

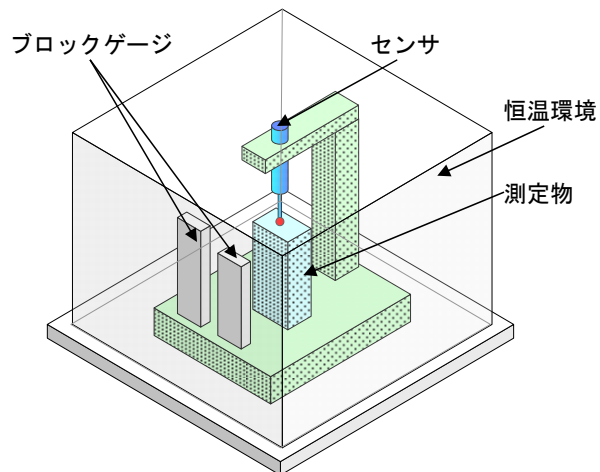
精密工学基礎講座  
「精密測定超入門」

第1回

精密測定の三大発明

東京大学 名誉教授

高増潔



精密測定の三大発明に基づく寸法測定の方法

## 1. 精密測定超入門：学問としての位置づけ

### 1.1 精密工学の課題と精密測定の定義

精密工学において、過去の研究や技術から学ぶことはきわめて重要である。『精密の歴史』<sup>1)</sup>の中で、クリス・エヴァンスは「精密工学の歴史は、苦心惨憺たる試行錯誤と再発明の繰り返しであった」と述べている。精密工学は体系化が難しく、教育方法が統一されていないことや、研究者の交流の場が十分に整っていなかったことが、このような再発明を招いた原因と考えられる。

無駄な再発明を避け、新しい技術の研究を推進するための有効な手段が「学会活動」と「歴史の学習」である。日本では欧米に先立ち精密工学会が設立され、その活動を通じて精密工学の体系化や研究者交流の場が形成されてきた。表 1 には各国の精密工学関連学会の設立状況を示す。精密工学会は他国に比べて圧倒的に早く設立され、このことが日本のものづくり分野が世界をリードする大きな要因となっている。さらに、他国の学会設立においても、精密工学会は協力や支援を通じて重要な役割を果たしてきた。ASPEN についても、アジア諸国を結集する学会が、精密工学会の指導的役割のもとに設立された経緯がある。

著者は精密測定を「ものづくりを支える知的ナノ計測技術の体系化＝知的ナノ計測学」と定義している。図 1 は、知的ナノ計測技術の体系とその方向性を示したものである<sup>2)</sup>。ナノ計測においては、高精度計測を実現するために、適切な標準の開発、計測手法やデータ処理法の改善が不可欠である。これらの改善を体系化し「知的ナノ計測技術」として確立することが重要である。図 1 では、3つのコア計測技術を研究することで、知的ナノ計測技術を「ものづくりへ展開」していくことを示している<sup>3)</sup>。

- 知的計測手法：多点法，自己校正手法，不確かさ解析
- ナノメートル三次元計測：ナノ三次元測定機，高精度三次元形状計測
- ナノメートル計測標準：測長 AFM，ナノメートル標準の確立
- ものづくりへ展開：半導体欠陥検査，ナノメートル形状計測

表 1 各国の精密工学関連学会の設立時期

設立年	略号	名称	ホームページ
1933	JSPE	The Japan Society for Precision Engineering	<a href="https://www.jspe.or.jp/">https://www.jspe.or.jp/</a>
1983	KSPE	Korean Society for Precision Engineering	<a href="https://kspe.or.kr/">https://kspe.or.kr/</a>
1986	ASPE	American Society for Precision Engineering	<a href="https://aspe.net/">https://aspe.net/</a>
1999	euspen	The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology	<a href="https://www.euspen.eu/">https://www.euspen.eu/</a>
2005	ASPEN	Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology	<a href="https://www.aspen-soc.org/">https://www.aspen-soc.org/</a>
2014	TSPE	Taiwan Society for Precision Engineering	<a href="https://www.tspe.org.tw/">https://www.tspe.org.tw/</a>

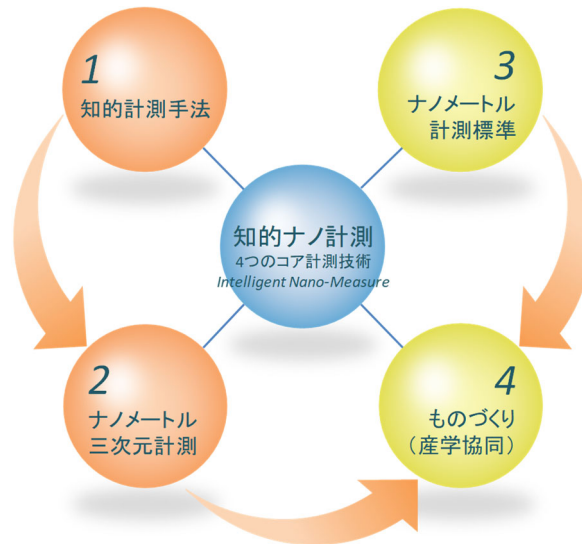


図1 知的ナノ計測技術の体系化：3つのコア計測技術をものづくりに展開

## 1.2 精密測定超入門の目次

本講座では、精密測定の基本的な考え方を理解することを目的として、最初に考慮すべき事項を説明する。表2に示すように、5つの内容を取り上げる予定である。第1回では、「精密測定の三大発明」として、ブロックゲージ、アッペの原理、恒温環境の三つを取り上げ、精密測定の基礎的な考え方を解説する。第2回と第5回では、計測の根幹をなすトレーサビリティと不確かさについて基礎的な概念を示す。第3回と第4回では、精密測定機器の基本となる端度器としてのブロックゲージ、および線度器に適用されるアッペの原理について詳しく解説する。この5回の講座を通して、精密測定の基礎的な考え方を体系的に理解することを目指している。

表2 「精密測定超入門」の目次

回	内容
1	精密測定の三大発明
2	長さのトレーサビリティ
3	精密測定機器1：端度器，ブロックゲージ
4	精密測定機器2：線度器，アッペの原理
5	不確かさの基礎

## 2. 精密測定の三大発明とその意義

精密測定における典型的な課題として、長さ約100mmの鉄製の棒を1 $\mu$ mの精度で測定する例が挙げられる。100mmに対して1 $\mu$ mというのは、相対精度にして $10^{-5}$ に相当し、まさにこの精度領域が精密測定の対象となる。この課題を達成するためには、三つの重要な要素が必要である。すなわち、ブロックゲージ、アッペの原理、そして恒温環境である(表3)。著者はこれらを「精密測定の三大発明」と呼ぶ。

歴史的に見れば、三大発明に数えられるのは、1896年にヨハンソンが発明したブロックゲージ、

1890年にアッペが提唱したアッペの原理，そして1924年に米国国立標準局（NBS）が整備した20℃の恒温環境である．これらはそれぞれ，精密測定の基本概念である「トレーサビリティ」および「測定不確かさ」と密接に関わっている．

寸法測定における最も基本的な方法は，図2に示すように，ブロックゲージを基準とした比較測定である．対象となるのは，高精度な形状をもつ機械部品であり，測定は原則として20℃の恒温環境下で行う．さらに，高分解能のセンサをアッペの原理を満たすように配置し，ブロックゲージによってセンサの拡大率を校正する．この条件を整えたうえで，測定対象とブロックゲージを比較測定することで，高精度な寸法測定が可能となる．

表3 精密測定の三大発明

三大発明	時期：実施者	機能
① ブロックゲージ	1896年：スウェーデンのヨハンソン	標準へのトレーサビリティ
② アッペの原理	1890年：ドイツのアッペ	幾何誤差の影響を減らす
③ 恒温環境（20℃）	1924年：米国のNBS（標準研究所）	環境の影響を減らす

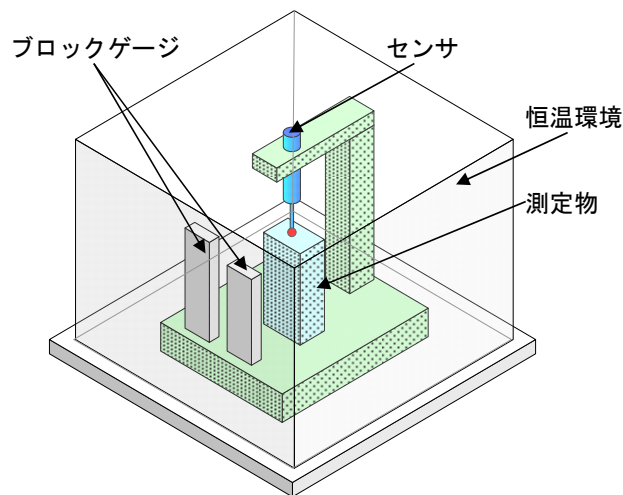


図2 精密測定の三大発明に基づく寸法測定の方法：恒温環境でブロックゲージと比較測定

### 3. ブロックゲージ：端度器の代表とその役割

#### 3.1 端度器と線度器の体系

三大発明の最初の要素として，ブロックゲージについて説明する．長さの標準器には大きく分けて「端度器」と「線度器」がある．端度器は両端面間の距離によって寸法を規定するもので，ブロックゲージ，すきまゲージ，プラグゲージ，リングゲージなどが含まれる．一方，線度器は表面に刻まれた目盛の間隔によって寸法を規定するもので，一般的な物差しやノギス，マイクロメータ，ダイヤルゲージなどが該当する．

#### 3.2 ブロックゲージの歴史・材料・規格とトレーサビリティ

ブロックゲージは1896年にスウェーデンのヨハンソンによって発明された．当初は鉄鋼製が主流

であったが、現在では耐食性に優れるセラミックや、熱膨張係数の小さい特殊材料なども広く用いられている（図 3(a)）。代表的なヨハンソン型のセットは、1.005 mm から 100 mm までの 103 個を組み合わせたものである（図 3(b)）。複数のブロックゲージを密着させて任意の寸法を構成する「リングング」と呼ばれる技法も重要であり、これにより任意の寸法を構成できる。

JIS B 7506<sup>4)</sup>では、ブロックゲージに 4 つの等級（K 級，0 級，1 級，2 級）が規定されており，基準用の K 級から実用的な検査用の 2 級まで，用途に応じて幅広く使用されている。これらのブロックゲージは，レーザ干渉計による絶対測定によって値付けが行われており，この方法により長さのトレーサビリティが確立されている。その精度は極めて高く，例えば 100 mm の K 級ブロックゲージでは寸法許容差はわずか 70 nm であり，寸法に対する許容差の比率は  $10^{-6}$  のオーダーに達する。このような高精度を有する一方で，ブロックゲージは比較的安価に入手できるという特徴もある。例えば，10 mm の 2 級ブロックゲージは約 3,000 円程度，また 0 級の 103 個セットでも約 40 万円で購入可能である。このように，ブロックゲージは極めて高い精度と優れた経済性を兼ね備えており，測定器の校正や比較測定の基準として広く利用されている。



(a) セラミック及び鋼製のブロックゲージ

(b) 103 個のブロックゲージのセット

図 3 ブロックゲージの例<sup>5)</sup>

### 3.3 比較測定における基準器としての利用と測定原理

図 4 は，ブロックゲージと測定対象を比較して測定する比較測定の方法を示している。比較測定機は，測定スタンドによってアッベの原理を満たすように配置する。この条件下で，ブロックゲージと測定対象の寸法差を比較測定機で測定する。

比較測定に用いられる測定機器としては，ダイヤルゲージ，電気マイクロメータ，空気マイクロメータ，デジタルゲージ，干渉式コンパレータなどがある。対象物とブロックゲージの差を直接測定することで，高精度に対象の寸法が決定される。比較測定機に求められる性能は，高分解能や安定性であり，広い測定範囲は必ずしも必要ではない。これは，ブロックゲージを組み合わせることで測定対象に極めて近い寸法の基準を構成できるためである。したがって，測定範囲はマイクロメートルオーダーでも十分である。

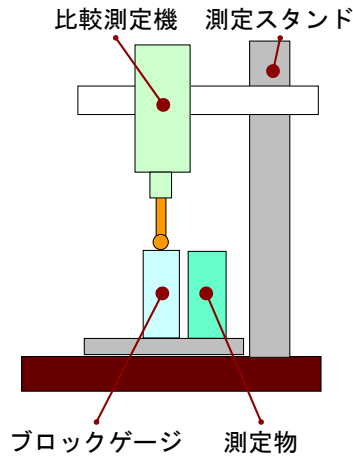


図4 ブロックゲージを利用した比較測定

### 3.4 精密測定におけるブロックゲージの意義

以上のように、ブロックゲージは精密測定における三大発明の一つであり、両端面間の距離によって寸法を定義する端度器の代表的存在である。ブロックゲージの寸法はレーザ干渉計による絶対測定によって決定されており、これにより長さのトレーサビリティが確立されている。さらに、ブロックゲージはリングングによって互いに密着させることができ、複数個を組み合わせることで任意の寸法を高い精度で構成することが可能である。この性質により、測定対象とブロックゲージとの差を求める比較測定が容易となり、直接測定よりも高い精度を達成することができる。このような特長により、ブロックゲージは測定器の校正や精密測定の基準として用いられ、精密測定を支える基盤的な役割を担っている。

## 4. アッベの原理

### 4.1 アッベの原理の概要：定式化と誤差解析

アッベの原理とは、被測定物の長さ基準となるスケールを、同一の測定方向において一直線上に配置しなければならない、という考え方である。この原理は1890年にドイツのアッベ(Ernst Abbe)によって定式化された。図5にその基本的な概念を示す。測定長を  $L$ 、基準の傾きを角度  $t$  とすると、正しい測定長に対する誤差は、垂直方向（上下方向）では  $L \sin t$ 、水平方向（左右方向）では  $L(1 - \cos t)$  で与えられる。角度  $t$  が小さい場合、水平方向の誤差は垂直方向の誤差に比べて非常に小さい。したがって、測定対象と基準スケールを一直線上に配置することが合理的である。

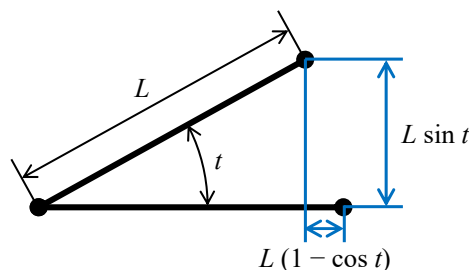


図5 アッベの原理の基本的な構図（測定長  $L$ 、基準の傾き  $t$ ）

#### 4.2 測定器への適用：ノギス・マイクロメータ・ダイヤルゲージ

図6は、図5のアッベの原理を実際の測定系に適用した模式図で、スケールと測定対象の関係を示している。スケールと測定物が案内の長さ  $a$  に沿って平行に配置された場合（図6(a)）には、アッベの原理を満たしておらず、案内が角度  $t$  だけ傾くと誤差  $a \sin t$  が生じる。これに対して、スケールと測定物が一直線上に配置されている場合（図6(b)）には、アッベの原理を満たしており、案内が角度  $t$  だけ傾いたときに生じる誤差は  $b(1 - \cos t)$  となる。

代表的な測定器における適用例として、ノギスとマイクロメータを比較することができる（図7）。ノギスはアッベの原理を満たしていないため、案内の傾きがそのまま測定誤差に反映されやすい。一方、マイクロメータはねじ送りを基準として測定対象とスケールが一直線上に配置されるため、角度変化の影響を受けにくく、高精度な測定が可能である。ダイヤルゲージもまた、狭い範囲を高分解能で測定できる構造を持ち、アッベの原理を満たす代表的な測定器である。

実際に生じる誤差の計算例を表4に示す。スケールと測定物が平行に配置された場合は案内の長さを  $a = 10 \text{ mm}$ 、一直線に配置された場合は  $b = 100 \text{ mm}$  と仮定した。表4から明らかのように、角度  $t$  が小さいときにはアッベの原理を満たす配置での誤差は非常に小さい。例えば  $t = 0.001 \text{ rad}$ （約  $0.06^\circ$ ）のとき、平行配置の場合には約  $10 \mu\text{m}$  の誤差が生じるのに対し、一直線配置の場合の誤差はわずか  $0.05 \mu\text{m}$ にとどまる。すなわち、アッベの原理を満たした配置は、著しく誤差を減らすことができる。

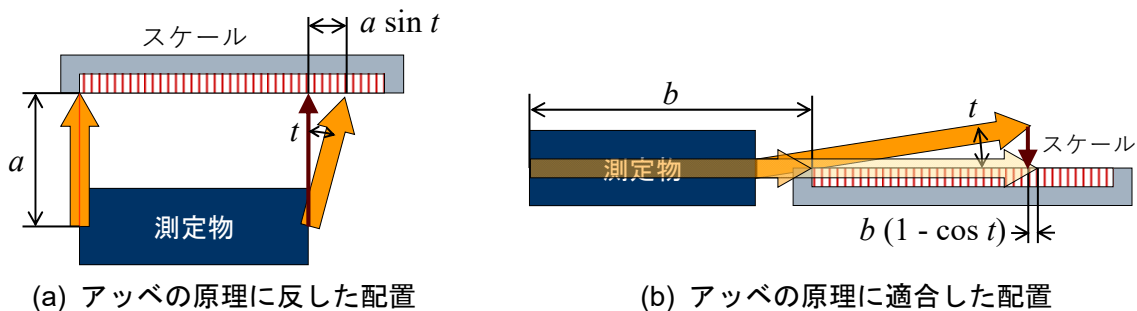


図6 測定物とスケールの関係

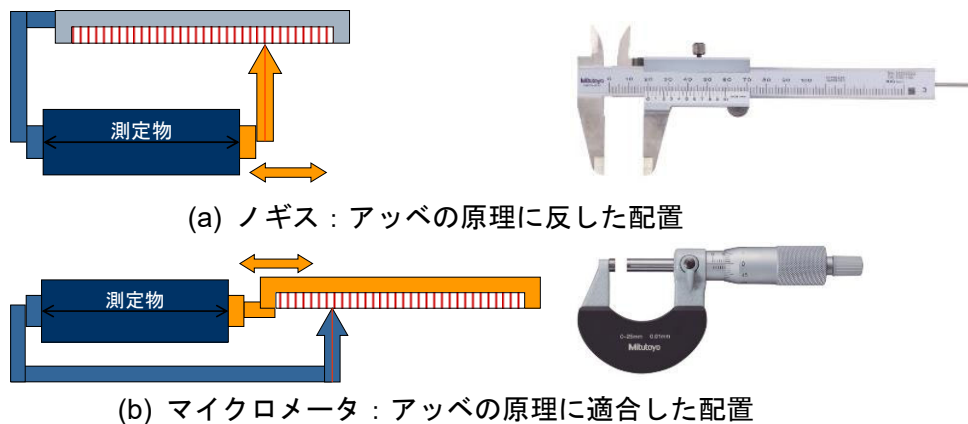


図7 ノギス、マイクロメータとアッベの原理の関係<sup>5)</sup>

表 4 測定物とスケールの関係で生じる誤差の計算例（図 6 :  $a = 10 \text{ mm}$ ,  $b = 100 \text{ mm}$ ）

$t \text{ (rad)}$	$t \text{ (}^\circ\text{)}$	$a \sin t \text{ (}\mu\text{m)}$	$b(1 - \cos t) \text{ (}\mu\text{m)}$
0.0001	0.006	0.99999	0.00050
0.001	0.057	9.99999	0.04999
0.01	0.573	99.99833	4.99995
0.1	5.730	998.33416	499.58347
1	57.300	8414.70984	45969.76941

### 4.3 測定器設計におけるアッペの原理の意義

以上のように、アッペの原理は精密測定における三大発明の二つ目である。その内容は、被測定物の測定長と基準スケールを同一方向に一直線上に配置すべき、という考え方である。この原理は1890年にアッペによって定式化され、その後の精密測定技術の基本原則となっている。補正技術が大きく進歩した現在でも、アッペの原理は測定器設計における基本指針として極めて重要である。代表的な測定器の適用例を挙げると以下の通りである。

- ノギス：簡便で多用途に使えるが、アッペの原理を満たしていない。
- マイクロメータ：ねじ送りを基準とし、スケールと測定長が一直線に配置されるため、アッペの原理を満たしている。
- ダイヤルゲージ：狭い範囲を高分解能で測定できる構造であり、アッペの原理を満たす代表例である。

## 5. 恒温環境

### 5.1 温度と寸法の定義：JISにおける20℃基準と温度の影響

寸法測定において、温度の影響は非常に大きい。測定物の寸法は JIS B 0680<sup>6)</sup>により、基準温度 20℃における寸法として定義されている。したがって、工業製品のカタログや図面に記載されている寸法はすべて 20℃に基づく値である。このため、20℃以外で測定を行う場合には必ず温度補正が必要となる。補正を行わない場合には、その分の不確かさを評価しなければならない。この点については本講座の別項で詳しく説明する。（コラム 1：材料の熱膨張率と精密測定，参照）

図 8 は、測定物とスケールを並べて配置した場合の温度補正の考え方を示している。スケールの読みは 20℃で正しくなっているので、スケール読みを  $l_{s20}$ 、線膨張係数を  $\alpha_s$ 、温度を  $t_s$  とすると、温度  $t_s$  におけるスケール長さ  $l_s$  は式 (1) で表される。一方、測定物の 20℃での定義寸法を  $l_{w20}$ 、線膨張係数を  $\alpha_w$ 、温度を  $t_w$  とすると、温度  $t_w$  における測定物の寸法  $l_w$  は式 (2) で表される。測定では、スケールと測定物の実寸法が一致する ( $l_s = l_w$ ) ため、この条件をもとに基準温度 20℃における測定物寸法  $l_{w20}$  を求める。この関係式を整理して得られる式 (3) が温度補正の計算式である。（コラム 2：近似式の利用と式の線形化，参照）

$$l_s = l_{s20}(1 + \alpha_s(t_s - 20)) \quad (1)$$

$$l_w = l_{w20}(1 + \alpha_w(t_w - 20)) \quad (2)$$

$$l_{w20} = \frac{l_{s20}(1 + \alpha_s(t_s - 20))}{1 + \alpha_w(t_w - 20)} \approx l_{s20}(1 + \alpha_s(t_s - 20) - \alpha_w(t_w - 20)) \quad (3)$$

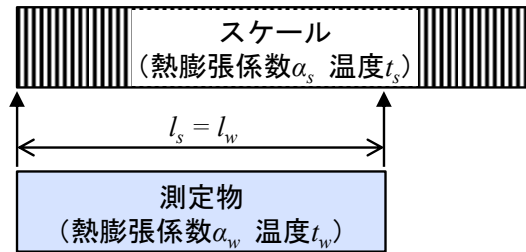


図8 測定物をスケールで測定した場合の温度補正：式(1)～式(3)

## 5.2 温度補正が不要となる条件

温度補正は常に必要というわけではない。式(3)から、以下の条件では補正が不要となることがわかる。

- スケールと測定物の温度がともに  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ( $t_s = t_w = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) の場合
- スケールと測定物の温度および熱膨張係数が一致している場合 ( $t_s = t_w$  かつ  $\alpha_s = \alpha_w$ )
- 熱膨張係数がゼロに近い材料 ( $\alpha_s = \alpha_w = 0$ ) を用いる場合

従来の高度な測定では、鉄製の測定物を鉄製スケールで測定していたため、膨張特性が近く、温度補正の重要性は比較的小さかった。しかし、現在では多様な材料を高精度に測定する必要があるため、温度補正の重要性は格段に高まっている。同様に、鉄製の工作機械で鉄を加工する場合は影響が小さいが、異種材料を加工する場合には温度補正が不可欠となる。

## 5.3 温度補正の不確かさ：温度測定と熱膨張係数の寄与

温度補正を行ったからといって、それで完全に十分というわけではない。補正を行ってもなお不確かさが残る。温度補正の不確かさは主に、

- 温度測定の不確かさ（温度計の精度、環境温度の均一性、ドリフトなど）
- 熱膨張係数の不確かさ（材料のばらつきや熱膨張係数の不明確さなど）

に起因する。

鉄の場合でも、熱膨張係数には10%以上の不確かさがあるとされ、プラスチックなどではさらに大きい。式(4)で測定物の温度補正について、不確かさの評価を行う。この式を温度測定  $t_w$  と熱膨張係数  $\alpha_w$  で偏微分し、それぞれの不確かさ  $d_{tw}$ 、 $d_{\alpha_w}$  を掛け合わせた成分を二乗和して算出する。これにより温度補正の不確かさ  $d_{lw20}$  を式(5)で求めることができる。同様な解析はスケールについても行える。

温度測定の不確かさ  $d_{tw}$  は、良好な測定環境と高精度な温度計を整えることで抑制できる。一方、熱膨張係数の不確かさ  $d_{\alpha_w}$  は材料特性に依存し、制御が難しい場合が多い。その際は、できるだけ基準温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$  付近で測定を行うことが有効である。すなわち、式中の  $(t_w - 20)$  を小さくすることで影

響を低減できる。したがって、良好な恒温環境と高精度温度計の使用、および 20℃ に近い条件での測定が必要である。

$$l_{w20} = l_{s20}(1 - \alpha_w(t_w - 20)) \quad (4)$$

$$d_{l_{w20}} = l_{s20} \sqrt{(\alpha_w d_{t_w})^2 + ((t_w - 20) d_{\alpha_w})^2} \quad (5)$$

#### 5.4 恒温環境の確立と精密測定への意義

精密測定における三大発明の一つが「恒温環境」である。寸法はすべて基準温度 20℃ における値として定義されているため、20℃ 以外での測定には必ず温度補正が必要となる。ただし、温度補正には温度測定および熱膨張係数の不確かさが影響するため、不確かさを最小化するには、以下の項目が必要である。以上のように、20℃ の恒温環境の確保と管理が精密測定の高精度化では不可欠となる。

- 高精度の温度計を用いること
- 温度ドリフトなどが少ない測定環境を整備すること
- 可能な限り基準温度 20℃ に近い条件で測定すること

#### 6. まとめ

本講座では、精密測定の三大発明について解説した。まず、寸法を精密に測定するためには、ブロックゲージを基準とした比較測定が最も有効である。次に、測定対象が高精度な形状をもつ機械部品である場合には、基準温度 20℃ の安定した環境で測定を行うことが不可欠である。さらに、高精度・高分解能のセンサをアッベの原理に従って配置することで、測定不確かさを最小化できる。センサの測定範囲は広くなくてもよいが、アッベの原理を満たす配置が重要である。また、複数のブロックゲージを組み合わせてセンサの拡大率を校正し、測定対象とブロックゲージを比較することで、高精度な寸法測定を容易に実現できる。以上を総合すると、精密測定の三大発明は、①ブロックゲージ、②アッベの原理、③恒温環境の三つに集約されると結論づけられる。

**コラム 1：材料の熱膨張率と精密測定**

精密測定では、スケールや基準となるアーティファクトの「長さ」を基準に寸法を決めます。しかし、材料の長さは温度によって変化します。この現象を熱膨張といい、その大きさを表すのが線熱膨張係数（CTE: Coefficient of Thermal Expansion）です。CTE は、温度が 1℃（または 1K）変化したときに、長さがどの割合で変化するかを示し、単位は 1/℃（または 1/K）で表されます。

CTE の値は材料によって大きく異なります（表 C1 材料の熱膨張係数，参照）。例えば、鉄や鋼は約  $11 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ，アルミニウムは約  $23 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ，ダイヤモンドは約  $1 \times 10^{-6}/\text{℃}$  です。一方、ポリエチレンでは約  $150 \times 10^{-6}/\text{℃}$  と非常に大きな値になります。この違いは、同じ温度変化でも材料によって長さの変化量が大きく異なることを意味します。例えば、長さ 1 m の鉄は、温度が 1℃ 変化すると約 11 μm 伸びます。精密測定では、この程度の変化でも無視することはできません。

実際の材料の CTE を正確に知ることは必ずしも容易ではありません。例えば鋼でも、炭素や添加元素の割合によって CTE は変化し、一般

に 10 %から 20 %程度のばらつきがあるといわれています。

このため、精密測定では測定室の温度を通常 20℃ に保ちます。また、ゼロデュア（Zerodur）やネクセラ（NexCera）のような、熱膨張の小さい材料が測定機器の基準部材に用いられます。このような温度管理と材料選択によって、熱膨張の影響を小さくすることができます。

熱膨張は小さな現象ですが、精密測定の精度に直接影響します。精密な長さを正しく測定するためには、温度の影響を理解し、適切に管理することが重要です。

**表 C1 材料の熱膨張係数（20℃ 付近）**

材料	熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/\text{℃}$ )
鋼（炭素鋼）	10.5～12.5
アルミニウム	23～24
ポリエチレン	100～200
ポリカーボネート	70～90
シリコン	2.5～2.7
ダイヤモンド	0.8～1.2
ゼロデュア	0±0.02
ネクセラ	0±0.03

**コラム 2：近似式の利用と式の線形化**

精密測定や物理では、複雑な式を扱うことが多くあります。そのような場合に有効なのが近似式の利用です。近似式を用いることで、式を簡単な形に変形でき、現象の本質を理解しやすくなります。特に重要なのが、変数  $x$  の絶対値が 1 より十分小さい場合 ( $|x| \ll 1$ ) の近似です。このとき、

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x, \quad \frac{1}{1-x} \approx 1+x$$

が成り立ちます。

これは、分母と分子に  $x-1$  をかけることで、

$$\frac{1}{1+x} = \frac{1-x}{(1+x)(1-x)} = \frac{1-x}{1-x^2} \approx 1-x$$

と変形でき、 $x^2$  は 1 に比べて非常に小さいため、これを無視することで近似式が得られます。

この近似は、 $x = 0.001$  のように  $x$  が小さい場合には非常に高い精度で成り立ちます。さらに、 $x = 0.1$  程度でも、変化の傾向を理解するには十

分有効です (表 C2 近似式の近似精度, 参照)。

現在では数値計算をコンピュータが正確に行うため、単に数値を求めるだけであれば近似式を使う必要はありません。近似式の重要な役割は、式を「線形化」できる点にあります。線形化された式では、変化量が変数に比例するため、解析や微分が容易になり、変数の影響を直感的に理解できます。例えば、熱膨張による長さ変化は温度変化に比例するとみなすことができ、温度補正の考え方が明確になります。

**表 C2 近似式の近似精度**

$x$	$1/(1+x)$	$1-x$
0.0001	0.999900010	0.9999
0.001	0.999000999	0.999
0.01	0.990099010	0.99
0.1	0.909090909	0.9

**コラム 3：精密測定のホームページと公開資料**

本解説で用いている図表の多くは、著者のホームページ (<https://takamasu-lab.org/>) で公開している PowerPoint ファイルを基に作成しています。これらの資料は、講義などで実際に使用してきたものであり、閲覧だけでなく、自由に利用・改変することも可能としています。精密測定を学ぶ方々にとって、使いやすい形で活用していただければと考えています。

掲載している内容は、精密測定の基礎を中心としたものです。具体的には、トレーサビリティの考え方から、ブロックゲージ、アッペの原理といった基本事項に加え、測定の不確かさや幾何特性仕様 (GPS) についても解説しています。初学者向けの導入から、実務や研究で役立つ内容までを意識して整理しています (表 C3 精密測定の PowerPoint データ, 参照)。

また、少し実務的な内容として、PowerPoint で図を作成するための Tips も掲載しています。

**表 C3 精密測定の PowerPoint データ**

- 精密測定の基礎
  - トレーサビリティ,
  - 計測の歴史とメートルの定義, SI 単位
  - 端度器 (ブロックゲージ)
  - 線度器, アッペの原理
  - 精密測定の定義, 精密測定の 3 大発明
- 測定の不確かさ (prec-02)
  - 測定不確かさ (1) 基礎・誤差伝播
  - 測定不確かさ (2) 寸法測定・温度補正
  - 測定不確かさ (3) 合否判定
  - 寸法測定の標準温度
- 幾何特性仕様 (長さ, 形状, 表面性状)
  - 幾何特性, 寸法, 幾何公差
- Tips
  - PowerPoint で正弦波を書く方法
  - 特殊文字-数学記号などの入力
  - PowerPoint でアイソメ図を書く方法

注：

1. 本稿の原稿作成にあたっては、まずパワーポイントファイルに対して口頭で説明を行い、その音声をディクテーション機能により文字起こしした。この文字起こし原稿を ChatGPT を用いて解説形式の文章に変換し、それを基に解説文を作成した。
2. 文章の添削、タイトルの作成、全体の校正にも ChatGPT を活用した。
3. 本解説で使用した図表は、**著者のホームページ** (<https://takamasu-lab.org/>)<sup>7)</sup> で公開しているパワーポイントファイルの図表を基に作成した。同ホームページでは、講義などで使用したパワーポイントファイルを自由に利用でき、図表等の改変も許可している。
4. 本解説およびホームページで公開しているパワーポイント等については、問題点があれば可能な範囲で修正を行う予定である。ご意見・ご指摘があれば、**著者** ([takamasu@pe.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:takamasu@pe.t.u-tokyo.ac.jp)) までお寄せいただきたい。

参考文献

- 1) クリス・エヴァンス：精密の歴史－人間はいかに精度をつくってきたか，大河出版，1993
- 2) 高増潔：ナノスケールものづくりのための知的計測技術，計測と制御，47 (9), 705-706, 2008
- 3) 高増潔，高橋哲：次世代製造を支える形状測定技術の進化と課題，計測と制御，64 (6), 361-366, 2025
- 4) JIS B 7506：ブロックゲージ
- 5) ミットヨホームページ：<https://www.mitutoyo.co.jp/products/measuring-tools/>
- 6) JIS B 0680：製品の幾何特性仕様（GPS）－製品の幾何特性仕様及び検証に用いる標準温度
- 7) 高増計測工学研究所ホームページ：<https://takamasu-lab.org/>

2026年5月22日 公開

## 精密工学基礎講座(精密測定超入門) 読者アンケートのお願い

『精密工学基礎講座』は、精密工学の基礎を網羅的に解説し、初学者や企業・大学等における教育向けの入門テキストとして活用いただくためのものです。

今後も、会員の皆様のニーズに合わせた基礎講座をご提供できるよう、読者の皆様へ2～3分で終わる簡単なアンケートへの回答をお願いしております。ご多用のところ恐縮ですが、何卒ご回答頂きますようお願い申し上げます。