



# 展 TENBO 望

## レーザーを使う核融合発電とは どんなものか、その現状は



北川 米喜  
Kitagawa Yoneyoshi  
(光産業創成大学院大学)

### 1 はじめに

#### 1.1 いつまで夢のエネルギー？

核融合というエネルギー源は遠い将来の夢のエネルギーとされ続けている。なぜそうなのか。原子核と原子核の融合は核分裂と同じく、極めて統計的な現象であり、日常起きているのである。ただそのエネルギーを取り出して電力として利用しようとする、核分裂は連鎖反応を使う。核融合には連鎖反応という便利な、しかし使い方を誤ると暴走し厄介なものはないが、対応するのが $\alpha$ 粒子（ヘリウム原子核のこと）自己燃焼である。

核融合反応は、そもそも野球場のグラウンドほどの大きさの原子のピッチャーマウンドにあるビー玉くらいの原子核同士が直接衝突しなければならない上に、原子核同士のプラス電荷の防御の堅いクーロン障壁をすり抜ける必要がある。前者は密度が高ければ衝突の確率が増え、後者は温度が高ければ劇的にその確率が増加する。これら壁を乗り越えて $\alpha$ 粒子燃焼を起こして電力を取り出すところまでいくには、密度が氷の500倍以上、温度が5,000万度（5 keV）以上である。ただこれは太陽中心に匹敵して実現するのが難しく、昨年夏米国ローレンス・リ

バモア研究所の国家点火装置 National Ignition Facilities, 略称 NIF で初めて $\alpha$ 粒子燃焼現象が見付かったところである。大阪大学でも密度だけは1,000倍近くが達成できている。

#### 1.2 マイルストーンに CANDY 炉

レーザー核融合開発で NIF を含めて世界中で行われてきたのはもっぱらシングルショットでいかに利得を1以上に上げるかであって、繰り返しはおいてけぼりであった。そこでは発電するということが忘れられていたわけではないとしても、それは研究者の仕事ではないということで、研究者自らが夢においやってしまっている。誰でも思うに強力なエネルギーを連続供給できるレーザーを手に入れることが肝心であって、逆にレーザー核融合が画餅だったのも今までそれがなかったことによる。いつまでも夢のエネルギーとは、このようなことである。

数年後に半導体キロジュールレーザーが現実のものになる可能性が出てきた。発電所規模のレーザーも基本的にこのレーザーモジュールの集積でできるという画期的な里程である。後に述べるロードマップの中間点でもあるこの地点でキロジュールレーザーを用いて、そして炉心、ターゲット投入、発生熱回収、トリチウム回収など発電炉に必要な要素をできるだけ盛り

込んで“ミニ実験炉 CANDY”を作ってみようというのが本プロジェクトの最初のもくろみである。概念図が図1である。わずか百 W の核融合出力しか見込めないが、それでも将来の核融合炉の姿をそれで捉えることができるはずである。発電実証炉という最終目標のみあってその途中のマイルストーンがなくては、長い航海の舵が切れるものではないと切実に思うからである。中性子の量は発電は割に合わなくとも中性子治療、物質改変、創成と実用になる。

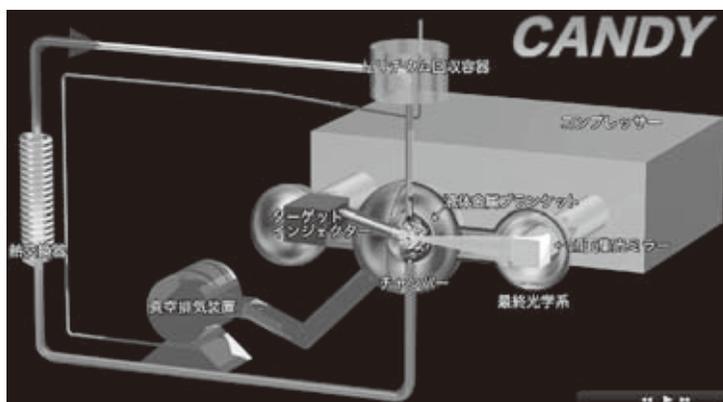


図1 キロジュールレーザーを用いるミニ実験炉 CANDY  
 背後のレーザー装置から対向爆縮レーザーと同軸で加熱レーザーを伝送する。照射容器の中心に重水素三重水素燃料ペレットを投入し、爆縮加熱による核融合反応を起こす。照射容器の中側の容器内面にリチウム鉛流を流下させ、液体金属ブランケットとする。加熱されたブランケット流は外部熱交換器を経て蒸気タービンを駆動する

## 2 レーザー核融合の原理

レーザー核融合とはまず、強力で時間幅の短いパルスレーザーで重水素と三重水素（トリチウム）の混合燃料の詰まった直径数 cm のプラスチックペレットを 1,000 倍ぐらいに圧縮する<sup>1)</sup>。ここでよく誤解されるのが、レーザーの光圧でペレットを圧縮するイメージである。これは間違い。量子の世界ではたしかに光子と電子が衝突してコンプトン散乱ということを起こす。しかしこれは両者が素粒子である間の話であって、レーザーは電磁波として個々の電子は動かしても直接マクロなものを押せるものでない。レーザー光は一般の電磁波と同じく、波長ぐらいの深さまで浸透しその浸透層で光エネルギーが吸収される。吸収エネルギーは層の熱エネルギーとなり、その部分は蒸散してしまう。これをアブレーションという。ペレット本体はこのアブレーションの反作用で加速される。これは全くロケット作用である。球形のペレットの表面を均一にレーザー照射すると、上のプロセスを経て結果的にペレットは中心に圧縮される。いわゆる爆縮（インプロージョン）であ

る。それでレーザーのパルス幅はペレットが中心まで押しつぶされるぐらいの時間幅を取ることになる。10 ナノ秒前後である。上手くいけば中心に超高密度の燃料球が実現する。超高密度であると同時に中心まで押し込まれた運動エネルギーが全て燃料球の熱エネルギーになって超高温度にもなるので、すぐさま爆発的に膨張が始まる。このすぐさまに注目する。瞬間とはいえ、有限の時間はその超高密度超高温度状態が保たれる。大体数十ピコ～100 ピコ秒である。太陽の中心以上の状態であり、既に日米の実験で実現している。それが慣性のなせる業で、レーザー核融合が慣性核融合と言われるゆえんである。最も核融合反応が起こりやすい重水素-三重水素融合の場合、個体密度の 500～1,000 倍ぐらいの密度で温度が 5～10 keV あれば、発電所として成立する。

ここで燃料同士が数 mm の火だるまとなって融合する。融合するやいなや  $\alpha$  粒子と中性子とに分かれるが、 $\alpha$  粒子は更にコアを加熱し核融合反応を進行させ、エネルギーを持って外に出て来る中性子などを照射容器の壁のブランケットで捕まえるという至って単純なものであ

る。出てくるエネルギーはウラン核分裂炉の10倍、これを1秒に10回程度繰り返し発電タービンを動かす。もちろん巨大なエネルギーを産み出そうというわけだから、照射容器を包むステンレスやコンクリートは熱くなり（放射化され）、冷めるのに100年掛かる。とは言っても核分裂炉の100万分の1ではある。

## 2.2 コア加熱

そもそもレーザーアブレーションで球殻を加速するということには、鬼が棲んでいる。固体のピストンで燃料ガスを圧縮するのは逆に、柔らかいプラズマで固体燃料を圧縮するというのだから、すぐに境界面が不安定になって球殻に細かい穴が開いたり、燃料だけの純粋であるべきコアにアブレーターの不純物が混じって高温度にならなかつたりする。鬼を代表するのがレーザー不安定性という流体特有の不安定性で、ある程度制御はできるが、なくしてしまうわけにはいかない。比重が1以下の軽い油で比重1の水を支えようと言うに等しいからである。

高密度達成は比較的優しくとも高温度達成は難しく、ここで道が2つに分かれる。そのまま押ししていくのがNIFなど中心点火方式で、点火栓のないディーゼルエンジンに例えられる。そこを更に時間幅の短い超短パルス超高強度のレーザーで加熱（点火）する方式もある。点火栓のあるガソリンエンジンに例えられる<sup>2)</sup>。コアが高温度になるのを待たないで、外部から加熱しようというので、レーザーのうちでも超高強度レーザーというものが陽の目を見て初めて現実味を帯びてきた方式である。

## 3 世界の核融合開発の現状

国際熱核融合実験炉（ITER）がフランスに建設中である。トカマク型という巨大なドーナツ容器の中に重水素と三重水素の混合ガスを封入し、周りを複雑怪奇の磁場で覆って数分間閉じ込め核融合反応を起こさせる。日欧露中韓印

米の参加国から巨額の資金が投入されつつあるが、この50万kW実験炉の後に原型炉（発電実証炉）、商用炉と構築しなければ発電に至らない。米国ローレンス・リバモア国立研究所ではNIFが稼動している<sup>3)</sup>。今年2月12日nature on lineの報じたNIFの成果「慣性閉じ込め核融合で燃料利得が1を超えた」は、核融合開発のエポックメイキングニュースである<sup>4,5)</sup>。従来ローレンス・リバモア国立研究所のみならず世界の主要研究施設で、“レーザーで超高密度超高温のプラズマを生成し、核融合反応を起こして中性子を取り出す”ことは行われてきたが、レーザー核融合が本当に発電炉となるための、つまり、投入電力以上の核融合出力を得る指標として必ずクリアしなければならないことは、核融合反応で中性子発生と同時にその5分の1の運動エネルギーを持って出て来る $\alpha$ 粒子で更に燃料自体を再加熱し（自己燃焼という）温度を上げて、中性子発生量を桁違いに増倍することである。それによってこそ、十分に電力として取り出せ利用できる。いわゆる発電所が成立する。この $\alpha$ 粒子による自己加熱が今回実証された。何によつての成果かについては、“ホットスポット”という集中的に核融合反応が起こって中性子が大量に発生するスポットを、爆縮コアの更に中心に形成できたことが一番の理由である。投入レーザーエネルギーが1.8 MJで核融合中性子出力が14 kJと一般的な利得でいえば1%弱というあまりに非効率で、これでそのまま実証炉建設につながるものではない。我が国はまず超高強度レーザーによる外部点火、高速点火でもっと効率良くと提唱している。

とにかく $\alpha$ 粒子加熱までクリアできたこと、及び論文で議論されているホットスパーク形成、 $\alpha$ 粒子加熱等実験データを駆使した評価パラメーターを見てみると、実証炉、発電炉の概念設計の設計値指針には非常に大きな意義がある。同時に、利得1が14 kJのプラズマで実証できたということは、今回のNIFの採っ

た間接照射自己加熱自己点火方式にこだわらずとも、直接照射方式や直接加熱方式を取り入れて、更に低い投入レーザーエネルギーで同じことが起こり得る可能性があり、その意味で実証炉が一步我々の手元に近づいたという印象を持つ。

本稿執筆時 NIF は、プラズマエネルギー 12 kJ で核融合出力 26 kJ まで来ており、このゴールは 1 MJ とのことである。ただ 1 日数ショットしかできない巨大装置からどうして 1 秒に数ショット必要な発電所の絵が描けるものだろうか。先のプラズマ核融合学会誌解説の中で著者ブルース・レミントンは「数 Hz の繰り返し周期で核融合反応を起こすことは NIF で行われる研究の範疇を超えた次の大きなステップであり、新たな違うタイプのレーザー装置が必要になろう。長期展望と目的は、核融合炉においてレーザー核融合により生じたエネルギーを電気へと変換することである。」と述べている<sup>5)</sup>。今回のシングルショットを基に炉心開発と同時に、すぐにも高繰り返しの本当の発電炉開発を進めていかねばならない。

## 4 世界初繰り返し核融合開発プロジェクト

### 4.1 爆縮と直接加熱

筆者らが目指す核融合は最初から半導体励起で効率の良いレーザーを使い、ゴールの発電所まで道を失わないことを第一ガイドラインとした。ロードマップを図 2 に示す。今はまだ開発段階の初期だからといって、ゴールでは使われない技術は可能なかぎり採らない。それを第二のガイドラインとした。ゴールまで見通したとき乗り越えるべきは、メガジュールレーザーとトリチウムの燃料ペレットとそれをレーザー照射点に入射すること、及びエネルギーの取り出しのためのブランケットを準備すること、であ

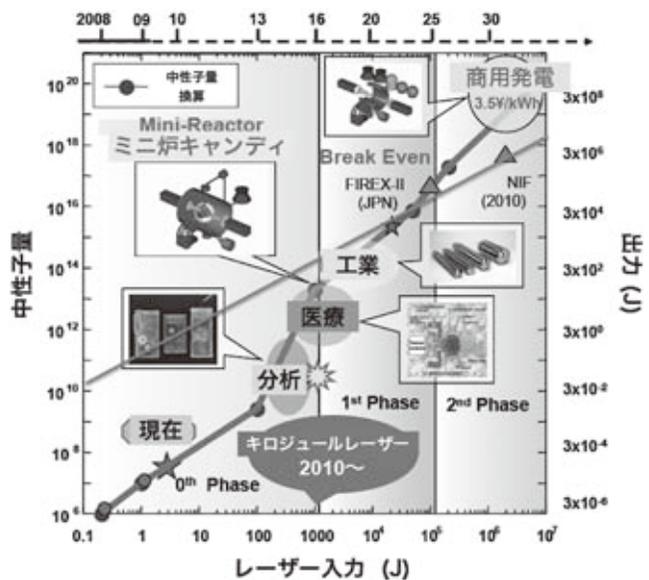


図 2 発電まで繋がるレーザー核融合開発ロードマップ

る。

レーザー核融合開発で NIF を含めて世界中で行われてきたのは、もっぱらシングルショットでいかに利得を 1 以上に上げるかであって、繰り返しはおいてけぼりであった。誰でも思うに強力なエネルギーを連続供給できるレーザーを手に入れることが肝心であって、逆にレーザー核融合が画餅だったのも今までそれがなかったことによる。ロードマップの真ん中の太線は、レーザーの出力が全てを決定すると言っている。

浜松ホトニクス(株)が長年掛けて開発して来た 20 J の出力が 1 秒に 10 回出せる半導体励起固体レーザー KURE を使って核融合研究がスタートしたのが 2005 年である<sup>6,7)</sup>。世界初、半導体励起の大出力繰り返しレーザーを用いての核融合開発研究である。前節の NIF の MJ のわずか 10 万分の 1 に過ぎないけれど、10 Hz 繰り返し照射が可能である。コンパクトな核融合発電を目指す産学の共同プロジェクトである。

繰り返し爆縮直接加熱に用いた HAMA レーザーシステムは、チタンサファイヤレーザー

BEATを種として、半導体励起固体レーザー KURE 倍長波で増幅し、一部はそのまま L-pulse、一部はパルス圧縮して S-pulse とする。K-pulse は KURE から直接取る。レーザービームは CD シェルへ対向 2 方向照射し、軸外し放物面集光鏡で球殻表面及び中心に集光する。

ビームの波形は、図 3 (a) に示すように K-pulse が 25 ns の長いフットパルスを形成して徐々にペレットを駆動する。最初から思い切りアクセルを踏み込むようなことをしても、球殻全体が吹き飛んでしまってほとんど圧縮ということができないからで、このようにレーザーパルスの波形を整形したものをテラードパルスといい、世界の主流となっている。そのピークでパルス幅 400 ps の L-パルスと称する主ビームで中心まで球殻を押し込んでコアプラズマを形成する。爆縮の様子を 1 次元流体コード STAR1D で追跡し流線図に表したのが図 3 (b) である。37 ns 辺りで最大圧縮となるが、次の瞬間爆発するのが分かる。このわずかな最大圧縮時にパルス幅 100 fs の超高強度レーザーを照射することになる。超高強度レーザーで駆動さ

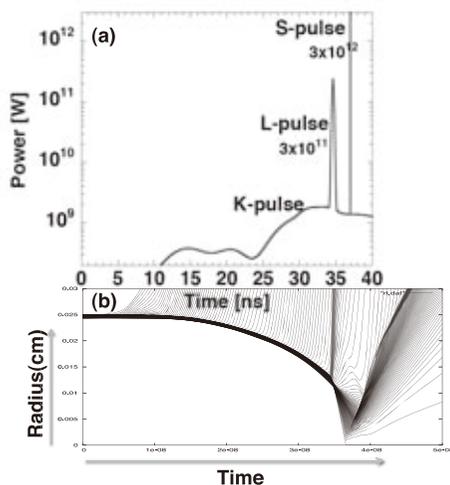


図 3 (a) 繰り返し爆縮直接加熱に用いたレーザーパルス波形。K-pulse、L-pulse、S-pulse のピークから成る。(b) このレーザーによる半径 500  $\mu\text{m}$  の CD 球殻の爆縮を STAR1D で追った空間時間ダイアグラム

れる高速電子、高エネルギーイオンがコアプラズマを加熱して、核融合反応に至るのが直接加熱方式のシナリオである。自己点火方式では、この最後の超高強度レーザー照射無しで自己点火を起こさせる。

CH プラスチックの H を D で置換した CD 材料で直径 0.5 mm の球殻を作り、両側からの対向レーザーの爆縮と加熱に進んでいる。図 4 は、球殻を模した二重 CD フォイルの爆縮コアの高速加熱を実証したもの<sup>8)</sup>。図 3 のフットパルス (K-pulse) を抜いて爆縮コア部分のみを取り上げ、X 線ストリークカメラで観測できるようにしたもので、加熱レーザー (高速点火レーザー) 照射で発生した高速電子で瞬間的に加熱されコアが発光する。発光は 3 ns 以上続くことも観測される (図 4)。

#### 4.2 ターゲット連続投入と中性子発生

一昨年までは核融合が連続 100 回止まりだった。レーザーの繰り返し確保されても、燃料ペレットの注入が追いつかない。今、直径 1 mm のペレットが無限に供給できる装置を用意した。飛んでくる 1 mm の中実 CD ビーズペレットをレーザーで撃ち落とすことを試みているが、的中は容易でない (図 5 参照)。最近打率は 7 割を越えるところまで来た<sup>9)</sup>。対向レーザ

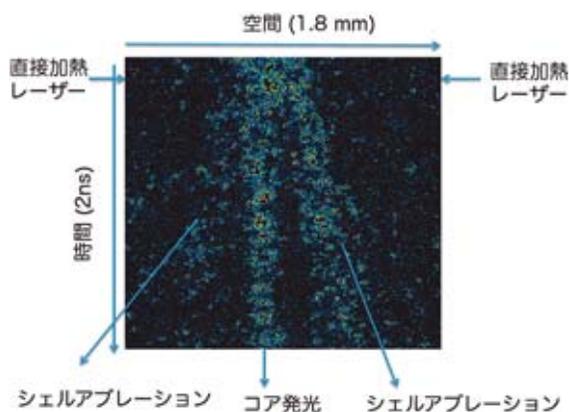


図 4 球殻を模し、二重 CD 薄膜の対向爆縮コアへ超高強度レーザーを照射したときのコア発光の時間変化を X 線ストリークカメラで初めて観測した

ービームがビーズペレットの表面に集光できると、図6に示すように、CD薄膜に照射するより3倍のDD反応(D(D, n)<sup>3</sup>He)中性子を発生させ得ることが分かった<sup>6)</sup>。

#### 4.3 CANDY 炉の構造概要

数年後に半導体キロジュールレーザーが現実のものになる可能性が出てきた。ロードマップの中間点でマイルストーンとして“ミニ実験炉CANDY”の構築を図る。概念図が図1である。真空の照射容器を二重構造にして、内側球状容器の内壁に沿わせて液体リチウム鉛を流す。ブランケットとして核融合燃焼熱を壁で吸収して冷却材で取り出すためである。それと真空容器(外側球容器)から成る。爆縮、加熱レーザーはともに10 Hz、出力2 kJで、発生中性子量は $5 \times 10^{12}/\text{shot}$ を見込む。利得0.7%で、わずか190 Wの核融合出力しか見込めないが、それでも将来の核融合炉の姿をそれで捉えることができるはずである。中性子の量は発電は割に合わなくとも中性子治療、物質改変、創成と実用になる。

CANDYへの課題はおよそ(1)繰り返し固体レーザー：ロングパルスレーザーと短パルスレーザー(既存)、(2)直接加熱で高利得核融合(現在進行中)、(3)ターゲット連続投入と追尾(現在進行中)、(4)出力取り出しブランケット、(5)DTクライオターゲット(既存技術)であり、(4)以外は先に述べてきたように何がしか緒に就いたと言える。

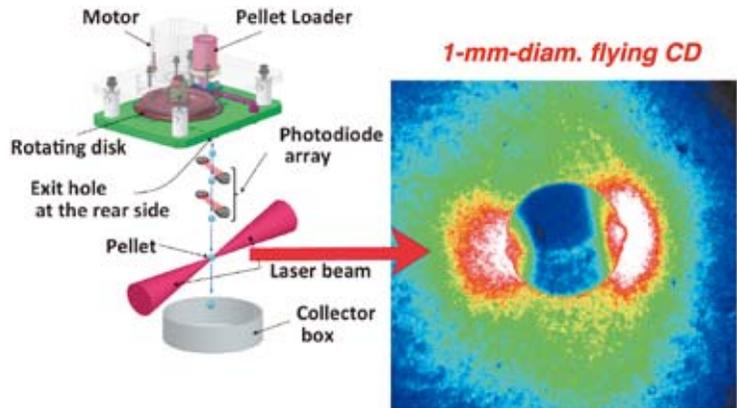


図5 ターゲット連続供給落下装置と照射瞬間の中実CDビーズペレット

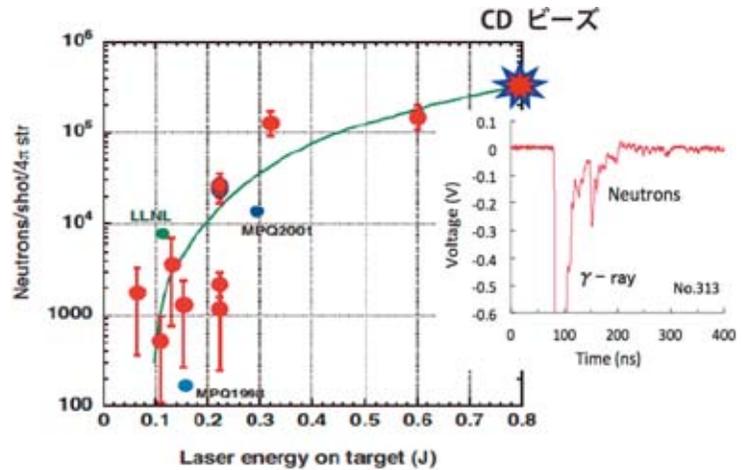


図6 投下中実CDビーズペレットからの中性子発生量とCD薄膜照射中性子<sup>6)</sup>との比較  
右に線と中性子のシンチレーター波形の一例を示す

## 5 最後に

ここまで光産業創成大学院大学、浜松ホトニクス(株)、トヨタ自動車(株)の三者が中心になってやってきたのはドン・キホーテの槍のような研究ではあるが、LEDと同様、巨大エネルギーの出せる半導体レーザーはごく最近の技術変革の象徴である。点火のための超短パルスレーザーの出現も変革の象徴であり、この2つの槍で一挙にレーザー核融合の夢が夢でなくな

った。

日本のレーザー核融合研究はあまりに米国の巨大研究に幻惑され、発電へのモチベーションを見失いかけている。核融合を人類のものとするために筆者らが実践しているのは、巨大装置を待つよりも、手元の装置で夢を手元に引き込もうということである。世界中にそれが広がることを望んでいる。無資源国のエネルギー飢餓感は資源大国が本当に共有できるものであろうか。

本研究は JST サイエンスチャンネル動画「核融合研究は今 実用化への現状と課題」<http://sc-smn.jst.go.jp/playprg/index/6761> で紹介されている。

#### 参考文献

- 1) Atzeni, S. and Meyer-ter-Vehn, J., "The Physics for Inertial Fusion, Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter", Oxford Science Publications (2004)
- 2) Tabak, M., *et al.*, *Phys. Plasmas*, **1**, 1626 (1994)
- 3) Lindl, J.D., "Inertial Confinement Fusion, The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive", Springer-Verlag New York, Inc. (1998)
- 4) Hurricane, O.A., *et al.*, "fusion implosion", *nature letter*, **506**, 343 (2014)
- 5) Remington, B.A., *J. Plasma Fusion Res.*, **90**, 228 (2014). *Plasma Fusion Research: Letters*, **6**, 1306006 (2011) [日本語]
- 6) Kitagawa, Y., *et al.*, *Plasma Fusion Research: Letters*, **6**, 1306006 (2011)
- 7) Mori, Y., *et al.*, *Nucl. Fusion*, **53**, 073011 (2013)
- 8) Kitagawa, Y., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 155001 (2012)
- 9) Komeda, O., *et al.*, *Scientific Reports*, **3**, 2561 (2013)