

分散シフトファイバ

藤倉電線(株) 光エレクトロニクス研究所 山内 良三

Dispersion shifted optical fiber

Ryozo Yamauchi
Fujikura, Ltd.

1. はじめに

通信用石英系光ファイバが商用化されて10数年が経過した。この間に光ファイバの性能も格段に進歩したが、なかでも、1988年頃からわが国で始まった分散シフトファイバの実用化は特に大きな意味を持つと思われる。すなわち、石英系ファイバの低損失化については、ほぼ理論限界に達したといわれて久しいが、必ずしも、最低損失波長である1.55 μm 帯で大容量伝送が可能であるという訳にはいかなかった。これは、光源のスペクトル広がりやレーザ変調時のチャージングに伴って、光ファイバ中の伝送波形の歪が増大する現象、すなわち、分散の影響が無視できないためであった。これを克服するために、ファイバの屈折率分布を制御して波長分散(色分散)を1.55 μm 帯で極小にした単一モードファイバ、すなわち、分散シフトファイバが検討されてきた。その歴史は、意外と古く1979年頃には、ステップ形屈折率分布の1.55 μm 分散シフトファイバの試作が行われている。しかし、伝送損失面で見ると、1.55 μm 帯での石英系ガラスの低損失性を十分に活かした分散シフトファイバはできず、損失0.4 dB/km前後のものしか報告されなかった。光ファイバの構造の検討が進み、低損失、低損失接続、波長分散制御性、ケーブル化でも損失増加を起こさない低い曲げ損失、など多くの要求をほぼ同時に満たす

ファイバが作製されるようになったのはここ数年のことである。

本報告では、この分散シフトファイバの現状および、広義の分散シフトファイバである分散フラットファイバ、等の開発状況について述べる。

2. 波長分散とファイバパラメータ

分散シフトファイバも単一モードファイバであり、その波長分散 σ はいくつかの近似も入れて、次式で与えられる¹⁾。

$$\sigma \doteq \frac{k}{c}(nk)'' - \frac{k}{\pi cn} \left(\frac{1}{kW^2} \right)' \quad (1)$$

ここで、 k は光の波数($k=2\pi/\lambda$)、 c は光速、 n はガラスの屈折率(コアガラスで代表)である。また、微分は k に関する微分を表す。 σ の単位としては、光源の単位のスペクトル広がり(nm)当り、単位ファイバ長(km)当りの光の遅延時間差として、ps/km/nmが用いられることが多い。式(1)の第1項はファイバガラスの屈折率の波長依存性のみに依存した量で、いわゆる材料分散を表している。石英系ガラスファイバでは、ドーパントの影響は比較的小さく、材料分散の組成による差は少ない。第2項はいわゆる導波路分散を表している。ここで、 W はモードの広がりを表すモードフィールド半径である。1.55 μm 分散シフトファイバを構成するには、波長1.55 μm における材

料分散値、およそ -20 ps/km/nm を逆符号の導波路分散をもって相殺しなければならない。導波路分散を大きくするには、式(1)より、モードフィールド半径 W を小さくし、しかも、 $1/kW^2$ が波数に対して大きく変化するような領域に設定することが必要である。このため、分散シフトファイバでは、コア・クラッド間の屈折率差は大きく、かつ、コア径は小さく設計する。これにより、モードフィールド径は小さくても、それ以上にコア内へのモードパワーの閉じこめを悪くすることにより、波長の変化に対してはモードパワーのコア外へのしみ出しが急激に増加するようなパラメータ設定を行っている。通常の単一モードファイバではコア中を伝搬する光の割合は80%程度であるのに対して、分散シフトファイバでは、50%以下になっていることが多い。Fig. 1に、分散シフトファイバにおける材料分散、導波路分散、全分散の関係を示す。なお、波長分散値の符号については、定義に従えば、Fig. 1に示すように、材料分散が波長に対して右下がり曲線となるのが正しいが、モードの群遅延時間の波長微分を簡便に波長分散として利用することも多く、この場合は逆符号になる。本文でも両者が出て来るが容赦されたい。

3. 分散シフトファイバへの要求項目

現実の分散シフトファイバには、相反する複数の要求項目があり、その妥協点を探る必要がある。

(1) 低損失：屈折率差を高くするため、コア

内のドーパント量は高くなり、ファイバのレーリー散乱損失が増加しがちである。

(2) 低い曲がり損失：かといって、屈折率差を少し低めにすると、コアへの光の閉じ込めが不十分になりがちで、曲がり損失を受け易い。これはファイバをケーブル化するときに問題を生じる。

(3) 大きなモードフィールド径：ファイバの接続時にモードフィールド径が大きい方が低い接続損失となる。望ましくは、 $8 \mu\text{m}$ 以上。

(4) 波長分散制御性：製造の観点から、最適パラメータ（コア径、屈折率差、屈折率分布）からのずれに対して、波長分散値の変化が少ないファイバ構造が望ましい。

(5) 高次の波長分散が小さい方がよい： β の三次微分、すなわち、零分散波長近傍の分散スロープが小さい方がより広い波長範囲で小さい波長分散値を得ることができる。

といった要求項目がある。

Fig. 2に示すように、これまでに様々なファイバ構造が提案された。しかし、(a)～(c)のように、いわゆる単峰形の屈折率分布では上記の要求を同時に満たすことは難しく、結局、実用と言えるのは(d)～(h)のタイプである。特に、(f)～(h)の階段型屈折率分布の分散シフトファイバ(Dual-Shape-Core Dispersion Shifted Fiber)は、わが国で開発されたものであり²⁾、わが国の主要ファイバ製造技術であるVAD法を用いて容易に作製することができる。

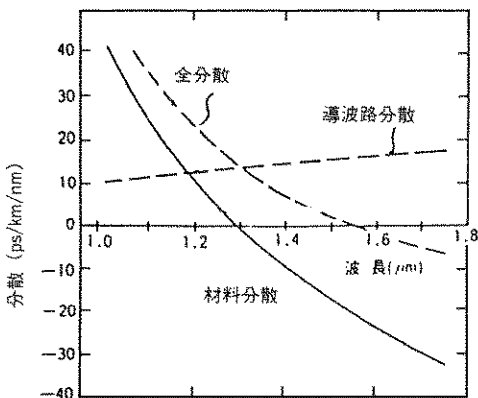


Fig. 1 分散シフトファイバの分散特性

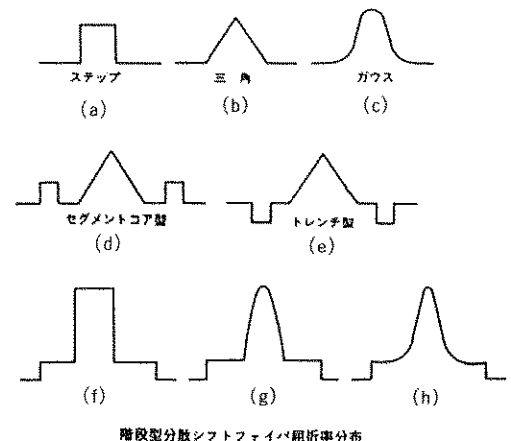


Fig. 2 分散シフトファイバの屈折率分布

4. 階段型屈折率分布ファイバ

ここでは、階段型分散シフトファイバの特性について述べる。

4.1 分散特性

階段型ファイバの分散特性を解析すると、興味深い性質があることがわかる。ここでは、簡単のため、Fig. 3 に示すような理想的な階段型の屈折率分布を考える。ファイバパラメータとして、 Δ_1 、 Δ_2 、中心部コア径 $2a$ 、階段部のコア径 $2b$ の四つがあるが、Fig. 4 ではこのうち Δ_1 、 Δ_2 を固定して、階段部のコア径 b に対する中心部のコア径 a の比を変化させてみた。なお、ガラスの組成は、コア部にはドーパントとしてゲルマニウムのみを含み、クラッド部は純粋な石英ガラスであるとした。Fig. 4 において、 $b/a=2$ と比率が小さいときには、コア径の変化に対して、波長 $1.5 \mu\text{m}$ における波長分散の変化は、非常に急峻であり、階段部の影響はほとんど現れていない。また、 $b/a=5$ と階段部を外側に大きく膨らました場合にも、波長分散の変化は急峻である。これら二つの場合には、中心部コア径、もしくは、階段部コア径のどちらかが波長分散を支配するため、単峰型の屈折率分布と類似の特性が現れていると考えられる。これに対して、その中間領域では、例えば、 $b/a=10/3$ のグラフが示すように、階段部コア半径が $2.5 \mu\text{m} \sim 7 \mu\text{m}$ と大きく変化しても $1.55 \mu\text{m}$ での波長分散値が $\pm 2 \text{ ps/km/nm}$ の範囲にある。このような

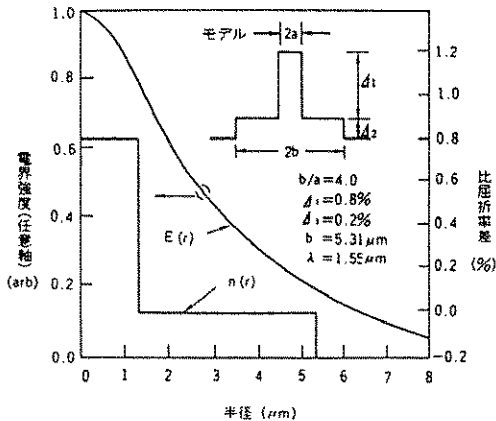


Fig. 3 解析モデルプロファイル

特性は、ファイバ作製上非常に都合がよい。すなわち、この結果は、一旦、適正な屈折率分布が形成されれば、ファイバ径の変化（ファイバ径とコア径は比例関係にある）に対して、波長分散がほとんど変化しないことを示している。

4.2 曲げ損失特性

ステップ型、三角型プロファイルなど、単峰型の屈折率分布では、曲げ損失を抑えて、かつ、ファイバ同志の接続で重要なモードフィールド径を大きくすることが困難であったが⁹⁾、階段型屈折率分布では、Fig. 5 に示すように、パラメータをうまく選ぶことにより、曲げ損失を低く抑えたままで、 $8 \mu\text{m}$ 程度の比較的大きなモードフィールド径を得ることができる^{4,5)}。ファイバをケーブル化したり、ケーブルを布設したりするときに伝送損失増加を受けずに済むファイバの許容曲げ損失のレベルは、経験的に、数 dB/m（ただし、 $20 \text{ mm}\phi$ の一様曲がりにおいて）であるが、モードフィールド径を $8 \mu\text{m}$ とすると、ステップ型ファイバでは 100 dB/m 近い損失となり、一般の使用には耐えられない。曲げ損失特性が等しいという条件で計算すると、ステップ型、三角型プロファイルでは約 $7 \mu\text{m}$ のモードフィールド径となるのに対して、階段型では、 $1 \mu\text{m}$ 改善されて、 $8 \mu\text{m}$ 程度となる。

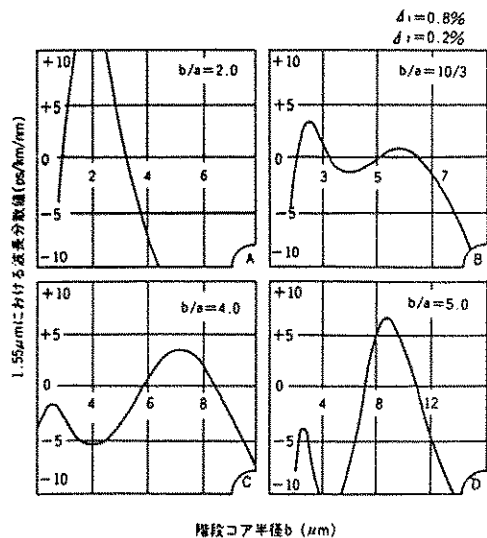


Fig. 4 階段型ファイバ分散特性

階段型屈折率分布では、プロフィールパラメータの数が多いため、伝送特性との関係はつかみにくい。Fig. 6はファイバの伝送特性とパラメータとの関係を一括して示したチャートである。多く

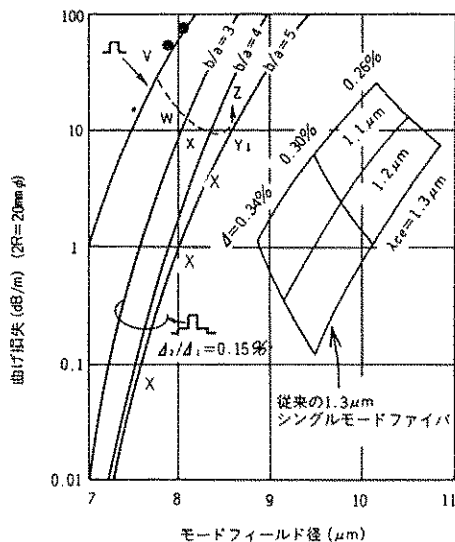


Fig. 5 b/a パラメータと曲げ損失特性
●×は実測値；●はステップ型，×は階段型。

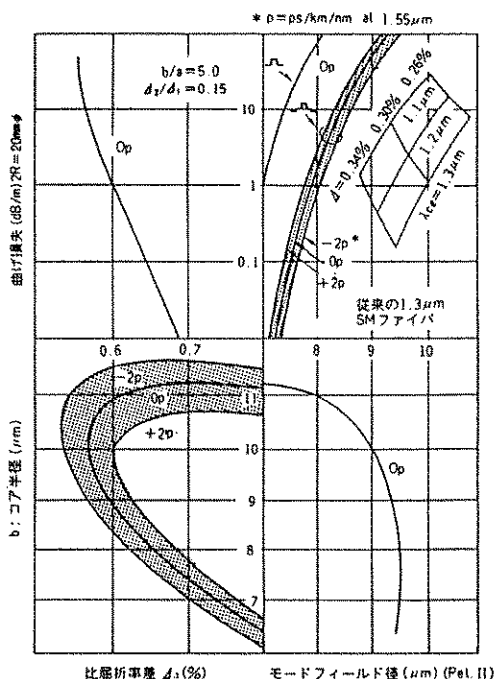


Fig. 6 階段型分散シフトファイバ伝送特性対応図

の特性を一覧できるように、第1象限では、モードフィールド径と曲げ損失、第2象限では曲げ損失と Δ_1 、第3象限では Δ_1 と階段部コア半径 b 、第4象限ではモードフィールド径と階段部コア半径の関係が示されている。第3象限において網掛けをした範囲は、 $1.55 \mu\text{m}$ での波長分散が $\pm 2 \text{ ps/km/nm}$ の範囲であり、例えば、 $b/a=5$ 、 $\Delta_2/\Delta_1=0.15$ の条件のもとでは、 $\Delta_1=0.57\%$ 付近に設定すると、コア径変動に対する分散制御が非常に良好になることがわかる。

4.3 VAD 法によるファイバの作製

上記の計算で用いた完全な階段型屈折率分布を形成するのは容易ではないが、階段型屈折率分布の特徴は、屈折率分布がかなり変形しても維持できる。ここでは、VAD 法に適合する屈折率分布として、Fig. 1(h)に示した中心部コアがガウス型のファイバについて述べる。Fig. 7は、同一のファイバ母材から異なる外径でファイバを線引したときの（コア径は外径に比例する）分散特性の変化を示している。波長分散値はコア径の20～30%の変化に対して停留値を持ち、ほとんど変化していないことがわかる。Fig. 8は波長分散特性である。波長分散のスロープ（波長分散の波長微分）は 0.08 ps/km/nm^2 程度の値をとる。計算は省略するが、コア径変化に対する波長分散の制御性がよいファイバほど、波長分散のスロープが大きくなる傾向がある。Fig. 9に伝送損失特性を示す。コア中のドーパントの量を減らし、コア・クラッド間の屈折率差を低くすれば、高いドーパント濃度に

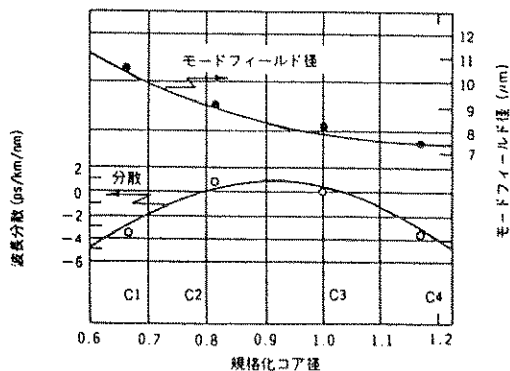


Fig. 7 階段型ファイバ分散制御性

伴うレーリ散乱損失の影響を減らすことができる。しかし、この場合には曲げ損失特性が悪く実際の使用には耐えられない。前述の多くの要求を同時に満たすような設計をした場合、標準的な伝送損失は0.20~0.21 dB/kmとなる。また、最低損失波長は1.57 μm 付近にあり、ここでは、1.55 μm よりも0.003 dB/km程度低い値となる。

5. 特殊な分散シフトファイバ

5.1 分散フラットファイバ

通常の分散シフトファイバが1.55 μm 帯の狭い範囲で低い波長分散値を得るファイバであるのに対して、分散フラットファイバは、より広い範囲で波長分散の低減をめざしたものである。分散フラットファイバとしては、(1)1.55 μm 付近で分散スロープがほとんど零となるようなもの⁹⁾、(2)1.3 μm ~1.55 μm の広い波長範囲で低い分

散値を得るように設計したものなどがあり、研究が進められている。分散をフラット化するには、理論上、Fig. 10(a)に示すように屈折率分布のコアの周囲に何らかの屈折率の落込み部が必要である⁷⁾。なお、分散フラットファイバでは、階段型分散シフトファイバに見られたようなコア径の変化に対して波長分散が停留値を取るような分散制御性の高い屈折率分布は見つかっていない。Fig. 10(b)は、上記(1)のタイプの分散フラットファイバの試作例である。

5.2 高分散ファイバ⁸⁾

ステップ型屈折率分布のファイバにおいて、大きな屈折率差を採用し波長分散を目一杯シフトさせると、Fig. 11に示すように零分散波長を1.8 μm 以上にシフトさせることができる。この結果、1.55 μm での波長分散値として50 ps/km/nmという高い値となる。高分散ファイバは、長距離フ

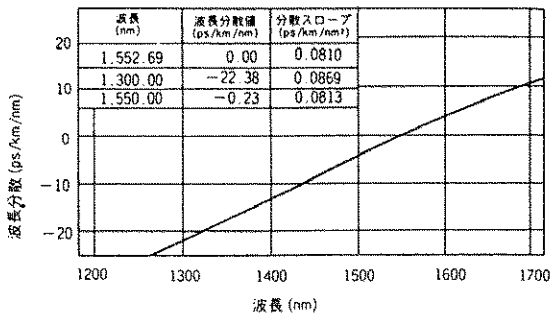
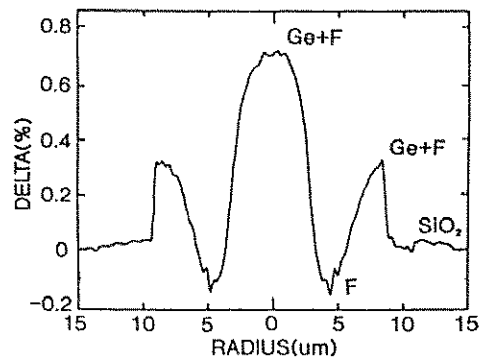


Fig. 8 階段型ファイバ波長分散特性



(a) 屈折率分布

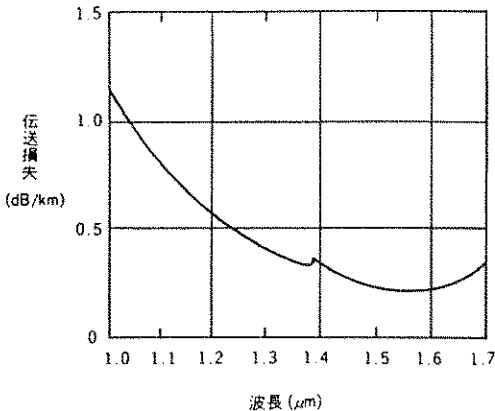


Fig. 9 階段型分散シフトファイバ損失波長特性

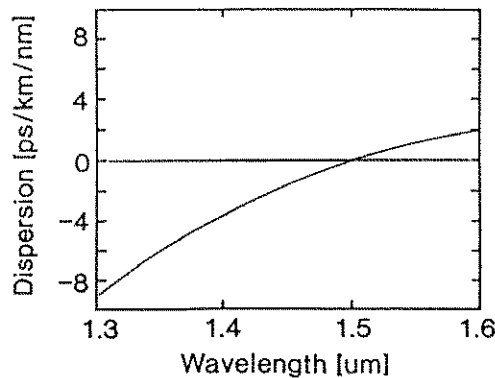


Fig. 10 波長分散スロープを低減したファイバ

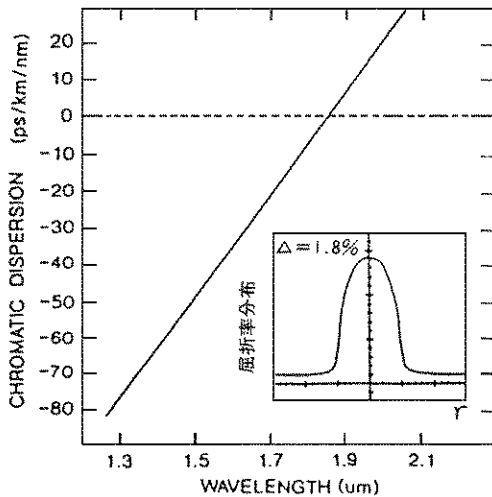


Fig. 11 高分散ファイバの分散特性

ファイバ伝送線を模擬するシミュレータとして使用したり、長距離伝送路の分散値を補正するのに使用することが出来る。

5.3 希土類添加分散シフトファイバ

希土類元素であるErをコアに添加したファイバを適当な波長の励起光で励起することにより、1.55 μm 帯で高い増幅度を有するファイバ型の光直接増幅器を構成することができる。励起光波長としては1.48 μm 、または、0.98 μm が有望である。このEr添加ファイバを分散シフトファイバ構造と組み合わせることにより、波長分散を制御した無損失線路を実現することができる。Fig. 12は、10 kmのEr添加分散シフトファイバの例であるが、ファイバ全長で光増幅を行わせるために、全長にわたって0.1 ppm オーダの低濃度のErイオンがコアに添加されている⁹⁾。また、このタイプのファイバは将来のソリトン伝送用ファイバとしての使用も期待される¹⁰⁾。

6. あとがき

分散シフトファイバの開発の現状を説明した。階段型屈折率分布の分散シフトファイバは、陸上および、近海の実用海底線では、既に実用伝送路として使用されている。今後は、大容量長距離海底ケーブルへの適用が期待される。また、分散シフト

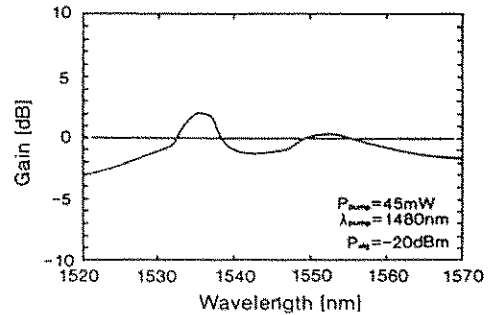


Fig. 12 エルビウム添加分散シフトファイバの利得波長特性
ファイバ長 10 km, ポンプ光 45 mW で無損失線路が達成されている。

ファイバの変形として、分散フラットファイバ、高分散ファイバ、希土類添加分布型増幅器など機能性の高いファイバへの展開も期待される。

参考文献

- 1) K. Petermann, Electron. Lett. Vol. 19, p. 712-714 (1983).
- 2) N. Kuwaki et al., Electron. Lett., Vol. 21, 1186 (1985).
- 3) R. Yamauchi et al., J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, p. 997-1004 (1986).
- 4) T. Abiru et al., Conf. on Optical Fiber Commun. (OFC'87) TuA4 (1987).
- 5) 西出, 他, 信学技報, OQE 87-4 (1987).
- 6) M. Ohashi, et al., 14th European Conf. on Optical Commun. (ECOC'89), p. 445-448 (1989).
- 7) S. Kawakami et al., IEEE J. Quantum Electron., QE-10, p. 879-887 (1974).
- 8) 西出, 他: 1989年電子情報通信学会春季全国大会, C-575.
- 9) D. Tanaka et al., Simpo. on Optical Amplifiers, Monterey, Ca., TuB7 (1990).
- 10) M. Nakazawa et al., ibid. TuA7.

〔筆者紹介〕



山内 良三（やまうち りょうぞう）

昭和 47 年 名古屋大学電気工学科卒

昭和 49 年 同修士課程終了，同年藤倉電線に入社。以来，光ファイバ，光ケーブル，ファイバ応用光部品の研究開発に従事，現在に至る，工学博士

〔連絡先〕

〒 285 千葉県佐倉市六崎 1440

藤倉電線株式会社光エレクトロニクス研究所光通信研究室

TEL 0434-84-2111