説

長さ標準:レーザー測長における真空および大気の影響* 寺 田 聡 -*1

Length Standard: Effects of Air Refractivity and Vacuum for a Laser Interferometer Souichi TELADA*1

Length Standards Section, Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1–1–1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305–8563, Japan

(Received October 10, 2008, Accepted January 10, 2009)

The current definition of the meter has been based on 'the speed of light' since 1983. Length standard measurements are performed using laser interferometers and are generally conducted in air. Specifically, a long length (referred to as ''distance'') is measured in air. The accuracy of distance measurements in air is limited by the refractivity of air, which can be determined with an accuracy of only approximately 10^{-8} . For smaller uncertainties, we must measure distances in vacuum. For example, both laser strain meters, which are used for tectonic measurements, and laser interferometer gravitational wave detectors employ long-baseline interferometers in vacuum. Since the sensitivity of gravitational wave detectors become worse by residual gases in vacuum, a pressure of less than 10^{-5} Pa is required for laser beam paths in the interferometer.

1. はじめに

'1メートル'は元々子午線の4千万分の1として作られた.世界的に'標準'を統一しようという試みがなされ 1889年に『メートル条約』が締結された.そのメートル条約の中で,'メートル原器'と呼ばれる白金とイリジウムの 合金で作られた金属の"ものさし"が1メートルの定義と なった.フランスの標準研究所 BIPM にあるこのメートル 原器から値を複製したメートル原器が日本の長さの標準とし て用いられてきた.1960年には1メートルは『クリプトン 86の波長の1650763.73倍』という定義になり,さらに, 1983年に『1秒間に光が真空中を進む距離の299792458分の 1』に変更されて現在に至っている.

初代の『メートル原器』の不確かさは10⁻⁷ 程度であり, 二代目の『クリプトンの波長』では10⁻⁹ 程度の不確かさで あった.

現在のメートルの定義である『1秒間に光が真空中を進む 距離の299792458分の1』は、アインシュタインの相対性理 論の光速度不変の原理から、不確かさの無い定義として扱わ れている.しかし、'定義'と'定義の実現'は異なる.直 ぐに解かることとして、'1秒'に不確かさがあるのだから、 当然その間に光が進む距離にも不確かさが存在する.

ところがこの『1秒間に光が真空中を進む距離の 299792458分の1』という定義はもっと厄介であり,残念な がらこの定義どおりに長さ標準を実現することは困難で,通 常別の方法が用いられている.現実的な長さ標準としては, 『よう素安定化 He-Ne レーザーの波長』が用いられている. よう素分子の飽和吸収線の周波数が勧告値として与えられて いて,それと光速よって長さの標準としているのである.例 えば,f線と呼ばれる飽和吸収線の周波数は473612353.597 MHzで,波長にすると632.991212588 nm となる.この

そとして扱わ 載った望遠鏡のようなものである.これは本体から光を発 、異なる.直 し、反射鏡で戻ってきた光を受けて本体と反射鏡の間の距離

を測るものである. これは数 km の距離まで測ることが出来, 100 m くらいの距離ならば0.1 mm くらいの分解能で測定で きる. この光波距離計も干渉計を基準として校正がなされて いる. 光波距離計は光を用いて距離を測定しているが, 光の 波長を用いた方式とは異なり校正が必要である.

空気屈折率

現在のメートルの定義で'真空中'と限定されているのは, 大気中では光の速さが異なるからである.真空中での光の速 さに対する大気中での光の速さの比の逆数が大気の屈折率と なる.正しくは'真空中に対する比屈折率'と呼ぶが,一般 的には単に'屈折率'と呼ばれる.光は真空中での速さが最 も速いので,この屈折率の値は必ず1より大きい値であ る.どれくらい大きいかと言うと,270 ppm くらい大き

レーザーを光源とした干渉計を用いて長さを測ることで、 '長さ標準'を実現している.

よう素安定化 He-Ne レーザーの波長の不確かさは10-11

と言われている.しかし、工業的にはさらに別の'もの'が

基準として用いられている.良く使われている基準としての

'もの'は, ブロックゲージ, あるいは, 標準尺である. ブ

ロックゲージとは鋼で出来たブロックで、その両端間の長さ

が正確に出来ているもので、1mm~1mの様々な長さのものがある.標準尺とはいわゆるものさしで、その目盛り線が

正確に刻まれているものであり,長いもので1mまであ

る. これらブロックゲージの長さや標準尺の目盛り間隔を

レーザー干渉計で正確に測り校正することで、よう素安定化

He-Ne レーザーの波長にトレーサブルな長さ標準を実現し

ている.ブロックゲージや標準尺は1m程度までであり,

もっと長い長さには、以前は巻尺などが用いられていた.し

かし、近年では巻尺よりもっと精度の高い光波距離計とよば

れる測距儀が精密な測定において用いられることが多くなっ

た. 光波距離計は、工事現場などでよく使われている三脚に

^{*} 平成18年6月23日 日本真空協会2006年6月研究例会で発表 *1 産業技術総合研究所・計測標準研究部門(〒305-8563 茨城県

つくば市梅園 1-1-1 中央第 3)

い. すなわち, 大気の屈折率の値は, 1.00027程度である. この値は光の波長,及び,大気の気圧,温度,湿度,二酸化 炭素濃度に依存する. 1.00027という値は可視光に対して我 々が普通に生活している大気の状態での大まかな値である. また, 大気の屈折率は, おおむね気圧1hPa で0.27 ppm, 温度1℃で-1ppm,湿度10%で-0.07ppm,二酸化炭素濃 度100 ppm で0.015 ppm 変化する. このことは大気中で光を 用いて長さを測る場合に非常に大きな悪影響を及ぼす. 大気 中での光による長さ計測で直接的に得られるのは、真の長さ を大気の屈折率で割った値だからである.これを'光学的な 長さ'と呼んでいる. それに対し, 真の長さを '幾何学的な 長さ'と呼ぶ.光を用いて幾何学的な長さ計測するには、大 気の気圧,温度,湿度,二酸化炭素濃度を計測し,それらの 値から計算式を用いて大気の屈折率を求め、光学的な長さに それを掛けて算出するのが一般的である.この屈折率の計算 式はCiddorの式と呼ばれ、その不確かさは~10-8であ る¹⁾. また,温度や気圧などの大気状態も屈折率の値に換算 して~10-8に相当する不確かさでの測定が限界なので、空 気中での長さ測定では~10-8の相対不確かさが下限となる.

3. 空気中での距離測定

"距離"という概念は、空間的な2つの点の離れの大きさ を表すものであり、その大きさには依存しないものである が、ここでは'長い長さ'を"距離"と呼ぶことにする。前 述のように、空気中での光を用いた長さ測定では空気の屈折 率を補正しなければならない。その屈折率の値を得るために 大気の状態を計測するが、その中で温度測定が最も重要で、 かつ、困難となる。湿度や二酸化炭素濃度に関しては、そも そもそれらの影響は小さい。気圧は水平な距離測定では場所 による違いが少ないので1ヶ所で測るだけでもよい。しか し、温度は場所依存性が強く、また、その影響も大きいの で、温度を正確に測るためには沢山の温度計が必要となる。 そのような沢山の温度計を用意することは一般的には困難で ある。

距離標準などの距離を正確に測る研究では、大気中でどれ だけ良く干渉フリンジを測定できるか、そして、温度が安定 な環境をどう作るかが課題である.特別な場合を除いて、距 離を測るときは大気中だからである.大気の気圧や温度が変 化しても、その影響を受けない二波長干渉計などを開発して いる.異なる波長の光が感じる屈折率の値の差は大気の状態 に依存するので、同じ点間を2つの波長で測定すること で、その光学的な距離の違いから空気の屈折率の差を算出 し、補正するのである.しかし、より精密に距離を測るため には真空中で測定するしかない.次に、真空中で距離を精密 に測定している地殻歪検出用干渉計と重力波検出用干渉計に ついて紹介する.

4. 地殼歪検出用干渉計

地殻歪計測というと地震予知などを連想するが、地殻歪の 測定は、地球内部の構造を知る上でその手がかりとなるな ど、地球物理学的に重要な観測項目である.地殻歪の計測方 法はさまざまであるが、10 m から100 m 程度のスケールで の歪測定ではこれまで石英管歪計と呼ばれる方法が一般的で あった.鉱山跡などの地下坑道の岩盤に熱膨張係数の小さな 石英の長い棒の一端を固定し,もう一方の端とその近傍の岩 盤とのギャップを測るのである.地下に設置するのは,岩盤 に直接固定できることと温度的に安定しているからである.

近年、レーザー干渉計を用いてこのスケールでの地殻歪を 計測する研究が行われている. 干渉計を構成する鏡を離れた 2点に固定し、その間隔を干渉計測するのである.しかし、 これを実現するのは非常に困難である.地殻歪の計測では, 精度としては最低でも8桁必要である.実際はこれより2 桁以上精度良く計測したい. 前述のように, 大気中での距離 測定では大気の屈折率の影響のために8桁が限界である が、現実的には、100m程度の距離になると7桁がいいとこ ろである. 大気の屈折率の影響を避けるためには干渉計の光 路を真空にすればよい.しかし,100mの干渉計には100m の長さの真空パイプが必要であることはすぐに解かることで ある. 100 m のレーザー干渉計では、レーザービームのビー ム径が1~2 cm にはなるため,回折を避けるためにはパイ プ径は10 cm~20 cm は必要となる. 真空度に関しては高い 要求はないのだが、真空ポンプが振動を発生すると干渉計測 に悪影響を及ぼすので、イオンポンプなどの無振動型のポン プが必要となり,ある程度の高真空に対応した真空パイプや 真空槽が必要となる.総じて真空系に対するコストは大きく なり、このようなレーザー 歪計を設置するのは大変である. さらに、より長い基線でのレーザー歪計は非常に有用である ことは間違いないが、長さに比例して、もしくは、それ以上 にコストが増えるため実現は困難となる.

現在、ニュートリノ検出器で有名なスーパーカミオカンデ と同じ神岡鉱山内に、100mのレーザー歪計を設置し観測を 行っている²⁾. これは次に述べる重力波検出器に併設する形 で設置されている. 真空パイプはL字型に直行した100m× 100 m である. その L 字の交点と両端に真空槽を配置し, その中に干渉計を構成する鏡やビームスプリッターが収めら れている. レーザーは真空槽の外に置かれている. 干渉計は 3つある.一つ目は、ビームスプリッターで分かれた2つの 光路がそれぞれ100mのマイケルソン干渉計である.これは 2つの100m腕の差しか検出できないので、両方が同時に伸 び縮みする歪を検出できない. そこで2つ目の干渉計とし て、片方の光路が100m,もう片方の光路が10cm程度,す なわち, ビームスプリッターの置かれた真空槽内ですぐに折 り返される非対称な光路長のマイケルソン干渉計である.こ の干渉計は100mの光路の伸び縮みを測定出きる.2つの干 渉計を併せると, 直交方向のそれぞれの伸び縮みを観測でき る. これらの干渉計はいずれも変位しか検出できないため, 何らかの理由で観測が中断するとその前後でデータの連続性 が途切れてしまう.3つ目は、それを補う絶対長計測型ファ ブリ・ペロー共振器である. このレーザー歪計の真空系とそ の中の光学系の配置を図1に示す. 真空光路を用いたこの干 渉計は歪量で10-12の感度があり、空気中での計測の1万倍 もの感度がある.



Fig. 1 100 m Strain Meter in Kamioka mine: Three vacuum tanks are connected with vacuum pipes which are 200 mm in diameter. Mirrors and beam splitters are placed in the vacuum tanks. Lasers and photo detectors are placed out of vacuum.

5. 重力波検出用干涉計

アインシュタインの相対性理論は重力の理論であるが、重 力場の方程式である 'アインシュタイン方程式' の波動解が '重力波'である.非常に重い星の周りでは時空が歪む事が 知られているが、その歪みが"さざ波"のように伝わってく るものである. 超新星爆発や連星中性子星の合体など大きな 質量が劇的な変化をしたときにのみ、地球で観測可能な大き さの重力波が放出される.これは時空の歪の波であるが、い くつかの特徴がある.重力波は光速で伝播する横波で四重極 であり、その透過性が非常に高い.この透過性が高い性質 は、高温、高密度な天体現象の情報をもたらすと期待される が、それはまた、検出の困難さを意味している. 重力波がや ってくると2点間の空間の距離が変化する. 横波で四重極 であることから, xyz 直交座標で z 軸方向に重力波が進んだ 場合, x 軸方向の2 点間は距離が伸び, 同時に, y 軸方向の 2点間は距離が縮む.波であるので、次は x 軸方向が縮み y 軸方向が伸びる.これを繰り返すのである.2点間の距離が 変化するのだから干渉計で測れば良い. さらに都合の良いこ とに、直行方向に差動で距離変化が起こるのだから、マイケ ルソン型干渉計は重力波検出に打って付けである.しかし, 歪量で10⁻²³の感度がなければ重力波を捕らえることは出来 ない. 重力波は非常に微小な信号であるため、これまで直接 検出されたことはない.

重力波は歪量であり、測る距離に比例して変位としては大 きくなるため、巨大な干渉計が有利である.現在アメリカに は4kmの干渉計(LIGO)が、ヨーロッパには3kmの干渉 計(VIRGO)が稼動している.日本では、国立天文台の三 鷹キャンパスに300 mの干渉計(TAMA300)があり³⁾, 3 kmの干渉計(LCGT)を計画している.また,LCGT計画 で重要な要素技術である低温鏡を用いた干渉計の実証とし て,神岡鉱山内に100 mの干渉計(CLIO)の建設され,感 度の向上が行われている⁴⁾.kmクラスの干渉計でも単純な マイケルソン型干渉計では感度が足りないため,ビームスプ リッターで分かれた2つの光路は,それぞれ,ファブリ・ ペロー共振器になっていて,多重反射によってレーザーが伝 播する実効的な距離を大きくしている.重力波では空間その ものが歪むので,干渉計の鏡は地面に固定する必要はない. むしろ地面からの振動を遮る為に,鏡を振り子に吊るして防 振してある.神岡鉱山内は重力波検出器の大敵である地面振 動が小さく有利な地である.

重力波検出器の干渉計は当然真空である.アメリカの LIGOは、直径1m長さ4kmの真空パイプが'L字'に2 本あり、その中を干渉計のレーザービームが往復している. 日本のTAMA300の真空パイプは直径40 cm, CLIOの真空 パイプは直径35 cmである.重力波検出器ではその要求感度 が非常に高いことから、真空度に対する要求も出てくる.残 留気体分子があると、それが干渉計の雑音となるのである. ここで残留気体による影響を考えてみる.

5.1 残留気体による光路長揺らぎ

残留ガスによる光路長揺らぎについて考える.大気の屈折率は,大気を構成している気体分子の種類と密度で決まる. 屈折率をnとすると気体分子の種類が一定なら,n-1の値はその密度に比例する.ここでの'屈折率'とは,正しくは真空の屈折率に対する比屈折率である.1気圧で室温の通常の空気,すなわち,窒素が80%で酸素が20%では,n-1は約270ppmである.真空ポンプで真空にした場合,圧力や表面,真空ポンプの種類によって残留ガスの種類は異なり,一般的には通常の空気とは組成が違う.屈折率は電磁気学的には分子の分極率に依存するので,気体分子の種類によって値が異なるのである.

この残留ガスによる屈折率がどれくらい揺らぐかが問題で ある. 最も簡単な議論として, 分子数揺らぎで見積もる方法 がある.干渉計のレーザービームの体積中の分子数に対し, その数の平方根の揺らぎを持っていると考える.3kmの干 渉計の場合,レーザービームの直径は7cmほどになる.正 しくはガウシアンビームと言って, ビームの断面の強度分布 がガウシアンになっていて、その太さも伝播によって変化す るのだが、ここでは簡単に円筒のビームとして考える.干渉 計の長さが3kmで直径が7cmならば,その体積は11.3m³ となる. 0℃,1気圧の理想気体ならば, 22.4 ℓ 中に1 mol 個の分子がある.干渉計の光路は室温であるから,圧力が 10⁻⁵ Paのとき,ビーム中の分子数は約3×10¹⁶ 個となる. このときの屈折率から1を引いた値、すなわち、 は1気圧 の時の10桁小さな値,約2.7×10-14である.この値が分子数 3×10¹⁶個の平方根の逆数で揺らぐので、この時の残留ガス による屈折率揺らぎは1.5×10-22となる.

ここで時間スケールについて考える.レーザービーム中の 気体分子が入れ替わる時間間隔で分子の個数を計測しなけれ ば、この分子数揺らぎでの議論は成り立たない.常温なので 水分子ならば約530 m/s の平均速度で飛んでいる. この圧力 では分子流状態であり、この気体分子がレーザービームを構 切る時間は約0.13 ms で、この程度の時間間隔での測定での 揺らぎが、計算された 1.5×10^{-22} である. これは7.6 kHz サ ンプリングに相当する. 重力波検出器の帯域は 1 kHz 程度 であるから、その2倍の2 kHz サンプリングまで積分する ことができる. この積分効果によって、積分量の平方根で小 さくなるので、7.9×10⁻²³ となる. この値は標準偏差での 評価であるが、重力波検出器では一般にノイズスペクトル密 度で検出器を評価する. 屈折率揺らぎによるノイズスペクト ル密度は、標準偏差を帯域幅の平方根で除算して、2.5× 10⁻²⁴ 1/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となる. この値は日本の大型計画 LCGT の目 標感度とほぼ等しい.

一般的に、干渉計の基線長が長くなるとレーザービームの 直径は、長さの比の平方根で大きくなる.よって、10倍長 い干渉計の場合、ビームの体積は100倍大きくなる.屈折率 揺らぎはその平方根の逆数であるから10⁻¹になる.ただ し、気体分子がレーザービームを横切る時間は√10倍長くな るので時間積分量はその分減り、揺らぎはその平方根の 10^{1/4}だけ大きくなる.総じて10倍長い干渉計にすれば屈折 率揺らぎは10^{-3/4}になる.これは基線長の長い干渉計のほう が、同じ圧力でも残留気体が与える影響が小さくなり、大型 計画では真空に対する要請が緩和されると思いがちであるが、

10倍長い干渉計の目標感度は最低でも10倍良いので,目標 感度との比としては10^{1/4}だけ厳しい値になる.現実的に は、レーザーのハイパワー化や鏡の熱雑音の低下,干渉計の コンフィギュレーションの変更などで,基線長の比以上の感 度向上が求められる.基線長300 m の TAMA300と建設予 定の3kmのLCGTとでは,基線長比は10倍であるが,目 標感度は30~100倍違う.TAMA300を用いた残留気体の影 響の研究が報告されている⁵⁾.

レーザービームのビーム径は,干渉計の長さで決まるある 径以下には細くできないが太くすることはできる.レーザー ビームを太くして,ビーム中の分子数が多くなれば,残留ガ スによる屈折率揺らぎを小さくすることができ,圧力に対す る要求を緩和することが出来る.しかし,ビーム径を大きく すると,ビームの通っている真空パイプの径も太くしなけれ ばならず,排気容量は増加し,真空系としては大掛かりにな り,また,鏡などの光学系も大きくしなければならないので 検出器全体としては得策ではない.

6. まとめ

長い距離を正確に測ることは科学的にも工業的にも重要で ある.それには光を用いるのが適しているが,大気中での計 測では大気屈折率の影響で精度が制限されてしまう.光路を 真空にすることで大気の屈折率の影響を除去することは出来 るが,大きな真空装置が必要となり,おもに予算的な困難を 伴う.また,重力波検出器のような究極的な感度をもつもの では,真空中での残留ガスの影響も無視できなくなる.

〔文 献〕

- 1) Philip E. Ciddor: App. Opt, **35** (1996), 1566–1573.
- 2) S. Takemoto et al.: J. Geodyn., 41 (2006), 23–29.
- 3) Ando, M. et al.: Phys. Rev. Lett., 86 (2001), 3950–3954.
- 4) S. Miyoki et al.: *Proc. 28th International Cosmic Ray Conference*, (Universal Academy Press 2003), 3073–3076.
- 5) R. Takahashi et al.: Shinku, 47 (2004), 696–701.