

光渦・偏光渦レーザーの開発と レーザー加工への応用

Optical-vortex and polarization-vortex lasers
and their processing application

北海道大学大学院工学研究科

応用物理学専攻 教授 森田 隆二

准教授 岡 和彦

教授 丹田 聡

千葉大学大学院融合科学研究科

情報科学専攻 教授 尾松 孝茂

アウトライン:

A. 光渦・偏光渦(トポロジカル光波)とは？

B. トポロジカル光波発生とその応用

**B-1. 空間分散・軌道角運動量分散のない
超広帯域光渦パルス発生**

B-2. 高出力偏光渦レーザーの開発

B-3. 光渦パルスによるアブレーション

研究背景

光を特徴づけるパラメータ

振幅	……光強度	⇒	相対論的強度
位相	……コヒーレンス	⇒	光コム
偏光	……電場ベクトルの向き		
包絡線	……パルス幅	⇒	アト秒

これまでは時間領域・周波数領域の極限的制御



空間座標に依存した光パラメータの活用は不十分



位相・偏光が空間座標に依存する

トポロジカル光波

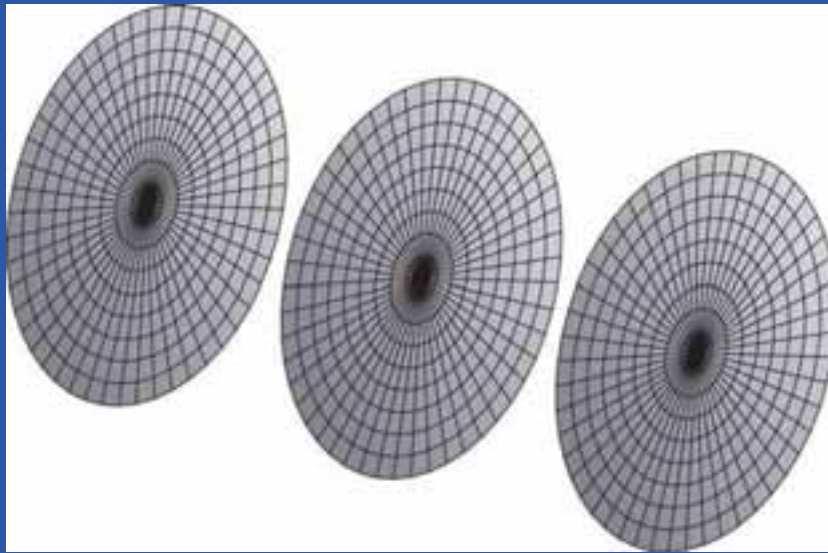
応用可能な光源の開発とその応用

トポロジカル光波（光渦・偏光渦）とは

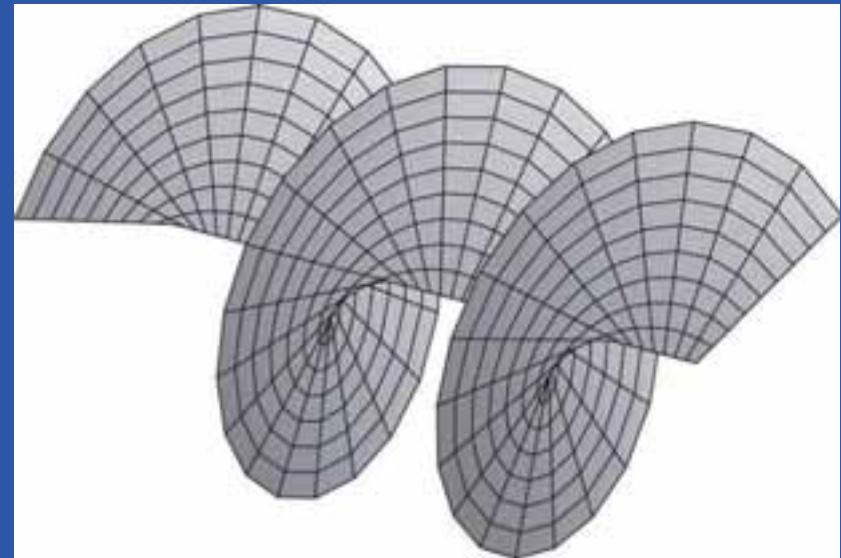
1. 光渦（位相特異点を持つ光）

位相の等しい面（等位相面）

螺旋（らせん）をなす



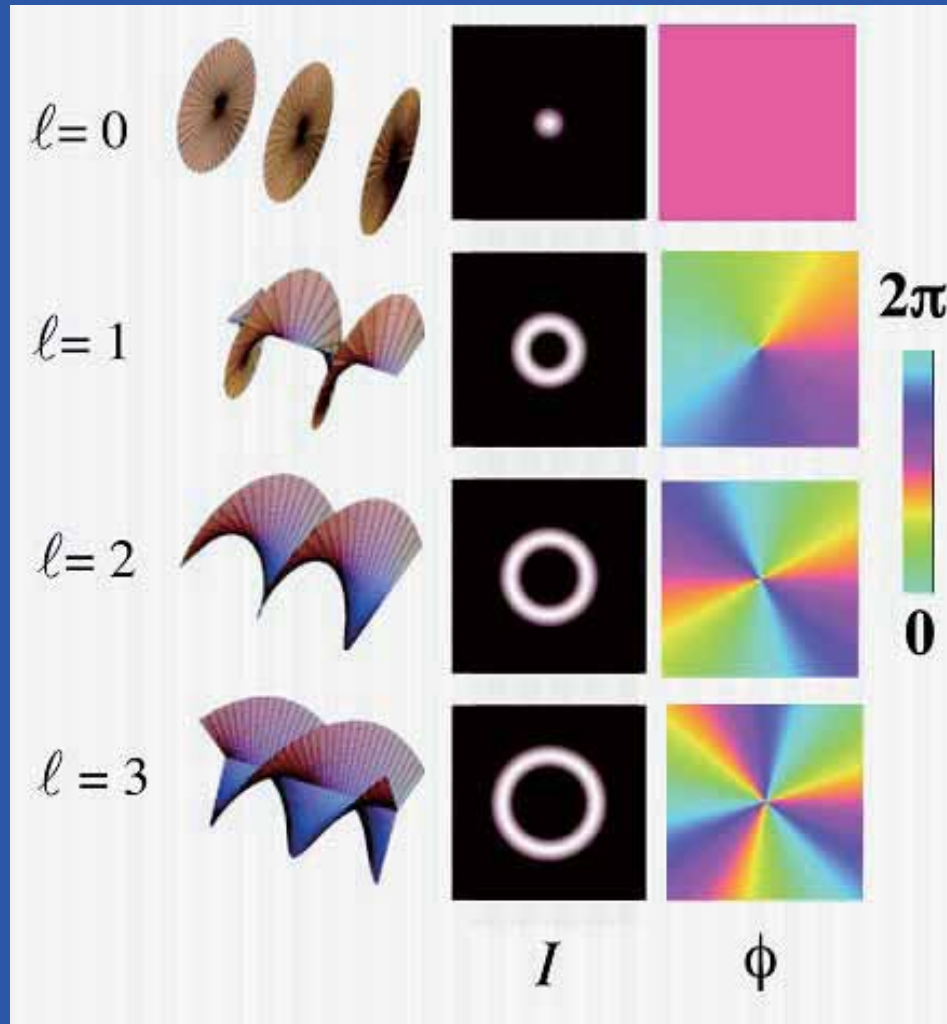
通常の光（平面波）
等位相面が平面



光渦
等位相面が螺旋

光渦の性質

位相の分布と光強度の分布



位相特異点

光強度 $\dots 0$



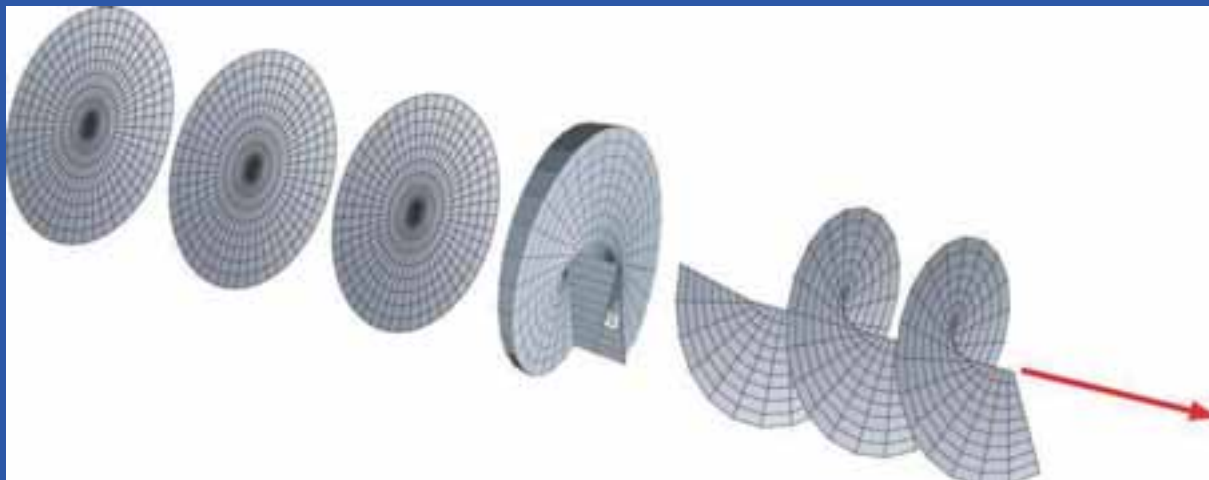
ドーナツ状のビーム

軌道角運動量をもつ

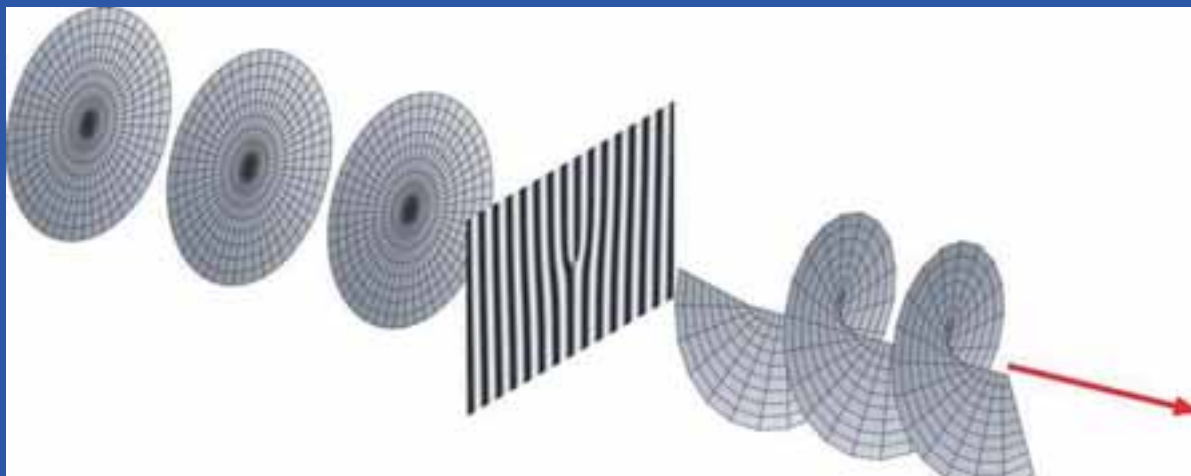
after M. J. Padgett
Univ. Glasgow

光渦の基本的な発生方法

螺旋位相板による方法

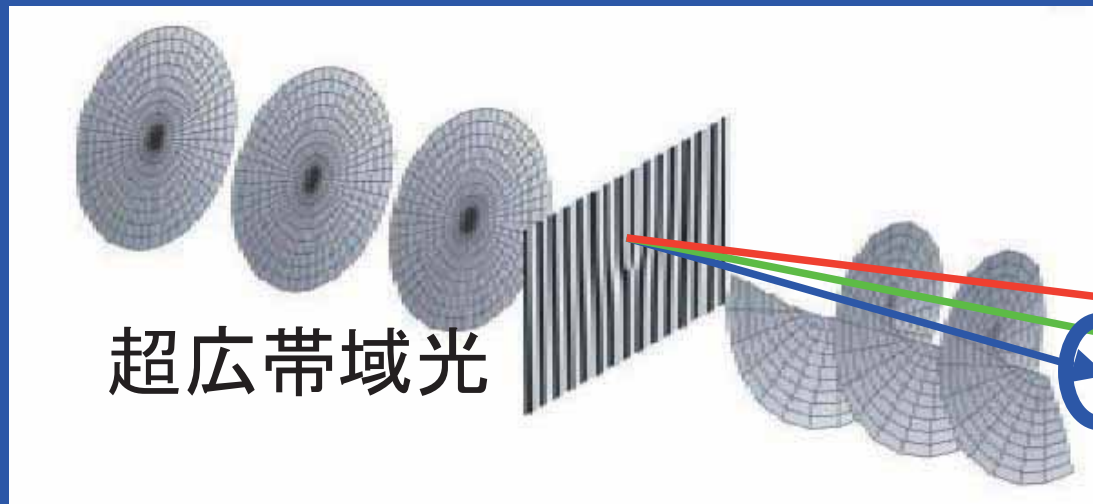


ホログラムによる方法



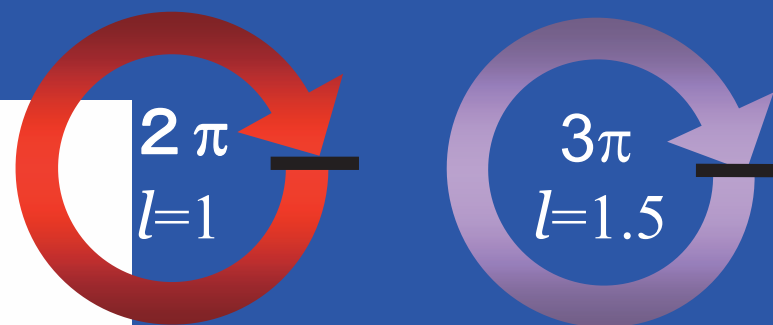
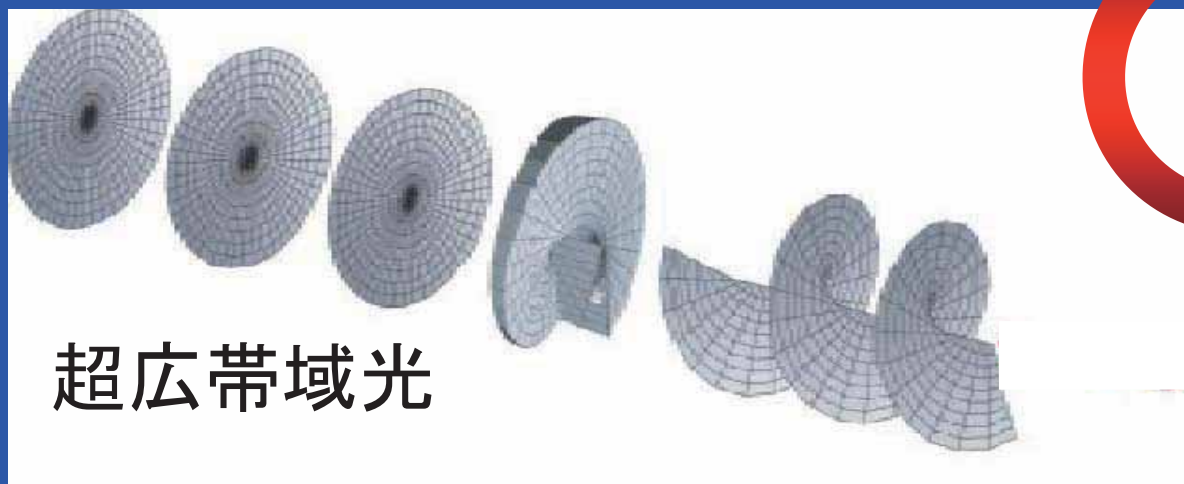
超広帯域光渦パルス発生における分散 —従来法の問題点

a. 空間位相変調器



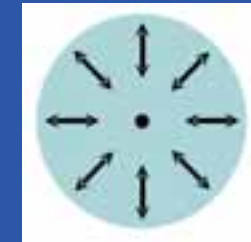
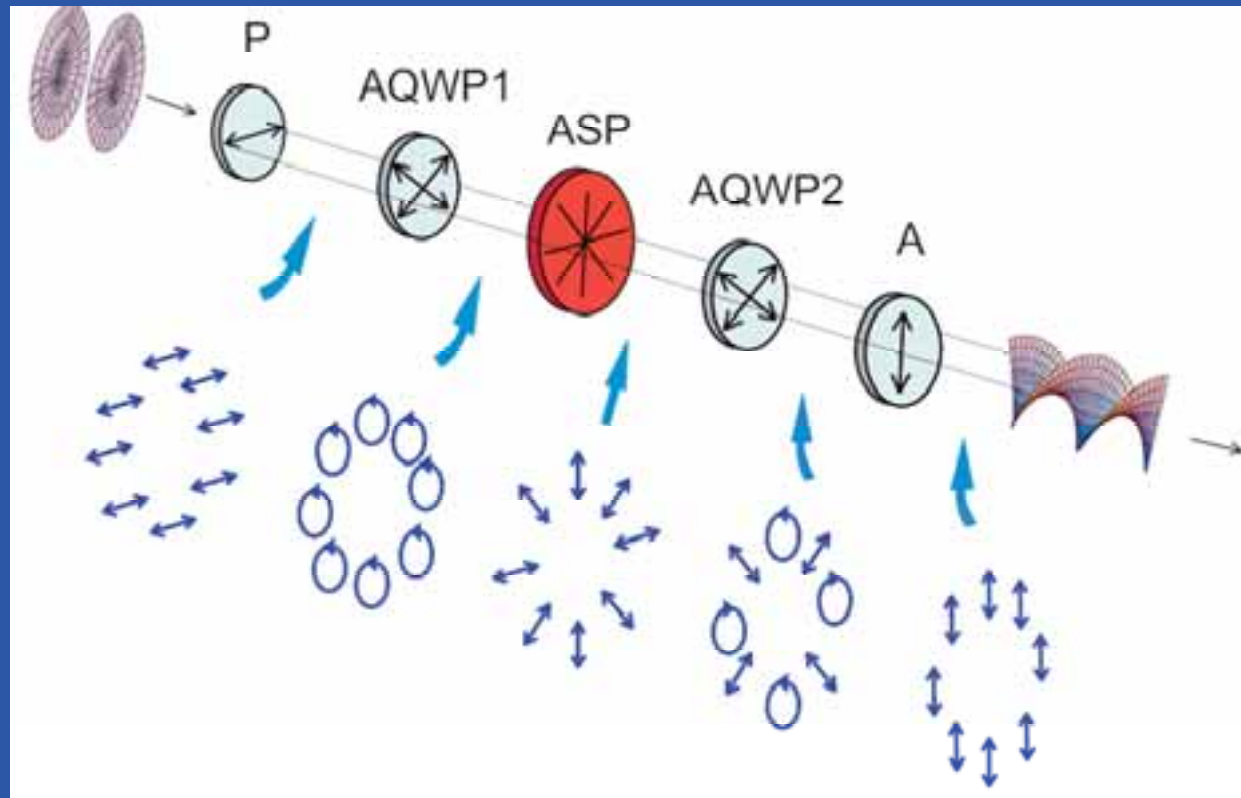
空間分散

b. らせん位相板



トポロジカル
チャージの分散

波長依存性のない新たな方法

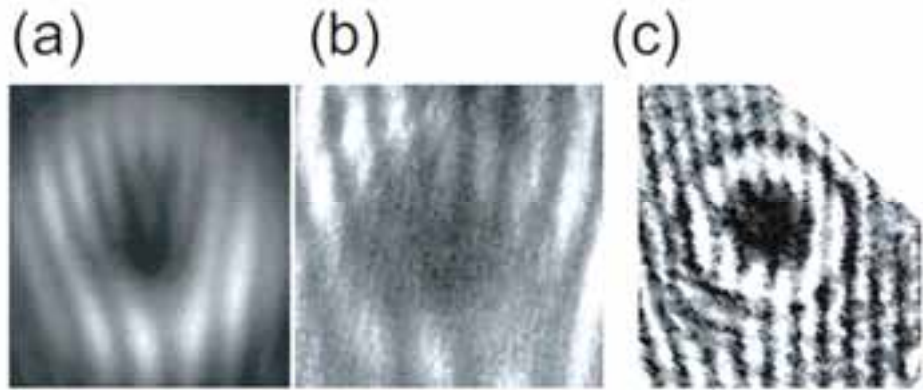
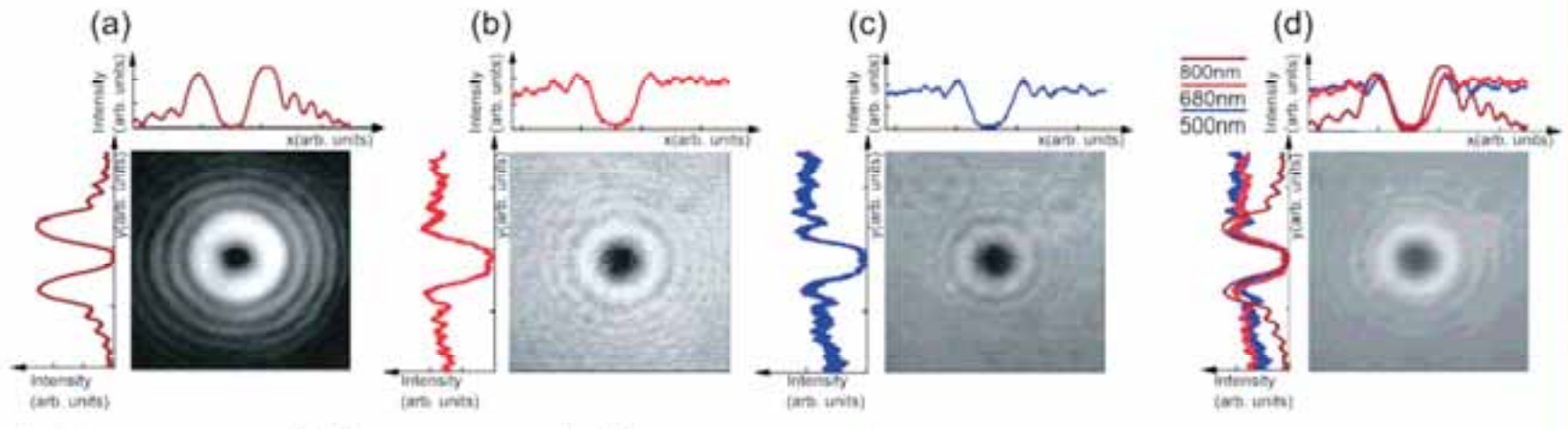
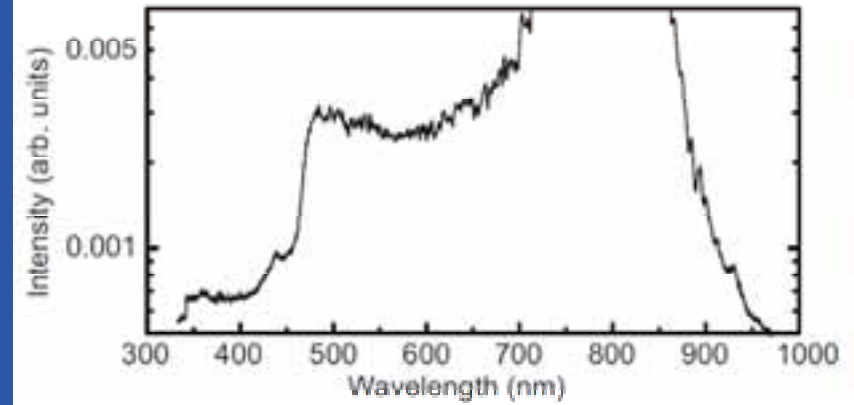


軸対称偏光子
(フォトニック結晶)

- ・空間分散無し
- ・トポロジカルチャージの分散無し

→ 超広帯域光渦パルス発生

超広帯域超短光渦パルス の発生 ($\Delta\lambda\sim 350\text{nm}$) 実験結果

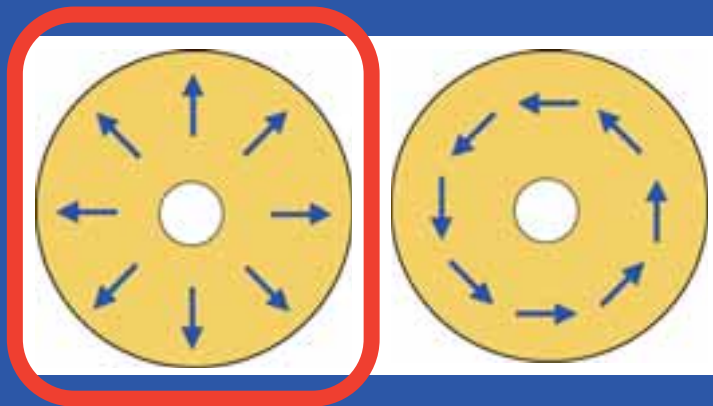


空間分散なし
トポロジカルチャージ
(軌道角運動量)分散なし

トポロジカル光波（光渦・偏光渦）とは

2. 偏光渦（偏光特異点を持つ光）

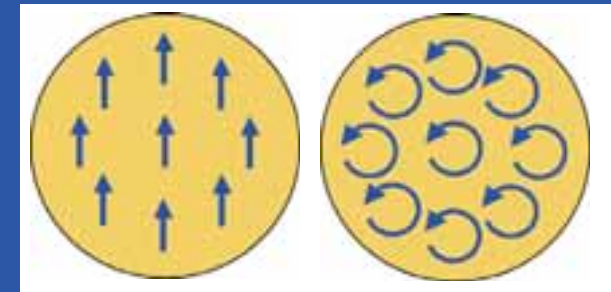
軸対称偏光モード
ビーム断面内で空間依存



径偏光

方位角偏光

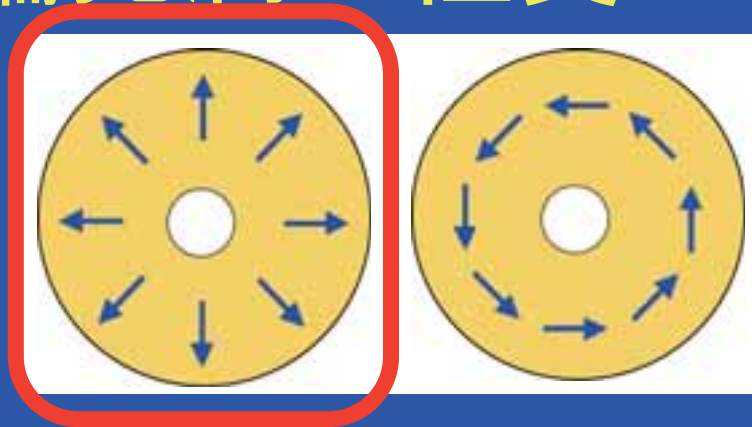
通常のレーザーモード
(ビーム断面内で一様)



直線偏光

円偏光

偏光渦の性質



偏光特異点

光強度 $\dots 0$

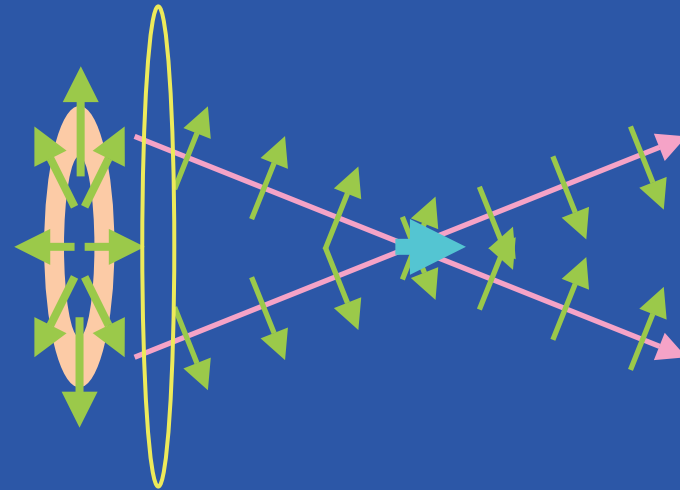


ドーナツ状のビーム

- 焦点付近で縦電場
- 小さなスポットサイズ



高空間分解分光
材料加工
荷電粒子加速
プラズマ物理



従来の偏光渦発生に関する研究と問題点:

重ね合わせ法 ← 厳密な光学調整が要求される

S. C. Tidwell et al. Appl. Opt. 29 (1990) 2234.

K. G. Toussaint et al. Opt. Lett. 30 (2005) 2846.

....

Nd:YAGレーザーからの直接発生 ← 不安定

R. Oron et al. Appl. Phys. Lett. 77 (2000) 3322.

I. Moshe et al. Opt. Lett. 28 (2003) 807.

Y. Kozawa et al. Opt. Lett. 30 (2005) 3063.

大きい吸収断面積 / 広い吸収帯域幅
大きな輻射断面積 / 大きな複屈折性

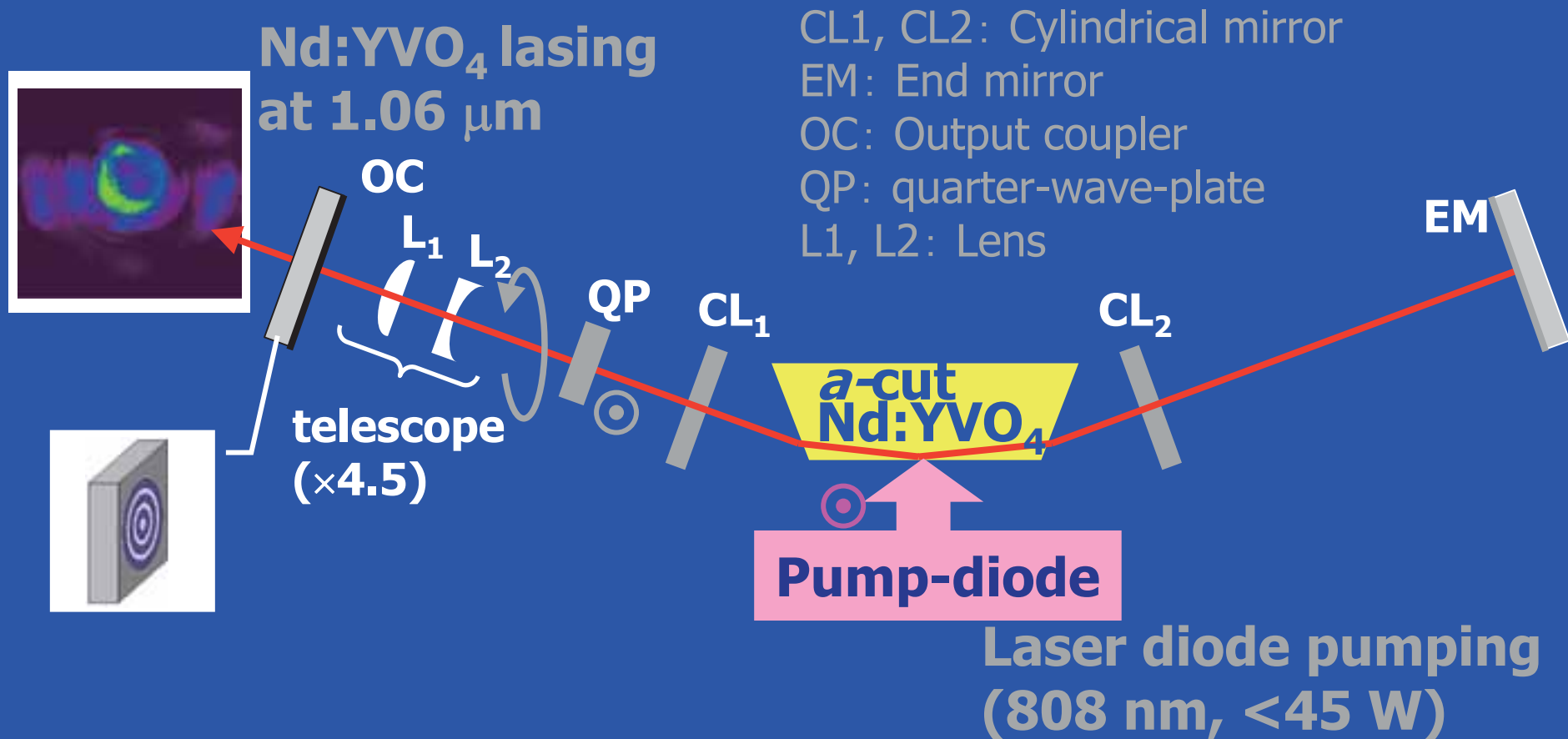
Nd:YVO₄レーザーからの直接発生 ← 低出力

J. F. Bisson et al. Opt. Express 14 (2006) 3304. 300 mW

K. Yoneazwa et al. Opt. Lett. 31 (2006) 2151. 75 mW

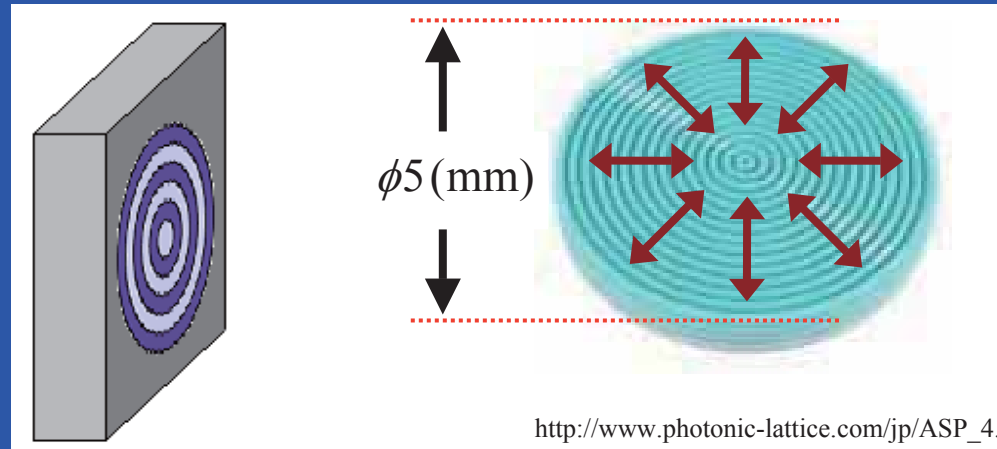
➡ Nd:YVO₄レーザーからの高出偏光渦の直接発生
を目指す

高出力偏光渦レーザー実験系

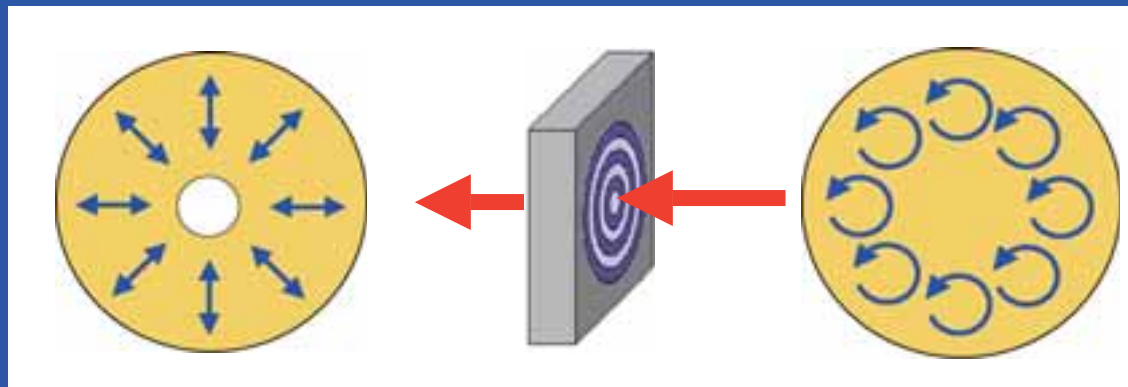


- 横方向励起バウンス型増幅器
簡単な構造・高い反転分布利得
- フォトリック結晶出力ミラー
偏光分布の発展を制御

フォトニック結晶ミラー



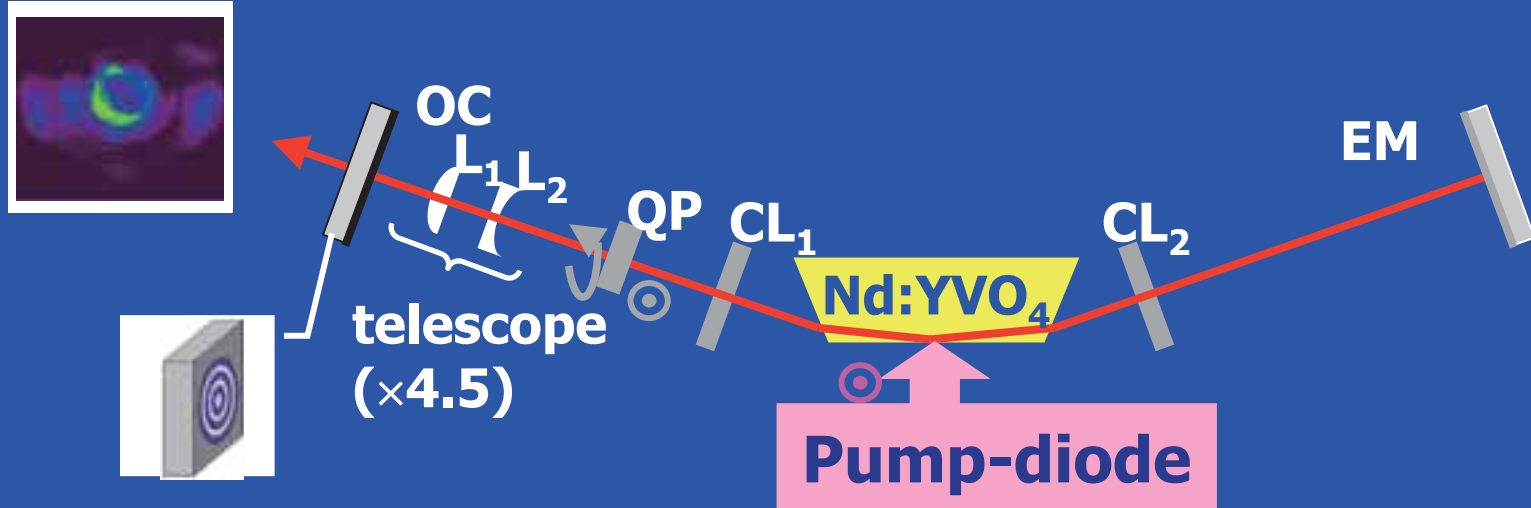
フォトニック結晶ミラー



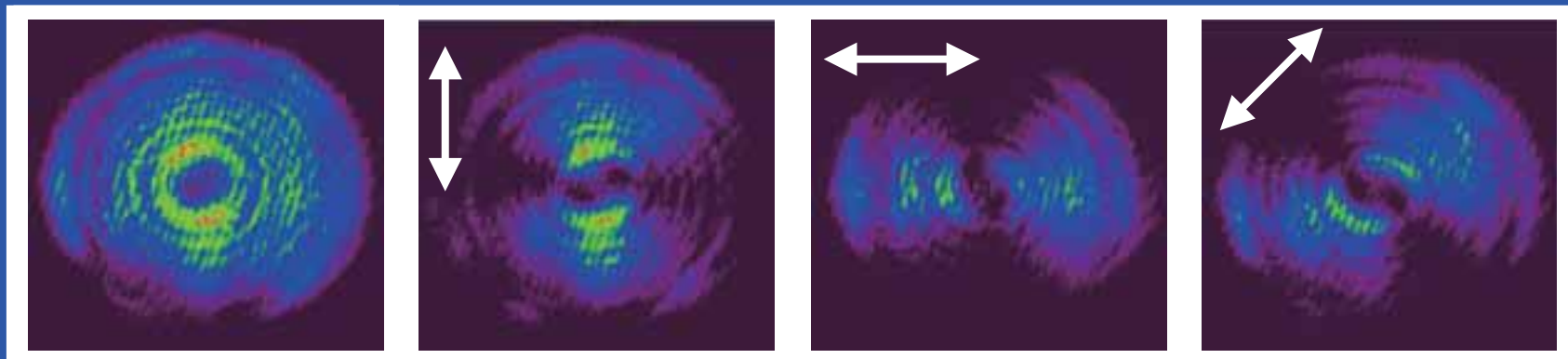
偏光等価特性
(実効的反射率 $\sim 50\%$)

偏光渦発生実験結果 I

出力光の偏光特性



ビームプロファイル



全体

偏光板通過後

垂直偏光

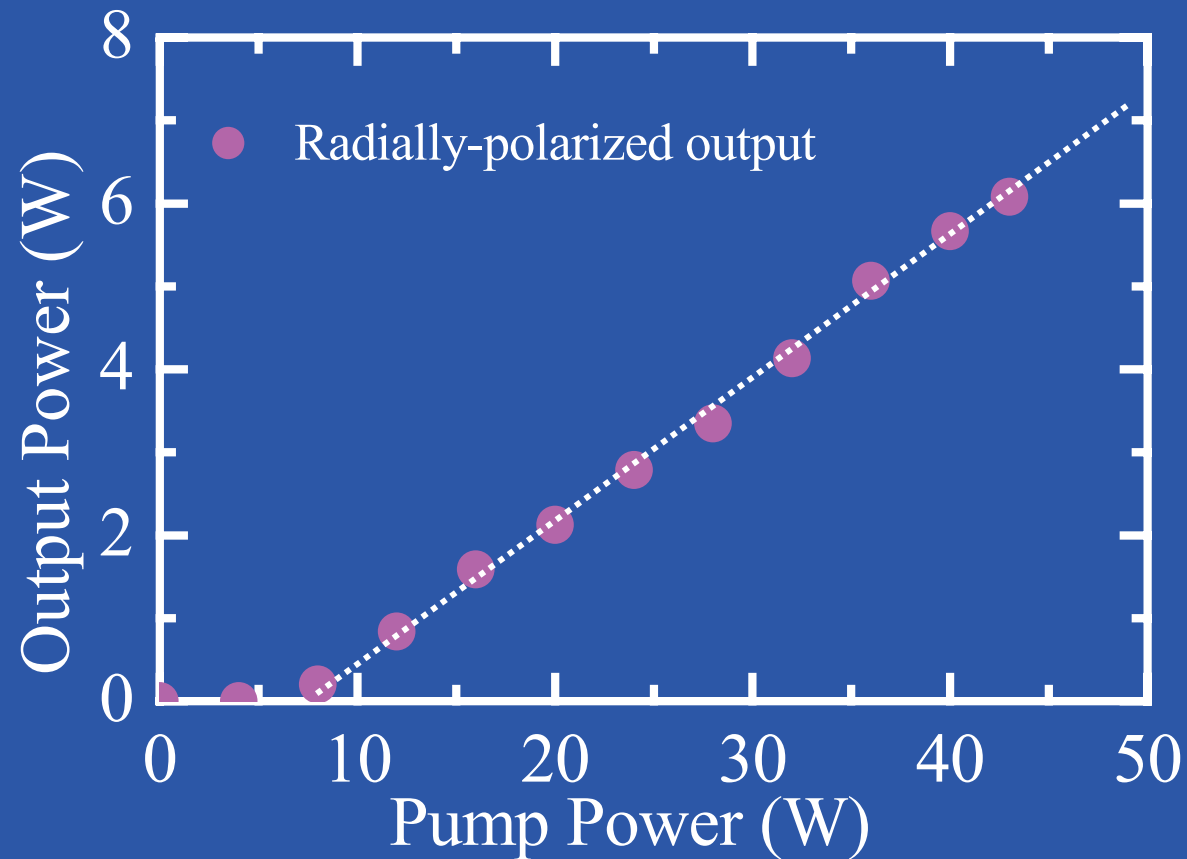
水平偏光

45° 偏光

径偏光

偏光渦発生実験結果 II

出力光の強度特性

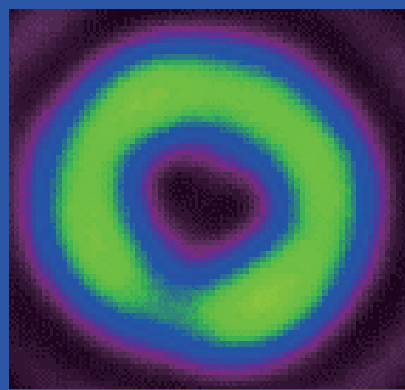
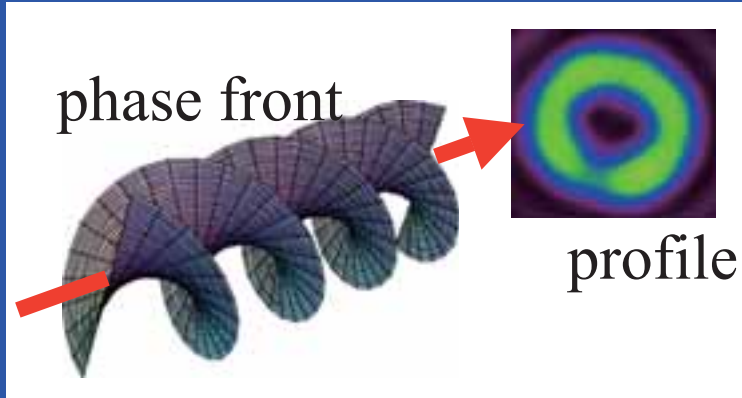
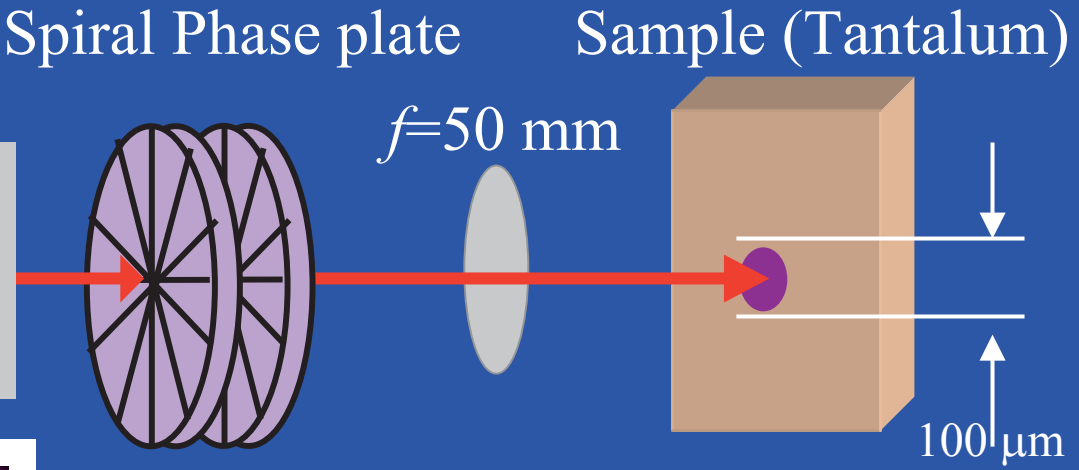


- 発振閾値: **7.0W**
- スロープ効率: **17%** (~30% まで向上可能)
- 最大出力: **6W** (世界最高)

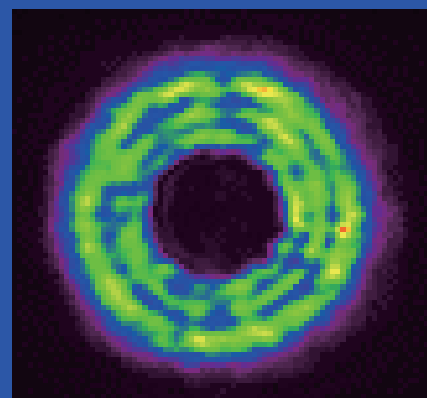
光渦パルスによる金属アブレーション 実験系

—新たな加工法—

Q-switched YAG-laser
Pulse width ~40 ns
Pulse energy 0.3~3 mJ
@ 1064 nm



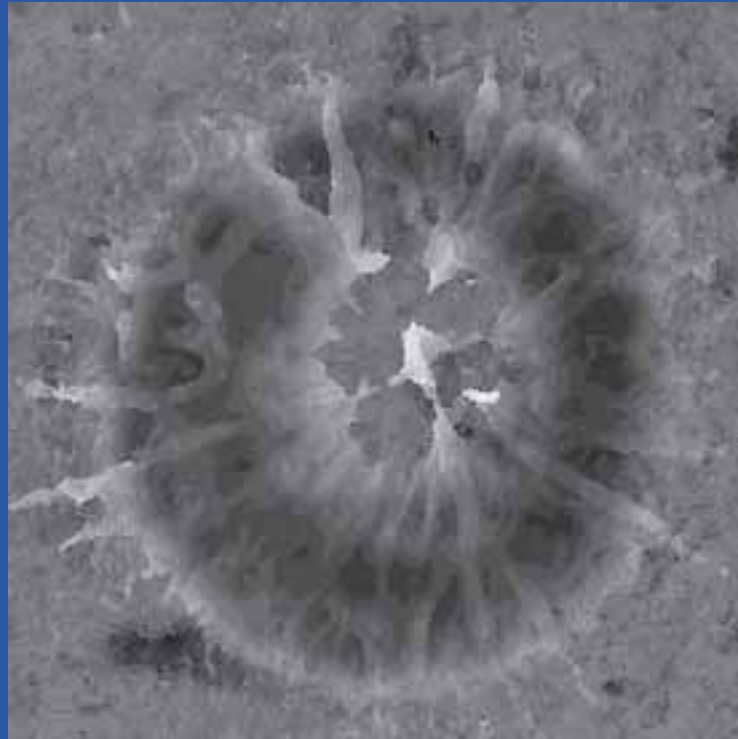
OV ($m=2$)



Hole-beam

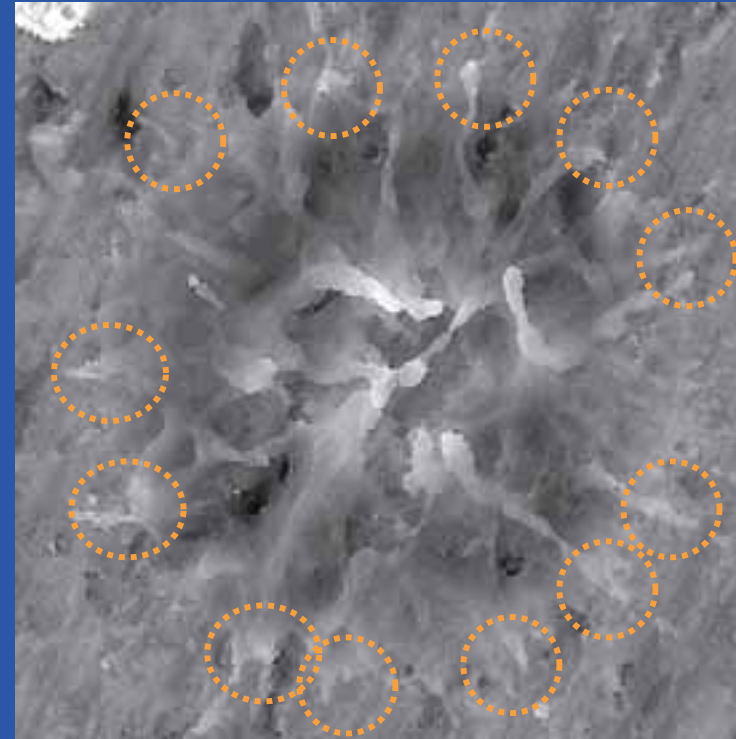
アブレーション結果 光渦 (3 mJ/pulse)

共焦点レーザー顕微鏡による観察



光渦 ($m=2$)

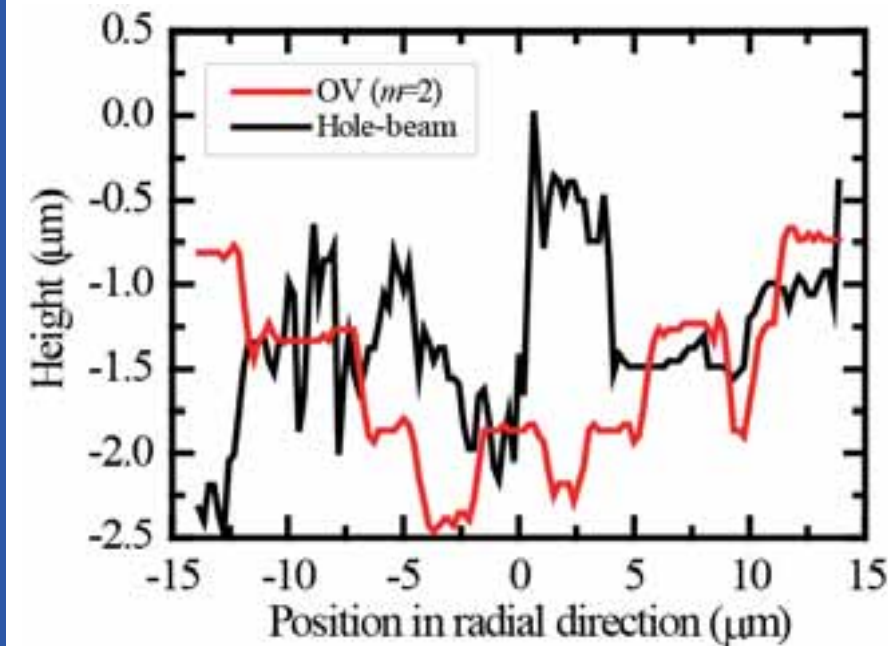
- なめらかな加工表面
- デブリの減少



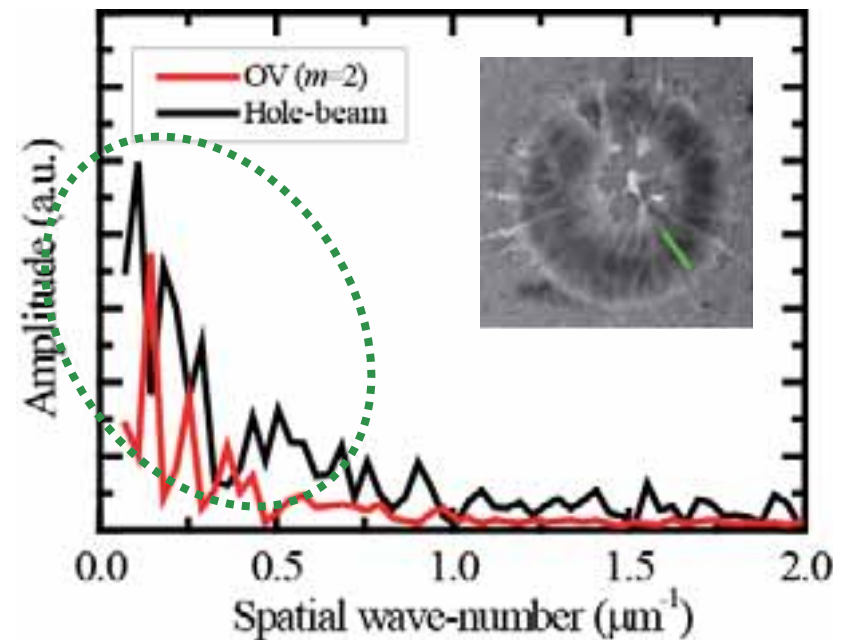
穴あきガウスビーム

- 粗い加工表面
- 多くのデブリ

空間周波数解析



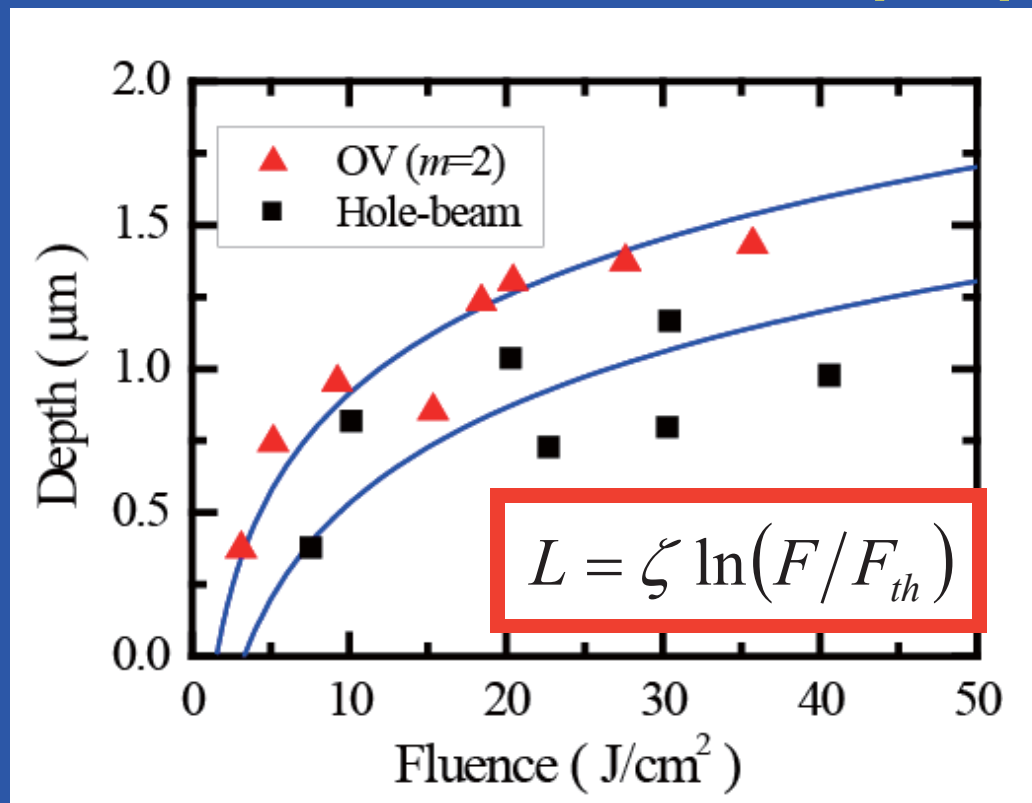
径方向の高さ分布
(ラインプロファイル)



空間周波数解析

細かい乱れも
大きなうねりも少ない¹⁹

アブレーション深さのフルーエンス依存性



L : アブレーション深さ
 ζ : 光透過深さ
 F : 入射フルーエンス
 F_{th} : アブレーション閾値

$F_{th} \sim 1.5 \text{ J/cm}^2$ 光渦 ($m=2$)
 $\sim 3.3 \text{ J/cm}^2$ 穴あきガウスビーム



アブレーション閾値の低下 20

新技術 ー想定される用途

1. 空間分散・軌道角運動量分散のない
超広帯域光渦パルス発生

➡ リング状物質分光・測定・制御

2. 高出力偏光渦レーザーの開発

➡ プラズマ制御・荷電粒子加速

3. 光渦パルスによる金属アブレーション



低閾値アブレーション
高精細アブレーション
少デブリアブレーション

企業への期待

高強度・超短パルス光渦・偏光渦光波発生は可能
となっている



基礎的用途以外のレーザー産業応用への展開を希望

実用化に向けた課題

- さらなる超短パルス化(モノサイクル域)・高強度化
- アブレーションメカニズムの解明と最適化
- 偏光渦によるアブレーション

本技術に関する知的財産権

1) 特願2005-216263号

岡 和彦, 森田 隆二, 丹田 聡, 西口 規彦, 谷口 敦史,
「光渦発生装置, 微小物体操作装置, 天体探査装置および
偏光渦変換素子」,

北海道大学, 2005年7月26日.

2) 特願2008-029784号

尾松孝茂, 森田隆二,

「軸対称偏光レーザー発振装置および軸対称偏光レーザー
発振方法」,

千葉大学・北海道大学 出願日 2008年2月8日.

3) 特願2009-79680号

尾松孝茂, 森田隆二, 丹田聡,

「レーザー加工方法」, 千葉大学・北海道大学,

出願日: 2009年3月27日.

問い合わせ先

北海道大学 産学連携本部
事業化推進部

城野 理佳子

Phone: 011-706-9559

Facsimile: 011-706-9550

E-mail: kino@mcip.hokudai.ac.jp