

光ファイバにおける標準とその計測技術に関する調査研究

雨宮 邦招*

(平成17年12月7日受理)

A Survey on Standards about Optical Fiber and Their Measurement Technique

Kuniaki AMEMIYA

1. 緒言

光導波路としての光ファイバが1960年代に開発を見てから半世紀近くが経つ¹⁾。19世紀終わり頃、ヘルツによる電磁波の発見を機にマルコーニが無線通信を実証し、電磁波による情報伝達が急速に発達した。20世紀中ごろには電磁波の開発が次第に短波長へとシフトしていくにつれ、光の持つ膨大な帯域幅は将来の情報通信時代の到来を夢見る研究者にとって非常に魅力的なものとなりつつあった。しかしながら当時の光導波方式は損失が大きくならざるを得ず、光ファイバの登場後も光通信の世界到来までは大きな壁が立ちはだかっていた。

ところが1970年、コーニング社により20 dB/kmという、当時としては極めて低損失な石英ガラス光ファイバが開発されてからは状況が一変、光ファイバが通信用伝送路として唯一無二の候補となることは疑いのないものとなり、世界中の光ファイバメーカによる壮絶な開発競争が展開されることとなる。今日では一般的な光ファイバの伝送損失は0.2 dB/km(波長1.55 μm)～0.35 dB/km(1.3 μm)に至っている²⁾。光ファイバを通信に用いることの利点は、軽量で曲げやすいこと、電磁誘導の影響を受けないこと、漏話が少なく秘話性が高いこと、ガラス材料の資源が豊富であることなどが挙げられ、今や全世界に展開する光ファイバネットワークは総延長700万km(2003年)、通信容量はユーザ利用速度で最大100 MBpsにも及ぶ大情報通信時代が到来した。

一般家庭レベルでも2005年9月現在、国内におけるFTTH(Fiber to the home)回線の純増契約数はADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line:非対称デジタル加入者線)のそれを既に越えており、契約数も300万件を上回っている³⁾。将来的には3000万回線(2010年目標・

NTT)にも及ぶものと予想されている。その大容量を生かした映像配信などの各種サービスが展開されており、インターネットトラフィックの増加はムーアの法則(CPU性能の向上度合い:1年半で2倍)のスピードを上回る勢いである。

このような大容量情報通信時代にあっては、あらゆる情報のやり取りが情報通信ネットワークにゆだねられることとなり、必然的に通信性能には高度な信頼性が求められる。また、長距離光通信には当然のことながら大出力の光源や中継増幅装置が用いられることとなり、その末端が一般家庭のごく日常に触れる場所に届くことを考えると、安全・安心のための対策も極めて重要なファクターとなってくる。

こうした通信性能試験や安全性確認のための計測技術は決して欠くことのできないものであり、その計測技術や計測装置に関しても高い精度と信頼性が要求されることはいままでもない。

中でも最も基本的かつ重要な計測器は光ファイバパワーメータであり、既に各国において光ファイバパワー標準のトレーサビリティ体系の構築が進んでいる。このほか光ファイバ網のコンポーネントは光源、コネクタなど多岐に渡るため各々における標準もまた重要であり、またWDM(Wavelength Division Multiplexing:波長分割多重伝送方式)など新たな大容量通信方式の開発に伴い、通信帯域における波長標準といった新たな標準の需要も急速に高まってきている。

本稿ではこれら光ファイバにおける各種標準について、特に光ファイバパワー標準に関して重点を置き、現状の計測技術や産業界のニーズを国内外の最新動向も含めて調査した結果を報告する。

* 計測標準研究部門 光放射計測科

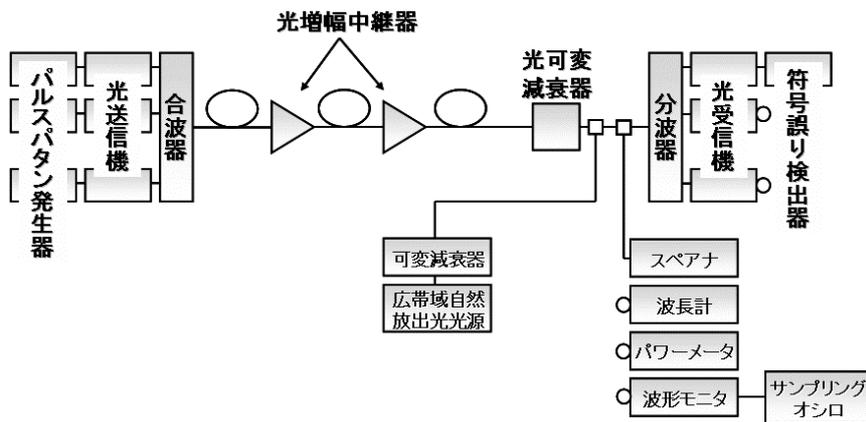


図1 光ファイバ通信システムと測定系の一例⁴⁾

2. 光ファイバ通信網の概要

2.1 光ファイバ通信網の標準化機関⁴⁾

光ファイバ通信に関する標準化については、国際的機関としてIEC（International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議）の技術委員会であるTC86、およびITU-T（International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector: 国際電気通信連合・電気通信標準化部門）がある。特に活発なのはIEC/TC86で、光通信技術に関わるデバイス・モジュールを網羅している。IEC/TC86はIECの全TCの中でも最大規模を誇っており、このことから光情報通信がいかに重要視されているかが垣間見える。IEC/TC86の発行済規格の中には、光ファイバパワーメータの校正、波長分散テストセットの校正、OTDR（Optical Time Domain Reflectometer: 光パルス試験機）の校正などがある。中でも後述するように最も重要な光ファイバパワーメータの校正についてはTC86/IEC61315として文書化されている。

これに対応するわが国のオプトエレクトロニクスの標準化はJISとしてまとめられている。JIS規格は（財）光産業技術協会（OITDA）の標準化委員会で原案の作成がなされている。

2.2 光ファイバ通信網のコンポーネント

光ファイバ通信網は、光信号を伝達する光ファイバはもとより、光ファイバ同士や光ファイバと各機器を接続するコネクタ、信号源である光源、信号の受信器にあたる光検出器、そして中継基地局では微弱になってしまった光信号を再生する光増幅器など各種コンポーネントから成っている。これらのコンポーネントは前節で述べた規格にのっとり、敷設時や故障時には試験を行なう必要がある。光ファイバ系通信システムの測定系の例を図1

に示す。もっとも基本的な測定項目は光レベルの確認であり、光パワーメータが用いられる。光パワーメータは光受信レベルを変えて符号誤り率を評価する際のモニタにも用いられる。したがって光ファイバ通信網測定の主役は光パワーメータであると言える。

2.3 光通信用パワーメータ

前節で述べたように、光通信用パワーメータの役割は極めて大きい。光ファイバ通信向けのパワーメータに要求される性能は、①高精度であること、②広ダイナミックレンジであること、③高速測定が可能であること、④入射光の偏光に対する依存性が小さいこと、⑤光センサからの反射が少ないことなどが挙げられる。現在市販されているパワーメータとしては、光源モジュールとセットになったテストセットやハンディタイプのものである。通常、センサ部はフォトダイオードであり、その応答は図2に示すように波長依存性を有している。したがって高精度な測定を行なうためには校正波長において感度（絶対値）の校正を行なう必要がある。他の波長につい

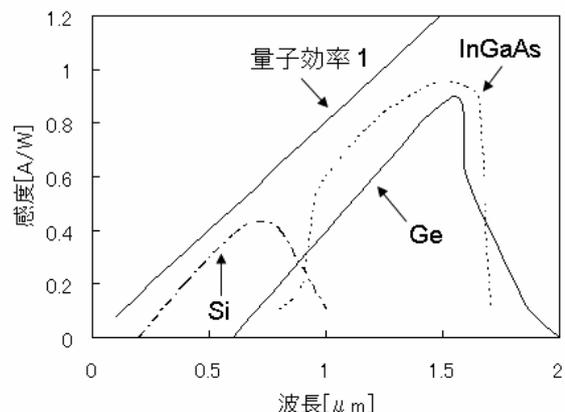


図2 フォトダイオードの波長感度特性

ではセンサごとに波長感度特性を別途評価しておき、測定においては波長ごとに補正を施す。ダイナミックレンジについては、-90 dBm (1 pW)の低パワーに対する感度が求められる。一方、光ファイバアンプを用いた高パワーの計測においては+30 dBm (1 W) に対して高精度な測定ができることが望ましい。市販されているパワーメータの精度は製品にもよるが数パーセント程度である。

以上より、光ファイバ通信網における測定で重要な光パワーメータについて、1 pW ~ 1 Wのパワー範囲で、サブ%レベルの不確かさで校正可能な標準が必要であることがわかる。

3. 光ファイバパワー標準の概要

3.1 わが国の光ファイバパワー標準供給体制

図3にわが国の光ファイバパワー標準供給体制を示す。現在、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) ではレーザーパワー標準がjcss供給されており、光減衰量は依頼試験として供給を行なっている。光減衰量標準は2005年秋にjcss化がなされる予定である。一方、光ファイバパワー標準は2006年度から依頼試験として供給を開始する予定である。

ユーザ向け光ファイバパワーの校正は、レーザーパワー標準の認定事業者がJCSS校正として請け負っている。NMIJのレーザーパワー特定標準器を用いて認定事業者のレーザーパワー二次標準器が校正され、この二次標準器を用いて光ファイバパワー標準器の校正がなされている。

表1 JQAが供給する光ファイバパワーの校正範囲

波長	パワー範囲	不確かさ (k=2)
850, 1310, 1550 nm	10 - 50 μW	1.0 %
	50 - 100 μW	0.5 %
	100 - 500 μW	0.35 %

すなわち、現在わが国の光ファイバパワー標準はレーザーパワー標準の供給範囲の拡大として校正がなされていることになる。しかしながら近年の光ファイバパワー標準の需要の大きさから、光ファイバパワー専用の特定標準器の開発・整備が急務とされている。

光ファイバパワー校正の認定事業者のうち、日本品質保証機構 (JQA) が供給している光ファイバパワー標準の概要は表1の通りである。

JQAによる2004年度の光ファイバパワーの校正件数は56件で、うち半導体フォトダイオード型のパワーメータが7割近くを占め、このほか熱型の標準パワーメータも校正の依頼があった。

3.2 レーザーパワーカロリメータ

光パワーの絶対計測は熱型検出器を用いる方式が主流である。熱型検出器は光パワーを受光部吸収体に吸収させて熱に変換し、受光部の温度変化を測定するものである。受光部は多くの場合、吸収体で覆われた金属板で、入射光パワーを漏れなく吸収できるよう低反射率であること、吸収率の波長依存性が小さいこと、熱容量が小さく熱伝導性が良いことなどが必要とされる。可視・近赤

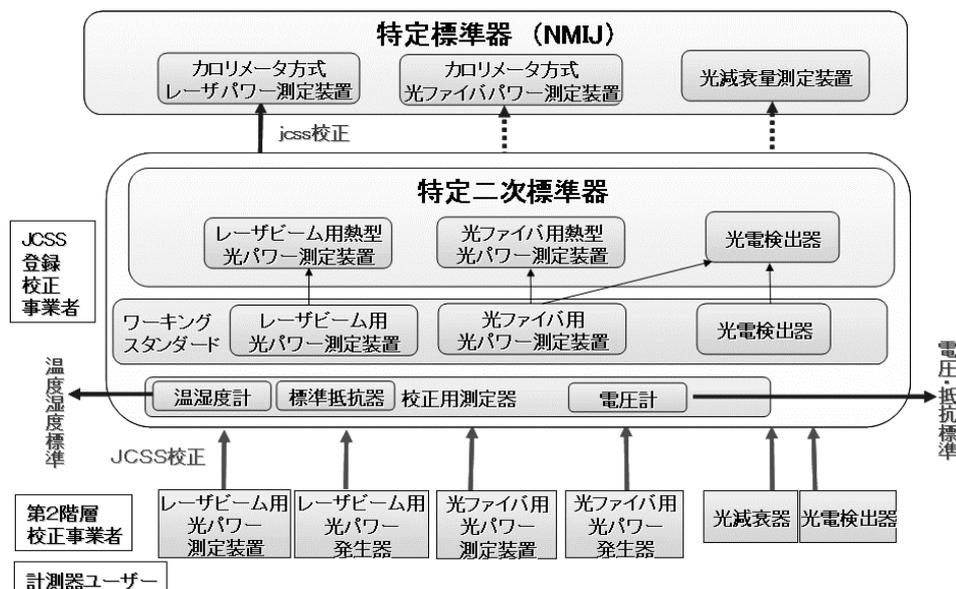


図3 わが国の光ファイバパワーとレーザービリティ体系

外領域では金黒(全反射率:0.1~1%), 黒色ペイント(0.5~3%), Ni-P合金⁵⁾(<0.2%)などが吸収体として用いられている。吸収体の温度上昇を測定する温度計の部分には十分な温度感度, 直線性, 再現性が求められ, 熱電対やサーモパイルが用いられている。吸収体裏には電気的なヒータが設けられていて, 光パワーによる温度上昇と等価となるようにヒータに直流電力を印加し, 入射した光パワーを算出するという方式を取る。ここで光パワーとヒータパワーの等価性が特に重要となる。

中でも熱型検出器の一つであるカロリメータは, 誤差評価が容易であり, 測定値が電氣的パラメータの一次標準に直接結び付けられるなどの利点が挙げられる。一方で一般的に熱抵抗値が小さく, 熱容量が大きいなどの欠点があり, 低パワーでの計測が困難となる問題があった。これを克服すべく, 旧電子技術総合研究所において1987年に等温制御方式の高感度カロリメータが開発され⁶⁾, 我が国のレーザーパワー特定標準器として利用が開始された。

図4に等温制御カロリメータ方式高感度レーザーパワー測定装置(H-3)のブロック図を示す。H-3カロリメータは筒型の吸収体, 温度センサ, 冷却ユニットからなる。二つの温度センサと冷却ユニットは吸収体と温度基準ジャケットの間に設置され, 吸収体には温度制御用のヒータが備えられている。吸収体の温度を常に一定に保つよう(等温制御), 温度センサで検出された温度差をヒータにフィードバックする機構になっている。入射レーザーパワーの算出方法は以下の通りである。

入射光の総パワーを P_i , 吸収体ディスク部で吸収されるパワーを P_{id} , 吸収体の円筒部分で吸収されるパワーを P_{ls} , 反射ロスによって散逸するパワーを P_r とすると, 次式が成り立つ。

$$P_i = P_{id} + P_{ls} + P_r \tag{1}$$

レーザービームが未入射のとき, ヒータパワーと冷却パワーとの間には等温制御の条件から

$$k_h P_{h1} - P_c = 0 \tag{2}$$

の関係がある。ここで P_{h1} はヒータパワー, P_c は冷却パワー, k_h はヒータパワーのうち, 冷却素子に伝達する割合で, ヒータと周囲との熱抵抗で決まる定数である。ビーム入射中のヒートバランスは等温制御条件より,

$$k_h P_{h2} + k_d P_{id} + k_s P_{ls} - P_c = 0 \tag{3}$$

である(各項の k は熱抵抗に起因する係数)。

ここでビーム入射時と未入射時のヒータパワー差を

$$P_{h1} = P_{h2} - P_{h2} \tag{4}$$

と置くと, 入射ビームパワーは

$$P_i = P_{m1} + \left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) P_{ls} + P_r \tag{5}$$

と変形できる。ただし,

$$P_{m1} = \frac{k_h}{k_d} P_{h1} \tag{6}$$

である。 P_{m1} は吸収された入射レーザーパワーのうち, ヒータパワーの変化量として検出される量にあたる。ディスク吸収体の吸収率が高いので, (5)式右辺第2項以降は誤差要因として評価・取扱う。

各部位の詳細について以下に述べる。

吸収体は高い光吸収率を有し, また温度基準ジャケットとの熱伝導率を可能な限り小さくして μW レベルでも計測可能な温度上昇を示す必要がある。そこでH-3カロリメータでは高い熱伝導率を有するアルミ製の平板と円筒を組み合わせた吸収体を採用した。表面吸収率を高めるため, 3M Nextelコーティングが施されている。コーティングの反射率は2~5%であるが, 反射ロスを0.1%以下に抑えるためにディスク前方に円筒を設けてある。ピンホール検出器を用いた評価ではいずれの波長域でも0.08%以内の反射ロスであった。また, この構造により吸収体のサイズを小さくでき, 直流置換に有利となっている。

温度センサは熱伝導率が小さく, 低ノイズで応答が速いことが重要である。H-3カロリメータではノイズ特性が極めて良好なBi-Teが用いられている。

また高いパワー分解能を達成するには温度基準ジャケットの温度安定性も重要で, H-3カロリメータでは3重のジ

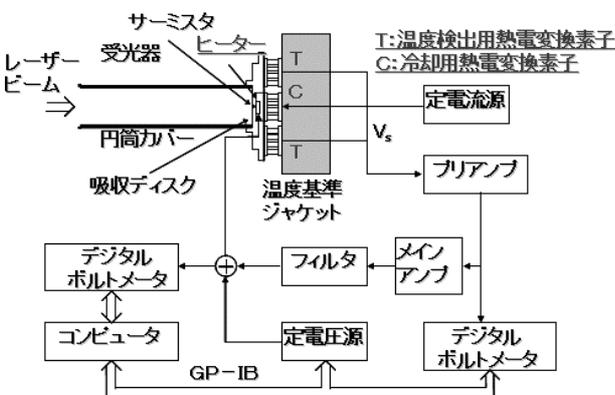


図4 等温制御カロリメータ方式高感度レーザーパワー測定装置のブロック図

ジャケット構造とすることにより外気温1℃の変化に対して 10^{-6} ℃の温度安定性を達成している。これによりnWオーダーのパワー分解能を得ている。H-3の基本特性評価においては、13 nWのレーザパワーに相当する温度 5.6×10^{-7} ℃まで計測可能であることが認められ、また等温制御時には5秒の時定数で動作することが確認されている。吸収体の一様性についてはビーム入射位置を中心から0.2 mmまでずらしても0.05%の差異に収まっている。

特定標準器における不確かさ評価について以下に記述する。H-3カロリメータには入射レーザパワーとヒータパワーの等価性を調べる目的で、ディスク前方中央にサーミスタが設置されている。(6)式は

$$P_{ml} = K \frac{k_t}{k_d} P_{hl} \quad (7)$$

$$K = \frac{k_h}{k_t} \quad (8)$$

と書き換えられる。ここでKはサーミスタパワーとヒータパワーにかかる係数の比である。(8)式より、

$$\frac{dP_{ml}}{P_{ml}} = K \left\{ \frac{k_d P_{hl}}{k_t P_{ml}} \cdot \frac{d\left(\frac{k_t}{k_d}\right)}{\frac{k_t}{k_d}} + \frac{k_t P_{hl}}{k_d P_{ml}} \cdot \frac{dP_{hl}}{P_{hl}} \right\} \quad (9)$$

となる。(9)式中の右辺第一項は熱平衡に起因する誤差、第二項は制御系および機器に関する誤差である。

$$K \cdot \frac{k_d}{k_t} \cdot \frac{P_{hl}}{P_{ml}} \approx 1 \quad (10), \quad K \cdot \frac{k_t}{k_d} \cdot \frac{P_{hl}}{P_{ml}} \approx 1 \quad (11)$$

であることから、

$$\frac{dP_{ml}}{P_{ml}} \approx \frac{d\left(\frac{k_t}{k_d}\right)}{\frac{k_t}{k_d}} + \frac{dP_{hl}}{P_{hl}} \quad (12)$$

となる。

円筒カバーにおける平衡に関する誤差は $1 - k_s/k_d$ として見積もられる。 P_{ls}/P_l および P_r/P_l は式(5)から導かれる。

ディスク上及びシリンダー上での平衡に関する誤差はディスク上のサーミスタおよび円筒上のワイヤヒータを用いて実験的に取得できる。

k_t/k_d は黒色コーティングの熱抵抗値およびコーティング表面とジャケット間の熱リンクの測定値から見積もられ、

$$\frac{d\left(\frac{k_t}{k_d}\right)}{\frac{k_t}{k_d}} \approx -0.07\% \quad (14)$$

となる。円筒カバーについては

$$\left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) \cdot \frac{P_{ls}}{P_l} \approx -0.11\% \quad (15)$$

であり、反射ロスについては

$$\frac{dP_r}{P_l} \approx -0.08\% \quad (16)$$

と見積もられる。 dP_{hl}/P_{hl} については、ヒータパワーの制御偏差による不確かさが0.002%、デジタルボルトメータの精度による不確かさが0.03%である。

測定結果のばらつきは0.011% (n=5)で、以上をまとめるとH-3特定標準器によるレーザパワー測定の不確かさは632 nm, 10 mWで0.11% (k=2)である。

3.3 改良型カロリメータ

H-3特定標準器は常温環境下でも動作可能な光パワー計測用カロリメータだが、光通信・光情報処理分野で需要がある10μW以下の低パワーの計測においては、計測室の室温変動や、大気圧変動による断熱膨張/圧縮効果の影響を大きく受ける。通常の測定室の大気圧変動は1~2 Paであるが、これは10 μWレベルでのパワー測定のバラつきに換算すると0.5~2%に相当する。そこでこれらの温度変動の補償用吸収体を装備した改良型のカロリメータが開発された⁷⁾。吸収体がツイン型となっているほかはH-3カロリメータとほぼ同じ構造となっており、補償用吸収体は大気圧変動等による室温変動をキャンセルするためのものである。熱等価ノイズが3.9 nW、応答時定数が5秒という特性を持っている。従来型カロリメータの場合、1~2 Paの大気圧変動に同期して770 nW相当の変動が検出されたが、ツイン型の場合は19 nWに抑えられている。またツイン型の場合、温度ドリフトにも強いという利点を有している。不確かさについては従来型カロリメータとまったく同じで追加事項はなく、測定バラつきを10 mW - 1 μWで0.01-0.6%に低減、10 μWにおける合成標準不確かさは0.18%を達成している。

3.4 光ファイバカロリメータ

光ファイバ系システムで要求されている光ファイバパワーの高精度測定の目的には、通常フォトダイオードを用いるが、下記のようにさまざまな問題点があり、IECでも活発に議論がなされている：

フォトダイオードは感度の波長依存性が大きく、また温度係数も大きいため、入射パワーを高精度に計測するには高い精度で検出器自身の特性を調べておく必要がある。特にGeフォトダイオードを1.55 μm帯で用いる際は、InGaAsフォトダイオードと比べて波長/温度依存性が

顕著なため注意が必要である。また光ファイバ端面等、光の入射面と検出器表面との間で多重反射が生じやすく、測定に大きな不確かさをもたらすことになる。光ファイバパワーメータの校正にカロリメータを直接利用することとすれば、全ての入射パワーが吸収されるためフォトダイオード固有の問題が生じなくてよい。Suzuki⁸⁾らにより開発された光ファイバパワー計測用カロリメータの構造を図5に示す。基本的な構造および制御方式は空間系ビーム計測用のツイン型カロリメータとほぼ同じである。光ファイバビーム用、空間系ビーム用の各アダプタが用意されておりいずれのビームにも対応できる。また光ファイバからのビームは発散ビームとなるため、これを漏れなく検出できるように吸収体の大きさおよび光ファイバ端と吸収体との距離に注意が配られている。吸収体の一様性は1 mmφサイズのビームをスキャンして求められ、0.1%未満であることが確認されている。光ファイバごとのNA（開口数）の違い、すなわち光ファイバからの発散ビームパターンの違いによる不確かさは、吸収体有感領域中のさまざまな位置を照射して調べたところ、0.2%未満であった。よって光ファイバパワー測定の不確かさは空間系ビームパワー測定の不確かさとほぼ同程度と考えられる。

従来方式であったフォトダイオードを介しての光ファイバパワーメータの校正と、カロリメータを直接用いる方式の校正とで不確かさを評価したところ、1.3 μm帯で0.24%から0.11%へ、1.55 μm帯では0.8%から0.16%へと劇的な向上を見た。従来方式の大きな不確かさのほとんどは仲介器であるフォトダイオードによるものであり、これらを介さずに直接光ファイバパワーを絶対計測できる光ファイバパワーカロリメータは強力な標準器である。

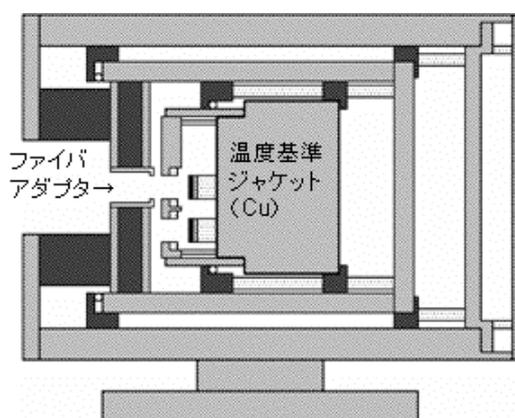


図5 ファイバカロリメータの構造図

この特色を生かし、NMIJでは光ファイバカロリメータを用いた光ファイバパワー標準確立のための研究を進めているところである。特に光ファイバの射出端からの放射パターンを元に、フェルールの最適設置位置、吸収体各位置での入射角度による影響の評価、コネクタ付け替え等による不確かさを詳細に検討していく予定である。

3.5 光パワーメータの直線性校正

前節で述べた熱型の標準器を用いることにより、高精度に光ファイバパワーの絶対値を計測することが可能であり、光パワーメータの校正が可能であるが、熱型の標準器は測定可能なパワー範囲が限られており（10 μW – 10 mW程度）、校正の需要（1 pW – 1 W）を満たすには至らない。一方で被校正検出器の直線性は後述する手法で別途校正することが可能である。すなわち、あるパワーにおいて熱型検出器で絶対値を校正しておき、校正パワーを基準としてより高い/低いパワー領域への検出器の直線性を校正することで、10桁以上にもわたる幅広い範囲についても光パワーメータを校正することが可能となる。直線性の校正手法としては重ね合わせ法、減衰量増分法、微分法、比較法などがあるが、このうちNMIJで用いられている前二者について述べる。

3.5.1 重ね合わせ法⁹⁾

重ね合わせ法（重畳法）はリニアリティ校正の基準器となる標準パワーメータの校正を行なうための手法である。重ね合わせ法で用いる実験体系の概略を図6に示す。通常、光源から検出器に至る光パワーを2系統に分ける。図6の場合、光ファイバ中を伝達する光パワーが測定対象であるため、光カプラーを用いて分波・合波を行なっている。それぞれの光路には光スイッチが設けられており、独立にオン・オフが可能である。まず一方の光スイッチのみをオンにしておき、標準パワーメータでパワーを読み取る。次にもう一方の光スイッチのみをオンにし、標準パワーメータの読み値が先ほどの測定と同じ値となるように光路上の減衰器を調整する。最後にいずれの光スイッチもオンの状態にし、2つの光路からくる合計の光パワーに対する、標準器の読み値を記録する。標準パワーメータが完全な直線性を有していれば合計光パワーの測定値はそれぞれの光路を経由した光パワーの測定値の和と全く同じ値をとることになる。逆にその値のずれが、検出器の直線性を評価する指標となる。本手法は基準器が不要な自己校正法であるという利点があり、IEC文書TC86/IEC61315でも下記の通り手続きが定められ広く用いられている。

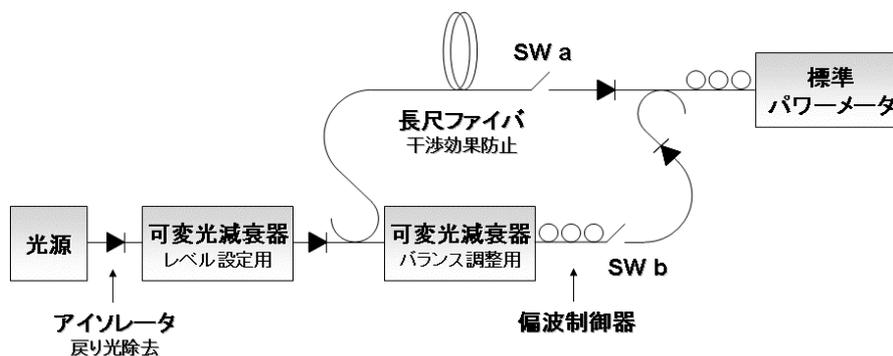


図6 重ねあわせ法による標準パワーメータの直線性校正法

1. それぞれの分岐においてパワーメータでの測定値が同じになるようにバランス調整用の減衰器を調整.
2. 両方の分岐のシャッターを開き、同時に計測したパワー $P_{ab,i}$ を計測.
3. それぞれの分岐からのパワー $P_{a,i}$, $P_{b,i}$ を計測.
4. 次式によりローカルな非直線性を計算.

$$NL_i = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{ab,i}}{P_{a,i} + P_{b,i}} \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

5. レベル設定用の減衰器で3 dB減衰させ、上記の作業を繰り返す.
6. デシベル表現において、グローバルな非直線性は、ローカルな非直線性の合計となる.

$$NL_{global}(P_n) = -\sum_{i=0}^{n+1} NL_i \quad \text{for } n = -1, -2, -3, \dots \quad (18)$$

$$NL_{global}(P_0) = 0 \quad \text{for reference power} \quad (19)$$

$$NL_{global}(P_n) = +\sum_{i=1}^n NL_i \quad \text{for } n = 1, 2, 3, \dots \quad (20)$$

ここで、 $n < 0$ は参照パワー以下での計測値、 $n > 0$ は参照パワー以上での計測値を示している.

参照パワーに対するトータルの非直線性は

$$NL_{total} = \pm \max(|NL_{global}|) \quad (21)$$

あるパワー区間における非直線性の最悪値は

$$NL_{worst} = \max(NL_{global}) - \min(NL_{global}) \quad (22)$$

不確かさの要因としては①ドリフトによる光源の不安定性、②反射の変化に対する応答、③レーザのコヒーレント長が長すぎるために生ずる干渉の効果、④偏光依存性およびパワーメータの分解能があげられる。また、それぞれの分岐のパワーと、合計パワーが等価でないことによる不確かさも生じる。

表2 9dBステップの直線性計測の不確かさ

不確かさ要因	評価の根拠	標準不確かさ
データのばらつき	実験データ	1.63×10^{-4} dB
重ねあわせ時の干渉	実験データ	0.66×10^{-4} dB
温度依存性	実験データ	0.35×10^{-4} dB
偏波依存性	実験データ	2.0×10^{-7} dB

不確かさを評価する手順としてはまず、ローカルな非直線性の合成標準不確かさ $u(NL_i)$ を計算し、グローバルな非直線性は

$$u(NL_{global}) = \sqrt{n} \cdot u(NL_i) \quad (\text{dB}) \quad (23)$$

として計算する。 n は3 dBステップを参照レベルから何回たどったかに関する回数である。

NMIJで供給中の減衰量標準で用いている標準パワーメータについて、 $n=3$ (9 dBステップ)の時の不確かさをまとめると表2のようになる。合成標準不確かさは 1.8×10^{-4} dBとなり、これは0.004%に相当する。

3.5.2 減衰量増分法¹⁰⁾

被校正光パワーメータの直線性校正に用いる手法として、減衰量増分法がある。これは定められたステップ減衰量に対する光パワーメータの応答を評価することによって直線性の指標とするものである。減衰量増分法で用いる実験体系を図7に示す。光路上に2つの光減衰器が設けられており、検出器に入射する光パワーを調整する。前段の光減衰器はパワーレベル設定用であり、後段のものはステップ減衰量を実現するために用いる。ステップ減衰量の光減衰器は、重ねあわせ法で校正した標準光パワーメータを用いてあらかじめ校正してあり、正確な減衰ステップを実現できる。NMIJではこれまで、9 dBステップで減衰量標準を供給してきたが、産業界のニーズに対応する形で最近10 dBステップでの供給にも着手している。このステップ減衰量を与える光減衰器に加え、

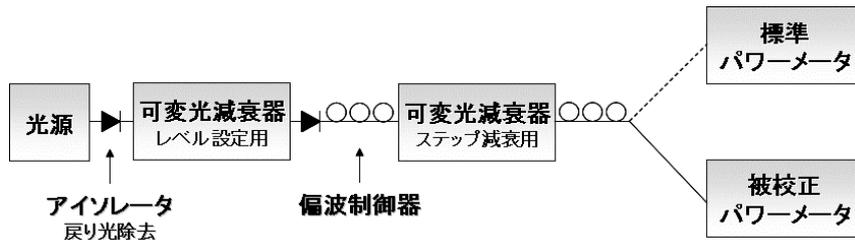


図7 減衰量増分法によるパワーメータ直線性校正法

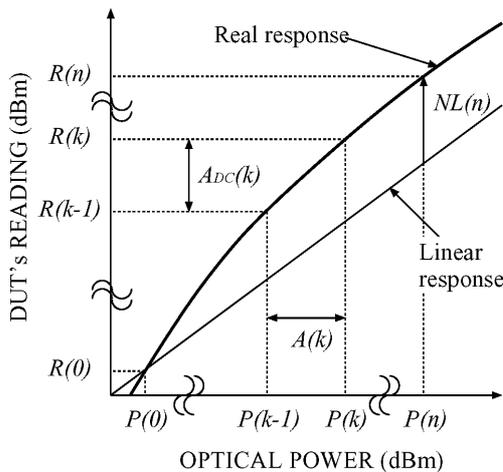


図8 検出器の非直線性の模式図

前段にレベル調整用光減衰器を併用することで、広ダイナミックレンジでの直線性校正が可能となっている。

検出器の持つ非直線性を図示すると図8のようになる。光パワー $P(n)$ における $NL(n)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 NL(n) &= \{R(n) - R(0)\} - \{P(n) - P(0)\} \\
 &= \sum_{k=1}^n A_{DC}(k) - \sum_{k=1}^n A(k) \tag{24}
 \end{aligned}$$

ここで、 $A_{DC}(k)$ は被校正パワーメータの応答 $R(k)$ 、 $R(k-1)$ の強度比であり、 $A(k)$ は光入力 $P(k)$ 、 $P(k-1)$ の強度比である。

不確かさの要因としては、①パワーレベル設定用減衰器の設定ズレ、②減衰量の切替に伴う偏光変動により被校正パワーメータが受ける影響、③光減衰器の光パワー依存性、④ステップ減衰量そのものの不確かさなどが挙げられる。表3に[-90 dB, 0 dB]区間 ($P(0)=3.87$ dBmを基準とする) における光パワーメータ直線性測定の不確かさバジェットを示す。この時、合成標準不確かさは 2.25×10^{-3} dBであり、これは0.05%に相当する。

表3 [-90 dB, 0 dB] 区間の直線性測定の不確かさ

不確かさ要因	標準不確かさ
繰り返しのばらつき	7.90×10^{-4} dB
レベルセットずれによる不確かさ	8.43×10^{-6} dB
パワーレベル切替による偏光の変動	4.84×10^{-6} dB
ステップ減衰切替による変更の変動	1.15×10^{-4} dB
ステップ減衰量の不確かさ	2.10×10^{-3} dB
ステップ減衰器のパワー依存性	1.45×10^{-4} dB

3.6 今後の取り組み

NMIJでは光ファイバパワー標準に関して2006年度から1550 nm帯・1310 nm帯で、パワー範囲は $50 \mu\text{W} - 1 \text{mW}$ で、校正の依頼試験開始を予定している。これと関連して、2005年にNISTとの光ファイバパワー比較実験が行われている。NISTは光ファイバパワー比較用の仲介器としてGeフォトダイオードによるトラップ検出器(後述)を開発しており、これを用いてPTBとの光ファイバパワー比較実験なども行われている¹⁾。また、2005年11月からアジア太平洋計量計画 (Asia Pacific Metrology Programme : APMP) による光ファイバパワー国際比較実験が開始される予定である。パイロットラボは韓国のKRISS、参加機関は表4に示す8機関で、NMIJは2006年9-10月に比較測定を実施する予定である。半導体フォトダイオードのパワーメータを仲介器として巡回し、波長1310、1550 nm、パワー1, 10, 100 μW について国際比較を行なう。

光減衰量に関しては2005年秋からjcss供給を開始する予定で、2006年度には認定事業者に対し、校正を開始する見込みである。適用範囲は1550 nm帯について、60 dBの範囲での供給を手始めに、その後は波長範囲を1310 nm帯へ拡大すること、またパワー範囲をWクラスのパワー領域にも拡大していくことが課題となる。ハイパワー用の標準供給は、特に長距離通信における中継増幅器の関連で重要となるが、通常フォトダイオードは10 mWを超えるパワーでは直線性が得られないため、ハイパワー測定の際はフォトダイオード前方に減衰器を設置した構造の検出器を検討している。

表4 2005-6 APMP 光ファイバパワー比較参加機関

機関名	国名
KRISS	韓国
SPRING	シンガポール
NIMA	オーストラリア
NMIJ	日本
CSIR-NML	南アフリカ
CMS/TRI	台湾
NIM	中国
NML-SIRIM	マレーシア

4. 海外の動向

4.1 光ファイバパワー標準について

海外の主な国家標準研究機関（アメリカ・NIST : National Institute of Standards and Technology, イギリス・NPL : National Physical Laboratory, ドイツ・PTB : Physikalisch - Technischen Bundesanstalt）では、光ファイバパワー校正の需要に対応し、既に国家標準に基づいたトレーサビリティ体系を構築している。特に上記3機関に関しては、以下に述べるように光パワーの一次標準器として極低温放射計を用いており、光ファイバパワー校正を行なうための常用標準器に値を下ろしている。常用標準器を値付けするための仲介器としては、次々節に述べるように半導体フォトダイオードを用いたトラップ検出器がよく用いられている。

4.1.1 極低温放射計^{12, 13)}

熱型検出器で光パワーの測定精度を向上させるには、光パワーと電気的パワーの等価性が極めて重要である。吸収体を液体ヘリウム温度にまで冷却すると、金属の熱伝導率はきわめて大きくなり、また比熱は小さくなって、熱拡散定数としては常温の1000倍にもなる。これにより入力パワーは速やかに吸収体に拡散するため、光パワーと電気的パワーの等価性が著しく向上する。また、感度も向上する。

このため、パワー計測の不確かさは 4×10^{-5} にもおよぶ高精度を誇っており、各国NMIが光パワーの一次標準器として用いている。

4.1.2 トラップ検出器

これら1次標準器の高精度な値を実際の校正現場に導入するにあたっては、仲介器として熱型検出器よりも十分に応答が速く高感度で、持ち運びも便利な検出器が必要であり、半導体型の光検出器（フォトダイオード）が

便利である。この場合、校正現場の温度管理をしっかりとし、既知の波長で安定したレーザ光源を用いることで、フォトダイオードに特有の比較的大きな不確かさを低減することができる。しかし、依然として存在するのが検出器表面での高い反射率と、入射光の偏光依存性である。

これらフォトダイオードの抱える諸問題を解決すべく開発されたのがトラップ検出器¹⁴⁾である。トラップ検出器は複数個のフォトダイオードを3次的に配置し、入射光パワーのうち前段のフォトダイオードで反射されたパワーを後段のフォトダイオードで捉え、反射ロスを抑制する機構になっている。

トラップ検出器には5, 6個のフォトダイオードを反射光路上に次々に配置する透過型と、3個のフォトダイオードを用い、最終段で垂直入射になるように配置して前段のフォトダイオードに反射光を戻す反射型がある。反射型は少数のフォトダイオードで構成されるため検出器ユニットを小型にできるメリットがあり広く用いられている¹⁵⁾。

また入射光パワーが3次的な反射光路を取るようフォトダイオードを配置することによって、反射光パワーの偏光依存性を抑制することが可能である。Goebelらによると、Siフォトダイオード単体の場合に比べ、3次元配置トラップ検出器の偏光依存性（ビーム入射角を3度とした時の依存性）は一桁以上改善され、 5×10^{-5} にまで低減されることが報告されている¹⁶⁾。

これらの工夫により、反射型Siトラップ検出器を用いた光パワー計測の不確かさは633 nm, 1 mWにおいて0.05 %と高い精度を誇っている。ただし、波長依存性があるため絶対値計測は不可能で、各国とも極低温放射計等、熱型の一次標準器から各種常用標準器に値を移す際の高精度な仲介器として利用している。

通信波長帯に対応したトラップ検出器としてはGeトラップ¹⁷⁾やInGaAs¹⁸⁾トラップが開発されている。InGaAsフォトダイオードは均一な大面積素子を作成するのが技術的にまだ難しく、高価であるためトラップ検出器はあまり普及していない。一方、Geフォトダイオードは内部抵抗が極めて小さいため、光電流を読み出す電流計の入力インピーダンスに注意を要するという難点はあるものの、トラップ検出器用としては有力な素子である。NISTでは特に、光ファイバパワーを直接計測できるGeトラップ検出器を開発し、国際比較における仲介器などとして利用がなされている。このトラップ検出器は2枚のGeフォトダイオードと1つの凹面鏡とを組み合わせた反射型で、光ファイバ端面からの発散ビームがフォトダイオードの有感領域から外れないように、最終段の凹面鏡で反

射光が収束するように工夫がなされている。光ファイバダブタ部は取り外しが可能で、空間系ビームの計測にも対応している。光電流の読み出しは市販の低入力インピーダンス・ピコアンメータもしくは、高精度オペアンプを用いたトランスインピーダンス回路によるI-Vコンバータ等を用い、フォトダイオード内部抵抗の影響を抑える注意が必要である¹⁹⁾。

4.2 その他の光ファイバ関連の標準

緒言でも述べたように、光ファイバ通信網を構成するコンポーネントは多岐に渡っており、光ファイバパワー標準の他にも性能試験や安全性評価で重要な計測が数多くある。

近年、大容量通信の目的で開発がなされているWDM技術では1本の光ファイバ中を多数の波長を用いて情報伝達する方式が取られている。利用する波長の数が増えるにつれ、隣り合う波長同士の間隔が狭まることとなり、入射側でも検出側でも波長情報を極めて高精度に取り扱う必要が出てきている。NMIJを含め、各国とも通信帯での波長標準の開発・供給に力を入れており、1530–1560 nmのCバンド帯ではアセチレン安定化レーザの基準周波数と光周波数コムを用いた極めて高精度な波長標準が整備されつつある。

また通常、光ファイバ通信では光パルスの伝達によって情報を伝送するため、入射光の波長ごとまたは偏光状態ごとに伝送速度が異なる（分散）と光ファイバ中を伝達するにつれ光パルス形状が崩れてしまうことから、波長分散・偏光モード分散に関する標準も重要である。

このほかコネクタ部分における光ファイバ同士の組み合わせにおいては、光ファイバ径やコーティング径、モードフィールド径などの不整合が伝送損失をもたらすため、これら光ファイバの幾何形状の標準についても大きな需要がある。NISTやNPLではこれら光ファイバパワー以外の光ファイバ関連の標準供給にも力を入れている。

4.3 各国NMIの光ファイバ系標準の動向

4.3.1 NISTの動向²⁰⁾

NISTでは極低温放射計（1 mWで不確かさ0.02 %）により、633, 1319, 1550 nmの波長で光ファイバパワー常用標準器である焦電検出器（ECPR: Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer）に値付けしている。ECPRは熱型の光パワー測定器で、吸収体に金黒コーティングを施したLiTaO₃焦電素子を用いている。焦電素子は温度上昇により起電力を生じる強誘電体で、10 μW–1 mWのパワ

一範囲で0.16 %の不確かさが達成されている。ECPRは素子の温度変化に対して電圧信号を生じるので、CWパワーを計測する場合には光路中にチョッパーを設けて同期検波する。

-90–0 dBm（1 pW–1 mW）の範囲については直線性校正で対応しており、その不確かさは0.1 %である。0–30 dBmのハイパワー領域についても、特に1480 nmの波長帯について直線性校正を行なっている。

また、先に述べたように光ファイバパワー計測用の仲介器として、Geフォトダイオードを用いたトラップ検出器を利用している。

光ファイバパワー以外の標準については、波長、波長分散、偏光モード分散、光ファイバ幾何形状について供給がなされている。波長以外の標準については、各種標準試料（標準光ファイバなど）としての頒布も行なっている。

4.3.2 NPLの動向²¹⁾

NPLでは極低温放射計（不確かさ0.01 %）を一次標準器とし、光ファイバパワー常用標準器までの値付けに2段階の仲介器を用いている。すなわち、極低温放射計の値は633 nmの波長でSiフォトダイオードのトラップ検出器に移され（不確かさ0.04 %）、次に熱型検出器であるサーモパイルに値付けされる。サーモパイルの吸収面は波長によらず一定の吸収率を示し、パワー計測の不確かさは0.2 %である。最後にInGaAsフォトダイオードや積分球+Geフォトダイオードの検出器に値が移される。ユーザのパワーメータの校正は100 μWで行なわれ、不確かさは0.7 %となっている。

-90–0 dBm（1 pW–1 mW）の範囲については重ね合わせ法による直線性の校正で対応していて、不確かさは0.05 %である。

+35 dBmまでのハイパワー領域については、直線性の校正されたハイパワー用サーモパイルとの比較法によって校正がなされており、不確かさは1.6 %である。

NPLは各国NMIの中でも特に光ファイバ関連の標準供給に力を入れており、波長、波長分散、偏光モード分散、光ファイバ幾何形状といった基本的なパラメータの標準以外にも、シングルモード光ファイバのカットオフ波長、光ファイバの非線形パラメータ、OTDR、マルチモード光ファイバの開口数、光ファイバ長さ、光ファイバアンプのゲイン、光ファイバの屈折率や光ファイバ内の応力分布測定まで、極めて多岐に渡る標準供給に対応している。

4.3.3 PTBの動向²²⁾

PTBの光パワー一次標準器は極低温放射計である。NIST, NPLと異なる点は、標準器をクリーンルーム内で動作させ、塵・埃などによる影響を極力低減する努力がなされていることである。これにより極低温放射計の極めて小さな不確かさを最大限に生かすことができ、測定不確かさ0.005%という値を誇っている。

極低温放射計の値はSiフォトダイオードのトラップ検出器によって633 nmの波長で10⁴台の不確かさで下ろされ、さらに真空サーモパイルに値付けされる。サーモパイルは波長感度特性が一定であるため、可視光での値付けの後、通信波長帯の入射光に対するパワー測定が可能となる。校正の不確かさは最終的に0.3-0.6% ($k=2$) となっている。

1pWまでの低パワーに関してはやはり、直線性の校正により対応している。

4.3.4 CMCリスト²³⁾

BIPMのKCDB (Key Comparison Data Base: 基幹比較データベース) のAppendix C : CMC (Calibration and

Measurement Capability) リストによると、2005年9月現在、光ファイバパワーのカテゴリーに関して登録されている国家標準機関および、適用範囲・不確かさは表5の通りである。先に述べた主要3機関はもとより、アジア・太平洋地域の国々も5カ国の機関が既に登録されている。1310 nm, 1550 nmの通信波長帯を中心に、パワー範囲は概ね10 μ W - 1 mWについて登録されている。不確かさについてはNISTの0.5%, PTBの0.3-0.6%が目立つが、その他は概ね1-2%となっている (いずれも $k=2$)。光ファイバパワーに関して、NMIJは諸外国に立ち遅れているのが現状で、2006年度の依頼試験に続き、APMPの国際比較を経て早急にCMC登録を目指す必要があるといえる。

減衰量のカテゴリーに関しては現在のところCMC登録がなされている機関はない。しかしながら光ファイバパワーのCMCリスト中にはnWレベルの低パワーについて登録がなされている機関もあり、これは減衰量 (検出器の直線性) の校正なくしては値付け不可能であり、その需要の大きさからも減衰量標準の開発・供給が急務であることにはかわりはない。

表5 BIPM・KCDBのCMCリスト (Appendix C)

機関名 (国名)	パワー範囲	波長範囲	不確かさ ($k=2$)
NMIA (Australia)	10 μ W ~ 1 mW	670 ~ 1560 nm	1.6 %
NIM (China)	1 nW ~ 1 mW	850, 1310, 1550 nm	3 %
DFM (Denmark)	50 μ W ~ 1 mW	800 ~ 1600 nm	0.75 %
MIKES (Finland)	1 nW ~ 7 mW	1310, 1550 nm	1.5 ~ 2%
LNE (France)		850, 1310, 1550 nm	1.6 ~ 1.8 %
PTB (Germany)	1 nW ~ 3 mW	850, 1300, 1550 nm	0.3 ~ 0.6 %
IEN (Italy)	10 μ W ~ 1 mW	850 nm	2.0 %
KRISS (Korea)	10 μ W ~ 1 mW	1300 nm	2 %
NML-SIRIM (Malaysia)		1310, 1550 nm	2 %
SPRING (Singapore)	1 μ W ~ 1 mW	850, 1310, 1550 nm	1.2 %
IFA-CSIC (Spain)	20 μ W ~ 1 mW	800 ~ 1600 nm	1.5 %
SP (Sweden)	5 μ W ~ 1 mW	850, 1300, 1550 nm	1 ~ 2 %
METAS (Switzerland)	5 μ W, 100 μ W	850, 1310, 1550 nm	1.1 %
NMi-VSL (Netherlands)	< 1 mW	850, 1300, 1550 nm	3 %
NPL (UK)		850, 1300, 1480~1570 nm	1.0 %
NIST (USA)	0.1 mW	850 nm帯, 1310 nm帯, 1550 nm帯	0.5 %

5. 総括

本稿では近年発展の著しい光情報通信分野で特に重要な、光ファイバに関連する光ファイバパワー標準及び減衰量標準（直線性校正）について、産業界の需要とともに、その測定原理や不確かさ、各国の現状などについて述べた。わが国における光ファイバパワー標準は、レーザパワー標準の二次標準器を所有する認定事業者により範囲の拡張としての供給がなされている。NMIJにおいては光ファイバパワー専用の特定標準器を開発することが必要であり、物理標準供給計画にも明記されているところである。光ファイバパワーは2006年度から依頼試験の受付開始を予定している。また、国内外問わず光ファイバ通信網が今後ますます利用拡大されていくであろうことを考えると、その試験やメンテナンスに用いられるパワーメータの校正は極めて重要であり、2005-6年にAPMPで行なわれる国際比較への参加は国際的な相互認証に向けて大きな意味を持つ。

光ファイバパワーの標準は、1 pWから1 Wクラスまで、12桁以上にもわたる非常に幅広いダイナミックレンジについて校正の需要があり、標準供給にあたっては光ファイバパワーの絶対計測とともに、被校正検出器の直線性評価も重要で、そのために減衰量標準が重要であることは言を待たない。NMIJでは減衰量標準が既に2005年4月から依頼試験の受付を開始しており、2005年中にはjcss校正が認定される予定である。

光通信に関連する標準として、WDMの分野では波長（周波数）標準が重要視されているが、これはNMIJでも時間・周波数計測科が既に依頼試験にてサービスを提供している。

このほか、分散（偏光モード分散・波長分散など）、光ファイバの幾何形状、OTDRといった光ファイバ関連の標準について需要があり、NISTやNPLで積極的に供給がなされている。これら関連量の標準は極めて多岐に渡るため、NMIJで今後どのように取り組んで行くかについて十分に検討を行なう必要があると考えられる。

謝辞

本調査研究を行なうにあたり、(財)日本品質保証機構計量計測センター事業推進科の宮脇雅裕・主幹には貴重な資料と情報を頂戴いたしました。ここに心より感謝申し上げます。産業技術総合研究所計測標準研究部門光放射計測科の三戸章裕・科長、レーザ標準研究室の遠藤道幸・室長、向井誠二・主任研究員ほかレーザ標準研究室の皆様には懇切なご指導・ご助言を賜りました。ここに

深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大越孝敬：光ファイバの基礎，オーム社，(1975).
- 2) 応用物理学会：応用物理ハンドブック，丸善，(2002).
- 3) 総務省：情報通信統計データベース，
<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/>
- 4) 松本弘一：光測定器ガイド，オプトロニクス，(2004).
- 5) Komada, S., Horiuchi, M., Kunii, T. and Kuroda, K.: Ultra-Black Nickel-Phosphorus Alloy Optical Absorber, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 39, No. 1, pp. 230-232 (1990).
- 6) Inoue, T., Yokoshima, I. and Hiraide, A.: Highly Sensitive Calorimeter for Microwatt-Level Laser Power Measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-36, No. 2, pp. 623-626 (1987).
- 7) Suzuki, Y., Murata, A., Araragi, M. and Inoue, T.: Calorimeter with Compensative Absorber for Measuring Microwatt Level Optical Power, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 40, No. 2, pp. 219-221 (1991).
- 8) Suzuki, Y., Chida, N., Murata, A. and Inoue, T.: A Calorimeter for Optical Fiber Power Standard and Advantages in Calibration of Optical Fiber Power Meters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, No. 2, pp. 430-433 (1993).
- 9) 光減衰量校正用機器部署内校正マニュアル（産業技術総合研究所，2004年9月10日発行）
- 10) 光減衰量校正マニュアル（産業技術総合研究所，2004年9月10日発行）
- 11) Vayshenker, I., Haars, H., Li, X., Lehman, J.H. and Livigni, D.J.: Optical-Fiber Power Meter Comparison Between NIST and PTB, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, Vol. 108, No. 5, pp. 391-394 (2003).
- 12) Stock, K.D. and Hofer, H.: Present State of the PTB Primary Standard for Radiant Power Based on Cryogenic Radiometry, *Metrologia*, Vol. 30, No. 4, pp. 291-296 (1993).
- 13) Hoyt, C.C. and Foukal, P.V.: Cryogenic Radiometers and their Application to Metrology, *Metrologia*, Vol. 28, No. 3, pp. 163-167 (1991).
- 14) Zalewski, E. and Duda, C. R.: Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency, *Appl. Opt.*, Vol. 22, No. 18, pp. 2867-2873 (1983).
- 15) Palmer, J.M.: Alternative Configuration for Trap Detectors, *Metrologia*, Vol. 30, No. 4, pp. 327-333 (1993).

- 16) Goebel, R., Yilmaz, S. and Pello, R.: Polarization Dependence of Trap Detectors, *Metrologia*, Vol. 33, No. 3, pp. 207-213 (1996).
- 17) Lehman, J.H. and Li X.: A transfer standard for optical fiber power metrology, *Appl. Opt.*, Vol. 38 No. 34, pp. 7164-7166 (1999).
- 18) Stock, K.D. and Heine, R.: Spectral Characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards, *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp.449-452 (2000).
- 19) Makai, J.P. and Cromer, C.L.: The Application of an Optical Biasing Method to Determine Temperature-dependent Nonlinearity of Photovoltaic Ge Detectors, *Metrologia*, Vol. 30, No. 4, pp. 335-339 (1993).
- 20) <http://www.boulder.nist.gov/div815/index.html>
- 21) <http://www.npl.co.uk/photonics/services/>
- 22) <http://www.ptb.de/en/org/4/41/413/index.htm>
- 23) http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list.asp?Iservice=PR/Fibre.7.1.0