

ナノメートル計測学 システム創成学科BISコース

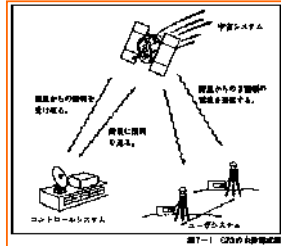
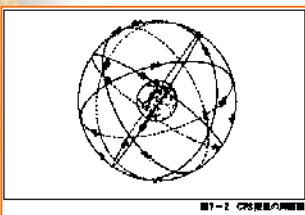
2005年4月18日
東京大学工学系研究科精密機械工学専攻
高増潔

測定のトレーサビリティ

測定の歴史
測定のトレーサビリティ
トレーサビリティ体系

GPSによる測量

- GPS (Global Positioning System) で地球上のいかなるところで人工衛星から、位置 (3次元) + 時間 (1次元) が測定できる。



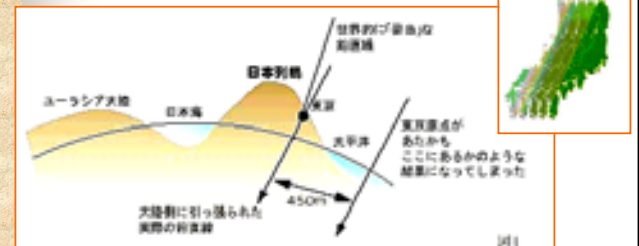
2005/4/18

ナノメートル計測工学2005年

3

日本が動いた？

- GPSによって測定すると、日本列島の位置は 450 m 南東にずれていた。
- 日本が移動したのか？



2005/4/18

ナノメートル計測工学2005年

4

世界測地系移行

- 経線・緯線は、地球を測る「ものさし」です。日本では「ものさし」のあてかたが、世界共通の「ものさし」と違っていました！
- いま、日本の国土を測る「ものさし」が、世界共通の、しかも、目盛りが極めて正確な「ものさし」に変わります。
- 2002年4月1日から



- <http://www.gsi.go.jp/LAW/G2000/g2000.htm>

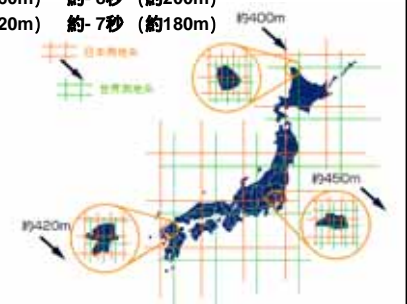
2005/4/18

ナノメートル計測工学2005年

5

日本測地系と世界測地系の違い

- 緯度の差 (距離換算) 経度の差 (距離換算)
- 稚内 約+ 8秒 (約240m) 約-14秒 (約350m)
- 東京 約+12秒 (約360m) 約-12秒 (約300m)
- 福岡 約+12秒 (約360m) 約- 8秒 (約200m)
- 那覇 約+14秒 (約420m) 約- 7秒 (約180m)



2005/4/18

ナノメートル計測工学2005年

6

FAQ

- 現在所有しているカーナビは使えなくなるのか。
- 地図図面の縮尺がどの程度であれば変化量を無視できるのか。
- 座標変換を行うことによって、土地の面積は変化するのか。
- 世界測地系とは何か。
- 日本測地系とは何か。
- この時期に世界測地系を導入する理由は何か。
- 日本測地系の経度・緯度は間違っていたのか。

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 7

計測の歴史

エジプト
SI単位

エジプト

カイロ
ギザ
ルクソール
アスワン

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 9

ISMTII2001

- ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN FEATURE-BASED METROLOGY

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 10

NIS 1

- The National measurement system of Egypt instituted **1500 years B.C.** and re-instituted in modern times in the first decade of the twentieth-century took its formal modern shape when the National Institute for Standards was established in 1963.

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 11

NIS 2

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 12

カイロ博物館

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 13

はじめに糸と水面があった

- BC1450年: 水準器, 糸を使っている.

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 14

ピラミッドの正確さ

- 各辺の長さは数十センチメートルしか違わない.
- 平面性は、良質の糸を使うと、0.1 mm 程度の誤差を検出できる.

底辺はほとんど正確に東西南北を指している
a, b, c, dの長さはほとんど等しい

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 15

王様が基準

- 手足を基準として使う.
- ヤード: イギリス王ヘンリー1世の鼻から親指の先まで
- キュービット×2 = ダブルキュービット = 1 m

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 16

王様から地球へ

- 1790: ダンケルクからバルセロナまで測量, 子午線の1/4の1000万分の1を 1 m
- 1875: メートル条約, メートル原器 (Pt 90%, Ir 10%)
- この形はフランスの“トレスカ”が考案した. 曲げに強く, 温度変化による伸び縮みも極めて少ない.

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 17

- ダンケルク: 北緯51度
- バルセロナ: 北緯41度

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 18

メートル条約の広がり

- 歴史的な背景
 - 18世紀末～：産業革命, 工業化
 - フランス革命: 神, 王も死ぬ
 - 1793～1795: ルイ17世
 - 1793: ルイ16世, マリーアントワネットがギロチンで処刑
- メートル条約
 - 1875: フランス, ドイツ, イタリアなど19カ国
 - 1885: 日本
 - 1960: SI単位系 (日本は1993)

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 19

光の波長を基準としたメートル

- 1961: メートルはクリプトン86 (86Kr) の原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ との間の遷移に対応する光の真空のもとにおける波長の1650763.73 倍に等しい長さ。
- 光の波長が基準: 量子化された。

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 20

光の速度を定数としたメートル

- 1983: メートルは, 1秒の299792458分の1の時間に, 光が真空中を伝わる行程の長さである。
- 光の速度を定数, 時間から長さを求める。

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 21

SI単位系の基本単位(7つ)

量	単位名称	単位記号	定義
長さ	メートル	m	メートルは, 1/299 792 458 秒の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ。
質量	キログラム	kg	キログラムは (質量でもでもない) 質量の単位であって, それは国際キログラム原器の質量に等しい。
時間	秒	s	秒はセシウム133の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の9 192 631 770周期の継続時間。
電流	アンペア	A	アンペアは, 真空中に1メートルの間隔で平行に置いた無限に小さい円形断面を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれの流れ, これらの導体の長さ1メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う不安の電流。
熱力学温度	ケルビン	K	ケルビンは, 水の三重点 [*] の熱力学温度の1/273.15。
物質	モル	mol	モルは, 0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子または要素粒子の集合体 (組成が明確にされたものに限り) で構成された系の物質とし, 要素粒子または要素粒子の集合体を特定して使用する。
光	カンデラ	cd	カンデラは, 周波数540 $\times 10^{12}$ ヘルツの単色放射を放射し, 所定の方向におけるその放射強度が $1/683$ ワット毎ステラジアンである光源の, その方向における光度。

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 22

SI単位の接頭語

接頭語	乗数	接頭語	乗数
Y ヨタ	10^{24}	y ヨクト	10^{-24}
Z ゼタ	10^{21}	z ゼプト	10^{-21}
E エкса	10^{18}	a アト	10^{-18}
P ベタ	10^{15}	f フェムト	10^{-15}
T テラ	10^{12}	p ピコ	10^{-12}
G ギガ	10^9	n ナノ	10^{-9}
M メガ	10^6	μ マイクロ	10^{-6}
k キロ	10^3	m ミリ	10^{-3}
h ヘクト	10^2	c センチ	10^{-2}
da デカ	10^1	d デシ	10^{-1}

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 23

長さとの接頭語

メートルとの比	名称	記号	実例概念
10^{16}	エクサ	E	カシオペア 13.0光年 0.9Em
10^{15}	ペタ	P	1光年 9.45Pm
10^{12}	テラ	T	太陽までの距離 0.15Tm
10^9	ギガ	G	太陽の半径 0.7Gm
10^6	メガ	M	赤道から北極までの子午線の長さ 10Mm 東京～宮崎の距離 0.9Mm

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 24

測定のトレーサビリティ

日本の1kgとアメリカの1kg

- どうしたら同じ1kgだと分かるか？
- 質量の定義はキログラム原器(フランスにある)




2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 26

Traceability

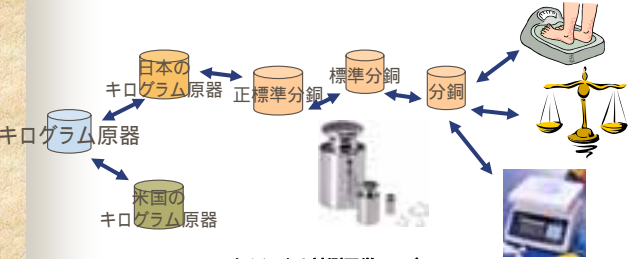
- Property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons all having stated uncertainties.

[International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology]

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 27

トレーサビリティ

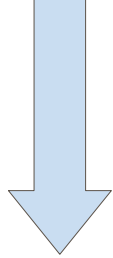
- トレーサビリティ (traceability)
不確かさがすべて表記された、切れ目のない比較の連鎖を通じて、通常は国家標準又は国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の値の性質。



2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 28

長さのトレーサビリティ

- メートルの定義
- ヨウ素安定化レーザー
- レーザ測長機
- ブロックゲージ
- 標準尺
- 物差し



2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 29

ヨウ素安定化レーザー

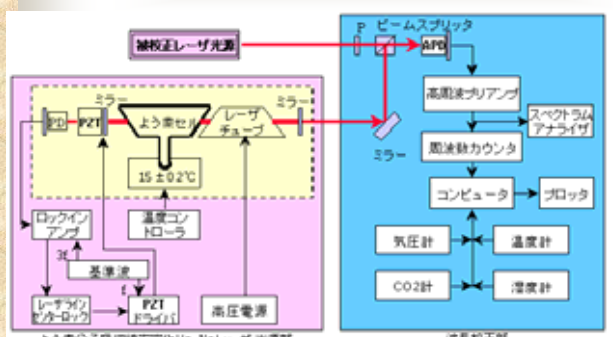
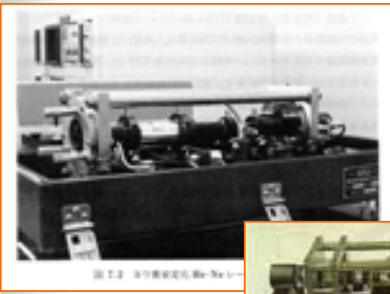


図1 よう素分子吸収線安定化He-Neレーザー 流長校正装置 ブロック図

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 30

ヨウ素安定化レーザ



2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 31

市販のレーザ測長機

- He-Neレーザを利用したものが多い
 - 可視光, 信頼性, 低価格
- 安定化が必要 (安定かしないと 10^{-6} 程度, $10^{-6} = 1 \text{ ppm}$, $10^{-9} = 1 \text{ ppb}$)
 - ピーク出力法
 - ラムディップ法
 - ゼーマン法
 - 2モード法
- HP (Hewlett Packard社)のレーザ測長機
 - 1970年から
 - ゼーマン法を利用, サーマルチューニングする
 - 5500シリーズ

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 32

HP 5519A

- ヘリウム・ネオン:自動チューニング・ゼーマン分調2周波出力
- 真空中の波長: 632.991384 nm
- 短期(1時間)波長安定度: $\pm 0.002 \text{ ppm}$ (代表値)
- 長期(耐用期間)波長安定度: $\pm 0.02 \text{ ppm}$ (代表値)
- 最大出力パワー: 1 mW




2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 33

ブロックゲージ, 標準尺

- 100 mm のブロックゲージの寸法偏差
 - K級 $0.07 \mu\text{m}$, 2級 $0.35 \mu\text{m}$
- 標準尺
 - 1000 mm, 1 mm, 1 mm
 - 100 mm, $0.5 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$




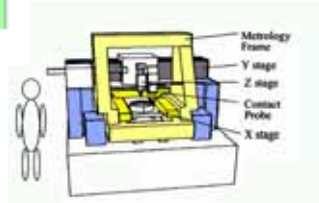

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 34

ナノメートル測定機の例(2)

スーパーマスター

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 35

Super Master

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 36

レーザ測長システム

Fig.3: Mirrors and Laser Pass

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 37

レーザ光路の真空化

Fig.4: Experimental Apparatus for Vacuum Laser Pass

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 38

ナノメートル計測の例(2)

水の比重
球の体積

球の体積の測定

Generalized Considerations in the Measurement of the Volume of an Approximate Sphere

David B. Johnson

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 40

光波干渉による球の直径測定

図1 光波干渉計による球の直径測定原理図

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 41

水の密度測定

温度	密度	体積	質量
10	0.9997	1.0000	0.9997
20	0.9982	1.0000	0.9982
30	0.9956	1.0000	0.9956
40	0.9922	1.0000	0.9922
50	0.9880	1.0000	0.9880
60	0.9832	1.0000	0.9832
70	0.9780	1.0000	0.9780
80	0.9725	1.0000	0.9725
90	0.9668	1.0000	0.9668
100	0.9602	1.0000	0.9602

2005/4/18 ナノメートル計測工学2005年 42