

おおたまなびの森

真理の探究が未来を拓く

～光で見て、モノを操れる速さの限界は何処に？～
1000兆分の1秒をどう凌駕するか？



東京工業大学 理学院 化学系
教授 **腰原 伸也**
koshihara.s.aa@m.titech.ac.jp

令和6年7月24日（水）大田区産業プラザ 1/49

今日の主題： 物質の素早い変身が、今日の世界を支えている

(でもこれに人類が気がついてまだ30年、化学、物理、工学、数学、一体となった進歩が、)
**皆さんの取り組む研究(勉強)と、他分野との関係、位置付けがどうなのか、
という答えのない問題に、異なる(大きな)視点から
皆(先生ではない!)で考えるのが大学の特徴。**

自己紹介 中高一貫校での化学の実験授業と通学時間で読んだ「生命の起源と生化学」「量子化学入門」「自然界における右と左」で、生化学→酵素の作用機構理解のための量子化学→量子力学へと興味に移る

↓	腰原 伸也 1960年 東京 武蔵野市生まれ 1986 東京大学 理(博士)中退 生物物理化学、ピコ秒レーザー開発 1986-1991 同 助手 1991 学位(同 博士) 固体物理学 1991-1993 理化学研究所 博士研究員 光工学 1993-2000 東工大 応用物理 助教授 応用物理学 2000-2016 東工大 物質科学 教授 理と工の融合科学(理工学研究科) 2016- 東工大 化学 教授 化学 2003-2004 KEK教授兼務 加速器科学(物理学)
---	---

一貫して、「光で物質(特に相転移)を操ろう」という物質科学の夢に邁進

2/49

本日の内容

- 1: イントロ: 「見る」って何だろう？
- 2: 物質の変身を使うことがどれだけ日常に入り込んでいるのか？
- 3: 物質の変身技を見たい！
でもどうやって？
物理、化学、数学、レーザー工学、
皆協力しての苦闘
- 4: どこまで物質の変身技の実況中継は
できるようになったのか？
- 5: まとめ

今回企画いただいた皆様方に心より
お礼申し上げます。

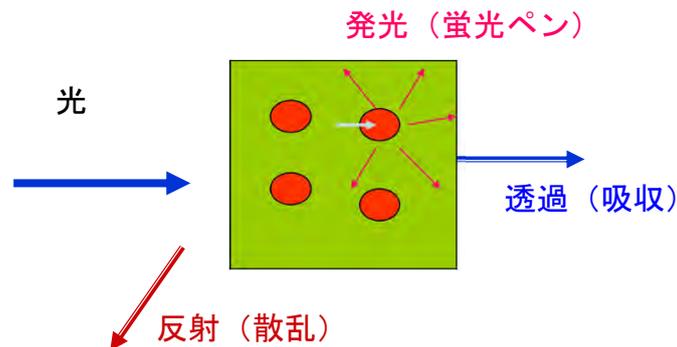
本研究は多くの共同研究者、とりわけ若い学生、博士研究員の皆さんとの協力の成果です

3/49

1: 「見る」ってなに？

まずは、見えるって何だろう？

「見える」3大過程

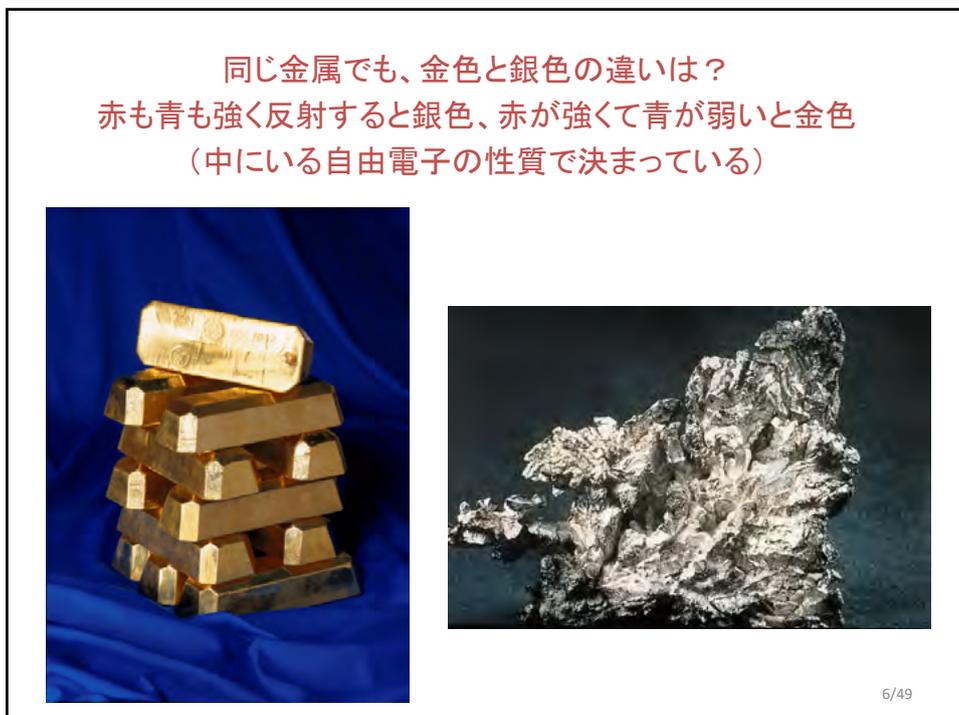


残り物(補色)には福がある？

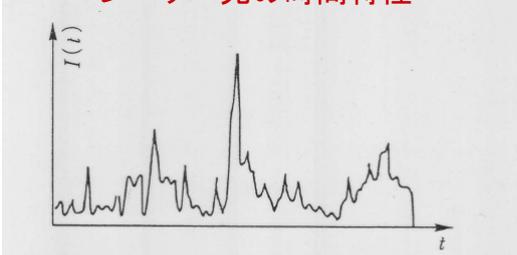
ファッションは補色の組み合わせ

吸収と発光、散乱が日焼け止め、美白化粧品

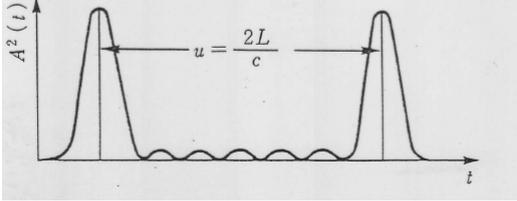
4/49



レーザー光の時間特性



通常のままだと

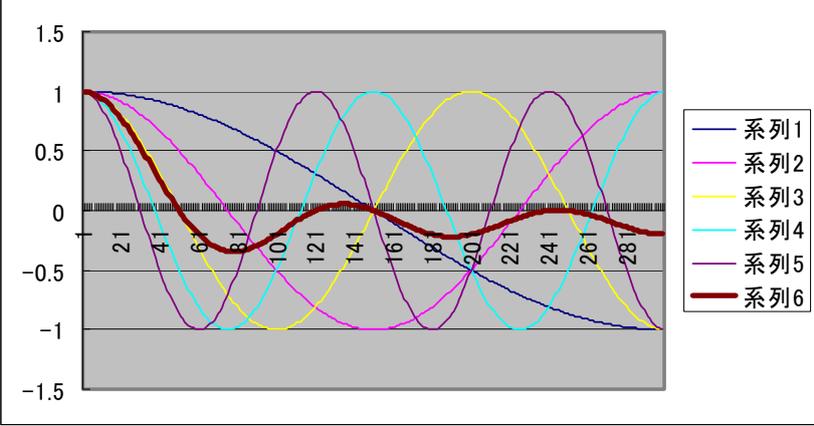


ある操作をすると
短いパルスに！
100兆分の1秒の
パルスまで作れる。
(限界 $\Delta t \cdot \Delta E \sim h/2\pi$)

11/49

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nat + b_n \sin nat)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos nat dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin nat dt$$

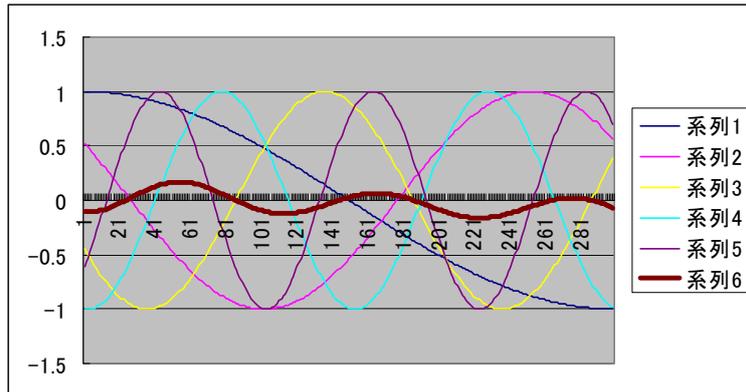


位相を乱して加えると??

12/49

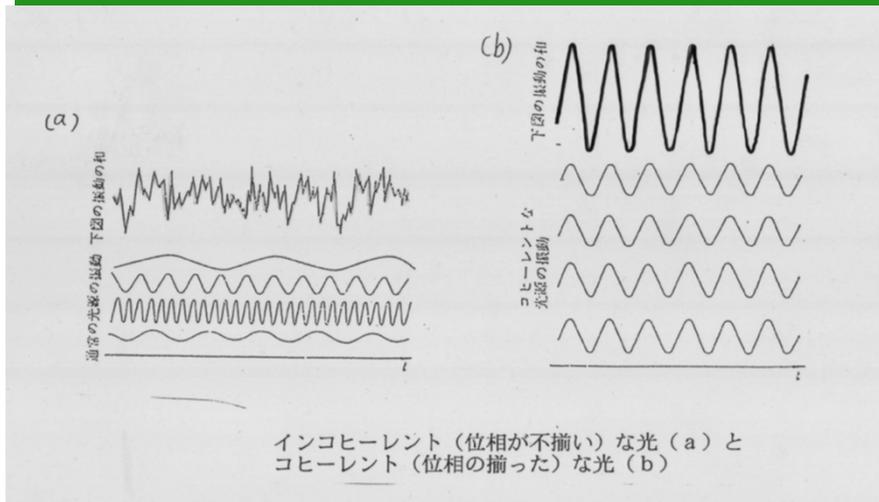
位相を乱して加えると??

短くするには位相をそろえて足すことが必要



13/49

1:「見る」ってなに? 位相を揃えると短いパルスが作れる(フラッシュ撮影で早業のスローモーション映画が見れる!)



インコヒーレント (位相が揃っていない) な光 (a) と
コヒーレント (位相の揃った) な光 (b)

14/49

2:物質の変身、実はあちこちで顔を出しています、

超高速コンピューターシステム

M-I (Semicon.) Circuit

光通信

磁気メモリー (ハードディスク)

光メモリー (光ディスク)

誘電体 (USB)メモリー

生命機能分子

人工光合成 (光エネルギー変換)

15/49

**光エネルギー・信号の超高速制御、高効率利用は
今や日本のみならず世界の必須の課題**

2025: 10GB/person/Day

2050: 0.21T kWh/year

2025: 0.15T kWh/year

2013: 100MB/person/Day

2010: 0.08T kWh/year

日本の総電力消費量 (TWh/年)

年	2010	2025	2050
総消費量	0.08	0.15	0.21
GJT (2005-2010)	0.03	0.04	0.05
GJT (2010-2050)	0.05	0.11	0.16
技術革新	0.00	0.00	0.00

Total electric power consumption in Japan: 0.9-1.0 T kWh/year (2013)

JST 低炭素社会戦略センター 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1 2018)
 推定情報通信関連機器 0.33 T kWh/year (2005), 0.49 (2025), 0.55(2050)
 データセンター分 (Vol.2 2021) 0.09(2030) ,1.2(2050):

16/49

2:物質の変身、超高速で起きると常識とかけ離れたことが、**、**。

超高速レーザー技術の発展のもたらしたもの
 温度（原子位置の揺らぎ）が定義不能な時空間スケールが身近に！

10兆分の1秒超微細加工

マッチの先端



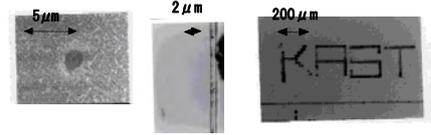
100fsパルスレーザー励起



連続発振レーザー励起

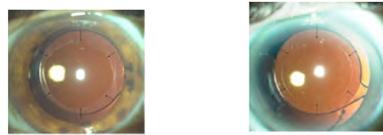
透明・高硬度・生命系超精密加工例

サファイア結晶 ダイヤモンド結晶板



fsパルスを用いた白内障手術

従来術式 新術式



眼内レンズが事前に設定された位置からずれて固定されている。

眼内レンズが事前に設定された位置に正確に固定されている。

M.Takesada and S.Koshihara *Look Japan* April 2001

東京慈恵会医科大学附属病院 眼科 HP http://jikei-eye.com/for_patient/docs/flacs.pdf 17/49

物質たちが、ささっと(若干姑息か?)何やっているのか、見たい！(20世紀の科学の夢)

物質はどう出来上がっているのか？

化学結合(ばね)が原動力

無極性分子

水素H₂ 直線形

窒素N₂ 直線形

二酸化炭素CO₂ 直線形

メタンCH₄ 正四面体形

極性分子

水H₂O 折れ線形

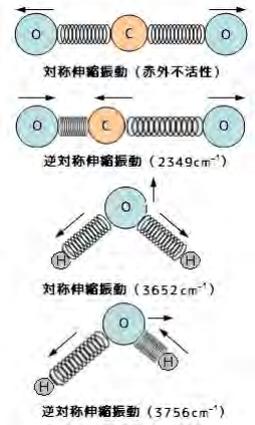
塩化水素HCl 直線形

アンモニアNH₃ 三角錐形

化学結合は「不動」ではない

揺らぎ、動いて働いている(1兆~100兆分の1秒のスケール)

止まると寝ている？熱って？



対称伸縮振動 (赤外不活性)

逆対称伸縮振動 (2349cm⁻¹)

対称伸縮振動 (3652cm⁻¹)

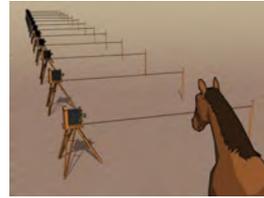
逆対称伸縮振動 (3756cm⁻¹)

18/49

3:物質の変身技を見たい!でもどうやって?

それも10~1000兆分の1秒で、..

1872年スタンフォードは仲間と賭けを(よいこの皆さんはまねしないでね)



マイブリッジは、苦心の末、ストロボ映画撮影法に到達

スタンフォードは、写真家のマイブリッジに相談

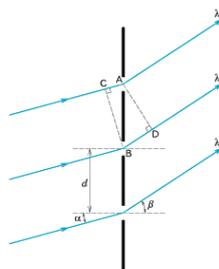


スローモーション(ストップモーション)撮影技法の始まり

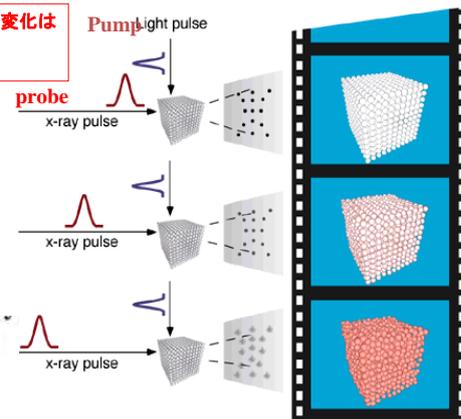
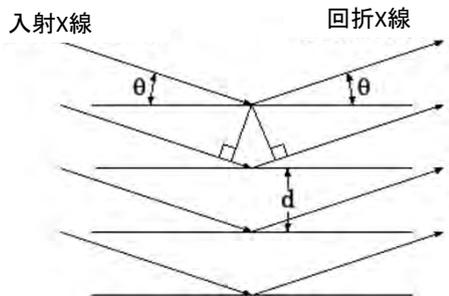
19/49

3:分子の変身の実況中継には、見るためのフラッシュ(X線や電子線)を短い時間幅のパルスにすればできる!

原子分子サイズの形の変化は直接は見れないので、回折など工夫



光(X線)や電子線の回折、干渉で原子間隔が見える



結晶構造のストロボ撮影(パラパラ漫画)

'Watching matter rearrange'
K. Nelson Science (1999)

分子動画

20/49

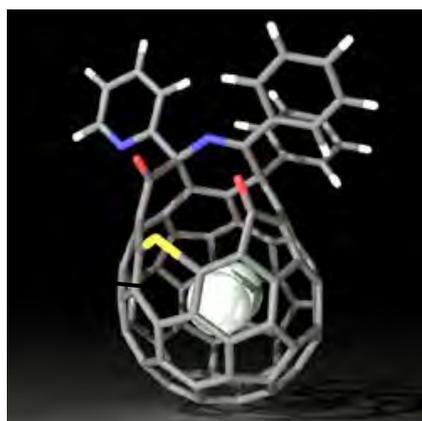
X-ran really probes only backbone ?



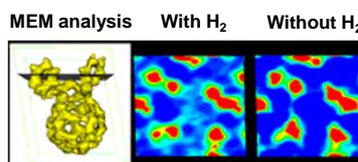
—Cartoon from *Life*, February, 1896. *The New Roentgen Photography.*
 "Look Pleasant, Please."

21/49

Electron density analysis based on SR



Sample preparation



Floating Single Hydrogen Molecule in an Open-Cage Fullerene
 (Sawa et al. (2005) *Angew. Chem. Int. Ed.*)

H₂ molecule in Fullerene can be observed

22/49

どうやって1兆分の1秒、それ以下クラスのストロボパルスのX線撮影を可能にするか？
加速器研究者との共同作業

シンクロトロンの中の電子は実は塊に
このため放射光もパルスに



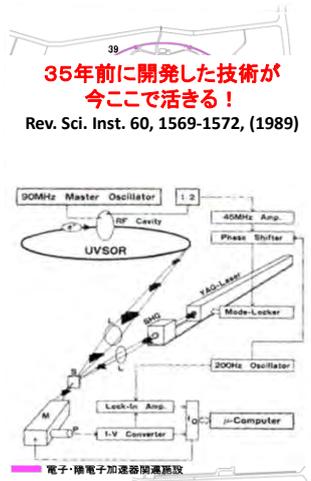
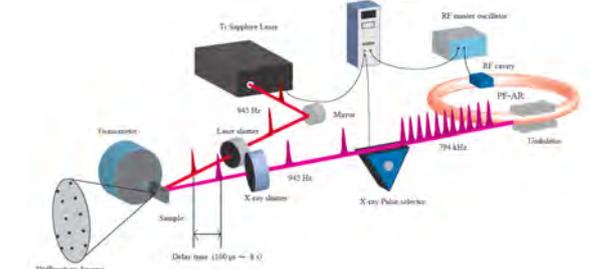
Property of ISK, (2005)

<http://www.isa.au.dk/animations/animations.asp>

23/49

分子・原子構造の100億分の1秒コマ撮り撮影装置 (PF-AR NW14A)

35年前に開発した技術が
 今ここで活躍！
 Rev. Sci. Inst. 60, 1569-1572, (1989)



電子・陽電子加速器関連施設

Nozawa et al. (2007) J. Synchrotron Rad. 14, 313.

24/49

4:どこまで変身技が見れるようになったか?

酸素貯蔵たんぱく質・ミオグロビン
 (どうやってガス分子を出し入れ(呼吸)するのか50年謎)
 (ミオグロビン密室殺人事件)

元は一本の長い分子

- 筋肉中での酸素貯蔵を担う
- 分子量 ~ 17,000
- アミノ酸153 個から成る
- 1つのヘムを持つ
- O₂の他にも CO や NO などの分子を結合可能

鉄原子

ヘム ポルフィリン環

筋細胞

血液とO₂,COなどのやり取り、貯蔵

25/49

CO migration process at 120 K

Xe1 site				
Xe2 site				
Xe3 site				
Xe4 site				

Xe4 site

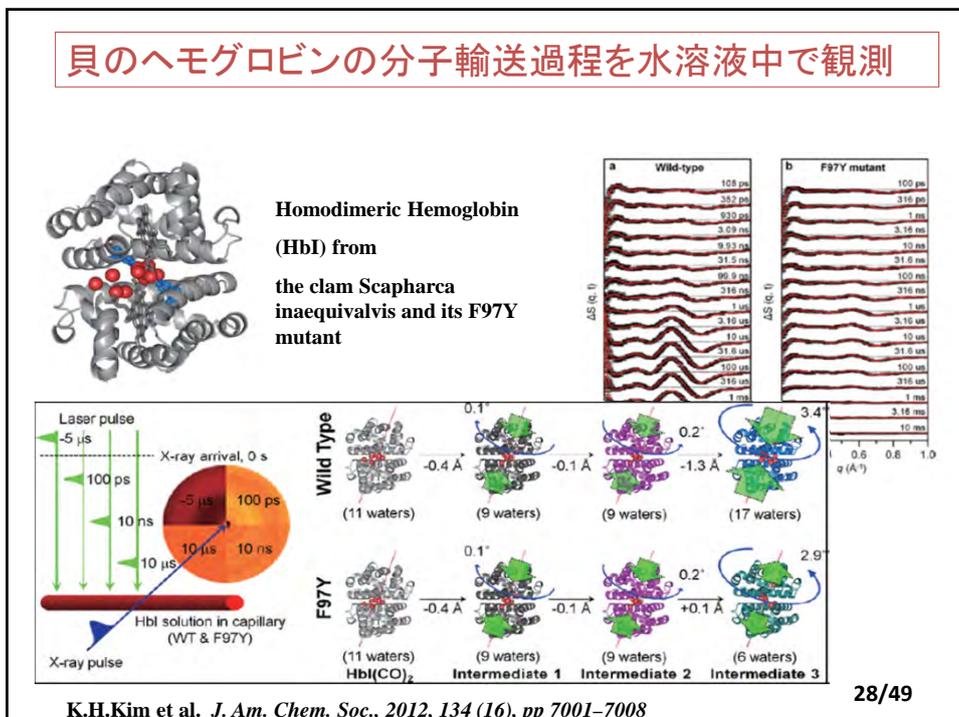
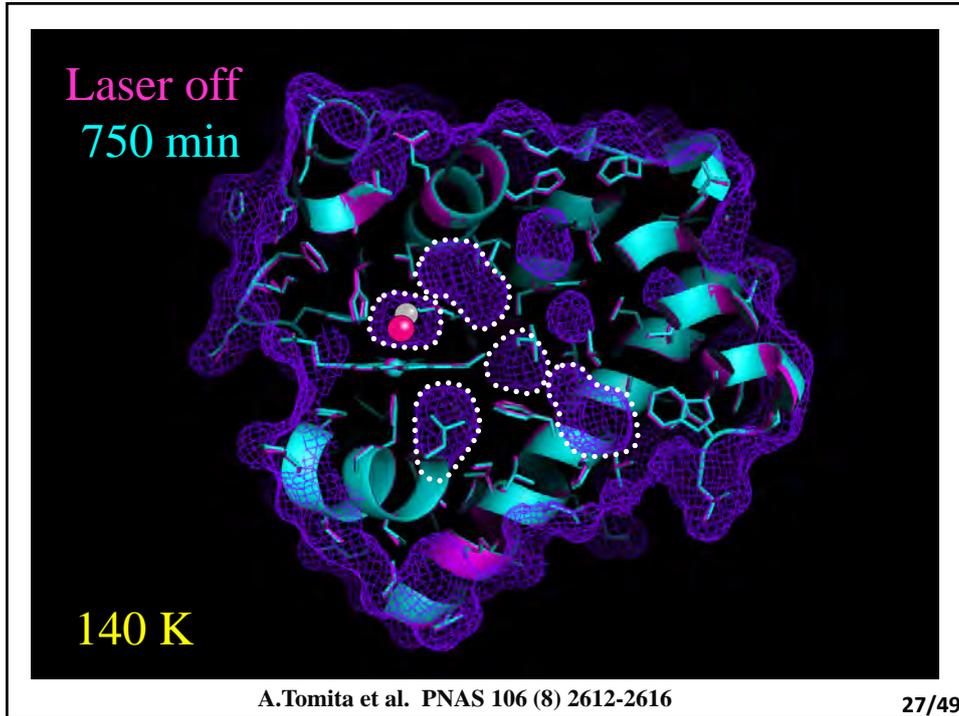
Xe2 site

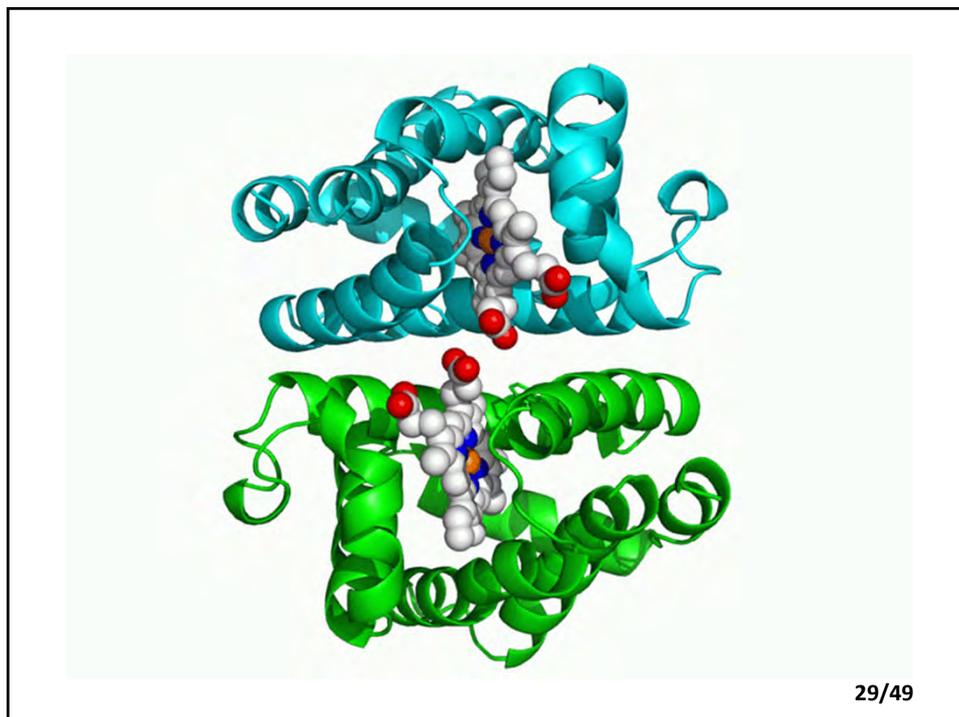
Xe1 site

Xe3 site

0.3 electron / Å³

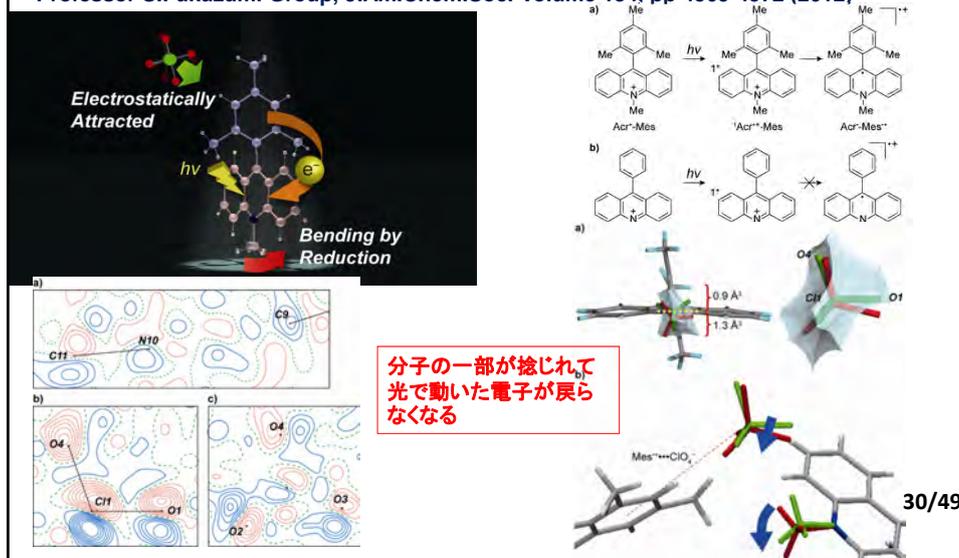
26/49

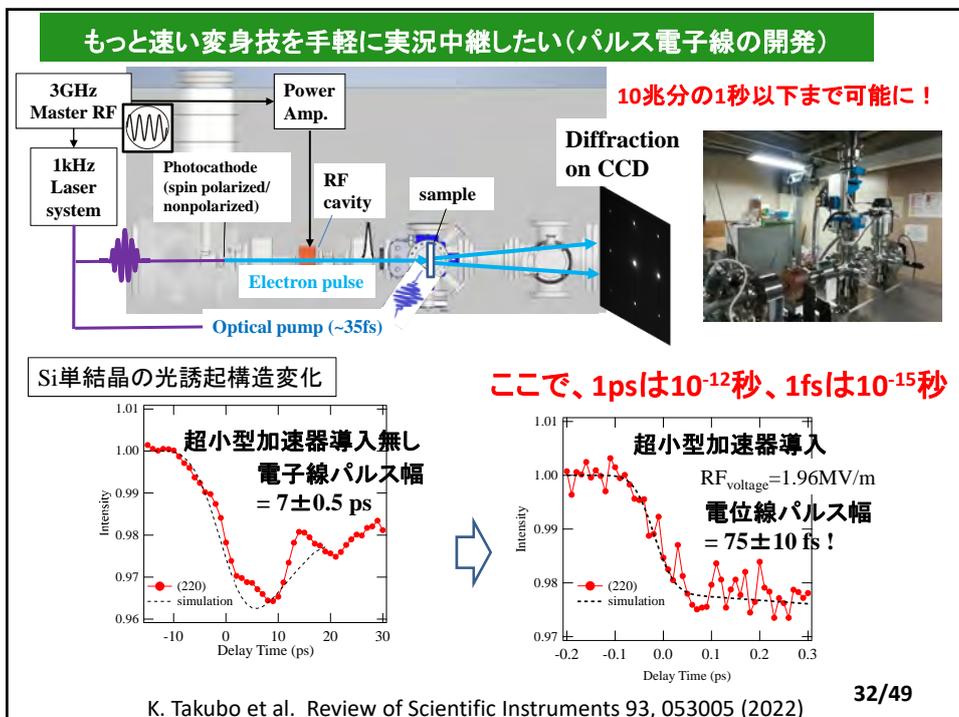
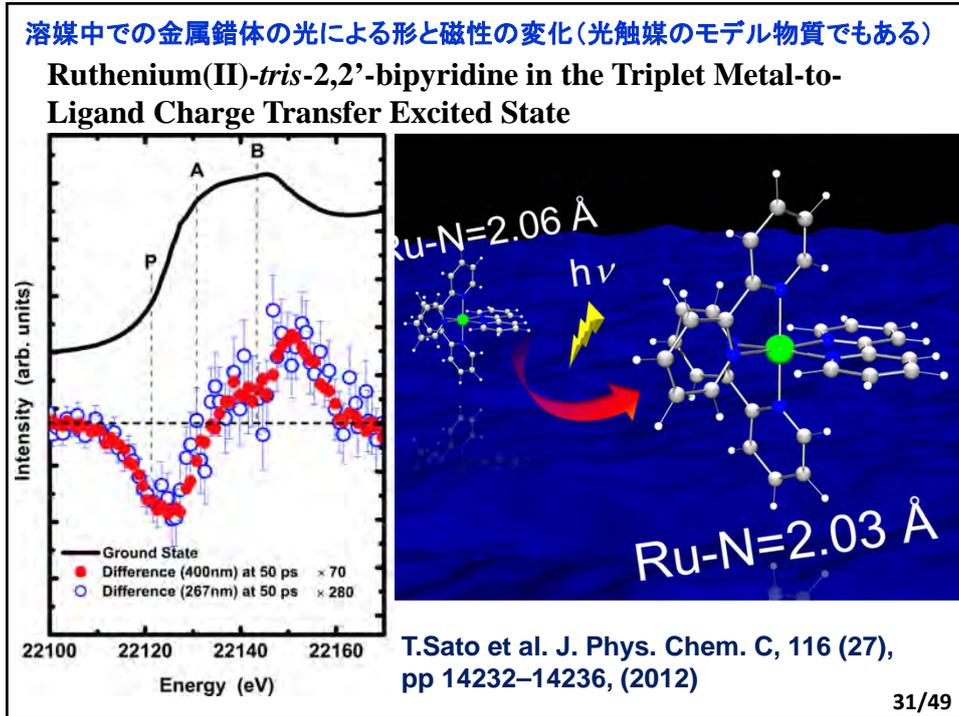




有機の人工光合成系で、光エネルギー変換中に
分子はどのような格好で働いているのか

NW14 Collaboration with M.Hoshino (my Group), Professor H.Uekusa and
Professor S.Fukuzumi Group, J.Am.Chem.Soc. Volume 134, pp 4569-4572 (2012)



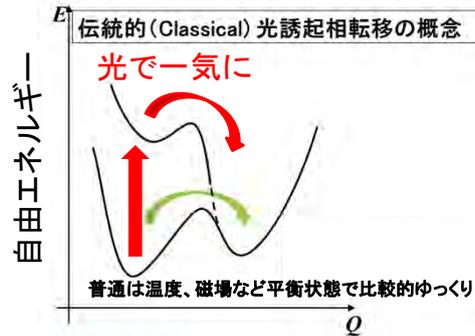
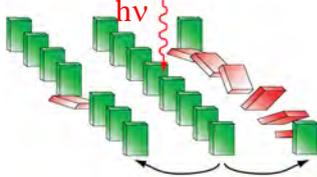


**研究目的・動機:ドミノ効果(相転移、協同現象)を光で操る
(1987年に開始当初は \oplus 扱い)**

対象は観測装置の発展で拡大: 固体、化学反応、生命分子….



協同現象の発生を介して、物質操作を
光で超高速かつ高効率に



- ・ 光エネルギーの高効率利用
- ・ コンデンサー、磁石、光学特性、生命機能など多彩な制御
- ・ 光スイッチデバイス、光エネルギー変換、メモリー、液相配向など多くの利用分野
- ・ 物質によっては100兆分の1秒以下超高速制御

33/49

超高速光誘起相転移の登場 (新観測手法への渴望)

TTF-CAの中性-イオン性相転移(電子強誘電とその特徴)

バターと塩が入れ替わる????

(a) Conventional ferroelectrics

(b) TTF-CA

(c) Chemical structures of TTF and CA. X=Cl: CA, X=Br: QBrCl₃.

(d)

アクセプター (A) 分子の最低空軌道 (LUMO)

ドナー (D) 分子の最高被占分子軌道 (HOMO)

中性相(ファンデルワールス結晶:バター)

イオン性相(強誘電:塩)

二量体化至あり

K.Kobayashi et al. PRL 108, 237601 (2012)

34/49

**目で見る協同的電荷移動
分子結晶とイオン結晶が入れ替わる？**

光でN相、I相間で
可逆スイッチは可能か？

D⁰A⁰D⁰A⁰D⁰A⁰D⁰

D⁰A⁰D⁰A⁰D⁰A⁰D⁰

D⁺A⁻D⁺A⁻D⁺A⁻D⁺

D⁺A⁻D⁺A⁻D⁺A⁻D⁺

35/49

電子密度分布の詳細な解析 (TTF-CA)

35 K : イオン性相

150 K : 中性相

R = 5.7%

WR = 5.5%

R = 5.8%

WR = 3.7%

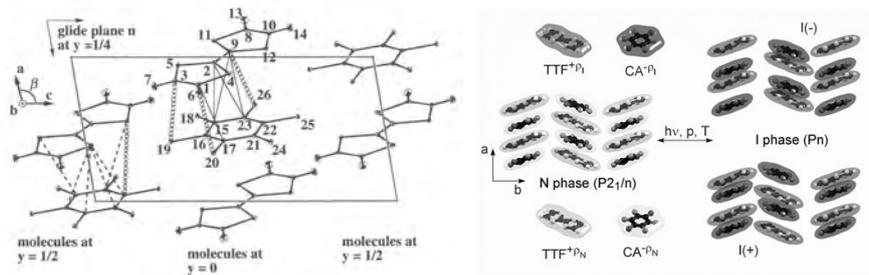
36/49

光で分子結晶とイオン結晶を入れ替えよう

バターと塩がfsで入れ替わる??

(中性(Neutral)-イオン性(Ionic)転移)

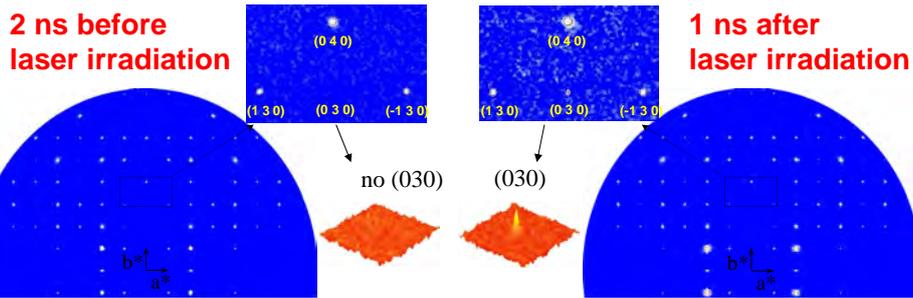
- ドナー (TTF) とアクセプター (CA) が交互に積層
- 高温 (>82K) で中性 (分子性結晶)、低温でイオン性 (イオン性結晶)



37/49

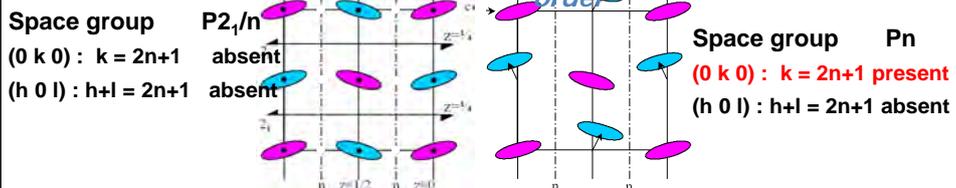
光誘起強誘電体の登場 (レンヌ大との共同研究、ESRFのパルスX線での研究)

Complete data collection : scattered intensity in the reciprocal space.



Neutral phase

Photo-induced ferroelectric order

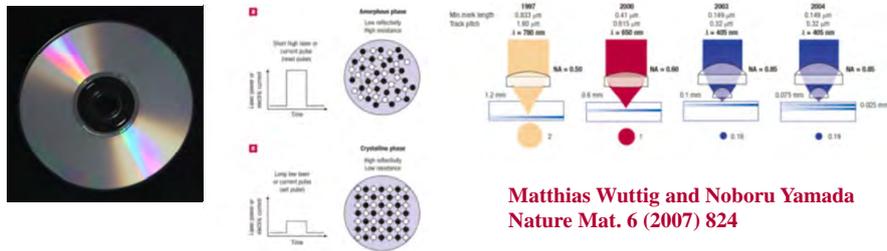


Science 300, 612 (2003)

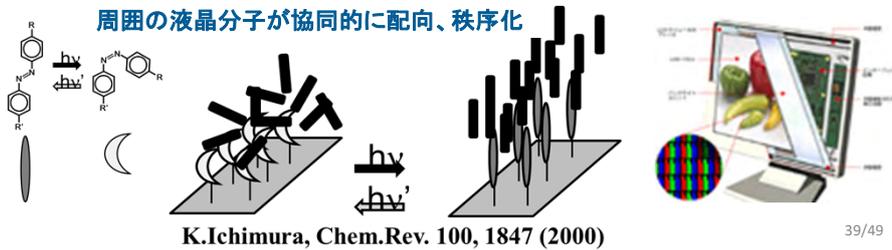
38/49

光ドミノ効果(光誘起相転移)の応用例

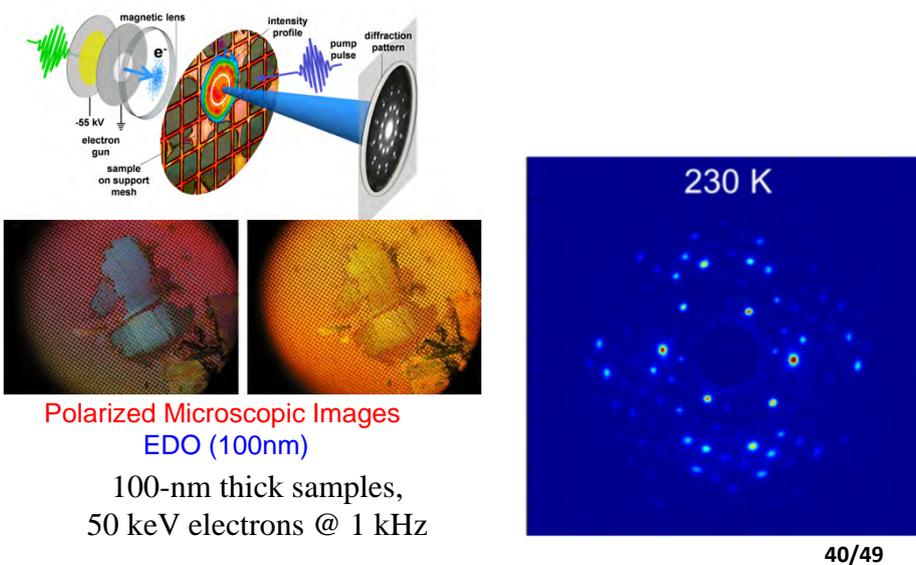
光相変化メモリ(光ディスク)(GST: Ge-Sb-Te)

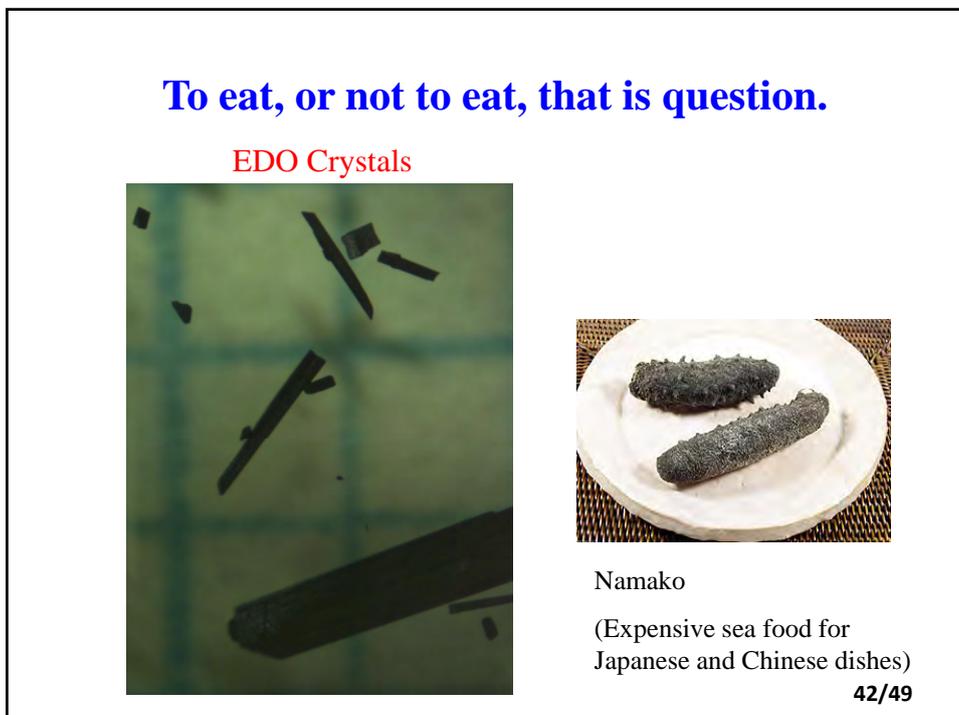
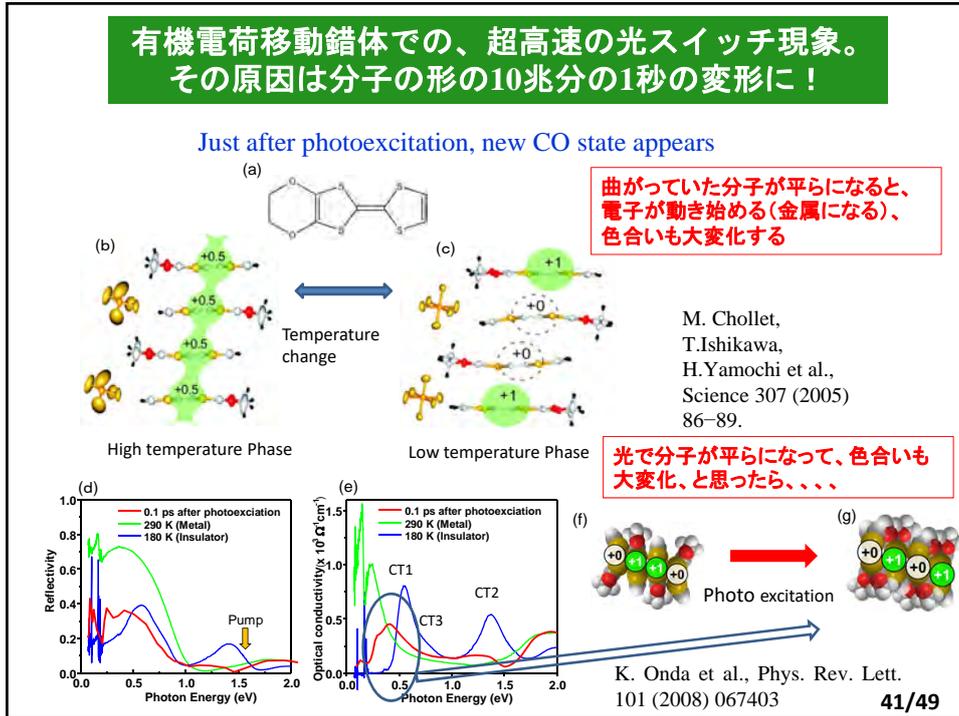


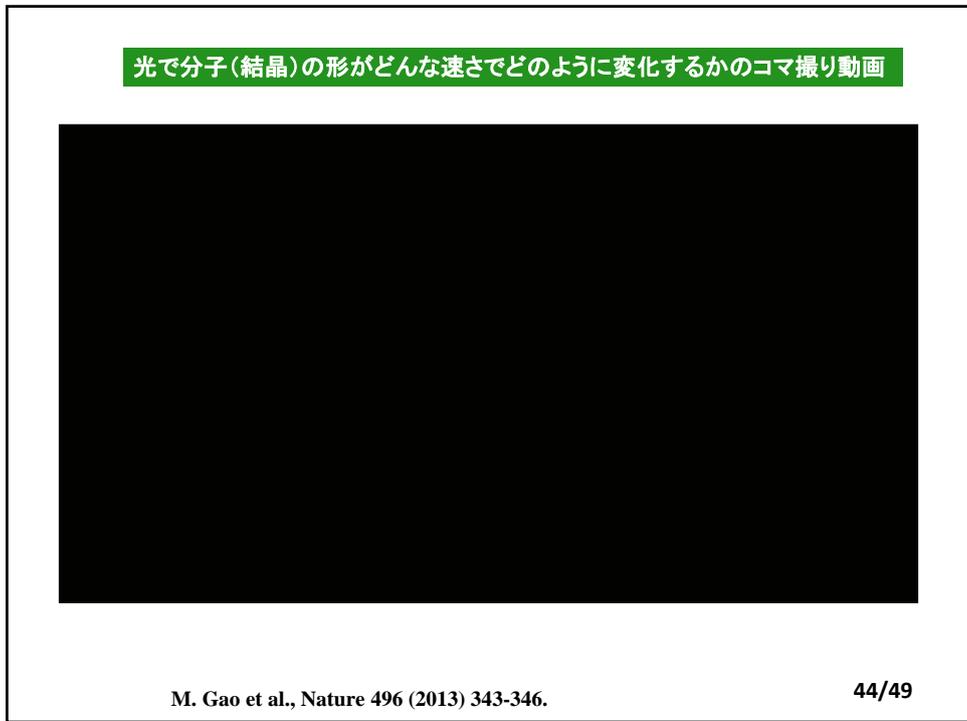
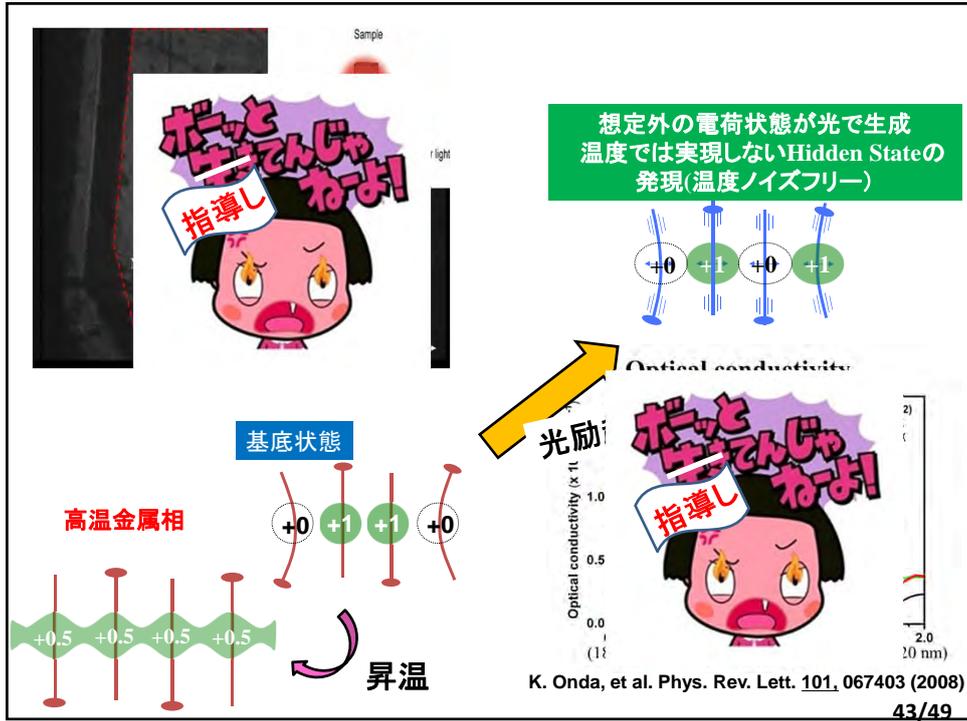
協同相互作用を用いた液晶構造相転移の光制御(コマンドサーフェス) 配向プロセスの光制御(偏光フィルターの製造プロセスで活躍中)



1兆分の1秒以下のコマ撮りを目指して レーザーを使った電子線回折技術(レーザー、電子顕微鏡との協働作業)







5: まとめ

世界の科学が、明日の人類のために必要としているもの。

1: 物質で柔道をやろう(小よく大を制す)

共同現象の面白さ、エネルギーの高効率変換、運搬にも不可欠

2: どれだけ素早く物質が変身するのか

いかに分子の形を素早く制御できるか？



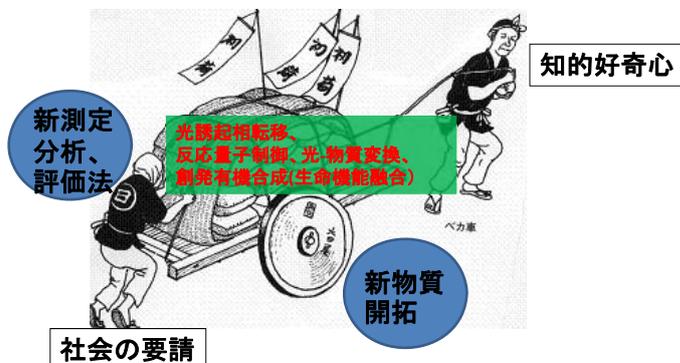
化学や物理、数学、地学、地球物理、材料、プロセス、理学、工学といった分野の既存分類は、教科書を書いたり読んで勉強するには便利な存在。

でも今や最先端の世界は渾然一体

45/49

腰原が考える基礎科学の現状

- (1) 人類の知的好奇心が生んだ2つの両輪：
「観測・物質評価新技術の創成」と「新物質の創成」という
両輪による分野の横断的協力と新分野創発
- (2) 人類の知的好奇心が牽引し、社会からの要請が後押し
(お尻を叩く?)する世界をリードする「知的初荷」の創発



46/49

霧の中のスキーは大変だが、突然、様々な分野を含めた眺めが見える瞬間が、時々やってくる。その時の爽快さは、。
明日の世界の科学に必要な、観測装置とそれに基づく物質設計方針を生み出すことは、意外とすぐ脇にある。

ご清聴ありがとうございました



こうした大きな発想の転換、
パラダイムシフトはもちろん様々な
困難に直面することが常 49/49