

《第6回》

長さ(m)についての基礎解説と最新動向

高辻 利之 (計測標準研究部門)

1. はじめに

長さ(メートル)は7つある基本単位のうちの1つであり、数少ない「目で見える」単位である。計量標準に関する国際条約がメートル条約と呼ばれることからわかるように、長さ計測は長い歴史を持ちまたその中で重要な役割を担ってきた。現代においてもその重要性は疑うべくも無く、自動車や半導体などのものづくり産業において特に重要である。以下、長さの歴史と定義、重要な測定量、最近の話題等について解説する。

2. 長さの定義の変遷

古来、計量標準はその時の権力者が有する特権の1つであった。経済活動を潤滑に動かし、適正な課税をして国を治めるために計量標準は不可欠であったからである。

計量標準の中でも長さは重要な量である。例えば古代エジプト時代には既に図1のものさしが使われていた。日本でも太閤検地の際に長さ標準の全国統一がなされ、その単位を使って課税の基礎となる土地の測量が行われた。



図1. 古代エジプト時代のものさし
(ルーブル美術館にて著者撮影)

現在の長さの単位であるメートルにつながる最初の重要な出来事は、18世紀末にフランスで行われた子午線の長さの測量である¹⁾。その結果により赤道から北極に至る子午線の長さの1000万分の1が1mと定義された。現在の技術を使って測った地球一週のがさが4万kmに非常に近い値であることは、この測量が極めて正確に行われたことを意味している。

同じ時期に日本では伊能忠敬による全国測量が行われている。彼の測量の真の目的は地球の大きさを知ることであったと言われている²⁾。同じ時期に日本とヨーロッパで同じことを考えて実行した人たちがいるという事実は非常に興味深い。

子午線の測量後100年近くかかって、ようやく長さを含めた計量標準を世界中で統一する気運が高まり、1875年にメートル条約が締結された。メートルは子午線の長さの測量結果を元に製作されたメートル原器の長さで定義された。

メートル原器はその役割を1960年に終え、メートルはクリプトンランプの波長をもとにした定義が変わった。その後2012年に、メートル原器は近代科学技術史において果たしたその役割の重要性を評価され重要文化財に指定された。



図 2. メートル原器を手に著者

メートルの定義は 1980 年にさらに改訂され、光の速度が一定であるとした相対性理論にしたがって「1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ」となった³⁾。

メートル原器と同時に作られたキログラム原器はまだ現役の標準として使用されている。そのような器物で実現される標準ではなく、基礎物理定数をもとにした定義に改訂する検討が多くの基本単位に関して現在行われている。長さは、基礎物理定数である光速 c に基づく定義をいち早く実現したためこの検討には無関係であり、定義は変えずに表現の改訂のみが予定されている

3. 長さの定義の実現法

3.1 長さの定義

現在の長さの定義で興味深いのは、光速という基礎物理定数をもとにして、時間を測定することにより長さが決まることである。当初独立であるかのように設定された 7 つの基本単位は、もはやお互いに独立ではない³⁾。

実は既に電気関係量も時間をもとに定義されている。これは、時間をもっとも高精度に決められる基本単位であるからである。現在の時間標準は原子時計によって実現されており、その精度は 15 桁程度である。

子午線の長さからメートルを定義する際にも、振り子の長さを基準にしてメートルを定義する案が一時期有力であった。200 年の時を経てようやく長さが時間をもとに定義されることになったわけである。なお、長さの定義に使われている 299 792 458 という 9 桁の数字は定義なので厳密 (exact) なものであり、小数点以下はない。あるいは小数点以下にゼロが無限に続くとも言える。

3.2 長さの定義にもとづいた長さ計測

定義にもとづいて長さを測定するためには、光の飛行時間 (time of flight、TOF と略される) を計測する必要がある。この原理を使って長さを測定する装置に、測量などに用いられる距離計がある。光の速度は非常に速いため、光パルスが発射されてから戻ってくるまでの時間は非常に短く、測定には高度なエレクトロニクス技術が要求される。

また、光の強度を変調して出射光と反射光の位相差を検出する方式のものもある。こちらも複雑なエレクトロニクスが必要であるため高価な装置であったが、近年急速な低価格化が進んでおり、現在距離計のほとんどはこちらの方式を採用している。

長さの定義は真空中での光の速度を用いているが、距離計はいずれの方式でも光が空气中を飛行するため屈折率の補正が必要である。

3.3 光コム

光速 c は、波長 λ と周波数 ν の積である。 c は定義値であるので、 λ と ν はどちらか一方が測定によって決まれば他方は計算できる。したがって光の周波数を測定すれば、長さ標準が実現できる。

つい最近まで、光の周波数を測定するのは困難であったが、近年この状況が一変した。光コム (櫛) という等間隔な周波数成分を持つ特殊な光を用いて精密な「光のものさし」を作る技術が開発された⁴⁾。今では、卓上の装置でだれでも周波数測定が行え、レーザの波長を求めることができる。

なお、光コムはそれ自身で長さ標準を実現するものではなく、時間標準と光の周波数をつなぐ装置である。現在、時間標準は 15 桁の精度の原子時計で実現されている。一方、光コム自体の精度は 18 桁以上あるので、今後時間標準の精度が向上すると長さ標準の精度も向上する余地がある。

3.4 Mise en Pratique

光コムを使えば容易に光の周波数が測定できるようになったが、容易と言ってもまだ研究室レベルのものである。レーザは物理的な原理に基づいて、増幅に使われる媒質に固有の周波数で発振しているため、レーザの使用者それぞれがレーザの周波数を測定する必要もない。

そこで、多くの種類の安定化レーザについて周波数、つまり波長、が測定されており、そのもっとも確からしい値が国際度量衡委員会（CIPM）によって勧告されている。MeP（Mise en Pratique）と呼ばれるリストで、ここに掲載されている波長は校正なしに使っても長さ標準へのトレーサビリティが確保される⁵⁾。なお、レーザの発明以前は水銀ランプが干渉計測に使われていたという歴史的経緯もあり、水銀ランプの波長も掲載されている。

ただし 3.6 で述べるように計量法においては光コム装置のみが特定標準器と指定されているため、計量法に基づくトレーサビリティの表明には MeP は使えない。

3.5 よう素安定化ヘリウム・ネオンレーザ

MeP に掲載されているレーザは、よう素分子の吸収線などにロックした安定化レーザである。このようなレーザは高価であるだけでなく干渉計測に適したものではない。実際の干渉計測にはゼーマン効果などを利用した簡易安定化レーザが使われている。なお、よう素安定化レーザの周波数安定度は 11 桁程度、簡易安定化レーザは 9 桁程度である。

MeP は安定化レーザの波長を記したものであるが、安定化していないレーザに関してもその発振波長は、それぞれのレーザに使われている媒質によって決定される。つまりレーザは光ってさえいけば、安定化レーザよりは劣るがある程度の波長の絶対値と安定性は保証される。

干渉計測にもっともよく使われるのは He-Ne レーザである。最近、MeP に未安定化 He-Ne レーザが掲載された⁶⁾。これは画期的であり、今後 He-Ne レーザは光ってさえいけば校正せずとも約 6 桁の精度が保証されたことになる。参考までに MeP による波長の勧告値は 632.9908 nm（真空中での値。空気中では約 632.8 nm。）、その不確かさは 95%信頼性で 3.0×10^{-6} である。

3.6 特定標準器

学術的には MeP に載っているかどうか、トレーサビリティが保証されているかどうかの判断基準になる。このように物理法則に基づいて定義されており、だれが作っても（現示するという）同じ値が得られる標準のことを *intrinsic standard* という。

国によっては *intrinsic standard* は国家標準として扱われている。ところが日本には計量法という法律があり、計量法は *intrinsic standard* を認めていない。それぞれの量についてただ 1 つの装置を指定し、それを国家標準（法律用語では特定標準器と呼ぶ）と定めている。

長さに関しては 2009 年までは「長さ用六百三十三ナノメートルよう素分子吸収線波長安定化ヘリウムネオンレーザ装置であって、独立行政法人産業技術総合研究所が保管するもの」と経済産業省告示によって指定されていた。日本における長さのトレーサビリティ体系の頂点にはこのレーザが位置していた。

この体系で不便であった点は、633 nm 近傍の波長しか校正ができず、したがってトレーサビリティが確保できないことであった。ところが上に述べたように、光コムの発明によりあらゆる光の周波数が校正できるようになり、またその精度も安定化レーザより高い。そこで 2009 年に特定標準器は、「協定世界時に同期した光周波数コム装置であって、独立行政法人産業技術総合研究所が保管するもの」に変更された。



図 3. 産総研が保有する長さの特定標準器・光コム

4. 長さ計測におけるトピック

4.1 レーザ干渉測長機

レーザ干渉測長機は一般的に高価であり、またトレーサビリティ体系の上位に位置しているという認識も影響して、測定精度が過大評価されていることが多い。もちろん適切かつ注意深く使えば非常に高い精度が得られる装置であるが、様々な誤差要因があり、カタログ通りの精度を達成することは容易ではない。

通常のレーザ干渉計に利用される安定化レーザ自体の安定度は 9 桁程度であるが、実際の長さ測定においては空気の乱れに大きな影響を受け、理想的な測定環境においても得られる精度はせいぜい 7 桁である⁷⁾。工場などの悪環境下では 5 桁程度、つまり 1 m に対して 10 μm に落ちるといった方が安全である。

測定長さが長くない場合には、波長の安定度以外の要因が支配的な誤差になる。測定された光信号の位相を電氣的に分割読み取りするので、干渉計の見かけの分解能はいくらでも上げられる。しかしながら、ヘテロダイン方式の場合には光学系の不完全さに起因する偏光のクロストークなどにより、またホモダイン方式の場合には光検出器のゲインのばらつきなどにより、本来きれいな正弦波を描くはずの干渉信号に歪みが生じる⁸⁾。この誤差は干渉計の測定単位である 2 分の 1 波長毎に周期的に表れるためサイクリックエラーと呼ばれ、装置によるが大きいものでは数 nm ある¹²⁾。

4.2 ブロックゲージ

レーザ干渉測長機は長さの「測定器」である。それに対して、長さなどの量そのものを示す実物体を「実量器」というが、なじみのない用語であり、通常はゲージと呼ばれている。長さの世界で代表的なものにブロックゲージがある。

ブロックゲージを高精度に校正するには干渉計が使われる。レーザ干渉測長機のように干渉縞の数を数える「計数法」ではなく、「合致法」が用いられる。あまり高精度でないブロックゲージの校正では、電気マイクロメータを使って、光波干渉によって校正されたブロックゲージとの機械的な比較測定が行われる⁹⁾。

ブロックゲージは長さの実量器としてもっとも高精度なため、様々な測定器の校正に利用されてきた。しかしながら、最近の超高精度三次元測定機の校正に用いるのには十分な精度とは言えなくなってきた。その最大の原因はブロックゲージの熱膨張係数 (CTE) の不確かさである。鋼の CTE は 11.5 ppm 程度と言われているが、実際にはもっと小さいことが多く、さらにロット毎のばらつきもある。最近では CTE を実測したブロックゲージも市販されている。CTE の不確かさを小さくするもう一つの方法は、CTE 自体を小さくする方法であり、比例して CTE の不確かさも小さくなる。CTE がほぼゼロのガラスやセラミックを使ったブロックゲージも市販されている。

ブロックゲージの長さは、経年変化することがあり、多くの場合製作してからの時間と共にその変化量は小さくなる。低熱膨張材料製のブロックゲージは歴史が浅いためその振る舞いが未知であり、定期的に再校正するなど注意を要する¹⁰⁾。

4.3 非接触三次元測定機

三次元測定機は、研究・開発現場だけでなく、製造現場においても不可欠な装置である。従来、ルビー球が先端についた接触式プローブを使って測定をしていたが、高精度である代わりに測定が非常に遅いという欠点があった。したがって、CAD で設計した部品の形状を測定し設計図面と照合する、あるいは複雑な形状の部品をリバースエンジニアリングのために測定するといったアプリケーションにおいては、三次元測定機で得られる離散的な点の集合では不十分になってきた。

そこで、縞投影やレーザスキャンを使ったプローブヘッドを持つ非接触三次元測定機の使用頻度が増している。非接触という利点も大きいですが、それにも増して何百万もの測定点を一瞬で測定することができる高速性と測定結果の稠密性が産業界での要求に合致している。従来型の三次元測定機が「点」を測定するのに対して、実質的に「面」の測定が可能である。

非接触三次元測定機は測定原理が多岐に渡っている。また、縞プロジェクターとテレビカメラ、そしてコンピュータさえ集めれば測定精度はともかくとして測定機が作れるため、非常に多くのメーカーが市場に参入している。価格も様々であり、カタログに記載されている精度表示のしかたも様々であるため、ユーザは購入に際してとまどうことが多い。さらに購入してから自分の思っていた機能や性能が発揮されないこともある。このような状況を改善すべく、産総研ではメーカー及びユーザと一緒にコンソーシアムを作り、精度評価法の標準化を進めている。具体的には、産総研提案の JIS B7441:2009「非接触三次元測定機の受入検査及び定期検査」、及び産総研がプロジェクトリーダーとなって制定した ISO 10360-8:2013「製品の幾何特性仕様 (GPS) - 座標測定システム (CMS) の受入検査及び定期検査 - 第 8 部: 光学式距離センサ付座標測定機」である。

4.4 X線CT

4.3で三次元計測のトレンドは、点測定から面測定に移っていることを述べた。そして近年その流れは測定対象の内部測定に向かっている。具体的には、X線、超音波、テラヘルツ波などを使うものであるが、その中でもX線CTはすでに産業界で広く利用されており、今後の研究開発や標準化の要望が大きい。

元々X線CTは医療用の機器として発明され利用が進んできたが、やがてその応用範囲は工業製品にも広がってきた。これらの応用はいずれも主として対象を「観察」するものであったが、近年「計測」に用いることができるほど精度が向上したDimensional CTと呼ばれる装置が登場した。

図4に産総研で開発したX線CTの外観と内部の構造を示す。三次元測定機と同様の石製のメトロロジーフレームに高精度な回転テーブルと移動機構が取り付けられている。さらにX線源とフラットパネルディテクタで構成されている。



図4. 産総研で開発したDimensional X線CTの外観と内部の構造

この装置の性能の一端を図5に示す。上図は球の直径を時間とポジションを変えて繰り返し測定した結果であり1 μm 以内に収まっていることがわかる。下図はフォレストゲージと呼ばれる球を空間上に多数配置したゲージを測定した結果であり、球間距離が絶対値で10 μm 以内で測定できている。

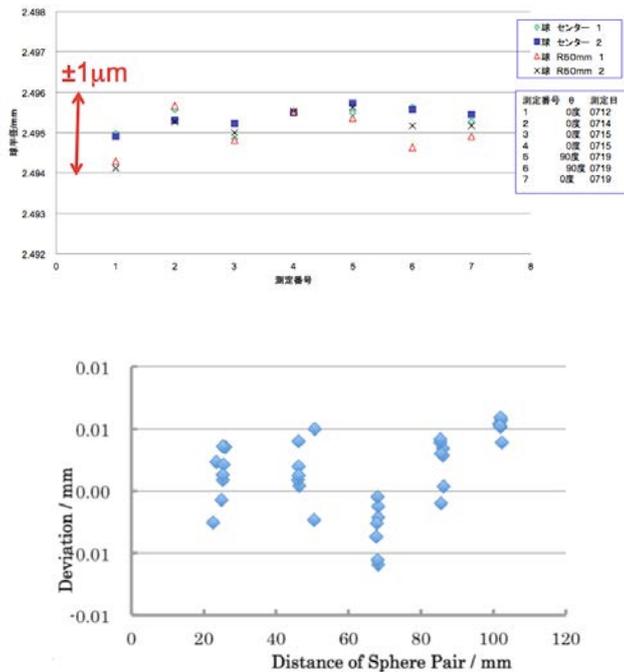


図5. Dimensional X線CTによる測定結果
繰り返し誤差(上図)と絶対誤差(下図)

4.5 ナノ長さ標準

ナノテク産業に必要な標準は数多くあり、長さ計測も例外ではない。例えば、半導体製造における品質管理には計測性能が保証された走査型電子顕微鏡 CD-SEM が不可欠である。半導体の製造がアジアの諸外国に押される中で、CD-SEM に関して日本は優位を保っておりその世界シェアも非常に高い。

CD-SEM の試料チャンバー内には校正済みのマイクロスケールが搭載されており、それを定期的に測定することにより正確な長さ測定が行える。現在 100 nm の周期構造を持つマイクロスケールが市販されており、計量法登録事業者制度に基づいてその値を校正する業者も存在する。その校正原理は波長 193 nm の紫外線を試料表面に照射して、スケールにより回折された光の回折角を測定するものである。さらに 50 nm のマイクロスケールも市販されているが、これだけ小さいピッチになると光を使つての測定は不可能であるため、X 線の回折を使つて測定を行っている。

ここで 100 nm のスケールの校正だけが計量法に基づいて行われると記したのは、X 線の波長と先に述べた特定標準器の間のトレーサビリティが確立できないことによる。MeP に載っている光の波長はいずれも、現在のナノテク技術にとっては長すぎて使えない。そこでもっと短い長さ標準を確立する研究と、平行してそれらを計量標準として確立する努力が続けられている。

国際度量衡委員会 (CIPM) 長さ諮問委員会 (CCL) で提案されているナノ長さ標準はいずれも、校正を必要とせずに自然現象に基づいて長さ標準が実現される intrinsic standard である。具体的には、シリコンやサファイヤ結晶の表面に形成された原子ステップなどが提案されている。

ナノ計測におけるもう一つの難しい点は、対象のサイズが極小であることからプローブとの相互作用が顕著なことである。結果として測定原理により測定値が異なるこのような現象を method divergence と呼ぶ。

具体的な例としてナノ粒子の直径を異なる測定原理を使つて測定した例を図 6 に示す。ヨーロッパの 6 つの国立標準研が 5 種類 7 台の測定機を使つて、10 nm から 200 nm のナノ粒子の直径を測定した結果である。¹¹⁾この図から様々なことが読み取れるが、顕著な現象として DLS (Dynamic Light Scattering) を使つた結果は常に他の結果よりも大きくなっていることがわかる。これは DLS の測定結果が間違っていることを意味しておらず、測定対象とプローブとの相互作用に加えて、測定対象の状態や定義が必ずしも同じでないということから発生している。

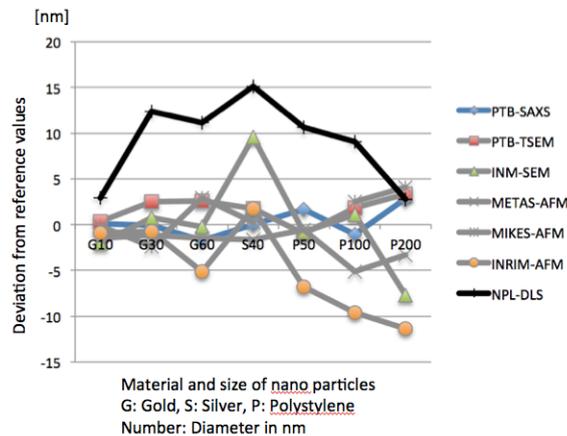


図 6. ヨーロッパの国立標準研によるナノ粒子の直径測定に関する国際比較の結果(参考文献 11 より)

4.6 幾何偏差量測定の不確かさ

最後に、計測法ではないが長さ関連量計測に関して重要な課題について述べる。

平面度や真円度など理想的な形状からの偏差を測定する偏差量計測について、その不確かさの考え方がまだ確立されていない。

真円度の場合、回転テーブルに試料を載せて、試料を回転させながら表面形状の凹凸を測定する、その結果を円に最小二乗近似し、その円からの最大の凹凸量を真円度と定義している。凸量から凹量を引き算するので、結果は必ず非負になる。計測の不確かさに関するガイドブック GUM では、このような片側だけの値をとる量の扱いについて明確にされていない。

球形の標準器は、三次元測定機の校正用 (正しくはプローブ設定用) として必ず用いられる。カタログに書

かかれている三次元測定機の精度は、この球の形状偏差に大きく左右される。1 μm と校正値の付いた球を測定した結果が 1 μm であった場合、三次元測定機の精度は 0~2 μm のどこかにあるとしか言えない。球の形状偏差とその測定の不確かさ、そして測定値をどのように扱うかは、三次元測定機の受け入れ検査の可否に関わるので ISO でも議論が続いているが、この扱いについては未だに結論は出していない。

平面度の場合も、同様に複雑である。絶対計測する測定法の場合、最小二乗近似する対象が平面であるだけで、基本的に真円度と同じ扱いが可能である。しかしながらほとんどの平面度測定は比較測定で行われる。市販の平面度測定機のほとんどには参照平面が組み込まれており、それと試料との比較測定が行われる。参照平面自体にも平面度誤差があり、理想的な平面ではない。その平面誤差をマップとして持っていれば、測定結果から誤差マップを差し引くことにより、より正しい形状が得られる。

ところが市販の大半の平面度測定機の説明書には、精度 $\lambda/20$ とだけ書かれている。この $\lambda/20$ の大半の要素は参照平面の形状偏差であるが、その形状マップはほとんどの場合メーカからは提供されない。形状マップが提供されれば、その測定機の精度は形状マップそのものが持つ誤差に取って代わられるので、さらに高い精度の測定機になりうるが実際には形状マップは提供されない。したがってユーザが知りうるのは、参照平面の形状が少なくとも $\lambda/20$ よりもよいということだけである。このような偏差を持った参照平面と試料との比較測定をした場合、凹凸の重なり具合によってさまざまな状況が起こりうる。詳しくは参考文献¹²⁾をご覧いただきたいが、測定結果の数値と $\lambda/20$ という不確かさが互いに同列であるという奇妙な状況になり、不確かさの計算は単純に標準偏差を二乗和したものではなくなる。ただし、参考文献の考え方も一つの提案でしかなく、今後より幅広い議論が必要である。

5. まとめ

長さ関連量の標準に関して、最近のトピックや今後の課題について興味深いものをおつかいで解説した。長さ計測は太古の昔から行われており、メートルが定義されたのも 200 年以上前のことである。現在の高精度な長さ計測の多くに干渉計測が使われているが、マイケルソンが干渉計測の発明によってアメリカ人最初のノーベル賞を受賞したのが 1907 年であるので、それからすでに 100 年が過ぎた。

その後の大きな進展として、レーザの発明により干渉計測が容易になり、高精度あるいは長距離の干渉計測が可能になったこと、エレクトロニクスとコンピュータの発達によりデータ収集・解析が容易になったことがあげられる。最近発明された光周波数コムもノーベル賞を受賞しており、今後高精度長さ測定がさらに進展すると共に、時間・周波数の世界との融合も進むであろう。

計測標準の研究は地味で、特に長さ計測はクラシカルな学問という印象を持たれがちであるが、近年、X 線計測を含めた三次元計測やナノ計測など新たな展開が始まっている。本稿の読者、特に若い方たちに興味を持って頂き、新たな活力を注入して技術開発を進め、それらの成果が実際の産業に役立つことを期待している。

(2014 年 3 月 3 日受付)

参 考 文 献

- 1) 万物の尺度を求めて—メートル法を定めた子午線大計測, ケンオールダー著, 吉田三知世翻訳, 早川書房, 2006年。
- 2) 四千万歩の男 (全5巻), 井上ひさし著, 講談社。
- 3) 国際単位系(SI) 日本語版—安心・安全を支える世界共通のものさし, 独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター訳編, 日本規格協会, 2007年。
- 4) T. Udem, et. al., Phys Rev Lett, 82 p.3568 (1999)
- 5) <http://www.bipm.org/en/publications/mep.html>
- 6) J. Stone, et. al., Advice from the CCL on the use of unstabilized lasers as standards of wavelength: the helium-neon laser at 633 nm, Metrologia, 46, pp.11-18 (2009)
- 7) P. E. Ciddor, Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, Applied Optics, 35, No.9, pp.1566-1573 (1996)
- 8) T. Kim, et. al.: Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system, Applied Optics, 44, No.17, pp.3492-3498 (2005)
- 9) 尾藤洋一, 平井亜紀子, 吉森秀明, 洪鋒雷, 大苗敦, 岩崎茂雄, 瀬田勝男: 3本の安定化レーザを用いた長尺ブロックゲージ干渉計の開発, 精密工学会誌, 68, No.4, 542-547 (2002)
- 10) 尾藤洋一, 大澤尊光, 高辻利之: 低熱膨張ガラス製長尺ブロックゲージの光波干渉計による校正不確かさの評価, 精密工学会誌, 71, No.5, 602-605 (2005)
- 11) F. Meli, et. al., Traceable size determination of nanoparticles, a comparison among European metrology institutes, Measurement Science and Technology, 23 (2012) 125005 (15pp)
- 12) Y. Bitou, et. al., Simple uncertainty evaluation method for an interferometric flatness measurement machine using a calibrated test flat, Metrologia 45, 21-26 (2008)