

多種多様な RI ビームのスピンを操作する新手法を開発

ー2 段階の RI 生成反応であらゆる RI ビームに対してのスピン操作と大強度化を実現ー
本研究成果のポイント

- あらゆる RI ビームのスピンの向きを整列させることが可能に
- 従来の手法に比べて有効なスピン操作の測定効率が 50 倍以上に拡大
- 新たな基礎物理学の発見や物質科学の応用に期待

理化学研究所（野依良治理事長）と東京工業大学（三島良直学長）は、あらゆる種類の放射性同位元素（RI）※¹ ビームのスピン※² の向きを、効率よく一定方向にそろえる手法を開発しました。これにより今まで困難だった RI の詳細な性質の解明だけでなく、RI ビームをスピンの供給源として用いる物質科学などへ応用が可能になります。これは、理研仁科加速器研究センター（延與秀人センター長）偏極 RI ビーム生成装置開発チームの上野秀樹 チームリーダー、市川雄一 元 基礎科学特別研究員（現 東京工業大学特任助教）らを中心とする国際共同研究グループ※³ の成果です。

理研仁科加速器研究センターは、2007 年に世界最先端の RI ビーム供給施設である RI ビームファクトリー（RIBF）※⁴ を本格稼働させました。RIBF が供給できる RI ビームの数は、史上最多の約 4,000 種にもものぼると予想されていますが、スピンの向きを一定方向に揃える“有効なスピン操作”が行えるビームは、そのうちわずか数十種類だけでした。

スピンがそろった有効なスピン操作ができる RI ビームを得るためには、スピンの向きを整列させる「スピン操作効率」と、スピンがそろった RI ビームの「収量」という 2 つの要素を同時に満たさなくてはなりません。通常、向きのそろったスピンを抽出するためには、RI ビームの成分のうち不要なものを排除しますが、不要な部分のみを排除することは難しく、必要な成分も同時に排除してしまうため結果的に RI ビームの収量は減ってしまうという問題がありました。

そこで研究グループは、このように相反する 2 つの要素を両立させる新たなスピン操作法「分散整合 2 回散乱法」を開発しました。RI の生成反応を 2 段階にしてスピン操作効率の向上を図りつつ、さらに、スピンがそろった RI ビームだけを抽出するスリットの数を 2 つから 1 つに減らして生成過程で起きるロスを減らし収量の減少を最小限にしました。RIBF で行われた本手法の実証実験では、スピンの操作効率と収量で決まる有効なスピン操作の測定効率が、従来に比べ 50 倍以上になることが明らかにになりました。

RI ビームは、その種類の多様性からさまざまな用途が開発されつつあります。RIBF という世界最高性能の RI ビーム供給能力と、本手法による有効なスピン操作を組み合わせることによって、生成可能な「スピン操作 RI」の種類が格段に増えることになります。例えば、RIBF で利用可能な全ビームは平均で約 10 倍、特にウランビームの場合は約 50 倍に増加します。これにより、未知の RI の詳細な性質に関する基礎研究が進展し、新たな RI ビームをスピン供給源として用いることで物質科学などの応用研究の可能性が大きく広がることが期待できます。

本研究成果は、英国の科学雑誌『*Nature Physics*』に掲載されるのに先立ち、オンライン版（10 月 21 日付け：日本時間 10 月 22 日）に掲載されます。

1. 背景

原子や電子、原子核といった私たちの目に見えないミクロな粒子を特徴づける性質には、スピンと呼ばれる物理量があります。量子力学の確立以来、ミクロな粒子のスピンを人工的に操作することで、次々と新たな現象が見つかってきました。ある新しいミクロな対象にスピン操作する手段が開発されると、その後の科学を飛躍的に進化させる可能性があります。近年注目されているミクロな粒子の 1 つとして、RI ビームが挙げられます。RI ビームは自然界に存在しない多種多様の RI が、高速なビームという形で現れたものです。特に、理研仁科加速器研究センターが保有する重イオン加速器施設 RIBF は世界最高強度の RI ビームの製造能力を持っており、供給可能な RI ビームの種類は約 4,000 種にも上ると予想されています。しかし、その中でスピンを一定の向きにそろえるスピン操作が可能なものは数十種類しかありませんでした。この制限は、スピン操作のメカニズムと RI ビームの生成方法とのミスマッチが原因です。

RIBF などの重イオン加速器施設では、安定な 1 次ビームを標的物質に入射し、その 1 次ビーム核の構成要素である陽子や中性子をはぎ取る入射核破碎反応^{*5}を起こすことで、RI を 2 次ビームとして取り出します。この陽子や中性子をはぎ取る単純な反応過程でスピン操作が可能であることを東京工業大学 旭耕一郎教授（元理研主任研究員）が 1990 年に明らかにしています。しかし、有効なスピン操作は「反応が単純であること、つまり少しの陽子あるいは中性子をはぎ取ること」が前提条件となるため、1 次ビームから多くの陽子や中性子をはぎ取って生成しなければならない RI は有効なスピン操作が困難でした。そのため、通常 1 次ビームとして利用できる原子核は、化学的性質から大強度ビームが供給できる希ガスなどの数種類に限定されます。これにより、必然的にスピン操作可能な RI もその 1 次ビームの原子核から近い核、つまり少数の陽子や中性子をはぎ取るだけで生成可能な原子核に限られていました。

さらに、実際に研究で利用可能なスピン操作できる RI ビームを得るためには、スピンの向きを整列させる「スピン操作効率」と、スピンがそろった RI ビームの「収量」という 2 つの要素を同時に満たさなくてはなりません。共同研究グループは、互いに相反するこれらの要素を同時に高める手法の開発に挑みました。

2. 研究手法と成果

今回、共同研究グループは「分散整合 2 回散乱法」と呼ばれるスピン操作方法を新たに開発しました（図 1）。有効なスピン操作を行うための条件として、「反応が単純であること」が挙げられます。そこで、目的とする RI ビームを生成する時にだけ 1 つの陽子あるいは中性子だけをはぎ取る「最も単純な反応」を起こすように工夫しました。具体的には、安定な 1 次ビームを 2 回標的物質に入射する、2 段階のステップを経て目的の RI ビームを生成します。1 段階目の入射核破碎反応を終えたビームの原子核が目的の原子核より陽子あるいは中性子が 1 つだけ多い核を選ぶことで、2 段階目の反応は「最も単純な反応」となり、スピン操作の効率を最大化することができます（図 2）。

しかし、反応を 2 段階のステップにしてスピン操作の効率は良くなるものの、生成反応回数が 2 倍になるために目的とする RI ビームの収量が少なくなるという問題が

生じます。なぜなら、RI を生成する入射核破砕反応は入射するビームの一部でしか生じないため、2 回の反応後に取り出す RI ビームの収量は少なくなります。またスピンの向きがそろった RI ビーム抽出するためには、速度によって振り分け、ある特定の速度をもつ集団を選択します。そのためスリットという速度選択装置を用いますが、その選択が 2 回も行われるために収量はさらに大幅に減少してしまいます。

そこで、収量の減少を最小限にするために、分散整合条件^{*6}というビームの広がり打ち消す条件で 2 次ビームを輸送することで、1 回目の反応後のスリットを省略することに成功しました（図 3）。その結果、特定のスピンの向きに整列させた RI ビームを選択でき、さらに 1 つのスリットだけで速度選択することにより、一定の収量を得ることが可能になりました。

本手法の実証実験を RIBF で行ったところ、1 次ビーム ^{48}Ca から ^{33}Al を経由して、“1 中性子はぎ取り反応”で ^{32}Al ^{*7}を生成することにより、生成した ^{32}Al のうち約 8% を有効なスピン操作することに成功しました。一方で、比較実験として従来手法で ^{48}Ca から 1 回の反応で ^{32}Al の生成を行ったところ、有効なスピン操作は確認できず、操作できた割合は 0.8% 以下であるという結果を得ました。測定に要する時間の短さは、スピン操作効率の二乗と収量との積で決まります。この実験では、新手法と従来法との収量比が 1:1.6 だったので、従来手法に比べて 50 倍以上の改善を達成したことになります。

3. 今後の期待

分散整合 2 回散乱法を用いることで、原理的には、あらゆる種類の RI ビームに対してスピン操作を行うことができ、かつ大強度で得ることができます。例えば、スピン操作した RI ビームを用いて、その磁石的性質である磁気モーメントを 1 日で測定できる範囲をシミュレーションすると、従来手法に比べて圧倒的に広範な範囲の不安定核が測定可能になることが分かります（図 4）。RI ビームの特長として種類の豊富さが挙げられますが、この手法は RIBF などの施設で供給される多種多様の RI ビームに「スピン」という新たな可能性を付加するものです。今後、RI ビームとして得られる不安定核の性質を調べる基礎研究はもちろん、RI ビームを用いた物質研究などの応用に向けても幅広い可能性が期待できます。

原論文情報：

Y. Ichikawa, H. Ueno, et al., “Production of spin-controlled rare isotope beams”
Nature Physics, 2012 doi: 10.1038/NPHYS2457

<報道担当・問い合わせ先>

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター

偏極 RI ビーム生成装置開発チーム

チームリーダー 上野 秀樹 (うえの ひでき)

TEL : 048-462-7681 FAX : 048-462-7494

国立大学法人東京工業大学

大学院理工学研究科 基礎物理学専攻 旭研究室

特任助教 市川 雄一 (いちかわ ゆういち)

TEL : 03-5734-2716 FAX : 03-5734-2716

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715

<補足説明>

※1 放射性同位元素(RI)

物質を構成する原子核には、構造が不安定なため時間とともに放射線を出しながら原子核が崩壊していくものがある。このような原子核を放射性同位元素 (RI) と呼ぶ。放射性同位体、不安定同位体、不安定原子核、希少同位体、ラジオアイソトープとも呼ばれる。同じ元素であっても中性子の数が異なるものを同位体と呼ぶが、同位体は安定なものと不安定なものに分類される。

※2 スピン

原子や電子、原子核などのミクロな粒子があったときに、それらの「方向」を定義する唯一の物理量。古典的には自転に対応する。通常ミクロな粒子はそれぞれバラバラな方向を向いているが、ある特殊な磁場環境やレーザーなどを用いた人工的操作によってそれらのスピンの向きをそろえることができる。本研究では核反応によりスピンの向きがそろった状態を実現 (スピン操作) している。

※3 国際共同研究グループ

理化学研究所、東京工業大学、首都大学東京、岡山大学、ブルガリア科学アカデミー、フランス原子力庁、オルセー研究所、ルーバンカトリック大学による共同研究グループ。

※4 RI ビームファクトリー(RIBF)

RI ビーム発生系施設と独創的な基幹実験設備で構成される次世代重イオン加速器施設。1 基の線形加速器、4 基のリングサイクロトロンと超伝導 RI ビーム分離装置 (BigRIPS) で構成される。従来、生成不可能であった RI も生成でき、世界最多となる約 4,000 種の RI を生成する性能を持つ。

※5 入射核破砕反応

RI を生成する代表的な手法の 1 つ。1 次ビームを標的に入射し、その標的中で 1 次ビームの原子核から、その構成要素である陽子や中性子がはぎ取られる。この時、はぎ取られた陽子や中性子は残った部分にほとんど影響を与えず、「いつの間にかいなくなった」ように記述できる。核反応のうち、最も単純な描像で記述できる反応。

※6 分散整合条件

BigRIPS のようなビームラインでは、目的とする RI ビームを取り出すために速度選択を行う。速度選択をするためには、速度に応じた空間的な位置の広がり (分散) を磁石によって発生させる必要があるが、この分散は速度選択後には再び消し去られなければならない。これは分散を発生させる過程に対して「逆再生」の条件を課すことで可能になる。この「逆再生」条件のことを分散整合条件という。

※7 ^{32}Al

アルミニウム (陽子数 13) 同位体の中で、中性子を 19 個持つ RI。天然に存在するアルミニウムは中性子数が 14 であり、それよりも 5 個多い中性子を持っている。

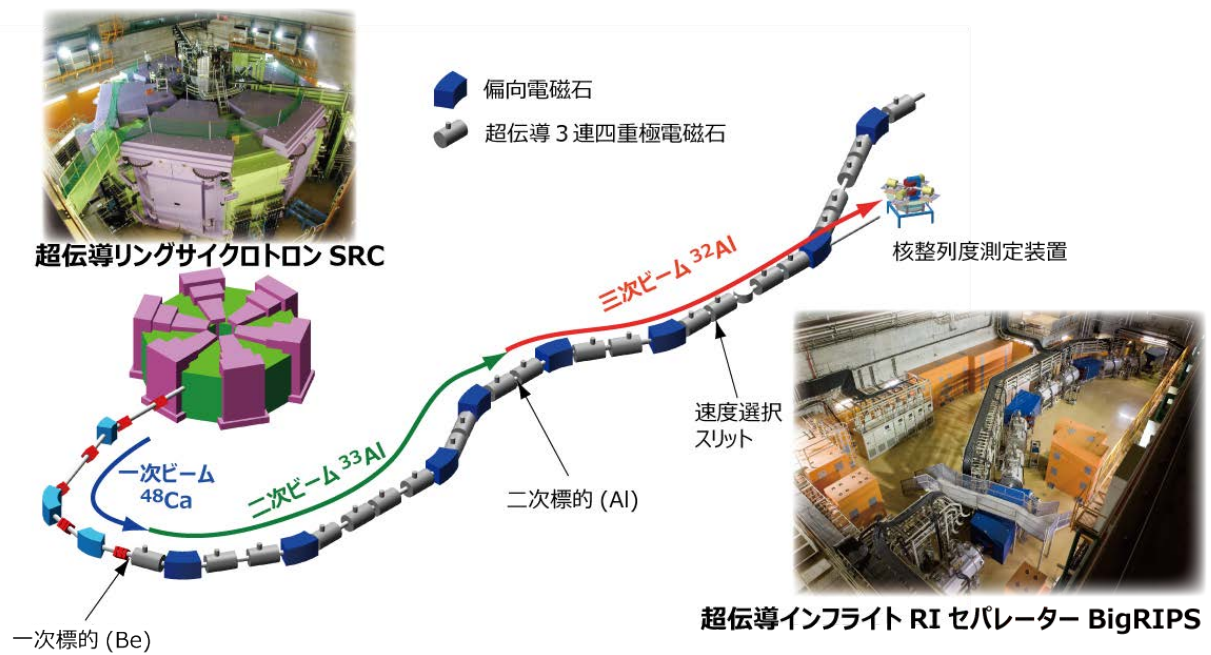


図 1 新手法「分散整合 2 回散乱法」適用時の実験レイアウト

本研究で開発した新しいスピン操作法「分散整合 2 回散乱法」は、2 段階核反応と分散整合という 2 つの新しいアイデアに基づく。2 段階核反応ではスピン操作効率の最大化を、分散整合では収量減少の最小化を図る。

一次ビームである ^{48}Ca は、一次標的に入射して多数の陽子や中性子のはぎ取られ、 ^{33}Al の二次ビームを生み出す。 ^{33}Al は分散整合条件を満たしながら二次標的に入射して、1 個の中性子のはぎ取られる。次に、ある特定の速度を持つ集団を選択できるスリットを通して、スピンの向きがそろった RI ビームを三次ビームとして得ることができる。

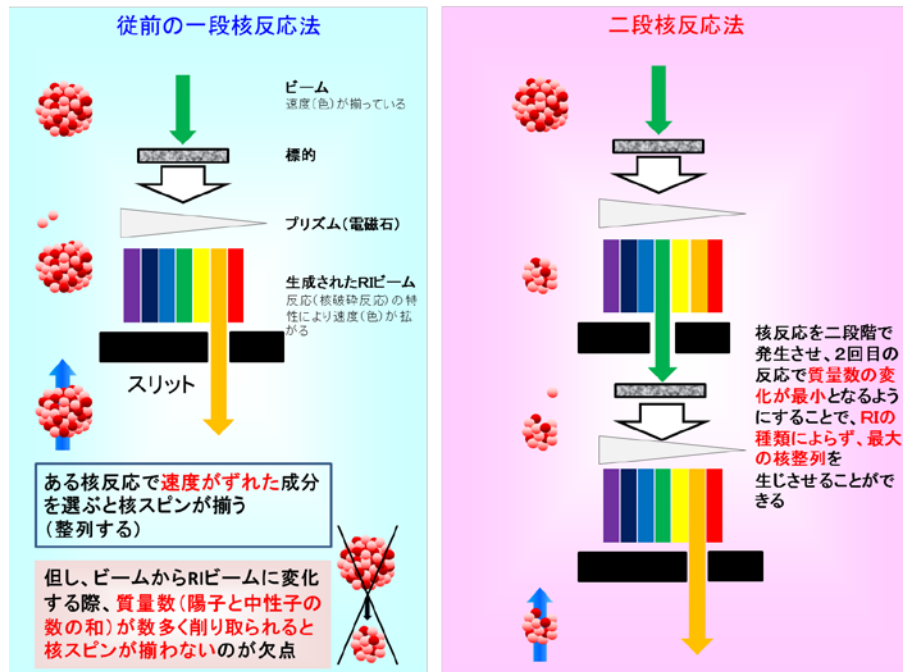


図2 分散整合 2 回散乱法で重要な開発要素の1つである「2 段階核反応」

核反応によって生じるビームの速度（運動量）の広がりを光の波長の広がり（色）に例えた。1 回目の標的を通過して取り出される 2 次ビームは、最終目的とする RI より陽子あるいは中性子が 1 つだけ多い核になるように設定する。その結果、2 回目の反応ではスピン操作効率を最大化することができる。これによりどのようなビームから生成された RI でもスピン操作が可能となる。

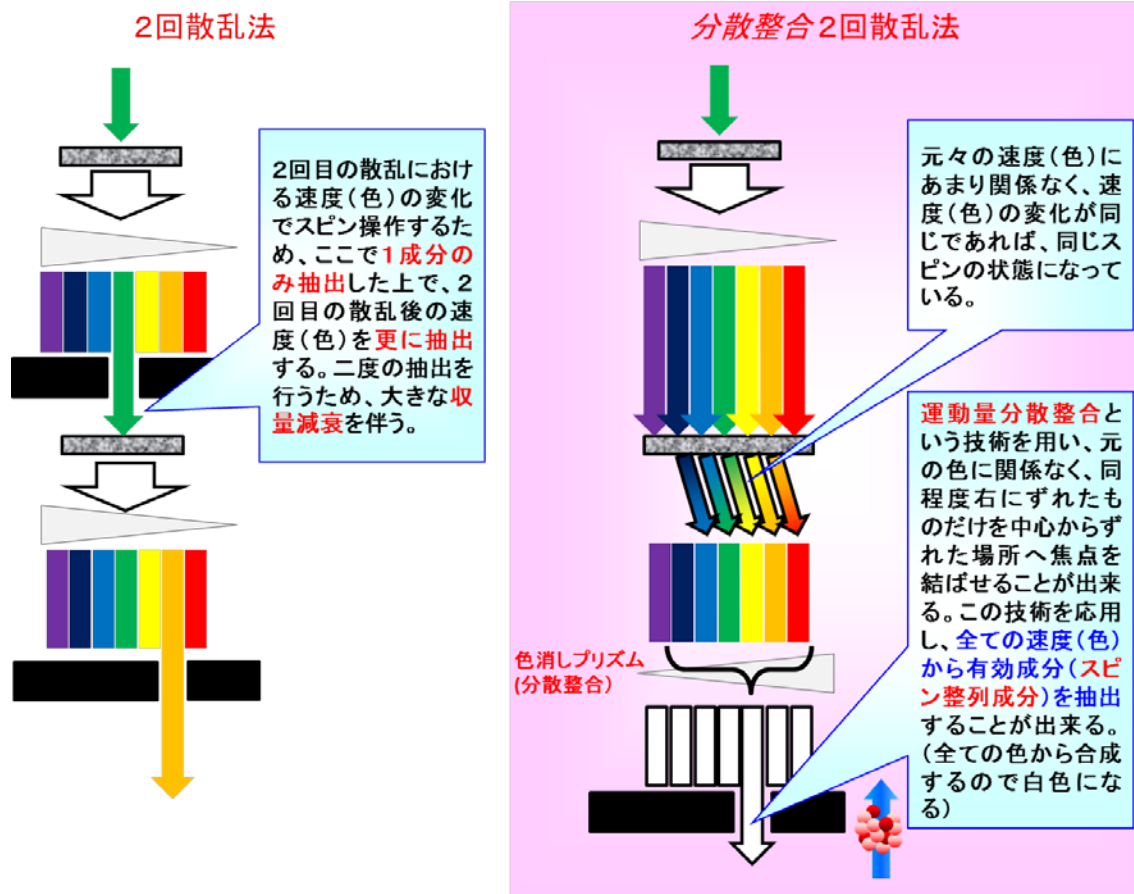


図3 分散整合2回散乱法でもう1つの重要な開発要素「分散整合」

分散整合条件を満たすように2次ビームを輸送すると、1回目の反応で速度を抽出しなくても2回目の反応で同じ速度変化したもの、つまりスピンの整列したRIビームを網羅的に収集することができるため、スリットを省略することができる。通常は原子核の緻密なエネルギー構造を調べるのに用いる。

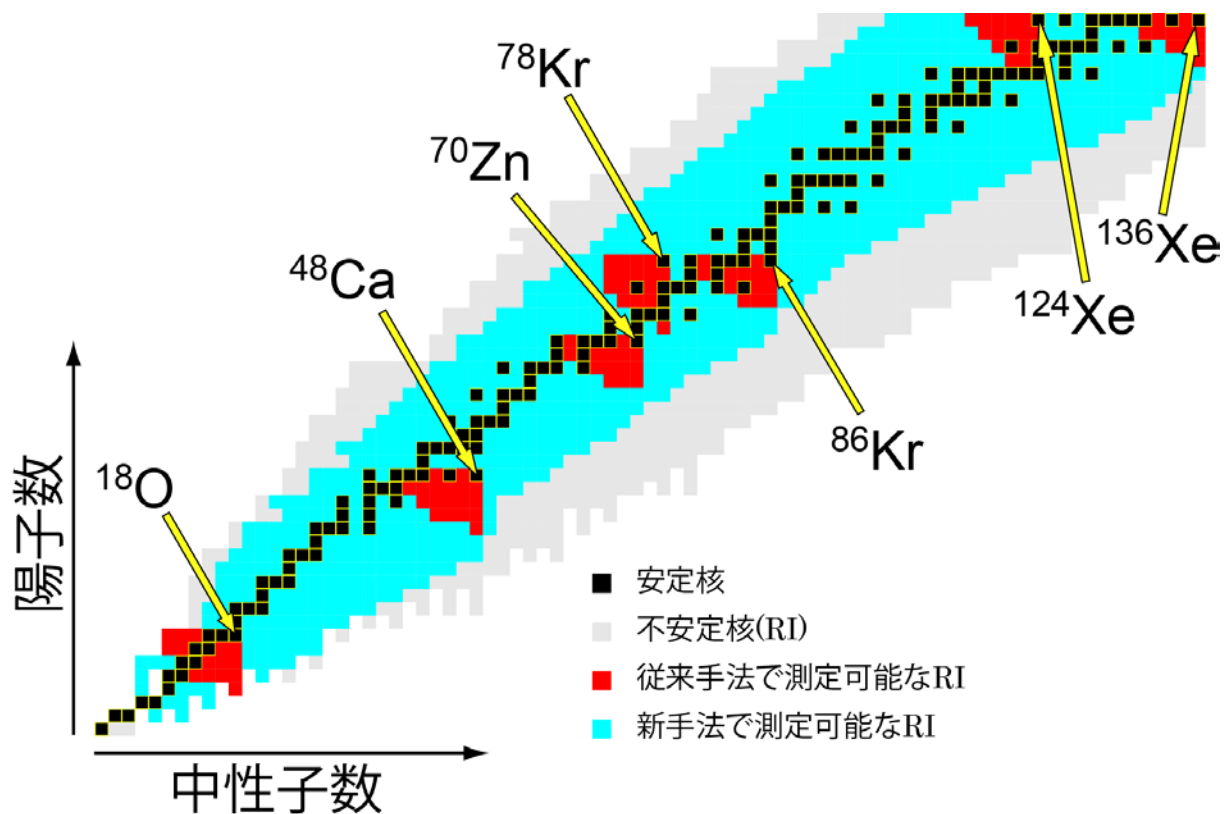


図 4 測定可能な RI の広がりを表した核図表

1 日間の測定時間で原子核の磁気モーメントの値を決定できる RI の範囲をシミュレーションした。 ^{18}O 、 ^{48}Ca …は RIBF で用いられる代表的な 1 次ビームの原子核を示す。赤色が従来の手法で到達可能な範囲、青色が新手法で到達可能な範囲。従来に比べて圧倒的に到達可能な範囲が広がったことが分かる。