

光がモノを壊す時代— 光ファイバ内バブル生成と 光ヒューズの話

物質・材料研究機構
光材料センター

轟 眞市

Slide 1

21 世紀に入ってレーザー光源の高出力化（～kW）が進んでいます。光導波路と組み合わせた新しいアプリケーションが続々と出現する一方で、高強度光を安全に取り扱う技術が求められています。数 W の連続光によって光ファイバ（シリカガラス製）が連鎖的にメルトダウンしてしまう現象（ファイバフューズ）とその基礎研究（バブル生成のからくり）を紹介した後、過剰光入力に反応して自律的に回線を切断する素子である光ヒューズを、低軟化点ガラスを使って実現した話をします。

NIMS イブニングセミナー (55)
「人と光の新たな関わりに向けた材料からの取り組み」
H 20 年 4 月 4 日 (金) 15:00～18:00
独立行政法人 物質・材料研究機構 東京会議室

背景 光がモノを壊す時代

- 光源の高出力化 (数百 W～数十 kW)
⇒ 多結晶レーザー、ファイバレーザー
- 高出力光の利用が拡大
⇒ 情報通信、素材加工、医療、...
- 光部品の損傷が問題に
⇒ ファイバフューズ

Source: A. Galvanauskas, U. of Michigan

Slide 2

背景 ファイバフューズとは？


- 1987 年に発見
- 数 W の光を伝搬している線路の局所的加熱で発生
- 軌跡には、弾丸状の空孔が等間隔に並ぶ Video 1

Slide 3

背景 過入力防止デバイス: 電流 vs 光

電流 ジュール熱 \propto 電流の二乗

- ヒューズ
金属線を熔断
- ブレーカー
バイメタルを
反らし切断




光 ?

- 光ヒューズ
- 光リミッタ

⇒ 給電 or 無給電

⇒ コスト?

Slide 4

ファイバフェーズ (3)  t = 20 μs

空孔はいつ生成されるのか?

その原因

なぜ透明な光ファイバが光で破壊されるのか?

出会い

どうして超高速撮影しようと思ったのか?


国際会議への道

その撮影の価値がどの様にして認められたのか?


Slide 6

内容


光ファイバ内バブル生成と光ヒューズ

ファイバフェーズ (3)  t = 20 μs

空孔はいつ生成されるのか?

メカニズム解明 

見えない内側の動きをどう推理したのか?

光ヒューズ (2)  t = 100 μs

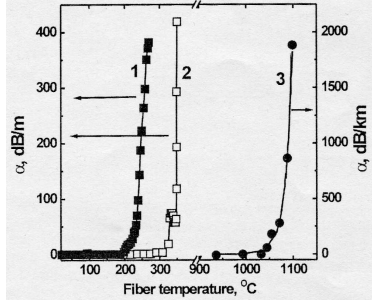
どのようにして発明したのか?

Slide 5

その原因 なぜ光で破壊されるのか?

光ファイバの損失 (1.064 μm) の温度依存性

1: As₂S₃ 2: fluoride 3: silica



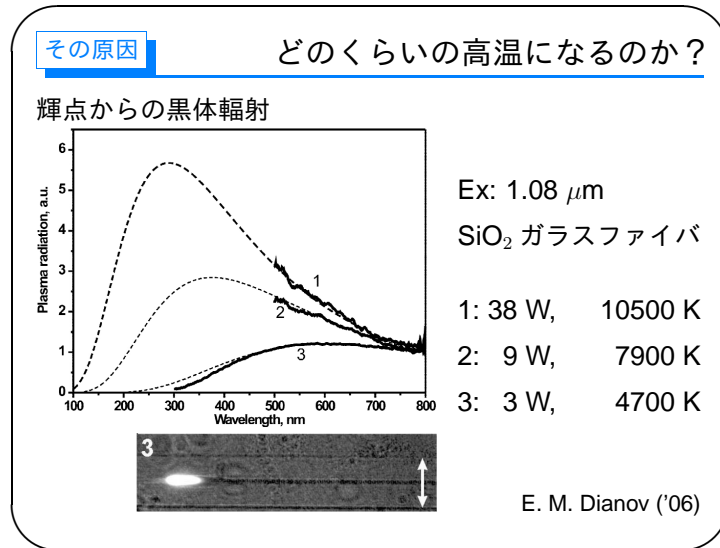
シリカガラス製ファイバの
光損失の起源 ('04 首藤)

- Ge E' 中心
- SiO
- 加熱領域の電子伝導

⇒ λ: 0.5 ~ 1.5 μm

出典: Dianov ('02) & Kashyap ('96)

Slide 7



Slide 8

ファイバフェーズ (3) t = 20 μs

空孔はいつ生成されるのか？

その原因
熱誘起光吸収のフィードバックでプラズマ発生

出会い
どうして超高速撮影しようと思ったのか？

国際会議への道
その撮影の価値がどの様にして認められたのか？

Slide 10

その原因 ファイバフェーズ通過前後の変化

シリカガラスファイバ:

- 高密度化
⇐ 屈折率上昇 (Dianov '92)
 $\Delta n_{\text{max}} \sim 0.012$
- 空孔中に O₂ ガス
⇐ 顕微 Raman (Kashyap '02)
 $\text{SiO}_2 \xrightarrow{\Delta} \text{SiO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$

いつ？なぜ？

Slide 9

出会い 研究の発端 — 2004 年初夏

- 飛び込みの営業マンが、廊下のポスターを見て、デモ撮影を提案
- 4000 倍の高速撮影
- それよりも、ファイバフェーズが面白い、...

光ヒューズが飛ぶ瞬間

(1) t = 0 s
(2) t = 1/30 s
(3) t = 15/30 s

でも、どうやって発生させるのか？

Slide 11

出会い 発生の様子を視野に収めるには？

1480nm
9W

125µm

Video 2

Glass ferrule Co oxide powder

Slide 12

出会い 撮影システム

1480nm
9W

Fiber Laser

SMF-28

5m

A B C

- 2004年8月4日
- 3回だけ撮影成功 初回→
- 性能の限界で試しても、画像は飽和

Video 3

→このままでは引き下げられない

Slide 14

出会い 超高速ビデオカメラ

- 4 µ秒 / コマ
- 露光 1 µ秒 + ND フィルタ (×16)
- 128×16 pixels
- 検出波長域: 380–790nm

撮影協力: フォトロン (株)

Slide 13

ファイバフェーズ

t = 20 µs

空孔はいつ生成されるのか？

その原因
熱誘起光吸収のフィードバックでプラズマ発生

出会い
廊下のポスターを見た飛び込みの営業マンの提案に乗った

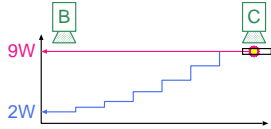
国際会議への道
その撮影の価値がどの様にして認められたのか？

Slide 15

国際会議への道 認められた再挑戦

8/4 11 16 9/5
 デモ 追試 〆切 国際会議

- 飽和対策: (1)ND フィルタ + (2) 供給光を絞る

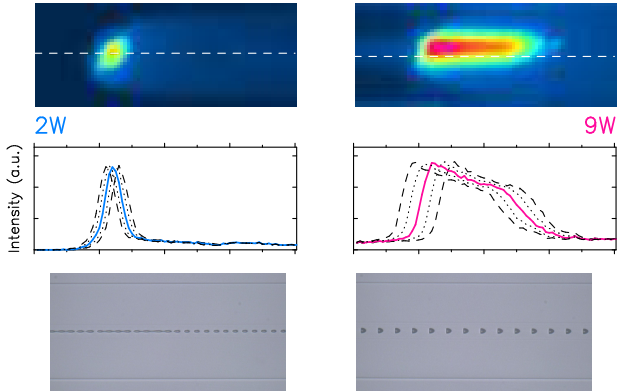


- 失敗 1 回、光の絞り忘れ。

⇒ 仕切り直して、無事成功

Slide 16

国際会議への道 データ解析



Slide 18

国際会議への道 〆切までの 5 日間


8/4 11 16 9/5
 デモ 追試 〆切 国際会議


- データ解析
- 函面書き
- 英文 2 ページ執筆




Slide 17

国際会議への道 発表の顛末

- 予想外の採択
- Dianov 教授の質問: 「何が新しいのか？」 
- 続いて部屋の外での一言:
 「君の論文、他の審査員の評点は低かったんだが、私が強行に推したんだ。」
- 20 日後に彼らも発表



Slide 19

ファイバフェーズ  (3) t = 20 μs

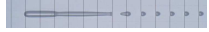
空孔はいつ生成されるのか？

その原因
熱誘起光吸収のフィードバックでプラズマ発生

出会い
廊下のポスターを見た飛び込みの営業マンの提案に乗った

国際会議への道
ライバル陣営の教授が採択委員会で私情を捨てて投票

Slide 20

メカニズム解明 

見えない内側の動きをどう推理したのか？

ひらめき
次の扉はどのようにして開かれたのか？


からくり構築
閃いたアイデアをどう膨らませたのか？

査読の突破口
突かれた弱点にどう反論したか？


Slide 22

内容


光ファイバ内バブル生成と光ヒューズ

ファイバフェーズ  (3) t = 20 μs

ポスターが縁でカメラを借り、空孔生成は通過直後と確認

メカニズム解明 

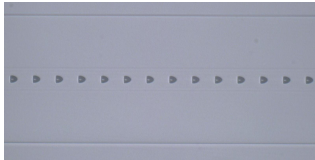
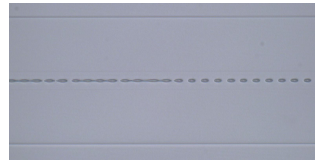
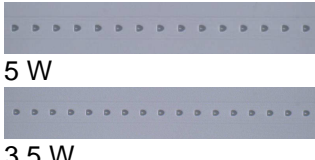
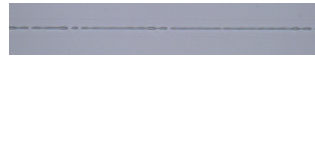
見えない内側の動きをどう推理したのか？

光ヒューズ  (2) t = 100 μs

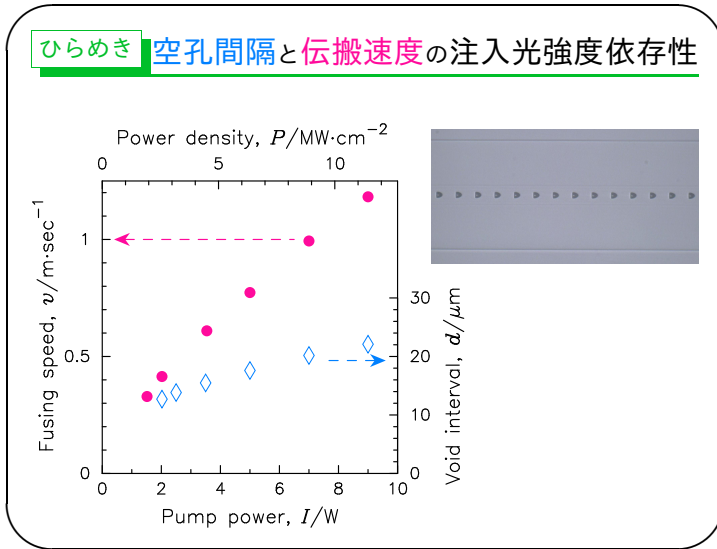
どのようにして発明したのか？

Slide 21

ひらめき **生成した空孔列の注入光強度依存性**

9 W	2 W
	
7 W	1.5 W
	
5 W	
3.5 W	

Slide 23



Slide 24

メカニズム解明 見えない内側の動きをどう推理したのか?

ひらめき たまたま覗いた顕微鏡像の比較がアニメーションを連想

からくり構築 閃いたアイデアをどう膨らませたのか?

査読の突破口 突かれた弱点にどう反論したのか?

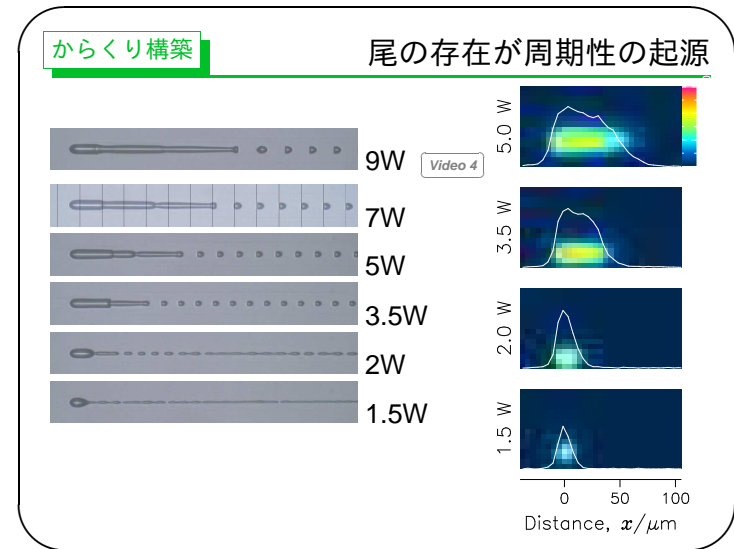
Slide 26

ひらめき たまたま覗いた顕微鏡像

Three microscopy images labeled (1), (2), and (3) showing the evolution of a void at different times: $t = 0 \mu\text{s}$, $t = 10 \mu\text{s}$, and $t = 20 \mu\text{s}$. The voids are elongated and bright against a dark background.

- この1週間後に、2回目のデモ撮影
- その1週間後に、招待講演依頼

Slide 25



Slide 27

からくり構築 **超高速撮影で分かったこと**

- 等速移動
- 20 μs 毎に 1 個生成

Slide 28

からくり構築 **空孔生成の考古学**

7W

Temperature

Viscosity

Distance from the top

Video 5

Slide 30

からくり構築 **試料作製**

Fiber Laser 1480nm

SMF-28

Power

Position

7W

Slide 29

メカニズム解明

見えない内側の動きをどう推理したのか？

ひらめき
たまたま覗いた顕微鏡像の比較がアニメーションを連想

からくり構築
同一条件下で撮影した多数写真を、時間順に並べ替えた

査読の突破口

突かれた弱点にどう反論したか？

Slide 31

査読の突破口 論文投稿で気にした弱点

- 連続写真は In situ にあらず

Slide 32

査読の突破口 授かった2時間

- 供給光はカメラに写らない！
⇒ ファイバフェーズの真剣白羽撮り
- 精度 0.01 秒を手動で

Slide 34

査読の突破口 査読結果と残された時間

- 供給光が減衰して零になるまでの時間を示せ


- あのカメラで撮影すれば良い！
⇒ 窮状を訴える Eメール発送

Slide 33

査読の突破口 水の心

- 5月の早朝
- 準備は 11 回分

Slide 35

メカニズム解明 

見えない内側の動きをどう推理したのか？

ひらめき

たまたま覗いた顕微鏡像の比較がアニメーションを連想


からくり構築

同一条件下で撮影した多数写真を、時間順に並べ替えた

査読の突破口

再びカメラを借り、ファイバフューズを真剣白羽撮り

Slide 36

光ヒューズ 

どのようにして発明したのか？

窮状

なぜ筋の悪いアイデアに固執したのか？

偶然

逆転の発想のきっかけは何だったのか？


特性

どんな性能を示すデバイスになったのか？


Slide 38

内容

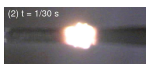
光ファイバ内バブル生成と光ヒューズ

ファイバフューズ 

ポスターが縁でカメラを借り、空孔生成は通過直後と確認

メカニズム解明 

アニメ原画の連想で、多数の写真から空孔切り離しを合成

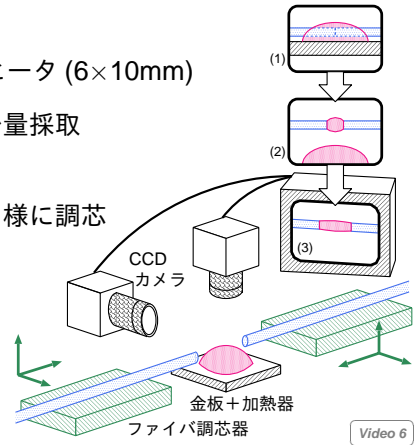
光ヒューズ 

どのようにして発明したのか？

Slide 37

窮状 **掬い上げ調芯法**

- 純 TeO₂ 融液 @小型ヒータ (6×10mm)
- ファイバ対で微量採取 (数秒間)
- 損失を最小にする様に調芯



J. Ceram. Soc. Jpn, 110 (2002) 476

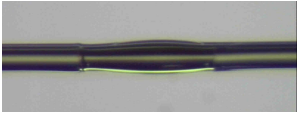
金板+加熱器
ファイバ調芯器

Video 6

Slide 39

窮状 筋が悪い理由

● ファイバに繋げるだけでは始まらない!



欠点

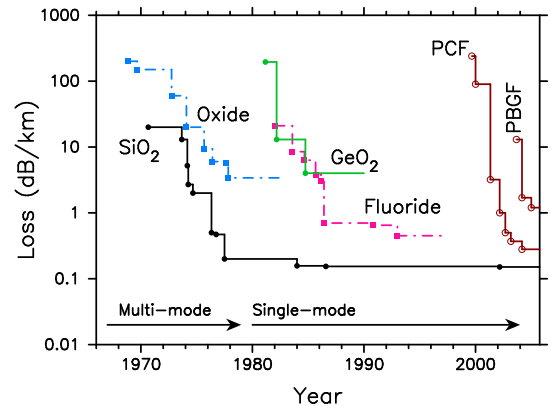
接合部での光損失

短い相互作用長

局所的強度低下

Slide 40

窮状 光ファイバの最低損失値の変遷



Slide 42

窮状 なぜ固執していたのか

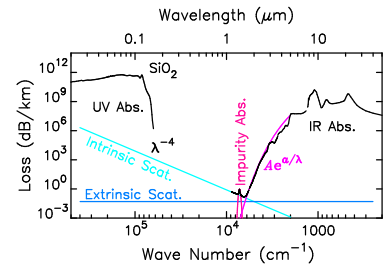
- ガラスの研究で学位取得
- NTT で多成分酸化物ガラス製光ファイバを研究
- 4年でゆき詰まり、転職

Slide 41

窮状 '93 当時の方針

光ファイバの損失要因

	散乱	吸収
内因性	誘電率揺らぎ	格子振動
外因性	構造不整	不純物



多成分酸化物ガラス

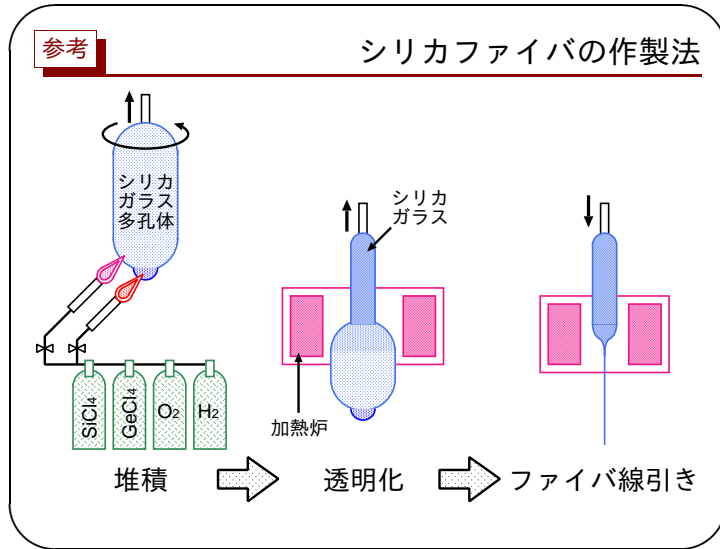
ε 揺らぎ	格子振動
構造不整	不純物

次のターゲット


シリカガラス	フッ化物ガラス
ε 揺らぎ 格子振動	ε 揺らぎ 格子振動
構造不整 不純物	構造不整 不純物

0.2dB/km(1979) 理論限界 → 1.2dB/km(1987)

Slide 43



Slide 44

光ヒューズ 

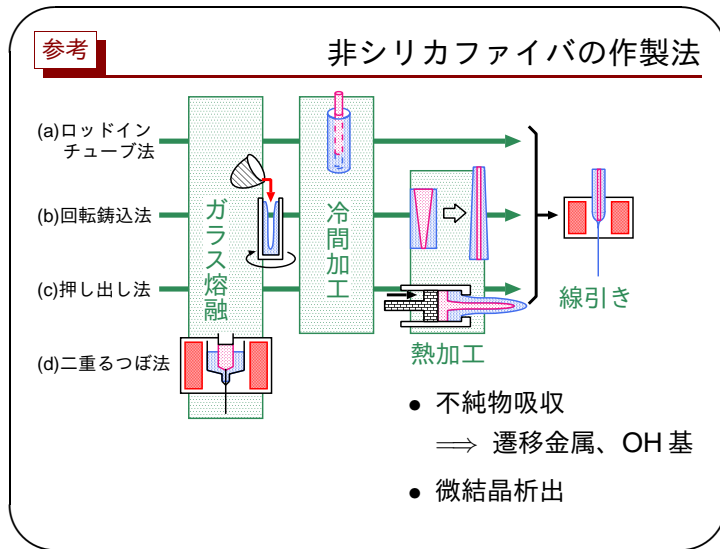
どのようにして発明したのか?

窮状
非シリカガラスで光デバイスを作りたいかった

偶然
逆転の発想のきっかけは何だったのか?

特性
どんな性能を示すデバイスになったのか?


Slide 46



Slide 45

偶然 国際会議、聴講前の予習

- イラク戦争突入 ('03/3/19) 直後の米国アトランタ
- レーザーの高出力化の兆し



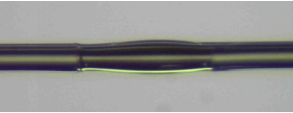
SM CW power (W)

Year

Source: A. Galvanauskas, U. of Michigan

Slide 47

偶然 壊すことを目的にすれば?!



欠点

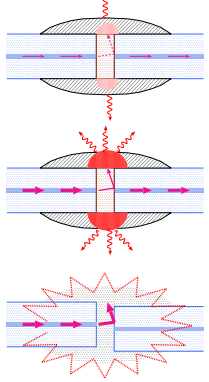
接合部での光損失 ⇒ エネルギーの供給
 短い相互作用長 ⇒ エネルギーの集中
 局所的強度低下 ⇒ 破壊に至る

エネルギー小

Slide 48

偶然 水彩絵の具が危機を救う

- 50 μ m 厚の 低融点ガラス層 + 炭素被覆
- 導波構造無し
挿入損失 < 1dB
- 洩れ光 ⇒ 熱
⇒ 発火
→ 軸ずれ
→ 損失 ↑

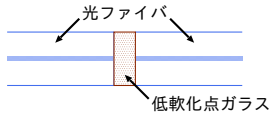


特許 3870270 号 Video 7

Slide 50

偶然 予算獲得

- 帰国直後に所内で新規テーマ募集
- 採択され、ファイバレーザー発注
- 2W を注入するも、変化なし!!



光ファイバ
低軟化点ガラス

Slide 49

光ヒューズ (011 = 130 s)

どのようにして発明したのか?

窮状

非シリカガラスで光デバイスを作りたいかった

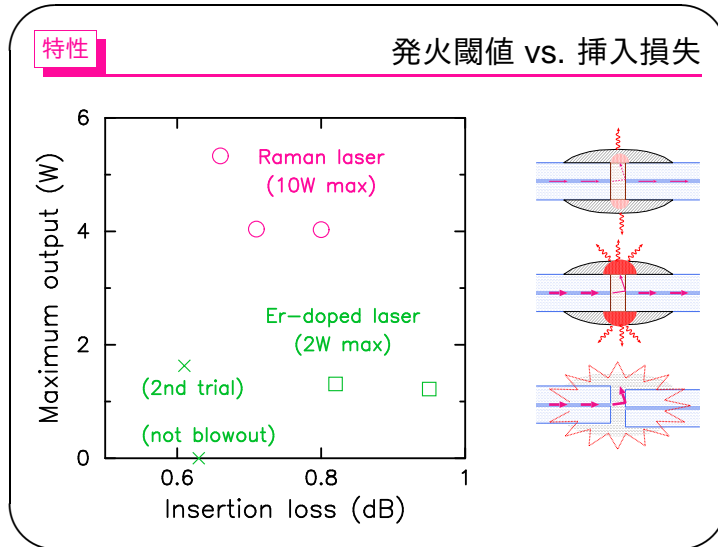
偶然

守るトレンドを見て壊す用途を思いついた

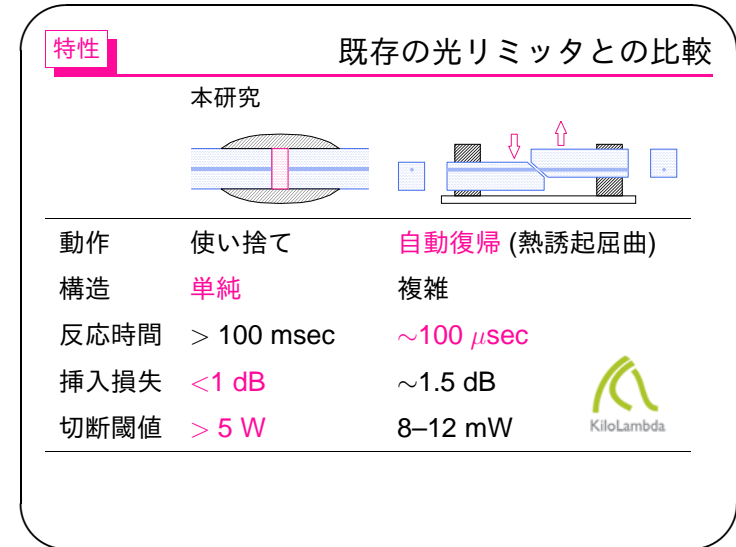
特性

どんな性能を示すデバイスになったのか?

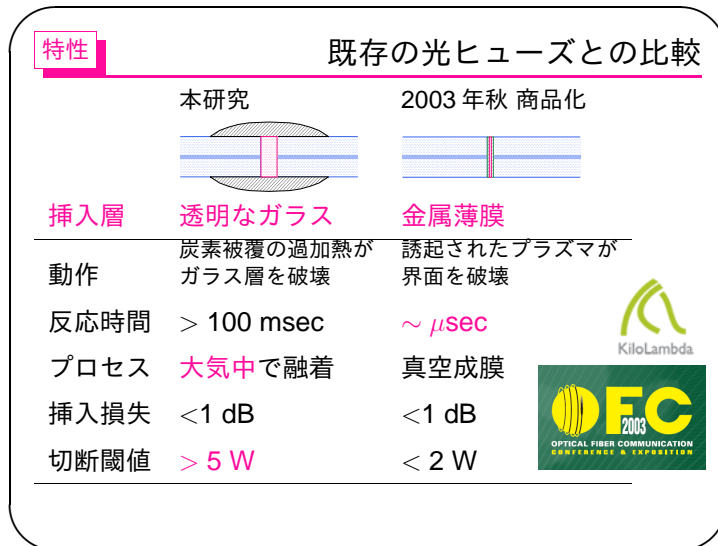
Slide 51



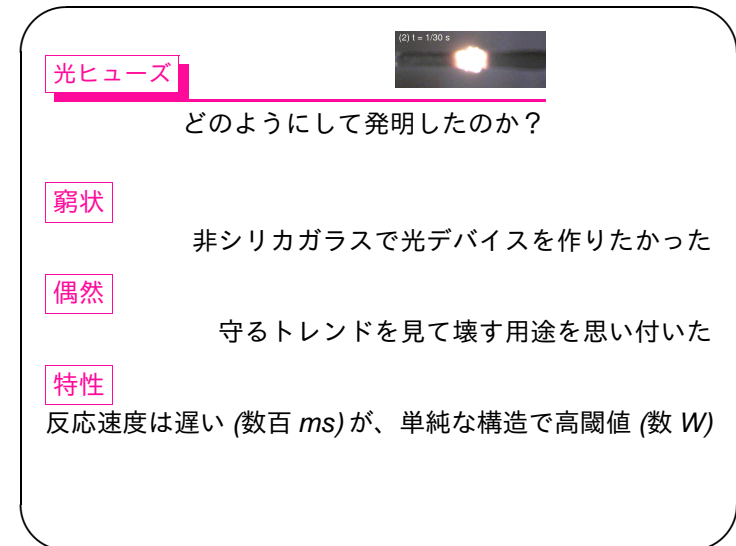
Slide 52



Slide 54




Slide 53




Slide 55


結論 光ファイバ内バブル生成と光ヒューズ

ファイバフューズ  (3) t = 20 μs

ポスターが縁でカメラを借り、空孔生成は通過直後と確認

メカニズム説明 

アニメ原画の連想で、多数の写真から空孔切り離しを合成

光ヒューズ  (2) t = 1/30 s

転職のデスマッチ。手を動かし、発想を逆転して発明

Slide 56

余談 私の身に起こった主な偶然

超低損失光ファイバ研究開発の終焉 (1997)

2003/3 月 筋の悪いアイデアを元に試行錯誤
⇒ 熱誘起型光ヒューズの発明

2004/5 月 飛び込み営業が縁で機材拝借
⇒ 世界初のファイバフューズの超高速撮影

2004/11 月 ふと覗いた顕微鏡から閃きが
⇒ ファイバフューズ空孔生成アニメを作成

2005/5 月 「真剣白刃撮り」実験で査読突破

Slide 58

謝辞

超高速ビデオ撮影にご協力頂いた、

株式会社フォトロンの

花香和秀 氏

坂巻顕 氏

相澤啓助 氏

桑原譲二 氏

に深く謝意を表します。

Slide 57

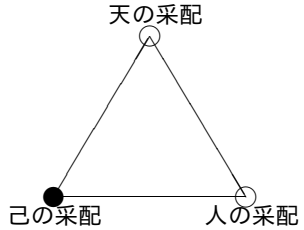
余談 偶然をもたらす主体

2003/3 月 筋の悪いアイデアを元に試行錯誤 己の采配

2004/5 月 飛び込み営業が縁で機材拝借 人の采配

2005/5 月 「真剣白刃撮り」実験で査読突破 天の采配

偶然は
手を動かして
掴むもの

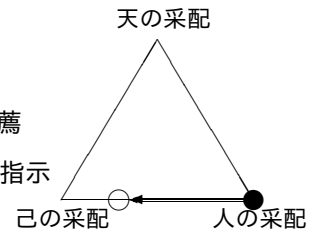


Slide 59

余談 「他人のもたらず偶然」を引き寄せるには？

⇒ 人を動かすプレゼンテーション

- 飛び込み営業が縁で機材拝借
- ライバル教授がPD論文を推薦
- エッセイを見た社長が協力を指示



Slide 60