

退官記念講演

光エレクトロニクス
—来世紀への展望—
Optoelectronics
—Perspective for Coming Century—

藤 井 陽 一*

Yoichi FUJII

最近, 光工学は, 光ファイバの応用を中心として, 著しい進歩を示しております.

来るべき21世紀は, 光の世紀と言われます. 光エレクトロニクス技術は, 来世紀に向けて, ますます社会的に不可欠な技術要素になっていくと思われま.

1. 始めに: 藤井研究室の研究の概要と光工学応用の将来

藤井研究室は, 1959年から現在に至るまで, 光工学について, その広い分野において基礎的な研究開発を行って参りました.

藤井研究室では, 光工学について広範な研究を行って参りました. 中でも, 最近は下記のテーマについて重点的に研究を行って参りました.

光ファイバ 光ファイバ伝搬特性, 光ファイバソリトン
光導波路 光導波路の解析, 光デバイス, 光導波路材料の特性測定 光センサ 電流電圧センサ, 分布型センサ
レーザ顕微鏡 光ヘテロダイン顕微鏡, 正形像伝送
ユーティリティソフト パソコン用の各種ソフトの開発

最近, 光工学は, 光ファイバの応用を中心として, 著しい進歩を示しております.

光を伝送する媒体としては, 光ファイバ, 光導波路, レンズ列などがあるわけですが,

低損失 空気よりも透明

小断面 コア部では数 μ m

耐振動性 通常程度の振動には耐えられる.

可撓性 電線よりは劣る.

低コスト 大量生産に適している.

という点で, 光ファイバが圧倒的な優位にあり, 光応用の大きな契機になっております.

光ファイバ応用工学, という立場から見ると, 現在の光エレクトロニクス分野における技術開発は,

光ファイバの開発, とくに, 新種・特殊ファイバの開発
光ファイバの製造技術の開発 とくに実際的な製造技術の開発
光ファイバの光通信への応用技術の開発 とくに大容量通信媒体としての応用
光ソリトニクス, すなわち, 光ファイバの非線形の応用技術
光ファイバ応用部品開発, グレーティング, スイッチなど
光ファイバ関連の部品, たとえば, スイッチ, アイソレータ等の研究

*東京大学名誉教授

光ファイバの接続技術, たとえばコネクタ, 融着技術の開発
 光ファイバデバイスの研究, とくに, フィルタ, 光ファイバグレーティングの研究
 光導波路関連の研究, とくに光導波路デバイスの研究
 光センサの研究, とくに光ファイバを利用したセンサの研究
 光ファイバのイメージ等の新しい応用の開発研究

というところがポイントになっております.

2. 波動論と相対論

光工学の基礎との関連において, 波動論と相対論について研究して参りました.

波動論については, 擬波という概念の重要性を指摘しました. 擬波という概念は, 空間的擬波と時間的擬波とがあり, この概念を用いると, いろいろな波動増幅デバイス, たとえば, 電子ビーム増幅デバイス, あるいは, 非可逆デバイスの動作を理解することができます.

波動的観点から見ると, 電磁波, 量子波は, 媒質に依存しない, 非媒体波というカテゴリーのものだ, という概念が役に立つことがわかりました.

3. 光導波路の研究

光導波路デバイスは, 光を導波伝送する, というより, 高度機能を持たせることができるという意味で, 光工学の上で重要と考えられております.

現在, 光導波路デバイスに関する研究においては,

材料自身の検討損失が少ない, 導波路を作り易い, 効果の強い材料

材料の非線形性の応用デバイスシステム 非線形を応用するシステムの検討

光スイッチ, 光変調器等のデバイス

光フィルタ, 波長多重デバイス

光インターコネクション用デバイスの検討 とくにボード内の伝送媒体の研究

等が主要研究テーマになっております.

我々の研究室においても, 光導波路について研究を行って参りました.

光導波路材料のパラメータ測定 とくに, 電気光学定数, 光損傷感度 結晶材料の検討 KTP, ニオブ酸リチウム, タンタル酸リチウム

同様に, 光導波路デバイスについて開発, 研究を行って参りました.

光変調器, 光スイッチデバイスとしては, 次のようなデバイスを作りました.

書き込み形スイッチ BSOの光電効果を利用したもの

超高速変調器 ジグザグ型の位相整合を利用したもの

デジタルスイッチ モードパターンの変化を利用したもの

そのほかです.

4. 光 セ ン サ

光を応用したセンサは, 広い可能性が 있습니다. センサ万別と言って, センサは目的に応じていろいろな形があることが重要なポイントです. 光センサの主要なポイントは,

非接触性 光ですので, とくに, 機械的, 電氣的な接触がない.

耐振動性 しかし、光の最大の欠陥として、振動について注意する必要があります。

現在は、光センサは、ほとんど、光ファイバを応用したセンサになっております。
光ファイバをセンサに応用するときは、どういうところにファイバを利用するか、ということを考える必要があります。

センサ本体にファイバを使用 ファイバの効果、非線形効果を利用します。
センサを含む光回路にファイバを利用 ファイバカップラ等の素子を用います。
データ伝送のために光ファイバを利用 普通の光通信と同じです。

という可能性があります。光ファイバセンサの特徴は、

一点型 普通のセンサ
多点型 1本のファイバに多数のセンシングエレメントを繋ぎます。
分布型 ファイバ自身がセンシングエレメントになっています。

という風に、ファイバが長いという性質を積極的に利用したセンサができるというところにあります。

藤井研究室においても、光センサについて古くから研究を行って参りました。

電流電圧センサ 鉛ガラス大電流センサ、ファイバセンサ、電力センサ
磁歪形センサ 微弱磁界センサ
干渉形位置センサ ナノメートル変位センサ
多点形温度センサ ファイバ共振器型多点温度センサ

5. イメージ工学の研究

レーザー光は、従来のインコヒーレント光を使っていたイメージ工学に対して、新しい可能性を提供するものです。レーザー光、コヒーレンスの良い光源をイメージ工学に使用するときのポイントは、

干渉を応用したイメージ、たとえば、ホログラフィー
方向性を応用したイメージ、たとえば、読みとり、表示デバイス
強いエネルギー密度を利用したデバイス、たとえば、画像記録デバイス

で、これらのメリットを生かした形のレーザーイメージシステムが開発されております。

われわれの研究室においても、レーザー光を応用したイメージ工学に関する研究を行って参りました。

光ヘテロダインレーザー顕微鏡 光ヘテロダインの結像作用を利用したもの
レンズ列画像伝送 正形像の伝送
60度鏡形3次元表示 3次元テレビ
パレット関連ユーティリティ パレットイメージの高速切り替えユーティリティ

6. 光ファイバ

光ファイバ技術は、光エレクトロニクスの基本的技術として、最近めざましい進歩を遂げております。光ファイバ技術の進歩は、

ファイバの伝送特性 とくに分散特性
 非線形性に関する基礎的技術 光カー効果, ラマン効果, ブリュアン効果
 ファイバ製造技術 量産性, 信頼性, 品質の向上
 特殊, 新種ファイバの製造 センサファイバ, 定偏波ファイバ, デバイス用ファイバ
 ファイバケーブル技術 海底ケーブル, 電力ケーブルとの共存, 高張力ケーブル
 ファイバの接続, 関連部品の技術 融着, 接着技術, コネクタ技術

がポイントになっています。

当研究室において行った光ファイバに関する研究は, 次のテーマに関するものです。

単一偏波光ファイバの研究:

とくに楕円断面ファイバについて, 電磁界の解析, 偏波特性の解析を行いました。

光ファイバの捻りの研究:

光ファイバが捻られているときの偏波の伝搬について, 基本的な立場から, 研究を行いました。

7. ソリトンとソリトニクス

現在, 光ファイバの非線形性を利用したソリトンとこれを拡張した技術体系としてのソリトニクスの研究が非常に盛んになっております。

光ファイバの非線形性とは, この場合, 光強度に比例して, 材料の屈折率が増加する, という光カー効果です。この効果と, 光ファイバの分散とが平衡状態になった状態で一定の波形を有する光ソリトンというパルスがその形を変えずに伝搬するという特徴があります。

光ファイバ非線形性の応用であるソリトンの研究は, 1971年以来, 研究所, 大学において精力的に進められております。光非線形性は, とくに, 100 Gbit/s 以上の, 大容量の光通信システムにおいて, 不可欠な要素になると考えられております。

ソリトンの研究は, 解析的な研究から, 実用的な観点からの研究と, 非常に幅広い研究が行われております。現在の研究のポイントは,

ソリトンファミリー ソリトンの理論的な問題点の検討, 新しいソリトンの開発

ソリトニクス応用 光通信を中心として, ソリトン応用各種技術の開発

我々の研究室においては, ソリトニクス技術の基礎的な研究, ソリトンファミリーと称している, 新しいソリトンの仲間の開発を行って参りました。主な研究項目を挙げると,

エッジダイナミクス 光パルスのエッジが非線形型伝搬において基本的要素である。

非線形光パルス分離 上記を応用して, 複数の光パルスの間隔を拡げ復元するシステム

空間的不確定性 有限な距離で相互作用する場合, 長さ方向の不確定性が生ずる

非線形光ファイバカップラによる光スイッチ 光パルス自身のパワーによるスイッチ光論理回路

上記の変形で, AND・OR 論理の機能を持ったシステム結合ソリトン 結合した複数の非線形ファイバで同時に一定パルスが生ずる。

3相ソリトン 上記の特例として, 120度ずつ位相がずれる場合。

シャドーソリトン, ドメインソリトン, ダークソリトン等

ペアドソリトン伝送 2本のファイバによるダイバーシティ伝送

位相共役ソリトン伝送 位相共役によるスペクトル反転を利用したソリトン伝搬

非長谷川ソリトン 通常の長谷川方程式以外の方程式によるソリトン
 超ソリトン 上記の一種で、分散特性をより広い周波数帯で近似したときの解。
 ダイナミックソリトン ファイバの減衰と増幅を繰り返したソリトン伝搬システム
 光ファイバ分散補償 普通のファイバの分散を、負分散ファイバで補償する。

また、上記のほかに、光センサに対するソリトンの応用についても研究しています。

ソリトンOTDR 光ソリトンパルスの反射波の検出とその応用

8. 光ファイバ通信の進歩

光ファイバ通信の最近の進歩は、誠にめざましいものがあります。光ファイバ通信は、量的な拡大、ネットワークの広がりと共に、その質的な改良、すなわち、大容量化、高信頼化がポイントになっております。

光ファイバ通信の大容量化 テラビット/秒の超高速性
 光システムの高信頼化 25年以上の耐用年
 光ファイバの高品質化 10^{-10} 以下の符号誤り率
 光ファイバの高度利用 マルチメディア、インターネットへの応用

これを実現するための要素技術として、

光ファイバ分散と分散補償 光ファイバの分散の制御による広帯域化
 光ファイバ非線形性の影響 ソリトニクス技術 ラマン効果等の応用
 光パルスのフィルタ、同期技術 光ファイバソリトンの制御
 高速パルス光源 Tb/s 級 supercontinuum の応用
 光ファイバ増幅器 増幅帯域の広帯域化、他波長への応用
 波長多重技術の開発 波長多重光によるファイバの高度利用

が主要な研究課題となっています。

光ファイバ通信の最近の進歩は、極めてめざましいものがあります。現在、ほとんどの幹線の通信路は、光ファイバによるようになっております。また、LAN等、広帯域を必要とする、より小さいネットにおいても、光ファイバ通信システムは不可欠の要素になっています。今後の課題は、家庭等の、より低速の端末に対する、いわゆる、アクセス網に対する光ファイバの適用、良く言われる、FTTH (fiber to the home) 技術の開発です。

このような光ファイバ通信の進歩には、要素技術としての、広帯域通信技術の開発が基盤となっています。この技術は、広帯域、高速の光デバイスの開発、光ファイバの伝送特性を拡張したソリトニクスのような新しい伝送技術、また波長多重技術のような伝送技術の高度化です。更に、これらを支えるレーザ、光源の技術、関連する測定技術などの進歩があります。

また、ネットワークに対しても、海底光ファイバケーブルを始め、各種のネットワークに適合した、光通信システムの開発が進められて、かなりのものは既に不可欠の要素技術として利用されるようになっております。

来世紀には、現在のトップデータである1本のファイバ当たり1テラビット/秒の伝送が実用の域に入ると同時に、更にこの技術を進めて、10テラビット/秒の伝送が可能になることが期待されます。また、各端末においても、数百メガビット/秒の伝送のネットワークが実際に利用されるようになる、ということが期待されます。

来世紀は、このような意味での、光伝送による広帯域・超高速情報ネットワークの世紀である

と考えられます。

このような、来るべき超高速情報社会において、この広帯域伝送システムが、いかなる社会的意義を持つのか、という点は、十分に考える必要があります。

このように、光ファイバ通信システムの進歩と共に大容量通信が実用的なレベル、すなわち、ある程度のコストで利用できる、という時代になって来ることが考えられます。しかし、これを利用する社会のほうで、そのメディアとしての利用方法が従来と同じ形態であって、単にそれを広帯域大容量にして利用する、という形態に留まり、有効な利用方法を考えないと、効率の悪い、社会的に無意味な情報が溢れることになります。

この点は、とくに、画像情報の場合に起こります。

一般に、通信のコストは、その情報の形態の如何にかかわらず、1ビット当たりいくらか、ということになります。このコスト一定性は、とくに通信のデジタル化が進めば進むほど、この傾向が強まることになります。つまり、アナログ通信のように、通信形態によって最低コストの伝送システムを選択して、コストを低減する、ということができないからです。

しかし、一方、伝送された情報の社会的重要性は、ビット当たりではありません。このことは、とくに、画像情報に対して顕著です。つまり、画像情報は、一般に非常に多くのビット数を含みますが、それによって伝達される情報はビット数に比例して増えては行かず、従って、社会が支払うコストのほうもビット当たりで増加することはありません。この点は、動画画像に対して更に顕著になります。

このことは、広帯域・超高速のネットワークを作る際での、大きな障害になっています。つまり、高速化すればするほど、コストの低減を要求されるからです。

しかし、この点は、ユーザ側にも、超高速ネットワークの有効な活用、という、大きな課題を提示しているもの、と考えられます。

9. ユーティリティソフト

パソコン用のユーティリティソフトの開発について進めて参りました。
基本的で使いやすいユーティリティソフトの開発を行っております。

ファイルマネージャ環境 ファイルマネージャを基本とする動作システムです。

ごみソフト ソフトに対するcriticismの開発です。

ユーティリティソフト開発 上記に基づくソフトの開発です。

10. 結 論

上記の結論です。

光エレクトロニクス技術は、来世紀に向けて、ますます社会的に不可欠な技術要素になっていく、ということは、間違いがないと思われれます。

光エレクトロニクスの将来像を描くことは、現段階では、比較的容易です。つまり、現在の開発の方向が定まり、それぞれの要素技術の開発の方向も定まっているからです。しかし、その進歩が、予想を越えて進んでしまう、という驚きを感じることは起こるかもしれません。

来るべき21世紀は、光の世紀と言われます。それは社会の全般にわたって、光技術が浸透して行き、その基本的な要素となることが予想されるからです。しかし、光技術自身は万能ではなく、それにも、基本的な限界があることに注意するべきです。

光技術の場合も、基礎は常に最先端である、ということは真理でなければならないと思います。

末筆ですが、長年勤務させて頂き、御指導、御協力を賜った生産技術研究所の各位に深い謝意を表したいと思います。

(1996年9月30日受理)