資料4
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
量子科学技術委員会（第11回）
平成29年4月28日

フォトニック結晶への産業からの期待

JST　ACCEL-Program Manager　八木重典

（産業界　1972～2013）

内容

初めに　フォトニック結晶とその開発の歴史

２次元フォトニック結晶 「フォトニック結晶レーザ」

基本構造　動作原理　他のLDとの比較　広報：加工デモ/NHK

大面積コヒーレントフォトニック結晶レーザ

可能性とJST-ACCELプログラム　-成果イメージ　-　加工用レーザベンチマーク

世界の光製造　社会実装への展望①　光製造への応用

フォトニック結晶レーザの発展　“on going”

レーザ分野への応用　波長変換　レーザ励起

フォトニック結晶レーザの新機能

-様々なビームパターン形成　-ビームスキャン　-ライダー、センサーへの応用

社会実装への展望②　加工以外への応用

新たな実用化が期待される２次元フォトニック結晶　-「熱輻射制御デバイス」

新しい科学の領域を切り開く「フォトニック結晶」

-完全３次元フォトニック結晶　-光メモリ、転送

まとめ　産業からの期待

フォトニック結晶とその開発の歴史

フォトニック結晶とは

光の波長程度の周期的な屈折率分布をもつ多次元光ナノ構造

完全3次元フォトニック結晶の提案と実現　1996、2000

発光体と人為欠陥導入による発光制御の実現　2004

3次元立体光導波の実現　Nature Photon.2013

フォトニック結晶スラブによる光制御

点・線欠陥導入と光操作　2000

光メモリー機能の実現　2007

ナノ共振器を強く結合させ、光を自在に往復　2012、2016

2次元フォトニック結晶への展開

フォトニック結晶レーザ　APL:1999,　Science:2001

ビーム形状、偏光制御　2001,2006

ビームスキャン　2010

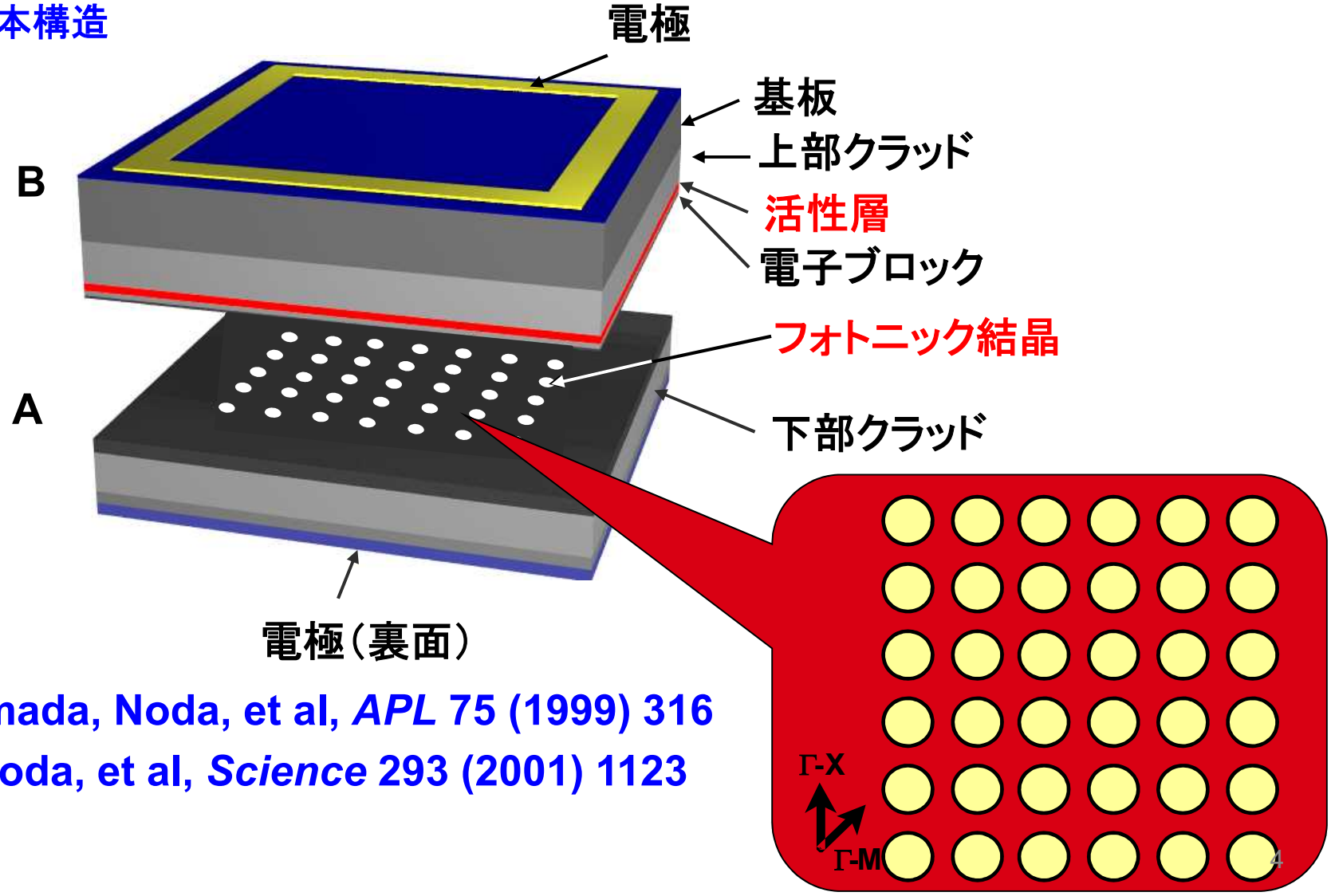
熱輻射の集約　2012

熱輻射の高速変調　2014

フォトニック結晶レーザ　とは

（PCSEL　Photonic Crystal Surface　Emitting Laser）

基本構造



Imada, Noda, et al, *APL* 75 (1999) 316

Noda, et al, *Science* 293 (2001) 1123

動作原理

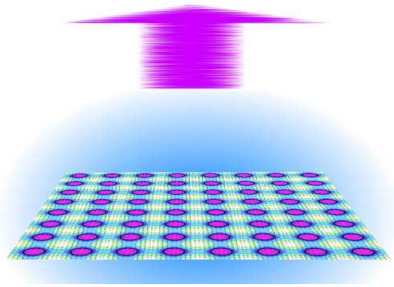
原理的にどのような大面積でも

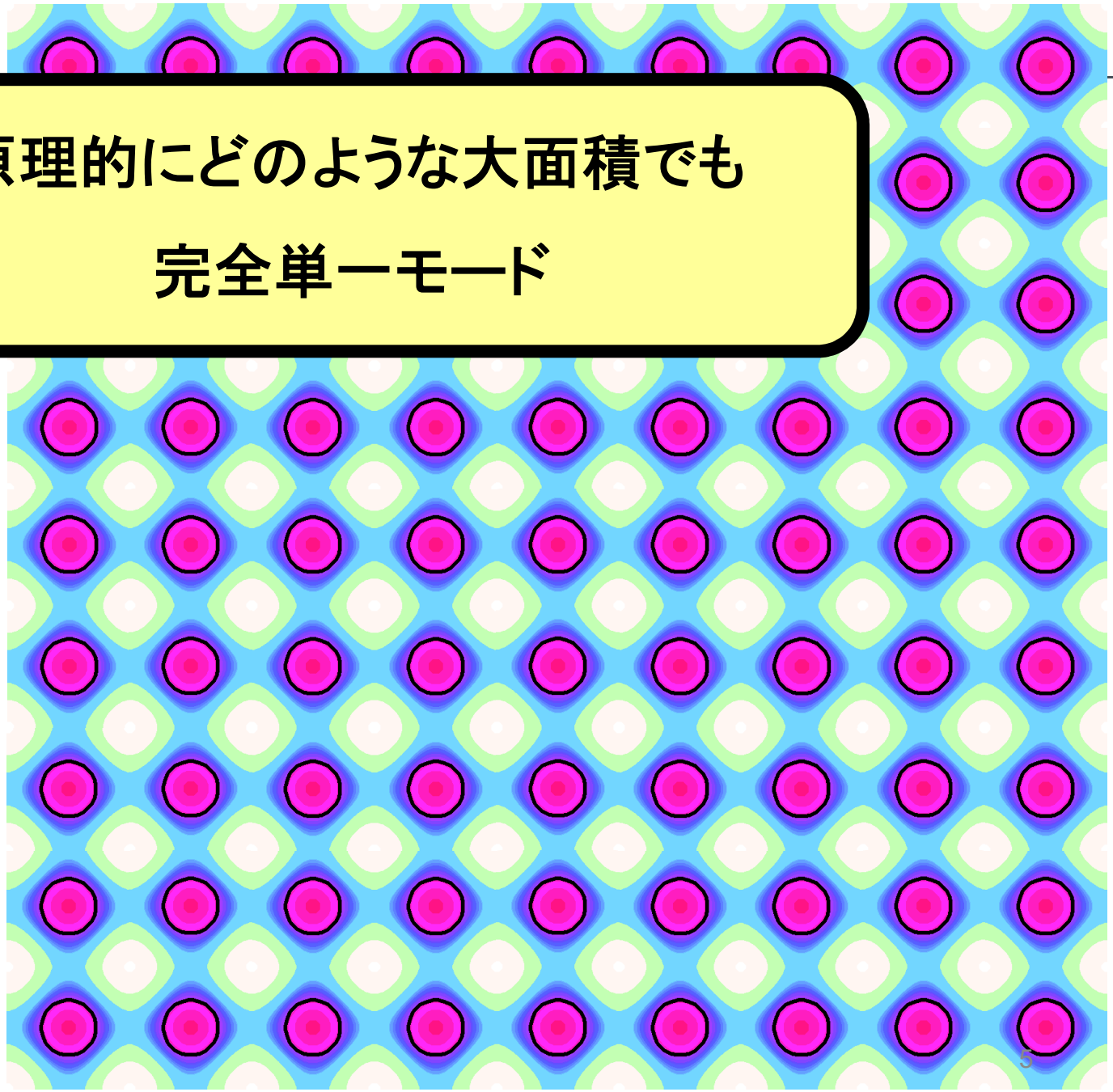
完全単一モード

面垂直方向へ

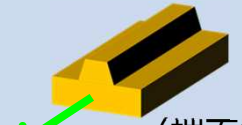
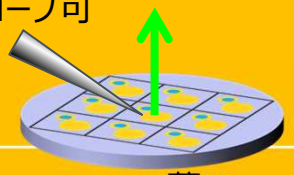
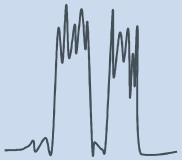
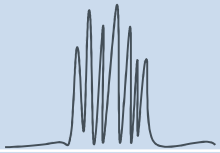
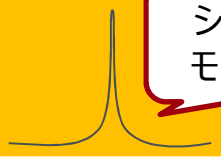
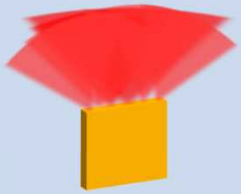
高集束光

放射





他の LD（半導体レーザ）との比較

名称		FP-LD Fabry-Perot Laser Diode	VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser	PCSEL Photonic Crystal Surface Emitting Laser
		既存品		研究開発中
特徴	ハンドリングしやすさ(発光方向)	特性評価は個片化必須  レーザー光（端面発光）	ウエハプローブ可  レーザー光	面発光！ モノリシック集積の可能性
	光出射方向の厚み	厚い （数mm程度）	薄い （200μm以下）	
	ワット級出力時のスペクトル幅			 シングルモード！
	ワット級出力時のビームパターン	 ※ワット級出力時は、ビーム集束性・等方性が劣化		 広がらない！ ※高出力時も、ビーム集束性・等方性維持

一般に用いられるLDで低出力。通信、情報用途。集積してファイバーレーザを励起用途にも用いられる。

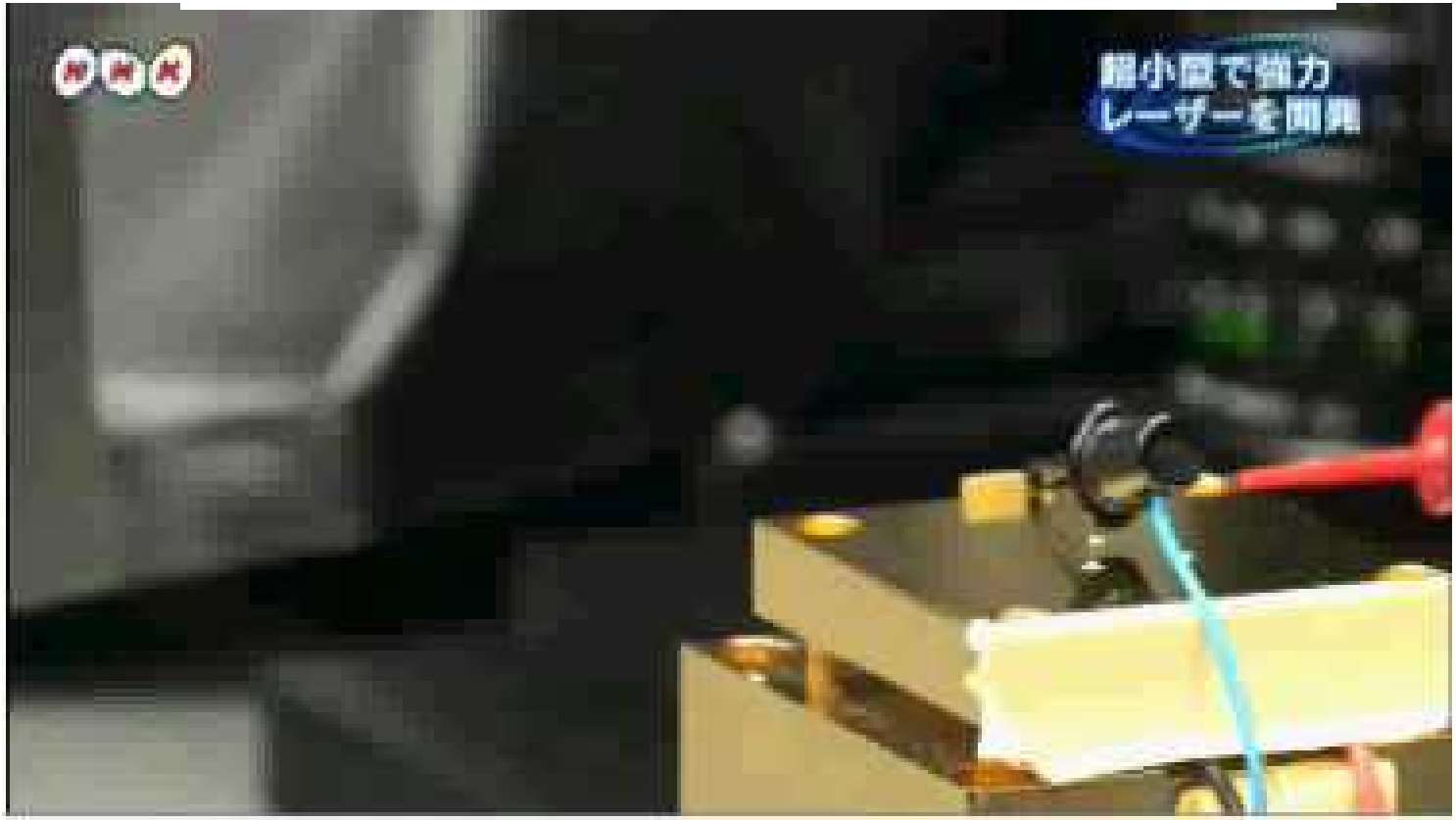
面発光の特性を生かして用途拡大中。最近はプリンターの光源にも用いられる。

高出力かつ高集束性の面発光LD。VCSELと並ぶ我が国の独創技術。

報道

NHK

レンズ無しでも１０ｃｍ先の紙が燃えます



Hirose, Noda, et al, *Nature Photonics* *(April 2014)*

小出力のバイオ、医用、センシングへの応用が期待される。
高出力化すれば本格的加工へ発展が期待される。

大面積コヒーレントフォトニック結晶レーザ

― 新概念の半導体レーザ ―

可能性

・ワンチップで、究極的には

100W超級の単一モード・コヒーレント発振が可能と期待

また、合波により、1kW超級の出力も可能なると期待

・様々な新機能が発現し、新たな産業へ応用が広がる

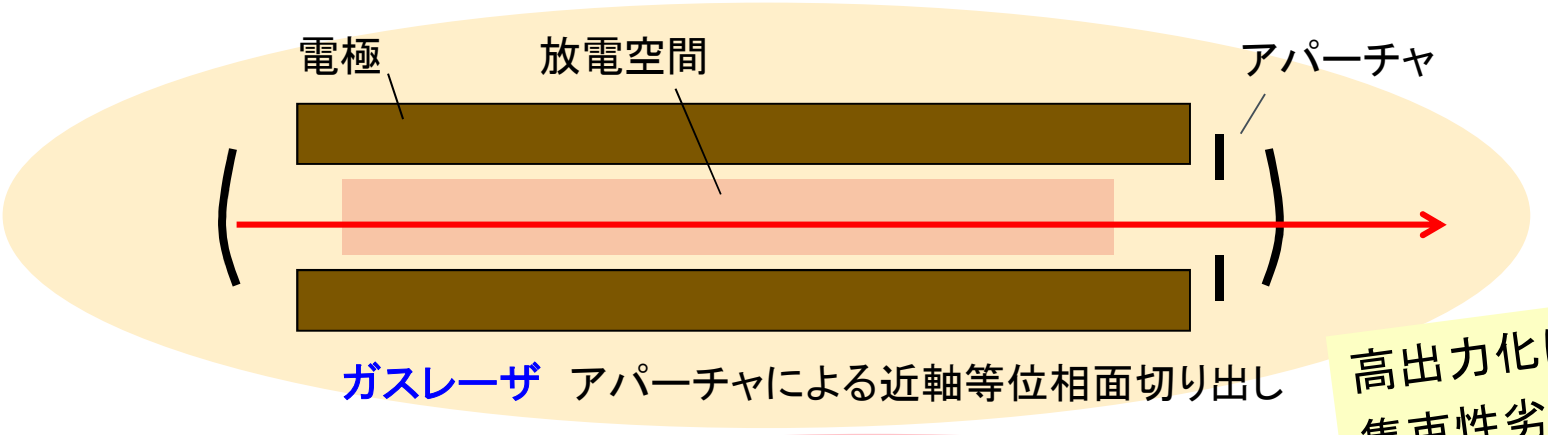
ACCELプログラム（2013.12-2018.3）開発中

加工応用に適用可能な目標をPOC（Proof of Concept) とする

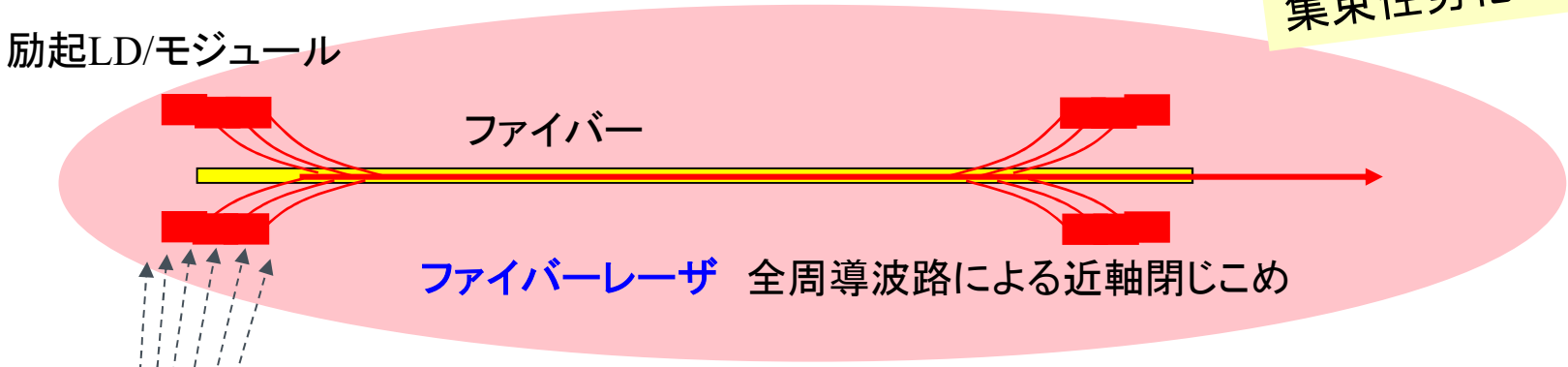
単素子　　高輝度

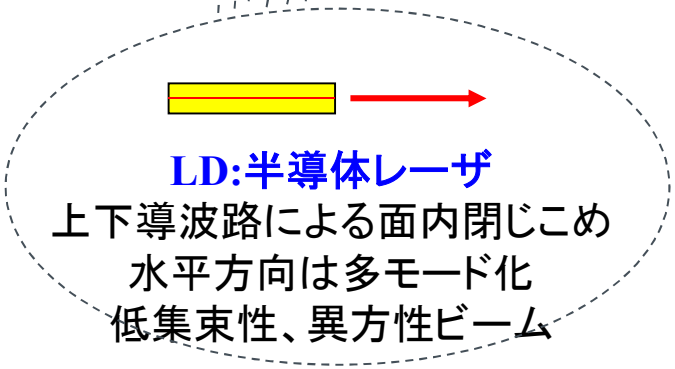
合波モジュール　高出力

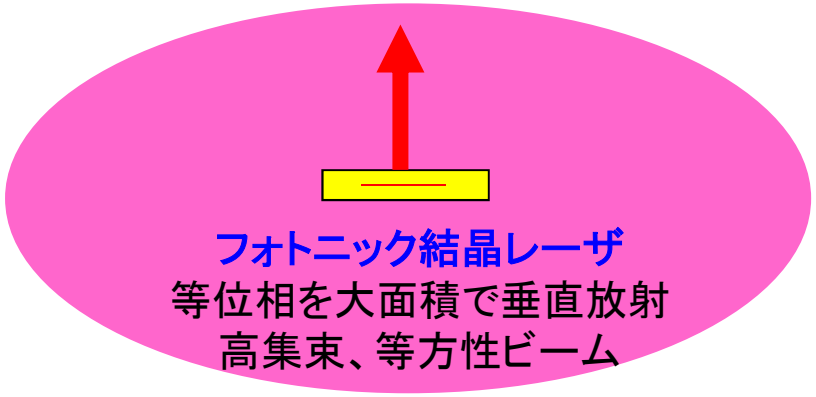
高出力レーザ共振器における高集束化の方法 （参考）



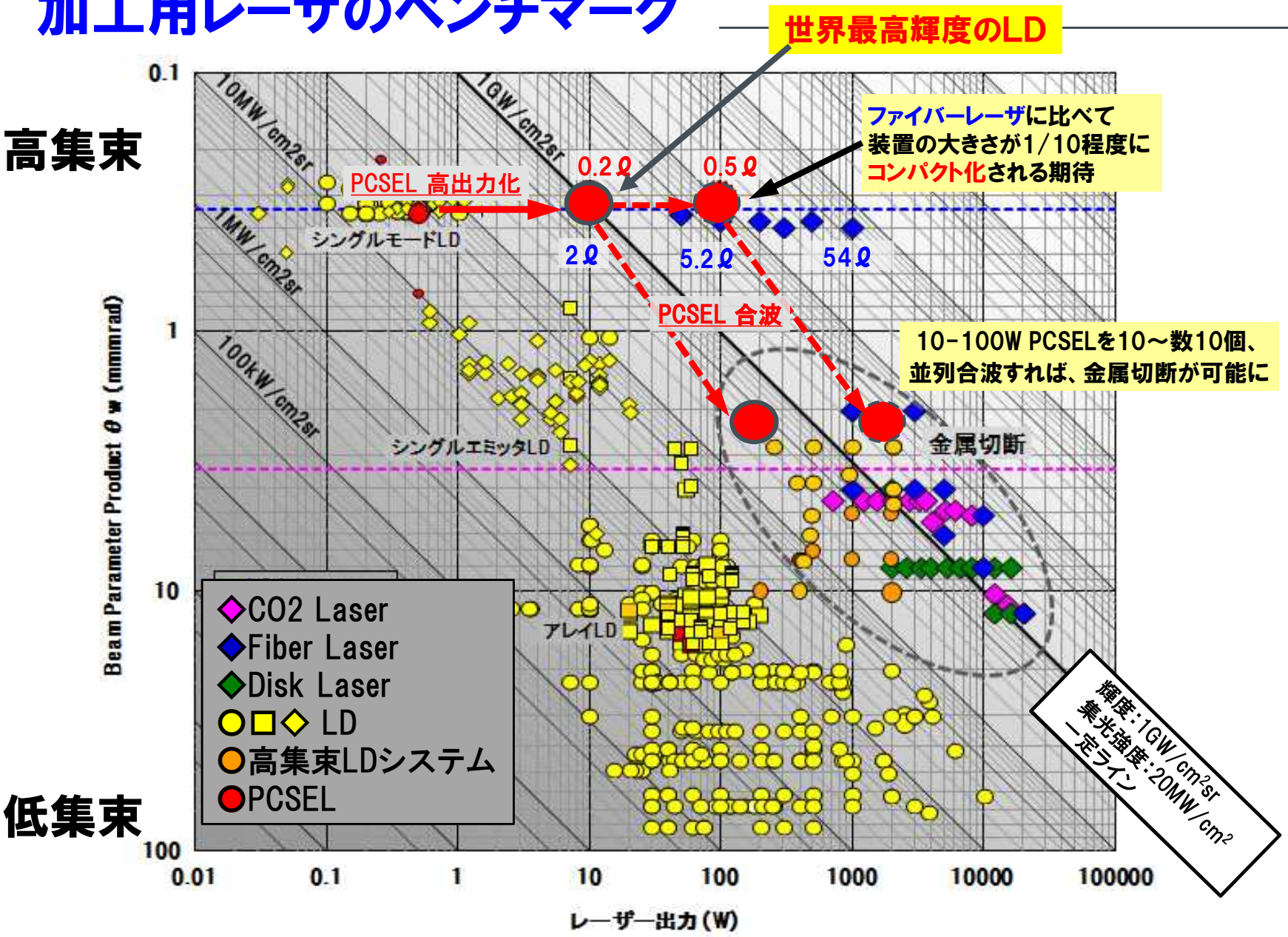
高出力化は常に
集束性劣化との戦い



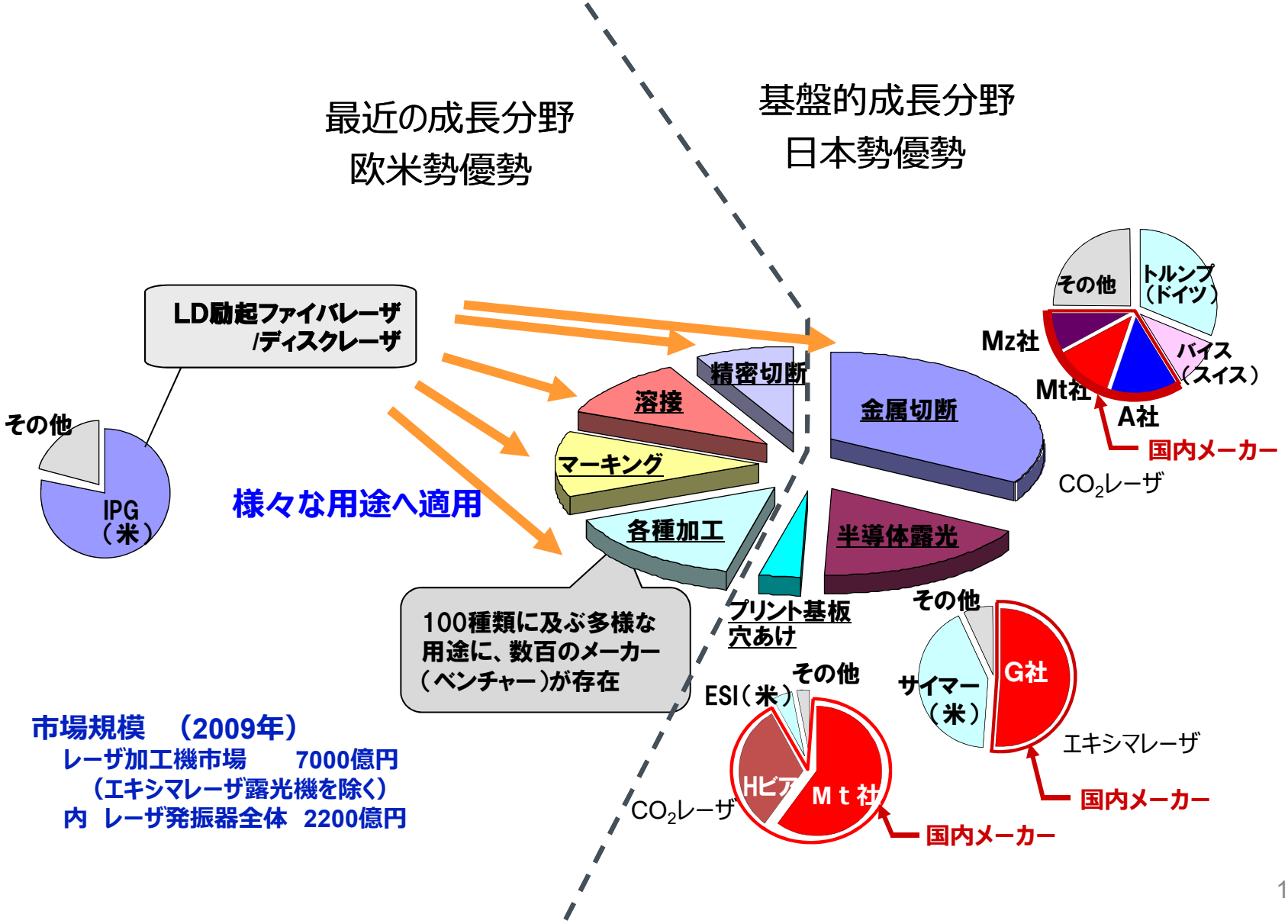




加工用レーザのベンチマーク



光製造の世界市場



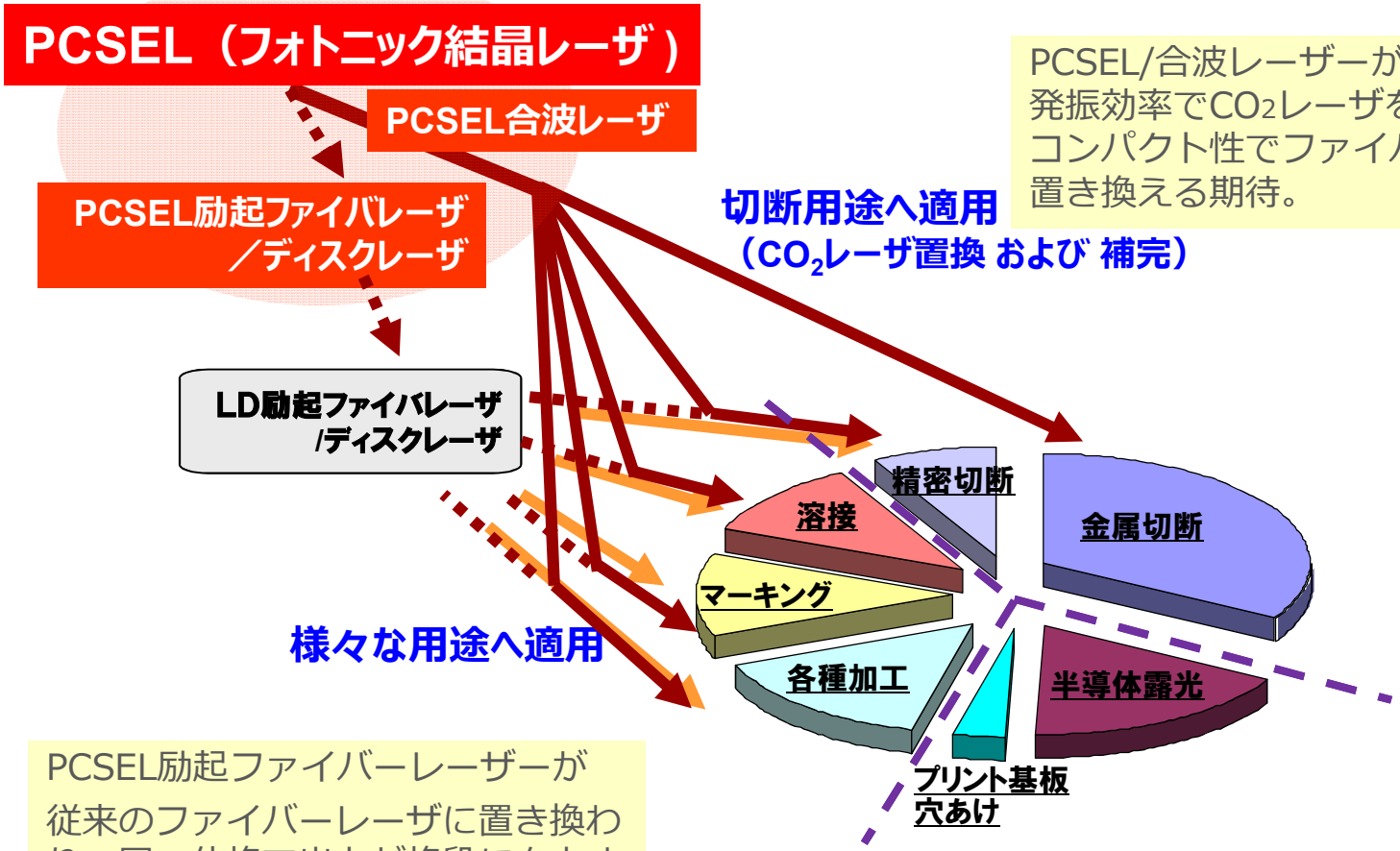
市場規模　（2009年）

レーザ加工機市場　　7000億円

（エキシマレーザ露光機を除く）

内　レーザ発振器全体　2200億円

光製造における期待



PCSEL/合波レーザーがコンパクト性、発振効率でCO_2レーザを置き換え、コンパクト性でファイバーレーザを置き換える期待。

PCSEL励起ファイバーレーザーが従来のファイバーレーザに置き換わり、同一体格で出力が格段に向上する期待。

フォトニック結晶レーザの発展 “on going”

PCSELのレーザへの応用

波長変換　レーザ励起

変調フォトニック結晶レーザ

ビーム形状設計

ビームスキャン

加工用途およびそれ以外の応用が期待される。後述。

波長領域

450nm帯　　**NEDOプログラム　2016開発着手**

940nm帯　　**ACCSEL2013～プログラム**

加工用途に広く用いられる波長帯で高輝度化の基礎技術を構く。

短パルス化

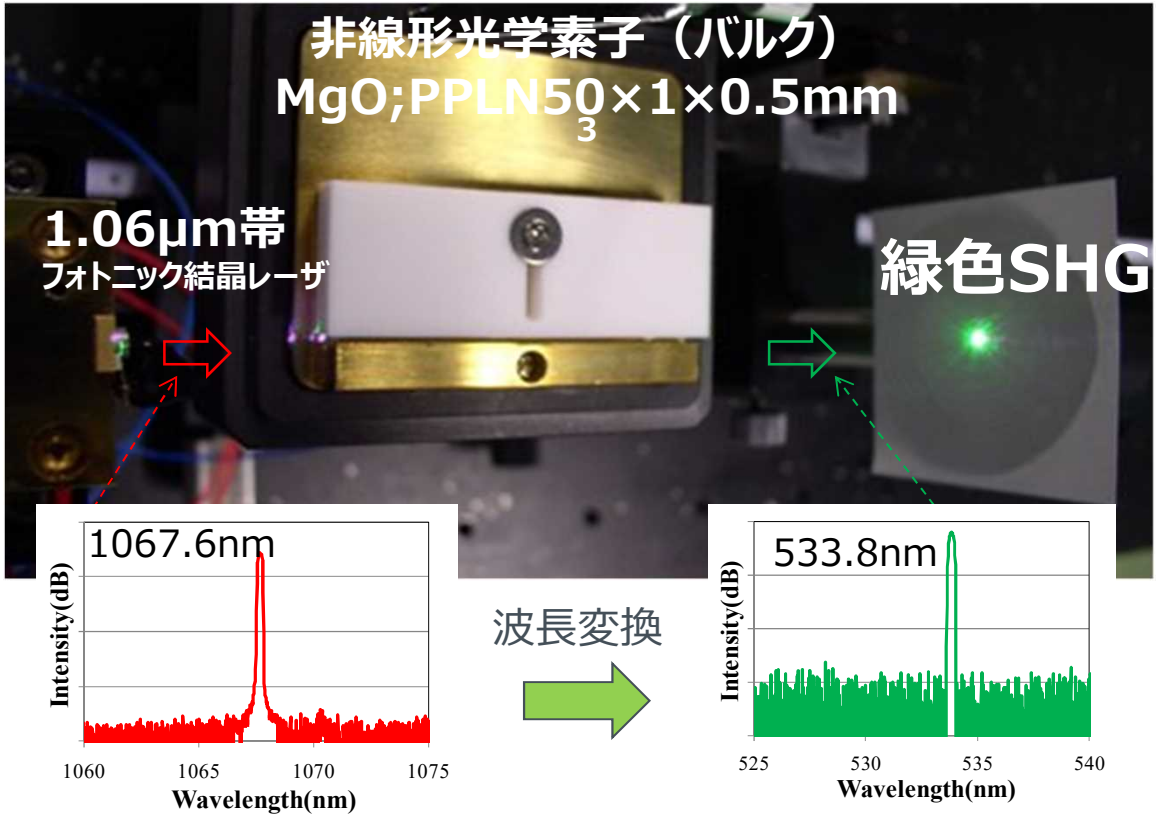
sub ns パルス　　**NEDOプログラム　2016開発着手**

短パルス化による非熱的物質加工の分野はIoT 時代の次世代加工として期待が大きい。新原理提案に基づく将来技術研究。

直ちに可能な応用

波長変換（赤外光⇒緑色光）

レンズフリーで 非線形光学波長変換ができる



スペクトルの狭さと結晶内で偏光の維持、ビーム径の最小保持が必要。
一般LDでは複数のレンズなど光学素子とアライメントが不可欠。

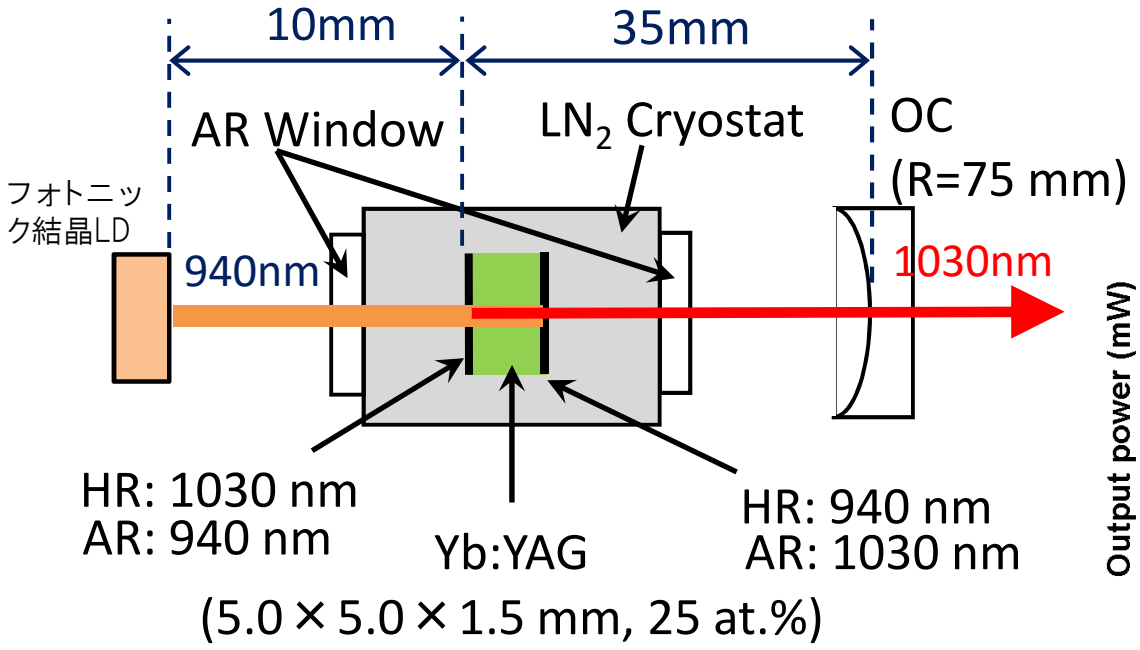
PCSELでは系が極限まで単純化される。

Watanabe, Noda, et al, *SPIE* (2014)

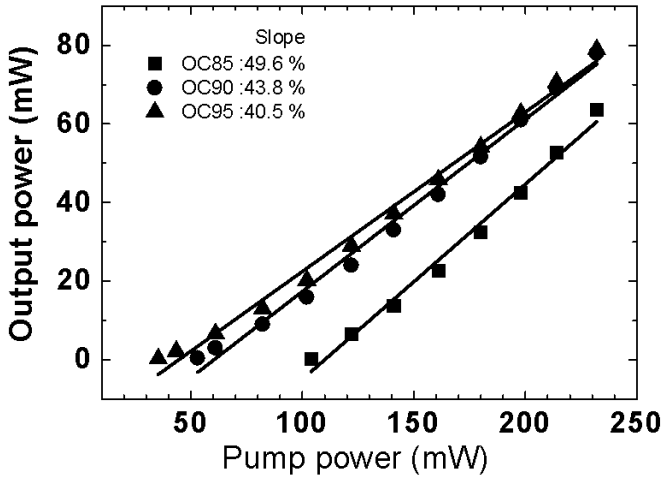
直ちに可能な応用

固体レーザ励起

レンズフリーで 固体レーザを励起できる



最大光出力： 229 mW
（光-光変換効率： 65%）



レーザ媒質に等方的でかつ集束されたビームの入射が必要。一般にはLDビームの等方化や複数のレンズなど光学素子が不可欠。

PCSELでは系が極限まで単純化される。

Guo, Noda,
Miyanaga, et al, *Opt. Lett.* **41** (2016) 4653.

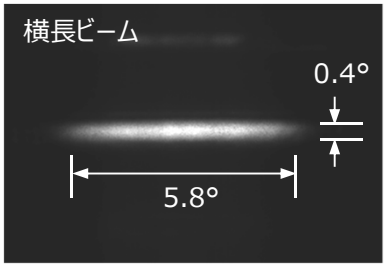
様々なビームパターンの形成

格子点設計によって様々なビームパターンが造れ

非金属も金属も補足できる
光ピンセットとしてバイオ応用など

集束性、等方性を生かした
微細加工など

数値はビーム発散角（例）

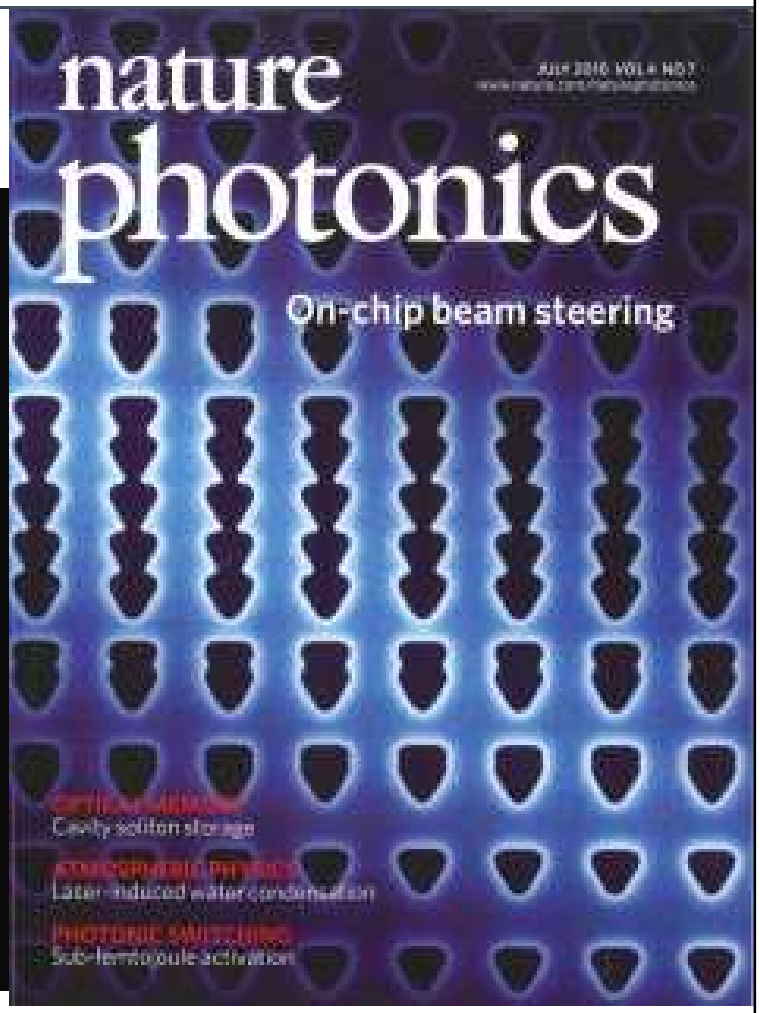


さらに多彩な
ビームパターン

ラインスキャンによる３次元計測や
センシング、セキュリテイ応用など

新しい用途が広がる

ビームスキャン



ビーム出射方向を1次元で走査することに成功

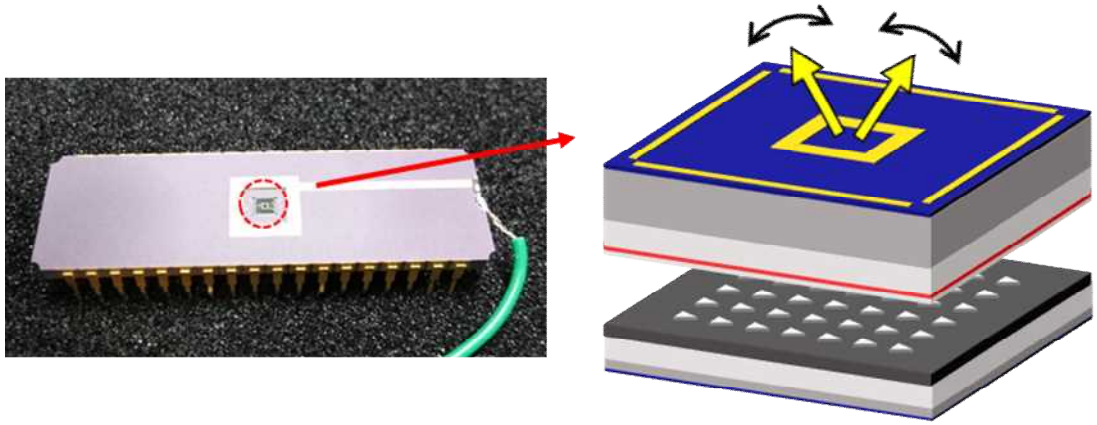
Kurosaka, Noda, et al, *Nature Photonics* (2010)

2次元ビームスキャン

フォトニック結晶の格子構造により、

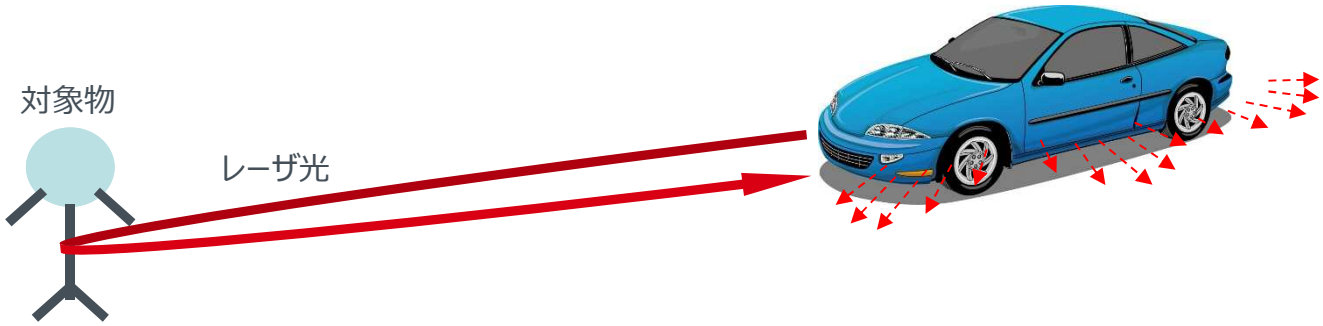
電子的２次元ビーム走査可能なレーザの実現

ライダー、センサーへの期待が大きい



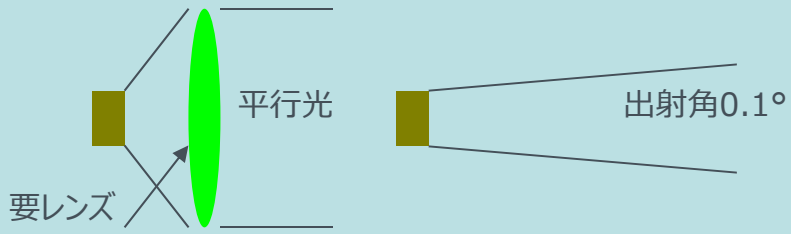
Kurosaka, Noda, et al, *Nature Photon*., 2010)
Yasuda, Kitamura, Noda, et al, *ICSL*, 2016

ライダー、センシングへの応用



高出力、狭出射ビーム

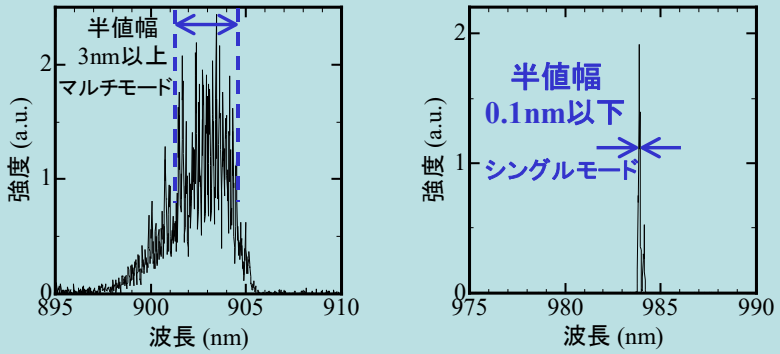
従来光学系　　フォトニック結晶LD光学系



光学系の簡略化

狭スペクトル幅

従来品　　フォトニック結晶LD



高いSN比

フォトニック結晶レーザ　加工以外への応用

その他産業への応用

評価	適用可能なレベル、もしくは条件付きで適用可能と判断された装置
○	共焦点レーザ走査型顕微鏡
○	レーザー色素性皮膚疾患治療器
◎	脱毛治療器
○	レーザー温熱治療器（補完治療）
○	レーザーメス
○	植物工場
◎	レーザーセキュリティセンサー
◎	車載ライダー
○	レーザーヘッドライト
○	レーザープロジェクター（2次元空間変調方式）
○	液晶プロジェクターのバックライト

凡例　◎は適用可能　　○は条件付きで適用可能（条件は出力アップ、波長域拡大、短パルス機能、コストなど）

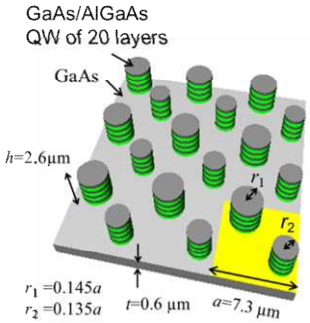
ACCELプログラムにおける市場調査（内部資料　2016）　より引用

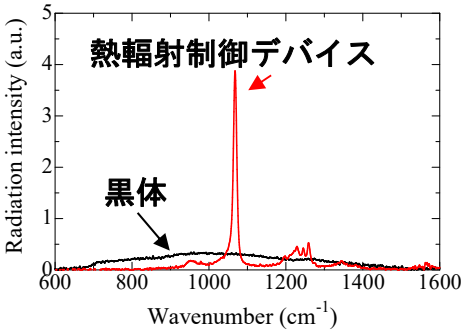
「熱輻射制御デバイス」

熱輻射の集約

黒体輻射を、エネルギー損失なく、狭いスペクトルに集約する

→ 効率50%を超える高効率太陽熱光発電システム



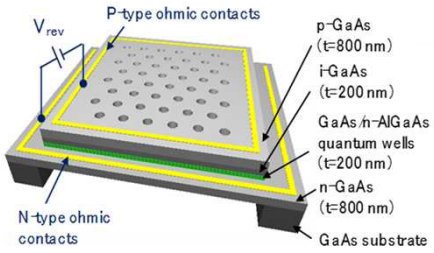


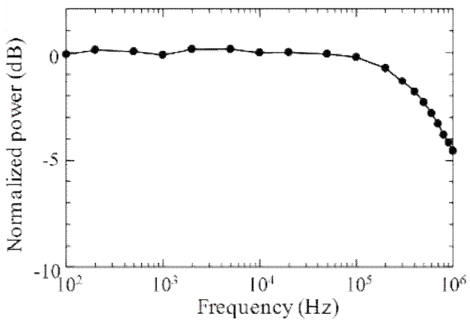
Menaka, Noda, et al, *Nature Photonics* (2012).
Inoue, Noda, et al, *Appl.Phys.Lett*. (2013).

高速変調

遅い熱輻射を、10^4倍以上高速（100Hz →1MHz）に変調

→超小型環境センサーや、バイオセンサーへの応用



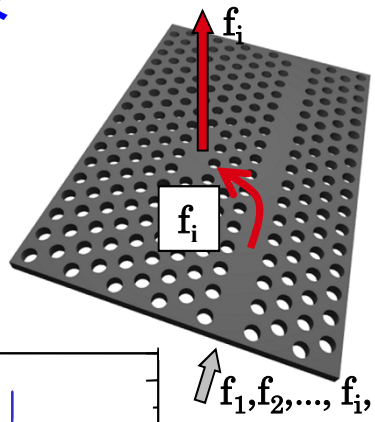


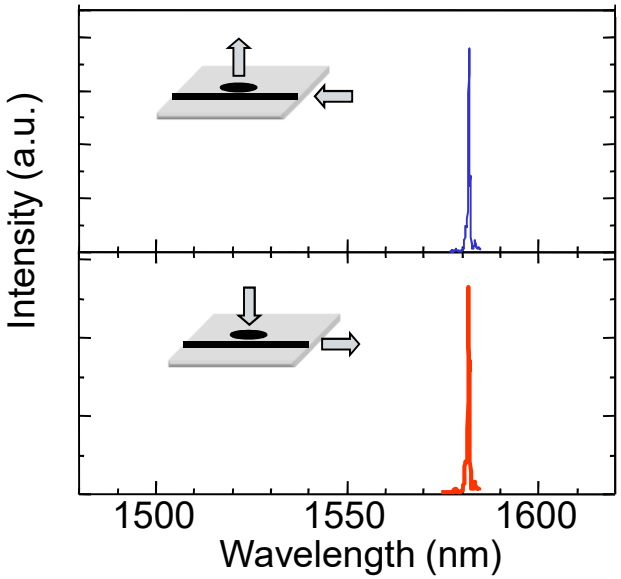
Inoue, Noda, et al, *Nature Materials* (2014)

伝搬する光の捕獲と放出

線欠陥導波路および**点欠陥ナノ共振器**の導入

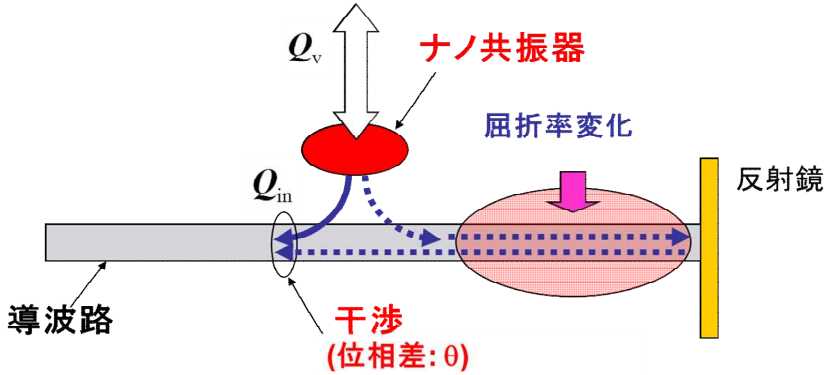
伝搬する光を捕獲し放出可能なことを初めて示した





Noda, et al, *Nature* **407** (2000) 608.

数ピコ秒の光パルスを数10～数100ピコ秒間保持する**光メモリー機能が実現**

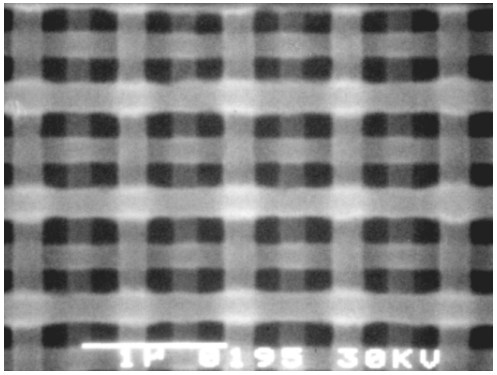


Tanaka, Noda, et al, *CLEO/PR* 2005 and *Nature Materials*, 2007

光メモリーと光による移送
→　新しい光チップ実現への期待

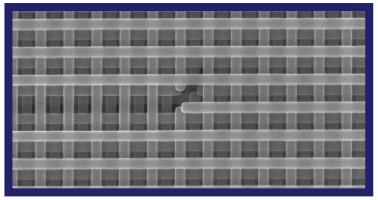
3次元立体光導波

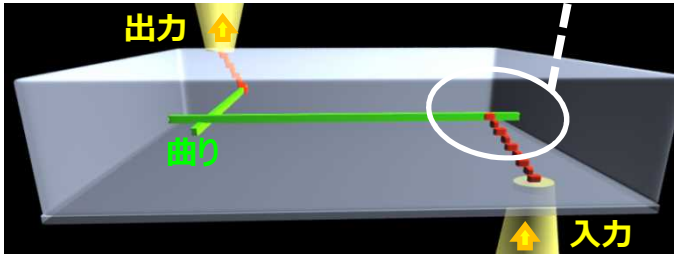
光波長域における完全結晶の初めての実現



700nm

Noda, et al., *Science* **289** (2000) 604





線欠陥導波路の導入による3次元立体光導波

3次元的な光の曲げ伸ばし伝播

Ishizaki and Noda, *Nature Photon.*, **7** (2013)133.

3次元の光チップ実現への期待

産業界からの期待

フォトニック結晶の研究は，今、まさに世の中に活用される時代になりつつある.

・ワンチップ高ビーム品質・高出力レーザ (10～100W)の実現
（半導体レーザ分野のパワー軸での革命）
→ 光製造の革新　モノづくりニッポンの旗艦技術

・ビーム走査、センサー機能などを備えた新機能半導体レーザの実現

近い将来産業への活用が期待される研究も進んでいる。

・熱輻射デバイスの高速制御

・高効率太陽熱光発電システム

サイエンスとして 21世紀を支える光科学・技術の基盤技術として
・光量子情報処理のためのプラットホームの実現

様々な興味深い展開がさらに期待され、

深みと広がりをもって、ますます進展するものと期待する。

結言

JST-ACCELプログラムマネージャであることに加え、
かつて産業加工用のレーザ事業で指揮をとっていた企業人として
フォトニック結晶レーザは　是非、単体デバイスで　100W、
合波によって　1kWまで研究をつづけ、
さらには、このレーザが持つ多彩な機能をますます高めていただきたい。

この技術は我が国が誇る独創技術として、
今も質的な進歩をしながら、
科学のフロンティアを開拓している。
支える価値は大きい。

ご清聴　ありがとうございました。