

平成16年度

# 情報通信審議会答申

諮問第2017号

「FTTH等によるケーブルテレビネットワークの高度化のための技術的条件」

平成17年3月30日

## 1 対象範囲

屋外の伝送路を光ファイバケーブルにより構築するケーブルテレビネットワークを対象とする。

なお、特に断らない限り、有線テレビジョン放送及び電気通信役務利用放送の双方に適用する。

## 2 技術的条件

### 2. 1 ネットワークにかかる条件

#### 2. 1. 1 光波長

放送伝送用光波長としては、1500nm 帯（1530nm～1625nm）を使用すること。ただし、既存のHFCをFTTH化する場合など、1500nm帯を使用できない特別な理由がある場合を除く。

#### 2. 1. 2 漏えい電界強度

電氣的に動作するヘッドエンド機器等からの漏えい電界強度の許容値は、有線テレビジョン放送法施行規則第 26 条に定める値を満足すること。

#### 2. 1. 3 伝送の条件

有線テレビジョン放送法施行規則に定める放送方式（「定められた放送方式」という。以下同じ。）の信号に影響を与えないよう、光ファイバへの入力光信号レベル、光変調度、他の信号との関係、および波長多重を用いる場合の光波長間隔等について適切に配慮した設備とすること。

定められた放送方式の信号への影響については、「総務大臣が別に告示する技術的条件」（平成 13 年総務省告示第 130 号）に規定する方法、もしくは、以下の(1)又は(2)の方法により確認すること。

##### (1) スペクトルマスク

妨害レベルが別添 1 に規定されるスペクトルマスク値以下であること。

##### (2) 客観的画質評価

標準テレビジョン放送方式の信号への影響については、ITU で勧告（ITU-T J.144）されている客観的画質評価法による推定 DSCQS 値が 12.5 以下であること。

### 2. 2 信号の伝送レベルにかかる条件

良好な受信品質の確保のために、以下に定める値を満たすこと。

#### 2. 2. 1 自設回線の場合

##### (1) 電気信号により性能規定する場合

受信者端子において定められた放送方式毎の受信品質を確保すること。または、表 1 の前提条件を満たす戸建または集合住宅においては、V-ONU 出力(別添 3 参照)での CN 比が表 1 の値を満たすこと。

表 1 電気信号を性能規定する際の宅内条件と V-ONU 出力の CN 比

住宅の規模の別		宅内・棟内配線の CN 比 の前提条件	V-ONU 出力の CN 比			性能規定点 (別添 3)		
			NTSC	64QAM	OFDM			
戸建		59dB 以上	40 dB 以上	26 dB 以上	24 dB 以上	図 1 ⑪ 図 2 ⑪		
集合住宅	建物入口で光—電気 変換し、各戸まで同 軸配線（棟内ブー スターは 4 段以内）	45 dB 以上	42 dB 以上					図 3 ⑪ 図 4 ⑪
	建物入口で光—電気 変換後に各戸まで光 配線	45 dB 以上						図 5 ⑪ 図 6 ⑪
	光信号のまま各戸ま で増幅分配する場合	59 dB 以上	40 dB 以上					

(2) 光信号により性能規定する場合

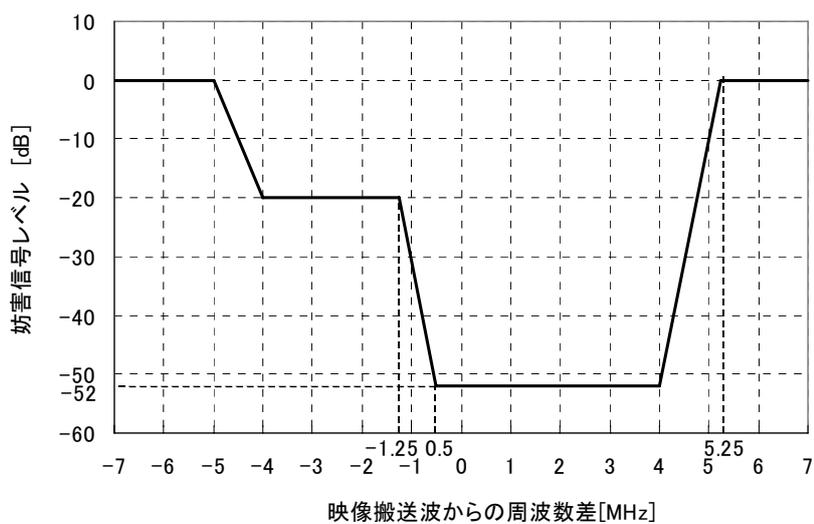
表 2 の前提条件を満たす戸建または集合住宅においては、別添 3 に示す V-ONU 入力または相当する点における光入力レベル及び RIN の測定値から、別添 2 の計算式により求めた V-ONU 出力での推定 CN 比が表 2 の値を満たすこと。

表 2 光信号を性能規定する際の宅内条件と V-ONU 出力の推定 CN 比

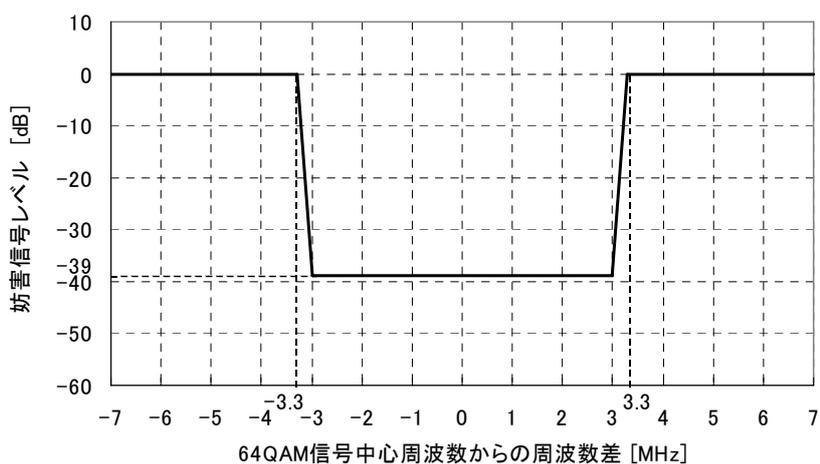
住宅の規模の別		宅内・棟内配線の CN 比 の前提条件	V-ONU 出力の推定 CN 比			性能規定点 (別添 3)		
			NTSC	64QAM	OFDM			
戸建		59dB 以上	42 dB 以上	28 dB 以上	26 dB 以上	図 1 ⑨又は⑩ 図 2 ⑨又は⑩		
集合住宅	建物入口で光—電気 変換し、各戸まで同 軸配線（棟内ブー スターは 4 段以内）	45 dB 以上	44 dB 以上					図 3 ⑨又は⑩
	建物入口で光—電気 変換後に各戸まで光 配線	45 dB 以上						図 4 ⑨又は⑩ 図 5 ⑤又は⑩ 図 6 ⑨又は④
	光信号のまま各戸ま で増幅分配する場合	59 dB 以上	42 dB 以上					

## 2. 2. 2 電気通信役務利用回線の場合

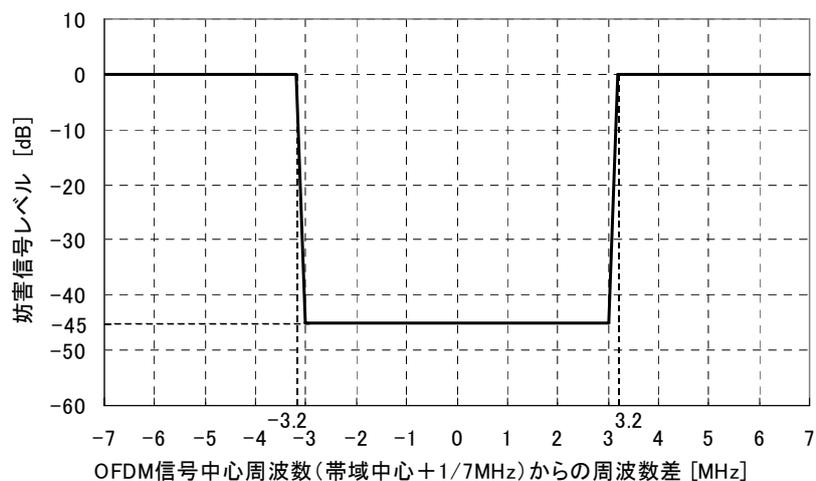
ケーブルテレビネットワークの総合性能は2. 2. 1の自設回線の場合の値を満たすこと。また、電気通信役務回線を利用する区間に応じケーブルテレビ事業者と電気通信事業者の間で電氣的性能・光学的性能について確認すること。



映像搬送波からの周波数差 [MHz]  
図 1 標準テレビジョン放送方式



64QAM信号中心周波数からの周波数差 [MHz]  
図 2 デジタル有線テレビジョン放送方式



OFDM信号中心周波数(帯域中心+1/7MHz)からの周波数差 [MHz]  
図 3 標準デジタルテレビジョン放送方式

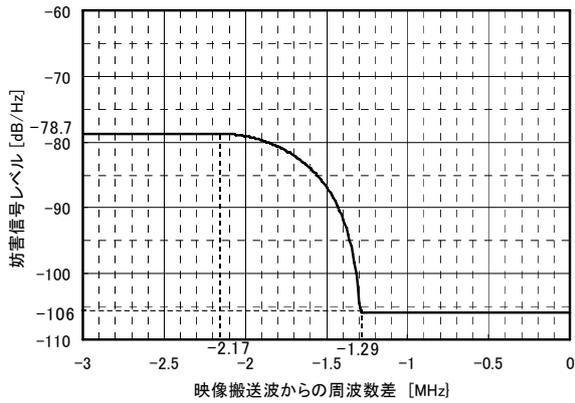


図4 標準テレビジョン放送方式の下側周波数

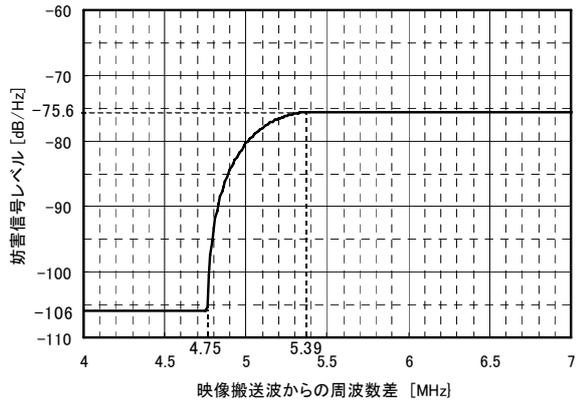


図5 標準テレビジョン放送方式の上側周波数

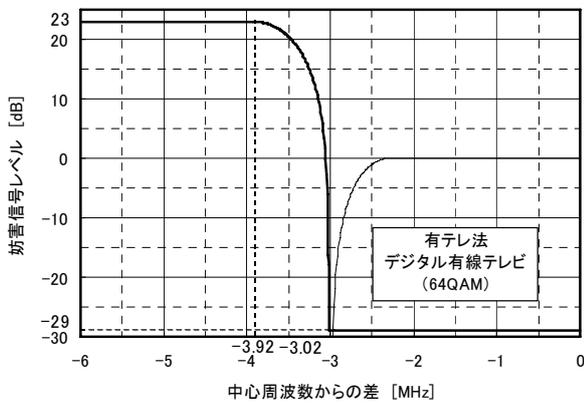


図6 デジタル有線テレビジョン放送方式  
の下側周波数

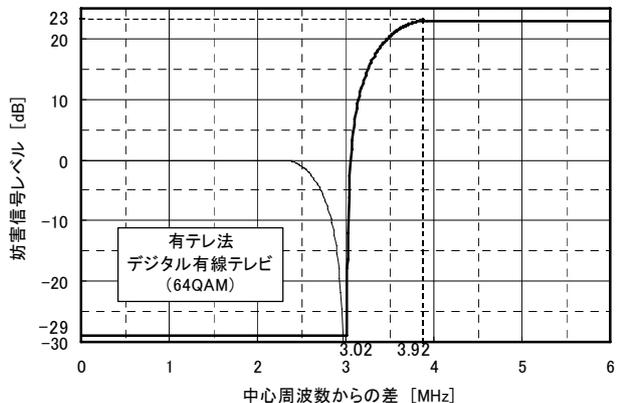


図7 デジタル有線テレビジョン放送方式  
の上側周波数

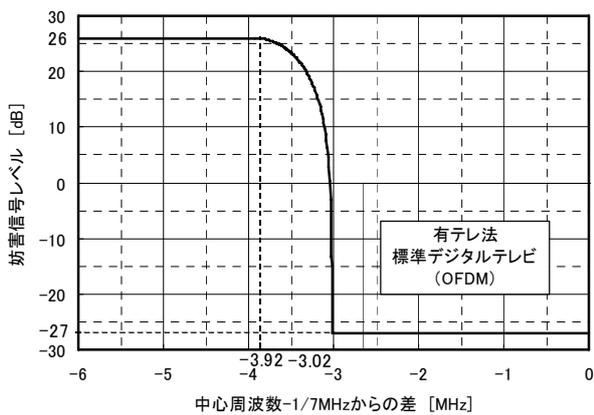


図8 標準デジタルテレビジョン放送方式  
の下側周波数

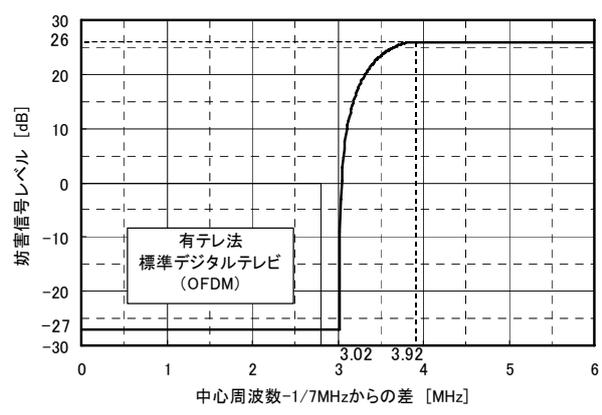


図9 標準デジタルテレビジョン放送方式  
の上側周波数

注：図4から図9までの曲線部分などの数値は別に示す。

\* 1 : 図4に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

映像搬送波周波数との差の周波数  $f$  MHz

$$\begin{aligned} \cdot L = -78.7 \text{ [dB/Hz]} & \quad f \leq -2.17\text{MHz} \\ & \quad -2.17\text{MHz} < f < -1.29\text{MHz} \end{aligned}$$

$$\cdot L = -78.7 + 20\log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{2(f+4.25) - f_0}{\alpha \cdot f_0}\right) \right)} \right\} \text{ [dB/Hz]}$$

ただし、 $f_0 = 5.057$  [MHz]、 $\alpha = 0.18$

$$\cdot L = -106 \text{ [dB/Hz]} \quad f \geq -1.29\text{MHz}$$

\* 2 : 図5に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

映像搬送波周波数との差の周波数  $f$  MHz

$$\begin{aligned} \cdot L = -106 \text{ [dB/Hz]} & \quad f \leq 4.75\text{MHz} \\ & \quad 4.75\text{MHz} < f < 5.39\text{MHz} \end{aligned}$$

$$\cdot L = -75.6 + 20\log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{2(f-7.75) + f_0}{\alpha \cdot f_0}\right) \right)} \right\} \text{ [dB/Hz]}$$

ただし、 $f_0 = 5.361$  [MHz]、 $\alpha = 0.12$

$$\cdot L = -75.6 \text{ [dB/Hz]} \quad f \geq 5.39\text{MHz}$$

\* 3 : 図6に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

中心周波数との差の周波数  $f$  MHz

$$\begin{aligned} \cdot L = 23 \text{ [dB]} & \quad f \leq -3.92\text{MHz} \\ & \quad -3.92\text{MHz} < f < -3.02\text{MHz} \end{aligned}$$

$$\cdot L = 23 + 20\log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{2(f+6) - f_0}{\alpha \cdot f_0}\right) \right)} \right\} \text{ [dB]}$$

ただし、 $f_0 = 5.057$  [MHz]、 $\alpha = 0.18$

$$\cdot L = -29 \text{ [dB]} \quad f \geq -3.02\text{MHz}$$

\* 4 : 図7に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

中心周波数との差の周波数  $f$  MHz

$$\cdot L = -29 \text{ [dB]} \quad f \leq 3.02\text{MHz}$$

$$3.02\text{MHz} < f < 3.92\text{MHz}$$

$$\cdot L = 23 + 20 \log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \sin \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{2(f-6) + f_0}{\alpha \cdot f_0} \right) \right)} \right\} \quad [\text{dB}]$$

$$\text{ただし、} f_0 = 5.057 \text{ [MHz]、} \alpha = 0.18$$

$$\cdot L = 23 \text{ [dB]} \quad f \geq 3.92\text{MHz}$$

5 : 図 8 に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

中心周波数  $-1/7\text{MHz}$  との差の周波数  $f \text{ MHz}$

$$\cdot L = 26[\text{dB}] \quad f \leq -3.92\text{MHz}$$

$$-3.92\text{MHz} < f < -3.02\text{MHz}$$

$$\cdot L = 26 + 20 \log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{2(f+6) - f_0}{\alpha \cdot f_0} \right) \right)} \right\} \quad [\text{dB}]$$

$$\text{ただし、} f_0 = 5.057 \text{ [MHz]、} \alpha = 0.18$$

$$\cdot L = -27[\text{dB}] \quad f \geq -3.02\text{MHz}$$

\* 6 : 図 9 に示す妨害信号レベルの基準となる線のレベル  $L$

中心周波数  $-1/7\text{MHz}$  との差の周波数  $f \text{ MHz}$

$$\cdot L = -27\text{dB} \quad f \leq 3.02\text{MHz}$$

$$3.02\text{MHz} < f < 3.92\text{MHz}$$

$$\cdot L = 26 + 20 \log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \sin \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{2(f-6) + f_0}{\alpha \cdot f_0} \right) \right)} \right\} \quad [\text{dB}]$$

$$\text{ただし、} f_0 = 5.057 \text{ [MHz]、} \alpha = 0.18$$

$$\cdot L = 26 \text{ [dB]} \quad f \geq 3.92\text{MHz}$$

## V-ONU 出力における推定 CN 比の計算式

強度変調方式と FM 一括変換方式の場合の V-ONU 出力の推定 CN 比は、式 (1-1) と式 (1-2) で求められる。

・強度変調方式の場合

$$C/N = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{B_N} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot (m_k \cdot R \cdot P_r)^2}{RIN(R \cdot P_r)^2 + 2 \cdot e \cdot (I_{d0} + R \cdot P_r) + I_{eq}^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

ただし、

$$M = \sqrt{\sum_{k=1}^K m_k^2}$$

なお、式中で用いた記号の意味は以下のとおりである。

- $B_N$ : 雑音帯域幅 (AM-VSB:  $4.0 \times 10^6$  [Hz]、64QAM:  $5.3 \times 10^6$  [Hz])
- $K$ : 伝送搬送波数
- $M$ : 全光変調度
- $m_k$ : k 番目搬送波の光変調度
- $R$ : 受光素子の光-電気変換効率 [A/W]
- $P_r$ : V-ONU 受光電力 [W]  
(WDM フィルタを使用する場合は、その損失分を差し引くこと。)
- $RIN$ : 入力信号光の相対強度雑音 (RIN) [1/Hz]
- $e$ : 電子素量 ( $1.602 \times 10^{-19}$  [C])
- $I_{d0}$ : 受光素子の暗電流 [A]
- $I_{eq}$ : 受光部の入力換算雑音 [ $A/\sqrt{\text{Hz}}$ ]

・FM 一括変換方式の場合

FM 一括変換方式の CN 比は、FM 変調器の雑音特性および FM 伝送区間の雑音特性の和に、広帯域利得を加味することにより求められる。

$$C/N = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{2 \cdot B_N} \cdot \frac{\Delta F^2(f)}{f^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{C/N_{mod}(f)} + \frac{1}{C/N_{ONU}}} \right) \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数 [MHz]
- $B_N$ : 雑音帯域幅 (AM-VSB:  $4.0 \times 10^6$  [Hz]、64QAM:  $5.3 \times 10^6$  [Hz])
- $\Delta F(f)$ : 周波数偏移量 [ $\text{MHz}_{0-p}/\text{ch}$ ]
- $C/N_{mod}(f)$ : FM 変調器の単位周波数幅当たりの雑音特性 [ $1/\text{Hz}^{-1}$ ]
- $C/N_{ONU}$ : FM 伝送区間の単位周波数幅当たりの雑音特性 [ $1/\text{Hz}^{-1}$ ]

周波数偏移量は導入事例ごとに自由に設定することが可能であるが、ITU-T 勧告書 J.185

においては以下の式で与えられている。

$$\Delta F(f) = 70.0 \cdot 10^{\frac{12.9(f-47)}{16340}} \cdot 10^{\frac{V_{in}-85}{20}} \quad [\text{MHz}_{0-p}/\text{ch}]$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数, MHz  
 $V_{in}$ : 光送信装置への入力搬送波レベル [dB  $\mu$  V/ch]  
 (AM-VSB: 85 [dB  $\mu$  V/ch], 64QAM: 75 [dB  $\mu$  V/ch])

FM 変調器の実現に光ヘテロダイン技術を用いる場合、FM 変調器の単位周波数幅当たりの雑音特性  $C/N_{mod}(f)$  は光ヘテロダイン部の単位周波数幅当たりの雑音特性、および、単位周波数幅当たりの位相雑音の和として求められる。典型値を代入した場合は以下のようになる。

$$C/N_{mod}(f) = \frac{1}{\frac{1}{C/N_{heterodyne}} + \frac{1}{C/N_{phase}(f)}} = \frac{1}{10.0 \times 10^{-15} + \frac{2 \times 10^{-8}}{\pi \cdot f^2}} \quad [1/\text{Hz}^{-1}]$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数 [MHz]

FM 伝送区間の単位周波数幅当たりの雑音特性  $C/N_{ONU}$  は以下の式により求まる。

$$C/N_{ONU} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (m \cdot R \cdot P_r)^2}{RIN \cdot (R \cdot P_r)^2 + 2 \cdot e \cdot (I_{d0} + R \cdot P_r) + I_{eq}^2} \quad [1/\text{Hz}^{-1}]$$

ただし、

- $m$ : FM 一括変換信号の光変調度  
 $R$ : 受光素子の光-電気変換効率 [A/W]  
 $P_r$ : V-ONU 受光電力 [W]  
 (WDM フィルタを使用する場合は、その損失分を差し引くこと。)  
 $RIN$ : 入力信号光の相対強度雑音 (RIN) [1/Hz]  
 $e$ : 電子素量 ( $1.602 \times 10^{-19}$  [C])  
 $I_{d0}$ : 受光素子の暗電流 [A]  
 $I_{eq}$ : 受光部の入力換算雑音 [ $A/\sqrt{\text{Hz}}$ ]

・ 光増幅器による RIN 劣化

光増幅器の多段接続による RIN 劣化は以下の式により求まる。

$$RIN_{out} = 10 \log_{10} \left( \sum_k \frac{2 \cdot E \cdot 10^{\frac{NF_k}{10}}}{10^{\frac{P_k}{10}}} + 10^{\frac{RIN_{in}}{10}} \right) \quad [\text{dB}/\text{Hz}]$$

ただし、

- $RIN_{in}$ : 1 段目の光増幅器入力光の RIN [dB/Hz]  
 $RIN_{out}$ : k 段目の光増幅器入力光の RIN [dB/Hz]  
 $E$ : フォトンエネルギー (1555nm の場合、 $1.278 \times 10^{-16}$  [mJ])  
 $NF_k$ : k 段目の光増幅器の雑音指数 [dB]  
 $P_k$ : k 段目の光増幅器の入力光電力 [dBm]

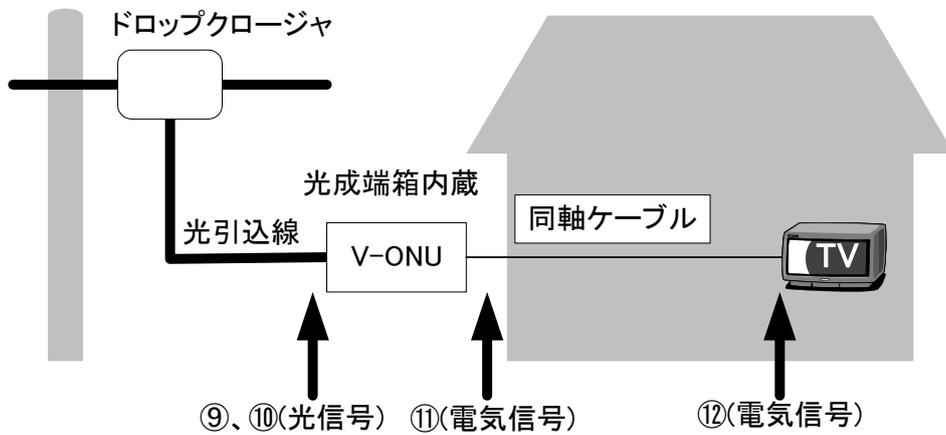


図 1 V-ONU 屋外設置

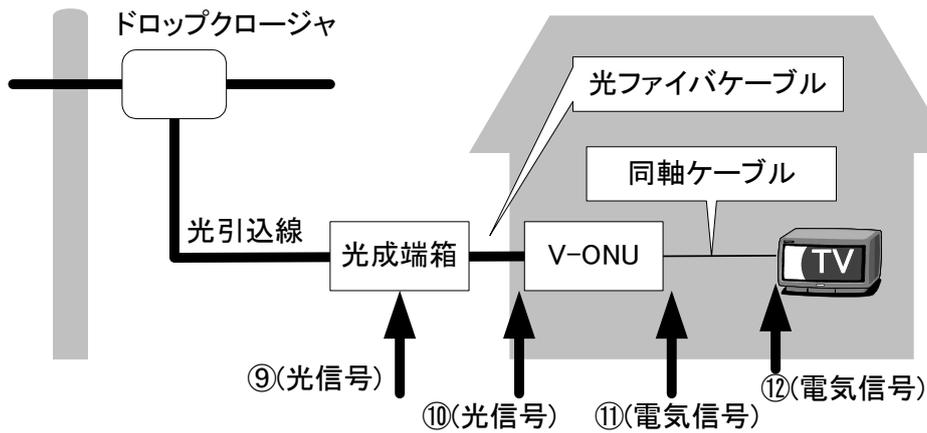


図 2 V-ONU 屋内設置

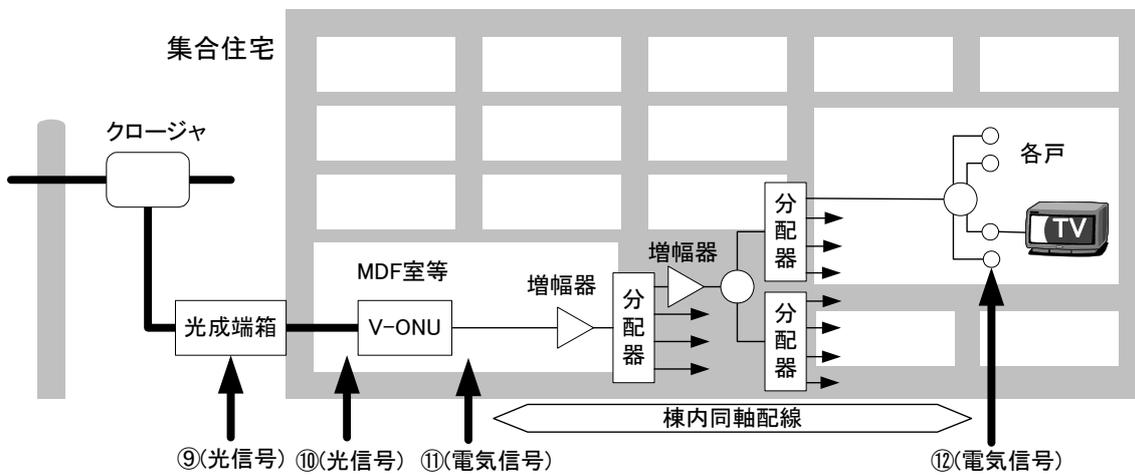


図3 電気信号の状態で各戸に配置

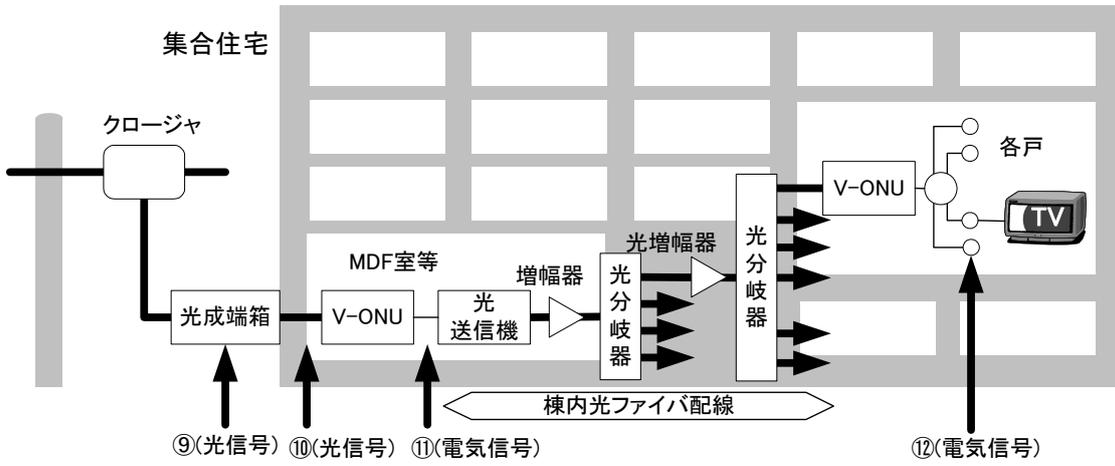


図4 電気信号を再び光信号に変換し各戸に配信

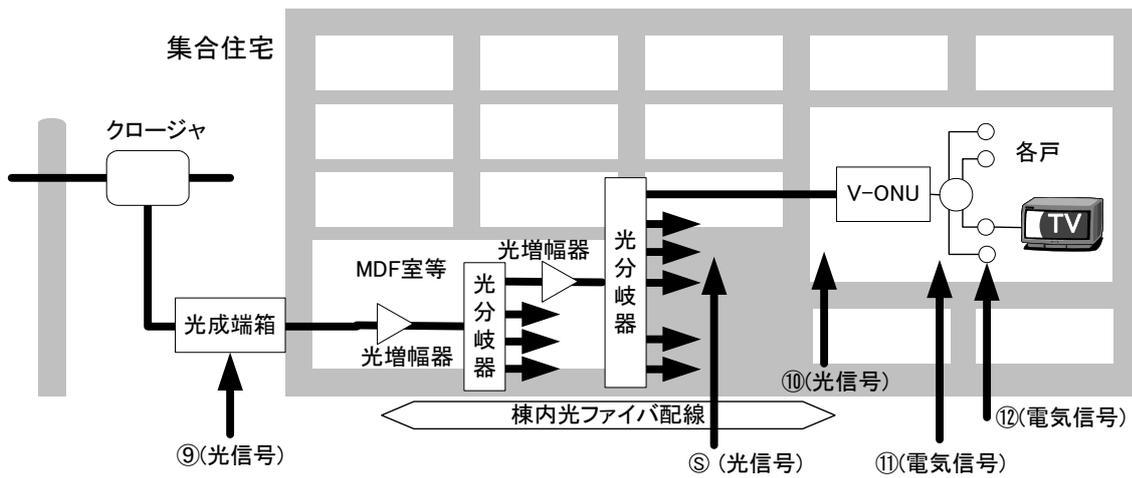


図5 光のまま各戸まで配信

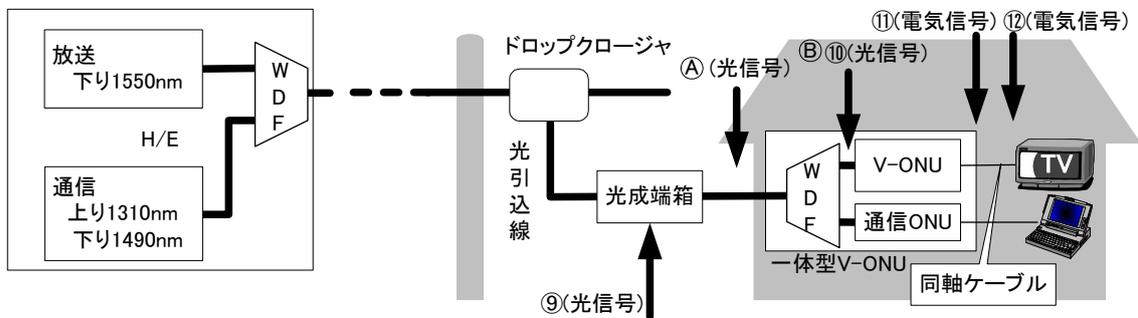


図6 放送サービスと通信サービスが同一心の光ファイバで提供される方式

# ケーブルテレビネットワーク高度化委員会報告

## 目 次

	頁
I 審議事項	2 0
II 委員会等の構成	2 0
III 審議経過	2 0
IV 審議概要	2 0
V 審議結果	2 0
別表（委員会等の構成）	2 1
別紙（審議概要）	2 3
参考（意見陳述）	6 5
別紙資料	6 7
参考資料	1 7 5

## 別紙資料

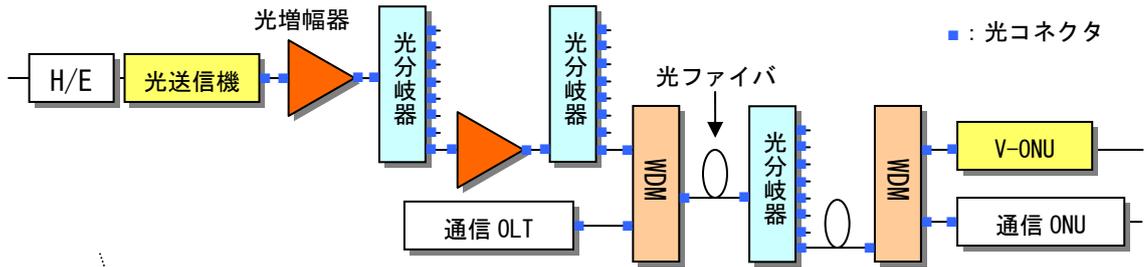
	頁
別紙 1 ケーブルテレビネットワークの現状	6 9
別紙 2 光ネットワークに影響を与える要素	7 7
別紙 3 ケーブルテレビネットワークの性能規定点	1 0 4
別紙 4 現行のケーブルテレビネットワークの性能配分	1 1 6
別紙 5 FTTH 等光ケーブルテレビネットワークの性能配分（自設の場合）	1 2 4
別紙 6 性能規定点の所要性能	1 3 4
別紙 7 電気通信役務回線の利用形態について	1 4 1
別紙 8 漏えい電界強度	1 4 6
別紙 9 スペクトルマスクによる定められた有線テレビジョン放送以外からの妨害評価基準	1 4 8
別紙 1 0 レーザ光の安全性について	1 6 0
別紙 1 1 測定方法	1 6 4

## 光ネットワークに影響を与える要素

FTTH 等光ネットワークに影響を与える要素について検討する。光ネットワークを構成する光関連機器に関する事項や光ネットワークとして考慮すべき項目（光波長、反射、非線形歪、波長多重光信号間の干渉など）についても概説する。

### 1 光ネットワーク構成機器が光ネットワークに影響を与える要素

光ネットワークにおいて、構成機器が光ネットワークに影響を与える要素を図1に示す。具体的には、光ネットワークの主な構成要素には、光送受信機、光ファイバ、光増幅器、光分岐器（光スプリッタ）、WDM フィルタ（波長合分波フィルタ）、光コネクタなどがあり、ここでは、各構成要素の概要と留意すべき事項について述べる。



	光送信部	光伝送路	光受信部
光送信機	1 性能劣化要因 RIN、歪特性、光変調度、出力安定性、SBS 対策 2 変調方式 強度変調、FM 一括変換 3 光出力パワー +5dBm~+8dBm	—	—
光増幅器	1 性能劣化要因 RIN、歪特性 利得の信号波長依存性、APC ダイナミックレンジ 出力安定性 2 光出力パワー 最大+22dBm 程度	—	—
光分岐器	1 性能劣化要因 挿入損失、方向性、反射特性 偏光依存性損失	1 性能劣化要因 挿入損失、方向性、反射特性、偏光依存性損失	—
光コネクタ	1 性能劣化要因 接続損失、反射特性	1 性能劣化要因 接続損失、反射特性	1 性能劣化要因 接続損失、反射特性
WDM フィルタ	1 性能劣化要因 挿入損失、偏光依存性損失、帯域内リップル、合分波帯域、アイソレーション (波長分離度)	—	1 性能劣化要因 挿入損失、偏光依存性損失、帯域内リップル、合分波帯域、アイソレーション (波長分離度)
光ファイバ (石英系シングルモード光ファイバ)	—	1 性能劣化要因 伝送損失、波長分散、レイリー散乱、非線形光学効果 (SBS など)、接続特性 (反射減衰量、接続損失) 2 入力光パワー制限 6dBm 程度 (SBS 対策無しの場合) 18dBm 程度 (SBS 対策有りの光送信機を用いた場合)	—
V-ONU	—	—	1 性能劣化要因 光受信回路雑音、歪特性、周波数応答特性、光入力パワーレンジ、AGC ダイナミックレンジ

注：SBS (Stimulated Brillouin Scattering:誘導ブリュアン散乱)

V-ONU (Video Optical Network Unit: 放送 ONU)

図 1 構成機器が光ネットワークに影響を与える要素

## 2 光関連機器に関する事項

### (1) 光送信機

光送信機では放送信号で光を変調して放送光信号を生成する。その光源となるレーザダイオードの光出力がランダムに微弱に高速で揺らぐことにより生じる相対強度雑音（RIN: Relative Intensity Noise、参考2参照）は、放送光信号をV-ONUで光—電気変換した際に電気雑音となるため、光信号の性能を示す指標となる。光変調方式には、強度変調方式とFM一括変換方式がある。強度変調方式には、レーザダイオードの注入電流を放送信号で変調する直接強度変調方式と光強度変調を光変調器で行う外部強度変調方式がある。FM一括変換方式は、周波数多重された多チャンネルテレビ信号（770MHz）をまとめてFM変調し、そのFM信号（数GHz）で光強度変調し光信号を生成する光変調方式である。本方式では、光伝送される信号がFM信号なので、V-ONUで復調した多チャンネル信号は光伝送で生じる種々の強度雑音に対して耐力が高いという特徴があり、このため、本方式で伝送した多チャンネル信号は後述する多重反射や線形／非線形クロストークの影響を受けにくい。光変調を低歪で行うためには直線性が保証されていない動作領域で光変調を行わないよう注意する必要がある。このため、直接強度変調方式の場合はレーザダイオードの直線性（すなわち、注入電流に対する光出力の直線性）に留意する必要がある。また、外部強度変調方式の場合は変調器の直線性に留意する必要がある。このような変調歪は一般的に光変調度を小さくすれば低減できるが、光変調度が小さすぎると受信後に所定のCN比を得られなくなる。光送信機の出力は一般に+5～+8.5dBm程度である。ヘッドエンドでは、多数のユーザに放送光信号を分配するため、光送信機出力を光増幅器で最大+22dBm程度までいったん増幅し、それを光分岐器（光スプリッタ）で複数の出力に分岐し、それらをまた光増幅器で増幅する、ということは何段か繰り返す。高出力の光信号を光ファイバに注入すると、光ファイバの長さによっては誘導ブリュアン散乱（Stimulated Brillouin Scattering: SBS）現象が発生し、光信号のRINを劣化させることがある。SBSが問題となる光ファイバ入力パワーは、一般的な石英系シングルモード光ファイバの場合、+6～7dBm程度以上といわれているので、SBS対策を施した光送信機を使用しないとこれ以上の光パワーを入力できなくなり、伝送距離や収容ユーザ数が減少する。このため、SBS対策を施した光送信機が開発されており、この場合は、SBSが問題とならない最大光ファイバ入力パワーを+18dBm程度まで増加させることができる（参考3参照）。SBS対策には、放送光信号の可干渉性を意図的に低下させる（すなわち、実効的な光スペクトル幅を拡大する）などの方法がある。

### (2) V-ONU

V-ONUは受信した放送光信号を電気の放送信号に変換して出力するものであり、FTTHでは必須の機器である。受信した放送光信号を電気放送信号に変換するV-ONUのフォトダイオードは、一般的に、1300nm帯～1600nm帯の広い波長範囲に対応可能である。V-ONUへの入力光レベルが小さすぎるとV-ONUの光受信回路雑音によりV-ONU出力に

おける CN 比が劣化し、V-ONU 入力光レベルが大きすぎると V-ONU 出力が歪むという問題がある。V-ONU は広帯域な多チャンネル放送信号に対応できるように、770MHz もしくは約 2GHz の広い帯域にわたって良好な周波数応答特性（例えば、平坦性や低リップル性など）を有することが必要である。また、V-ONU には、基本的に、低歪で放送信号を出力できる回路特性が求められる。図 2 に、V-ONU の受光レベルと出力放送信号の CN 比の関係の一例を示す。なお、図 2 の計算では下記のパラメータを使用した。

〔強度変調方式〕(EDFA:4 段連続、入力光レベル+4.5dBm、NF6.2 dB の場合)

- ・ 光変調度: 4.31 % / キャリア (AM40 搬送波+QAM30 搬送波)
- ・ O/E 変換効率: 0.84 A/W
- ・ 雑音帯域幅: 4.0 MHz (アナログ放送信号相当)
- ・ 暗電流: 1.3 nA
- ・ 入力換算雑音: 10 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- ・ V-ONU 入力光の RIN: -147.8 dB/Hz

〔FM 一括変換方式〕

- ・ 光変調度: 70 % / キャリア
- ・ 搬送波周波数: 450 MHz
- ・ 周波数偏移量: 145.6 MHz<sub>0-p/ch</sub> (AM40 搬送波+QAM30 搬送波)
- ・ O/E 変換効率: 0.8 A/W
- ・ 雑音帯域幅: 4.0 MHz (アナログ放送信号相当)
- ・ 暗電流: 100 nA
- ・ 入力換算雑音: 15 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- ・ V-ONU 入力光の RIN: -136.0 dB/Hz

強度変調方式の場合、V-ONU への入力光レベルが変動すると出力放送信号の CN 比が変動するだけでなく出力放送信号の信号レベルも変動するが、AGC 機能などを付加することにより出力放送信号の変動をある程度補償することができる。現在、約 6dB 程度ダイナミックレンジの AGC 機能付き V-ONU が開発されているが、総チャンネル数や放送方式（アナログ／デジタル）などの諸条件により受信光レベルの許容値が大きく変わるので、ひとつの V-ONU でこのような広い受光レベル範囲にどこまで対応できるかどうかは今後の商品化の課題であるとともに、ネットワークの性能配分等を検討する際には標準化の検討も必要となる。V-ONU の受信光レベルは受信信号の CN 比に影響するので、受信光レベルを管理することが必要となる。受信光レベルの測定は波長及びレベルが校正された光パワーメータを用いれば簡単に行えるが、通信光信号と放送光信号を波長多重伝送する光ネットワークの場合は、必要に応じて WDM フィルタを用いて光パワーメータに通信光信号が混入しないようにすると共に、当該 WDM フィルタの挿入損失を考慮する必要がある。

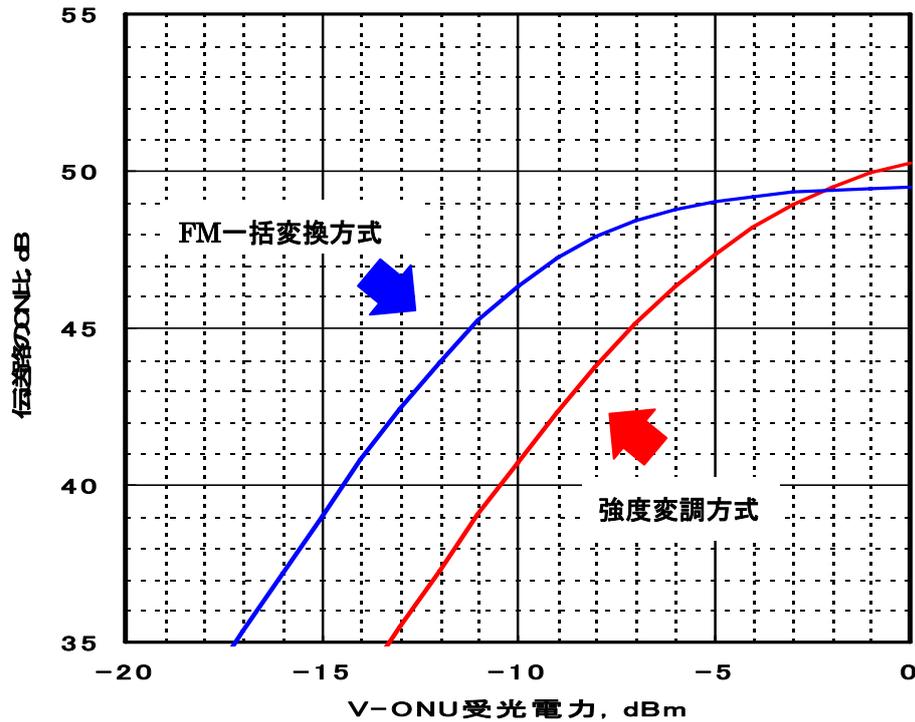


図 2 V-ONU の受信光レベルと出力信号の CN 比の関係

(3) 光ファイバ

光ファイバは伝送路を構成するものであり、その特性はネットワークの性能に大きく影響する。一般的な石英系シングルモード光ファイバでは、1300nm 帯～1600nm 帯の広い波長範囲にわたって低損失で安定な光信号伝送を行うことができる。実環境では光ファイバは数 km 毎に接続されることが多い。光ファイバ接続には、局部的／瞬間的にガラスを溶かすことにより高安定で低損失な接続が行える融着接続と、平坦に断面を切断した光ファイバをつきあわせ、その接続点を簡便な光部品で固定するメカニカルスプライスがある。光ファイバ接続は、光ファイバ本来の低損失伝送特性が損なわれないように注意して行うことが重要である。非常に良好な作業環境であれば、融着接続での接続損失は 0.1dB 以下、メカニカルスプライスでの接続損失は 0.3dB 以下となる。また、後述するように、接続点での反射を小さくすることは良好な光伝送を行う上で重要となる。融着接続では、光ファイバの光学的な不連続性が非常に小さいので接続点の反射減衰量は 60dB 以上となり、このため、接続点における反射は実用上無視できる。メカニカルスプライスでも良好に施工されれば 35dB 以上の反射減衰量で接続可能なことがわかっている。光伝送上留意すべき光ファイバのその他の特性を以下に記す。

ア レイリー散乱

レイリー散乱(Rayleigh Scattering)は、使用する波長よりも小さな物質の密度や成分の不

均一によって生じる光の散乱現象で、ガラスで構成される石英系シングルモード光ファイバ内を伝送する光はレイリー散乱により減衰する。レイリー散乱は光ファイバの本質的な伝送損失要因のひとつで、その影響が波長の四乗に反比例するため、光伝送で使用される波長範囲では基本的に波長が長いほど伝送損失が小さくなる。また、レイリー散乱は光信号の伝搬方向と同じ方向にも逆方向にも生じるので、レイリー散乱によって光ファイバ全体にわたり無数の多重反射が発生し光信号の RIN を劣化させるが、散乱強度が非常に小さいため実際には光伝送に対する影響は極めて小さい。

#### イ 波長分散

一般的に、光ファイバを光信号が伝搬する速度は波長によって僅かに異なり、その特性は光ファイバの材質や構造により変化する。この現象は群遅延分散 GVD (Group Velocity Dispersion) や波長分散 (Chromatic Dispersion) と呼ばれ、光信号を構成する各スペクトル成分が異なる伝搬時間で伝送されるので、伝送後の光信号に波形劣化が生じる。このような波形劣化は、光信号スペクトルが広い場合や長距離伝送で累積波長分散が大きくなる場合に問題となる。例えば、半導体レーザを用いて直接強度変調された光信号は、一般的に、強度変調と同時にチャープと呼ばれる波長の変動を伴い、光信号スペクトルが大きく広がるため、光ファイバの波長分散特性によって放送信号に無視できない複合 2 次歪 (CSO) が生じる場合がある。この現象は、1300nm 帯零分散シングルモード光ファイバの場合 (注:これが実際に用いられる光ファイバの大部分を占める)、波長分散の無い 1310nm 近傍では小さくなるが、1500nm 帯の光信号を用いた長距離伝送の場合は問題となることがある。

#### ウ 非線形光学効果

光ファイバに入力する光信号パワーが高くなると、光ファイバの出力に入力光信号とは異なる光スペクトルが生じたり、波長多重信号間で混信したりすることがあり、これらは非線形光学効果と呼ばれる。石英系光ファイバは、材質的には極低非線形物質に属するが、伝送損失が小さいので長距離にわたって高光パワー状態が持続するため、光ネットワークにおいて非線形光学現象による歪やクロストークなどが無視できない場合がある。非線形光学効果の低減には光パワーの低下が最も有効であるが、現象によっては、光信号のスペクトル幅／変調方式や光ファイバの分散特性や光信号波長の選択を工夫することにより低減できる場合もある。

##### (ア) 自己位相変調 SPM (Self-Phase Modulation)

入射光の光パワーに比例して、光ファイバの屈折率が変化する現象をカー効果と呼び、信号光自身の光パワーによって生じた屈折率変化により位相変調がかかることを自己位相変調と言う。

##### (イ) 相互位相変調 XPM (Cross-Phase Modulation)

カー効果により、波長多重している他の光信号の光パワーによって生じた屈折率変化で位相変調がかかることを相互位相変調と言う。

(ウ) 四光波混合 FWM(Four-Wave Mixing)

2 波長以上の波長多重伝送において、各信号間のビートで生じる強度変化がカー効果を通じて光位相変調を発生させ混変調を生み出すことを四光波混合という。各信号間のビートが本効果の源泉となっているため、波長分散が大きい場合(つまり、各信号間の位相整合が取りにくい場合)や信号間の波長差が大きい場合(すなわち、波長分散の影響が大きくなることに相当)はビートが発生しにくくなるため、四光波混合の影響も低減される。

(エ) 誘導ラマン散乱 SRS(Stimulated Raman Scattering)

媒質に光を入射したとき、入射光と入射光により生じる光学フォノン(結晶格子の光学的振動)との相互作用により発生する散乱で、関与する光学フォノンのエネルギーに対応した周波数分だけ周波数が低減した光に変換される(つまり、入射光の波長より長い波長の光が生成される)。この散乱光は、ストークス光と呼ばれ、前方散乱も後方散乱も同程度に観測される。石英系光ファイバの場合、ストークス光は数十 nm 程度の広い波長範囲にわたって発生するが、ラマン散乱効果が最も強く現れるストークス光の波長は入射光よりも約 13THz 周波数が低くなる光周波数の波長で、その波長差は 1500nm 帯では概ね 100nm となる(例えば、1450nm の光を入射すると 1550nm 近傍に最も強いストークス光が現れる)。ラマン散乱効果は、ストークス光の波長と同じ波長の光を同時に光ファイバに入射するとさらに促進され、両波長間の混信が発生する。

(オ) 誘導ブリュアン散乱 SBS(Stimulated Brillouin Scattering)

SBS は、入射光と媒質中を通過する音波(結晶格子の音響的振動)との相互作用により発生する散乱である。ブリュアン散乱で発生するストークス光は、入射光波長が 1300nm 帯~1600nm 帯の場合、入射光の波長から約 10GHz(1600nm)~約 13GHz(1300nm 帯)程度周波数が低くなった光となり、後方散乱のみしか発生しない。誘導ブリュアン散乱が発生すると、入力光パワーの大半が入力側に反射される上、出力光の出力が揺らぎ光信号の RIN が劣化する。

(4) 光増幅器

一般的に、光増幅器は、10~30dB 程度の利得で入力光信号を増幅し、数十~数百 mW 程度の高パワーの光信号を出力することができる。光ネットワークで最も一般的な光増幅器はエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)で、その物性上、本質的には 1MHz 以上の速度で強度変調された光信号に対して極めて低歪な光増幅を行うことができる。しかしながら、光増幅器を構成する光部品の挿入損失偏光依存性が十分小さくないと、光信号の光スペクトル幅が広い場合(例えば、直接変調によるチャープイング)、無視できない歪が生じるので留意を要する。光増幅器が発生する光雑音は光信号の RIN を劣化させるので、使用する光増幅器は低雑音である(すなわち、雑音指数が小さい)ことが望ましい。

なお、利得の信号波長依存性が十分低減されていないと、放送光信号の光スペクトル幅が広い場合に放送信号に無視できない複合 2 次歪 (CSO) を生じさせる場合もあるので[1]、信号波長帯近傍における利得の波長特性が十分平坦化されていることに注意する必要がある。光ネットワークで使用する光増幅器の出力光パワーは高いので、安全性に関する配慮とともに、関連する光部品を焼損させないような建設・保守運用上の管理が重要となる。

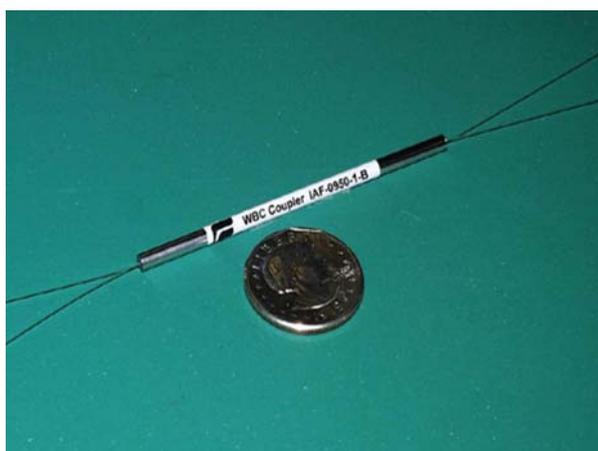
#### (5) 光分岐器

光分岐器は入力された光パワーを等分に分配して出力する素子である。図 3 にその製品例を示す。光スプリッタについては、出力端子間の挿入損失にばらつきが少ないこと、過剰損失（注：過剰損失＝挿入損失－分岐損失、分岐損失とは分岐数によって決まる本質的な損失で、例えば、2 分岐なら 3dB）や偏光依存性損失が小さいこと、などが重要であるが、運用上は未使用の開放端子の反射減衰量にも留意が必要となる。

#### (6) WDM フィルタ

WDM フィルタは、波長の異なる放送光信号と通信光信号を合分波するための光部品である。図 4 にその製品例を示す。挿入損失が小さいこと、アイソレーション（波長分離度）が大きいこと（すなわち、不要波長の除去率が大きいこと）、偏光依存性損失が小さいことなどが重要となる。分離する波長の間隔が広がると高いアイソレーションを得ることは容易になり、例えば、1490nm と 1550nm とを分波する WDM フィルタでは 30dB 以上のアイソレーションが可能で、最近では 40～50dB の高いアイソレーションを一枚の光フィルタで達成している製品もある。合分波できる各波長帯の帯域が広く、かつ、帯域内リップル（すなわち、透過帯域内での挿入損失リップルやそれに対応する群遅延リップル）が小さいことも WDM フィルタの重要な特性である。合分波

(a)



(b)

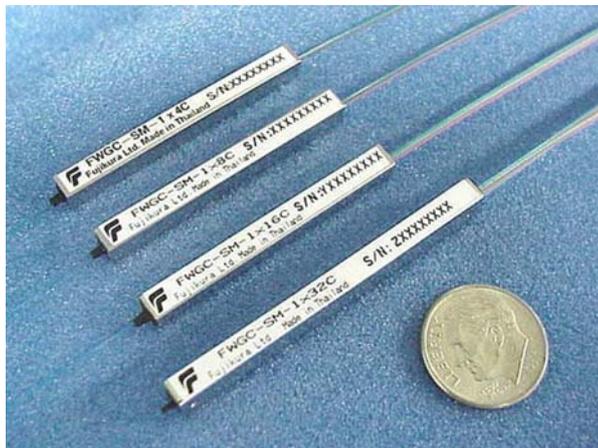


図3 光分岐器の一例 (情報提供: (株)フジクラ殿)

(a) 溶融延伸型、(b) PLC (Planer Lightwave Circuit) 型



図4 WDM フィルタの一例 (情報提供: (株)フジクラ殿)

帯域が広ければ利用できる光信号波長帯が広がるので好ましいが、高いアイソレーションと両立させるには遮断帯域における光フィルタの波長選択特性を急峻にしなければならず、製造難度とコストが高くなると共に帯域内リップルの低減が難しくなる。帯域内リップルは放送光信号を歪ませるので十分低減する必要がある。

#### (7) 光コネクタ

光コネクタは、サブミクロン程度の超高精度な軸あわせが必要な光ファイバ接合を簡便に行える接続部品であり、その形状や端面研磨にいくつもの種類がある。光コネクタでは、取り扱いが容易で接続が確実で安定なこと、低損失で接続できること、接合点での反射が少ないことなどが重要となる。低損失な接合のためには、光コネクタ端面の清掃が重要で、ごみや汚れの付着は厳禁である。光コネクタ端面が汚れていると、光パワーが数十～数百 mW に大きくなった場合に光コネクタが焼損する原因にもなる

ので嚴重な注意を要する。また、光コネクタを確実に接合しないと接続損失の増大や反射問題の原因となるので嚴重な注意を要する。光コネクタ接合面あたりの反射減衰量は、PC 研磨で 25dB、AdPC (SPC) 研磨で 40dB、APC 研磨で 60dB 程度であり、用途に合わせ使い分ける事が必要となる。基本的に、APC 研磨の光コネクタを PC 研磨や SPC 研磨の光コネクタと接合させ使用するのは好ましくない。光コネクタ端を開放した場合、APC 研磨であれば光コネクタ出力光がその進行方向に対して一定の角度で反射されるので光コネクタ端面で生じた反射光が光ファイバに戻ってくる量は非常に少なく高い反射減衰量を維持できるが、PC 研磨や SPC 研磨の場合は光コネクタ端面で生じた反射光が光ファイバに戻ってくるため反射減衰量が 14dB 程度に劣化してしまうので使用上注意する必要がある。

### 3 光ネットワークとして考慮すべき項目

前項では光ネットワークに用いられる機器、部品等について特徴を述べたが、光ネットワークとして考慮すべき項目を記述する。

#### (1) 信号波長

FTTH を用いた放送を行う場合、伝送性能や経済性及び通信光信号との整合性といった観点から、放送に適した光波長を検討することは重要である。一般的にはシングルモード光ファイバが用いられており、ここではこれを用いて光信号伝送する場合に利用可能な光波長について概説する。光部品の多くは動作波長域が広く、かつ、その波長特性が比較的緩やかに変化することが多いため、利用域の上限・下限を厳密に規定することが困難な場合が多い。なお、このような状況を鑑み、以下の説明では波長範囲の表記は概数となっており、例えば、利用可能な波長域が概ね 1300nm 近傍から 13XXnm である場合は「1300nm 帯」と記載した。また、以下の説明では、「C バンド」(1530～1565nm)や L バンド(1565～1625nm)といった、ITU-T で規定されている波長帯の呼称も使用した。

## ア 主な光部品の波長特性

表1に、光ファイバを用いた光伝送システムにおける要素部品とその波長特性を示す。基本的には、1300nm 帯から 1600nm 帯の光信号は放送に利用可能であり、特に、通信において実績があり関連光部品も豊富な 1300nm 帯や 1500nm 帯の波長域は、経済的な光伝送に適した波長域と考えられる。なお、光増幅器の波長特性については次項で概説する。

表 1 光ファイバを用いた光伝送システムの主な要素部品とその波長特性

要素部品	波長特性
光ファイバ	1300nm 近傍～1600nm 近傍にわたり一括対応可能 (但し、1550nm 帯近傍が最低損失波長帯)
発光素子	1300nm 近傍～1600nm 近傍の範囲で 各波長/各波長域に個別に対応可能
受光素子	1300nm 近傍～1600nm 近傍にわたり一括対応可能
光増幅器	一般的には、1300nm 近傍～1600nm 近傍の範囲で 特定の波長帯に対応可能
光分岐器	1300nm 近傍～1600nm 近傍にわたり一括対応可能

## イ 光増幅器の種類と特長

現在利用可能な光増幅器の主な特長を表2と図5に示す。一般的な商用光通信システムで使用実績のある光増幅器はCバンド用EDFA及びLバンド用EDFAで、特に、Cバンド用EDFAは、性能的にも価格的にも優れ、現在、商用光伝送システムにおける標準的な光増幅器となっている。図6に、CバンドEDFAの利得/雑音特性の一例を示す。CバンドEDFAでは一般的に1550nm帯が利得/雑音特性に優れた波長帯となっている。

表 2 光増幅器と特長

光増幅器	EDFA増幅器 <sup>注1)</sup> (Cバンド)	EDFA 増幅器 (Lバンド)	PDFA増幅器 <sup>注2)</sup>	TDF A増幅器 <sup>注3)</sup>	ラマン増幅器
波長帯	1530～1570nm	1570～1610nm	1310～1340nm	1460～1500nm	1300～1600nm <sup>注4)</sup>
価格	安価	中価	高価	高価	非常に高価
利得	高い	高い	高い	高い	低い
雑音指数	小さい	小さい	小さい	小さい	小さい

注1)EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier:エルビウム添加光ファイバ増幅器)

注2)PDFA(Praseodymium-Doped Fiber Amplifier:プラセオジウム添加光ファイバ増幅器)

注3)TDF A(Thulium-Doped Fiber Amplifier:ツリウム添加光ファイバ増幅器)

注4)ラマン増幅は、原理的には、適当な励起光源さえあれば任意の波長帯を増幅波長帯にすることが可能であるが、現実には1300～1600nm帯を一括増幅するのは困難である。一般的な光通信システムにおいて実用可能な典型的な増幅波長帯域は、1500nm帯域内の任意の数十nm帯域である。

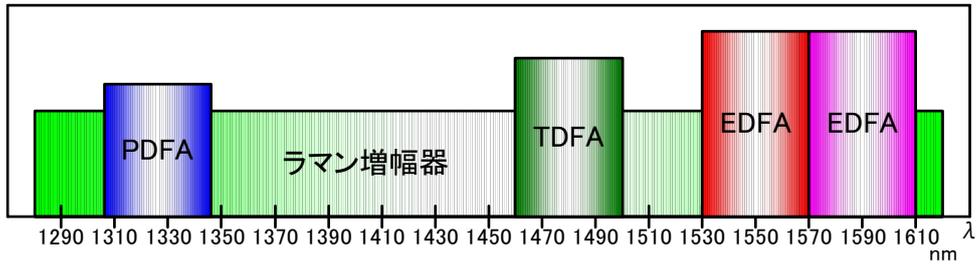


図 5 光増幅器の利得帯域

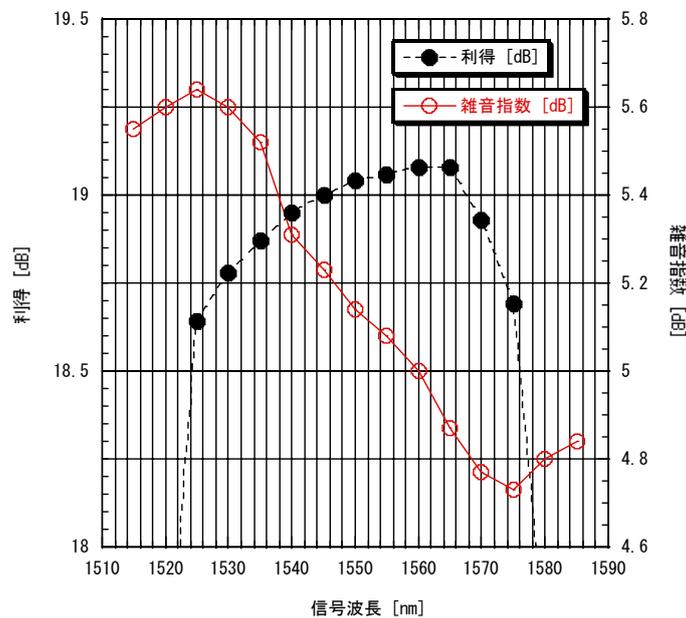


図 6 C バンド EDFA の利得／雑音特性の一例(入力信号レベル:3dBm)

ウ アクセス系光通信で用いられる光波長

アクセス系の回線では、使用される光ファイバの心数により使用する波長についての考え方も異なる。上り回線と下り回線、または、通信回線と放送回線を別々の光ファイバで取り扱う二心システムの場合は、各信号間の混信を考えなくても良いので、光ファイバ毎に使用する光信号を独立に選択できる。しかしながら、1本の光ファイバでこれらの信号を伝送する一心システムの場合は、混信を回避できる適切な波長選択が必要となる。アクセス系光通信で用いられる代表的な光波長は以下のとおりである。

(ア) PON(Passive Optical Network)システムの光波長

B-PON ( Broadband PON )、GE-PON ( Gigabit Ethernet PON ) 及び G-PON (Gigabit-capable PON)などの PON システムで用いられる通信用光波長は、ITUにおいて表 3 のように規定されている。また、B-PON では、放送回光波長が表 3 のように規定

されている (ITU-T G983.3)。一般的なシングルモードファイバの零分散波長は 1310nm 近傍にあるため、光信号波長が 1300nm 帯である場合には低廉な光源を用いても光ファイバの群遅延歪による信号波形劣化が比較的小さく良好な伝送特性を得ることが可能となる。このため、コスト低減の要求が強い加入者側の信号波長は 1300nm 帯となっている。なお、ITU-T G983.3 では、1539～1565nm の波長域を「additional digital service」に、L バンドを「future use」用に利用するバンドプランも規定されている。

表 3 PON 方式で用いられる光波長 (ITU-T G.983.3)

用途	光波長
通信(上り)	1260～1360nm
通信(下り)	1480～1500nm
放送(映像)	1550～1560nm

#### (イ) 一心双方向のメディアコンバータの光波長

一般の一心双方向のメディアコンバータでは、表 4 のような波長を使用することが多く、1500nm 帯の広い波長範囲が通信光信号の波長帯となる。このため放送光信号と波長多重する際には注意を要する。なお、Gigabit Ethernet 用に IEEE で規定された 1000BASE-BX10-D/U では、通信用光波長は表 5 のように規定されており、前述の PON システムと整合する。

表 4 TS-1000(TTC)及び 100BASE-BX10(IEEE 802.3)で用いられる光波長

用途	光波長
通信(上り)	1260～1360nm
通信(下り)	1480～1580nm

表 5 1000BASE-BX10(IEEE 802.3)で用いられる光波長

用途	光波長
通信(上り)	1260～1360nm
通信(下り)	1480～1500nm

#### エ 放送に適した光波長

基本的に、光ファイバ伝送では光ファイバ外に光信号が漏洩することは考慮しなくてよいので、システム毎に 1300nm 帯～1600nm 帯の中から所望の光波長を選択して利用することが可能である。しかし、伝送損失などの制約や経済性の面から現実的には適当な光波長帯が生じている。ここでは、前項をふまえ、光ネットワークにおける放送に適した光波長について、HFC を新設する場合、FTTH を新設する場合、既設 HFC を FTTH に変更する場合の3つの場合にわ

けて概説する。

(ア)HFC を新設する場合

HFC では、各ユーザへの放送信号分配が電気段で行われるため、光伝送区間の損失が必ずしも FTTH と同様に大きくならない場合がある。従って、光送受信機間伝送損失設計に余裕があれば、一般的に 1500nm 帯よりも経済性の高い光送受信機が利用可能な 1300nm 帯が使用される場合が多い。但し、光ファイバの伝送損失は、1300nm 帯よりも 1500nm 帯の方が小さいので、システム長が長い場合やシステム内の光損失が大きい場合には 1500nm 帯を使用するのが適している。また、1500nm 帯は、波長多重通信の種々の光部品が豊富なため、複数の下り/上り信号を一本の光ファイバで波長多重伝送することも比較的容易に実現可能で、利便性が高い特徴がある。

将来的には、1500nm 帯の普及によって 1500nm 帯光送受信機の低廉化も期待されることから、基本的には、1500nm 帯を使用することが望ましいと考えられる。

(イ) FTTH を新設する場合

FTTH では多くのユーザに放送光信号を分配することが必要となるので光送受信機間伝送損失が大きくなり、このため、光増幅器が必要となる場合が多い。経済的な光増幅器である EDFA は 1500nm 帯で利用可能である。光ファイバの伝送損失は 1500nm 帯が 1300nm 帯よりも小さい。また、PON 等で使用されているアクセス系通信用光信号と波長多重を行う場合、C バンド、特に、1550～1560nm 帯は、ITU-T などで推奨映像用光波長帯として規定されているため、通信用光信号と放送光信号の分離に必要な光部品の入手が容易である。このため、FTTH では 1500nm 帯を利用することが望ましいと考えられる。

(ウ) 既設 HFC を FTTH に変更する場合

既設設備の一部を使用して FTTH を行う際に、既設設備で使用していた光波長(例えば、1300nm 帯)が利活用できる場合は当該波長を使用することは可能であると考えられる。しかしながら光増幅器など前項と同じ観点から、1500nm 帯を利用することが望ましいと考えられる。

(2) 反射

光反射は、伝送路中で生じた屈折率の不整合(例えば、石英系光ファイバの屈折率は約 1.45～1.47 程度、空気の屈折率は約 1)により、伝搬する光信号の一部が進行方向と逆方向に戻る現象である。光伝送システムにおける光反射の原因には、①光ファイバの接続点や開放端における反射、②光ファイバでの後方レイリー散乱、③光分岐器の方向性(Directivity)などがある。反射光が光送信機及び光増幅器に入力されると放送光信号の RIN を劣化させる原因となるので、一般的には光アイソレータなどを使って対策がなされている。後方レイリー散乱はフレネル反射に比べ反射量が 40～60dB 低いため、反射による障害は発生しないほか、一般的に光分岐器は 50dB 以上の端子間分離度(方向性)を持っているので、問題は生じない。反射が特に問題となるのは光ファイバ線路上

に複数の反射点がある場合で、図7のように、多重反射により基本波と反射波が重なる  
と放送信号に位相歪が発生する。遅延差のある2波の光信号はランダムに変化している  
ため位相雑音は強度雑音となりRINの劣化をまねくので、各反射点での反射減衰量が十  
分大きくなるように考慮して多重反射の影響を抑えなければならない。空き端子の反射  
は、ダミー終端や簡易な端末処理等で低減できる。多重反射の影響は、放送光信号のRIN  
を測定することで評価することができる。

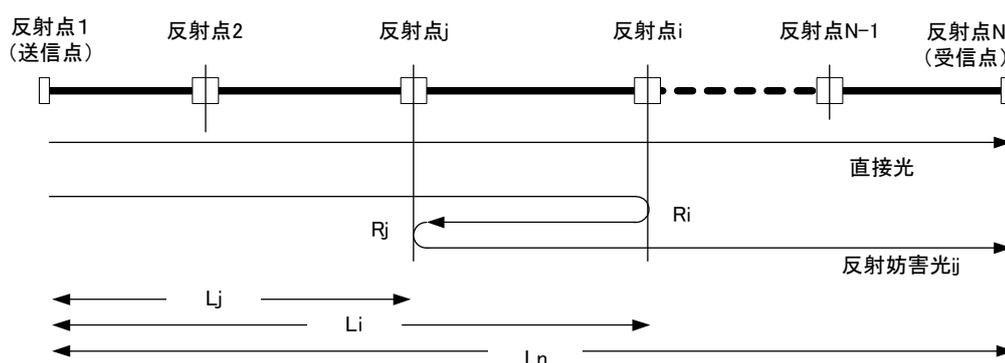


図7 多重反射の概念図

端点を含めてN点の反射点が存在する場合には、図7の様に、正常な信号に反射波が妨害  
波として作用する。反射点iと反射点jで反射して受信機に届く妨害波の光パワー $R_{ij}$  [dBm]は、  
光入力パワー $P_o$  [dBm]、各反射点での反射減衰量を $R_m$  ( $m=0, 1, 2, \dots, i, j, \dots, N$ ) [dB]、又、  
送信点～各反射点までの距離を $L_m$  ( $m=0, 1, 2, \dots, i, j, \dots, N$ ) [km]とすると、損失係数 $\alpha$  [d  
B/km]を用いて、以下の式(1)で表すことができる。直接光 $P_s$  [dBm]の強度は以下の式(2)で  
表されるから、信号対反射妨害波比(DU比) $=P_s - R_{ij}$  [dB]は、以下の式(3)となる。

$$\begin{aligned}
 R_{ij} &= P_o - \alpha L_i - R_i - \alpha (L_i - L_j) - R_j - \alpha (L_n - L_j) \\
 &= P_o - (R_i + R_j) - \alpha (2L_i - 2L_j + L_n) \\
 &= P_o - (R_i + R_j + \alpha (2L_i - 2L_j + L_n)) \quad \text{----- (1)} \\
 P_s &= P_s = P_o - \alpha L_n \quad \text{----- (2)} \\
 P_s - R_{ij} &= R_i + R_j + 2\alpha (L_i - L_i) \quad \text{[dB]} \quad \text{----- (3)}
 \end{aligned}$$

ここで、全体の反射減衰量を見積もる場合には、 $i, j$  だけを考慮することによって重複を避けること  
ができる。反射減衰量は通常ある程度大きいので4回以上の反射は無視できる。また、光フ  
ァイバの融着接続点は60dB以上の反射減衰量を持っているので、近接で複数の融着接続  
点があっても、無視できるレベルにある。

光ネットワーク上で最大の反射点となる可能性のあるところはクロージャ内での光分岐器の

開放出力光ファイバ端面で、その反射減衰量は最大約 14dB となる。このような光反射の実例として、図 8 に示すような、2、4、8、16 ポートの光分岐器の各出力ポートの先端を光ファイバカッタで切断した時の反射減衰量の測定結果を図 9 に示す。

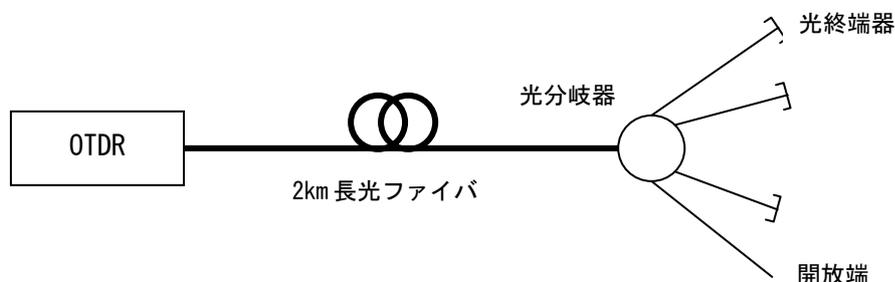


図 8 光分岐器の開放端における反射減衰量を評価するための測定系

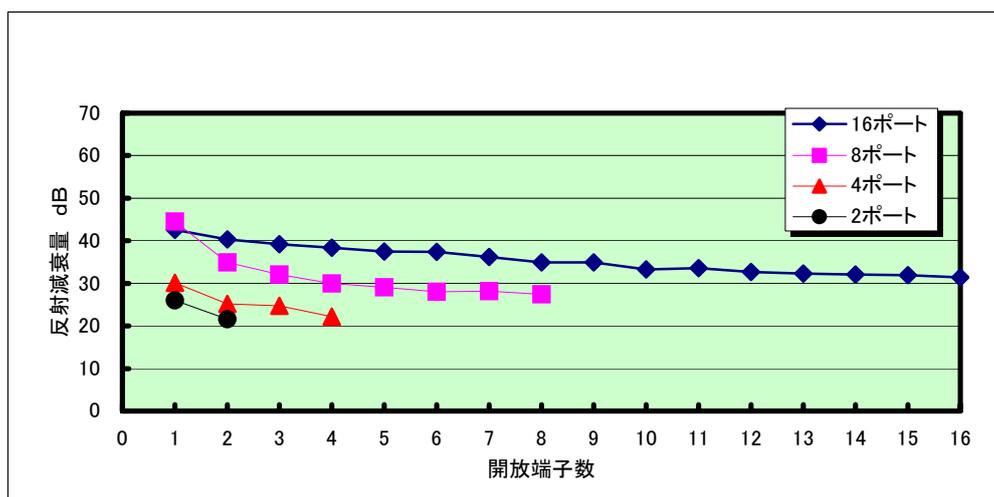


図 9 光分岐器の開放端子数と反射減衰量

測定では、2km 光ファイバを OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) と光分岐器間に接続し、各光分岐器開放端には、光ファイバ端面を光ファイバカッタで切断し作製した反射減衰量約 14dB の光終端器を接続した。光分岐器と光終端器の長さは OTDR の距離分解能以下のため、測定値としては光ファイバと光分岐器の接続点での反射が測定される。従って、光ファイバの伝送損失は本測定には影響しない。光分岐器の挿入損失(分岐損失+過剰損失)は反射光にも損失として加算されるので、OTDR の測定結果は、

$$= \text{端面の反射減衰量} + \text{光分岐器損失} \times 2 + 2\text{km 光ファイバ損失} \times 2 - \text{反射光の合成加算}$$

となるはずである。各分岐器での実測値と、上記に従い計算した結果を表 5 に示す。

表 5 反射減衰量の測定結果と推定値(計算結果)

分岐数	計算式	計算結果[dB]	実測値[dB]
2	$14+3.5 \times 2+2 \times 0.2-10\log 2$	18.4	21.6
4	$14+7.1 \times 2+2 \times 0.2-10\log 4$	22.6	22.2
8	$14+10.5 \times 2+2 \times 0.2-10\log 8$	26.4	27.4
16	$14+14.1 \times 2+2 \times 0.2-10\log 16$	30.6	31.4

なお、計算では偏波面や位相が一致し完全に合成された場合の値を使用しているが、現実にはこれらが全て一致することは無いので実測値は計算値より大きくなる。また、実際の測定では、OTDRのマーカ読値誤差、分岐器と14dB終端器との接続損失、開放端反射減衰量誤差として±1dB程度が考えられ、これらを考慮すると、測定値は計算値とよく一致している。

実験では、開放端子の光ファイバが光ファイバカッターでカットされた場合(すなわち、平坦で均一なカット面であり、カット面で反射された光が光ファイバの中に戻ってくる率が最も大きくなる状況)を想定したが、実環境で一般的なニッパーなどによるカットの場合(すなわち、不均一で粗いカット面であり、カット面で反射された光が散乱し光ファイバの中にあまり戻ってこない状況)の反射減衰量は平均40dB程度となるため、実環境の光分岐器における光反射は一般的には十分小さいと推察される。融着接続やAPCの場合は60dB以上の反射減衰量を有しており、反射の影響は考える必要がない。SPCの場合は40dB程度の反射減衰量になり、最悪でも58dB程度のDU比を確保できることになる。OTDR側の反射点が近接して2つある場合はDU比は3dB程度悪化するが、それでも55dB程度のDU比は確保できると考えられる。

多重反射が放送信号に及ぼす影響の一例として、図10に、平均反射減衰量(すなわち、DU比の平方根)と相対CN比の関係を示す。

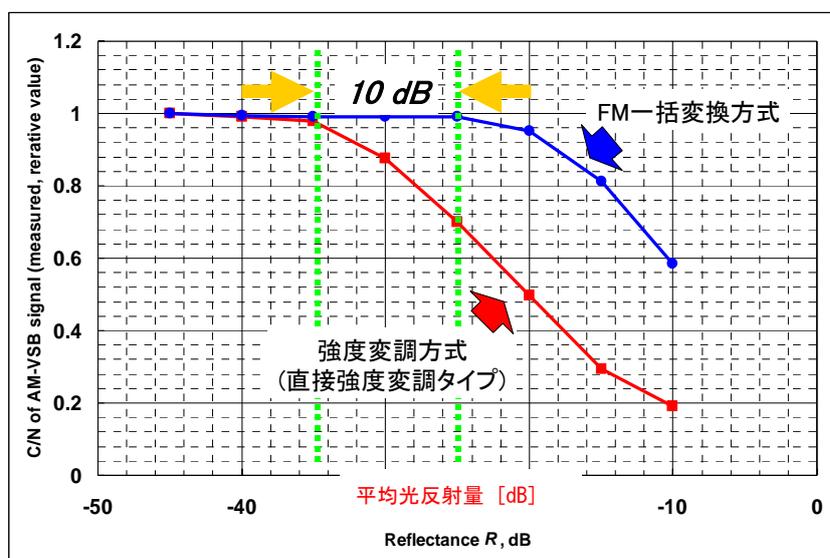


図 10 平均光反射量と相対 CN 比の関係

外部強度変調方式の特性は FM 一括変換方式の特性とほぼ同じであるため、図 10 には記載されていない。標準テレビジョン放送の場合、直接強度変調方式では平均反射量が $-35\text{dB}$ より多くなると CN 比が悪化するため、DU 比は  $70\text{dB}$  以上必要になる。従って、光ネットワーク上に反射点が2つあり、一方が開放端(すなわち、 $14\text{dB}$  の反射減衰量)である場合でも他端の反射減衰量が  $56\text{dB}$  以上であれば放送信号には影響は出ないことになる。このため、直接強度変調方式では光ファイバの接合には APC コネクタや融着接続を適用することが基本的には望ましい。一方、FM 一括変換方式及び外部強度変調方式の場合は約 $-25\text{dB}$  以上の平均反射量で CN 比が悪化するため、DU 比は  $50\text{dB}$  以上であればよい。この場合は、光ネットワーク上に反射点が2つあり、一方が開放端(すなわち、 $14\text{dB}$  の反射減衰量)である場合でも他端の反射減衰量が  $36\text{dB}$  以上であれば放送信号には影響は出ないことになるので、一般的には SPC/APC/融着接続のいずれでも適用可能と考えられる。

引込線系の反射減衰量については、ドロップクロージャの光分岐器の出力光ファイバの開放を最悪ケースとして検討しているため、これよりも性能の良い各種光コネクタ及び V-ONU の反射減衰量についての規定については、必要ないと考えられる。実際の光ネットワークでは、光ファイバだけでなく光分岐器などが存在するために OTDR などによる反射減衰量の測定が困難な場合があるので、構成機器及び光コネクタなどは反射減衰量  $30\text{dB}$  以上の規格をもったものを使用することが望ましい。工事上の不具合などで期待される反射減衰量が確保できない場合は RIN 及び伝送損失に影響を与える可能性があり、その影響は RIN と光レベルを測定することで評価できる。なお、HFC 光ネットワークの場合は、図 8 のような光分岐の出力開放は想定されないため、直接強度変調方式でも反射減衰量は  $35\text{dB}$  以上あれば問題ないと考えられる。

前述のように、光コネクタ1個あたりの反射減衰量は、PC 研磨で  $25\text{dB}$ 、AdPC (SPC) 研磨で  $40\text{dB}$ 、APC 研磨で  $60\text{dB}$  程度であり、光コネクタについても用途に合わせ使い分ける事が必要となる。その他の光接続点として、融着接続やメカニカルスプライスなどのあり、反射減衰量は融着接続の場合  $60\text{dB}$  以上、メカニカルスプライスは  $35\text{dB}$  以上ある。このことから、PC 研磨光コネクタを用いる場合は留意を要する。

### (3) 波長多重光信号間の干渉

光波長が異なる放送光信号と通信光信号を1心の光ファイバで波長多重伝送する場合、V-ONU 入力に通信用光信号が混入することで生じる線形クロストーク及び光ファイバ伝送中に光ファイバの非線形光学効果を介して通信光信号と放送光信号が相互作用することにより発生する非線形クロストークに関する注意が必要である。一般的に通信光信号が2値のデジタル変調光信号であるのに対し、放送光信号はアナログ変調光信号である。このため、放送光信号が通信光信号に及ぼす影響が非常に小さくても、その逆は無視できない場合があるので十分注意する必要がある。また、最近、VHF $\sim$ UHF( $70\text{MHz}\sim 770\text{MHz}$ )のテレビ信号と BS-IF パススルー信号をそれぞれ波長の異なる光信号で波長多重伝送する方法(1心2波長

方式)が開発されているが(例えば、1555nmと1560nmの波長を使用し、V-ONUで一括電気変換する方法)、この場合も両信号間の干渉に留意する必要がある。

線形クロストークは、V-ONUに混入した通信光信号が光-電気変換され受信放送帯域に妨害波となって現れる現象で、特に通信信号が急峻なスペクトルを有する場合(例えば、アイドル状態のEthernet信号)は同じ周波数の特定の放送チャンネルに影響を及ぼす。線形クロストークはV-ONUの入力段に設置するWDMフィルタで通信光信号を除去することにより十分低減できる。図11に、WDMフィルタの概念図を、表6に当該光フィルタに求められる主な性能を示す。

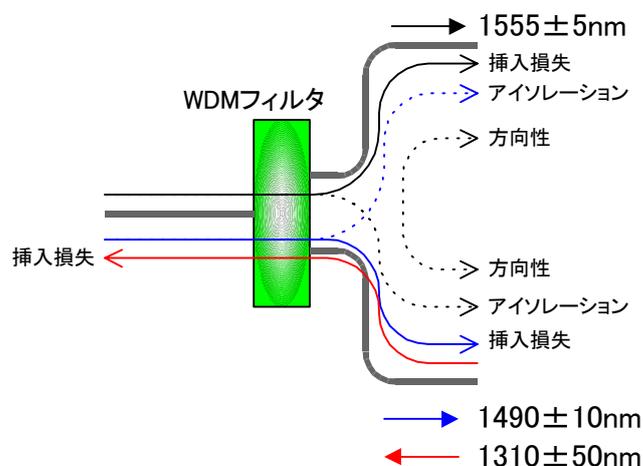


図 11 WDM フィルタの一例とその性能イメージ

表 6 WDM フィルタの所要性能

項目	内容
挿入損失 (帯域内波長)	帯域内の波長が光フィルタを透過する際の損失
アイソレーション (帯域外波長)	帯域外の波長が光フィルタを介して混入してくるレベル
方向性 (端子間結合)	
反射減衰量	帯域内の波長が光フィルタモジュールから戻ってくるレベル

通信光信号混入の影響を示す一例として、図 12 に示す実験系を用いて、下り通信光信号に対する放送光信号の相対強度と受信放送信号の PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)劣化の関係を調べた結果を以下に示す。実験では、アナログテレビ信号 (NTSC) の放送光信号 (1550nm) とアイドル状態の GE-PON 信号である通信光信号 (1490/1310nm) を用い、Ethernet フレームのアイドルパターン信号の周波数スペクトル成分と部分的に重なる放送チャンネル

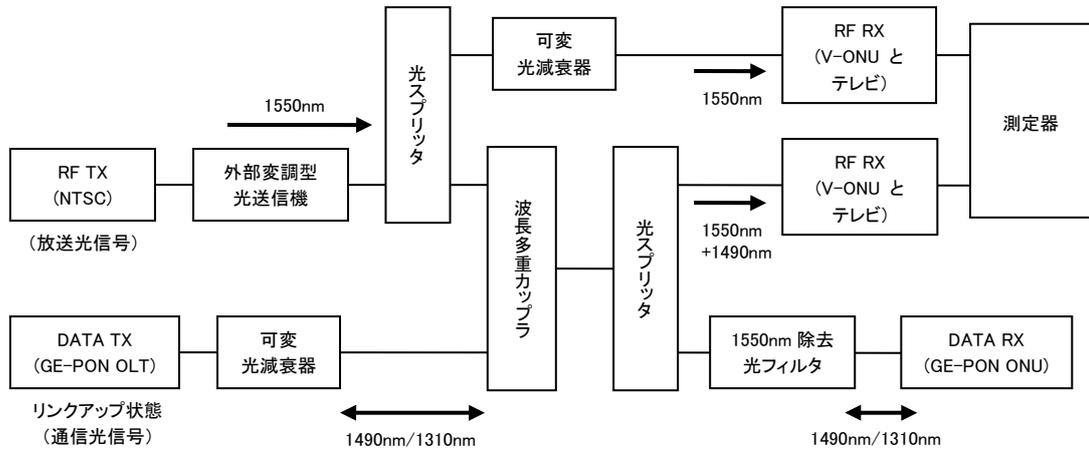


図 12 V-ONU に漏れ込む通信用光信号による受信画質劣化評価のための実験系

ル周波数を評価対象テレビ信号チャンネルとして設定している。アイドル状態の GE-PON 光信号の時間波形をオシロスコープと広帯域光受信機で測定した結果を図 13 (a) に、RF スペクトルをスペクトルアナライザで測定した結果を図 13 (b) に示す。図 13 のように、アイドル状態の GE-PON 光信号は、固定パターンの繰り返し周期に対応する約 62.5MHz 周期の急峻なスペクトル成分を有する信号を送出するため、このような信号が V-ONU に混入し放送光信号と同時に光-電気変換されると、当該スペクトル成分と同じ放送帯域を有する特定

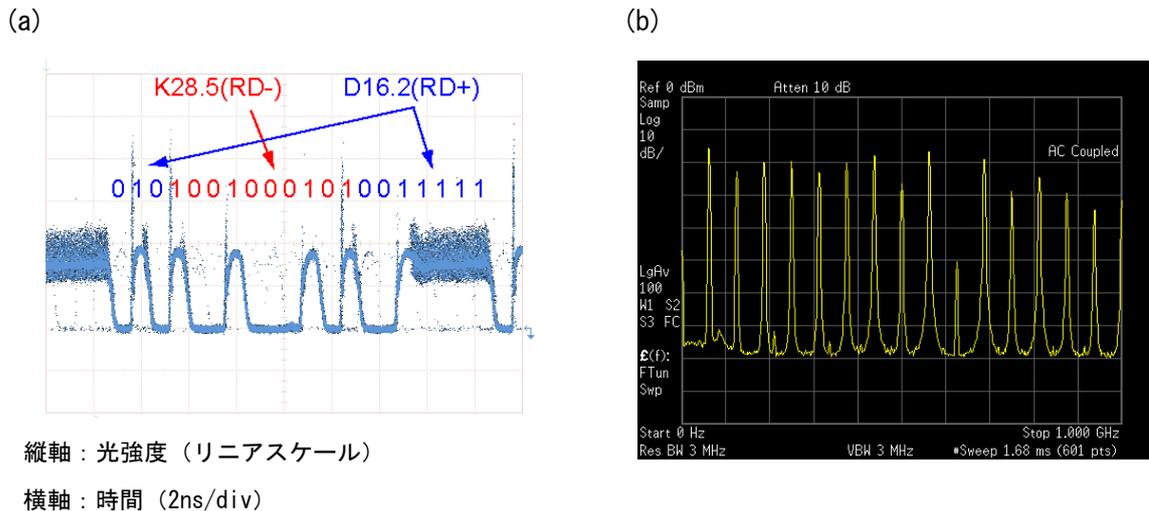


図 13 アイドル状態の GE-PON システムにおける光信号の

(a) 時間波形、(b) その RF スペクトル

(アイドルパターンとして /12/ コード ( /K28.5/D16.2/ ) を送信している例)

(K28.5 Current RD- コード=1001000101、D16.2 Current RD+ コード=0011111010)

のチャンネルにおいて妨害波となり、縞模様の混信が当該チャンネルの画面に現れる。放送品質劣化は、通信用光信号の漏れ込みが全くない状態で放送光信号を受信した場合のPSNRを基準にして評価した。実験結果を図14に示す。本実験例では、図14に示すように、相対強度が30dBより十分大きいと混信の影響は軽微になり、相対強度が33.6dBの場合のPSNR劣化量は、光変調度（OMI）が1%及び2%のいずれの場合も、それぞれ約0.2dB弱程度で（OMIが3%の場合は、劣化が測定できなかった）、相対強度が40.0dBの場合のPSNR劣化は測定できなかった。相対強度が40dB以上になると、OMI=1%でも、テレビ受信画面上においても混信の影響は全くわからなくなった。

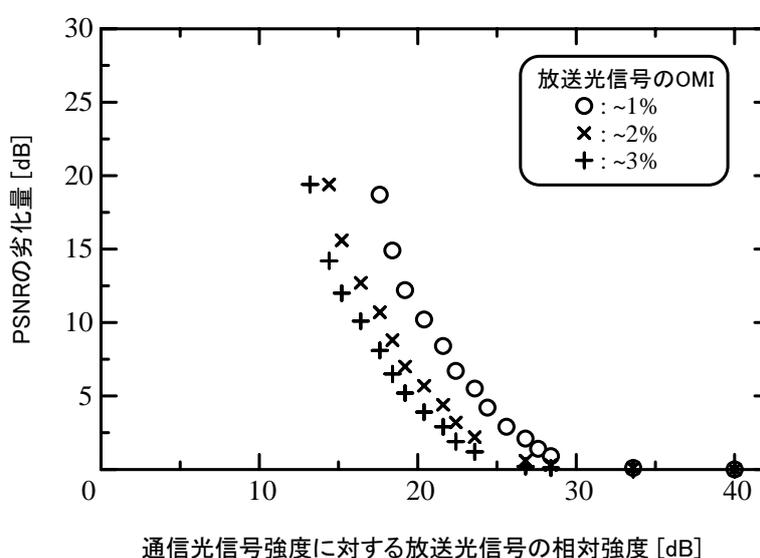


図14 通信光信号に対する放送光信号の相対強度と受信放送信号のPSNR劣化量  
(OMI=光変調度、通信光信号のOMIは約100%)

\*注) PSNRについて

PSNRは次式で表される。

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad [dB]$$

ここで、MAXは、画素値の最大値（例えば、原画像の階調を8ビット表現するとMAX=255）、MSE (Mean Square Error)は、原画像の色成分や輝度成分などに関する画素値を $x_i$ 、評価画像の当該画素値を $y_i$ 、として次式となる（ $N$ は画像の全画素数）。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2$$

WDM フィルタに求められる通信用光信号の除去率は、放送光信号と通信光信号の所要相対強度（すなわち、妨害が検知されないために必要な通信光信号の抑圧比）と、V-ONU 入力における放送光信号と通信光信号のレベル差を考慮して決定される。波長多重に用いられる光送受信機の例を表 7 に記載する。放送光信号強度は、通常、下り通信光信号強度よりも十分大きいので、その分、WDM フィルタに求められる下り通信光信号の除去能力は緩和される。例えば、ユーザ宅に到達した通信光信号レベルが-15dBm で、放送光信号レベルが 0dBm の場合、40dB の相対強度を得るのに必要な WDM フィルタの下り通信光信号除去率は 25dB となる。ITU-T G. 983. 3 では、放送光信号と通信光信号を分離する WDM フィルタにおいて、放送光信号経路における下り通信光信号（1490nm 帯）の除去率は 30dB 以上となることを規定している。実際のシステムでは通信光信号の除去を複数種の光フィルタで実現する方法もある。

以上は下り通信光信号との線形クロストークであるが、波長多重システムでは WDM フィルタなどを介して回り込む上り通信光信号との線形クロストークも考慮すべきである。下り通信光信号との線形クロストークの影響は、放送光信号と通信光信号の伝送損失が極端に異なることがないため、測定箇所が大きく依存しないが、上り通信光信号との線形クロストークの影響は、通信 ONU の上り通信光信号出力が大きく、かつ、V-ONU 入力での放送光信号レベルが小さい場所で顕著になる。このため線形クロストークの影響を評価する際は、加入者宅までの最長距離かつ最小光パワーで V-ONU に到達する箇所で測定を行うことが適当であると考えられる。

表 7 波長多重に用いられる光送受信機の例

	親機	方向	子機
通信（上り）	-27.0~-6.0dBm（受信レベル）	←	-1.0~+4.5dBm（送信レベル）
通信（下り）	+2.0~+7.0dBm（送信レベル）	→	-24.0~-3.0dBm（受信レベル）
放送（下り）	+13.0~17.0dBm（送信レベル）	→	-8.0~+2.0dBm（受信レベル）

放送光信号と通信光信号を波長多重伝送すると、光ファイバの非線形光学効果である相互位相変調、四光波混合及び誘導ラマン散乱などを介して、放送光信号と進行方向が同じ下り通信光信号が放送光信号に混信してスプリアスを発生させる場合がある（注：上り通信光信号と放送光信号は信号伝搬方向が逆であるため位相整合せずクロストークの影響は白色雑音的となる。また、一般的に上り通信信号と放送光信号の波長差は 200nm 程度と大きいため非線形クロストークの影響は殆どなく無視できる）。一般的なシングルモード光ファイバを用いたアクセス系伝送の場合、四光波混合は高密度波長多重伝送しないかぎり無視できると考えられる。また、相互位相変調は、放送光信号波長と通信

光信号波長が数 nm 以下と近接している場合に顕著になり、3 (1) ウで示したように放送光信号と通信光信号の波長差が 50nm 程度と大きい場合には誘導ラマン散乱が支配的になることがわかっている[2]。図 15 に、誘導ラマン散乱による非線形クロストークの概念図を示す。その妨害のレベルは、光ファイバへの光信号入力レベル、伝送距離、波長間隔、通信信号符号（データパターン）及び放送信号の周波数など、表 8 に示すような種々のシステム諸元に依存する。ランダムなデータで変調された通信信号の場合はそのスペクトルが比較的低いパワー密度で広範囲に広がるため妨害源となる通信光信号のデータパターン（すなわち、光強度変化パターン）の影響は軽微であるが、前述のように、アイドル状態の Ethernet 信号のような場合はそのスペクトルが離散的であるためシステム条件によっては顕著となる場合がある[3]。

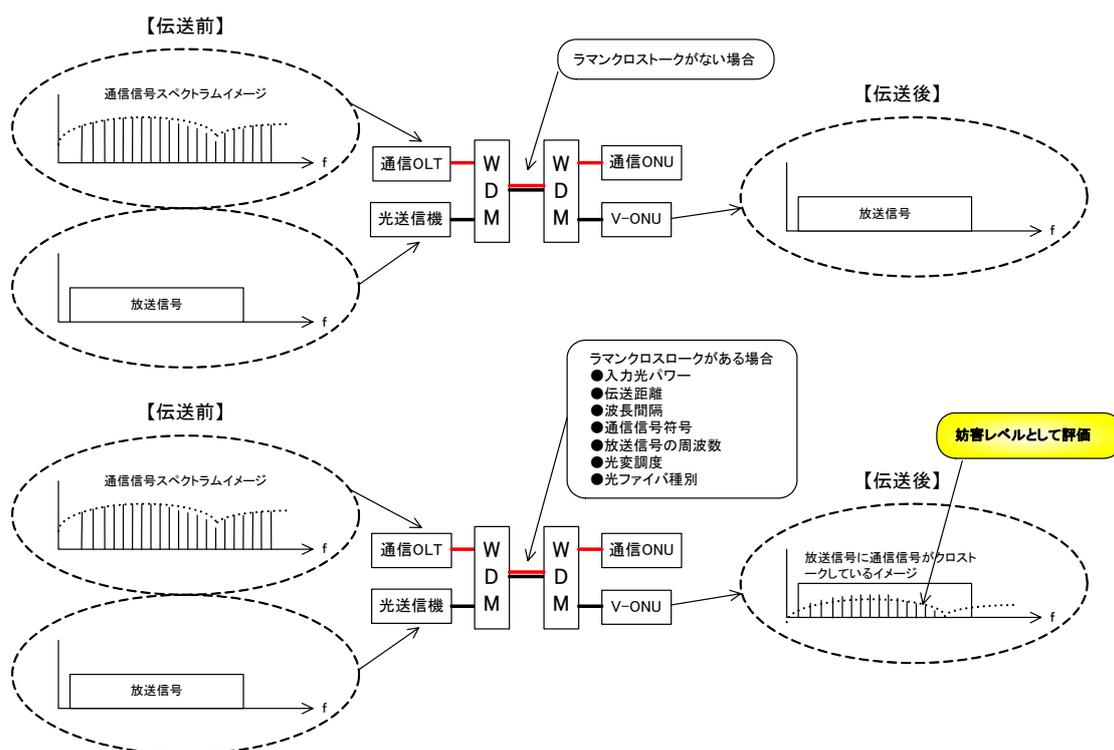


図 15 光波長多重における放送信号への妨害発生概念

表 8 光波長多重における放送光信号への妨害レベルとシステム諸元

システム諸元	妨害レベル
光ファイバ入力光パワー	通信光信号の入力光パワーが大きいほど大きくなる。
伝送距離	伝送距離が短い間は距離と共に増加するが、長距離伝送の場合は距離に対して周期的に変化する(図 16 参照)。当該周期は、波長間隔、波長分散、放送信号の周波数等により決まる。なお、システム上流で分岐があれば妨害レベルは低減する。
波長間隔	石英系光ファイバの場合は、基本的に、光周波数差が 13~15 THz となるまで、波長間隔が広がるほど増加。
放送信号の周波数	一般的なランダムパターンの通信信号の場合、低い放送周波数帯の方が大きくなる。
放送信号の光変調度	変調度が低いほど大きくなる。
光ファイバ種別	シングルモードファイバと比較して分散シフトファイバのほうが大きくなる。
通信信号の符号	離散的なスペクトル成分があると特定の放送周波数に表れる。

図 16 に、各光信号の光ファイバ入力レベルを一定にした場合の、伝送距離に対するスプリアス量の計算結果(放送信号の映像搬送波周波数 91.25MHz)を、図 17 に、通信光信号の光ファイバ入力レベルを変化させたときのスプリアス量の計算結果を示す。

光ファイバ伝送距離 vs 妨害レベル(Data to Analog)  
 $\lambda$  (通信)=1486nm,  $\lambda$  (映像)=1559nm,  $\rho=1$ ,  
 $P$  (通信)=-10dBm,  $P$  (映像)=+15.0dBm,  
 OMI(映像)=3.6%(50ch)、OMI(通信)=50.0%(Idle)

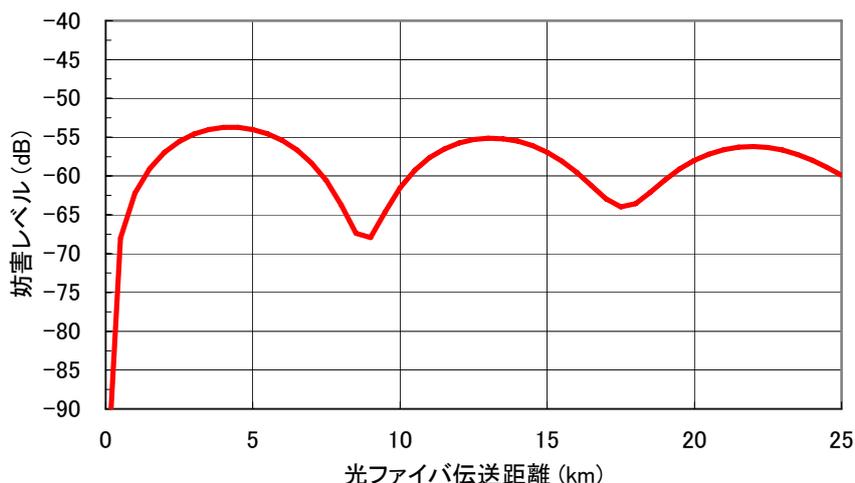


図 16 ラマンクロストークによる妨害レベルのシミュレーション結果  
 (放送信号の映像搬送波周波数=91.25MHz)

通信の入力レベル vs 妨害レベル(Data to Analog)  
 $\lambda$  (通信)=1486nm,  $\lambda$  (映像)=1559nm,  
P(映像)=+15dBm(固定), ファイバ伝送距離=4km

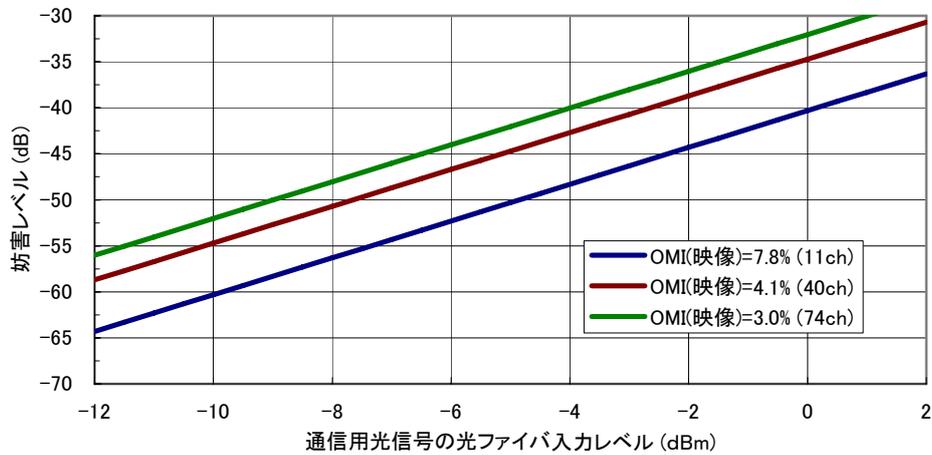


図 17 通信用光信号の光ファイバ入力レベルに対する妨害レベルのシミュレーション結果 (放送信号の映像搬送波周波数=91.25MHz)

図 16 のように妨害レベルが伝送距離によって周期的に変化する理由は、光ファイバを伝搬する速度が通信光信号と放送光信号とで異なるために、通信光信号から放送光信号に与える影響が同相となったり逆相となったりすることにより生じている。例えば、図 16 のように、放送信号の映像搬送波周波数が 91.25MHz、通信／放送光信号波長が 1486nm／1559nm の場合、当該周波数の周期は約 11ns、両光信号間の伝搬遅延差は約 1.2ns/km と見積もられるので、妨害レベルの繰り返し周期は、 $11\text{ns} \div 1.2\text{ns/km} \approx 9\text{km}$  となる。従って、図 16 に示した妨害レベルの伝送距離依存性は映像搬送波周波数が高くなれば、その分、短周期で変化することになる。また、波長間隔や波長分散が小さくなれば、当該周期は長くなる。

【非線形クロストークの影響が最悪となる場所及び測定条件】

線形／非線形クロストークの影響は複雑なので、妨害の評価判定はその影響が最悪となる点で放送信号の品質を総合的に評価することにより行わなければならないが、前述のように、非線形クロストークの影響が最悪となる場所や放送信号の周波数は種々のシステム諸元によって変化するので注意が必要である。例えば、前述のように、GE-PON 信号が与干渉信号となる場合は、約 62.5MHz の整数倍の放送信号の周波数に影響が出るので、評価対象チャンネルは当該チャンネルとする必要がある。なお、与干渉信号が、B-PON や G-PON のように常にデータパターンがランダム化されている通信信号の場合に

は、ビットレートに相当する広い周波数帯に電気信号スペクトルが拡散されるので、妨害レベルは非常に低くなり実害は一般的に殆どない。このような信号の場合は、使用する放送信号の周波数帯の一番低い周波数帯に妨害の影響が最も出やすくなるので、基本的には、評価対象チャンネルを当該低周波数帯とすることが適当である。しかしながら、前述のように、妨害レベルが最大となる伝送距離が放送信号の周波数等により変わるので、非線形クロストークの影響が最悪となる評価対象放送チャンネルや伝送距離の選定に際しては、評価対象となるシステムの構成（各ユーザに対する伝送距離の分布、分岐パターンなど）や与干渉信号のデータパターンなどを考慮することが重要となる。また、ラマンクロストークは偏光依存型の現象であるため（放送光信号と与干渉光信号の偏光状態が一致したとき最も影響が大きくなる）、非線形クロストークの影響が最悪となる状態を想定するためには放送光信号と与干渉光信号との相対的偏光状態についても考慮する必要があるが、一般的には、アクセス系光ファイバの偏光状態は常時ランダムに変化しており、かつ、一般的に波長差が数十 nm 以上ある場合には相対的偏光状態は光ファイバ伝送中でランダムとなるので、ある程度長時間の測定を行えば偏光依存性を考慮した最悪状態での評価は可能となる。

以上のことから、非線形クロストークの評価に際しては

- 与干渉信号のスペクトル分布に応じた適切な評価対象放送信号の周波数帯
  - 当該評価対象周波数帯においてラマンクロストークが最大となる伝送距離
- に留意しながら、適切な測定箇所及び測定条件を選択する必要がある。

#### （４） 非線形歪

非線形歪は光送信機及び V-ONU の歪特性が支配的である。光増幅器の歪や光ファイバの分散歪・自己位相変調などによる複合 2 次歪／複合 3 次歪（CSO/CTB）などの性能劣化も予想されるが、光増幅器による歪劣化は縦続段数が 6 台までは小さくできることが示されており[1]、光送信機や V-ONU で発生する CSO/CTB などの歪成分より十分小さいので無視できるレベルであると考えられる[1][4]。直接強度変調方式の場合は、長距離伝送すると光ファイバでの分散の影響で CSO が劣化することは知られている。誘導ブリュアン散乱などの影響は、光ファイバ長と光ファイバ入力パワーならびに光スペクトルの線幅などの相互作用により発生するため、光送信機と V-ONU の組み合わせで決まる歪特性だけでは評価できないことを意味しており、光ファイバ長と光ファイバへ入力するパワーも考慮する必要がある。非線形歪は光信号では評価することができず、V-ONU 出力の電気信号に変換して総合的に評価することが適当である。

【参考文献】

- [1] 佐々木、式井、伊藤、鈴木、笠井、柿沼 「光アクセスシステムにおけるアナログ伝送用エルビウムドープ光増幅器」 信学技法 TECHNICAL REPORT OF IEICE DCS96-71(1996-11)
- [2] M. R. Phillips and D. M. Ott, "Crosstalk Due to Optical Fiber Nonlinearities in WDM CATV Lightwave Systems," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 17, No. 10, pp. 1782-1792, 1999
- [3] D. Piehler, et al., "Nonlinear Raman Crosstalk in a 125-Mb/s CWDM overlay on a 1310-nm Video Access Network," Technical Digest of OFC2004 (Optical Fiber Communication Conference), Los Angeles, Paper FE8, 2004
- [4] SHLOMO OVADIA 「BROADBAND CABLE TV ACCESS NETWORKS From Technologies to Applications」 PRENTICE-HALL, Inc 2001

## ケーブルテレビネットワークの性能規定点

有線テレビジョン放送法施行規則では性能規定点は受信者端子と規定されている。一方、有線テレビジョン放送事業者は、ネットワークの保守管理上、保安器の出力を性能規定点として利用している場合が多い。これは、保安器から受信者端子までの伝送路による劣化が極めて少ないため、放送信号等の品質が受信者端子と保安器出力に差異がないことや、視聴者宅内で信号の保守管理をそのつど行うことが困難であるという運用上の問題を踏まえてのものである。

こうした実態及び電気通信事業者ネットワークを利用した電気通信役務回線を利用する放送という新しい点も踏まえた上で、光ファイバによるケーブルテレビネットワークの性能規定点について検討を行った。

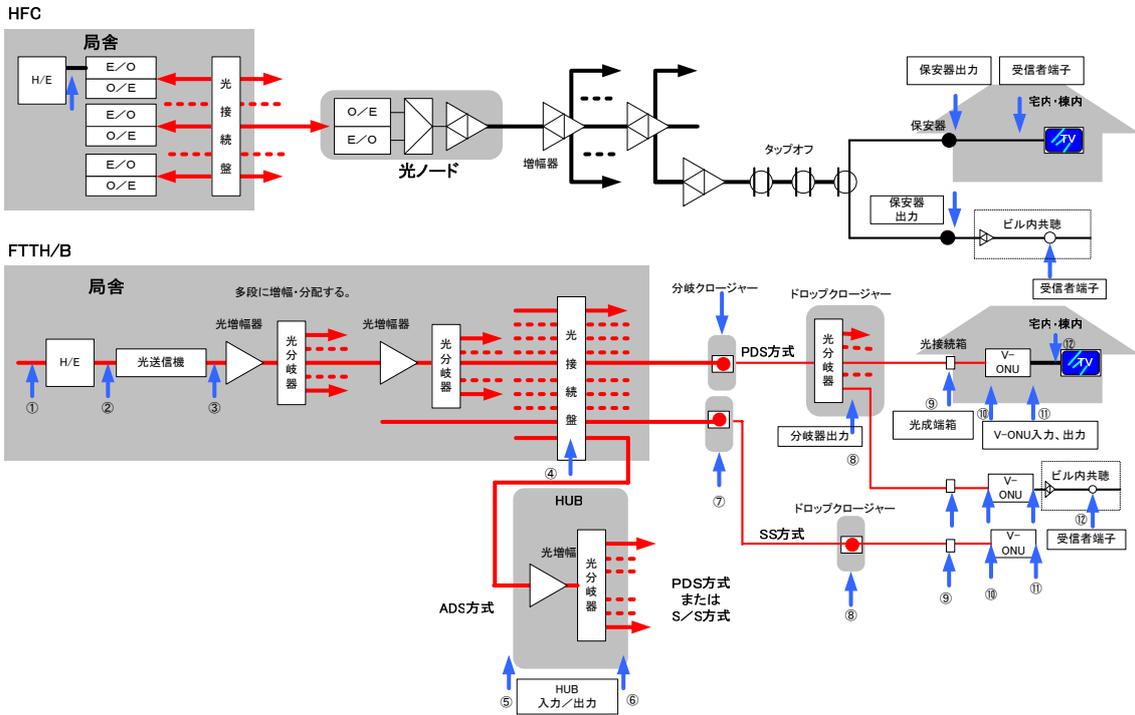
## 1. 性能規定点の考え方

## (1) 光ケーブルテレビネットワーク全体における性能規定点の候補

視聴者のテレビや STB の入力は依然として電気信号であることから、光ケーブルテレビネットワークでは V-ONU による光-電気変換が必須である。このため、宅内設備として従来は無かった V-ONU を考慮した上で性能規定点を検討する必要がある。

図 3-1 に HFC と FTTH の比較をした上で FTTH における性能規定点の候補となる点を示す。

凡例: ↑ 性能規定点の候補位置



規定点の位置	規定点の名称	概要
①	H/E 入力	H/E における高周波信号の入力点
②	H/E 出力	高周波電気信号の出力点
③	光送信機出力	光送信機で光変調された信号の出力点
④	H/E 光接続盤	H/E と線路の切分のための接続点 (光コネクタ接続が一般的)
⑤	HUB 入力	HUB の光入力
⑥	HUB 出力	HUB の光出力
⑦	分岐クロージャ	伝送路上の分岐クロージャ内の接続点 (融着接続が一般的)
⑧	ドロップクロージャ	クロージャ内の加入者用引込線との接続点 光分岐器が内蔵される場合にはその出力側
⑨	光成端箱	引込線と宅内配線を接続する点で、融着接続や簡易な接続が 用いられる 光成端箱と屋外用 V-ONU が同じく内蔵される場合もある
⑩	V-ONU 入力	V-ONU の光信号の入力点 (光コネクタが一般的)
⑪	V-ONU 出力	高周波電気信号の出力点
⑫	受信者端子	受信機器 (テレビや STB) に接する点

図 3-1 性能規定点の候補

## (2) 受信者端子での性能規定点の考え方

現状のケーブルテレビネットワークでは受信者端子の性能規定を保安器で運用する実態を紹介したが、光ファイバによるケーブルテレビネットワークにおいても同様の運用が考えられる。具体的には図 3-1 の⑨、⑩、⑪、⑫を性能規定点として運用することが考えられる。

受信者端子は電気的信号であることから V-ONU による光-電気変換後の電気的特性を確認できる性能規定点の候補としては受信者端子の⑫、V-ONU 出力の⑪がある。また、光成端箱の⑨、V-ONU 入力⑩は光学的性能による確認となる。

V-ONU が屋外・宅外に設置される場合は、V-ONU 出力を保安器出力に見立て性能規定点とすれば現在と同様に性能把握が可能であるが、V-ONU が屋内・宅内に設置される場合、現在の方法では性能把握が困難となる。

このため、光成端箱から V-ONU を通じ受信者端子までの間の宅内線及び V-ONU を標準モデル化することが考えられる。有線テレビジョン放送法上の受信者端子の規定は変えないものの、モデル化した宅内線と同等な性能が保証される場合は、屋外等での光信号で性能を確認できるため、性能規定点として扱うことが可能となる。

図 3-1 の⑨、⑩及び⑪の運用も含めて適当と考えられる性能規定点については、宅内線が比較的短く単純なため性能劣化が少ない戸建住宅と宅内線に増幅機器等が設置される集合住宅を分けて整理した。

## ア 戸建ての場合の性能規定点

戸建て住宅の場合、①V-ONU を屋外に設置する場合と、②V-ONU を屋内に設置する場合で、性能規定点の考え方が異なる。

### (ア) V-ONU を屋外設置する場合

図 3-2 は光成端箱と共に V-ONU が屋外に設置された場合である。⑨、⑩、⑪、⑫が性能規定点として考えられるが、この場合は現在の同軸ネットワークと屋内は同様であるため、受信者端子までの性能劣化が少なく屋外で容易に性能を把握できる V-ONU 出力の⑪を性能規定点として用いることが可能である。

V-ONU が売り切りになった場合には、所有の分界点すなわち責任分界点である V-ONU 入力の光信号を性能規定点とすることが妥当である。

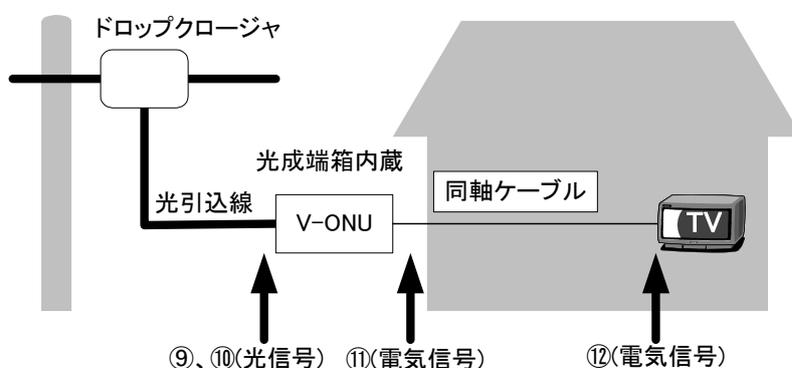


図 3-2 戸建て FTTH の性能規定点 (V-ONU が屋外設置の場合)

### (イ) V-ONU を屋内設置する場合

図 3-3 は屋内に V-ONU を設置する場合である。⑨、⑩、⑪、⑫が性能規定点として考えられるが、(ア)と同様に受信者端子の⑫、V-ONU 入力⑩及び出力⑪はケーブルテレビ事業者にとって運用上の性能規定点として運用しにくい。この場合は V-ONU 入力と光成端箱間の性能劣化が少ないことから V-ONU の性能が正しく評価可能であれば光成端箱の⑨を光伝送による性能規定点として用いることが可能である。

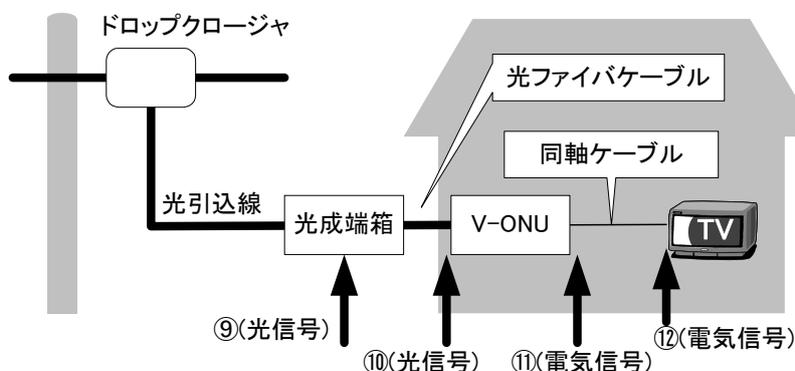


図 3-3 戸建て FTTH の性能規定点 (V-ONU が屋内配置の場合)

## イ 集合住宅の性能規定点

従来、集合住宅とケーブルテレビ事業者の責任分解点は、保安器出力であったが、集合住宅の棟内配線の性能は定量化されていなかった。受信者端子で技術基準以上の十分な性能が確保できるよう、ケーブルテレビ事業者と建物管理者側で設計上の取り決めをしてきた。集合住宅の場合 (FTTB システム) では、ケーブルテレビ事業者からの棟内への信号の受け渡し方法としては以下の3とおりがある。

- ①電気信号に変換され集合住宅に渡され、同軸ケーブルにより電気信号の状態で行配される場合
- ②電気信号に変換され集合住宅に渡されるが、再び光信号に変換され、光ファイバケーブルで各戸に配線される場合
- ③集合住宅に光信号のまま渡され、光ファイバケーブルで各戸まで配線される場合

### (ア) 電気信号で集合住宅に渡され、電気信号で各戸に配線される場合

図3-4に示すようにMDF室等にV-ONUを設置し、電気信号は棟内の同軸ケーブルのネットワークを使って各戸に配線される。⑨、⑩、⑪、⑫が性能規定点として考えられるが、戸建て同様、運用上の面から棟内の宅内線及びV-ONUが一定の性能を持つことが確認できることを前提として受信者端子の⑫に代わり光成端箱の⑨又はV-ONU入力⑩を光信号により、V-ONU出力⑪を電気信号により性能規定点として用いることが可能である。

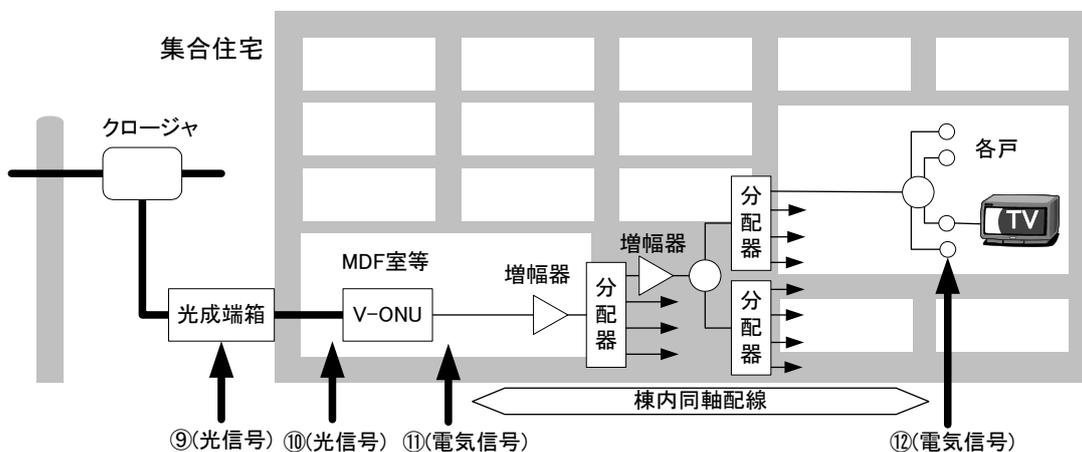


図3-4 集合住宅の性能規定点(電気信号の状態で行配)

### (イ) 電気信号で集合住宅に渡され、再び光信号に変換され各戸に配線される場合

近年の大型集合住宅では各戸まで IP 信号を光ファイバで配線する例が出始めており、テレビ信号は光ノードを使用した棟内 HFC が構築される例もある。近い将来には放送も各戸まで FTTH で光配線されることが考えられる。図3-5に示すようにMDF室等にV-ONUを設置し、電気信号に変換されるが、変換された電気信号は再び光信号に

変換され棟内の光ファイバを用いたネットワークを使って各戸に配信される。⑨、⑩、⑪、⑫が性能規定点として考えられるが、戸建て同様運用上の面から棟内の宅内線及びV-ONUが一定の性能を持つことが確認できることを前提として受信者端子の⑫に代わり光成端箱の⑨又はV-ONU入力⑩を光学的信号により、V-ONU出力⑪を電気的信号により性能規定点として用いることが可能である。

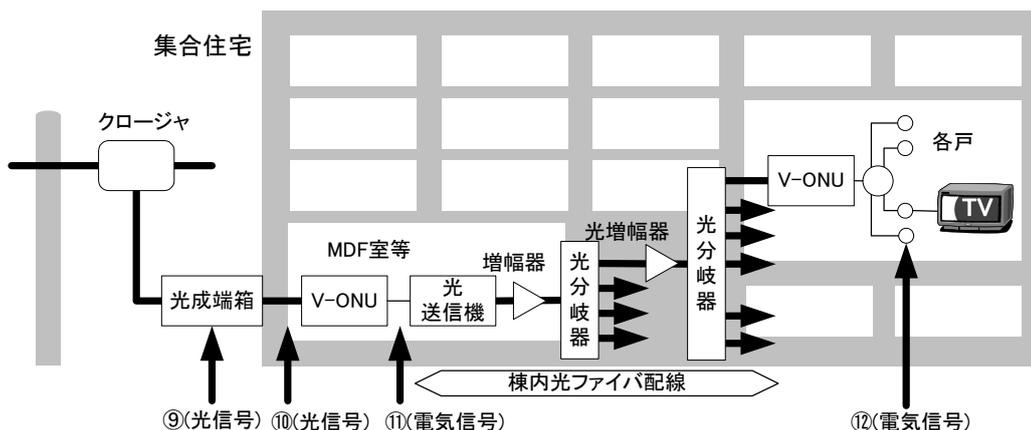


図 3-5 集合住宅の性能規定点(電気信号を再び光信号に変換し各戸に配信)

(ウ) 集合住宅に光のまま渡され、各戸まで配信される場合

棟内配線が、光配線になった場合、建物入口で電気信号に変換せず、光信号のまま増幅分配する方法も考えられる。図 3-6 に示すように、ケーブルテレビ事業者から受信した光信号を棟内で光信号のまま増幅し各戸に分配する場合であり、V-ONU は各戸に設置される。⑨、⑩、⑪、⑫の他に棟内に設置した最終分岐器からの出力㊦が性能規定点として考えられる。

しかし、ケーブルテレビ事業者からは、棟内設備を集合住宅所有者が設置している場合に棟内設備の性能保証が得難いこと、責任分界点である⑨における性能規定を定めることが困難等の理由からこのようなつなぎ込みを行わないとの意見があった。すなわち、現実的には(イ)に示すように一度電気信号に変換するか、自ら棟内設備を設置するという手法をとる。

前者の場合の性能規定点は(イ)の議論そのものである。後者の場合には各戸を戸建てと同等とみなすことができるため、屋内にV-ONUを設置した場合と等価であるため性能規定点として㊦を用いることが可能となる。なお、㊦は戸建ての場合の光成端箱出力⑨と同等とみなすことも可能である。

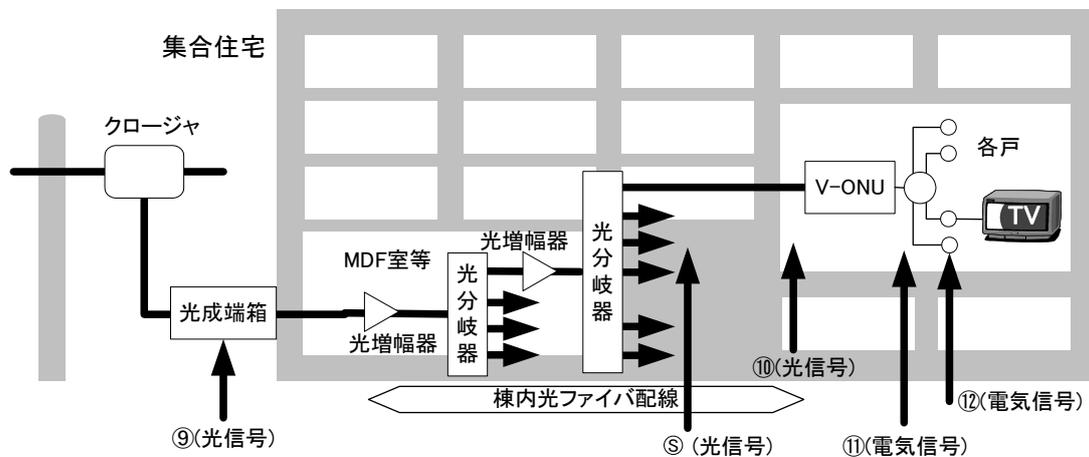


図 3-6 集合住宅の性能規定点(光のまま各戸まで光配線する)

## 2. 放送サービスと通信サービスをあわせて行う場合の形態

ケーブルテレビ事業者は放送サービスのほか、インターネットサービス等の通信サービスを提供する場合があります、FTTH 等によるケーブルテレビネットワークの場合にも通信サービスも考慮した性能規定点を考慮しておくことが必要である。通信と放送の同時サービスには、

- ①通信サービスと放送サービスが別心の光ファイバで提供される場合と
- ②通信サービスと放送サービスが同一心の光ファイバで提供される場合があり、これらに分けて検討した。

なお、放送サービスを行う者が電気通信役務利用放送事業者であっても同様である。

### (1) 通信サービスと放送サービスが別心の光ファイバで提供される場合

現状は光ファイバを2心使って放送サービスと通信サービスを行うことが多い。以下に2心の場合の利用事例を紹介する。

図3-7、図3-8は放送サービスを先行し、視聴者からの希望に応じて通信サービスを行えることを前提とし、また、テレビとパソコンの自由接続のためONUの配置に柔軟性を持たせた形態で、営利を目的としたケーブルテレビ事業者が採用している。

一方、図3-8、図3-9は住民に平等なケーブルテレビ施設を導入するため放送サービスと通信サービスを同時に設置する形態で、地方自治体が設置する施設において採用する機会が多い。

このような光ファイバを2心使ったサービス形態では、放送サービスと通信サービスは、それぞれ別心の光ファイバを利用するので完全に分離されており、通信サービスにかかわりなく、性能規定点は1の(2)節で検討されたものと同じの性能規定点とすることが可能である。

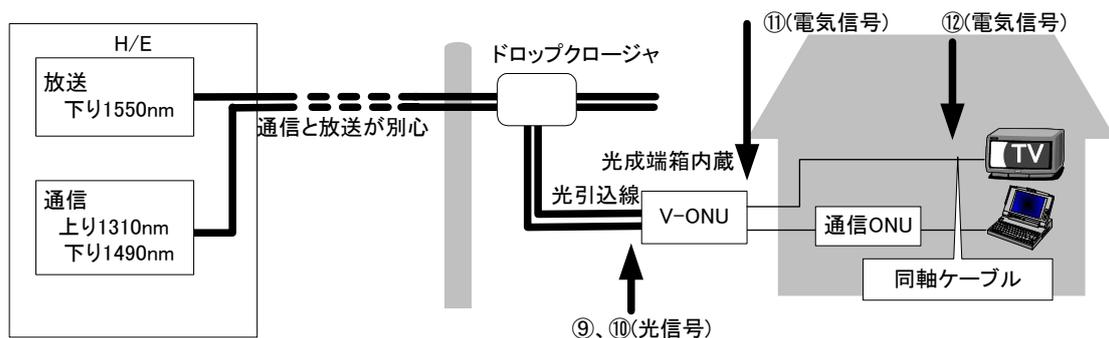


図3-7 V-ONU 屋外設置型、通信 ONU 後付型

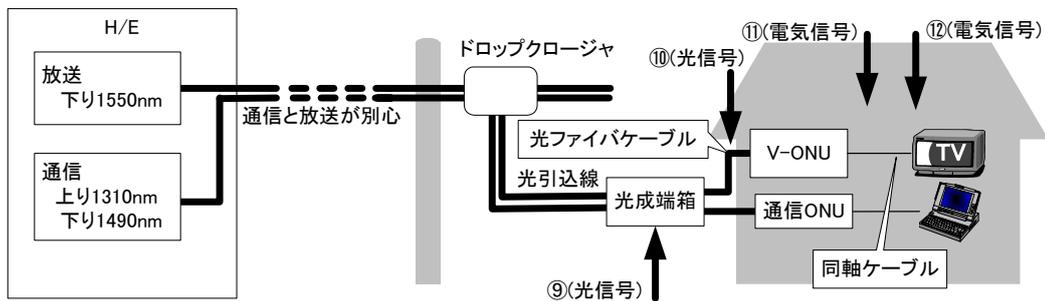


図 3-8 V-ONU 屋内設置型（分離型）

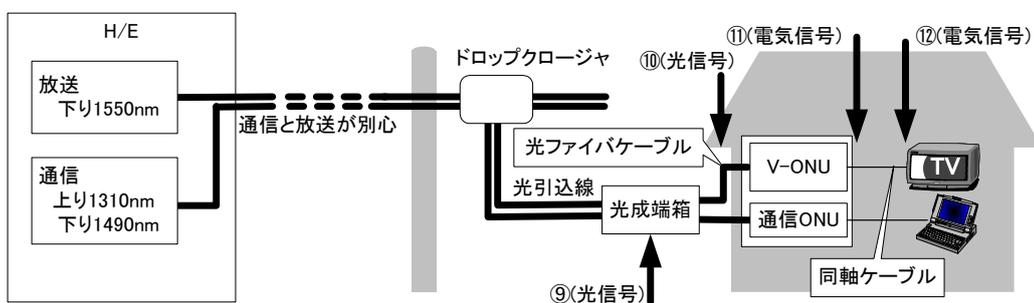


図 3-9 V-ONU 屋内設置型（一体型）

## （2）光ファイバ1心光多重を使ったサービス形態

近年、光ファイバ1心を使って放送サービスと通信サービスを行う事業者が現れてきた（平成16年末現在で3社：総務省調べ）。以下に1心の光多重による利用事例を紹介する。

図3-10は放送サービスを先行し、視聴者からの希望に応じて通信サービスを行えることを前提とし、テレビとパソコンの自由接続のためONUの配置に柔軟性を持たせた形態で、営利を目的としたケーブルテレビ事業者が採用している。

一方、図3-11、図3-12は住民に平等なケーブルテレビ施設を導入するため放送サービスと通信サービスを同時に設置する形態で、地方自治体が設置する施設において採用する機会が多い。

このような光ファイバ1心光多重を使ったサービス形態では、放送サービスと通信サービスが同一の線路を通してサービスが行うため、WDMフィルタが用いられ、このフィルタの入力又は出力を性能規定点の候補と考えられるが、後述するように、光関連機器（トリプレクサ）の開発、サービスの導入順序などを考慮すると、将来にわたり放送サービスの技術的条件を評価できるWDMフィルタの入力を性能規定点とすることが望ましい。

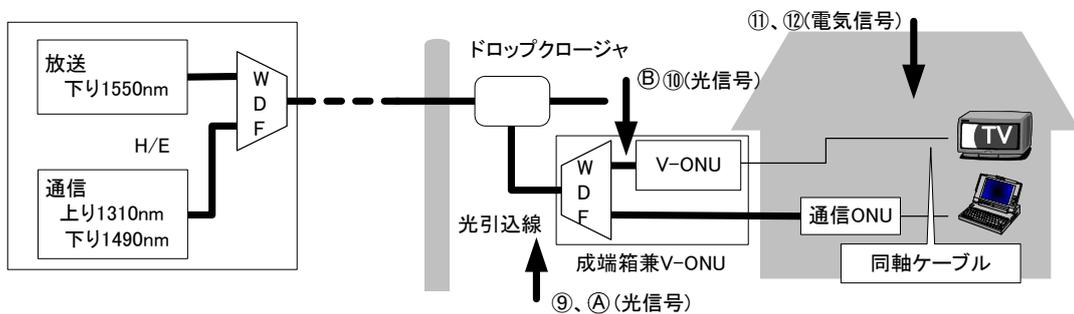


図 3-10 V-ONU 屋外設置型、通信 ONU 後付型

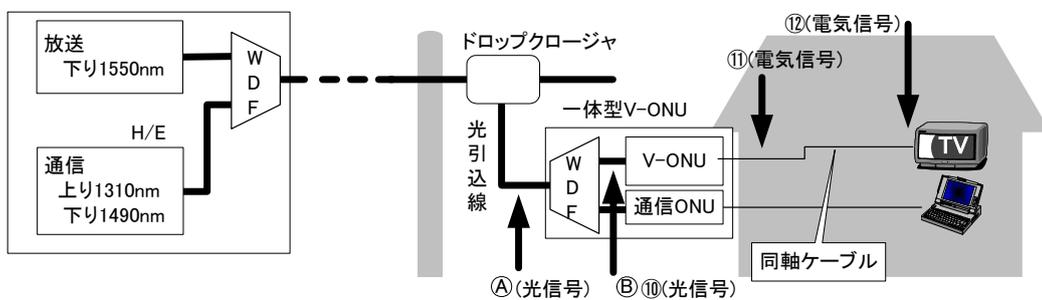


図 3-11 ONU 屋外設置型

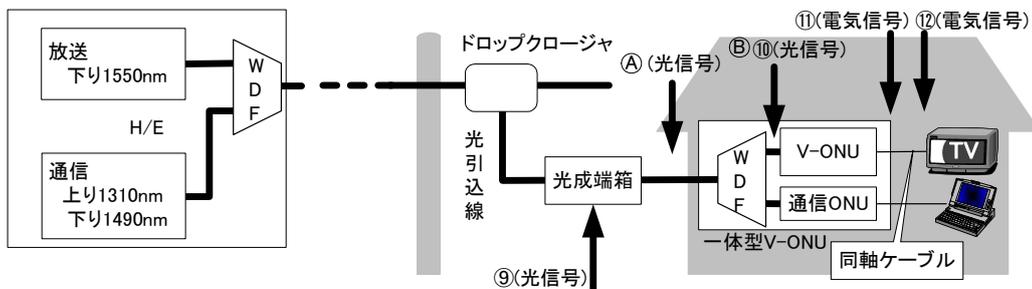


図 3-12 ONU 屋内設置型

ア 今後の光関連部品の動向

近年、WDM フィルタなどを小型化、高性能化、価格廉価を目指して、図 3-13 に示すような WDM フィルタとレーザダイオード、フォトダイオードを一体化したトリプレクサの開発が進んでいる。

このトリプレクサを利用する場合、トリプレクサの映像出力はフォトダイオード出力であり、V-ONU 出力でないトリプレクサの出力を性能規定点の候補とすることは不適當である。

一方、WDM フィルタの入力は、ケーブルテレビネットワークと V-ONU の接続点として普遍的な点であり、これらのことも考慮すると将来に渡りこの点を光側の性能を規定する点として適當と考えられる。

エラー!

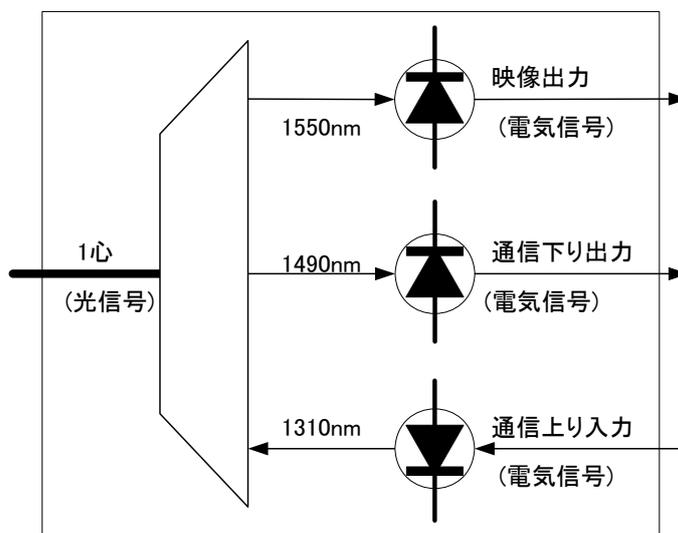


図 3-13 トリプレクサの構成概要

イ サービスの導入形態

光ファイバ1心により放送サービスと通信サービスの両方を提供する場合、サービスの導入順序は表 1 に示す 3 とおりとなる。

表 3-1 サービスの導入順のケース

	サービスの導入形態
(A)	通信サービスの導入後、放送サービスが導入される。
(B)	放送サービスの導入後、通信サービスが導入される。
(C)	放送サービス及び通信サービスが同時に導入される。

サービスの導入順序としては、同時に放送と通信サービスが導入される場合は、(1)及び(2)の前段で行った検討のとおりであるが、通信サービスまたは放送サービスだけを希望する視聴者がいるため、図 3-14 に示したようにサービスの導入時期に差が生じる。

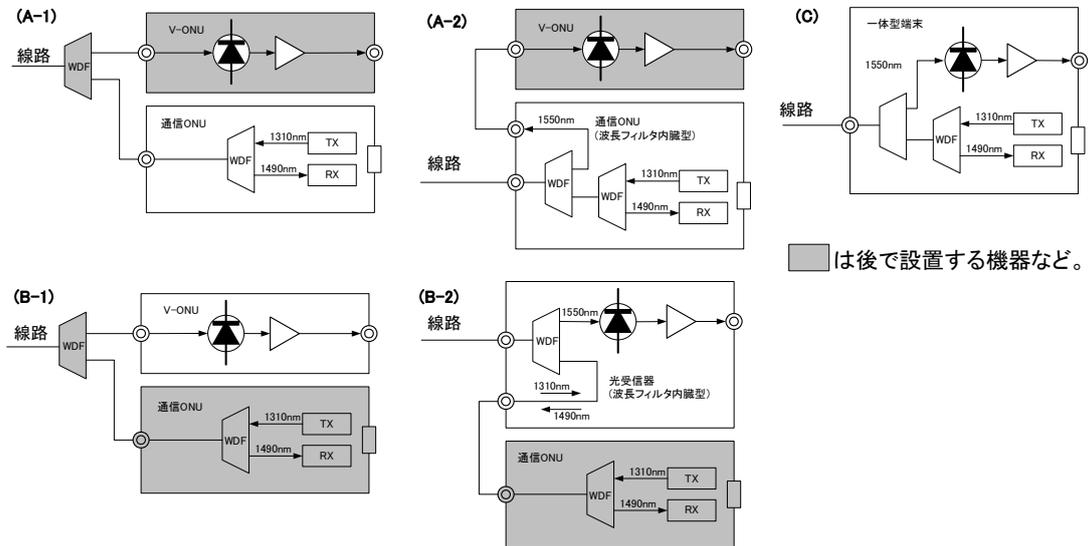


図 3-14 サービスの導入順による性能規定点の候補

例えば(A-1)では通信 ONU が導入された後、WDM フィルタと V-ONU を導入することとなる。この場合、ケーブルテレビの性能規定点としては WDM フィルタの入力又は出力がその候補として考えられるが、WDM フィルタの出力を性能規定点とした場合、V-ONU 又は通信 ONU の導入順序によっては、後から WDM フィルタ挿入に伴う損失が加わり所要の V-ONU の受光レベルの低下を招く恐れがある。このため、WDM フィルタの入力を性能規定点とすることが望ましい。

なお、WDM フィルタの入力を性能規定点とする場合、V-ONU 入力光レベルは WDM フィルタの損失や接続損失が無視できない(参考 7) ため、これらの損失を考慮しておく必要がある。

#### 参考文献

[1] 昭和 62 年 9 月 28 日電気通信技術審議会答申の報告書

「多チャンネル等に伴う有線テレビジョン放送施設に関する技術的条件」

(昭和 61 年 9 月 27 日諮問第 30 号) に掲載された参考資料 9

## FTTH 等光ケーブルテレビネットワークの性能配分（自設の場合）

ここでは、FTTH 等ケーブルテレビネットワークを自設する場合の光ケーブルテレビネットワーク（光ネットワーク）に割当てられる性能を同軸ケーブルテレビネットワーク（同軸ネットワーク）と同様の手法により検討する。次にその CN 比をもとに、光ネットワークで伝送される信号の種類（デジタル、アナログなど）と RIN 及び ONU の入力レベル等の関係について検討する

### 1 光ネットワークにおける光変調などについて

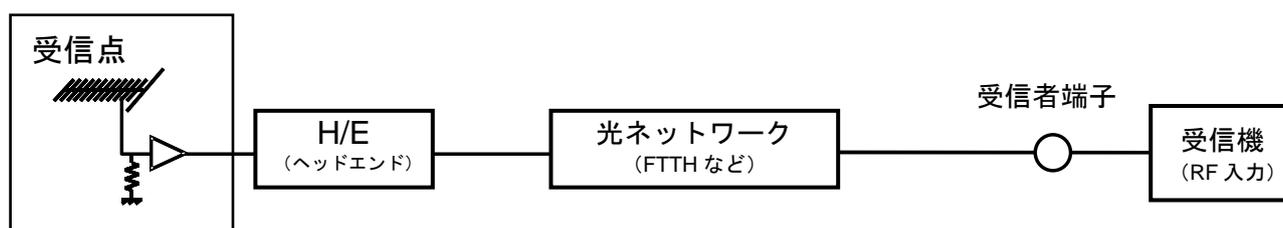


図1 光ケーブルテレビネットワークで関連する機器などの概略図

現行の同軸ネットワークにおける性能配分については別紙4に記述した。同軸ネットワークでは、搬送波のレベル差があっても、受信者端子での所要 CN 比は各搬送波の全てで満足されていることとされている。一方、光ネットワークでは、電気信号を光に変換する際の各搬送波のレベル設定が重要である。例えば、強度変調の場合、各搬送波の電気信号レベルと光強度との関係である変調度の誤差が、視聴者側で光から電気に変換する V-ONU 出力の CN 比の誤差になる。

光ネットワークの場合でも、それぞれの伝送方式ごとに要求される受信者端子やヘッドエンド入力でのレベルは同じ値が適用されるので、それをもとにネットワークに配分される CN 比を求めることになる。但し、前述のように同軸ネットワークと光ネットワークでは、搬送波のレベル差に対する考え方が根本的に異なる。現行の有線テレビジョン放送法施行規則では、各搬送波のレベル差についてのヘッドエンド規定が無く、受信者端子での搬送波のレベルと他の搬送波レベルとの差は 10dB 以内とされているだけである。このため、ここでは

- ・許容されるレベル差 10dB のうち 1/3 の 3.3dB がヘッドエンドの各搬送波レベル設定で生じている
- ・光変調器入力の各搬送波のレベル差は時間変動を含んで  $\pm 2$ dB 以内

と仮定し、2dB 低い搬送波の CN 比が同軸ネットワークで規定されている CN 比を確保するのに必要な CN 比を光ネットワークの CN 比と考えることとした。

別紙5において同軸ネットワークに割当てられた CN 比の許容値は、

- ・アナログ放送テレビジョン放送方式での受信者端子での CN 比の基準値：41.1dB、40.5dB
- ・デジタル有線テレビジョン放送方式（64QAM）での受信者端子での CN 比の基準値：26dB
- ・標準デジタルテレビジョン放送方式（OFDM）での受信者端子での CN 比の基準値：24.5dB

光ネットワークの CN 比を算出するにあたって、同軸ネットワークの値に変調度の差が  $\pm 2$ dB 以内の誤差を許容するとして 2dB を加え光ネットワークの CN 比とする。また、多チャンネルサービスをしているケーブルテレビ事業者を考慮して、参考基準として CN 比 46dB も加えた。なお、この場合には、

変調度の差±2dB を考慮して CN 比を 48dB 以上とすることは実現上困難であり、参考基準の CN 比は平均で CN 比 46dB(変調度の差±2dB を考慮した場合 44dB)とした。また、受信点出力の CN 比は 53dB 以上とした[8]。すなわち、

- ・アナログ放送の品質向上ケーブルテレビ事業者での受信者端子での CN 比の参考値：46dB
- ・アナログ放送テレビジョン放送方式での受信者端子での CN 比の基準値：42dB
- ・デジタル有線テレビジョン放送方式（64QAM）での受信者端子での CN 比の基準値：28dB
- ・標準デジタルテレビジョン放送方式（OFDM）での受信者端子での CN 比の基準値：26dB

その他、受信点とヘッドエンドの CN 比は、同軸ネットワークと同じ

- ・アナログ放送の受信点出力の CN 比：47dB と 51dB と 53dB（受信品質向上を目指す設備）
- ・デジタル放送の受信点出力の CN 比：34dB
- ・ヘッドエンドの CN 比：55dB

を用いて光ネットワークでの所要 CN 比を算出した結果を表 1 に示す。

表 1 受信者端子などの CN 比の例から算出される光ネットワークの所要 CN 比

標準アナログ	受信者端子 CN比[dB]	H/E CN比[dB]	受信点 CN比[dB]	光ネットワークCN比[dB]以上
				受信点CN比含む
品質向上設備	46	55	53	47.7
300MHz 超え	42	55	51	42.8
300MHz 以下	42	55	47	44.0

デジタル有線 (64QAM)	受信者端子 CN比[dB]	H/E CN比[dB]	受信点 CN比[dB]	光ネットワークCN比[dB]以上
				受信点CN比含まず
CN比基準受信	28	55	34	28.0
BER基準受信	28	55	22	28.0

標準デジタル (OFDM)	受信者端子 CN比[dB]	H/E CN比[dB]	受信点 CN比[dB]	光ネットワークCN比[dB]以上
				受信点CN比含む
CN比基準受信	26	55	34	26.8
BER基準受信	26	55	22	割当てられない

以上の算出結果から、光ネットワークに要求されている所要 CN 比を表 2 にまとめる。

表 2 光ネットワークにおける各放送方式における CN 比の関連

放送方式	受信点 CN 比 または ヘッドエンド入力	光ネットワーク CN 比	受信者端子 CN 比 (2dB 劣化した値)
標準アナログ (品質向上を目指す設備)	53dB 以上	48dB 以上	44dB 以上 (平均では 46dB を得る)
標準アナログ	47dB 以上	44dB 以上	40dB 以上
デジタル有線	BER : $1 \times 10^{-4}$ 以下	28dB 以上	26dB 以上
標準デジタル	34dB 以上	27dB 以上	24dB 以上
標準デジタル	BER : $1 \times 10^{-4}$ 以下	割当てられない	—

アナログ放送の再送信では、有線テレビジョン放送法施行規則の受信者端子での所要 CN 比 40dB を得るためには受信点での CN 比 47dB 以上であれば光ネットワーク CN 比 44dB を必要とする。デジタル有線テレビジョン放送方式（64QAM）は受信点 CN 比に影響されず光ネットワーク CN 比 28dB 以上を必要とし、標準デジタルテレビジョン放送方式（OFDM）では受信点での CN 比 34dB 以上であれば

光ネットワーク CN 比 27dB 以上を必要とする。しかし、現運用地上デジタル放送の再送信においてヘッドエンド入力信号のビット誤り率が  $1 \times 10^{-4}$  以下の確認のみでは、その入力信号の CN 比が 27dB 以下の場合もあり得るので、光ネットワークが実現できない場合もある。

また、各搬送波のレベルは他の搬送波とのレベルとの差は  $\pm 2\text{dB}$  以内の場合に限られ、それ以上のレベル差がある場合には受信点での所要 CN 比を満足できない場合がある。

## 2 実際の光ネットワークにおける所要 CN 比の算出

実際の光ネットワークにおいては、上記で算出された光ネットワークに要求される CN 比を満足する必要がある。光ネットワークにおける CN 比については、強度変調方式と FM 一括変換方式の場合、以下の計算式で求めることができる。

### 光伝送の CN 比の計算式

強度変調方式と FM 一括変換方式の場合の CN 比は、RIN を元に、式 (1-1) と式 (1-2) で求められる。

光増幅器による RIN

光増幅器の多段接続による RIN は以下の式により求まる。

$$RIN_{out} = 10 \log_{10} \left( \sum_k \frac{2 \cdot E \cdot 10^{\frac{NF_k}{10}}}{10^{\frac{P_k}{10}}} + 10^{\frac{RIN_{in}}{10}} \right) \quad [\text{dB/Hz}]$$

ただし、

- $RIN_{in}$ : 1 段目の光増幅器入力光の RIN [dB/Hz]
- $RIN_{out}$ : k 段目の光増幅器入力光の RIN [dB/Hz]
- $E$ : フォトンエネルギー (1555nm の場合、 $1.278 \times 10^{-16}$  [mJ])
- $NF_k$ : k 段目の光増幅器の雑音指数 [dB]
- $P_k$ : k 段目の光増幅器の入力光電力 [dBm]

#### (1) 強度変調方式の場合の CN 比

$$C/N = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{B_N} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot (m_k \cdot R \cdot P_r)^2}{RIN(R \cdot P_r)^2 + 2 \cdot e \cdot (I_{d0} + R \cdot P_r) + I_{eq}^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad \dots \dots \dots (1-1)$$

ただし、

$$M = \sqrt{\sum_{k=1}^K m_k^2}$$

なお、式中で用いた記号の意味は以下のとおりである。

- $B_N$ : 雑音帯域幅 (アナログ: $4.0 \times 10^6$  [Hz]、デジタル: $5.3 \times 10^6$  [Hz])
- $K$ : 伝送搬送波数
- $M$ : 全光変調度
- $m_k$ : k 番目搬送波の光変調度
- $R$ : 受光素子の光-電気変換効率 [A/W]
- $P_r$ : 受光電力 [W]
- $RIN$ : 入力信号光の相対強度雑音 (RIN) [1/Hz]
- $e$ : 電子素量 ( $1.602 \times 10^{-19}$  [C])

- $I_{d0}$ : 受光素子の暗電流 [A]
- $I_{eq}$ : 受光部の入力換算雑音 [ $A/\sqrt{\text{Hz}}$ ]

・ FM 一括変換方式の場合の CN 比

FM 一括変換方式の CN 比は、FM 変調器の雑音特性及び FM 伝送区間（FM 一括変換方式で伝送される光伝送区間）の雑音特性の和に、広帯域利得を加味することにより求められる。

$$C/N = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{2 \cdot B_N} \cdot \frac{\Delta F^2(f)}{f^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{C/N_{mod}(f)} + \frac{1}{C/N_{ONU}}} \right) \quad [\text{dB}] \quad \dots \dots \dots (1-2)$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数 [MHz]
- $B_N$ : 雑音帯域幅 (アナログ:  $4.0 \times 10^6$  [Hz]、デジタル:  $5.3 \times 10^6$  [Hz])
- $\Delta F(f)$ : 周波数偏移量 [ $\text{MHz}_{0-p}/\text{ch}$ ]
- $C/N_{mod}(f)$ : FM 変調器の単位周波数幅当たりの雑音特性 [ $1/\text{Hz}^{-1}$ ]
- $C/N_{ONU}$ : FM 伝送区間の単位周波数幅当たりの雑音特性 [ $1/\text{Hz}^{-1}$ ]

周波数偏移量は導入事例ごとに自由に設定することが可能であるが、ITU-T 勧告書 J.185 においては以下の式で与えられている。

$$\Delta F(f) = 70.0 \cdot 10^{\frac{12.9(f-47)}{16340}} \cdot 10^{\frac{V_{in}-85}{20}} \quad [\text{MHz}_{0-p}/\text{ch}]$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数, MHz
- $V_{in}$ : 光送信装置への入力搬送波レベル [ $\text{dB} \mu \text{V}/\text{ch}$ ]  
(AM-VSB: 85 [ $\text{dB} \mu \text{V}/\text{ch}$ ], 64QAM: 75 [ $\text{dB} \mu \text{V}/\text{ch}$ ])

FM 変調器の実現に光ヘテロダイン技術を用いる場合、FM 変調器の単位周波数幅当たりの雑音特性  $C/N_{mod}(f)$  は光ヘテロダイン部の単位周波数幅当たりの雑音特性及び単位周波数幅当たりの位相雑音の和として求められる。典型値を代入した場合は以下のようになる。

$$C/N_{mod}(f) = \frac{1}{\frac{1}{C/N_{heterodyne}} + \frac{1}{C/N_{phase}(f)}} = \frac{1}{10.0 \times 10^{-15} + \frac{2 \times 10^{-8}}{\pi \cdot f^2}} \quad [1/\text{Hz}^{-1}]$$

ただし、

- $f$ : 搬送波周波数 [MHz]

FM 伝送区間（FM 一括変換方式で伝送される光伝送区間）の単位周波数幅当たりの雑音特性  $C/N_{ONU}$  は以下の式により求まる。

$$C/N_{ONU} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (m \cdot R \cdot P_r)^2}{RIN \cdot (R \cdot P_r)^2 + 2 \cdot e \cdot (I_{d0} + R \cdot P_r) + I_{eq}^2} \quad [1/\text{Hz}^{-1}]$$

ただし、

- $m$ : FM 一括変換信号の光変調度
- $R$ : 受光素子の光-電気変換効率 [A/W]
- $P_r$ : 受光電力 [W]
- $RIN$ : 入力信号光の相対強度雑音 (RIN) [1/Hz]
- $e$ : 電子素量 ( $1.602 \times 10^{-19}$  [C])
- $I_{d0}$ : 受光素子の暗電流 [A]
- $I_{eq}$ : 受光部の入力換算雑音 [ $A/\sqrt{\text{Hz}}$ ]

### 3 放送方式による各パラメータの関係

光ネットワークの施設では、①現行のアナログ放送とデジタル放送が混在で多くの番組を提供している多チャンネル施設、②放送の再送信のみを行っている再送信施設とがあり、更に将来は③デジタル方式でのみサービスをするデジタル多チャンネル施設の3種に分類される。1で記述したように、それぞれの場合で所要 CN 比が異なることから、光ネットワークの性能配分をこれら3種について考察する。ケーブルテレビ施設での放送サービス数は様々であるため、上記具体例では、平成14年2月に(社)日本ケーブルテレビ連盟で調査された全チャンネル数を参考にした[9]。その報告では、41~50chが38%(89社)と最も多かった。その後、デジタル放送に移行したチャンネルもあると思われ、多チャンネル施設は、アナログ40搬送波とデジタル30搬送波とした。デジタル放送のみの施設では、デジタル化することにより、光ネットワークの許容品質を下げられるので、90~770MHz帯域のほとんどの搬送波を用いたとして、デジタル放送110搬送波とした。また、放送の再送信のみの施設では、NHK2放送波に民間放送系列局を加えても10チャンネルを超えるとは思われないので10搬送波とし、デジタル放送への移行時期のサイマル放送を考慮してデジタル10チャンネルも追加した。

1. アナログ、デジタル放送同時伝送：アナログ40搬送波+デジタル(64QAM、OFDM)30搬送波
2. デジタル放送のみ：デジタル(64QAM、OFDM)110搬送波
3. アナログ、デジタル放送同時伝送：アナログ10搬送波+デジタル(OFDM)10搬送波

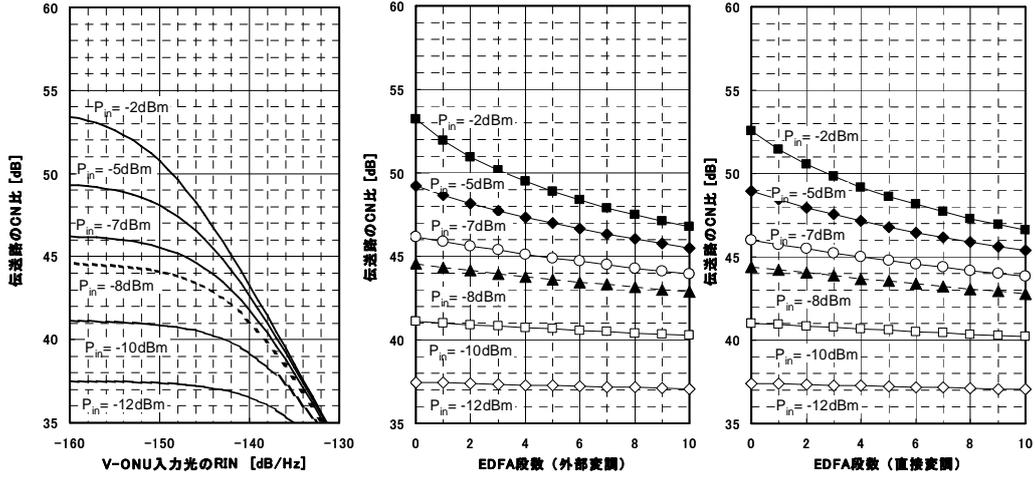
計算に用いた設計パラメータは表3に示す。これらの値は、(社)日本CATV技術協会での機器提供メーカーなどへのアンケート結果の平均値である。(参考3)強度変調方式とFM一括変換方式での光ネットワークのRINとCN比との関係を計算した結果を図2から図7に、V-ONU入力光とCN比との関係を図8と図9に示す。デジタル放送信号もアナログ放送信号と同じく計算をした(同期尖頭値の最大搬送波レベルでの変調度と4MHz帯域幅の雑音帯域幅)。なお、64QAMでは、最大搬送波レベルが平均値搬送波レベルより3.68dB低く、雑音帯域幅はアナログ放送信号より1.2dB広い。それゆえ、64QAMのCN比が5dB低く、図3と図6はその5dBを下げて図示している。アナログ、デジタル放送同時伝送(図2、図4、図5、図7)では、デジタル放送のレベルを下げることも可能なので、ここでは10dB下げて計算し、光ネットワークのCN比はアナログ放送のCN比を示した。再送信施設では、伝送チャンネルが少ないため、光変調度を高くして光ネットワークに割当て性能を低下することができ、強度変調方式の全光変調度を30%として算出した。

光変調器からV-ONUの間に存在するEDFA(エルビウムドープファイバ増幅器)段数の依存性を求め、図10に示す。なお、EDFA段数とCN比の関係については、光反射やSBS、線形クロストークなどによるRINを考慮していない。さらに、計算結果は全て光ネットワークCN比であり、ヘッドエンドと受信点のCN比は含んでいない。

表3 計算に用いたパラメータ一覧

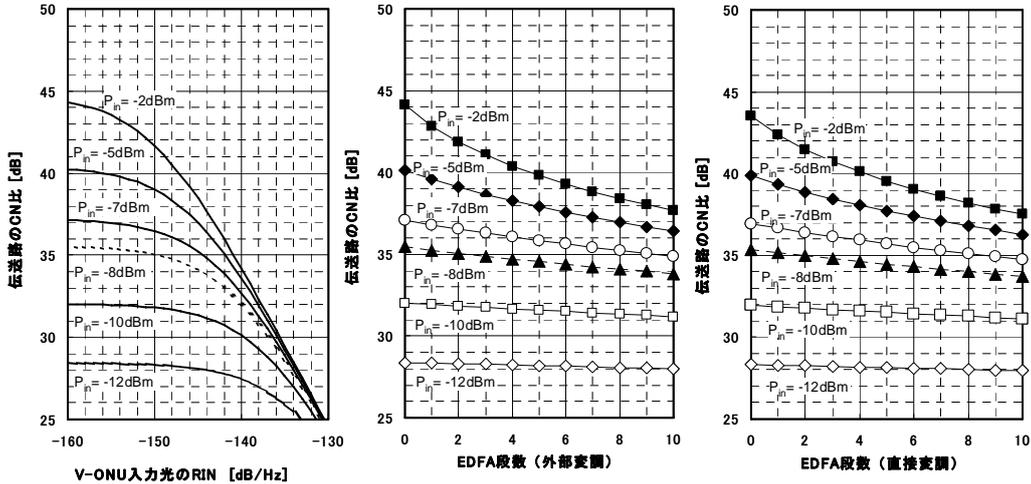
設計パラメータ	強度変調方式		FM一括変換方式
	直接変調	外部変調	
雑音帯域幅	4.0 MHz		
全光変調度	28.2 %	28.3 %	70 %
光送信器出力光のRIN	-155 dB/Hz	-158.1 dB/Hz	-140 dB/Hz
光増幅器のNF	6.2 dB		
光増幅器の入力光電力	+4.5 dBm		
光-電気変換効率	0.84 A/W		0.8 A/W
受光素子の暗電流	1.3 nA		100 nA
受光部の入力換算雑音	10 pA/√Hz		15 pA/√Hz

計算結果



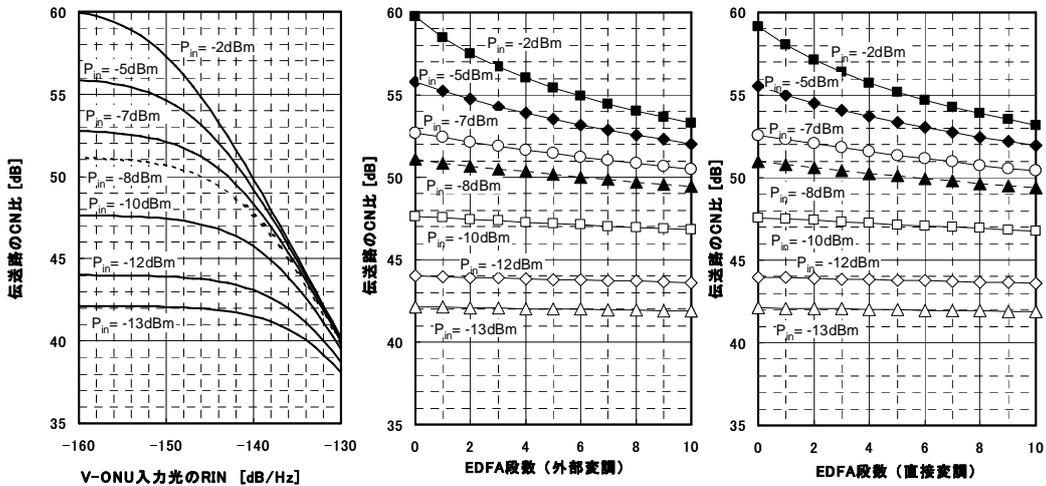
- (注1)  $P_{in}$  はV-ONUの受光電力を示す
- (注2) 伝送路のCN比にはHE等のCN比は含まず
- (注3) 1搬送波当たりの光変調度はアナログ信号4.31%、デジタル信号1.36%
- (注4) 上記結果はアナログ信号のCN比 (雑音帯域幅は4 MHz)

図2 強度変調方式 ~ アナログ 40 搬送波+デジタル 30 搬送波 ~



- (注1)  $P_{in}$  はV-ONUの受光電力を示す
- (注2) 伝送路のCN比にはHE等のCN比は含まず
- (注3) 1搬送波当たりの光変調度は2.70%

図3 強度変調方式 ~ デジタル 110 搬送波 ~



- (注1)  $P_{in}$  はV-ONUの受光電力を示す
- (注2) 伝送路のCN比にはHE等のCN比は含まず
- (注3) 1搬送波当たりの光変調度はアナログ信号9.16%、デジタル信号2.89%
- (注4) 上記結果はアナログ信号のCN比 (雑音帯域幅は4 MHz)

図4 強度変調方式 ~ アナログ 10 搬送波+デジタル 10 搬送波 ~

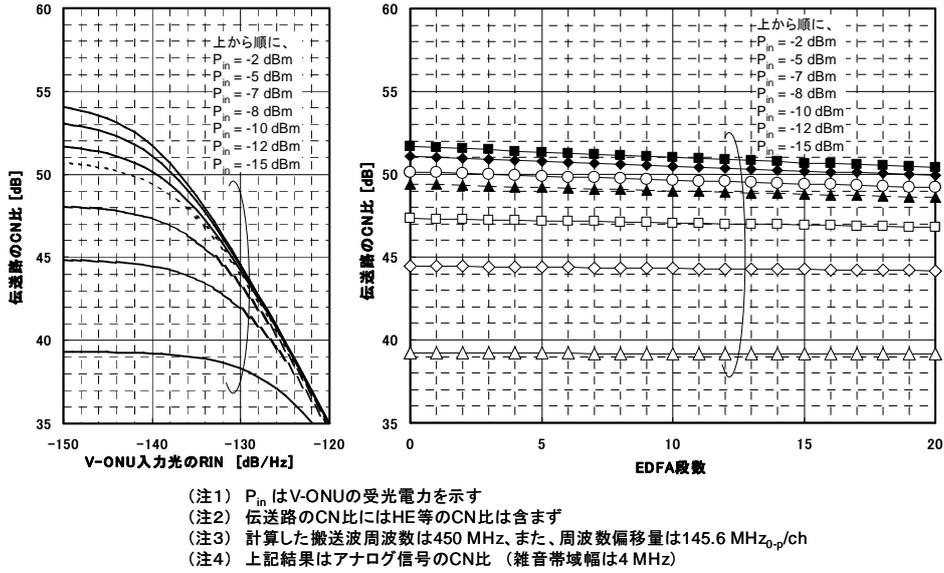


図5 FM一括変換方式 ～ アナログ40搬送波+デジタル30搬送波 ～

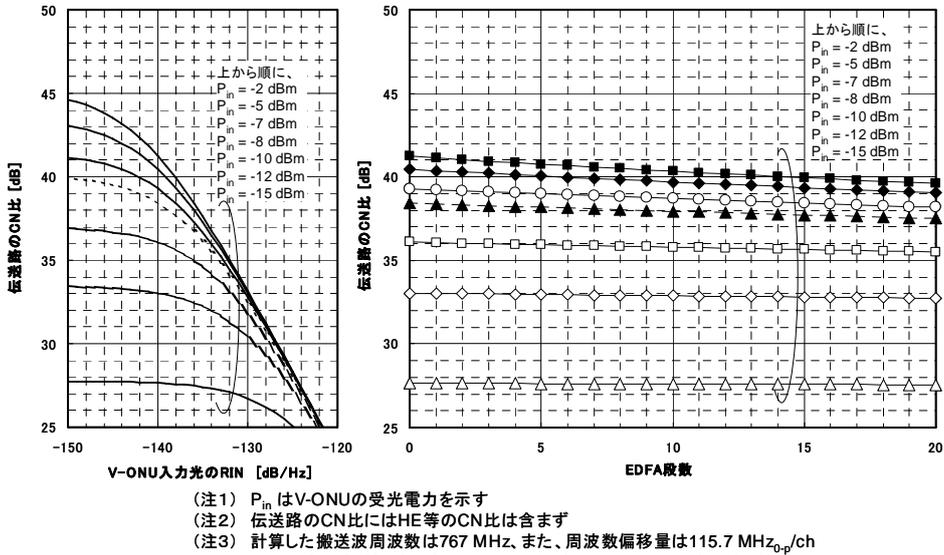


図6 FM一括変換方式 ～ デジタル110搬送波 ～

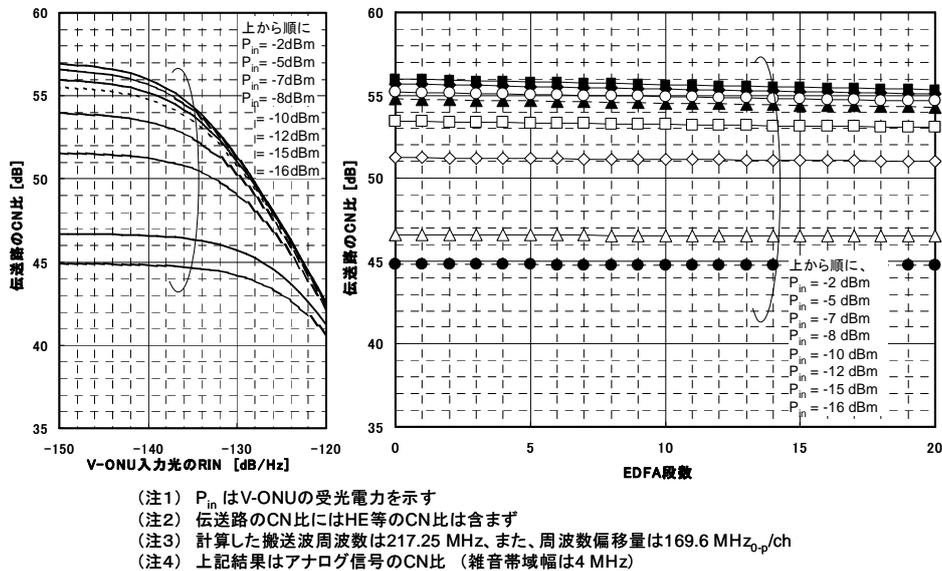


図7 FM一括変換方式 ～ アナログ10搬送波+デジタル10搬送波 ～

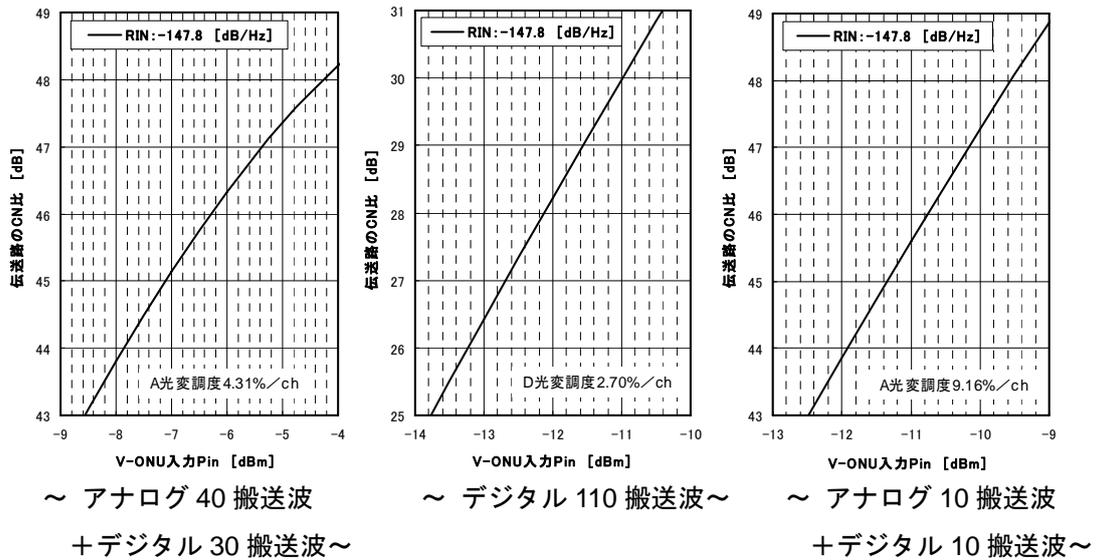


図 8 強度変調方式

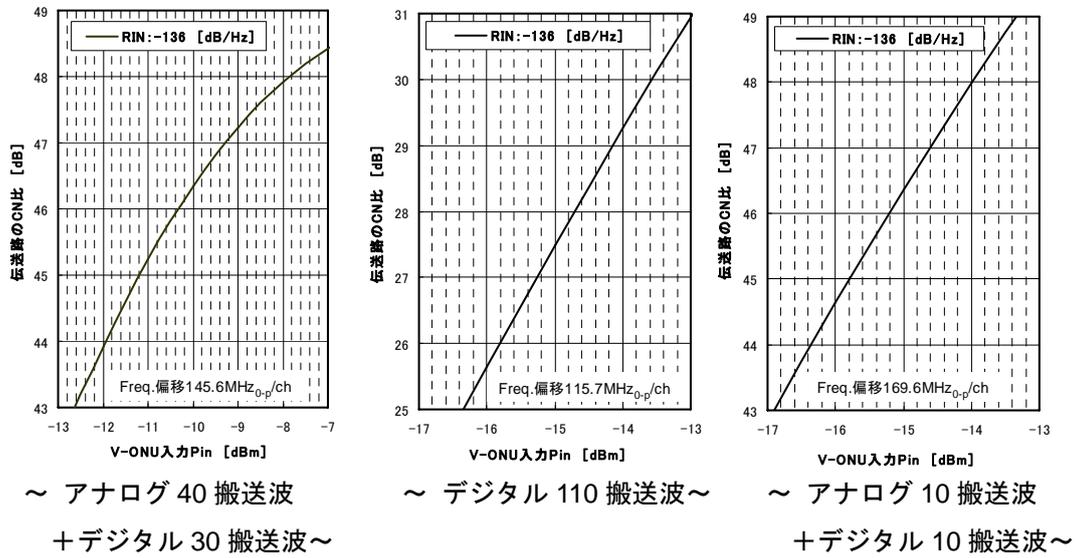


図 9 FM 一括変換方式

【参考】EDFA の入力光電力と出力光 RIN の関係

EDFA の入力光電力と出力光の RIN との関係を示す。EDFA の入力光電力を +4.5dBm とすると、出力光の RIN はグラフより -154.2dB/Hz となる。この条件の EDFA を 4 段連続接続すると、全体の RIN は -148.2dB/Hz となる。外部変調の強度変調方式でアナログ 40 搬送波 + デジタル 30 搬送波を 4 段の EDFA を経由して伝送すると、V-ONU 入力光の RIN は -147.8dB/Hz となる。

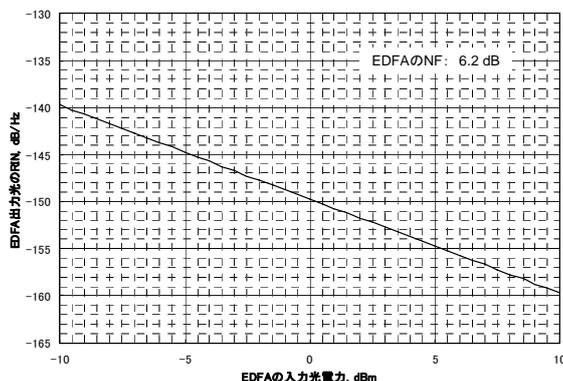


図 10 EDFA の入力光電力と出力光 RIN の関係

#### 4 光ネットワークの所要 CN 比と V-ONU 入力の関係

3の結果をもとに、EDFAの段数を4段として、光強度変調方式のRINを $-148\text{dB/Hz}$ に、FM一括変換方式のRINを $-136\text{dB/Hz}$ に統一し、それぞれの場合について必要となるV-ONUの入力レベルを計算した。

##### ・FTTH（強度変調方式）例（RINを $-148\text{dB/Hz}$ に統一した場合）

###### 多チャンネル施設

- ・光ネットワーク CN 比 48dB 以上の場合 \* 1 V-ONU 入力： $-4.3\text{dBm}$
- ・光ネットワーク CN 比 44dB 以上の場合 \* 2 V-ONU 入力： $-7.9\text{dBm}$

###### デジタル多チャンネル

- ・光ネットワーク CN 比 28dB 以上の場合 \* 3 V-ONU 入力： $-12.1\text{dBm}$
- ・光ネットワーク CN 比 27dB 以上の場合 \* 4 V-ONU 入力： $-12.7\text{dBm}$

###### 再送信施設

- ・光ネットワーク CN 比 44dB 以上の場合 \* 2 V-ONU 入力： $-11.9\text{dBm}$

##### ・FTTH（FM一括変換方式）例（RINを $-136\text{dB/Hz}$ に統一した場合）

###### 多チャンネル施設

- ・光ネットワーク CN 比 48dB 以上の場合 \* 1 V-ONU 入力： $-7.8\text{dBm}$
- ・光ネットワーク CN 比 44dB 以上の場合 \* 2 V-ONU 入力： $-11.9\text{dBm}$

###### デジタル多チャンネル

- ・光ネットワーク CN 比 28dB 以上の場合 \* 3 V-ONU 入力： $-14.7\text{dBm}$
- ・光ネットワーク CN 比 27dB 以上の場合 \* 4 V-ONU 入力： $-15.3\text{dBm}$

###### 再送信施設

- ・光ネットワーク CN 比 44dB 以上の場合 \* 1 V-ONU 入力： $-16.4\text{dBm}$

\* 1：この光ネットワーク CN 比 48dB は、多チャンネルサービスをしているケーブルテレビ事業者の品質向上目標の CN 比 46dB を平均的に得るための目安である。

\* 2：この光ネットワーク CN 比 44dB は、有線テレビジョン放送施行規則の標準テレビジョン放送方式の受信者端子での規定 CN 比 40dB を得るため、受信点 CN 比 47dB 以上の信号をそのままあるいは再変調され、それらの信号の光変調器入力での全搬送波のレベル差は $\pm 2\text{dB}$ 以内の場合である。

\* 3：この光ネットワーク CN 比 28dB は、有線テレビジョン放送施行規則のデジタル有線テレビジョン放送方式の受信者端子で規定された CN 比 26dB を得るため、ヘッドエンド入力の信号は再変調され、それらの信号の光変調器入力での全搬送波のレベル差は $\pm 2\text{dB}$ 以内の場合である。

\* 4：この光ネットワーク CN 比 27dB は、有線テレビジョン放送施行規則の標準デジタル放送方式の受信者端子での規定 CN 比 24dB を得るため、受信点 CN 比 34dB 以上の信号をその変調された信号をそのまま再送信され、それらの信号の光変調器入力での全搬送波のレベル差は $\pm 2\text{dB}$ 以内の場合である。

この結果、V-ONU の入力レベルとしては表 4 の様な結論を得ることができる。なお、デジタル多チャンネルと再送信施設は同程度なのでまとめて示す。

表 4 V-ONU 入力レベル

施設	強度変調方式	FM 一括変換方式	算出の一条件
多チャンネル施設	-8dBm 以上	-12dBm 以上	アナログ 40 搬送波 +デジタル 30 搬送波
デジタル多チャンネル あるいは 再送信施設	-12dBm 以上	-15dBm 以上	デジタル 110 搬送波 あるいは アナログ 10 搬送波 +デジタル 10 搬送波

注：強度変調方式の RIN-148dB/Hz、FM 一括変換方式の RIN-136dB/Hz の場合

注：各搬送波の光変調度±2dB 以内の場合に限り、上記値を満足する

<参考文献>

- [1] 昭和 62 年 9 月 28 日電気通信技術審議会答申の報告書「多チャンネル等に伴う有線テレビジョン放送施設に関する技術的条件」(昭和 61 年 9 月 27 日諮問第 30 号)
- [2] 平成 8 年 5 月 27 日電気通信技術審議会答申時の報告書「デジタル放送方式に係る技術的条件」(平成 6 年 6 月 27 日諮問第 74 号)のうち「有線テレビジョン放送方式によるデジタル放送方式の技術的条件」(デジタル有線テレビジョン放送方式による有線テレビジョン放送の技術的条件)
- [3] 平成 10 年 6 月 29 日電気通信技術審議会答申時の報告書「有線テレビジョン放送事業用無線局の技術的条件」(平成 10 年 4 月 21 日諮問第 102 号)のうち「2.3GHz 帯を使用する有線テレビジョン放送事業に用いる固定局の技術的条件」
- [4] 平成 11 年 5 月 24 日電気通信技術審議会答申時の報告書「デジタル放送方式に係る技術的条件」(平成 6 年(1994 年)6 月 27 日諮問第 74 号)のうち「地上デジタルテレビジョン放送方式の技術的条件」(標準デジタルテレビジョン放送方式による地上テレビジョン放送の技術的条件)
- [5] 平成 11 年 5 月 24 日電気通信技術審議会答申時の報告書「デジタル放送導入のための地上放送の置局に関する技術的条件」(平成 10 年 2 月 6 日諮問第 98 号)
- [6] 平成 12 年 1 月 24 日電気通信技術審議会答申時の報告書「デジタル放送方式に係る技術的条件」(平成 6 年 6 月 27 日諮問第 74 号)のうち「有線テレビジョン放送施設における地上デジタルテレビジョン放送の伝送に係る技術的条件」(標準デジタルテレビジョン放送方式による有線テレビジョン放送の技術的条件)
- [7] 平成 14 年 1 月 27 日情報通信技術審議会答申の報告書「東経 110 度 CS デジタル放送等の新たな受信形態に係る有線テレビジョン放送方式の拡充に関する技術的条件」(平成 13 年 11 月 26 日諮問第 2006 号)(デジタル有線テレビジョン放送方式の信号の平均値レベルへの移行など)
- [8] 泉監修：(社)日本電子機械工業会 CATV 技術委員会編集：ケーブルテレビ技術入門、pp.190-202、pp.222-225、コロナ社(1994)
- [9] 平成 14 年 7 月「ブロードバンド時代のケーブルテレビの在り方に関する検討会」報告書 参考資料 1 の Q13：[http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020705\\_8.html](http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020705_8.html)

## 性能規定点の所要性能

従来の電気的な性能規定点である受信者端子に加えて、FTTH/FTTB の場合には V-ONU の入出力も性能規定点に加えるべく別紙 3 にて検討した。この場合、建物内部配線の性能を定量化することが条件となる。特に光の接続点での性能は CN 比に代えて RIN 等で評価することができ、この規格で最も厳しいアナログ放送に対する性能を検討する。技術基準ではコンバータを使用する場合の性能として受信者端子にて、CN 比は 40dB 以上と定めている。

## 1 戸建ての場合の所要性能

戸建て宅内の接続構成例を図 1、図 2 に示す。宅内配線は増幅器を使用せずに分配器だけで構成できるため、V-ONU 出力の CN 比や歪みはそのまま受信者端子の性能となる。端子数の多い住宅では宅内増幅器を使用するがその場合の受信者端子の CN 比は以下の式で表される。

$$\text{宅内配線の CN 比} = \text{宅内増幅器の入力レベル} - \text{宅内増幅器 NF} - \text{熱雑音}$$

一般的な製品の仕様の値を代入すると以下のとおりとなる。

$$\text{宅内配線の CN 比} = 70 - 10 - 1 = 59 \text{ [dB]}$$

この宅内配線の CN 比 59dB を考慮すると宅内での性能劣化は 0.1dB 以下であり、V-ONU 出力の性能は受信者端子の所要性能 40dB がそのまま適用できる。V-ONU 入力の光信号で性能を規定する場合には、チャンネル間のレベル偏差として  $\pm 2\text{dB}$  を考慮し（別紙 6 参照）、V-ONU 出力で平均 CN 比 42dB を得られる光レベル、RIN 等を規定すればよいことになる。

戸建て住宅の V-ONU 出力で性能規定する場合の所要 CN 比  $\geq 40 \text{ dB}$

戸建て住宅の V-ONU 入力光で性能規定する場合の所要推定 CN 比  $\geq 42 \text{ dB}$

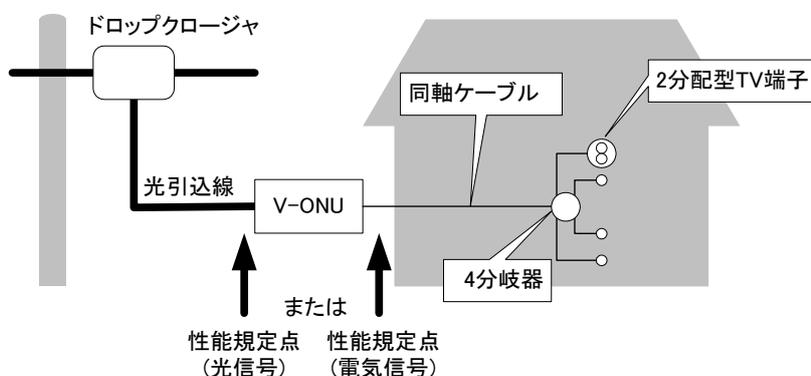


図 1 戸建て宅内接続図(ブースターを使用しない場合)

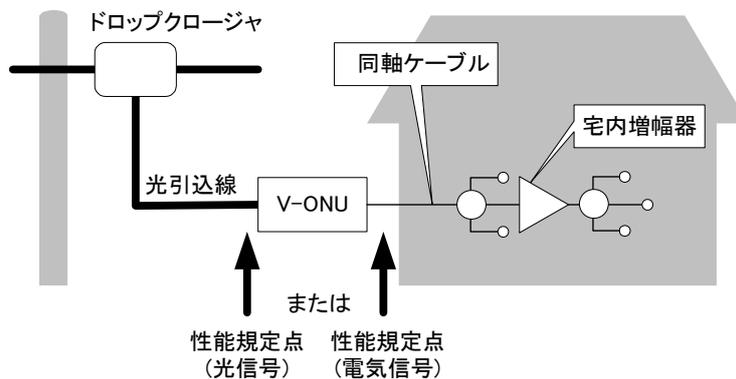


図 2 戸建て宅内接続図(ブースターを使用する場合)

## 2 集合住宅の建物入口 V-ONU の所要性能

集合住宅との性能規定点を屋外として受信者端子の性能を確保するためには、棟内 TV 配線をモデル化して性能劣化を定量化する必要がある。5 階～60 階までの集合住宅について、同軸配線の場合と各戸まで光配線の場合を整理した。各種の方式について建物入口 V-ONU 出力から各戸の受信者端子までの棟内だけの伝送性能を CN 比について表 1 にまとめた。各戸まで光で配線する場合には、光ファイバの損失が小さいので建物の規模には依存しない。同軸配線の場合について機器主要諸元を表 4 に、性能計算の結果を図 3 に示す。各戸まで光配線する場合の性能計算は図 4 に示す。

表 1 各種の大きさ、配線方式による棟内の CN 性能

階数	戸数	配線方式	増幅器 段数	棟内 CN 比 [dB]
5	40	同軸	2	52.2
15	120	同軸	2	52.2
30	240	同軸	2	47.7
60	480	同軸	4 (プリアンプ含む)	46.2
60	980	各戸光	2 (EDFA)	46.7

表 1 の値から集合住宅の棟内配線の CN 比は 46dB 以上を確保している。古い集合住宅はおよそ 30 階以下と考えられ CN 比 47.7dB に 2dB のマージンを見ても、45dB 以上が確保出来るものと考えられる。

集合住宅用建物入口の V-ONU 出力端子の所要 CN 比は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \text{V-ONU 出力所要 CN 比} &\geq \text{目標とする受信者端子 CN 比} - \text{棟内 CN 比} \\ &\geq 40 \text{ [dB]} - 45 \text{ [dB]} \\ &\geq 42 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

屋外に設置した光接続箱の中の光接続点、すなわち V-ONU 入力の光信号で性能規定する場合には、V-ONU 出力の CN 比 42dB に、チャンネル間のレベル偏差を考慮して±2dB のマージンを見て（別紙 5）、CN 比 44dB に相当する RIN や光レベルを規定すればよいこととなる。

$$\begin{aligned} \text{集合住宅入口 V-ONU 出力で性能規定する場合の所要 CN 比} &\geq 42 \text{ [dB]} \\ \text{集合住宅入口 V-ONU 入力光で性能規定する場合の所要推定 CN 比} &\geq 44 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

### 3 各戸まで光配線の集合住宅で光信号のまま各戸まで増幅分配する場合の所要性能

建物入口で電気変換しない集合住宅の性能規定点は各戸 V-ONU であるとした（別紙 3）。従って、戸建て住宅と同様に次のように性能を規定できる。

$$\begin{aligned} \text{各戸 V-ONU 出力で性能規定する場合の所要 CN 比} &\geq 40 \text{ [dB]} \\ \text{各戸 V-ONU 入力光で性能規定する場合の所要推定 CN 比} &\geq 42 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

1～3 項で検討した各種の建物条件について表 2 に整理する。

これまで最も性能規定の厳しいアナログテレビジョン放送 (NTSC) について検討したが、各種放送方式について性能の規定を表 3 にまとめた。デジタルテレビジョン放送 (64QAM、OFDM) は、所要の CN 比が低いため、宅内・棟内配線の性能劣化よりもチャンネル間レベル偏差の±2dB の方が充分大きいためこの値とした。

表 2 建物入口 V-ONU の入出力を性能規定点とする場合の条件

住宅の規模の別	光入力を規定するための条件 宅内・棟内配線の CN 比	V-ONU 出力 の CN 比	V-ONU 入力を規定 するときの推定 CN 比
共通事項	RIN で規定するための条件 ・ 光変調方式 ・ 光パワーレベル ・ チャンネル当たり変調度 ・ V-ONU の緒元		
① 戸建て	宅内テレビ配線の性能 CN 比 $\geq 59$ dB	各戸 V-ONU 40dB 以上	各戸 V-ONU 42dB 以上
② 集合住宅 ・ 60 階以下の同軸配線 (棟内ブースターは 4 段以内) ・ 建物入口で電気変換後に 各戸まで光配線	棟内配線の性能 CN 比 $\geq 45$ dB	建物入口 V-ONU 42dB 以上	建物入口 V-ONU 44dB 以上
・ 各戸まで光配線の集合住 宅で光信号のまま各戸ま で増幅分配する場合	宅内テレビ配線の性能 CN 比 $\geq 59$ dB	各戸 V-ONU 40dB 以上	各戸 V-ONU 42dB 以上

表 3 各種放送方式に対応した V-ONU 入出力の規定性能

性能規定点	放送方式	受信者端子 の CN 比規定	V-ONU の CN 比 (単位 : dB)		
			戸建て V-ONU	建物入口 V-ONU	集合住宅の各戸 V-ONU(*)
V-ONU 出力 (電気)	NTSC	40	40	42	40
	64QAM	26	26	26	26
	OFDM	24	24	24	24
V-ONU 入力 (光)	NTSC	40	42	44	42
	64QAM	26	28	28	28
	OFDM	24	26	26	26

(\*) 建物入口で電気変換しない場合

表 4 機器単体性能

ブースター(CS・BS・UV-1)

	VHF(L)	VHF(H)	UHF	BS 1000MHz	BS 1336MHz	CS 2150MHz
利得 [dB]	30	35	40	35	36.7	40
定格出力レベル[dB $\mu$ ]	105	110	115	110	111.7	115
雑音指数 [dB]	8	8	10	10	10	10
IM3 [dB]	-52	-58	-68	-59	-59	-59

ブースター(2602MHz)

	VHF(L)	VHF(H)	UHF	BS 1000MHz	BS 1336MHz	CS 2602MHz
利得 [dB]	30	35	40	30	32.5	40
定格出力レベル[dB $\mu$ ]	105	110	115	105	107.5	115
雑音指数 [dB]	8	8	10	10	10	10
IM3 [dB]	-52	-58	-68	-63	-63	-63

ブースター(CATV・CS・BS-2W)

	55MHz	70MHz	770MHz	BS 1000MHz	BS 1336MHz	CS 2602MHz
利得 [dB]	30	38	38	30	32.5	40
定格出力レベル[dB $\mu$ ]	110	107	107	103	105.5	113
雑音指数 [dB]	10	10	10	10	10	10
IM3,CTB [dB]	-70	-60	-60	-63	-63	-63

ケーブル(1m)減衰量[dB]	55MHz	70MHz	100MHz	220MHz	770MHz	1000MHz	1300MHz	2150MHz	2600MHz
S-5C-FB	0.0446	0.0522	0.0621	0.095	0.192	0.224	0.261	0.355	0.4
S-7C-FB	0.0314	0.0369	0.0441	0.068	0.14	0.164	0.193	0.265	0.3
S-10C-FB	0.025	0.028	0.037	0.051	0.104	-	0.133	0.183	0.207



項目	局内接続(WH)						各階のCSO						C/N(階層別)							
	VHF L		VHF H		UH F A		UH F D		UH F D		UH F D		UH F D		UH F D		UH F D		UH F D	
	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	CS-F	
① コンバータ出力	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
② ケーブル(70)	10m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③ ケーブル(70)	10m	0.41	0.68	1.4	1.4	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
④ E/O	入力	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑤ E/O	出力	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑥ コネクター	光ファイバ<200m>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑦ 光増幅器	光増幅器	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑧ O/E	光出力	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑨ 混合器	混合器	1	1	1.5	1.5	2	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑩ E/O	入力	75.59	73.32	72.1	62.1	62.1	78.0	-3.0	77.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑪ E/O	出力	70	70	70	60	60	70	70	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑫ コネクター	コネクター	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑬ 光増幅器	光増幅器	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑭ 光増幅器	光増幅器	20	20	20	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑮ 光増幅器	光増幅器	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑯ 光増幅器	光増幅器	-14.5	-14.5	-14.5	-14.5	-14.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑰ 光増幅器	光増幅器	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑱ 光増幅器	光増幅器	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑲ 光増幅器	光増幅器	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⑳ 光増幅器	光増幅器	22	22	22	22	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉑ 光増幅器	光増幅器	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉒ 光増幅器	光増幅器	-4	-4	-4	-4	-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉓ 光増幅器	光増幅器	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉔ 光増幅器	光増幅器	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉕ 光増幅器	光増幅器	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉖ 光増幅器	光増幅器	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉗ 光増幅器	光増幅器	-23.68	-23.68	-23.68	-23.68	-23.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉘ 光増幅器	光増幅器	-1.68	-1.68	-1.68	-1.68	-1.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
㉙ 光増幅器	光増幅器	85	85	85	75	80	80	80	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉚ 光増幅器	光増幅器	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉛ 光増幅器	光増幅器	8	8	8	8	8	9	10.5	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉜ 光増幅器	光増幅器	12m	1.13	2.28	2.28	3.13	4.27	4.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉝ 光増幅器	光増幅器	9.23	10.38	10.38	10.38	12.23	14.97	16.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉞ 光増幅器	光増幅器	75.77	75.77	74.62	64.62	64.62	67.77	66.03	63.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㉟ 光増幅器	光増幅器	-63	-63	-63	-63	-63	-60	-60	-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊱ 光増幅器	光増幅器	-53	-53	-53	-53	-53	-60	-60	-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊲ 光増幅器	光増幅器	-60	-60	-60	-60	-60	-66	-66	-66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊳ 光増幅器	光増幅器	-50	-50	-50	-50	-50	-60	-60	-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊴ 光増幅器	光増幅器	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊵ 光増幅器	光増幅器	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊶ 光増幅器	光増幅器	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊷ 光増幅器	光増幅器	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊸ 光増幅器	光増幅器	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊹ 光増幅器	光増幅器	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊺ 光増幅器	光増幅器	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊻ 光増幅器	光増幅器	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊼ 光増幅器	光増幅器	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊽ 光増幅器	光増幅器	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊾ 光増幅器	光増幅器	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊿ 光増幅器	光増幅器	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊱ 光増幅器	光増幅器	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊲ 光増幅器	光増幅器	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊳ 光増幅器	光増幅器	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊴ 光増幅器	光増幅器	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊵ 光増幅器	光増幅器	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊶ 光増幅器	光増幅器	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊷ 光増幅器	光増幅器	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊸ 光増幅器	光増幅器	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊹ 光増幅器	光増幅器	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊺ 光増幅器	光増幅器	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊻ 光増幅器	光増幅器	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊼ 光増幅器	光増幅器	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊽ 光増幅器	光増幅器	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊾ 光増幅器	光増幅器	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊿ 光増幅器	光増幅器	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊱ 光増幅器	光増幅器	6	6	6	6	6	6	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊲ 光増幅器	光増幅器	8	8	8	8	8	8	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊳ 光増幅器	光増幅器	10	10	10	10	10	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊴ 光増幅器	光増幅器	12	12	12	12	12	12	12	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊵ 光増幅器	光増幅器	14	14	14	14	14	14	14	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊶ 光増幅器	光増幅器	16	16	16	16	16	16	16	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊷ 光増幅器	光増幅器	18	18	18	18	18	18	18	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊸ 光増幅器	光増幅器	20	20	20	20	20	20	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊹ 光増幅器	光増幅器	22	22	22	22	22	22	22	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊺ 光増幅器	光増幅器	24	24	24	24	24	24	24	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊻ 光増幅器	光増幅器	26	26	26	26	26	26	26	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊼ 光増幅器	光増幅器	28	28	28	28	28	28	28	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊽ 光増幅器	光増幅器	30	30	30	30	30	30	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊾ 光増幅器	光増幅器	32	32	32	32	32	32	32	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊿ 光増幅器	光増幅器	34	34	34	34	34	34	34	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊱ 光増幅器	光増幅器	36	36	36	36	36	36	36	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
㊲ 光増幅器	光増幅器	38	38																	