

フェムト秒レーザの簡易安定化技術

＝フェムト秒パルス干渉法の高精度化を目指して＝

大阪大学大学院 安井 武史

産業技術総合研究所 美濃島 薫・松本 弘一

はじめに

最近、安定なフェムト秒モードロック (fs-ML) パルスレーザが比較的容易に利用可能になってきたことにより、干渉計測⁽¹⁾⁽²⁾、形状測定^{(3)~(5)}、測距⁽⁶⁾といった幾何計測の光源として fs-ML レーザが注目を集めている。フェムト秒パルス光を用いた幾何計測の特徴は、その光としての極限的特徴 (高速性、高ピークパワー、広帯域、局在性) と非線形光学効果 (光増幅、波長変換、光シャッター他) を有効に利用することにより、従来の連続発振 (CW) レーザやランプ光源を用いた手法では困難とされた高機能光計測 (例えば、微弱光測定や選択的計測) への応用が期待できることである。その一例であるフェムト秒パルス干渉法では、フェムト秒パルス光の時間的局在性をいかすことによって、干渉計測に時間的選択性を持たせることが可能となる。光透過物体の形状測定⁽¹⁾ や水のレーザ誘起ブレイクダウン現象の観測⁽²⁾ を通してその有用性が実証されている。一方、干渉計測の特徴である測定精度に関しては現在までのところ十分とは言えず、高精度化を実現するためには fs-ML レーザの安定化制御が必要である。

fs-ML レーザから出力されたモードロック・パルス列は、図1に示すよ

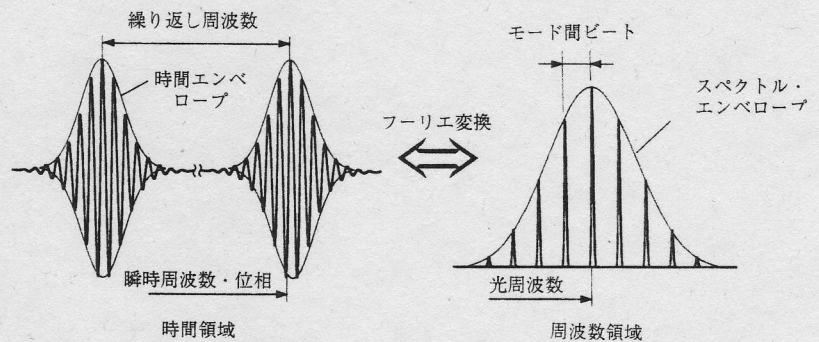


図1 フェムト秒モードロックパルス列のパラメーター

うに時間領域と周波数領域のパラメーターによって表現することができる。フェムト秒パルス干渉法の高精度化を実現するためには、繰り返し周波数とスペクトル (厳密にはスペクトル・エンベロープ、中心波長と形状) の安定化が興味深い。繰り返し周波数の安定化が有効である応用例に、モードロックパルス列を用いた長光路パルス干渉計がある。従来のパルス干渉法では時間的に同一なパルス光の干渉を利用していたため、長光路測定においては測定光路と同様に長い参照光路が必要となり、実用上の大きな制限 (空気揺らぎ、スペース他) となっていた。十分に安定な繰り返し周波数を持つ fs-ML パルス列では、時間的に異なるパルス光の干渉を利用できる。すなわち、光路長差をパルス間隔の整数倍に設定することにより、短い参照光路で長光路の計測が可能となる。一方、干渉計

測の単位となる干渉縞はレーザ波長と屈折率によって決定される。屈折率は波長の関数であるから、スペクトル安定化は干渉縞の変動を抑え、その結果、干渉計測の高精度化につながる。

これまでも高速分光や光周波数計測において、パルスレーザの繰り返し周波数 (タイミングジッター)^{(7)~(10)} や光周波数^{(11)~(14)} の安定化制御法が提案されている。しかし、これらは研究室レベルの精密・複雑な手法を用いているため、パルス干渉法を実用計測 (例えば、工業計測) に応用する場合にはあまり適当でない。むしろ、レーザ共振器に大きな改造を加えない単純な手法によって、工場のような現場でも使用可能な簡易安定化制御法が要求される。同時に、極限的な安定性よりも、むしろ要求計測精度に見合った適度な安定性が長期的に得られるほうが望ましい。本解説では、フェムト秒パ

ルス干渉法の高精度化を実現するため、fs-MLパルスレーザーの繰り返し周波数とスペクトルの簡易安定化制御法を紹介し、その有用性を考察する⁽¹⁵⁾。

1. 繰り返し周波数の安定化

図2に繰り返し周波数の安定化制御システムを示す。用いたレーザー光源はアルゴン・イオンレーザー（コヒーレント、Innova-310、パワー=8W、オールライン）励起のカーレンズ・モードロック・チタン・サファイアレーザー（コヒーレント、MIRA-900D、パルス幅=80fs、繰り返し周波数=75MHz、中心波長=790nm、スペクトル幅=12nm）である。繰り返し周波数を安定化するためにはレーザー共振器長を制御する必要があるが、そのための制御素子として共振器内のモードロックスター（MLスター）を用いる。これはロータリー・アクチュエーター上に2枚のミラーを平行に取り付けた構造になっており（図2右下）、微小回転によって±160μm（繰り返し周波数で±3.5kHzに対応）の範囲内で共振器長を変化させることができる。MLスターは共振器長変調によってモードロックを開始させる時のみ使用され、モードロック動作中は不要なため、繰り返し周波数の安定化制御に用いることができる。制御信号には、繰り返し周波数の変動を拡大するため、20次高調波成分（ $f_{20th} \approx 1.5\text{GHz}$ ）を用いる。アバランシェ・フォトダイオードで検出された周波数信号は、ルビジウム周波数標準（安定度=10⁻¹¹）に同期させた周波数シンセサイザーからの信号（ $f_{LO}=1.5\text{GHz}$ ）とミキシングされる。不要な信号はローパスフィルターによって除去され、100kHz以下（ $=f_{20th}-f_{LO}$ ）までビートダウンさせる。この信号は参照周波数と周波数比較され、差周波信号が生成される。この差周波信号を積分（時定数2秒）し、MLスターの制御信号に用いる。 f_{20th} の値を一定に保つように共振器長を積分制御する

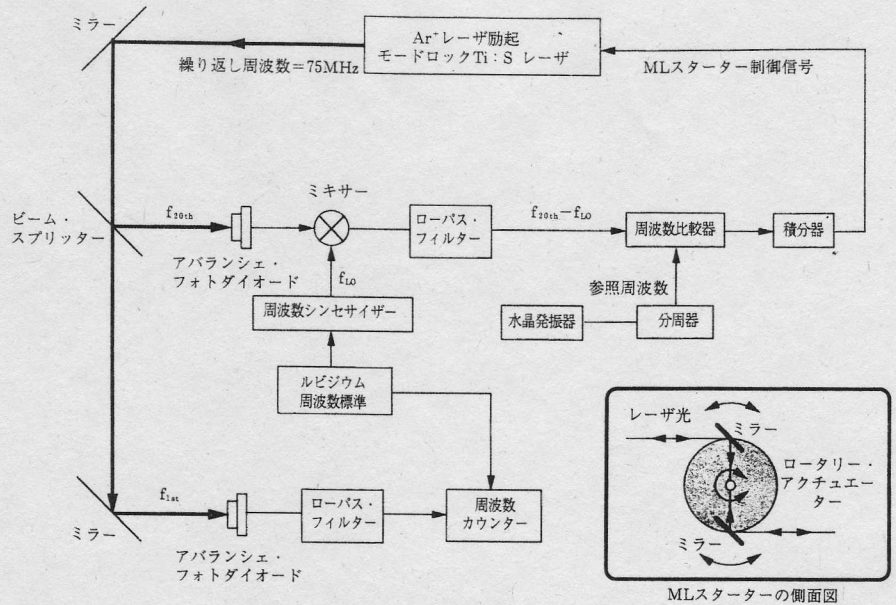


図2 繰り返し周波数安定化システム

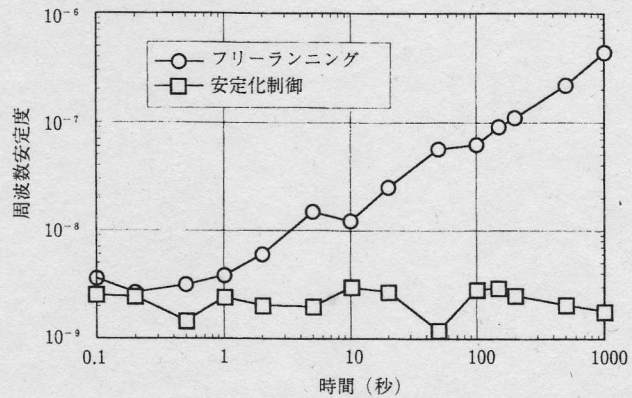


図3 繰り返し周波数の安定度

ことにより、繰り返し周波数が長期的に安定化される。

繰り返し周波数の短期安定度（タイミングジッター）は従来よりパルス光のパワースペクトルによって評価されてきたが⁽¹⁶⁾、今回のような長期安定度の評価には測定機器性能の制限により適していない。そこで、CWレーザーの周波数安定度評価に用いられるアラン分散⁽¹⁷⁾によって繰り返し周波数の安定度評価を行った。測定用のアバランシェ・フォトダイオードで検出された繰り返し周波数の基本波成分（ $f_{1st}=75\text{MHz}$ ）は、ローパスフィルターによって高調

波成分を除去した後、ルビジウム周波数標準にロックされた周波数カウンターで測定される。図3は、アラン分散平方根によって表された周波数安定度である。繰り返し周波数の変動を短期的成分（<1秒）および長期的成分（>1秒）に分けて考えると、前者は励起アルゴン・イオンレーザーのパワーやポインティング・ベクトルの変動に依存し、後者はレーザー共振器の機械振動や熱膨張に起因するスロードリフトであると考えられる。本システムによってスロードリフトは効果的に抑制されているが（1000秒で1/100以下）、1秒

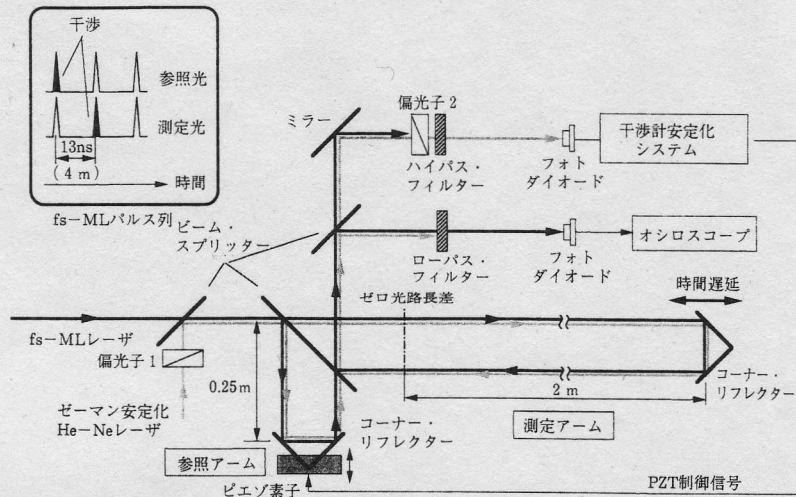


図4 モードロック・パルス列を用いた長光路パルス干渉計

以下の短期安定度の改善は見られなかった。これは本システムが長期安定化を目的とした簡単な積分制御であることと、制御素子として比較的低速・低分解なMLスターを用いたためである。短期安定度を改善するためには、制御システムの広帯域化、高分解・高速な制御素子（例えば、ピエゾ素子）の使用、安定な全固体型励起レーザーの使用が有効であると思われる。

繰り返し周波数が安定なfs-MLパルス列を用いた長光路パルス干渉計は、参照光路を短縮し実用性を拡大する。そこで、図4に示す長光路パルス干渉計によって、繰り返し周波数安定化fs-MLレーザーの有用性を評価した。ここでは、fs-MLパルス列中の時間的に連続した2つのパルス光（パルス間隔13ns）を干渉させるために、参照アームと測定アームの光路長差を4mにセットする（図4左上）。fs-MLパルス列は、ビーム・スプリッターによって短光路長の参照アームと長光路長の測定アームに分離される。コーナー・リフレクターからの反射パルス光はビーム・スプリッターによって再び空間的に重ね合わされる。測定アームの時間遅延制御によって両パルス光が時間的に重なった時のみ干渉信号が生成され、それをオシロスコープで測定する。測定光路に沿った空気揺らぎ、光学部品の

機械振動や熱膨張は干渉縞信号に大きな変動を与えるため、これらの影響を除去する必要がある。そこで、ゼーマン安定化He-Neレーザーとピエゾ素子を用いて干渉計光路長の安定化を行った。fs-MLレーザー光（水平偏光）との干渉を避けるため、偏光子1によってゼーマン安定化レーザーから垂直偏光成分のみを抜き出し、fs-MLレーザー光と同一の光路を通す。ゼーマンレーザーによる干渉信号光は、偏光子2とハイパス・フィルター（カットオフ波長=700nm）によって完全に分離される。フォトダイオードで検出された信号は、ピエゾ素子を用いて長光路干渉計の光路長を安定化するために用いられる。このように安定化された長光路干渉計を用いてfs-MLパルス列の干渉信号を測定した。

図5は、測定アーム長を固定した場合の干渉信号の時間変化を示している。縦軸のフルスケールは、 $\lambda_{790}/2$ ($=790/2=395\text{nm}$) の位相変動に対応している。この時、長光路干渉計の光路長はfs-MLレーザーの干渉信号変動よりも十分に高い精度 ($=0.005\lambda_{888}/150\text{sec}$) で安定化されている。従って、フリーランニング時に示されている干渉信号の変動は、繰り返し周波数の変動によるものであると考えられる。時間範囲(a) (150秒) において直線近似を

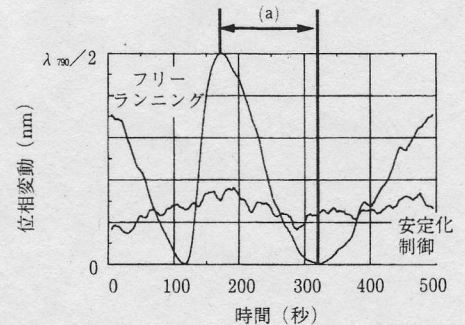


図5 長光路パルス干渉計における干渉信号の変動

行くと、繰り返し周波数安定化により干渉信号の変動が1/7まで抑制されている。このことから、繰り返し周波数安定化fs-MLレーザーは、長光路パルス干渉計の高精度化に対して有効であることが分かる。

2. スペクトルの安定化

fs-MLレーザー光のスペクトル安定化には、共振器内にある群速度分散補正用プリズムペアを用いる。プリズムの効果として、以下の2点が考えられる。

- (1) プリズムの出し入れ（光路を横切る方向）は負の群速度分散を共振器に与え、スペクトルの中心波長をシフトさせることなくスペクトル幅を変化させることができる。
- (2) プリズムの回転は光路の横ズレによりレーザー発振の状態を変化させ、スペクトル形状の変化なしに中心波長を変えることができる。

一般にfs-MLレーザー光スペクトルの時間的変動は形状の変化よりも中心波長のシフトが支配的である。そこで、プリズムの回転を機械的に制御することによりスペクトルの安定化が可能であると考えられるが、そのような制御法では共振器の改造が必要となり簡易安定化には不適である。我々は、それに代わる簡易制御方法としてプリズムの熱制御に注目した。プリズムをペルチェ素子で加熱し温度を上昇させたところ、スペクトルの形状や幅は変化せ

ず中心波長が長波長方向にシフトした。すなわち、プリズムの熱制御によって、プリズムの回転と等価な効果が得られる。これは、プリズム屈折率の温度依存によるものである。そこで、プリズムの熱制御によりスペクトル中心波長の安定化を行った。

図6にスペクトル安定化システムを示す。共振器エンドミラー側プリズム(材質:SF10)の上部にペルチェ素子($I_{max}=4A$, $Q_{max}=38W$)を貼り付け、熱制御を行う(図6右下)。プリズムは、熱容量を小さくするため5mm厚までスライスしている。中心波長をモニターするため、スペクトル範囲内の2波長の強度差信号を用いる(図6左下)。fs-MLレーザー光は回折格子(1800line/mm)によってスペクトル分解され、2つのフォトダイオードによって1.5nmの波長幅で2波長の強度信号(= I_{787} 、 I_{793})が検出される。別のフォトダイオードで検出された全強度信号(= I_{all})を用いて規格化し[= $(I_{787}-I_{793})/I_{all}$]、参照電圧と電圧比較される。その誤差信号は、積分器(時定数2秒)とパワーアンプを経て、ペルチェ素子の制御に用いられる。

図7は、中心波長と繰り返し周波数を同時制御したときの、安定化前後における両パラメーターの変化を示している。中心波長は、干渉縞計数型波長計(分解能0.03nm)によって測定された。フリーランニング時は両パラメーターともスロードリフトを示しているが、安定化後は効果的に抑えられている。表1は、図7から得られた中心波長の安定度(直線近似)を示しており、安定度は約50倍向上した。一方、図7の中心波長には、安定化後も比較的速い変動が残っている。これはプリズムの熱容量がペルチェ素子の制御能力を上回っているためであり、これが本制御システムの時間応答を制限している。制御のさらなる高精度・高速化のためには、プリズム熱容量の減少とペルチェ素子の高出力化が必要である。また、繰り返し周波数も同時に安定化されて

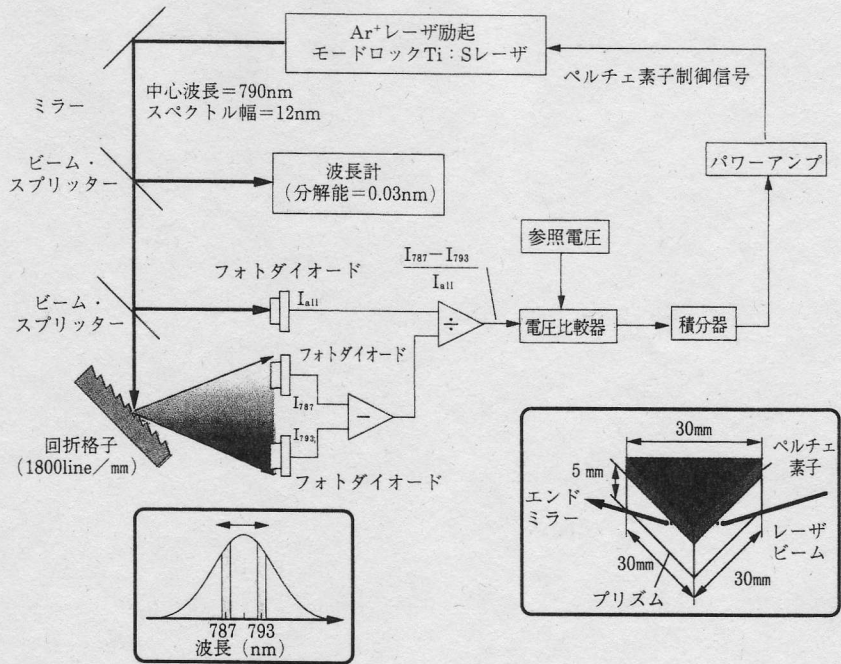


図6 スペクトル安定化システム

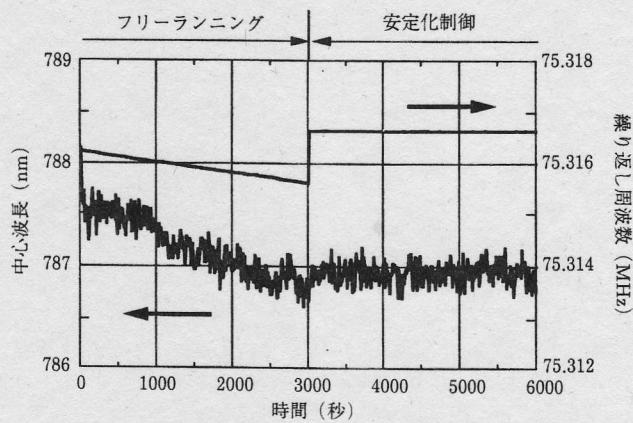


図7 中心波長と繰り返し周波数の変動

いるが、繰り返し周波数とスペクトルの同時制御における干渉効果は見られていない。

干渉計測への応用を考えると、スペクトル安定化は屈折率変動とそれに伴う干渉縞変動を抑制し、測定精度を向上させる。例えば、ガラス材料(BK7)の群屈折率と位相屈折率を考えた場合、表1に示されるように屈折率変動も1/50まで抑えられる。このように、スペクトル安定化フェムト秒レーザーは、

表1 中心波長と群・位相屈折率(BK7)の安定度

安定度	中心波長	群屈折率	位相屈折率
フリーランニング	1.32×10^{-3}	2.59×10^{-5}	1.38×10^{-5}
安定化制御	2.53×10^{-5}	4.98×10^{-7}	2.65×10^{-7}

パルス干渉計測の高精度化に有効である。

まとめ

高精度パルス干渉計を実現するため、fs-MLレーザの繰り返し周波数とスペクトルの簡易安定化制御法を紹介した。単純かつ実用的な手法として、MLスターターと群速度分散補正用プリズムをそれぞれ制御素子として用いた。繰り返し周波数の安定化によって、1000秒におけるスロドリフトを1/100以下まで減少することができた。さらに、繰り返し周波数安定化fs-MLパルス列を用いた長光路パルス干渉計において、参照光路の短縮化と高精度化に有効であることが示された。一方、スペクトル安定化によって中心波長とそれに付随した屈折率の変動は1/50以下まで減少された。その結果、安定な干渉縞を得ることが可能となり、パルス干渉計測の高精度化が実現できる。

ここで紹介した簡易安定化制御は、

フェムト秒パルス干渉法の実用化において重要な技術である。今後、非線形光学効果を用いた光計測法に安定化fs-MLレーザを積極的に導入することにより、高機能性と高精度性を併せ持つ新しい光幾何計測法の展開が期待される。

本研究は、通商産業省（現 経済産業省）産業科学技術開発制度「フェムト秒テクノロジー」のもとで行った研究である。

<参考文献>

- (1) K.Minoshima, and H.Matsumoto : Opt. Comm. 138 (1997) 6-10.
- (2) E.Abraham, K.Minoshima and H.Matsumoto : Opt. Comm., 176 (2000) 441-452.
- (3) K.Minoshima, and H.Matsumoto : Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1994) L1348-1351.
- (4) K.Minoshima, and T.Yasui, E.Abraham, H.Matsumoto, G.Jonusauskas, and C.Rulliere : Opt. Eng., 38 (1999) 1758-1762.
- (5) T.Yasui, K.Minoshima, H.Matsumoto : Appl. Opt., 39 (2000) 65-71.
- (6) K.Minoshima, and H.Matsumoto : Appl. Opt., 39 (2000) 5512-5517.
- (7) M.J.W.Rodwell, D.M.Bloom, and K.J.Weingarten : IEEE J. Quantum Electron., 25 (1989) 817-827.
- (8) S.B.Darack, D.R.Dykaar, and G.T.Harvey : Opt. Lett., 16 (1991) 1677-1679.
- (9) D.R.Walker, D.W.Crust, W.E.Sleat, and W.Sibbett : IEEE J. Quantum Electron., 28 (1992) 289-296.
- (10) D.E.Spence, J.M.Dudley, K.Lamb, W.E.Sleat, and W.Sibbett : Opt. Lett., 19 (1994) 481-483.
- (11) B.Couilland, A.Ducasse, L.Sarger, and D.Boscher : Appl. Phys. Lett., 36 (1980) 1-3.
- (12) A.I.Ferguson, and R.A.Taylor : Opt. Comm., 41 (1982) 271-276.
- (13) J.Chesnoy, and L.Fini : Opt. Lett., 11 (1986) 635-637.
- (14) T.B.Simpson, T.Day, F.Doft, M.M.Malley, and G.W.Sutton : IEEE J. Quantum Electron., 29 (1993) 2489-2496.
- (15) T.Yasui, K.Minoshima and H.Matsumoto : IEEE J. Quantum. Electron., 37(1) (2001) 12-19.
- (16) D.von der Linde : Appl. Phys.B, 39 (1986) 201-217.
- (17) D.W.Allan : Proc. IEEE, 54 (1966) 221-230.

【筆者紹介】

安井武史

大阪大学大学院 基礎工学研究科 システム人間系専攻 助手
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3
TEL:(06)6850-6217 FAX:(06)6850-6212
E-mail:t.yasui@me.es.osaka-u.ac.jp

美濃島薫

産業技術総合研究所 計量研究所 量子部 主任研究官
〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-4

TEL:(0298)61-4030 FAX:(0298)61-4080
E-mail:mino@nrlm.go.jp

松本弘一

産業技術総合研究所 計量研究所 量子部 部長
〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-4
TEL:(0298)61-4034 FAX:(0298)61-4006
E-mail:hiro@nrlm.go.jp