


■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 保立 和夫

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Kazuo Hotate

学術俯瞰講義 2012

光の科学－未来を照らす究極の技術とアイデア

2012年11月1日、8日

光を導き、活用する



I. 光ファイバの物理と応用

II. 痛みの分かる材料・構造の為の光ファイバ神経網

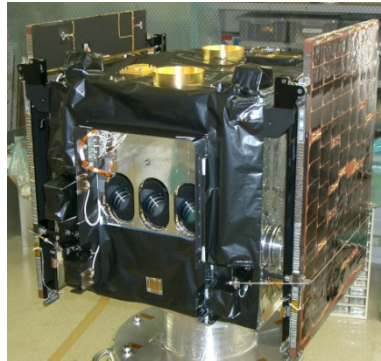
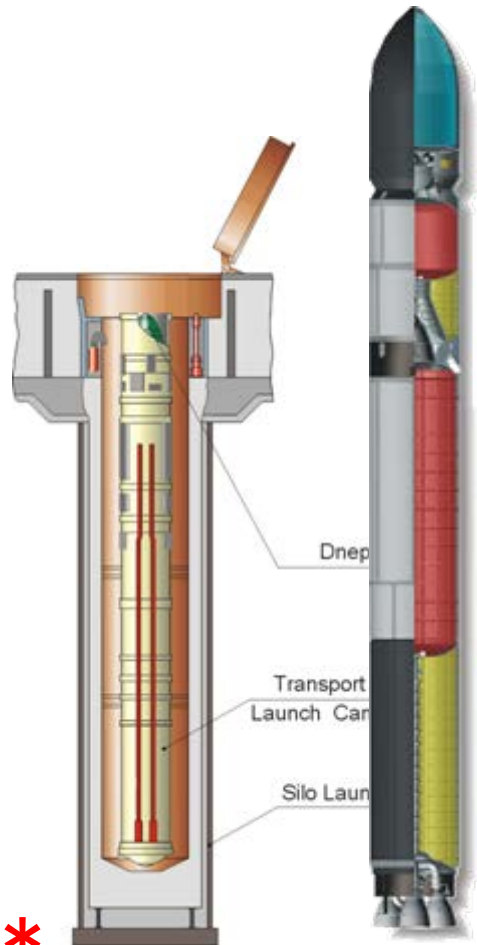
東京大学 工学部 電気電子工学科

工学系研究科 電気系工学専攻

保立和夫

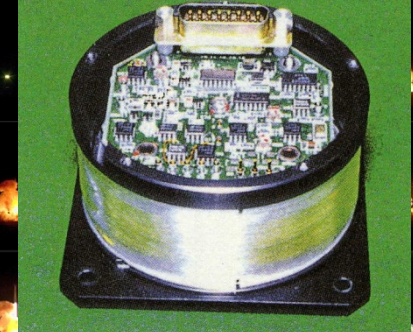
ドニエプルロケットによる人工衛星「れいめい」 の打ち上げ: JAXA宇宙研 (大学院電気系工学専攻)

● Launched From Under-Ground Silo



「れいめい」

Launched on
2005/8/23!

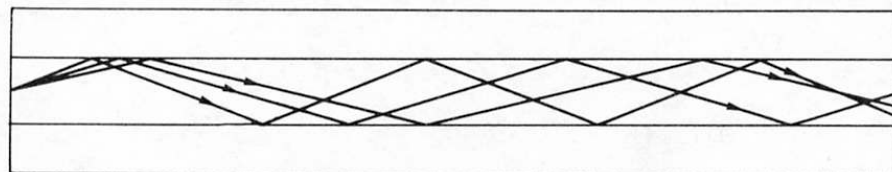


* 光ファイバジャイロ

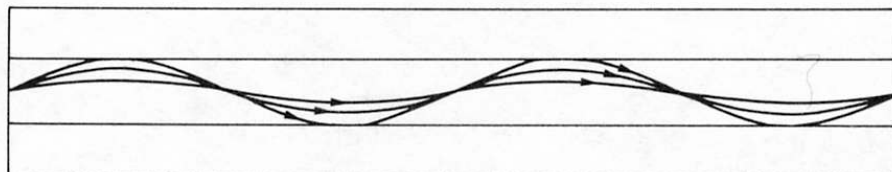
光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプト
ロニクス社、1998年
p.74、図4「光ファイバジャイロの内部の様子」(日
本航空電子工業提供)

*

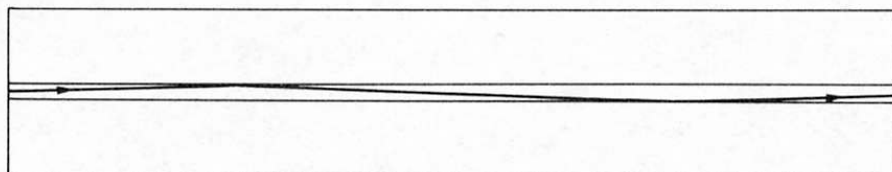
光ファイバ: 光を遠くまで送る仕組み



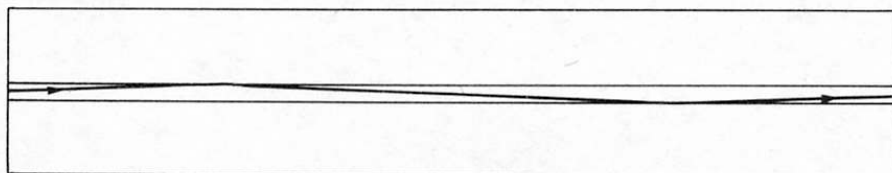
(a) ステップ形多モード光ファイバ



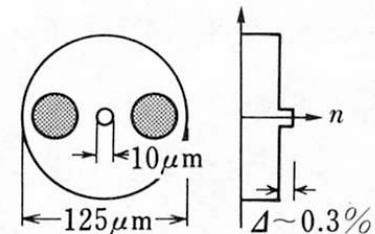
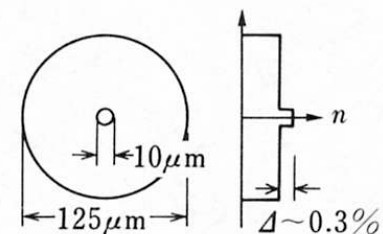
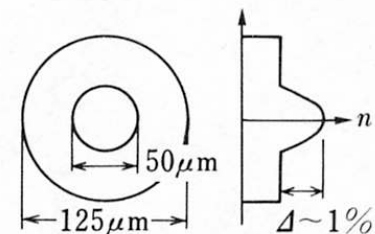
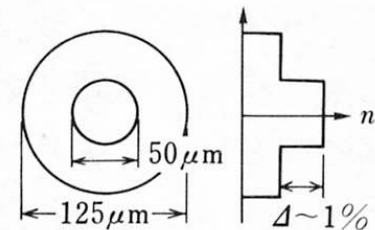
(b) グレーデッド形多モード光ファイバ



(c) 単一モード光ファイバ



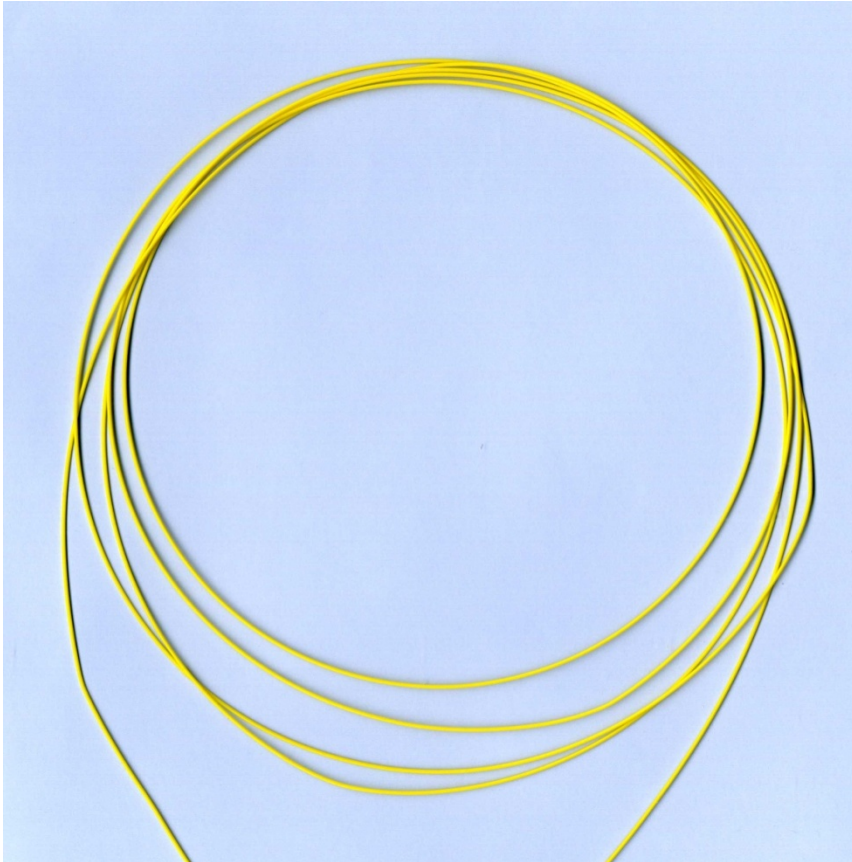
(d) 複屈折ファイバ



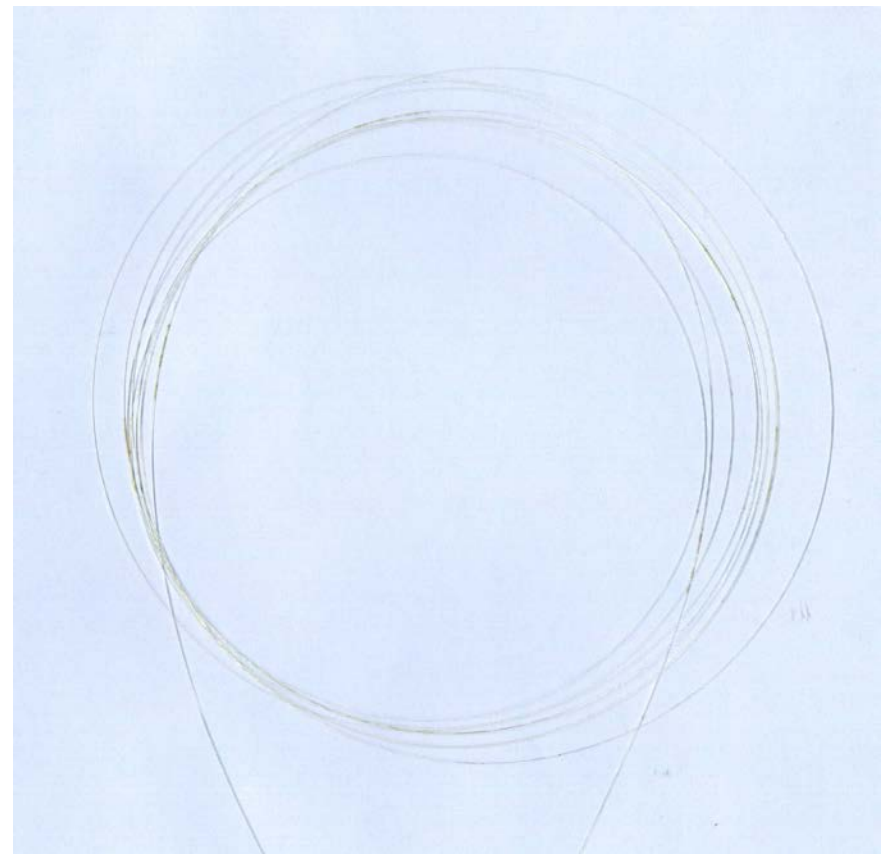
全反射 !!

* 大越孝敬編『光ファイバセンサ』オーム社、1986年、p.19、図2・3

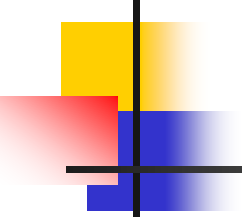
光ファイバ



光ファイバ芯線
(ビニール被覆)



光ファイバ素線
(ナイロン被覆)



2009年ノーベル賞

2009年 ノーベル物理学賞受賞：
チャールズ カオ 博士（英国にて研究）

- * 1966年1月： 純粋なガラスで光ファイバを作れば、100km以上離れていても、光を伝搬させ得る、と計算により予見。
- * 光ファイバの研究が世界的に開始される。
- * 1970年： 1km伝搬後の光強度として、1%が残る。
- * 現 在： 1km伝搬後の光強度として、95%残る。

保立 坊やは...

- ・ラジオを直すと言っては壊していた。
- ・カメラを直すと言っては壊していた。
- ・プラモデルをすごく沢山作った。
- ・HOゲージをやっていた。
- ・好きな科目は「図画工作」
- ・ラジコンの飛行機、船、自動車、...
をやっていた。
- ・小学校卒業文集に：
「僕は大きくなったら模型屋のオヤジになりたい。そのためには技術に詳しくならないといけないので、大学に行ってエンジニアリングをやる。」
- ・飛行機の機体を作るか、送受信機を作りたい。





保立少年は…その後

- 1964年 東京都新宿区立牛込第2中学校入学： 生徒会長を務める
・好きな科目は「技術家庭」
- 1967年 東京都立戸山高等学校入学： 小宮山 宏 前総長も同窓
- 1970年 東京大学理科I類入学
- 1972年 進学振分け(当時は、1回の変更ができた。)
最初： 航空工学科を志望
変更： 電子工学科を志望。 そして、電子工学科へ進学
- 1972年 電子回路マニアに出会う： 疑問「これで良かったのか？」
・電気磁気学、回路理論、量子電子工学、半導体物性論、…
「工学は学問なのだ！！」
・疑問は解けた：「これで良いのだ！！」
「学問としてのもの作りをやろう！！！」
- 1973年 電磁波で卒論をやりたい： 結局「フォトニクス」(ホログラフィ)
- 1974年 大学院：「光ファイバとの出会い」(光ファイバ自体を研究)
- 1979年 東大に任官： 宇宙航空研究所(現在JAXA宇宙研) 講師
「宇宙航空用のフォトニクス技術の研究をスタート」

光ファイバ母材 と 光ファイバケーブル



光ファイバ母材：プリフォーム

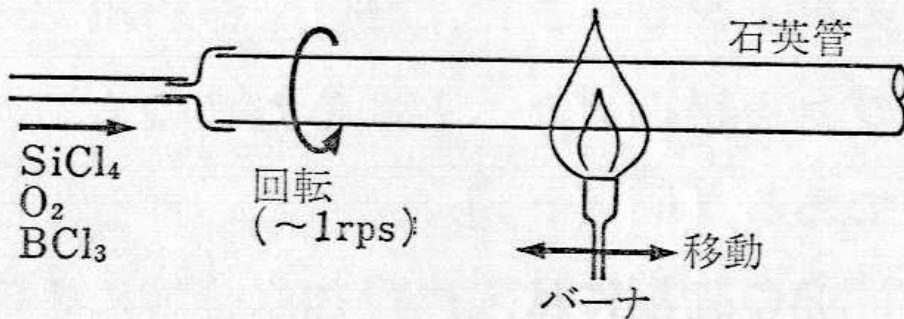
* 光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、1998年
p.29、図8「ファイバ母材を透明化したもの」



光ファイバケーブル

* 光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、1998年
p.24、図1「光ファイバケーブル」

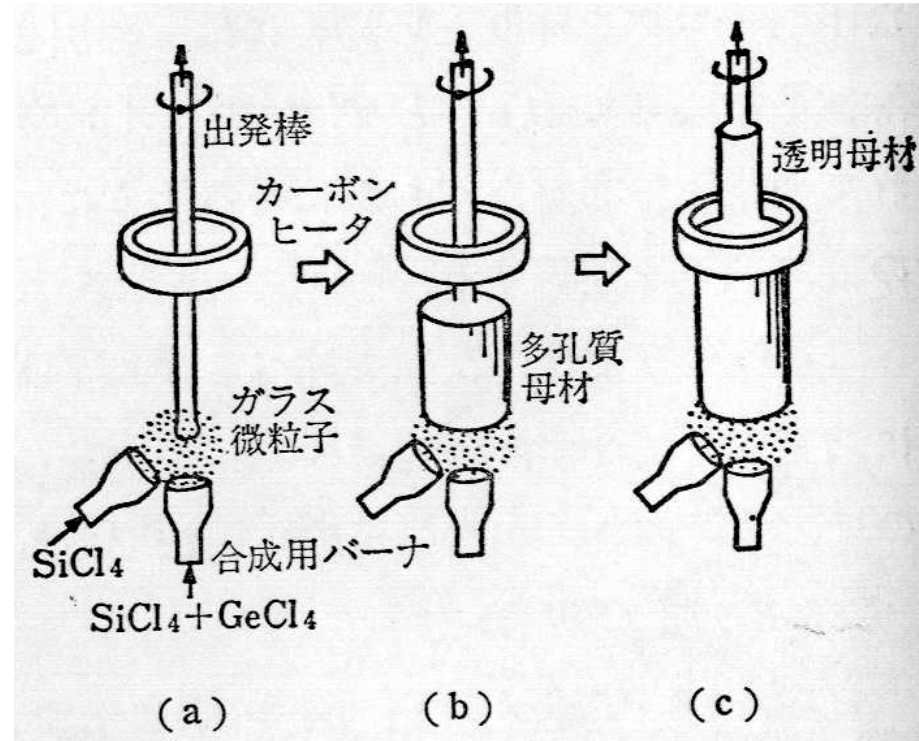
光ファイバの作り方



* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.31、図2・5

MCVD法: 化学的気相成長法

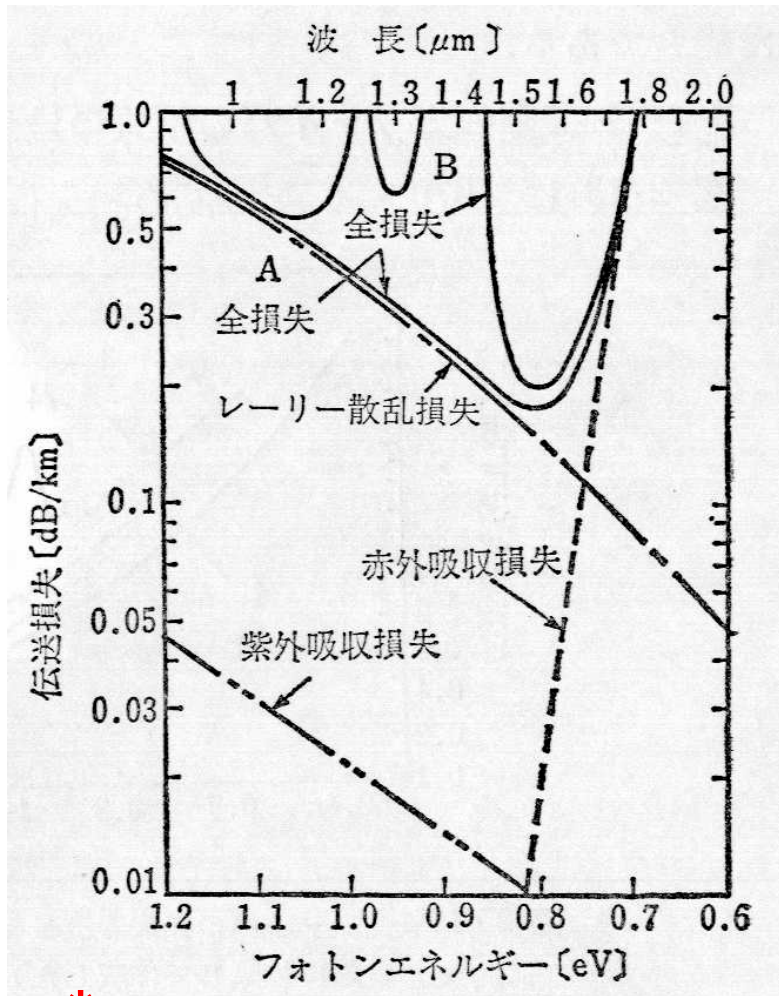
高純度の塩化物からガラスを合成



* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.36、図2・6

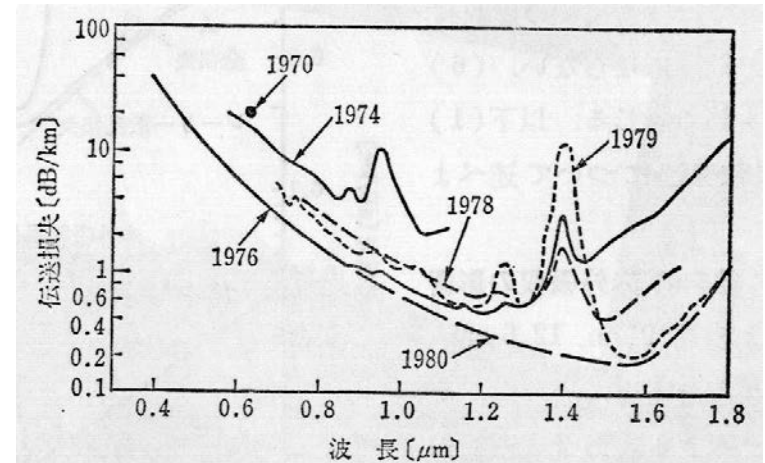
VAD法: 気相軸付け法 (我が国独自の技術)

光ファイバの損失



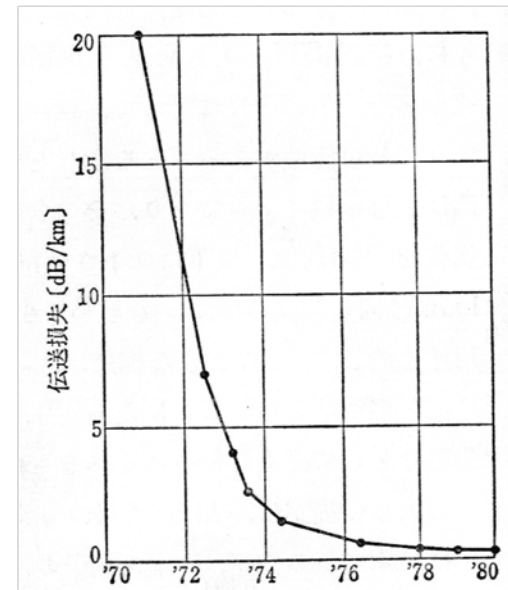
* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.29、図2・12

光ファイバの損失要因



* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.30、図2・14

損失低減の歴史



* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.8、図1・7

光ファイバ中の光を支配する方程式

$$\mathbf{E} = \text{Re}\{\mathbf{E}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)]\}$$

$$\mathbf{H} = \text{Re}\{\mathbf{H}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)]\}$$

$$\begin{cases} E_r = -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} \right) \\ E_\theta = -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_r = -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} + \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \right) \\ H_\theta = -\frac{j}{\beta_t^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} + \omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + \beta_t^2 E_z = 0 \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + \beta_t^2 H_z = 0 \end{cases}$$

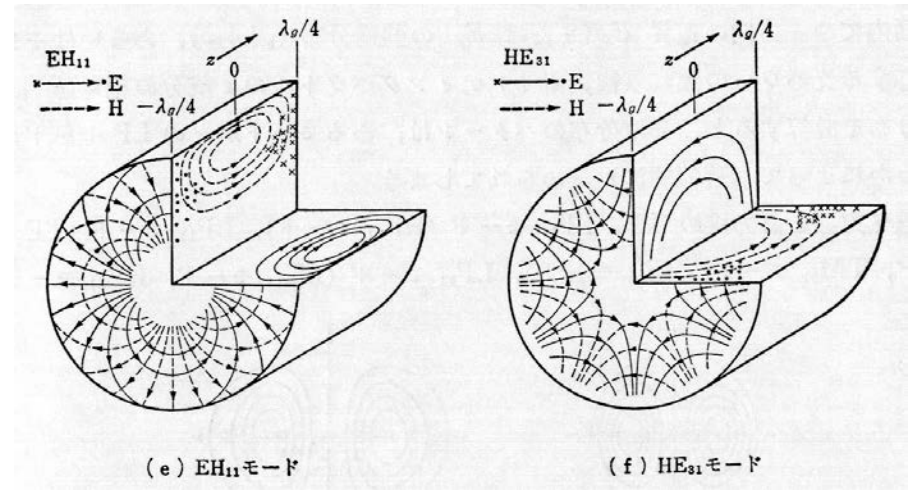
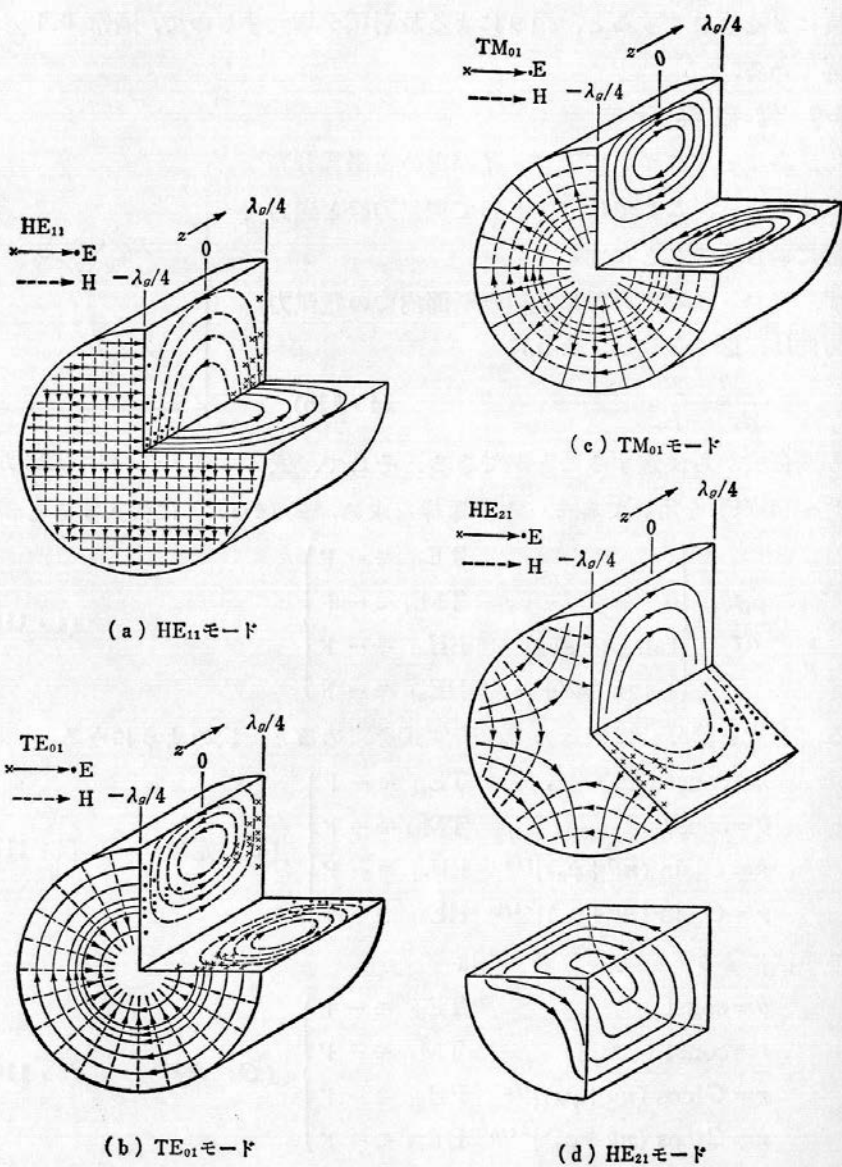
光ファイバの伝搬モード

- ・光ファイバ中には伝搬方向に姿が不変な電磁界分布がある

マックスウェルの波動方程式の境界値問題の解

- ・2階の線形波動方程式の境界値問題の解は直交関数系を成す複数の解（モードと伝搬定数）
- ・シュレーディンガー方程式と類似（波動関数とエネルギー準位）

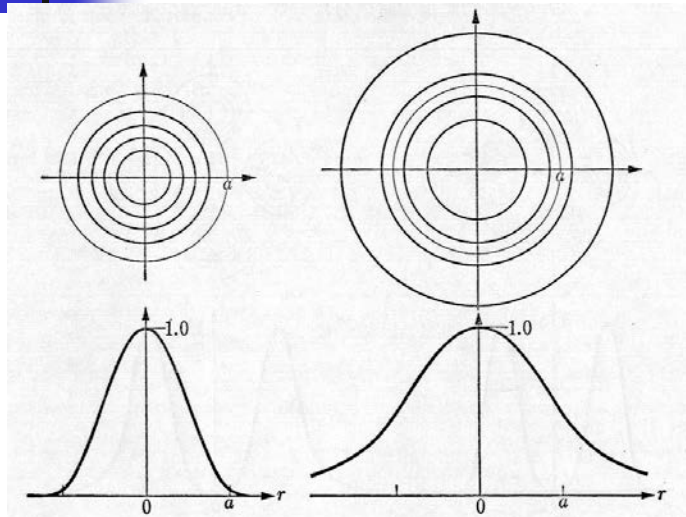
光ファイバ中の伝搬モードの電磁界分布



* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.76-77、図4・8

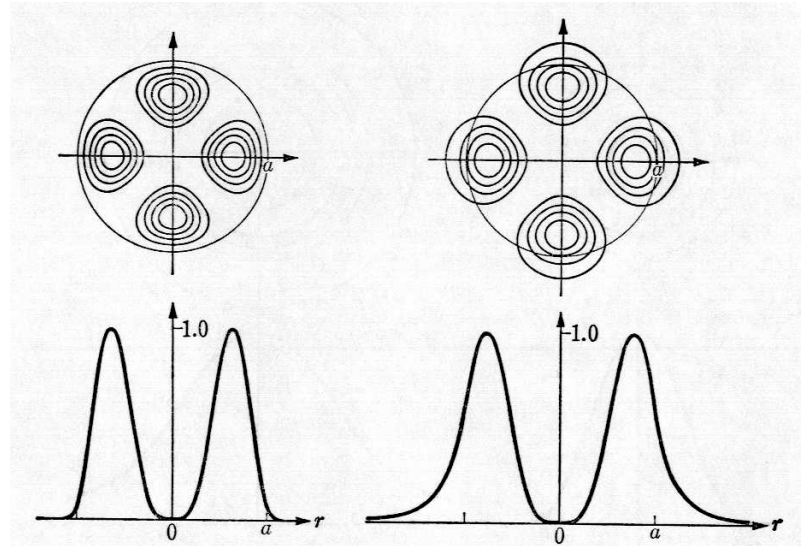
- TE モード
- TM モード
- HE モード
- EH モード

光ファイバ中の伝搬モードのエネルギー分布



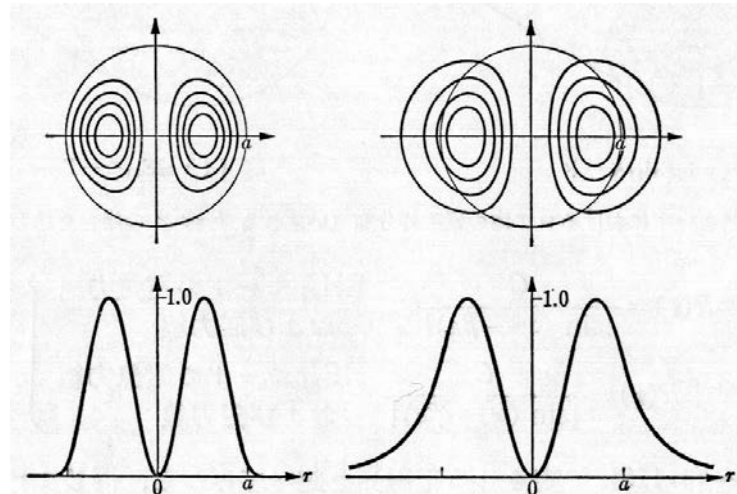
* (a) $b=0.9$ の場合 (b) $b=0.1$ の場合

大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.77、図4・9



* (a) $b=0.9$ の場合 (b) $b=0.1$ の場合

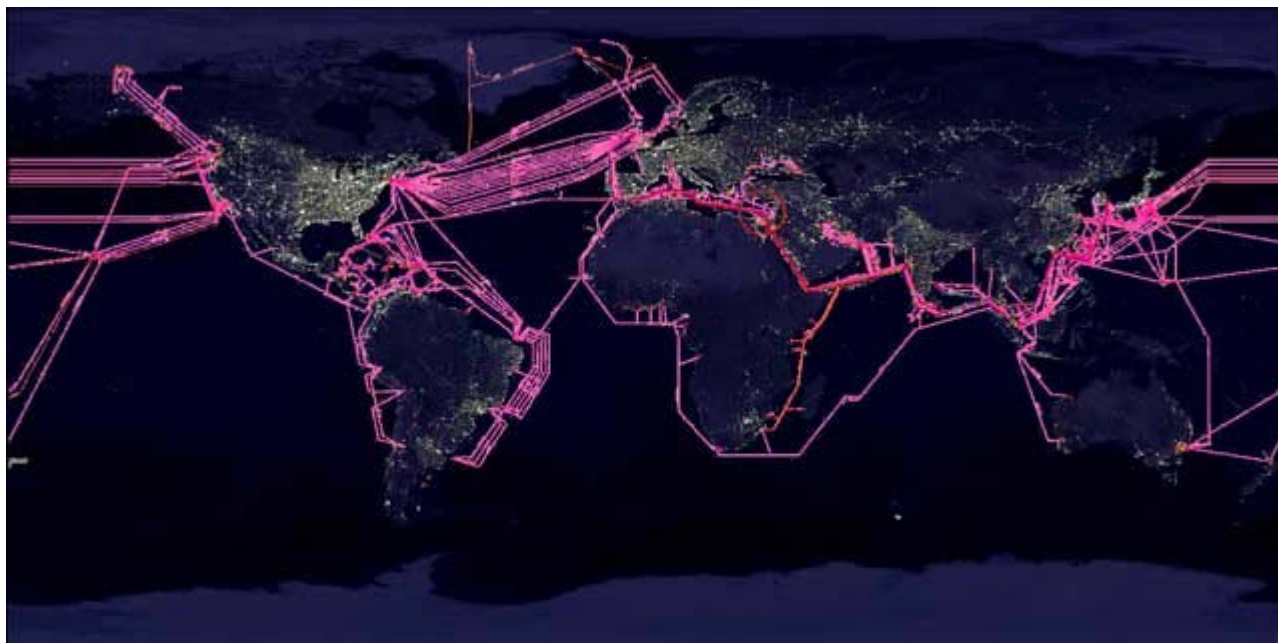
大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.78、図4・10



(a) $b=0.9$ の場合 (b) $b=0.1$ の場合

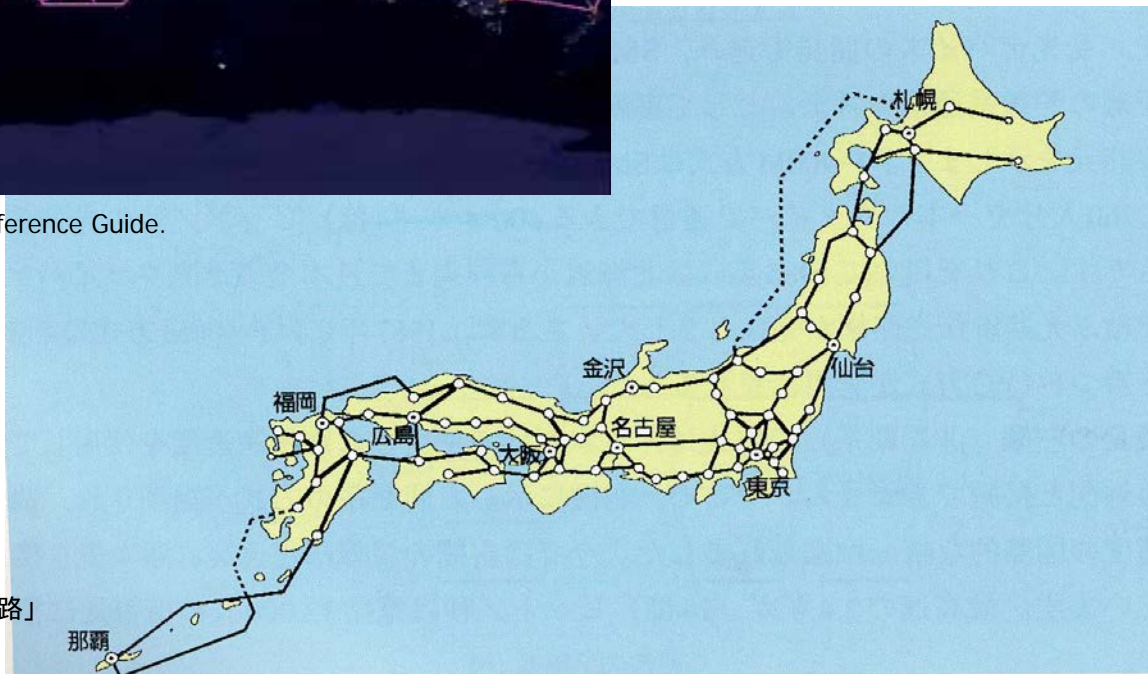
* 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫共著『光ファイバ』オーム社、1983年、p.78、図4・11

光ファイバ通信システム



海底光ファイバケーブル

我が国の光ファイバネットワークの例



* Reproduced from the Fiber Optic Association Online Reference Guide.

www.thefoa.org

*

光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、
1998年、p.40、図7「NTTの通信網を構成する主な光基幹伝送路」



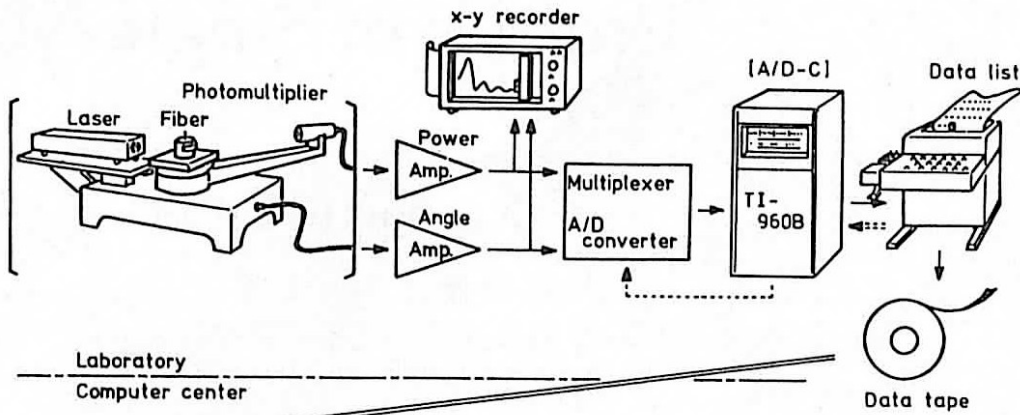
大学院での研究「光ファイバとの出会い」

指導教官：大越孝敬先生

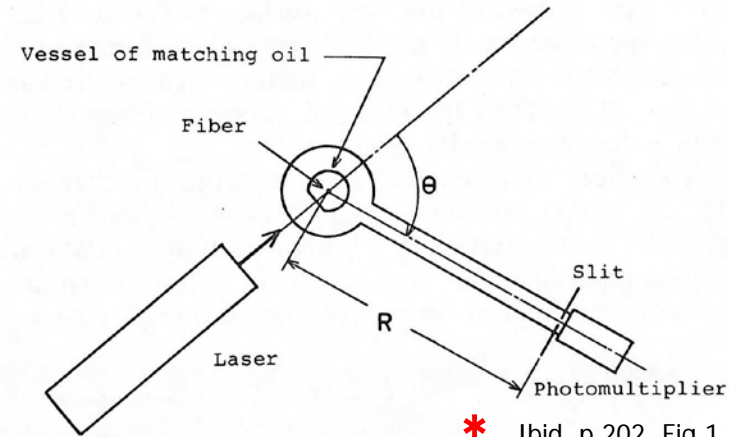
- 光ファイバ内の屈折率分布の非破壊測定
 - * 散乱パターン法
 - * 遠方出射パターン法
 - 光ファイバの伝搬特性の解析と測定
 - * 遮断条件の表現式の導出
 - * 遮断周波数、伝搬定数、等の測定法
- 、等

散乱パターン法

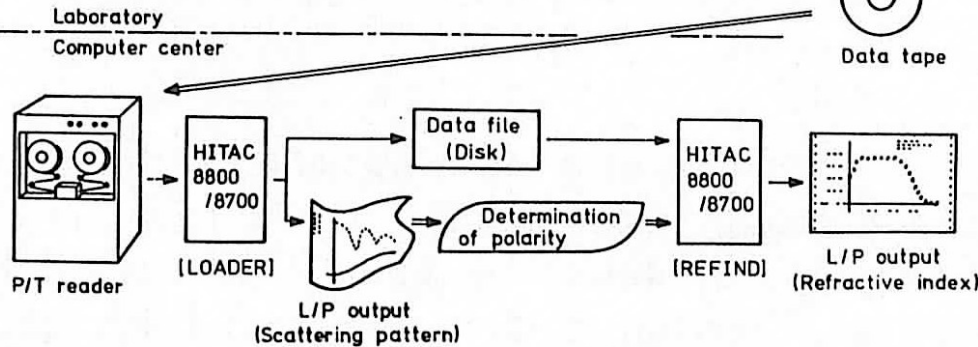
サブミクロンの空間分解能を狙う



* 実験系の構築

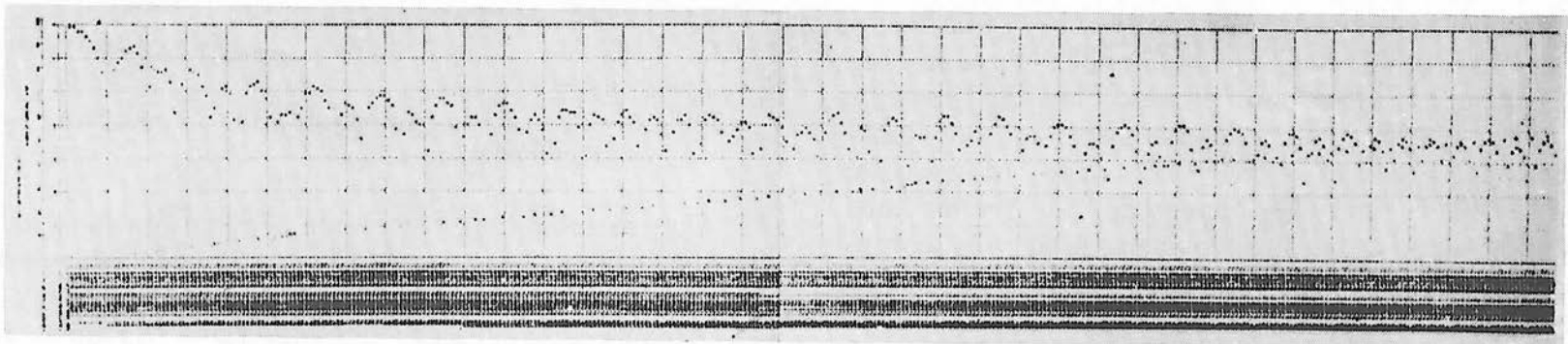


* Ibid. p.202. Fig.1



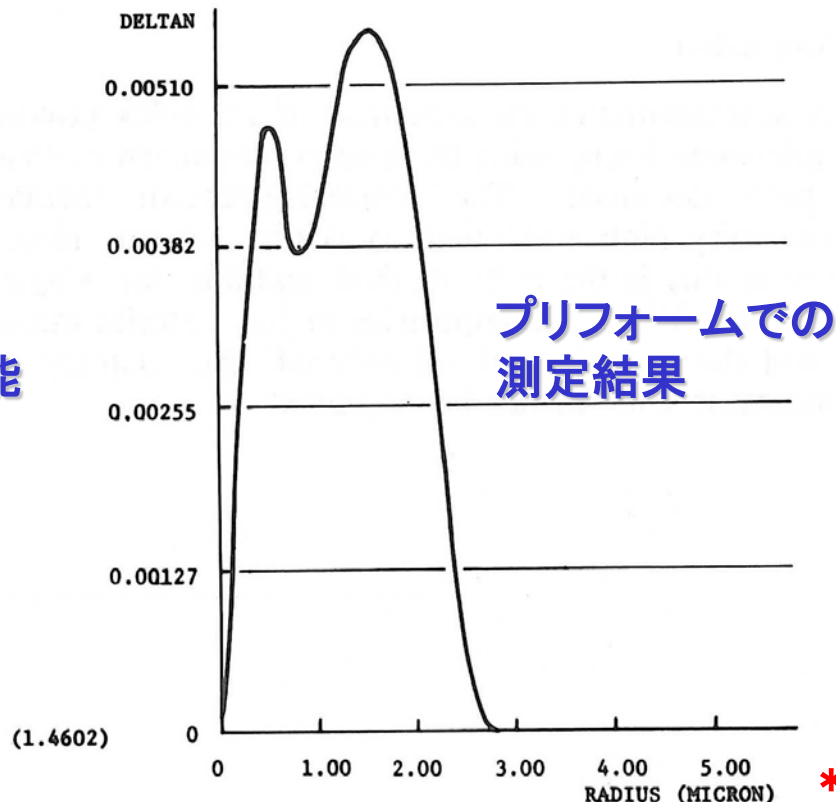
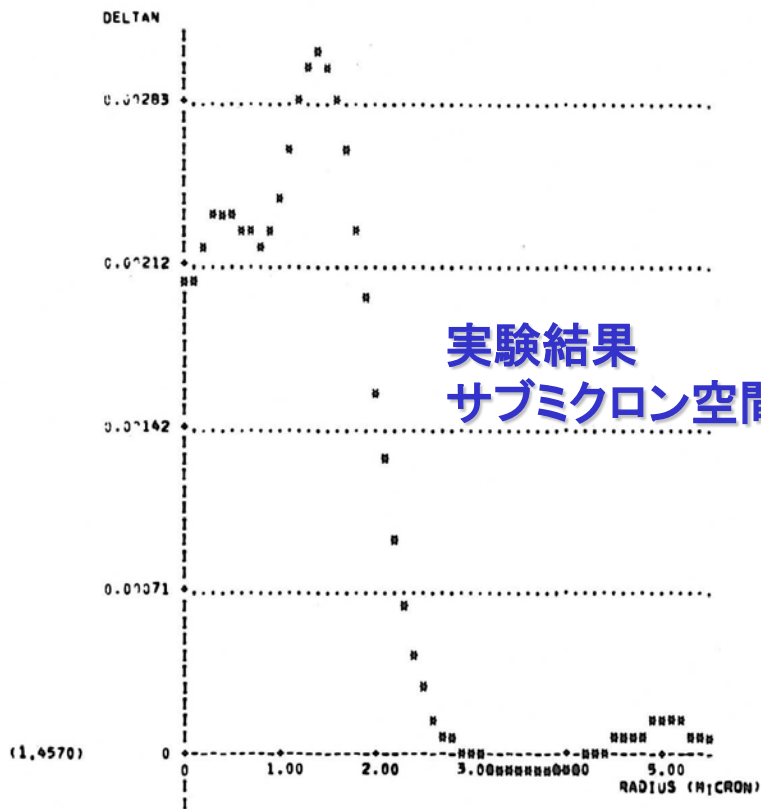
* Hotate and Okoshi (1978) "Semiautomated Measurement of Refractive-Index Profiles of Single-Mode Fibers by Scattering-Pattern Method," *The Transactions of the IECE of Japan*, E61(3): 202-204, p.203, Fig.2.

- * 散乱パターンから屈折率分布を逆算する基本式の導出
- * Hankel Transform



* Ibid. p.203, Fig.3

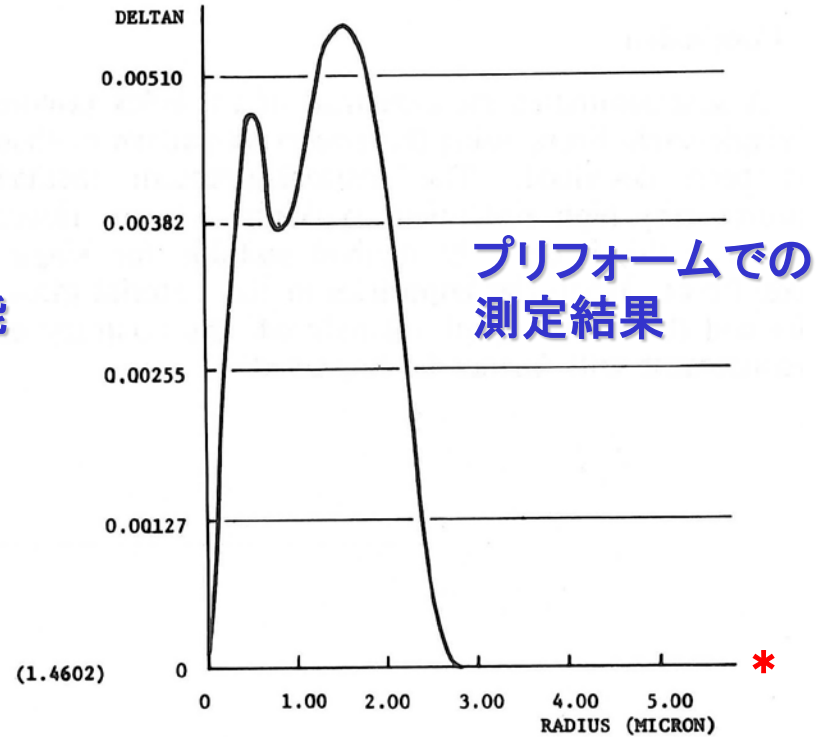
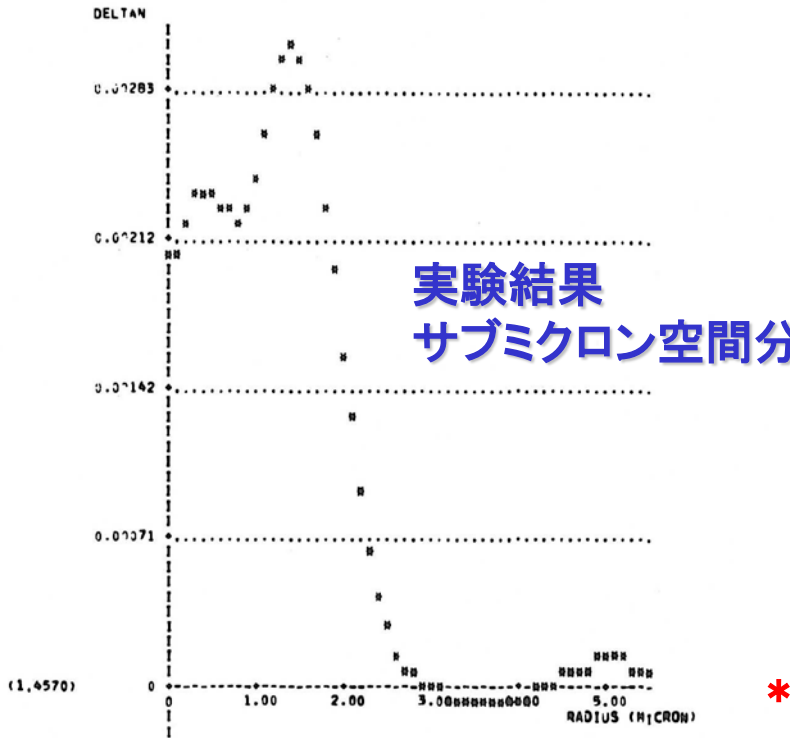
散乱パターン法



Hotate and Okoshi (1978) "Semiautomated Measurement of Refractive-Index Profiles of Single-Mode Fibers by Scattering-Pattern Method," *The Transactions of the IECE of Japan*, E61(3): 202-204, p.204, Figs.6, 7.

「保立君ね、私たちはエンジニアなんだから、一生でひとつくらいは世の中で使われる新しい技術を作りたいよね！！」

散乱パターン法



- * 見えないものが見えてくる面白さ !!
- * センシングの面白さ !!
- * こんなことも出来るんだ !!

Hotate and Okoshi (1978)
"Semiautomated Measurement of Refractive-Index Profiles of Single-Mode Fibers by Scattering-Pattern Method," *The Transactions of the IECE of Japan*, E61(3): 202-204, p.204, Figs.6, 7.

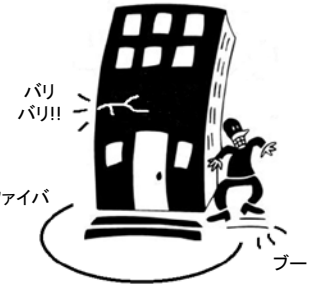
ずっと後になって
聞いたこと !!

「保立君ね、実は君にあのテーマを出したとき、ちゃんと上手く出来るかどうか、心配だったんだよ !!」

私の専門分野

Ex.3

防災システム
防犯システム
ビル、住宅



「システムフォトニクス」

* ユニークなアイディアで新機能を出すシステムを作る。 光の物理とデバイス機能を活用

* 自然体でのシステムアセンブリングではない。

* フォトニックセンシング

* フォトニックコンピューティング

* フォトニックデバイス、など

- 光ファイバジャイロ

- 痛みの分かる材料・構造の為の

光ファイバ神経網技術、など

応用先：航空機、土木・建設、...

Ex.4 スマートマテリアルのための神経網

~100mレンジで
サブcm分解能



光ファイバの特徴とセンシング応用

光ファイバの特徴

低損失
広帯域
可とう性
細径
軽量
電磁誘導なし
絶縁性
耐水性
耐火性 ……

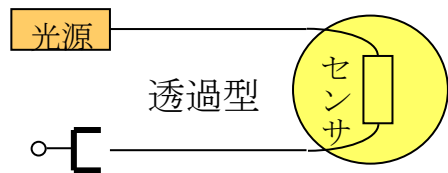
センシング応用

遠隔計測
狭空間計測
システムの小型化
システムの軽量化
電磁雑音下計測
高電圧現象計測
防爆計測
悪環境下計測
生体計測 ……

光ファイバは安定した光を送れる： 通信： デジタル
光ファイバは外界の変化を捉える： 計測： アナログ

光ファイバセンシング技術の方式分類

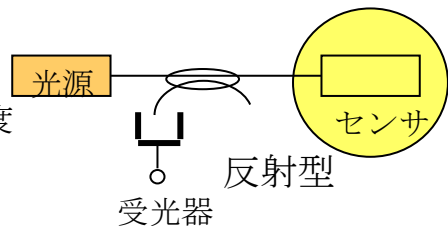
電圧・電界
電流・磁界
温度
加速度、等



透過型

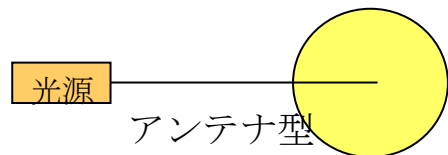
(a) (伝送路としての利用法)

音響
血中O₂
マイクロ波強度
温度、等



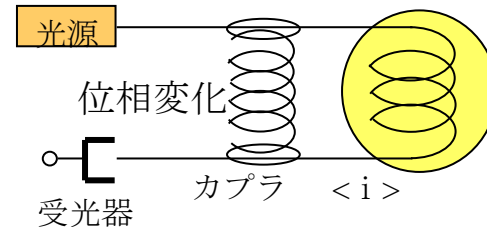
反射型

高電圧
インパルス
温度、等



アンテナ型

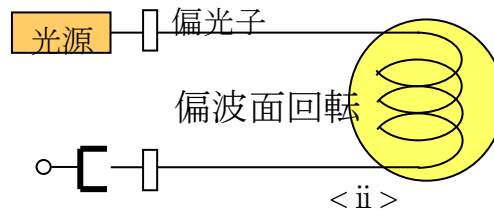
(b) (センサとしての利用法)



位相変化

カプラ <i>

温度
圧力
ひずみ
磁界
音圧、等



偏波面回転

<ii>

電流
磁界、等
(ファラデー効果)

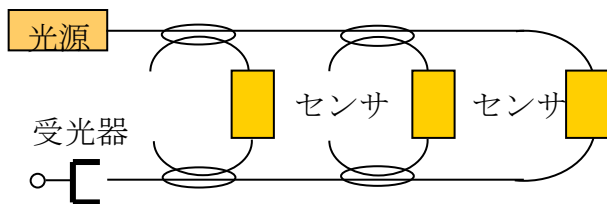


損失変化

<iii>

音圧
(マイクロベンド)
ガス濃度
(エバネッセント波)
放射線、等

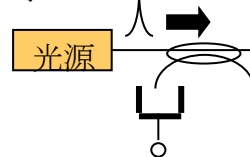
歪み
温度
圧力
音響、等



多点型

OTDR

等 パルス



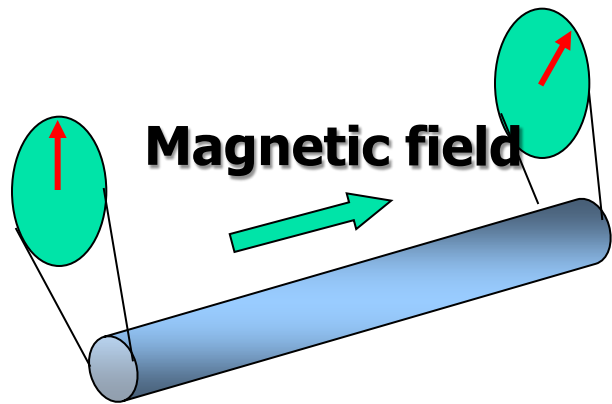
散乱

温度分布
ひずみ分布
側圧分布
異常点分布
水漏れ・油漏れ分布
等

(c) (多点型・分布型光ファイバセンサ) 分布型

光ファイバ電流センサ

ガラスのファラデー効果



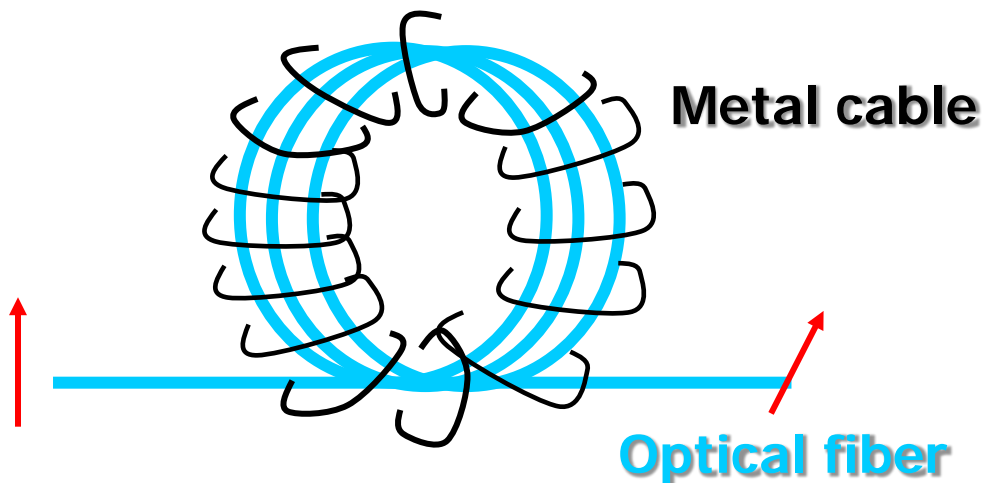
Faraday rotation:

$$\varphi = VN_f N_I I$$

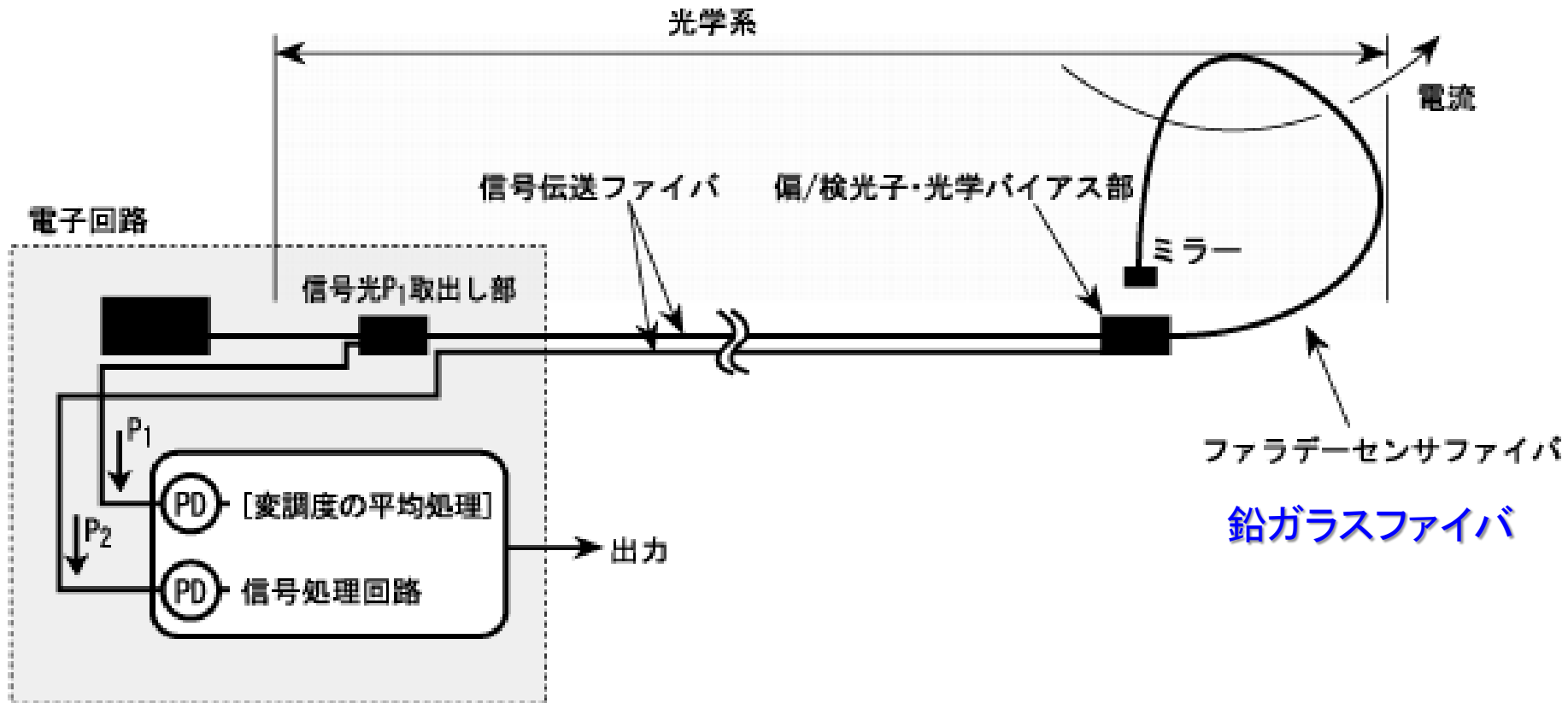
Annotations for the equation:

- V : Verdet constant
- N_f : No. of fiber turns
- N_I : No. of current crosses
- I : Current

Verdet constant
= 0.015
arcsec/A
(Quartz glass)

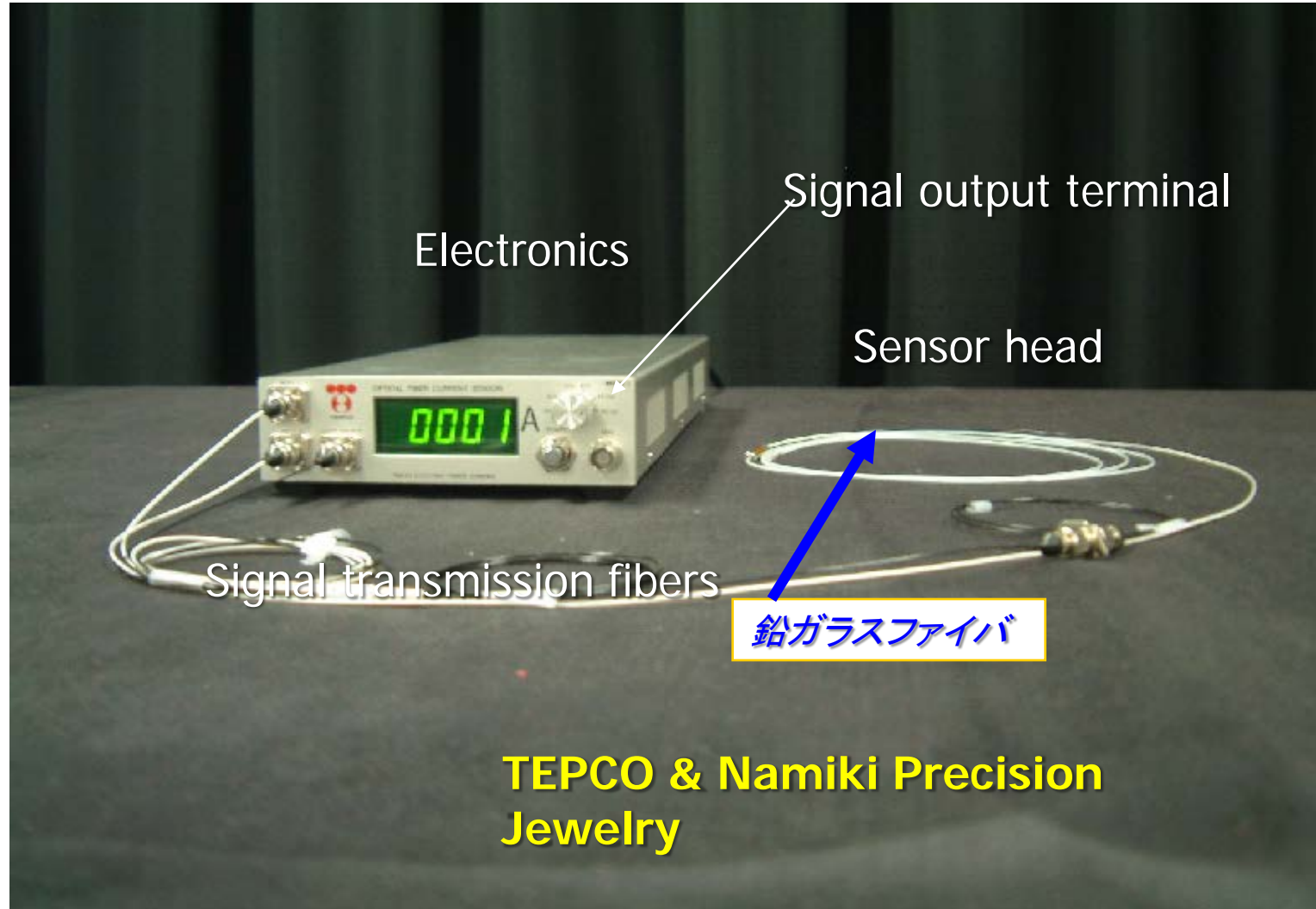


光ファイバ電流センサの構成図



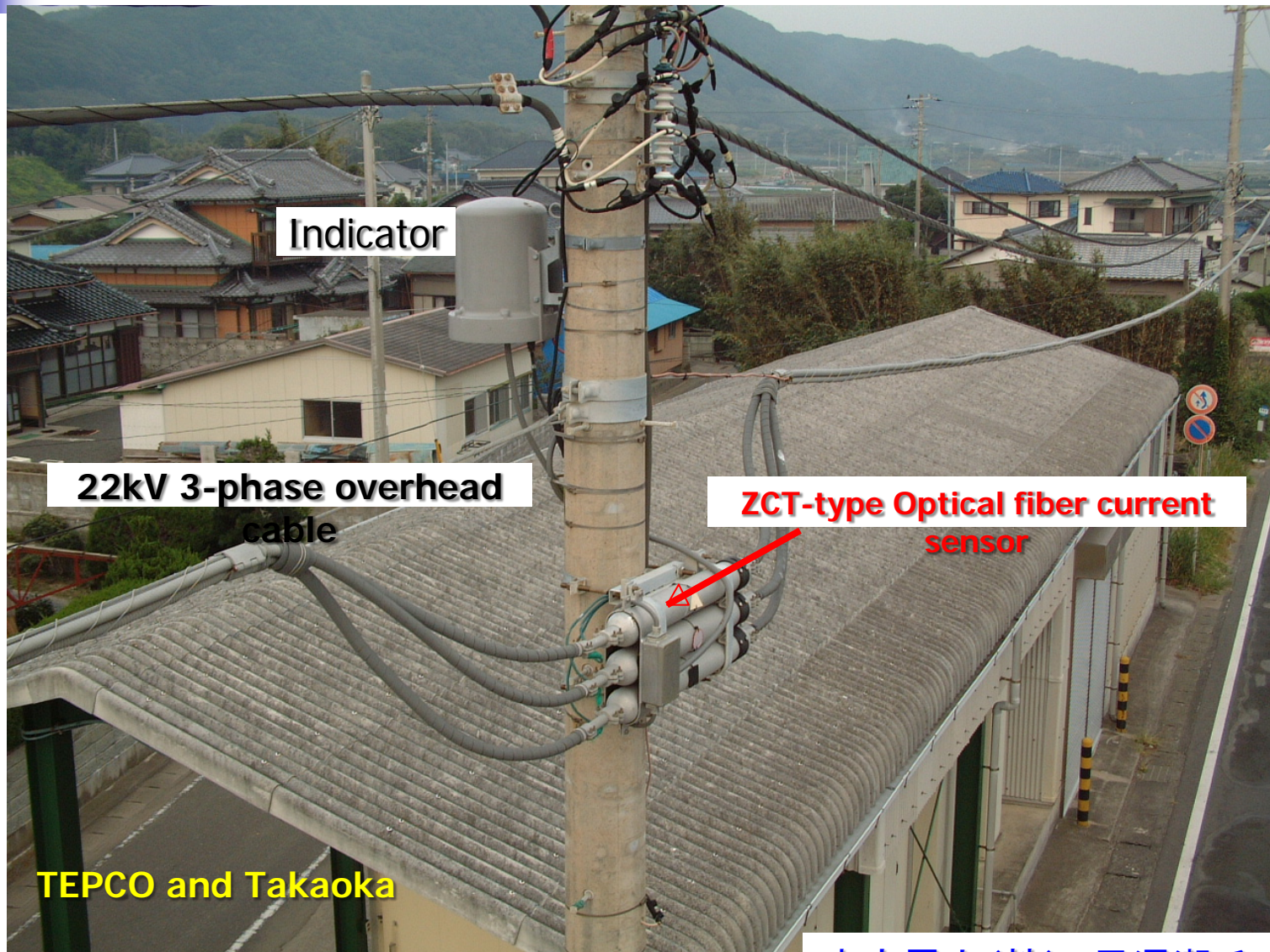
* 東京電力(株) 黒澤潔氏ご提供

光ファイバ電流センサの具体例



* 東京電力(株) 黒澤潔氏ご提供

光ファイバ電流センサの設置例



Indicator

22kV 3-phase overhead
cable

ZCT-type Optical fiber current
sensor

TEPCO and Takaoka

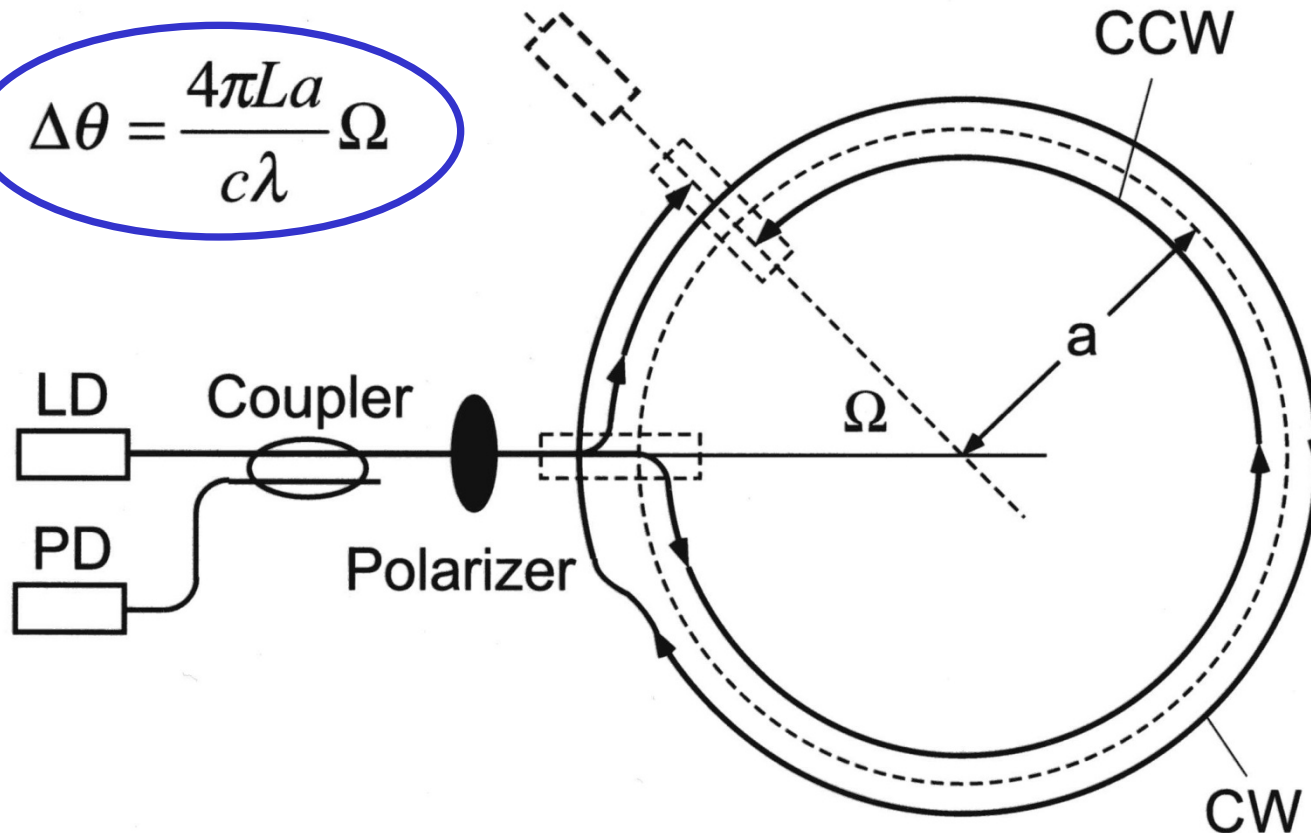
*

東京電力(株) 黒澤潔氏ご提供

光ファイバジャイロ

ジャイロ : 慣性空間に対する回転計

$$\Delta\theta = \frac{4\pi La}{c\lambda} \Omega$$



サニャック効果

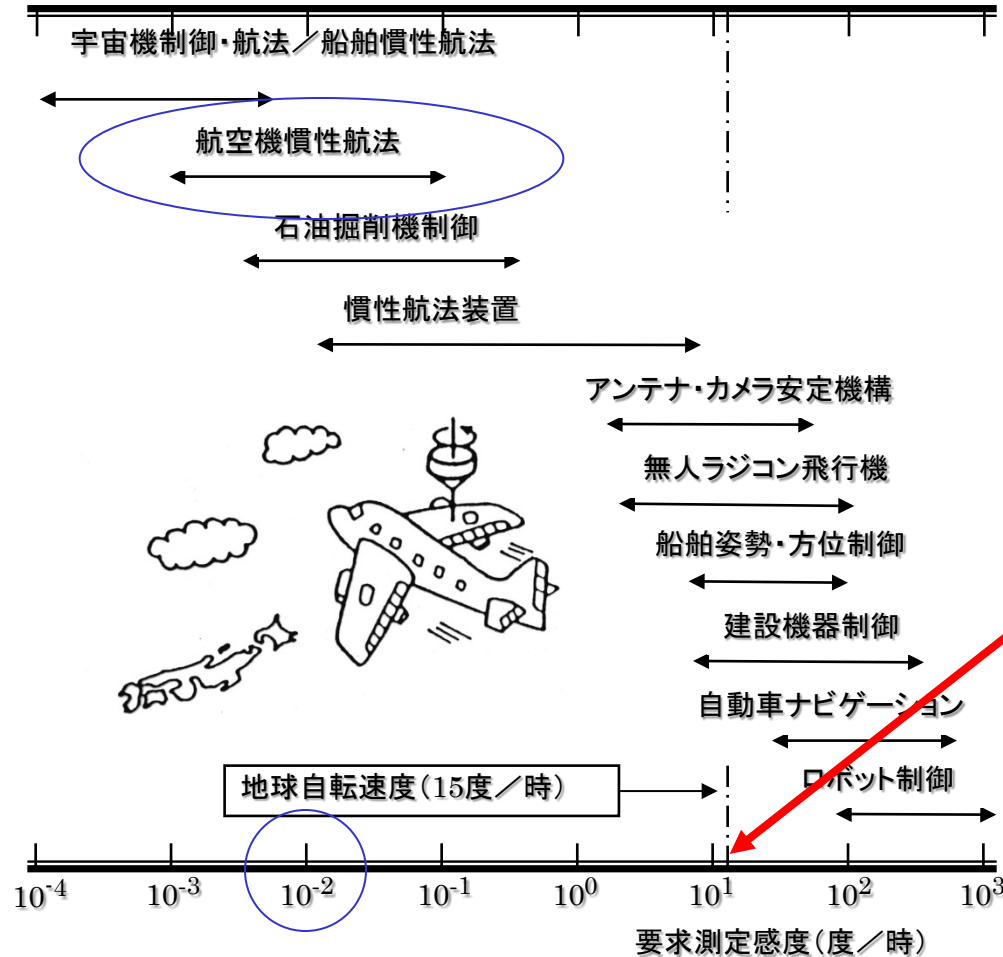


相対性理論!

1976年に
ユタ大の
Vali and
Shorthillが
提案

光ファイバジャイロ

ジャイロ : 慣性空間に対する回転計

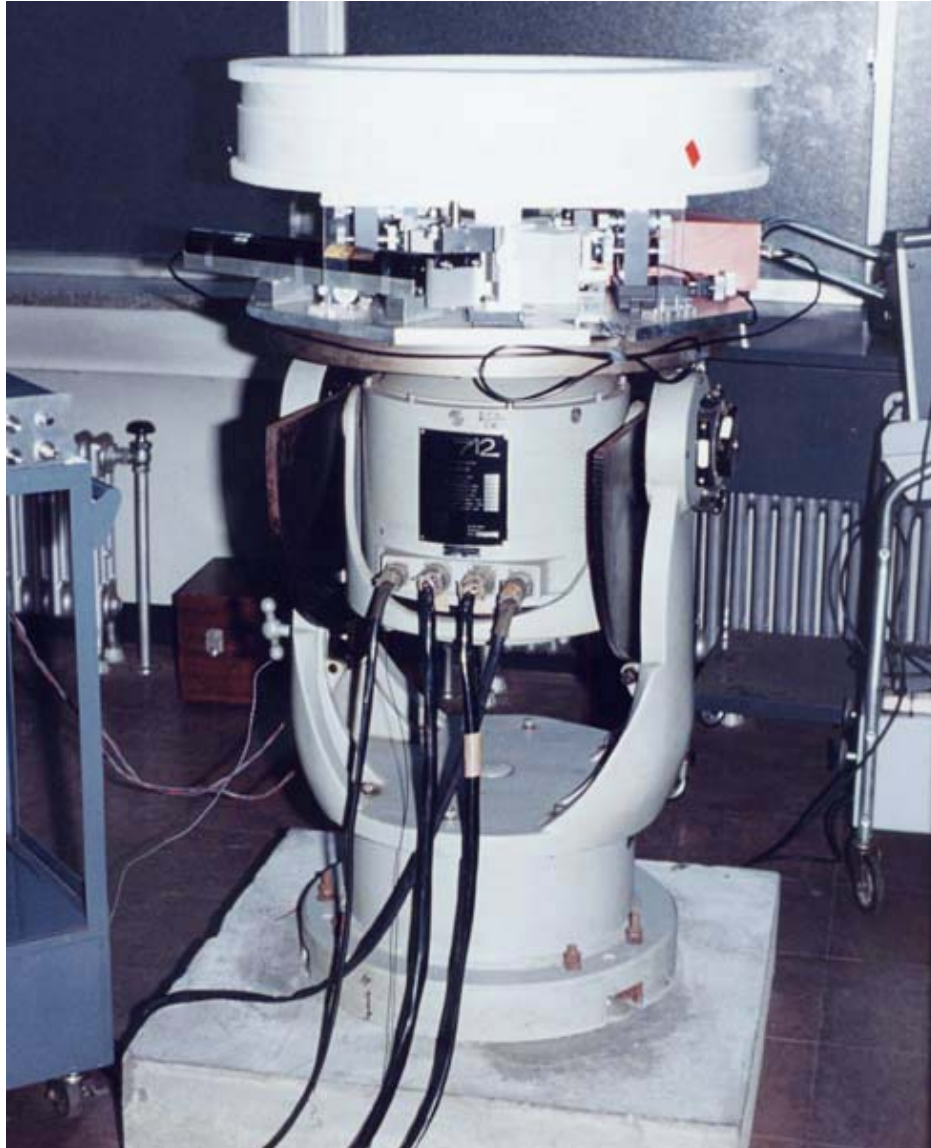


時計の短針の
半分の回転角
速度

1日に1回転

FOG: マイクロラジアン位の位相を測定 = 光センサの王様

わが国初の光ファイバジャイロ



1千万分の1波長の
長さ変化を読む！！

宇宙から日本を見て
目黒区駒場の保立が
見える。

本当は、すごく難しい
研究・開発だった！

東京大学宇宙航空研究所
1979年

保立和夫 による

わが国初の光ファイバジャイロ

鉄アングルとベニヤ板
で自作した暗室

NTTから頂いた
10mの単一モード
光ファイバで実験
開始 1979年秋

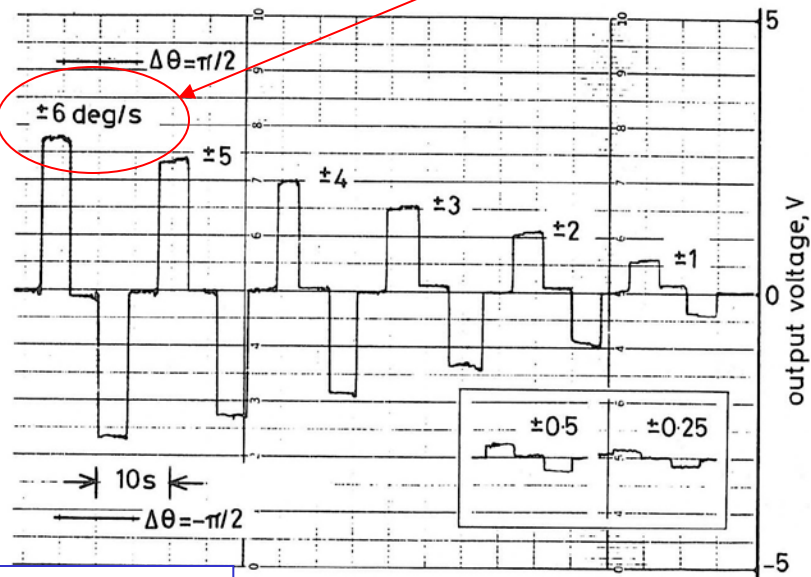
左右両回り光による
干渉縞 1979年秋

時計の秒針

運動場の片隅に捨ててあった
工作用定板

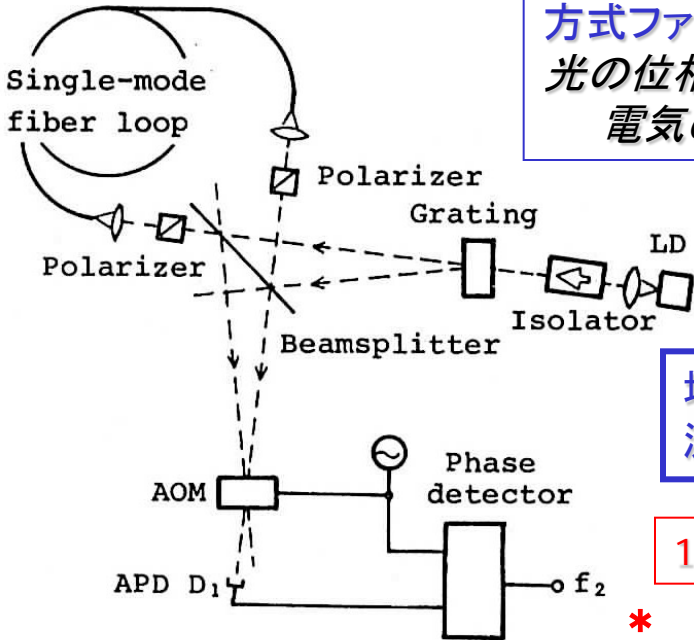
我が国初の
光ファイバ
ジャイロの
システム構成

Hotate *et al.* (1980) "Rotation detection by optical fibre laser gyro with easily introduced phase-difference bias," *Electronics Letters* 16(25): 941-942, p.941, Figs.1, 2. *



回転の検出に成功 !!

性能向上を目指して

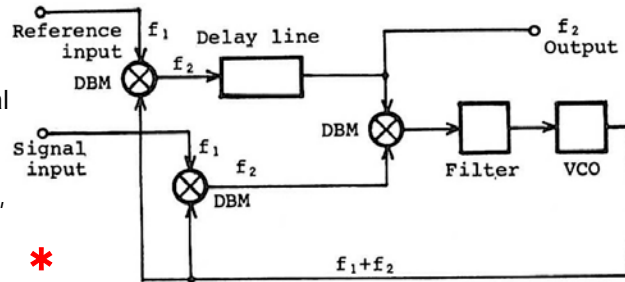


光ヘテロダイン
方式ファイバジャイロ
光の位相を
電気の位相に

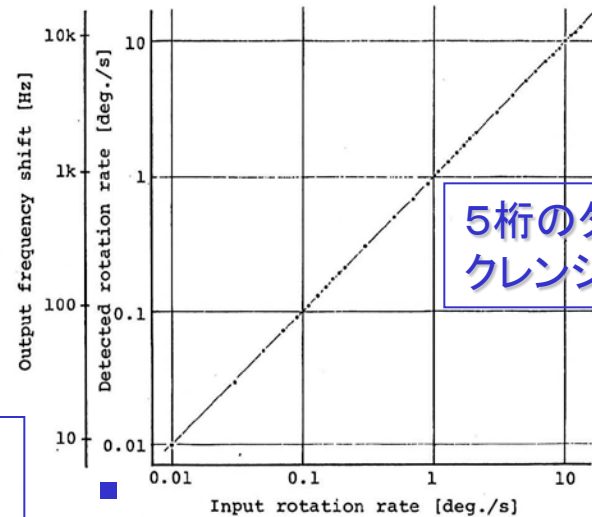
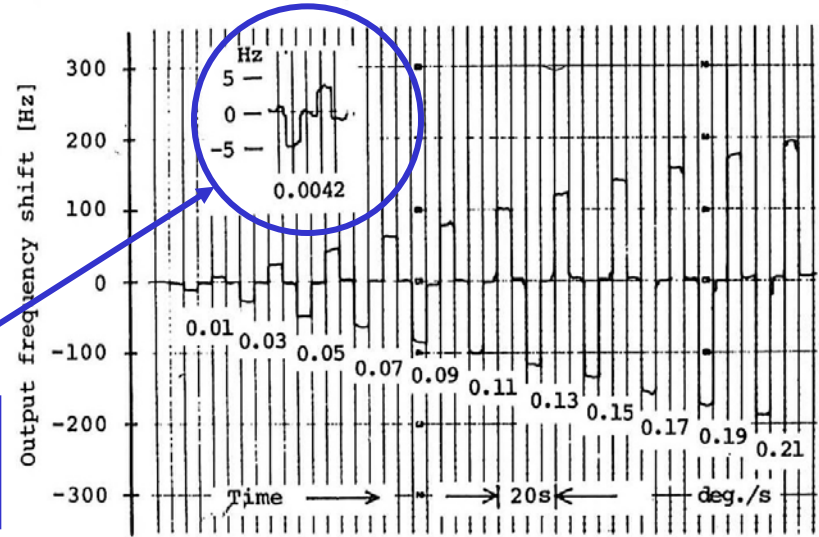
地球自転速度の
測定に成功！

1984年：計測自動制御学会技術賞（保立、大熊、東口、丹羽）

Hotate *et al.* (1982)
"Rotation detection by optical
heterodyne fiber gyro with
frequency output," *Optics
Letters* 7(7), 331-333, p.331,
Fig.1; p.332, Figs.2, 3, 5.



広いダイナミックレンジの追求
電気の位相を電気の周波数に！！





究極性能への挑戦

1千万分の1の変化への挑戦

光ファイバ中の

- * レーリー散乱
- * 偏波変動
- * 非線形光学効果
- * 地磁気によるファラデー効果
- * 空間不均一な温度変動

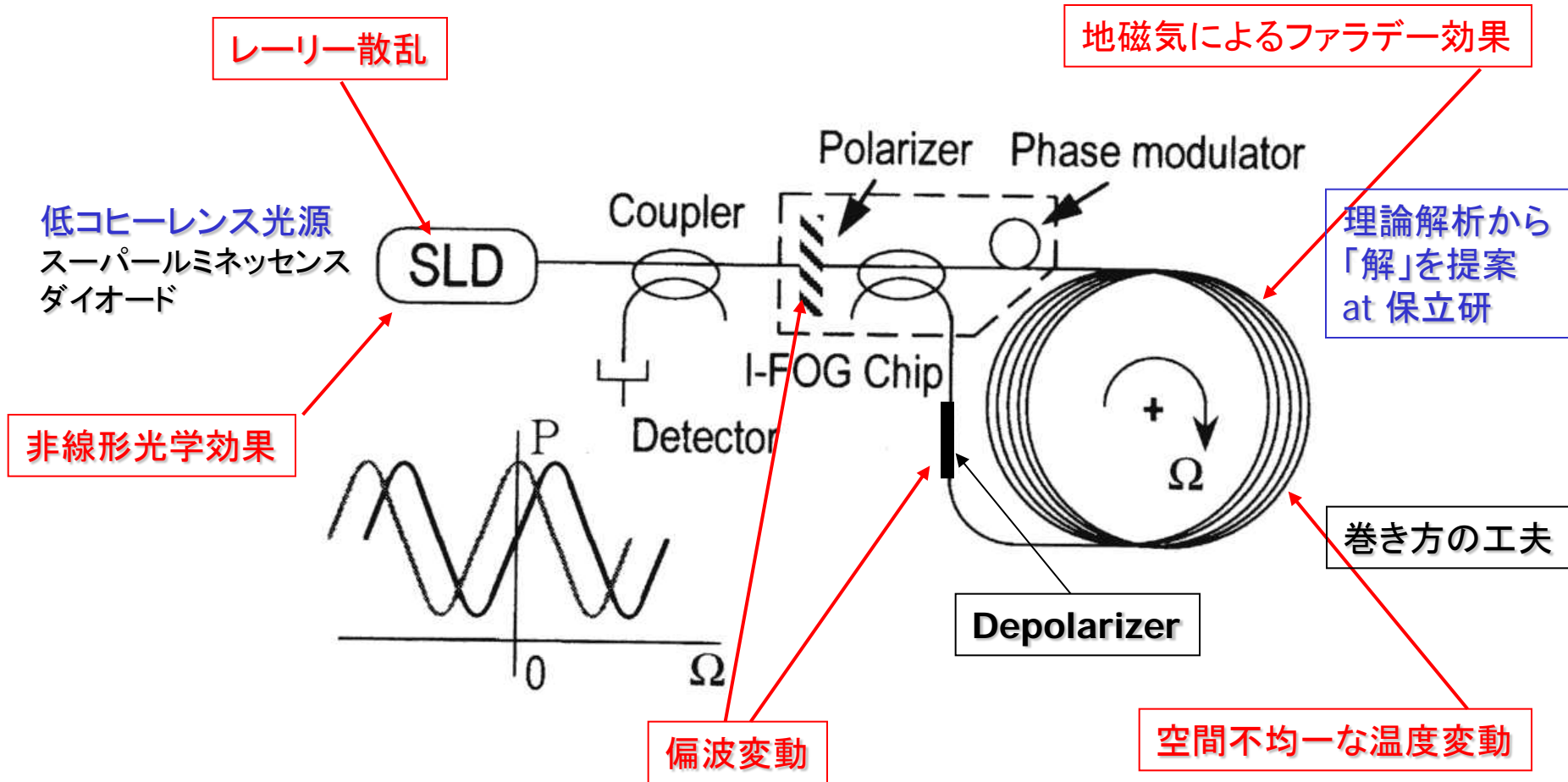
などなど、

雑音要因(物理)の「理論的検討」と、それに基づく

「雑音除去手法の発明」(システムフォトニクス)

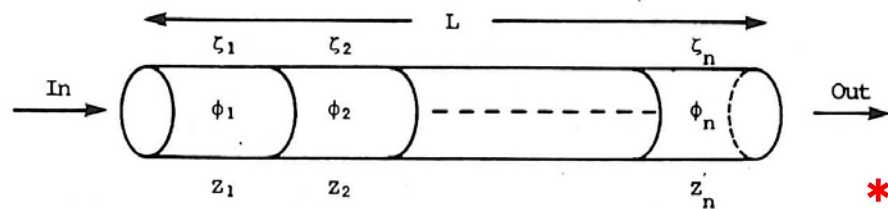
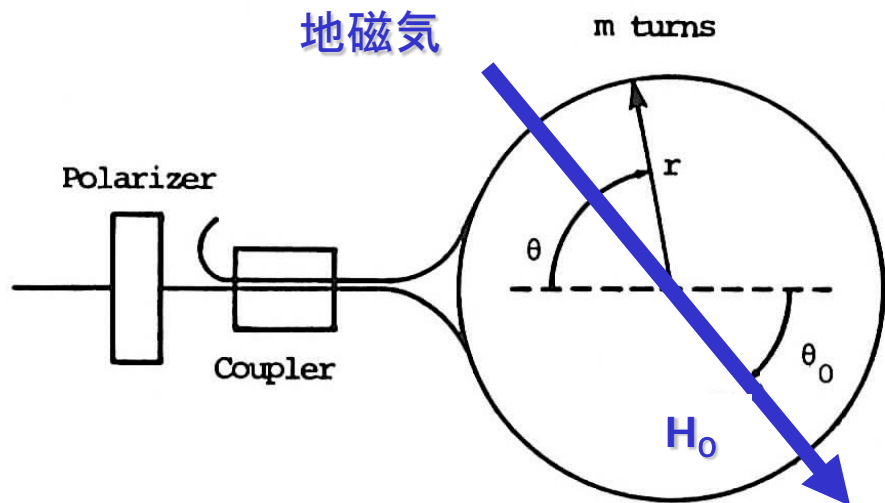
光ファイバジャイロの雑音対策

干渉方式光ファイバジャイロの Minimum Configuration



シンプルだけど、効果の大きな雑音対策の考案 !

偏波維持光ファイバコイルにおける 地磁気誘起ドリフトの定式化



地磁気によるファラデー回転を定式化

Hotate and Tabe (1986) "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: influence of the earth's magnetic field," *Applied Optics* 25(7): 1086-1092, p.1089, Figs.7, 8.

$$\Delta\psi = \frac{4\zeta_0 r}{\Delta\beta} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\theta_0 + \xi)$$

$$= \frac{4\zeta_0 r}{\Delta\beta} \cdot \sqrt{|\Phi|^2} \cdot \cos(\theta_0 + \xi)$$

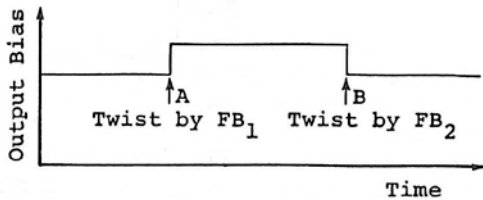
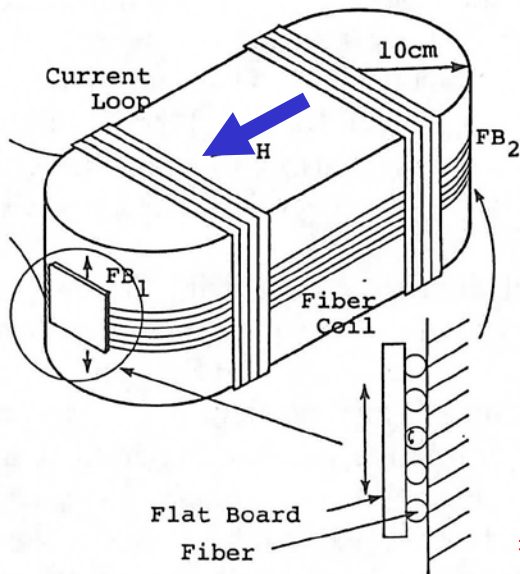
光ファイバ長さ方向(θ)に沿う
単位長さ当たりの捻り角

$$\Phi = \int_0^{2m\pi} \phi(\theta) \cdot \exp(-j\theta) \cdot d\theta$$

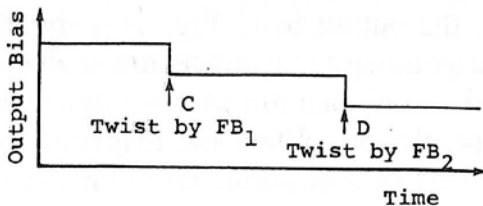
光ファイバコイル1周を周期とする光ファイバの交流的な捻れ成分に比例して、ファラデー効果誘起ドリフトが生じる !

偏波維持光ファイバコイルにおける 地磁気誘起ドリフトの実験

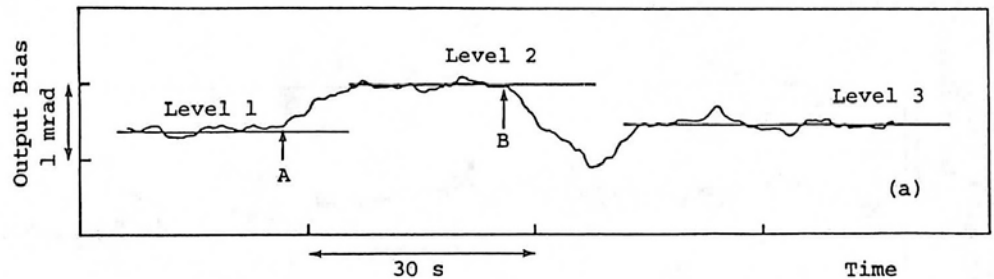
光ファイバを捻ってみる



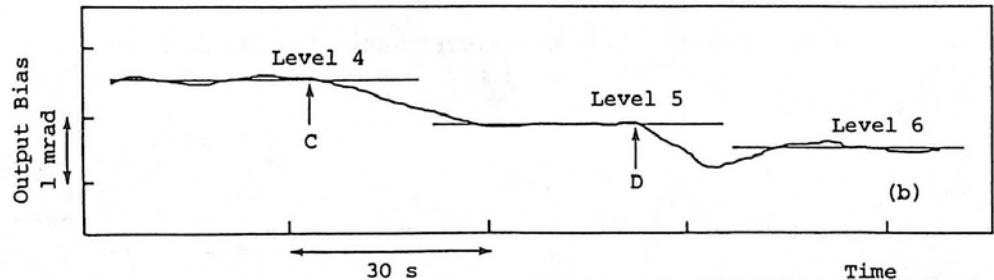
(a)



(b)



(a)



(b)

ジャイロ出力がこうなる
ように捻ってみた

そうなった ! ! !

Hotate and Tabe (1987) "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Experiment," *Journal of Lightwave Technology* 5(7): 997-1001, p.998, Fig.3; p.999, Fig.6; p.1000, Fig.7.

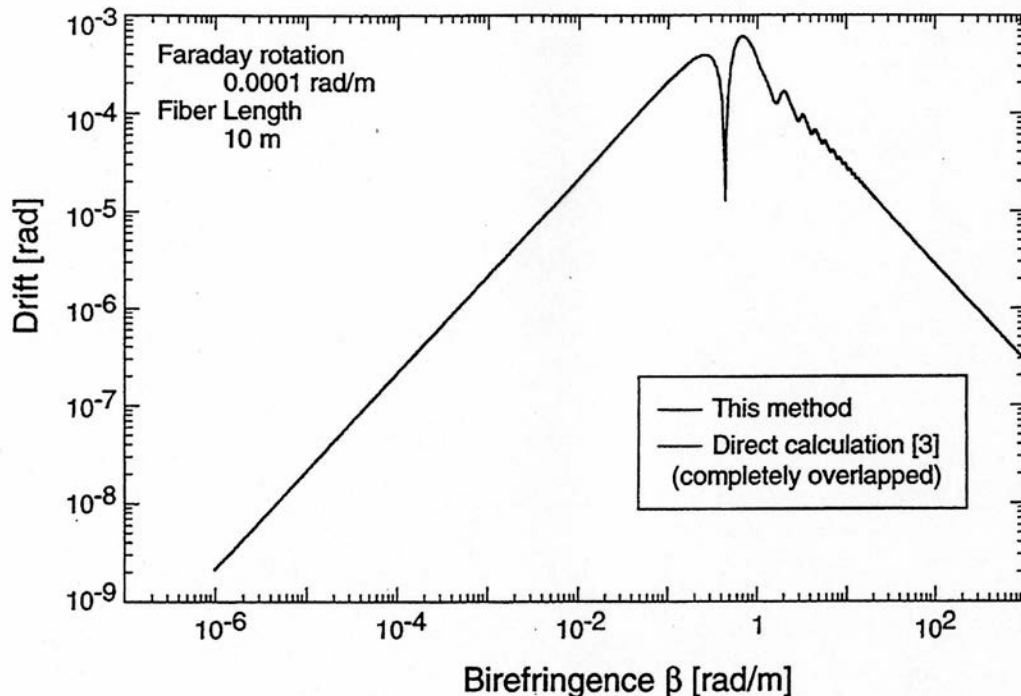
地磁気誘起ドリフト理論の精緻化

任意の光ファイバに適用できるドリフト発生機構の定式化を実現

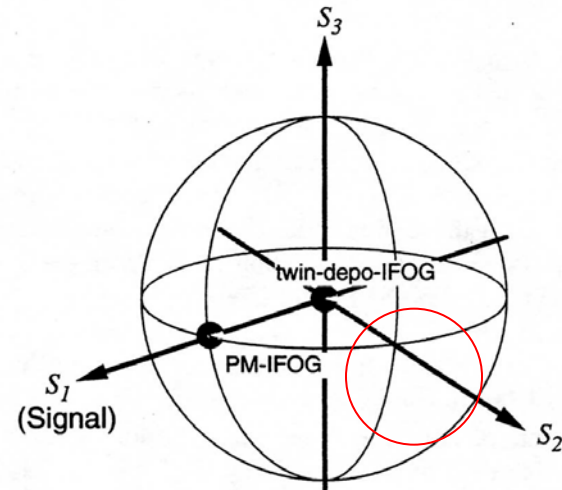
$$\Phi_0 = \frac{1}{k} \int \eta(z) [-s_{3c}(z) + s_{3cc}(z)] dz.$$

光ファイバの単位長さ当たりのファラデー回転角

右回り光と左回り光の第3ストークスパラメータの光ファイバに沿う分布（楕円偏波性）



偏波維持光ファイバによるドリフト低減のメカニズムの確認



デポラライズ光のドリフト低減効果を証明

Saida and Hotate (1999) "General formula describing drift of interferometer fiber-optic gyro due to Faraday effect: reduction of the drift in twin-depo-I-FOG," *Journal of Lightwave Technology* 17(2): 222-228, p.225, Figs.3, 4.



光ファイバジャイロの雑音要因とその対策

* 偏波状態変動

左右両周り光の共通光路部に偏光子
低コヒーレンス光源の利用
偏波維持光ファイバの利用
ツインデポラライザ方式

* 後方散乱

低コヒーレンス光源の利用

* 光カー効果

低コヒーレンス光源の利用

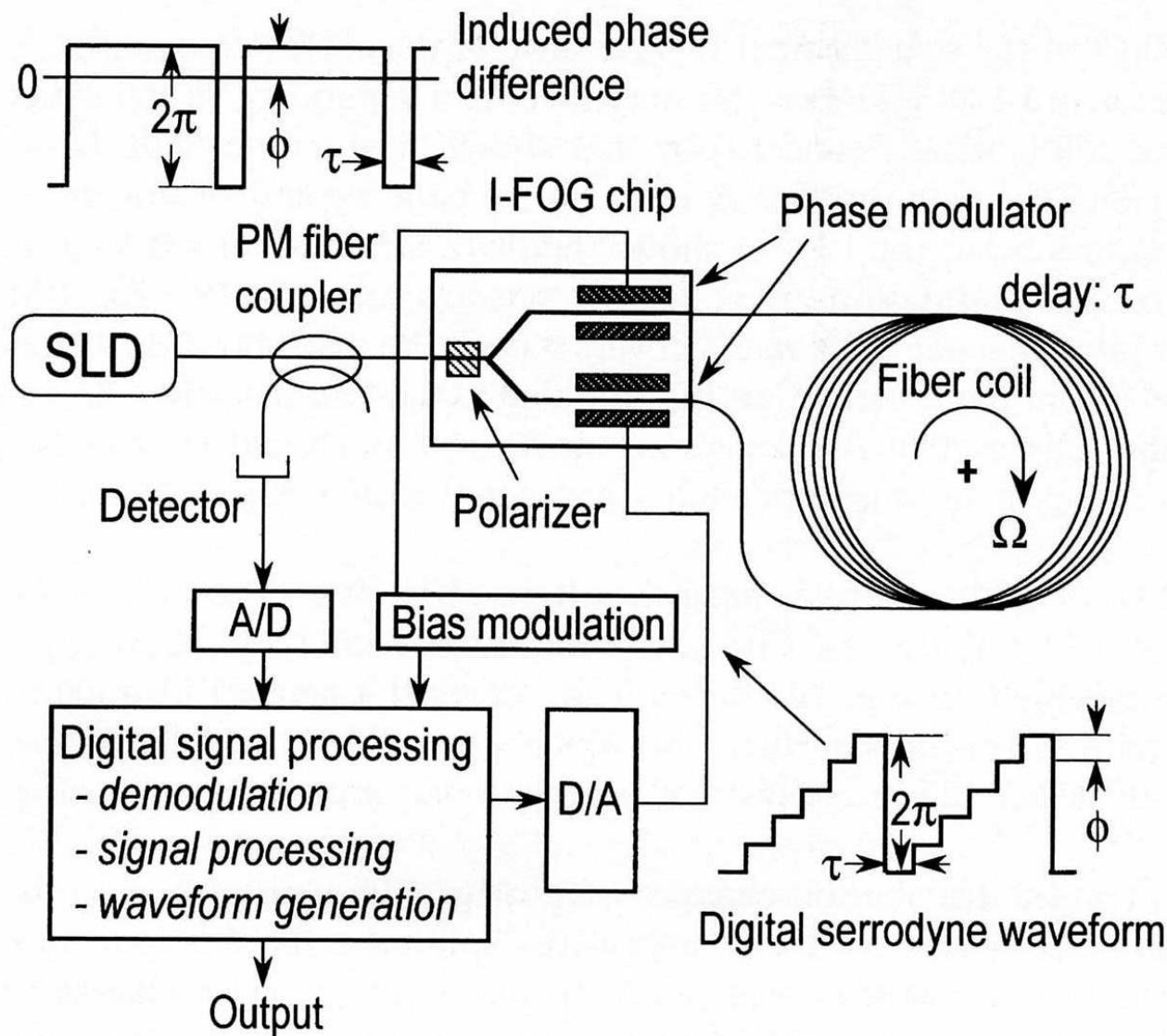
* 地磁気によるファラデー効果

偏波維持光ファイバの利用
ツインデポラライザ方式の利用
(低コヒーレンス光源の利用)

* 不均一な温度分布の時間変動

光ファイバコイルの巻き方の工夫
(4重極巻き、8重極巻き)

光ファイバジャイロの究極のシング処理技術



クローズドループ

バイアス安定性

0.01度/時

入出力特性の線形性

数ppm

ダイナミックレンジ

6桁

デジタルゼロダイン方式

光ファイバジャイロの実用化状況 I

航空・宇宙 応用

＋航空機姿勢制御装置

ボーイング777、ドルニエ328、等

＋ロケット姿勢制御

NASDA TR-1Aロケット(1991年から5回)

JAXA/ISAS M-Vロケット(1号機から8号機)

＋人工衛星制御

ISAS「はるか」、JAXA「 μ -Labsat」、
JAXA/ISAS「れいめい」、USEF「SERVICE」、
JAXA「SDS-1」、JAXA「IKAROS」、等

船舶

＋ジャイロコンパス、等

光ファイバジャイロの実用化例: 宇宙・航空

**TR-1A Rocket:
NASDA
with JAE I-FOG**



日本航空電子工業株式会社
(JAE) *

**M-V Rocket: ISAS
with Mitsubishi
Precision I-FOG**



* JAXA



**Boeing 777: ANA, JAL,
etc.
with Honeywell I-FOG**

* JAXA

* ANA

光ファイバジャイロの実用化例： 宇宙・航空

- No.1 (#1) : 12 Feb. 1997
[MUSES-B]
- No.2 (#3) : 4 July 1998
[PLANET-B]
- No.3 (#4) : 10 Feb. 2000
[ASTRO-E]
- No.4 (#5) : 9 May 2003
[MUSES-C]
- No.5 (#6) : 10 July 2005
[ASTRO-E2]
- No.6 (#8) : 22 Feb. 2006
[ASTRO-F]
- No.7 (#7) : 23 Sep.2006
[SOLAR-B]



MPC Proprietary

* JAXA

* JAXA

ING : Inertial Navigation & Guidance

M-Vロケットに搭載された光ファイバジャイロ



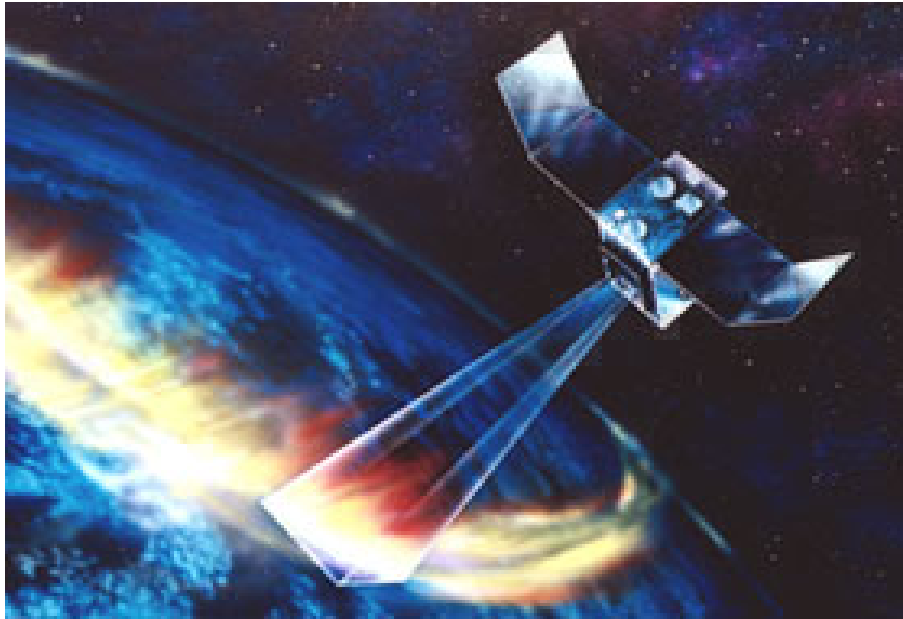
* 画像提供: 三菱プレシジョン株式会社

- **Type No.** : MFG-200 MOD- I
- **Size** : 105 × 105 × 46.5 (H) mm
- **Weight** : ≤ 950 g
- **Fiber Length** : 1,000 m
- **Scale Factor** : 1 kHz/(deg/sec)
- **Detection Range** : ≥ ±540 deg/sec
- **Bias Stability** : ≤ 0.03 deg/hr (1σ)
- **Operating Temperature** : -20 ~ +70 °C

References

1. Nasu et al., "Development of the FOG system for space",
Proc. of 25th Meeting on Lightwave Sensing Technology, pp.23-29, June 2000.

「れいめい」衛星に搭載された光ファイバジャイロ



* JAXA/池松均

Microsatellite Reimei

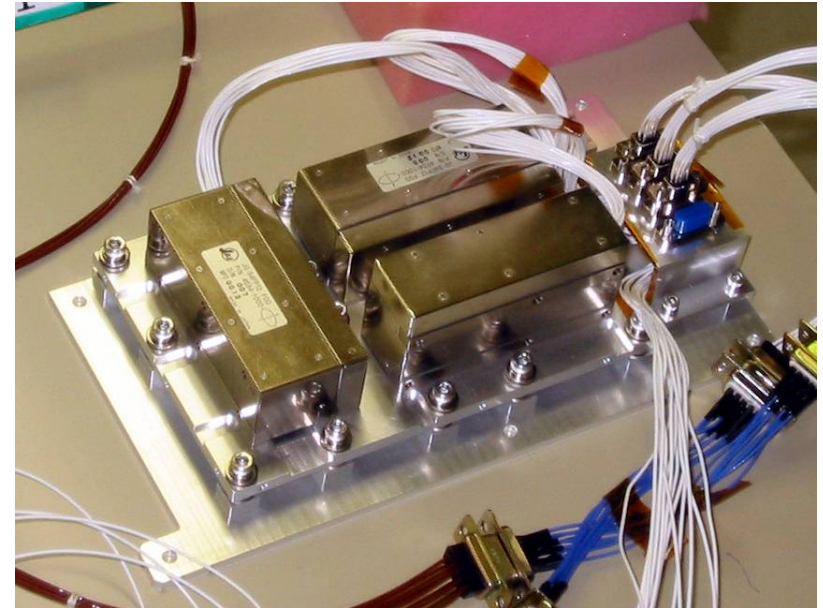
Purpose : Observation of Aurora Structure

Size : 72 × 62 × 62cm

Mass : 72kg

Ref(1) : <http://www.isas.jaxa.jp/j/index.shtml>

Ref(2) : OFS-18 poster session TuE3(10/26 PM)



* Sakai et al. (2006) "In-orbit Performance Evaluation of Temperature Controlled Small Fiber Optical Gyro on Microsatellite REIMEI," Proceedings of the 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, TuE3, p.1, Fig.2.
<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFS-2006-TuE3>

I-FOGs for Microsatellite Reimei

Size : 85 × 34 × 37mm

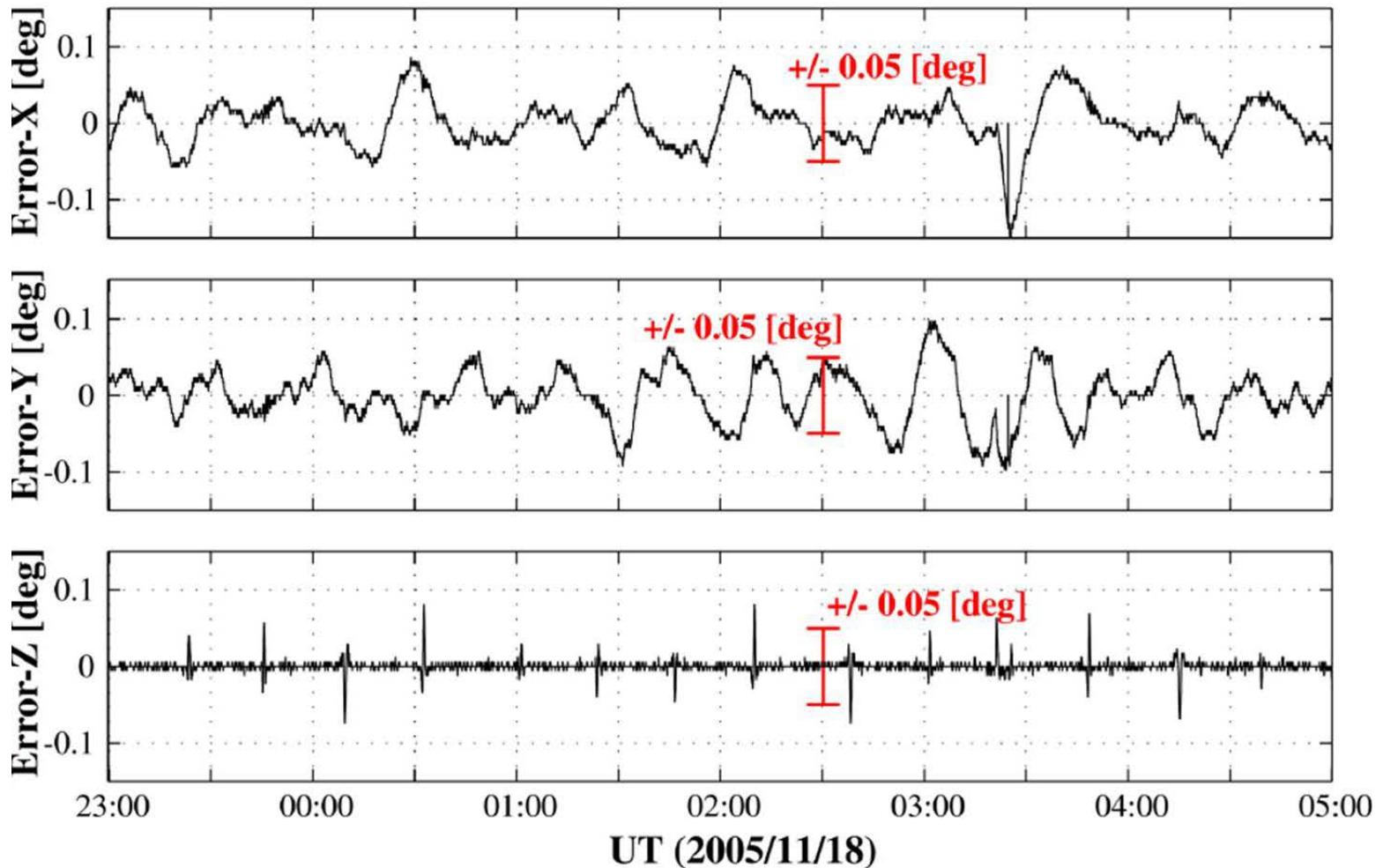
Drift : 0.1° /h (on orbit)

SF error : 0.05%

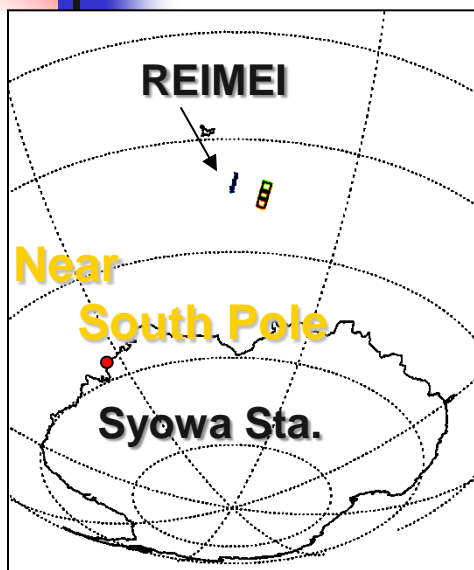
Closed loop I-FOG

「れいめい」衛星に搭載された光ファイバジャイロ

方位制御誤差



「れいめい」衛星が捉えたオーロラ画像



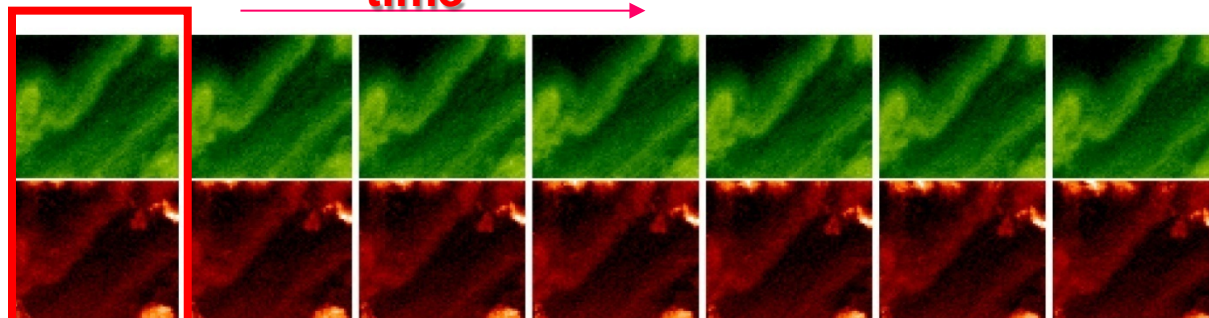
REIMEI/MAC observation
2005 Sep. 20

intensity in log₁₀ scale (kR)

Ch.2: 7
Ch.3: 7

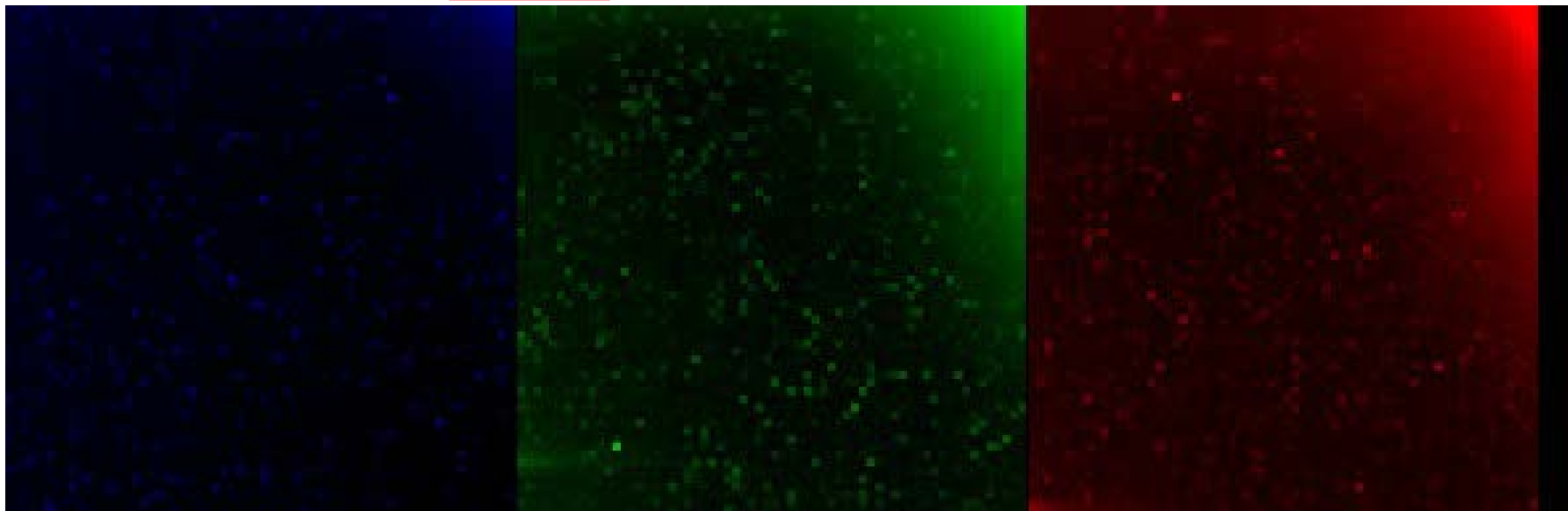


time →

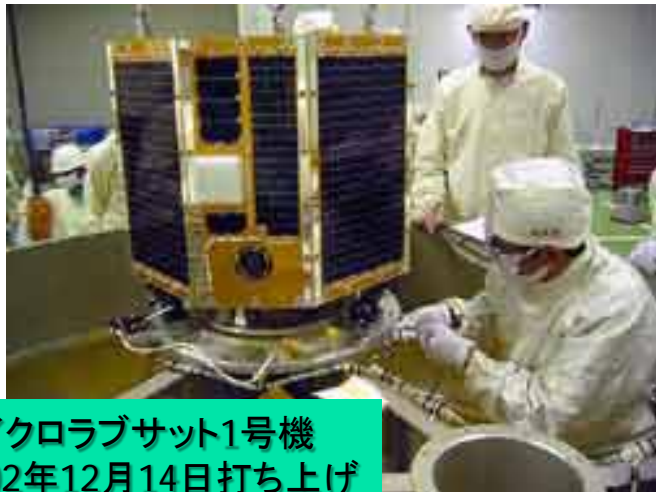


JT=19:17:46.9688 JT=19:17:47.0938 UT=19:17:47.1875 UT=19:17:47.3125 UT=19:17:47.4375 UT=19:17:47.5625 UT=19:17:47.6875

Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec Mode-S, Exp. 40msec.
Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm) Ch.2 (557.7 nm)
Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm) Ch.3 (670 nm)

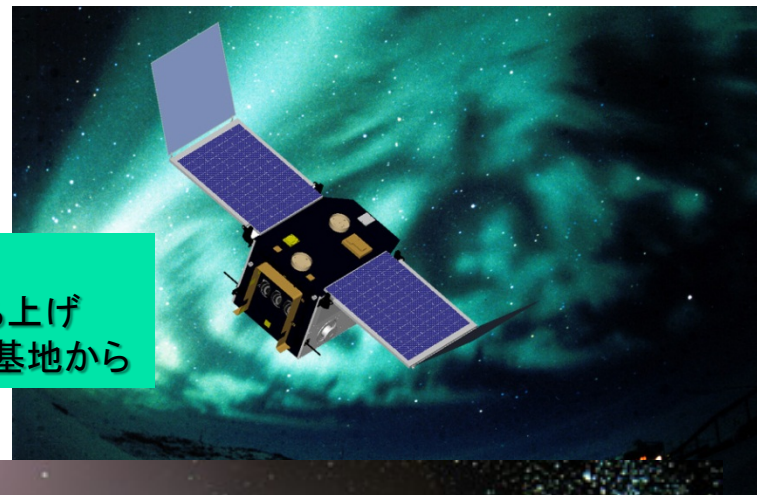


光ファイバジャイロを搭載した我が国の人口衛星(例)



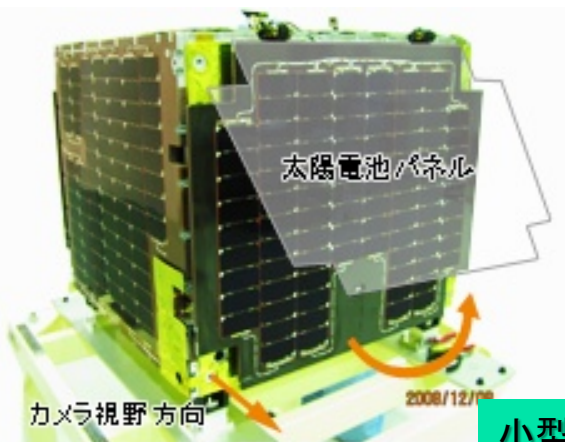
マイクロラブサット1号機
2002年12月14日打ち上げ
JAXA, H-IIA4号機

* JAXA



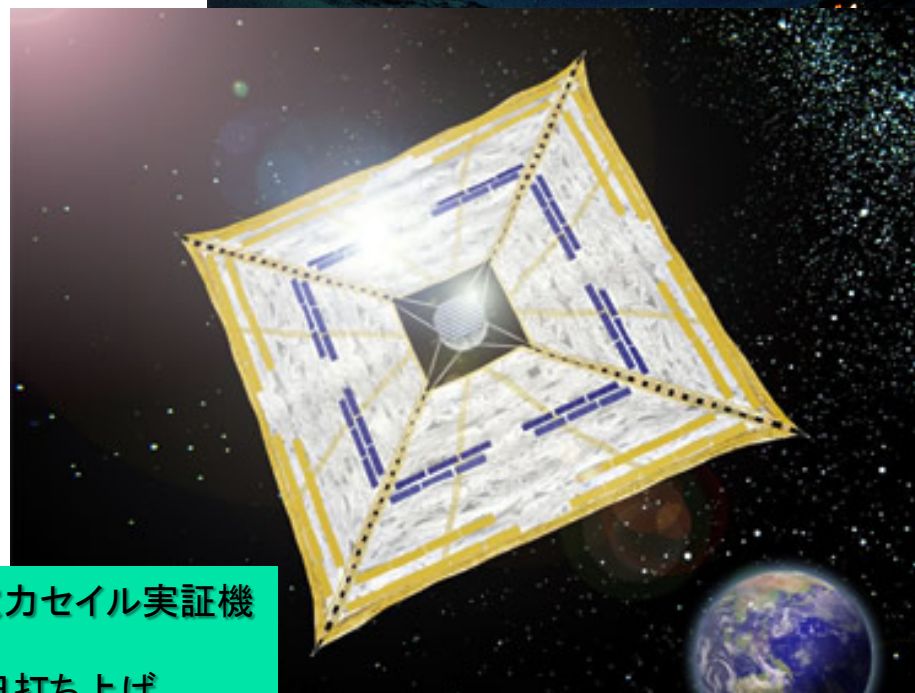
れいめい (INDEX)
2005年8月24日打ち上げ
JAXA, バイコヌール基地から

* JAXA



小型実証衛星1型 (SDS-1)
2009年1月23日打ち上げ

* JAXA



小型ソーラー電力セイル実証機
(IKAROS)
2010年5月21日打ち上げ
JAXA, H-IIA17号機

* JAXA

民生応用

- +カーナビゲーション(1990年代に10万台利用)
 - +自動走行車制御・ナビゲーション
 - +アンテナ・カメラ安定機構
 - +無人ラジコンヘリコプター制御・ナビゲーション
 - +無人ダンプトラック制御・ナビゲーション
 - +トラクター等農業機器制御・ナビゲーション
 - +クレーン制御
 - +管路ルート計測器
 - +ヒューマノイドロボット制御、等
-

光ファイバジャイロの実用化例： 民生応用



*

日立電線株式会社 (Hitachi Cable, Ltd.)

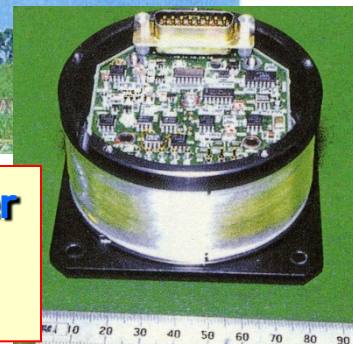
**Car navigation: 100,000 axes sold in late 1990.
Hitachi Cable, Ltd.**

+ Humanoid robot,
+ Head-mount display for VR
+ etc.



* 日本航空電子工業株式会社 (JAE)

**Camera stabilizer with I-FOG
JAE**



光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、1998年 p.74、図4「光ファイバジャイロの内部の様子」(日本航空電子工業提供) *



RC-Helicopter controller, Yammer

* ヤンマー株式会社

光ファイバジャイロの実用化例： 民生応用



I-FOG for camcorder stabilizer



3-axis camcorder stabilizer for Helicopter

Stability : $5\mu\text{rad}$

Ref: Proc. OFS-15 2002

光ファイバジャイロの実用化例： 民生応用

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

ASIMO (Honda)の紹介映像

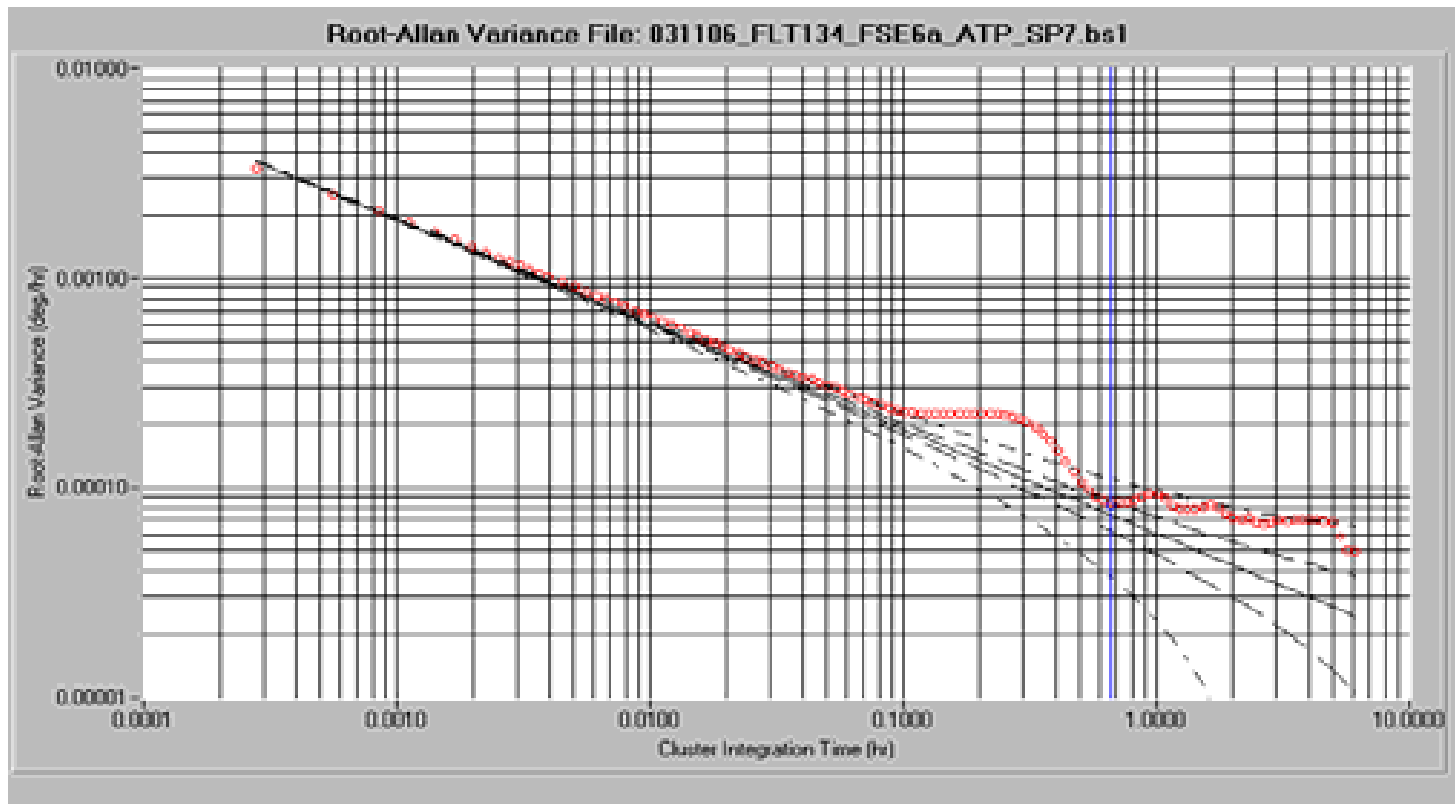
3-axis IMU for HONDA ASIMO

- Small size I-FOG and accelerometer
- High speed data communication

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を
削除しました。

ASIMO (Honda)の写真

光ファイバジャイロの超高性能化



* Divakaruni and Sanders (2006) "Fiber Optic Gyros: A Compelling Choice for High Precision Applications," 18th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-18), MC2, p.4, Fig.3.

+ Angle random walk: $79\mu\text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$

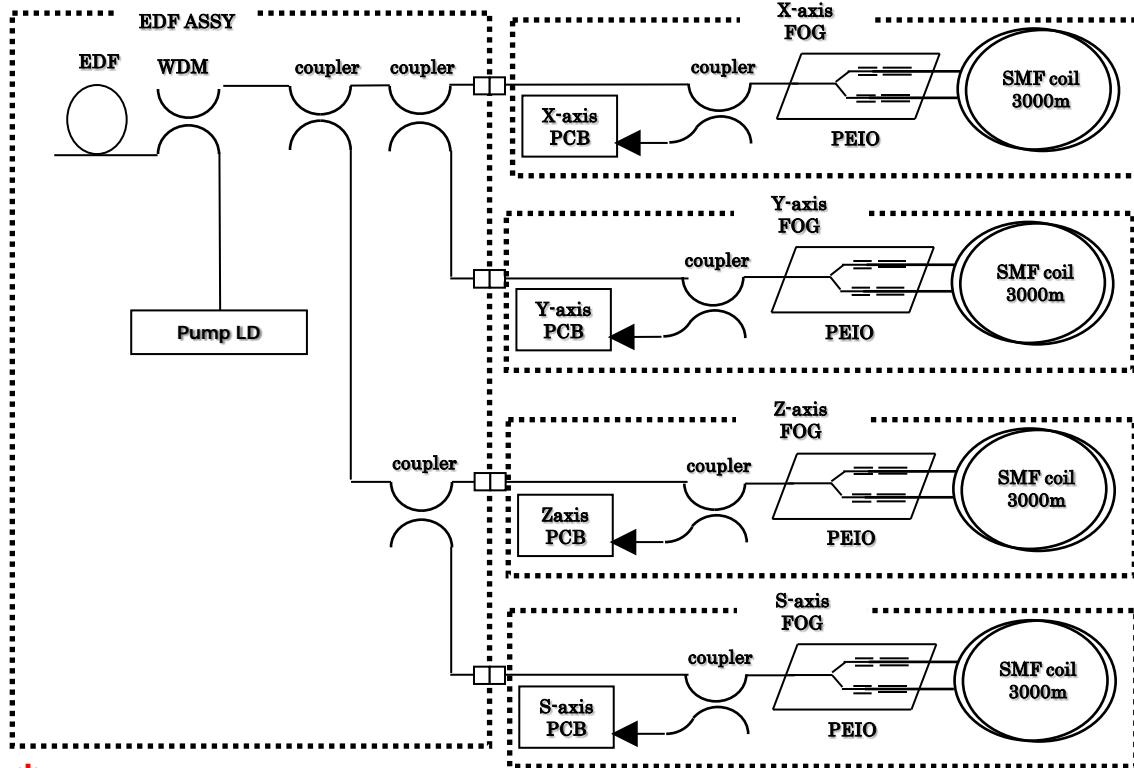
500年で1回転

+ Bias error: $0.00005\text{deg}/\text{hr}$

+ Scale factor error: 0.4ppm

Honeywell社

光ファイバジャイロの超高性能化

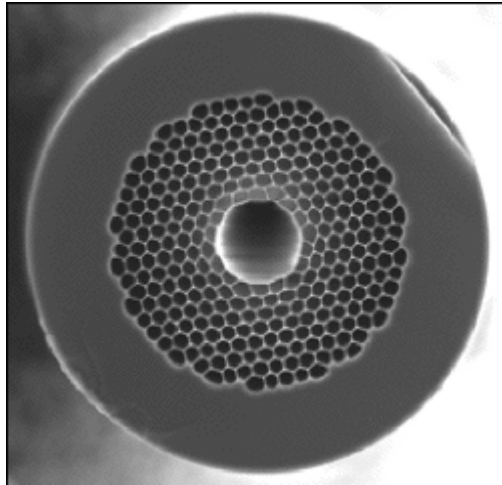


JAEs High performance closed loop I-FOG

- EDF ASE source : Power out of fiber=100mW
- L=3km, R=7cm , 4-axis/single light source configuration

★ ARW=0.0005deg/ \sqrt{h}

フォトニックバンドギャップ光ファイバによる 光ファイバジャイロの性能向上



* NKT Photonics

フォトニックバンドギャップファイバ

* 中空光ファイバ

* FOGの雑音要因が本質的に減少

レーリ-散乱

光カー効果

ファラデー効果

シュツペ効果

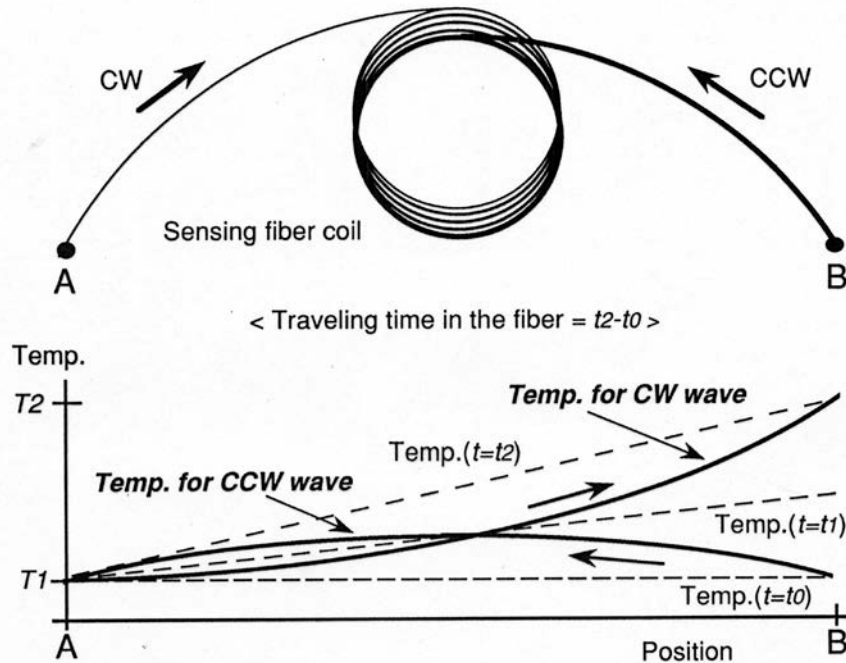
干渉方式光ファイバジャイロにおける新たな研究の展開
(スタンフォード大、など)

* 各種雑音の低減効果の実証実験が進展

* 高コヒーレンス光源の利用が可能との理論・実験！

新たなデバイスの登場は、新たなシステム技術の
アイデアを生む！

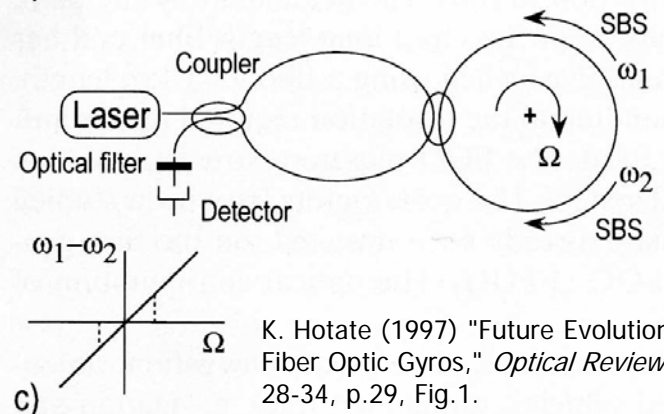
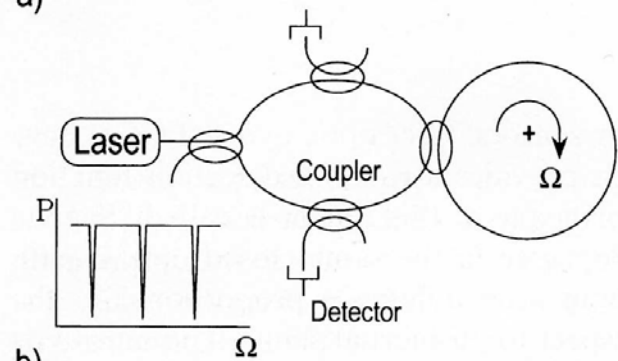
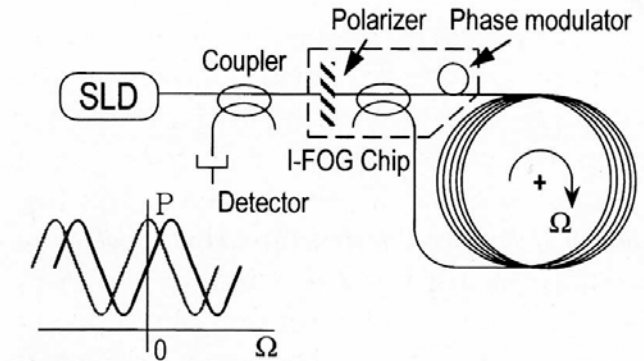
次世代光ファイバジャイロの研究



* Reprinted from *Optical Fiber Technology*, 3(4), K. Hotate, Fiber Sensor Technology Today, 356-402, p.365, Fig.4, Copyright 1997, with permission from Elsevier.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520097902303>

温度変動誘起ドリフト: 光ファイバコイルの
 温度分布が時間変動すると大きなドリフト
 「シュツペ効果」

短尺光ファイバコイルで高感度を狙う
 共振方式(b)とブリルアン方式(c)



* K. Hotate (1997) "Future Evolution of Fiber Optic Gyros," *Optical Review* 4(1A): 28-34, p.29, Fig.1.

共振方式光ファイバジャイロ

大学の研究では、人と違うことをやらなければならない！

エタロン効果によるレーザの分解能向上の可能性

光ファイバの伝送損失は回折損失に起因する

$$\alpha = \frac{2\pi R}{\lambda c} \Omega \quad (4)$$

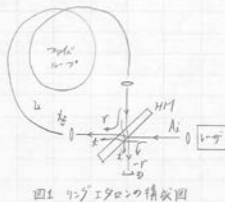


図1 レゾナタの構成図

この場合、光ファイバの伝送損失は回折損失に起因する。この場合、光ファイバの伝送損失は回折損失に起因する。この場合、光ファイバの伝送損失は回折損失に起因する。

回折損失の構成図のスケッチは、水色カギエタロンに似ている。回折損失の構成図のスケッチは、水色カギエタロンに似ている。

$$A_r = -r A_i \quad (1)$$

回折損失による伝送損失の構成図

$$A_1 = k_1 k_2 e^{i\phi} A_i \quad (2)$$

$$A_2 = k_3 k_4 e^{i\psi} A_i \quad (3)$$

$$A_3 = k_5 k_6 e^{i\theta} A_i \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{k_1}{r} \cdot (r k_2 e^{i\phi})^2$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n L + \alpha \phi$$

ここで、 $\alpha = \frac{2\pi R}{\lambda c} \Omega$ 、受光器

$$A_0 = A_r + \sum_{i=1}^n A_i$$

$$= -r A_i + \frac{k_1}{r} \cdot \frac{r k_2 e^{i\phi}}{1 - r k_2 e^{i\phi}}$$

$$= A_i (-r + k_2^2) \frac{1}{1 - r k_2 e^{i\phi}}$$

従って、レーザ出力は受光器に到達する

$$f(\lambda, \Omega) = \frac{A_0 A_i}{A_i A_i} = \frac{r k_2^2 e^{i\phi}}{1 - r k_2 e^{i\phi}}$$

ここで、 $\alpha = \frac{2\pi R}{\lambda c} \Omega$

$$k_2^2 = r^2 \cdot \frac{1}{1 - r k_2 e^{i\phi}}$$

$$f(\lambda, \Omega) = \frac{k_2^2 e^{i\phi} - r}{1 - r k_2 e^{i\phi}}$$

$$= \frac{k_2^2 e^{i\phi} - r}{1 + r k_2^2 - 2 r k_2 \cos \phi}$$

$$= \frac{(k_2 - r)^2 + 4 r k_2 \sin^2 \frac{\phi}{2}}{(1 - r k_2)^2 + 4 r k_2 \sin^2 \frac{\phi}{2}} \quad (10)$$

$$r = k_2 \quad (11)$$

$$f(\lambda, \Omega) = \frac{4 R \sin^2 \frac{\phi}{2}}{(1 - R)^2 + 4 R \sin^2 \frac{\phi}{2}} \quad (12)$$

$$R = r^2 - r k_2 \quad (13)$$

これは、レーザの共振波長である。この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

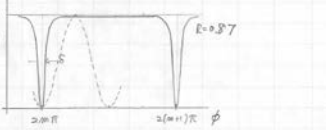


図2 $f(\lambda, \Omega)$ のグラフ

$$\frac{2\pi}{\lambda} n L = 2m\pi + \delta \quad (14)$$

ここで、 δ は、レーザの共振波長と、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ の共振波長のずれである。

この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

$$F(\Omega) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda, \Omega) d\lambda \quad (15)$$

ここで、 λ_1 と λ_2 は、レーザの共振波長の範囲である。

$$f(\lambda, \Omega) = \frac{d\phi}{d\lambda} + \frac{2\pi n L}{\lambda^2} \quad (16)$$

$$d\lambda = -\frac{\lambda^2}{2\pi n L} d\phi \quad (17)$$

この場合、 ϕ は、レーザの共振波長である。

この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

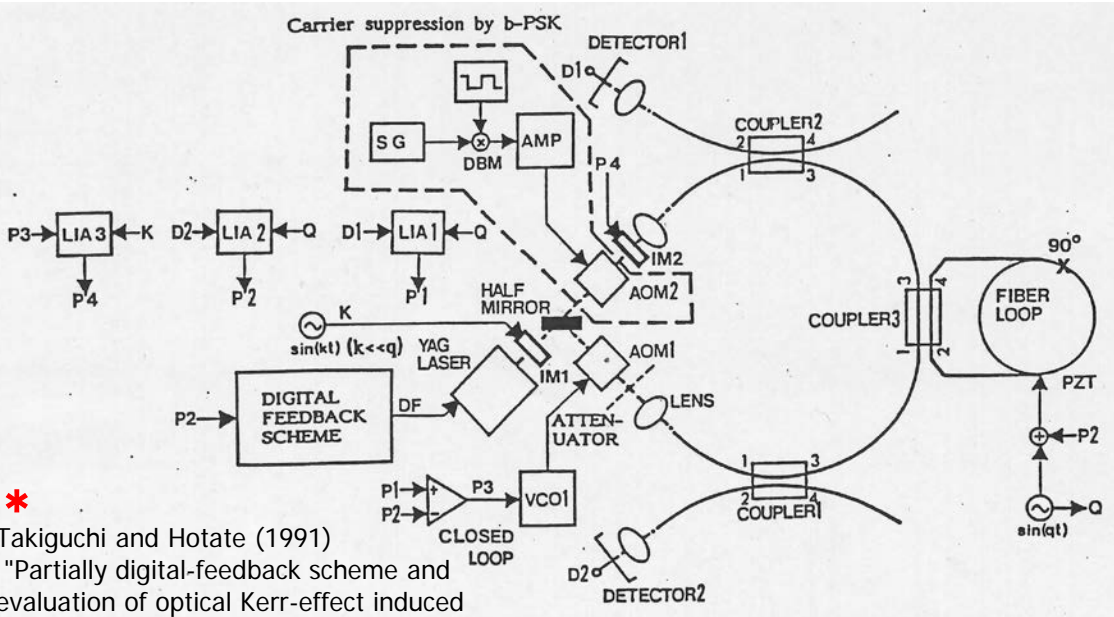
この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

この場合、レーザの共振波長は、 $\lambda = \frac{2\pi R}{\Omega}$ である。

研究室での打ち合わせ会資料
1979年6月13日
「エタロン効果によるレーザジャイロの分解能向上の可能性」

共振方式光ファイバジャイロ

まさに、システムフォトリクス !



* Takiguchi and Hotate (1991)
 "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," *Photonics Technology Letters* 3(7): 679-681, p.679, Fig.1.

高コヒーレンス光源が必須

新たな雑音対策が必要

全ての雑音対策を検討・考案 !

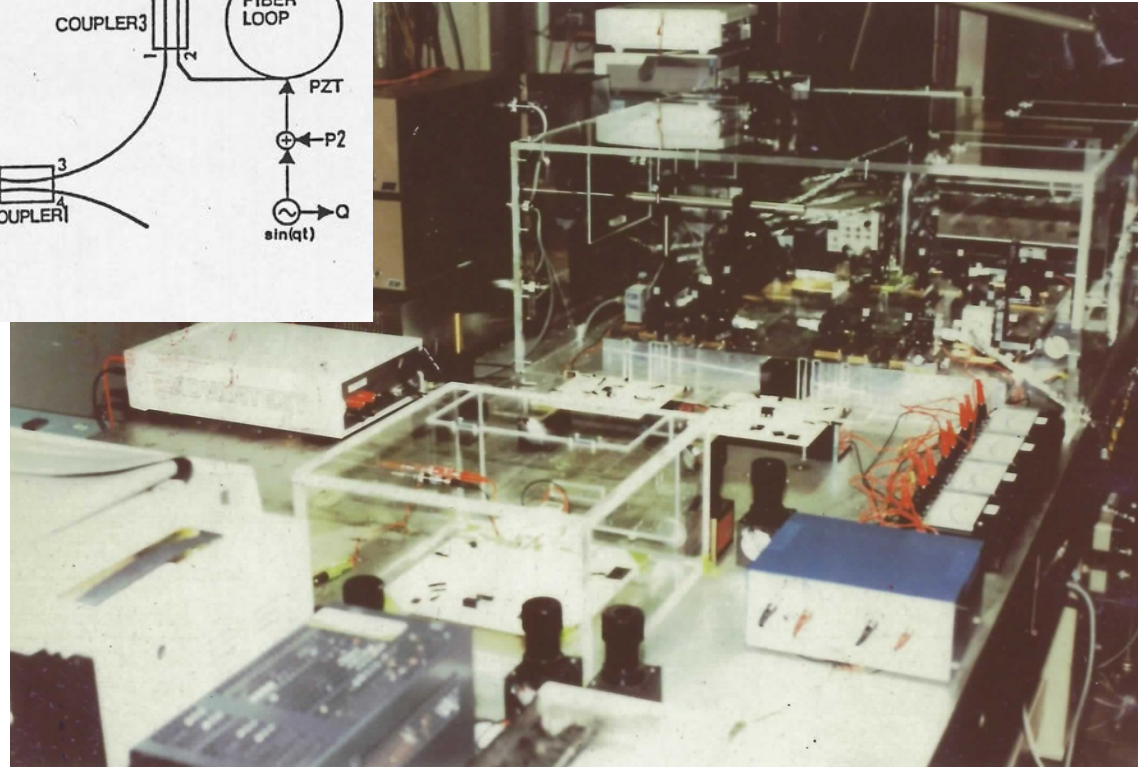
* レーザ散乱

* 偏波変動

* 非線形光学効果

* 地磁気によるファラデー効果

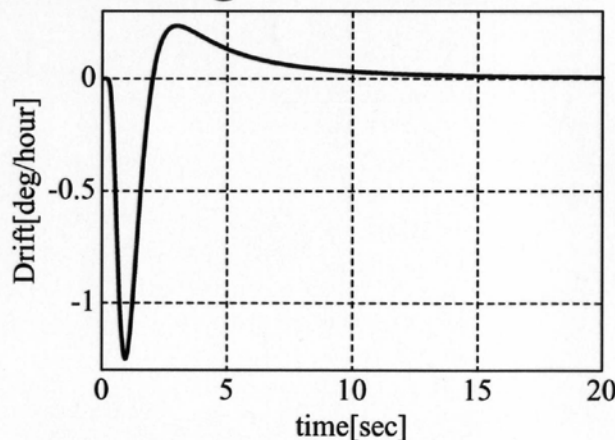
* 空間不均一な温度変動



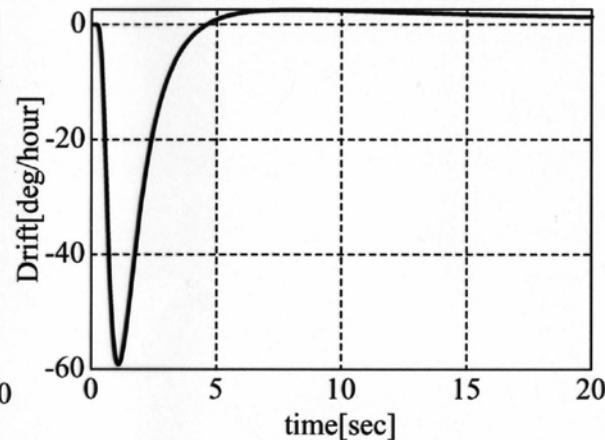
シュツペ効果が低減可能なことを証明

干渉方式

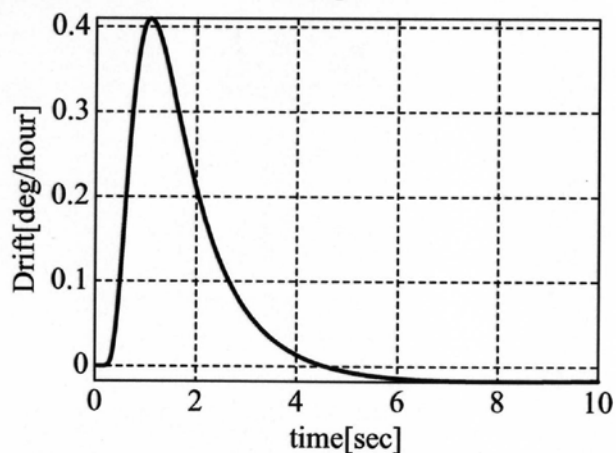
QAD winding <inside>



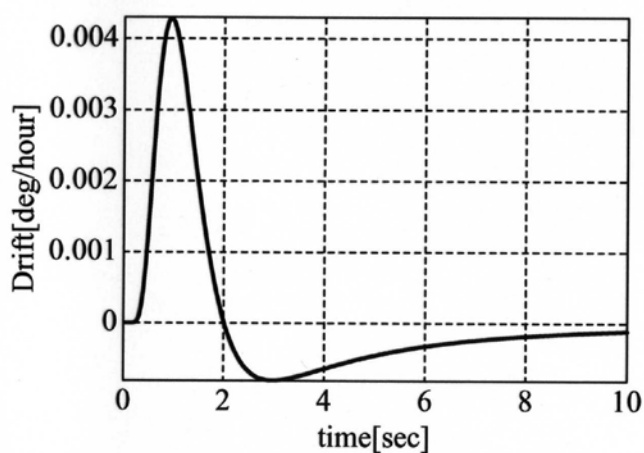
<outside>



1-layer QAD <top>



<bottom>



Hotate and Kikuchi (2001)
"Analysis of the thermo-optically induced bias drift in resonator fiber optic gyro," *Proceedings of SPIE 4204, Fiber Optic Sensor Technology II*, 81-88, p.84, Figs.5, 6; p.87, Figs.14, 15.

共振方式

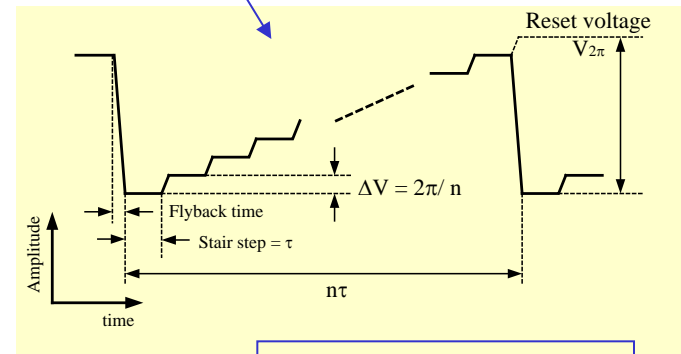
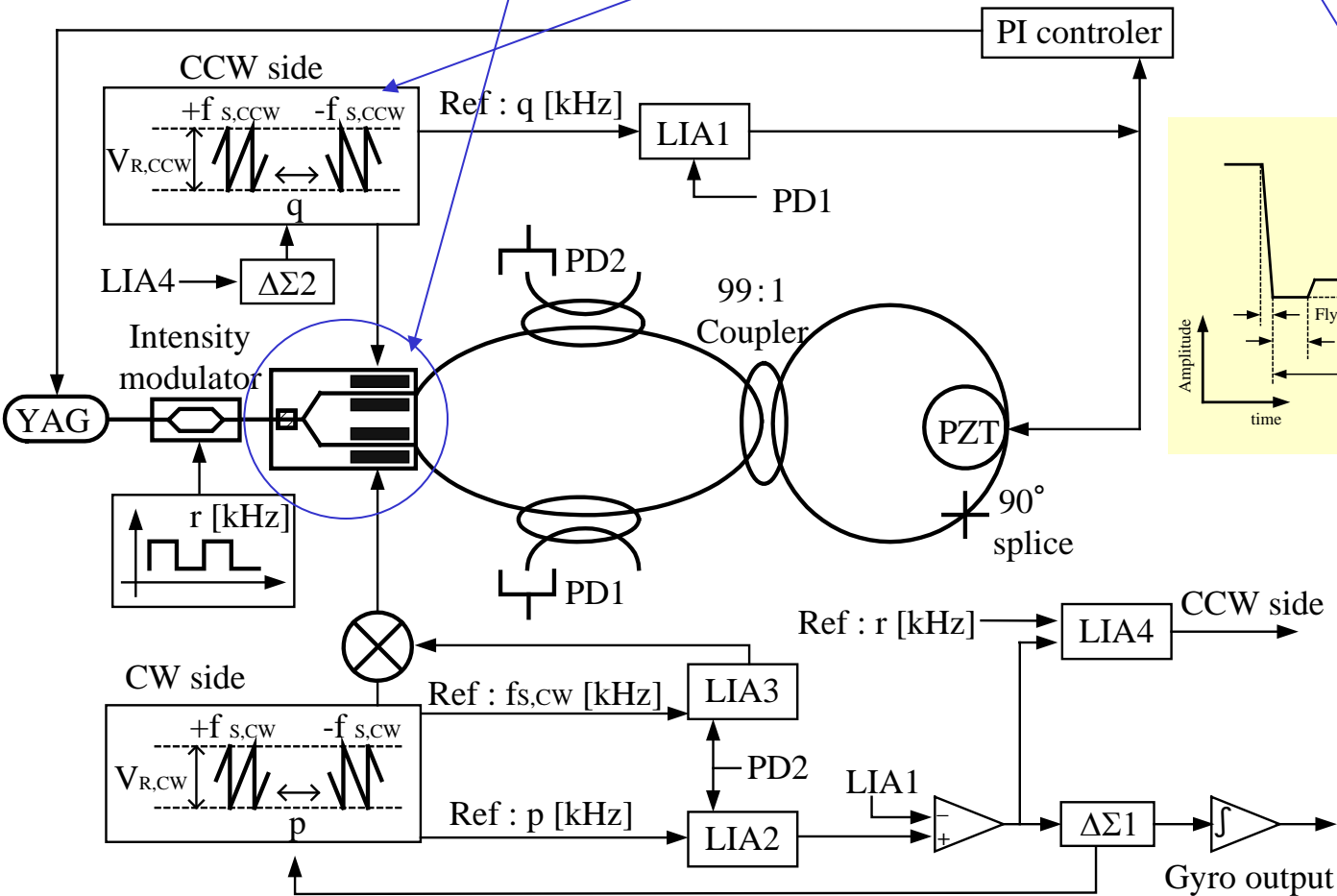
*

*

デジタルゼロダイン R-FOG

I-FOG用光集積回路を活用

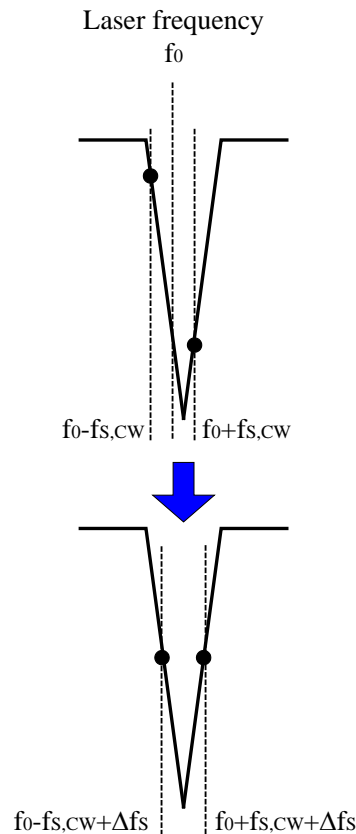
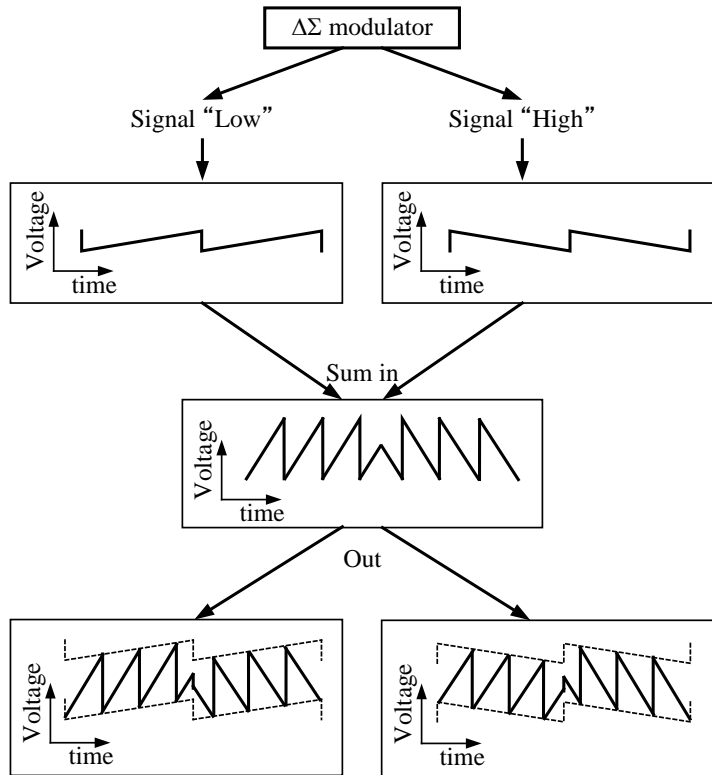
デジタルゼロダイン波形



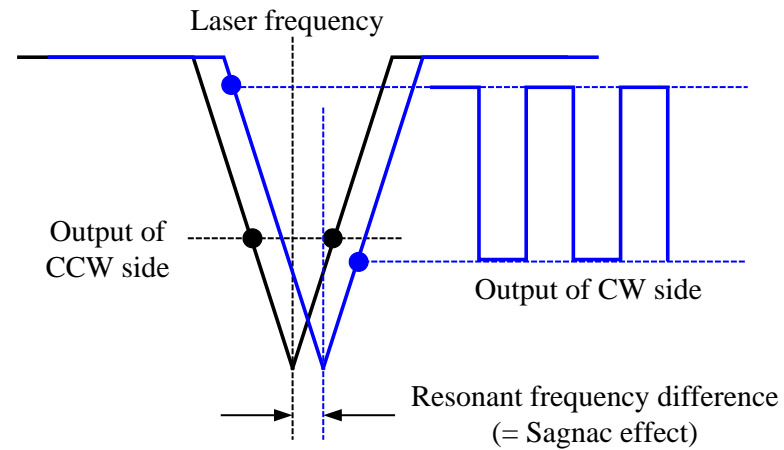
位相変調によって
等価的に周波数
シフトを実現 !!

デジタルセロダイン R-FOG

- ・長周期デジタルセロダイン変調により光中心周波数をシフト
- ・量子化誤差はデルタ変調・オーバーサンプリングで克服



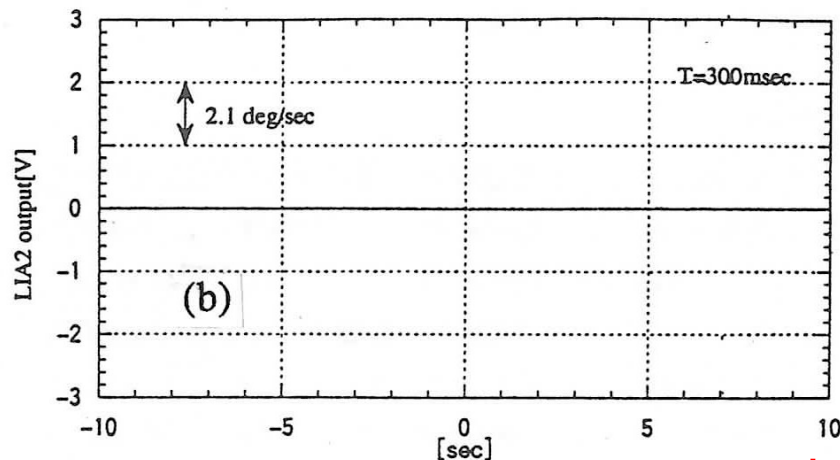
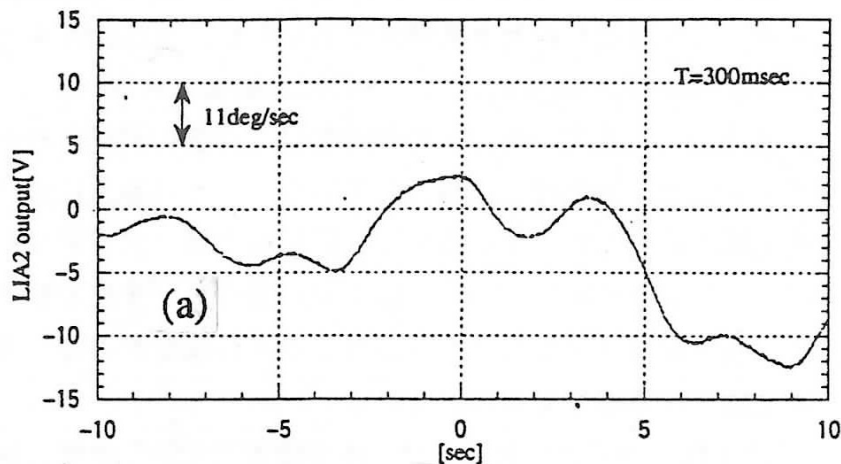
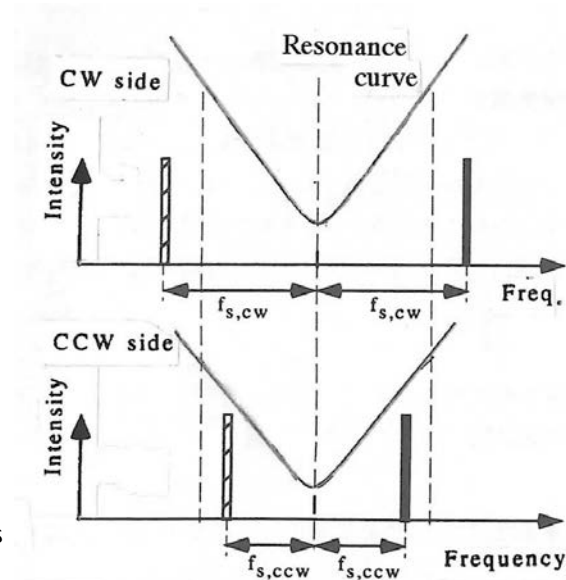
交互デジタルセロダイン変調により
共振周波数の変化を捕捉する



デジタルセロダインR-FOGでの雑音除去

- ・左右両回り光には同一の周波数成分が無い
- ・後方散乱が雑音として働かない

Hotate and Hayashi (1999) "Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation: Method to reduce the noise induced by the backscattering and closed-loop operation using digital signal processing," *Proceedings of SPIE 3746*, International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-13), Kyongju, Tu-4-1, pp.104-107, <Invited>, p.106, Figs.3, 4.



デジタルセロダイン方式による後方散乱誘起雑音の低減効果(右図)

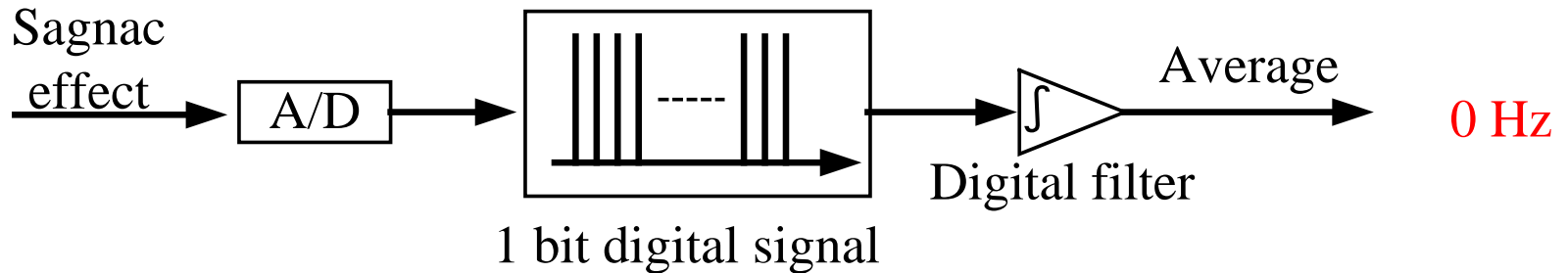
オーバーサンプリングによる

周波数分解能の向上

“High” $\rightarrow \Delta f = + 3.7\text{kHz}$ “Low” $\rightarrow \Delta f = - 3.7\text{kHz}$

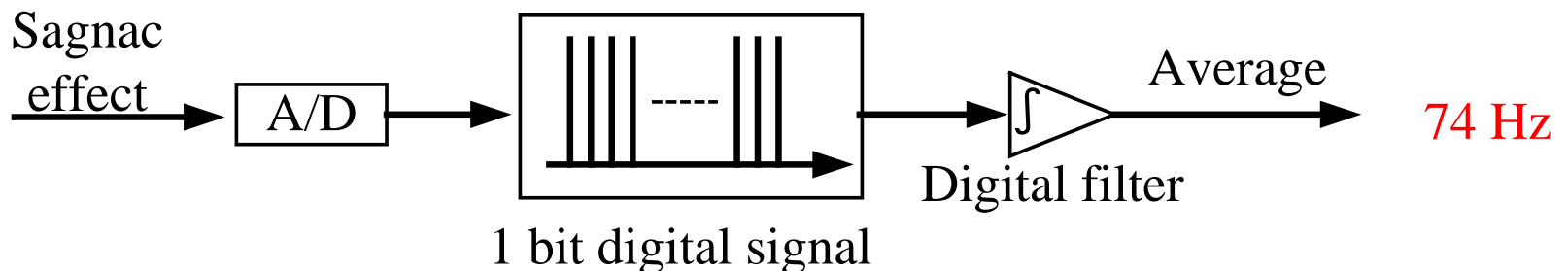
Difference of resonant frequency = 0 Hz

High : Low = 50 : 50

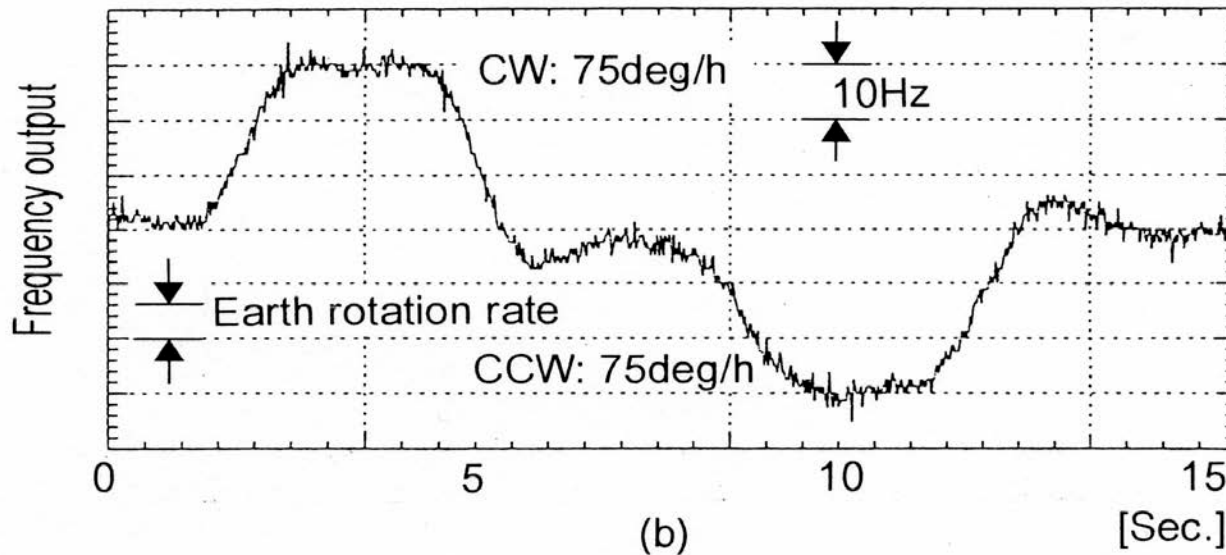
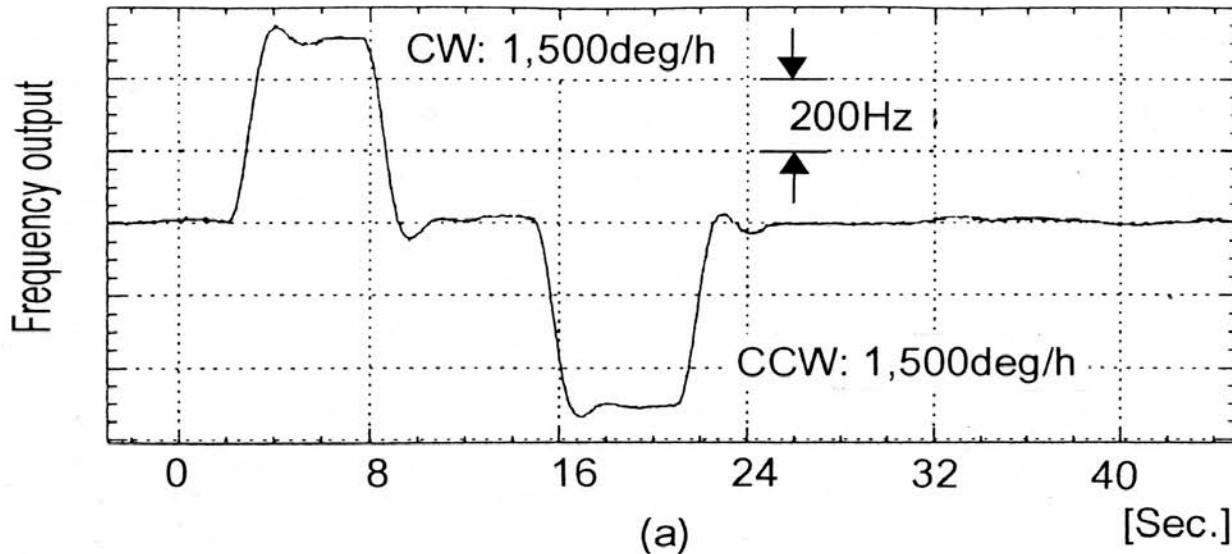


Difference of resonant frequency = 74 Hz

High : Low = 51 : 49



オーバーサンプリングによる実験結果

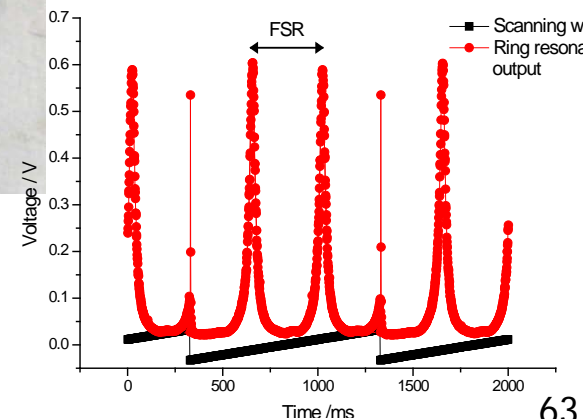
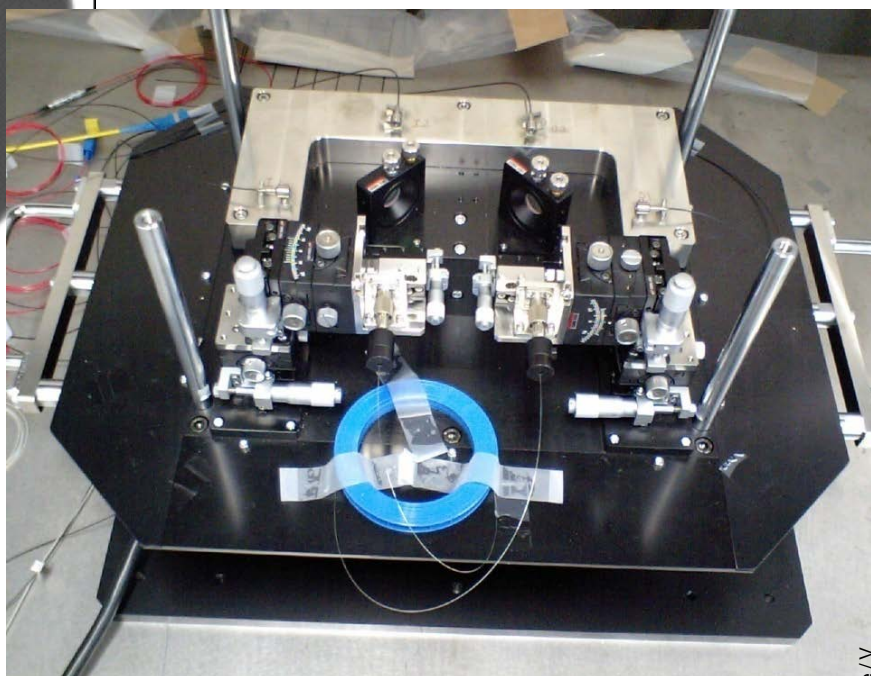
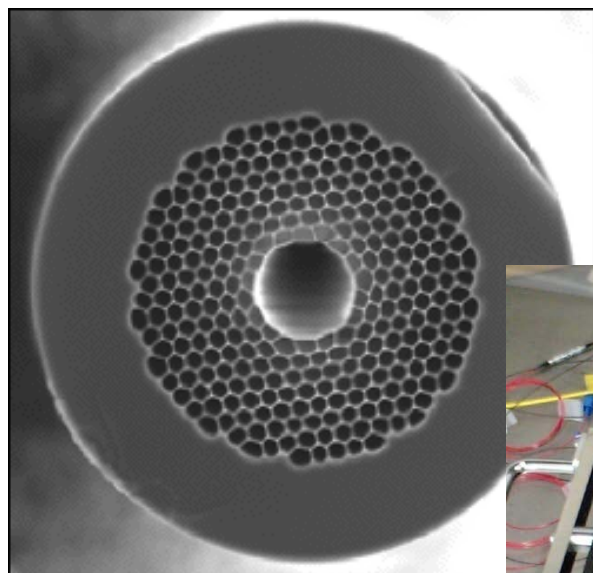


Hotate and Hayashi (1999)
"Resonator fiber optic gyro
using digital serrodyne
modulation: Method to
reduce the noise induced by
the backscattering and
closed-loop operation using
digital signal processing,"
Proceedings of SPIE 3746,
International Conference on
Optical Fiber Sensors (OFS-
13), Kyongju, Tu-4-1,
pp.104-107, <Invited>,
p.107, Fig.9.

フォトニック結晶ファイバによるR-FOG

フォトニックバンドギャップファイバ

- ・中空ファイバ
- ・散乱、非線形、ファラデー効果、偏波変動、温度変動の全ての係数がガラスファイバより数桁小さい



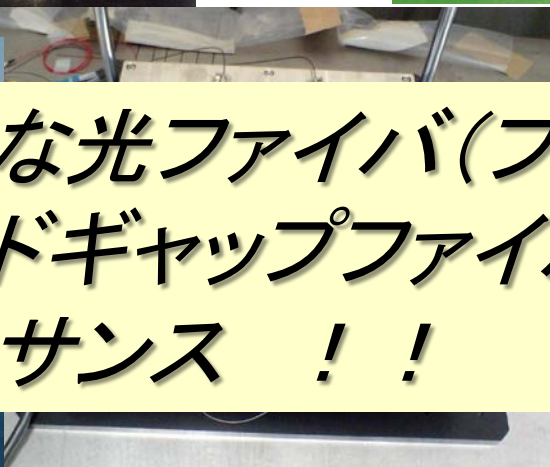
* NKT Photonics

光ファイバジャイロ

* ヤンマー株式会社

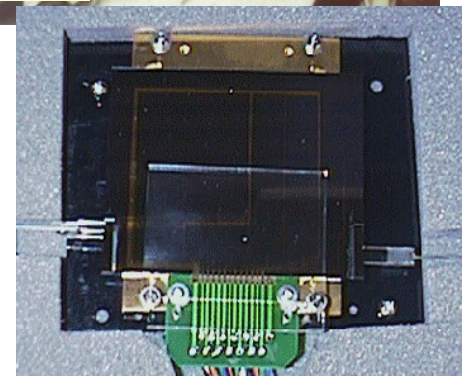


新たな光ファイバ(フォトリック
バンドギャップファイバ)による
ルネサンス !!



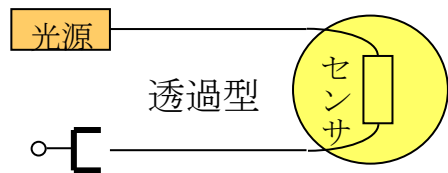
- ・システム構成にいろいろな
アイデアが盛り込める
- ・極限追求型の研究対象
- ・面白い !!
- ・システムフォトニクス !!

* JAXA



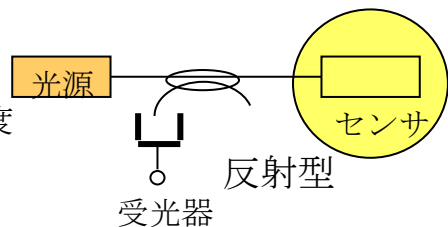
次回予告: 光ファイバセンシング技術の方式分類

電圧・電界
電流・磁界
温度
加速度、等

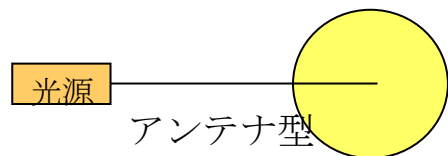


(a) (伝送路としての利用法)

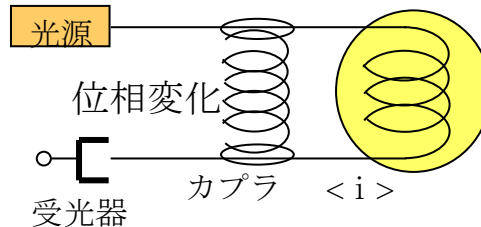
音響
血中O₂
マイクロ波強度
温度、等



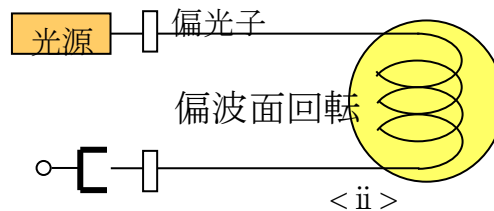
高電圧
インパルス
温度、等



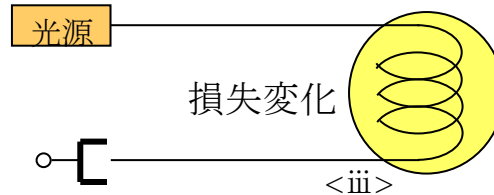
(b) (センサとしての利用法)



温度
圧力
ひずみ
磁界
音圧、等

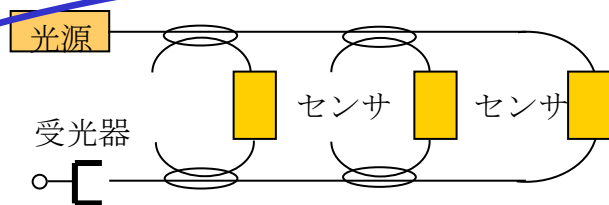


電流
磁界、等
(ファラデー効果)

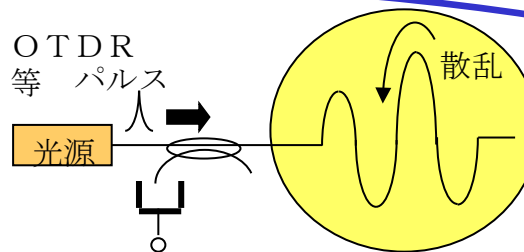


音圧
(マイクロベンド)
ガス濃度
(エバネッセント波)
放射線、等

歪み
温度
圧力
音響、等



OTDR
等 パルス



温度分布
ひずみ分布
側圧分布
異常点分布
水漏れ・油漏れ分布
等

(c) (多点型・分布型光ファイバセンサ) 分布型

痛みの分かる材料・構造・通信網の為の光ファイバ神経網

Bridges

F.O. Nerve Systems

ガタガタ!!

Mountains

Space crafts

Aircrafts

Airports

River Levee

Highways

Slopes

Buildings

Tunnels

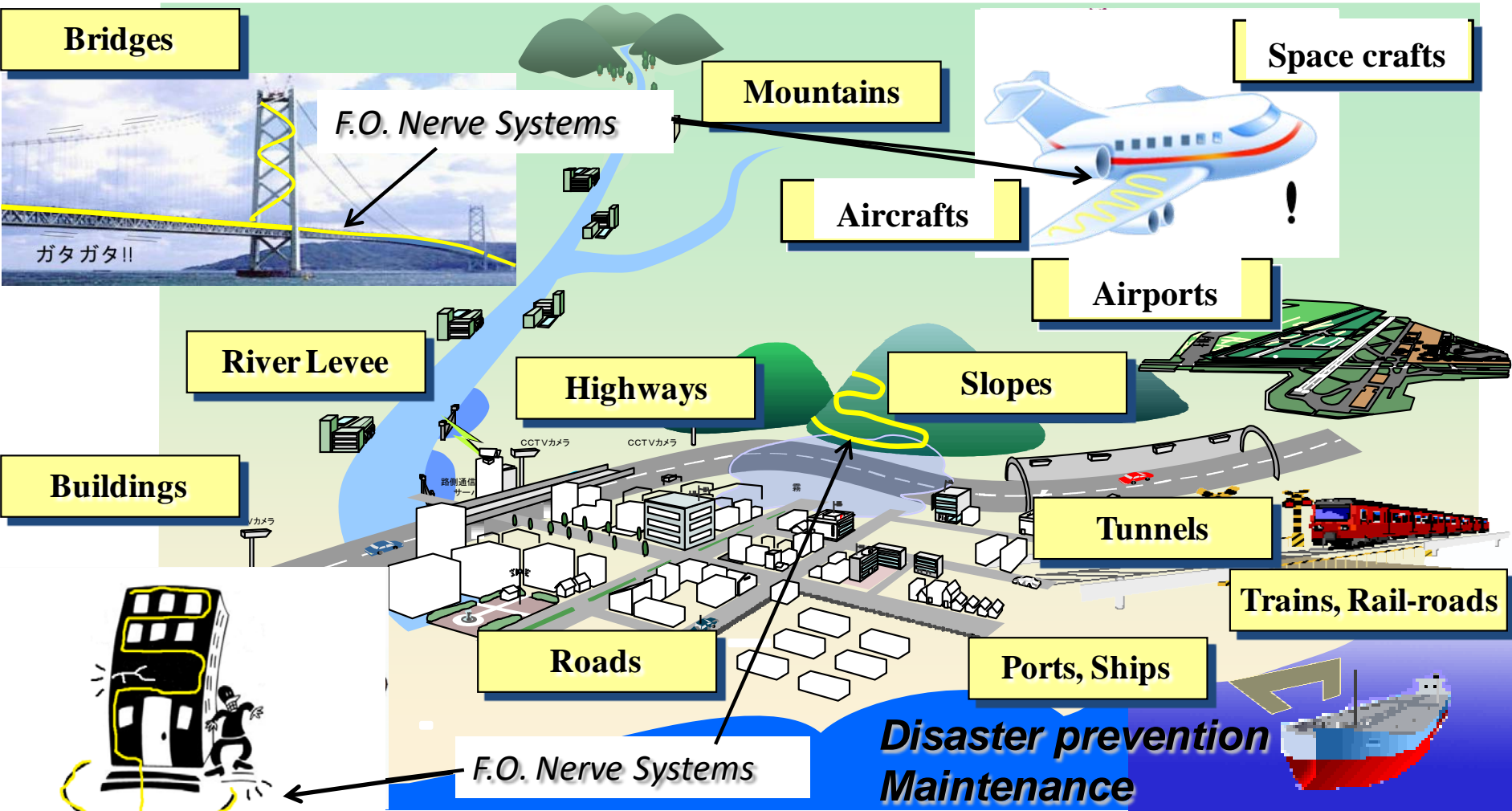
Trains, Rail-roads

Roads

Ports, Ships

F.O. Nerve Systems

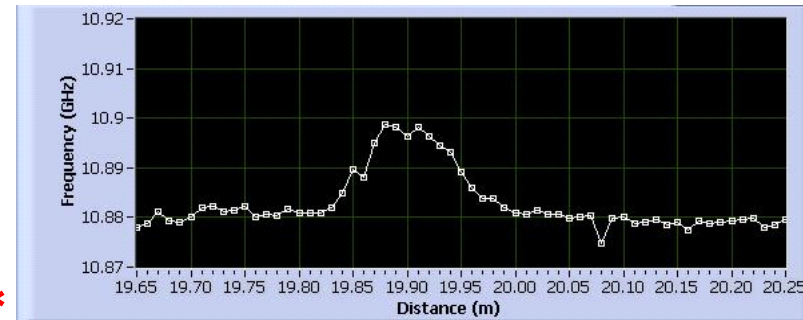
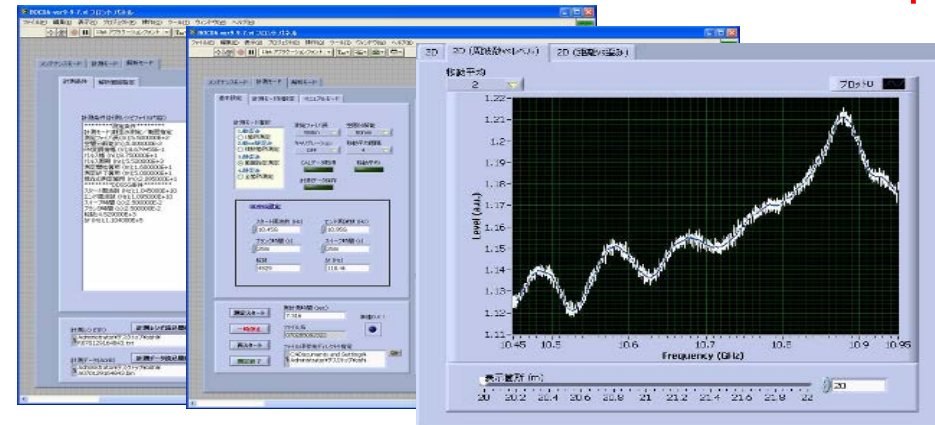
Disaster prevention
Maintenance



光ファイバ神経網システムのプロトタイプ BOCDA方式



鎗孝志・石岡昌人・長井謙宏・足立正二・飯田力弘・熊谷芳宏・保立和夫・櫻井建夫(2007)「航空機搭載型BOCDA分布型光ファイバセンサ」『第39回光波センシング技術研究会論文集』163-170、p.167、図6、8(a)および発表スライド



空間分解能: 5cm、測定ファイバ長: 500m、
測定速度: 10 times/sec

Yokogawa Electric
Mitsubishi Heavy Industry
The University of Tokyo
RIMCOF
Lightwave Sensing Technology
2007. 6

*

*

ビジネスジェットMU-300のヘルスマニタリング

*Mitsubishi Heavy
Industry: MU-300*

*Nov. 1, 2007
Twice Flights !!*



*Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF*

- * Yari et al. (2008) "Aircraft structural health monitoring using on-board BOFDA system," *Proceedings of SPIE* 6933, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2008, 69330S, Fig.5.

ビジネスジェットMU-300のヘルスマニタリング



*Business Jet, MU-300,
with the Fiber Optic
Nerve System
(BOCDA system)*



**Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF**

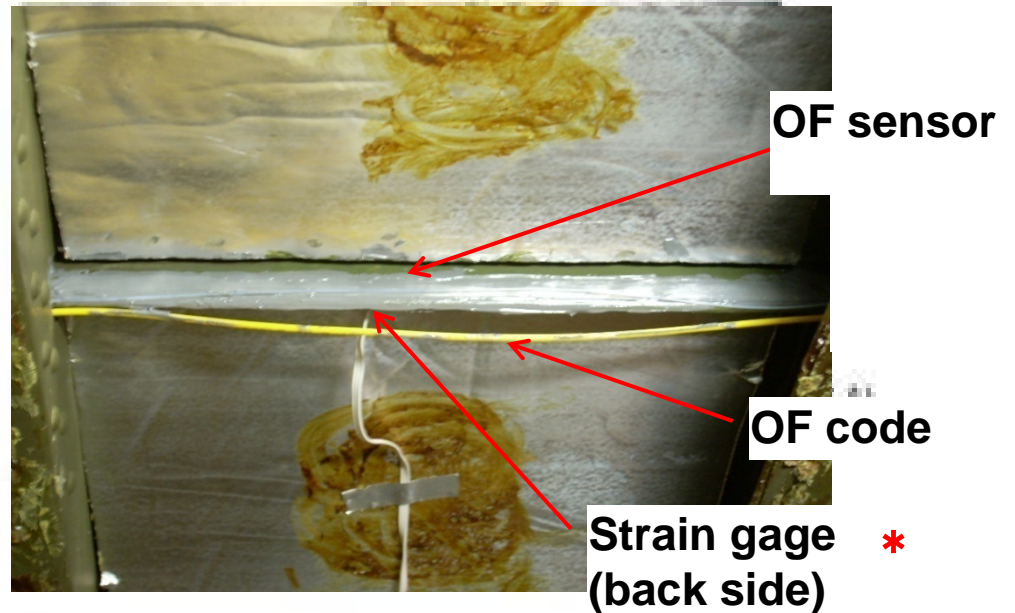


T. Yari, "Strain Monitoring by the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Method," Symposium on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures, Tokyo, Jan. 21, 22, 2008. 発表スライド
本研究は、経済産業省「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「構造健全性診断技術開発」の一環として、次世代金属・複合材料研究開発協会(現:素形材センター)とMHIの契約に基づき実施したものである。

ビジネスジェットMU-300のヘルスマニタリング



Monitoring portion
(Fuselage upper panel)



Monitoring portion
(close up)

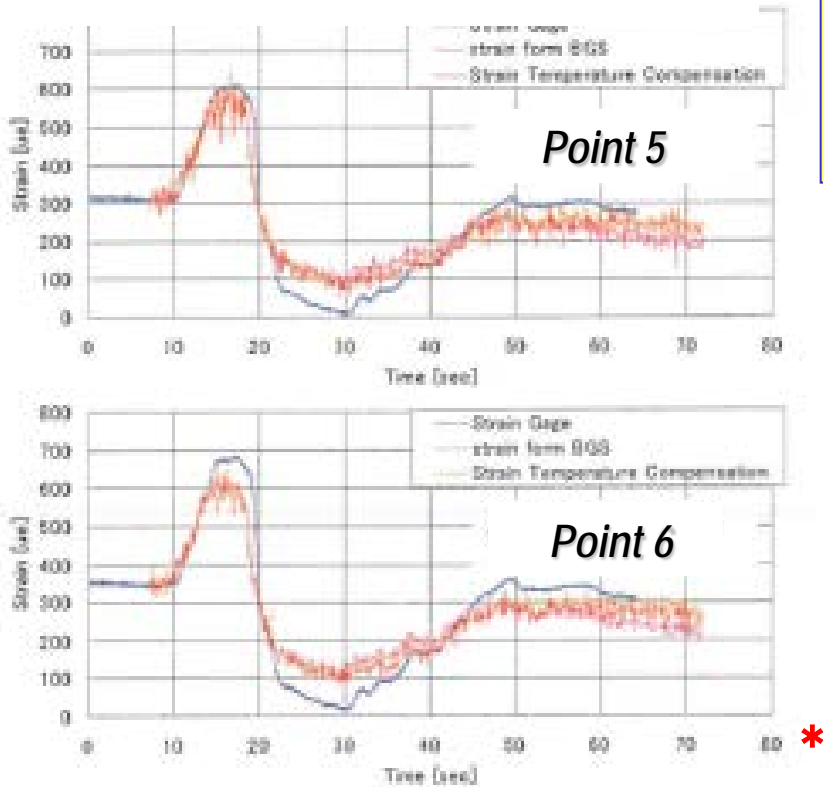
MU-300 with fiber optic nerve system

Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF

T. Yari, "Strain Monitoring by the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Method," Symposium on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures, Tokyo, Jan. 21, 22, 2008. 発表スライド

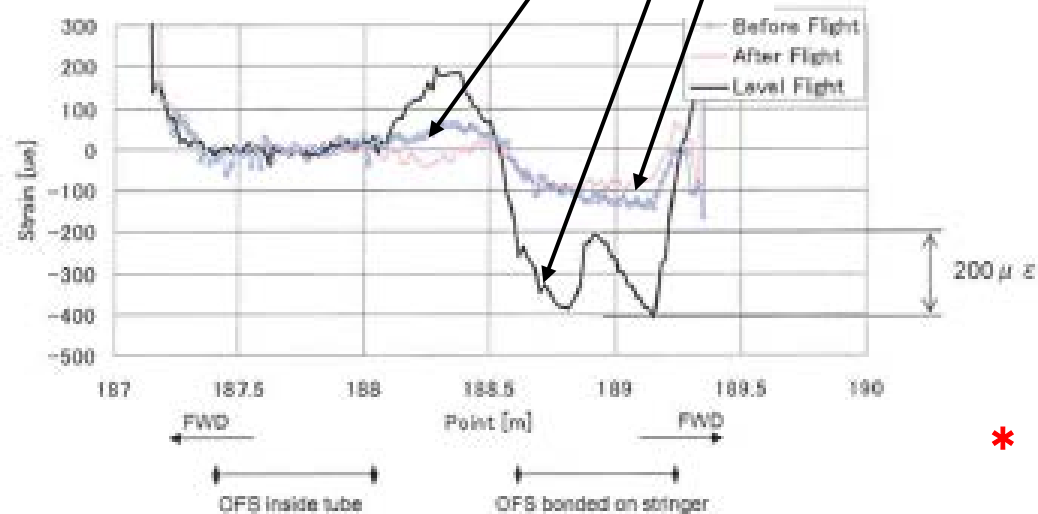
本研究は、経済産業省「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「構造健全性診断技術開発」の一環として、次世代金属・複合材料研究開発協会(現:素形材センター)とMHIの契約に基づき実施したものである。

ビジネスジェットMU-300のヘルスマニタリング



Multi-point and Dynamic strain sensing
pull-up 2.7G

Distributed strain sensing
Before flight
Level flight
After flight



Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF



Deformation of skin panel due to the cabin pressure !!

T. Yari, "Strain Monitoring by the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Method," Symposium on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures, Tokyo, Jan. 21, 22, 2008. 発表スライド
本研究は、経済産業省「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「構造健全性診断技術開発」の一環として、次世代金属・複合材料研究開発協会(現:素形材センター)とMHIの契約に基づき実施したものである。

痛みの分かる材料・構造・通信網の為の光ファイバ神経網

Bridges

Space crafts

Mountains

F.O. Nerve Systems

Aircrafts

Airports

River Levee

Highways

Slopes

Buildings

Tunnels

Trains, Rail-roads

Roads

Ports, Ships

Disaster prevention
Maintenance

F.O. Nerve Systems

