

Cs07200 実験 (レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器による測地 VLBI 実験) の結果とその評価

市川隆一、石井敦利、瀧口博士、久保木裕充

平成 19 年 8 月 20 日

概要

アンリツ株式会社製レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器の評価を目的として、測地 VLBI 実験を鹿島 34m アンテナ-小金井 11m アンテナ基線で 2007 年 7 月 19 日に実施した。解析の結果、 $RMS1.3mm$ で基線長が推定され、その推定値は従来の水素メーザ発振器を用いた測地 VLBI 実験結果と 2mm 以内で一致した。実験では、レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器は、水素メーザ発振器用の恒温槽に隣接して設置した。このときの温度変化は $\pm 1^{\circ}C$ で制御された室内環境であり、この条件下で水素メーザ発振器を用いた測地実験と遜色のない測定精度を達成できることが確認できた。



図 1: アンリツ製レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器の外観

1 実験目的

アンリツ (株) さんからお借りしたレーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器 (以下、これを便宜的に“ガスセル型 Cs 発振器”と呼ぶ) を用い、これの VLBI 測地実験での有効性を評価することを目的とした。

2 ガスセル型 Cs 発振器

この度、お借りしたのは、図 1 に示すガスセル型 Cs 発振器“SD2T01A”である。この図からもわかるように、ちょうど PC1 台分程度の大きさ (手前に置いたマジックペンと比較されたい) であり、重量は 18kg である。

3 測地 VLBI 観測

測地 VLBI 観測でのガスセル型 Cs 発振器の有効性を調べるために、2007 年 7 月 19 日に測地 VLBI 実験 (実験コード: CS7200) を実施した。この実験では、鹿島 34m

アンテナ-小金井 11m アンテナ基線 (基線長: 約 110km) を用い、鹿島側のみ従来周波数標準に使用していた水素メーザからガスセル型 Cs 発振器に切り替えて各システムに周波数標準を供給するようにした。観測は、19 日 09:00UT-20 日 11:00UT の約 26 時間行い、データ取得できた 1088 個の OBS のうち 1054 個を解析に使用することが出来た (約 97%)。1obs あたりの積分時間は、30 ~ 45 秒程度である。

なお、今回測地 VLBI 実験の際のガスセル型 Cs 発振器、及び水素メーザ発振器が設置された環境は図 2 のようになっている。図 2 で示される個々の環境のうち、恒温槽内は $\pm 0.1^{\circ}C$ 程度、またメーザ室そのものは $\pm 1^{\circ}C$ 程度で温度制御されている。それぞれの温度設定は、恒温槽が $23^{\circ}C$ 、またメーザ室が $24^{\circ}C$ である。

測地 VLBI 実験の前には、ガスセル型 Cs 発振器を図 2 の恒温槽内に設置して、一定温度条件下での特性を調

べた。また VLBI 実験後は恒温槽の外にガスセル型 Cs 発振器を設置して、水素メーザ室のエアコン設定により温度を変化させた場合の特性を調べた。

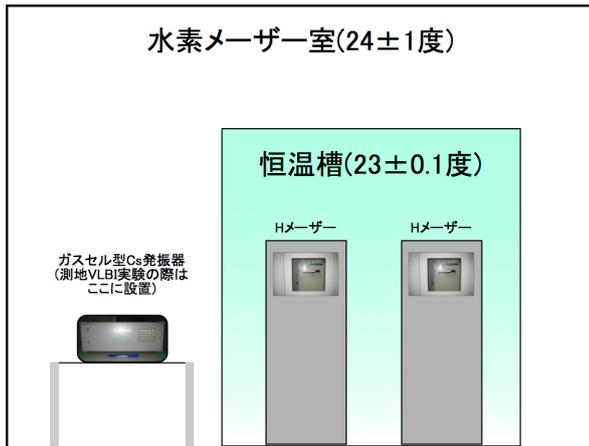


図 2: ガスセル型 Cs 発振器、及び水素メーザ発振器の設置環境

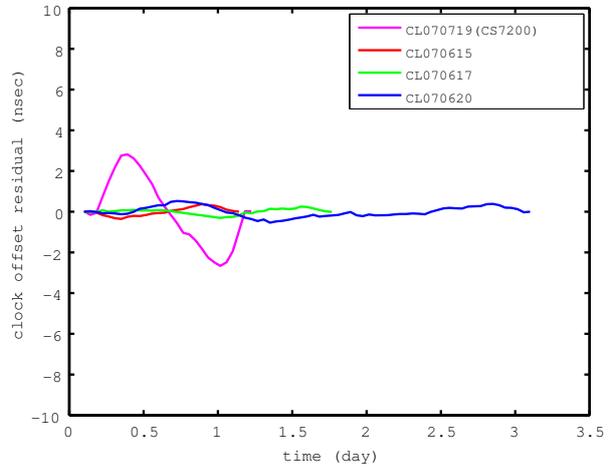


図 3: クロックオフセットの時系列比較。各観測の時間変化を比べるために、横軸は観測開始時間からの経過時間を日を単位として示した。なお、CL070617 実験については 2 日間弱、また CL070620 実験については 3 日分のデータを一度に解析したため、他のプロットに比べて長期間の変化となっている。

4 解析結果

4.1 測地精度

まず、表 1 に今回実施した CS7200 実験の解析結果を、6 月に実施した同基線での時刻比較連続 VLBI 実験の結果と共に示す。基線ベクトルの推定値は 2mm 程度の範囲内で一致しており、基線長、水平成分、鉛直成分の σ もほぼ調和的な値を示す。また、CS7200 実験の解析残差 (“Weighted RMS Residual”) 39psec という値も、他の 3 回の実験に比べてほぼ同等とみなせる。この結果より、測地 VLBI 実験での周波数標準としてガスセル型 Cs 発振器の使用した場合、水素メーザを使用した場合と遜色ない精度で解析結果を得ることができるといえる。

4.2 推定クロックオフセットの時間変化

ここで、各観測の解析で推定されたクロックオフセットの時間変化を示す図 3 によると、ガスセル型 Cs 発振器を用いた CS7200 実験でのクロックオフセット変化の振幅が他の実験に比べて 1 桁近く大きい。しかしながら、その変動そのものはなだらかに日変化を示しており、実

際のパラメータ推定では同位置推定値との分離が問題なくできたことを示唆する。

4.3 ガスセル型 Cs 発振器の温度依存性

次に、ガスセル型 Cs 発振器の発振周波数の温度依存性について調べてみた。あいにく、CS7200 測地実験の際はガスセル型 Cs 発振器が設置された水素メーザ室の温度測定を行っていなかった。そこで、観測後に、水素メーザ室内においてガスセル型 Cs 発振器特性と気温変化を同時に計測した際の結果に基づいて議論する。ここでは、エアコンの温度制御により、室内の温度を乱高下させた場合と、なだらかな変化を加えた場合のふた通りについて調べてみた。

4.3.1 メーザ室内の気温を乱高下させた場合

まず、メーザ室内の気温を急激に変化させた 8 月 8 日の結果を、図 4 に示す。

図 4 の上 2 枚 (水素メーザ室内温度変化と 10MHz 基準信号に対するガスセル型 Cs 発振器 10MHz の周波数差) をよく見ると、双方の間の時系列変化が逆相関して

表 1: Cs7200 実験の解析結果 (時刻比較実験との比較)

date	WRMS residual (psec)	baseline vector(mm)	sigma(mm)		
			length	horizontal	vertical
2007.6.15 (時刻比較実験)	32	109337424.10 ± 1.17	1.17	0.76	4.82
2007.6.17 (時刻比較実験)	29	109337422.26 ± 1.00	1.00	0.67	4.09
2007.6.20 (時刻比較実験)	37	109337421.45 ± 0.76	0.76	0.51	3.12
2007.7.19 (Cs 実験)	39	109337422.58 ± 1.26	1.26	0.92	5.14

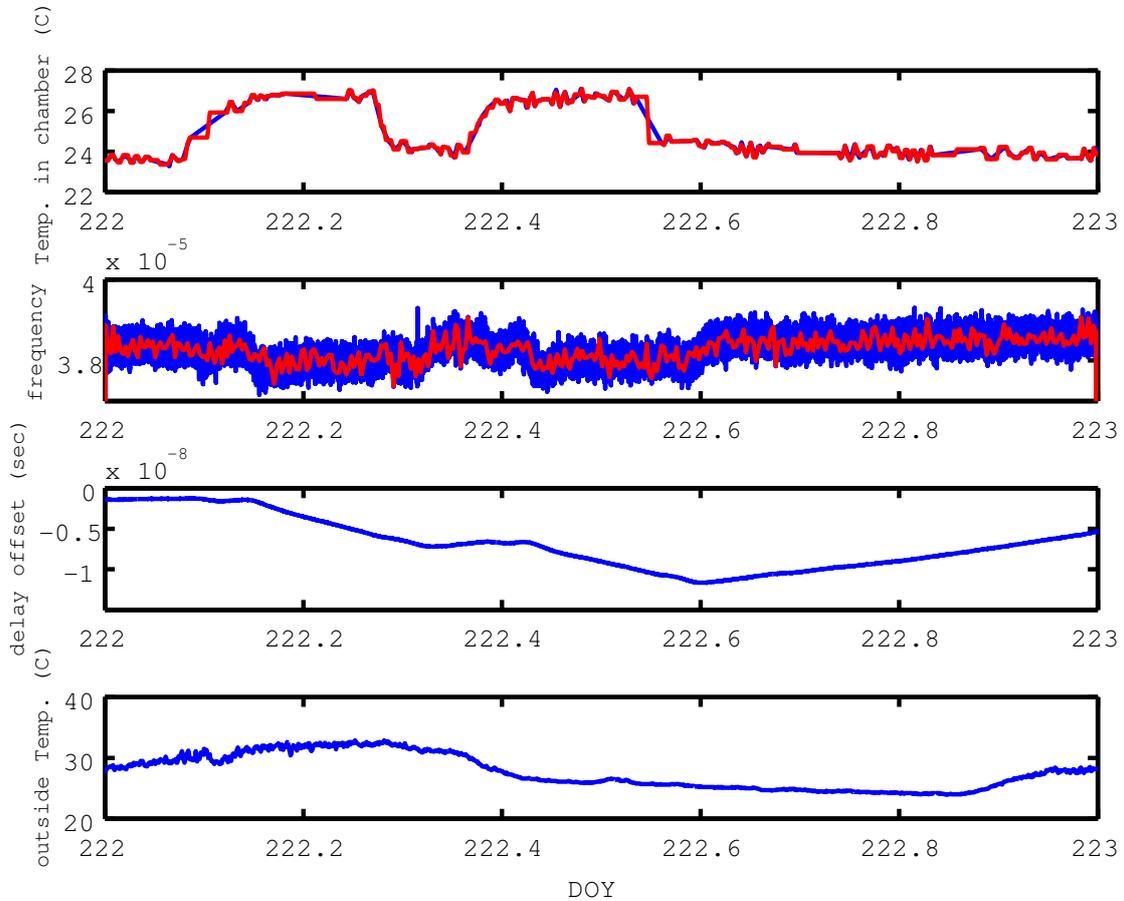


図 4: ガスセル型 CS 発振器の特性変化 (2007.8.8)。上から、水素メーザ室内温度変化、水素メーザ 10MHz 基準信号に対するガスセル型 CS 発振器 10MHz の周波数差、水素メーザに対するオフセット、外気温。この図で、水素メーザ室内温度変化と周波数差変化の図に示した赤い線は、青線で示した生データのプロットをスプライン補完したもの。

いるように見える。また、双方の間に何らかの時間オフセットがあるようにも見える。そこで、この 2 つの変化の内、周波数変化の時系列を 216 秒ずつずらして、各々のケースについて相関係数を計算し、これらをプロット

したのが図 5 である。

図 5 から、絶対値最大の相関係数 0.62 となったのは、周波数変化の時系列を 72 分早めたケースであった。この時の気温と周波数差変化との相関を取ったプロットを

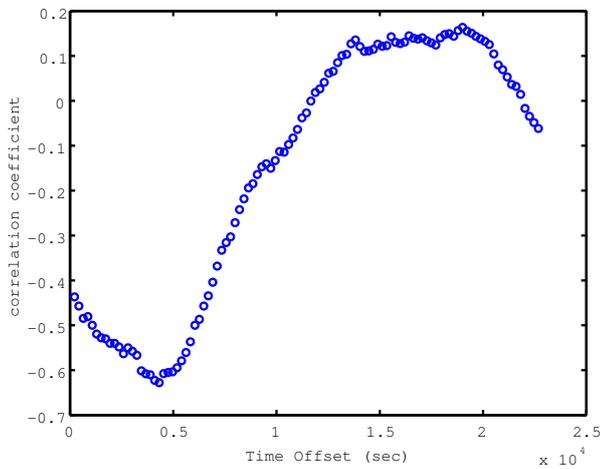


図 5: 水素メーザ室内温度変化に対して、ガスセル型 Cs 発振器 10MHz の周波数差の時系列を 216 秒ずつずらして相関を取ったもの。後者の時系列を 72 分早めたときに相関係数の絶対値が最大となる (約 0.62)

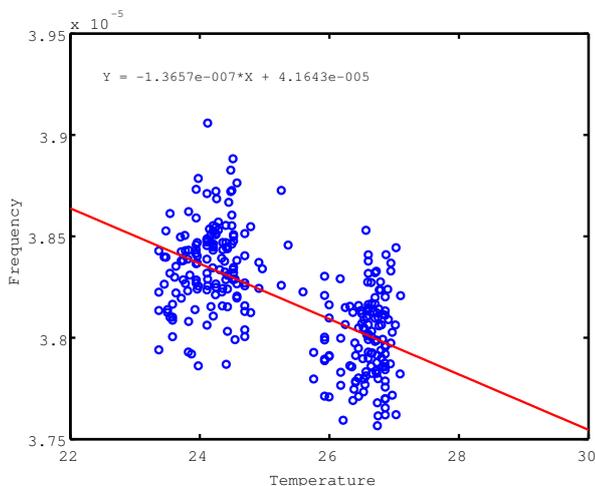


図 6: 水素メーザ室内温度変化とガスセル型 Cs 発振器 10MHz の周波数差との相関 (図 5 で相関係数-0.62 のケースについてプロットした

図 6 に示す。

4.3.2 メーザ室内の気温を徐々に変化させた場合

次に、8月13日～16日の間、メーザ室内の徐々に変化させ、このときのガスセル型 Cs 発振器の応答を調べてみた。図 4 と同様に、この期間の特性を図 7 に示した。この図では、先の図 4 ほど明瞭ではないが、やはりメーザ室気温変化 (最上段) と周波数差変化 (上から 2 段目) との間に逆相関の関係があるように見える。

そこで、図 5 と同じように、周波数変化の時系列を 216 秒ずつずらして、各々のケースについて計算した相関係数を図 8 にプロットしてみた。ただし、図 5 で見られるような、時間ずれでの大きな相関係数の変化は見られず、-0.48 ~ -0.33 程度の範囲におさまる。このケースでは、周波数差の変化を 75 分 36 秒早めた場合の相関係数の絶対値が最大 (約 0.48) となった。この時の気温と周波数差変化との相関を図 9 に示す。

以上の結果から、ガスセル型 Cs 発振器の温度依存性が明瞭に見て取れ、気温と周波数差の変化との間には逆相関の関係がある。また、特に気温変化が急激な場合には周波数差変化も急であり、気温変化が緩やかな場合は周波数差の変化も緩やかとなる特徴が見られる。さらにいずれの場合も、70 分強の時間遅れでガスセル型 Cs 発振器が応答しているように見える。ただ、発振器のメカニズムの中でどの部分がこのような特性を持つのかは現時点では不明である。

4.4 アラン分散の結果

最後に、図 10 はガスセル型 Cs 発振器から得られたアラン分散である。この図には、測地実験の際の値の他、後日の温度依存性モニターでの結果、及び水素メーザから得られた結果 (黒実線) を並べて示した。この図のうち、赤実線は図 2 で水素メーザが設置された恒温槽内にガスセル型 Cs 発振器を置いて計測した結果であり、現状でガスセル型 Cs 発振器の性能を最も良く引き出せる環境下での評価といえる。

表 1 に示した測地 VLBI 実験の際には、図 2 に示す状態でガスセル型 Cs 発振器が設置されていた。この実験で得られたアラン分散は緑色の実線で示している。この事実は逆に言えば、周囲の温度変動を $\pm 1^\circ\text{C}$ 程度に抑えることが出来れば、水素メーザを用いた測地 VLBI 実験と遜色ない結果を得られることを意味する。また、周囲の温度変化が急な場合 (青色の実線)、そして緩やかな場合 (紫色の実線) の場合は、 τ が概ね 300 秒を越えるあ

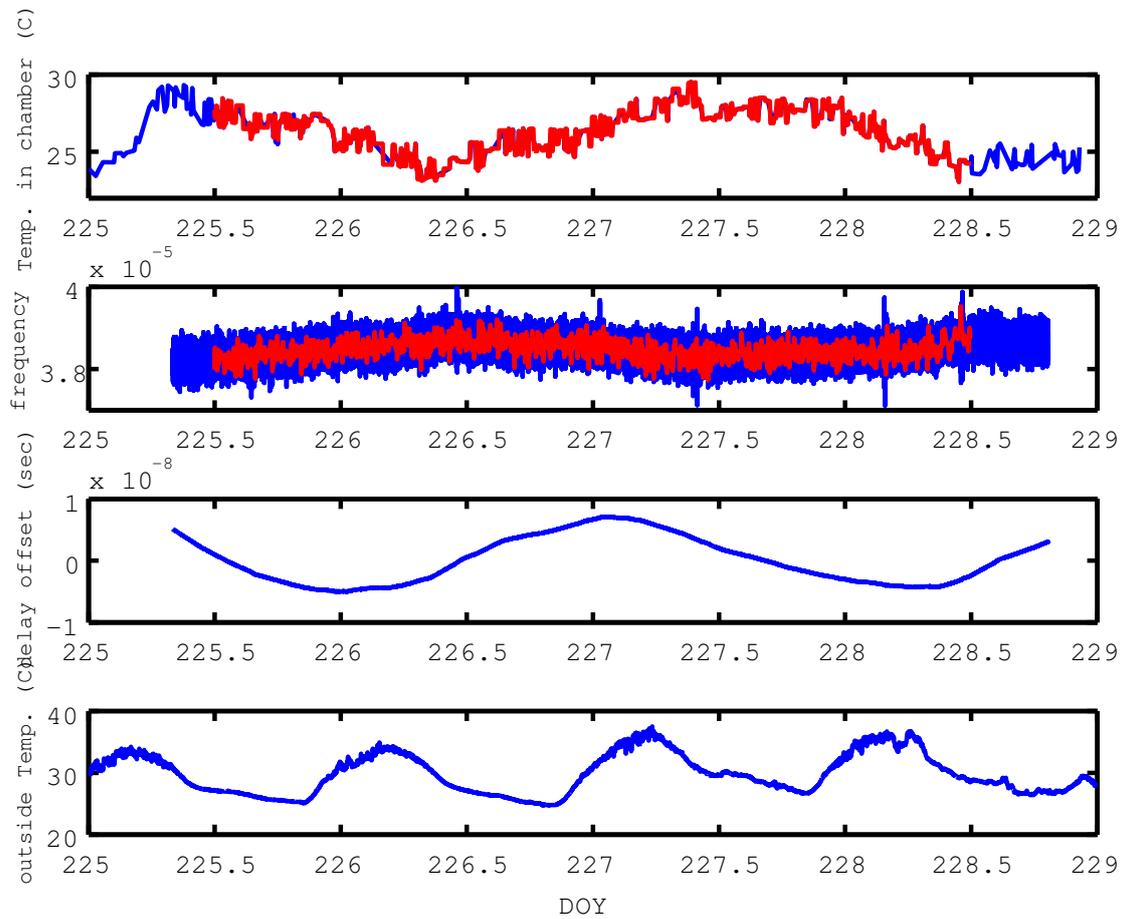


図 7: ガスセル型 Cs 発振器の特性変化 (2007.8.13-16)。各図に示す内容は図 4 と同じ。

たりから初めて各々の安定度に違いが生じていることがわかる。このことは、ガスセル型 Cs 発振器の安定度が、測地 VLBI 実験での一般的な積分時間 (30-300 秒) の範囲で周囲の環境に影響されにくいことを示唆する。

今回は機械的な温度環境制御を行った条件下での評価であった。一方で、エアコン等の温度制御を行わず、例えば発泡スチロール製の簡易恒温槽などを用いた場合の精度評価も、ガスセル型 Cs 発振器の使用可能範囲を調べる上で重要である。

5 まとめ

アンリツ (株) 製レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器を用いて、2007 年 7 月 19 日に鹿島 34m アンテナ-小金井 11m アンテナ基線において測地 VLBI 実験を行っ

た。解析の結果、 $RMS1.3mm$ で基線長が推定され、その推定値は従来の水素メーザ発振器を用いた測地 VLBI 実験結果と 2mm 以内で一致した。その後、レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器を設置した部屋の温度を変化させ、水素メーザ 10MHz 出力に対するガスセル型 Cs 発振器からの 10MHz 出力の差の振る舞いを調べてみた。この周波数差は明らかに温度変化に依存する傾向が見られた。一方で、少なくとも設置環境の温度変化を $\pm 1^{\circ}C$ に押さえる限りは、水素メーザ利用での測地 VLBI 実験と遜色ない精度で基線ベクトルを推定可能であることがわかった。借用したガスセル型 Cs 発振器は汎用 PC と同程度の大きさ、重さであり、その可搬性を生かすことで測地 VLBI 実験が実施できる範囲、条件を大きく広げることができると考えられる。

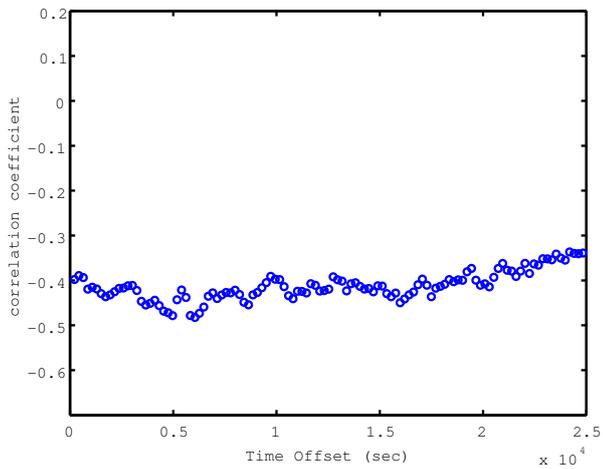


図 8: 水素メーザ室内温度変化に対して、ガスセル型 CS 発振器 10MHz の周波数差の時系列を 216 秒ずつずらして相関を取ったもの。後者の時系列を 75 分 36 秒早めたときに相関係数の絶対値が最大となる (約 0.48)。なお、この図のスケールは図 5 と同じである。

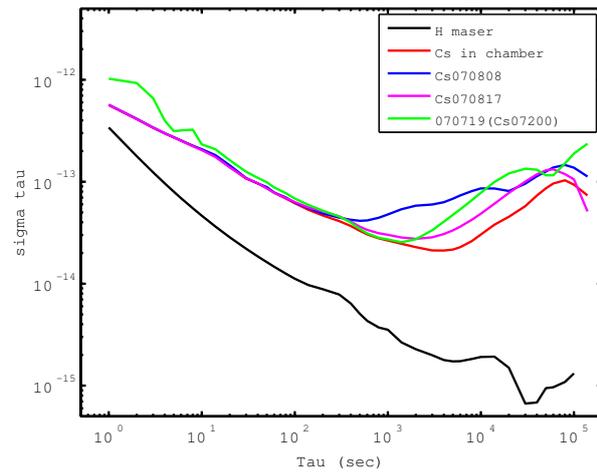


図 10: ガスセル型 CS 発振器のアラン分散

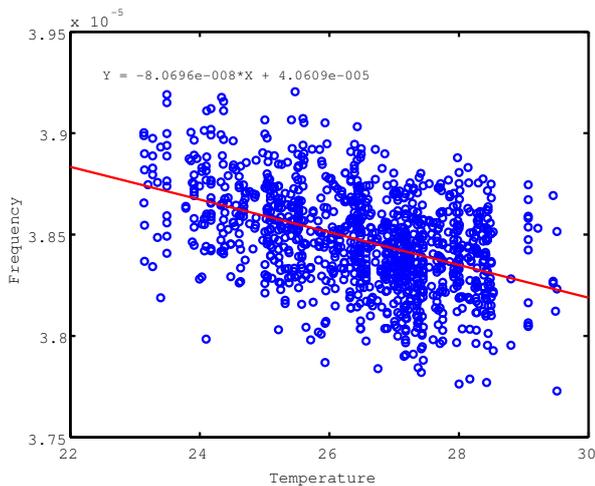


図 9: 水素メーザ室内温度変化とガスセル型 CS 発振器 10MHz の周波数差との相関 (図 8 で相関係数-0.48 のケースについてプロットした。なお、この図のスケールは図 6 と同じである。