

炭素 12 の新しい励起状態の発見

サイエンスピックアップ

サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター 准教授 伊藤正俊



あらゆる生物に必要不可欠な炭素は、生物から見ると微妙な反応によって生成されています。六十年以上前に宇宙に存在する元素がどのように創られたかを原子核反応から微視的に説明する必要がある

と認識されていました。しかし、炭素より重い元素を原子核反応によって合成するには、質量数 5 と 8 に安定な原子核が存在しないことが大問題となっていました。これを解決したのがイギリスの宇宙物理学者のフレッド・ホイルです。ホイルは、人間が存在するためにはヘリウム原子核であるアルファ粒子が 3 つ集まったエネルギー付近に炭素 12 の合成反応を促進する共鳴状態が存在し、3 つのアルファ粒子から直接炭素が生成されるはずであると考え、原子核物理学者らを説得し実験を行うように仕向けました。その後すぐにウィリアム・ファウラーらの研究グループによって角運動量ゼロの共鳴状態が発見されたため、この状態はホイル状態と呼ばれています。なお、ウィリアム・ファウラーはこの研究を発展させ「宇宙における化学元素の生成にとって重要な原子核反応に関する理論的および実験的研究」の功績によりノーベル物理学賞を受賞し、宇宙核物理学の分野を切り拓きました。

ホイル状態は、このような宇宙物理学的な面だけでなく、原子核物理研究者からも注目されています。なぜなら、通常の原子核構造はマイヤーとイェンゼンの殻模型によって説明できることが分かっていますが、このホイル状態は現在の殻模型の枠組みではどうしても説明することができなかったからです。今回の受賞対象となった研究は、ホイル状態の謎を解く重要な手がかりとなる状態の発見です。原子核はその形状を保ったまま回転励起すると、その慣性モーメントに従った励起準位が現れます。この原理に基づいて原子核構造を研究する手法を確立したのは、東北大学に在籍されたこともある森永晴彦先生ですが、当時、炭素 12 で知られていた励起準位から、ホイル状態はアルファ粒子が 3 つ団子のように連なった直鎖構造を持った状態であることを予言されていました。しかし、ホイル状態の次の回転量子数 2 の 2^+ 状態が見つかっておらず、また、アルファ粒子を原子核の構成要素として原子核構造を研究するアルファ・クラスター模型理論によって、ホイル状態の構造は、アルファ粒子の直鎖構造ではなく、アルファ粒子がガス状に広がった希薄な状態であると考えられるようになりました。近年では、この希薄な

ガス状態は、構成するアルファ粒子が最低エネルギーの S 軌道上に落ち込んでいる状態、すなわち凝縮しているような状態とも考えられています。ただいずれにしろ、ホイル状態の 2^+ 励起状態が長い間見つかっていなかったため、全ての原子核構造研究者には受け入れられませんでした。

このような中で、筆者らのグループはアルファ粒子を用いた 0 度非弾性散乱測定技術、および散乱断面積の角度分布から連続状態の中に存在する励起状態のスピン・パリティを高精度で抽出する手法を確立していました。加速器を用いてアルファ粒子を 400MeV という高エネルギーまで加速し、研究対象となる原子核と反応させることによって、目的の励起状態を生成します。そのとき、0 度を含む前方角度に非弾性散乱されるアルファ粒子を精密に測定すると、反応における角運動量移行によって特徴的な分布を示します。実験に起因するバックグラウンドのない連続状態は様々な状態の重ね合わせで表されるとして、各々の強度分布を求めます。ホイル状態よりも高い励起エネルギー領域には、それまでスピン・パリティが 0^+ と 2^+ ともつかない幅広い状態が存在すると考えられていました。筆者らは上記の手法を用いて、この幅広い励起状態の中に埋もれていた 2^+ 状態の強度分布を正確に抽出することに成功しました。後に光核反応による追実験によって筆者らが求めた強度分布と同等の結果が得られたことで、この炭素 12 の新しい励起状態は広く認められるようになりました。これにより、恒星中における炭素の合成速度をより正確に求めることができるようになり、また、ホイル状態の構造に関しても再び活発に研究されるようになりました。もう一つの受賞対象となった論文はその中の一つで、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) のサイクロトロン加速器を用いて、ホイル状態からの崩壊アルファ粒子を世界最高精度で精密に測定することによって実験的にホイル状態の構造を解明することを狙った研究です。今後、さらに測定精度を上げ、ホイル状態の構造を解明したいと考えています。

受賞対象となった研究は、大阪大学核物理研究センターおよび東北大学 CYRIC におけるサイクロトロン加速器を用いた多くの方々と共同研究です。ご協力頂いた共同研究者、加速ビームに対する多くの注文にも関わらず真摯に調整・運転頂いた加速器グループの方々に感謝致します。最後に、受賞にあたり、ご審査いただきました先生方や泉萩会関係者の皆様に深く感謝致します。

サイエンスピックアップ

分子集合体から生命機能を探る

物理学専攻 助教 佐久間 由香



生命体は分子集合体から進化したと考えられていますが、どのようにして進化したかということについては未だ明らかになっていません。近年、最低限の生命機能を持つプロトセルと呼ばれる前駆生命体を合成することで、分子集合体がいかにして

生命体へと進化したかを解明しようとする試みがなされています。

最低限の生命機能として挙げられるのが、細胞単位での代謝や自己複製です。細胞は物質を内包した小胞膜と接着・融合することで外部から物質を取り込み、それを用いて生命維持に必要なエネルギーや物質を合成します。さらに不必要となった物質を細胞外へ放出するために、細胞膜に孔を開けるなどすると考えられます。また、分裂などにより自己と同等の細胞を生産する自己生産も最低限の生命機能として挙げることができます。

生命体の最小単位である細胞は、脂質や蛋白質、糖鎖など様々な分子で構成されています。現在の生命体においては、その生命機能のほとんどは蛋白質によって実現されており、脂質は蛋白質などの複雑な分子を支える土台のような役割しかないと考えられています。ですが蛋白質のような生命機能効率化のための複雑な分子を得る以前、原始生命体は脂質のような単純な分子のみによって生命機能を発現していたのではないかと考えられます。そこで、私たちは脂質のみから成るシンプルなモデル生体膜（ベシクル）を用いて、代謝経路の素過程である膜接着や膜面上での孔形成、自己生産といった最低限の生命機能に伴う膜変形を再現することを試みました。

現在の生体膜では、蛋白質が脂質膜に作用することによって膜に局所的な曲率を与え、それによって生体機能に伴う膜変形が実現されています。そこで、私たちは脂質の持つ幾何学的形状に着目して、脂質膜に局所的曲率を与えることで膜変形の再現を試みました。脂質は一分子中に親水基と疎水基を併せ持つ両親媒性分子ですが、この親水基と疎水基の断面積の比率によって、幾何学的形状を3種類に分類することができます。この3種類はそれぞれ、親水基が疎水基より大きいコーン形脂質、親水基と疎水基の断面積がほぼ同等のシリンダー形脂質、親水基が疎水基より小さい逆コーン形脂質と呼ばれています。

まず、代謝経路の入り口である膜接着に於いては、逆コーン形脂質とシリンダー形脂質の二種類から成るモデル生体膜を用いました。この二成分モデル生

体膜は、温度によって逆コーン形脂質とシリンダー形脂質が相分離します。相分離した状態で2つのモデル生体膜を接触させると、逆コーン形脂質の部分を通して接着することがわかりました。

次に、コーン形脂質とシリンダー形脂質とから成る二成分モデル生体膜に温度変化を与えて膜面上に孔を形成することに成功しました。高温では二種類の脂質が均一に混合して球形を示しますが、温度を下げることによって膜面上に一つだけ孔を開けることがわかりました。

さらに、逆コーン形脂質で、かつ膜のトポロジー変化を誘起すると言われているエタノールアミン基を親水基に持つPE脂質と、シリンダー形脂質とから成る二成分モデル生体膜に温度変化を与えることで、自己生産を再現することができました。この二成分の脂質の混合比に依って、二種類の自己生産のパスウェイを通ることがわかりました。また、温度サイクルを繰り返すことにより何度でも自己生産を繰り返し、数世代に渡るモデル生体膜の産出を観察することができました。

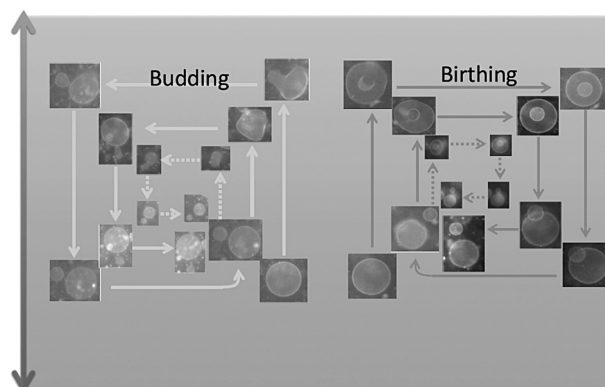


図1. 二成分脂質の混合比に依る二種類の自己生産過程。左はモデル生体膜の一部が外側に突出した後に分裂する budding 型。右はモデル生体膜の一部が内部に陥没した後に分裂して独立な子世代モデル生体膜となり、さらに外側の親世代モデル生体膜に開く孔を通して外部に排出される birthing 形。左端の矢印は温度を示し、上側が高温・下側が低温。温度サイクルにより自己生産は何世代にも渡って観察される。

以上のように、異なる幾何学的形状を持つ二種類の脂質のみから成るシンプルなモデル生体膜で生命機能を再現し、そのメカニズムを明らかにすることができてきました。これらの結果は、分子集合体と生命体との間にあるミッシングリンクを解き明かす足がかりとなることが大いに期待されます。

サイエンスピックアップ

宇宙暗黒物質と素粒子物理学

平成 17 年理学部物理学科卒 金沢大学 助教 石渡 弘治



宇宙は静的な存在である—20 世紀初頭まで信じられていた概念が、1915 年アルベルト・アインシュタインの一般相対性理論によって大きく覆がえった。一般相対論の基本方程式であるアインシュタイン方程式は収縮あるいは膨張する宇宙を予言し、その予言は 1929 年エドウィン・ハッブルの宇宙膨張発見によって証明された。宇宙膨張は、その昔宇宙がマイクロな存在であったことを示唆する。つまり、宇宙には始まりがあり、物理の法則によって現在の宇宙に進化したというのである。

空想とも思われるこの主張は、現在宇宙観測によって証明されている。膨張宇宙説は高温高密度のビッグバンという現象を予言する。このとき星や銀河の素となる軽元素が合成され、やがて宇宙が冷えると電離していた電子が水素原子核に捕獲され、光は直進できるようになる（宇宙の晴れ上がりと呼ばれる）。この晴れ上がりの光が我々に届く最も原始的な光であると予言された。ビッグバンの名残ともいえるこの光は、1965 年アルノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンによって偶然発見され（ビッグバンの名残と示したのはディッケらプリンストン大学のグループ）、現在では宇宙マイクロ背景放射（cosmic microwave background radiation、略して CMB）と呼ばれている。CMB の発見により膨張宇宙説は確定的なものとなり、その後 1990 年代から現在にかけ、宇宙観測衛星による CMB の精密観測が行われた。これらの観測はビッグバンを含む「標準宇宙模型」の正しさを高い精度で示す一方、新たな疑問を我々に提示した。その一つが暗黒物質の存在である。

CMB の情報から宇宙の構成要素がわかるのだが、観測の結果、我々の宇宙には正体不明の物質、暗黒物質が存在することが明らかになった。恒星や惑星を形成する通常の物質（主にバリオンと呼ばれる物質で占められている）と違い、暗黒物質は他の粒子との相互作用が弱く、直接捕まえることができない。無論我々の体を通しても全く何も感じない。さらに驚くべきことに、この暗黒物質は通常の物質に比べて（エネルギーに換算して）約 5.5 倍も存在することが CMB の観測で明らかになった。現在の宇宙に暗黒物質が存在することは 1930 年代から示唆されていたが、この頃は暗黒物質が天体（例えば白色矮

星など）である説も唱えられた。しかし CMB の観測は暗黒物質が通常の物質（バリオン）でないことを示し、我々の全く知らない物質が大昔から宇宙に大量に存在すると結論付けた。

ここで素粒子論の登場である。宇宙という壮大なスケールから素粒子というマイクロな話へ大きく転換したと思うかもしれないが、初期宇宙を語る上で素粒子論は不可欠である。先に述べたように、宇宙は時間が遡れば遡るだけ小さな存在であった。すると宇宙の温度は必然的に上がり、このような高温下では原子は電離し、原子核もクオークへとバラバラになり、すべては素粒子として宇宙に存在する。この時代は素粒子物理学の法則が宇宙を支配し、宇宙の進化を決める。つまり、素粒子を記述する理論がわかれば宇宙の進化が予言でき、それを CMB などの観測で検証することができるのである。

素粒子の性質は「素粒子標準模型」と呼ばれる理論模型で記述されている。素粒子標準模型は自然界に存在する 4 つの力のうち、強い力、弱い力、電磁気力の 3 つを統一的に扱うことに成功し、1960 年代に完成された。その後多くの地上実験によって検証が進められ、最近では 2012 年 CERN の LHC 実験においてヒッグス粒子の存在が確認されたことで、素粒子標準模型が予言する粒子はすべて発見された。現在のところ、素粒子標準模型と確実に矛盾する物理現象は地上では確認されていない（ニュートリノ振動を除く）。一方、この素粒子標準模型に基づく標準宇宙模型も大きな成功を収めている。標準宇宙模型で予言される軽元素量は現在宇宙で観測されている軽元素量ととてもよく一致することがわかっている。しかしながら暗黒物質の存在は説明できないのである。

まず明らかなのは、素粒子標準模型を暗黒物質を含むような理論へ拡張しなければならないことである。この拡張作業には理論と実験の両面から様々なアプローチがある。理論屋が行うのは暗黒物質を含む理論を作ることだ。最も単純には、暗黒物質を“手で”理論に書き加えてしまえばよい。あるいはもっとずっと高いエネルギーの素粒子模型の候補に着目する方法がある。超弦理論は万物の理論の最有力候補と考えられている理論で、先に述べた自然界の 3 つの力に加え重力までを統一する究極の理論である。超弦理論は理論的整合性から超対称と呼ばれる性質を要求する。この超対称性はとても奇抜な予言をす

る：超対称性が自然界に存在するならば、我々が現在観測している粒子それぞれに、そのパートナーとなる粒子(超対称粒子と呼ぶ)が存在する。いや待て、そんな粒子あったらとくに気づくはずだ、と思うだろうが、そこは大丈夫だ。超対称粒子のほとんどは、宇宙初期に対消滅したり崩壊したりして消えて無くなる。ここで“ほとんど”と言ったことに注意してほしい。超対称粒子の中で最も軽いものが宇宙に残存する可能性がある。これが暗黒物質の候補となる。

万物の理論の候補の超弦理論から超対称性とかいう性質が出てきて暗黒物質云々という話は、理論だけが一人歩きしすぎているという印象を与えるかもしれない。しかし近年、そうした理論予言を観測や実験で検証することが可能になってきている。その一つが、暗黒物質の直接探索実験であり、今回受賞対象となった研究テーマである。

暗黒物質は通常の粒子との相互作用が非常に弱いことは先に述べた。この性質のため、暗黒物質を実験室サイズの検出器で検出することはまず無理である。そこで地下に巨大な検出器を用意し、暗黒物質が検出器内の物質と散乱するごくごく稀な現象を捉えようとする試みが始まっている。これが暗黒物質の直接探索実験だ。雰囲気としては日本が誇るニュートリノ検出器スーパーカミオカンデと似ている。スーパーカミオカンデでは水で満たされた巨大な検出器にニュートリノが入射した時、ニュートリノと電子が散乱する現象をとらえる。一方、暗黒物質の直接探索では水の代わりにもっと密度の高い物質(キセノンなど)を用いる。これは密度が高い(原子番号の大きい)物質ほど単位体積あたりの核子の数が多く、暗黒物質と核子の散乱現象がとらえやすくなるからだ。理論屋の仕事は、暗黒物質と核子の散乱確率を正確に求めることである。

核子はクォークとグルーオンという素粒子で構成されている。従って暗黒物質とクォーク、及び暗黒物質とグルーオンの間の散乱確率を求めることが必要となる。超対称粒子が暗黒物質であると仮定した場合、最も単純なケースではヒッグス粒子または別の超対称粒子を媒介して散乱が起こり、これら媒介粒子がある程度軽ければ散乱が起きやすくなると予測できる。しかし現実はその単純ではないことが LHC 実験によって明らかになってきている。現状はこうだ：LHC 実験においてヒッグス粒子は発見された。一方で超対称粒子発見の兆候は全くない。このような場合、ヒッグス粒子を媒介する散乱過程が有効となるが、この散乱過程ですら、量子補正を含む複雑なプロセスとなる。それだけではない。量子補正を含むプロセスには W ボソンや Z ボソンといっ

た粒子を媒介するものもあり、上記のヒッグス粒子による散乱と同等の寄与を与える。これら量子補正を含む散乱過程の理論計算は複雑で、事実、過去の文献における計算結果は互いに食い違っていた。これでは正確な理論予想ができず、今後 LHC 実験で進展があった場合や暗黒物質直接探索実験でなんらかのシグナルが検出された場合に、それら実験結果を正しく解釈することができない。このような時理論屋がとる方法はわりと単純である。一からすべて計算し直すことである。そこで我々は、量子補正を含めた暗黒物質 - 核子間の相互作用を一から系統的に導出する方法を提示した。

具体的には長い計算をいくつかのパーツに分け、一つ一つが正しく行われていることを明示した。これらの定式化により、以前よりもずっと見通しよく理論計算が可能になっただけでなく、他の様々な暗黒物質候補粒子にも応用できる公式を導出した。こうした技術的な側面における発展だけでなく、最終的に得られた散乱確率においても興味深い結果を得た。散乱に関わる複数のプロセスが偶発的に互いに打ち消し合い、散乱確率が非常に抑制されることがわかったのである。さらに、この打ち消し合いの効果はヒッグス粒子の質量にとっても敏感であることも見出した。2012 年に発見されたヒッグス粒子は約 125 GeV という質量を持つのだが、この値では打ち消し合いの効果がより高まり、より散乱確率が小さくなることがわかった。手短かに言えば、加速器実験で得られた最新の結果を用い、正しく理論計算を行うと、暗黒物質は従来考えられていたよりもずっと発見されにくい物質である、とわかったのである。

現在素粒子物理学はエキサイティングな時代を迎えている。長期シャットダウンを経た LHC 実験が今年 2015 年に再稼働する。前回 2013 年までの運用と比べ約 2 倍の重心系エネルギーでの運用となり、(もし存在するなら)より質量の大きい粒子を作ることが可能になる。もし暗黒物質が LHC 実験で作られその質量がわかれば、より正確に暗黒物質 - 核子間の相互作用の強さが予言できる。一方、世界各国でより大規模な暗黒物質直接探索検出の計画が進んでいる。これら将来実験では、予言された散乱現象をとらえることが可能なほどの感度をそなえるような設計になっている。もし予言された通りに暗黒物質が検出されれば、これは大発見である。そうでなければ、その実験結果をヒントに別な可能性を探求するのみである。この未知の物質が素粒子標準模型を越えた素粒子模型の重要な要素であることは明らかであり、暗黒物質の正体解明が究極の理論への大きな一歩になるだろう。

サイエンストピックス

異常気象・気候変動を巡る話題
—夏の現象に着目して—昭和 57 年天文及び地球物理学科第二卒
東京大学 先端科学技術研究センター 教授 中村 尚

最近天気がおかしいのではというマスコミからの問合せが増えています。実際、2013・2014 年と続けて、気象庁異常気象分析検討会の臨時会合が9月初めに開催されました。2013 年は西日本の記録的猛暑、翌年は広島豪雨など西日本の多雨・寡照が

そのテーマで、上記分析検討会の委員としてコメントを求められた訳です。マスコミの関心事は、こうした近年の猛暑や過去に経験のないような豪雨が「地球温暖化」の現れかと言う点にあります。そこで、今回（2014 年 10 月）の泉萩会の講演では、夏の現象に着目して、異常気象の仕組みと地球温暖化との関連についてご説明します。

地球大気には、水蒸気に加え、微量ながら二酸化炭素やメタンなどの温室効果気体が含まれています。温室効果気体は、日射で暖められた地表面が射出する赤外放射を吸収し、逆に下向きに赤外線を出して地表面を暖めます。この「温室効果」がなければ、地球の平均気温は -18°C に低下してしまうことを理論的に導くことができます。これでは、多くの地域で農業・漁業は成り立たないでしょう。つまり、我々が現在享受する食生活は温室効果に依っているととも言えるでしょう。一方、「地球温暖化」とは、大気中の二酸化炭素やメタンなどの濃度が人間活動に因って急激に増加し、温室効果が余りに急速に強化されていることです。実際、6～8 月平均の全球平均地表気温は、過去 100 年に 0.68°C の割合で上昇してきました。

我が国においても気温上昇は顕著です。都市化に伴うヒートアイランド現象の影響を無視できる 17 観測点を平均しても、夏季平均の地表気温は 100 年間に 1.05 度の割合で上昇してきました。実際、平成に入ってからの本格的な冷夏は 1993 年・2003 年のみですが、過去の気温上位 5 年のうち 3 年はここ 5 年間に現れており、観測データからも近年暑夏が多い傾向が明らかです。但し、全球平均地表気温に比べて年々の変動が格段に大きいのが特徴です。即ち、日本のような地域的な天候は、地球温暖化という人為起源の「気候変化 (climate change)」に、自然変動に伴う「気候変動 (climate variability)」が重畳して決まっているのです。そして、全球平均地表気温の時系列においては、後者の相対的寄与が小さいことから、気候変動には地域スケールのシグナルが卓越することも分かります。

我が国を含めた亜熱帯・中高緯度域における自然

気候変動はジェット気流の異常な蛇行に伴って発生する場合があります。ジェット気流は特に強い上層の西風で、これを挟んで南北気温差が特に顕著です。よって、ジェット気流の異常な蛇行は異常高温や異常低温をもたらすのです。偏西風ジェット気流には 2 種類あります。亜熱帯ジェット気流は熱帯と中緯度の空気の境界を流れ、夏季モンスーンや熱帯域の積乱雲に伴う降水の影響で維持されています。一方、亜寒帯ジェット気流は亜熱帯ジェット気流よりも弱く、中緯度と極域の空気の境界を流れています。興味深いことに、この気温差を解消しようと発達する移動性高低気圧が亜熱帯ジェット気流から西風運動量を輸送してくることで亜寒帯ジェット気流が維持されています。また、移動性高低気圧による極向き熱輸送の効果により、地表付近にもかなり強い西風を伴うことも亜寒帯ジェット気流の特徴です。

ジェット気流の持続的な蛇行は地表高気圧の勢力を変動させます。例えば、夏季にシベリア沿岸上空を吹く亜寒帯ジェット気流がオホーツク海付近で北へ蛇行すると、寒冷な海上に地表高気圧が発達します。この寒冷なオホーツク海高気圧は梅雨期に最も出現しやすいのですが、盛夏期にも頻繁に出現する年には冷夏になりやすい傾向があります。一方、盛夏期に北日本上空を吹く亜熱帯ジェット気流が北へ蛇行すると、夏の小笠原高気圧（背の高い亜熱帯高気圧で太平洋高気圧の西縁に位置する）が日本列島に強く張り出して暑夏になる傾向があります。

ジェット気流の蛇行をもたらす要因の 1 つは、西方から伝搬してくる大規模な気圧の波動です。これはロスビー波と呼ばれ、ある速さの水平運動に対する地球自転の効果（コリオリの力）が緯度とともに増大することに起因する大規模な波動です。背景風に相対的な位相速度は常に西向きで、その大きさが波長とともに増大するという強い分散性を持ちます。よって、ある強さの偏西風に対して、特定の波長を持つロスビー波の（対地）位相速度がゼロになることが可能です。この「停滞性ロスビー波」に特徴的なのは、地球に相対的な位相速度が無くても東向きの群速度をもち、しかもその大きさが背景風速に比例して増大することです。よって、散逸過程の無視できない現実大気では、偏西風ジェット気流は停滞性ロスビー波の導波管として働きます。

天気図で馴染み深い移動性の高低気圧は、大気波動の位相伝播に伴って天気や気温・風向などを日々変化させます。これに対し、その 2～3 倍もの波長をもつ停滞性ロスビー波に伴っては上空の偏西風の蛇

行の強い部分が群速度で東進し、それに応じて地表の停滞性の高気圧や低気圧の強弱が引き起こされ、西から東へと異常気象が連鎖的に発生します。顕著な蛇行が起こりやすいのは、ジェット気流が弱まってゆく場所、即ちジェット気流の出口です。夏季の極東上空はこれに当たり、異常気象が発生しやすい場所と言えます。例えば、オホーツク海高気圧を発達させる極東上空での亜寒帯ジェット気流の蛇行は、数日前に北欧上空で発達した上空の高気圧に伴うジェット気流の蛇行に引き続いて起こる傾向にあります。このとき北欧は異常高温に見舞われやすく、我が国の異常低温へと異常気象の連鎖が停滞性ロスビー波によって引き起こされています。

同様に、小笠原高気圧を発達させる北日本上空での亜熱帯ジェット気流の蛇行を、地中海・中東方面から伝播してくる停滞性ロスビー波が引き起こすことがあります。亜熱帯ジェット気流を蛇行させるもう1つの要因は、南海上での台風活動です。海水温の高い南海上で台風が頻繁に発生する夏ほど、日本上空で下降気流が強まり、小笠原高気圧が強く日本に張り出す傾向にあります。

なお、上述の小笠原高気圧の強化は、温暖化が顕在化する以前から起きている自然変動の現れです。実際、日本の夏季気温上位5年にも、昭和時代から1978年がランクインしています。このときも亜熱帯ジェット気流が北へ著しく蛇行していました。自然変動が極めて大きく、異常高温に寄与した事例です。近年は自然変動に伴って小笠原高気圧が強化されると、その影響が地球温暖化に伴う長期的昇温傾向重なることで暑夏になりやすいと解釈できます。また、暑夏になると、都市域では排熱効果で最低気温が郊外ほど下がらず（ヒートアイランド現象）、気温上昇はさらに顕著になります。

一方、地球温暖化の進行に伴って大気中の水蒸気量が増加傾向にあることが人工衛星によって観測されています。温室効果気体である水蒸気の増加は、温暖化を加速させる正のフィードバックをもたらすだけでなく、積乱雲の発達を促し、集中豪雨の発生頻度を増加させるよう働きます。実際、長期的にみれば、我が国における強い降水の頻度は統計的に有意な増加傾向にあります。加えて、日本近海の海水温上昇の影響も無視できません。日本近海の過去100年の水温上昇率は、全球海洋の平均上昇率の2倍以上なのです。これは、熱帯・中緯度域の海上風の長期変化の影響が、西方へ伝播する海洋のロスビー波を介して、黒潮など大洋の西縁を流れる強い暖流の強化として集中的に現れていると考えられます。一方、日本海・東シナ海の水温は、冬の季節風の長期的弱化などによって着実に上昇しています。こうして暖まってきた海上に、夏季に熱帯からの暖湿な季節風が吹き込むと、気流の対流不安定性が保持されまま陸地に流入し、集中豪雨を引き起こす可能性

が高まる訳です。

そこで、2012年7月中旬に甚大な洪水被害をもたらした「九州北部豪雨」の予測再現実験を、積乱雲を解像可能な領域大気モデルを用いて実施し、モデルの下方境界条件として与える海面水温が積乱雲の組織化に与える影響評価した。その結果、水深の浅い東シナ海が晩夏にかけて季節的に急速に温暖化するのに伴い、仮に同じ大気循環場であっても6月よりは7月に積乱雲の発達がより促され、九州での雨量を増加させる傾向が明瞭に示されました。この結果は、九州西部で（弱い降雨まで含めた）平年雨量が梅雨最盛期の6月下旬にピークを迎えるのに対し、災害史に残る九州の豪雨（「諫早豪雨」・「長崎豪雨」・「九州北部豪雨」）いずれも7月中旬・下旬に起きていることと整合的です。

さらに、将来の温暖化が梅雨期の九州の豪雨に与え得る影響の評価も、「もし2012年の九州北部豪雨と同じ大気循環場が2090年代に出現したら」という仮想的な設定で実験を行いました。最新のIPCC（気候変動に関する政府間パネル）評価報告書に用いられた32の気候モデルの中から、6・7月の東シナ海について予測された将来への水温上昇が最大のものと最小のものを選り、各大気層における九州近傍での気温上昇量を領域大気モデルに与えました。今世紀末までに予想される約1.7～2.6℃の水温上昇分も現在観測された東シナ海の水温分布に足し込みました。このような手の込んだ手法を採るのは、IPCC評価報告書に用いられる全球気候モデルは水平分解能が不十分で、観測される細かな水温分布が再現できないためです。実験の結果、もし九州北部豪雨と同じ大気循環場が2090年代の7月に出現したら、降水量は20～30%増加し得ることが分かり、6月でも下旬であれば九州北部豪雨にほぼ匹敵する雨量になり得ることも示されました。水温上昇を組み込まず、気温上昇のみ与えた実験では雨量増加がかなり抑制することから、将来の雨量増加には水温上昇が第一義的に寄与することが分かります。つまり、将来は東シナ海の温暖化により、九州では6月下旬から集中豪雨の危険に曝され、7月には集中豪雨の雨量が増え、頻度も増す恐れがあるという防災上重要な示唆が得られたのです。さらに、IPCC評価報告書の将来予測において、モデル間のばらつきは大きいものの、日本付近では盛夏期に向けての亜熱帯ジェット気流の北上が遅れる可能性が示されていることを加味すれば、将来は現代に比べてより長い期間、集中豪雨に見舞われる可能性が示唆されます。周辺海域の温暖化に伴い、我が国の他地域でも同様に、特に暖候期において集中豪雨が起こりやすくなってゆくと思われます。実際、北海道でも近年1時間80mm超の豪雨が観測され始めています。今後の防災・減災のためにも、是非周辺海域の温暖化に着目して頂きたいと思います。