

OITDA規格
TP
Technical Paper

TP（技術資料）

光増幅器－光増幅器における四光波混合効果の
ための応用ガイド

（英語題名：Application guide for Four-wave mixing
effect in optical amplifiers）

公表 2009 年 5 月

取纏委員会
光増幅器標準化委員会

OITDA
発行：財団法人 光産業技術振興協会
Optoelectronic Industry and Technology Development Association (JAPAN)

これは、光産業技術振興協会の標準に関する TP（技術資料）である。TP（技術資料）は、規格になる前段階、標準化の技術的資料、規格を補足する などのために公表するものである。

まえがき **Background**

DWDM 光ファイバー伝送システムにおける、主要な制限事項のひとつに光増幅器内で **Four-wave mixing (FWM)**がある。しかし、この発生メカニズム、条件、要因等について、数々の報告はされているが、その評価方法等含め業界標準には規定されておらず、光増幅器の各メーカーおよびユーザーが独自に評価を行っているのが現状である。

本文書はこの背景を考慮し、日本国内での規格化に向け技術資料としてまとめたものである。

なお、IEC では、TC86/SC86B において、テクニカルレポートの作成が検討されている。

目次

序文.....	3
1 適用範囲及び目的.....	3
2 引用規格.....	3
3 略語.....	4
3.1 簡略化された用語.....	4
4 EDFA 内の FWM 効果.....	4
4.1 はじめに.....	4
4.2 FWM 効果の導入説明.....	5
4.3 EDFA での FWM クロストーク劣化.....	6
附属書 A (参考) 光増幅器における FWM 効果の測定の方法.....	9
A.1 はじめに.....	9
A.2 装置.....	9
A.3 試験試料.....	13
A.4 手順.....	13
A.5 試験結果.....	17
附属書 B (参考) FWM 測定における測定チャンネル波長光オフの影響.....	19
B.1 はじめに.....	19
B.2 FWM 光をを発生させる信号チャンネル組合せ数.....	19
B.3 FWM 光パワー計算結果.....	19
B.4 結果と考察.....	20
参考文献.....	23
解説.....	24

TP（技術資料）

光増幅器—光増幅器における四光波混合効果のための応用ガイド (英語題名：Application guide for Four-wave mixing effect in optical amplifiers)

序文

本文書は日本国内の規格化に向け光増幅器における四光波混合効果効果に関する技術資料としてまとめたものである。

1 適用範囲及び目的

この OITDA 規格は商用に使用される Er を添加した能動ファイバおよび導波路型光増幅器を用いた光増幅器に適用される。

この技術標準は光増幅器の FWM 効果に関する指針を提供する。この文書の目的は FWM 効果によるクロストーク劣化の問題に関する理解のための導入的な情報を与えることである。本文書は附属書として、推奨される測定方法も提示する。

2 引用規格

次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、西暦年を付記してあるものは、記載の年の版を適用し、その後の改正版（追補を含む。）には適用しない。西暦年の付記がない引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

注 参考文献は目録を参照のこと

IEC 61291-1: *Optical fibre amplifiers – Part 1: Generic specification*

→対応 JIS 規格: JIS C 6121 光ファイバ増幅器通則

IEC 61290-1: *Optical amplifiers – Test methods – Optical power and gain parameters – Part 1-1: Optical spectrum analyzer method*

→対応 JIS 規格: JIS C 6122-1 光ファイバ増幅器 — 測定方法 — 第 1 部：利得パラメータ測定方法

IEC 61290-3: *Optical fibre amplifiers - Basic specification – Part 3: Test methods for noise figure parameters*

→対応 JIS 規格: JIS C 6122-3 光ファイバ増幅器 — 測定方法 — 第 3 部：雑音指数パラメータ測定方法

IEC 61290-10-4: *Optical amplifiers – Test methods – Part 10-4: Direct interpolation method for gain and noise figure*

→対応 JIS 規格: JIS 化未済

3 略語

3.1 簡略化された用語

EDF	erbium-doped fibre	希土類添加光ファイバ
EDFA	erbium-doped fibre amplifier	希土類添加光ファイバ増幅器
OFA	optical fibre amplifier	光ファイバ増幅器
OA	optical amplifier	光増幅器
ASE	amplified spontaneous emission	増幅された自然放出光
FWM	four-wave mixing	四光波混合
XPM	cross-phase modulation	相互位相変調
SPM	self-phase modulation	自己位相変調
WDM	wavelength division multiplexing	波長多重
DWDM	dense wavelength division multiplexing	高密度波長多重
ROADM	reconfigurable optical add/drop multiplexer	(再構成可能型光合分波装置)
WSS	wavelength selectable switch	(波長選択型光スイッチ)
OSA	optical spectrum analyzer	光スペクトラムアナライザ
MUX	multiplexer	合波器
O-MUX	optical multiplexer	光合波器
AWG	arrayed waveguide	(アレイ導波路型回折格子)
VOA	variable optical attenuator	光可変減衰器
CW	continuous wave	連続波
DFB	distributed feed-back (laser diode)	分布帰還型 (半導体レーザ)
ECL	external cavity laser (diode)	外部共振器型半導体レーザ
DOP	degree of polarization	偏光度

4 EDFA 内の FWM 効果

4.1 はじめに

EDFA は WDM 伝送に基づくフォトニックネットワーク・システムを構成する重要な要素である。EDFA は ROADM や WSS などのノードデバイスの損失を補償し、大規模ネットワークの伝送容量と伝送距離を拡大する。したがって EDFA は DWDM 信号の多くのチャンネルを増幅することを要求され、ノードデバイスと伝送ファイバの損失補償のために各チャンネルを高出力に増幅することも求められる。これらの要求は近年、EDF の非線形効果を引き起こし、DWDM 信号に対して相反的に信号劣化を発生させている。以前は、この非線形効果が信号光に及ぼす影響は小さかったので、十分には考慮されていなかった。

L 帯用 EDFA に関しては、1.58um 帯の誘導放出断面積が 1.55um 帯に比較して、非常に小さい。最初の実証された L 帯用光増幅器は、20dB-30dB の利得を実現するために、通常の C 帯用光増幅器に比較して 10 倍程度長い EDF 長を必要とした。したがって、当初、非線形効果による信号劣化の重大な問題は、長い EDF 長を用いる L 帯用光増幅器で報告された[1]。通常、多波長増幅における FWM 効果は長い EDF で構成される EDFA、または高出力 EDFA で観測される。この技術報告書は、EDFA の FWM(四光波混合)効果によって引き起こされるクロストークを測定するための方法と手順を提供する。

4.2 FWM 効果の導入説明

EDF 内の非線形効果は伝送ファイバと同様に、EDF の三次の誘電分極率に起因し、FWM（四光波混合）効果、XPM（相互位相変調）効果、SPM（自己位相変調）効果を引き起こす[2][6]。FWM 効果では、波長多重信号が他の波長にノイズ光を発生させる。したがって、DWDM 伝送システムにおいては、クロストークは信号光と FWM 効果によるノイズ光の間で発生する。図 1 は FWM 光の発生について説明するための概要図である。

3 つの異なる波長の信号光が EDFA に入射されるとき、新しい光(アイドラー光)が FWM 効果で発生する。新たに発生したアイドラー光は、前述の 3 つの波長のいずれにも該当しない。

信号周波数が f_p 、 f_q 、 f_r であるとき、FWM 効果によって引き起こされ、発生したアイドラー光は、以下のように表現される。

$$\begin{aligned} f_F &= f_{p,q,r} \\ &= f_p + f_q - f_r \end{aligned} \quad (1)$$

発生した FWM 光は信号光と重なり、クロストークによる信号劣化が重畳される。

3 つの異なる波長による FWM アイドラー光の発生以外に、2 つの異なる波長の信号光が EDFA に入射された場合にも FWM 光は発生する。2 つの波長によるこの FWM 効果は縮退四光波混合と呼ばれる。

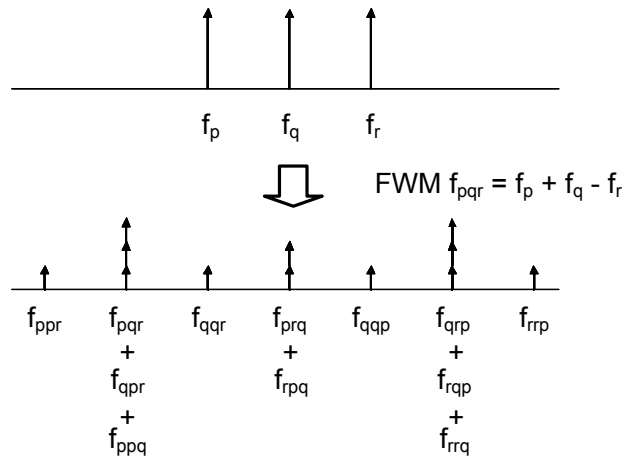


図 1 FWM 光の発生の例

4.3 EDFA での FWM クロストーク劣化

基本的なレベルでは、材料での非線形応答の原因は、その材料が受ける電場の影響を受けた束縛電子の非調和な運動に関する。その結果、電気双極子からの誘電分極 P は、電場 E に対し直線的でなく、下記式に従うように表現される[2]。

$$P = \chi_1 E + \chi_2 E \cdot E + \chi_3 E \cdot E \cdot E + \dots \quad (2)$$

第一項は線形な効果を表し、第二項は二次の非線形性、第三項は三次の非線形性を表す。 χ_1 、 χ_2 、 χ_3 は、それぞれ、一次、二次、三次の電気感受率である。

二次の電気感受率 χ_2 は、二次の調和（振動）発生と和周波数発生のような非線形効果の要因である。しかしながら、 χ_2 は媒質が分子レベルで反転対称を欠く場合にのみ、ゼロではない。 SiO_2 は左右対称の分子であるので、 χ_2 はシリカガラスの場合には（ゼロとみなされ）無くなる。その結果、通常光ファイバは二次の非線形効果を生じない。

光ファイバで最も次数の低い非線形効果は、FWM などの現象の要因である三次の電気感受率 χ_3 に起因する。したがって、FWM を引き起こす非線形効果は、上記式(2)の第三項により発生する。

式(2)より、信号周波数 ω_p 、 ω_q 、 ω_r 、およびそれぞれの電場を $E(\omega_p, z)$ 、 $E(\omega_q, z)$ 、 $E(\omega_r, z)$ と仮定すると、FWM 効果による電場 $E(\omega_F, z)$ による電場の伝搬方程式を記述できる[4]。記号 z はファイバ長に沿った位置を表す。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 E(\omega_F, z)}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E(\omega_F, z)}{\partial t^2} - \frac{\zeta^2}{c} \frac{\partial E(\omega_F, z)}{\partial t} \\ & = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (D\chi_3) \cdot E(\omega_p, z) \cdot E(\omega_q, z) \cdot E^*(\omega_r, z) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 n はコア屈折率、 c は光の速度、 D は FWM の縮退度である。EDF の背景損失は ζ によって表される。

EDF へ入射される $E(\omega_p, 0)$, $E(\omega_q, 0)$, $E(\omega_r, 0)$ で表現された 3 つの光の境界条件を仮定し、EDF 長手方向の利得配分を考慮すると、 $z=L$ の位置で出射される FWM 光パワーは下記のように表現される[文献 5,8]。

$$\begin{aligned} P(\omega_F, L) &= \frac{256\pi^4 \omega_F}{n^4 c^4} \left(\frac{D\chi_3}{A_{eff}} \right)^2 P(\omega_p, 0) \cdot P(\omega_q, 0) \cdot P(\omega_r, 0) \\ & \times \left| e^{i\beta_r z} \int_0^L e^{i\Delta\beta z} \sqrt{G(\omega_p)|_0^z \cdot G(\omega_q)|_0^z \cdot G(\omega_r)|_0^z \cdot G(\omega_F)|_z^L} dz \right|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $P(\omega_p, 0)$ 、 $P(\omega_q, 0)$ 、 $P(\omega_r, 0)$ はそれぞれ EDF への入力光パワーであり、そして、 βF は FWM 光の伝搬定数を表す。 $G(\omega_p)$ 、 $G(\omega_q)$ 、 $G(\omega_r)$ は、周波数 ω_p 、 ω_q 、 ω_r における利得係数を表す。伝搬定数差 $\Delta\beta$ は文献[7,8]より下記のように記述される。

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_r^4}{c} D_c (f_p - f_r)(f_q - f_r) \quad (5)$$

ここで $f_j = \omega_j / 2\pi$ ($j = p, q, r$) であり、 $\lambda_r = c/f_r$ であり、 D_c は EDF の波長分散である。 $\Delta\beta$ は角周波数 ω_p 、 ω_q 、 ω_r での入力光パワーにおける伝搬定数の差分を示す。 $\Delta\beta$ は EDF の波長分散に起因し、分散が大きければ、 $\Delta\beta$ も大きくなる。結果として、EDFA の FWM 効果は、上記式(4)に示されるように、信号光パワー $P(\omega_p, 0)$ 、 $P(\omega_q, 0)$ 、 $P(\omega_r, 0)$ の増加と、ファイバの相互作用長の増加にともない増強される。

図 2 は異なる EDF で構成される 2 つの EDFA における、FWM 光発生の様子を示す出力スペクトルである。従来の EDF で構成された EDFA における出力スペクトルは左図に示され、増幅された信号光と共に FWM 光の発生が観測される。右図は FWM 効果を抑制するために最適化された EDF を用いた EDFA における出力スペクトルを示す。FWM 光の発生は最適化された EDF の方が、従来の EDF に比較して、緩和されている。右図に示すように FWM 光の発生は、適切な EDF 設計により抑制される。

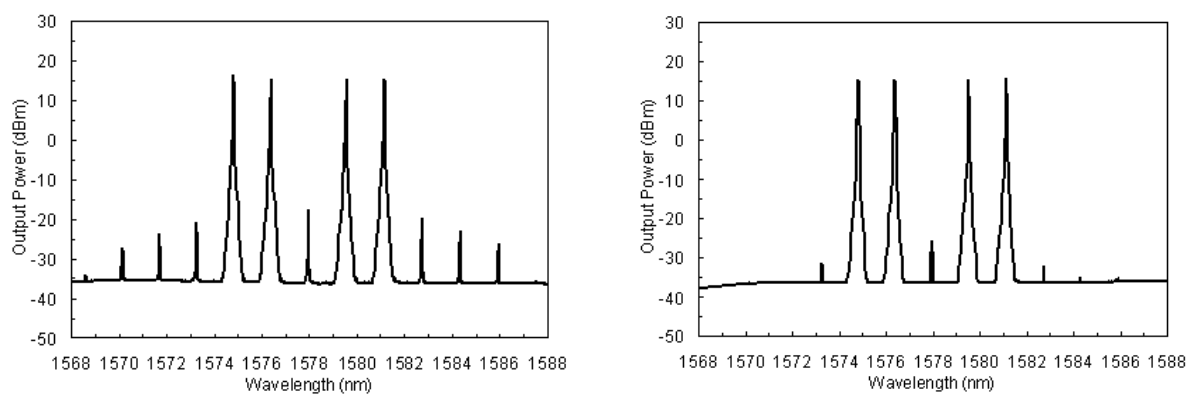


図 2 FWM の影響下にある EDFA の光出力波形の例

附属書 A
(参考)
光増幅器における FWM 効果の測定の方法

A.1 はじめに

通常、複数の WDM 信号光を増幅する光増幅器では、等周波数間隔で配置された N 個の信号光(波長 f_1, f_2, \dots, f_N)が入射される。しかしながら、 N チャンネルの入力光の増幅特性を観測する場合、FWM 光は信号波長上に発生するため、信号光とは分離できない。

本附属書に記載された測定方法では、波長 f_k の信号光が N チャンネルの信号群から除外され、 $N-1$ チャンネルの信号波長が光増幅器に入射される。そして、信号光波長が除外された波長 f_k の FWM 光のパワーと、FWM 光の両隣の波長 $f_{k\pm 1}$ における増幅された信号光パワーが測定される。FWM 効果により発生したクロストークは、 $N-1$ チャンネルの増幅された信号光の測定と N チャンネル入射時の増幅特性の推定により、測定される。

A.2 装置

A.2.1 測定系

基本的な測定系の構成を下記図 A.1 に示す。

測定系、推奨試験条件、手順は次項に示す。

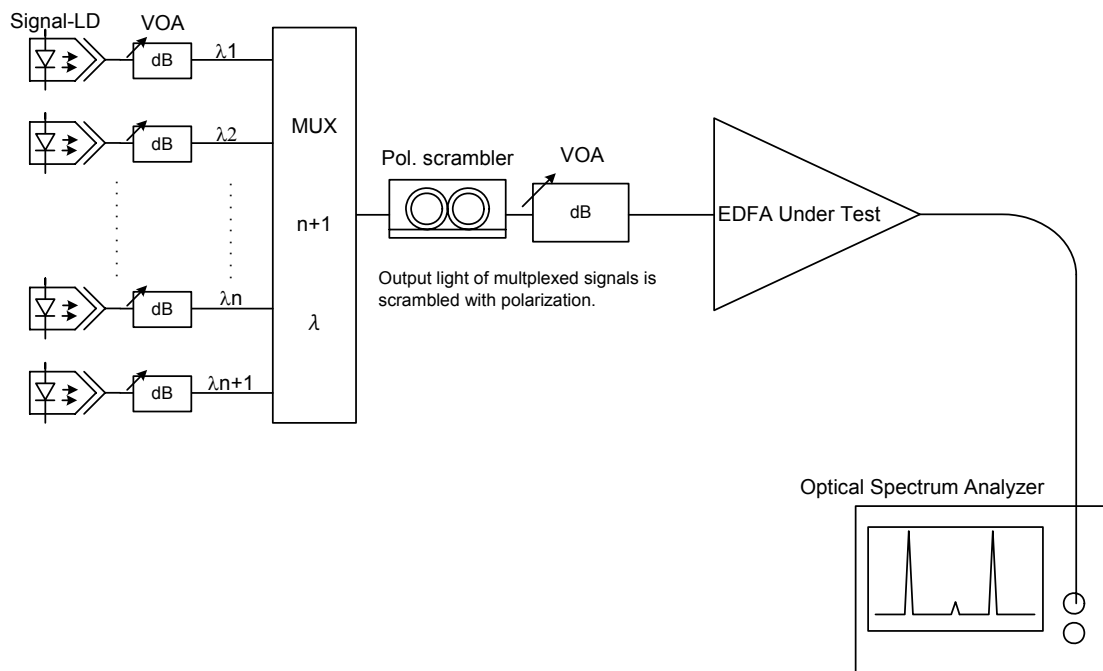


図 A.1 測定系

a) 信号光源

波長が調整可能で波長線幅が **5MHz** 程度のレーザを光源として用いることがよい。通常の **DFB-LD** は適用可能である。複数の信号光源が **CW** モードで同時に光を出力する。信号光源の波長は等周波数間隔で配置される。複数の信号光源から均一な光出力を得るために、信号光源の光出力は調整可能であること。光出力を可変するために、それぞれの信号光源の出力ポートに **VOA** を接続してもよい。

b) 光合波器

光合波器は信号光源から出力される（それぞれの）光を合波するために用いられる。合波器は、挿入損失とクロストークが小さいことが望ましい。**AWG** がこの測定には好適である。

c) 偏波スクランブラ

偏波スクランブラは光合波デバイスの出力側に挿入される。この装置により、**WDM** 信号光は偏波状態がスクランブルされる。この装置は全ての偏波状態を有する（直線偏波、楕円偏波、円偏波）入力信号光の偏波状態をランダム化することができる。この装置は **OSA** のスキャン時間もしくはサンプリング平均化時間より速いレートで偏波状態をスクランブル化するように動作することが要求される。

d) VOA

VOA は被測定光増幅器の入力ポートに挿入される。このデバイスは動作状態の光増幅器の入力信号光を適切なレベルに減衰させる。

e) OSA:

OSA は光増幅器の増幅された信号光と FWM 効果により発生した光を測定するために用いられる。分解能は、信号光源の波長間隔より十分に狭くなるように調整される。（例えば信号光源が 100GHz 間隔で配置されていた場合は、分解能は 0.1nm より十分に狭い。） OSA のスキャン時間は、偏波スクランブラが OSA による一点のサンプリングポイントをスキャンする時間より速い時間で偏波状態をランダム化できるように、調整されなければならない。

A.2.2 測定条件

基本的な推奨試験条件を下記表 A.1 に示す。

表 A.1 推奨試験条件

項目	推奨条件	コメント
信号チャンネル数	40ch (100GHz 間隔) もしくは 80ch (50GHz 間隔)	被測定光増幅器が実用で適用される最大信号チャンネル数
波長間隔	00GHz もしくは 50GHz	被測定光増幅器が実用で適用される WDM 信号光の波長間隔と同じであること。
信号光源の波長精度	+/-12.5GHz (+/-100pm)	+/-12.5GHz は 100GHz 間隔の DFB レーザの一般的な要求仕様である。
入力光パワーの平坦度 (マルチチャンネルパワー偏差)	+/-0.2dB	[最大パワーチャンネル] - [最小パワーチャンネル] (dB)
信号光源の線幅	Typ.5MHz (通常の DFB-LD の線幅)	狭線幅の波長可変光源の代わりにより線幅の広い DFB レーザの方が適している。
光増幅器へのトータル入力パワー	被測定光増幅器の仕様による。	被測定光増幅器の仕様に準拠すること。
光増幅器のトータル出力パワー	被測定光増幅器の仕様による。	被測定光増幅器の仕様に準拠すること。
偏波スクランブル 偏波スクランブル	合波後の信号光源の出力光は偏波スクランブルされる。	項目 A.2.2 g)を参照のこと。

a) 信号チャンネル数：

本測定方法では、光増幅器内の FWM 効果により発生したクロストークは N-1 チャンネルの増幅された信号光の測定と N チャンネル入射時の増幅特性の推定により、測定される。それゆえに、波長 f_k の除外された信号光（観測のために消失した信号光）により、波長 f_k に発生する FWM 光を観測することができない。したがって、信号チャンネル数が少ない場合は、クロストークが過小評価される（詳細は附属書 B に記載）。少ない信号チャンネル数による過小評価を避けるために、信号チャンネル数は実使用状態での WDM 増幅時と同じくらい大きくしなければならない。40 チャンネル以上の入力の場合は、真値からの測定誤差は 0.2dB 程度に緩和されると報告されている。

b) 波長間隔：

測定時の波長間隔は、被測定光増幅器が適用される WDM 伝送システムの動作条件の波長間隔に一致させる。100GHz 間隔の 40 チャンネル入力、もしくは 50GHz 間隔の 80 チャンネル入力が推奨される。

c) 信号光源の波長精度：

信号光源の波長精度は $\pm 12.5\text{GHz}(\pm 100\text{pm})$ より高精度であること。 $\pm 12.5\text{GHz}$ の波長精度要求は 100GHz 間隔の波長可変 DFB レーザの一般的な要求仕様である。

d) 入力光パワーの平坦度（マルチチャンネルパワー偏差）：

入力光パワーの偏差は一定利得動作時に光出力の偏差を生み、FWM の測定誤差を引き起こすため光増幅器への入力光パワー平坦度は $\pm 0.2\text{dB}$ 以下であること。マルチチャンネル利得偏差（利得平坦度）といった光増幅器の動作状態が、 1.0dB 以下であることがよい。

e) 信号光源の線幅：

信号光源の線幅はおよそ 5MHz 程度であることが推奨され、これは DFB-LD の通常値である。狭線幅の波長可変光源よりも線幅の広い DFB-LD を使用するほうが実際の適用を模擬するのに適している。

f) 光増幅器へのトータル入力パワー：

測定時のトータル入力パワーは、被測定光増幅器の仕様上で規定されるトータル入力パワーと一致すること。発生する FWM 光パワーが最大となるように、被測定光増幅器の仕様上で規定される入力レベル範囲内で、トータル入力パワーは最大レベルに調整することが、通常推奨される。

g) 光増幅器のトータル出力パワー：

測定時のトータル出力パワーは、被測定光増幅器の仕様上で規定されるトータル出力パワーと一致すること。発生する FWM 光パワーが最大となるように、被測定光増幅器の仕様上で規定される出力レベル範囲内で、トータル出力パワーは最大レベルに調整することが、通常推奨される。

h) 偏波スクランブル：

偏波スクランブラは、OSA が 1 サンプルポイントをスキャンする時間もしくは 1 サンプルポイントの平均化時間より速いレートで偏波状態をスクランブル化するように動作することが要求される。

A.3 試験試料

光増幅器は WDM 信号光入力による公称動作条件で動作する。光増幅器が不要な反射によるレーザ発振を引き起こす可能性がある場合は、光増幅器の前後に光アイソレータを使用する。これによって信号不安定性と測定誤差を最小にすることができる。

光増幅器の入出力レベル条件は、WDM 伝送システム内の光増幅器の実使用条件でのクロストークを定量化するために、被測定光増幅器の関連仕様の規定条件と一致すること。

A.4 手順

A.4.1 一般

測定手順は以下の 8 つの項目から構成される。

a) 信号光源の波長設定

信号光源の波長を、項目 A.2.2 に従って設定する。被測定光増幅器内で発生した FWM 光を観測するために、信号波長セット内（例 40ch.等）から、被測定チャンネルの信号波長のみオフにされる。

b) 信号光源のパワー設定：

信号光源の出力パワーを調整する。信号光源の出力ポートに接続された VOA は信号光を適切なレベルに減衰するために用いられる。被測定光増幅器の入力光パワー平坦度は、項目 A.2.2 に従って、考慮されなければならない。

c) 偏波スクランブラの設定：

偏波スクランブラを、項目 A.2.2 に従って設定する。

d) 光増幅器の入力光パワー調整

被測定光増幅器のトータル入力パワーを調整する。光増幅器の入力ポートに接続された VOA がトータル入力光パワーを適切なレベルに減衰するために用いられる。詳細は項目 A.2.2 を参照すること。

e) 光増幅器の出力光パワー調整

被測定光増幅器のトータル出力光パワーを調整する。詳細は項目 A.2.2 を参照すること。

f) OSA による測定（信号光）

増幅された信号光レベルを OSA により測定する。詳細は項目 A.4.2 を参照すること。

g) OSAによる測定 (FWM 光)

被測定光増幅器内で発生した FWM 光の出力レベルを OSA により測定する。詳細は項目 A.4.2 を参照すること。

h) クロストークの計算

増幅された信号光レベルと発生した FWM 光レベルの測定結果を用いて、クロストークを計算する。

測定フローを下記図 A.2 に示す。

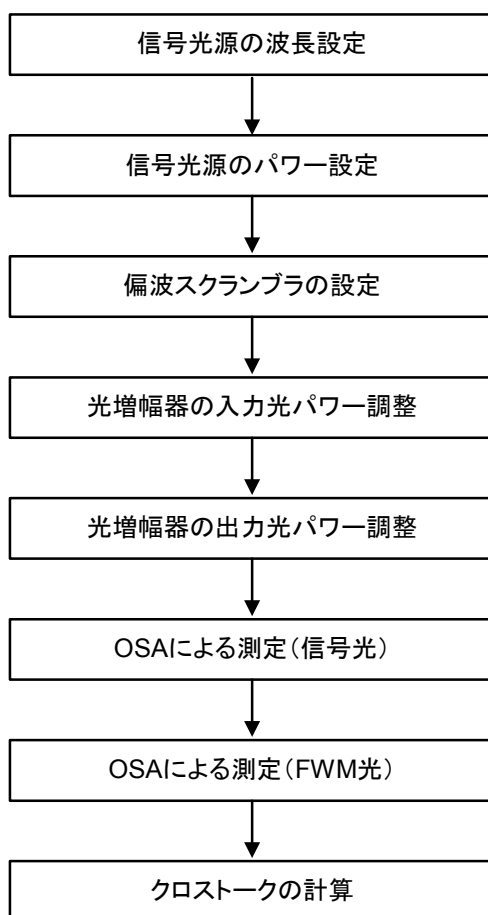


図 A.2 測定フローチャート

A.4.2 OSAによる測定とクロストーク計算

OSAによる測定とクロストーク計算の詳細は本項目に記載される。

OSAによる測定により十分な理解のためには、IEC61290-10-4を参照すること。

a) 信号光源内のただ一つの波長をオフにする：

例として、40ch-100GHzで配置された信号光内から、被測定チャンネル波長に該当する信号光源のみオフにする。クロストーク計算のために、信号光源をオフにした波長に現れるFWM光を観測する。

b) FWM光が現れる波長での信号光パワーの推定：

$P_{SIG}(\lambda_{n-1})$: 等周波数間隔で配置されたチャンネル内の(n-1)番目のチャンネルの増幅された信号光パワー [mW]

$$P_{SIG}(\lambda_{n-1}) = S_{n-1} - ASE_{n-1}$$

: 波長 λ_{n-1} での信号光パワーの真値を定量化するために、測定したレベル S_{n-1} から、ASE要素 ASE_{n-1} を減算する。

S_{n-1} : 波長 λ_{n-1} におけるASE要素を含む測定レベル [mW]

ASE_{n-1} : 波長 λ_{n-1} における補間して得られたASEレベル [mW]

$P_{SIG}(\lambda_{n+1})$: 等周波数間隔で配置されたチャンネル内の(n+1)番目のチャンネルの増幅された信号光パワー [mW]

$$P_{SIG}(\lambda_{n+1}) = S_{n+1} - ASE_{n+1}$$

: 波長 λ_{n+1} での信号光パワーの真値を定量化するために、測定したレベル S_{n+1} から、ASE要素 ASE_{n+1} を減算する。

S_{n+1} : 波長 λ_{n+1} におけるASE要素を含む測定レベル [mW]

ASE_{n+1} : 波長 λ_{n+1} における補間して得られた ASE レベル [mW]

b-1) 信号光パワーの推定、方法 A : 平均値法

発生した FWM 光の両隣の信号光パワーの平均値を計算する。

$P_{SIG}(\lambda_n)$: FWM 光が現れる波長 n 番目のチャンネルでの増幅された信号光出力パワーの推定値 [mW]

$$P_{SIG}(\lambda_n) = \frac{1}{2}(P_{SIG}(\lambda_{n-1}) + P_{SIG}(\lambda_{n+1}))$$

b-2) 信号光パワーの推定、方法 B : 最小値法

発生した FWM 光の両隣の信号光パワーの最小値を用いる。

$P_{SIG}(\lambda_n)$: FWM 光が現れる波長 n 番目のチャンネルでの増幅された信号光出力パワーの推定値 [mW]

$$P_{SIG}(\lambda_n) = \text{Min}(P_{SIG}(\lambda_{n-1}), P_{SIG}(\lambda_{n+1}))$$

被測定チャンネル波長に該当する波長 λ_n における信号光パワーを推定するために、手順(b-1)もしくは手順(b-2)を適用する。

c) FWM 光パワーの推定

$$P_{FWM}(\lambda_n) = S_n - ASE_n$$

$P_{FWM}(\lambda_n)$: チャンネル n 番目の波長 λ_n における FWM 出力光レベル [mW]

S_n : 波長 λ_n における ASE 要素を含む測定レベル

ASE_n : 波長 λ_n における補間して得られた ASE レベル

d) 信号光パワーと FWM 光パワーからクロストークを算出する。

$$Xtalk(\lambda_n) = 10 \times \text{Log}_{10} \left(\frac{P_{Sig}(\lambda_n)}{P_{FWM}(\lambda_n)} \right) > 0$$

e) 被測定チャンネル波長に該当し、信号光源をオフにする波長を変更し、項目 A.4.1 に記載された手順(a)～手順(h)を繰り返す。

WDM 信号光パワー、発生した FWM 光パワーを含む OSA 測定スペクトルの例を下記図 A.3 に示す。

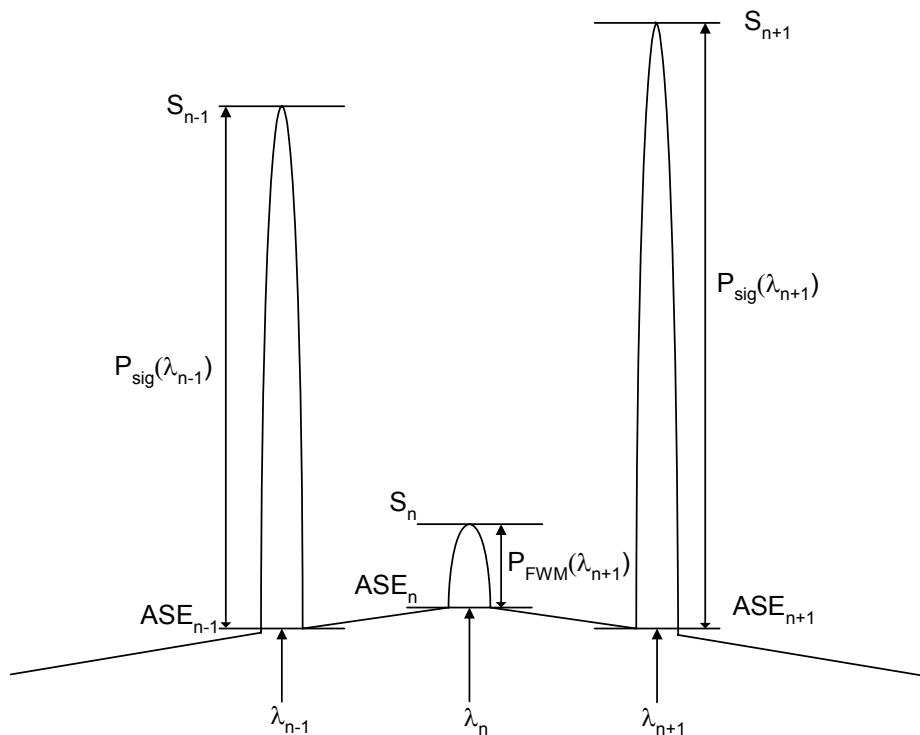


図 A.3 OSA 測定スペクトルとクロストークの算

A.5 試験結果

A.5.1 測定毎に提示される情報

下記の試験結果と関連する情報は、測定毎に提示される。

a) 試験試料（被測定光増幅器）の識別情報

- b) 信号光源の波長範囲
- c) 信号チャネル数
- d) 波長間隔
- e) クロストーク測定のためにオフされた信号光波長
- f) 光増幅器へのトータル入力光パワー
- g) 光増幅器のトータル出力光パワー
- h) 算出されたクロストーク

A.5.2 必要に応じて提出される情報

- a) 測定系の説明
- b) 光増幅器への入力光パワーの平坦度
- b) 光増幅器の出力光パワーの平坦度
- c) 偏波スクランブラのスクランブルレート
- d) OSA の分解能

附属書 B
(参考)
FWM 測定における測定チャンネル波長光オフの影響

B.1 はじめに

EDFA において、WDM 信号増幅時に発生する四光波混合(FWM)光パワーの測定は、被測定チャンネル波長光をオフにして行っている。これは、WDM 信号が周波数等間隔に多重化されているため、FWM 光波長と信号チャンネル波長が一致し、全信号チャンネルをオンにしたままでは、FWM 光の測定が困難となるからである。したがって、測定される FWM 光パワーは、全信号チャンネル数を入力したときのものとは異なっている。一方、必要な(評価されるべき)FWM 光パワーは、全信号チャンネルが入力されたときのものである。本附属書では、L 帯 EDFA の FWM 光パワー測定において、被測定チャンネル波長光をオフにする影響を計算により明らかにする [文献 7]。

B.2 FWM 光を発生させる信号チャンネル組合せ数

図 B.1 に各信号チャンネル波長に FWM 光を発生させるチャンネル周波数の組合せ全数、及び $fF=fp+fq-fr=fr$ (fp, fq, fr は信号チャンネル周波数、 fF は FWM 光周波数) となる組合せを除いた組合せ数、並びに組合せ全数に対する $fF=fr$ の組合せ数比率を示す。信号チャンネル数は 44 である。 $fF=fr$ の組合せ数比率は帯域の中心付近で最大となる。その最大比率の全信号チャンネル数依存性を図 B.2 に示す。 $fF=fr$ となる組合せ数の最大比率は全信号チャンネル数が増大すると共に小さくなり、数十チャンネル以上では数%まで低下する。すなわち、仮に全組合せについて、組合せあたりの FWM 光パワーが等しいとすると、測定 FWM 光パワーに 0.2dB 程度の誤差しかもたらさない。したがって、FWM 光パワー測定において、数十チャンネルを多重した WDM 信号を用いる場合は、被測定チャンネル波長光をオフにする影響は小さいと考えられる。

B.3 FWM 光パワー計算結果

前節の結果を確認するため、全信号チャンネル (N チャンネル) を入力したときと、実際の測定と同様に被測定信号チャンネルを除いた N-1 チャンネルを入力したときに発生する FWM 光パワーの差を計算により見積もった。L 帯 EDFA において発生する FWM 光パワーの計算は文献[2]に基づいて行った。EDFA 構成は、シングルステージ・1480nm 帯 LD 前方励起とし、EDF の 1530nm における吸収は 24dB/m と仮定した。図 B.3 に全信号チャンネルを入力した場合、及び被測定信号チャンネルを除いた場合の FWM 光パワーを示す。入力信号は波長範囲 1570.42~1606.60nm に 100GHz 間隔とし、全信号チャンネル数は 44 である。

入力信号光パワーは -15dBm/ch とした。EDF 波長分散値は 5 及び 50ps/nm/km について計算を行った。被測定チャンネルを除いた場合は FWM 光パワーは全チャンネル入力時より小さくなる。しかし、最大 FWM 光パワーの両入力間の差異は 0.2dB 程度と小さい。この両入力間の最大 FWM 光パワー差の全信号チャンネル数依存性を図 B.4 に示す。

EDF 波長分散値は 1.0~50ps/nm/km の範囲で設定した。両入力間の最大 FWM 光パワー差は、全信号チャンネル数が大きくなるほど、また、EDF 波長分散値が小さくなるほど小さくなる。特

に、全信号チャンネル数が約 40 チャンネルより大きい場合の最大 FWM 光パワー差は、いずれの EDF 波長分散値でも 0.2dB 以下に抑えられる。

B.4 結果と考察

L 帯 EDFA で発生する FWM 光パワー計算により、被測定チャンネル波長光をオフにすることが最大 FWM 光パワーに与える影響は全チャンネル数が 40 程度以上であれば 0.2dB 以下と小さいことを示した。このことから、L 帯 EDFA において最大 FWM 光パワー測定では、必要に応じて 0.2dB 程度の補正を行えばよい考えられる。

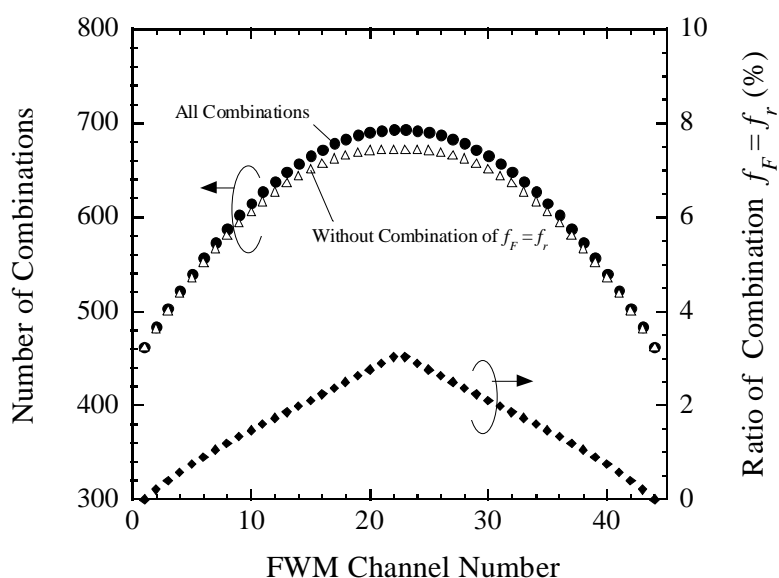


図 B.1 FWM 光発生に関する信号チャンネル組合せ数及び組合せ全数に対する $f_F = f_r$ の組合せ数比率

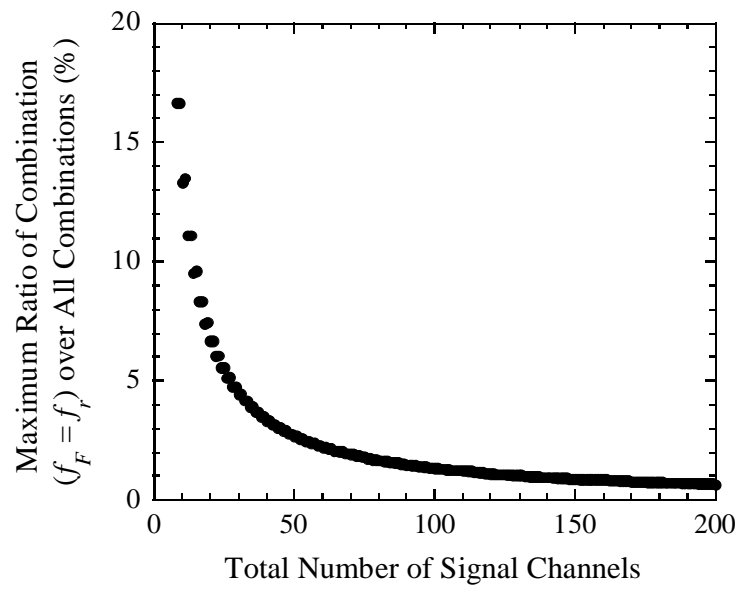


図 B.2 $f_F=f_r$ の最大組合せ比率の全信号チャンネル数依存性

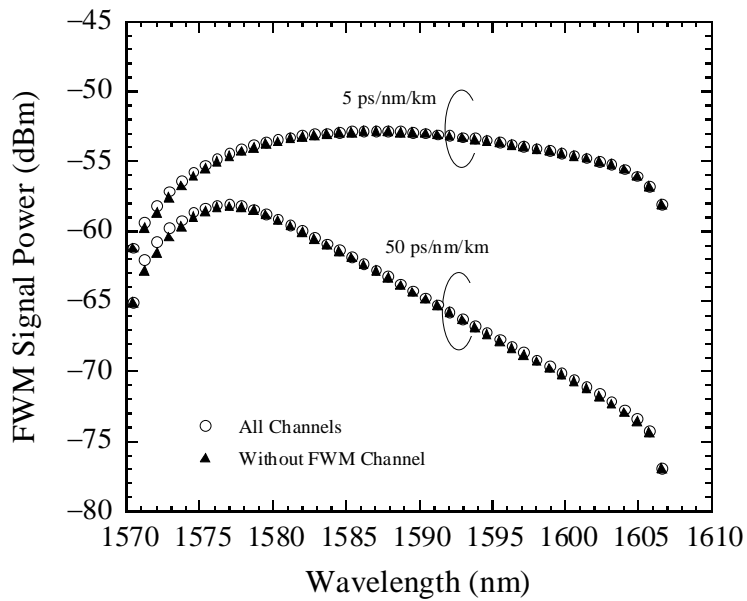


図 B.3 各信号チャンネル波長における FWM 光パワー

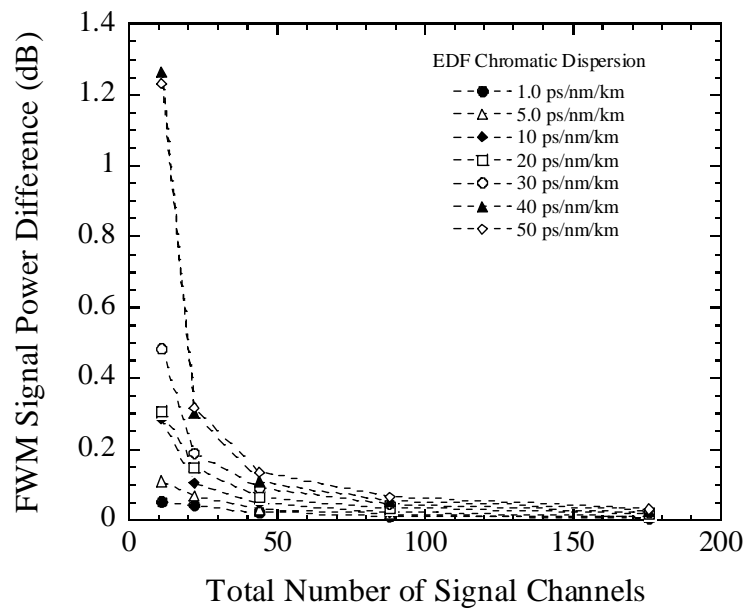


図 B.4 最大 FWM 光パワー差の全信号チャンネル数依存性

参考文献

- [1] Y. Liu, et al., "Four-wave mixing in EDFAs," *Tech. Digest OFC'2000*, Baltimore, paper WG4 (2000)
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics: Second Edition*, Academic Press, (1995).
- [3] K. Aiso et al., "Erbium Lanthanum co-doped fiber for L-band amplifier with high efficiency, low non-linearity and low", *Tech. Digest OFC'2001*, Anaheim, paper TuA6 (2001).
- [4] K. Inoue, "Polarization Effect on Four-Wave Mixing Efficiency in a Single-Mode Fiber," *J. Quantum Electronics.*, Vol.28, No.4. April, pp.883, (1992)
- [5] S. Radic, G. Pendock, A. Srivastava, P. Wysocki, and A. R. Chraplyvy, "Four-Wave Mixing in Optical Links Using Quasi-Distributed Optical Amplifiers," *J. Lightwave Technol.* Vol.19, No.5. May., pp.636, (2001)
- [6] A. R. Chraplyvy, "Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities", *J. Lightwave Technol.* Vol.8, No.10. Oct., pp.1553, (1990)
- [7] N. Shibata, R. P. Braun, and R. G. Waarts, "Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode fiber," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, Jul., pp.1205, (1987)
- [8] H. Ono, and M. Yamada, "Four-Wave Mixing Crosstalk Measurement in a Highly Doped L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier by Using Half of the Signal Channels," *J. Lightwave Technol.*, Vol.26, No.14. Jul., pp.2175, (2008)
- [9] IEC/TR 61292-5: *Application guide for non-linear coefficient measuring methods*

解説

[取纏め・審議委員会] (敬称略)

光増幅器標準化委員会 (2008年度～2009年5月)

	氏名	所属
(委員長)	山田 誠	大阪府立大学
(委員)	飯田 力弘	横河電機株式会社 (2009年4月から)
	奥野 秀樹	日本電気株式会社
	小笹 健仁	経済産業省商務情報政策局情報通信機器課 (2009年3月まで)
	松川 貴	経済産業省商務情報政策局情報通信機器課 (2009年4月から)
	小野 浩孝	日本電信電話株式会社 (2009年3月まで)
	森 淳	日本電信電話株式会社 (2009年4月から)
	佐藤 文利	財団法人日本規格協会
	澤田 久	三菱電線工業株式会社
	杉本 亮	株式会社フジクラ
	鈴木 裕一	富士通株式会社
	津田 幸夫	アンリツ株式会社 (2009年3月まで)
	根岸 英彦	パナソニックモバイルコミュニケーションズ株式会社 (2009年3月まで)
	熊井 猛雄	パナソニックモバイルコミュニケーションズ株式会社 (2009年4月から)
	福島 大	古河電気工業株式会社 (2009年3月まで)
	三浦 寿太郎	古河電気工業株式会社 (2009年4月から)
	増田 宏	株式会社日立コミュニケーションテクノロジー
	水本 哲弥	東京工業大学
	森田 逸郎	株式会社 KDDI 研究所
	八重樫 浩樹	沖電気工業株式会社
	増田 岳夫	財団法人光産業技術振興協会
	遊佐 英明	住友電気工業株式会社 (2009年3月まで)
	津崎 哲文	住友電気工業株式会社 (2009年4月から)
(オブザーバ)	金枝上 敦史	経済産業省産業技術環境局情報電子標準化推進室
	渋谷 隆	日本電気株式会社
(事務局)	稲田 孝	財団法人光産業技術振興協会
	賣野 豊	財団法人光産業技術振興協会

禁無断転載

この OITDA 規格の TP (技術資料) は、光産業技術振興協会の光増幅器標準化委員会で審議・取纏めたものである。

この資料についてのご意見又はご質問は、下記にご連絡ください。

OITDA 規格 TP (技術資料) :

光増幅器－光増幅器における四光波混合効果のための
応用ガイド

(英語題名 : Application guide for Four-wave mixing
effect in optical amplifiers)

TP 番号 : OITDA-TP07/AM-2009

第 1 版

公表日 : 2009 年 5 月 21 日

発行者 : 財団法人 光産業技術振興協会

住所 : 〒112-0014 東京都文京区関口 1-20-10

住友江戸川橋駅前ビル 7F

電話 : 03-5225-6431 FAX : 03-5225-6435

e-mail : opt-st@oitda.or.jp (標準化室)