

4.2 技術要素

4.2.1 レーザー伸縮計の構成及び動作原理

レーザー伸縮計は、マイケルソン干渉計を用いて地殻の伸縮を計測する装置として構成した。マイケルソン干渉計は、2 光路の長さの差を干渉光の強度の差として検出する。Fig. 4.2.1 にレーザー伸縮計の構成図を示す。レーザー装置から発したレーザー光は、ビームエキスパンダーによりビーム径を拡大し、無偏光ビームスプリッターに入射する。無偏光ビームスプリッターにより測定光(measuring beam)と参照光(reference beam)に分割され、参照光は無偏光ビームスプリッターに隣接して置かれたレトロリフレクターにより反射される。一方、測定光は測定用基線の端にある測定光用のレトロリフレクターにより反射され戻ってくる。測定光と参照光は無偏光ビームスプリッターにおいて、重なったビームとなり、受光器(detector)に入射する。受光器の出力は測定光と参照光の干渉により、測定光と参照光の光路長差の変化に応じてその強度が変化する。

光強度の増減だけでは光路長が伸びたのか縮んだのか識別できないので、直交した 2 方向の偏光のうち片方を波長(λ)の 1/4 だけずらす機能を持つ $\lambda/4$ 波長板(wave plate)を挿入して位相をずらすと共に、受光器の手前に偏光ビームスプリッターを用いて直交した 2 成分の偏光を分離して、ビーム強度を別々に測定する。Fig. 4.2.1 において、矢印によって直交した 2 つの偏光方向を示しているが、これは斜めに偏光した光を分解した成分を表現している。

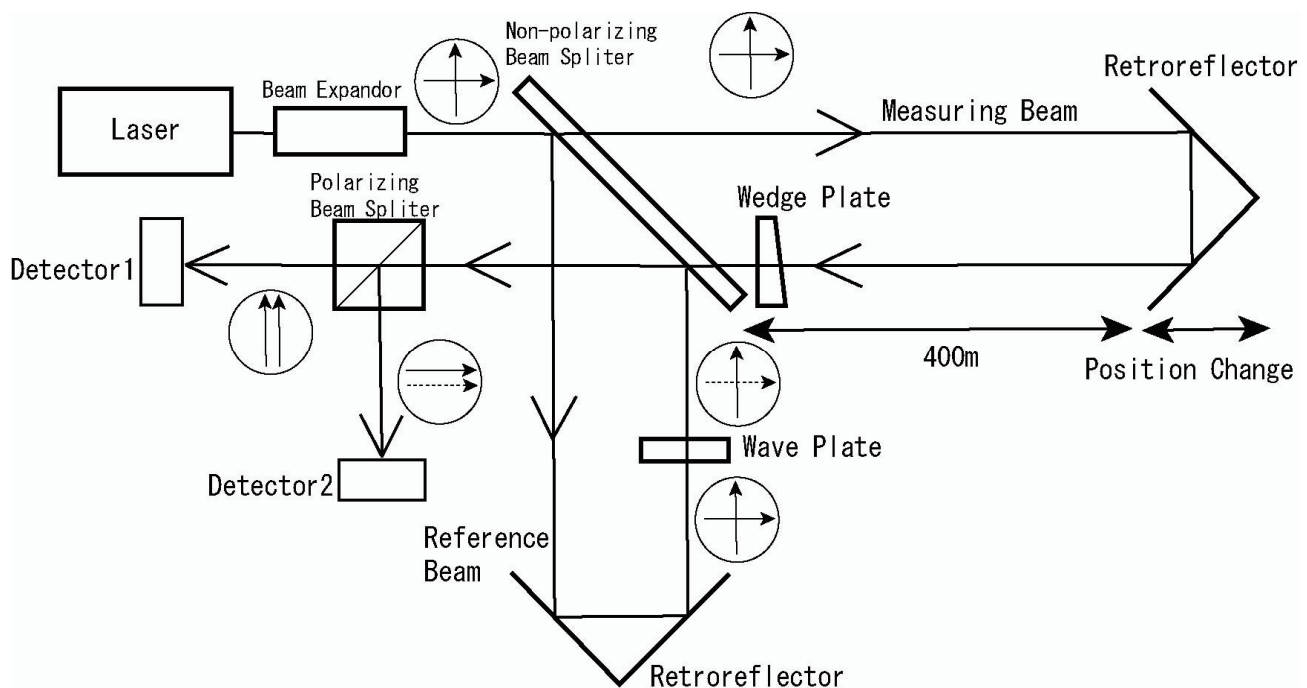


Fig. 4.2.1. Schematic of a laser extensometer. The arrows in circles denote the polarization direction of beams, and the broken arrows indicate beams with a delay of a quarter wavelength.

仮にレーザー装置からの入射光を $\cos(\omega t)$ と表し、測定光と参照光の強度を同じと仮定すると、受光器 1 に入射する光は $\cos(\omega t) + \cos(\omega t - k\Delta l)$ に比例すると考えられる。ここで、 ω 及び k はレーザー光の角振動数と波数、 Δl は測定光と参照光の光路長差である。一方受光器 2 に入射する光は、 $\cos(\omega t) + \cos(\omega t - k\Delta l - \pi/2)$ に比例する。 $\pi/2$ が $\lambda/4$ 波長板による位相の遅れである。受光器から出力されるのは光のエネルギーに比例した電圧とみなせるので、受光器 1 からの出力電圧は次のようになる。

$$\{\cos(\omega t) + \cos(\omega t - k\Delta l)\}^2 = \{2 + 2\cos(k\Delta l)\}\cos^2(\omega t + \alpha)$$

ここで $\tan \alpha = -\sin(k\Delta l) / \{1 + \cos(k\Delta l)\}$ である。すなわち受光器 1 には $1 + \cos(k\Delta l)$ に比例した出力が得られ、同様

にして受光器 2 には $1 - \sin(k\Delta l)$ に比例した出力が得られる。2 出力を直交座標にプロットすると、基線長の変化に応じてリサージュ図形を描く。リサージュの偏角の増減が、光路長の伸び・縮みの値に比例する。

体積歪計や多成分歪計は、 10^{-9} の歪変化を検出可能である。ここでは、これらと同等の 10^{-9} の変化が検出可能な測器の開発を目指した。光の波長は数 100nm であり、数 100m の基線長をとった場合に、1 波長は 10^{-9} の歪変化に相当する。前述のリサージュの偏角の変化を検出可能とすると、1 波長の変化よりも更に微少な変化も検出可能である。一般に計測誤差は必要とする分解能よりも小さいことが必要であり、既知の機器依存誤差は可能な限り $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 未満におさえることを目標とした。

4.2.2 レーザー装置

マイケルソン干渉計を使用する場合、光源の波長が変化するとそれが光路差の変化として検出されてしまうことから、精密計測に用いるレーザー光源に必要な要素として、その発振波長の安定性がある。通常のレーザー光源の発振波長安定性は 10^{-7} 程度である。 10^{-10} の測定値の信頼性を確保するためには、 10^{-10} 以上の安定性が求められる。安定性を得る手法として、ヨウ素等の吸収線を基準として発振波長を安定化させる方法がある。そのような方法により安定化したレーザー発振装置は市販されており入手することができた。用いたレーザー装置の発振波長安定性は 2.5×10^{-11} 以上とされている。

なお、通常のヨウ素安定化レーザー自体は光に変調がかかっており、干渉計用途には適さない。そこでヨウ素安定化レーザーの発振周波数に一定のオフセットのある周波数の無変調のレーザー光を発することのできるオフセットロックレーザー装置を組み合わせて用いた。レーザー装置の写真を Fig. 4.2.2 に示す。

出力強度の安定性もデータ処理上重要な要素となる。出力パワーが変動した場合には、出力のリサージュ図形が変動することになり、伸縮を示す位相変化の抽出に影響を及ぼす。同レーザー装置の出力変動は 1% 未満とされており、データ処理上大きな影響はないものとみられる。

用いた安定化レーザー装置は GPIB インターフェース経由により計算機制御可能となっており、遠隔地における観測維持に適したものとなっている。オフセット周波数は、通常の機器ではレーザー制御装置の操作パネルから直接操作することにより変更する仕様であるが、それを計算機から変更可能となるよう改造を施した。

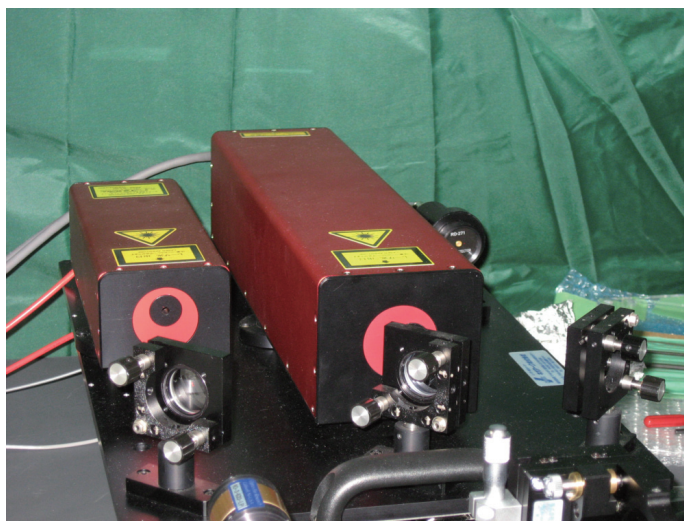


Fig. 4.2.2. Iodine-stabilized laser (right) and offset-lock laser (left).

4.2.3 光学部品

4.2.3.1 光学部品の条件

(1) 波面精度

干渉計を構成する際に、波面精度が重要なポイントとなる。単に干渉縞の数をカウントするのであれば波長の精度までの分解能となるが、干渉光の位相の変化まで抽出することができれば、更に高分解能の測定が可能となる。参照光と測定光の波面が重なる光に対して、レンズで集光することにより強い光強度が得られれば、S/N 比の観点からも位相検出に望ましいものとなる。波面に凹凸があつては、干渉光強度に不規則な変化を起こす可能性があり、精密な測定には適さない。波面精度に影響をあたえるものとして、ビームエキスパンダー・無偏光ビームスプリッター・リフレクター・波長板・波面補

正板がある。それぞれについて、高精度の波面精度を有している必要がある。

(2)光軸精度

長基線のレーザー干渉計を構成するためには、ビームを正確に測定光用レトロリフレクターに当て、それが正確に戻ってくる必要がある。400m離れた地点に1cm未満の誤差でビームが戻ってくるためには、 $0.01/400(\text{rad})(=5 \text{ 秒})$ の精度のレトロリフレクターが必要である。また、光軸の調整機能として、同程度の調整分解能が必要となる。

干渉させるビームの向きが異なると、参照光と測定光の波面がそろわず干渉縞が生じてしまう。波長を 633nm, 発射ビームの直径が 3cm として、その中で波長の 1/10 以内のずれとするために以下の角度精度が必要である。

$$\frac{633\text{nm}}{0.03\text{m}} \times \frac{1}{10} = 2.1 \times 10^{-6}(\text{rad}) \\ = 0.44(\text{秒})$$

(3)ビーム径

レーザー光は回折現象のために、細い径であるほど広がりやすい。長基線のレーザー干渉計を設計する場合に、想定するビーム径は基線長に直接的に関係する。基線長を長くするためには、ビームの広がりを抑えるために径の大きなビームとする必要がある。しかし、ビーム径を大きくすると、高い波面精度の光学部品が入手しにくくなるとともに、経費も高くなる。ビーム径が必要な光学部品の大きさを決めることから、ビーム径の見積もりが重要な要素となる。

ビーム径の予測値として、フラウンホーファー回折による見積もりがある。フラウンホーファー回折の場合には、ビーム断面の光強度を一様と仮定しているが、実際のレーザー装置の場合には一様ではなく、ビームの中心において強く、周辺部では弱い。その分布はガウス分布で近似できることからガウシアンビームと呼ばれる(例えば, 河合, 2005)。従ってガウシアンビームの距離に応じた広がりを見積もる必要がある。

ここでは、波面積分によりビーム径を見積もった。 $A(\mathbf{x})$ を平面波源上の $\mathbf{x}$ におけるレーザー光の強度として、波源から離れた点 ξ におけるレーザー光の強度分布を次の数値積分により見積もった。

$$\iint A(x) \cos\{k \cdot (x - \xi)\} dx$$

Fig. 4.2.3 に見積もり結果を表す。ここでは初期ビーム直径 25mm を仮定している。基線長 400～600m として、測定光用レトロリフレクターにおいて、エネルギーレベルがピークの 10%に下がる範囲が直径 35mm 以内の範囲となり、直径 40mm の範囲にはレーザー光パワーのほとんどが含まれる。往復距離にして 800～1200m を想定した場合には、エネルギーが 10%となるレベルとして戻りビームの直径が約 35～50mm と推定される。戻りビームのエネルギーのほとんどが直径 60～80mm の範囲にあるとみつめられる。

以上のような理論的な予測を行うとともに、気象研究所/高層気象台構内において実験を行い、初期ビーム 20mm とした場合に 500m 先において直径 40mm のビームとなることを確認した。安定化レーザー装置から出力されるビームは直径

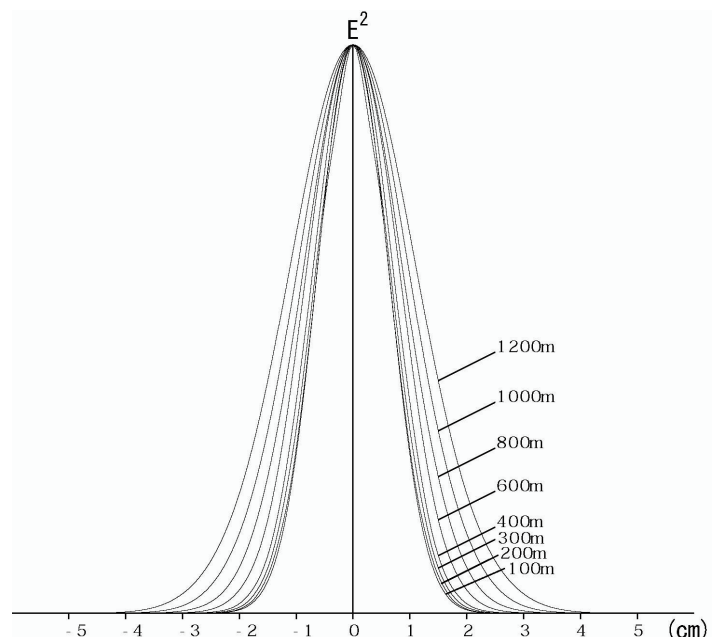


Fig. 4.2.3. Estimated beam power for an initial beam of 25mm diameter.

1mm であり、以上の検討から直径 25mm とするようなビームエキスパンダーを用いることとした。

(4) 光学部品マウントの熱膨張

温度変化による伸縮は計測結果に様々な影響を与える。無偏光ビームスプリッター・レトロリフレクター等の取り付け角度などが変化しても計測値の変化として現れる。特に無偏光ビームスプリッターと参照光レトロリフレクター間の距離は測定値に直接的な影響を与える。無偏光ビームスプリッターと参照光リフレクター間の距離は 10cm ほどであるが、これらの光学部品を約 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の線膨張係数(例えば、国立天文台,2008)を持つステンレス板の上に固定したとすると、 1°C の温度変化に対して

$$0.1\text{m} \times 15 \times 10^{-6} \times 1^{\circ}\text{C} = 1.5 \times 10^{-6}\text{m}$$

となり、400m に対する相対歪として 3.8×10^{-9} の変化に相当し無視し難い。そこで、無偏光ビームスプリッターと参照光レトロリフレクターを固定するプレートは、線膨張係数が $0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とされるスーパーインバー製とすることとした。

4.2.3.2 光学部品の詳細

以下に、各種光学部品の具体的な仕様等を記す。

(1) アイソレーター

ヨウ素安定化レーザー装置及びオフセットロックレーザー装置は、想定外のレーザー光の入射があると、安定化動作に影響がある。反射してレーザー装置に対して戻ってくるレーザー光がないようにするため、レーザー装置の出力部分にアイソレーターを挿入した。

アイソレーターは、偏光面の回転と偏光板によって、逆方向入射光の強度が 1/100 未満となる遮断を行っている。出力されたレーザー光の偏光面は、入射光から 45° 回転している。オフセットロックレーザーの出力光の偏光面は水平である。偏光面が 45° 傾いた光として、ビームエキスパンダーに入射する。 $\lambda/4$ 波長板や光検出器への入力を分離する偏光ビームスプリッター設置の方向に、この角度が関係する。アイソレーターの写真を Fig. 4.2.4 に示す。

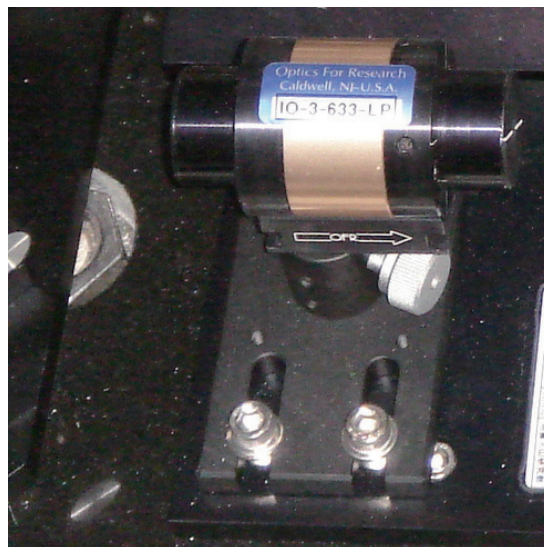


Fig. 4.2.4. Isolator. The laser beam goes through the center of the cylinder.

(2) ビームエキスパンダー

ビームエキスパンダーの機能は、ビーム径を広げることにある。その際に、波面精度が問題となる。ここでは入手可能であった波面精度 $\lambda/8$ のビームエキスパンダー(Fig. 4.2.5)を使用することとした。ビームを入射する際に、ビームエキスパンダーの中心に入射しなくては、ビームエキスパンダーがプリズムのようにビームを曲げてしまう。そこで、ビームエキスパンダーにはビーム入射位置 (x,y) と、向き (θ, ϕ) の調整機構が必要となる。

ビームエキスパンダーには、出力ビームの焦点距離を変える機構もある。球面波とした場合のその球面半径を調整可能である。その平面度はコリメーションチェッカーを用いて確

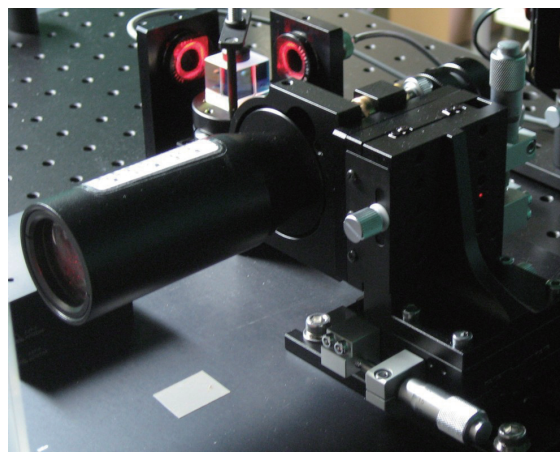


Fig. 4.2.5. Beam-expander.

認可である。出力光を完全平面波として調整した場合に、他の光学部品等の波面誤差等のため戻りビームが円形ビームとならなかったため、球面波として出力することとした。

(3)無偏光ビームスプリッター

無偏光ビームスプリッターは、レーザー装置からのビームを測定光と参照光に分割する。ビームを分割する反射面は干渉光の波面精度に影響を与えるので、反射面の凹凸はレーザー光の波長よりも十分小さい必要がある。また、レーザー装置からのビームを測定光と参照光に分割する面と、戻ってきた測定光を反射して参照光とあわせて、干渉光をつくる面とは同一の向きである必要があるため、両面は一体の光学ガラス上とした。

また、無偏光ビームスプリッターの反射面ともう一方の面が傾きを持っていたら、プリズム状態となりビームを曲げてしまう。しかし、入手可能な無偏光ビームスプリッターの 2 面の並行度は 5 秒程度であり、波面の一致に必要とされる 0.5 秒未満にはならなかった。そこで、波面補正板(後述)を挿入して、波面のずれを補正することとした。

測定ビームは光路長 400m を往復して伝播してくるため、そのビーム径が広がり単位面積あたりの光強度が小さくなる。そこで、無偏光ビームスプリッターは反射係数を大きくして測定光ビーム強度を大きくした。無偏光ビームスプリッターの写真を Fig. 4.2.6 に示す。

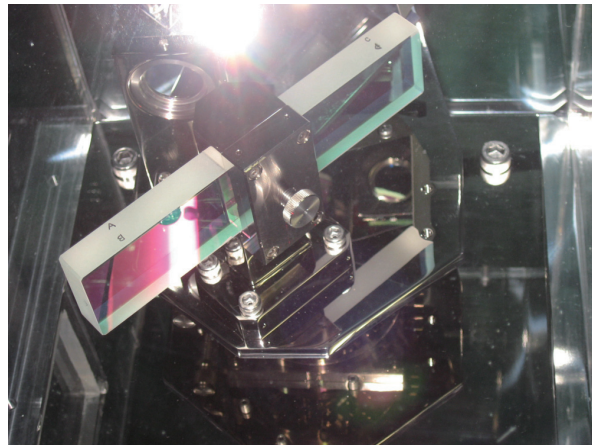


Fig. 4.2.6. Non-polarizing beam-splitter.

(4)レトロリフレクター

レトロリフレクターは入射した光を全く同じ方向へ反射する。レトロリフレクターとして、ガラス塊から入射面を形成したものがあるが、反射時の偏光方向回転を避けるために、鏡を 3 枚組み合わせたものを選択した。

Fig. 4.2.7 にビームの反射位置を示す。波面精度を保つため、ビームが 2 面にわたらないように、各鏡の反射面内にビームの反射範囲が収まるようにしている。波面を保つため、各反射面の平面精度が必要とされる。また、各反射鏡が直交していないと戻りビームが想定外の方角へ返ってしまう。そこで、入手可能であった角度精度 0.5 秒のレトロリフレクターを用いた。レトロリフレクターの写真を Fig. 4.2.8 に示す。

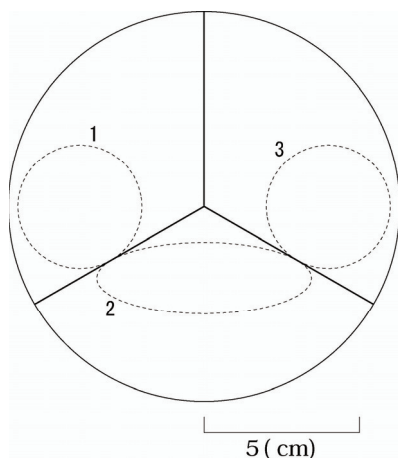


Fig. 4.2.7. Assumed beam-reflecting positions on the mirrors of the retroreflector. The broken circles denote outlines of the beams, and the attached numbers indicate the sequence of the reflection.

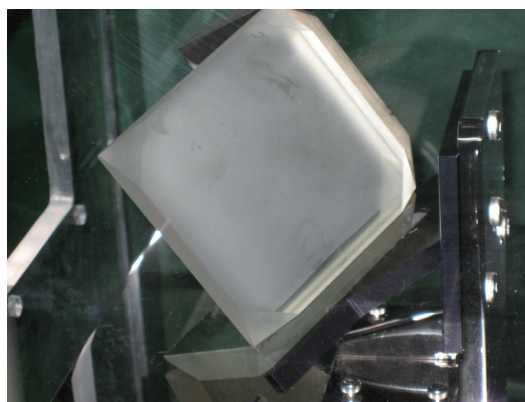


Fig. 4.2.8. Retroreflector (side view)

(5)波面補正板(wedge plate)

入手可能な光学部品の精度の限界のために、波面の角度精度を保つことはできない。そのため初期に得られた干渉光は波面のずれによる干渉縞がみられた。そこで、ウェッジ状の角度のついた光学基板を片方の経路に挿入することにより、ビームの角度の補正を行った。波面補正板を未挿入のときのビームを Fig. 4.2.9 に示す。

このビームの写真から補正すべき角度を求めた。球面波としての光源からの距離と干渉光を形成する 2 つの光源のずれというパラメータを変更しつつビームパターンを計算し、試行錯誤的に波面角度の差を求めた。

参照光を $\cos(\omega t - kr_1)$ 、測定光を $\cos(\omega t - kr_2 - \alpha)$ と仮定する。ここで、 r_1, r_2 は干渉させる場所と仮想的な点光源との距離、 α は位相差を表す定数である。干渉光の強度の振幅は次のようになる。

$$[\{\cos(kr_1) + \cos(kr_2 + \alpha)\}^2 + \{\sin(kr_1) + \sin(kr_2 + \alpha)\}^2]^{0.5}$$

$r_2 = r_1 + 400(\text{m})$ 、参照光の光源は中心軸上、測定光のみかけ上の光源が中心軸からずれているとして、Fig. 4.2.9 と類似のビームパターンとなるように、 $r_1 = 100\text{m}$ 、 $\alpha = 2.3\pi$ 、測定光の光源の中心軸からのずれ(-3.0cm, 2.0cm)を試行錯誤的に求めた。 $r_2 = r_1 + 400(\text{m})$ としたのは、計測時の基線長 200m の往復分を考慮したためである。最適と判断したパラメータのときの干渉ビームの計算強度分布を Fig. 4.2.10 に示す。これを元に参照光と測定光の波面の傾き角度 δ を求めた。

$$\delta = (0.03^2 + 0.02^2)^{0.5} / 500$$

$$= 7.2 \times 10^{-5} \text{ (rad)}$$

$$= 14.8 \text{ 秒}$$

波面の角度のずれ δ を補正するものとして片側に θ の傾斜のついた光学プレートを考える(Fig. 4.2.11)。 $\delta = (n-1)\theta$ である。ここで、 n は光学プレートの材質の屈折率である。 n として、光学ガラス AK7 の 1.515 を用いると、

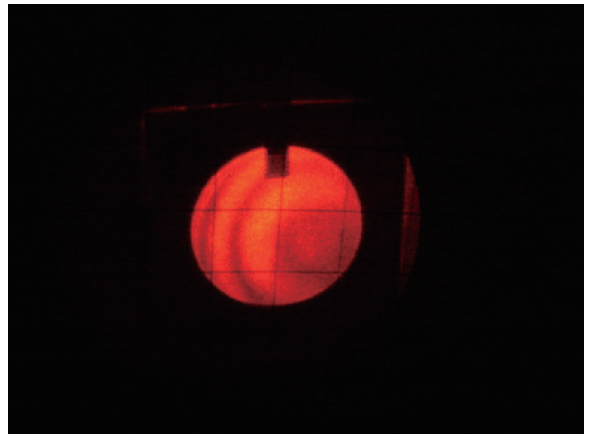


Fig. 4.2.9. Beam pattern without the wedge plate. The grid interval is 1cm.

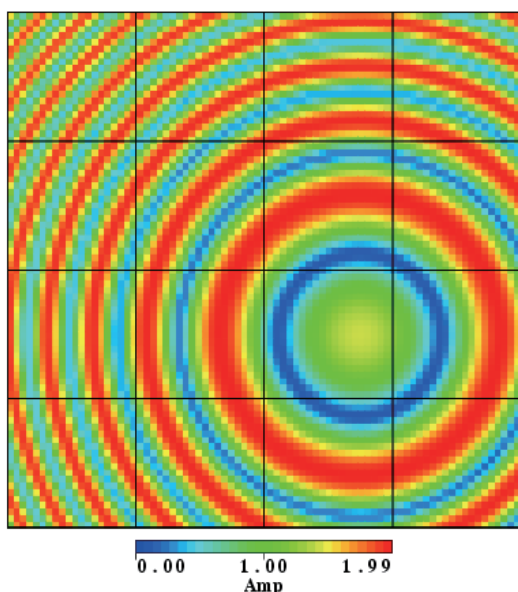


Fig. 4.2.10. Calculated beam pattern. The grid interval is 1cm.

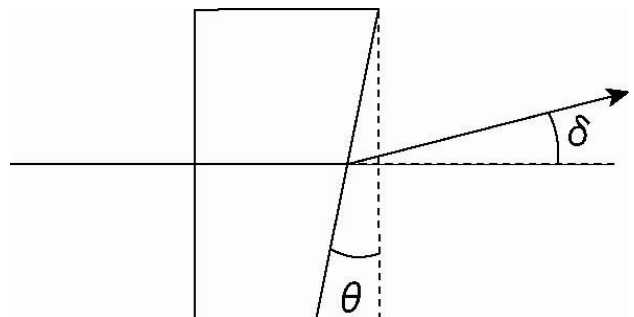


Fig. 4.2.11. Wedge plate and correction to beam direction.

$$\theta = \delta / (n-1)$$

=28.9 秒

となる。このようなウェッジのついた光学プレートを挿入して補正することとした。

(6) 集光レンズと受光器

2つのビームの方向が完全に一致した理想的な干渉光では、光路長の変化に応じて同位相で波面全体の光強度が変化する。その一部の光強度を測定しても光路の伸縮の計測は可能であるが、ビーム全体を集約できれば、光信号強度が強くなり環境電磁気ノイズに対する S/N の向上が図られる。ここでは集光レンズを用いることにより、受光器への入力光強度を強くすることとした。

干渉光は、受光器に入射する前に、偏光ビームスプリッターにより p 偏光と s 偏光に分光される。Fig. 4.2.12 に集光レンズ・偏光ビームスプリッター・受光器部の写真を示す。受光器からは、専用のアンプを経由して、0-5V の電圧が出力される。出力された電圧をデータロガーに入力して記録する。

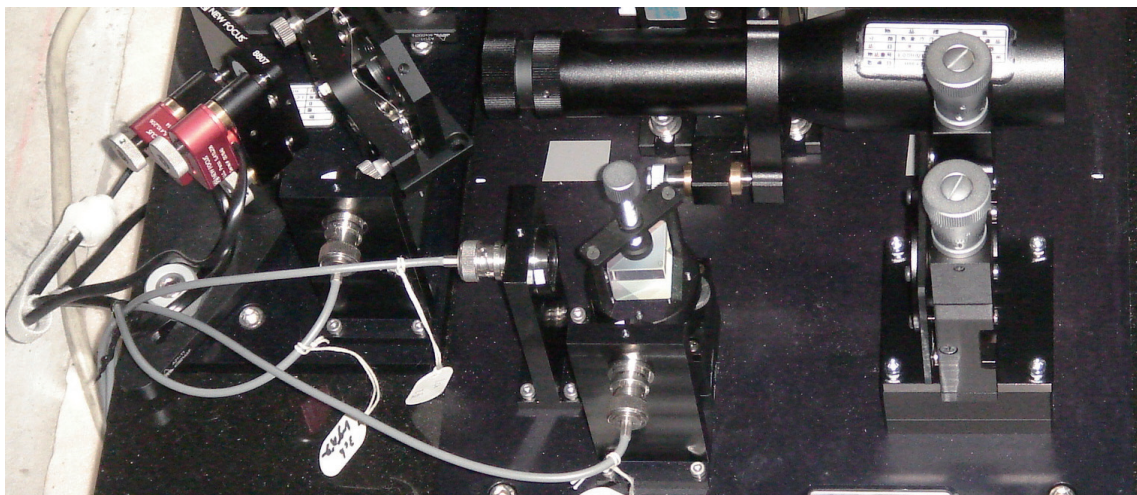


Fig. 4.2.12. Converging lens (right), the polarizing beam-splitter (cubic glass at the center), and photo detectors (connected to cables through BNC connectors).

(7) 光軸調整機構と光軸調整法

光軸の調整機構として、いくつかの可動部を設けている。Fig. 4.2.13 に干渉計の配置図を示す。レーザー装置からのレーザー光は、モーター駆動レンズにより方向を 90° 曲げている。モーター駆動ミラーとして、0.38 秒ステップの調整が可能なステップモーター内蔵の光学ステージ(Fig. 4.2.14)を用いた。2 個のステップモーターにより、水平方向・仰角方向の 2 方向の調整が可能となっている。ビームエキスパンダーにも水平と垂直方向のビーム入射位置・2 方向の角度調整機構が付加されている。ビームエキスパンダーは理想的にはビームの方向を曲げないものであるが、中心にビームが入射しなかった場合には、プリズムのように作用してビームの方向を曲げるので、光軸調整機構の一部となっている。

ビームエキスパンダーからの出力ビームは、レーザー窓を経由して真空装置に入射する。真空装置内の無偏光ビームスプリッター・λ/4 波長板・レトロリフレクター・波面補正板を固定している基板は、可動ステージ上に載せている。これらを側方からみた模式図を Fig. 4.2.15 に示す。可動ステージの調整機構として、回転と傾斜の 2 自由度を持たせている。下から回転ステージ・ゴニオ(傾斜)ステージ・光学部品固定プレートの順に積み上げている。ビームエキスパンダーからのビーム光は、無偏光ビームスプリッターに反射されて、測定光レトロリフレクターへ向かう。測定光レトロリフレクターへ向ける光軸調整は、この回転ステージ・ゴニオステージを用いて行う。測定光レトロリフレクターからの反射光は、測定光レトロリフレクターの反射光角度精度に基づき、再び無偏光ビームスプリッターに戻ってくる。

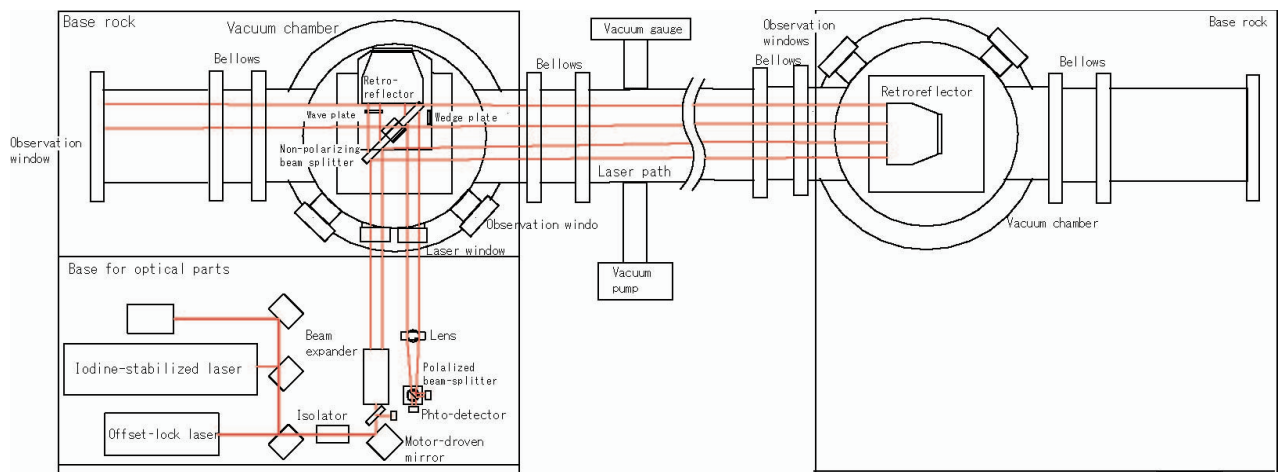


Fig. 4.2.13. Layout of the laser interferometer.

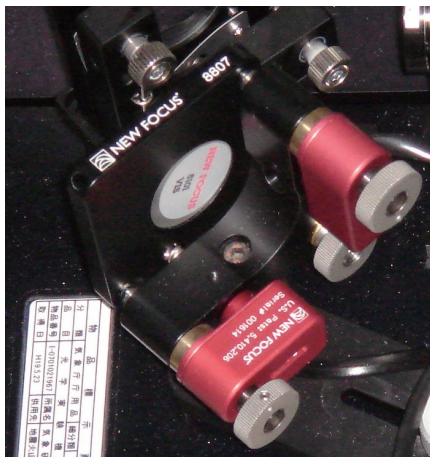


Fig. 4.2.14. Mirror with stepping motors.

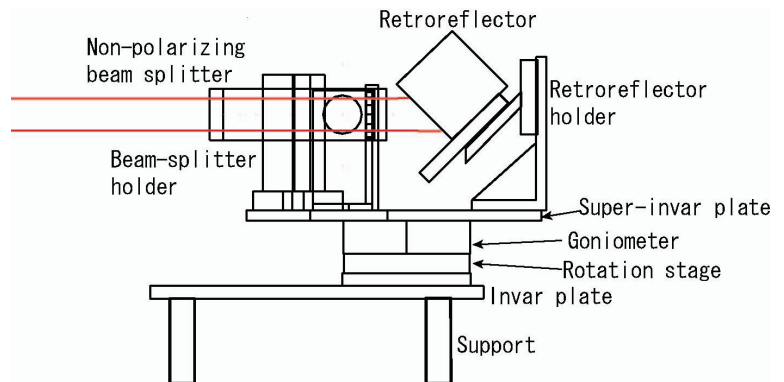


Fig. 4.2.15. Optical part holder in the vacuum chamber. The beam direction is adjusted with the rotation stage and the goniometer.

初期設定において、ビームを測定光レトロリフレクターにあてるのは容易ではない。ここでは、光軸調整のため、真空光路の端面を全面ガラスとした。参照光レトロリフレクターにより反射されたビームは、無偏光ビームスプリッターを透過して測定光のビームと重なり受光器に入射する一方、無偏光ビームスプリッターにより反射されて端面のガラス窓を透過して、真空装置の外に出てくる。その真空装置の外に出たビームは、測定光リフレクターに向かうビームと並行である。そこで真空装置の外に出たビームを真空光路を平行になるように調整することにより、測定光リフレクターに向かうビームの方向を測定光リフレクターの方向に合わせることが可能である。

真空装置内の可動ステージは、外部からの調整は可能としておらず、真空化後は調整不可能となる。また、真空装置内部が大気圧の状態と真空状態では、空気による屈折のために、ビームの方向が異なってくる。そこで、装置内を真空化した後に、更に光軸調整を行う必要がある。真空化した後は、モーター駆動ミラー及びビームエキスパンダーの調整機構を用いて光軸合わせを行う。

4.2.4 設置基台

岩盤の伸縮を測定するためには、測定基準点を岩盤に固定する必要がある。トンネル内は掘削後約 50cm の砂利が敷き詰められている。装置設置場所の砂利をとり除き、1m×1m×0.5m の花崗岩製の台を設置して、干渉計の基台とした(Fig. 4.2.16, 17)。真空装置は基台上に直接固定するものとした。レーザービームの高さは基台面を基準にして 250mm と設定した。レー

レーザー装置・干渉計構成光学部品などは基台の上に更に厚さ 172mm の花崗岩を固定して、その上に設置することとした。レーザー装置等設置用の台石には、装置固定用のボルト穴を設けた。



Fig. 4.2.16. Base rock.

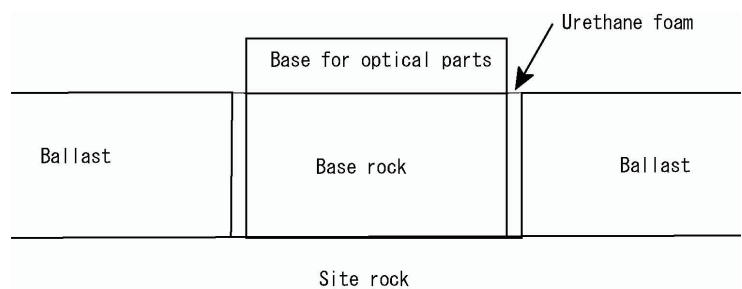


Fig. 4.2.17. Base rock for laser and optical parts of the interferometer.

4.2.5 真空装置

4.2.5.1 考慮すべき条件

光は空気中では真空中よりもその伝播速度が遅くなる。その伝播速度比は屈折率 $n = \sqrt{k\epsilon k\mu}$ として表されている。ここで、 $k\epsilon$ は空気の比誘電率、 $k\mu$ は比透磁率である。乾燥空気の比透磁率は約 1.0000004 であり約 1.00054 の比誘電率に比べ影響は小さい。また、 P を圧力、 T を絶対温度すると、比誘電率 $k\epsilon$ は $k\epsilon - 1 \propto PT^2$ と近似できる(例えば、国立天文台, 2008)。以上より、大気圧における 1hPa の圧力変化は屈折率にして 2.6×10^{-7} の歪変化に相当することになる。数十 hPa に及ぶ大気の気圧変動は、レーザー干渉計による地殻変動観測に直接的な障害となる。空気の屈折率の影響が歪にして 10^9 未満とするためには気圧は 0.4Pa 未満、 10^{10} 未満とするためには気圧は 0.04Pa 未満である必要があると概算される。光路全体の気圧を約 0.1Pa 未満とすれば、内部の空気の屈折率の影響はほぼ無視できる。

また、同時に空気の動きはビームの進行方向に揺らぎを与える役割をはたし、安定観測の障害となる。歪変化としての影響とビームのゆらぎの双方の理由から光路は真空とした。

4.2.5.2 排気ポンプ

真空装置内の空気の屈折率の影響をほぼ無視できる 0.1Pa まで排気するには、1 種類の真空ポンプでは達成できない。多くの場合、1Pa までの真空度を得るための低真空系ポンプと更に高い真空度を得るための高真空系ポンプと縦列に組み合わせて排気する。

低真空系真空ポンプとしては、油回転ポンプやスクロールポンプなどが使われる。しかし、油回転ポンプは油を気密シールとして用いており、排気限界で長時間排気すると容器内はポンプの油の蒸気で満たされる。もしなんらかの理由で高真空系ポンプが停止した場合、真空装置の中が拡散した油分子で満たされる可能性が考えられるが、油分子の光学部品への付着は干渉光の質に悪影響を与える。そこで油を用いないスクロールポンプを用いることとした。高真空を得るためにはターボ分子ポンプを縦列に接続した。ターボ分子ポンプのような高真空系ポンプは、過剰な負荷を避けるために真空度が上がった状態で使用するものであり、初期の排気は低真空系真空ポンプによる。

4.2.5.3 排気時間の見積り

低真空系のポンプの仕様を決定するためには、排気時間の見積りが必要となる。ポンプの排気速度は、単位時間あたりの排気体積によって表される。体積 V の容器において、排気速度 S_p (m^3/s) の真空ポンプを用いて排気するときに、 Δt (s) の間の圧力の変化 Δp (Pa) は、容器内壁からのガス放出速度 Q ($\text{Pa m}^3/\text{s}$) も考慮して表すと次のようになる(例えば、飯島・飯田, 1998)。

$$V\Delta p = -pS_p\Delta t + Q\Delta t$$

ここで、 p はその時点の容器内の圧力(Pa)である。上式から

$$\frac{dp}{dt} = \frac{-pS_p}{V} + \frac{Q}{V}.$$

初期圧力 P_0 としてこの式を解いて次のような解を得る。

$$p(t) = \frac{Q}{S_p} + \left(P_0 - \frac{Q}{S_p} \right) \exp(-S_p t/V)$$

気圧 P にするための時間は次のようになる。

$$t = \frac{-V}{S_p} \ln \frac{P - \frac{Q}{S_p}}{P_0 - \frac{Q}{S_p}}$$

ガス放出は、容器内部に吸着したガスが放出されることが主な要因である。表面処理の状況によりガス放出量は異なる。単位面積あたりのガス放出量 q_D (Pa m/s) を、内部を電解複合研磨した状態を想定した 1×10^{-6} (Pa m/s) (例えば、石澤・他, 2007) と仮定して、大気圧から 10(Pa) にするまでの時間排気速度と排気時間の関係を Fig. 4.2.18 に示す。なお、10(Pa) は、ターボ分子ポンプを稼働するのに十分可能な真空度として仮に設定した。また、内径 $D=0.2\text{m}$ 、長さ $L=400\text{m}$ の管を想定している。ガス放出量は $Q = \pi D L q_D$ から計算される。

作業効率だけからみた場合には、所定の真空度に達するまでの時間は短いほどよい。ここでは、作業時間に大きな支障を与えないことを想定して、数時間以内に所定の真空度に達する条件を考える。Fig. 4.2.18 より、300~400L/min の排気容量を持つ中型の排気ポンプ 1 台があれば、排気開始から数時間で高真空系のポンプが可能とみられる。

実際に採用したものは 250L/min のスクロールポンプである。250L/min の排気ポンプを用い、 $q_D=1 \times 10^{-6}$ とした場合の気圧の推定時間変化を Fig. 4.2.19 に実線により示す。洗浄のみを想定した 10^{-5} (Pa m/s) の場合にも、Fig. 4.2.19 とほぼ同様の变化となる。検討段階において、塩化ビニル製の真空

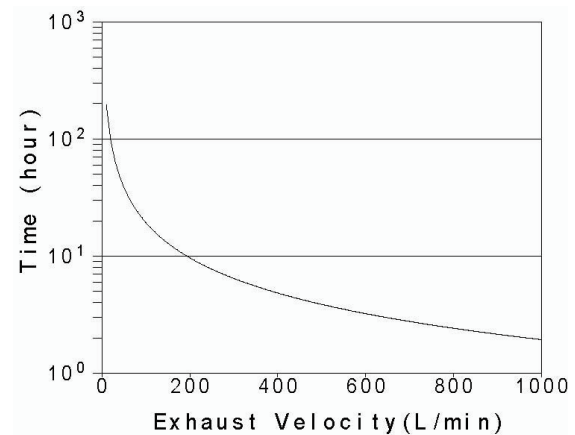


Fig. 4.2.18. Relationship between exhaust velocity of a vacuum pump and time to reach the pressure of 10Pa.

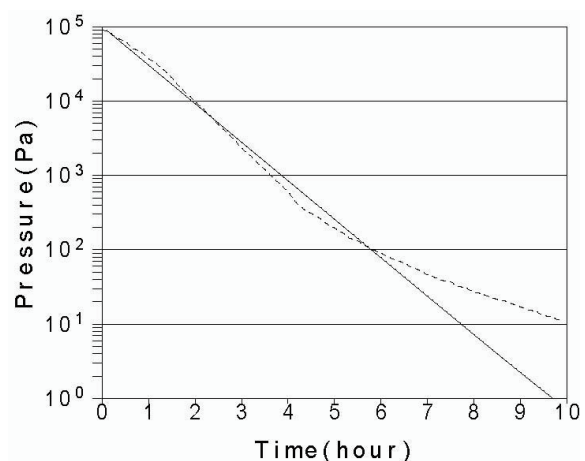


Fig. 4.2.19. Estimated pressure change for a vacuum duct of $q_D = 1 \times 10^{-6}$ (Pa m/s) (solid curve). A vacuum pump of 250L/min is assumed to be used. The broken curve indicates the observed pressure change for the 400m-long vacuum duct.

容器の可能性についても考えた。しかし、塩化ビニルを想定した 10^3 (Pa m/s) の各場合には 1500L/min 以上の能力のポンプでなくては、ガス放出量が大きすぎて排気時間算出に必要な $P_0 > Q/S_p$ の条件が得られない。

管状容器内の空気の排気の場合には、排気抵抗のために以上の推定よりも排気速度は下がる。Fig. 4.2.19 の波線は実際に測定された真空度の変化である。 10^2 (Pa)に至るまでは、理論推定値に近い値となっている。

4.2.5.4 真空度分布の見積り

真空装置内部の真空ポンプに近い場所では真空度は高くなるが、排気口から離れるとガス放出のために真空度が下がる。管路内の真空度の分布 p を管路中の場所 x の関数として見積もるためには、配管中を気体が流れるときに生じる抵抗である排気抵抗を考慮する必要がある。圧力差 Δp (Pa)がある場合の排気量 Q (Pa m³/s)は、排気抵抗の逆数であるコンダクタンス C (m³/s)を用いて次のように表すことができる(例えば、飯島・飯田, 1998)。

$$Q = C\Delta p$$

気体分子の平均自由行程が導管断面の最小寸法よりも十分に小さい場合には、粘性流という取扱いをする。圧力が下がり分子密度が下がると分子流という扱いをする必要がある。その境目はおおよそ 1Pa である。粘性流か分子流かでコンダクタンスの値が異なる。ここでは、高真空まで達した場合の分子流を想定し真空管路内の圧力分布を見積もる。

分子流のコンダクタンス C_m (m³/s)は次のようになる(飯島・飯田, 1998)。

$$C_m = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{D^3}{\Delta x}$$

ここで D (m)は管路の直径、 Δx (m)は管路長、 R は気体定数、 T は絶対温度、 M は分子量である。20°Cの空気の場合には、

$$C_m = 121 \frac{D^3}{\Delta x}$$

となる。定数を a_m とおく

$$Q = a_m \frac{D^3}{\Delta x} \Delta p$$

$$\approx a_m D^3 \frac{dp}{dx}$$

ここで x は管路に沿って計った距離である。

dx あたりのガス放出 dQ は、 $\pi D q_D dx$ となる。ガス放出と排気量がつり合う定常状態では

$$a_m D^3 \frac{d^2 p}{dx^2} = \pi D q_D$$

となる

また、 $x = 0$ に排気速度 S_p (m³/s)のポンプをおいて、管路全体で放出されたガスを排気しているとする、 $x = 0$ における排気量 Q_0 は、

$$Q_0 = p(0)S_p$$

$$= \pi D q_D L$$

となる。 $p(0)$ は $x = 0$ における圧力である。また、コンダクタンスによる制約から $Q_0 = a_m D^3 \frac{dp}{dx} \Big|_{x=0}$ である。以上より管路内の圧力分布は以下の通りとなる。

$$p(x) = -\frac{\pi q_D}{2a_m D^2} x^2 + \frac{\pi q_D L}{a_m D^2} x + \frac{\pi D q_D L}{S_p}$$

S_p として 400L/s, q_D として, $10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-3}$ (Pa m/s) を仮定した場合の圧力分布を Fig. 4.2.20 に示す。但し, 10^{-3} (Pa m/s) では真空度が低いので, 次の粘性流の場合のコンダクタンス C_v (m³/s) とそれから導かれる圧力分布の式を用いた。

$$C_v = a_v \frac{D^4}{\Delta x} \Delta p,$$

$$p(x) = \sqrt{-\frac{\pi q_D x^2}{a_v D^3} + \frac{2\pi q_D L}{a_v D^3} x + \left(\frac{\pi q_D D L}{S_p}\right)^2}$$

なお, 20°C の空気の場合に $a_v = 1349$ である。

Fig. 4.2.20 において, 真空ポンプ付近の圧力は, 真空ポンプの排気速度と全体のガス放出量により決まり, 真空ポンプから離れた場所においては, ガス放出量の影響が大きいことがわかる。1 台の排気ポンプを用いて光路全体において 0.1Pa 未満としようとした場合に, 10^{-6} (Pa m/s) 程度未満のガス放出量である必要がある。また, ガス放出が多い管路を用いた場合には, 多数の真空ポンプを必要とする。

Fig. 4.2.21 にターボ分子ポンプ稼働後 10 日間に 400m の真空光路の端にあるポンプ設置場所付近で観測された真空度の変化を示す。排気開始後数時間で, $q_D = 10^{-6}$ (Pa m/s) から期待される気圧 ($\pi D q_D L / S_p = 6 \times 10^{-4}$ (Pa)) に至っている。更に 10 日後には 3×10^{-5} (Pa) に至っている。この気圧は真空容器壁面からのガス放出が 5×10^{-8} (Pa m/s) 未満になっていることに相当する。なお, 真空光路長 200m にて数ヶ月以上真空ポンプを運転した場合に, 気圧は 2×10^{-5} (Pa) より下がることはなかった。排気システムの写真を Fig. 4.2.22 に示しておく。

4.2.5.5 光学部品からのガス排出量

光学部品から多量のガス放出があつては, 容器からのガス放出を抑えても容器内の気圧を下げることはできない。光学部品についてもガス放出量を検討した。

光学部品を固定するプレートについては, 真空容器内部と同様に研磨を施し, ガス放出を抑えてある。レトロリフレクターは, 固定のためのプレートとミラーが一体

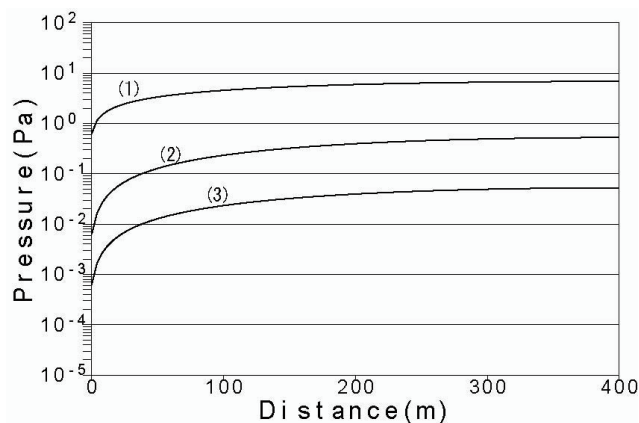


Fig. 4.2.20. Estimated pressure distribution in a duct for outgas rates of (1) $q_D = 10^{-3}$ (Pa m/s), (2) 10^{-5} , (3) 10^{-6} .

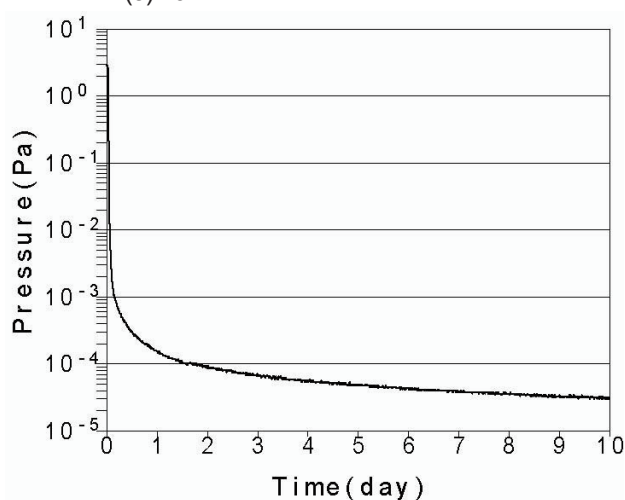


Fig. 4.2.21. Observed pressure change in the vacuum chamber at the evacuation port after the start of evacuation by the 400L/s turbo molecular pump.

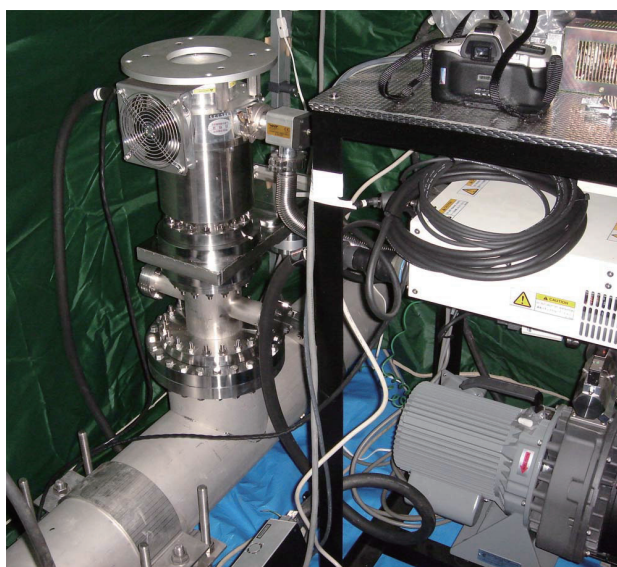


Fig. 4.2.22. Pump system. A scroll pump is at the right bottom, and a turbo molecular pump is at the left.

化されて制作されたものであり、また、固定用プレート部分が研磨されたものでなかったため、ガス放出が懸念された。そこで、レトリフレクターについてはガス放出量を実測した。

方法としては、小型の真空容器を用いて、レトリフレクターの有無に応じた真空度の低下を比較した。初期ガス放出を除くため、まずターボ分子ポンプを用いて排気する。その後、容器とポンプの間をゲートバルブにより閉じ切り、真空度の変化を測定した。レトリフレクターがない状態では、初期真空度 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、70 時間後真空度 1.6Pa に対し、レトリフレクターを入れた状態では、初期真空度 $4.2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、70 時間後真空度 5.1Pa であった。この差がレトリフレクターからのガス放出とみなせるので、その量は以下になる。

$$\{(5.1 - 4.2 \times 10^{-5}) - (1.6 - 1.3 \times 10^{-5})\} / (70 \times 3600) \times 0.0035 = 4.9 \times 10^{-8} (\text{Pa m}^3/\text{s})$$

ここで、 $0.0035(\text{m}^3)$ はテストに用いた真空容器の容積である。レトリフレクターからのガス放出量は、真空容器内壁のガス放出量を $q_D = 10^{-6} (\text{Pa m}^3/\text{s})$ と仮定した場合の全ガス放出量

$$\pi D L q_D = 2.5 \times 10^{-4} (\text{Pa m}^3/\text{s})$$

に比較して、無視可能な量である。

真空容器内で用いる可動ステージもガス放出が懸念された。通常の規格の製品である真鍮製の歯車を用いた場合に、ステージ制作会社の見積もりでは回転ステージが $1.69 \times 10^{-4} (\text{Pa m}^3/\text{s})$ 、ゴニオステージが $2.55 \times 10^{-4} (\text{Pa m}^3/\text{s})$ のガス放出(真空中 3 ~ 10 時間後)があるとされていた。これは真空容器内壁全体からのガス放出量を上回る量に相当する可能性がある。そこで、歯車の材質をリン青銅に変更して、想定ガス放出量が 1 桁小さな可動ステージを用いることとした。

4.2.5.6 気圧荷重対策

直径 0.2m の円筒真空容器の端面には、およそ 300kgf の気圧荷重が加わる。それがそのまま干渉計の光学部品を収納する真空容器に加わると気圧荷重による容器の変形が歪変化として記録される。そのため、光学部品を収納する真空容器の真空ダクト部分からの分離をはかるため、両者を伸縮可能なベローズにより接続することとした。その際に端面に加わる荷重を何らかの方法により支える必要がある。ひとつの方法は床面に固定架台を設置してそこで端面への気圧加重を支える方法がある。ここでは、真空容器を製造した日造精密研磨社の提案に基づき、気圧荷重を金属棒によりバイパスすることにより、真空ダクトそのもので支えるようにした(Fig. 4.2.23)。気圧荷重は真空ダクトそのものの剛性及び真空ダクトの支持架台により受けるようにしている。

気圧荷重は、光学部品収納槽の底面にも加わる。底面が変形すると、そこに取り付けられている光学部品の位置も変化する。変形を小さくするために、底面は厚さ 40mm のステンレス鋼製とした。また、光学部品を支えるサポートは、底面に対して対称となる 4 本の脚で支えるものとした。たとえ底面が気圧変動により変形しても、サポートが底面に対して対称であれば上下方向にのみ変形し計測に影響のある傾斜変化は極小さなものになることを期待した。



Fig. 4.2.23. Isolation of the chamber from atmospheric pressure. The atmosphere pressure loaded on the edge is bypassed by rods to the duct so that the chamber containing optical parts can be isolated from atmospheric pressure. The chamber and the duct are connected with bellows (covered with white sheets).

4.2.5.7 真空光路設置

真空光路は、トンネルの床面を 10cm ほど掘り下げてコンクリートで支持台を固定した(Fig. 4.2.24)。支持台は高さや水平方向について若干の調整が可能としてある。設置時の調整のために管路の接続部分には適宜ベローズを挿入してある。

測定光レトロリフレクター側から見た真空光路の写真を Fig. 4.2.25 に示す。



Fig. 4.2.24. Support for the vacuum duct.

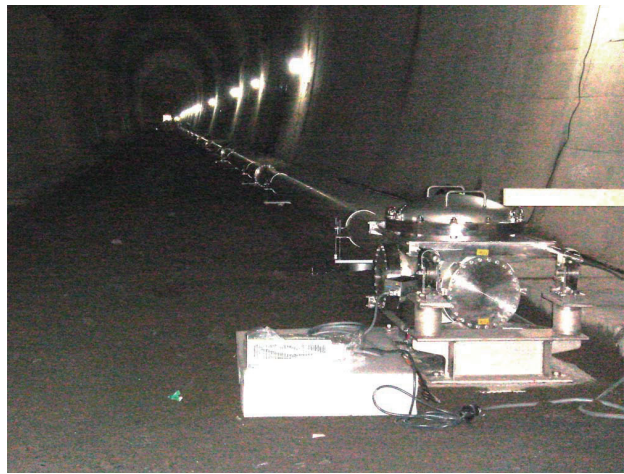


Fig. 4.2.25. Vacuum duct.

4.2.6 データ収録と処理

4.2.6.1 データ収録項目と収録装置

データ収録項目及び処理装置の具体的な構成について以下に記す。

(1) 干渉信号及びレーザー光強度

2 チャンネルの干渉光のビーム強度を連続記録する。また、入力ビーム強度が変化すると干渉信号自体が変化し、リサーチの位相抽出処理上障害となるので、レーザー装置からの入射ビーム強度もモニターする。受光器からの電圧出力はデータロガーにおいて A/D 変換して、計算機へ伝送して記録する。用いたデータロガー(白山工業社製 LS7000)は通常の仕様では 200sample/s までの速度であるが、特別ファームを組み込むことにより 1000sample/s として使用している。サンプリング速度を上げた理由は、地震等によって高速に変化する位相に追従するためである。LS7000 は、入力信号の変化範囲及び十分な分解能を得るために、10V/20bit($39 \mu\text{V/count}$)として用いた。

ロガーからのデータは、ネットワーク経由で収録用計算機へ転送される。そのパケット形式は win フォーマット(卜部, 1994) を元にしたものであるが、1000samples/s となるデータは通常の win フォーマットではなく、A5 フォーマットと呼ばれる特殊なフォーマットとなっている。フォーマットの概要を Fig. 4.2.26 に示す。通常の win において 1 秒のデータが 1 パケットとして伝送されるが、A5 フォーマットにおいては 0.1 秒間のデータ 100 サンプルが 1 パケットとして伝送される。通常の WIN フォーマットにおいては 100ms, 10ms の時刻情報は付加されない。通常と異なるフォーマットに対処するため、東京大学地震研究所によって配布されている WIN のプログラムのデータ受信(recvt.c)・データソート(order.c)・ファイルへの書き出し(wdisk.c)を変更し、データの収録に用いている。

用いたデータロガーのアンチエイリアスフィルターは、エイリアシングを完全に抑えるに十分な減衰量はない。LS7000 に環境電磁気ノイズによるエイリアシングが観測されたため、受光器出力とデータロガーの間に高域遮断フィルターを挿入した。高域遮断フィルターとして、8 次のベッセルフィルターを用いた。フィルターの伝達関数を決定する上で、勝間田(1993)によるプログラムを用いた。その振幅の周波数特性を Fig. 4.2.27 に示す。20bit のダイナミックレンジ(120dB)に対するアンチエイリアスフィルターとしては十分なものではないが、高周波の環境電磁気ノイズによる影響を抑えるのに有

効であり、また電圧値そのものが地殻の伸縮に対応するものではないので、ノイズを軽減するには十分と考えこのような周波数特性とした。なお、フィルターは多重帰還型 2 次低域通過フィルター(例えば、柳沢・金光, 1973)を 4 段縦列接続したものとした。

データロガーの時刻精度は、GPS 信号を受信することにより維持している。トンネル入り口に GPS アンテナ(Fig. 4.2.28)を設置し、トンネル入り口から 100m 地点にあるデータロガーまでアンテナ信号線を延長している。但し、減衰に対処するため 100m まで直接延長するのではなく、途中に信号増幅器を挿入した。計算機の時刻はデータ packets に埋め込まれている時刻(Fig. 4.2.26)を参照し随時校正調整するようにしている。

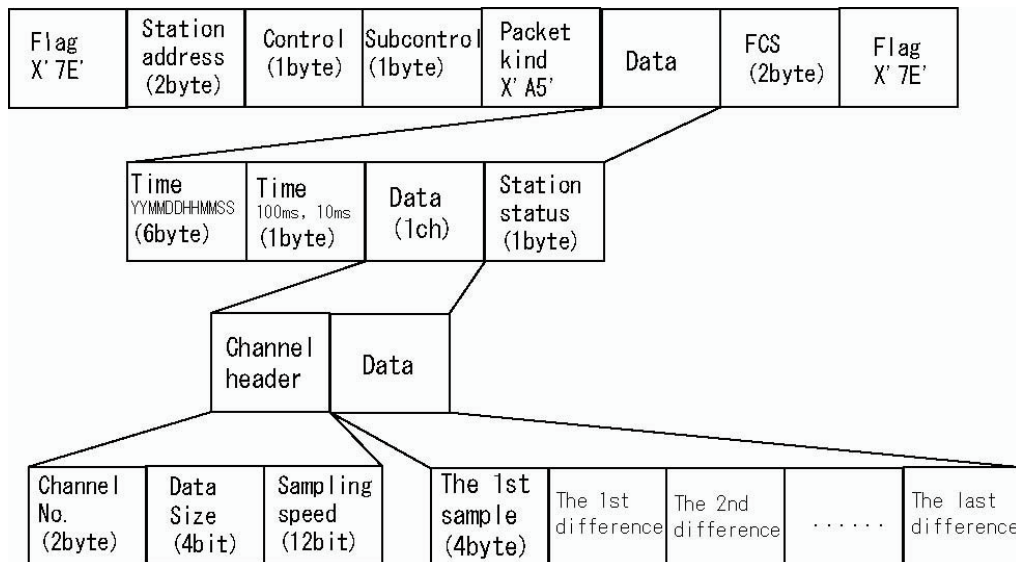


Fig. 4.2.26. A5 format used in the LS7000 data-logger for data transmission of 1000 samples/s.

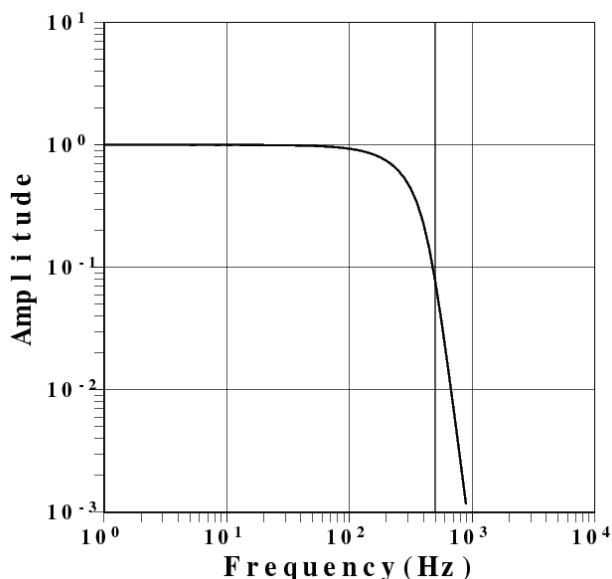


Fig. 4.2.27. Frequency response of the low-pass filter applied to the signal from the photo detector. The vertical line at 500Hz indicates the Nyquist frequency.

(2) ヨウ素安定化レーザー状態

ヨウ素安定化レーザー装置は、通常発振周波数を制御した状態にして動作させている。しかし、振動等が発生すると制御がはずれる場合がある。ヨウ素安定化レーザー装置は、 GPIB インターフェースを通じてそのロック状態のモニターが可能であり、一定間隔でその状態を確認することとした。

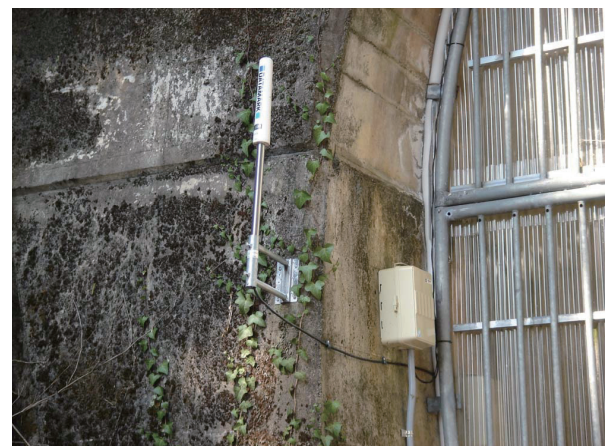


Fig. 4.2.28. Antenna for the data-logger.

(3) オフセットロックレーザー発振周波数

オフセットロックレーザー装置は、ヨウ素安定化レーザーとは一定の周波数だけずれた周波数において発振するように制御されている。その差の周波数は両レーザー光の干渉のビート周波数として取り出している。オフセットロックレーザーの周波数が安定に保たれているかどうかを確認するため、ビート信号を 3GHz まで計測可能な周波数カウンターに入力し、周波数カウンターの出力は GPIB インターフェース介して計算機に取り込むこととした。

(4) 気圧

気圧は地殻変動データの補正のため必要とされる。長野市松代の精密地震観測室における 100m 石英管伸縮計は 10^{-9} strain/hPa の気圧応答を示すことが知られている(柏原・他, 1987)。気圧測定の精度を検討する上で、この値を考慮した。20~30hPa の変化では $2\sim3\times10^{-8}$ strain 相当の変化が期待される。 $2\sim3\times10^{-8}$ の歪の 1/100 まで補正するためには、0.2~0.3hPa の分解能を必要とする。センサーとしては、0.30hPa の精度を持つ機器を用いることとした。また、サンプリング速度は高速を必要としないと考え、1 サンプル/分程度とした。出力はアナログとして、低速データロガーを用いてデータ収録することとした。

(5) 真空度

真空システムの保全を確認するため、真空計の記録を得る。真空光路内の気圧をモニターするものとして大気圧から 10^5 Pa 程度までの計測範囲のものを必要とする。測定感度の関係から主として用いられるセンサーのタイプは、通常 1Pa を境にダイヤフラム方式からフィラメントの温度変化を検出するタイプに切り替わる。両方のセンサーを備えた真空計を用いることとした。同表示器からの電圧出力を LAN 接続可能な電圧ロガーに接続してモニターすることとした。

(6) トンネル内温度

トンネル内の温度を精密にモニターするため、真空光路の 0m 地点と 200m 地点に、水晶振動子式の温度計を設置した。2 点の精密温度とは別にトンネル全体の温度変化をモニターするために、簡易型温度モニターを設置した。但し、これは、オフライン型として、装置の保守時にデータ回収する形式とした。

(7) カメラ

温度変化や振動により光学部品の取り付け位置にずれ等が生じ、ビーム位置がずれていくことが懸念される。ビームが所定の位置に維持されるかをモニターするために、カメラを設置することとした。使用したカメラは、http プロトコルによりアクセス可能な web カメラとして、一定時間ごとに画像を記録する。

(8) 観測室内温湿度

構成部品は熱膨張するので、測定値に対する影響を確認するために温度の測定が必須となる。レーザー装置や光学部品などを設置してある観測室の温度をモニターする。また、トンネル内は高湿度環境であるが、電子機器などが正常な動作を続けるためには 80%未満の湿度が必要であり、観測室内には除湿器を設置している。機器保全のための観測室内の湿度も確認しておく必要がある。観測室内の温度・湿度をモニターするセンサーを設置し、アナログ入力データロガーに接続した。

(9) 真空ポンプ室内温湿度

動作環境保持のため真空ポンプ室にも除湿器を設置している。真空ポンプ室の温度・湿度は LAN 接続の温湿度計を用いてモニターすることとした。

また、観測を維持するために、以下の通り機器の制御も必要とする。

(1) ヨウ素安定化レーザー制御

安定化レーザー装置は、GPIB インターフェースを通じて状態のモニターが可能であると同時に、同インターフェースを通じて安定化の回復などの制御が可能である。非安定化状態を検知した場合には、再安定化の制御を行うこととした。

(2) オフセットロックレーザー発振周波数制御

絶対長測定などの応用を可能とするため、オフセットロックレーザーの発振周波数を外部よりリモートで制御可能にする改造を行った。計算機との接続として、デジタル I/O(DIO)を用いることとした。

(3) モーター駆動反射鏡

光軸調整の必要が生じた場合に、リモートから対応可能とするため LAN 経由にて制御可能なモーター駆動反射鏡を用いた。

以上の入力・出力を行い、そのデータの記録を行うための計算機として、Linux を OS とするものを用いることとした。

以上の機器の構成を Fig. 4.2.29 に示す。GPIB・DIO などは拡張ボードを用いて接続した。

なお、精密地殻変動観測は降雨の影響を受けやすいため降水量の計測が必要であるが、ここでは近くの気象観測点のデータを参照することとして、降雨モニターは行っていない。

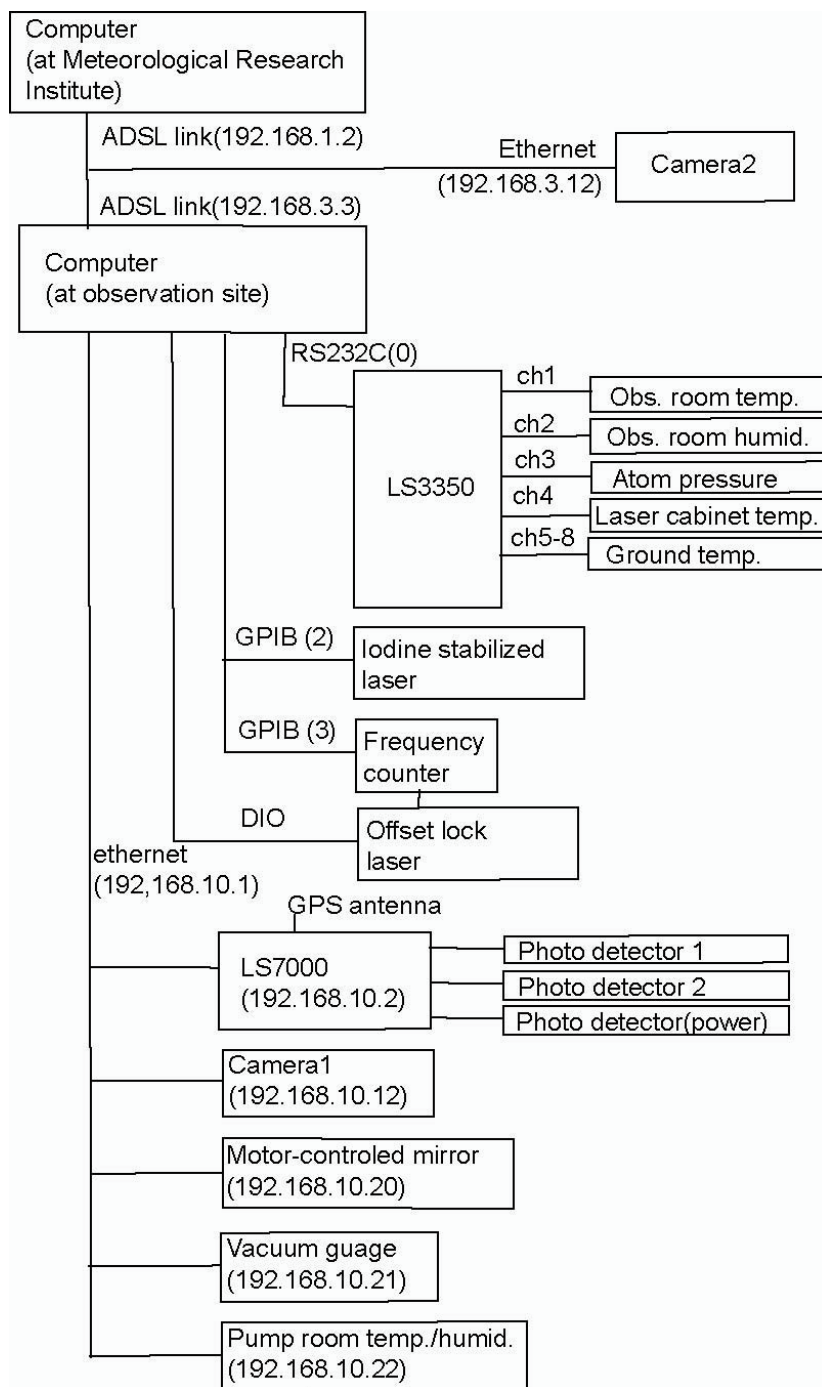


Fig. 4.2.29. Recording system.

4.2.6.2 距離変化算出処理

マイケルソン干渉計では、 $\lambda/4$ 波長板を用いて $\pi/2$ だけ位相をずらした 2 つの直交した直線偏光の光強度を測定して、変化が伸びであるか縮みであるかを判定して長さ変化を得ている。干渉計から得られる信号は、長さ変化に応じて変動する 90° 位相のずれた 2 つの光の強度である。光強度がそのまま長さ変化を表すものではないので、長さ変化を得るためにはデータ処理が必要となる。

2 つの光強度の変化は (x, y) 平面上にプロットした際には楕円軌道を描く。ここではデータプロットに楕円をフィッティングさせて位相角を抽出する方法をとった。データのプロットの (x, y) 平面において、ある楕円を初期値として与えて、楕円軌道とデータの中心からの距離の差を角度の関数とみなす。Fig. 4.2.30 にその例を示す。仮定した楕円の大きさが不適切である場合 ((a) と (b)) には、残差の平均値にその違いが現れる。中心がずれている場合 ((c) と (d)) には、残差は周期 2π の分布を示す。扁平率が不適切であった場合 ((e)) や、楕円の角度が異なっている場合 ((f)) には、残差は周期 π の分布となる。そこで、1 周期内の角度の変化 ϕ に対して、残差の平均、 $(\cos \phi, \sin \phi)$ 成分、 $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ 成分を取り出すことにより、どの楕円パラメーターが不適切か判別可能となる。このときにデータの ϕ に関するデータ分布の偏りの影響を軽減するために ϕ に関するデータの区間平均 a_i を用いて成分を取り出す。

$$r_j = \sum_{i=1}^N a_i f_j(\phi)$$

ここで、 r_j が関数 $f_j(\phi)$ の成分、 N は ϕ に関する分割数である。 $f_j(\phi)$ として $1, \sin(\phi), \cos(\phi), \sin(2\phi), \cos(2\phi)$ を仮定する。残差のオフセット成分は初期楕円の大きさ $(a+b)$ のずれに、 $(\cos \phi, \sin \phi)$ 成分は初期楕円の中心位置 (x_0, y_0) のずれに、 $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ 成分は初期楕円の回転角 (θ) もしくは扁平率 $((a-b)/a)$ のずれに主として関係するものとして、楕円のパラメーター (x_0, y_0, a, b, θ) を繰り返し修正して最適値を求める。 $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ 成分についてはまず回転角の補正を行い、回転角の補正が十分な場合にのみ扁平率の補正を行うこととした。

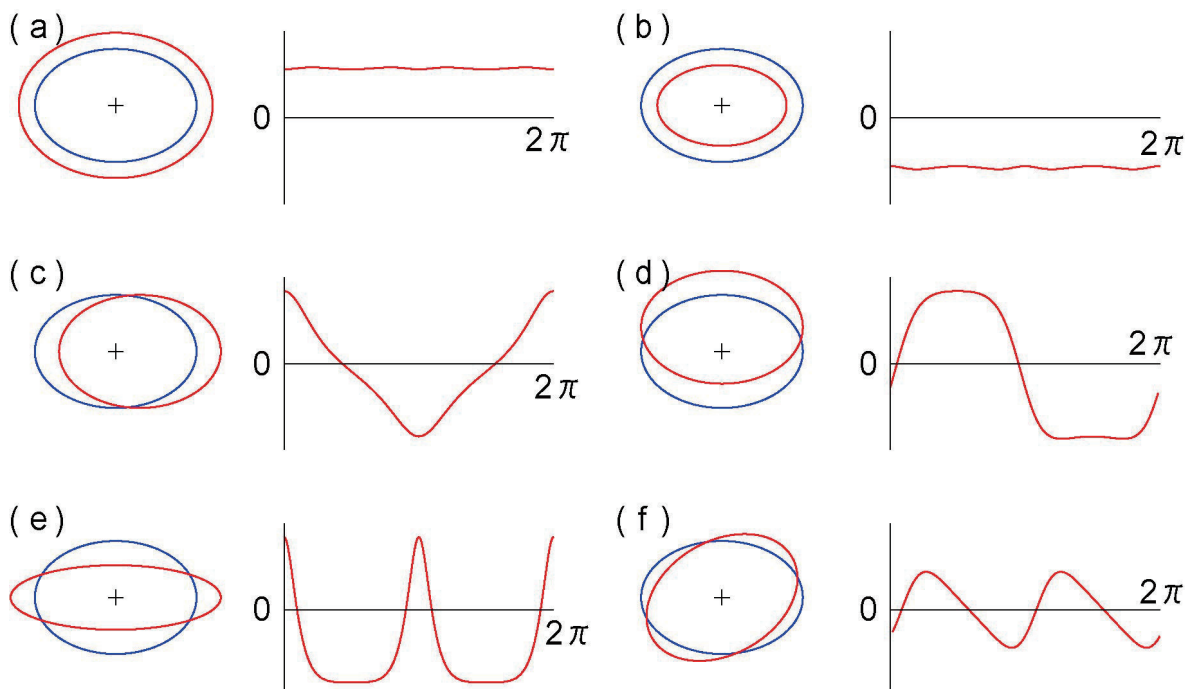


Fig. 4.2.30. Residual distributions for various misfits. The red ellipses indicate data distribution in Lissajous figures. The blue ones are assumed ellipses. The graph on the right plots the residual distribution as a function of the angle around the center of the assumed ellipse. The residual is measured as the difference in distances from the center of the assumed ellipse between the data distribution and assumed ellipse. (a) Too small assumed ellipse. (b) Too large assumed ellipse. (c) Horizontal offset of the assumed center. (d) Vertical offset of the assumed center. (e) Difference in ellipticity. (f) Rotation.

Fig. 4.2.31 にその過程を示す。 (x,y) 平面上の楕円のプロットと、仮定した楕円の位相を横軸にとった残差のプロットを並べて示している。 (x,y) 平面上の青い楕円が仮定しているもの、黒いプロットがデータ、残差プロットの水色の丸が位相区間ごとのデータの平均、赤線が平均、橙線が $(\cos\phi, \sin\phi)$ 成分、緑線が $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ 成分を表す。初期の楕円は ch1 と ch2 の最大値から仮定している。平均成分・ $(\cos\phi, \sin\phi)$ 成分・ $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ 成分を同時に補正した場合に必ずしも収束が進まない場合があったので、1 回の補正は最も大きな成分のみを対象とした。

データが楕円の一部にしか分布していない場合には、そのまま楕円をフィットさせることは困難であるが、その場合には、十分なデータの分布がある期間をとって処理を行う。なお、時間を長くとるとデータの数が過大となり処理の上で障害となりうる。その場合にはデータの間引きを行なって楕円のフィットを行う。フィットした楕円に基づき位相を取り出すときに間引きをおこなわなければ、楕円のフィティングにおける間引きが元でエイリアシングを起こすことはない。

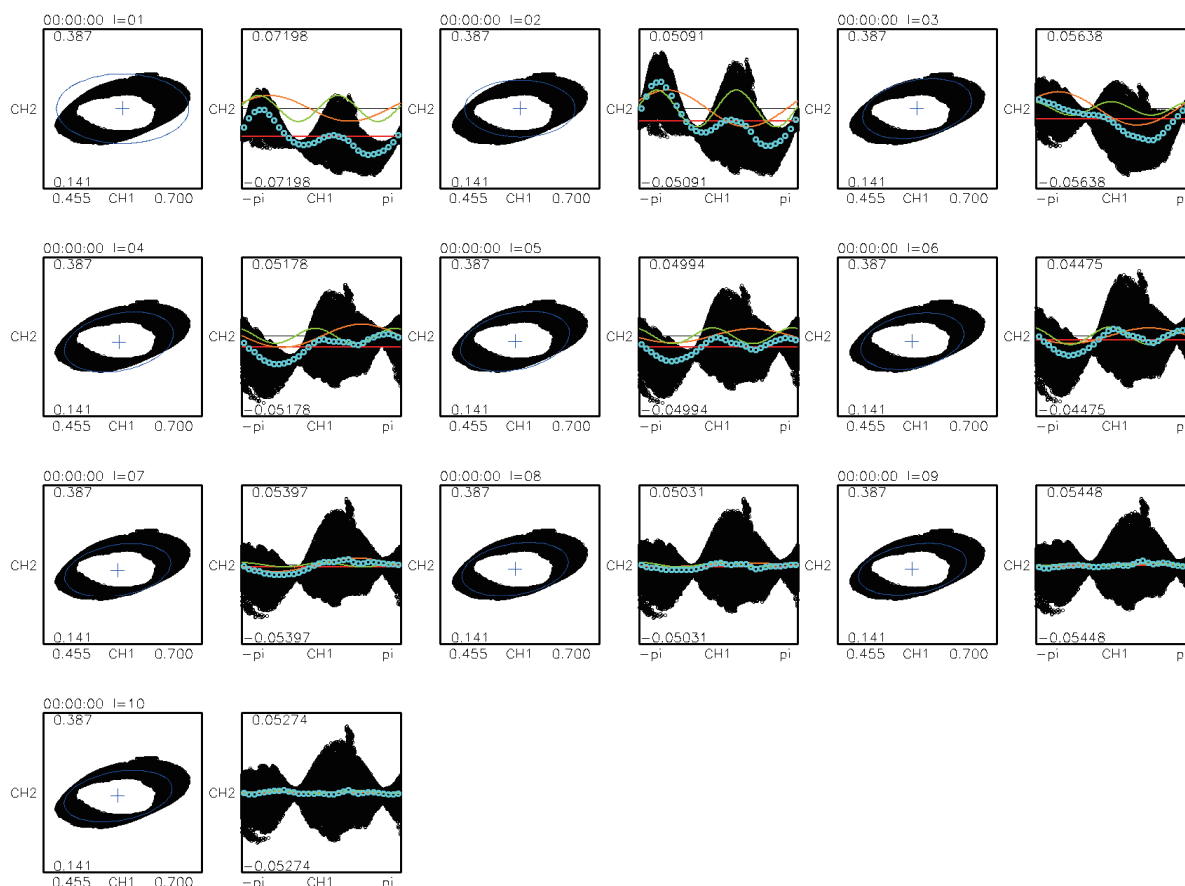


Fig. 4.2.31. Process of ellipsoid fitting. Plots of channels 1 and 2 on the (x,y) coordinate and residuals from the assumed ellipsoid are depicted as a pair. The blue ellipsoid indicates assumed data distribution, the black dot indicates data, the blue dot indicates average of data on the sectioned range of phase, the red line indicates data average, the orange curve indicates the $(\cos\phi, \sin\phi)$ component, and the green curve indicates the $(\cos 2\phi, \sin 2\phi)$ component.

4.2.7 絶対長測定

マイケルソン干渉計は長さ変化を高精度で測定できるものの、そのままでは絶対長の測定には適さない。また、地震時にはビームの横振れやサンプリングの遅れなどにより、位相を連続して検出できないような事態となると、地震時の地殻変動量を観測できなくなることが懸念される。Araya *et al.*(1999)のようにファブリペロー光共振器を構成して絶対長を測定するのは容易ではない。ここではレーザーの波長スイープ方式の絶対長測定を取り入れた。

オフセットロックレーザーの発振周波数オフセット量は、接点スイッチにより設定するものであるが、それを外部から

のデジタル入力による方式に改造した。制御用計算機からのディジタル出力をフォトカプラー接続により直接にオフセットロックレーザの制御装置に入力する。実際の発信周波数のオフセット量は周波数カウンターにより測定し、その周波数と干渉計の位相変化量の関係から絶対的な長さを求める。

オフセットロックレーザの発振周波数は、安定化レーザに対して約 200MHz の幅で制御可能である。レーザの発振周波数を Δf だけ変化させるとそれに応じて、レーザ光の参照系と測定系の間に $2\pi L\Delta f / c$ (rad)だけの位相変化が生ずる。ここで、 L は参照光と測定光のレーザ光路長の差、 c は光速である。往復で $L=800(\text{m})$ の光路差があるので $\Delta f=200(\text{MHz})$ のレーザ発振周波数の変化に対して、 $L\Delta f / c = \text{約 } 530$ 波長分の位相変化が生ずる。全体長に対して $10^6 \sim 10^7$ の分解能を得ようとした場合に 1 周期に対する位相分解能は $10^3 \sim 10^4 (=530/10^7 \sim 530/10^6)$ まで必要とされる。また、安定化レーザとオフセットロックレーザの発振周波数の差は、そのビート信号から周波数カウンターを用いて十分正確(分解能 10 桁程度)にモニター可能である。 10^5 までの精度の絶対長測定が可能であることが確認されたが、地動ノイズなどの影響により、 $10^3 \sim 10^4$ の位相分解能は得られていない。

4.2.8 雷災対策・停電対策

レーザ装置等は精密電子機器であり、雷サージ等の電気ショックに対して保護する必要がある。電源ラインには耐雷トランスを挿入するとともに、1 時間程度までの停電対策を含めて UPS を用いた。UPS には入力側と出力側の分離を図るため常時インバーター方式のものを用いた。

真空ポンプの電源は耐雷トランス経由とはしたものの UPS 等を用いていない。停電時には真空ポンプは停止してしまうため、現地において対処する必要がある。なお、停電によるポンプ自体への障害はない。

(勝間田明男)

謝辞

地殻変動用マイケルソン干渉計の構成において東京大学地震研究所新谷昌人准教授より協力頂いた。真空装置の構成において(独)日本原子力開発機構の廣木成治博士より協力頂いた。

参考文献

- Araya, A., S. Telada, K. Tochikubo, S. Taniguchi, R. Takahashi, K. Kawabe, D. Tatsumi, T. Yamazaki, S. Kawamura, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagano, M. Fuimoto, K. Horikoshi, N. Mio, Y. Naito, A. Takamori, K. Yamamoto, 1999: Absolute-length determination of a long-baseline Fabry-Perot cavity by means of resonating modulation sidebands, *Appl. Opt.*, **38(13)**, 2848-2856.
- 飯島 徹穂・飯田 俊郎, 1998: 改訂新版・真空技術活用マニュアル, 工業調査会, 東京, 183p.
- 石澤 克修・野村 健・村重 信之, 2007: 真空材料の電解研磨・化学研磨による表面改質 ステンレス鋼, アルミニウム合金からチタンへ, *真空*, **50(1)**, 47-52.
- 柏原 静雄・永井 章・三上 直也, 1987: 松代における地殻変動の連続観測 (VII) —石英管伸縮計データに対する気圧, 気温の補正について—, *気象庁地震観測所技術報告*, **8**, 29-37.
- 勝間田 明男, 1993: ベッセルディジタルフィルタの自動設計について, *験震時報*, **56**, 17-34.
- 河合 滋, 2005: 光学設計のための基礎知識, オプトロニクス社, 東京, 303p.
- 国立天文台編, 2008, 理科年表平成 21 年, 丸善, 東京, 1038p.
- ト部 卓, 1994: 多チャネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, *日本地震学会講演予稿集*, No.2, P24.
- 柳沢 健・金光 磐, 1973: アクティブフィルタの設計, 産報出版, 東京, 206p.