

精密測定01e

線度器，アッベの原理

2022年4月23日

高増計測工学研究所

東京大学 名誉教授 高増潔

<https://www.takamasu-lab.org/>



利用上の注意

- このファイルの内容，表現，図（高増潔が作成したもの：
©takamasu-lab）は自由に使ってください
 - 改変，コピーなどは自由です
 - 特に許可，コピーライトの表示などは不要です
- 引用している図については，引用元の規則に従ってください
 - 講義での資料としては，自由に使えると思います
 - wikipedia関係は，パブリックドメインになっているものは自由に使えます
 - フリー素材は，フリーです
 - それ以外は，引用元の提示が必要になります
- もしも，お気づきの点，間違い，感想などがあれば，以下にメールしてください．対応するかは，状況によります．
 - takamasu@pe.t.u-tokyo.ac.jp



線度器

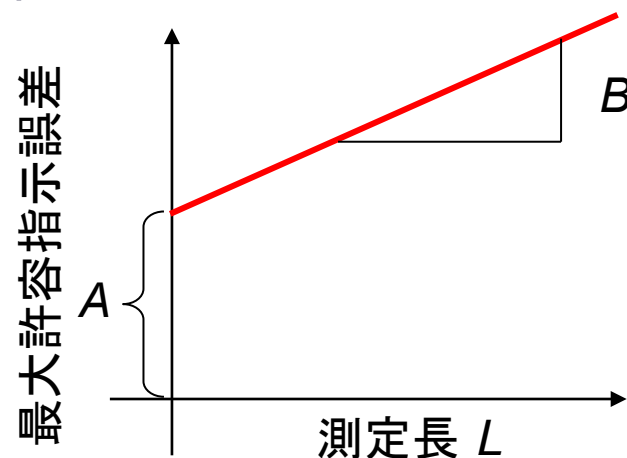
線度器の最大許容指示誤差（MPE）の表現

■ 線度器の最大許容指示誤差

- 指示誤差：長さを測定した場合の誤差→ブロックゲージを測定した場合の、ブロックゲージの寸法（校正されている）との差
- **最大許容指示誤差（MPE: Maximum Permissible Error）**：指示誤差はこれ以下でなくてはならない（絶対値もしくは±で表現）

■ 線度器の最大許容指示誤差の表現

- $A + B \cdot L$ mm：測定長 L （m単位）のとき mm 単位の最大誤差の絶対値
- $A + B \cdot L$ μm ：測定長 L （mm単位）のとき μm 単位の最大誤差の絶対値
- 誤差の考え方
 - A ：偶然誤差およびゼロ点誤差，繰返し誤差など
 - B ：長さに比例する系統誤差，目盛の線形的な誤差，温度の影響など



指示誤差： $A + BL$ （高増潔作成©takamasu-lab）



物差し，標準尺の最大許容指示誤差と例

- 鋼製巻尺：JIS B7512
 - 1級： $0.2 + 0.1 L$ mm
 - 2級： $0.25 + 0.15 L$ mm
- 金属製直尺：JIS B7516
 - 1級： $0.1 + 0.025 L$ mm
 - 2級： $0.1 + 0.05 L$ mm
- 直定規：JIS B7514
 - A級： $2 + 0.004 L$ μ m
 - B級： $4 + 0.02 L$ μ m
- 標準尺：JIS B7541
 - 0級： $1 + 0.001 L$ μ m
 - 1級： $2 + 0.002 L$ μ m
 - 2級： $4 + 0.004 L$ μ m



鋼製巻尺：TJMデザインホームページ：
<https://jpn.tajimatool.co.jp/product/4975364029768>



金属製直尺：シンワ測定ホームページ
<https://www.shinwasokutei.co.jp/products/13005/>



直定規：大菱計器製作所ホームページ
<https://www.obishi.co.jp/catalog/straight-edge/468/>



標準尺：ミットヨホームページ
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/reference-gauges-and-calibration-instruments/reference-gauges/standard-scales-and-working-standard-scales/>



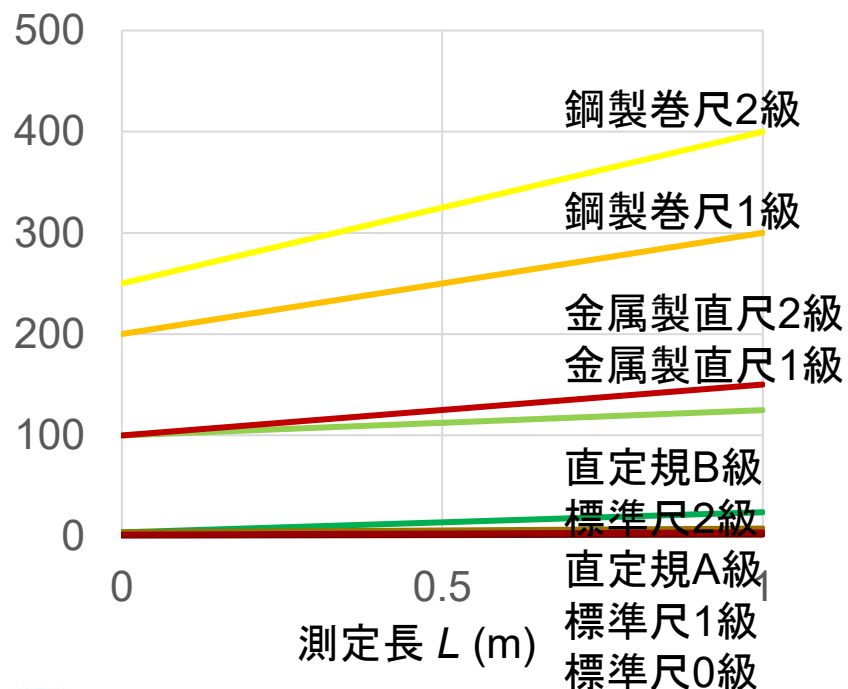
メモ：測定長と最大許容指示誤差の関係

■ JISに基づいたグラフ

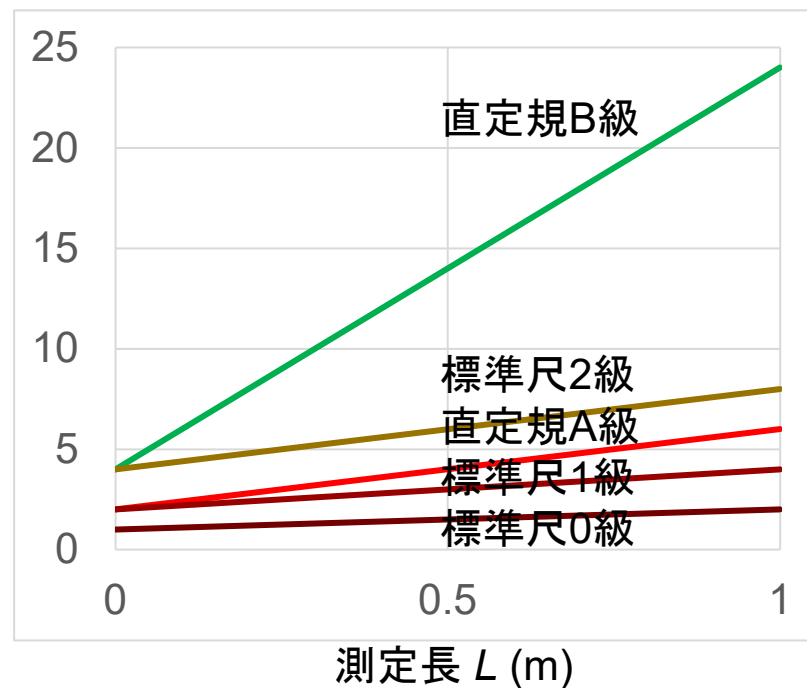
■ 測定長：0 m～1 m

■ 測定長の最大値は，測定器によって異なる

MPE (μm)



MPE (μm)



測定長と指示誤差（JISより高増潔作成©takamasu-lab）

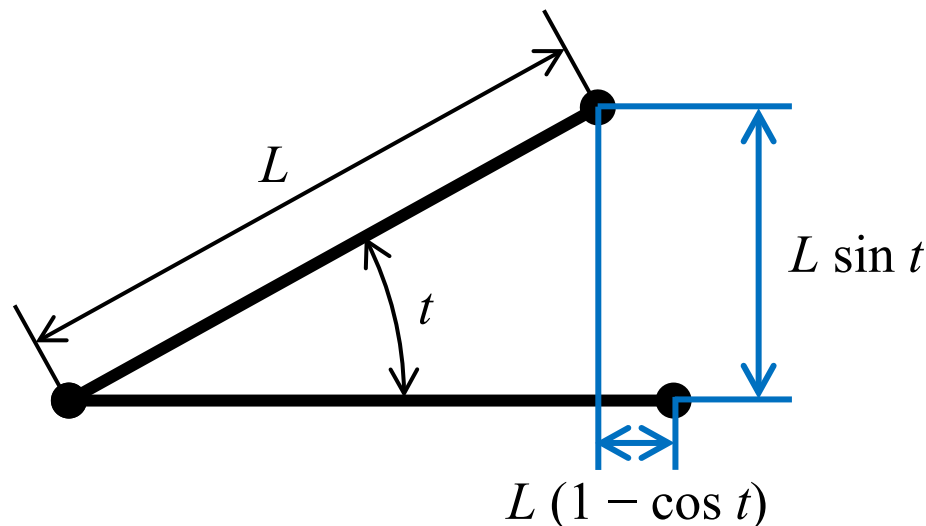


アッベの原理



アッベの原理 (1) (Abbe's Principle)

- 被測定物上の測定すべき長さや度器上の基準長さとは、測定方向において**一直線上に配置しなければならない**
 - 1890年 E. Abbe (ドイツ) が定式化
 - 下図で、 L の長さが角度 t だけずれていた場合、上下方向の誤差は $L \sin t$ 、左右方向は $L (1 - \cos t)$ となるが、 t が小さい場合左右方向の誤差のほうが小さくなる
 - これを測定する長さや物差しとの位置関係で考えると、測定する長さや物差しは一直線上に置くことが有利となる



サイン誤差とコサイン誤差 (高増潔作成©takamasu-lab)

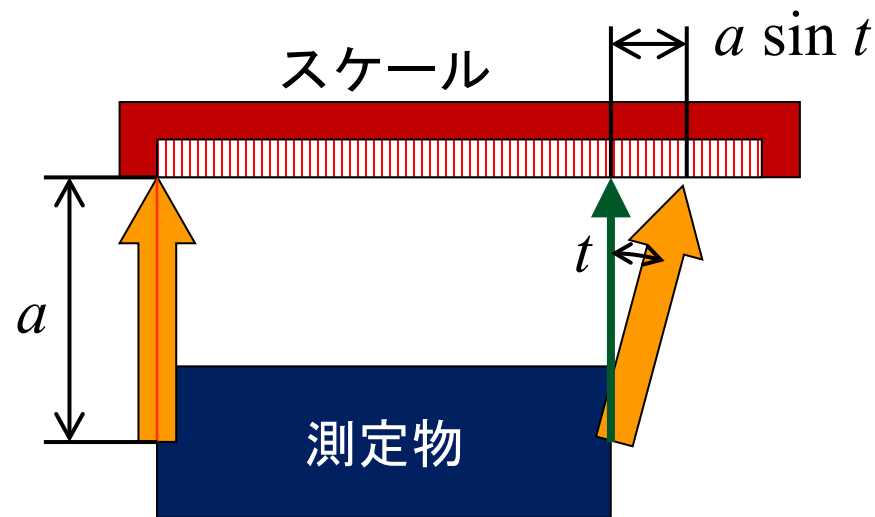


アッベの原理 (2)

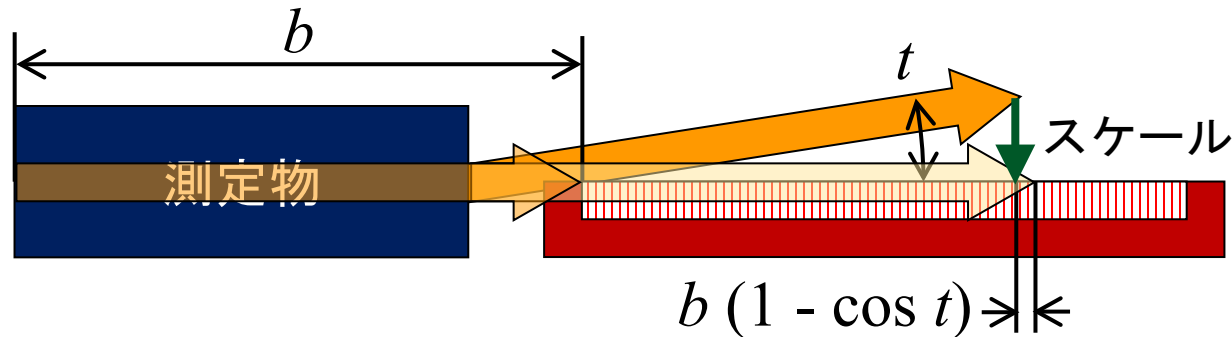
■ スケールと測定物

- 上図：スケールと測定物が平行（案内の長さ a ）でアッベの原理を満たしていない→誤差は $a \sin t$
- 下図：スケールと測定物が一直線上（案内の長さ b ）でアッベの原理を満たしている→誤差は $b (1 - \cos t)$

測定物とスケールを平行に置いた場合



測定物とスケールを一直線上に置いた場合



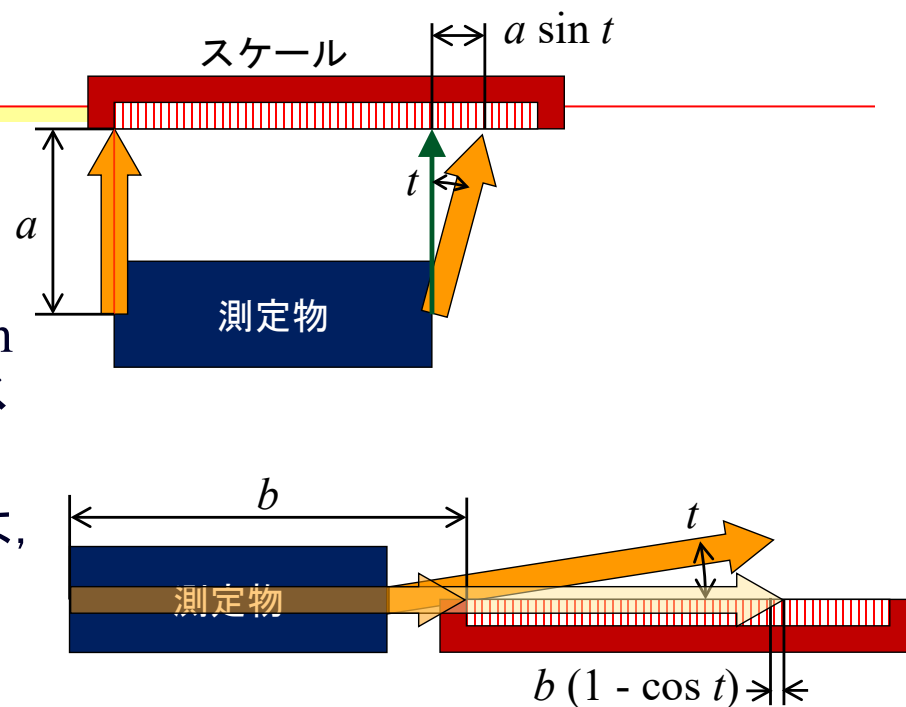
アッベ誤差：測定物とスケール（高増潔作成©takamasu-lab）



アッベの原理 (3) 計算例

■ 計算例

- スケール平行 : $a = 10 \text{ mm}$
- スケール一直線上 : $b = 100 \text{ mm}$
- 角度 t が小さいときは, アッベの配置の誤差はとても小さい
- $t = 0.001 \text{ rad}$ (0.06度) のときは, スケール平行では $10 \mu\text{m}$ の誤差に対して, スケール一直線上では 50 nm の誤差となる



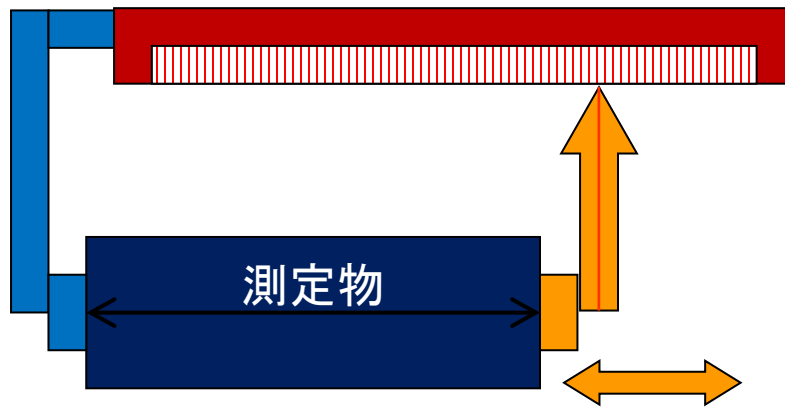
$t \text{ (rad)}$	$t \text{ (度)}$	$a \sin t \text{ (}\mu\text{m)}$	$a t \text{ (}\mu\text{m)}$	$b(1 - \cos t) \text{ (}\mu\text{m)}$	$b t^2/2 \text{ (}\mu\text{m)}$
0.0001	0.006	0.99999	1	0.00050	0.0005
0.001	0.057	9.99999	10	0.04999	0.05
0.01	0.573	99.99833	100	4.99995	5
0.1	5.730	998.33416	1000	499.58347	500
1	57.300	8414.70984	10000	45969.76941	50000

アッベ誤差の計算例 (高増潔作成©takamasu-lab)

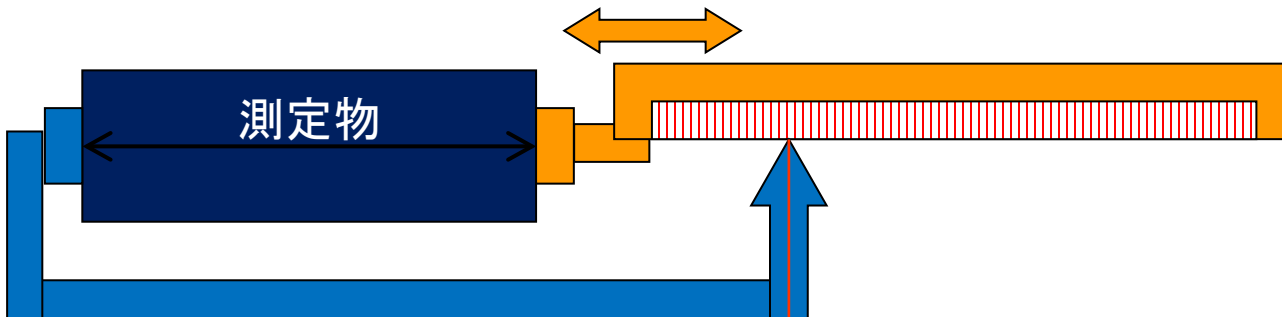


アッベの原理 (4) ノギス, マイクロメータ

- ノギス : アッベの原理を満たしていない
- マイクロメータ : アッベの原理を満たしている



ミットヨホームページ :
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>



マイクロメータ

ミットヨホームページ :
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>



ノギス, マイクロメータ (高増潔作成©takamasu-lab)

メモ：アッベ

■ Ernst Abbe, 1840-1905

- カールツァイス社の創業者の一人，回折限界の式もアッベによる
- 19世紀のドイツ：1日14～16時間労働，40歳で老人のように老けこむ→産業革命の悪い面→アッベは，1日9時間労働，有給休日，年金などを実現
 - 「カールツァイス 創業・分断・統合の歴史」小林孝久，朝日新聞社参照
 - カールツァイス社の歴史も詳しく興味深い
 - アッベの逸話は，他にもたくさんある

■ アッベの原理

- 古くから利用されている原理であるが，今でも重要で多くの高精度測定機器で使われている
- アッベの原理から外れている場合は，何らかの補正や対応が必要となる
 - すごく高剛性で作る→工作機械
 - 位置による補正を行う→三次元測定機
 - エッペンシュタインの原理→調べると興味深い
 - オートコリメータ等で角度測定して補正する



Universitätsbibliothek Heidelberg, CC 表示-継承 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68788569>



メモ：三角関数の近似（テーラー展開）

- 三角関数を近似する（0付近でテーラー展開）
 - 簡単な計算に便利：一次式に近似できる，式が解ける，微分や積分が簡単にできるので理論展開がしやすい
 - 「三角関数の近似-テーラー展開」参照

$$|x| \ll 1$$

$$\sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \dots \approx x$$

$$\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 + \dots \approx 1 - \frac{1}{2}x^2 \approx 1$$

$$\tan x = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 + \dots \approx x$$

三角関数のテーラー展開（高増潔作成©takamasu-lab）

x (rad)	x (度)	$\sin x$	$\cos x$	$\tan x$
0.0001	0.006	0.000100000000	0.999999995000	0.000100000000
0.001	0.057	0.000999999833	0.999999500000	0.001000000333
0.01	0.573	0.009999833334	0.999950000417	0.010000333347
0.1	5.730	0.099833416647	0.995004165278	0.100334672085

近似の成り立つ範囲（高増潔作成©takamasu-lab）



アッベ式測長機の例

■ MICROREP / 横型万能測長機

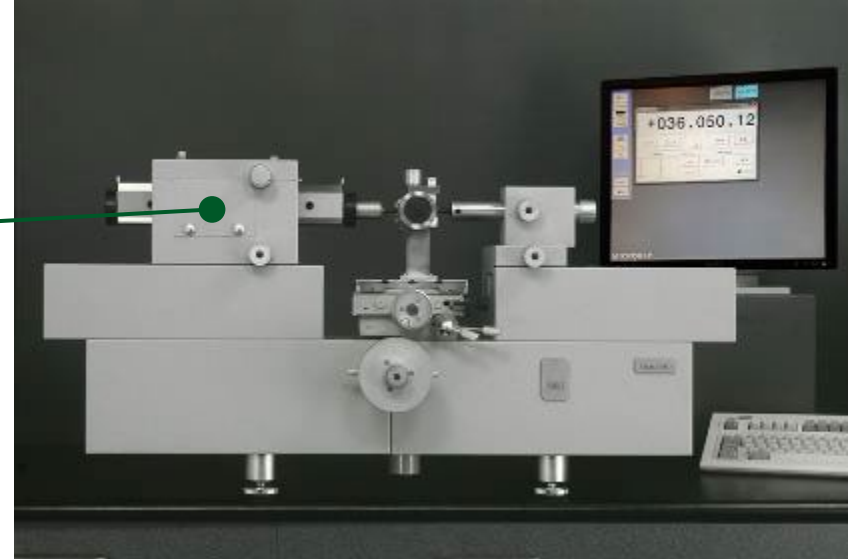
■ アッベ式測長機：万能測長機ともいわれる

- 基本構造はZeissが作っていたULM600などと変わっていない
- アッベの原理に基づいて、スケールが配置されている
- 昔はスケールを人が顕微鏡で読み取っていた→今は光学的，電氣的に読み取る

■ 性能

- 外部測定：0 mm～680 mm，内径測定：1 mm～480 mm
- 測定精度：
 $0.14 \mu\text{m} + L (\text{mm}) / 1200$
- 分解能：0.01 μm

スケール

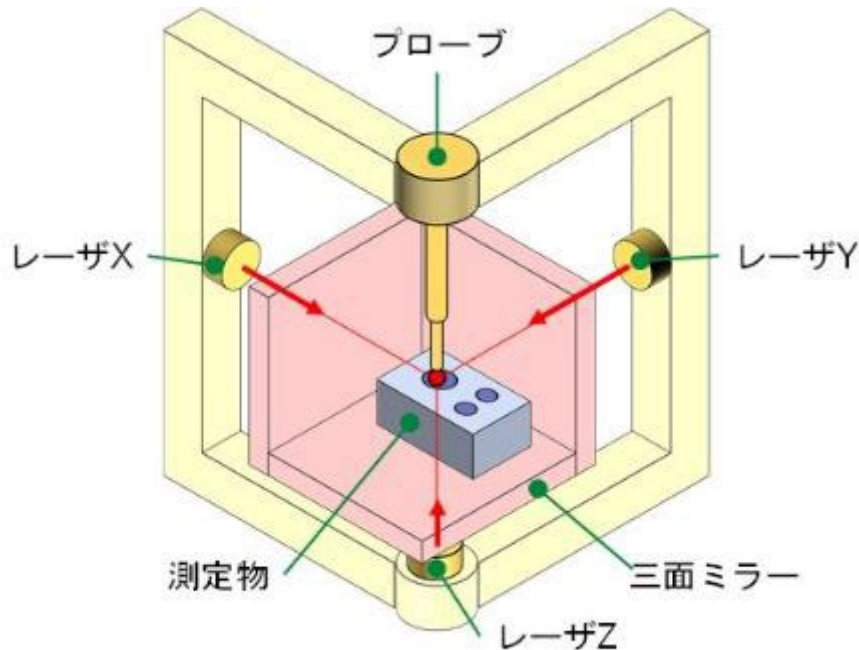


シーケービーホームページ： <https://www.ckb.co.jp/product/817/>



メモ：3Dアッベの原理

- 三次元測定では、アッベの原理を満たすことができない
 - 疑似的にアッベの原理を満たす（3Dアッベ）
 - レーザ測長機と三面鏡を利用
 - レーザ測長機の延長線上に測定位置を設定
 - 三面鏡上に置いた測定物を移動する
 - IBS社のISARAは3Dアッベによる三次元測定機



IBSホームページ： <https://www.ibspe.com/measuring-systems/coordinate-measuring-machine-isara-400-machine-isara-400>

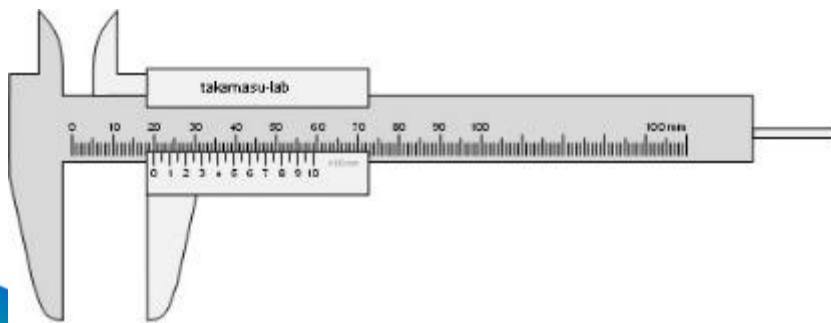
3Dアッベの原理（高増潔作成©takamasu-lab）

ノギス, マイクロメータ, ダイヤルゲージ

ノギス (1)

■ ノギス : JIS B7507

- 低価格で日常的に使う長さ測定器の代表
- ノニウスのドイツ読みがなまって、ノギスとなった。英米では、バーニヤキャリパー（バーニヤ目盛のあるキャリパー）という
- 性能（一番一般的なもの：目量0.05 mm）
 - 測定長：0 mm～100 mm
 - 総合精度（器差）：±0.05 mm（外側測定）
- M形が一般的で4種類の測定が可能（次のページ参照）
 - 外側測定，内側測定
 - 深さ測定（デプスバー），段差測定



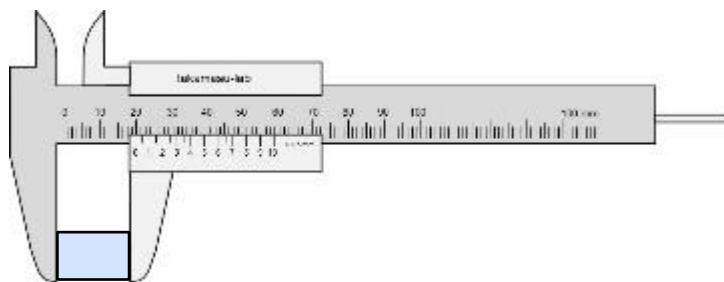
ミットヨのノギスをもとに高増潔作画©takamasu-lab



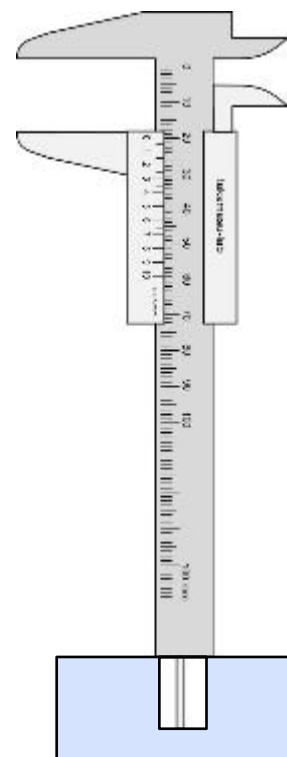
ミットヨホームページ：
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>

ノギス（2）使い方

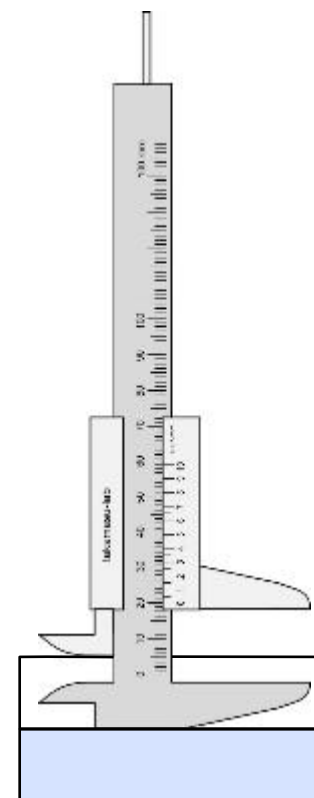
- M形が一般的で4種類の測定が可能



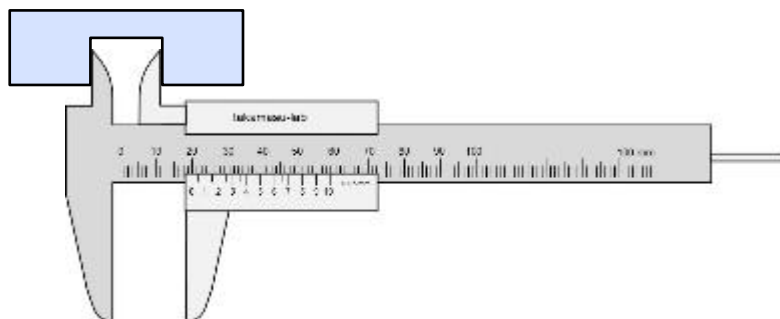
外側測定



深さ測定



段差測定



内側測定

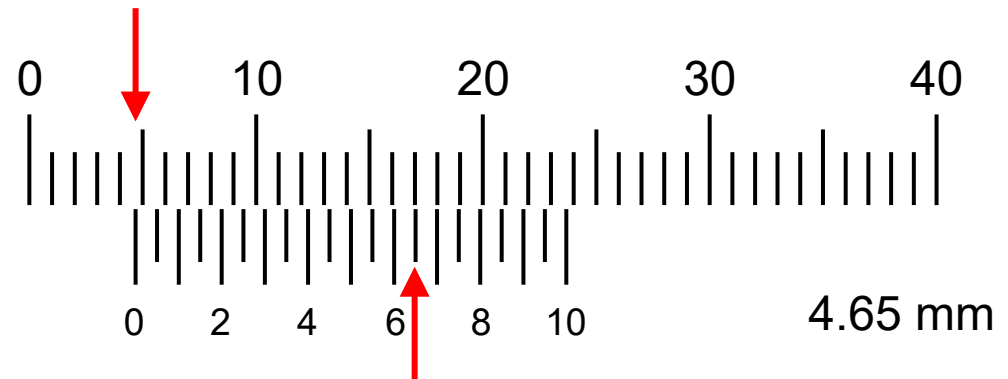


ノギス (3) バーニヤ目盛

■ バーニヤの読み方

- 1542年：ポルトガルのノニウスの発明
1631年：フランスのバーニヤにより定式化
- 本尺：目量が1 mm
- バーニヤ：19 mm を20等分，バーニヤの一致点を見ると，0.05 mm 単位で読み取りが可能
- 人間の目の性質を利用→1 mmを目分量で分割すると ± 0.1 mm近い誤差が出るが，人間は一致の位置や真ん中を見分けるのは得意
- バーニヤの例：4.65 mm

バーニヤ目盛の例：19 mmを20分割：0.05 mm読み

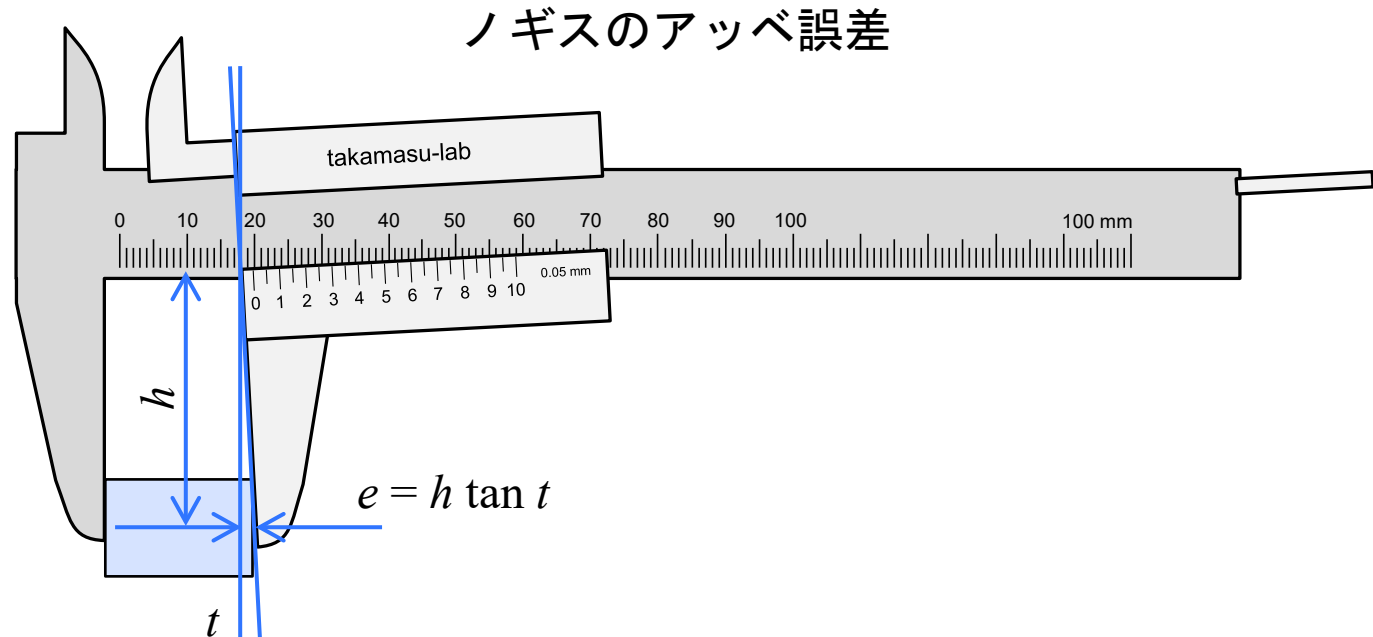


高増潔作成©takamasu-lab

ノギス（4）ノギスの誤差要因

■ ノギスの誤差要因

- アッベの原理に反している：アッベ誤差 $e = h \tan t$
- 基準面の曲がり
- 測定力：測定力が大きいと影響がでる
- 読取り（視差の影響）
- 相対的に精度が低いので、温度の影響は小さい

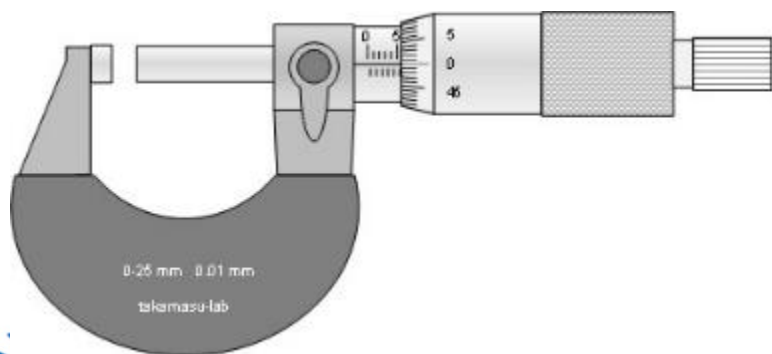


高増潔作成©takamasu-lab



マイクロメータ (1)

- 外側マイクロメータ : JIS B7502
 - ネジのピッチを利用した測定機
 - 手軽に使える高精度の寸法測定器, アッベの原理にあっているの
で, 誤差要因が少ない
 - ネジピッチは0.5 mm, 回転を50分割して0.01 mmで測定, バーニ
ヤを使うと 1 μm まで読める
 - 性能 (一番一般的なもの : 目量0.01 mm)
 - 測定長 : 0 mm~25 mm
 - 総合精度 (器差) : $\pm 2 \mu\text{m}$



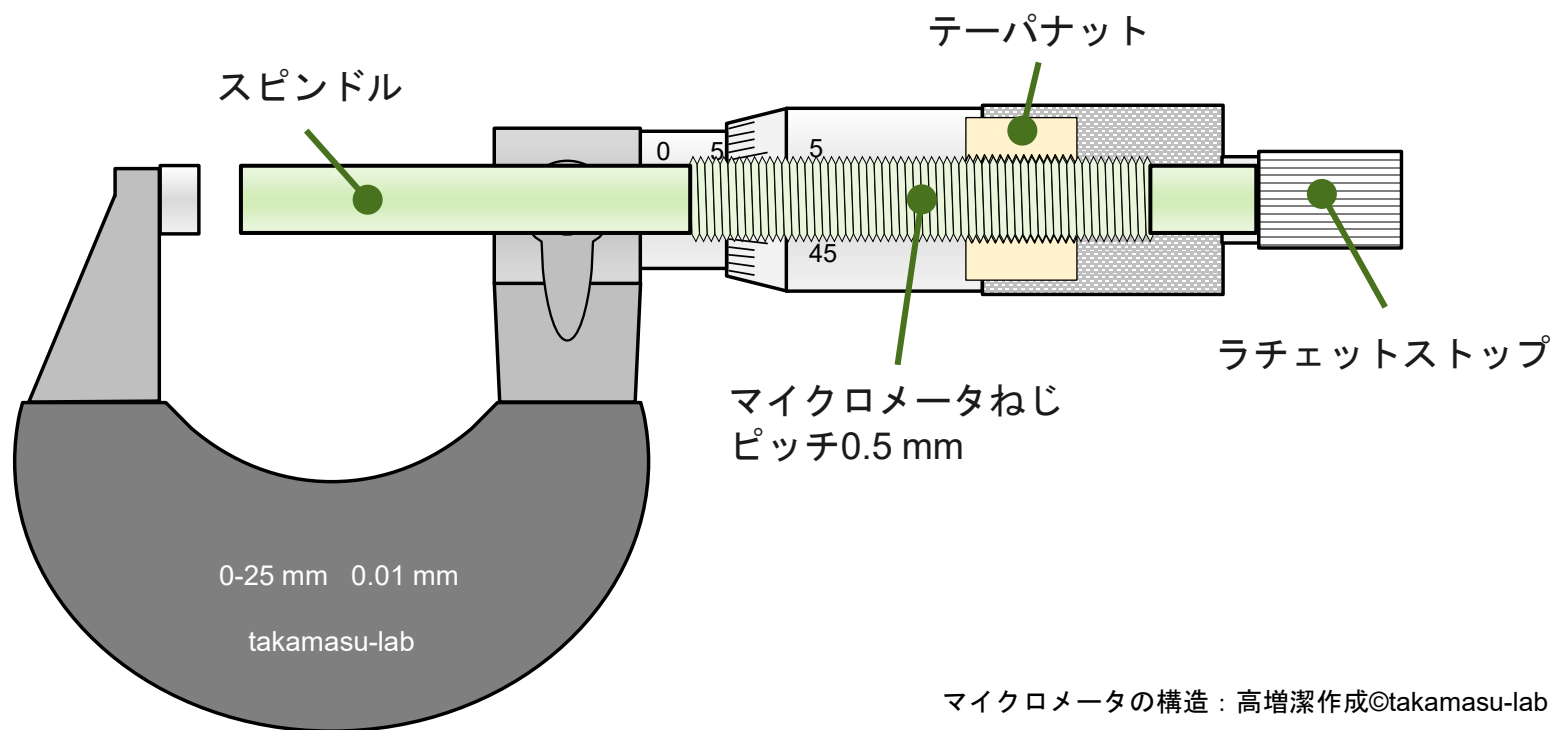
ミットヨのマイクロメータを元に他
高増潔作成©takamasu-lab

ミットヨホームページ :
[https://www.mitutoyo.co.jp/pr
oducts/measuring-tools/](https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/)



マイクロメータ (2) 構造

- ネジがスケールとなっている
 - ネジピッチは0.5 mm, 回転を50分割して0.01 mmで測定, バーニヤを使うと 1 μm まで読める
 - ネジの精度が一番の誤差要因 : ネジを切る工作機械については, 歴史的な高精度化は興味深い



マイクロメータの構造 : 高増潔作成©takamasu-lab



マイクロメータ (3) 種々のマイクロメータ



大径用マイクロメータ

ミットヨホームページ : <https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/micrometers/standard-analog/105-103/>



内側マイクロメータ

ミットヨホームページ : <https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/inside-measurements/micrometers/main/133-143/>



深さ用マイクロメータ

ミットヨホームページ : <https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/depth-gauges/depth-micrometer/main/128-101/>



デジタル表示マイクロメータ

ミットヨホームページ : <https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/micrometers/standard-digital/293-821-30/>



マイクロメータ（4）測定誤差

- マイクロメータの誤差
 - 測定力の影響→ラチェットストップを有効に使う
 - ネジの誤差→ネジ切りの高精度化
 - 読取り（視差の影響）
 - 相対的に精度が低いので，温度の影響はあまり大きくない



ダイヤルゲージ (1)

■ ダイヤルゲージ : JIS B7503

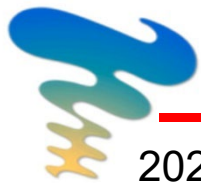
- 歯車を利用した測定機
- 手軽に使える高精度の寸法測定器, アッペの原理にあっているの
で, 誤差要因が少ない
- 測定範囲は狭いが, 高精度→比較測定に有利
- 性能 (一番一般的なもの :
目量0.01 mm)
 - 測定長 : 0 mm~5 mm
 - 指示誤差
 - 1/10回転 : 5 μ m
 - 1回転 : 10 μ m



ミットヨのダイヤルメータをも
とに高増潔作画©takamasu-lab

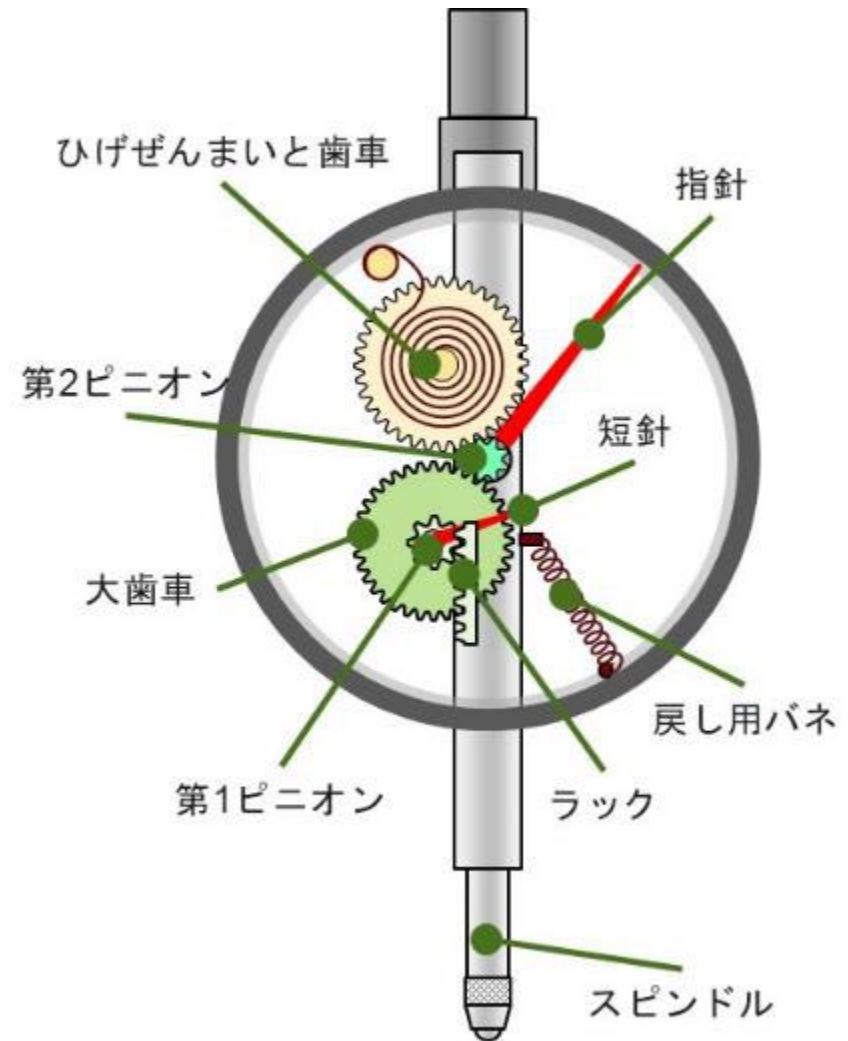


ミットヨホームページ :
[https://www.mitutoyo.co.jp/
products/measuring-tools/](https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/)



ダイヤルゲージ (2) 構造

- ダイヤルゲージの拡大
 - 目量：0.01 mm, 1回転で1 mm, 測定範囲5 mmまたは10 mm
 - スピンドル 1 mm押し込まれた場合→指針は1回転する
 - ラック（ピッチ0.5 mm）2歯
 - 第1ピニオン（20歯）1/10回転→短針が1/10回転する
 - 大歯車（120歯）1/10回転
 - 第2ピニオン（12歯）1回転
 - ひげぜんまい：バックラッシュを防ぐため
 - 戻し用バネ：スピンドルを戻すため

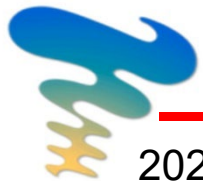


ダイヤルメータの構造：高増潔作画©takamasu-lab



ダイヤルゲージ (3) 誤差

- ダイヤルゲージの誤差
 - 測定力の影響→バネで測定力は一定 (1.4 N以下)
 - 行きと戻りで測定値が変わる：ヒステリシスがある→戻り誤差
 - 読取り (視差の影響)
 - 相対的に精度が低いので、温度の影響はあまり大きくない



種々の寸法測定器（比較測定器）

- 種々の変位を利用した測定機器
 - 電気マイクロメータ（差動トランス）
 - 静電容量センサ
 - 渦電流センサ
 - 空気マイクロメータ
- スケールを利用した測定機器
 - デジタルノギス
 - デジタルスケール



デジタル式ダイヤルゲージ：ミットヨホームページ
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/indicators/digimatic/main/543-300/>



空気マイクロメータ：東京精密ホームページ
<https://www.accretech.jp/product/measuring/e/e/deltair22h.html>



デジタル式マイクロメータ：ミットヨホームページ
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/micrometers/standard-digital/293-100-10/>



寸法測定の誤差と比較測定

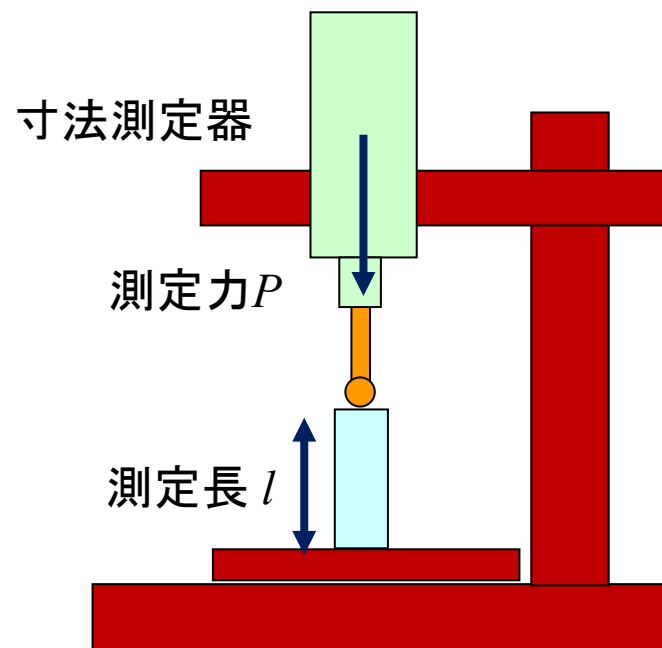
寸法測定器の誤差 (1)

■ 寸法測定

- 寸法測定器による縦型の測定方法
- 寸法測定器としては、ダイヤルゲージ、デジタル測長器など可以使用できる
- 下の基準台で0を合わせて、寸法 l を測定する
- アッベの原理にあっている

■ 寸法測定器の誤差

- スタンドのたわみ
- スタンドの傾き：垂直誤差
- 測定力 P による誤差
 - 圧縮変形（フックの法則）
 - 自重による変形
 - 弾性的接触量（ヘルツの式）
- 目盛を水平に支持するとき目盛が曲げ
- 温度の影響→不確かさのところで検討する



寸法測定器：高増潔作画©takamasu-lab



寸法測定器の誤差 (2)

■ スタンドのたわみ B_s, B_a

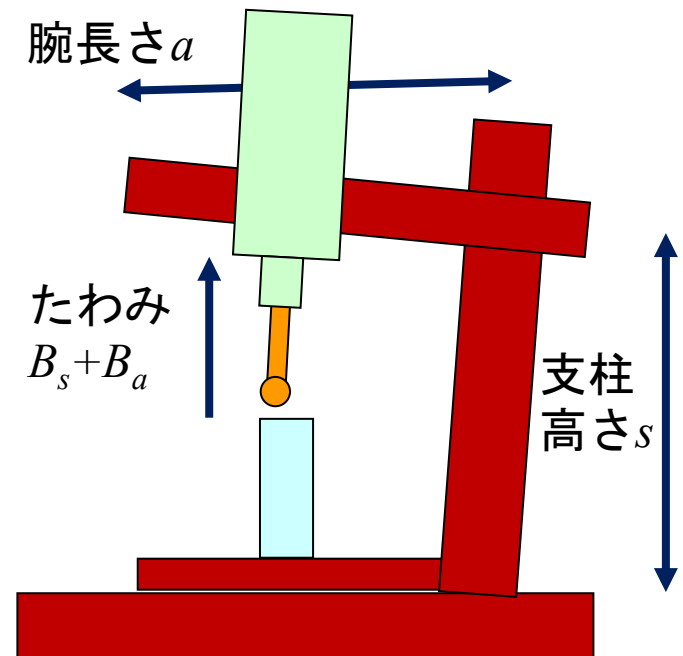
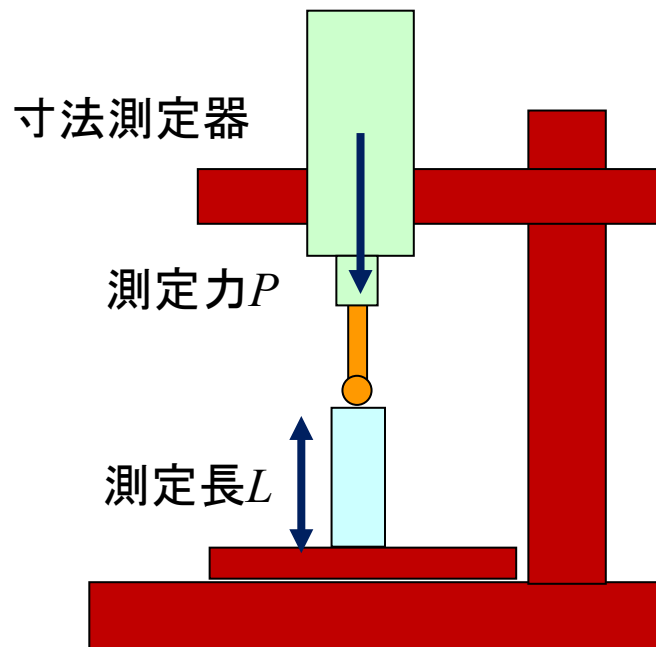
■ 支柱の高さ : s , 断面2次モーメント : I_s

■ 腕の長さ : a , 断面2次モーメント : I_a

■ 測定力 : P , ヤング率 : E , 支柱の変形 : B_s , 腕の変形 : B_a

■ 例 : 鋼 ($E = 200 \text{ GPa}$), 直径 $D = 25 \text{ mm}$ の丸棒 ($I = \pi D^4/64$), $a = s = 200 \text{ mm}$, $B/P = 2.8 \text{ } \mu\text{m/N}$, 0.36 N (36 gf) で $B_a + B_s = 1 \text{ } \mu\text{m}$

$$B_s + B_a = \frac{P \cdot a^2}{E} \left(\frac{s}{I_s} + \frac{a}{3I_a} \right)$$



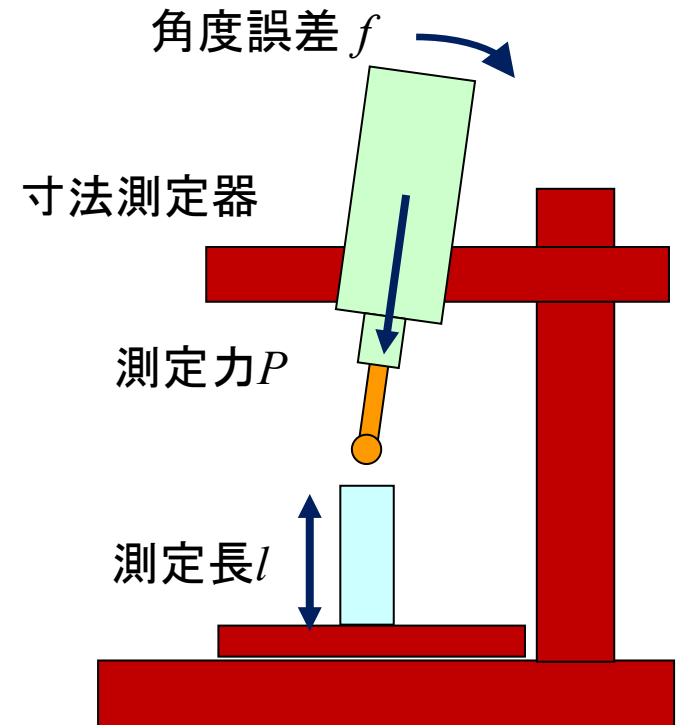
寸法測定器の誤差 : 高増潔作画©takamasu-lab



寸法測定器の誤差 (3)

- スタンドの傾き：垂直誤差 B_1
 - アッベの原理に基づいている→誤差は小さい
 - 角度誤差： f
 - 例： $l = 100 \text{ mm}$, $f = 0.0045 \text{ rad} = 0.25^\circ$, $B_1 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
0.25°はかなり大きいので、実際にはこの誤差はもっと小さい

$$\begin{aligned} B_1 &= l \left(\frac{1}{\cos f} - 1 \right) \\ &\cong l \left(\frac{1}{1 - \frac{f^2}{2}} - 1 \right) \\ &\cong l \left(1 + \frac{f^2}{2} - 1 \right) = \frac{l \cdot f^2}{2} \end{aligned}$$



寸法測定器の誤差：高増潔作画©takamasu-lab



寸法測定器の誤差 (4)

■ 測定力による圧縮変形（フックの法則） B_2

■ 測定物の高さ： l ，断面積： q

■ 例：1 mの鋼製ブロックゲージ

$l = 1 \text{ m}$ ， $q = 315 \text{ mm}^2$ ， $P = 10 \text{ N (1 kgf)}$ ， $E = 200 \text{ GPa}$ ， $B_2 = 0.16 \text{ }\mu\text{m}$

測定力10 Nはかなり大きいのでこの誤差は実際はかなり小さい

$$B_2 = \frac{l \cdot P}{E \cdot q}$$

■ 自重による変形 B_3

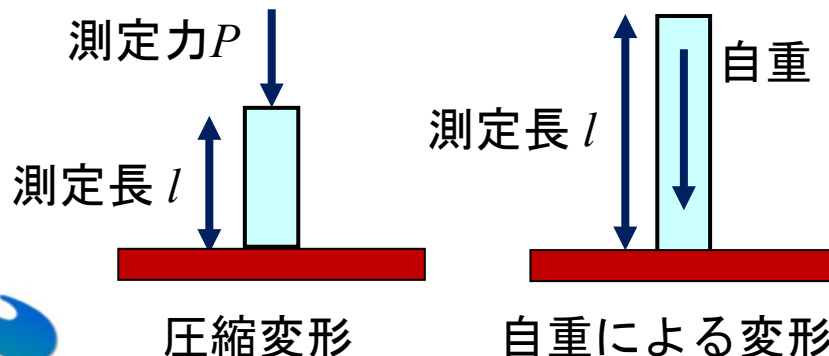
■ 密度： γ ，ヤング率： E ，重力加速度： g

■ 例：1 mの鋼製ブロックゲージ

$l = 1 \text{ m}$ ， $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$ ， $E = 200 \text{ GPa}$ ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ， $B_3 = 0.19 \text{ }\mu\text{m}$

小さいがブロックゲージでは無視できない→エアリー点を参照

$$B_3 = \frac{l^2 \cdot \gamma \cdot g}{2E}$$



寸法測定器の誤差：高増潔作画©takamasu-lab

寸法測定器の誤差 (5)

■ 弾性的接触量（ヘルツの式） B_4

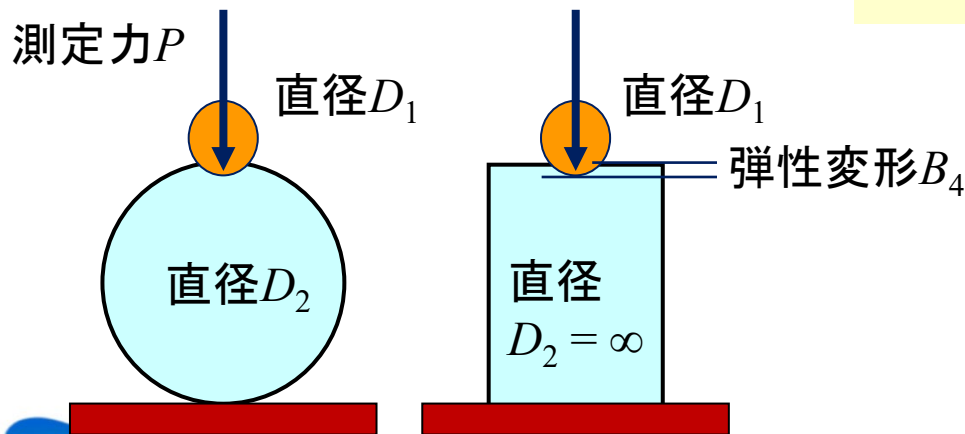
■ 表面の局所的な弾性変形の量

■ 測定力： P ，直径： D_1, D_2 ，ヤング率： E_1, E_2 ，ポアソン比： ν_1, ν_2 ，弾性的接触量： B_4

■ 例：直径1 mmの球と平面（どちらも鋼）

$D_1 = 1 \text{ mm}$ ， $D_2 = \infty$ ， $P = 3.3 \text{ N}$ (330 gf)， $E_1 = E_2 = 200 \text{ GPa}$ ， $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ ， $B_4 = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ，思ったより大きな変形がある

$$B_4 = \sqrt[3]{\frac{9P^2}{8} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^2 \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)}$$



材料が同じ場合

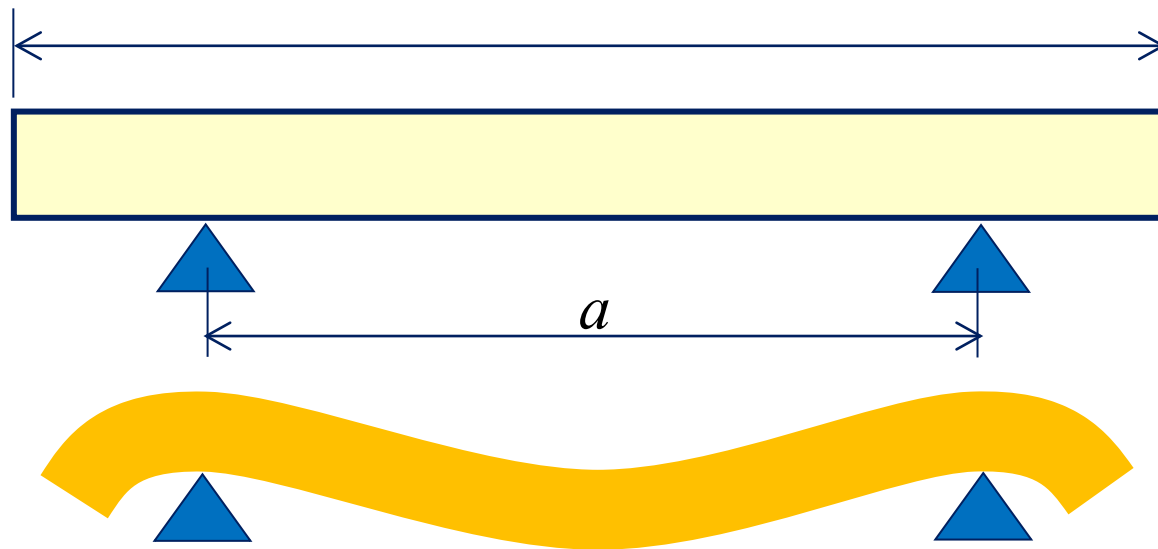
$$B_4 = \sqrt[3]{\frac{9P^2}{2} \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right)^2 \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)}$$

弾性的接触量

寸法測定器の誤差：高増潔作画©takamasu-lab

寸法測定器の誤差 (6)

- 長いブロックゲージをたてて使用すると自重の影響を受ける, 目盛を水平に支持するときに目盛が曲げによる変形をおこす
 - 全長 : l , 支持する点の間隔 : a を適切に設定する必要がある
 - エアリー点 (Airy Points) : $a/l = 0.5774$
 - 上面での全長の変化がない : 目盛が上面にある標準尺
 - 両端が平行となる : ブロックゲージ, 端度器
 - ベッセル点 (Bessel Points) : $a/l = 0.5594$
 - 中立点での目盛の変化が最小となる : 中立点に目盛がある標準尺



寸法測定器の誤差 : 高増潔作画©takamasu-lab



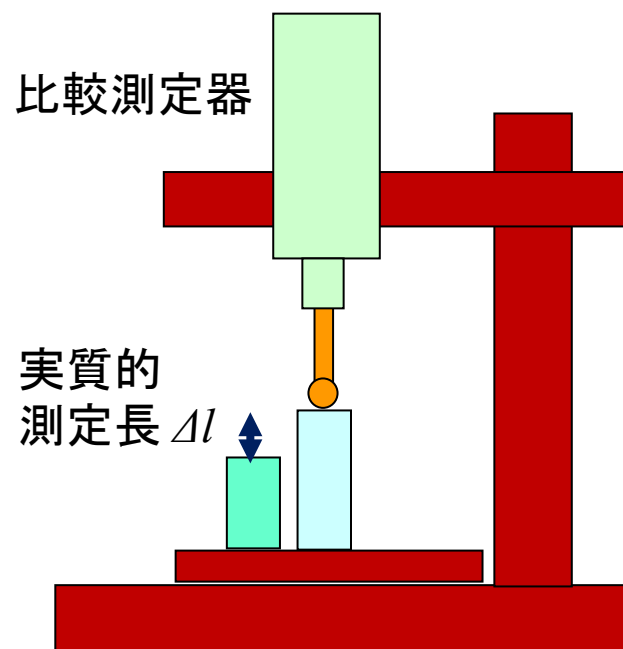
寸法測定器の誤差：まとめ

- 変形または誤差が $1\text{ }\mu\text{m}$ の場合を比較する
 - スタンドのたわみ $B_s + B_a$: 鋼製のスタンド（高さ，長さ200 mm，直径25 mm）では測定力0.36 N
 - スタンドの傾きによる垂直誤差 B_1 : 測定長100 mm，角度誤差0.0045 rad
 - 測定力による圧縮変形（フックの法則） B_2 : 鋼製ブロックゲージ，長さ100 mmでは測定力625 N
 - 自重による変形 B_3 : 鋼製ブロックゲージでは長さ2.3 m
 - 弾性的接触量（ヘルツの式） B_4 : 直径1 mmの球と平面（どちらも鋼）では測定力3.3 N
- 比較について
 - スタンドのたわみが大きい
 - スタンドの傾きや測定力による圧縮変形は小さい，自重による影響はブロックゲージに固有の問題
 - 弾性的接触量は，それなりに大きい



比較測定器の誤差

- ブロックゲージとの比較測定
 - アッペの原理にあっている
 - 実質的な測定長 l を短くできる
 - 比較対象をトレーサブルな基準（ブロックゲージ）にすれば，トレーサビリティを確保できる
 - 比較測定器としては，種々のものを使用できる→測定範囲は狭くてよい
- 比較測定器の誤差
 - 測定長 l を小さくできる， Δl で計算される→とても小さくなる
 - 測定力による影響は，測定力のばらつき ΔP で計算される→1/10以下にできる
 - 条件を仮定して，計算するとよい



比較測定器：高増潔作画©takamasu-lab



メモ：寸法測定器の誤差

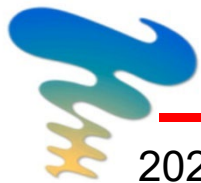
- 過去の資料は、間違いが多くあったので少し検討しなおした
 - 「精密測定，青木保雄，コロナ社」などを参考にしたが，古い資料は単位がSIでなかったり（Nではなくkgfを使用），条件があいまいだったりしているので，理解が難しかった
 - ヘルツの式では，長さをm，ヤング率をPaとすると桁数が多くなり，結果が正しいか分かりにくい
 - 例えば鋼のヤング率は 200×10^9 Paとなり，直径1 mmは 10^{-3} mとなる
 - 鋼として直径はmm，測定力はNとした場合の弾性的接近量 B_4 （単位 μm ）とすると，右の式になる
- 測定力について
 - ダイヤルゲージの測定力は，1 N～2 N（100 gf～200 gf）で小さい
 - てこ式ダイヤルゲージの測定力は，～0.3 Nととても小さい
 - マイクロメータの測定力は，5 N～15 N（JIS B7502）
 - ノギスは実験的には，1 N～5 N
- 比較測定を行う場合の評価をもう少し検討が必要
 - 具体的な例を考えて，比較測定した場合の誤差評価を行う予定

$$B_4 = 0.453 \sqrt[3]{\frac{P^2}{d}}$$

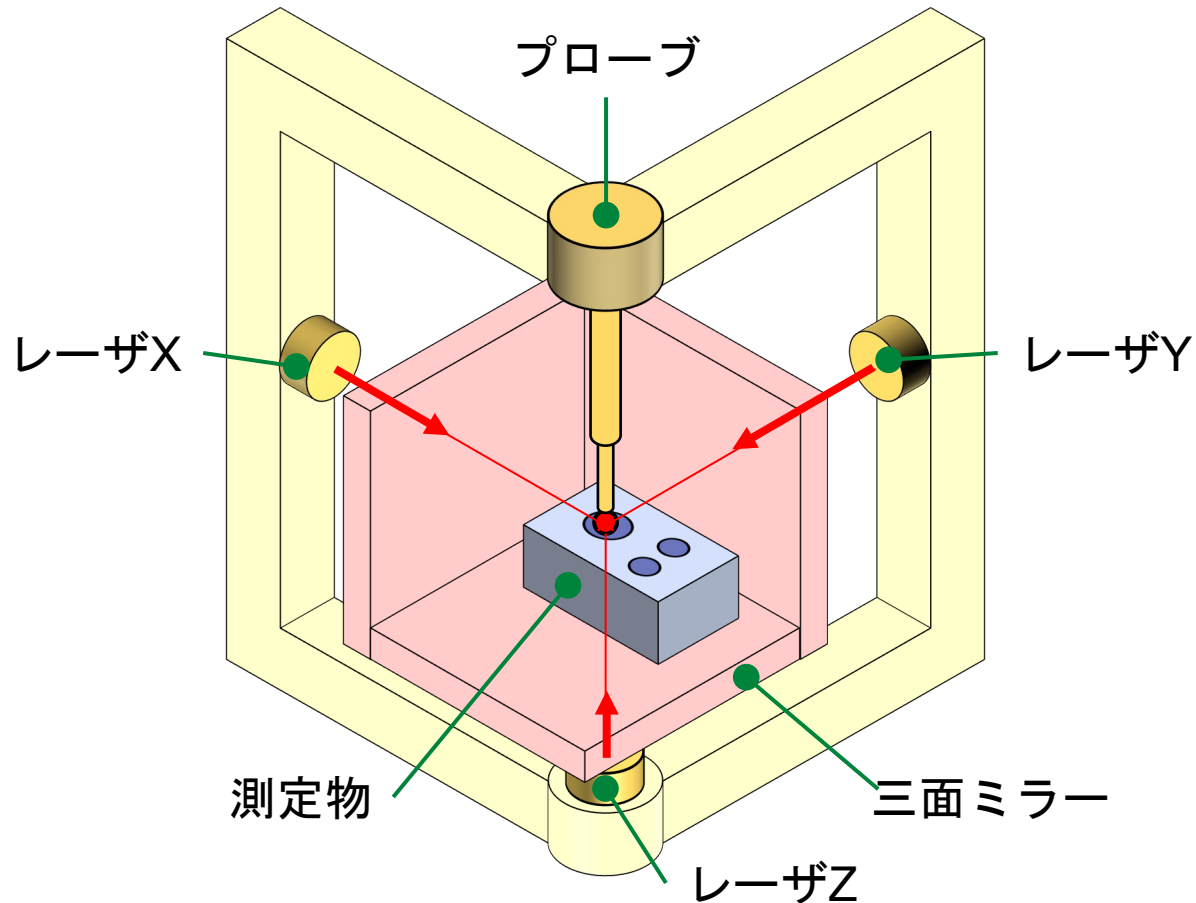


まとめ

- 物差し，標準尺
 - 線度器の指示誤差は $A + B \cdot L$ で表現される
- アッベの原理
 - アッベの原理を守ることによって，高精度な測定が可能となる
- ノギス，マイクロメータ，ダイヤルゲージ
 - 一般的に使用されるスモールツール（小型の寸法測定器）の代表
 - ノギスはアッベの原理にあっていないが，簡易的に種々の測定が可能
 - マイクロメータはネジを基準にし，広範囲で高精度となる
 - ダイヤルゲージは狭い測定範囲を高分解能で測定する
- 寸法測定の誤差と比較測定
 - 寸法測定の誤差は測定力の影響を受ける
 - 温度については，別途測定の不確かさのところで検討する
 - ブロックゲージと比較測定にすると誤差が減り，トレーサビリティを確保しやすい



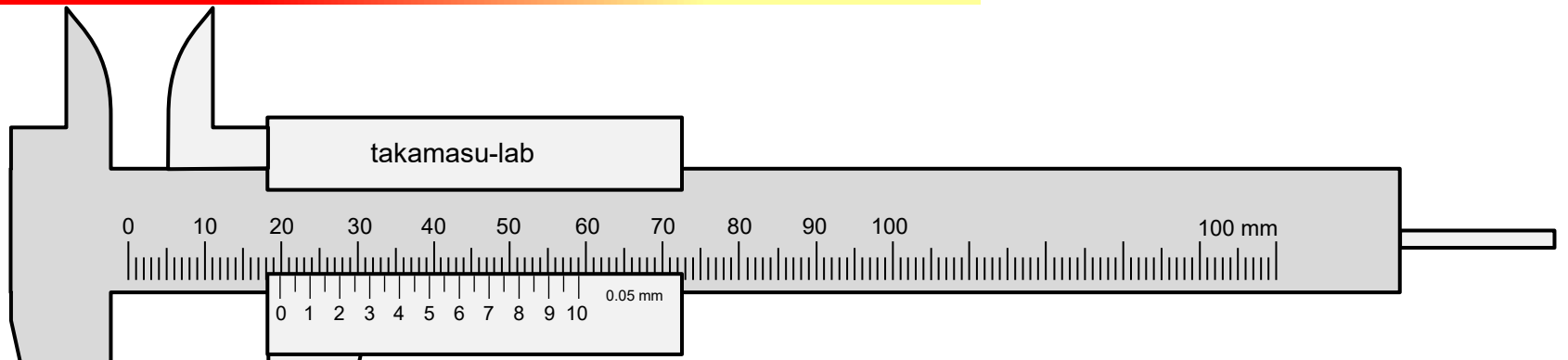
メモ作画：3Dアッベの原理



3Dアッベの原理（高増潔作成©takamasu-lab）



メモ作画：ノギス



ミットヨのノギスをもとに高増潔作画©takamasu-lab



ミットヨホームページ：
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>

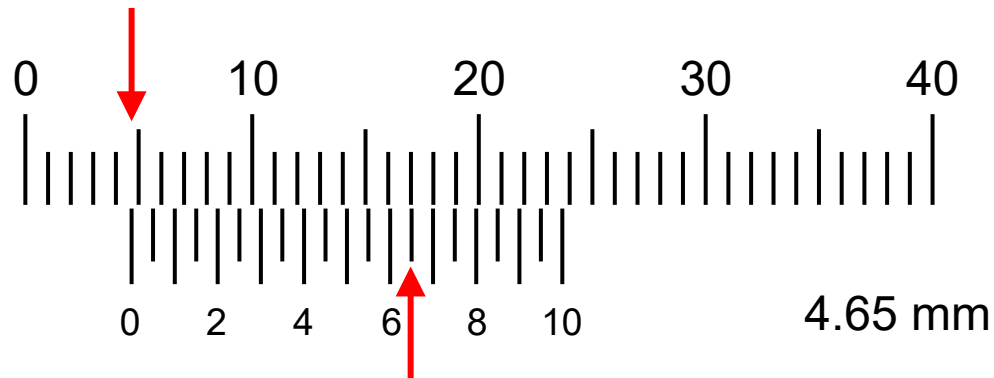


メモ作画：目盛，バーニヤ



高増潔作成©takamasu-lab

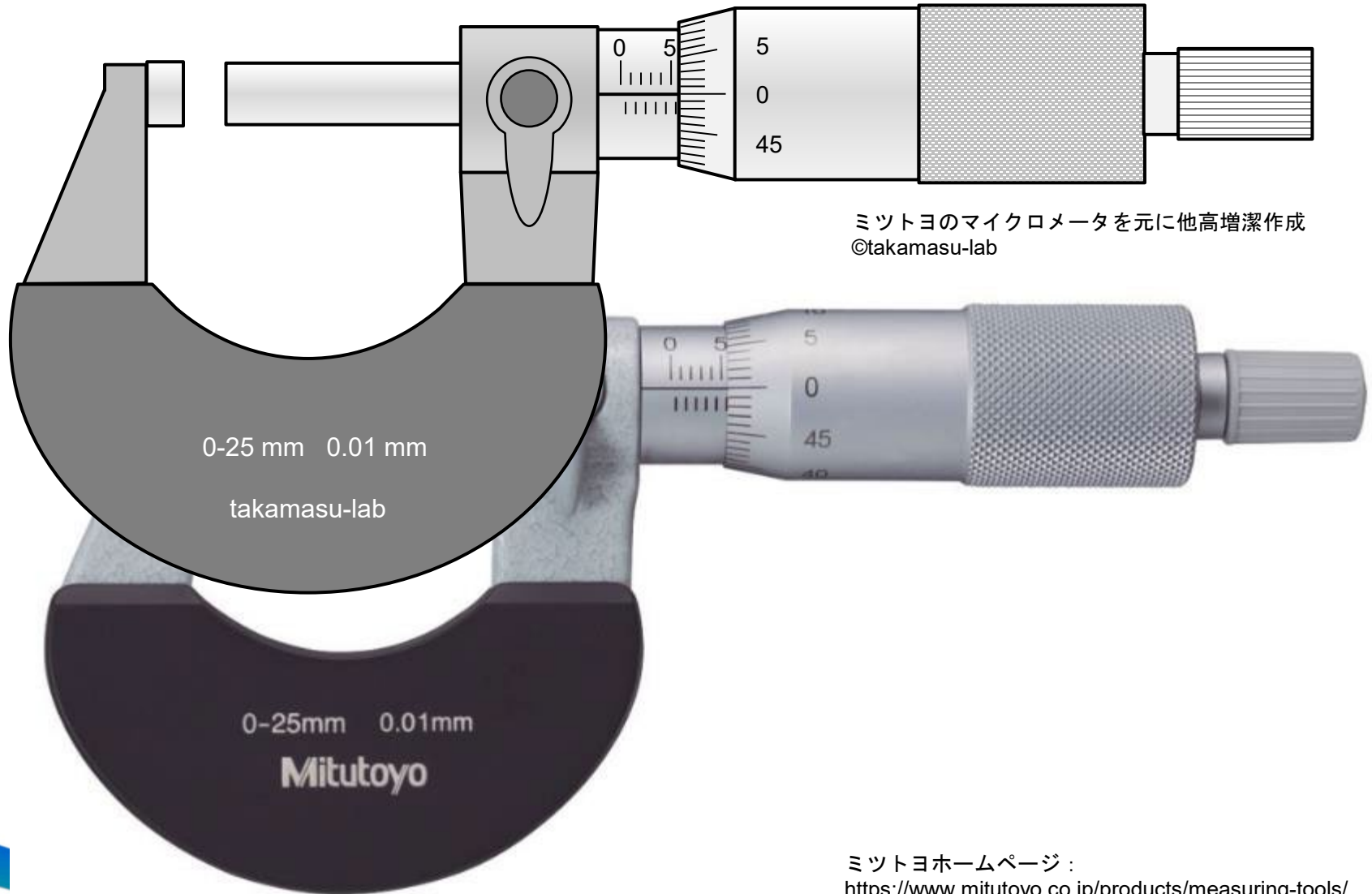
19 mmを20分割：0.05 mm読み



高増潔作成©takamasu-lab

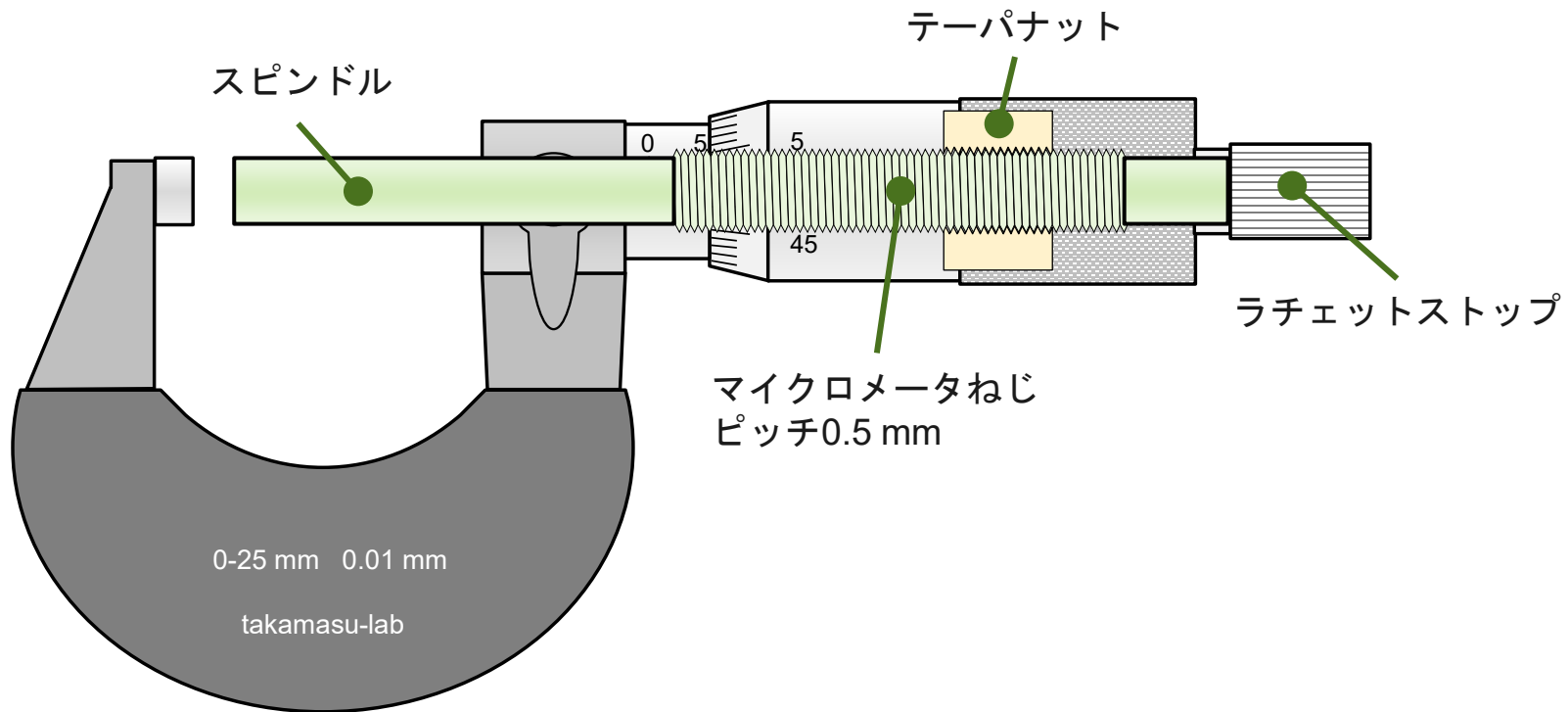


メモ作画：マイクロメータ



ミットヨホームページ：
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>

マイクロメータの構造



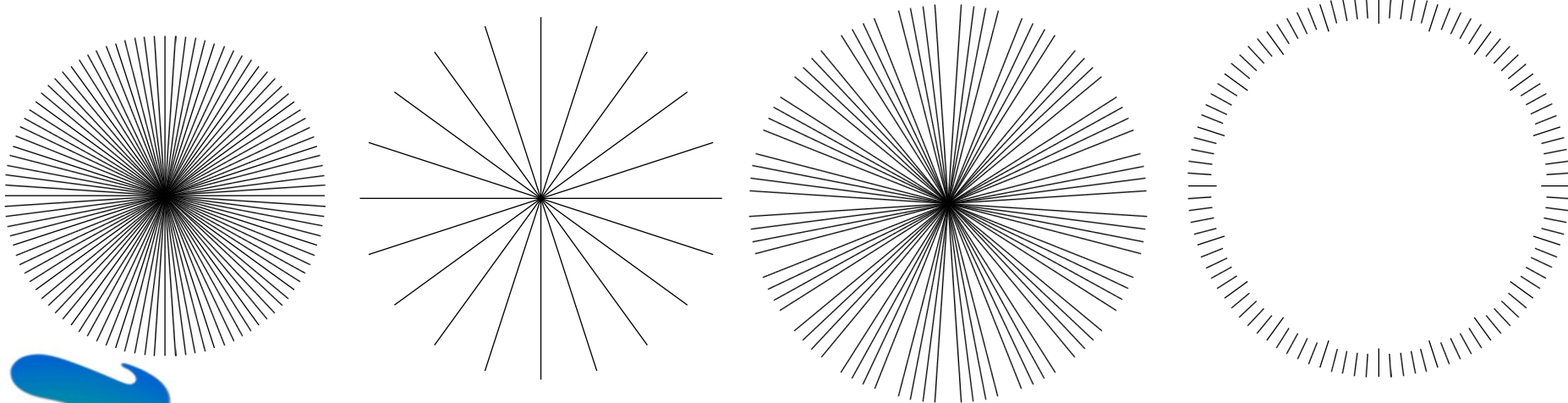
マイクロメータの構造：高増潔作成©takamasu-lab



メモ作図：円目盛

■ 円目盛の作画

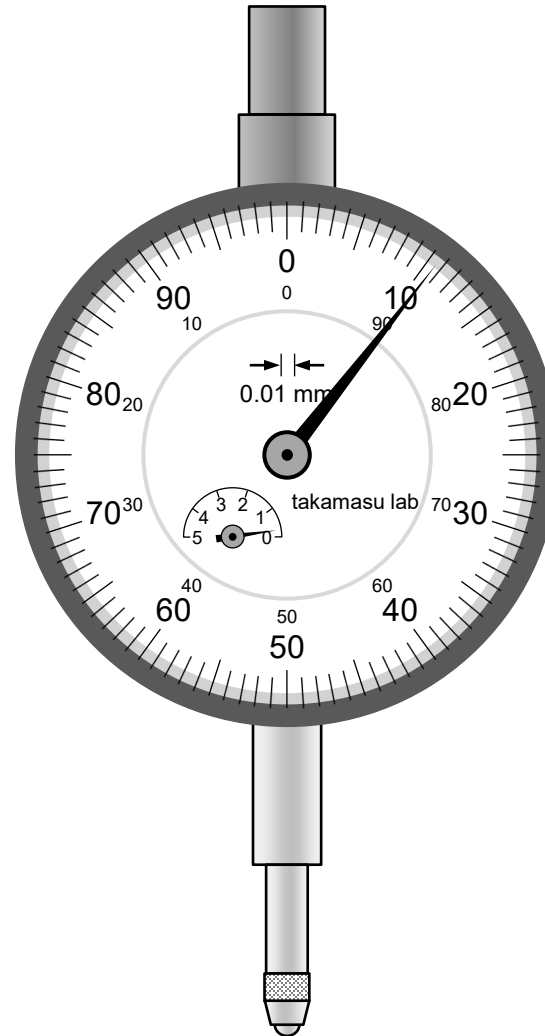
- 結構作画が難しい
- 線を回転させて、全てを左右中央，上下中央で揃える
- 線の回転は1度単位だが，3-D回転のZ方向に回転を利用すると0.1度単位で指定できる
- 目盛を100個：3.6度間隔，長い目盛20個：18度間隔
- その後，中に円を書いて真ん中を隠す



高増潔作成©takamasu-lab



メモ作画：ダイヤルゲージ



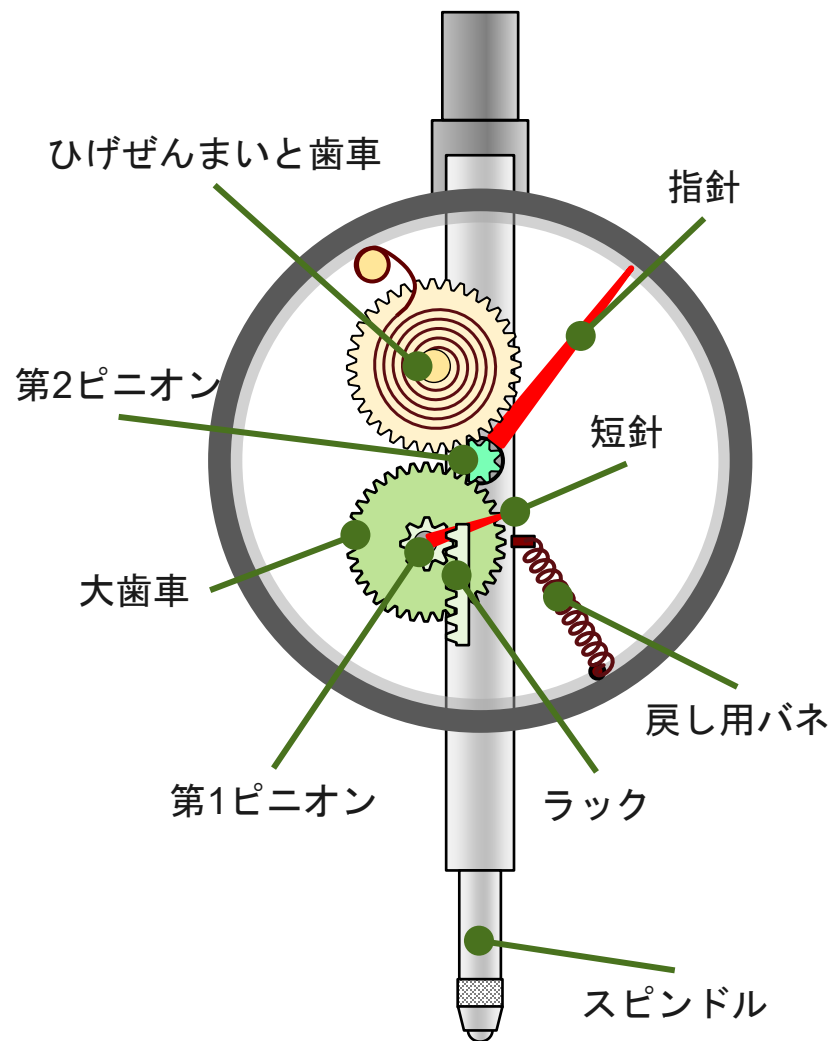
ミットヨホームページ：
<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>

ミットヨのダイヤルメータをもとに高増潔作画©takamasu-lab



メモ作画：ダイヤルゲージの構造

- 歯車，渦巻ばね，ばねの作画
 - 「PowerPointで歯車コイル渦巻ネジを書く方法」を参照



ダイヤルメータの構造：高増潔作画©takamasu-lab

