

<<テクニカルレポート>>

測定時間間隔によるビート周波数測定限界について(リアルモード)

株式会社フォトンプローブ

2020年1月20日

光ヘテロダイン変位計HV400の測定において、リアルモードでは測定時間間隔を変えることができる。この変更はユーザの選択項目であるが、測定時間間隔を変更すると、測定可能なビート周波数範囲の下限域があることを実験により確かめた。その限界につき、実験結果を示しながら、解説する。

(1) リアルモードでの設定可能な測定時間間隔

1ms、2ms、5ms、10ms、20ms、50ms、100ms、200ms、500ms、1s、2s、5s、10s、の13項目である。ダイナミックレンジで4ケタである。

(2) 理論的解説

理論的には、計測データの測定時間間隔 (Δt 時間間隔) の変動では

$$\Delta L = \frac{1}{2} h \Delta f \Delta t$$

の変動量が発生する。(ただし、この式は Δf が小さい場合に限る)。ここで、 λ はレーザ波長で、 Δf はビート周波数である。

したがって、 Δf 、 Δt 、が一定ならば ΔL は一定のはずである。この一定値からの測定値のずれは、HV400プログラムにおける、データ処理精度に依存している。この精度は Δf 、 Δt の大小に依存しているので、ビート周波数のすべてを測定可能ではなくなる。特に重要な点は以下の点である。“ Δt の時間中すべてにおいて測定(1 μ s毎にデータを算出)しているわけではなく、 Δt に依存した平均化対象時間(Δt_r)があり($\Delta t > \Delta t_r$)、その Δt_r 間は1 μ s毎にデータを求めるが、その残りの $\Delta t - \Delta t_r$ 時間は、測定しない”。したがって、実質の測定時間間隔は $\Delta t - \Delta t_r$ 、(平均化しているので、結果的には測定時間間隔= Δt)となる。1 μ s毎のデータ取得と Δt_r 、が測定可能な高周波側(Δf_{max})を決める。(基本的に1 μ sの測定限界1MHzが高周波側の制約値となる)。一方、低周波側(Δf_{min})、は実験により求めるよりない。理屈ならば、限界がないように思えるが、測定精度の限界で決まってしまう。そこで、本実験はその精度の限界を求めることを目的とする。

(3) 実験および解析

測定時間間隔 Δt において、測定時間を20分から24時間までの範囲で行った。

(例えば、 $\Delta t=100ms$ 条件では、20分で12000点の連続計測、24時間では864000点の連続計測である)。

この連続計測の間、ビート周波数は一定である。実験および解析内容は以下の通り

- ① Δt の変化による変動量 $\Delta L(n)$ とその変動量の平均値 $AVE(\Delta L)$ 及び標準偏差 $DEV(\Delta L)$ を求める。 N は測定点数を示す(12000点の連続計測では $n=1,2,3,...,12000$) 相対標準偏差 $RDEV(\Delta L)=DEV(\Delta L)/AVE(\Delta L)$ 、と Δf の関係をグラフ化する。相対標準偏差 $=0.3(\log(0.3)=-0.528)$ 程度を限界と判断する。
- ② 測定変動量の平均値 $AVE(\Delta L)$ を用いて、理論式を用いて波長を算出すると真値からずれるであろう。この算出された波長を計算波長と呼んで真値の波長とは区別する。このずれは様々な要因があるが、

トータル特性として利用できないずれとなる。そこで、この計算波長と Δf の関係より、その利用可能な限界を求める。632.81642nm が標準状態でレーザー波長である。いわゆる物差しである。上記ずれはこの物差しの長さが異なることを意味する。物差しが 0.1nm 異なっている場合に、測定対象物の変動が 1mm であった場合、158nm の誤差を生む。誤差率は 0.016%、許容できる限界と判断する。

(4) 実験結果

Δt と Δf を変動させて、測定時間は 40 分を基本として求めた。

(4-1) ビート周波数の算出と正負関係及び $\Delta t=100\text{ms}$ での解析

2 チャンネル出力のシンセサイザの各チャンネルは個別に光電変換装置のアンプ部分を用いて 1V p p 程度の信号に増幅し、HV 400 の処理回路に個別に入力される。入力を CH 1, CH 2 と呼ぶ。

ビート周波数 = CH 1 の周波数 - CH 2 の周波数

で与えられるので、中心周波数からのずれ Δf_1 、 Δf_2 の正負により、 ΔL の正負を含めると簡単に次の 4 つのパターンがある。(正確に言えば、無限個のパターンがあるが、実験では 4 パターンとした)

ΔL 値	Δf_1	Δf_2	ビート周波数
ΔL (>0)	Δf_1 (>0)	0	Δf_1
ΔL (>0)	0	$\Delta f_2 = -\Delta f_1$ (<0)	Δf_1
$\Delta L' = -\Delta L$ (<0)	$-\Delta f_1$ (<0)	0	$-\Delta f_1$
$\Delta L' = -\Delta L$ (<0)	0	$\Delta f_2 = \Delta f_1$ (>0)	$-\Delta f_1$

(注意 ; 周波数ずれが大きくなると、 Δf による変動量 ΔL と、 $-\Delta f$ による変動量 $\Delta L'$ は、その絶対値が異なるが、周波数ずれを小さい領域で行った実験のため、絶対値は等しいと推測している)

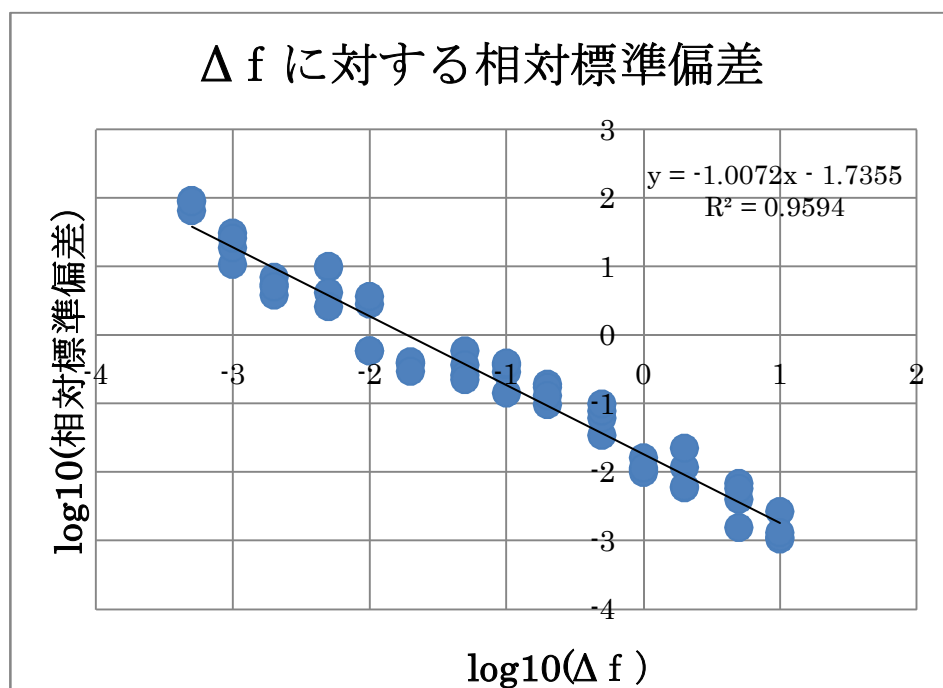


図1 $\Delta t=100\text{ms}$ での Δf と相対標準偏差の関係

$\Delta t=100\text{ms}$ の場合の 4 つのパターンを全て表記した結果を図 1 に示す。(Δf の単位は [Hz] である)。

Δf は 10Hz から、0.5mHz まで変動させた。4つのパターンでばらつきはあるものの、概ね、同じ相対標準偏差と判断できる。これは、HV 400 の 1CH と 2CH が対称的に動作していることを表している。グラフの傾きが、概略“1”であることはビート周波数が1桁変動すると、相対標準偏差も1桁変動することを表しており、変位量算出の基本となるデータ処理において、ノイズ発生がビート周波数に対して線形に発生していることを表している。

下限周波数の算出の際の第1の基準

“相対標準偏差=0.3 ($\log(0.3)=-0.528$) 程度を限界と判断する”

を適用すると、 $\Delta f=0.05\text{Hz}$ (対数値=-1.3)が測定限界と知れる。

第2の限界基準判断の計算波長を求める。 $\Delta t=100\text{ms}$ の場合の4つのパターンを全て表記した結果を図2に示す。

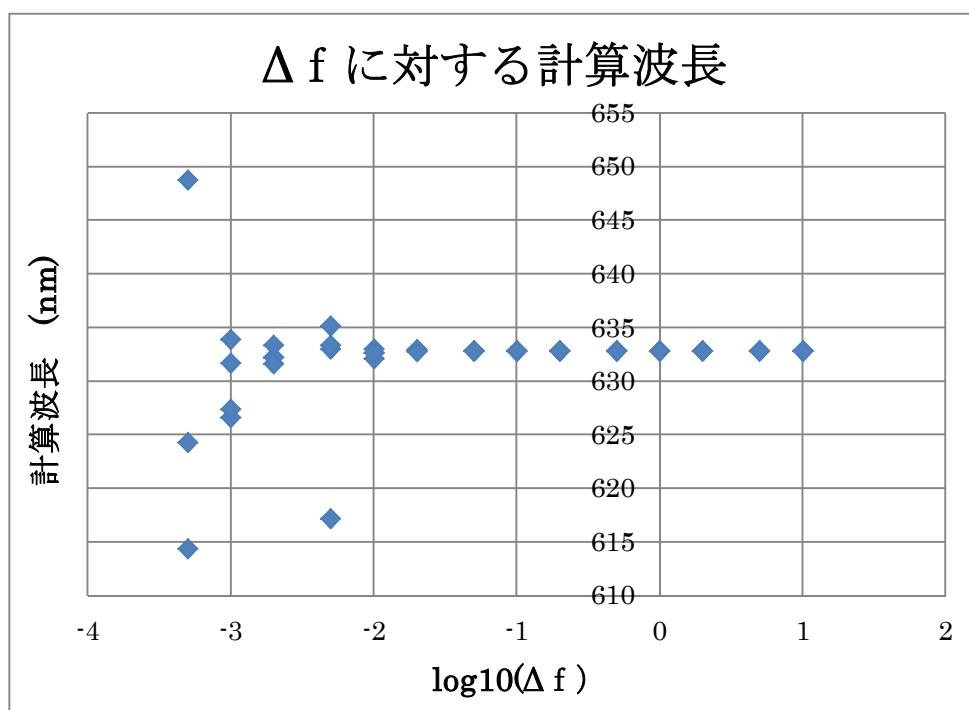


図2 $\Delta t=100\text{ms}$ における、 Δf と計算波長の関係

- ① 図の横軸が、-1.3 値以上では4つのパターンに全く変化が見られず、同一値を示していることが知れる。この値は、真値と等しい。それ故、-1.3 値以上では、測定において、正しい物差しが使われ、CH 1 と CH 2 の相違も見られないことが知れる。
- ② 図の横軸が、-1.7 値以下になると、ばらつきが出始め、物差しとしては使用できない値を示すようになる。

これより、 $\Delta t=100\text{ms}$ においては、 Δf と計算波長の関係より、 $\Delta f=0.05\text{Hz}$ (対数値=-1.3)が測定限界と知れる。相対標準偏差からの結果と一致する。

以上まとめると、データのばらつきを示す相対標準偏差の解析からも、データ平均値の変動を示す計算波長からも、下限の測定ビート周波数は、0.05Hz ($\Delta t=100\text{ms}$ の場合) と言える。

$$\Delta f_{\min}=0.05\text{Hz} \quad (\Delta t=100\text{ms} \text{ case})$$

以上の解析を、他の Δt に対して行った

(4-2) $\Delta t=20\text{ms}$ での解析

相対標準偏差の Δf 依存性、計算波長の Δf 依存性を、それぞれ、図3、図4に示す。

結果として、

$$\Delta f_{\min}=0.3\text{Hz} \quad (\Delta t=20\text{ms} \text{ case})$$

を得た。

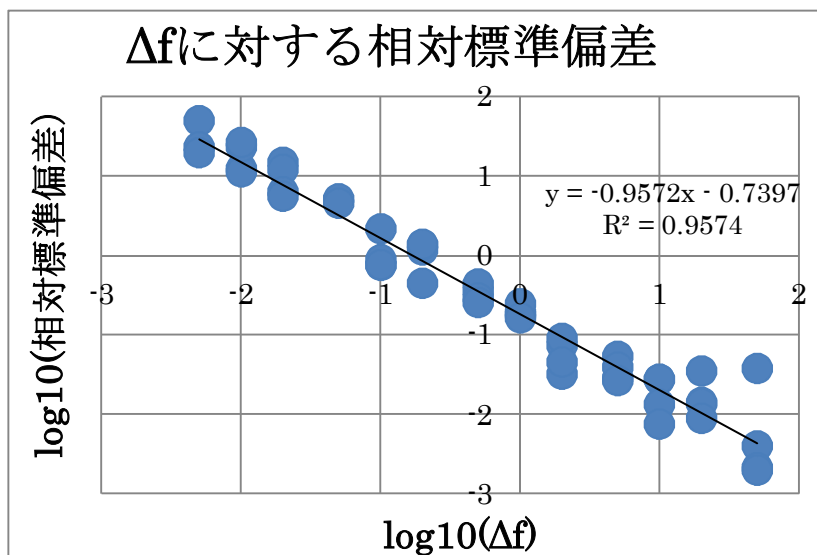


図3

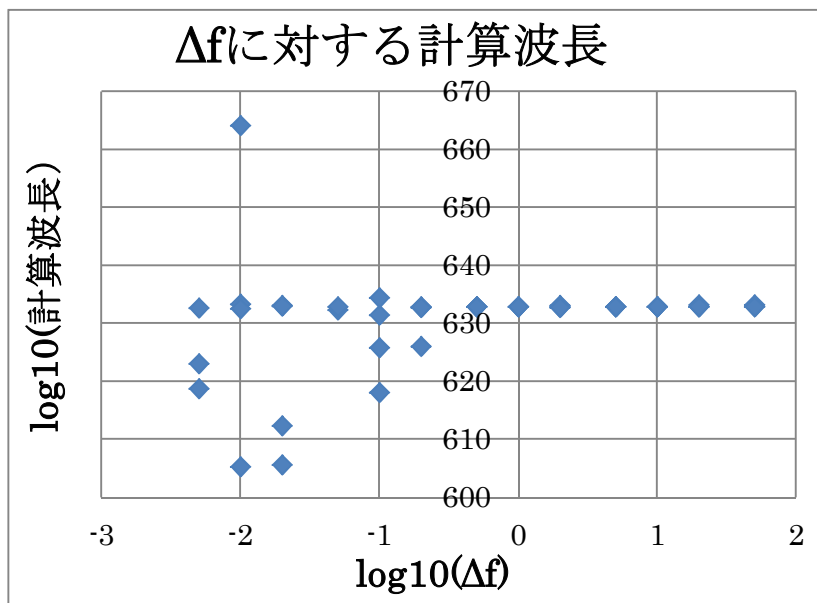


図4

(4-3) $\Delta t=5\text{ms}$ での解析

相対標準偏差の Δf 依存性、計算波長の Δf 依存性を、それぞれ、図5、図6に示す。

結果として、次の値を得た。

$$\Delta f_{\min}=2\text{Hz} \quad (\Delta t=5\text{ms} \text{ case})$$

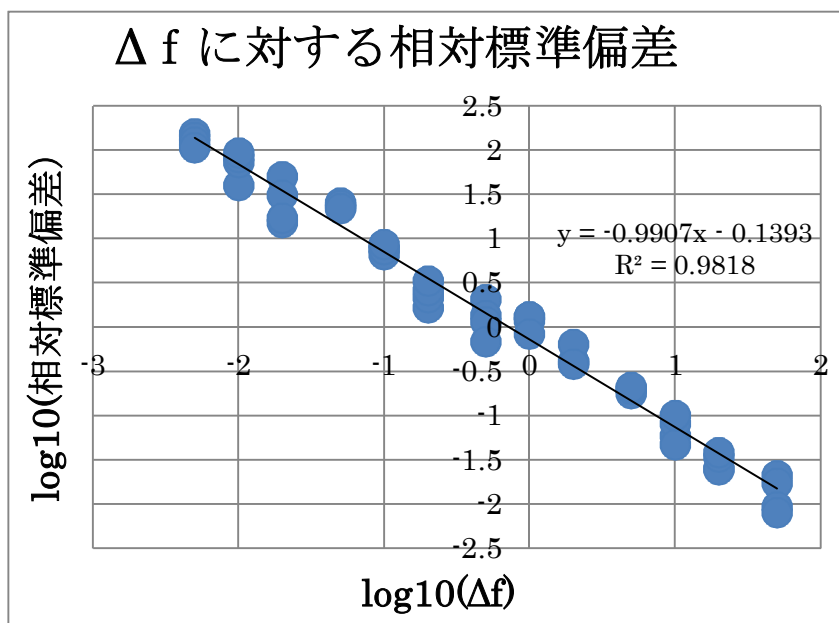


図 5

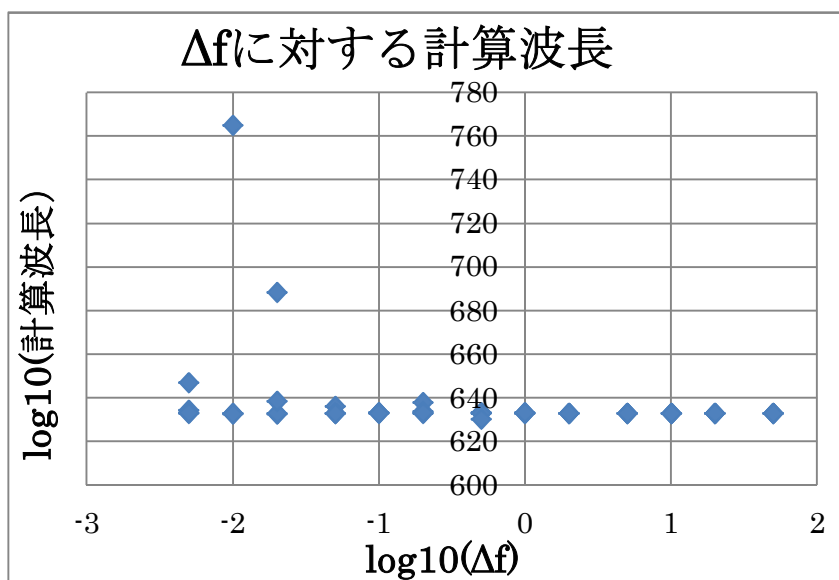


図 6

(4-4) 以上の解析を、すべての Δt に対して行った結果の $\Delta f_{\min}$ の値を表 1 及び図 7 に示す。

Δt	$\Delta f_{\min}$
1ms	10Hz
2ms	7Hz
5ms	2Hz
10ms	1Hz
20ms	0.3Hz
50ms	0.1Hz
100ms	0.05Hz
200ms	0.007Hz=7mHz
500ms	2mHz

1s	0.7mHz
2s	0.3mHz
5s	0.1mHz
10s	0.04mHz=40 μ Hz

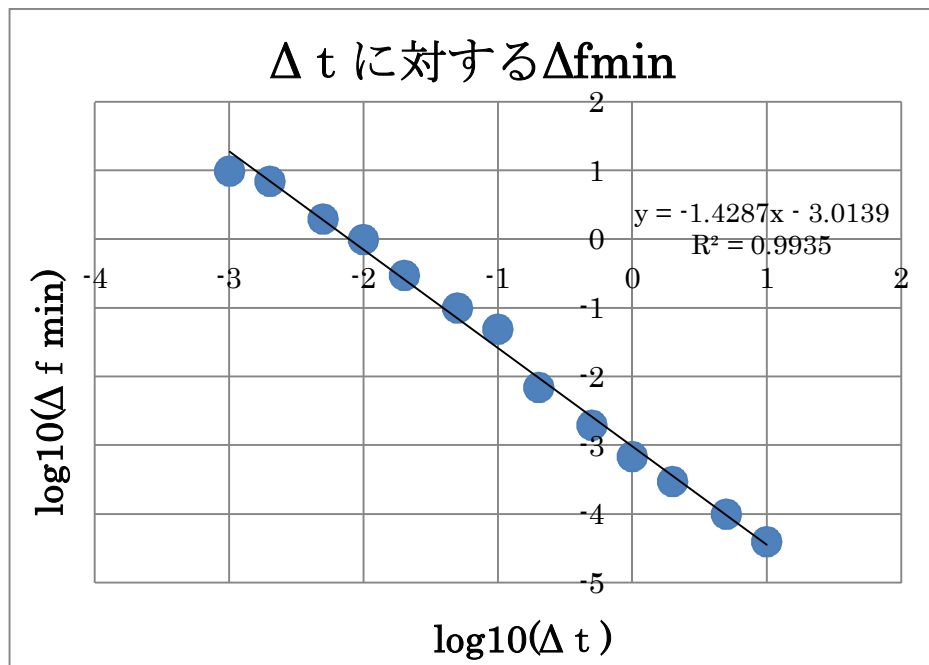


図 7

線形性高く依存性がみられた。しかしながら、グラフの傾きが“1”ではない。測定時間間隔 Δt が 1 桁変動すると、測定下限周波数 $\Delta f_{\min}$ は 1 桁以上に変動する。測定下限が計算処理プログラムにおける精度から発生しているとすれば、 Δt の桁変動と $\Delta f_{\min}$ の桁変動は、相対標準偏差の変動と同じで、同程度の桁変動になるはずである。 Δt が小さくなると、予測以上に低周波を観測できなくなることを表している。 Δt が小さくなると、平均化対象時間(Δt_r)と Δt の比 ($= \Delta t_r / \Delta t$) の比が大きくなるとともに、絶対値の Δt_r 値が減少 ($=$ 平均化するデータ点数の減少) するために、データ演算する際により低周波成分を、観測するために必要な十分な精度を得られなくなったと判断することができる。グラフにおける、 Δt の単位は[s]、 $\Delta f_{\min}$ の単位は[Hz]、である。

(5) まとめ

リアルモードでの測定時間間隔に対して、測定可能なビート周波数範囲が明確になった。

測定時間間隔 (Δt) が短いほど、測定可能なビート周波数下限値 ($\Delta f_{\min}$) は高くなる(悪くなる)ことが知れた。この変動依存性は、単純な精度変動では説明できないが、概ね、 $\Delta t = 100\text{ms}$ では、 $\Delta f_{\min} = 0.1\text{Hz}$ 、と知れた。

また、同時に、選択できる全ての測定時間間隔 (1ms から 10s まで) に対して、 $\Delta f_{\min}$ 、が定義できるほどに測定が可能であることも傍証した。さらに、連続測定において、24 時間連続計測が可能であることも知れた。今後は 100 時間の連続計測のデータを取得してみたい。