

# 高信頼性を有する広域温度動作(-30 ~ 70°C)型 アサーマルAWGモジュールの開発

## Development of Wide-Operating Temperature Range (-30 ~ 70°C) Athermal AWG Module with High Reliability

長谷川 淳一\*  
Junichi Hasegawa

奈良 一孝\*  
Kazutaka Nara

**概要** 従来のアサーマルAWGモジュールの温度依存性の原因を明確にし、更に温度依存性を低減させた広域温度動作(-30 ~ 70°C)型アサーマルAWGモジュールを開発した。開発したモジュールの中心波長の温度依存性は、-30 ~ 70°Cにおいて、すべてのチャンネルで±0.015 nm以下である。また、屋外設置を想定した信頼性試験を実施し、本モジュールが極めて高い信頼性を有していることを確認した。

### 1. はじめに

多様化が進む光通信ネットワークを構築する上で、波長合分波器の役割を担うAWG(arrayed waveguide grating)のアサーマル(温度無依存)化は、欠かせない要求になっている。我々は、この要求を満たすべく独自のアサーマルAWG原理を考案し、様々なアサーマルAWGモジュールを開発してきた<sup>1)~3)</sup>。ところで、近年では、次世代通信であるWDM-PON(wavelength division multiplexing-passive optical network)システムの研究開発が、韓国を中心として盛んに行われている。このシステムでは、波長合分波器を用いて、各ユーザに異なる波長の光を割り当てるため、ユーザごとに独立した方式、速度を提供することができる。その波長合分波器として、多チャンネル化、量産化に有利なAWGモジュールを使用した試みがこれまでに数多く報告されている<sup>4) 5)</sup>。図1にWDM-PONシステムの概略図を示す。図のように、AWGモジュールは、通常のPONシステムで使用されている光スプリッタと同様に屋外(例えば、クロージャなど)に設置される。このため、AWGモジュールの要求特性として、アサーマル化、高い信頼性、使用温度の広域化

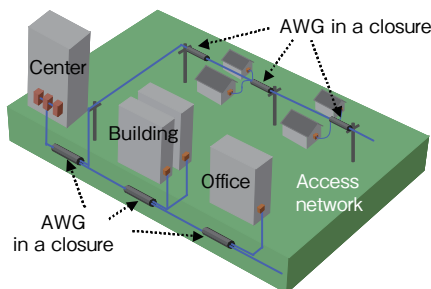


図1 WDM-PONシステムの概略図  
Outline of WDM-PON system.

(-30 ~ 70°C)が挙げられる。今回は、この使用温度の広域化の要求に応えるべく、従来のアサーマルAWGモジュールの僅かに生じる温度依存性の原因を理論的に明確にし、その現象の理解から、中心波長の温度依存性を更に低減させたアサーマルAWGモジュールを開発したので報告する。更に、屋外設置を想定した信頼性試験を実施し、モジュールの高い信頼性を確認したので併せて報告する。

### 2. 従来のアサーマルAWGモジュールにおける 中心波長の温度依存性の原因解明

#### 2.1 従来のアサーマルAWGの構成及び温度依存性

図2(a)に従来のアサーマルAWGの概略図を示す。一方のスラブ導波路部でAWGチップが回路ごと切断されており、補償板である銅板にそれぞれ接続されている。温度の変化に伴う補償板の伸縮により、出力導波路の位置を移動させることができる。図2(b)に温度補償のメカニズムを模式的に示す。温度

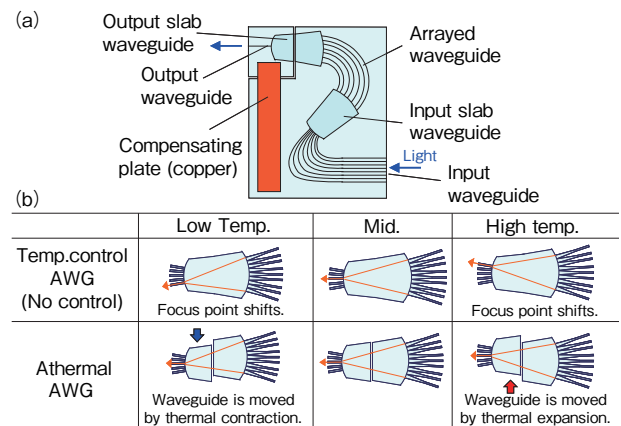


図2 アサーマルAWGの構造の概略図  
Schematic configuration of athermal AWG.

\* 研究開発本部 ファイテルフォトンクス研究所

制御型AWG(温度制御無しの場合)は、温度が変化すると、図に示すように集光位置がシフトし、中心波長が変化する。一方、アサーマルAWGは、温度が変化すると、同様に集光位置はシフトするが、そのシフトした位置に銅板の伸縮により、出力導波路を移動することができるため中心波長は補償される。その移動距離は銅板の長さで調整される。図3に従来のアサーマルAWGモジュールの中心波長の温度依存性を示す。その温度依存性は僅かに下に凸の形状を有しており、一般的な局内の仕様である使用温度範囲-5~70℃において、中心波長の温度依存性は±0.015 nm以下を実現している。しかしながら、使用温度範囲を更に拡大させると、その値は大きくなり、実用上無視できなくなってしまう。このため、AWGモジュールが、使用温度の広域化が求められるWDM-PONシステムに適用されるためには、中心波長の温度依存性を更に低減することが求められる。

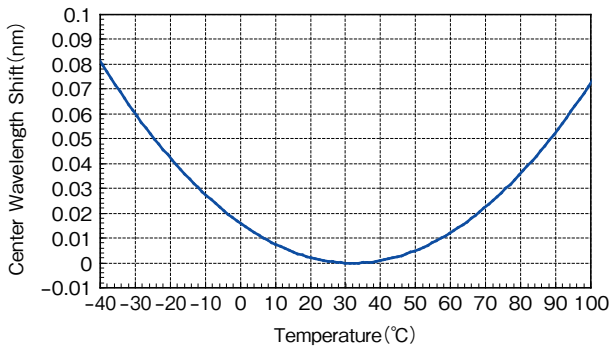


図3 従来のアサーマルAWGモジュールの温度依存性  
Temperature dependence of conventional athermal AWG module.

### 2.2 下に凸の中心波長温度依存性の原因の理論的説明

初めに、下に凸の中心波長の温度依存性が生じる原因について、我々はAWGの温度依存性の主な原因であるAWGを構成する石英系ガラスの屈折率温度依存性に着目した。一般に石英系ガラスの屈折率温度依存性  $dn/dT \sim 8 \times 10^{-6}$  と一定値で表現されている。しかしながら、実際は一定値ではなく、この屈折率温度依存性自体が温度  $T$  の関数となっていることが報告されている<sup>6)</sup>。石英系ガラスの屈折率  $n$  は波長依存性も含め、式(1)に示すセルマイヤー多項式で表される。

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{b_i^2 - (hc/\lambda)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $h$ :プランク定数、 $c$ :光速、 $\lambda$ :波長であり、更に  $a_i$ ,  $b_i$  は式(2)で表される温度特性を考慮したセルマイヤー係数である。 $a_i$  は調和振動子の振動強度、単位体積当たりの振動数に依存し、 $b_i$  は振動子の共鳴エネルギーに依存している。

$$\begin{aligned} a_i &= a_{i0} + a_{i1}T + a_{i2}T^2 \\ b_i &= b_{i0} + b_{i1}T + b_{i2}T^2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、各パラメータを表1に示す。

以上の式(1)、式(2)及び表1を用いて石英系ガラスの屈折率温度依存性を計算すると、屈折率温度依存性は、図4に示すように、ほぼ直線的な特性になる。これは、石英系ガラスの屈折率は、温度に対して2次曲線的に変化することを意味している。

表1 温度特性を考慮したセルマイヤー係数のパラメータ Sellmeier's parameters considering temperature dependence.

		i=1	i=2	i=3
$a_{i0}$	eV <sup>2</sup>	228.7018	46.40806	0.014173
$a_{i1}$	eV <sup>2</sup> /°C	4.930E-05	-3.270E-05	-1.704E-06
$a_{i2}$	eV <sup>2</sup> /°C <sup>2</sup>	1.100E-07	-3.780E-08	-2.140E-09
$b_{i0}$	eV	18.11163	10.671082	0.125
$b_{i1}$	eV/°C	9.150E-06	-2.991E-04	0
$b_{i2}$	eV/°C <sup>2</sup>	7.478E-08	-4.807E-07	0

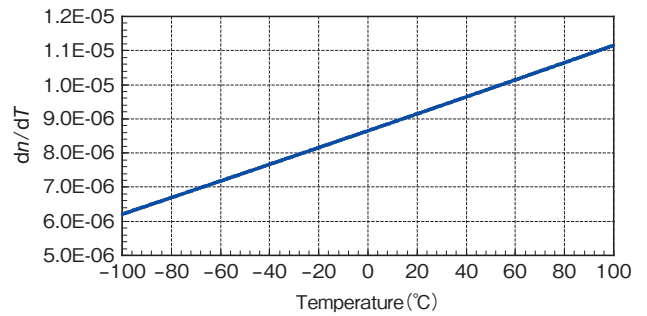


図4 石英系ガラスの屈折率の温度依存性  
Temperature dependence of refractive index of silica-based materials.

続いて、AWGの中心波長の温度特性を計算する。今回計算に用いたAWGの回路パラメータを表2に示す。

表2 AWGの回路パラメータ  
Circuit parameters of AWG.

Channel spacing (GHz)		100
Channel number		40
Focal length of slab waveguide (mm)	$L_f$	17.2
Diffraction order	$m$	29
Pitch of adjacent arrayed waveguide ( $\mu\text{m}$ )	$d$	13.8
Path length difference of arrayed waveguide ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta L$	31.0
Group index of arrayed waveguide at R.T.	$n_g$	1.4760
Effective index of slab waveguide at R.T.	$n_s$	1.537
Effective index of arrayed waveguide at R.T.	$n_c$	1.4514

これらのパラメータを用いて、AWGの中心波長  $\lambda$  は式(3)で与えられる。

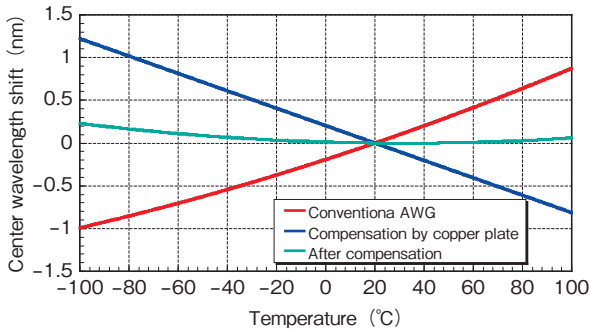
$$\lambda = \frac{\Delta L}{m} n_c \quad (3)$$

この式(3)より、中心波長温度特性を把握するためには  $n_c$  の温度変化を正確に見積もる必要がある。そこで、式(1)及び式(2)を用いて算出した値をクラッドガラスの屈折率とし、その値に一律に  $\Delta=0.8\%$  を上乘せた値をコアガラスの屈折率とし、更に膜厚及び線幅を  $6.5 \mu\text{m}$  の条件のもと、等価屈折率法を用いて、 $n_c$  の温度変化を計算した。

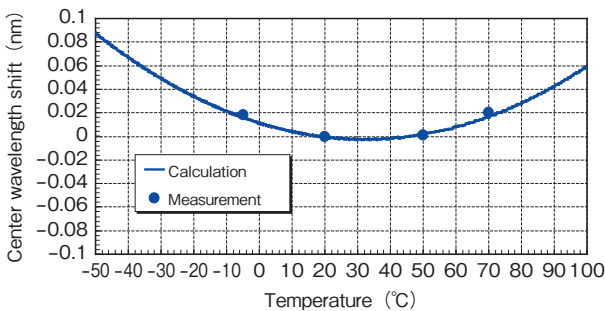
一方、我々のアサーマルAWGは銅板の線膨張率を利用して、ほぼ直線的に温度補償をしている。使用温度範囲を  $-5 \sim 70^\circ\text{C}$  とし、その温度範囲において、中心波長の温度依存性が最も小さくなるように銅板の長さを調整している。

以上の議論をもとにAWGの中心波長の温度特性、銅板を使用した温度補償、更にはそれらから求められる従来のアサーマ

ルAWGの中心波長温度特性の計算結果を図5(a)に示す。いずれの場合も20℃で設計波長に合致するように規格化している。銅板による温度補償はほぼ直線的に変化するのに対して、AWGの中心波長の温度特性は、石英系ガラスの屈折率温度依存性が一定値ではないため、2次曲線的に変化している。このため、補償後の中心波長の温度依存性は僅かに下に凸の形状を有することになる。この一連の計算より、アサーマルAWGの中心波長の温度特性が下に凸の形状となる原因は、2次曲線変化を持つAWGの中心波長温度特性が、ほぼ直線変化を有する銅板によって補償されることにあることが分かった。また、図5(b)に示すとおり、計算より得られた温度依存性は、実測したアサーマルAWGモジュールの中心波長の温度特性と一致している。



(a) 計算結果  
Calculation result.



(b) 測定結果との比較  
Comparison with measurement result.

図5 アサーマルAWGの中心波長の温度特性  
Temperature dependence of the center wavelength of conventional athermal AWG.

### 3. 完全にアサーマル化するための補償板の線膨張特性

上記の計算結果より、直線変化ではないAWGの中心波長温度特性と一致する補償板が存在すれば、完全にアサーマル化できることになる。そこで、補償板に要求される線膨張特性を算出した。まず、アサーマルAWGで使用する位置補償量 $dx$ は表2に示すAWGの回路パラメータを用いて式(4)で与えられる。

$$dx = \frac{L_i m n_g}{n_c d n_c} \left( \frac{d\lambda}{dT} \right) (T - 20) \quad (4)$$

ここで、温度は20℃からの変化量として記述した。更に、中心波長の温度依存性 $d\lambda/dT$ は以下の式(5)で与えられる。

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda}{n_c} \left( \frac{dn_c}{dT} \right) + \lambda \alpha_s \quad (5)$$

ここで、 $\alpha_s$ はAWGの基板材料であるシリコンの線膨張係数( $\alpha_s = 3.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )である。図6に式(4)、式(5)及び式(3)を用いて、完全にアサーマル化するための位置補償量 $dx$ を計算した結果を示す。

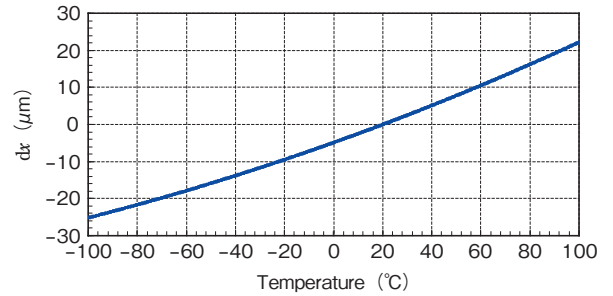


図6 完全にアサーマル化するための位置補償量 $dx$ の計算結果  
Calculation result of  $dx$  for complete athermalization.

この図から、求められる位置補償量 $dx$ は温度に対して、2次曲線変化を有していることが分かる。更に、 $dx$ の温度依存性 $d(dx)/dT$ を計算すると、式(6)で表される。

$$\frac{d(dx)}{dT} = (6.74 \times 10^{-4})T + 0.237 \quad (6)$$

$d(dx)/dT$ の変化率を満たす材料を補償板として選定すれば、完全にアサーマル化できることになる。図7に計算された $d(dx)/dT$ の変化率と一般的な金属材料の変化率との比較を示す。この計算された変化率は、金属材料にとって極めて大きな値であることが分かる。そこで、我々は、金属材料の中でも $d(dx)/dT$ の変化率が大きい材料である純アルミニウム(JIS A1050)を選定した。

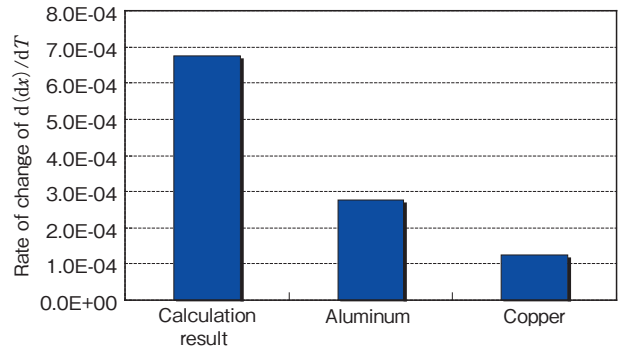


図7 金属材料の変化率との比較  
Comparison of the rate of change of  $dx$  with metal materials.

### 4. 作製結果

FHD法、フォトリソグラフィ、反応性イオンエッチングを組み合わせたPLC作製技術で、100 GHz/40 chのAWGチップを作製した。そのチップをスラブ導波路部で切断し、補償板として純アルミニウム(JIS A1050)板を接続し、アサーマル化を行った。その後、AWGチップにファイバアレイを接続し、パッケージングを行った。図8に作製したアサーマルAWGモジュールの外観写真を示す。パッケージサイズは130×65×8.5 mmと小型化及び薄型化を実現している。



図8 100 GHz-40 ch アサーマル AWG モジュールの外観  
Appearance of athermal AWG module.

図9に100 GHz-40 ch アサーマル AWG モジュールのスペクトラムを示す。挿入損失2.5 dB (1.8 ~ 2.5 dB) 以下、クロストーク-30 dB以下の良好な光学特性が得られた。なお、アサーマル化による光学特性の劣化は無かった。

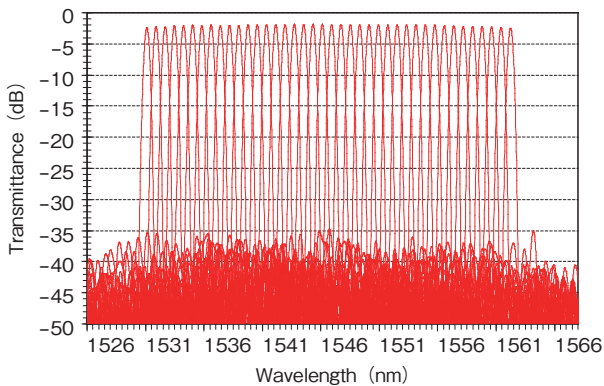


図9 100 GHz-40 ch アサーマル AWG モジュールのスペクトラム  
Spectrum of 100 GHz-40 ch athermal AWG module.

図10に中心波長の温度依存性を示す。比較のために銅板で作製した従来のアサーマル AWG モジュールの温度依存性も併せて示す。純アルミニウムで作製したモジュールの温度依存性は、すべてのチャンネルで、-30 ~ 70°Cにおいて±0.015 nm以下を実現しており、従来よりも大幅に低減されていることが分かる。また、挿入損失変動は±0.1 dB以下であった。図11にスペクトラムの温度依存性を示す。いずれの温度においてもスペクトラムの劣化は見られず、その他の光学特性も安定していることを確認した。

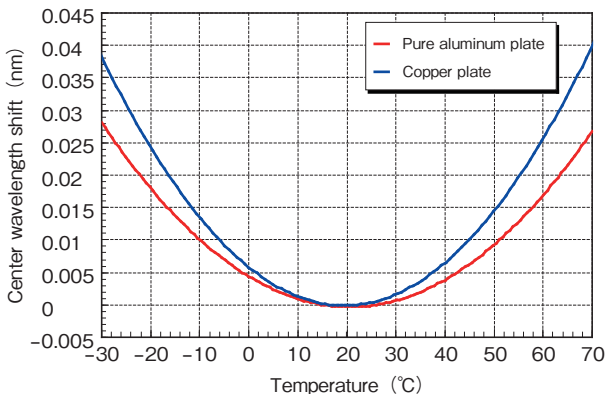


図10 中心波長の温度依存性  
Temperature dependence of center wavelength.

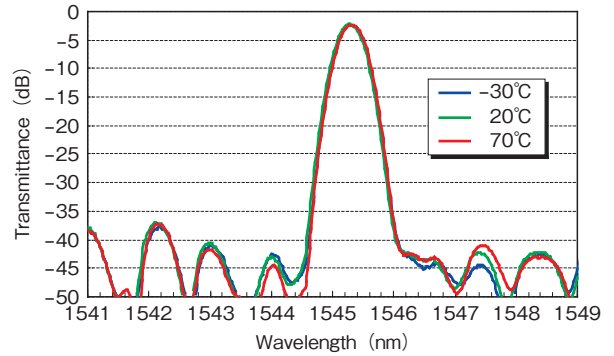


図11 スペクトラムの温度依存性  
Temperature dependence of spectrum.

### 5. 屋外設置を想定した信頼性試験

これまでに、我々はこのアサーマル AWG モジュールの信頼性特性評価のため、Telcordia GR-1221 及び GR-1209 に準拠した一連の試験を実施し、問題のないことを確認してきた。しかしながら、屋外使用時には、過酷な環境下に置かれる可能性があるため、モジュールの極めて高い信頼性が求められる。そこで、屋外設置時のモジュールに起こりうるあらゆる状況を想定し、衝撃、振動印加時の挿入損失のモニタリング試験、浸水試験、更には Telcordia GR-1221 を超えた長期間の高温高湿試験及びヒートサイクル試験を実施した。

初めに、図12にモニタリング試験の測定構成を示す。波長可変光源及び波長計を使用してモジュールに光を入射させ、指定のサンプリング周期で各試験において挿入損失変動をモニタした。なお、図12に示す各方向 (Direction A, B, C) においてそれぞれ挿入損失変動を測定した。図13(a)にモニタリング衝撃試験 (50 G, 5 times, 6 directions) 結果及び (b) にモニタリング振動試験 (20 G, 20-2000 Hz, 4 min/cycle, 4 cycles/axis) 結果をそれぞれ示す。各方向ともに衝撃や振動印加時に挿入損失変動は全く無いことが分かる。図14に浸水試験 (43 ± 2°C, pH5 ± 0.5, 336 h) 結果を示す。各図は、初期値からの変動を示している。浸水336 h後においても中心波長変動、挿入損失変動はほとんど見られなかった。また、図15(a), (b)に、高温高湿試験 (85°C, 85%RH, 5000 h) 及びヒートサイクル試験 (-40 ~ 85°C, 1650 cycles) の結果をそれぞれ示す。これら

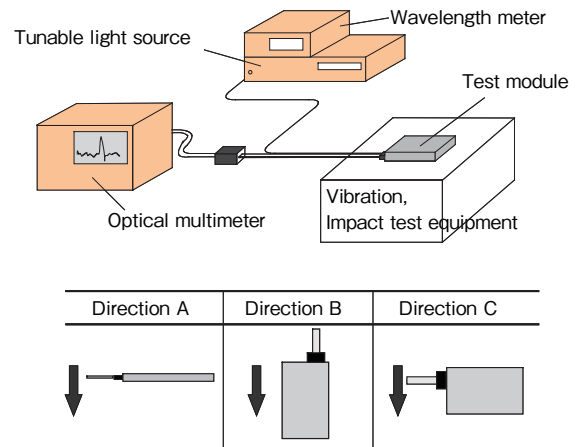


図12 モニタリング試験構成と試験方向  
Outline of monitoring tests and test directions.

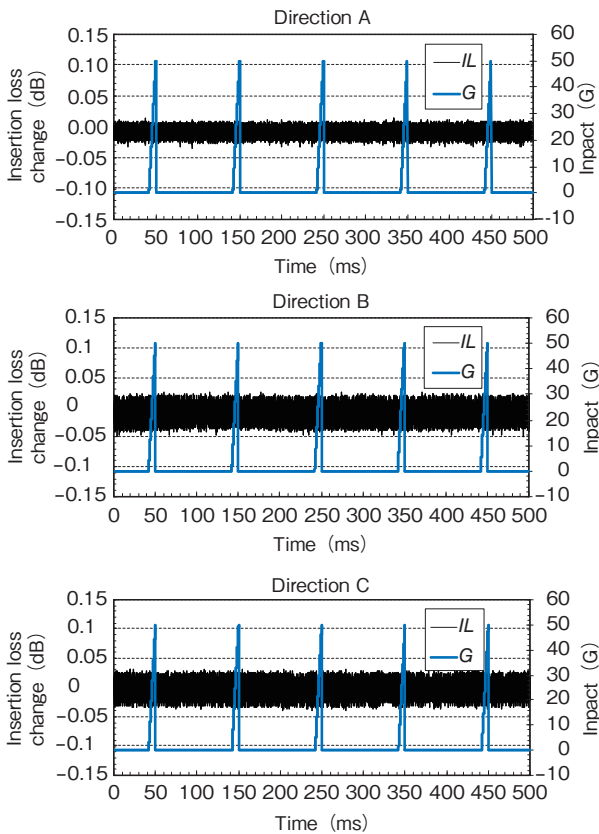


図13 (a) モニタリング衝撃試験結果  
Result of monitoring impact test.

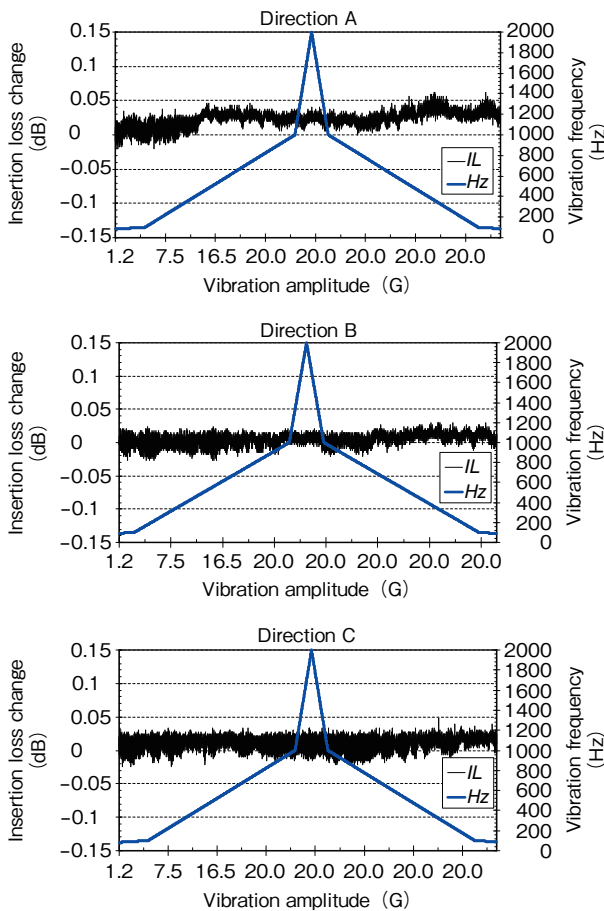


図13 (b) モニタリング振動試験結果  
Result of monitoring vibration test.

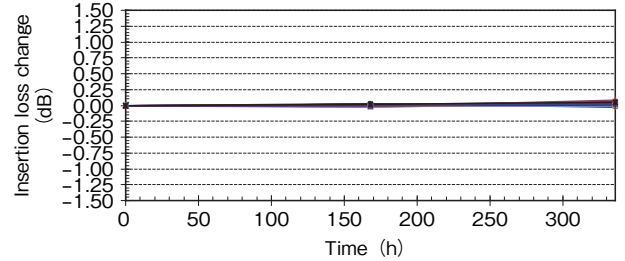
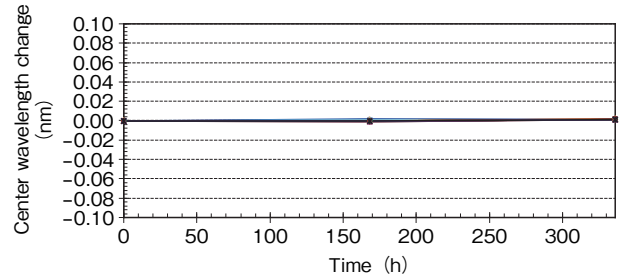


図14 浸水試験結果  
Result of water immersion test.

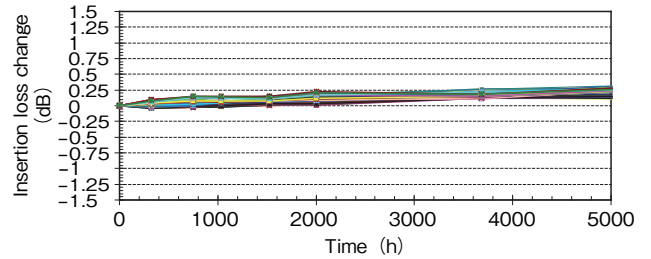
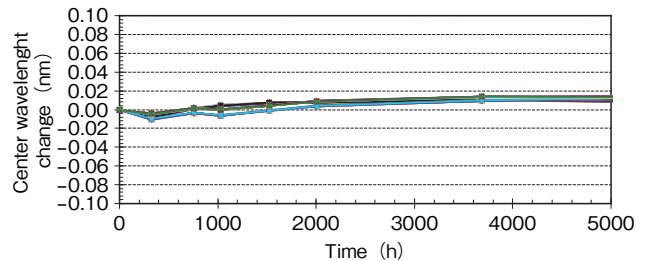


図15 (a) 長期高温高湿試験  
Result of ultra-long term dump heat test.

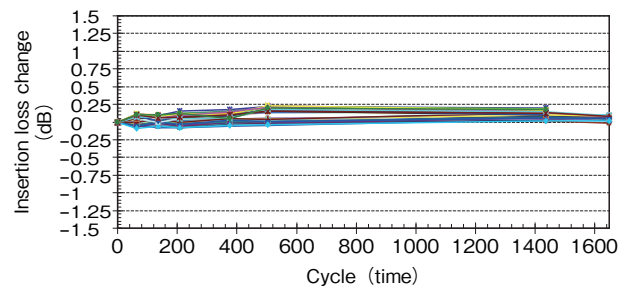
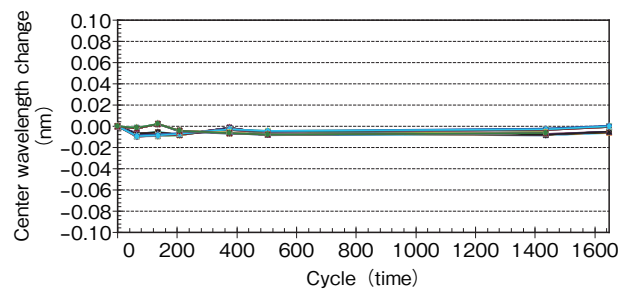


図15 (b) 長期ヒートサイクル試験  
Result of ultra-long term temperature cycling test.

の長期に渡る過酷な試験に対しても、中心波長及び挿入損失は非常に安定している結果が得られた。以上の試験結果から、このアサーマルAWGモジュールは極めて高い信頼性を有しており、屋外に設置できる強固なモジュールであることを確認した。

## 6. おわりに

我々は、従来のアサーマルAWGモジュールの中心波長の温度依存性の原因を理論的に明確にし、その温度依存性を更に低減させた屋外に設置可能な、アサーマルAWGモジュールを開発した。開発したモジュールは、-30 ~ 70°Cの温度範囲に対して、中心波長の温度依存性 $\pm 0.015$  nm以下を実現しており、極めて高い信頼性を有している。

## 参考文献

- 1) T. Saito et al.: OFC2003, MF47, (2003), 57.
- 2) J. Hasegawa et al.: OFC2005, OTuD5, (2005).
- 3) J. Hasegawa et al.: OECC2005, 7E3-3, (2005).
- 4) D. J. Shin et al.: OFC2005, PDP36, (2005).
- 5) Soo-Jin Park et al.: Journal of Lightwave Tech., **22** (2004), 2582.
- 6) J. Matsuda et al.: Journal of Non-Crystalline Solids, **135** (1991), 86.