

二波長干渉計による地殻歪計測

寺田 聡¹⁾、新谷 昌人²⁾

産業技術総合研究所¹⁾、東京大学地震研究所²⁾

はじめに

地殻歪を観測する手法はいくつかあるが、レーザー干渉計を用いて二点間の距離の変化を観測する方法がある。これは地下トンネル内で数十 m から数 km の距離の地殻歪を検出するのに適している。岐阜県神岡鉱山内には基線長 100m の真空光路を用いたレーザー干渉計型地殻ひずみ計が設置されており、 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ の精度で地殻歪を観測している。この干渉計は非常に高精度であるが真空光路を用いているため高額であり、更なる長基線化や多点設置には向かない。そこで、真空光路を用いずに大気光路のレーザー干渉計で地殻歪が計測できれば非常に有用である。

大気光路のレーザー干渉計では空気屈折率の影響は非常に大きい。空気屈折率を算出するには、気温、気圧、湿度、二酸化炭素濃度の測定が必要である。このうち、気温、気圧による影響は大きい。気温に関しては空間分布があり、基線長の長い干渉計の場合、光路の気温を正確に測定することは困難となる。

空気屈折率の値、および、温度等によるその値の変化の割合は光の波長によって異なるので、二つの波長の光を用いて干渉測長することによって、気温、気圧、湿度、二酸化炭素濃度の測定をすることなく空気屈折率の補正を行うことができる。ただし、この方法で空気屈折率を補正した場合、その測長精度は干渉計のフリンジ分解能の数十倍～百倍程悪化するのが一般的である。ここでは、地殻歪の観測を目的とした高精度な二波長干渉計を開発した。

二波長測長

大気光路の干渉計で直接測定できるのは、真の距離と空気屈折率の積で、これを‘光学的距离’と呼ぶ。これに対して、真の距離を‘幾何学的距離’と呼ぶことがある。ほとんどの場合、計測したい量は幾何学的距離であり、地殻歪計測でも重要なのは、当然、幾何学的距離である。光学的距离を $L^{(O)}$ 、幾何学的距離を $L^{(G)}$ 、空気屈折率を n とすると、それらの関係は次式ようになる。

$$L^{(G)} = \frac{L^{(O)}}{n} \quad \dots \dots \dots (1)$$

幾何学的距離 $L^{(G)}$ は真の距離であるから光源の波長や大気の状態には無関係であるが、光学的距离 $L^{(O)}$ は光源の波長に依存し、空気屈折率 n は光源の波長、空気の気温、気圧、湿度、

二酸化炭素濃度に依存する。これらのパラメータから空気屈折率を計算する Ciddo の式と呼ばれる式がある[1]。今、二つの波長 λ_1 と λ_2 で測長した場合、

$$L^{(G)} = \frac{L^{(O)}(\lambda_1)}{n(\lambda_1, T, P, h, x_c)} = \frac{L^{(O)}(\lambda_2)}{n(\lambda_2, T, P, h, x_c)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、 T 、 P 、 h 、 x_c は、それぞれ、気温、気圧、湿度、二酸化炭素濃度である。式(2)より、

$$L^{(G)} = L^{(O)}(\lambda_2) - A \cdot \{L^{(O)}(\lambda_2) - L^{(O)}(\lambda_1)\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$A = \frac{n(\lambda_2, T, P, h, x_c) - 1}{n(\lambda_2, T, P, h, x_c) - n(\lambda_1, T, P, h, x_c)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

が得られる。もし湿度が 0% ならば、式(4)の A は λ_1 と λ_2 のみの関数となる。それは A が空気の状態に依存しないということであり、二波長干渉計では定数とみなせるということである。これは、式(3)から、幾何学的距離 $L^{(G)}$ が光学的距離二つ $L^{(O)}(\lambda_1)$ 、 $L^{(O)}(\lambda_2)$ と定数 A で算出できることを意味している。すなわち、空気状態の計測なしで幾何学的距離を測定できる。湿度が 0% でないときは、 A は定数にはならない。しかし、空気の状態の変化に対し A の変化は小さいので、単一波長の干渉計と空気屈折率から幾何学的距離を求めるときより環境測定は大まかで良い。

地殻歪計測用二波長干渉計

式(4)の A の値は二つの波長に依存するが、例えば、YAG レーザーの基本波(1064nm)と第二高調波(532nm)の場合約 65 となる。式(3)の右辺第 2 項は、二つの波長で測定した光学的距離の差を A 倍しているので、幾何学的距離は測定された光学的距離の精度の A 倍、すなわち、これらの波長なら 65 倍悪くなる。これは二波長干渉計の最大のデメリットである。特に測長距離が長くなると、空気の影響で光学的距離は激しく変動し、そもそも光学的距離を高分解能に測定することが困難である。それに加え、 A 倍の精度悪化があるため、そのままでは地殻歪計測のような高精度な距離測定には向かない。二つの波長それぞれの光学的距離の測定を高精度にすることは困難であるが、もし、それらの差だけでも高精度に測定できれば、幾何学的距離を精度良く測定できることになる。そこで、 $L^{(O)}(\lambda_2) - L^{(O)}(\lambda_1)$ を高精度に測定する光学系(図 1)、および、電気系(データ処理系) (図 2) を考えた。

ドライブ周波数の 65 MHz であるが、二次回折光の周波数シフトは 2 倍の 130 MHz となる。よって、基本波のヘテロダイン周波数は 65 MHz で、第二高調波のそれは 130 MHz である。ヘテロダイン干渉計では、通常、干渉信号をヘテロダイン周波数で復調することで測長光路の変化を検出する。ここでも式(3)の右辺の第 1 項に対してはこれに類する方法を用いている。これに関しては後述する。しかし、第二項の二波長の差に対しては、それぞれを復調してから差を計算したのでは、先に述べたとおり、十分な精度で検出することが出来ない。

基本波の干渉信号は中心周波数が 65 MHz であり、波長が 1064 nm なので、測長距離が毎秒半波長の 532 nm/s で変化すると、干渉信号の 65 MHz が 1 Hz 変化する。一方、第二高調波は中心周波数が 130 MHz で、波長が 532 nm なので、測長距離が毎秒半波長の 266 nm/s で変化すると、干渉信号の 130 MHz が 1 Hz 変化する。干渉信号はそれぞれ光検出器で検出される。光検出器で電気信号に変換された基本波の干渉信号を周波数通倍器で電氣的に周波数を 2 倍にする。すると、中心周波数は 130 MHz となり、毎秒半波長の 532 nm/s の変化でそれが 2 Hz 変化することになる。すなわち、266 nm/s の変化で 1 Hz 変化するわけで、中心周波数、および、その変化の割合共に第二高調波のそれらと同一になる。そこで、この二通倍された基本波の干渉信号と第二高調波の干渉信号を Double Balanced Mixer (DBM) で掛け算し、Low Pass Filter (LPF) を通すことで、基本波による測長と第二高調波による測長の差を直接的に取り出すことができる。同一の測長光路で、波長は厳密に 2 倍であり、周波数通倍器による二通倍も厳密に 2 倍なので、この方法で取り出された差は空気屈折率の差に起因するものである。それぞれの波長での光学距離は大きく揺らぐが、その大半は共通因子なので、直接差のみを検出する方法は精度も非常に良い。これは、図 2 の右半分に相当する。

式(3)の右辺の第 1 項を取得するために、第二高調波の干渉信号をヘテロダイン周波数 130 MHz で復調するのだが、ここでは、フリンジを分割してその位相を高精度に検出する必要が無いので、カウンターを用いてフリンジ検出を行う。図 2 の左半分がそれである。第二高調波の干渉信号とヘテロダイン参照信号をそれぞれカウンターを用いてカウントすると、ある時刻のそれぞれのカウント値の差が位置情報となる。カウンターは自作したので、130 MHz は早すぎるためにカウントできない。そこで、ローカルオシレーターを用いて周波数をダウンコンバートする。ダウンコンバートしても、鏡の位置変化に対するフリンジの変化は変わらない。しかし、検出可能な測長距離の変化の上限速度は小さくなる。ここでは、ローカルオシレーターの周波数を 134 MHz とし、ダウンコンバート後の周波数は 4 MHz とした。第二高調波の干渉信号はこのようにしてダウンコンバートしたが、ヘテロダイン基準信号の周波数に対してはダウンコンバートの方法を用いず、AOM をドライブしているローカルオシレーターに周波数同期させた別のローカルオシレーターから信号を取り出した。ちなみに、ダウンコンバート用のローカルオシレーターも周波数同期させている。カウンターは特殊なもので、ダウンコンバートされた第二高調波の干渉信号の

カウント値が n の整数倍になった瞬間に、ヘテロダイン参照信号用のカウント値を読み出すものである。この実験では、 $n = 65536$ とした。こうすると、ダウンコンバートされた第二高調波の干渉信号の周波数とヘテロダイン参照信号用の周波数は等しい必要が無く、それらの比によって取得するフリンジ分解能を変えることができる。ここでは、ヘテロダイン参照信号用のローカルオシレーターからは 8 MHz の信号を出力して、干渉フリンジの 2 分の 1 の 133 nm 分解能で検出した。

観測予備実験

この二波長干渉計を用いて、産業技術総合研究所の光学トンネルで測長実験を行った。このトンネルは地下に埋設された 2 重のコンクリート壁を持つ全長 310m のトンネルで、上に約 3.5m の土で覆われている。このトンネルはエアコンによる温度コントロールはしていないが、地下である為、年間の気温変動は 18 から 20 と安定している。湿度は除湿機により約 45% に保たれている。気圧は基本的に外気圧と同じである。このトンネル内には、トンネルに沿って 6m 置きに 52 本の温度計、気圧計 3 台、湿度計 3 台、二酸化炭素濃度計 1 台が設置されており、空気屈折率を算出するための大気環境のデータを取得することができる。このトンネルの床に干渉計と反射鏡を 72m 隔てて置き、その距離の変化を測定した。この 72m という距離は、今後予定している神岡鉱山内での地殻歪測定の距離に合わせた。測長光路は、紙で作った直径約 20cm 長さ 2m のパイプを並べその中を通した。これは光路のそばを人が通ったときに期せずして光路を遮らない為である。

二波長干渉計による空気屈折率補正測長を確認するために、トンネル内の大気環境データを取得した。また、測定において大きなトンネルの伸縮が確認されたため、アジレント社製の干渉測長器を用いて同じ点間を測長した。この干渉測長器は He-Ne ゼーマンレーザーを光源として用いた市販のヘテロダイン干渉計である。図 3 の青線は二波長干渉計による測長であり、赤線はこの干渉計の第二高調波のみの測長データ(光学距離)を大気環境データから計算した空気屈折率で除算して幾何学距離を算出したものである。見やすいように二つの線をシフトさせた。このグラフからわかるように、大きな日周成分とドリフトが観測された。これはアジレント社製干渉測長器を用いた測長データでも同様であり、真に幾何学的距離が変動していると思われる。

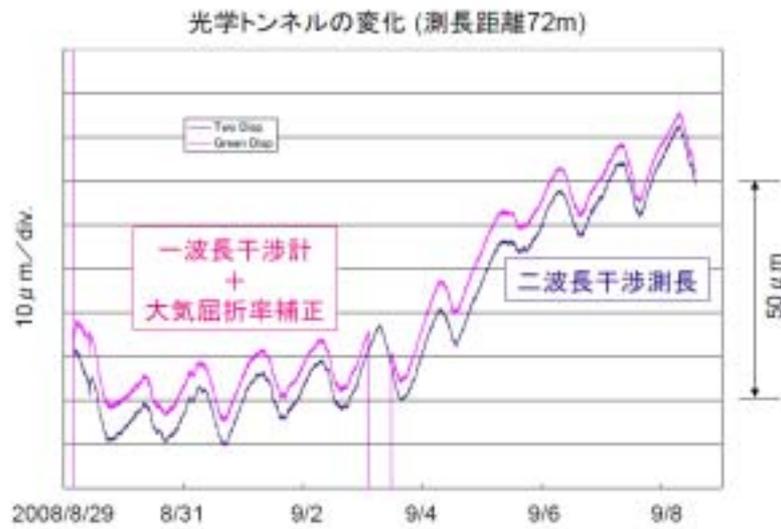
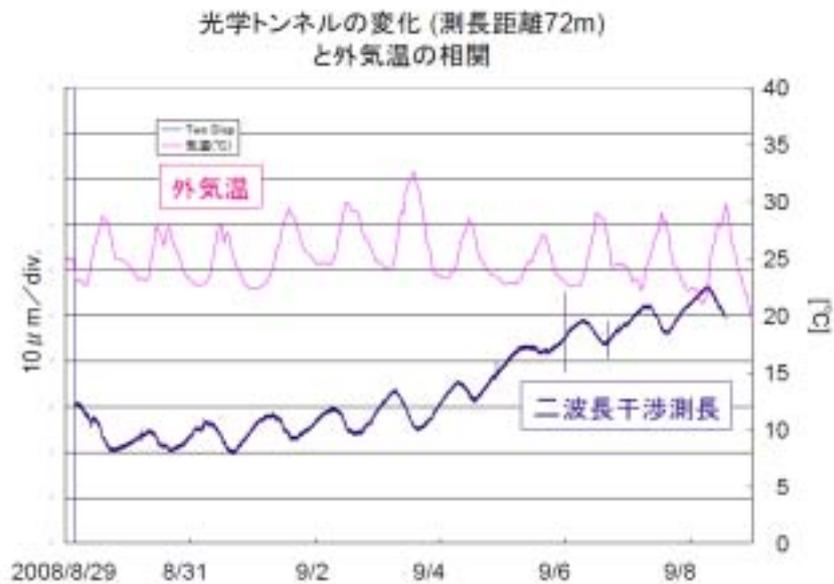


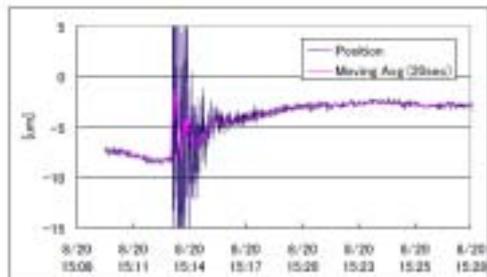
図 3 : 二波長測長と一波長測長



※外気温は、気象庁ホームページより

図 4 : 二波長測長と外気温

8/20 15:13 の地震
つくば震度3



8/22 19:59 の地震
つくば震度3

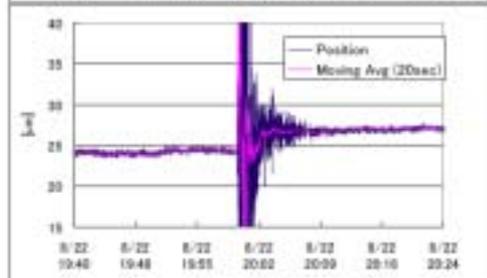


図 5：地震発生時の二波長測長データ

議論

観測されたトンネルの伸縮は、完全に独立な 2 つのシステムで観測されていることから、トンネル自体が実際に伸縮していることに疑いはない。外気の気温、気圧の変化を受けている様子であるが、詳しい相関は不明である。トンネル内の温度は安定しており、トンネル自体の温度変化による伸縮ではなさそうである。測長距離と外気温の関係を図 4 に示す。外気温は気象庁のホームページより、つくば（館野）観測点での値を参照した。

まとめ

短時間的な分解能は予定通りの性能が評価された。しかし、トンネル自体の大きな伸縮のため、長期の安定性や分解能は評価できなかった。また、観測中に震度 3 の地震があったが、観測が継続できており、大きな揺れに対する耐性も評価できた（図 5）。

この二波長干渉計は、2009 年 3 月に神岡鉱山内に移設した。今後、既存の真空光路を用いたレーザー伸縮計との比較等の実験を予定している。

参考文献

[1] Ciddor, P.E., Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.*, 35, 1566, 1996.