

第5回レーザー学会「ユビキタス・パワーレーザー」専門委員会  
第5回科学技術交流財団「マイクロ固体フォトニクス」研究会  
向け講演資料

**Paradigm**  
Laser Research

# マイクロチップレーザーの市場動向

2019年7月18日（木）

鷺尾 邦彦  
有限会社パラダイムレーザーリサーチ

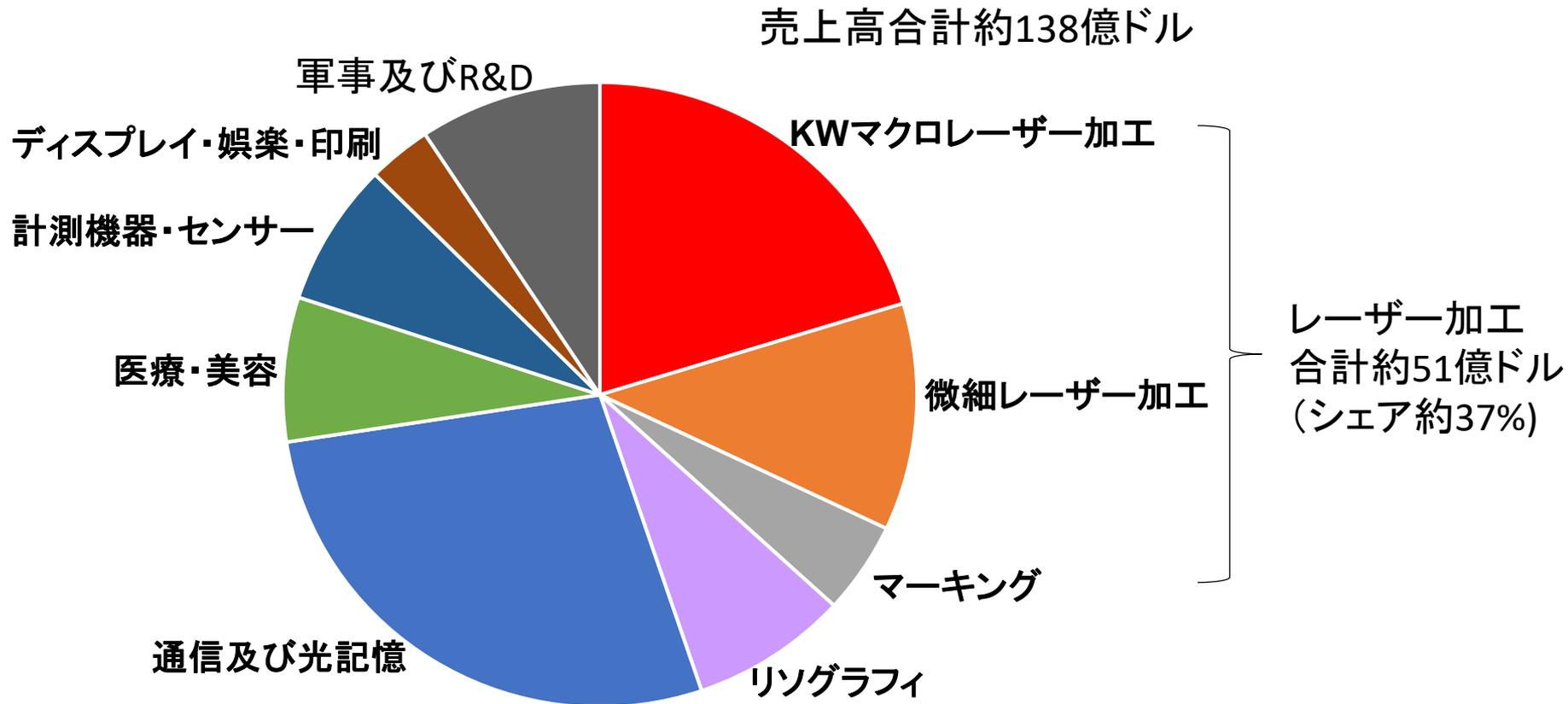
[k-washio@paradigm-laser-research.jp](mailto:k-washio@paradigm-laser-research.jp)

# マイクロチップレーザーの市場動向

## 内 容

1. レーザー発振器及びレーザー加工機世界市場全体の動向
2. ナノ秒短パルスレーザー及び超短パルスレーザー分野の論文数年次推移
3. 高出力・ナノ秒及びサブナノ秒レーザーの各種応用分野の動向
  - (1) レーザー加工(微細加工、ピーニング、LLO(リフトオフ)、クリーニング)
  - (2) 計測・イメージング(LiDAR、LIBS、PAT、PAM、PIV)
4. 市販マイクロチップレーザーの現状
5. 今後の課題

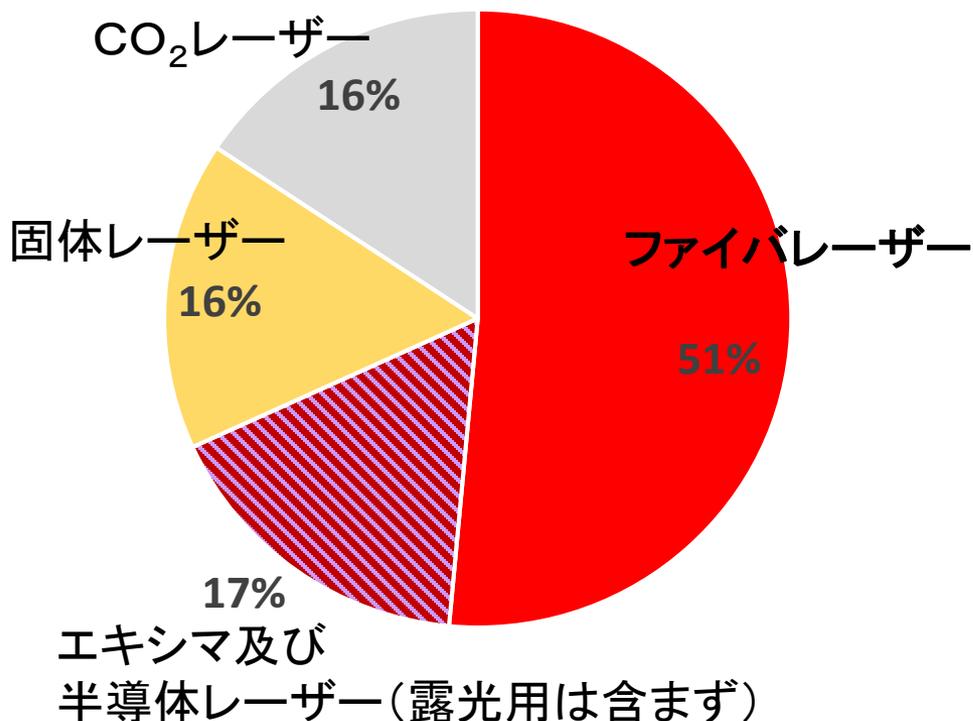
# 2018年のレーザー発振器世界市場



A. Noguee: "Worldwide Laser Market Review & Forecast," Lasers & Photonics Marketplace," San Francisco, USA, Feb. 4, 2019、及び  
G. Overtone, et al: "Annual Laser Market Review & Forecast 2019," Laser Focus World, (Jan., 2019) p. 40, のデータをもとに、グラフを作成

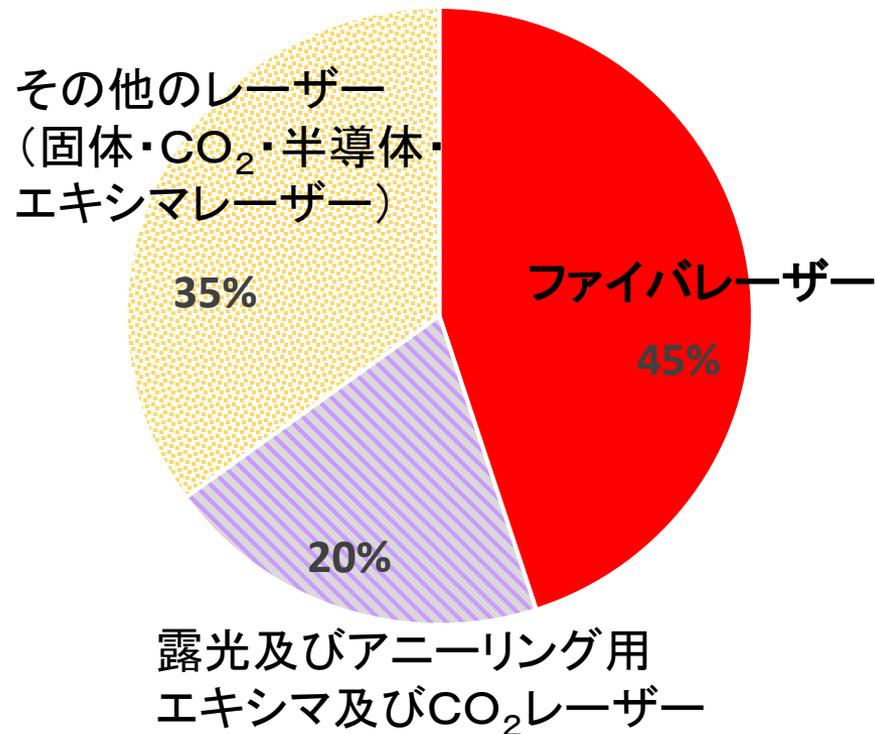
# 2018年の産業用レーザー発振器売上高の機種別内訳

総額5,058百万ドル



D. Belforte: "2018 was another record year, Contending with turmoil," Industrial Laser Solutions, Jan/Feb., (2019) 9

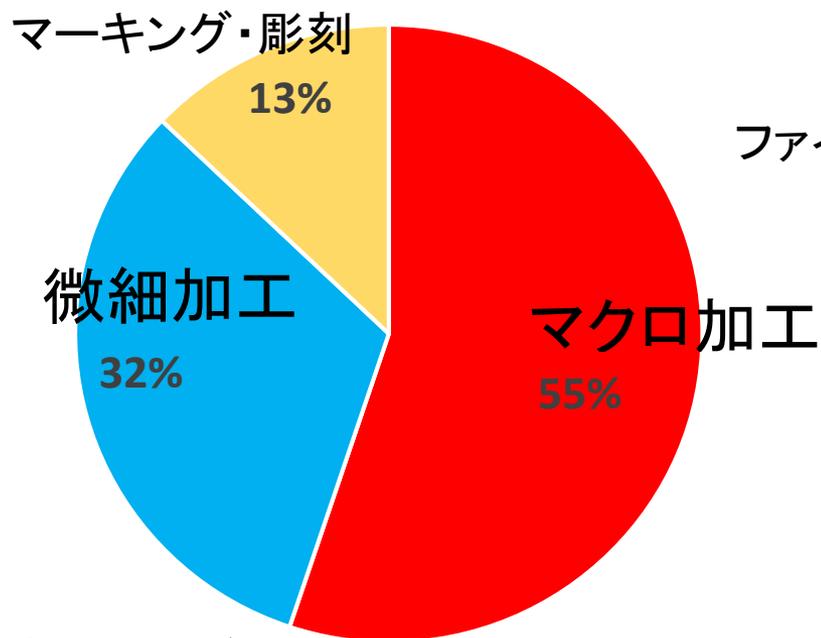
総額51億ドル  
(うち超短パルスレーザー10%)



A. Mayer: "Update on the global market for lasers and systems in Materials processing Vigorous growth, will it last?", 14<sup>th</sup> International Laser Marketplace, June 26, 2019, Munich, Germany

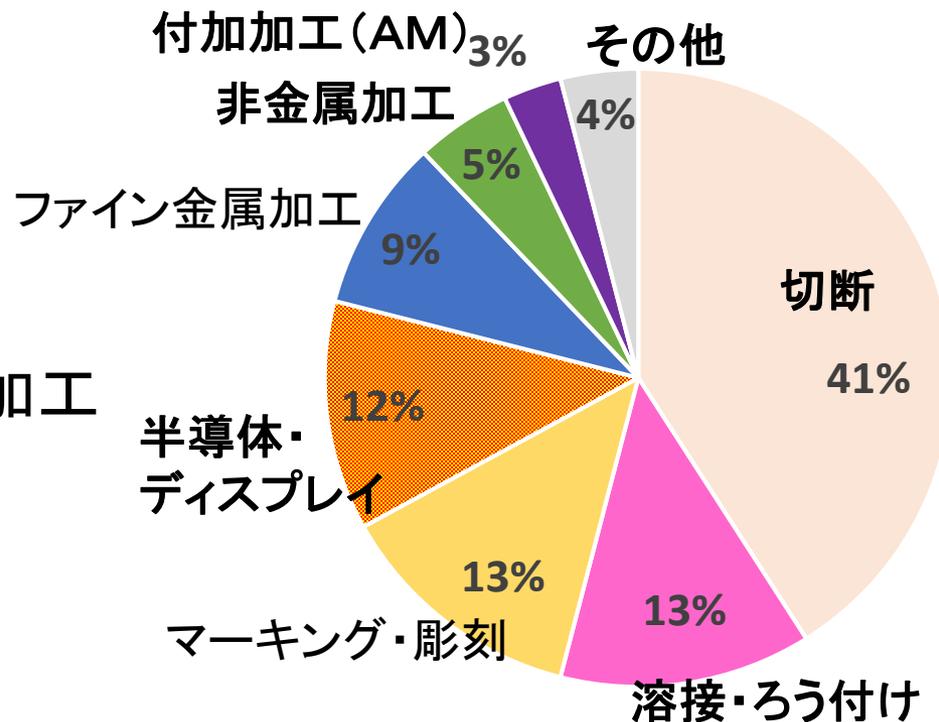
# 2018年の産業用レーザー発振器売上高の用途別内訳

総額51億ドル



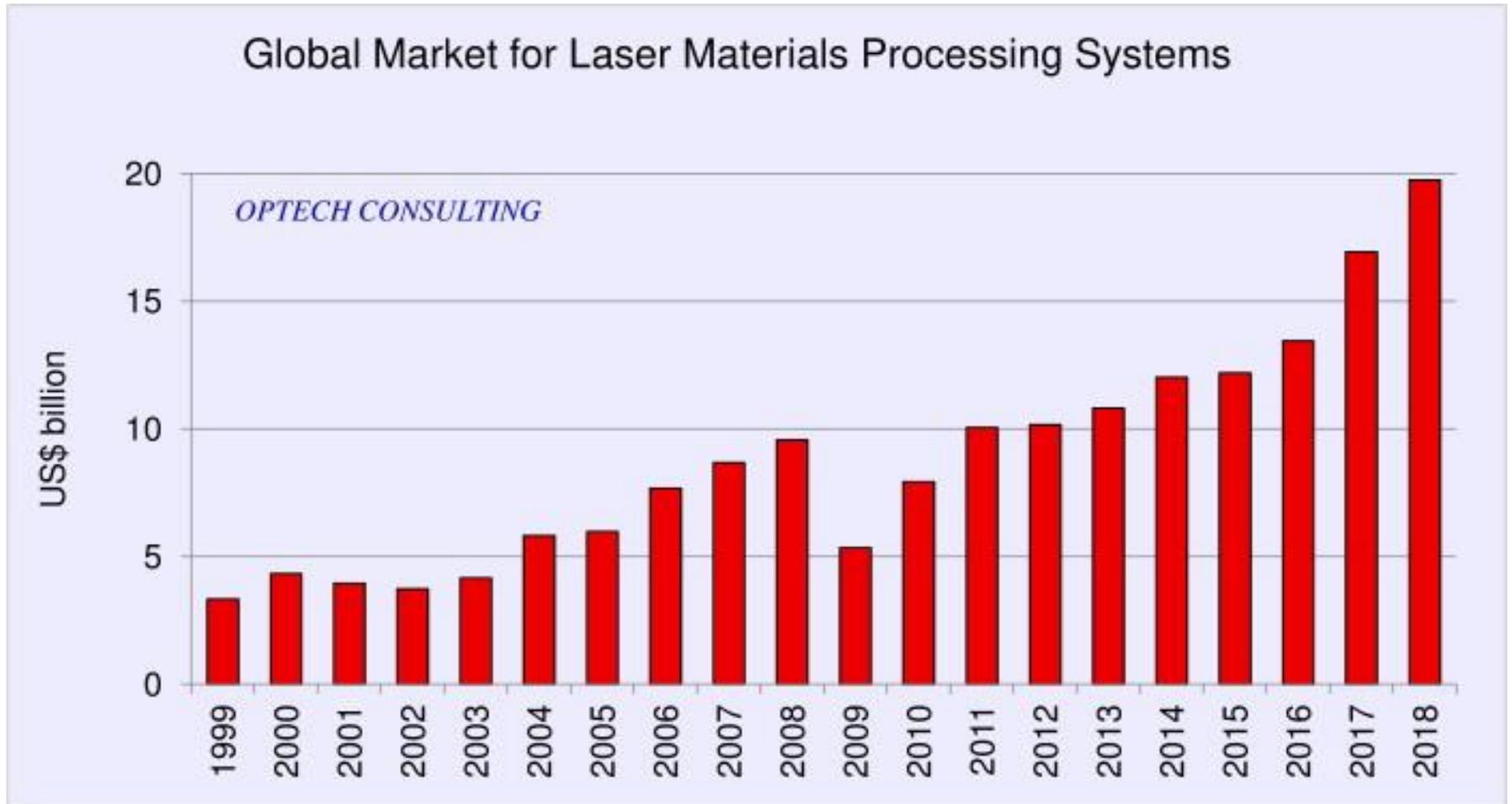
エキシマ及び  
半導体レーザー(露光用は含まず)

総額51億ドル



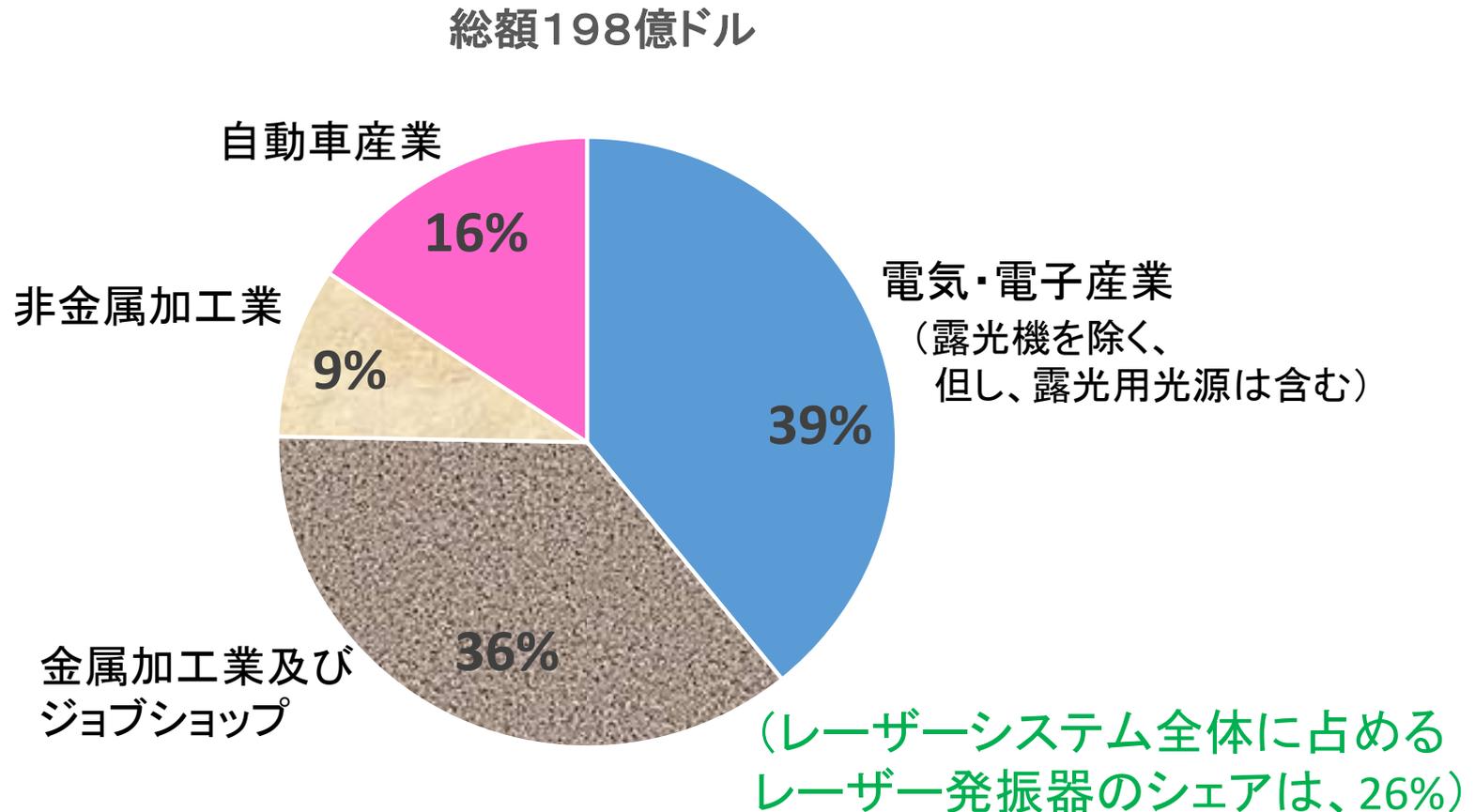
D. Belforte: "2018 was another record year, Contending with turmoil,"  
Industrial Laser Solutions, Jan/Feb., (2019) 9

# 2018年の産業用レーザーシステム売上高の年次推移



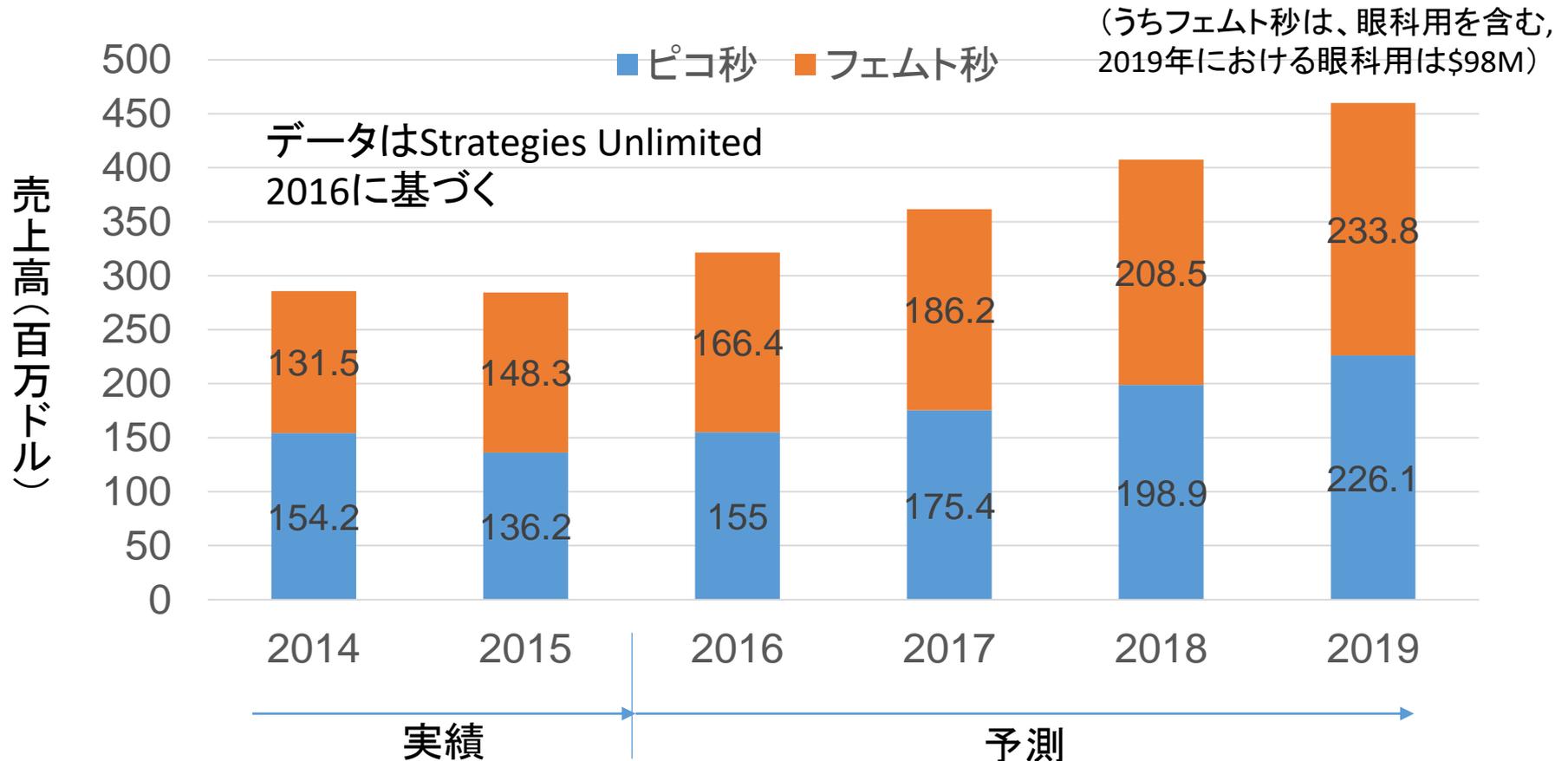
[http://www.optech-consulting.com/html/laser\\_market\\_data.html](http://www.optech-consulting.com/html/laser_market_data.html)

# 2018年の産業用レーザーシステム売上高の ユーザー業種別内訳



A. Mayer: "Update on the global market for lasers and systems in Materials processing Vigorous growth, will it last?", 14<sup>th</sup> International Laser Marketplace, June 26, 2019, Munich, Germany

# 加工用超短パルスレーザーの市場予測



N. Hodgson, et al: "Industrial femtosecond lasers and material processing,"  
Industrial Laser Solutions, Web exclusive, Jan. 22, 2019.

<https://www.industrial-lasers.com/home/article/16489137/industrial-femtosecond-lasers-and-material-processing>

# 2018年加工用ナノ秒固体レーザー発振器市場規模の推定 (1/2)

ナノ秒固体レーザー発振器は、微細加工用ないしマーキング・彫刻用に使用されるが、まだマクロ加工には使用されていないとみなすと、前述した2018年の産業用レーザー発振器売上高(総額51億)のうちの、微細加工(32%)及びマーキング(13%)を合算した51億ドル×45%=23億ドルの1部である。

前述した、D. Belforte氏による2019版のレポートでは、微細加工及びマーキング等に関するレーザー発振器機種別売上高構成が明示されていないので、前年の2018年版のレポートに掲載されていたレーザー発振器売上高の2018年シェア予測値を利用して、上記の23億ドルを按分する。

## 2018年初における2018年市場予測

	微細加工	マーキング	合計	シェア
ファイバ	470	353	827	37.8%
固体	197	44	241	11.1%
CO2	215	217	432	19.8%
エキシマ・ 半導体	73	610	683	31.4%
合計	\$686M	\$1492M	\$2,178M	100%



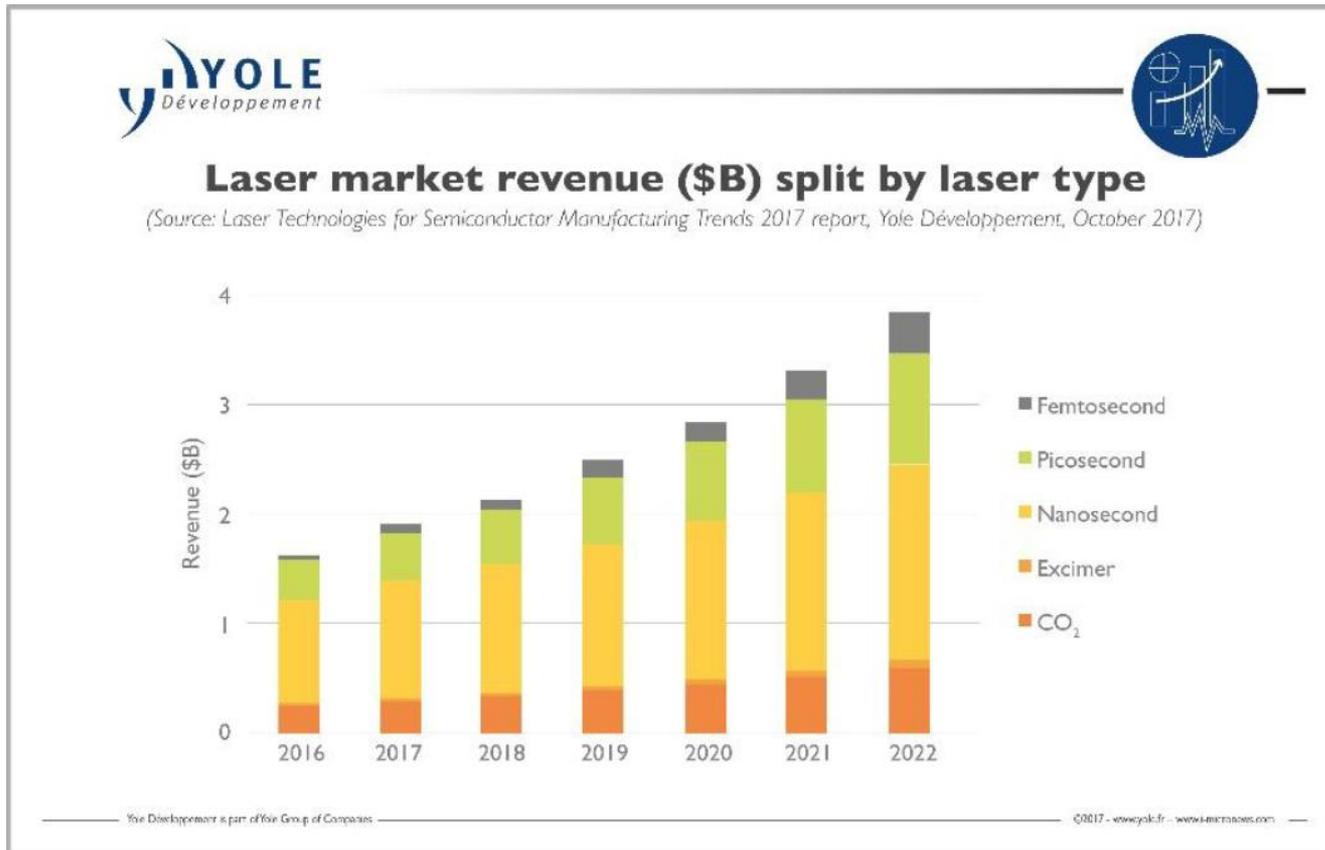
レーザー	按分結果
ファイバ	868
固体	255
CO2	455
エキシマ・ 半導体	722
合計	\$2,300M

# 2018年加工用ナノ秒固体レーザー発振器市場規模の推定 (2/2)

1. 微細加工及びマーキングに使用されているファイバレーザー及び固体レーザーは、すべてパルスレーザーであり、それらはナノ秒レーザーか超短パルスレーザーのいずれかであると仮定。
2. 超短パルスレーザーは、ファイバレーザーないし固体レーザーのいずれかであり、CO<sub>2</sub>レーザー、エキシマレーザー、ダイオードレーザーには含まれないと仮定。
3. 2018年における加工用超短パルスレーザーの売上高は、前述したHodgsonらによる2018年の予測結果(\$407M)から眼科用(\$90Mと推定)を差し引いた、約\$300Mと推定
4. 加工用超短パルスレーザーのうち、固体レーザーとファイバレーザーの売上高比は、SU社の2014年の予測値\*を参考にして、現在はほぼ1:1であると仮定→2018年の超短パルス固体レーザー及びファイバレーザーの売上高は、それぞれ\$150M、\$150Mと推定
5. 上記の仮定のもとでは、2018年における加工用ナノ秒固体レーザー及びファイバレーザーの売上高は、それぞれ\$105M、\$718Mと推定される。(上記の仮定のもとでは、加工用超短パルスレーザーの2018年の市場規模はナノ秒市場の1.5倍と計算された)。

\* F. Pescarmona: "Fiber based cables for ultrashort pulse delivery," (2017)  
<https://www.swissphotonics.net/libraries.files/Pescarmona.pdf>

# 半導体産業向けレーザー装置（検査機を含む）の 搭載レーザー機種別売上高推移の予測



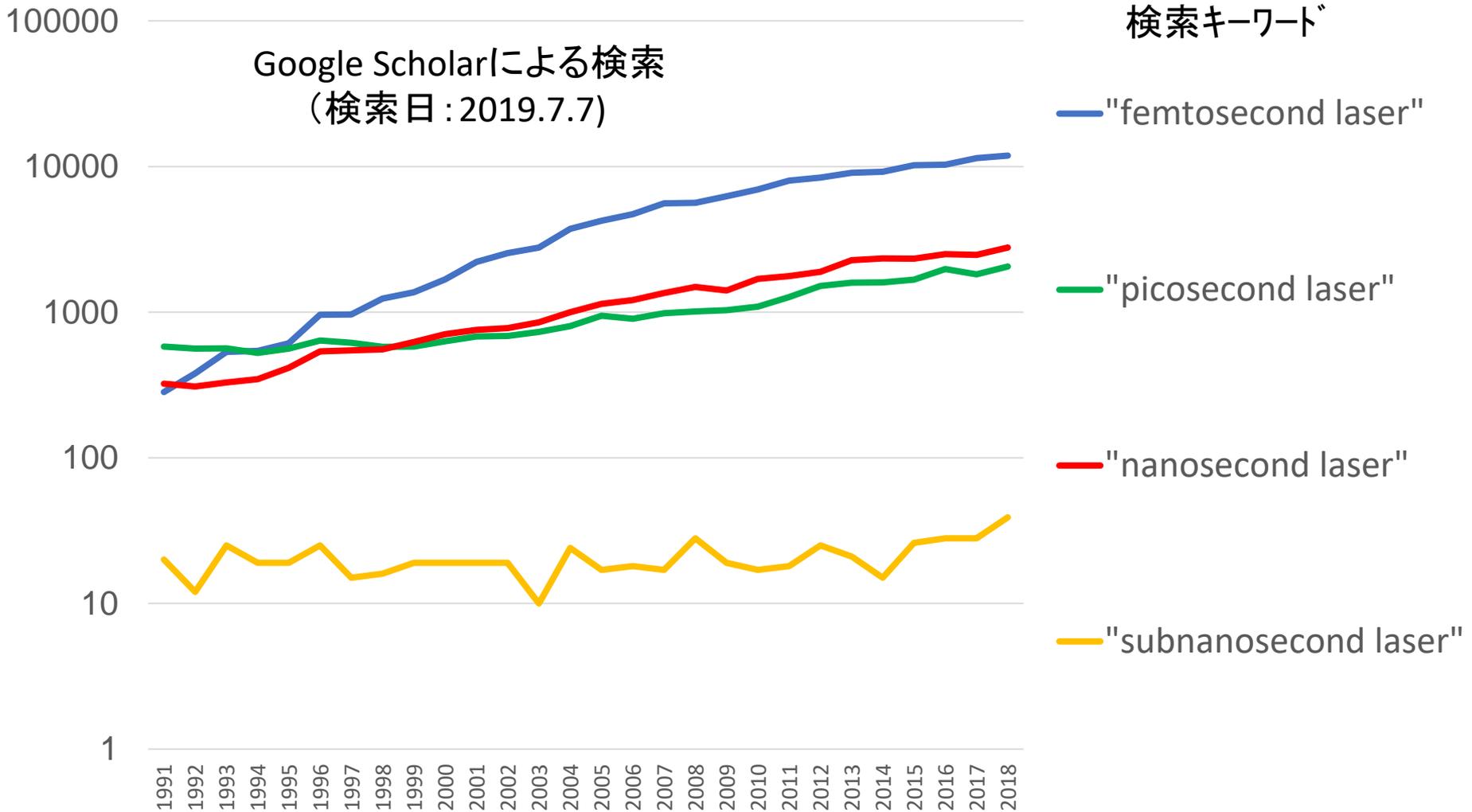
Yoleのレポートでは、フラットパネル用、太陽電池用、及びEUVリソグラフィ用を除外している。

このレポートでは、ナノ秒レーザー搭載機種 of 売上高がかなり大きく、超短パルスレーザーやエキシマレーザー搭載機種の売上高は小さいと予測されている。

Yole Développement: “Laser technologies for semiconductor manufacturing,” October, 2017

[http://www.yole.fr/LaserTechnologies\\_SemiManufacturing\\_MarketOverview.aspx](http://www.yole.fr/LaserTechnologies_SemiManufacturing_MarketOverview.aspx)

# ナノ秒レーザー及び超短パルスレーザー分野の論文数年次推移\*



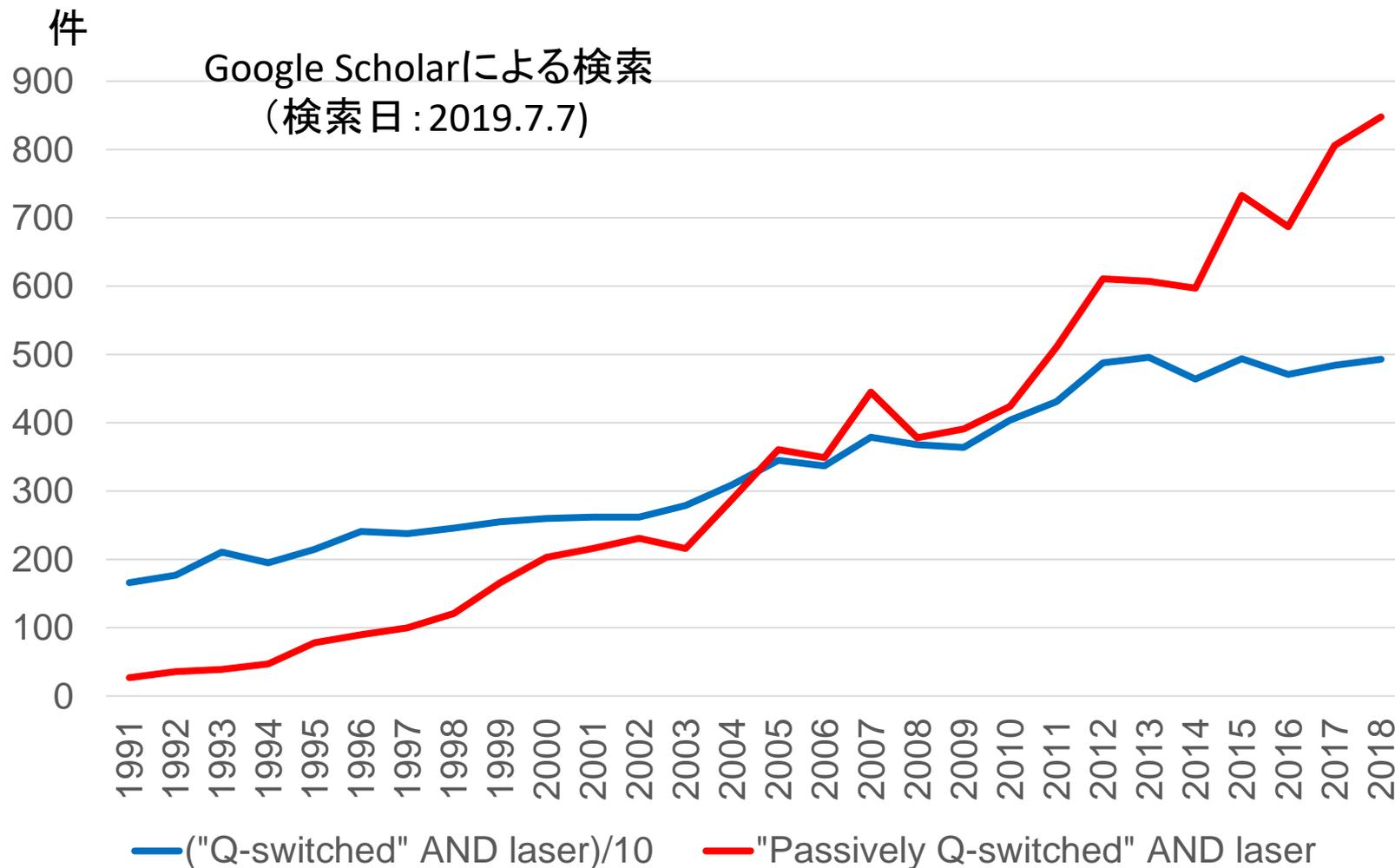
注: 固体レーザー及びファイバレーザーのみでなく、エキシマなど他のレーザーも含まれる<sup>12</sup>

# Google Scholar上での論文検索ヒット件数の年次推移

Qスイッチレーザー全体/10

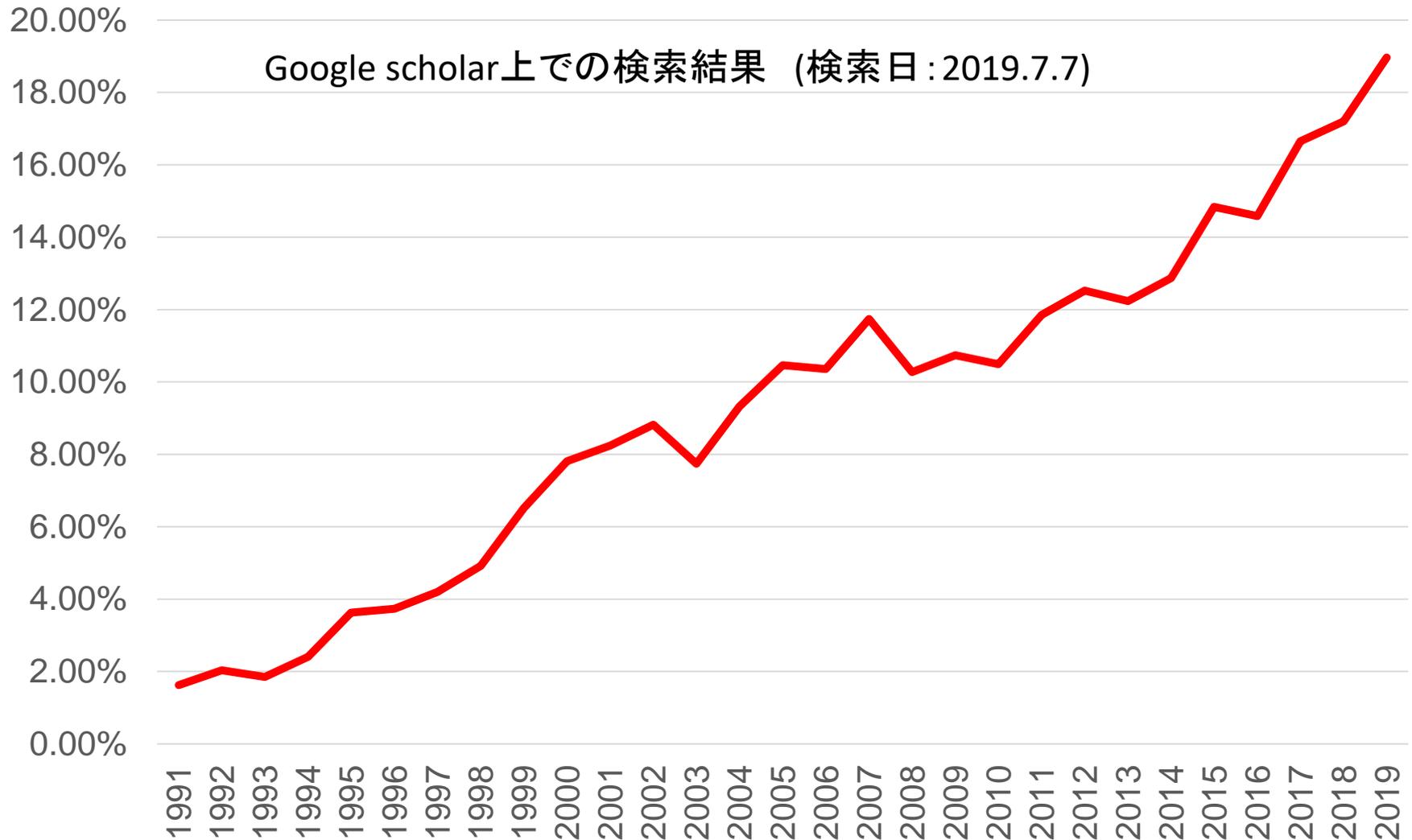
対

受動Qスイッチレーザー



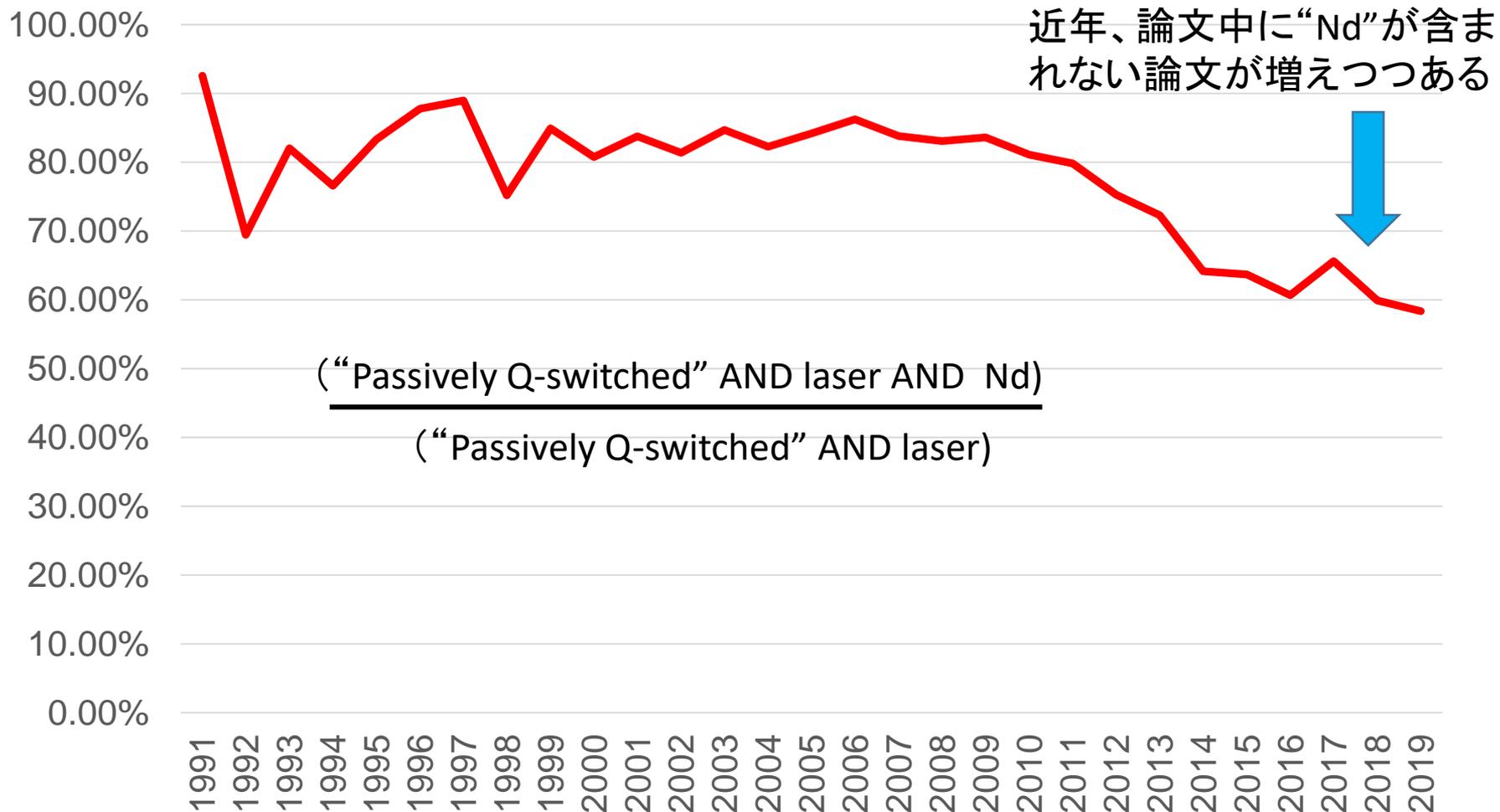
# 受動Qスイッチレーザー関連の論文シェア年次推移

(“Passively Q-switched” AND laser) vs. (“Q-switched” AND laser)



# 受動Qスイッチレーザーの論文におけるNdのシェア年次推移

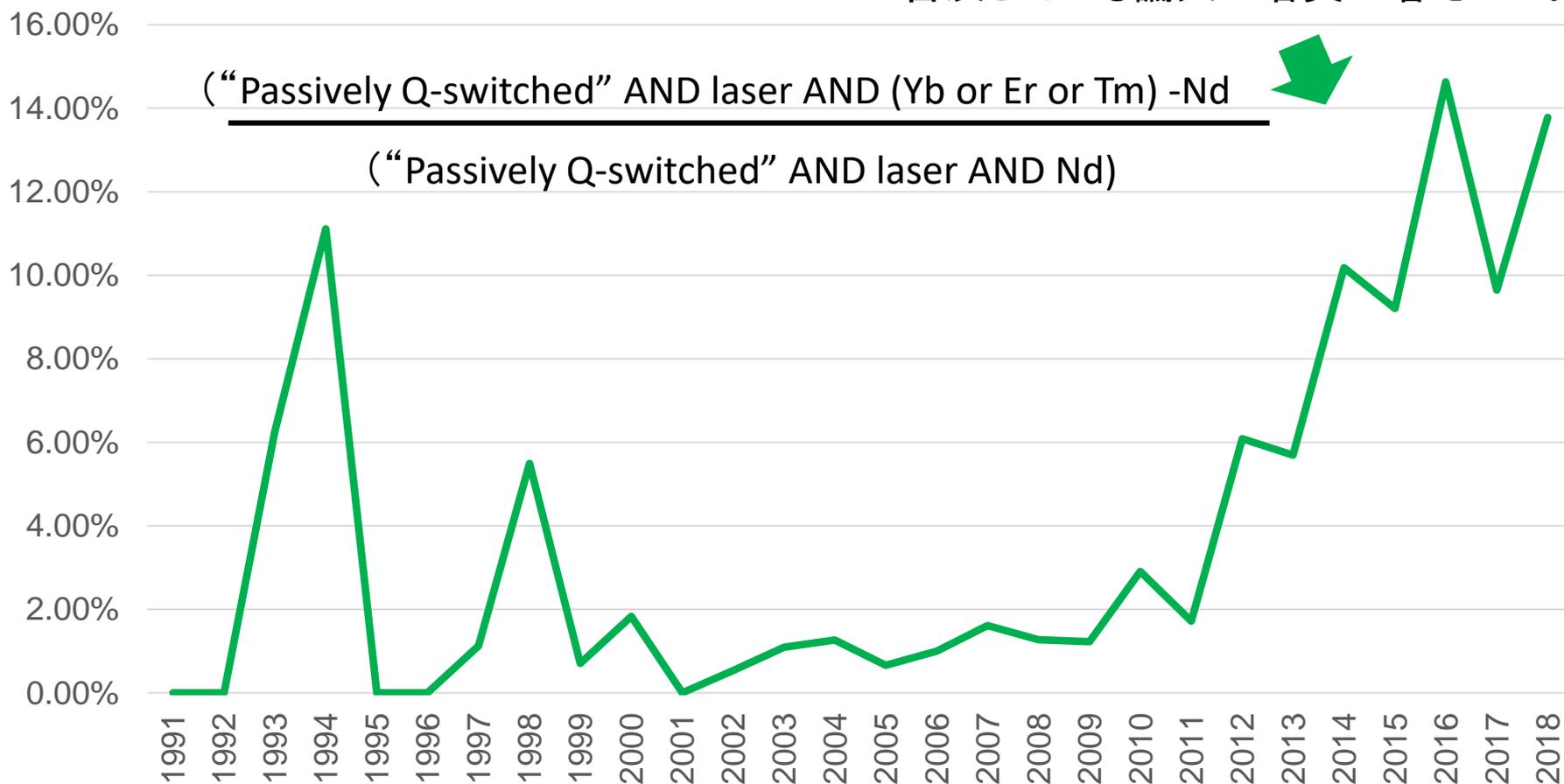
Google scholar上での検索結果 (検索日: 2019.7.7)



# 受動Qスイッチレーザーの論文における(Yb,Er,Tm)対Ndの年次推移

Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.7)

近年、論文中に“Nd”以外の活性イオンに言及している論文が着実に増えつつある



# 1 μm帯ナノ秒レーザー(基本波)の代表的機種の様例

機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー(μJ)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (ns)	平均出力 (W)
Matrix- 1064-1-LP (Coherent)	1064 (媒質: NA)	(710 at 1.4kHz)	up to 10	>40	1 at 1.4 kHz
Matrix- 1064-7-10 (Coherent)	1064 (媒質: NA)	(700 at 10 kHz)	up to 30	<60	7 at 10 kHz
Matrix-10-30 (Coherent)	1064 (媒質: NA)	(330 at 30kHz)	up to 100	<40	10 at 30 kHz
TruMicro 7060 (Trumpf)	1030 (Yb:YAG)	80,000	5 ~ 100	30	750
TruMark 5020 (Trumpf)	1062 (Yb:fiber)	NA	CW, 1 ~1,000	9 ~200	NA
TruMark 1110 (Trumpf)	1064 (Nd:YVO <sub>4</sub> )	NA	15 ~ 100	NA	NA
YLPN-100-25x100-1000-S (IPG Photonics)	1064 (Yb:fiber)	(500,000 at 2kHz)	2 ~50	25, 50, 70, 100	Max 1000
YLPN-1-1-100-M (IPG Photonics)	1060 (Yb:fiber)	1,000	10 ~ 300	1.3 ~2.0	100
YLPN-1-10mJ, 200W (IPG Photonics)	1064 ±2 (Yb:fiber)	200 ~ 10,000	2 ~2,000	30~1,500	200
Quanta-Ray Pro-290-50Hz (Spectra-Physics)	1064 (Nd:YAG)	1000,000	0.05	8 ~12	50
Quanta Ray Lab-190-100Hz (Spectra Physics)	1064 (Nd:YAG)	325,000	0.1	8 ~12	32.5
Quanta-Ray INDI-40-20Hz (Spectra-Physics)	1064 (Nd:YAG)	420,000	0.02	6 ~ 9	8.4

# UVナノ秒固体 (THG) レーザーの代表的機種仕様例

機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー (μJ)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (ns)	平均出力 (W)
AVIA LX 355-20 (Coherent)	354.7 (媒質 : NA)	Up to 400	Single shot to 300 kHz	<30 at 50 kHz	>20 at 50 kHz >5 at 200 kHz
AVIA NX 355-30 (Coherent)	354.7 (媒質 : NA)	250 at 120 kHz	Single shot to 300 kHz	<32 up to 120 kHz	30 at 120 kHz
MATRIX 355-8-50 (Coherent)	(355) (媒質 : NA)	(160 at 50 kHz)	Up to 150 kHz	<25	8 at 50 kHz
Talon 355-45 (Spectra-Physics)	355 (媒質 : NA)	(300 at 150kHz, 175 at 200 kHz)	0 to 500 kHz	<35 at 150 kHz	>45 at 150kHz >35 at 200kHz
Talon HE 355-500 (Spectra-Physics)	355 (媒質 : NA)	500 at 20 kHz 42typ at 100kHz	(0 to 150 kHz)	25~40 at 20 kHz	10 at 20 kHz 4.2typ at 100kHz
Quasar 355-60 (Spectra-Physics)	355 (媒質 : NA)	>300	0 to 3.5 MHz	<2 to >100	>60 at 200 kHz
Explorer One HP 355-4 (Spectra-Physics)	355 (Nd:YVO <sub>4</sub> )	>50 at 80 kHz	Single shot to 500 kHz	<15 at 80 kHz	>4 at 80 kHz
TruMicro 7370 (Trumpf)	343 (Yb:YAG)	Max 18,000 at 10 kHz	Min. 10 kHz	15 ±3	180 at 10 kHz
TruMark 3330 (Trumpf)	355 (Nd:YVO <sub>4</sub> )	NA	1 ~120 kHz	NA	NA
ULPN-355-10-1-5-M (IPG Photonics)	355 ((Yb: fiber)	10 (10~500 kHz)	10 ~500 kHz	1.2	5
ULM/ULR-200 (IPG Photonics)	355 ((Yb: fiber)	2.5	80 MHz (80,000 kHz)	~1.4	200
Quanta-Ray Pro 350 (Spectra-Physics)	355 (Nd:YAG)	750,000 at 0.01	100 Hz (0.01 kHz)	8~12	7.5

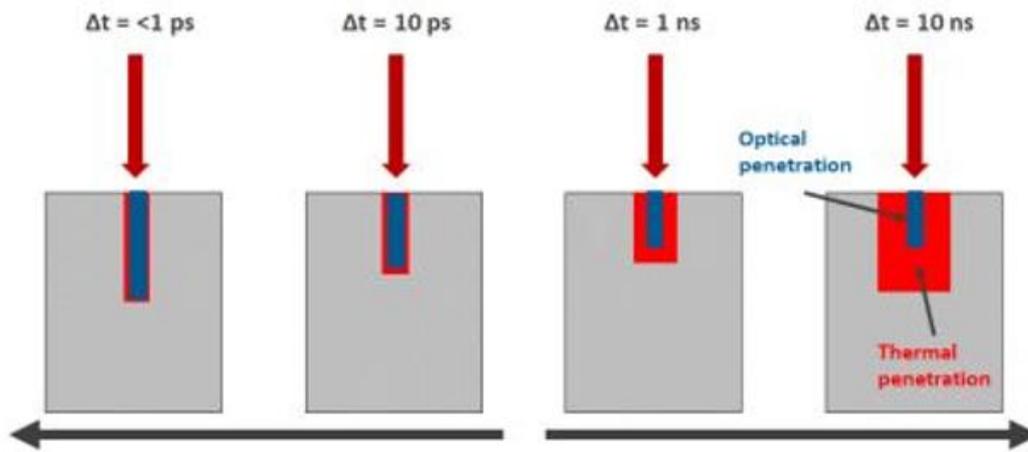
# 1 μm帯ピコ秒レーザー(基本波)の代表的機種の仕事例

機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー (μJ)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (ps)	平均出力 (W)
HyperRapid NX 1064-100 (Coherent)	1064 (媒質: NA)	>250	200 ~1,000 kHz	15 ps (0.015ns)	>100 at 500 kHz
Hyper Rapid 100 (Coherent)	1064 (媒質: NA)	225 at 400 kHz 90 at 1000 kHz	400 ~1,000 kHz	<15 ps (<0.015ns)	90 with AOM (100 w/oAOM)
Rapid NX (Coherent)	1064.5 ±0.5 (媒質: NA)	50 at 50 kHz 7 at 1 MHz	50 ~1,000 kHz	10~15 ps	7 W at 1MHz 2.5 Wat 50 kHz
Helios 1064-5-50 (Coherent)	1064 (媒質: NA)	>100	Single shot to 70 kHz	<0.69ns (<690ps)	5 W at 50 kHz
IceFyre 1064-50 (Spectra-Physics)	1064 (Hybrid: Fber+)	>200 at 200 kHz	Single shot to 10 MHz	<20 ps (<0.02ns)	>50 at 400 kHz w/o AOM
TruMicro 5080 (Trumpf)	1030 (Yb:YAG)	Max 250	600 ~1,000 kHz	10 ps (0.01 ns)	150
TruMicro 5050 (Trumpf)	1030 (Yb:YAG)	Max 125	200 ~ 400 kHz	<10 ps (<0.01 ns)	25
TruMicro 2030 (Trumpf)	1030 (Yb:Fiber)	20 at 330 kHz 50 (Option at 125 kHz)	330~1,000 kHz (option 400 kHz at 50 μJ)	20 <400 fs 可変	20
YLPP-150x5000-30-M (IPG Photonics)	1060 (Yb:Fiber)	(50 at 600 kHz)	30 ~600 kHz	150 ps at 600 kHz	30
YLPP-25-50-R (IPG Photonics)	1060 (Yb:Fiber)	25	50 ~2,000 kHz	1 ~3 ps (2 Typ)	50
YLPP-100-3-100-R (IPG Photonics)	1060 (Yb:Fiber)	100 (50~1000 kHz)	50 ~2,000 kHz	1 ~3 ps (2 ps Typ)	100
YLPP-100-70-50-M (IPG Photonics)	1060 (Yb:Fiber)	100	10 ~ 1,500 kHz	70	50

# 1 $\mu$ m帯フェムト秒レーザー(基本波レーザー)の代表的機種の仕事例

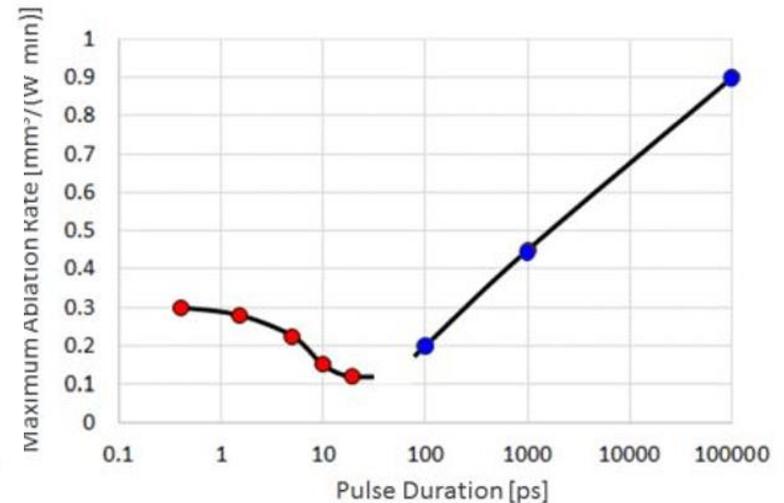
機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー ( $\mu$ J)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (fs)	平均出力 (W)
Monaco 1035-80-60 (Coherent)	1035 $\pm$ 5 (fiber CPA)	80 at 750 kHz	Single-shot to 1MHz with AOM	350	60
Monaco 1035-80-40 (Coherent)	1035 $\pm$ 5 (fiber CPA)	80 at 500 kHz	Single-shot to 1MHz with AOM	350	40
Rapid FX (Coherent)	1030 $\pm$ 5 (媒質: NA)	100 at 100 kHz	100 kHz, 200 kHz	<900	>10
SRARFEMTO FX (Coherent)	1030 (媒質: NA)	Max 200 (Max peak power 660 MW)	Single pulse to 1,000 kHz	300 fs to 10 ps	15
Spirit 1030-100 (Spectra-Physics)	1030 $\pm$ 5 (媒質: NA)	>100	Single-shot to 10 MHz	<400	>100
Spirit One (Spectra-Physics)	1040 $\pm$ 5 (媒質: NA)	>40 at 200 kHz	200 kHz, or 1 MHz	<400	>8
Spirit 1040-16 (Spectra-Physic)	1040 $\pm$ 5 (媒質: NA)	>40 at 400 kHz	400 kHz~1 MHz	<400	>16
Spirit ClearShape 1040-8 (Spectra-Physics)	1040 $\pm$ 5 (媒質: NA)	>40 at 200 kHz	Single-shot to 200 kHz	<400	>8
TruMicro 5080 Femto Ed. (Trumpf)	1030 (Yb:YAG)	Max 200	600 kHz~ 1,000 kHz	900 $\pm$ 150	120
TruMicro 2030 (Trumpf)	1030 (Yb:fiber)	20 (Option 50 at 400 kHz)	330 kHz~1,000 kHz (125 kHz~2,000 kHz)	<400 ~20 ps	20
YLPF-100-900-R (IPG Photonics)	1030 (Yb:fiber)	100 (Peak~110 MW)	50 kHz ~2,000 kHz	<900	100
YLPF-50-500-50-R (IPG Photonics)	1030 (Yb:fiber)	50 (Peak~100 MW)	50 kHz ~2,000 kHz	<500	50 <sup>20</sup>

# 短パルスレーザーアブレーションを用いた 微細形状加工における基本的事項 (1)加工除去速度のパルス幅依存性(1/2)



Absorption of a laser pulse in a medium is shown, where energy penetration is represented in blue and volume heated via heat conduction in red.

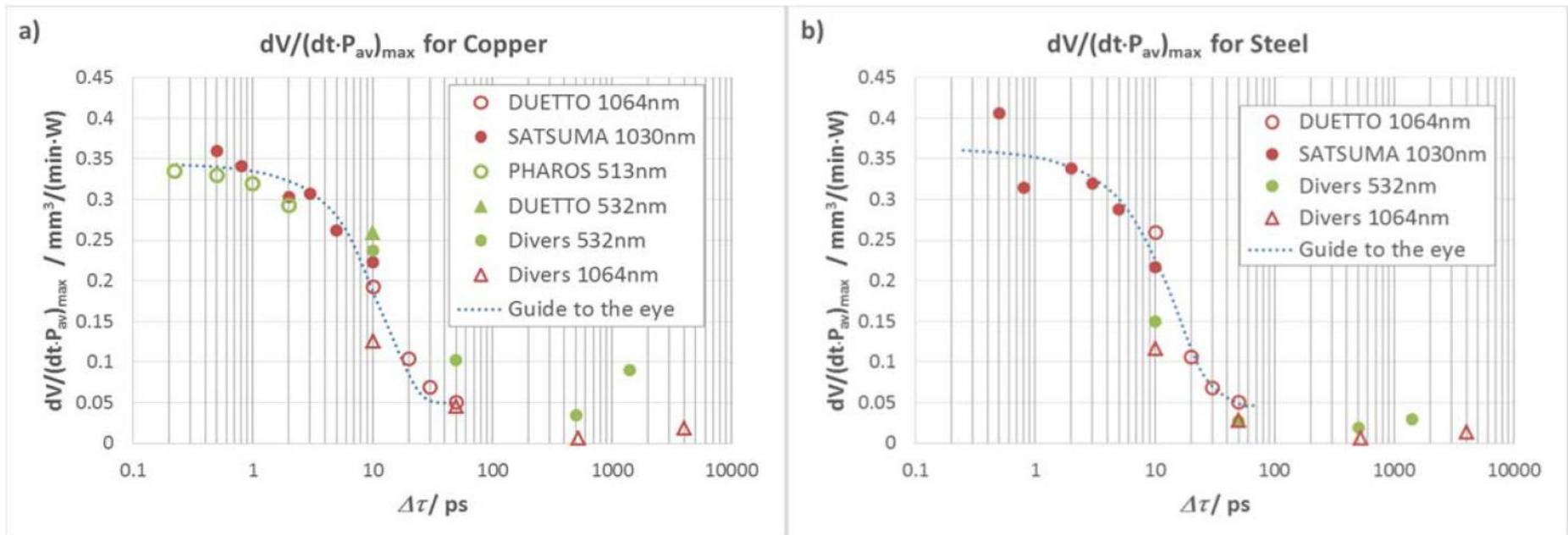
金属は、10ps以下では、一般的に、短パルス化するほど、深達長 (Penetration depth  $\delta$ ) が増し、除去速度が向上



Maximum ablation rates of **aluminum** with Coherent's measured values (red dots) and using values taken from data published by Breitling et al. (blue dots)

長尺パルス ( $\tau_p \gg 10\text{ps}$ ) 領域では、HAZが大きくなり、加工品質が劣化する

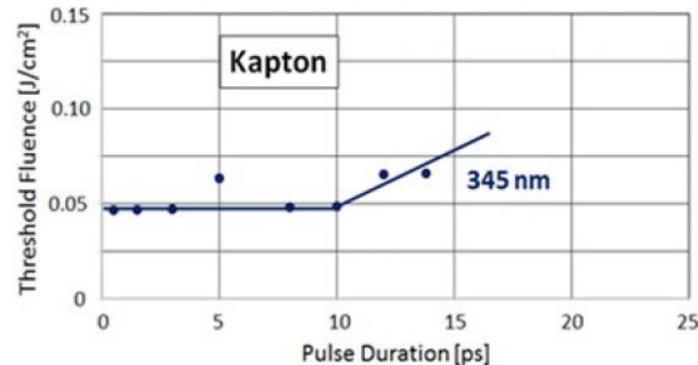
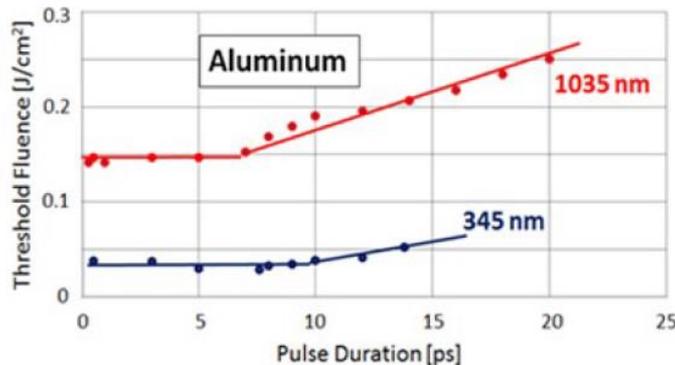
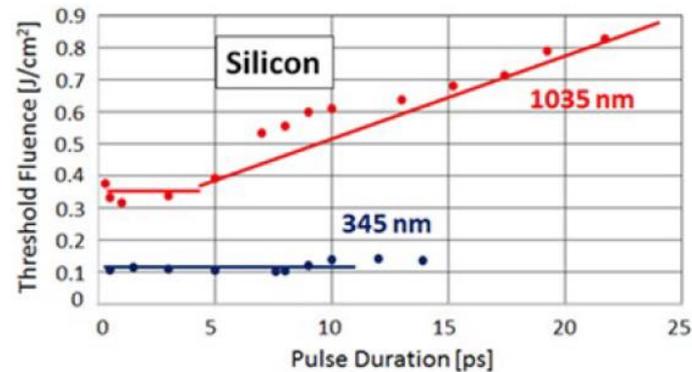
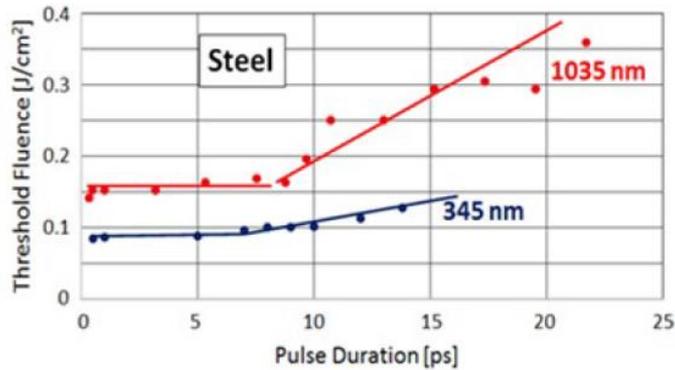
# 短パルスレーザーアブレーションを用いた 微細形状加工における基本的事項 (1)加工除去速度のパルス幅依存性(2/2)



Maximum removal rate for (a) copper and (b) steel for pulse durations between 250fs and 4ns.

B. Neuenschwander, et al: "Surface structuring with ultra-short laser pulses: Basics, limitations and needs for high throughput," Phys. Proc., **56** (2014) 1047.

# 短パルスレーザーアブレーションを用いた 微細形状加工における基本的事項 (2) 加工しきい値のパルス幅及び波長依存性



短波長化のメリットは、集光スポットサイズの縮小による加工しきい値の低下。

しかし、波長変換に伴う光源の効率低下は、要注意

Measured single-shot damage threshold fluence (average fluence) as a function of pulse duration at 1035 nm and at 345 nm. The spot diameter was 36  $\mu\text{m}$  at 1035 nm, and 20  $\mu\text{m}$  at 345 nm.

N. Norman, Et al.: "Ultrafast Laser Ablation at 1035 nm, 517 nm and 345 nm as a Function of Pulse Duration and Fluence," Proc. LiM 2019, June 2019.

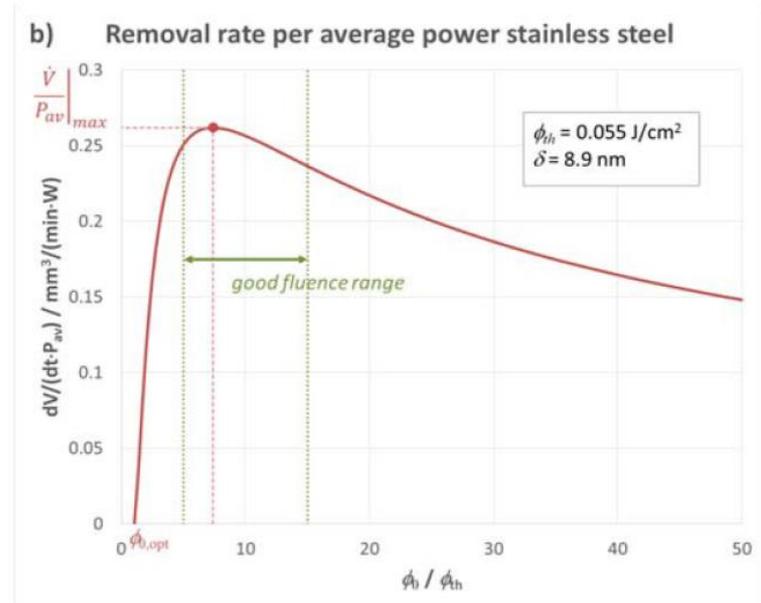
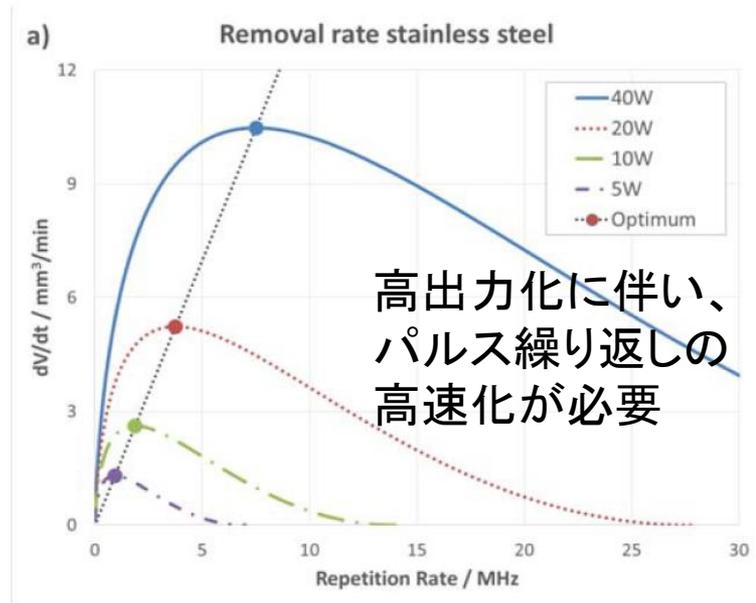
# 短パルスレーザーアブレーションを用いた 微細形状加工における基本的事項

## (2) 加工除去速度のパルス繰返し及びフルーエンス依存性

$$\phi_{0,opt} = e^2 \cdot \phi_{th}$$

$$\frac{f_{opt}}{P_{av}} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w_0^2 \cdot \phi_{th}}$$

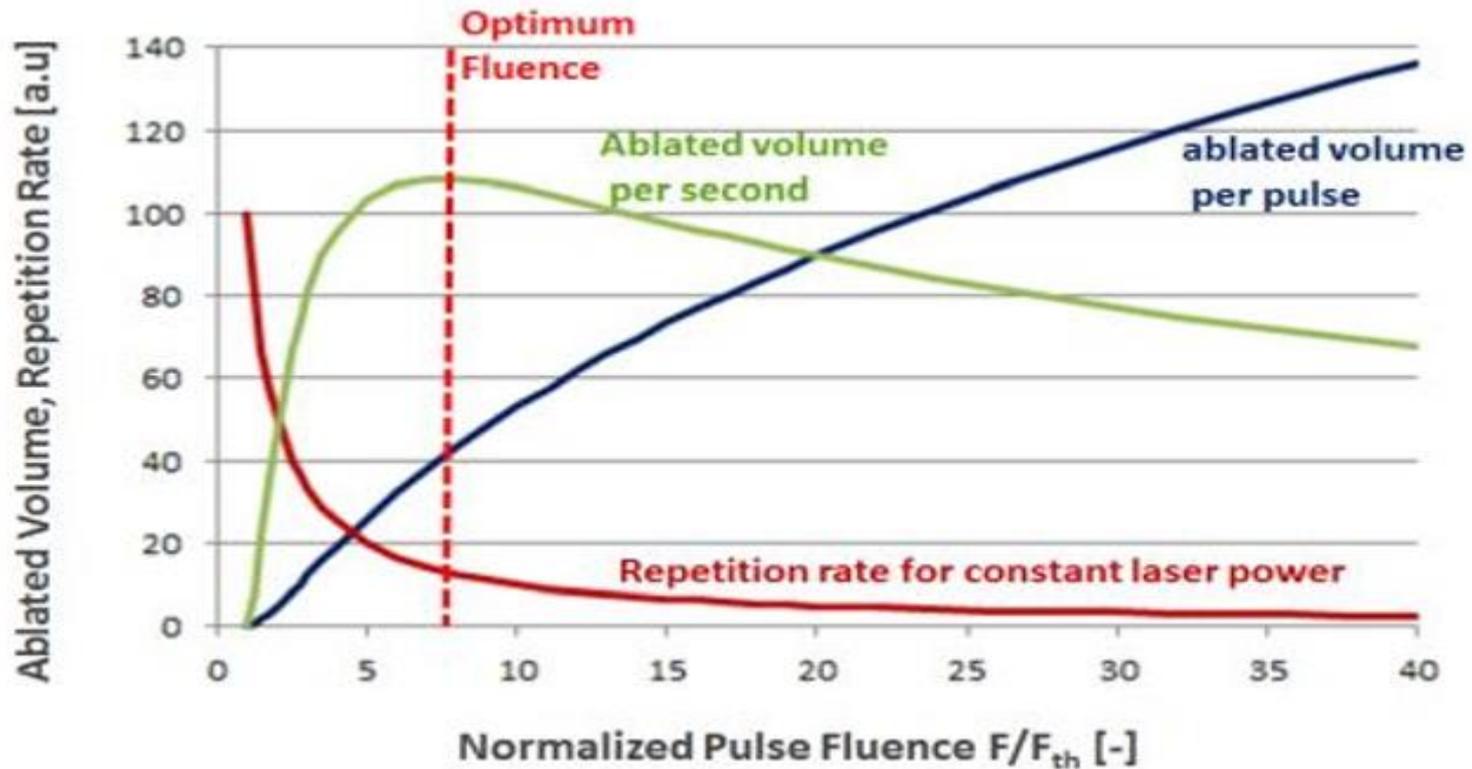
フルーエンスは、しきい値の $e^2 \sim 7.4$ 倍での加工が最も効率的



(a) Removal rate for stainless steel for different average powers as a function of the repetition rate and a spot radius of  $w_0 = 29 \mu\text{m}$ ; (b) Removal rate per average power for stainless steel as a function of the peak fluence  $\phi_0$ .

# 短パルスレーザーアブレーションを用いた 微細形状加工における基本的事項

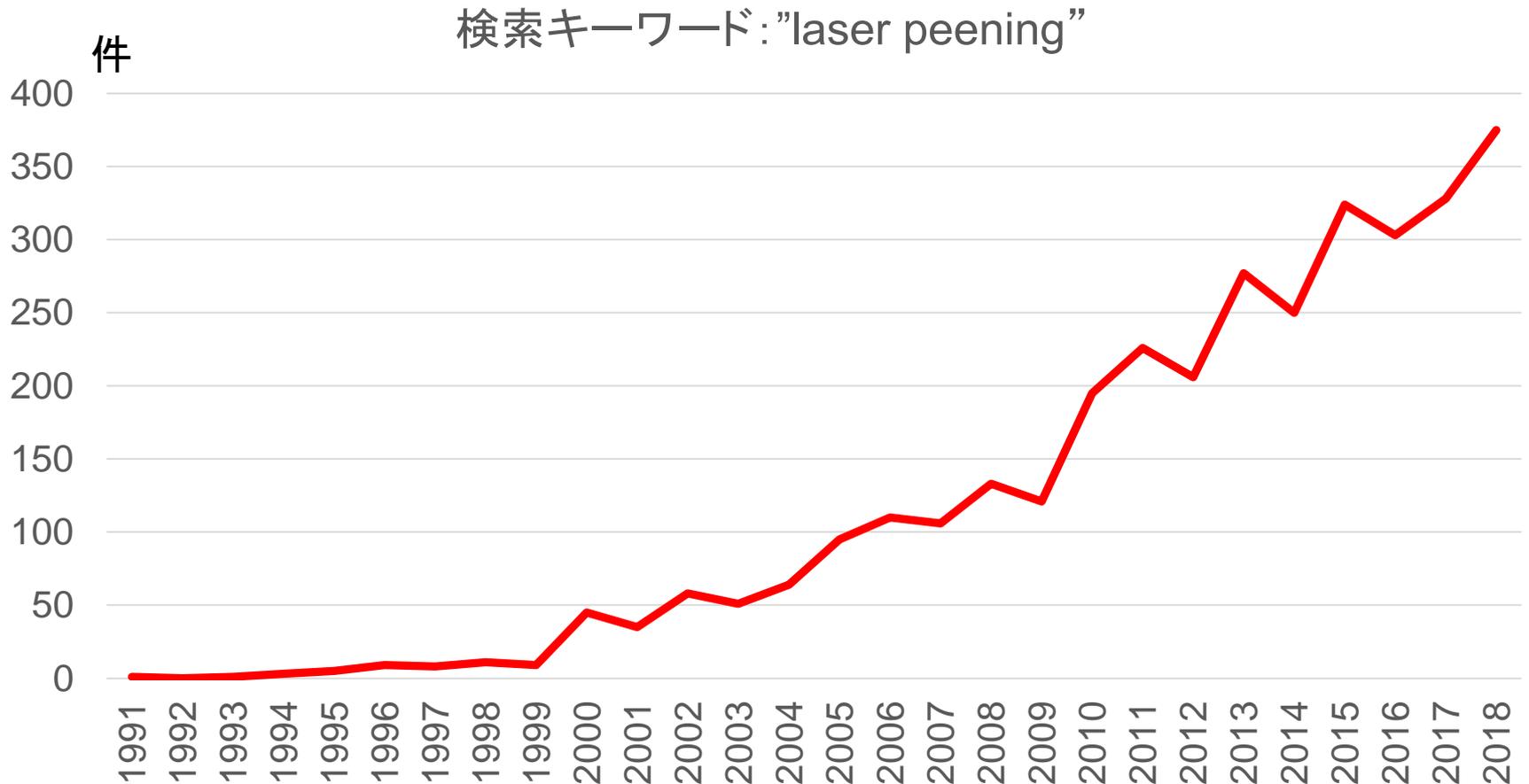
## (3) 加工除去速度及びパルス繰返しのフルーエンス依存性



Ablated volume per pulse (blue curve) and  
ablated volume per second (green curve) **at constant laser power**

# レーザーピーニングに関する論文件数の年次推移

Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



# 多種多様な材料についてのレーザーピーニング における主要パラメーターの一覧

Material (Reference)	Power density (GW/cm <sup>2</sup> )	Pulse duration (ns)	Absorbent coating	Transparent overlay
Ti-6Al-4V [53]	5	10	Al Foil	Water
Ti-17 [82]	3, 6, 9	9, 27	Al	Water
AA2195 [60]	5	18	Al	Water
Al2024 T3 [83]	5	18	Black paint	Water
4140 Steel [84]	3	5	Al	BK7 Glass
316 L SS [85]	2.5	10	No coating	Water
2204 Duplex SS [86]	900, 1600, 2500 pul/cm <sup>2</sup>	8	No	Water
Cu 15 μm foil [87]	6	10	Black paint	Water
Alloy 22 [88]	10	25	Al	Water
Inconel 600 [89]	10 J/cm <sup>2</sup>	12	-	Water Jacket

Material (Reference)	Power density (GW/cm <sup>2</sup> )	Pulse duration (ns)	Absorbent coating	Transparent overlay
Fe-3%Si [4]	0.1-1	25-200	Pb	Quartz
Mg-Ca [79]	78	5 to 7	Black paint	Water
AZ31B Mg [90]	5	23	Al7075	Water
Brass H62 [91]	1000, 2000, 3000 Pulses/cm <sup>2</sup>	10	-	Water
CMSX, AM1, Astroloy [92]	12-150, 90, 25	25, 33, 40	Black paint	Water, Glass

高出力のナノ秒パルスレーザーが  
が用いられている

A. Gujba and M. Medrai: "Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening," Materials, 7 (2014) 7925.

# レーザーピーニングに適用可能な既存の 高出・ナノ秒レーザーの仕様例

機種名 (メーカー名) 又は “装置保有機関”	波長 (nm)	パルス エネルギー (J)	パルス幅 (ns)	パルス 繰り返し (Hz)	備考
“Curtiss Wright”	1064 ?	25	25	5 ?	Flashlamp励起
GAIA HP (Thales)	1064 (Nd:YAG)	24	7-10	5	Flashlamp励起
LPY 10J (Litron Lasers)	1064 (Nd:YAG)	10	7-11	5	Flashlamp励起
NL 310 (Ekspla)	1064 (Nd:YAG)	10	4~6	10 or 20	NA (DPSS?)
Laser Peening Systems Procudo 200 (LSP Technologies)	1053 (Nd:YLF)	10	8-16	20	DPSS、なお レーザー本体は Northrop Grumman社製
Bivoj “HiLASE”	1030 (Yb:YAG)	10	2~10	10	DPSS

D. Rostohar, et al.: “Development of experimental station for laser shock peening at HiLASE,” Proc. SPIE, **10523** (2018) 105230K.

# Northrop Grumman CEO社製10 Jレーザー-GIGASHOT-HEの装置内部写真



*The GIGASHOT-HE™ laser is an injection-seeded, diode-pumped laser that produces **10J at a repetition rate of 20Hz and an output wavelength of 1053nm**. The laser produces a flat top beam profile in the near field, making it an ideal source for high-repetition-rate laser peening. The Procudo™ 200 system is a high-quality, turn-key, all diode-pumped laser peening system that can be adapted to meet the needs of any manufacturing or research facility. It can be supplied with a wide range of automated part-handling robots and accessories that facilitate laser peening on parts of nearly any size and shape.*

<http://cuttingedgeoptronics.com/2015/05/01/ceo-installs-10-joule-laser-at-lsp-technologies/>

# コーティング材の使用の有無によるレーザーピーニング方式の比較

	<b>with coating</b>	<b>without coating</b>
Laser oscillator	Nd:glass (1.05 $\mu\text{m}$ )	Nd:YAG (532 nm)
Pulse duration	< 100 ns	< 10 ns
Pulse energy	$\leq$ 100 J	40 ~ 250mJ
Spot size	$\leq$ 10mm $\phi$	$\leq$ 1.2mm $\phi$
Delivery system	Mirror	Fiber or mirror
Developed in	USA, France	Japan

Y. Sano, et al.: "Development and applications of laser peening without coating as a surface enhancement technology," Proc. SPIE, 6343 (2006) 634324.

# レーザークリーニングに関する論文件数の年次推移

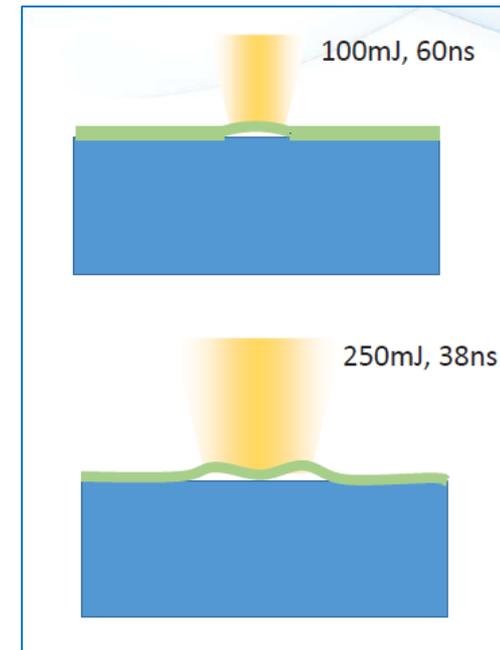
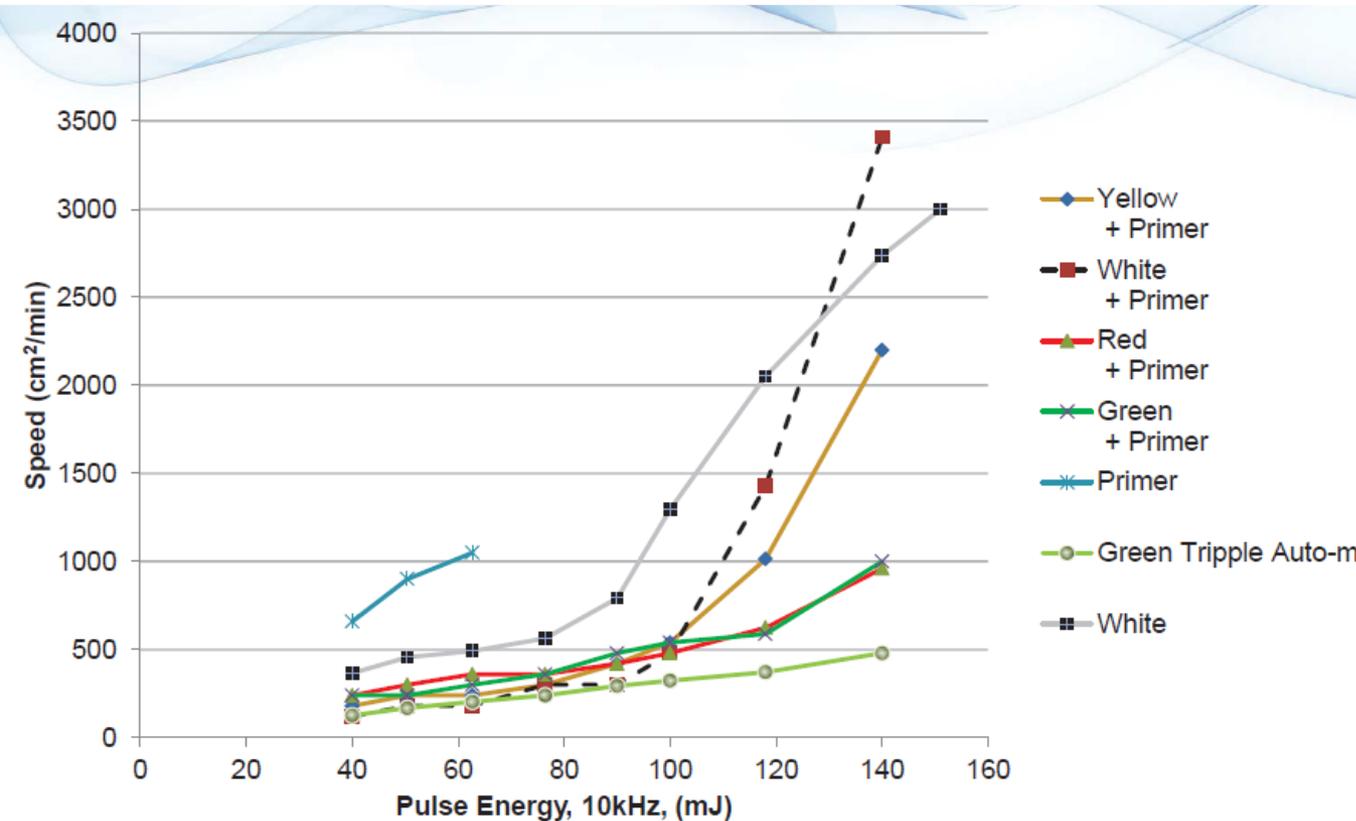
Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



# レーザークリーニング用大出力・ナノ秒レーザーの 代表的な機種及びそれらの仕様例

機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー(mJ)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (ns)	平均出力 (W)
Vulcan 1600e (Andritz Powerlase)	1064 (DPSS)	200	(8)	40~120	1,600
HighLight™ FL Series Pulsed (Coherent)	1064 (Yb:fiber)	100 (Peak: 1.7 MW)	10	10~100 (可変)	1,000
YLPN-50-120-5000- S (IPG Photonics)	1064 (Yb:fiber)	up to 50	up to 100	120	up to 5,000
TruMicro 7050 (Trumpf)	1030 (Yb:YAG)	(50)	10	<500	500

# 各種塗料についての、塗装膜除去速度 の照射パルスエネルギー依存性実験報告例



I. Metsios: “Low environmental impact laser removal of paints and coatings at high speed,” AVT-302 Workshop Paint Removal Technologies for Military Vehicles, Amsterdam, The Netherlands, 9-13 October 2017.

# レーザークリーニング用 小型ファイバレーザーの仕様例

Characters	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Mode of Operation	Pulsed				
Polarization	Random				
Laser Beam Mode	Customized				
Output Power	100% power output	99.9	100	110	W
Power Tunable Range		5%		100%	
Central Wavelength	100% power output	1060	1064	1068	nm
Pulse Width	100% power output	80	100	160	ns
Long-Term Average Power Stability	100% power output		±2	±5	%
Consumption	480W (AC110V or 220V)				
Weight	22.7KG				
Colling	Forced Air Cooling				

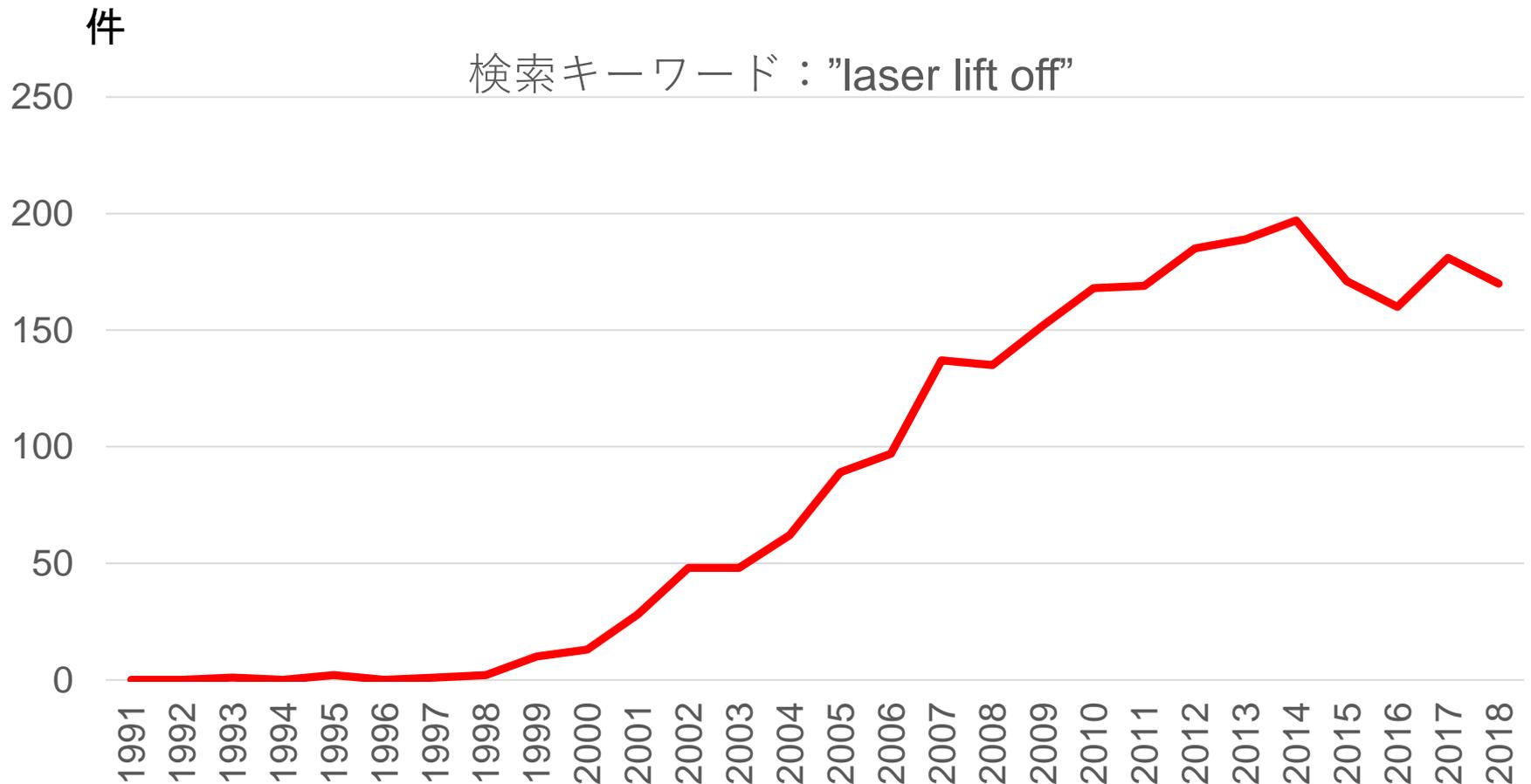


なお、出力パルスエネルギー及び繰り返し周波数の仕様は、不明

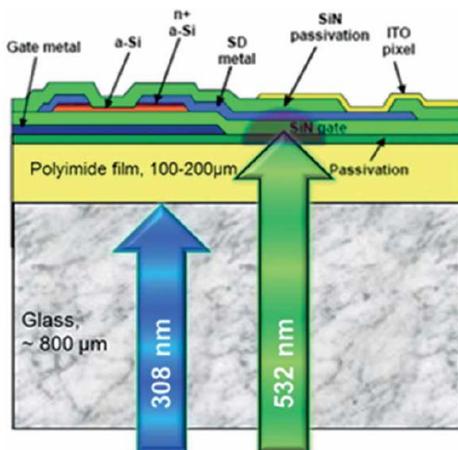
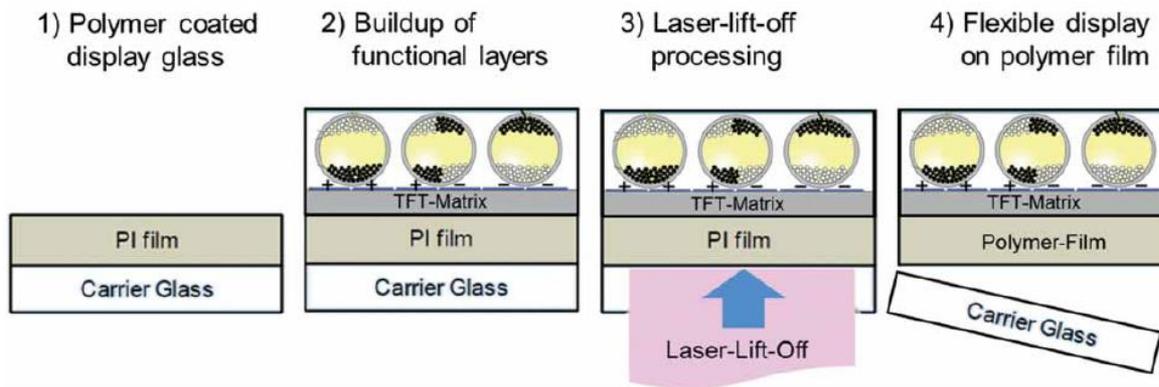
<http://www.maxlasers.com/fiber-laser/laser-cleaning/max-photonics-pulsed-fiber-laser-surface.html>

# レーザーリフトオフに関する論文件数の年次推移

Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



# 高出力UV・ナノ秒レーザーを用いた レーザーリフトオフ(LLO)の適用例



Fabrication scheme of flexible displays by means of excimer LLO.

Schematics of the LLO characteristics using short and long wavelengths.

R. Delmdahl, et al.: "Laser lift-off systems for flexible-display production,"  
J. of Information Display, **15** (2014), No.1 p.1.

# レーザーリフトオフ用高出力UV・ナノ秒固体レーザーの仕様例

	TruMicro 7370	TruMicro 7380
Wavelength	343 nm	343 nm
Pulse duration	15 ns	17 ns
Repetition rate	10 kHz	10 kHz
Average power	130 W	400 W
Pulse energy	18 mJ	40 mJ
Beam quality ( $M^2$ )	22.5	20
Pulse energy stability per laser ( $1 \sigma$ )	< 1.5 %	< 1.5 %
Peak to peak jitter ( $1 \sigma$ )	< 2 ns	< 2 ns
Max. number of synchron. lasers	4	12
Max. avg. power laser system	0.72 kW	4.8 kW

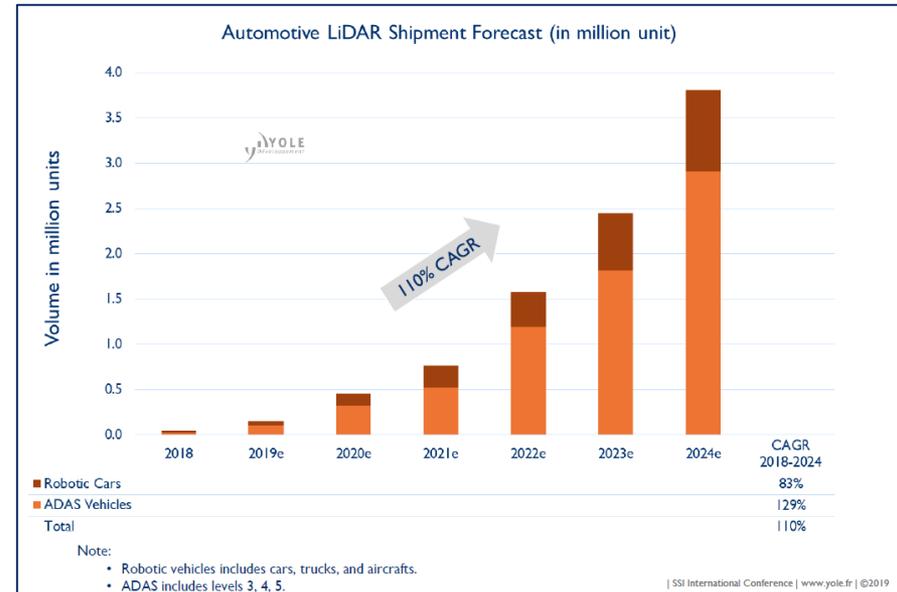
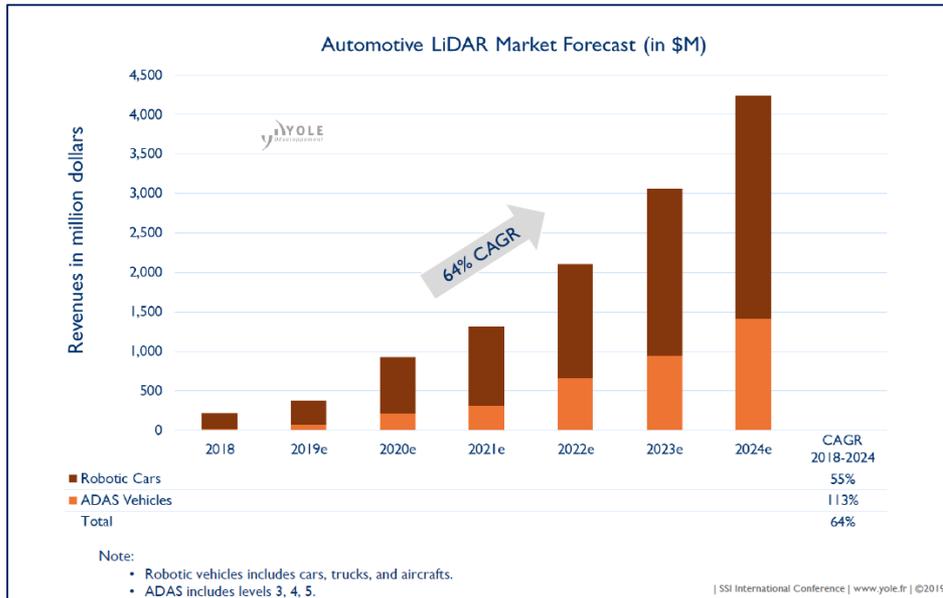
F. Kanal, et al.: "TruMicro 7380: advancements in high-power UV nanosecond disk lasers (Conference Presentation), Proc. SPIE, 10511 (2018) 105110M.

# ナノ秒高出力レーザーの 計測・イメージング領域への応用例

- (1) LiDAR (Light Detection and Ranging)
- (2) LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)
- (3) PAT (Photoacoustic Tomography)
- (4) PAM (Photoacoustic Microscopy)
- (5) PIV (Particle Imaging Velocimetry)

# 車載用LiDARの用途別市場規模(売上高及び販売台数)予測例

売上高年次推移(単位: \$M) ■ Robotic Cars ■ ADAS Vehicles 販売台数年次推移(単位: 百万台)



2024年時点では、まだロボットカー向けの売上高のほうがADAS車向けよりもかなり大きく、2024年では車載用LiDAR全体の\$4.2Bのうち、約2/3の\$2.8Bを占める

ADAS車用LiDARの販売台数は、年平均成長率129%とロボットカー向けの年平均成長率83%よりも大きく伸長する。2024年における用途別単価比は、1:6程度と予測されている

# 車載用LiDARの走査方式による類別

## 機械的走査方式

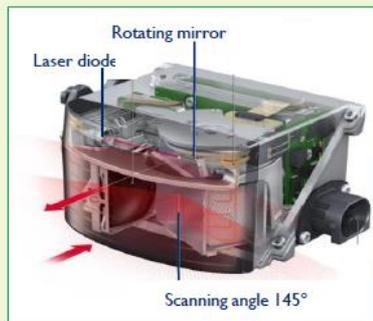
### Mechanical LiDAR

#### Mechanical LiDAR for ADAS

Valeo

ibeo

Audi



### 水平視野角360° 回転式

#### Mechanical LiDAR for Robotic cars



### その他の機械的走査方式 (複数のミラー、プリズムの回転、 及びマイクロモーション等)

#### Other mechanical LiDAR



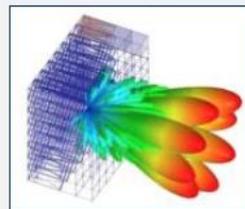
### Solid-state LiDAR

#### MEMS LiDAR

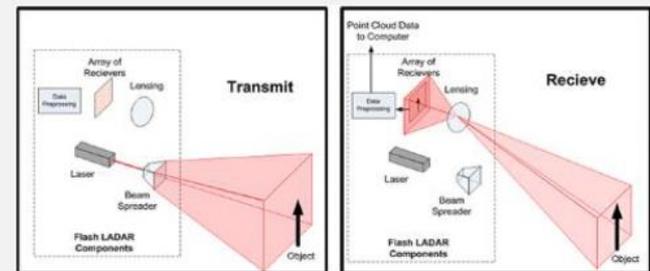


Courtesy of Preciseley Microtechnology Corp.

#### OPA LiDAR



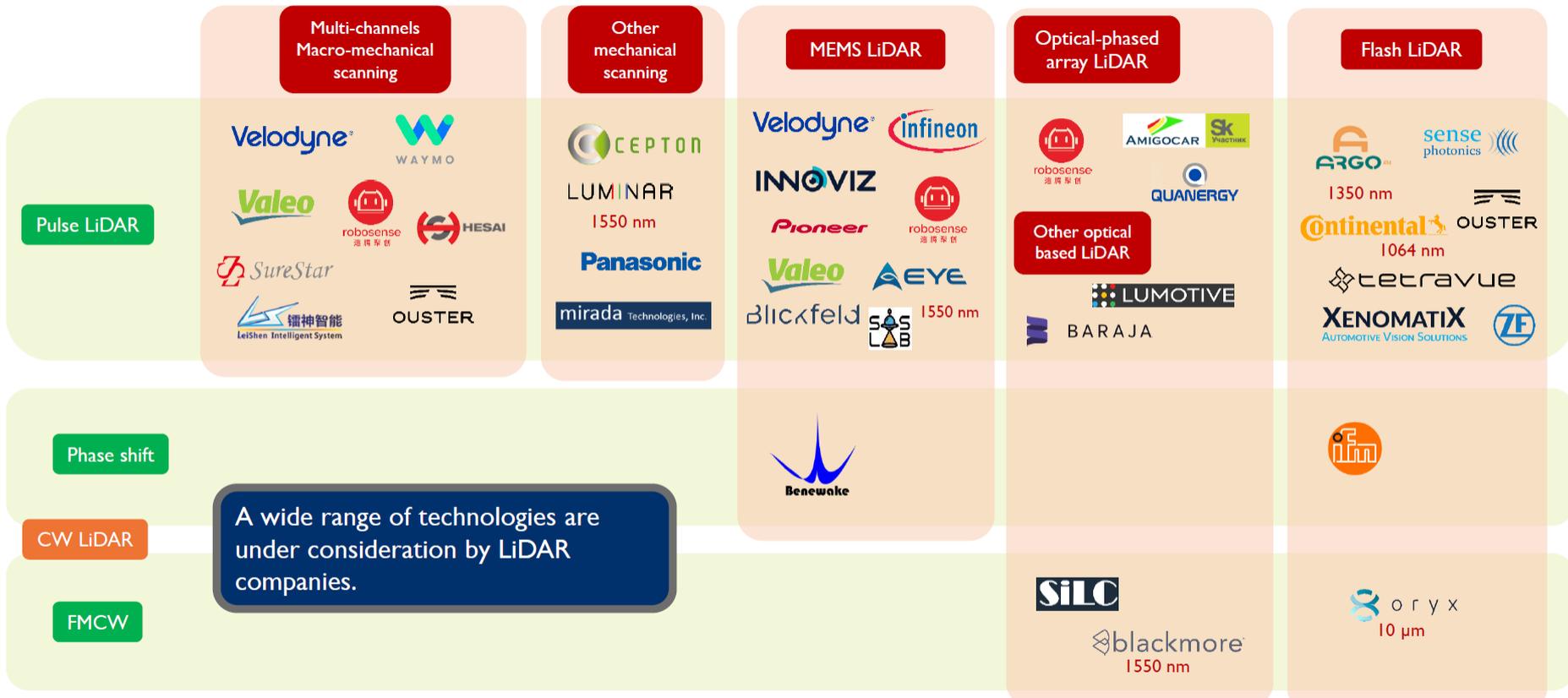
### Flash LiDAR



Courtesy of Advanced Scientific Concepts, Inc.

# 各種方式別車載用LiDARへの企業の参入状況

## TECHNOLOGY/PLAYERS SEGMENTATION FOR AUTOMOTIVE LiDAR



3次元LiDARの実現には、異なる走査方式を組み合わせることも多く、走査方式による単純な類別は、実際には容易でない。

Except when noted, wavelength is between 830 nm and 940 nm.

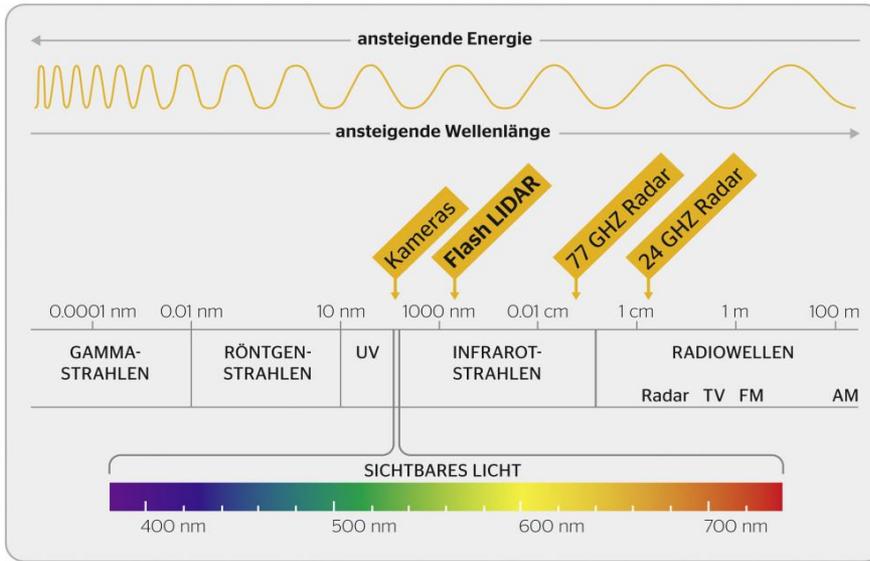
CW: Continuous Wave

FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave

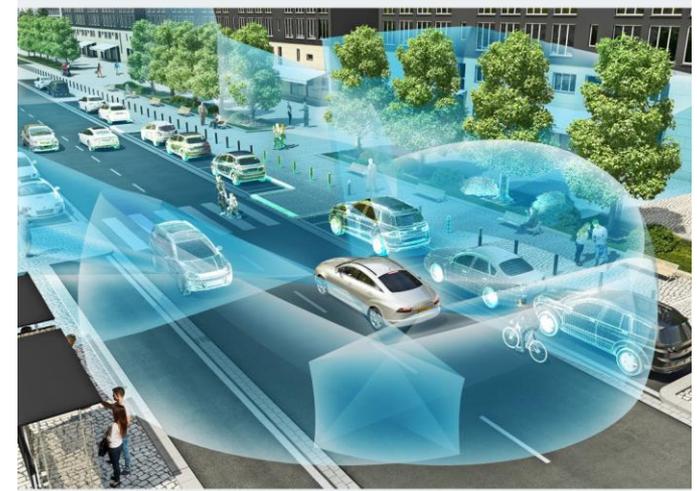
| SSI International Conference | www.yole.fr | ©2019

Yole Development Presentation: "LiDAR – From Space to roads,"  
SSI (Sensor solutions International) Conference, March 2019

# Continentalの3DフラッシュLiDAR紹介用の図及び写真



波長は1000 nm以上



# The smallest and most lightweight laser for 3D Flash LiDAR and range finding



中心波長: 1030nm

平均出力: 20mW(放熱制限)

TEM<sub>00</sub>

動作温度範囲: 20°C~40°C

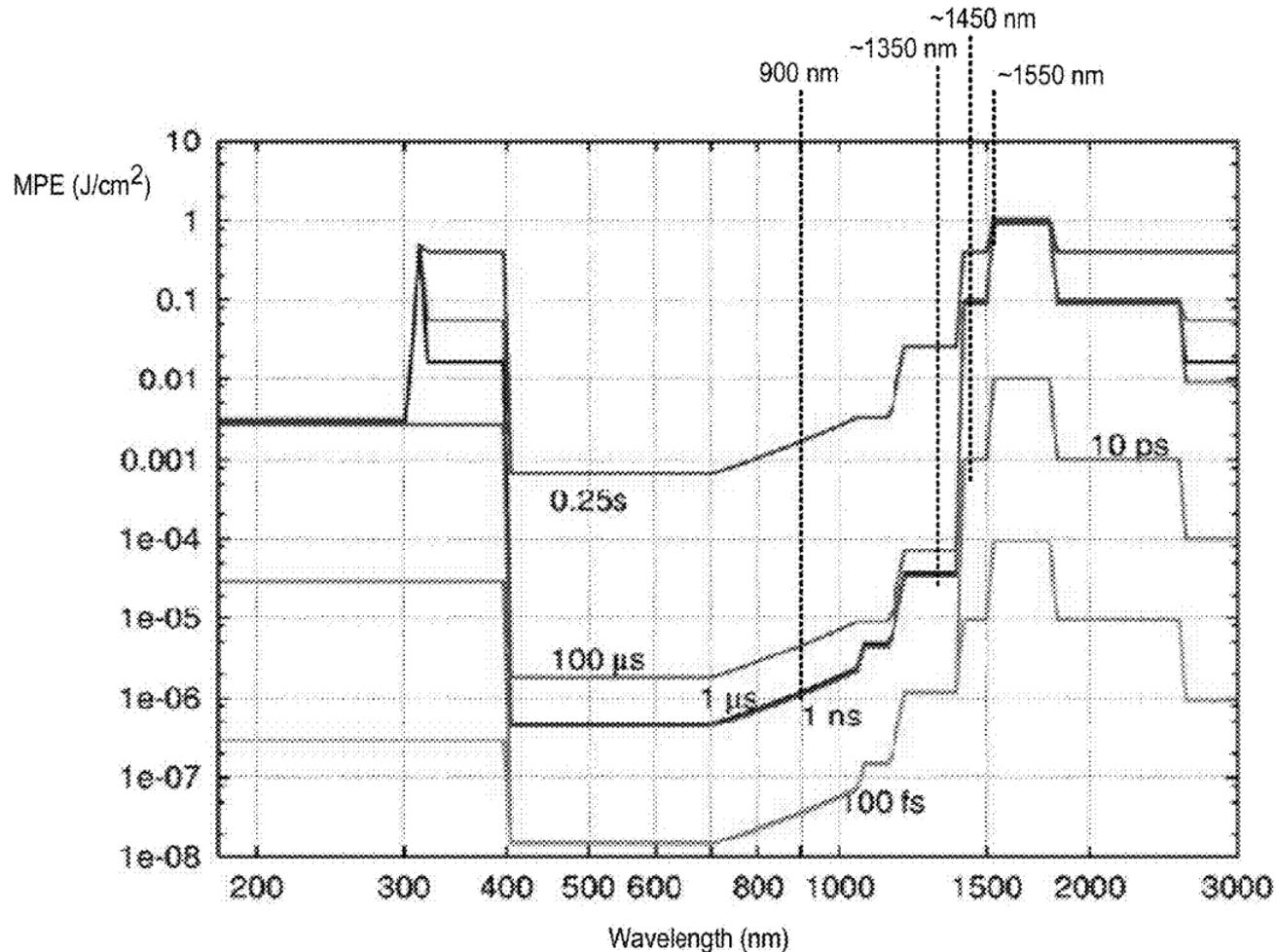
受動Qスイッチ固体レーザー

## Current configurations in production:

Variant	Pulse duration, ns	Pulse energy, $\mu$ J	Peak power, kW	Polarization
	0.9	150 to 200	160 to 220	Random

<https://integratedoptics.com/>

# 目のレーザー安全に関するMPEG(最大許容露光量)の パルス幅及び波長に対する依存性



E. Y. Kotelnikov, et al.: "LiDAR system comprising a single-photon detector,"  
Pub. No.: US 2017/0176576 A1, Filed date: Jun. 22, 2017.



# Ford傘下のARGO AI 社が、 LiDAR用光検出器で著名なPrinceton Lightwave社を買収

October 28, 2017 Bryan Salesky, CEO of ARGO



To accelerate our mission to realize the self-driving future, **Argo has acquired Princeton Lightwave, a company with extensive experience in the development and commercialization of LiDAR sensors.** The technology that underpins their lineup of LiDAR sensors—which already serve the commercial mapping and defense industries—will help us extend the range and resolution needed to achieve self-driving capability in challenging urban environments. Princeton Lightwave’s technology also complements and expands the capability of LiDAR sensors already available to the automotive industry today.

<https://www.argo.ai/blog/author/Bryan-Salesky%2C-CEO>

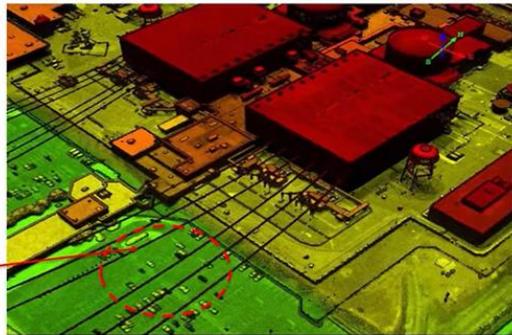
# ARGO AI における車載用Flash LiDARの開発動向

## Geiger-mode 3D LiDAR mapping

Power line detail visible from 7 km above ground level (AGL)  
Based on legacy PLI 128 x 32 GmAPD cameras



McGuire Nuclear Station, N.C



Power lines

imagery courtesy of **HARRIS**  
Argo AI Proprietary

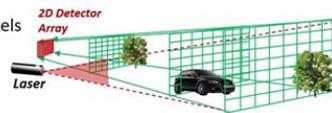
13

## Flash vs. scanning for Auto LiDAR

“Flash” illumination: elegant but impractical for Auto

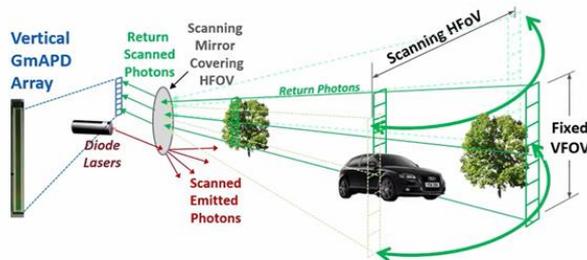
~100° FOV with 0.1° resolution needs 1000 pixels  
in one direction → ~Mpixel 2D array

Even given Mpixel array, illuminating all  
pixels takes prohibitive laser energy



Scanning provides best balance of laser/detector resources

Image vertical FOV with ~1000 pixel ~1D array, scan to cover horizontal FOV



SPIE Optics + Photonics 2018 - paper 10729-10

Argo AI Proprietary

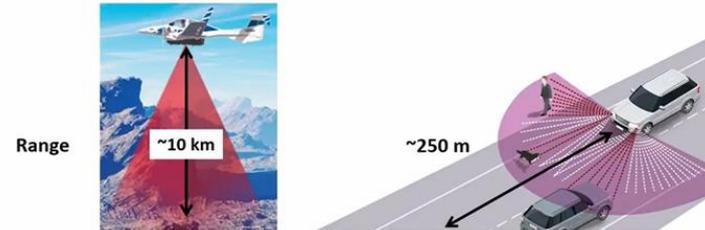
19

## Airborne vs. Automotive LiDAR



Airborne

Automotive



Range

2 – 10 pts/m<sup>2</sup>

20 – 40 cm resolution at 250 m

Cost



SPIE Optics + Photonics 2018 - paper 10729-10

Argo AI Proprietary

15

## Summary



**Geiger-mode APD FPA technology has reached a high level of maturity**

- Single-photon sensitivity
- Precise timing resolution
- Robust scaling for large-format arrays
- Provide an enabling technology for LiDAR and other active optical applications

**GmAPD enables airborne LiDAR to**

- Collect high-resolution 3D imagery from high altitudes
- Achieve 10X improvement in mapping rate over competing LiDAR technologies

**GmAPD LiDAR is a ideal choice for automotive platform applications**

- Long range (> 200 meters)
- High angular resolution (< 2 mrad)
- Fast frame rate (> 24 Hz)
- Enhanced eye-safety
- Reliable performance in variable weather

SPIE Optics + Photonics 2018 - paper 10729-10

Argo AI Proprietary

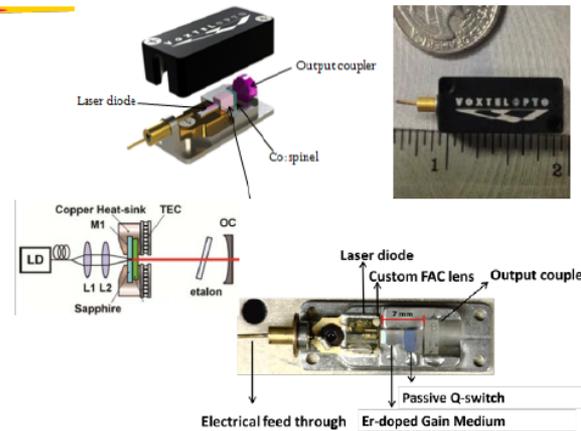
26

# Voxel社製の波長1535nm超小型 Er: 固体レーザーの構成及び主な仕様

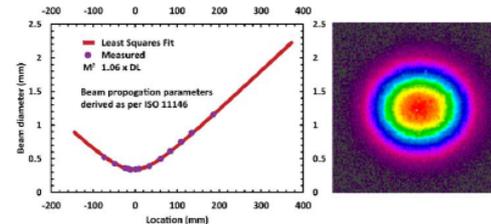


## ROX Tx: Ultra-miniature Er-doped Solid-state Laser

✦ Eye-safe	Class 1 (1535 nm)
✦ Laser pulse energy	10 – 200 $\mu$ J
✦ Short pulses	3.8 ns FWHM
✦ Low beam divergence	4 mrad (0.25 mrad with 12x expander)
✦ Beam quality	1.06 x DL
✦ Pulse averaging	1 – 50 KHz
✦ Manufacturable, low-cost solid-state	
✦ Domestic component sources	



10-200  $\mu$ J (1 mJ) Er: Ceramic Laser



Measured  $M^2 = 1.06 \times DL$  Data

Ultra-compact, high rate micro-chip laser

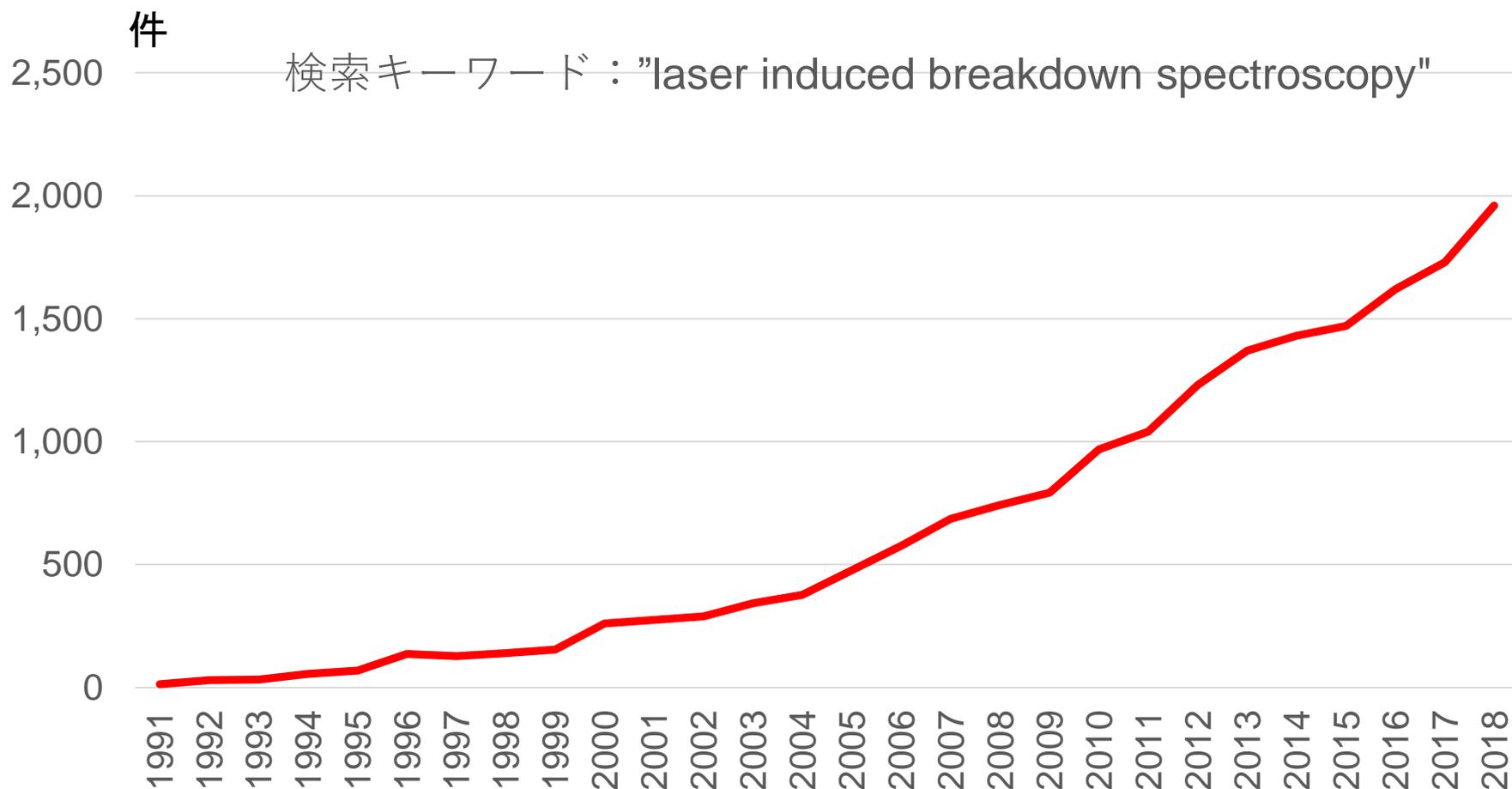


Replaces expensive, large size, weight, power, and lower peak power fiber lasers (3  $\mu$ J, < 6 kW pp) – & – 100 nJ laser diodes

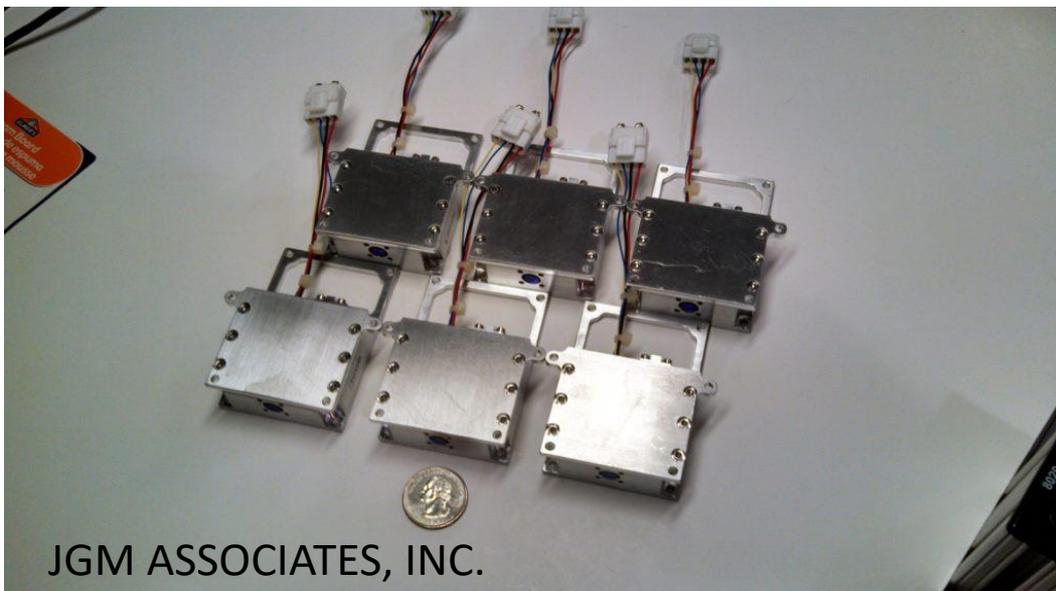
G. M. Williams: “Mobile 4D imaging technologies for construction & life-cycle BIM model dimensional information management,” Advanced Methods of Manufacturing Workshop, September 29, 2015.

# LIBSに関する論文件数の年次推移

Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



# LIBS用レーザー及びLIBS応用システムの開発事例



JGM ASSOCIATES, INC.

Six OEM Q-switched lasers in user-specified package

We currently make a **passively Q-switched Nd laser (1064 nm) for handheld LIBS instruments**. An eyesafe version is under development and is **expected to be in production by the end of 2017**.

[http://jgma-inc.com/?page\\_id=29](http://jgma-inc.com/?page_id=29).

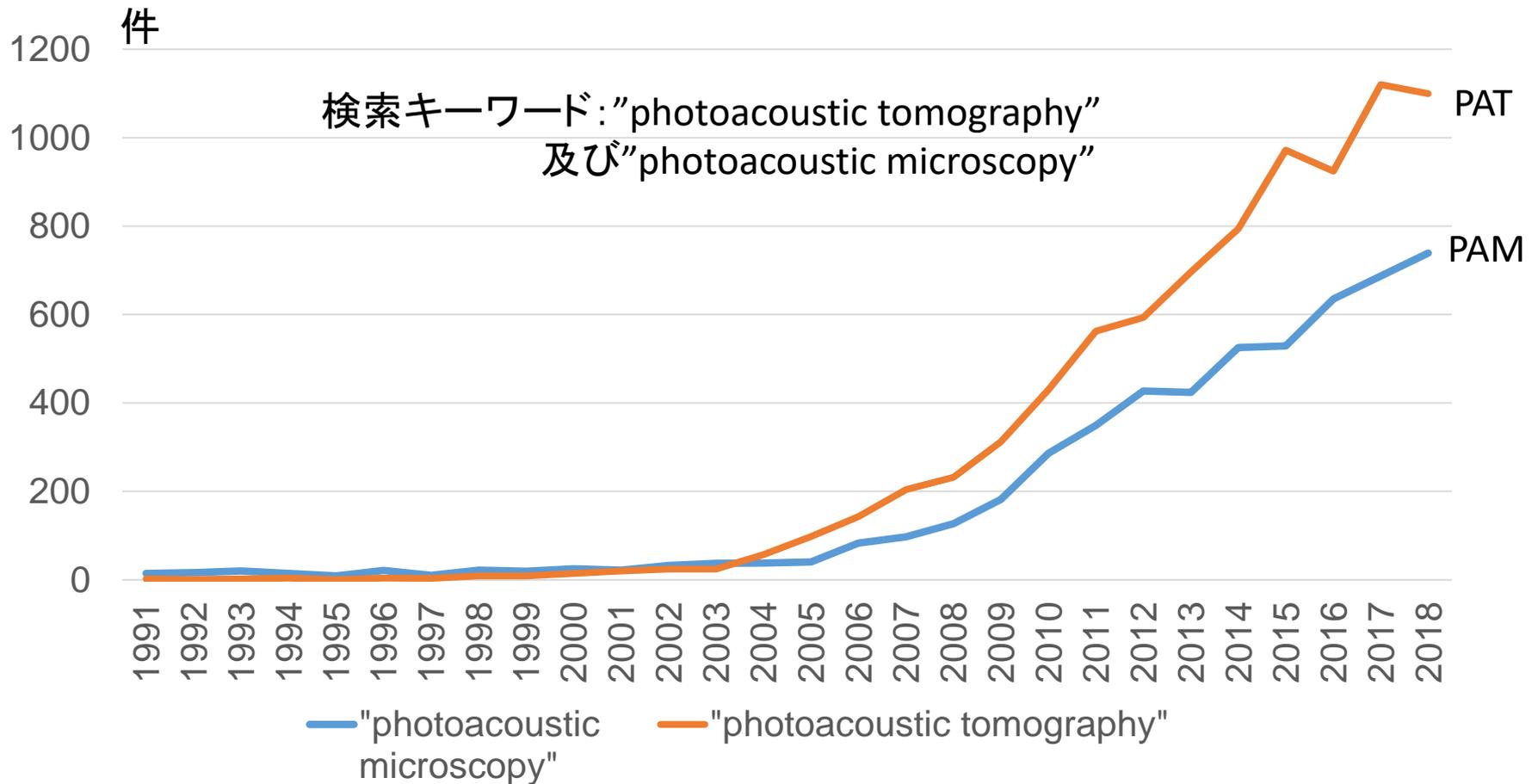


The MopaLIBS elemental analyzer classifies according to the alloy composition in milliseconds and with highest precision into an unlimited number of material classes. Limit is usually the sorting technology.

<https://www.metec-tradefair.com/vis/v1/en/exhibitors/GMTN2019.2579363?oid=289692&lang=2>

# PAT及びPAMに関する論文件数の年次推移

Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



# 光音響イメージングの生体への応用

光音響イメージング (PAI) ~ 光音響トモグラフィ (PAT) + 光音響顕微鏡 (PAM)

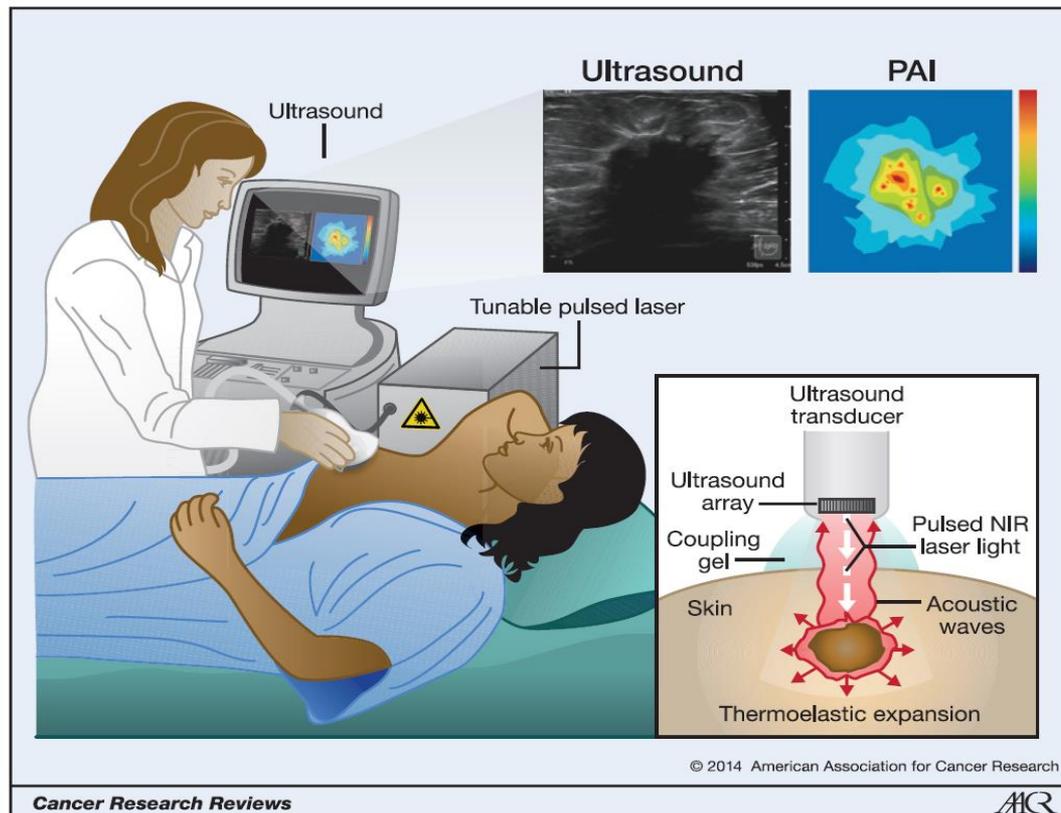
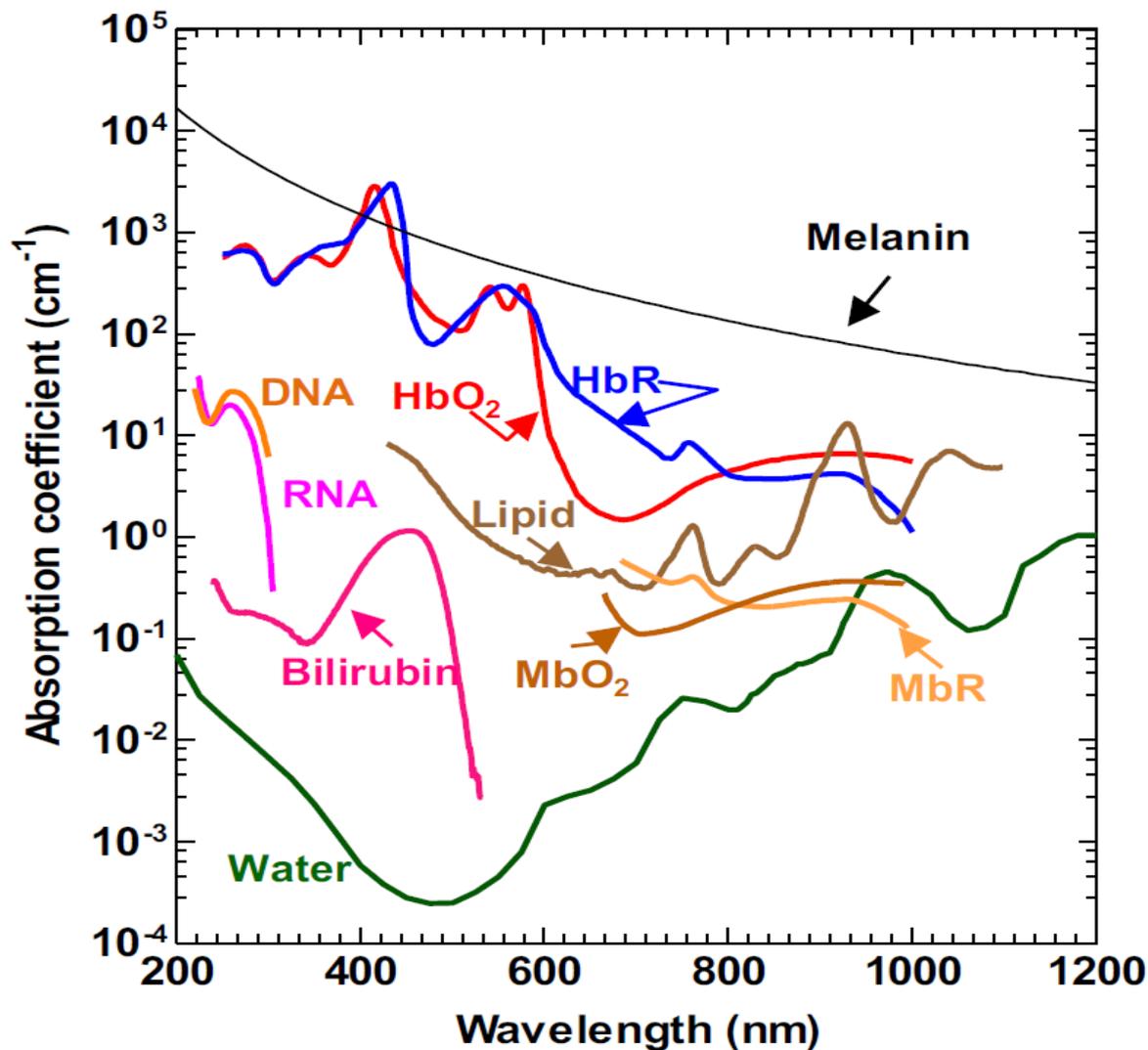


Figure 1. Principles of PAI presented for a potential clinical application: diagnostic breast imaging by integrated real-time photoacoustic/ultrasound imaging. The laser sends nanosecond pulses of NIR light through the transducer into the tissue. This light is then absorbed inside the tissue (at different levels for each tissue type/component) causing a localized transient thermoelastic expansion. This expansion leads to the emission of pressure waves (ultrasound), which can be detected by the array in the transducer. Finally, a photoacoustic image is calculated and displayed in real-time. At the same time, the ultrasound system can be used in its b-mode to provide structural information about the tissue, in addition to the functional/molecular information obtained by PAI, and both images can be displayed on the viewing screen together (either next to each other or integrated).

S. Zackrisson, et al. *Cancer Res.*, Vol. 74 (2014) 979-1004.

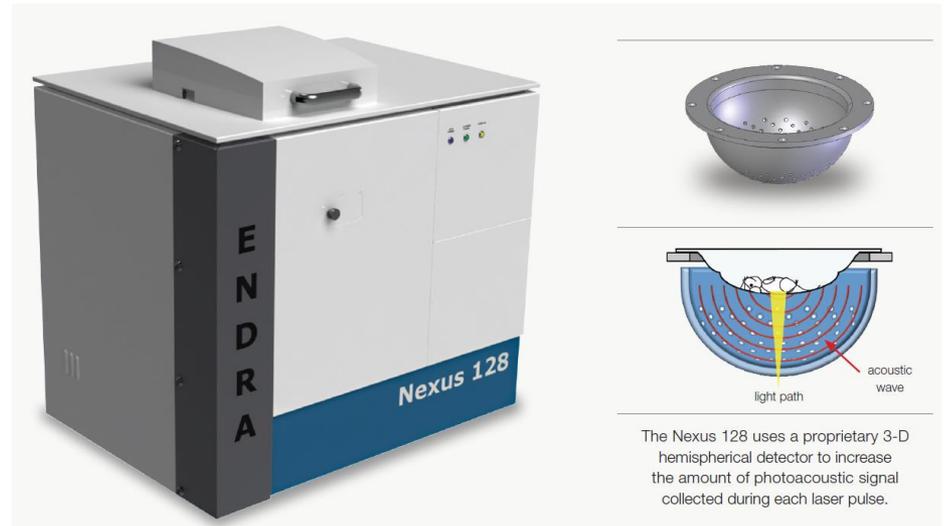
# 生体の皮下組織における、代表的な生体内在物質の吸収スペクトル



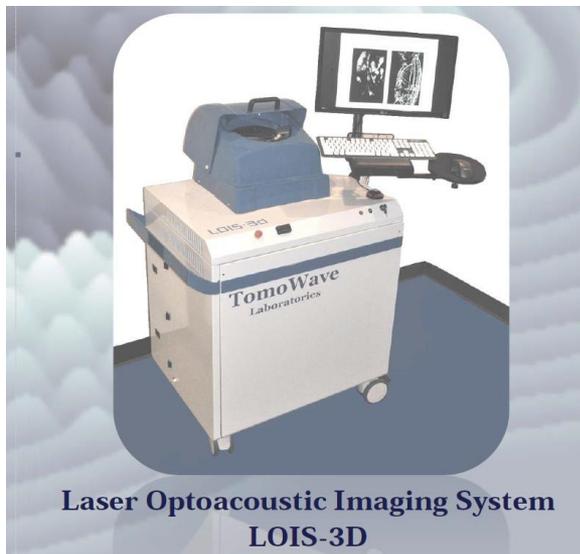
# 生体観察用光音響イメージング装置の事例



Figure 1: Vevo LAZR imaging system with PhotoTight™ animal enclosure box



The Nexus 128 uses a proprietary 3-D hemispherical detector to increase the amount of photoacoustic signal collected during each laser pulse.



Laser Optoacoustic Imaging System  
LOIS-3D



# PATに適用可能と思われる波長可変ナノ秒固体レーザーの仕様例

光源の方式 メーカー名	機種名・モデル	パルス幅 代表的パルス出力	発振繰返し周波数 波長同調範囲(nm)
OPO Lotis TII	LT-2214-PC (@355nm)	励起パルス幅より1~2ns短い 【<50 mJ@500nm?】	<50 Hz 410~690(Signal)
OPO Lotis TII	LT-2215-PC (@355nm)	励起パルス幅より1~2ns短い 【<30 mJ@500nm?】	<50 Hz 410~690(Signal)
OPO OPOTEK	Phocus Standard (@532nm)	5 ns 50 mJ 【@740nm】	10 Hz 690~950(Signal)
OPO OPOTEK	Phocus HE Option (@532nm)	5 ns 120 mJ 【@740nm】	10 Hz 690~950(Signal)
OPO OPOTEK	Rasinat 532 LD Standard (@532nm)	5 ns 【43mJ@740nm】	10 Hz 680~ 【1070】 (Signal)
OPO OPOTEK	Rasinat 532 LD HE Option (@532nm)	5 ns 【65mJ@740nm】	10 Hz 680~ 【1070】 (Signal)
OPO Solar Laser Systems	LQ929B (532nm) +LP604	NA (基本波は10~12ns) 120 mJ@ピーク波長	10 Hz 680~1064(Signal)
OPO Solar Laser Systems	LQ529B (532nm) +LP604	NA (基本波は10~13ns) 50 mJ@ピーク波長	10 Hz 680~1064(Signal)

# OPOTEK社のOPO製品の外観

## PHOCUS BENCHTOP

TRANSPORTABLE TUNABLE LASER SYSTEM  
FOR PHOTOACOUSTIC IMAGING



### TUNING RANGE

690 – 950 nm  
1200-2600 nm

### PEAK OPO ENERGY

140 mJ @ 750 nm  
(before fiber)

## PHOCUS CORE

TRANSPORTABLE TUNABLE LASER SYSTEM  
FOR PHOTOACOUSTIC IMAGING



### TUNING RANGE

690 – 950 nm  
1200-2600 nm

### PEAK OPO ENERGY

140 mJ @ 750 nm  
(before fiber)

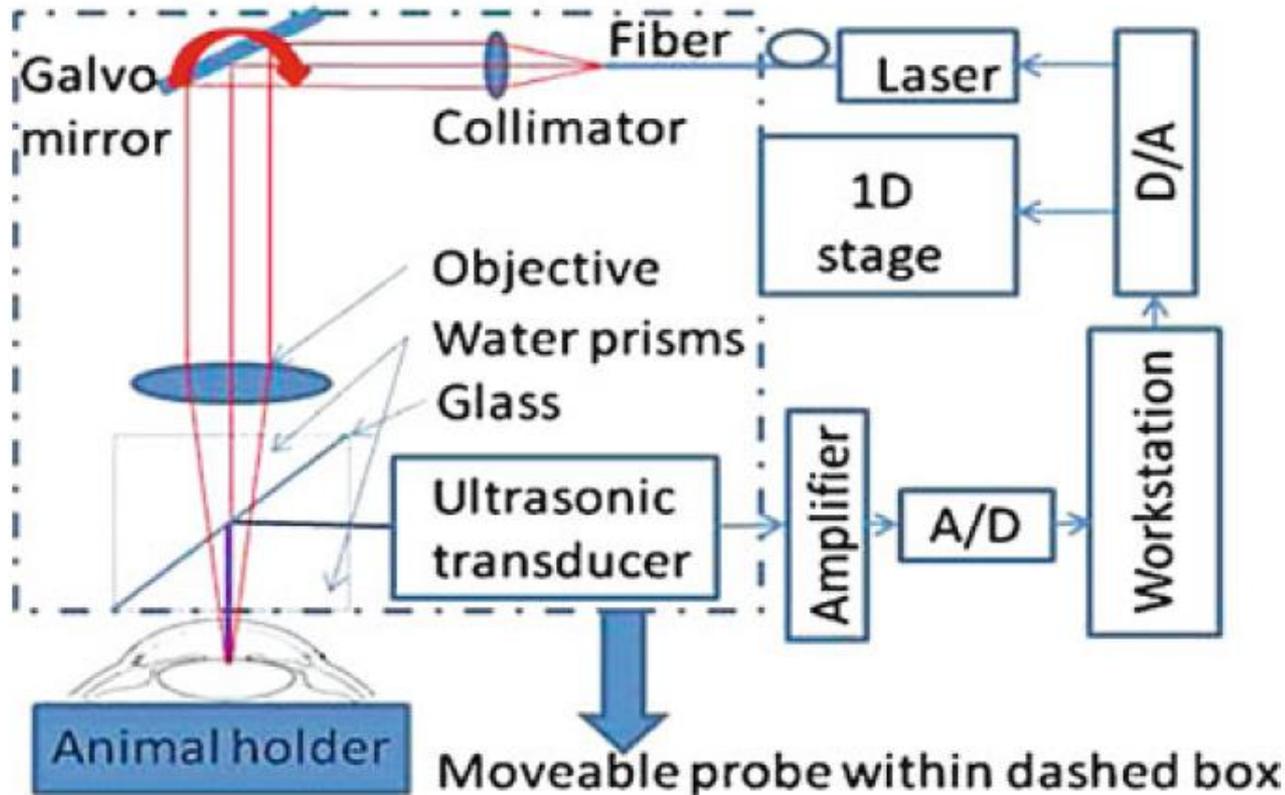
パルス幅: 5 ns ±2 ns

パルス繰り返し周波数: 20 Hz (60 mJ) SEモデル  
10 Hz(150 mJ) HEモデル



<https://opotek.com/>

# 光音響顕微鏡 (PAM) の実験構成例



*Schematic of the hybrid-scanning optical-resolution photoacoustic microscopy system*

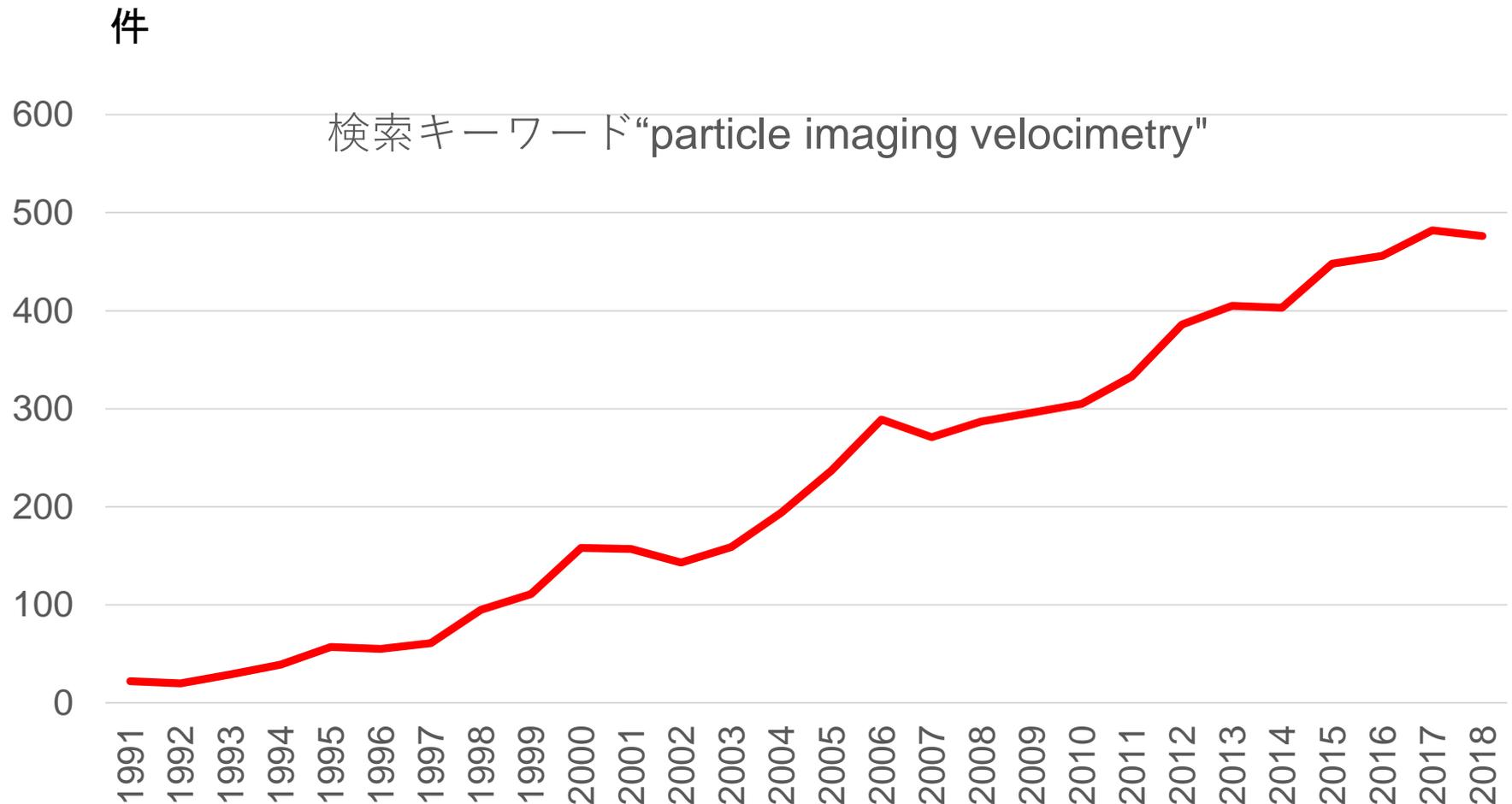
S. Hu, et al.: "Chapter. 2: Three-Dimensional Optical-Resolution Photoacoustic Microscopy,"  
In R. Liang (ed.), Biomedical Optical Imaging Technologies, Biological and Medical  
Physics, Biomedical Engineering, DOI 10.1007/978-3-642-28391-8 2,  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

# 光音響顕微鏡(PAM)に関する論文中で使用されていた代表的なレーザー機種例

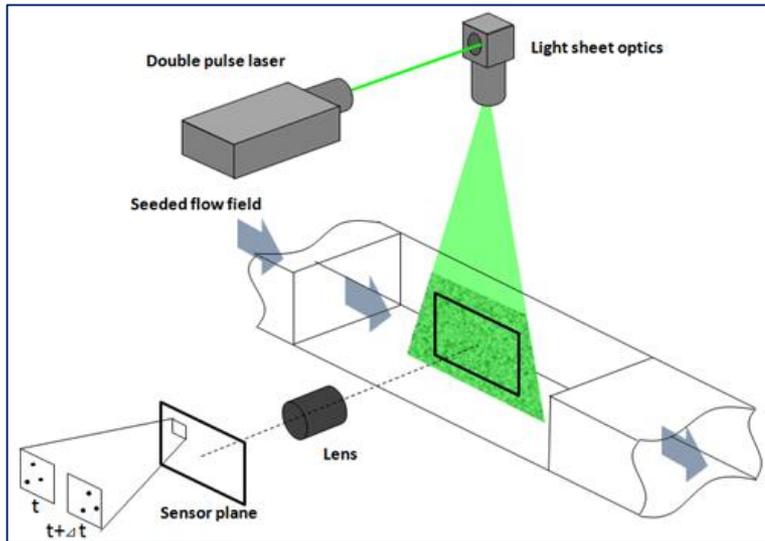
パルスレーザーのメーカー名	論文で使用されていたレーザー製品の機種名	発振波長 (nm)
Elforlight (英国)	SPOT-10-100-532 SPOT-10-200-532 FQS-400-1-Y-1064	532 1064
IPG Photonics (米国)	GLP-10 YLP-G GLPM-10-Y13	532
Teem Photonics (フランス)	NP 10820-100 SNP-13E SNP-20F-100 など	1064
Bright Solutions (イタリア)	LUCE 532 LUCE 820 Wedge 532	532 820 532

# 粒子画像流速測定法(PIV)に関する 論文件数の年次推移

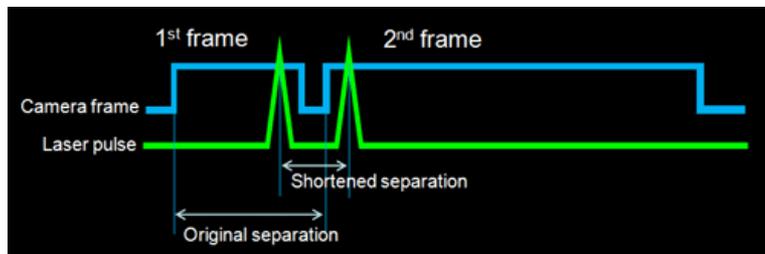
Google scholar上での検索結果 (検索日:2019.7.8)



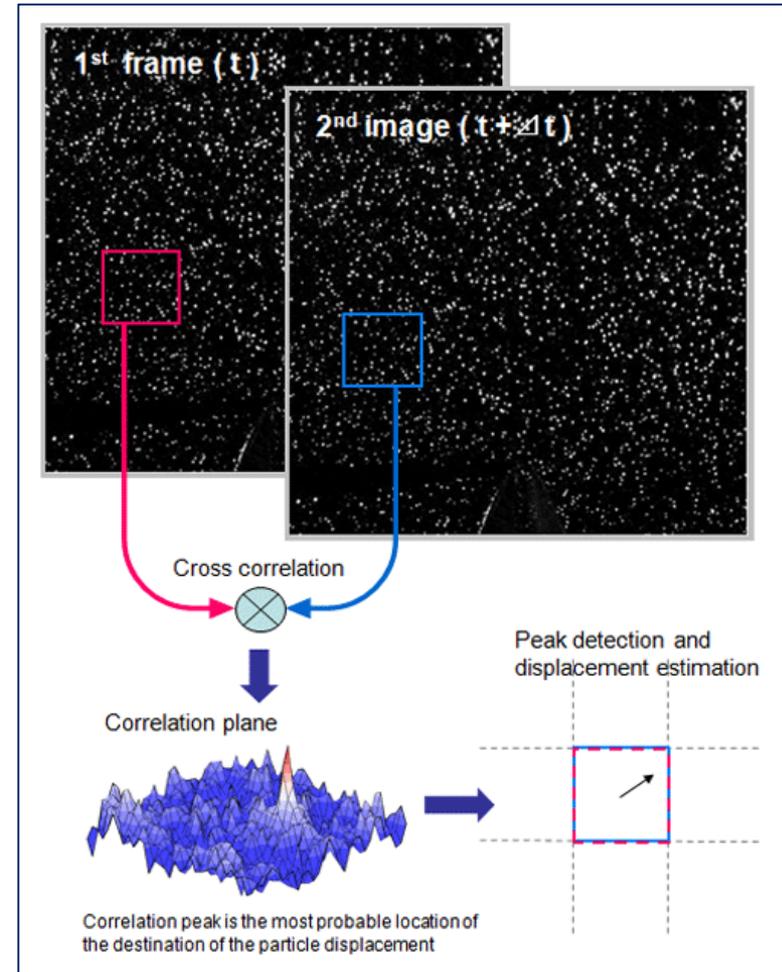
# 粒子画像流速測定法 (PIV) の原理



シートレーザー光 (一般に可視光) のダブルパルスを測定対象の流体に照射



ダブルシャッターカメラで2枚連続した画像を取得



取得画像を解析し、流れを可視化

# PIV用レーザーのいくつかの機種の様例

メーカー	機種名	励起光源	波長 (nm)	出力エネルギー (mJ)	パルス幅 (ns)	Rep. Rate (Hz)
Quantel	Q-smart Twins 532	Lamp	532	2 × 380	~5	10
Innolas	SpitLight 400 PIV	Lamp	532	2 × 200	5~7	15
Innolas	SpitLight 1000 PIV	Lamp	532	2 × 500	5~7	10
Innolas	SpitLight DPSS 250 PIV	Diode	532	2 × 120	7~9	100
Innolas	SpitLight PIV Compact 100	Lamp	532	2 × 60	4~6	10
Innolas	SpitLight PIV Compact 400	Lamp	532	2 × 180	4~6	10
Innolas	SpitLight PIV Compact DPSS	Diode	532	2 × 50	7~9	100
LOTIS-TII	LS-2132PIV	Lamp	532	2 × 100	5	20
LOTIS-TII	LS-2145PIV	Lamp	532	2 × 300	6~7	10
Litron	Nano 1 50-100 PIV	Lamp	532	2 × 50	5~8	100
Litron	Nano TRL 40-20 PIV	Lamp	532	2 × 400	5~7	20
Litron	LD75-G PIV	Diode	532	2 × 7.5@10k	< 150	1k~50k
Litron	LD3—527 PIV	Diode	527	2 × 30@1k	< 110	1k~3k

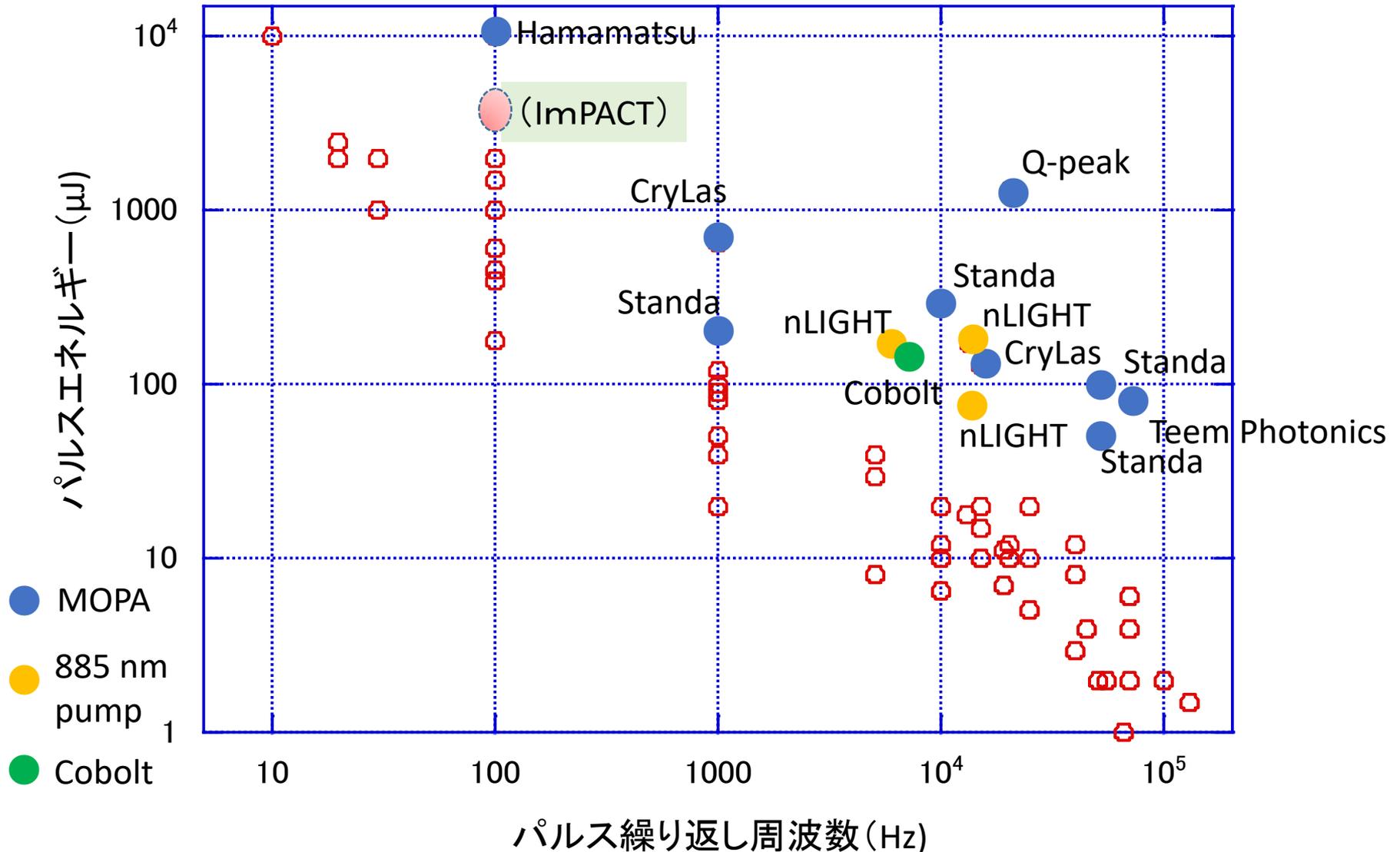
# 受動QスイッチNd:固体レーザー製品の代表的なメーカー名

メーカー名	1064 nm MAX Energy (μJ)	532 nm	355 nm	266 nm	213 nm	MOPA	備考
ALPHALAS	1500 @100Hz	○	○	○	—	—	高調波はoption
BrightSolutions	40 @1 kHz	○	—	—	—	—	高速・低出力
CryLas	650 @ 1 kHz	○	○	○	○	○	UV・DUV機が充実
Hamamatsu	10,000@1 kHz	○	○	—	—	○	国産・高出力
Horus Laser	40 @ 5 kHz	○	—	—	—	—	高速・低出力
Hübner/Cobolt	150 @ 7 kHz	○	○	—	—	—	内部SHG・THG
nLIGHT	175 @ 13.5 kHz	—	—	—	—	—	885nm励起・高平均出力
Optogama	400 @ 100 Hz	—	—	—	—	—	Lithuania 新規参入
Oxide	2,000 @100 Hz	○	○	○	—	—	波長変換に強み
Q-Peak	13,000@20kHz	○	—	—	—	○	NASA等官需が中心
Quantum Light Inst.	2,000 @ 20 Hz	○	○	—	—	—	高調波はoption
RealLight	120 @ 1 kHz	○	—	—	—	—	中国メーカー
(Shimadzu)	> 180 @ 100 Hz	○	○	○	—	—	社内用
Standa	300 @10 kHz	○	○	—	—	○	高速・機種数が充実
Teem photonics	80 @ 70 kHz	○	○	○	—	○	高速・機種数が充実

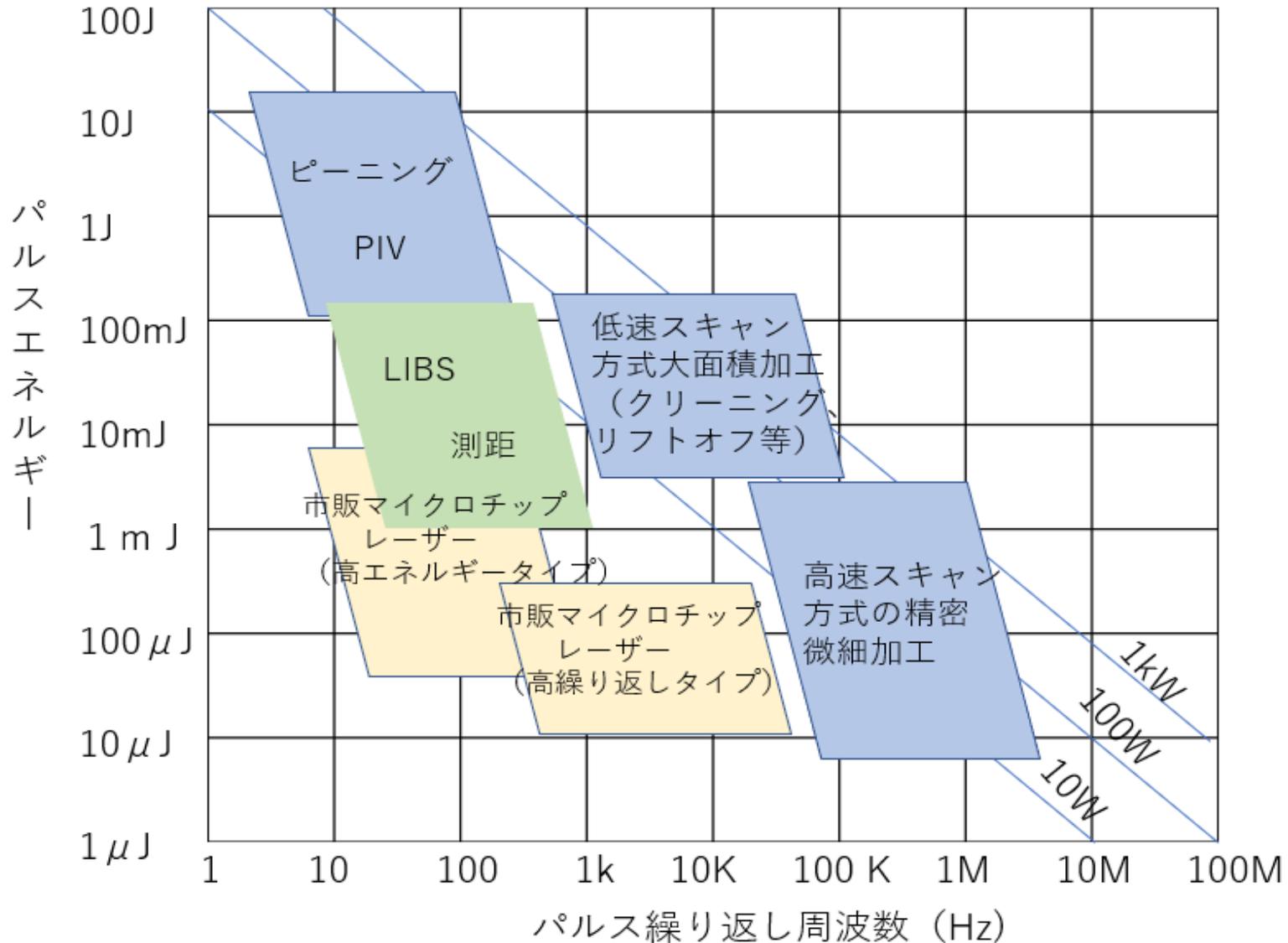
# 市販マイクロチップレーザーの代表的な機種の主な仕様

機種名 (メーカー名)	レーザー 波長(nm)	パルスエネ ルギー(μJ)	繰り返し 周波数(kHz)	パルス幅 (ns)	平均出力 (W)
PULSELAS-A-1064-1000-HP (ALPHALAS)	1064	100 at 1 kHz	0 ~10	1.5~3.0	0.1
PULSELAS-P-150-HE (ALPHALAS)	1064	1500 at 100 Hz	0~0.1	1.1	0.15
Tor X5 (Cobolt)	532	>50	1	2~3.5	>0.05
Helios 1064-6-125 (Coherent) MOPA	1064	>45 at 125 kHz	0.001~125	<0.95	6
L11308-11A (Hamamatsu) MOPA	1064	10,000	0.1	0.5~2	1
高繰り返しサブナノ・暫定版 (Hamamatsu) MOPA	532	60	50	0.35	3
M30 Microlaser (nLight)	1064	175	30	5	5.3
DSS 1064-3000 (CryLas)	1064	>2,500 at 20Hz	0.001~0.08	,2.5	0.05
STA-01-YLF-03 (Standa)	1053	1,000	0.1	0.65	0.1
HNP-70F-100 (teem photonics)	1064	>80	>70	<0.6	>6
HNP-70F-100 (teem photonics)	532	>50	>70	<0.55	>4
PQ01C (Oxide)	1064	>2,000	0.1	<1	0.2
PQ04LB (Oxide)	266	>200	0.1	<0.6	0.02
OEM PQSW (JGM Associates)	1064	5,000	0.1	2	0.5

# 市販受動QスイッチNd:固体レーザー製品の動作範囲



# 既存のナノ秒ないしピコ秒レーザーの産業応用に関して実用ないし開発が進んでいる領域と、現在市販されているマイクロチップレーザーの動作領域のマップ



# マイクロチップレーザーの開発課題

1. レーザー加工分野は、市場規模が比較的大きいが、スキャナーを用いた微細加工応用などでは、高出力化、及び繰り返し周波数の高速化が求められている。

マイクロチップレーザーは、比較的高ピーク出力が得られるので、微細加工用途には、LCOS-SLMなどと組み合わせた、パラレルプロセッシング技術の開発や、UV域高出力化などが有用であろう。

小型・高出力性を生かし、小回りが効く、安価かつフレキシブルな小型ロボットハンドヘルド装置の開発並びに、ピーニング等で、従来にない、新たな適用領域の開拓が望まれる。

2. 計測・イメージング用途では、マイクロチップレーザーはLiBS用としては、既に多用されている。

LiDAR用は、それほど高出力化は必要でないが、耐環境性(振動、温度)や長期信頼性、低価格化や競合する種々の方式とのベンチマーキングが必要。

PAT、PAM、PIV用などでは、可視域を含むマルチ波長での高出力化が必要。

ご静聴ありがとうございました。



2019年6月28日、Schloss Nymphenburg, Munich にて