<https://www.sewdifferent.co.uk/how-to-cut-fabric-on-the-bias/>

4D Printing

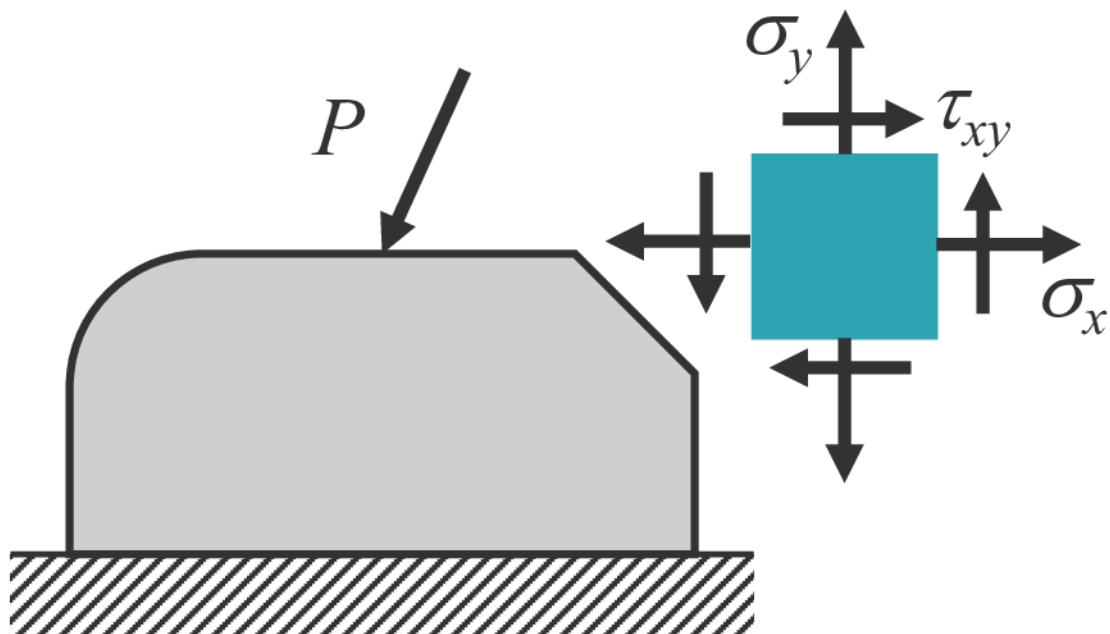
力学の原理を用いて、構造とその時間変化をデザインする



<http://fashionlab.3ds.com/4d-printing-is-the-next-big-thing/>

せん断変形と応力

はたらいている内力（応力）を想像してみよう！



内力（応力分布）が、静力学的に釣り合い状態にあるとき、正解！

任意の部分領域を切り出したときに力の釣り合いが保たれるような分布

自由表面では面の法線方向の垂直応力とせん断応力は0である。

自由表面の接平面方向の垂直応力は非ゼロでもよい。

考えてみよう♪

微分と積分・平均値の定理 (復習, 高校数学)

微分の定義

(極限は近似ではない)

$$\frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

積分の平均値の定理

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx = f(x_1), \quad a < \exists x_1 < b$$

たとえば高速道路の
2地点の走行:

x と、 $x + \Delta x$ の区間に適用すると、

距離と所要時間から計算
される平均速度と同じ瞬
間速度が必ず存在する

$$\frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} f(\xi) d\xi = f(x_1), \quad x < \exists x_1 < x + \Delta x$$

したがって、

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} f(\xi) d\xi = f(x)$$

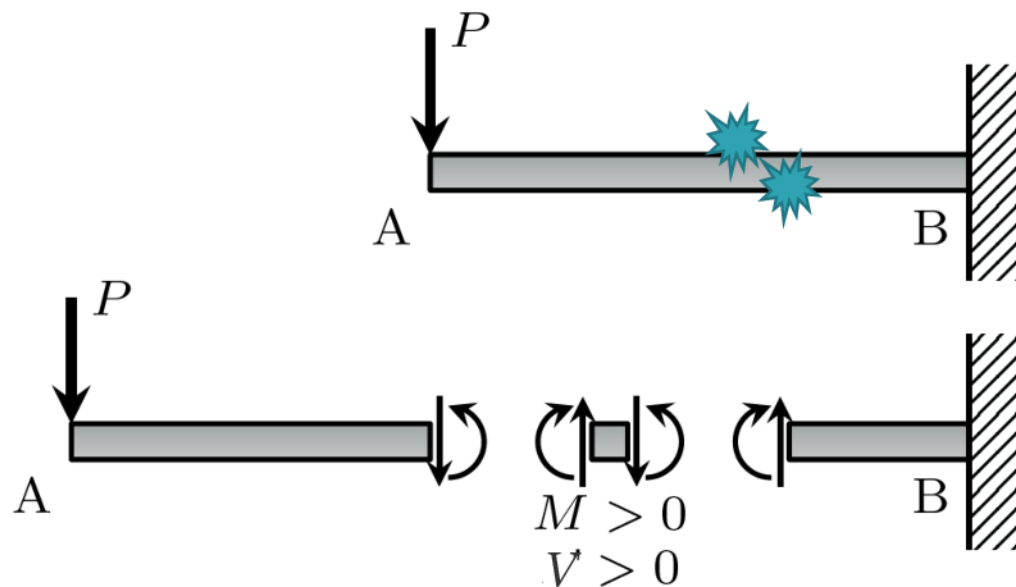
切断法の極意

(method of section)

斬鉄！

つまらないものを切ると
だいじなものが見える！

またつまらぬものを
斬ってしまった



棒の引張り・圧縮 (復習)

軸力 N と分布荷重 q の関係

x 軸方向の力のつりあい (左向きを正)

$$N(x) - \int_x^{x+\Delta x} q(\xi) d\xi - N(x + \Delta x) = 0.$$

たとえば

$$q(\xi) = \rho A(\xi) \quad (\text{自重, 材料力学 p.62 例題4.3})$$

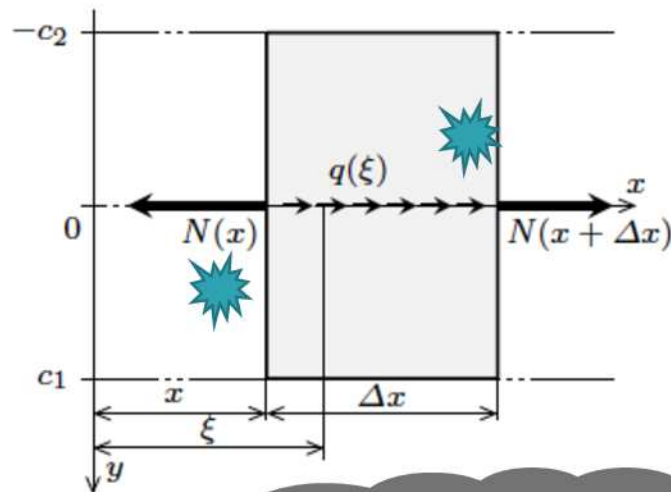
$$q(\xi) = \rho A(\xi) x \omega^2 \quad (\text{遠心力, 材料力学 p.63 例題4.4})$$

Δx で除して整理すると, 積分の平均値の定理より

$$\frac{N(x + \Delta x) - N(x)}{\Delta x} = -\frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} q(\xi) d\xi = -q(x_1)$$

ただし, $x < \exists x_1 < x + \Delta x$ 。 $\Delta x \rightarrow 0$ をとると

$$\frac{dN}{dx} = -q$$



またつまらぬものを
斬ってしまった



棒の引張り・圧縮（軸力と断面内の応力分布）（復習）

軸力 N と垂直応力 σ_x の関係

引張り・圧縮の仮説

変形前：軸線に垂直な断面

変形後：平面を保ち、軸線に垂直



ひずみは断面内の場所に依らず一定

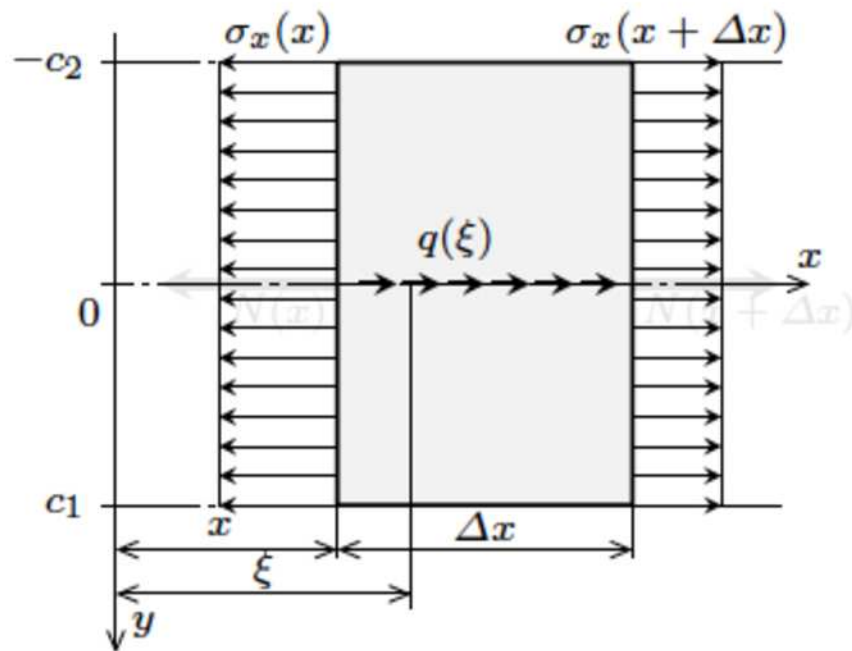
$$\varepsilon_x(x) = \sigma_x / E$$

均質材料（ E が位置に依らず一定）



応力は断面内の場所に依らず一定

$$\sigma_x(x) = \frac{N(x)}{A(x)}$$



サン・ブナンの原理（材料力学 p.78の解説）もあわせて思い出しておこう

はりのせん断力と曲げモーメント (復習, 材料力学 p.23)

せん断力 V と分布横荷重 q の関係

垂直方向の力のつりあい (上向きを正)

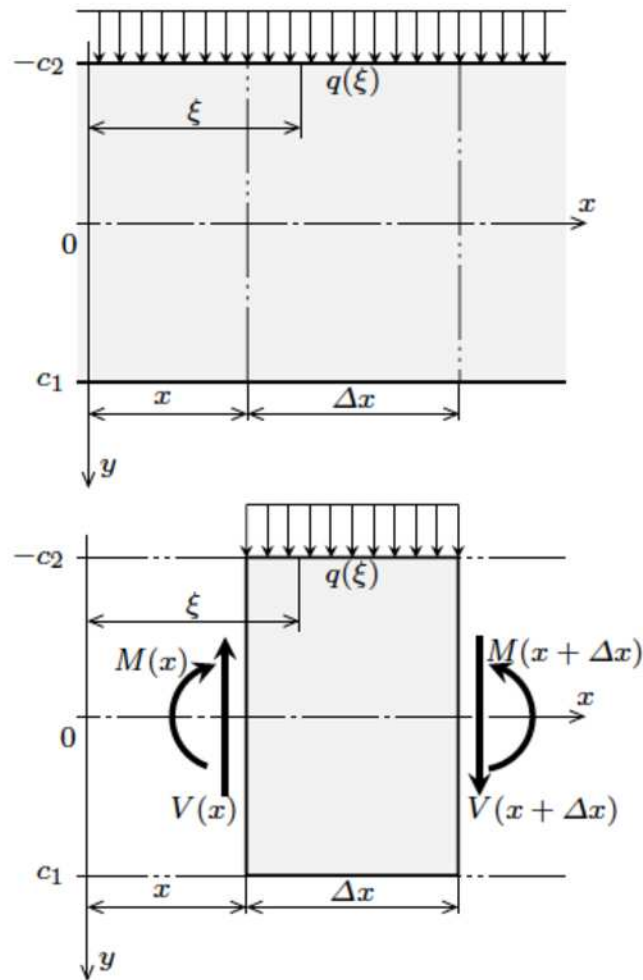
$$V(x) - \int_x^{x+\Delta x} q(\xi) d\xi - V(x + \Delta x) = 0. \quad (*1)$$

Δx で除して整理すると, 積分の平均値の定理より

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = -\frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} q(\xi) d\xi = -q(x_1)$$

ただし, $x < \exists x_1 < x + \Delta x$ 。 $\Delta x \rightarrow 0$ をとると

$$\frac{dV}{dx} = -q \quad (2.20)$$



はりのせん断力と曲げモーメント (復習, 材料力学 p.23)

曲げモーメント M とせん断力 V , 分布横荷重 q の関係

$x = x_2$ に関するモーメントのつりあい (時計回りを正)

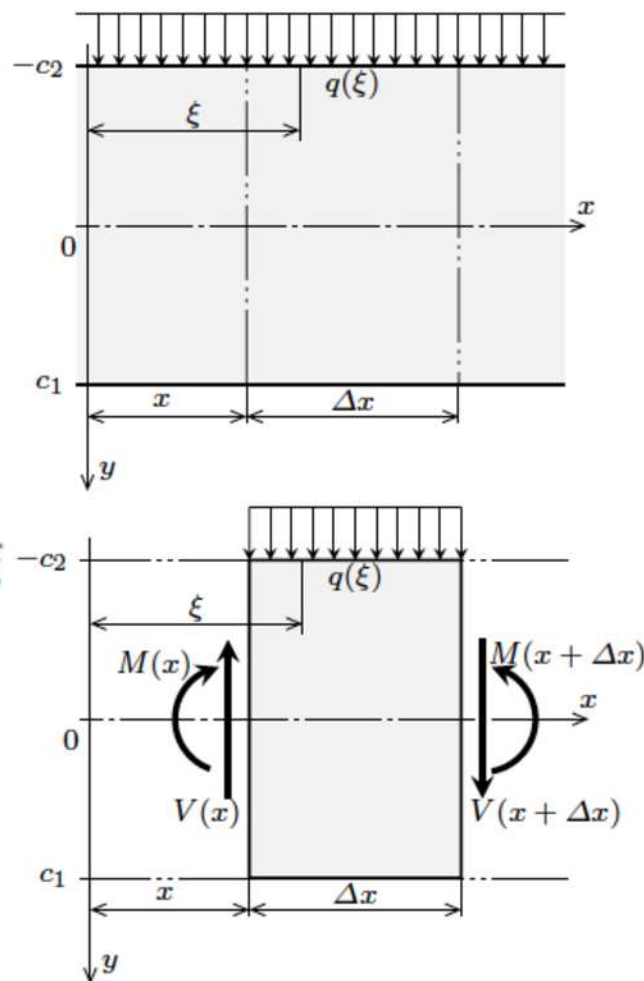
$$M(x) + V(x)(x_2 - x) + \int_x^{x+\Delta x} q(\xi)(\xi - x_2)d\xi - M(x + \Delta x) + V(x + \Delta x)(x + \Delta x - x_2) = 0.$$

式(*1)を用いて $V(x + \Delta x)$ を消去し,
 Δx で除して整理すると, 積分の平均値の定理より

$$\begin{aligned} \frac{M(x + \Delta x) - M(x)}{\Delta x} &= V(x) - \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} q(\xi)(x + \Delta x - \xi)d\xi \\ &= V(x) - q(x_3)(x + \Delta x - x_3) \end{aligned}$$

ただし, $x < \exists x_3 < x + \Delta x$ 。 $\Delta x \rightarrow 0$ をとると

$$\frac{dM}{dx} = V \quad (2.21)$$



たわみの方程式とたわみの基礎式 (再掲, 復習)

幾何の世界

たわみ曲線

$y(x)$

微分

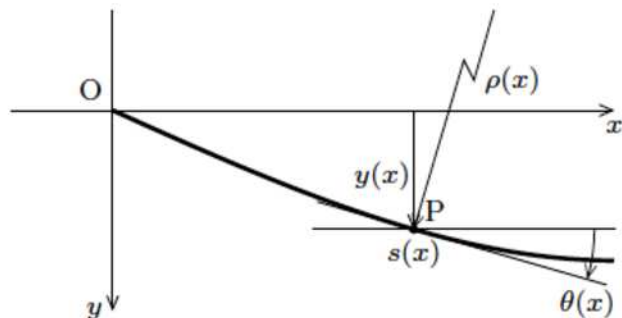
たわみ角

$$\theta = \frac{dy}{dx}$$

微分

曲率

$$\kappa = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{\rho}$$



力の世界

たわみの方程式

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI}$$

EI が一定の場合

$$EI \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{dM}{dx} = -V(x)$$

たわみの基礎式

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -\frac{d^2M}{dx^2} = -\frac{dV}{dx} = q(x)$$

曲げモーメント

$M(x)$

微分

$$\frac{dM}{dx} = V(x) \quad \text{せん断力}$$

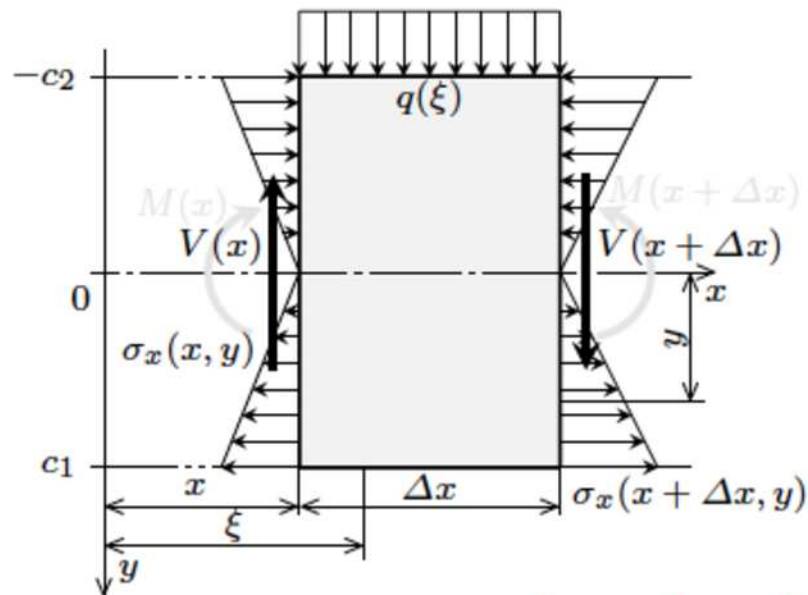
微分

$$\frac{dV}{dx} = -q(x)$$

横荷重 (分布荷重) に
負号をつけたもの

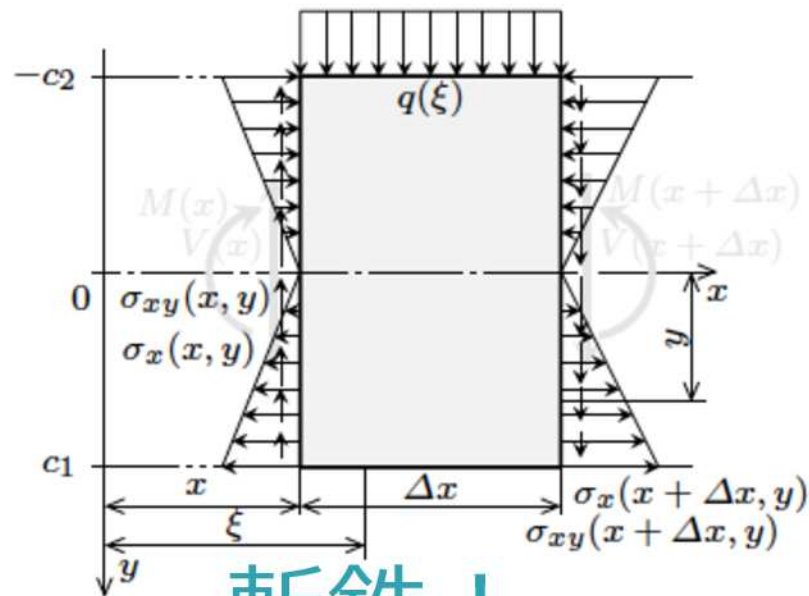
はりのせん断力と曲げモーメントに対応する応力分布

曲げモーメント M と曲げ応力 σ_x



$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= \frac{M(x)y}{I} \\ \sigma_x(x + \Delta x, y) &= \frac{M(x + \Delta x)y}{I} \end{aligned} \quad (7.1)$$

せん断力 V に対応する応力分布は？



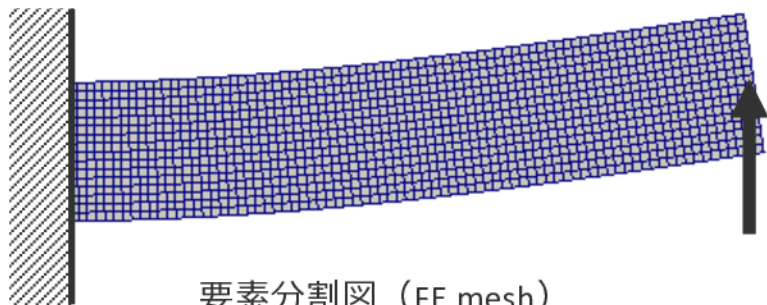
斬鉄！



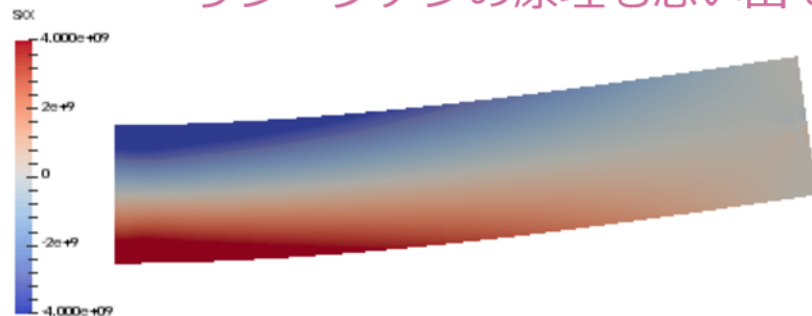
任意の部分領域で内力がつりあっていることを利用して考える！

自由端に集中荷重を受ける片持ちはり 有限要素法による解析 (Finite Element Analysis; FE analysis)

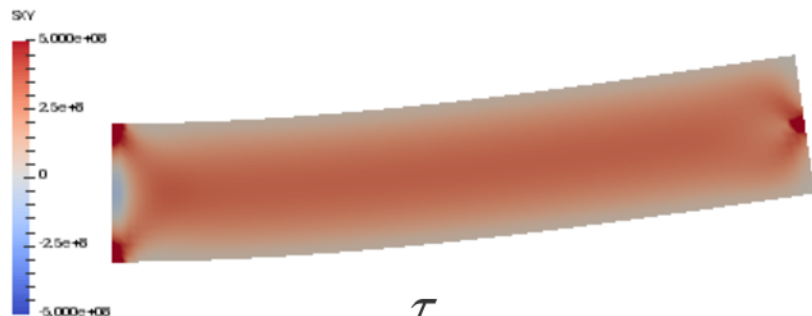
サン・ブナンの原理も思い出そう！



要素分割図 (FE mesh)



σ_x



τ_{xy}

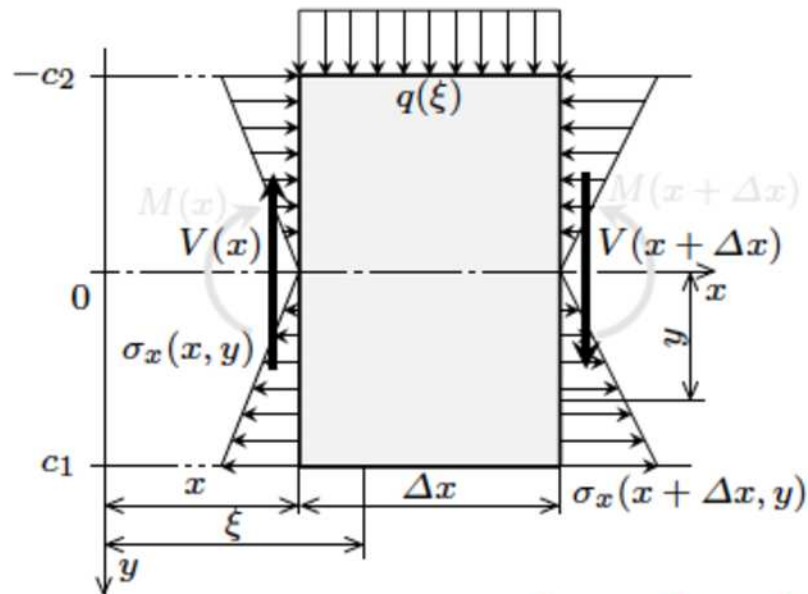


σ_y

せん断応力ははりの内側に隠れている！！

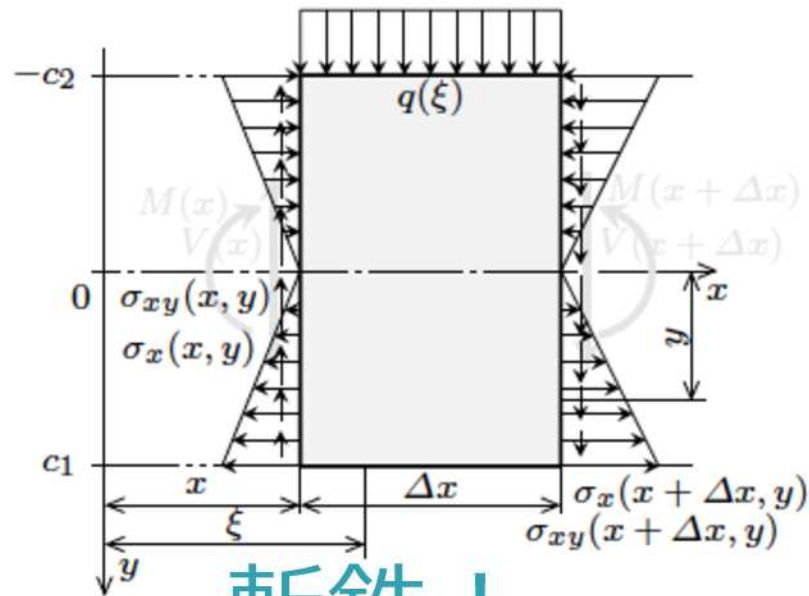
はりのせん断力と曲げモーメントに対応する応力分布

曲げモーメント M と曲げ応力 σ_x



$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= \frac{M(x)y}{I} \\ \sigma_x(x + \Delta x, y) &= \frac{M(x + \Delta x)y}{I} \end{aligned} \quad (7.1)$$

せん断力 V に対応する応力分布は？



斬鉄！

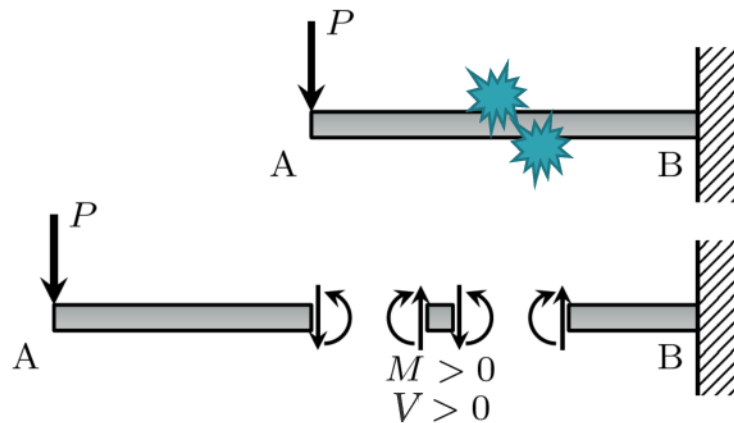


任意の部分領域で内力がつりあっていることを利用して考える！

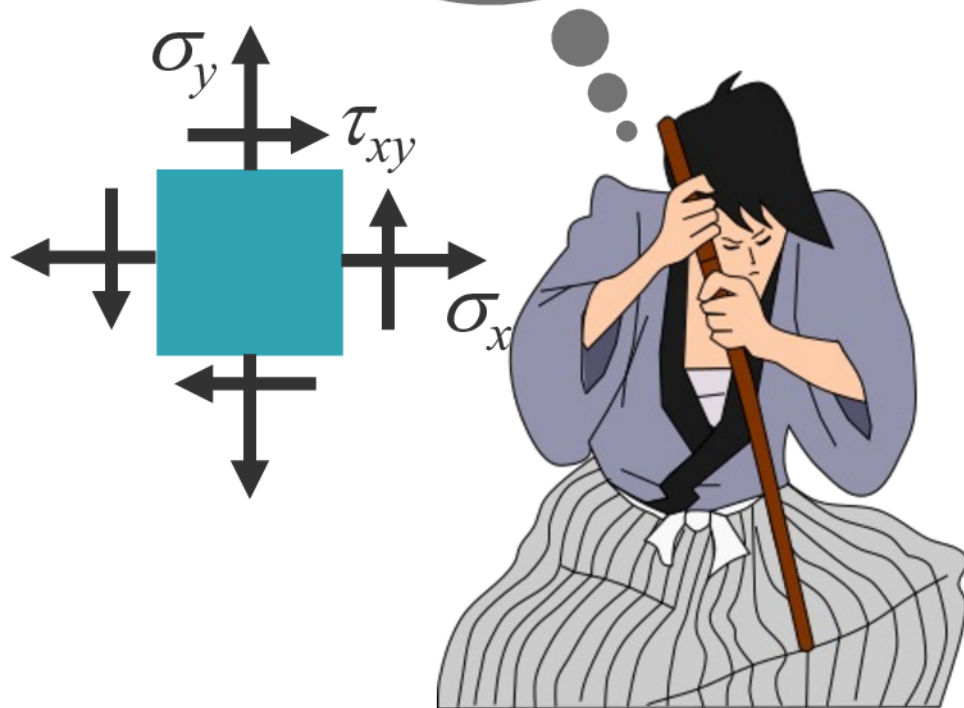
切断法の極意

(method of section)

春学期は x 軸（に垂直な断面）
を主にスライスしていた



ミクロな応力を知るためには
 y 軸、 z 軸（に垂直な断面）にも
斬らねば...



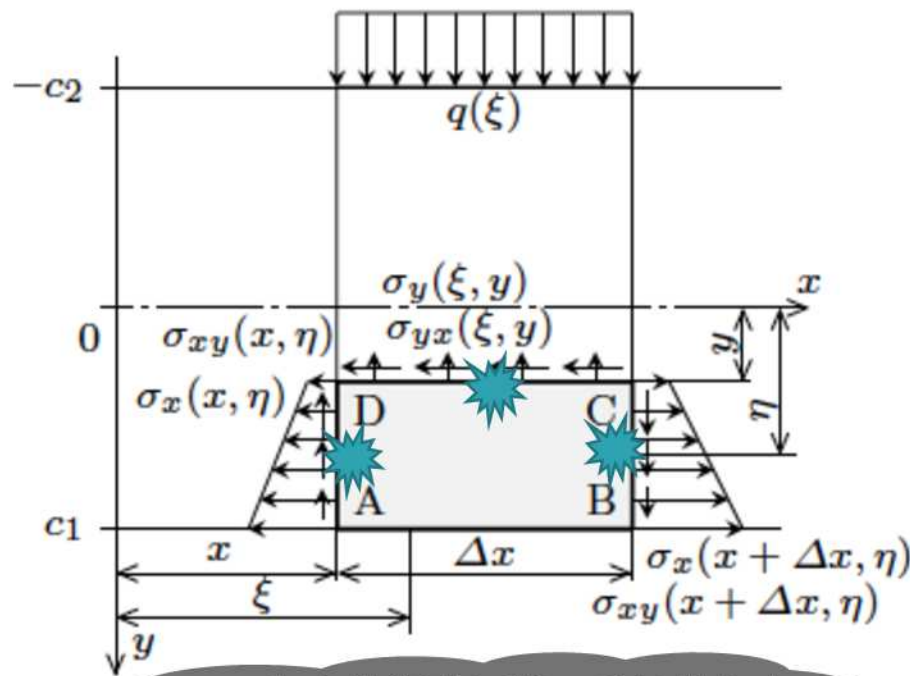
せん断力 $V(x)$ に対応するせん断応力 $\tau(x, y)$ を求めるために 横切り！切断法を適用する！

x 軸方向の力のつりあい（右向きを正）

$$\begin{aligned} & \int_y^{c_1} \sigma_x(x + \Delta x, \eta) b(\eta) d\eta \\ & - \int_x^{x+\Delta x} \sigma_{yx}(\xi, y) b(y) d\xi \\ & - \int_y^{c_1} \sigma_x(x, \eta) b(\eta) d\eta = 0 \end{aligned}$$

ここで、以下のように置く

$$\tau(\xi, y) = \sigma_{yx}(\xi, y)$$



いつもより余計に斬っております
よろこんでっております



せん断力 $V(x)$ に対応するせん断応力 $\tau(x, y)$

曲げ応力 $\sigma_x(x, y)$ を曲げモーメント $M(x)$ によって表現

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} \tau(\xi, y) b(y) d\xi &= \frac{M(x + \Delta x) - M(x)}{I \Delta x} \int_y^{c_1} \eta b(\eta) d\eta \\ \rightarrow \tau(x, y) b(y) &= \frac{dM(x)}{dx} \frac{1}{I} \int_y^{c_1} \eta b(\eta) d\eta \quad (\Delta x \rightarrow 0) \end{aligned} \quad (7.3)$$

曲げモーメントの導関数 $dM(x)/dx$ をせん断力 $V(x)$ に等置

$$\tau(x, y) = \frac{V(x) S(y)}{b(y) I} \quad (7.4) \quad \text{ただし,} \quad S(y) = \int_y^{c_1} \eta b(\eta) d\eta \quad (7.5)$$

力のつりあいチェック（合力を計算）

$$\int_{-c_2}^{c_1} \tau(x, y) b(y) dy = \frac{V(x)}{I} \int_{-c_2}^{c_1} S(y) dy = V(x) \quad (7.6)$$

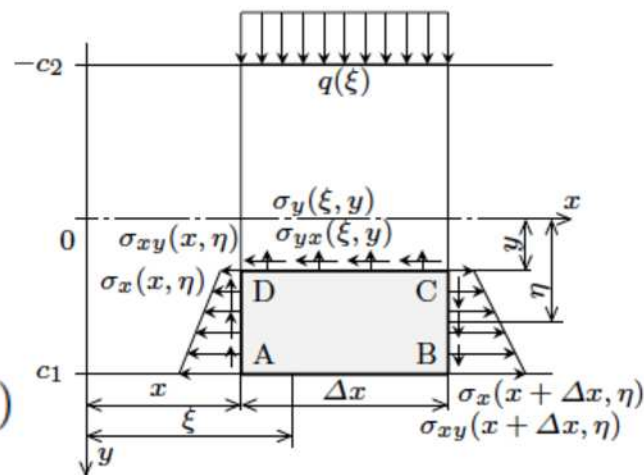
横方向の垂直応力 $\sigma_y(x, y)$

$$\begin{aligned}
 & \int_x^{x+\Delta x} \sigma_y(\xi, y)b(y)d\xi \\
 &= \int_y^{c_1} \sigma_{xy}(x+\Delta x, \eta)b(\eta)d\eta - \int_y^{c_1} \sigma_{xy}(x, \eta)b(\eta)d\eta \\
 &= \int_y^{c_1} \tau(x+\Delta x, \eta)b(\eta)d\eta - \int_y^{c_1} \tau(x, \eta)b(\eta)d\eta \quad (7.7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} \sigma_y(\xi, y)b(y)d\xi &= \int_y^{c_1} \frac{\tau(x+\Delta x, \eta) - \tau(x, \eta)}{\Delta x} b(\eta)d\eta \\
 \rightarrow \sigma_y(x, y)b(y) &= \int_y^{c_1} \frac{\partial \tau(x, \eta)}{\partial x} b(\eta)d\eta, \quad (\Delta x \rightarrow 0) \quad (7.8)
 \end{aligned}$$

はりの上面 $y = -c_2$ では垂直応力 σ_y は分布荷重 $-q$ に等しい。一方、右辺は、 dV/dx となる。

$$\sigma_y(x, -c_2)b(-c_2) = -q(x) = \frac{dV(x)}{dx}$$



$$\frac{dV}{dx} = -q$$

せん断応力分布：長方形断面

幅 b 、高さ h の長方形断面では、 $c_1 = h/2$ であり、

$$b(y) = b, \quad S(y) = \int_y^{h/2} \eta b d\eta = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right), \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad (7.11)$$

であるから、せん断応力分布は、

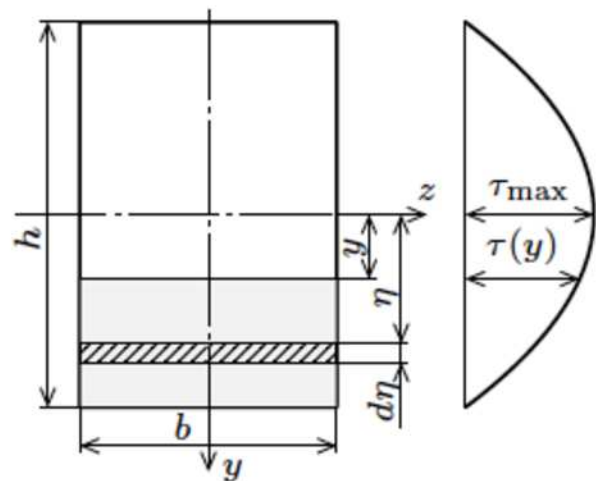
$$\tau(y) = V \cdot \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{12}{bh^3} = \frac{3}{2} \tau_{\text{mean}} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) \quad (7.12)$$

となる (図 7.1)。ただし、せん断力 V を断面積 bh で除して得られる平均せん断応力を

$$\tau_{\text{mean}} = \frac{V}{bh} \quad (7.13)$$

とされている。長方形断面の場合、輪郭は y 軸に平行であり、

$$\tau_{1(y)} = \tau(y) = \frac{3}{2} \tau_{\text{mean}} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) \quad (7.14) \quad \tau_{\text{max}} = \tau_{1\text{max}} = \frac{3}{2} \tau_{\text{mean}} \quad (7.15)$$



せん断応力分布：円形断面

図 7.2 に示すように、半径 r の長方形断面では、 $c_1 = r$ であり、

$$b(y) = 2\sqrt{r^2 - y^2}, \quad I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(2r)^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4} \quad (7.16)$$

$$S(y) = \int_y^r \eta b(\eta) d\eta = \int_y^r 2\sqrt{r^2 - \eta^2} \eta d\eta = \frac{2}{3}(r^2 - y^2)^{3/2} \quad (7.17)$$

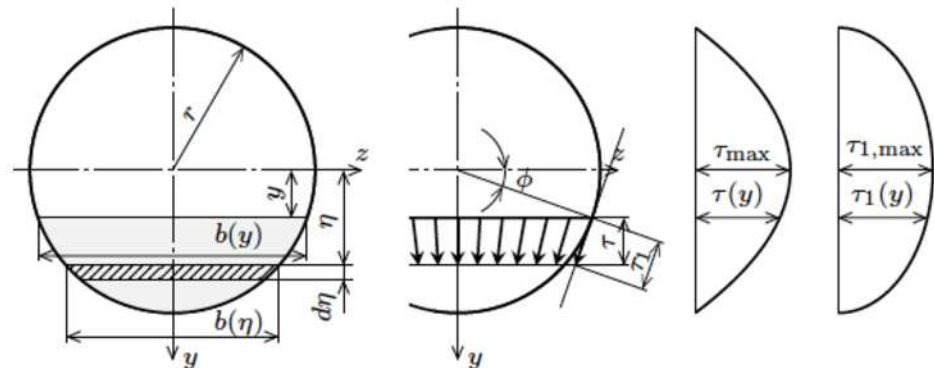
であるから、せん断応力分布は、

$$\begin{aligned} \tau(y) &= V \cdot \frac{2}{3}(r^2 - y^2)^{3/2} \cdot \frac{1}{2\sqrt{r^2 - y^2}} \cdot \frac{4}{\pi r^4} \\ &= \frac{4}{3}\tau_{\text{mean}} \left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (7.18)$$

となる。ただし、せん断力 V を断面積 πr^2 で除して得られる平均せん断応力をとおいている。 $\tau(y)$ は放物線状分布となる。また、円形断面の周辺のせん断応力 $\tau_1(y)$ は、

$$\tau_1(y) = \frac{\tau(y)}{\cos \phi(y)} = \tau \frac{r}{\sqrt{r^2 - y^2}} = \frac{4}{3}\tau_{\text{mean}} \left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right)^{1/2} \quad (7.20)$$

となる。 $\tau_1(y)$ は楕円状分布となる。最大値は τ_{max} , $\tau_{1,\text{max}}$ は



$$\tau_1 = \frac{\tau}{\cos \phi} \quad (7.10)$$

$$\tau_{\text{max}} = \tau_{1,\text{max}} = \frac{4}{3}\tau_{\text{mean}} \quad (7.21)$$

薄肉構造断面はりのせん断応力とせん断中心

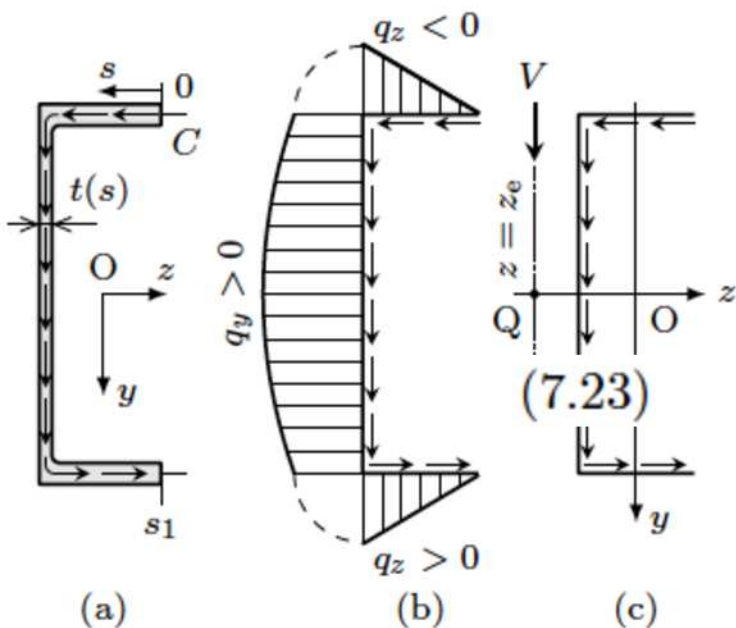


図 7.3 薄肉構造のせん断流とせん断中心

せん断流 (shear flow) $q(s) \equiv \tau(s)t(s)$

$$\tau(s) = \frac{VS(s)}{t(s)I} \quad (7.22)$$

$$S(s) = \int_0^s y(\zeta)t(\zeta)d\zeta \quad (7.24)$$

せん断中心 $Q(y, z_e)$

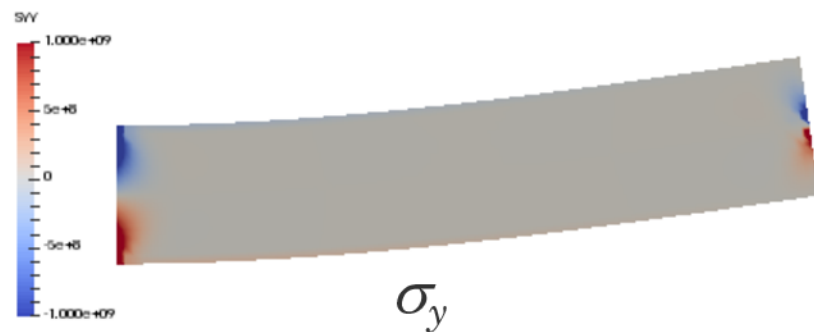
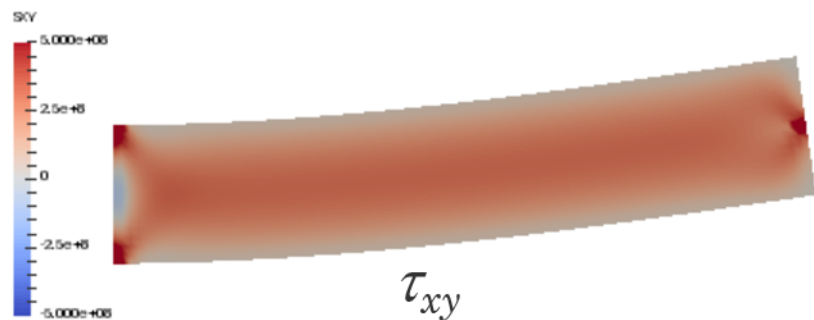
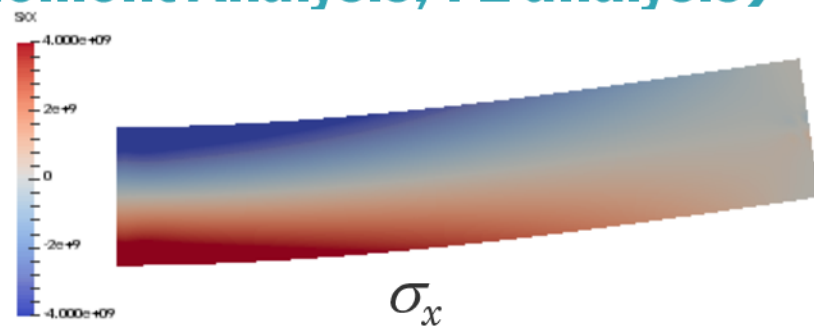
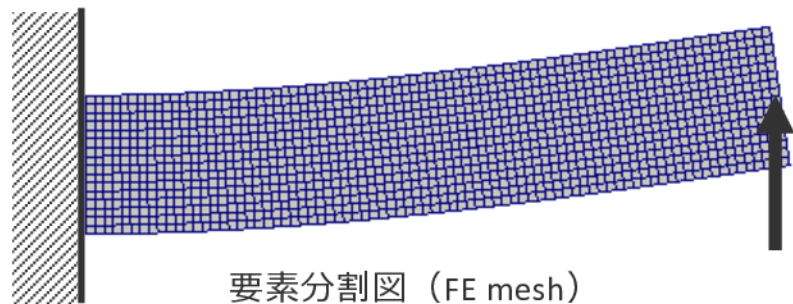
z 方向、 y 方向の力のつりあい

$$\int_0^{s_1} q_z(s)ds = 0 \quad \int_0^{s_1} q_y(s)ds = V$$

x 軸に関するモーメントのつりあいを満たす点

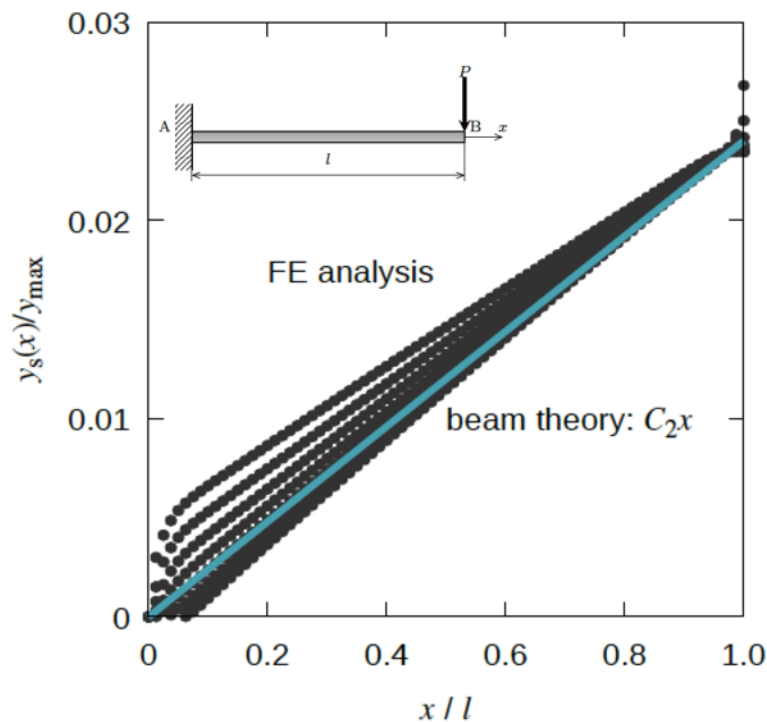
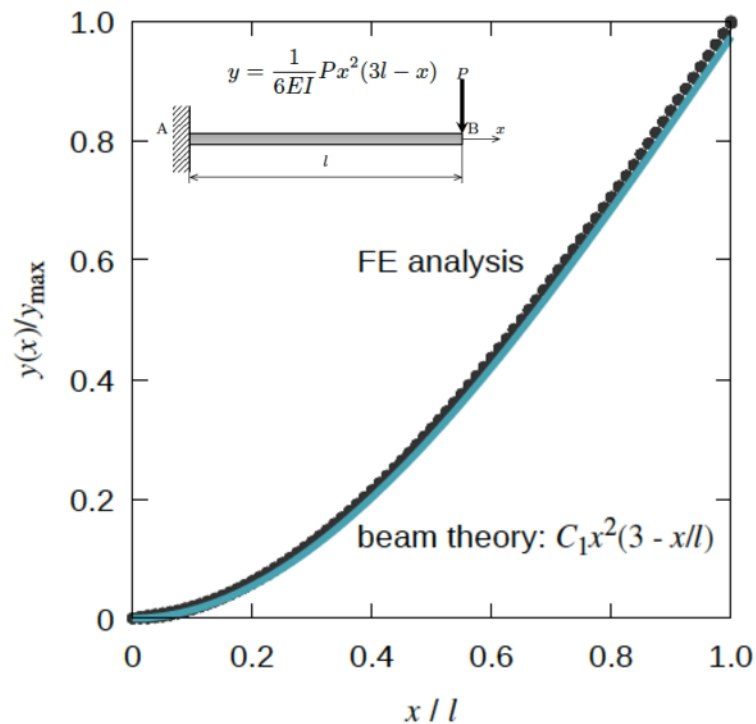
$$z_e = -\frac{1}{V} \int_0^{s_1} [q_z(s)y(s) - q_y(s)z(s)] ds$$

自由端に集中荷重を受ける片持ちはり 有限要素法による解析 (Finite Element Analysis; FE analysis)



はりの内部に分布するせん断応力によって、変形前に軸線に垂直な断面は変形後平面ではなくゆがんで、曲面になっている
軸線のたわみ角がせん断力によって影響を受けている

自由端に集中荷重を受ける片持ちはり 有限要素法による解析 (Finite Element Analysis; FE analysis)



せん断力が働くはりのたわみにはせん断力によるたわみが重ね合わせられている
しかし、その大きさは、通常は曲げモーメントによるたわみに比べて小さい

次回

材料力学2024 シーズン 2

第6話 複雑なはりの問題 前編

2024年6月25日 (火)

Coming Soon . . .