

# 数値シミュレーションによるWDM励起ラマンアンプ設計とその励起パワー自動決定手法

## Application of Numerical Simulation Techniques to the Design of WDM-Pumped Raman Amplifier and Automatic Determination Methods of Pumping Powers

藤村 幸司\*  
Koji Fujimura

小栗 淳司\*  
Atsushi Oguri

中島 毅\*  
Takeshi Nakajima

江森 芳博\*  
Yoshihiro Emori

並木 周\*  
Shu Namiki

坂野 操\*  
Misao Sakano

**概要** ラマンアンプを設計する上で、その特性、すなわち、励起波長、励起パワー、信号パワー等が与えられた時、それに対する出力信号パワー、ラマンゲイン、雑音指数、multi path interference (MPI) 等を数値的に予測する必要がある。更に、所定の諸特性を得るために必要な励起波長や励起パワーの値を得ることができれば、ラマンアンプの設計効率が格段に上がる。本報告では、まず、アンプ特性を見積もるための数値シミュレータについて説明する。次に、励起波長数を逐次増加していく構成のラマンアンプを提案し、この設計に、上記数値シミュレータを適用する。そして、最後に、所定の出力信号パワー、あるいはラマンゲインを得るために与えるべき励起パワーを予測する手法とその応用例について述べる。

### 1. はじめに

波長分割多重 (WDM) 光伝送システムにおいて、光増幅に分布型 WDM 励起ラマンアンプを用いれば低雑音化、利得の広帯域化に有効である<sup>1), 2)</sup>。我々はラマンアンプの特性を見積もるための数値シミュレータを開発した。そのモデルは、信号の入出力特性、雑音指数、Rayleigh 散乱による MPI, nonlinear phase shift を含む。また、この数値シミュレータを用いて、ラマンアンプの構成や励起手法に関する提唱を行った<sup>3), 4)</sup>。最近、励起波長を逐次増加するアンプ (アップグレード型ラマンアンプ) をそのシミュレータを用いて設計し、特性評価を行って、提唱した<sup>5)</sup>。

ラマンアンプの設計においては、必要な諸特性を実現するための励起波長と励起パワーを得ることが課題となる。上記シミュレータでは設計すべき値は人為的に選ばれ、シミュレータにより得られた特性が要求された特性を満たすまで、人為的な判断と設計値の修正が繰り返される。設計システムの更なる効率化のために、特性を満たす励起波長と励起パワーを自動的に決定できることが望ましい。これまでに満たすべき特性を信号出力、あるいは利得として与え、励起波長と励起パワーを見出す幾つかの手法が提案されている<sup>6)~8)</sup>。一方、所定の利得特性を得る励起波長の決定のために、重ね合わせの手法が過去に開発されている<sup>2)</sup>。我々は、励起パワーの自動決定に線形近似を用いた手法を開発した<sup>9)</sup>。それは、初期値が解から離れていても真値への収束性の強い手法である。

本報告では、まず、ラマンアンプ特性を予測する数値シミュレータについて、次に、これを用いた設計例として、増幅帯域を拡張可能なラマンアンプについて実験結果も含めて報告する。そして、最後に励起パワーを予測するための自動設計手法について述べる。

### 2. 基本式 & 設計支援システム

#### 2.1 ラマンアンプの構成

光ファイバに入射した光は、ガラス分子の光学フォノンを励起してエネルギーを失い、低い周波数の光として散乱される。この現象をラマン散乱と呼び、シリカ系ファイバの場合、通常、約 13 THz 付近に周波数シフトが分布している。散乱光の帯域に光が存在すれば、誘導放出が起こるため、増幅器として利用できる。これをラマンアンプと呼ぶ。

図1にラマンアンプの基本的な構成を示す。複数の波長から成る入力信号光、異なる波長を持つ複数のポンプレーザ、増幅媒体である光ファイバ、信号光と励起光の合波器で構成されて

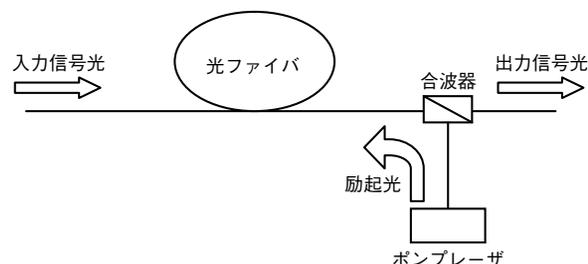


図1 ラマンアンプの基本構成  
Schematic diagram of Raman amplifier

\* 研究開発本部 ファイテルフォトンクス研究所

いる。波長多重励起の場合、各励起波長の利得特性の重ね合わせによって、広帯域にわたり所望の利得特性、例えば非常に平坦な利得特性が得られる。したがってラマンアンプの設計には、所望の特性を得るための励起波長と励起パワーの決定が必要となる。

### 2.2 基本式

WDM伝送における光パワーの時間平均値のファイバ長手方向への伝播は、以下の微分方程式で与えられる<sup>2), 10), 11)</sup>。

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_v^\pm}{dz} = & -\alpha_v P_v^\pm + \varepsilon_v P_v^\pm + P_v^\pm \sum_{\mu > v} E_{R\mu, v} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ & - P_v^\pm \sum_{\mu < v} \frac{v}{\mu} E_{Rv, \mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ & + 2h\nu \sum_{\mu > v} E_{R\mu, v} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \left[ 1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\mu - \nu)}{kT}\right] - 1} \right] \Delta\nu \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $P_v^+$ は光の平均パワー、添字 $v$ はその光の周波数、“+”、“-”はそれぞれ前方、後方への伝播を示し、 $\varepsilon_v$ は周波数 $v$ の光の後方レイリー散乱係数、 $E_{R\mu, v}$ は周波数 $\mu$ の光から周波数 $v$ の光への無偏光化されたラマンゲイン効率、 $\Delta\nu$ は周波数 $v$ の光の周波数幅、 $h$ はプランク定数、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度を表す。 $\alpha_v$ は周波数 $v$ におけるファイバロス係数であり、自発ラマン散乱の効果を含んでいる。つまり、

$$\alpha_v = \alpha_v^* + 4h\nu P_v^\pm \sum_{\mu < v} E_{Rv, \mu} \left[ 1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\nu - \mu)}{kT}\right] - 1} \right] \Delta\nu \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $\alpha_v^*$ はラマン散乱の効果を含まないファイバロス係数である。まとめると式(1)において、第一項はファイバロス、第二項はレイリー散乱、第三、四項は誘導ラマン散乱、第五項は自発ラマン散乱による効果をそれぞれ表している。

### 2.3 設計支援システム

我々は所定の利得特性を与える励起波長、励起パワーを決定するため、式(1)、(2)を数値的に解く設計支援システムを構築した。式(1)、(2)の微分方程式を解くには、前方と後方へ進む光を両方扱わなければならないので、インプット側とアウトプット側の二点に境界値を有する問題を解く必要がある。このソルバーには四次のRunge-Kutta法によって前方、後方を繰り返し解く手法を用いており、その収束性は非常に良い。

設計支援システムのフローチャートを図2に示す。まず、ファイバ条件、信号条件、励起条件をソルバーに入力する。結果として、出力信号パワー、noise figure (NF)、MPI、optical signal to noise ratio (OSNR)、nonlinear phase shiftといった特性が出力される。これが設計仕様値と一致するか判断し、一致するならば設計完了とし、一致しなければ励起条件を変更し、仕様値に一致するまで同じ過程を繰り返す。

その出力例を図3に示す。図3(a)～(f)はそれぞれラマンゲイン、NF、ネットゲイン、MPI、OSNR、nonlinear phase shiftの出力画面の一例である。

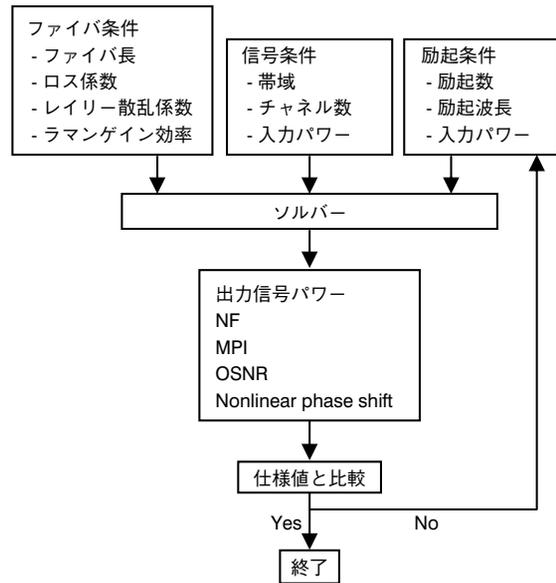
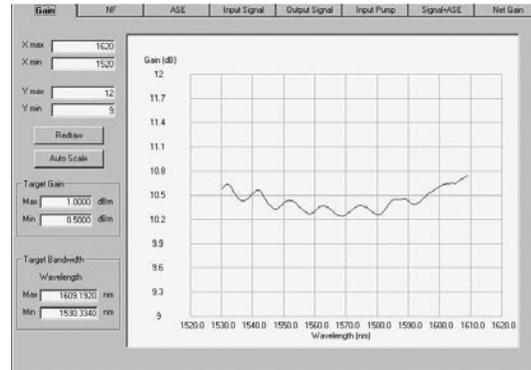
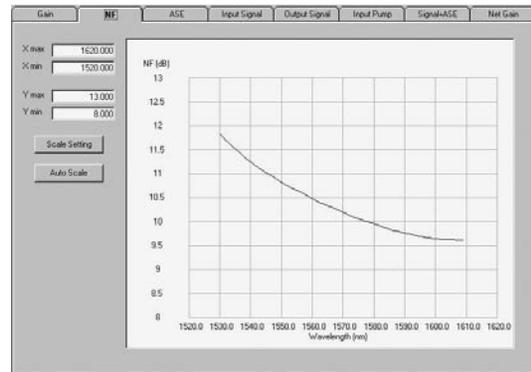


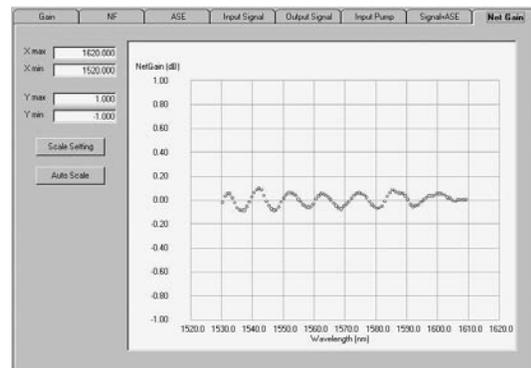
図2 ラマンアンプ設計支援システムのフローチャート  
Flowchart of design support system for WDM-pumped Raman amplifier



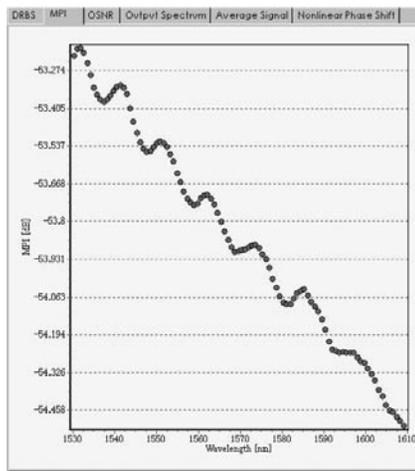
(a) Raman gain



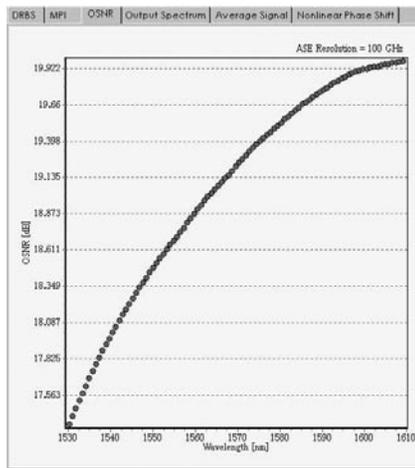
(b) NF



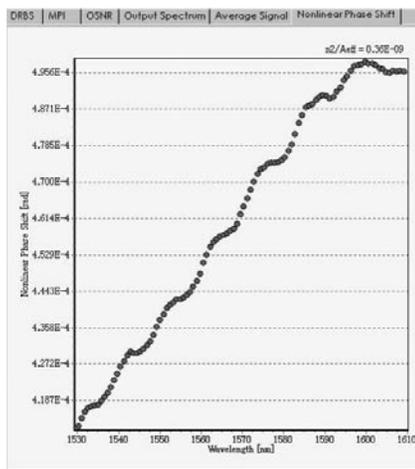
(c) Net gain



(d) MPI



(e) OSNR



(f) Nonlinear phase shift

図3 ラマンアンプ設計支援システムの出カ例  
Output windows of design support system  
for WDM-pumped Raman amplifier

### 3. アップグレードラマン

#### 3.1 背景とアンプ構成

光通信システムの伝送容量の増大に伴って、波長分割多重伝送システムに使用される信号帯域は広がっていくことが予想さ

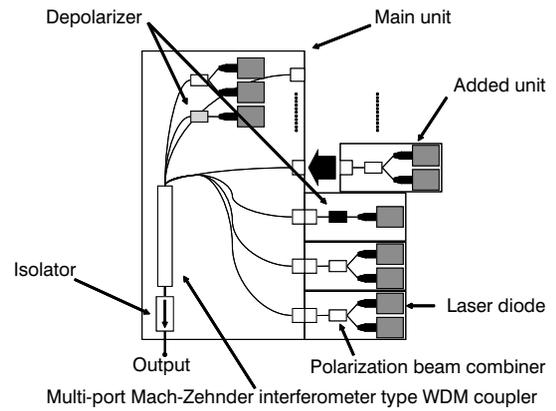


図4 帯域拡張可能なラマン増幅器の模式図  
Schematic of a bandwidth-upgradeable  
Raman amplifier

れる。しかしながら、将来の需要に対応した帯域を最初から用意するよりも必要に応じて帯域を拡張できる方が初期投資を抑えることができるという点から望ましい。ラマンアンプは波長多重励起によって簡単に増幅帯域を増やすことができるため、励起波長を追加することによりこの要望に応えることが可能である。

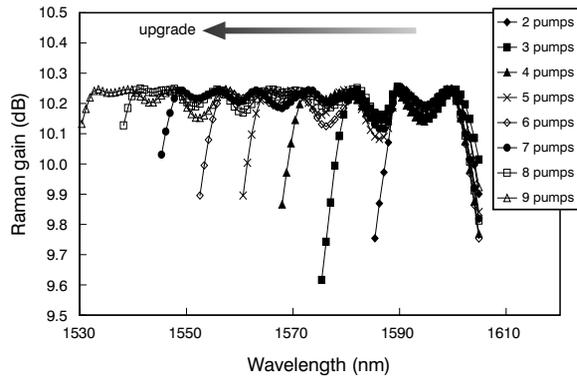
これまでに波長多重励起を用いて増幅帯域を拡張できるラマン増幅としては、励起光を3波長追加することによりCバンドまたはLバンドからC+Lバンドへ一度に拡張できるものが報告されている<sup>2)</sup>。しかし、より柔軟に市場の要求に応えるためには、より狭い増幅幅で拡張できる方が望ましい。そこで本報告では、図4の模式図で示すような励起波長を追加することにより約20 nmから75 nmまで8 nm (1 THz) 間隔で増幅帯域を拡張できるラマンアンプユニットを nonzero dispersion shifted fiber (TrueWave<sup>†</sup> RS) 80 kmの後方励起に用いた場合について報告する。拡張方法には、短波長方向に励起波長を加えることにより増幅帯域を短波長方向に拡張していく方法と、長波長方向に励起波長を加えることにより増幅帯域を長波長方向に拡張していく方法の2通りの方法があるが、どちらの方法が励起光のコスト的に望ましいかについても検討した。

#### 3.2 シミュレーション結果

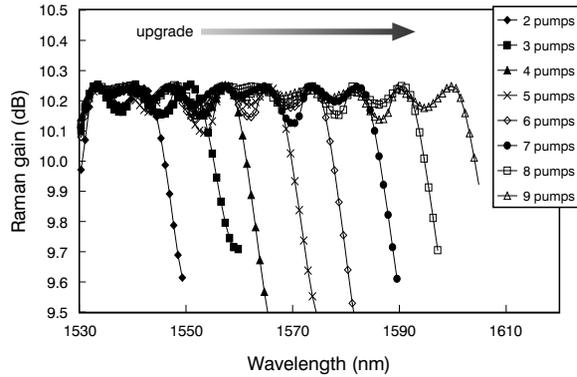
図5(a), (b)に増幅帯域を短波長方向に拡張した場合と長波長方向に拡張した場合のそれぞれのラマン利得のシミュレーション結果を示す。これらの図より、どちらの拡張方法においても十分に平坦な増幅帯域を得られることを確認した。

図6(a), (b)に短波長方向及び長波長方向に拡張した場合の励起パワーのシミュレーション結果を示す。図6(a), (b)から2つの拡張方法における各励起波長に要求される仕様励起パワーの比較をしてみると、2つの理由から短波長方向に拡張した方が励起光のコスト的に優れていることがわかる。1つ目の理由は、各励起波長に必要とされる仕様パワーの合計は短波長方向に拡張した場合で662.7 mWであり、長波長方向に拡張した場合の1277.2 mWの約半分で済むからである。これは、最も励起パワーが必要とされる最長波長の励起光が短波長方向に拡張した場合は1495.2 nmに固定されているのに対して、長波長方向に拡張した場合は各拡張段階で移動するからである。2つ目の理由は、長波長方向に拡張した場合は1480.5,

† TrueWaveはFitel USA社の商標です

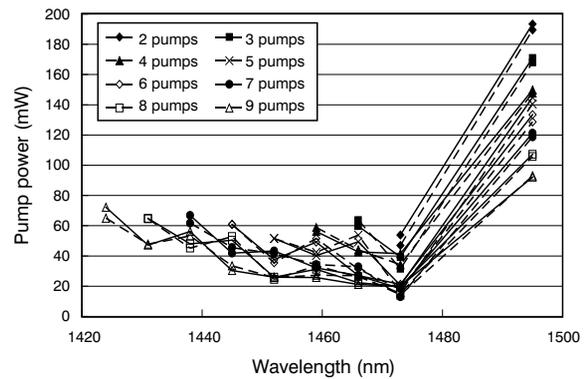


(a) 短波長方向に拡張した場合

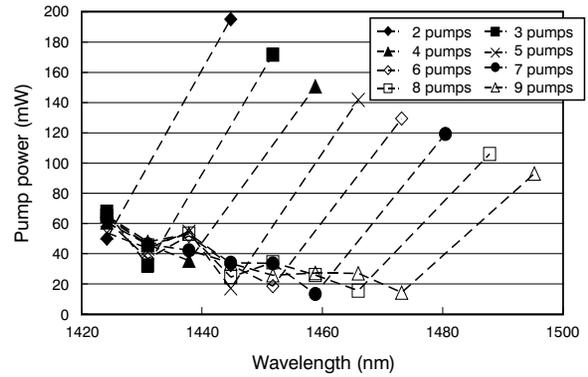


(b) 長波長方向に拡張した場合

図5 ラマン利得のシミュレーション結果  
Simulated Raman gain profiles,  
(a): Upgraded to shorter wavelength direction,  
(b): Upgraded to longer wavelength direction



(a) 短波長方向に拡張した場合の実験 (実線) とシミュレーション結果 (破線)



(b) 長波長方向に拡張した場合のシミュレーション結果

図6 各拡張段階における必要とされる励起パワー  
Pump power needed on each upgrading stage, (a):  
Experimental results (solid line) and simulated results  
(dashed line) when upgraded to shorter wavelength  
direction, (b): Upgraded to longer wavelength  
direction

1487.8nmの2波長余分に励起光が必要になるからである。これは、7波長励起の場合における最長励起波長が1480.5 nmを、8波長励起の場合における最長励起波長が1487.8 nmを使用するためである。以上のことより、短波長方向に拡張した方がコスト的に優れている。また、短波長方向に拡張した場合は、最長波長である1495.2 nm以外の励起波長に要求される仕様パワーは80 mW以下と比較的小さいパワーで済むことがわかる。

### 3.3 実験結果

シミュレーションの結果を検証するために、シミュレーションと同様の条件で短波長方向への拡張の場合の実験を行った。

図7が示すように、図5(a)のシミュレーションと同様なラマン利得を実験により得ることができた。また、図6(a)は実験による励起パワー (実線) とシミュレーションによる励起パワー (破線) の比較を示す。励起パワーの比較から、実験とシミュレーションのよい一致を確認した。

## 4. 自動設計論と制御

### 4.1 自動設計指針

図2で示したようにWDM励起のラマンアンプにおいて、所望の出力信号パワー、あるいは利得プロファイルを得るためには各励起光の波長と入力パワーを決定しなければならない。よって、各励起パワーの配分を自動的に決定する手法が得られれば非常に有効である。自動決定には図8に示すようなフローチャートが求められる。信号条件、ファイバ条件に加え、所望

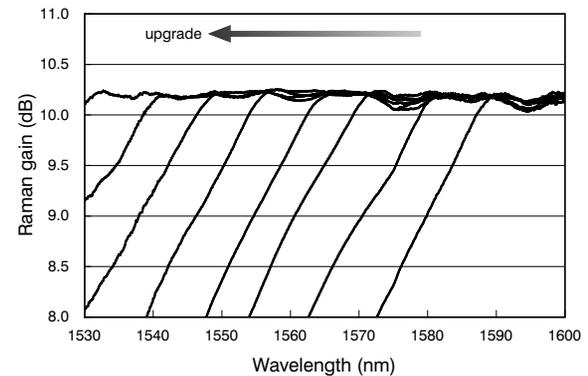


図7 実験によるラマン利得  
Experimental Raman gain profiles

の出力信号パワーを入力し、逆問題を数値計算によって解いて最適な励起条件を決定する。逆問題を解く手法として、これまでにgenetic algorithm<sup>6)</sup>, simulated annealing algorithm<sup>7)</sup>, neural networks<sup>8)</sup>などが採用されている。これらの手法は、励起波長と励起パワーの最適セットを同時に決定している。また、非線形問題であることから、最適化に時間を要する、一意の解が得られない、などの短所がある。一方、superposition ruleを用いた最適励起波長の決定手順も過去に開発されている<sup>2), 12)</sup>。

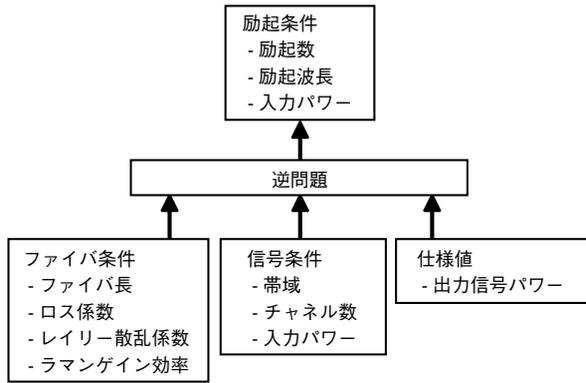


図8 ラマンアンプ自動設計のフローチャート  
Flowchart for automatic design of WDM-pumped Raman amplifier

我々は設計指針として、励起波長の決定後に励起パワーを最適化する手法を提案する。最適励起波長の決定には superposition rule を用いる。また14xx nm 励起用レーザは実用上波長が固定されているため、既存の励起波長セットに対する励起パワーセットの最適化は有効である。

#### 4.2 アルゴリズム

最適励起波長決定後の、最適励起パワー自動決定のアルゴリズムについて説明する。まず、式(1)において励起パワーの最適化にほとんど影響を与えないレイリー散乱項、自発ラマン散乱項を無視する。また、簡単のため、信号光1波、前方励起光1波を想定する。初期条件として信号パワー、励起パワーの長手分布をそれぞれ  $P_{S0}(z)$ ,  $P_{P0}(z)$  とする。また初期値から目標値へのパワー変動量を  $\varepsilon(z)$ ,  $\eta(z)$  と定義し、目標の信号パワー、励起パワーの長手分布をそれぞれ  $P_S(z)$ ,  $P_P(z)$  とする。つまり、

$$\begin{aligned} P_S(z) &= P_{S0}(z) + \varepsilon(z) \\ P_P(z) &= P_{P0}(z) + \eta(z) \end{aligned} \quad (3)$$

とする。 $P_{S0}(z)$ ,  $P_{P0}(z)$ ,  $P_S(z)$ ,  $P_P(z)$  は全て式(1)を満たすのでこれらを代入し、 $\varepsilon$ ,  $\eta$  に関する微分方程式を得る。更に、 $\varepsilon$ ,  $\eta$  の二次の項を無視することにより以下の線形微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{d\varepsilon(z)}{dz} \\ \frac{d\eta(z)}{dz} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -\alpha_S + g_{SP}P_{P0}(z) & -g_{SP}P_{S0}(z) \\ -g_{PS}P_{P0}(z) & -\alpha_P - g_{PS}P_{S0}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon(z) \\ \eta(z) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{F} \begin{pmatrix} \varepsilon(z) \\ \eta(z) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_S$ と $\alpha_P$ はそれぞれ信号光、励起光のファイバロス係数、 $g_{SP}$ は励起光と信号光間のラマンゲイン効率を表し、 $g_{SP} = (v_P/v_S)g_{SP}$ と書ける。 $v_S$ ,  $v_P$ はそれぞれ信号光、励起光の周波数である。式(4)の行列 $\mathbf{F}$ の要素は $z$ の関数となるので、直接解析的に解くことはできない。したがってファイバを $N$ 個の区間に分割し、 $P_{S0}(z)$ ,  $P_{P0}(z)$ がその区間にわたって一定であるとみなせる程度に、区間の長さを微小に設定する。このようにして、 $z=z_i$ から $z=z_{i+1}$ の区間において式(4)の微分方程式を解くと以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon(z_{i+1}) \\ \eta(z_{i+1}) \end{pmatrix} = \mathbf{A}_i \begin{pmatrix} \varepsilon(z_i) \\ \eta(z_i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

更に、式(5)を $z=0$ から $z=L$ まで繰り返し適用すると以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon(L) \\ \eta(L) \end{pmatrix} = \mathbf{A}_N \mathbf{A}_{N-1} \dots \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 \begin{pmatrix} \varepsilon(0) \\ \eta(0) \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \varepsilon(0) \\ \eta(0) \end{pmatrix} \quad (6)$$

これを $m$ 波の信号光、 $n$ 波の励起光に拡張すると以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1(L) \\ \vdots \\ \varepsilon_m(L) \\ \eta_1(L) \\ \vdots \\ \eta_n(L) \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \varepsilon_1(0) \\ \vdots \\ \varepsilon_m(0) \\ \eta_1(0) \\ \vdots \\ \eta_n(0) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)は信号パワー、励起パワーそれぞれの変動量のインプット側とアウトプット側の関係式を表している。式の総数が増加する未知数より多ければ、その未知量は線形最小二乗法によって求められる。

ここまでは変動量が微小であると仮定した線形領域内の議論であるが、更に大きな変動量にも対応できる手法に拡張する。一度に初期値と目標値との差を変動量とするのではなく、線形近似が有効となる範囲内でその変動量を決定する。そして繰り返しステップを踏んで目標値に一致するまで続ける。この手法の有効性は、パワー変動量のステップ幅に依存する。線形問題であることから、非常に短い時間で計算を行える。

更に、もう少し時間を要せば非常に精度の高い設計を行える。最終ステップにおいて1度あるいは2度、設計支援システムを用いて式(1)を直接数値的に解き、信号パワー、励起パワーの長手分布を正確な値に更新すればよい。我々は、式(1)を最終ステップに解く手法を‘high-accuracy procedure’と呼び、式(1)を最終ステップに解かない手法を‘high-speed procedure’と呼ぶ。

#### 4.3 精度検証

以上の設計手法の精度検証のため、我々の手法によって得られた最適励起パワーセットからラマンゲインスペクトルを導き、superposition ruleから得られるそれと比較した。ラマンアンプには、dispersion shifted fiber (DSF) 100 km、後方励起10波、信号は1530 ~ 1610 nmの100 GHz間隔で97チャンネルとする。入力信号パワーは0 dBm/chで、励起波長は既に与えられているとする。励起パワーは信号帯域にわたってラマンゲイン20 dBを実現するように最適化される。初期値として用いたラマンゲインスペクトルは平均約2 dBであり、これは目標値と18 dBの差がある。図9は、設計結果のラマンゲインスペクトルを示している。high-accuracy procedureの結果はほぼ完全にsuperposition ruleの結果と一致しており、最大でも0.03 dBの差である。この結果から、我々の手法は、与えられた励起波長に対し最適な励起パワー配分を決定するのに有効であることが示された。

更に、3章の実験結果を用いた検証を試みた。初期条件の励

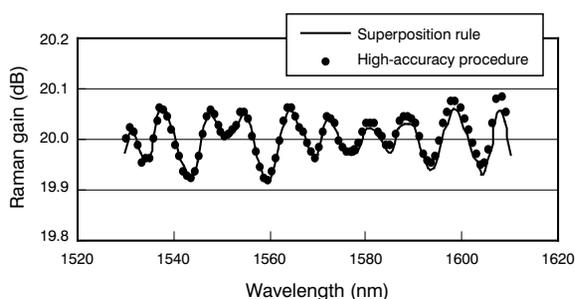
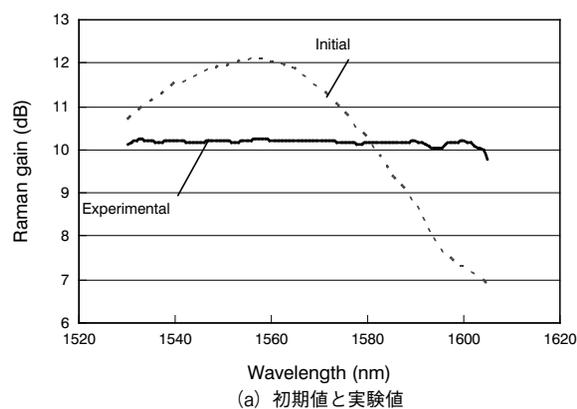


図9 ラマンゲインスペクトルの比較  
Raman gain spectra

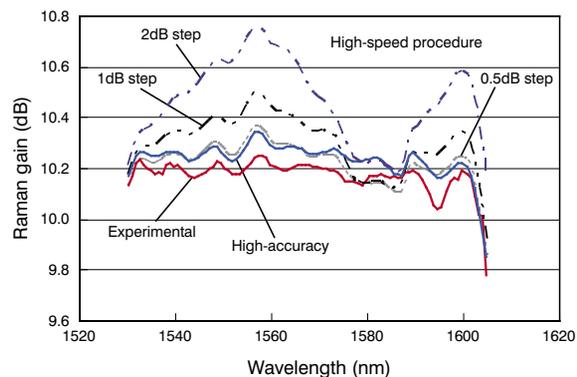
起パワーを各ポンプ42 mWとし、実験で得られているラマンゲインスペクトルを目標値として、最適な励起パワーを決定する。これを実験で用いた励起パワーと比較する。図10(a)は、目標となる実験から得られたラマンゲイン、及び初期値のラマンゲインを示している。high-accuracy procedureによって最適化された励起パワーは、合計で2 mW、各ポンプに関しては最大6 mW、実験の励起パワーと異なっていた。このずれは、合計の励起パワー390 mWを基準として、それぞれ0.5%、1.5%である。また、high-accuracy procedureによって得られたラマンゲインは実験結果と0.2 dB以内で一致した。図10(b)は、high-speed procedureでステップ幅0.5 dB、1 dB、2 dBを用いて得られたラマンゲインスペクトル、high-accuracy procedureにより得られたラマンゲインスペクトル、及び実験結果のラマンゲインスペクトルを示している。ステップ幅を小さくするほど実験結果に近づき、精度が上がっていることがわかる。また、0.5 dBのステップ幅で得られたラマンゲインスペクトルは、ほぼhigh-accuracy procedureで得られた結果に一致した。

#### 4.4 フィードバック制御シミュレーション

最後にhigh-speed procedureのフィードバック制御への適用例を示す。high-speed procedureは非線形の式を線形近似していることから、計算時間の点から制御に対して有効といえる。ネットゲイン0 dBに設定されたラマンアンプを二台繋げたシステムを考える。それぞれのラマンアンプは、DSF 100 km、後方励起10波とする。信号条件は1530 ~ 1610 nmの100 GHz間隔で97チャンネルとし、入力信号パワーは0 dBm/chとする。つまり、目標となる出力信号パワーは0 dBm/chである。今、一台目のラマンアンプのうちレーザダイオードの1つが故障し、その影響で二台目のラマンアンプの出力信号パワーが初期値から変動した状況を仮定する。これに対し、二台目のラマンアンプの励起パワーを制御し、出力信号パワーを初期値に戻すプロセスを施す。まず、二台目のラマンアンプの出力信号パワーをモニタし、二台目に入ってくる信号パワーの変動量を式(7)によって予測する。そして、出力信号パワーを初期値に戻すための励起パワーの配分を同様に式(7)によって決定する。図11は、故障前、故障後、及び1ステップのみで回復させた制御後の出力信号パワーを示している。また、ステップ幅0.5 dB、1 dBでも制御シミュレーションを行った。これらの結果は、故障前の出力信号パワーとの差として、図12に示している。図10(b)と同様にステップ幅を小さくするほど出力信号が良く回復されることがわかる。ステップ幅0.5 dBの場合、結



(a) 初期値と実験値



(b) High-speed procedure と High-accuracy procedure の計算値と実験値の比較

図10 ラマンゲインスペクトル, Raman gain spectra, (a) Initial and measured gains; (b) Gains calculated by high-speed and high-accuracy procedures

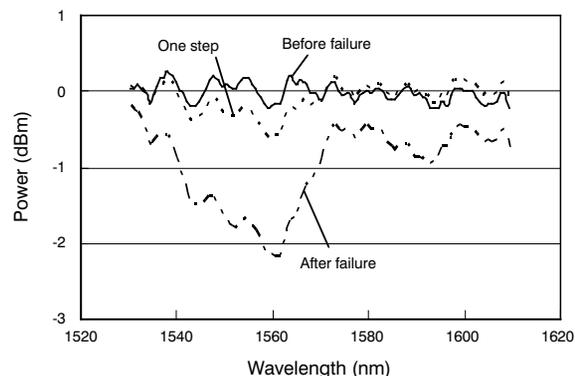


図11 故障前、故障後、及び1ステップのみで回復させた制御後の出力信号パワー  
Output signal powers before and after failure, and after control based on the procedure with one step

果的に、その平坦性(最大値と最小値の差)は1.99 dBから0.54 dBに回復した。この値は故障前の値0.50 dBに非常に近い値である。

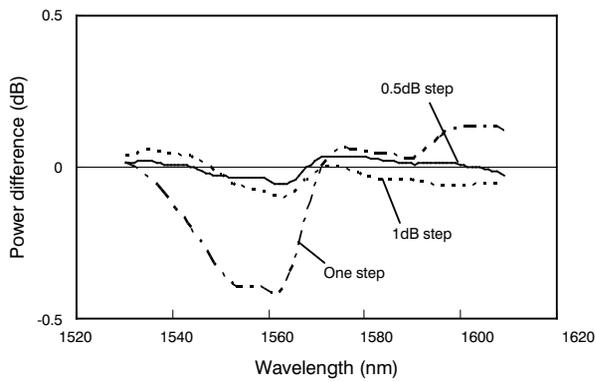


図12 1ステップ、ステップ幅1 dB、及び0.5 dBで制御した出力信号パワーと故障前の出力信号パワーの差 Differences in output signal powers between before failure and after control, where control procedures of one step, 0.5-dB and 1.0-dB step sizes are adopted

## 5. おわりに

ラマンアンプの特性を予測するための数値シミュレータを開発した。このシミュレータを、我々の提案する励起波長数を逐次増加していく構成のラマンアンプに適用した。実験とシミュレーションの値はよく一致し、短波長方向と長波長方向に増幅帯域を拡張する方法を比較した結果、短波長方向に拡張した方が励起光のコスト的に望ましいことがわかった。

また、線形近似をベースに励起パワーを予測するための自動設計手法を開発した。この設計手法は励起パワーの初期値が最適値から離れていても (18 dB)、強い収束性能を有することを確認した。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、シミュレータ作成に関してご協力して頂いた、相川明氏、古河インフォメーションテクノロジー株式会社の片山寛之氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) B. Zhu, L. E. Nelson, S. Stulz, A. H. Gnauck, C. Doerr, J. Leuthold, L. Gruner-Nielsen, M. O. Pedersen, J. Kim, R. Lingle, Jr., Y. Emori, Y. Ohki, N. Tsukiji, A. Oguri, and S. Namiki: "6.4-Tb/s(160 x 42.7 Gb/s) transmission with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency over 32 x 100 km of fiber using CSRZ-DPSK format," OFC 2003, PD19(2003).
- 2) S. Namiki and Y. Emori: "Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diode," J. of Selected Topics in J. Quantum Electron., **7**(2001), 3.
- 3) S. Kado, Y. Emori, and S. Namiki: "Gain and noise tilt control in multi-wavelength bi-directionally pumped Raman amplifier," OFC2002, TuJ4(2002).
- 4) Y. Emori, S. Matsushita, and S. Namiki: "1-THz-spaced multi-wavelength pumping for broadband Raman amplifiers," ECOC2000, **2**(2000), 73.
- 5) A. Oguri, Y. Emori, and S. Namiki: "1 THz-step bandwidth upgrades in broadband Raman amplifier by adding pump laser diodes," OFC2003, ThB1(2003).
- 6) V. E. Perlin and H. G. Winful: "Efficient design method for multi-pump flat-gain fiber Raman amplifiers," OFC2002, TuJ1(2002).
- 7) M. Yan, J. Chen, W. Jiang, J. Li, J. Chen, and X. Li: "Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps," Photon. Tech. Lett., **13**(2001), 948.
- 8) P. Xiao, Q. Zeng, J. Huang, and J. Liu: "A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier," Photon. Tech. Lett., **15**(2003), 206.
- 9) K. Fujimura, M. Sakano, T. Nakajima, and S. Namiki: "A linearized method for unique determination of the input pump powers in designing and controlling WDM-pumped Raman amplifiers," OAA2003, MC3,(2003), 56.
- 10) H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarijaona: "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," Photon. Tech. Lett., **11**(1999), 530.
- 11) M. Ikeda, M. Sakano, H. Katayama, S. Namiki, Y. Emori, and S. Kado: "Wavelength Dependence of Raman Gain Efficiency," OECC2002, 10D2-5(2002).
- 12) Y. Emori: "Ultrabroadband Fiber Raman amplifiers," ECOC2002, Symposium 3.2(2002).