

全体委員会 特別講演報告

Vol. 37 特別講演

2022年2月18日

公益社団法人 精密工学会
画像応用技術専門委員会



精密測定 —ものづくりを支える知的ナノ計測学—

2022年2月18日

画像応用技術専門委員会：特別講演

東京大学 高増 潔

takamasu@pe.t.u-tokyo.ac.jp

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



講演内容

1. 精密測定の定義
 - 1-1 知的ナノ計測技術の体系化
 - 1-2 スケールインターフェースとスケールファクターチャート
2. 精密測定の基礎
 - 2-1 長さ測定のトレーサビリティ
 - 2-2 精密測定の条件
3. 走査型形状測定
 - 3-1 走査型形状測定と誤差分離手法
 - 3-2 マルチプローブ法によるミラー形状測定
4. まとめ



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

2

1. 精密測定の定義

1-1 知的ナノ計測技術の体系化

1-2 スケールインターフェースとスケールファクターチャート



1-1 知的ナノ計測技術の体系化 (1)

- 精密測定
 - 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」
- 学会活動の重要性→精密工学の体系化
 - 精密工学において、過去の研究および技術に学ぶことは最も重要なことである。「精密の歴史」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、教育方法の統一化ができていないこと、研究者の交流の場がないことがこの原因と考えられる。無駄な再発見をなくし、新しい技術を研究するための有効な手段が「**学会活動**」であり、歴史の勉強である。日本では欧米に先立って精密工学会を設立し、この活動の中で精密工学の体系化、研究者の交流の場を作ってきた。
- 精密測定分野で、精密工学会の活動は世界をリードしている
 - 精密工学会：**画像応用技術専門委員会**の役割は重要



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

4

知的ナノ計測技術の体系化 (2)

- 日本のものづくりの優位性を活かしながら次世代のものづくりへのイノベーションを加速する
- 知的ナノ計測技術の体系化が必要：形状精度をナノスケール化することで機械部品、半導体、光素子に高付加価値な機能を付与する
- 以下の4つのコア計測技術の研究を行うことで、「知的ナノ計測」のものづくりへの展開を目指す
 - **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
 - **ナノメートル計測標準**：測長AFM、ナノメートル標準
 - **ものづくりへの展開**：半導体欠陥検査、ナノメートル形状計測



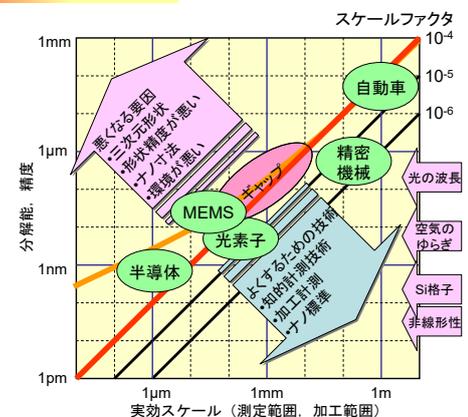
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

5

1-2 スケールインターフェース (1)

- スケールインターフェース
 - 相対的な精度：スケールファクタをマクロからマイクロまで連続的に連携する
 - 10^{-4} ：精密測定
 - 10^{-5} ：超精密測定



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

6

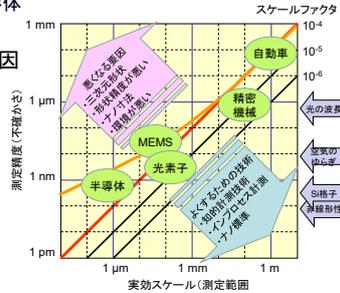
スケールインターフェース (2)

■ スケールファクタを悪くする要因

- 実効スケール：小さい (スケールに対して：光の波長)
- 測定対象
 - 表面形状：相対的に悪い
 - 測定次元：1次元→2次元→3次元
 - 測定形状：単純形体→複雑形体
- 測定環境：悪い

■ スケールファクタをよくする要因

- 補正技術を利用する
 - 温度補正
 - 校正
- 測定手法・データ処理技術
 - 反転法・多点法
 - インプロセス加工/計測
 - 相対測定・比較測定：標準
 - 平均化
 - アップの原理



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

7

高増研究室での形状・寸法測定の研究の例

■ 半導体産業におけるナノメートル計測：

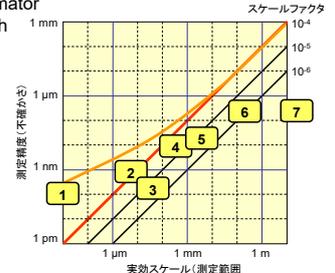
- 1 Line Width and Roughness Measurement of SAOP by Using FIB and TEM as Reference Metrology (sub 10 nm)
- 2 Multi-Ball Cantilever System for Flatness Measurement of Resist Surface

■ 形状および座標計測における不確かさ評価

- 3 Nanometer Profile Measurement of Aspheric Surface Using Scanning Deflectometry and Rotating Autocollimator
- 4 Calibration of Planar Linear Motor with Uncertainty Estimation
- 5 Profile Measurement by Multi Point Method for Calibration of Micro-CMM

■ 光コムによる絶対距離測定：

- 6 Calibration of Coordinate Measuring Machines
- 7 Long Length Measurement (over 400 m)



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

8

スケールファクタチャート

■ スケールファクタを悪くなる要因、よくするための方法

- 悪くなる要因：実効スケールが小さい、測定形状が悪い、2次元、3次元、環境が悪い、絶対測定、標準が悪い
- よくする方法：反転法、多点法、温度補正、インプロセス測定、平均化、アップの原理

要因		スケールファクタ (10 ⁻⁴ を基準)			
分類	小分類	-1	0	+1	+2
1. 実効スケール	A 小さい		10 μm以上	10 μm以下	1 μm以下
	B 大きい		100 mm未満	100 mm以上	10 m以上
2. 計測対象	A 表面形状		よい	悪い	とても悪い
	B 測定次元		1次元	2次元	3次元
	C 形状		単純	複雑	
3. 計測環境	A 環境		よい	悪い	とても悪い
	B 温度補正	有効	なし/無効		
4. データ処理 (知的計測技術)	A 反転法/多点法など	有効	なし/無効		
	B 加工計測	有効	なし/無効		
	C 相対/絶対		相対 (標準)	絶対	
	D 平均化	有効	なし/無効		
	E アップの原理	有効	なし/無効		

2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

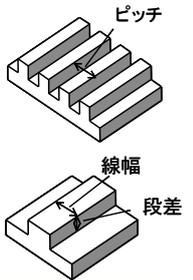
9

スケールファクタチャート：ナノ標準 (1)

■ 測長AFMにより、ピッチ、段差、線幅のナノメートル標準の値付けを行う：高いスケールファクタを確保するのは難しい

- 実効スケールが小さく、表面形状が悪い
- ピッチは平均化が使えるが、線幅は絶対的な測定になる

要因		ピッチ	段差	線幅
1. 実効スケール	A 小さい	+2	+2	+2
2. 計測対象	A 表面形状	+1	+1	+1
3. 計測環境	A 環境	0	0	0
4. データ処理	A 反転法/多点法	0	0	0
	C 相対/絶対	0	0	+1
	D 平均化	-1	0	0
	E アップの原理	-1	-1	-1
合計 (10 ⁻⁴ が基準)		+1	+2	+3
スケールファクタの推定値		10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

10

スケールファクタチャート：ナノ標準 (2)

■ ナノスケール標準 (測長AFMによる値付け)

■ ピッチ標準 (1次元グレーティング) (240 nm)

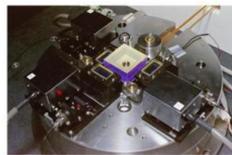
- 不確かさ 0.4 nm
- 形状が悪いが、平均化が有効
- 10⁻³

■ 段差標準 (50 nm)

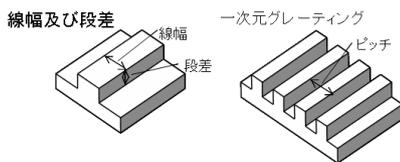
- 不確かさ 0.8 nm
- 形状が悪いが、平均化が無効なので不確かさが増える
- 10⁻²

■ 線幅標準 (100 nm)

- 不確かさ 5 nm
- 絶対測定
- 10⁻¹



産業技術総合研究所



一次元グレーティング

2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

11

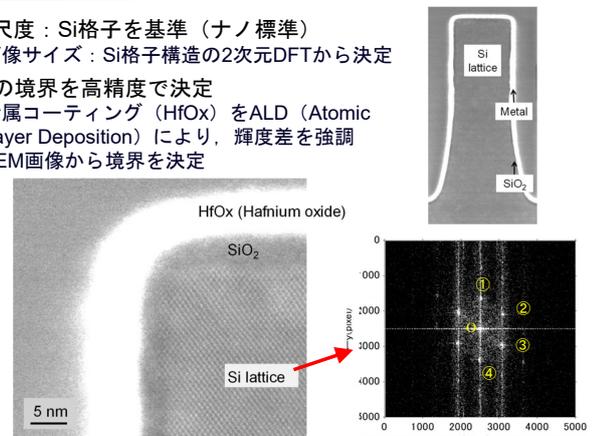
1 半導体産業におけるナノメートル計測

■ 絶対尺度：Si格子を基準 (ナノ標準)

- 画像サイズ：Si格子構造の2次元DFTから決定

■ SiO₂の境界を高精度で決定

- 金属コーティング (HfOx) をALD (Atomic Layer Deposition) により、輝度差を強調
- TEM画像から境界を決定



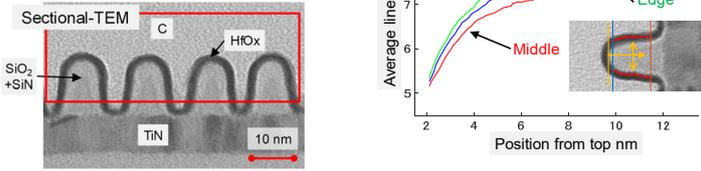
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

12

SAOP (Self-Aligned Octuple Patterning) デバイスの解析

- 10 nm以下の形状計測
- ウェハ上の位置による線幅、線の高さの計測
- 不確かさ：0.1 nm以下
- スケールファクタ： 2×10^{-2}



Chip position	Center	Middle	Edge
Line height	12.927 nm	12.462 nm	14.229 nm
Line width (2.1 nm from top)	5.268 nm	5.161 nm	5.333 nm
Line width (3.3 nm from bottom)	8.616 nm	8.294 nm	8.631 nm

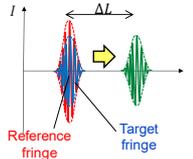
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

13

7 光コムパルス干渉計による長距離絶対測定

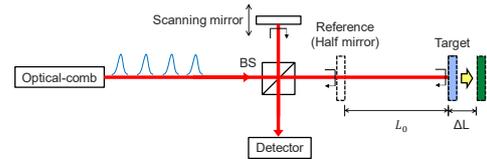
- 光コムパルス干渉計による絶対距離測定
- パルス列が干渉することで、パルス間隔 l_d の1/2の整数倍距離を決定できる
- パルス間隔は周波数でロックされ 10^{-10} 以上の高精度でトレーサブル（光の速度 c 、周波数標準 f_{rep} ）
- 不確かさ要因：
 - 干渉縞の間隔 ΔL
 - 空気の屈折率 n_{air}



$$L = L_0 + \Delta L$$

$$L_0 = m \frac{l_d}{2}$$

$$l_d = \frac{c}{n_{air} f_{rep}}$$



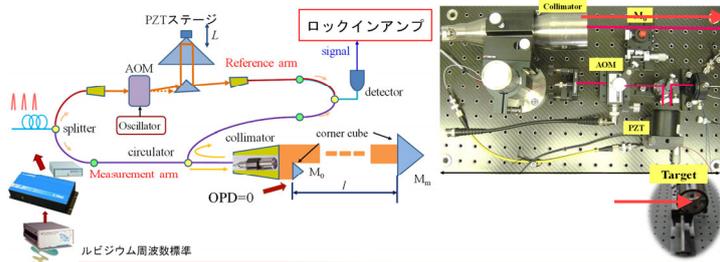
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

14

長距離の絶対距離測定 (400 mを10 μm)

- 光コムパルス干渉計の長距離絶対距離測定への応用
- 高エネ研（つくば）の加速器の設備で実験
- 実験条件： $l_d \approx 3$ m, $m = 269$, $l_0 \approx 403.2$ m
- 安定性：6.2 μm
- 空気、空気の温度が安定した環境
- スケールファクタ： 1.5×10^{-8}



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

15

2. 精密測定の基礎

- 2-1 長さ測定のトレーサビリティ
- 2-2 精密計測の条件と課題

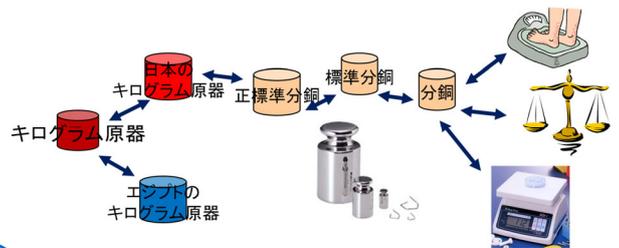


2-1 長さ測定のトレーサビリティ

トレーサビリティ
長さのトレーサビリティ体系
光周波数コムによる長さの基準

トレーサビリティ (traceability)

- 個々の校正が測定不確かさに寄与する、文書化された切れ目のない校正の連鎖を通して、測定結果を計量参照に関連付けることができる測定結果の性質。
 - 測定不確かさ：測定誤差の評価
 - 校正の連鎖：比較の連鎖
 - 計量参照：国際標準



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

18

長さのトレーサビリティ

- メートルの定義 (1983, BIPM)
 - 真空中で1秒間の299,792,458分の1の時間に光が進む行程の長さ
- 光周波数コム (不確かさ: 10^{-13})
- ヨウ素安定化レーザー (不確かさ: 10^{-10} - 10^{-11})
- レーザ測長機 (不確かさ: 10^{-8} - 10^{-9})
- ブロックゲージ
- 標準尺
- 測定機器, ものさし



光周波数コム



ヨウ素安定化レーザー



HP (Hewlett Packard) レーザ測長機



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

19

光周波数コムが長さの特定標準器 (2009年)

- 日本の計量法に定められた長さの国家標準 (特定標準器)
 - よう素安定化ヘリウムネオンレーザーから光周波数コムへ変更
 - 波長 (真空中) が従来に比べ300倍高精度化された
 - 従来の波長 (633 nm) に加えて, これまで難しかった光通信帯の波長 (1.5 μm) などの波長にも適用が可能
- 超短光パルスレーザーによる「光周波数コム」
 - 米ホール博士と独ヘンシュ博士が2005年ノーベル物理学賞
 - 光周波数コムを用いると, 広い範囲の波長に対して波長標準を設定できる.
 - 不確かさを大幅に低減できる



NMIJホームページ



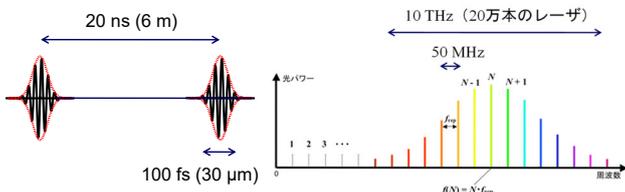
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

20

光周波数コム

- モード同期レーザー
 - 超短光パルスレーザー (時間領域), 広帯域かつ櫛状のスペクトル (周波数領域) を持つ光
 - モード同期レーザーの超短光パルス列は, 繰り返し周波数 (f_{rep}) で決まる間隔を持った細いスペクトル成分 (モード) を持つ
 - 繰り返し周波数 f_{rep} を原子時計などに同期できる



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

21

トレーサビリティのまとめ

- 測定の結果が正しいことを示すには, トレーサビリティが必要.
- トレーサビリティでは, 以下の2つが重要
 - 測定結果を比較する「比較の連鎖」
 - 測定結果を評価する「測定の不確かさ」
- 質量は, キログラム原器をもとにした, 比較の連鎖が各国でできている (現在は質量の定義はプランク定数)
- 長さは, 以下の階層で比較の連鎖ができている
 - メートルの定義 (光の速度)
 - 光コムレーザー
 - レーザ測長機
 - ブロックゲージ
 - スケール
 - 光コムレーザーでは, 直接的にトレーサビリティを確立できる



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

22

2-2 精密計測の条件

精密計測の条件: 寸法測定

アッペの原理

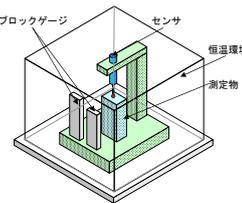
比較測定 (コンパレータ)

測定物形状の影響

温度環境の影響

精密計測の条件: 寸法測定

- 寸法測定における精密計測の条件
 - 絶対測定より基準との比較測定
 - 恒温室で高精度な形状を持つ機械部品の1次元的な寸法を測定
 - 高分解能なセンサをアッペ原理にあうように配置
 - 2個のブロックゲージによりセンサの拡大率を校正
 - 測定物をブロックゲージとの比較測定
 - 温度変化や測定対象の形状は問題にならず
 - センサ: 短時間, 狭い範囲の直線性と高分解能があればよい
- 精密測定の大3大発明
 - アッペの原理 1890年 ドイツのアッペ
 - ブロックゲージ 1896年 スウェーデンのヨハンソン
 - 恒温室 (20°C) 1924年 米国のNBS
 - 精密測定の大3大条件
 - センサは短時間の安定性
 - 狭い範囲での直線性がある
 - 測定対象の形状精度が高い



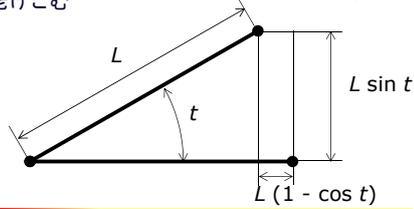
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

24

アッペの原理 (1)

- 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)
- Ernst Abbe, 1840-1905 founder of the Carl Zeiss
 - 回折限界の式もアッペによる
 - 1889年：カールツァイス財団が設立、1日9時間労働、有給休日、年金などを実現
 - 当時のドイツの工場労働者は1日14～16時間労働、40歳で老人のように老けこむ



2022年2月18日

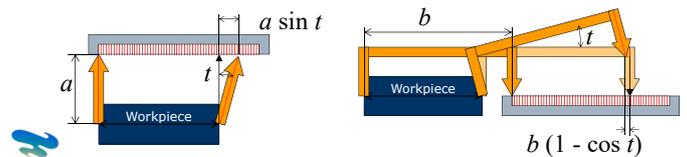
精密測定-知的ナノ計測学

25

アッペの原理 (2)

- 計算例
 - $a = 10 \text{ mm}$
 - $b = 100 \text{ mm}$
- t が小さい場合はアッペの原理を満たすほうが、誤差が小さい

t (rad)	t (deg)	$a \sin t \approx a t$ (nm)	$b(1 - \cos t) \approx b t^2 / 2$ (nm)
0.0001	0.006	1	0.0005
0.001	0.057	10	0.05
0.01	0.573	100	5
0.1	5.730	1000	500
1	57.300	10000	50000



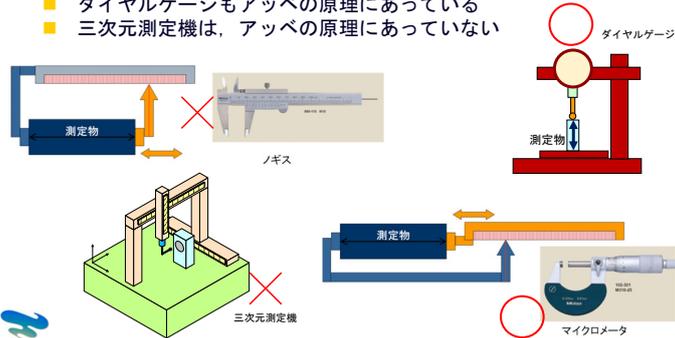
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

26

アッペの原理 (3)

- 測定機器 (スケールと測定物の関係)
 - ノギスとマイクロメータでは、マイクロメータがアッペの原理にあっているため高精度で測定が可能となる
 - ダイヤルゲージもアッペの原理にあっている
 - 三次元測定機は、アッペの原理にあっていない



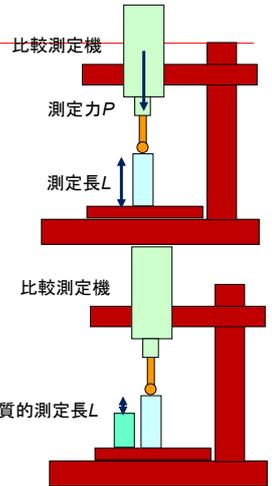
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

27

比較測定 (コンパレータ)

- 比較測定
 - アッペの原理にあっている
 - 実質的な測定長を短くできる
 - 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しやすい
- コンパレータ
 - 機械式：ダイヤルゲージなど
 - 空気式：空気マイクロメータ
 - 光学式、デジタル式
- 誤差要因
 - スタンドのたわみ、傾き
 - 測定力による変形
 - 温度
 - 比較測定で打ち消される要因が多い



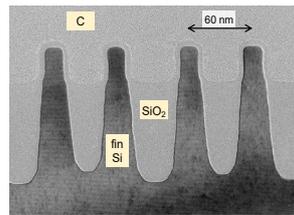
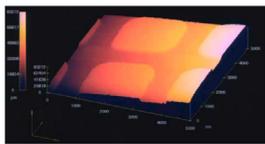
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

28

測定物形状の影響

- 測定物形状の影響
 - ナノメートルの段差標準用に作られたアーティファクトの例
 - 段差量 100 nm に対して表面のばらつきが 1 nm 程度 (10^{-2})
 - 50 mm のブロックゲージの平面度はK級では $0.05 \mu\text{m}$ (10^{-6})
 - 4桁以上の寸法と形状精度の比率が悪くなっている
 - 形状精度が寸法に対して充分よいという条件が成り立たない
 - 測定物の形状の影響による不確かさが最大となる



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

29

温度環境の影響 (1)

- 温度補正
 - 測定物の寸法は、JIS B0680 (ISO 1) (製品の幾何特性仕様及び検証に用いる標準温度) によって、 20°C における寸法と定義されている。
 - 20°C 以外の測定では温度補正が必要となる。
- 温度補正による不確かさ
 - 温度測定の不確かさと熱膨張係数の不確かさにより、不確かさが生じる。



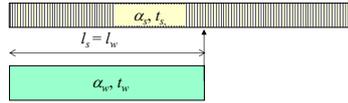
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

30

温度環境の影響（2）：温度補正

- 温度の影響
 - 測定物の寸法はJIS B0680によって、20°Cにおける寸法と定義されている
 - スケール：読み l_{s20} 、熱膨張係数 α_s 、温度 t_s 、温度 t_s での寸法 l_s
 - 測定物：定義寸法 l_{w20} 、熱膨張係数 α_w 、温度 t_w 、温度 t_w での寸法 l_w
 - 測定では、 $l_s = l_w$
 - 温度補正が不要な条件
 - 全ての温度が20°C
 - 温度が等しく、熱膨張係数も等しい



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

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

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

2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

31

温度環境の影響（3）：温度補正の不確かさ

- 温度補正の不確かさ：20°C以外での測定では温度補正が必要
 - 温度測定の不確かさと熱膨張係数の不確かさによる
 - 25°Cで100 mmの鋼製の測定物の寸法測定をする場合
 - 温度測定の不確かさ：0.1°C → 25°C ± 0.1°C
 - 温度測定の不確かさによる寸法測定の不確かさ
100 mm × 10 × 10⁻⁶ × 0.1 = 0.1 μm
 - 熱膨張係数の不確かさ：1 × 10⁻⁶ → 10 × 10⁻⁶ ± 1 × 10⁻⁶
 - 熱膨張係数の不確かさによる寸法測定の不確かさ
100 mm × 1 × 10⁻⁶ × (25 - 20) = 0.5 μm
この不確かさは25°Cで測定する限り、補正することのできない
- 20°Cの恒温室が温度補正の不確かさを減らすのに有利になる



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

32

機械的な計測と熱膨張率

- 機械的な計測における熱膨張の影響
 - 機械的な計測では、スケールやアーティファクトの寸法を利用するので、熱膨張の影響を直接受ける
 - 固体のCTE：単位 1/°C
 - 一般的な材料では、10%以上の不確かさを持つ
 - 鉄・鋼：11 × 10⁻⁶
 - アルミ：23 × 10⁻⁶
 - ポリエチレン：150 × 10⁻⁶
 - ゼロデュア（ガラスセラミックス、ショット）：< 0.007 × 10⁻⁶
 - ネクセラ（セラミックス、黒崎播磨）：< 0.03 × 10⁻⁶
 - 熱膨張の大きさ：1 mの材料が1°C変化した場合
 - 鉄・鋼：11 μm、アルミ：23 μm
 - ポリエチレン：150 μm
 - ゼロデュア：< 0.007 μm (7 nm)、ネクセラ：< 0.03 μm (30 nm)



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

33

光学的な計測と空気の屈折率

- 光学的な計測における温度の影響
 - 光の速度：毎秒30万キロメートル（地球を7周半）
 - 真空中の光の速度 c は定数：299,792,458 m/s ≈ 3 × 10⁸ m/s
 - 空気中の光の速度は： $c_a = c/n$ (n ：空気の屈折率)
 - 光による距離計測では、光の速度または波長を利用するため、**空気の屈折率の影響**を直接受ける。
 - 空気の屈折率 n ：1.000270くらい
 - Ciddorの式（実験式）：波長、温度、気圧、湿度、CO₂濃度から
 - 温度1°C：-1 × 10⁻⁶
 - 気圧1 hPa：0.3 × 10⁻⁶
 - 湿度10%：-0.1 × 10⁻⁶
 - 屈折率による長さの影響：1 mの光路の場合
 - 温度1°C：-1 μm → 鉄のスケールより一桁影響が小さい
 - 気圧1 hPa：0.3 μm
 - 湿度10%：-0.1 μm



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

34

精密測定の実験条件のまとめ

- 精密測定の実験条件
 - アップの原理、ブロックゲージ、恒温室（20°C）の3つの発明に基づき、比較測定を行うことで簡単に超精密測定が可能となった
- 精密測定に必要な要因を検討した
 - アップの原理
 - 比較測定（コンパレータ）
 - 測定物の形状の影響
 - 温度環境の影響：超精密測定では、温度補正の不確かさの影響が大きい
- 精密測定の実験条件を検討することで、精密測定の基本的な概念が明確になる。



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

35

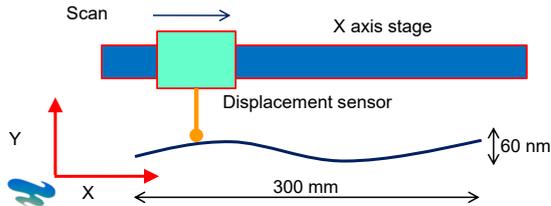
3. 走査型形状測定

- 3-1 走査型形状測定と誤差分離手法
- 3-2 マルチプローブ法によるミラー形状測定



3-1 走査型形状測定と誤差分離手法

- 高精度平面鏡の形状測定
 - 平面鏡，長さ：300 mm，平面度： $\lambda/10$ （約 60 nm），滑らかな面
 - 測定精度：1 nm
- 測定システムの条件
 - 変位センサー：測定範囲 > 60 nm，精度1 nm，
 - 走査ステージ（X方向）：
 - 走査範囲 > 300 mm，位置決め精度 < 0.1 mm
 - Y方向の真直度 < 1 nm，ピッチング誤差 < 10 μrad → 難しい



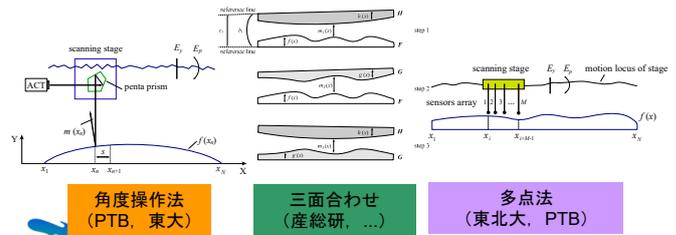
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

37

走査ステージの誤差を分離する方法

- 典型的な3つの誤差分離手法
 - 角度走査法（Deflectometry）：ペンタプロズムとオートコリメータによる走査
 - マルチステップ法：複数の基準か複数の位置，三面合わせ，反転法
 - 多点法（マルチプローブ法）：複数センサーによる



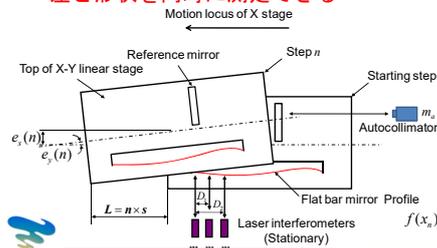
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

38

マルチプローブ法（1）

- 走査ステージの誤差（自由度）：2次元では3自由度
 - X方向の位置決め誤差→測定面の傾斜が小さいと影響が少ない
 - Y方向の真直度誤差→2つ以上の変位センサーで測定できる
 - Z軸回りの回転誤差（ピッチング誤差またはヨーイング誤差）→オートコリメータで測定できる
- 2つ以上の変位センサーとオートコリメータで走査ステージの誤差と形状を同時に測定できる



2022年2月18日

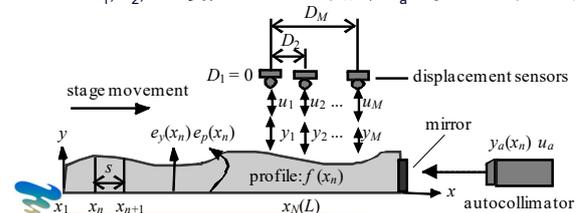
精密測定-知的ナノ計測学

39

マルチプローブ法（2）

- 基本構成
 - 複数の変位センサーと1つのオートコリメータ
 - D_1, D_2, \dots : 変位センサーの位置， s : 走査間隔
- 求める量 X

$$u_j(i) = f(x_i + D_j) + e_y(i) + D_j e_p(i) + c_j$$
 - 測定形状 f
 - 走査ステージの変位誤差 e_y ，走査ステージのピッチング誤差 e_p
- センサー出力 Y
 - u_1, u_2, \dots : 変位センサーの出力， u_a : オートコリメータの出力



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

40

連立方程式を最小二乗法で解く（1）

- 線形連立方程式を最小二乗法で解く
 - 理論的に最高の精度で求まる
 - 不確かさが誤差伝播によって簡単に求まる
- Y : センサー出力のベクトル
 - 変位センサーの値およびオートコリメータの値
$$Y = [u_1(x_1), \dots, u_1(x_{N-1}), u_2(x_1), \dots, u_2(x_{N-1}), u_a(x_1), \dots, u_a(x_{N-1})]^T$$
- A : ヤコビ行列
 - センサー出力と求める量の関係式から理論的に求められる
 - 基本式の係数を並べたものにある
- X : 求める量のベクトル
 - 測定形状，走査ステージの変位誤差およびピッチング誤差，センサーの0点のオフセット量
$$X = [f(x_1), \dots, f(x_{N-2}), e_y(x_1), \dots, e_y(x_{N-1}), e_p(x_1), \dots, e_p(x_{N-1}), c]^T$$

2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

41

連立方程式を最小二乗法で解く（2）

- 最小二乗解
 - センサー誤差が全て一定だと

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad X = (A^T S^{-1} A)^{-1} A^T S^{-1} Y$$
 - S : 誤差行列，センサーの測定誤差（分散，共分散）
 - σ_1 : 変位センサー1の誤差， σ_2 : 変位センサー2の誤差
 - σ_a : オートコリメータの誤差
- 求める量 X の不確かさ（分散，共分散）は誤差伝播で計算できる
 - S_x : X の不確かさ
 - この推定には，センサーの出力 Y は必要ないので，測定する前に不確かさの推定ができる
$$S_x = A^T S^{-1} A$$
- はじめての精密工学「精密測定における最小二乗法の使い方」，精密工学会誌 Vol.76, No.10, 2010

2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

42

マルチプローブ法のまとめ

- 走査型形状測定における誤差分離法について説明した
 - 角度走査法 (Deflectometry), マルチステップ法, 多点法 (マルチプローブ法)
- マルチプローブ法
 - 長所: 機上計測, 多くの構成が可能, 多くの応用範囲
 - 短所: 多くのセンサーが必要
 - データ処理: 連立方程式を最小二乗法で解く手法が優れている
- 最小二乗法
 - 多くの構成に対応できる
 - 誤差が理論的に最小になる
 - 不確かさの推定が簡単にできる



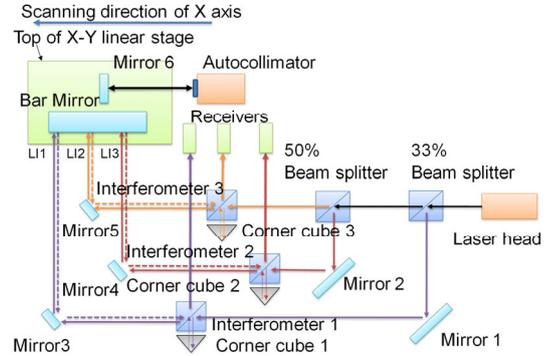
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

43

3-2 マルチプローブ法によるミラー形状測定

- 3つのレーザ測長機と1つのオートコリメータ



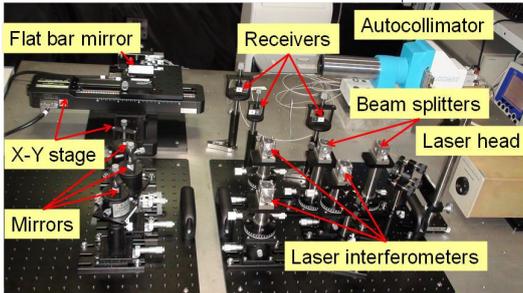
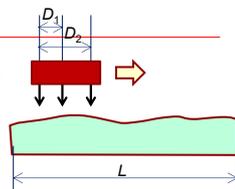
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

44

実験装置の構成

- ステージ: ポールねじによる低価格なもの
- 平面鏡 (バーミラー)
 - 平面度: λ (630 nm), 長さ L : 300 mm
- D_1, D_2 : 10 mm, 21 mm, $s = 1$ mm



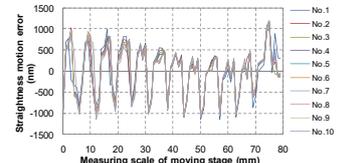
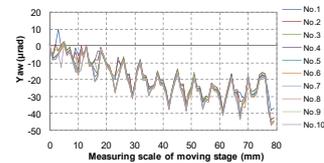
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

45

走査ステージのヨーイング誤差と真直度誤差

- 10回の繰り返し測定
 - ヨーイング誤差
 - 範囲: $-50 \mu\text{rad}$ から $+10 \mu\text{rad}$
 - 繰り返し: 最大 $10 \mu\text{rad}$
 - 垂直方向の真直度誤差
 - 範囲: $\pm 1 \mu\text{m}$
 - 繰り返し: 最大 500 nm
 - ステージの繰り返しはよくない



Xステージのヨーイング誤差

Xステージの垂直方向の真直度誤差



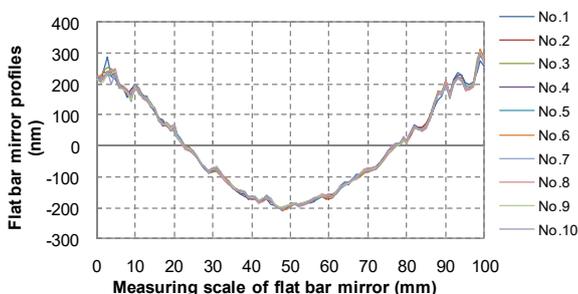
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

46

平面鏡の形状測定結果 (1)

- ステージ精度は悪いが, 平面鏡の形状測定は繰り返しが高い.
 - $\pm 10 \text{ nm}$ 程度 of 繰り返し



平面鏡の形状 (10回の繰り返し測定)



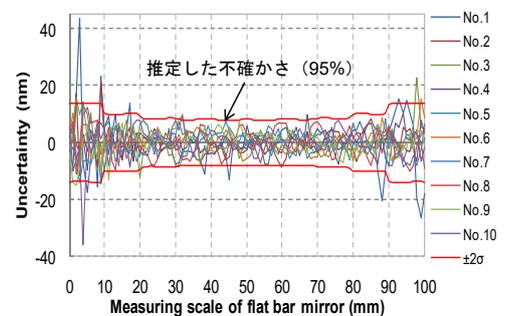
2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

47

平面鏡の形状測定結果 (2)

- 10回の測定の平均形状からの偏差
 - 理論的な不確かさ推定値 (95%) によく入っている
 - 中心部分は $\pm 10 \text{ nm}$ 程度 of 不確かさ



10回の測定の平均形状からの偏差



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

48

走査型形状測定のみとめ

- 走査型形状測定における2つの問題
 - ナノメートル計測では走査ステージの誤差が大きい
 - 誤差分離のための複雑な計測では、測定の不確かさの推定が難しい
- 上記の問題の解決方法を提案：
 - 多点法に最小二乗法によるデータ処理を適応する
 - 多点法により走査ステージの誤差を分離して、形状が測定できる。
 - 最小二乗法と誤差伝播により、測定の不確かさが推定できる。
- 3点法による走査型形状測定実験を実施
 - 計算手法の有効性を確認
 - 不確かさ推定の妥当性を確認



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

49

まとめ



まとめ：知的ナノ計測技術の体系化

- ものづくりの高度化を支える「精密測定」では、知的ナノ計測技術の体系化が必要
- 精密測定：ものづくりを支える知的ナノ計測技術の体系化
- 体系化の方法
 - 学会活動、人的ネットワークによる知識の共有
 - 知的計測手法
 - ナノメートル三次元計測
 - ナノメートル計測標準
 - ものづくりへの展開

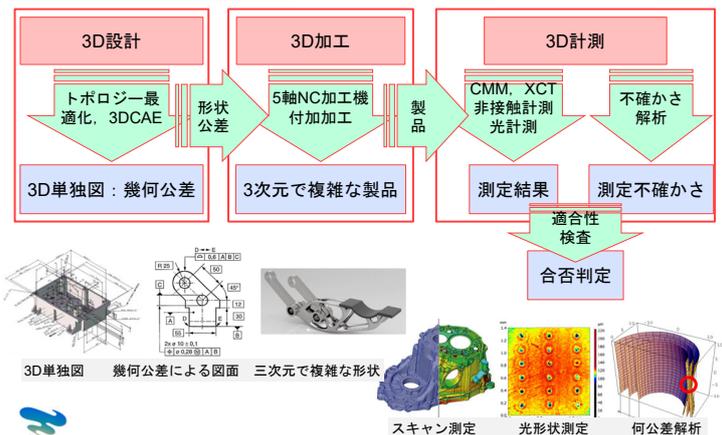


2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

51

三次元で複雑な製品の設計、加工、計測



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

52

今後の研究：三次元計測における不確かさ

- 三次元計測における不確かさ推定の必要性
 - 三次元で複雑な機械部品の測定が不可欠である
 - 測定不確かさ
 - 部品の検査（合否判定）：測定不確かさを考慮する
 - 検査不確かさ
 - 三次元測定機の受入検査（合否判定）：検査不確かさを考慮する
- 測定不確かさ
 - 三次元測定機の測定不確かさ：繰り返し、測定機器、環境などを考慮し、測定戦略に基づいて評価する
 - 合否判定：厳密に行うか、経済性を重視するか
 - 光学測定（非接触測定）への拡張：多くの測定点、異常値の特性
- 三次元測定機の検査不確かさ
 - 検査の方法がしっかり決まっていれば、主要因は標準器となる
 - 光学測定（非接触測定）への拡張：種々の非接触測定機器の検査への対応



2022年2月18日

精密測定-知的ナノ計測学

53

ご清聴ありがとうございます

東京大学 高増潔

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



次回研究会案内（第1回）

年間テーマ「画像応用技術、AIブームのその先へ」

1. 日 時 2022年5月20日（金） 午後2時より
2. 場 所 オンライン
3. 話題提供 テーマ「ロボットビジョン・FA」
 - 1) 講 演「未定」
 - 2) 研究発表「未定」
 - 3) 事例紹介「未定」
 - 4) 報 告 「動的画像処理実利用化ワークショップDIA2022報告」
岡山県立大学 滝本 裕則 実行委員長
静岡大学 大橋 剛介 プログラム委員長

主担当: 秋月 秀一 (中京大学)

担当: 小室 孝 (埼玉大学)、青木 公也 (中京大学)、駒野目 裕久 (池上通信機)、
清水 毅 (山梨大学)、塚田 敏彦 (愛知工業大学)、橋本 学 (中京大学)、
村上 俊之 (慶應義塾大学)

アドバイザー: 川西 亮輔 (エクサウィザーズ)

次々回以降の研究会案内

開催日時等は下記の通りです。研究発表、事例紹介は募集中です。

各回の研究会テーマに関係ないご発表も歓迎致します。

詳細は各担当者あるいは事務局にお問い合わせ下さい。

第2回 7月15日（金）テーマ「人工知能・データサイエンス」

主担当: 齋藤 剛史 (九州工業大学)

担当: 吉村 裕一郎 (富山大学)、姉崎 隆 (沖縄工業高等専門学校)、佐藤 惇哉 (岐阜大学)、
佐藤 雄隆 (産業技術総合研究所)、戸田 真志 (熊本大学)、
中島 慶人 (電力中央研究所)、三和田 靖彦 (YYC ソリューション)、
横田 秀夫 (理化学研究所)、野口 稔 (日立ハイテクソリューションズ)

アドバイザー: 片岡 裕雄 (産業技術総合研究所)

第3回 9月16日（金） テーマ「3次元計測・3次元理解」

主担当: 青木 広宙 (千歳科学技術大学)

担当: 青山 忠義 (名古屋大学)、梅田 和昇 (中央大学)、笹谷 聡 (日立製作所)、
寺林 賢司 (富山大学)、林 純一郎 (香川大学)、山下 淳 (東京大学)、
寺田 賢治 (徳島大学)、恩田 寿和 (明電舎)

アドバイザー: 中村 明生 (東京電機大学)

第4回 11月18日（金） テーマ「人センシング・動作行動認識」

主担当: 飛谷 謙介 (長崎県立大学)

担当: 大橋 剛介 (静岡大学)、明石 卓也 (岩手大学)、滝本 裕則 (岡山県立大学)、
竹内 駿 (富士通)、永田 毅 (みずほリサーチ&テクノロジーズ)、
中野 宏毅 (日本IBM)、廣瀬 誠 (松江工業高等専門学校)、
藤原 孝幸 (北海道情報大学)、望月 貴裕 (NHK 放送技術研究所)、
門馬 英一郎 (日本大学)

アドバイザー: 青木 義満 (慶應義塾大学)

第5回 1月20日（金） テーマ「検査・異常検知」

主担当: 森野 比佐夫 (ファースト)

担当: 石山 塁 (日本電気)、浅野 敏郎 (広島工業大学)、安部 雄一 (日立ハイテク)、
渋谷 久恵 (日立製作所)、菅野 純一 (ヴィスコ・テクノロジーズ)、野村 安國 (ディスコ)、
広瀬 修 (住友化学)、糊澤 信 (AGC)

アドバイザー: 加藤 邦人 (岐阜大学)

画像応用技術専門委員会

全体委員会特別講演報告 Vol. 37 特別講演

発行所 公益社団法人 精密工学会
画像応用技術専門委員会 事務局
〒169-0073
東京都新宿区百人町2-21-27
アドコム・メディア（株）内
TEL 03-3367-0571
FAX 03-3368-1519
E-mail : iaip@adcom-media.co.jp
<http://www.tc-iaip.org/>