

波長多重の詳細

1 波長多重の基本

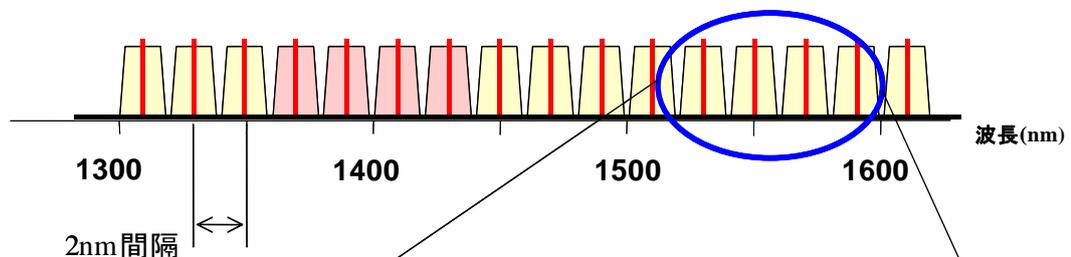
1.1 波長多重の方式

異なる波長の光を 1 本の光ファイバで伝送することを波長多重伝送という。波長多重をする方式には、以下の 2 方式がある。

- (1) “粗い波長多重” CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)
- (2) “密な波長多重” DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

両者は、波長の間隔が異なり、その波長（周波数）は、ITU-T で規定された波長配列を使用することが望ましい。図 1 の (1) に CWDM の波長多重例を示す。CWDM の波長範囲を台形で、波長中心を中心の線で示す。また、(2) に DWDM の波長多重例を示す。DWDM の方が波長を有効に使用できることが分かる。

- (1) CWDM (粗い波長多重)



- (2) DWDM (密な波長多重)

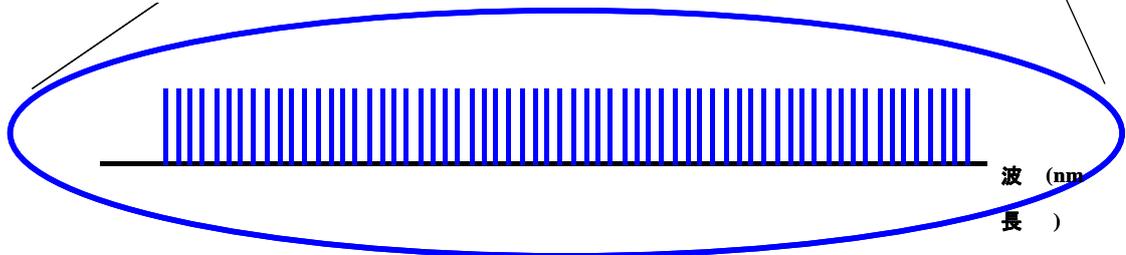


図 1 CWDM と DWDM

1.2 光の波長間隔（光の周波数間隔）

波長多重伝送をする光の波長間隔は、二つの方式で以下のように定義される。

- ① DWDM 伝送の場合

波長間隔は、 $193.1[\text{THz}]$ を中心に 12.5GHz 、 25.0GHz 、 50.0GHz 又は 100GHz 間隔の周波数で規定される。

- ② CWDM 伝送の場合

波長間隔は、波長を多重・分離するフィルタの中心波長で規定され、 20nm 間隔で規定される。

1.3 使用波長（周波数）

波長多重伝送をする波長（周波数）は、二つの方式で以下のように定義される。(ITU-T G.694.1)

(1) DWDM 伝送の場合

12.5GHz 間隔の波長多重を行う場合の光の周波数 f は、

$$f = 193.1 + n \times 0.0125 \text{ [THz]} \quad (\text{ただし、} n \text{ は整数})$$

25.0GHz 間隔の波長多重を行う場合の光の周波数 f は、

$$f = 193.1 + n \times 0.025 \text{ [THz]} \quad (\text{ただし、} n \text{ は整数})$$

50.0GHz 間隔の波長多重を行う場合の光の周波数 f は、

$$f = 193.1 + n \times 0.05 \text{ [THz]} \quad (\text{ただし、} n \text{ は整数})$$

100.0GHz 間隔の波長多重を行う場合の光の周波数 f は、

$$f = 193.1 + n \times 0.1 \text{ [THz]} \quad (\text{ただし、} n \text{ は整数})$$

※ 光の周波数を波長で言い換える場合には、以下の式で変換する。

$$\lambda = \frac{c}{f \times 10^3}$$

ただし、

λ [nm] : 波長

f [THz] : 周波数、[THz]=[10^{12} Hz]

c [m/s] : 光速(= 2.99792458×10^8)

※ 200GHz については、ITU-T G.692 を引用。

※ 表 1 に代表的な DWDM 伝送時の光周波数と参考波長を記載する。

表 1 ITU-T G.694.1 の光周波数と参考波長

参考波長 [nm]	光周波数[THz]	
	100GHz z 間隔	200GHz z 間隔※
1624.89	184.5	184.5
1624.01	184.6	
1623.13	184.7	184.7
1622.25	184.8	
1621.38	184.9	184.9
1620.50	185.0	
1619.62	185.1	185.1
1618.75	185.2	
1617.88	185.3	185.3
1617.00	185.4	
1616.13	185.5	185.5
1615.26	185.6	
1614.39	185.7	185.7
1613.52	185.8	
1612.65	185.9	185.9
1611.79	186.0	
1610.92	186.1	186.1
1610.06	186.2	
1609.19	186.3	186.3
1608.33	186.4	
1607.47	186.5	186.5
1606.60	186.6	
1605.74	186.7	186.7
1604.88	186.8	
1604.03	186.9	186.9
1603.17	187.0	
1602.31	187.1	187.1
1601.46	187.2	
1600.60	187.3	187.3
1599.75	187.4	
1598.89	187.5	187.5
1598.04	187.6	
1597.19	187.7	187.7
1596.34	187.8	
1595.49	187.9	187.9
1594.64	188.0	
1593.79	188.1	188.1
1592.95	188.2	
1592.10	188.3	188.3
1591.26	188.4	
1590.41	188.5	188.5
1589.57	188.6	
1588.73	188.7	188.7
1587.88	188.8	
1587.04	188.9	188.9
1586.20	189.0	
1585.36	189.1	189.1
1584.53	189.2	
1583.69	189.3	189.3
1582.85	189.4	
1582.02	189.5	189.5
1581.18	189.6	
1580.35	189.7	189.7
1579.52	189.8	
1578.69	189.9	189.9
1577.86	190.0	
1577.03	190.1	190.1
1576.20	190.2	

参考波長 [nm]	光周波数[THz]	
	100GHz z 間隔	200GHz z 間隔※
1575.37	190.3	190.3
1574.54	190.4	
1573.71	190.5	190.5
1572.89	190.6	
1572.06	190.7	190.7
1571.24	190.8	
1570.42	190.9	190.9
1569.59	191.0	
1568.77	191.1	191.1
1567.95	191.2	
1567.13	191.3	191.3
1566.31	191.4	
1565.50	191.5	191.5
1564.68	191.6	
1563.86	191.7	191.7
1563.05	191.8	
1562.23	191.9	191.9
1561.42	192.0	
1560.61	192.1	192.1
1559.79	192.2	
1558.98	192.3	192.3
1558.17	192.4	
1557.36	192.5	192.5
1556.55	192.6	
1555.75	192.7	192.7
1554.94	192.8	
1554.13	192.9	192.9
1553.33	193.0	
1552.52	193.1	193.1
1551.72	193.2	
1550.92	193.3	193.3
1550.12	193.4	
1549.32	193.5	193.5
1548.51	193.6	
1547.72	193.7	193.7
1546.92	193.8	
1546.12	193.9	193.9
1545.32	194.0	
1544.53	194.1	194.1
1543.73	194.2	
1542.94	194.3	194.3
1542.14	194.4	
1541.35	194.5	194.5
1540.56	194.6	
1539.77	194.7	194.7
1538.98	194.8	
1538.19	194.9	194.9
1537.40	195.0	
1536.61	195.1	195.1
1535.82	195.2	
1535.04	195.3	195.3
1534.25	195.4	
1533.47	195.5	195.5
1532.68	195.6	
1531.90	195.7	195.7
1531.12	195.8	
1530.33	195.9	195.9

(2) CWDM 伝送の場合

CWDM は一般に、波長多重・分離フィルタの中心周波数で規定する。表 2 にレーザーダイオードの公称波長と波長多重・分離フィルタの中心波長、伝送波長範囲を記載する。(ITU-T G.694.2) 温度が変化するとレーザーダイオードの出力波長は変化するが、使用温度範囲において波長は波長多重・分離フィルタの波長範囲内になければならない。

表 2 ITU-T G.694.2 の光周波数

レーザーダイオードの公称波長 [nm]	波長多重・分離 フィルタの中心波長 [nm]	波長多重・分離フィルタの 波長範囲 [nm]
(1530)	(1531)	(1524.5 ~ 1537.5)
1550	1551	1544.5 ~ 1557.5
1570	1571	1564.5 ~ 1577.5
1590	1591	1584.5 ~ 1597.5
1610	1611	1604.5 ~ 1617.5

※ 一般的に、CWDM 伝送に使われる波長は、周囲温度の変化に応じて波長が変化する光源が使われることが多いので伝送波長については規定されない。

2 波長多重伝送時の注意点

2.1 光ファイバの使用可能帯域

光ファイバケーブル中の光信号伝送時における損失の波長依存性を以下のグラフに示す。通常の光ファイバは、CWDM 伝送したときに伝送損失が著しく悪くなる波長(1370~1430nm など)があり、通常使えない。図 2 に示すように、これらの波長多重時の問題を改善するために伝送損失の波長依存性を均一化したファイバを使用することで、CWDM 伝送時にどの波長帯域も選択できるようになる。

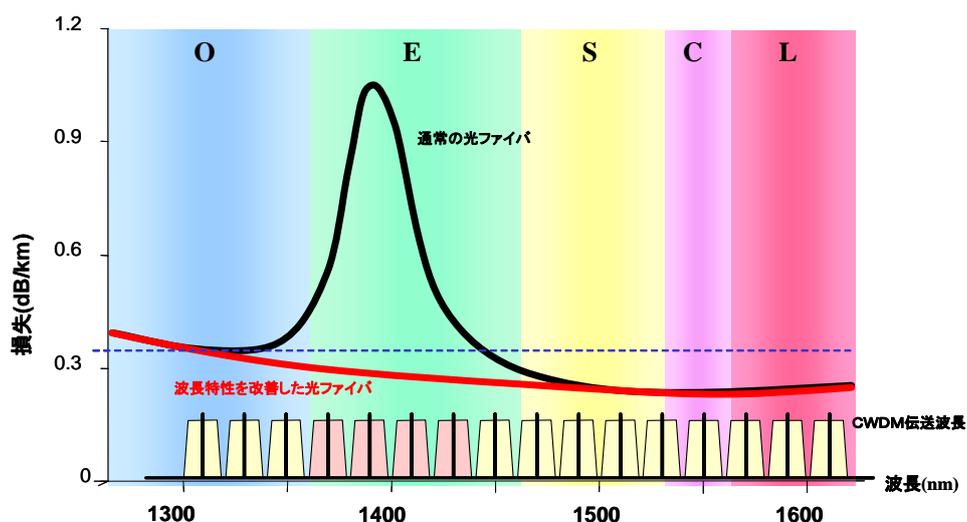


図 2 光ファイバの使用可能帯域

2.2 光ファイバアンプの使用可能帯域

光ファイバアンプは、増幅できる波長帯域によって種類が異なる。一般的に FTTH システムで使用される光増幅器は、EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) であり、C バンド帯域、L バンド帯域の光信号を増幅できる。

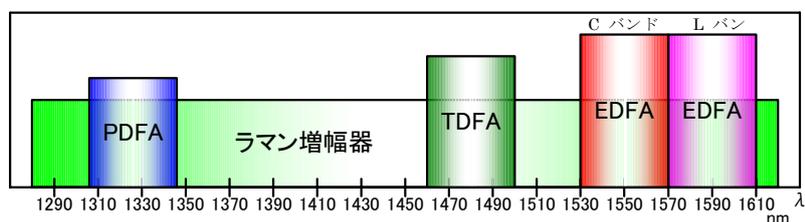


図 3 光ファイバアンプ(EDFA) の使用可能帯域

また、一般的な光増幅器（EDFA）における利得の波長特性を以下に示す。

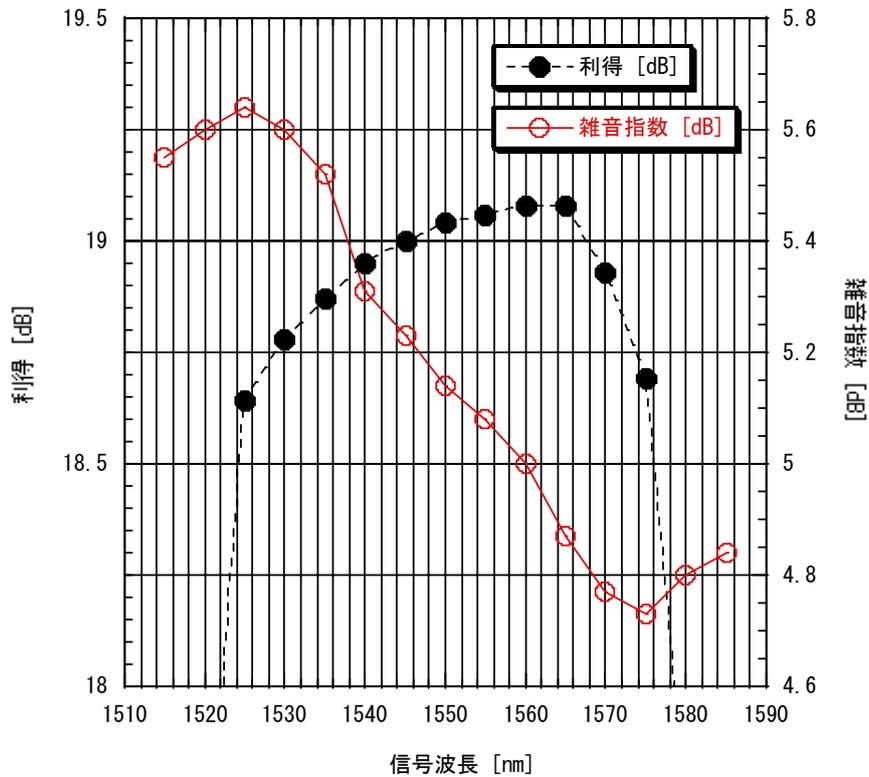


図 4 光増幅器(EDFA)の利得の波長特性例

2.3 光増幅器の AGC (Automatic Gain Control) 動作

光増幅器へ 2 波以上の光信号が入力される場合、一般的な光増幅器では、光信号の全パワーの出力が一定になるように出力レベルを自動的に変化させる。この場合、たとえば、2 波長で同電力の光信号を光増幅器に入力した場合、入力電力は 2 倍となり光信号 1 波長あたり 3dB 低く出力されるので注意が必要。通常は、光信号 1 波長あたりのレベルが一定になるような光増幅器を使用する、または、主信号に影響のないレベルで第 2 信号を入力する。

2.4 2波長間のクロストーク

異なる波長の光信号を同一の光ファイバで伝送した場合には、クロストークが起こる。
クロストークが生じる原因として以下がある。

(1) 線形クロストーク

線形クロストークは、波長分離フィルタにおいて、透過すべき波長帯域以外の信号が

十分に除去しきれないで、光受信器に混入し妨害波として生じるものである。

※ 電波信号を光信号に復調するとき、お互いの電波信号の周波数が異なる場合には、
クロストークが生じても妨害波にはならない。

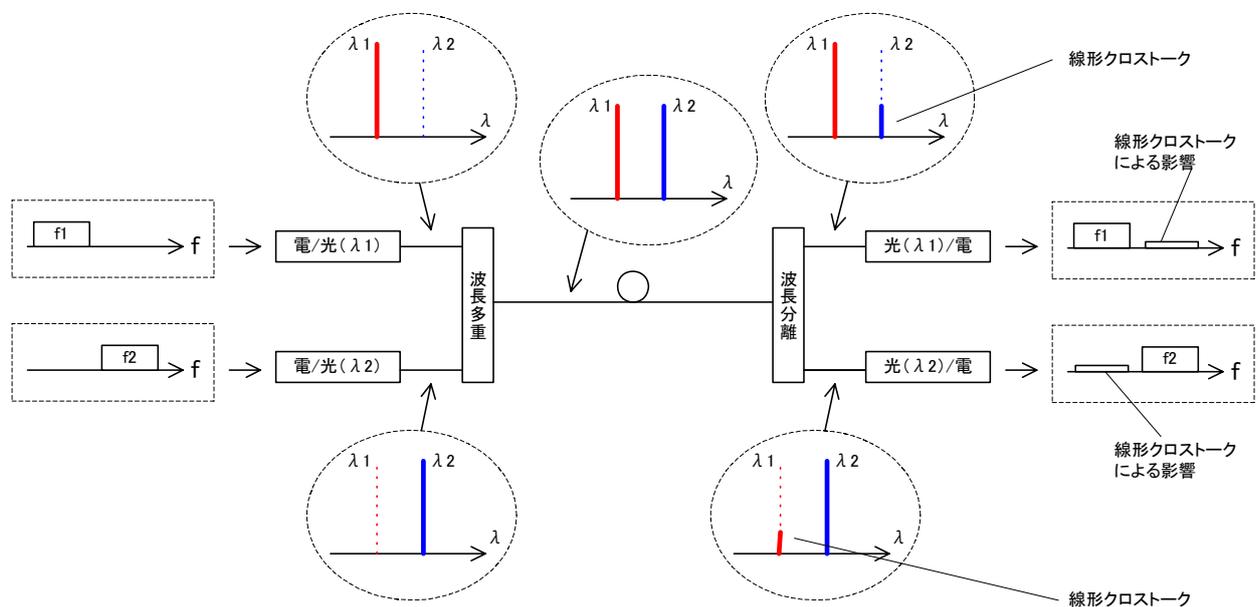


図5 2波長間の線形クロストーク

(2) 非線形クロストーク

非線形クロストークとして、ラマンクロストーク(Raman crosstalk)がある。ラマンクロストークは、波長間隔が 100nm 離れているときに最も生じやすく、光ファイバ内伝送中で生じ、波長分離フィルタでは除去できない。

※ 電波信号を光信号に復調するとき、お互いの電波信号の周波数が異なる場合には、
クロストークが生じても妨害波にはならない。

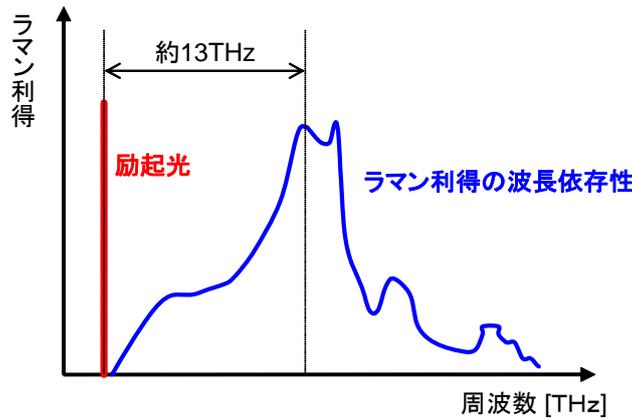


図 6 非線形クロストーク(ラマンクロストーク)の波長依存性

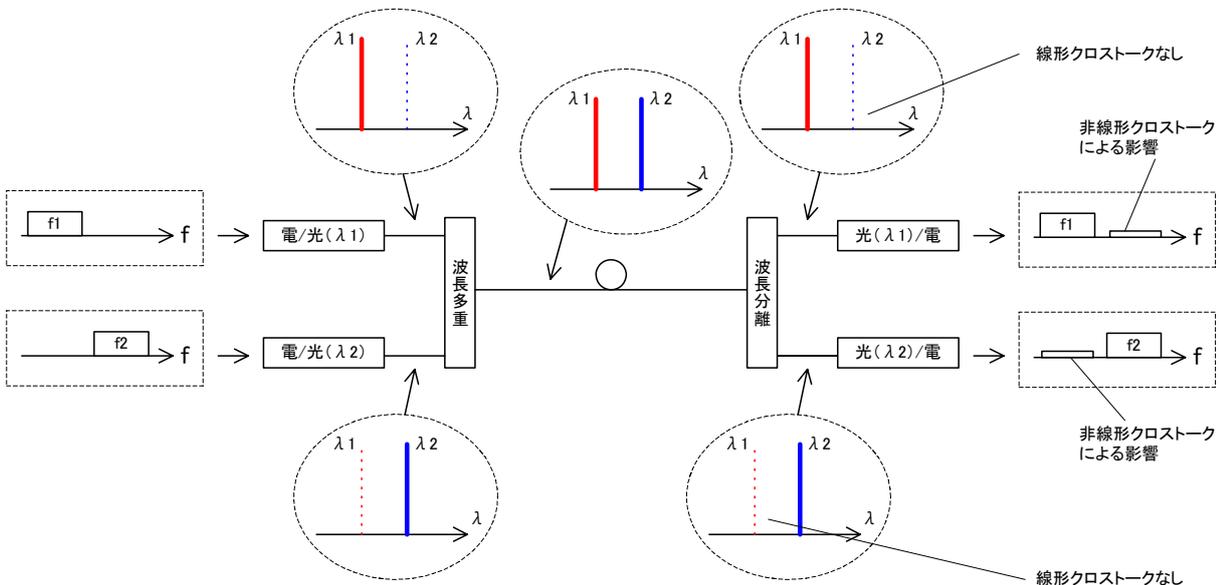
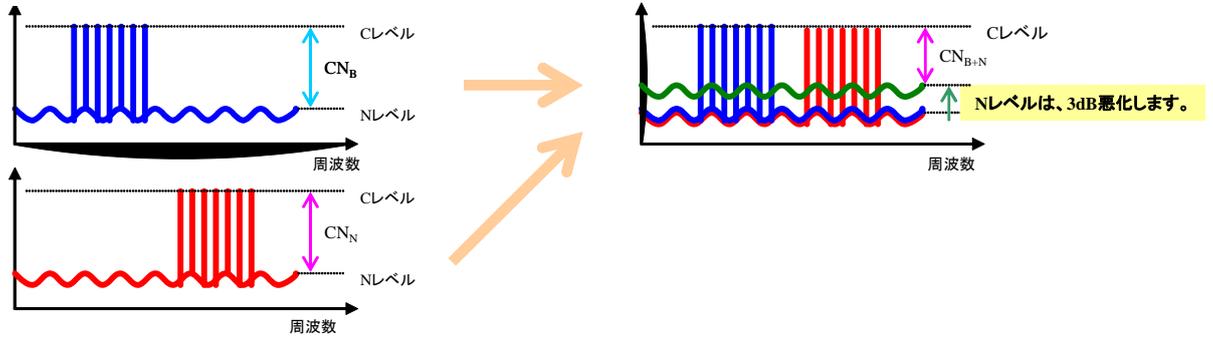


図 7 2 波長間の非線形クロストーク(ラマンクロストーク)

2.5 2波長以上の光信号を同一の光受信器で受信をする場合

同じ CN 比の光送信機を使う方式



異なる CN 比の光送信機を使う方式

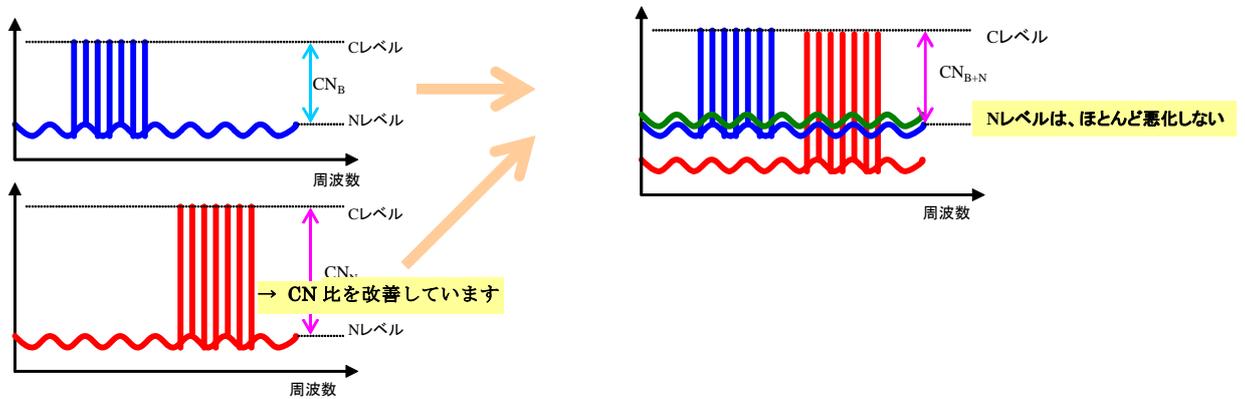


図 8 2波長以上の光信号を同一の光受信器で受信をする場合の雑音レベル

2.6 光ビート

2 波長以上の光信号を同一の光受信機で受信する場合、光信号の波長（周波数）差に応じた周波数を中心にして光ビート雑音と呼ばれる干渉成分が生じる。光ビート雑音の中心周波数は、

$$f_{beat} = \frac{c|\lambda_i - \lambda_{i+1}|}{\lambda_i \cdot \lambda_{i+1}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

$c=2.997942458 \times 10^8$ [m/s]:光速

以下に光ビート雑音の中心周波数と光信号で伝送する電波周波数の差(オフセット周波数)における RIN の劣化を示した実験結果を示す。たとえば、2.5GHz の電波信号を光で変調し(総合変調度: $m\sqrt{N}=30\%$ 時)、伝送する場合に $\text{RIN} = -140\text{dB/Hz}$ 以下を満足するためには、

$$f_{beat} \geq 25\text{GHz} \quad (1.2)$$

となり、0.2nm 以上、波長間隔を離せば十分であることが確認できる。通常、DWDM の 100GHz 間隔の波長多重であれば、約 0.8nm の波長間隔となり、これら光ビートについて考慮する必要はない。

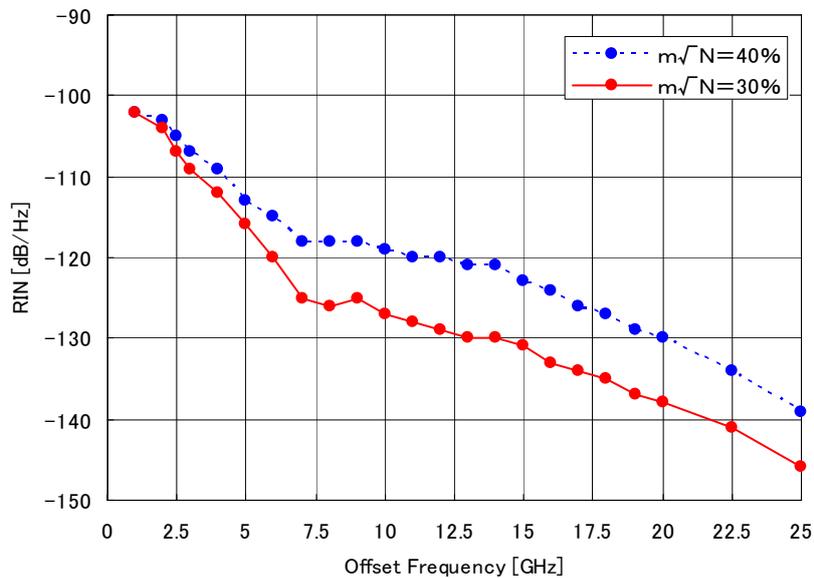


図9 光信号の波長（周波数）差と RIN の劣化量の実験結果