

可変光減衰器の開発

Development of Variable Optical Attenuator

佐藤 功紀*

Kouki Sato

青木 拓磨*

Takuma Aoki

渡辺 泰弘*

Yasuhiro Watanabe

小栗 祐一郎*

Yuichiro Oguri

芝田 信之*2

Nobuyuki Shibata

西脇 利光*2

Toshimitsu Nishiwaki

大池 瑞記*2

Mizuki Oike

太田 寿彦*3

Toshihiko Ohta

概 要 ますます増大する光通信トラフィック需要に対し、通信方式で主流となりつつある波長分割多重（WDM）通信方式においては、伝送速度の高速化のみならず波長多重数の増加によって通信容量増大を図る WDM 伝送装置の開発が鋭意行われている。WDM 伝送装置にはエルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）が必須（ひっす）であるが、ダイナミックに変動する利得レベルの調整を行うために、広帯域にわたり波長特性が平坦（へいたん）な可変光減衰器（VOA）が EDFA と組み合わせて使用されることが多い。本稿では、高出力化する EDFA に対応するため耐光入力パワー（200 mW）に優れた VOA を開発したので報告する。

1. はじめに

近年の通信容量の急激な増加に対応すべく、光通信分野においては1本の光ファイバに複数の異なる波長を多重化して伝送を行う波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）通信技術を用いた光通信ネットワークが急速に実用化、導入されてきている。WDM 伝送システムにおいて不可欠なエルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）は、EDFA の利得帯域が WDM 通信における使用波長帯域に相当し、この波長帯域内において波長多重化された複数の信号光を一括増幅することが可能な光増幅器である。

EDFA はエルビウムイオンの誘導放出による入力信号光の増幅作用を利用しており、利得プロファイルに波長依存性が存在する。したがって、受信機における各波長の信号光の受信レベルを一定に保つため、EDFA の利得の波長依存性と相反するプロファイルを有する利得等化器（GEQ: Gain Equalizer）が EDFA とともに使用され、伝送帯域の利得平坦化がなされるように設計されることが多い¹⁾。

しかしながら、GEQ は固定のプロファイルを有しているため、伝送途中でスパンロスが変動した場合や、波長信号を分岐挿入（OADM: Optical Add-Drop Multiplexing）したことにより EDFA への入力光強度が変化すると、EDFA の利得プロファイルの波長依存性も変化し、GEQ によって実現されていた利得平坦化にずれが生じる。したがって、EDFA 及び GEQ に波長依存性の少ない光量調節機能を付与することにより利得プロファイルの平坦化を実現させる光部品として可変光減衰器

（VOA: Variable Optical Attenuator）が必要となる²⁾。

VOA は大別すると可動部分を有する機械式と可動部分を持たない非機械式が製品化されている³⁾。非機械式としては、磁気光学効果を利用したタイプや、導波路の熱光学効果を利用したタイプが知られている。しかし、これら非機械式 VOA の場合、設定された減衰量は波長依存性を有している。一方、機械式の場合、モータなどの手段によって光量減衰レベルに分布を有する光学フィルタを移動させる構成となっているため、光学フィルタとして波長依存性の少ないフィルタを選択することにより波長平坦性に優れた VOA を実現することが可能である。

以上のような背景から、VOA の需要が近年急激に膨らんできている。本稿では、波長平坦性に優れているという点、及び EDFA に搭載実績が多いという点から機械式 VOA を開発したので報告する。

2. 開発目標

開発目標値を表1のように設定した。なお、波長帯域については、EDFA の帯域がいわゆる C バンド（1525 nm ～ 1560 nm）から L バンド（1575 nm ～ 1610 nm）へと広帯域化していることも念頭に置き、両帯域への適用が可能なように考慮した。

表1に示した開発目標の設定にあたっては、EDFA 設計開発者からの要望を基に設定したが、特に以下の点を考慮している。既に製品化されている VOA のうち非機械式 VOA は入力光パワーの点では優れているものの波長平坦性が多少劣るのに対し、機械式 VOA では逆に波長平坦性は優れているものの入力光パワーは 50 mW 程度と比較的低い仕様となっている。したがって、今回の開発にあたっては、良好な波長平坦性、及び、入力光パワーとして 200 mW というハイパワーを両立させる VOA を開発目標として挙げた。

* ファイテルフォトニクス研究所 WP チーム 光機能部品グループ

*2 設備部 生産技術開発センター プロセス開発部

*3 ファイテル製品事業部 光部品部 開発1Gr.

表1中の繰り返し設定精度とは、ポテンシオメータで検出された電圧値及びステッピングモータに印加したパルス数を再度設定した場合の減衰量の設定精度、バックラッシュとは、上記の場合においてステッピングモータの動作方向が反転する場合を含んで設定された場合における減衰量の設定精度を指している。

3. VOAの構造

今回開発したVOAの概略構造について、光路の順に従って説明する。入出射ファイバはシングルモード光ファイバ(SMF: Single Mode Fiber)であり、ファイバ先端のフェルールは6°にて斜め研磨され無反射(AR: Anti-Reflection)コーティングが施されている。レンズによって光ビーム径が広げられ、VOA全体としては空間結合系の構成となっている。レンズとフェルール間の距離は、作動距離にて最大結合となるように調整されているが、両者の固定に接着剤等は使用していない。接着剤を使用しないことで耐光入力パワーを向上させることを意図している。入射側レンズから出射された光ビームはプリズムによって光路が180°折り返される。これは、入出射光ファイバをVOAモジュールの同一側に配置することにより、省スペース化を目指したものである。プリズムを経た光ビームは、その移動方向に連続的な濃度勾配(こうばい)を有する光学フィルタ(減衰素子)を通過した後、レンズによって出射側光ファイバ(SMF)に集光される。

なお、減衰素子のうち波長依存性の少ないフィルタを特にニュートラルデンシティ(ND: Neutral Density)フィルタと呼ぶ。NDフィルタは、樹脂製ナットを介してステッピングモータに連結されており、ナットに形成されたタップ及びステッピングモータにより回転するリードスクリューによってその濃度勾配方向に往復運動することで減衰量を調整する。また、反射減衰

量を抑制するために、光路に対して傾斜して設置されている。

減衰量を検出する手段としてポテンシオメータが設置されており、ナットに設置されたブラシが抵抗膜と接触することで抵抗値を検出し、この抵抗値によってNDフィルタ位置、すなわち対応する減衰量を検出する機構となっている。EDFA中に実装されたVOAの減衰量の設定は、あらかじめ測定されたポテンシオメータの抵抗値と減衰量の関係をもとにEDFA出力からのフィードバックにより制御される。

ステッピングモータへの給電及びポテンシオメータへの給電、検出した抵抗値の読み取りは、フレキシブル配線基板を介してVOA底面に形成された電極ピンが外部とのインターフェースとなっている。

VOAモジュールのパッケージングは、ステッピングモータやポテンシオブラシなどの可動部及び配線基板の電気接点の性能保持のため、窒素ガス封入後にシーム溶接によって気密封止(ハーメチックシール)されている。

4. 試作結果

今回開発したVOAの外観写真を写真1に示す。サイズは開発目標であった幅30 mm、長さ50 mm(ファイバ保護ブーツ部長さは30 mm)、高さ11 mmを実現している。

4.1 光学特性

4.1.1 挿入損失

図1に、VOAの挿入損失のヒストグラムを示す。1.55 μm の光源を使用した場合の挿入損失の平均値は0.28 dB、標準偏差は0.09 dBであった。この内訳は、対向させたコリメータ間の損失、ARコーティングを含むプリズム及びNDフィルタのうち金属膜が蒸着されていない部分における損失に相当する。開発目標値の0.6 dBに対し、十分満足すべき試作結果となっていることがわかる。

表1 VOAの開発目標
Target specification for VOA

光学特性	
波長帯域	1525~1610 nm
挿入損失	< 0.6 dB
反射減衰量	> 45 dB
波長平坦性	0.2 dB又は減衰量の1%の大きいほう
偏波依存性損失(PDL)	< 0.15 dB
温度依存性	< 0.15 dB
入力光パワー	200 mW
駆動部特性等	
モータタイプ	2相ステッピングモータ
モータ動作電圧	3.3 V
減衰量検出機構	ポテンシオメータ
減衰量分解能	< 0.1 dB/ステップ
繰り返し設定精度	< 0.1 dB
バックラッシュ	< 0.2 dB
サイズ(幅×長さ×高さ)	30×50×11 mm
パッケージ	気密封止



写真1 開発したVOAの外観
General view of VOA

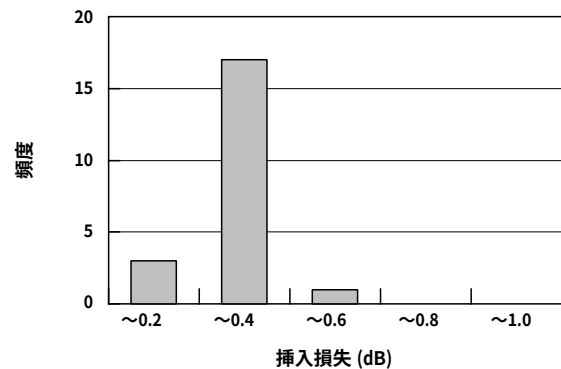


図1 VOAの挿入損失のヒストグラム
Histogram of insertion loss for VOA

4.1.2 反射減衰量

図2に、モータステップ数と入射光各ポートにおける、1.55 μm 光源を用いて測定した反射減衰量の関係を示す。NDフィルタとして金属膜を使用しているため、減衰領域において反射が予想されることから、全（すべ）ての減衰量範囲において、すなわちモータステップ数を変化させて、反射減衰量を測定した結果である。全ての減衰量範囲において、開発目標である45 dB以上が確保されていることがわかる。

また、図3に、入射ポート及び出射ポートそれぞれの反射減衰量のヒストグラムを示す。図3においては、全減衰量範囲における反射減衰量の最悪値をもってVOAモジュールとしての反射減衰量としている。入射ポート側の反射減衰量の平均値は48.3 dB、標準偏差は2.2 dB、出射ポート側の反射減衰量の平均値は49.1 dB、標準偏差は1.8 dBであった。

4.1.3 波長特性

図4に、各減衰量における減衰量の波長依存性を示した。開発目標である、Cバンド及びLバンドの全ての減衰量範囲において帯域内での平坦性（最大減衰量－最小減衰量）は0.2 dB以内に収まっていることが確認された。また、C及びLバンドを合わせた広帯域においても平坦性は0.3 dB以内に収まることも確認された。更に、このスペクトルにおいては、周期的なリップル等も観測されておらず、NDフィルタ内部をはじめとする各構成光学部品間での多重干渉は生じていないことも明らかとなった。具体的には、1520 nmから1620 nmの波長帯域の中から任意の2 nm帯域について最大減衰量と最小減衰量の差をリ

ップルと定義した場合、リップルの値は平均で0.032 dBであった。

4.1.4 偏波依存性損失

図5に、モータステップ数と偏波依存性損失（PDL: Polarization Dependent Loss）の関係を示した。全ての減衰量範囲（モータステップ数に相当）において開発目標である0.15 dB以下が達成されていることがわかる。また、図示はしていないが、C及びLバンド帯域においてPDLの波長依存性の測定も行っており、特段の波長依存性は認められず開発目標値である0.15 dB以下を満足していることを確認している。

4.1.5 温度依存性

図6に、 -5°C から 70°C の温度範囲における挿入損失の温度依存性のヒストグラムを示した。平均値は0.10 dB、標準偏差は0.05 dBであった。開発目標0.15 dB以下が達成されていることがわかる。温度依存性はプリズムの固定方法に起因していると推測されたので、プリズムの固定はエポキシ系接着剤の塗布量、接着位置、接着面積を管理して行ったため、良好な温度依存性が実現できたと考えられる。

4.1.6 入射パワー

図7に、入射光パワーを変化させた場合の減衰量の変動を測定した結果を示す。図7からわかるように、入射光パワーが500 mWの際には経時的な減衰量の低下が見られる。500 mW照射後のNDフィルタをSEM観察した結果を写真2に示す。この写真から、500 mWを照射した部分（丸印）ではNDフィルタ膜が酸化されていることがわかる。NDフィルタを構成する

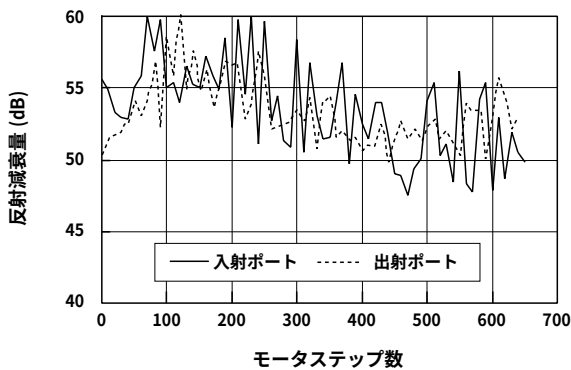


図2 反射減衰量のステップ数依存性
Dependence of return loss on stepping counts

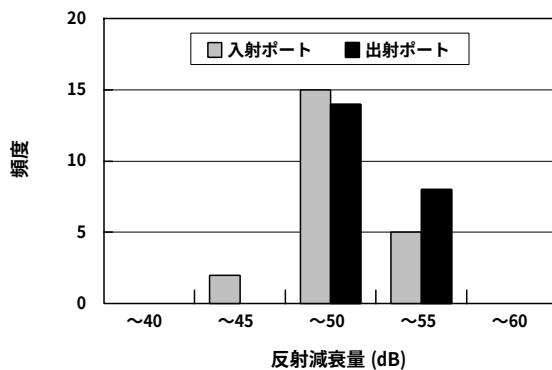


図3 VOAの反射減衰量のヒストグラム
Histogram of return loss for VOA

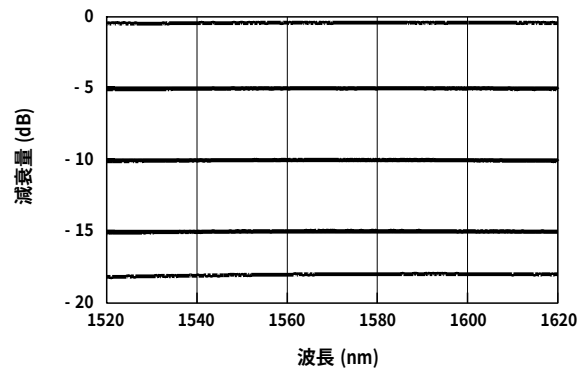


図4 VOAの減衰量の波長依存性
Wavelength dependence of attenuation spectra

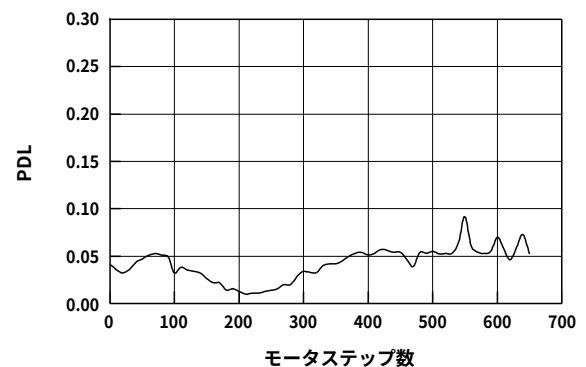


図5 PDLのステップ数依存性
Dependence of PDL on stepping counts

金属元素が酸化することにより光を吸収しなくなり、減衰膜としての機能が失われてきたものであると考えられる。NDフィルタ膜の酸化の原因は、入射光がNDフィルタ膜に吸収されることによるNDフィルタの昇温であると考えられるため、開発目標である200 mWでの使用を保証するため入射光パワーを300 mWとした場合のNDフィルタ及びVOAモジュールの温度を測定した結果を図8に示す。NDフィルタ温度は60℃程度、モジュール温度は40℃程度であることがわかる。したがって、500 mW入射時におけるNDフィルタ膜の酸化は、入射光がNDフィルタ膜に吸収されて熱に変化したことによる昇温により促進されていると推測される。しかし、図7からわかるように、開発目標である200 mWにおいては、照射初期段階での昇温によるモジュール自体の温度特性と思われる減衰量の増加はわずかに認められるものの、NDフィルタ膜の酸化進行速度が著しく遅いことにより、減衰量の経時的な変動は観測されていない。また、VOAモジュール温度も40℃以下程度にまでしか上昇していないため、実装された状態における使用に対し問題はないことが確認された。

4.2 動作特性

4.2.1 減衰量設定精度

図9に、VOAを動作させた際の減衰量とポテンショメータによって検出された電圧との関係を示す。なお、このVOAに搭載したNDフィルタの減衰量範囲は0～20 dBである。減衰量にして5 dB付近において多少直線性からのずれが見られる

が、ステッピングモータに対し減衰量が増減される方向に1パルス印加した場合において、減衰量及び検出されるポテンショメータ電圧の増減の方向も一致しており、VOA機能としての動作が正常であることが確認された。また、ステッピングモータに1パルスを印加した際の減衰量の変化量は平均で0.040 dB/ステップであり、開発目標である0.1 dB/ステップが達成されていることが確認された。

4.2.2 繰り返し特性、バックラッシュ

つぎに、ステッピングモータに100パルスずつ印加して往復運動させるという条件にて減衰量の繰り返し設定精度及びバックラッシュについて評価を行った。その結果のヒストグラムを図10に示す。繰り返し特性については平均で0.011 dB、標準偏差は0.010 dB、バックラッシュに関しては平均で0.041 dB、標準偏差で0.021 dBであり、開発目標はそれぞれ達成されていることがわかる。



写真2 500 mW照射後のNDフィルタのSEM写真
SEM image of ND filter after 500 mW optical power incidence

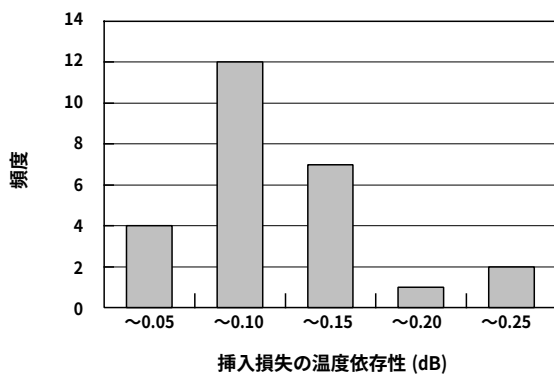


図6 挿入損失の温度依存性ヒストグラム
Histogram of temperature dependency of insertion loss

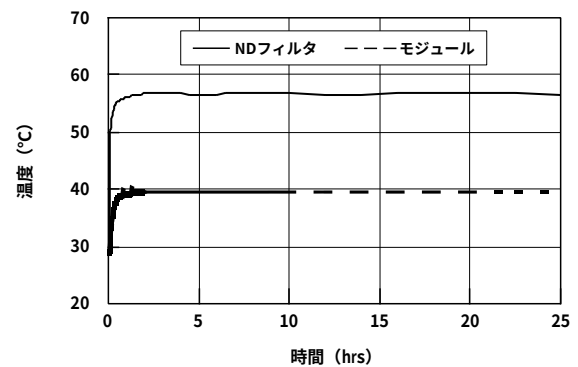


図8 NDフィルタ及びVOAモジュールの温度
Temperature of ND filter and VOA module

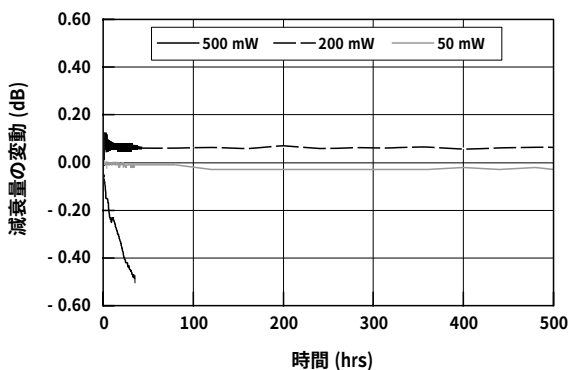


図7 VOAのハイパワー試験結果
Results of high optical input power test for VOA

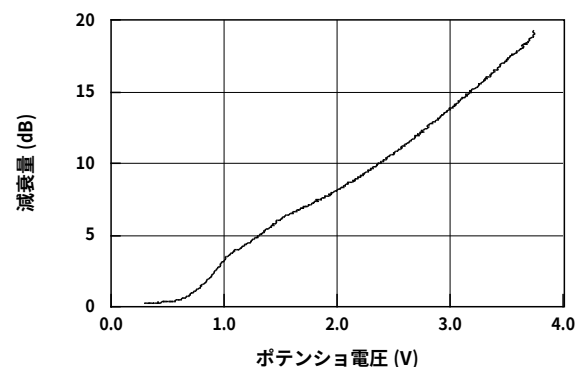


図9 ポテンショメータ検出電圧と減衰量の関係
Relationship between potentiometer voltage and attenuation

4.2.3 切り替え時間

切り替え時間の測定にあたっては、EDFAの中で利得レベル調整用途を想定した場合、変化させる減衰量としては数dB程度と考えて良いと思われるので、3 dBの減衰量変化に要する切り替え時間の測定を行うこととした。測定は、2チャンネルのデジタルストレージオシロスコープを用い、1つのチャンネルにVOAモジュールの出射ポートからの光をO/E変換して入力し、もう1つのチャンネルにステッピングモータへの印加パルス電圧を入力することで行った。ステッピングモータの動作条件としてパルス印加と同時に最大速度である1000 ppsに到達するという条件で切り替え時間測定を行った結果を図11に示す。切り替えに要する時間はおよそ115 msであった。

5. 信頼性試験

5.1 ベルコア試験

開発したVOAモジュールについて、信頼性試験としてベルコア試験（GR-1209, 1221）を実施した結果を以下に示す。

5.1.1 機械的試験

機械的試験として、振動試験（ベルコア1209: 10-55 Hz, 振幅1.52 mm, 2時間）、衝撃試験（ベルコア1221: 6 ft落下, 8サイクル, 3軸×5回）をそれぞれ3モジュールずつ実施した前後における挿入損失の変化、及び、減衰量を挿入損失及び最大減衰量に設定した場合におけるポテンショメータで検出される電圧値の変化（最大電圧に対する%）をそれぞれ図12に示す。

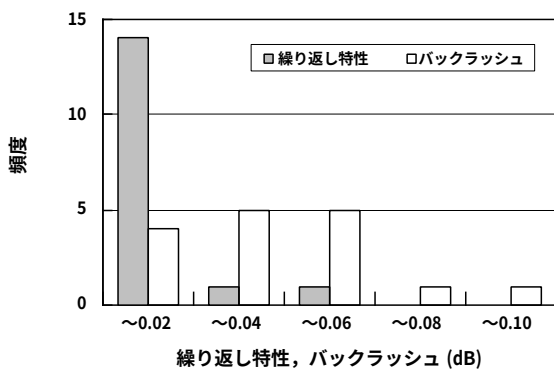


図10 繰り返し特性とバックラッシュのヒストグラム
Histogram of repeatability and backlash

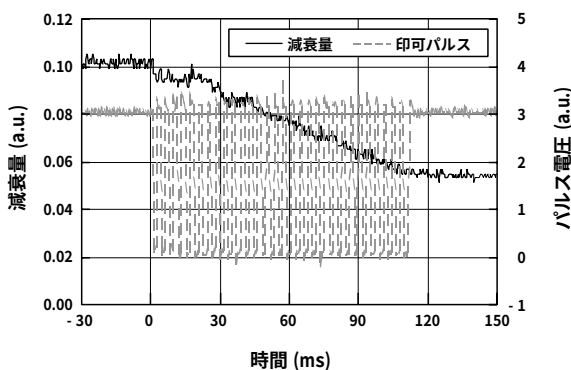


図11 切替時間の測定結果
Results of switching time measurement

各機械的試験後においても、挿入損失、及びポテンショメータ電圧値の変化はほとんど認められておらず、ベルコアの機械的試験をパスしていると考えられる。

5.1.2 環境試験

温度、湿度の環境下における試験として、温度湿度エージング試験（ベルコア1209: 85℃, RH 85%, 14日）、温度湿度サイクル試験（ベルコア1209: -40℃~75℃, RH 10%~80%, 42サイクル, 14日）、高温高湿保持（85℃, RH 85%, 2000時間）、高温保持（85℃, 2000時間）、低温保持（-40℃, 2000時間）の各試験をそれぞれ3モジュールずつ（低温保持試験は2モジュール）実施した前後における挿入損失の変化、及び、減衰量を挿入損失及び最大減衰量に設定した場合におけるポテンショメータで検出される電圧値の変化（最大電圧に対する%）をそれぞれ図13に示す。なお、高温保持試験及び低温保持試験の結果は1000時間後の途中経過であり、試験は現在も継続中である。

各環境試験後においても、挿入損失、及びポテンショメータ電圧値の変化はほとんど認められておらず、ベルコアの環境試験をパスしていると考えられる。

5.2 モータ環境負荷試験

モータ単体についても、90℃温度下放置及び-40℃~75℃温度サイクル試験を実施し、モータ特性の評価を行った。その結果、外観に一部錆（さび）のような変質が見られたものの、プルトルク値、プリアウトトルク値、最大自起動周波数及び最大応答周波数のモータ特性値は試験前後で±10%程度しか変化しておらず、モータ単体としても温度環境下において耐久性があることが確認されている。

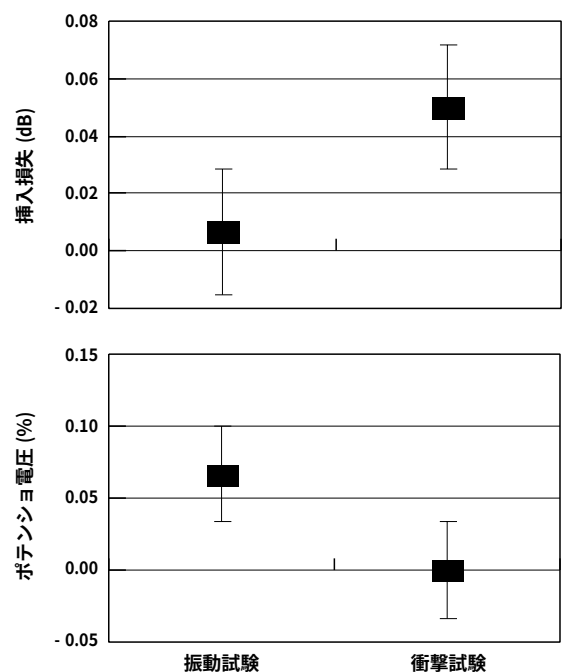


図12 ベルコア機械試験の結果
Results of Bellcore mechanical tests

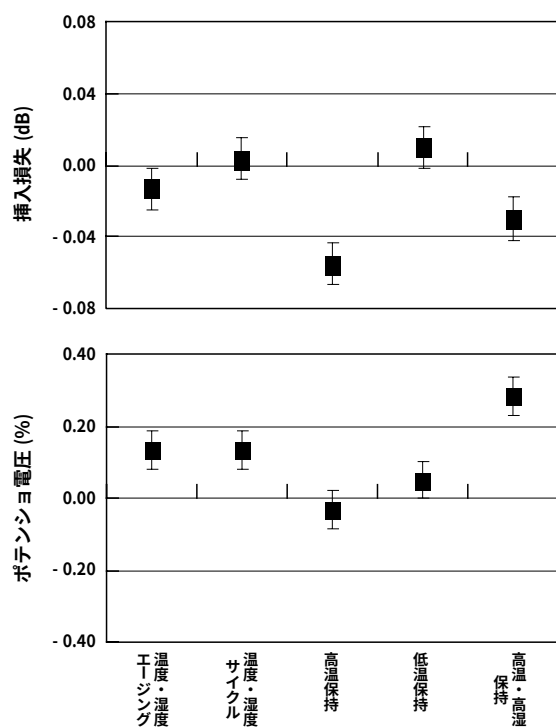


図13 ベルコア環境試験の結果
Results of Bellcore environmental tests

6. まとめ

主として光アンプ中に設置され、光伝送路のダイナミックな損失変動を調整するため外部から電気信号によって減衰量を制御可能な、波長平坦性に優れ、かつ、耐ハイパワー性に優れた小型の変光減衰器 (VOA) を開発した。その結果、開発目標である以下の諸特性を満足することを確認した。

波長帯域:	1525～1610 nm
挿入損失:	< 0.6 dB
反射減衰量:	> 45 dB
波長平坦性:	< 0.2 dB (C, Lバンド) < 0.3 dB (C+Lバンド)
PDL:	< 0.15 dB
温度依存性:	< 0.15 dB
入力パワー:	200 mW
減衰量分解能:	< 0.1 dB/ステップ
繰り返し設定精度:	< 0.1 dB
バックラッシュ:	< 0.2 dB
サイズ (幅×長さ×高さ):	30×50×11 mm

VOA モジュールの信頼性試験としてベルコア試験を実施し、結果が良好であることが確認された。なお、高温保持、及び、低温保持試験については2000時間に向け試験を継続中である。

参考文献

- 1) 水野一庸, 西 泰宏, 味村 裕, 飯田義隆, 松浦 寛, 尹 大烈, 麻生 修, 山本敏郎, 虎谷智明, 小野義視, 安 燁: 古河電工時報 105号, (2000) 36.
- 2) S.Kinoshita, Y.Sugaya, H.Onaka, M.Takeda, C.Ohshima, and T.Chikama: Optical Amplifiers and Their Applications, (1997), 49.
- 3) "可変光アッテネータの製品動向": OPTOCOM, May, (2000), 64.