

大型産業を牽引する

「長い距離・大寸法の計測技術の開発」

松本 弘一 (計量研究所)

レーザーの出現は、光計測技術に大きなインパクトを与えた。そして、非線形光学結晶の進展もあり、当該分野における利用技術は目を見張る状況であったので、活発な光計測技術の開発に自由に取り掛かることができた。生かしながら、これらの技術が民間に受け入れられるまでには至らなかったが、これらの研究は今現在でも生きているので、今後、著者自身もその解決の糸口を見出すことに専念すると共に、若い研究者・技術開発者の指針となることができれば、さらなる発展が期待される。

1. 始めに

渡辺譲・今泉氏は、早くから多くのファブリー・ペロー・エタロンを製作して、長い距離の測定を行った。それは、フリースpektralレンジ（エタロンの長さに相当）を整数倍にすることによって、1 dm のエタロンで、2 dm のエタロン長を決定し、そして、2 dm のエタロン長を用いて 4 dm のエタロン長を決定する方法である。その結果、最終的には、1 m のエタロンを用いて、数十 m の距離を決定した。当時の技術では、エタロンの窓板の精密な研磨が大変であったと思う。また、この実験は、“銀座”にあった当時の中央計量検定所の地下で行われたようである[1]。さらに、この技術はフィンランド国で、基線長の標準（約 400 m の距離）として生かされている。

さらに、大石忠尚氏・清野昭一氏・桜井好正氏らは、1970 年代において、安定化 He-Ne レーザーの安定度を調べることもあって、長野県松代地区の岩盤山に掘られたトンネル網をお借りして、真空管を備えた 20 m の光路差の干渉計による連続測定を行った。大石は測地学会で発表していたが、岩盤の伸縮は、当該分野で大きな評価を受けているように感じた。そして、私達は長い距離の測定に関心を示す糸口になり、1979 年に現在のつくば地区に 310 m の光学トンネルを建設する糸口になったことは間違いないことである。

このような技術は、その後、地震予知にも使えるのではないかと、多くの機関などから本プロジェクトの評価を受けることになった。後で分かったことであるが、当時、地震予知が可能であると、いろいろと議論されていた。著者は、これらの背景の基に、当該技術の研究を開始することができた。

2. 距離計研究の始まり

2. 1 米国への長期出張

①はじまり

当時、静岡県は、南海トラフ関係の大きな地震の発生が懸念されることから、地震予知の技術開発は大きな課題であった。日本の地震予知連絡協議会というものがあり、東京大学、国土地理院、工業技術院地質調査所などの多くの機関が関心を示していた。特に、当時の静岡県では、県知事に近い部署に工業技術院の関係者がおられて、地震予知が大きな課題であり、その対応に積極的であった。その予知の一つの方法としては、地殻の歪（ひずみ）を測ることであった。この歪の測定は御前崎と伊豆半島の松崎との間の長距離（約 50 km）の変化を精密に測ることであった。そして、静岡県の予算で当該技術を開発すべく、いろいろと企画を行っていたが、先ず、国土地理院では自前の予算で検討することになっていたもので、外部の機関での人材を探していた。国土地理院や工業技術院のご指導により、計量研究所にターゲットが絞られた。計量研究所では所議で検討し、人材を出すことになったようである。留学などに関しては、担当部長に強い権限があるので、部内の留学制度を促進することからも、博士課程の経験を有していた私に白羽の矢が届いた。

と言いますのも、当時、米国のロスアンジェルス当局は、地震予知のための地殻歪の測定を既に行っていたからである。当時、私は、技術の展開を広げることも有効に思い、県からの依頼を受けて、米国ボルダー市にある研究と技術とを有機的につなぐ JILA(天文学連携研究所；米国標準研究所とコロラド大学) に、静岡県の予算で1年間出張することになった。この研究所では、また、He-Ne レーザ干渉計を用いて、約 10 km 以上の距離において岩盤の伸縮を測定している経験も有していた。

②ボルダーでの生活

結果的には、1983 年 3 月からの 1 年間、米国ボルダー市で生活した。ボルダー市は、ロッキー山脈の麓に位置し、すごくきれいな街であった。また、税金が高いことから、米国で一位の安全であった。当時、娘 2 名（5 才と 2 才）は 1 年間生活できるかが心配だったが、子供は、言葉より、行動であることが分かった。最初は泣くだけの日常だったが、米国の精神だと思うが、弱い人を助ける精神があり、多くの友達から支援を受けていたようである。また、家庭の事情を大学に話すと、大学経営のアパートに優先的に入れてくれたので、快適な生活を送ることができた（図 1）。そして、

アパートは広いので、若い日本人の留学生や長期出張者などとの交流ができた。休日は特に楽しく感じた。妻はキリスト教会のボランティアの英語トレーディングに通うことが無料でできたので日常生活でも楽しい日々だったと察することができた。このような事の情報私の活動にも反映することができ、多くの支援を受けたようにも思う。それに、ロッキー山脈の界限ではマツタケがとれたので、すき焼きを多く行った。この時にお店で行った肉の切り方の問題である。すき焼には、薄い厚さの肉が必要であるが、厚くしか加工できないことである。その後は”できるだけ”の言葉を入れるようにした。

単位に関して思ったことは、一軒一軒の間隔が長く、道路の幅が広いので、マイルとギャロンは生活レベルではうなずける。つまり、自動車のスピードは、マイル/時を、日本的には、km/h と読み替え、ガソリンにおいてギャロンはリットルと読み替えるのが妥当である。また、人の体も大きいので、肉などはポンドの単位が良いと思った。でも、当時、メキシコ国に近づくと道路標識が km/h に途中で変わっていった。



図1 コロダド大学の学生アパートでの風景

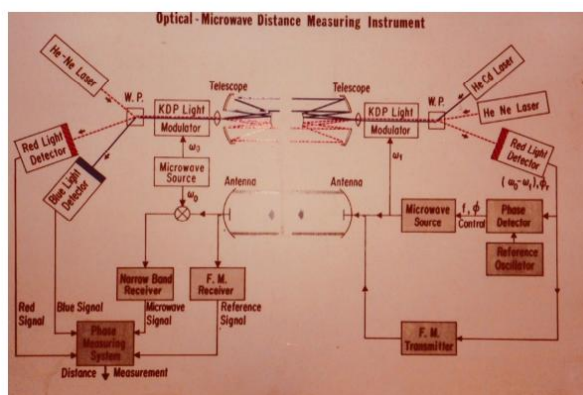


図2 JILAにおけるマイクロ波型トランスポンダ方式の長距離測距システム

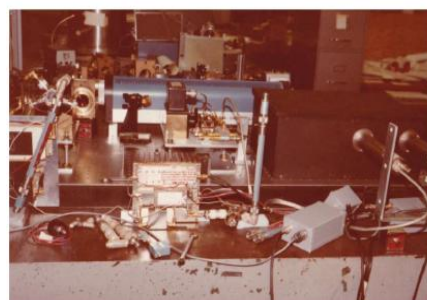


図3 JILAのシステムの写真

③技術課題

当時の出張の意味は、50 km の距離を精密に測定する要素技術を開発することであったので、コロダド大学・米国標準局（NBS）連合研究所のレビン教授の研究室にお世話になった。そして、以下の課題を選んだ。

必要な技術は、高分解能化に必要な高速光変調技術とその変調光を低周波数で測定するための復調技術が基本技術である（図 2，3）が、精密測距法としては、大気ゆらぎ補償技術や全体をまとめるシステム化技術である。図にも示されているように、水蒸気の影響を補正するために、第 3 の波長として高周波数のマイクロ波を用いることが提案されていた。そして、本技術を現場での実施実験の様子と実験室での研修を十分に学ぶことができた。新しい実験では、ボルダー市は標高が高いので大気のゆらぎの影響が比較的少ないが、日本では大きな課題となることが想定されるので、大気のゆらぎの評価に取り組んだ。

流体理論の基礎となるロシア国のタタルスキーの難しい本を読み、大気ゆらぎのモデルを考え、その実証実験をコロダド大学の校庭で行った。図 4 は、野外実験の配置を示したものである。実験は、学生らが少ない夜に行ったが、夜の行事も多いので、人通りが少なくなるのを待ったこともあった。それでも、目標とするデーターは順調に取得することができた。これらの実験のデーターを簡単な計算機で手動で解析し、先のモデルと比較・評価した結果、今までに存在しない新しい結果が得られた。つまり、測距に利用する光源の波長、ビーム径、そして、データー処理法などの新しい知見が得られた[2]（図 5）。そして、非常に長い

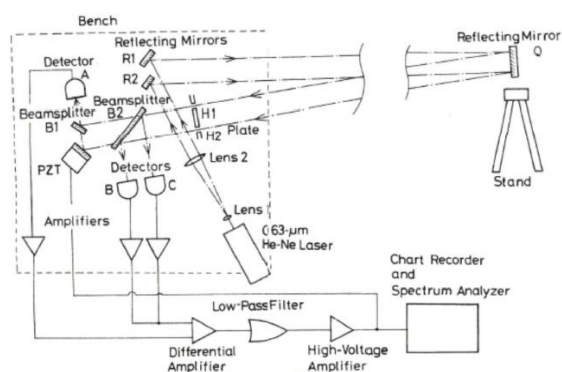


図 4 コロダド大学の校庭における空気ゆらぎ量測定の実験系

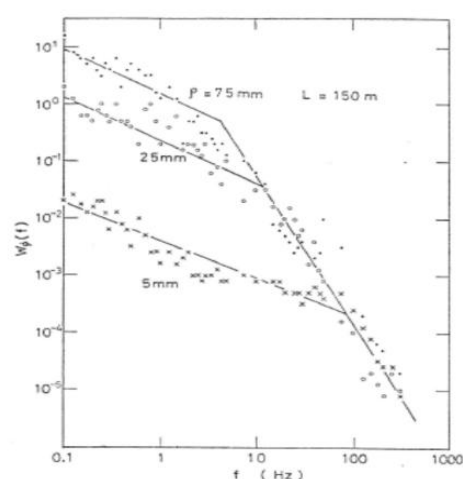


図 5 実験の解析結果；空気ゆらぎの周波数特性

50 km の距離における地殻歪を取得するために必要な測距装置の仕様が得られたので、当初の目標が達成され、レビン教授が保有する測距システムの構想を利用できる見通しが得られた。この中で、電波による空気の水蒸気量の補正法に関しては、短波長レーザーの利用を考えたが、測定する距離の2地点に距離計を置き、それらの距離計の同期をとるトラスポンダー方式に関しても利用の可能性の知見が得られ、世界でトップの距離計製作の指針が得られたので、大きな収穫であった。そして、日本の測量業界にも世界でトップの技術を紹介でき、この業界の発展に貢献できたと評価している。この技術が発展し、後記のプロジェクトに発展でき、非常に有意義であった。

この時の実験に必要な部品の機械加工のために、研究所の工場に行ったときに驚いたのは、国際度量衡委員長（カナダ国）自身が旋盤で加工されていたことであった。もう一つの驚きは、旋盤などを使った後には、ペーパータオルで掃除をすることになっていたようで、翌日工場に行くと、工場長にすごく叱られた。が、英語で叱られたので、落ち込むことはなかった。なお、電機部品ショップの部署では、伝票を簡単に書けば、必要な部品がもらえるので、電子回路の半田付けもスムーズにできた。

④ 交流結果

全体を通して、研究者として多くの知見を得ることができた。直接的には、私を受け入れて下さったレビン教授の考え方とその決定に至るプロセスである。かなり、こせこせしないで、合理的に目標に向かって研究を進めていた。このことは、精密分光に関する研究で卓越していたジョンホール教授や光による重力加速度計に関する研究で頑張っておられたファース教授の他に、分光光学で権威ある成果を出されていた多くの教授達であった。これらの方達には、研究者としての知見を得た。彼らの自信は、分野を決めて活動すると、十分な研究予算を獲得できる制度が米国に存在することによって分かった。ジョンホール教授（2005年のノーベル物理学賞を受賞）は非線形結晶などに関して教えて下さった。このときから、食事の誘いなど、いろいろと交流させていただいて、現在も続いている。家内はジョンホール教授の奥様お世話になっていた。米国では、余裕のある奥様はボランティア活動されている方が多かった（図6）。

野外実験での大きな出来事は、大気ゆらぎの野外実験のために、研究室から実験器具を窓から運び題しているときに、突然、大学がやとっている警察官（学生と専門職）が研究室に入ってきて、20才位の女性にピストルを向けられた。この時、私はジャンバーのポケットに手を入れていたことが悪かったようである。指導教授に連絡してもらって、届書を出せば問題ないとのことで、翌日からは何にもなかった。米国では、何事も契約書が必要である。この時の経験から、工業技術院内での野外で実験を行うときは、総務部長に連絡することにした。そして、大気ゆらぎに関する技術は、私の研究分野に大きな広がりを示す指針になっている[3]。



図6 訪問の時のジョンホール先生との談笑の様子（1996年）

2. 2 帰国後の活動

1年間の米国生活の後、帰国すると渡米前とは状況が大きく変わっていた。まず、静岡県の幹部の方々が変わっていた。渡米前の意気込みはあまり感じられなかった。これは、国における地震予知の可能性の是非が議論されてきたからだと思う。渡米に関する全ての計画や予算などの詳細を担当して下さった県の方（井野氏）が、かなり高い地位になれていた。

その内に、浜松ホトニクスを訪問することを依頼されましたので、浜松駅に行ったところ、駅には、晝間社長が社用車で待っていて下さいました。良い自動車だったのも覚えています。この時の印象は、以下です。

県と関係があるのかどうか分かりませんが、言えることは、ナノ秒パルスのYAGレーザーで測距実験を行っていたことです。これでは、精密測距が不可能だと思いましたが、説明は大気特性調査であるようにも思いました。私の関心事は、高出力のレーザーを空中伝搬させると、空気の屈折率による非線形効果が発生し、50 kmの距離を伝搬させることができない時があるということです。この件では、流体の大御所であるタタルスキー教授の理論に関して米国でコロラド大学の図書室から本を借りて深く研究していたので、非常に興味深く、議論できた。社長とお話をしたときは、非常に歓迎してくれました。その他に、取締役水島氏（元、NTT）、土屋氏（開発技術研究所 副所長）、そして小池氏（東京営業所長）にお話しすると、殆ど無料で光検出素子などに関して試供品を送ってくれました。このことは、美濃島氏が入所してからの数年間で、土屋氏が亡くなられる前まで続いたと思います。

3. 大寸法計測技術

3. 1 3 μm 波長代の波長領域

① 計測の課題

本課題の研究開始は、当研究所が東京から筑波へ移転後における補助金などのおかげだったように思う。それにもまして、新研究用の実験室が貸与されたことである。大学の博士課程のころ、大気ゆらぎなどに関心を持っていたほかに、工業会でも数 μm ～数百 μm の比較的大きな物体の寸法の高精度化に関して強い期待を持っているようでもあった。大気ゆらぎの影響は、使用光源の波長の二乗に比例して影響が小さくなると思っていたので、波長の長い赤外線光源とする干渉計の開発を始めることにした。当該分野は、一般の計測法としても未踏であったので、学術的にも意義があると感じた。

最初に手掛けたのが、3 μm 代の波長のレーザーに関して、光周波数標準（光周波数計測のチェーンのため）を開発されていた2名の女性先輩が第2部にいたからでもある。レーザーの製作に関して、懇切丁寧に教えて頂き、ネオアークという小さな企業に発注した。この結果、計画していたレーザー光源を取得できた。そして、私も、赤外線レーザーの評価法や調整法を考え、手作りの簡単な方法を考案して、知財化も行った。当時の知財化は、開発者が特許請願の原案を書き、弁理士が添削する方式であった。そして、弁理士がタイプライターで、請願案を清書してくれるが、私の伝達のまずさや考えの変更があり、数回の切梁によって、最終資料が完成した。

この場合、複数の波長による合致法でなくて、合成波長という新技術を考案した[4, 5]（図7）。この考えは正しかったと思う。なぜなら、スイス国の有名な教授が、新規の技術として、英語の論文を発表していたからである。これらの技術を用いた実証実験も、(株)ツガミ製の長尺ブロックゲージを調達して、評価することを行った。実際に私の方法は脚光をあびた。新聞や解説などの資料も積極的に執筆した。当時、赤外線の応用計測技術に関して大阪大学関係などの関連研究会で講演を行うことができ、開発した技術を宣伝できた外に、当該分野の技術を新たに習得でき、必要な技術の高度化を実現できた。

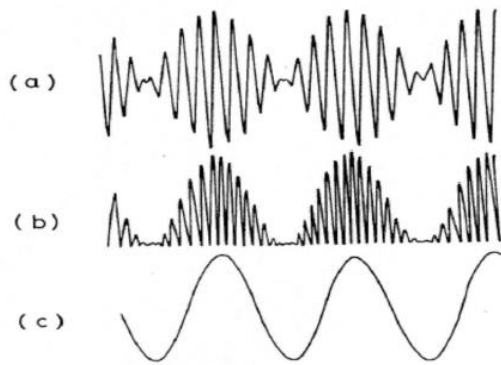


図7 初めて開発された合成波長法の実験検証

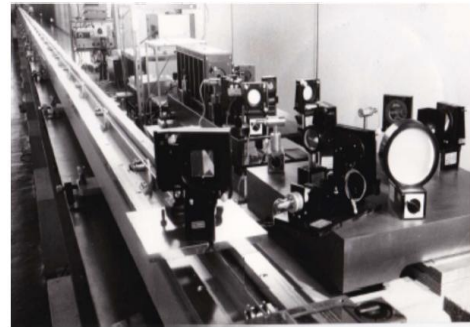


図8 多波長CO₂レーザを用いた干渉測距の実験装置

② 研究結果

また、ロシア国大学教授 Brudet 氏が、新しい技術として賞賛してくださり、大寸法測定技術の本の中に著者の論文を大きく取り上げてくれた。残念ながら、ロシア語であったが、丁度、その時に、精密工学会専門委員会の幹事を仰せつかっていたので、委員長に相談したところ、翻訳料を提供してくれることになったので、地質調査所の方に相談したところ 30 万円で翻訳を受けてくれ、立派な翻訳本を専門委員会として印刷した。後で、思ったことであるが、一般の出版社で発行すれば、当該分野の発展に有効であったと思った（残念でした）。その後、ブルーデット教授が来日した時にお話しをしても、出版しなかがことが残念でした。大学の学部生の時、ロシア後を少し勉強していたことはとても良かったと思う。

さらに、三菱重工(株)高砂研究所の技師長が非常に興味を持って下さって、共同研究を開始した。三菱重工の全事業所の計測関係の技術者・研究者に聞かせたいと、高砂研究所の合同講演会で講演をさせて頂いた。当時、高砂研究所の職員は、一人で 9 テーマを持っておられていたので、私の技術の実用化を組み込むことは大変のようで、私がもっと手助けをしたらと思いつつ、次のプロジェクトに夢を巡らせていた。

この関係の論文では、1984 年 3 月に、精機学会の 50 周年記念の精機学会賞を受賞した。そして、雑誌社（月刊誌）から連続シリーズの解説書執筆の依頼があり、猛勉強を行って 2 年間に渡って執筆できたことを懐かしく思う [5]。

特に、大学の先生方は、光計測に関する優しい現場技術として講義に使って頂いていたことが、大分後で分かったので、本にすべきであったと後悔した。

3. 2 10 μm の波長領域

私の思いは、既に、10 μm 波長領域で発振する CO₂ レーザーに移っていた。なぜなら。CO₂ レーザーは波長が長い上に、CO₂ 分子の回転スペクトルにより多数の波長を発振できるからである。競争相手は、米国アリゾナ大学であった。既に、加工物体の表面計

測に関して、顕著な成果を出していた。でも、著者の目的は、長さ標準の分野であるので、私の計画は変更しなかった。これらの技術を勉強できたことが、今後の発展に有意義であった。この時の大きな成果は、米国留学の経験を活かすと共に、次の研究のステップになった。具体的には、具体的には、光学トンネルの中の 100 m の距離においても、数 μm の再現性で実証できた（図 8）[6, 7]。この時のアライメントには、自転車で移動し、空気のゆらぎがおさまる時間（数分間）だけ待ってから、レーザービームのチェックと調整を行う実験であつたが、どんなデータが得られるかと楽しい日々であった。そして、波長が 10 μm であるので、表面粗さが、 $\lambda/4$ 以下の物体の計測も可能であり、大気ゆらぎの影響が受けにくい外に、機械分野の形状計測に有効であった。この場合、幸いに光源としての CO_2 レーザーに関して良い環境にあった。それは、今までの CO_2 レーザーは、ガラス細工によって製作される廃棄・注入システムを用いて CO_2 ガスを取り変える必要があつたので、一般の光計測を行うことが大変だと思っていたところ、封じ切りの CO_2 レーザーが初めて販売されたことは、非常に幸運であった。3 W 以上の出力パワーで、10 万時間の寿命であるとのことでした。（実際には、10 年以上の寿命があつた）この頃、(株)パナソニックの研究者が、煙の中で作業する防災監視カメラに応用して、いろいろ議論をさせていたことも大きな励みになった[8]。

これらの研究成果は、所内でも高く評価してもらい、そして、工業技術院の 50 周年記念行事として、1988 年に工業技術院長表彰を受けた。さらに、外部でも、学術的に良い評価を受けることができたことにより、研究活動に有意義であった。

4. 距離に関する高分解能技術の開発

4. 1 高分解能変調測距技術

当時、高速光通信分野のために、光の高速変調技術を開発しており、当該分野の多くの方と交流ができたことは、著者らの必要な技術の勉強になった。この中で、NTT の幹部も出席して頂いて、多くの議論・情報を提供してくれた。当時、情報分野では、大量の情報を伝送できるコヒーレント通信を見直しつつある時期であつた（現在は光周波数コム等の出現によって高速通信が実現している）ので、当該分野における技術動向を現場を見学しながら、把握できたことは、長さ・距離分野の動向を決める上で、非常に参考になった。具体的には、民間である富士通との交流が大きかった。現場見学などの調査を通して、導波路型超高速変調器に非常に興味を持つことになった。

測量機関係の企業として、(株)トプコン、(株)ニコン、及び(株)ソキア等からも非常に多くの期待を頂いた。何故なら、5 V の定電流で、数十 GHz という高速変調ができることは、当該技術で、光波干渉技術と合体できる可能性があるからである。そして、瀬田氏や藤間氏の精力的研究・開発活動が大きかった。

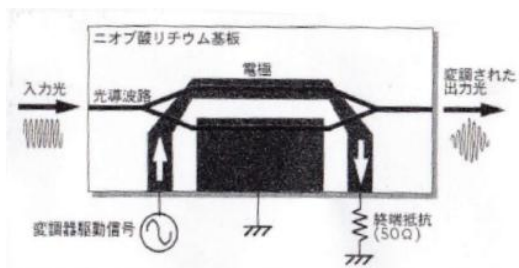


図9 コンパクトな光導波路型高速変調器

そして、富士通が無料で、32 GHz の高速変調器を提供してくれた（図 9）。当時、私はこれで当該分野における課題を解消できるとおおいに期待した。だが、測量分野としては、大きな落とし穴があった。この変調器はマッハツェンダー干渉法を利用した変調器であったが、やはり、変調に加える電気信号が、距離計の光検出器に導入し、大きな周期誤差を発生することである。これには、非常に悩んで、商品化ができなかったが、今だったら多くの課題に対する解消法も詳細まで補償ができると思うが後の祭りである。これを言うのも、導波路型変調器はコンパクトであるので、ビニールの袋に入れて、水の中に入れたが、何の効果もなかった[9, 10]。

現時点で思えば、偏光子などの光デバイスを当該技術に付加したら良かったのではないかと思いつつ、次のプロジェクトの遂行に専念することになった。このような状況で、何をすべきかの決定に関して、もう少し、余裕の時間をもらえ、当該メンバーと深く議論することが必要だったと反省している。この大きな点は、特別な専門的技能であり、当該技術を会得する技術者・研究者がいなかったことである。そして、この変調器が可視光領域でなかったことも大いに関係したと思うが、特に強調すべきことは、細かい技能に関して評価できる機能が存在しなかったことと思う。

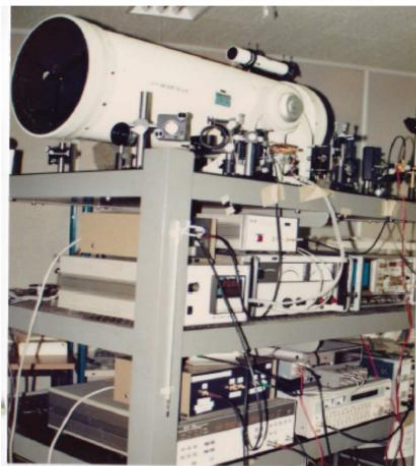


図10 つくば山との距離（約18 km）を測定するシステム

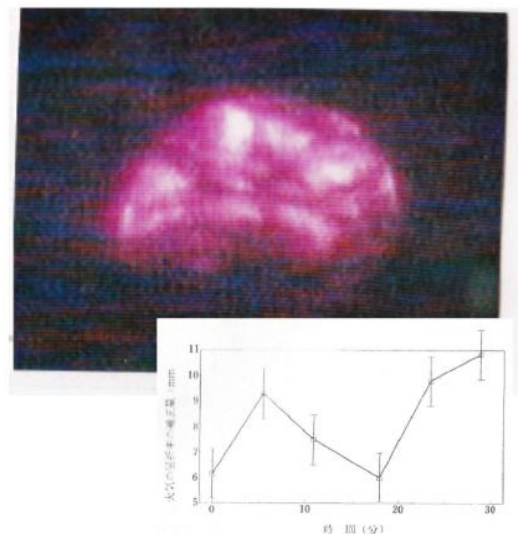


図12 18 kmの距離において大気ゆらぎを受けた可視レーザーの波面パターンと距離の測定値の変化

4. 2 応用研究等

研究成果をどのように情宣するかは、プロジェクトリーダーの役割である。

大寸法の計測関係のユーザーとして、本プロジェクトに関心を示し、若い技術者を送って参加したのは、(株)川重と(株)IHIである。このように、当時の光学計測研究室に多くの会社が興味を示し、多くの技術者を派遣してくれたので、研究室のデスクを配置するために、いろいろな工夫を行った。非常な手狭であったが、研究室の全体が同じ方向をもっているという仲間意識を成就できたのは、楽しい研究生活であった。そして、雑用は事務担当の非常勤職員にお願いして、技術関係の先輩として、現場で直接活動できたので、私にとっては楽しい日々であった。この場合、家庭の妻や子供との生活時間が短くなり、恐縮していたが、娘達は、結婚式に、不満を言うのかと懸念していたが、当時は寂しかったが40代の労働者として頑張っていたと、娘達が成長して見守ってくれ感謝してくれたので、私に涙がでた。何故なら、当時は、研究実験の実施、学术论文の執筆、その解説書執筆の業務が非常に多い上に、学会発表講演や招待講演が多かった外に、企業との打ち合わせなどに関しても、国内外における出張が多かった。

4. 3 天皇陛下・皇后さまの行幸啓

この時期は、昭和天皇が崩御されるなど、多くの出来事が発生した時期であった。これらの出来事の中で、最も大きな出来事は、天皇陛下・皇后さまの行幸啓であった。その時に感じたことは、首相の代理はあるが、天皇の代理は無いことである。従って、安全を確保するための数多い課題などを遂行することが必要であった。このために、

建物などの安全性は、総務省に任せるとして、ご見学の行動の順路や関係者の配置である。工業技術院と計量研究所とのあいだで、多くの調整があったと思うが、結果的には、メートル原器と変調測距に関してかかわってきた私（光学計測研究室長）が選定された（図 10）。と言うのも、サウジアラビアの国王や安部通産相大臣などの VIP に説明させて頂いたからのように思う。また、当時、テレビ局から、取材が多くあり、それらの一部は、準全国放送された。その時に” NG”という言葉も知った。



図12 天皇陛下と皇后陛下がメートル原器をご覧になっている様子



図13 18 kmの距離計測装置もご覧になれるので笑顔で説明している著者

特に、重要なことは、ご見学の内容と説明の仕方である。説明の言葉のすり合わせには、今井研究企画官などの関係者は多くのことを何回も考えられたと感謝する。私としても、いろいろとご視察のストーリーを検討し、安全性はもとより、安心性も検討していた。ご視察に関して、メートル原器の目盛り線などを熱心にご視察されました。そして、多くの関心を示され、長距離測距装置もご覧頂けることで、私も明るく移動していました。（図 12, 13）

私の故郷では大きな話題にあり、母などが非常に満足していたようである。ご視察で、頂いた多くの提供品に関して、母は非常に大事にしていた。私は和歌山県の山奥で生まれたので、このような情報は、父母において想像できなかったようで、非常に喜んでくれたので、日頃の私の少ない帰郷に関しての私の思いは解消されたと思った。

住民レベルでも当該技術に関しても、山奥の故郷方にとっても意味の意義深い課題だったと自己満足をしている。実際に、産総研とつくば市京成ホテル（当時）との間の距離約 18 km において、サブ mm の測定の標準偏差（相対精度で 10^{-7} ）に達するこ

とが自覚できた。これは当時としては画期的で、一般にも理解しやすいデモンストレーションであったと言える。

5. 非線形光学を利用した計測技術

5. 1 非線形光学の応用計測

① はじめに

金属などの加工表面の精度が向上してきたので、加工表面を超精密に測定することが必要になってきた。この方法には、干渉計の光源の波長を短波長化するのは良い方法であるが、一般的な干渉法では、他の研究者との戦いになるので、非線形光学の利用を考えた。それは、当時、急速に進展して来ている非線形結晶の利用である。そして、非線形光学を利用した計測技術に取り掛かっている研究者がいなかったのも、非線形光学に関して勉強している時に、神戸大学から非常勤講師の依頼があり、またしても、猛勉強の日々であった。

当時、スタンフォード大学のバイヤー教授が、新しい技術を基盤とした YAG レーザーの開発を行って、ベンチャー企業を設立して、販売を始めた。このレーザーも本邦初で取得できた。このレーザーは、単一モードで発振できるので、コヒーレンス長は非常に長い光源であった。国の補正予算などで、購入できる機会があったので、早速に購入した。この YAG レーザーの買い物は適切だったと思う。それは、1.06 μm 帯の YAG レーザーだったが、著者に必要な安定性、コヒーレンシー、高品質なビームパターン、そして、比較的大きな出力パワー（約 50 mW）を実現できていた。この結果、著者が思う多くの課題の整理を行うことができた。バイヤー教授とは、昼食会で参加でき、いろいろな情報を提供・収集できた。ここのことに至ったのは、先の新 CO₂ レーザーを紹介して頂いた当時の名称がレオニクス社という商社であった。やはり、商社であっても、異なる分野における技術の紹介は有意義であると思った。

② 第2高調波の発生と新規技術

第二高調波を発生できる非線形光学素子（KTP）の進展が著しく、高効率な結晶が製作されていた。何とか、KTP 非線形結晶を購入し、YAG レーザーに適用した結果、目に見えるパワー（当時の私の目の品質は良かったが）を十分に発生させることができた。これらの結果、新しく思いついたのが、非線形光学干渉計（共通光路の考え）である。この技術は当時画期的と思い、特許申請を行ったが光源としての機能では申請が困難であるが、システムとしては困難であるが、何とか、特許申請に到達した。光源としての単独の機能では申請が困難であり、一般的な光計測としても困難であったが、最終的には、応用分野における機能が優れていることで、特許成立に到達することができた。図 14 は、その原理図であり、基本波と第二高調波とが、コモンパスになっており、空間での光路が完全に同一であることが特徴である。何故なら、光計測において

は、大気ゆらぎや機械的振動などの解消が大きな課題になるからである。この結果、長さ関連量の多くの分野における光計測技術の高精度化が実現できることが分かった。

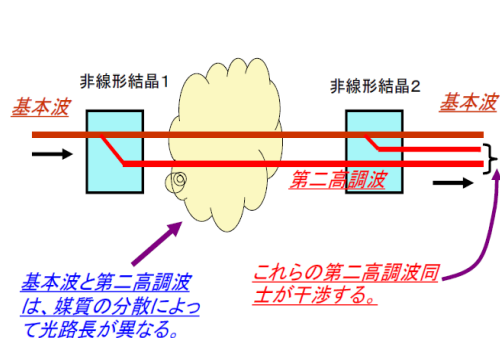


図14 新しく開発した2個の非線形結晶1, 2 (第二高調波) を用いた高機能コモンパス干渉法

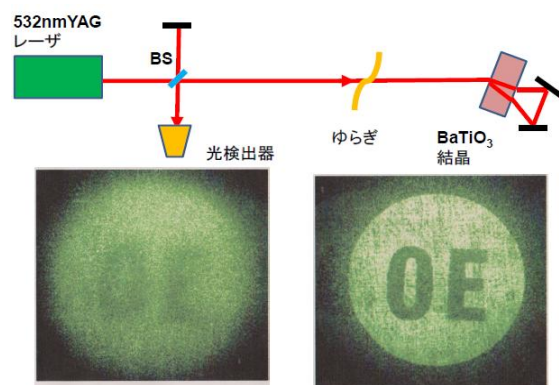


図15 位相共役技術とスリガラスを通した画像とその補償画像

③ 応用技術

新しい技術に関して、計測分野への応用は重要であり、多くの可能性を調査・検討した結果、本プロジェクトの改質表面状態の計測に特に有効であることが分かった。つまり、非線形結晶に YAG レーザーを 2 回通す方法である。1 個の結晶に折り返して通す方法でも良いので、錆びないとか、硬くすることのために、鉄の表面に N イオンを注入する改質表面の製造が大きな課題であったが、このイオン注入の評価が重要課題であったからである。この評価が正確に評価できた。[11]

これらの研究成果によって、1993 年に精密工学会沼田賞受賞を受賞した。

5. 2 空気屈折率の補正

この課題は、光を用いる計測関係においては、切実な問題であった。このための新しい 2 色干渉計の技術は画期的だったと自己評価を行っている。特に、いわゆるコモンパスの干渉計は、外乱の影響を抑える上で、空気中でもナノ計測が可能と思った。そして、空気の屈折率の自動補正にもチャレンジしたところ、今までに無い安定した干渉縞を形成できた。この理由は、コモンパスの原理が正確に実施できていたことによると考えられる。

実際に、この実証実験を行ったところ、空気の屈折率を 10^{-7} の精度で補正できることが分かった。[12]だが、多くのユーザーに利用して頂くには、利用していた YAG レーザーの定価が高すぎたことである。当時、思ったことは、製品化のためには、技術だけでなく、市場性の十分な把握が重要であることわかった、このように、技術的に良い結果がえられた。このことから、EU の徠ライカから、私たちのパテントを購入に見えたが、本件は JST のプロジェクトとして、中小企業の育成に登録されていたので、

販売することができなかったことが、非常に残念であった。やはり、実用化も、研究開発者が自ら実行することが必要であると思った。

しかし、本方法は、微分干渉となるので、レーザー光を分子・原子の吸収線などに安定化するための技術としても有効である。例えば、よう素分子の吸収スペクトルを利用した技術にもその応用が可能である。さらに、ピコメートルの計測にも有効であることが分かり、ナノメートル領域だけでなく、ピコメートル領域にも有効であった。

5. 3 位相共役による大気のゆらぎの解消

①光屈折率結晶の製作

当時、高品質な結晶が無かったので、結晶の製作に関していろいろな企業に問い合わせたが良い返事が無かった。その中で、藤倉電線が興味を示し、チタン酸バリウム結晶の共同研究を行うことになった。その製法や不純物の添加などに関して殆ど不明であったので、まず会社が均質性の良い結晶を引き上げ、その後、不純物を添加する方式をとった。そして、計量研で位相共役波の発生の実験を行い、その結果を基に結晶への添加量を変えた。この位相共役波の発生法として、長さ・距離の計測への応用が容易な自己変調型法を採用した。[13] (図 15) 特に、本多氏は、位相共役波の発生メカニズムに関して多くの学術論文を執筆し、世界のトップレベルに達し、日本光学会賞を受賞した。そして、東京大学生産技術研究所で工学博士の学位を取得できた。

この発生には、YAG レーザーの第二高調波が有効であることから、鈴木自動車は、位相共役波の発生と同時にレーザーの製作（共同研究の実行）に関して、2名の技術者を派遣してくれたので、特許請願を行うことができた。

②応用

具体的な応用は、先の国際プロジェクトであり、トプコンやニコンなども応援してくれた。また、国立天文台野辺山支所 石黒教授のグループも大きな関心を示して下さった。大気のゆらぎの解消にどれくらい有効であるかの室内実験（光学トンネル内）を行ったが、思っていた通りの実験結果が得られた。これには、感動したので、野外での実験はどうかと思い、光学トンネルの上で、実証実験を行うことになったが、唯一の懸念は、大気ゆらぎにより、YAG レーザーの第二高調波がどれくらい揺らぐかであった。つまり、当時の計測用 YAG レーザーの出力パワーはそれほど大きくなかった。つまり、レーザーのビーム径をあまり大きくできないので、非線形結晶から、レーザービームが外れないかということである。正確にアラインメントを行えば、位相共役波が発生できる見通しが得られるようになり、夕食やもろもろの実行の後、再度、位相共役波の確認を行った後、測距の実験を行おうとした頃から、大気的气温が急速に低下した。この実験の敗因は、新規の実験は直ぐに行うことであったと思う。そして、

標準として、後で、繰り返し実験を行うのが良いと思った。

この実験で、予期していた現象が発生した。チタンサンバリウム結晶は、気温が14°C以下では、相転移が生じるので、結晶は多くの筋状の歪が発生するので、位相共役波の発生が不可能であることである。

③ 失敗の考察

本実験の失敗は、トプコンや天文台などにおける野外の使用である。何故、その時に、20 °C付近での応用のことを考えなかったと反省している。まず、第一の原因は、光源の問題でもある。当時、YAG レーザーを使用することは、価格とサイズなどの面で、困難に感じたが、2010 年代になった現在では、これらの課題は解決できている。

5. 4 超短パルス応用計測

①フェムト秒パルスレーザー

フェムト秒パルスレーザーは、非常に短いパルス光であり、また、ブロード光であるので、新しい光計測技術の光源として魅力を感じた。レーザー発振が色素液媒質を用いている間は、光計測技術の光源として利用するには、大きなハードルがあったが、レーザー媒質が固体のタイサファイヤーになると、大きな期待が湧いてきた。それでも、大出力パワーのアルゴンイオンレーザーを利用する頃は、企業が関心を示してくれる光計測システムの開発の発展に自信が無かった。それでも、瞬時の計測を精密に行える可能性は魅力的であった。これは、博士課程の指導教授が、高速度カメラによる計測において、MIT のエジャートン教授とで、大きな成果をえていたことも一因であったと思う。特に、東京大学から美濃島氏が、研究室に配属されたことが大きな要因であった。

このような中で、当該分野では物理学の研究として時間的分光にカーシャッターの原理を利用していた。偶然、仏国ボルドー大学を訪問した時に、興味ある実験を行っていた。この技術は、光応用計測に応用できると思った。実は、当時、仏国では土曜日には見学・議論をさせてくれる教授がいなかったと思っていたが、ルリエール教授が快く私の訪問を承諾して下さった。[14]

②応用計測への展開

本技術は民間の方の期待する課題であり、多くの分野の方が訪問してくれた。そして、多くの議論をさせて頂いたが、良い技術であるが、光計測システムを構築した場合に、高コストであるとの判断であった。その後は、高コストでも意味のあるある分野を調査することにした。その一つは、光周波数コムであったと思う。2005 年にノーベル賞を受賞されたジョンホール先生が、計量研を訪問されていて、ご見学の案内をする立場にあったが、いつも質問されていた内容は、私に、何故、標準研究所として

フェムト秒パルスレーザー応用計測の研究を行っているのですかと言う内容であったが、1997年に来られた時に、フェムト秒パルスレーザーと半導体レーザーとの光ビート信号の実験をお見せしたところ、非常に、驚かれたのを思い出す。その時に、予算がもう少しあったら、当該分野での国際的な研究成果を得ることができると思ったからである。それでも、工業技術院の特別研究と採用して頂いた方々には敬意を払います。当時の考えでは、図16に示すように、多くのフェムト秒レーザーの連結で実現することを想定していた（1996年）。そして、当時、私がもう少し良く考えればと思う気持ちはその後の私の研究に対する考え方が変わった。今後も、あらゆる分野で興味がある瞬時計測は課題であるので、既存会社を通して社会に還元できるように、研究を進めている。と言うのは、計測分野は、新技術だけでなく、製造コストも大きな課題になっているからである。[15]

今でも思い出す。2005年10月6日に、管理職の業務を早場と終え、秘書の連絡によって実験室での研究を打ち切り私の居室に戻ったところ、5新聞の記者がおられたので、私は非常に途惑ったのを覚えています。

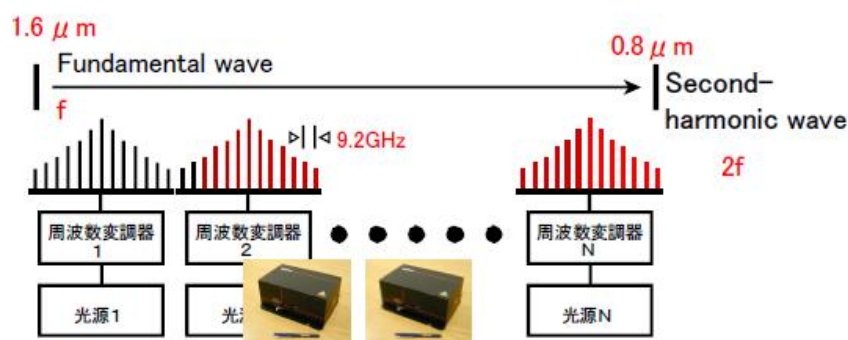


図16 1996年に提案した光周波数の絶対測定図

③ 光周波数コムへの応用発展

レーザー技術の急速な進展とともに、本関連技術の研究に遂行できたことで多くの知見を得ることができたので有意義であった。その技術が、光周波数コム関係の技術の開発であり、メートル条約における単位の定義の改定にまでも発展である。私は、当該分野のリーダーとして、旧来の研究開発の開発を無視して、競争的資金の獲得に奔放するとともに、人材の配置にも苦慮しながら、目標を達成すべく努力した。当然、他の業務の障害となり、いろいろな批判を受けるが、幸い、当該分野の職員は自覚意識を持って、頑張り、多くの成果が後に出てきた。これは、私は直接的な研究技術の

因果関係が無いことも良かったと思っている。

本技術は幾分技能私の同僚の深い技術的であり、いろいろなノウハウが詰まっているので、世界的に大きな競争となっている。そして、メートル条約の中で重要な分野となっているが、ここでは、深い技術の紹介はやめて、後輩の若い研究者の執筆にゆだねるとして、私のリーダーとしての役割の印象的な概要のみを記述する。

私は、当時、東京理科大学の連携大学院の教授に併任していて、学生が卒業論文と修士論文の研究のために、産総研で研究を行うことになった。この学生が優秀であったことと、私の同僚も優秀であったので、今まで、タイサファイヤーレーザーによる光コム技術を全光ファイバー化の技術にすることによって、レーザーシステムの安定化が実現できたので、世界で初めて、光周波数コムによる光周波数計測に関して、今までの技術の半日程度の技術を、1週間に延長することができ、本分野でのトップに立つことができた。[16, 17]

これらにもまして、本技術関連成果が、2005年のノーベル物理学賞に結び付いたことは、研究管理者であった、私の今後の活動の支えになった。特に、光周波数コムを、光計測技術の分野において、低（時間）コヒーレンス干渉法に関して、平井氏との研究で深い新知見と新実験結果を得ることができた。

② 遠隔計測

問題意識は、計量分野において情報産業との連携によって、どんな新機能が生まれ、産業界・社会に役立てることができるかの技術の開発だった。具体的な課題は、校正業務の低コスト化、高精度化、及び高速化であった。そして、このようなプロジェクトを通して、計量機器の校正方法などを考えると共に、当該分野の活性化であると思った。

私は、直ぐに、情報通信用の光ファイバーの利用であり、開発危機の多い課題を選んだ。これは、光周波数コムの利用もあったので、1.5 μm 帯の波長を選んだが、現在も懸念していることは、1.3 μm 帯の波長を選ばなかったことである。なぜなら、光源の第2高調波が、当時、一番よく使われていたHe-Neレーザーの波長に近くなるからである。このことを超えて、波長1.5 μm 帯の技術開発に突入し、現在のIOT事業ともおおいに関連すると思う、このような状況から、外部における判断が困難であると思うので、ここでは、執筆を省略する。[18, 19] (図 17, 18)

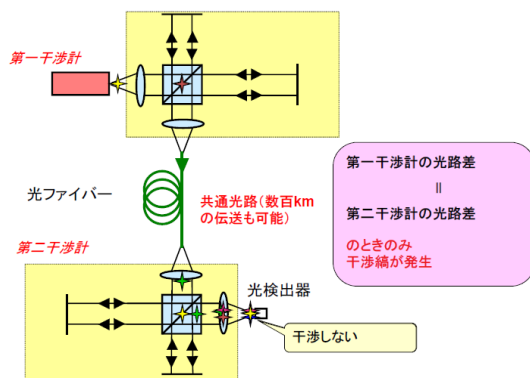


図17 2個の干渉計を光ファイバーで連結したタンデム干渉計

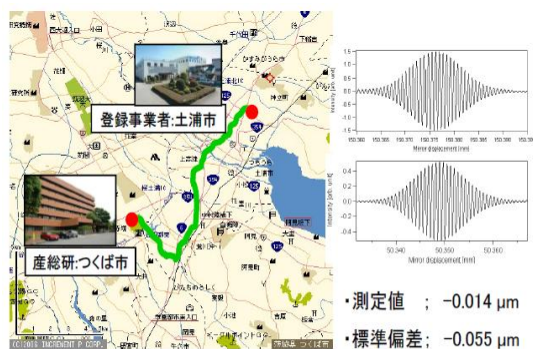


図18 22 kmの商用光ファイバーを用いた実証実験の結果 (14 nmの精度)

6. 議論と期待 (産総研から異動後)

以上、記述した外に、現在も研究開発が続いている。松本は、東京大学に異動し、光周波数コム of 的往計測関係では、音響光学変調器を持ちて光パルスのヘテロダイン開発することによって、大型科学・産業に貢献するために、高エネルギー加速器気候 (KEK) の屋内において、400m の距離測定実験を行い、数 μm の再現性を得た (図 19)。また、企業が関心を示している非接触形状計測技術を確認し、金型などへの応用計測技術に貢献している外に、光周波数コム技術の低コスト化に挑戦している。美濃島氏は、電気通信大学に異動し、光周波数コム関係の技術の新展開にチャレンジしている。本多氏は企業に異動し、医療関係の技術関係の技術開発・製品化に貢献している。

これらの研究成果を総合して、精密工学会賞を受賞した (2016 年)

最後に、これらの研究開発活動を実行できたのは、研究所の多くの仲間達の支援があったからだと思い、感謝を申し上げます。また、光計測分野で活動したかったのは、私の実家が田舎であったので幼少期における光に対するあこがれでした。(図 20)

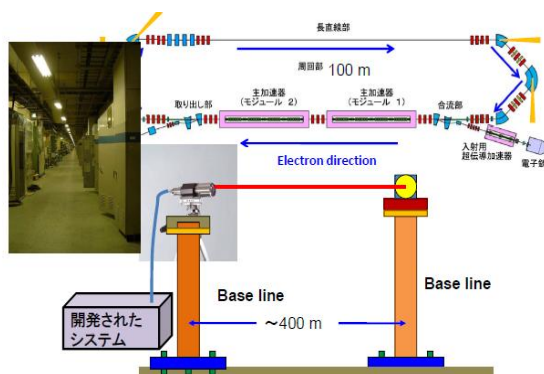


図19 光周波数コム干渉計による約403.1 mでの絶対測定の実証実験の概要 (測定値は数 μm より良い)



図20 筆者が幼少期に光に興味を抱いた要因

参考文献；

- [1] 計量標準 100 周年記念写真集（1903 年-2003 年）平成 15 年 5 月 20 日発行.
- [2] H.Matsumoto, K.Tsukahara;"Effects of the atmospheric phase fluctuation on long-distance measurement", Applied Optics, Vol.24, No.19(1984)3388-3394.
- [3] 松本弘一；"測距用干渉計の最適ビーム径"，光学，Vol.14, No.4 (1985) 276-280.
- [4] H.Matsumoto;"Measurement of the Group Refractive Index of Air by Two-Wavelength Interferometry", Optics Communications, Vol.44, No.1 (1982)5-7.
- [5] 松本弘一；"赤外合成波長による長尺ゲージの測定"，精密機械, Vol.49, No.12(1983) 1658-1662.
- [6] H.Matsumoto;"Synthetic interferometric distance-measuring system using a CO₂ laser", Applied Optics, Vol.25, No.4, (1986)493-498.
- [7] H.Matsumoto, T.Kurosawa, S.Iwasaki;"Verification of the Accuracy of a CO₂ Laser Interferometer for Distance Measurement", Metrologia, Vol.25, (1988)95-97.
- [8] 松本弘一；"大型構造物製作における計測技術の実際と課題"，溶接学会誌，第 64 巻，第 3 号 (1995) 161-165.
- [9] 松本弘一，藤間一郎，瀬田勝男，大石忠尚；"レーザーで長距離を測る"，計測と制御，Vol.31, No.10(1992)1092-1098.
- [10] I.Fujima, K.Seta, H.Matsumoto, H.Yoshida;"High-resolution distance meter using optical modulators at 3.5 GHz", Opt. Eng., Vol.36, No.12(1997)3349-3352.
- [11] H.Matsumoto, L.Zeng;"Two-color interferometer for surface characterization using two frequency doublers and a four-phase-step method", Applied Optics, Vol.35, No.13(1996)2179-2181.
- [12] H.Matsumoto, T.Honda;"High-accuracy length-measuring interferometer using the two-colour method of compensating for the refractive index of air", Meas. Sci. Technol., Vol.3(1992)1084-1086.
- [13] 松本弘一；"位相共役・アダプティブ光学が開く高品質光ビームの世界"，精密工学会誌，Vol.60, No.8(1994)1061-1064.
- [14] K.Minoshima, H.Matsumoto, Z. Zhang and T.Yagi; "Simultaneous 3-D imaging using chirped ultrashort optical pulses", Jpn. J. Applied Physics, Vol.33, (1994)L1348-L1351.
- [15] K.Minoshima, H.Matsumoto;"In-situ measurements of shapes and thicknesses of optical parts by femtosecond two-colour interferometer", Optics Communications, No.138(1997)6-10.
- [16] H.Inaba, Y.Daimon, F.-L.Hong, A.Onae, K.Minoshima, T.R.Schibli, H.Matsumoto, M.Hirano, T.Okuno, M.Onishi, and M.Nakazawa;"Long-term measurement of optical

frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb”, Opt. Express, Vol. 44, No. 12, (2006) 5223-5231.

[17] 松本弘一；”光応用精密計測と長さ標準の進展”，応用物理，Vol. 69, No. 6 (2000) 631-640.

[18] H. Matsumoto, A. Hirai; ”Transmission of optical length information through single-mode fiber by a low-coherence tandem interferometer”, Opt. Eng., Vol. 40, No. 11 (2001) 2365-2366.

[19] H. Matsumoto, K. Sasaki; ”Remote Measurements of Practical Length Standards Using Optical Fiber Networks and Low-Coherence Interferometers”, Jpn. J. Applied Physics, Vol. 47, No. 11 (2008) 8590-8594.

著者履歴

1976 年 3 月 東京大学 精密機械工学博士課程修了（工学博士）

1976 年 4 月 工業技術院 計量研究所入所

1983 年 3 月 米国標準技術研究所 客員研究員（1 年間）

1988 年 2 月 工業技術院計量研究所 量子部光学計測研究室室長

1988 年 11 月 工業技術院長表彰

1991 年 4 月 神戸大学非常勤講師（～1995 年 3 月）

1995 年 10 月 工業技術院計量研究所 研究企画官

1997 年 8 月 工業技術院計量研究所 量子部部长

1999 年 4 月 東京理科大学連携大学院教授（～2005 年 3 月）

2001 年 4 月（独）産業技術総合研究所 計測標準研究部門副研究部門長

2008 年 4 月 東京大学大学院 工学研究科精密工学専攻 特任教授

2008 年 4 月 文部科学大臣表彰

2011 年 4 月 東京電機大学非常勤講師（～現在）

2012 年 4 月（独）産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

2013 年 4 月 東京大学大学院 工学研究科精密工学専攻 特任研究員（～現在）

2013 年 6 月（株）東京精密 社外取締役（～現在）

2016 年 9 月 精密工学会 学会賞・フェロー

受理日：2017年5月29日
