

CASE 1

地震の始まり方と 大きさからわかること

地震の揺れは突然始まり、大地震だと数秒から数分も続く。

でもその揺れ始めの最初、たとえば 0.1 秒間の揺れはとても小さく人間は気づかない。

揺れは地下の岩盤の破壊によって生まれた地震波が、岩盤を伝わって地表に届いたものである。

もし地下での破壊がたった 0.1 秒で終わったなら、

われわれは地震が起こったことすら気付かない。

しかし高感度地震観測網はその揺れをキャッチし、

震源を特定し、地震がマグニチュード (M)3 より小さいと判定する。

地下での破壊が 10 秒以上続いたら M7 の大地震、

数分続いたら M9 の超巨大地震でたいへんなことになる。

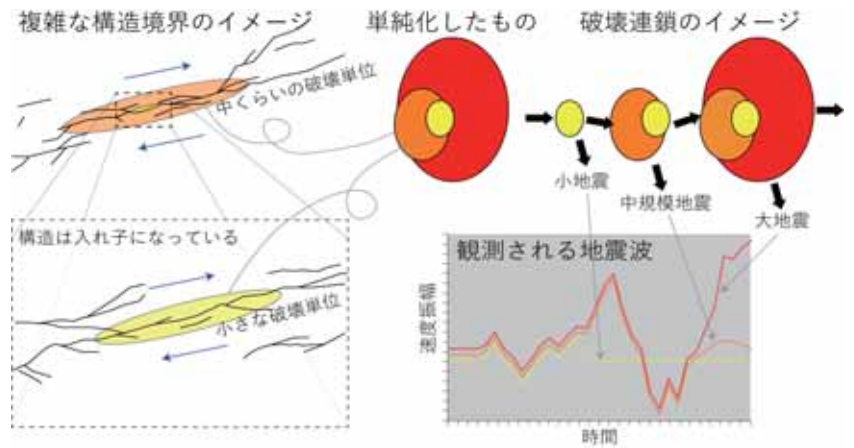
では地下での破壊が始まった瞬間、もしくは地上で

その最初の 0.1 秒の地震波をキャッチした瞬間に、

その地震が M3 なのか

M7 なのか M9 なのか、

わかるのだろうか？



図：今回の観察事実が示唆する地震発生プロセスのイメージ

この問題は地震の予測可能性にとって重要な問題であり、多くの研究者によって何十年も議論されてきた。2019年9月に*Nature*誌に掲載された論文 (Ide, 2019) は、この問題に対しひとつの明快な解答を与えた。少なくとも通常の地震波の分析では、地震の始まり方から最終サイズはわからない。なぜなら最初の約 0.1 秒の地震波が同じなのに、中規模で終わる地震も大地震になる場合もあることが分かったからである。具体的には、過去 15 年に東北沖で発生した約 2 千回の比較的大きな地震の中に、より小さな地震と同じような最初の地震波をもつペアが多数発見された。わからない、というのは一見残念な結果である。しかし、始まり方が同じという事実は地震の発生メカニズムについて、もうひとつの重要な示唆を与える。

今回発見されたペアには、2011 年の東日本大震災時のようにプレート境界で発生する地震が多く含まれる。プレート境界で発生する地震の中には、ほぼ同じところで何か月または何年か一度、同じようになりかえす地震があることが、以前から知られていた。プレート境界というのは 2 つのプレートがすれ違う境界面だが、もちろん数学的な平面ではない。長い年月をかけてできあがった凸凹や亀裂が多数存在する複雑な構造境界である。複雑な境界の中にも比較的単純な部分があり、その部分は壊れるときには一度に壊れ、そこを境に 2 つのプレートがすれ違う。いつも同じ場所が壊れるなら同じ大きさの地震が起こる。地震の始まり方どころか、すべて同じ

である。そして実際にこのようになりかえし地震は高い確率で予測可能である。

今回の発見はこの観察をより一般化する。プレート境界の複雑な構造には、さまざまな大きさのものがああり、多くは入れ子状になっている (図)。すると最初に小さな構造が壊れた後で、さらに連鎖反動的に大規模な構造が破壊することもありえる。それが今回観察されたペアのうち大きいほうの地震に相当する。この連鎖反応はいつも起きるとは限らないので、小さい地震で終わることも多い。連鎖反応がめったに起こらないなら、いつも同じ予測しやすいくりかえし地震である。今回の成果は、観測の蓄積によって、プレート境界の構造で支配された地震の起こり方を絞り込めることを示唆する。まだまだ正確な確率予測のためのハードルは高い。しかし地震は全く予測不能な現象ではない。正しい理解によって予測能力を向上させることが地震研究の重要な目標である。

本研究成果は、S. Ide, *Nature* 573, 112 (2019) に掲載された。

(2019年9月5日プレスリリース)

CASE 2

重力波と暗黒物質の二毛作 レーザー干渉計で

数々の宇宙観測によって、われわれの宇宙は暗黒物質で満たされていることがわかっているが、その正体は全くわかっていない。暗黒物質の候補として、近年これまで以上に注目されているのが、アクシオンとよばれる粒子である。われわれはアクシオンと光のわずかな相互作用によって生じる光の偏光面回転を、レーザー干渉計を用いて測定することで、アクシオンを探索する新手法を提案した。この手法をLIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)やKAGRA(Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)のようなレーザー干渉計型重力波望遠鏡に適用すると、重力波観測と同時に、かつてない精度でのアクシオン暗黒物質探索が可能となる。

暗黒物質とは、質量をもち重力の源となるが、重力以外の相互作用をほとんどせず、光を出さない物質である。その存在は、銀河の回転速度の観測や重力レンズの観測などから強く示唆されてきた。近年では宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測から、宇宙の全エネルギーのうち通常の物質(バリオン)、暗黒物質、ダークエネルギーが占める割合が測定されており、それぞれ約5%、27%、68%と報告されている。この観測結果は宇宙の標準モデルと驚くべき精度で一致しており、現在は精密宇宙論の時代とも言われている。

いっぽうで、暗黒物質の正体は全くわかっていない。とくにWIMP(Weakly Interacting Massive Particles)とよばれるわずかな相互作用をする重い粒子や原始ブラックホールなどは暗黒物質の有力な候補と考えられており、大規模な観測や実験で精力的に探索が行われてきたが、いまだ検出に至っていない。そこで近年、改めて高い注目を集めているのがアクシオンとよばれる軽い粒子である。アクシオンは元々は量子色力学における強いCP問題を解決するために提案された仮説上の粒子であるが、ひも理論のような高次元理論もさまざまなアクシオンに似た粒子を预言する。

アクシオンには、光とわずかに相互作用して直線偏光をもつ光の偏光面を周期的に回転させるという性質がある。われわれはこの性質に着目し、レーザー干渉計を用いて偏光測定をすることで、アクシオン暗黒物質を探索する新手法を提案した。われわれの手法では、2枚の正対する合わせ鏡で構成したファブリ・ペロー干渉計を用いる(図上)。ファブリ・ペロー干渉計では、干渉計内をレーザー光が何回も往復するが、往復にかかる時間と偏光面の回転周期が一致すると、偏光面回転の大きさを増幅することができ、高い精度での探索をすることが可能となる。

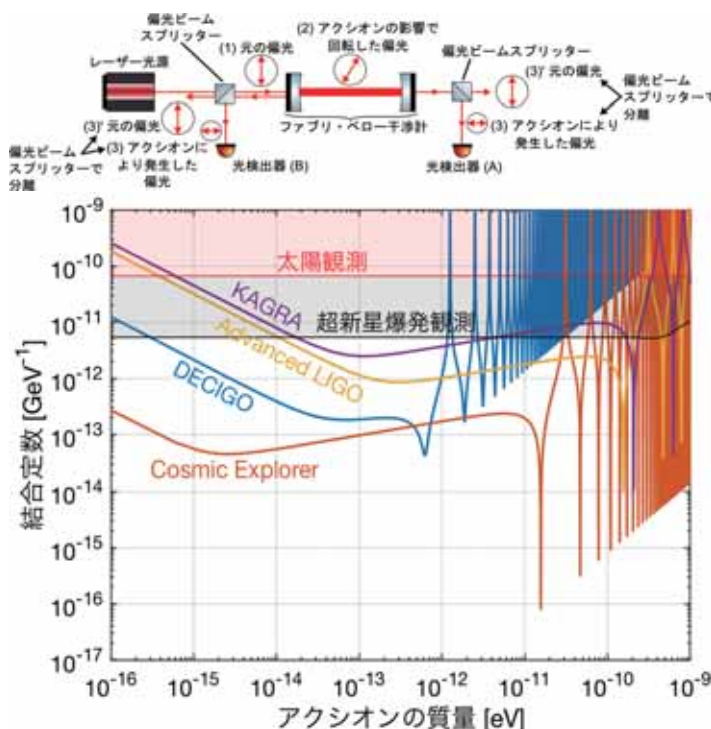
この手法には従来のアクシオン探索に用いられてきた強磁場発生装置が必要ないため、さまざまなレーザー干渉計に適用可能である。たとえば、アメリカにあるAdvanced LIGOや日本にあるKAGRAのような重力波望遠鏡は、それぞれ片腕の長さが4km、3kmの大型のレーザー干渉計であり、われわれの手法を適用するとこれまでの探索精度にくらべて約10倍高い精度でアクシオン暗黒物質を探索することが可能となる(図下)。また、Cosmic ExplorerやDECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)のような将来の重力波望遠鏡計画では1000倍以上の精度向上が期待されることを示した。

われわれの手法は、光検出部に偏光測定用の装置をつけるだけで適用可能である。重力波は光の位相を、アクシオンは光の偏光面を回転させるため、それぞれを分離して検出することで重力波の観測と同時にアクシオン探索をすることができる。重力波望遠鏡から、暗黒物質の初検出が報告される日が来るかもしれない。

本研究成果は、K.Nagano *et al.*, *Physical Review Letters* 123, 111301 (2019) に掲載された。

(2019年9月11日プレスリリース)

図: ファブリ・ペロー干渉計で増幅された偏光面回転を検出することでアクシオン探索を行う手法を提案した(上)。重力波望遠鏡に本手法を適用すると、太陽観測や超新星爆発観測などを超える高い精度でアクシオン探索が可能となる(下)。縦軸はアクシオンと光の相互作用の大きさであり、より小さな結合定数を探索することができるほど、より高精度な探索となる。



CASE 3

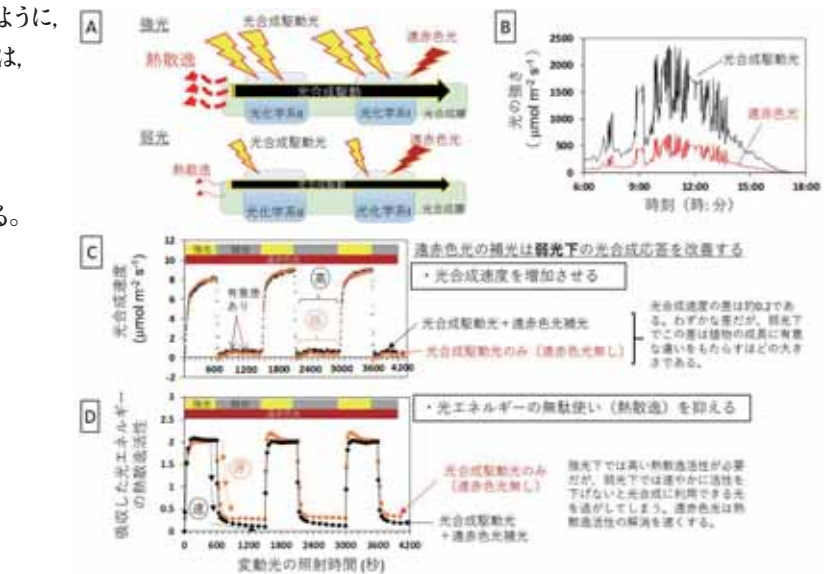
光合成を助ける 光合成を駆動しない光が

太陽光のさまざまな波長のうち、植物は青～赤色域の光を光合成に利用している。これに加えて、単独では光合成を駆動することはできない遠赤色光が、光合成を手助けしていることがわかった。なぜ、光合成を手助けする必要があるのか？それは、野外の光環境が、植物にとってわれわれが想像する以上に過酷だからである。交通渋滞を防ぐためにさまざまなインフラが整備されるように、光合成を手助けする遠赤色光は、光合成過程において光エネルギーや電子の渋滞緩和のための交通整理の役割を果たしている。

陸上植物は波長 400–700 nm の青色から赤色の領域の光、つまり可視光（光合成駆動光）を吸収して光合成を行う。光合成は、可視光によって、2つの光化学系（II と I）が励起されることで進行する。いっぽう、人の目には見えないとされる遠赤色光（700–800 nm）のうち短波長の光は、光化学系 II は駆動できないが、光化学系 I を駆動することができる（図 A）。遠赤色光単独ではほとんど光合成を駆動できないため、光合成における遠赤色光の役割は長年無視されてきた。

太陽光は遠赤色光を豊富に含む。さらに、自然界の光環境は、雲による遮蔽や上部に存在する植生によって、頻繁かつダイナミックにその強度と質（波長特性）が変化する変動光環境である（図 B）。

変動光に対して、植物はどんな応答をするのか。日陰の状態、つまり弱光下におかれた葉が、突然強い光に曝されることがある。植物にとって光合成量を稼ぐ絶好の機会であるとともに、強すぎる光によって実は自身が傷つく可能性もある。そうならないように、植物は吸収した光エネルギーのうち、光合成に利用できない分は積極的に熱に変換して捨てている（熱散逸という：図 A）。いっぽうで、強光（日向）から再び弱光（日陰）に曝されたときは、速やかに熱散逸の多い状態を解消しないと、光合成に利用できる光を熱として逃がしてしまうことになる。すなわち、強光に対する熱散逸の誘導と弱光下の解消が両方とも速やかであることが、植物の光合成生産性を上昇させる。



われわれは、変動光中に遠赤色光が存在することで、効果的な熱散逸によって光化学系が保護されることを先行研究で示していた。さらに今回は、光合成駆動光が強光から弱光に切り替わったときに、遠赤色光が存在することで熱散逸の解消が遠赤色光の非存在時よりも促進されることが分かった（図 C）。熱散逸の解消が速くなった結果、変動光弱光中の光合成速度は遠赤色光存在下で有意に高くなった（図 D）。単独では光合成を駆動しない遠赤色光は、光合成の調節に深く関わっており、光エネルギーや電子の渋滞緩和のための交通整理の役割を果たしているのである。

本研究成果は、植物の光合成応答の真の姿を理解するためには、遠赤色光を考慮することが必須であることを意味している。現在、遠赤色光による光合成促進機構の徹底解明を進めている。本研究成果と光合成促進機構の解明は、将来の食糧不足問題解決に向けた光合成能強化作物の創出へ貢献することが期待される。

本研究成果は、M.Kono *et al.*, *Plant & Cell Physiology*, **pcz191** (2020) に掲載された。

(2019年10月16日プレスリリース)

図：(A) 光合成駆動光と遠赤色光が光合成反応に与える影響を示した模式図。光合成駆動光は光化学系 II と光化学系 I を両方励起することによって光合成を駆動する。いっぽう、遠赤色光は光化学系 I のみを励起する。強光下、強すぎる光エネルギーの一部は、熱に変換されて安全に散逸される。いっぽう、弱光下では、吸収した光エネルギーのほとんどが光合成に利用される。(B) 晴れた日の野外の光強度の日変化。(C と D) 変動光中の光合成応答を遠赤色光の補光あり（黒色）と補光なし（オレンジ）と比較した。変動光中に遠赤色光が存在すると、強光から弱光に切り替わったときの光合成速度が高い (C)。これは、強光中に活性化していた熱散逸能が、遠赤色光によって速やかに解消されたためである (D)。