

# 甲南大学 総合研究所報

## 第 72 回 総合研究所公開講演会 (オンライン)

### 「甲南の教員が解説する Nobel Prize2020」

～ノーベル化学賞／物理学賞～

講 師 久原 篤 (甲南大学 理工学部教授)  
大神 隆幸 (甲南大学 外部資金等研究員)

2021 年 1 月 23 日 (土) ～1 月 25 日 (月) (配信)

久原先生



大神先生



【久原】 皆様、こんにちは。理工学部生物学科大学院自然科学研究科甲南大学統合ニューロバイオロジー研究所教授の久原と申します。よろしくお祈いします。

本日は、このような発表の機会をいただきまして、誠にありがとうございます。皆様とこういう形で話をさせていただくことを誠に光榮に存じます。

今回は、2020年度のノーベル化学賞「ゲノムを編集するツール CRISPR/Cas9の解説と実践」について紹介させていただきます。

ここからスライドを使って紹介させていただきますので、少し私の顔は小さくさせていただきます。

2020年のノーベル化学賞は、CRISPR/Cas9というゲノム編集の技術を使って、エマニュエル・シャルパンティエ先生とジェニファー・ダウドナ先生のお二人にノーベル化学賞が授与されました。これは、スウェーデン王立科学アカデミーが10月7日、2020年度のノーベル化学賞としてゲノム編集技術、ドイツのマックスプランク研究所のエマニュエル・シャルパンティエ教授とアメリカのカリフォルニア大学バークリー校のジェニファー・ダウドナ教授、このお二人にノーベル賞を授与することを発表しました。この原著論文は2012年にサイエンス誌に報告されています。

このCRISPR/Cas9は、2012年にサイエンス誌に報告されて以降、ノーベル賞の大本命だと言われておりまして、革新的ゲノム編集法の開発につながったということで非常に著名で、2012年に発表されて以来、世界中の注目を集め、既に引用回数は5,000回以上、論文はほかの研究者から読まれて、その論文を引用されるんですね。基礎研究のみならず、様々な応用研究に展開されつつありました。大本命でしたので、小話ですけれども実は2017年10月7日の受賞発表日の当日に、ネイチャーでは既にインタビュー記事まで紹介されておりました。

これが2012年に発表された原著論文、サイエンス誌に報告された論文です。ジェニファー・ダウドナ先生、エマニュエル・シャルパンティエ先生、このお二人のお名前が入っている論文です。論文自体は英語で専門的ですのでその内容をかいつまんで紹介しますと、これはCRISPR/Cas9法、生物学を知っている人に向けた解説をこのスライド1枚だけでさせていただきます。この後により簡単な解説をさせていただきますね。生物学を知っている人向けですけれども、Cas9というDNA分解酵素をガイドRNAによって目的部位に導き、標的DNAの二本鎖を切断する。切断されたDNAは自然に修復される。修復時のエラーを利用して標的部位に変異を導入したり外来遺伝子の挿入を行うなど、ゲノムDNAを編集することができます。難しいですね。私の比較生理学の大学の講義の中で使っているイラストの犬ですけれども、難しいワンということで、今の説明では生物学を習っている学生さんには分かるかもしれませんが難しいですね。

ということで、より一般的な解説をさせていただきます。ノーベル賞の大本命でしたので、既に2015年に日本未来館のホームページの鈴木啓子氏の解説が「日本未来館科学コミュニケーターブログ」として掲載されていたので、そのブログと図を引用して紹介させていただきます。

ゲノムを編集するツールCRISPR/Cas9の開発。そもそもゲノム編集とCRISPR/Cas9とは何でしょうか。私たちの体は、たんぱく質と呼ばれる物質でつくられています。皆さんも聞いたことがあると思いますね。そのたんぱく質をつくる情報は遺伝子と呼ばれています。この遺伝子はATGCの4文字で示されるDNAという物質でつくられています。

「ゲノム」とは何かと申しますと、体の中に持っている人間なら人間、私、線虫という実験動物を使っていますが、線虫なら線虫をつくり出すDNAの暗号ですね。全ての暗号のことをゲノムと言います。ゲノム編集は、このDNAを切ったり、つないだり、新しいDNAを入れたりすることを言います。

今回受賞されたお二人は、このゲノムを編集するための道具・ツール、CRISPR/Cas9、平仮名で「く

りすば一きやすないん」の開発を行いました。彼女たちが開発した「CRISPR/Cas9」は、より簡単に早く、安く、正確にゲノムを編集できちゃうツールです。このツール、もともとは細菌バクテリアの研究から始まりました。ゲノムの研究とは一見、縁遠い細菌の、バクテリアの研究から始まりました。お二人はバクテリアがウイルスから身を守る仕組みを研究していて、2011年に共同研究を始めました。このときバクテリア細菌の研究者が目にしたのが、CRISPRです。このCRISPRは clustered regularly interspaced short palindromic repeats と呼ばれていて、一言で言いますと「ATGC、ATGC」などのパターン化された連続の配列のことを言います。繰り返し配列というものを持っています。この配列は1987年に石野教授、現在は九州大学の教授が大腸菌のDNAを調べているときに発見した繰り返し配列。繰り返し配列とは、先ほど申しました「ATGC、ATGC」などのパターン化された連続の配列です。このパターン化されたクリスパー配列というDNA配列があって細菌が、バクテリアが自分の細胞の中に取り込んできたウイルスを攻撃するときその配列が使われて、入ってきたウイルスを記憶します。しかし、その仕組みは不明でした。シャルパンティエ博士は、細菌では入ってきたウイルスDNAをCas9という、たんぱく質が切ってしまうことに気がつき調べることにしたそうです。このCas9とは CRISPR associated proteins、CRISPRに関連した、たんぱく質です。文字だけだと少し難しかったので、図を使って分かりやすく説明します。

Cas9について調べていくうちにバクテリア、細菌がウイルスから身を守る仕組みであることが分かりました。通常、ウイルスが細胞に感染するとウイルスのDNAが細菌の中に侵入します。そうするとそのDNA、異物ですので「ばらばらにするぞ」ということで、Cas9というDNAを分解する酵素が働きます。ばらばらにされたウイルスのDNAが細胞の中でゲノムのCRISPR配列という繰り返し配列、DNA配列に挟み込まれるように、ゲノムDNAの中にウイルスのDNAが、自分の細胞のDNAの中に組み込まれるんですね。このウイルスが「覚えたぞ」というふうにこの細胞が自らのDNA、ゲノムの中にウイルスのDNAの一部を組み込んで覚えるんですね。ウイルスのDNAの一部を細菌のDNAに組み込むと。それによってその細菌、細胞がウイルスを覚えるんですね。そうするとどうなるかというと、同じウイルスが細菌、バクテリアに再び侵入してきたときには、取り込んでおいたウイルスDNAをガイド役として使って、今度はウイルスDNAをばらばらにするという仕組みが働きます。

図を使って説明しますと、これは1回、ウイルスを覚えた細胞では、同じウイルスが感染したときに再びウイルスDNAが侵入してきます。そうすると「こいつ、また来たな」ということで、細菌の細胞の中のゲノムDNAからCRISPR配列に取り込まれたウイルスのDNAの一部が取り出されて、Cas9というたんぱく質と一緒にウイルスのDNAにくっついて、ウイルスのDNAを迅速かつ簡単、正確にばらばらにすることができるんですね。しかも先ほど、一度取り込んだウイルスのDNAをガイド役、これがここにくっついて「これを狙え」というふうに標的にできるので、その部分を使うことで正確にウイルスのDNAをばらばらにすることができます。

ダウドナ先生とシャルパンティエ先生は、このガイド役の部分の配列を変えればウイルスに限らず様々な生き物のDNAを操作できると考えました。そこで、このガイド役のRNAを改良してDNA配列からできてくるのがRNAですけれども、それを改良して人工的に入れたい配列や、取り除きたい配列を操れるようにしたのがCRISPR/Cas9です。

2012年の発表以来、簡単に安く、早く、正確に遺伝子を操作できるので爆発的に使われるようになりました。

ここからゲノムを編集するツール、CRISPR/Cas9を使った実験例、実際の実験での使用例を少し紹介します。少し専門的ですが、そういう専門的なところに御興味のある方はぜひ御覧ください。

まずCRISPR/Cas9法、特定の遺伝子に張り付くガイドRNAというものを人工的に作ります。Cas9たんぱく質、これがDNAをばらばらにするたんぱく質ですね。編集したい細胞に注入します。そうするとガイドRNAはCas9、この水色の部分、青色の部分がCas9と呼ばれるDNAを分解する酵素ですね。

これがガイドRNAとくっついて、RNAの端がヘアピンと言って、髪留めのような構造をつくって、Casと  
呼ばれるたんぱく質に刺さります。もう一方のRNAの端っことは、出会うDNAと相互作用します。CRISPR/Cas9の複合体がゲノムDNAに沿いながら進んで、PAM配列と呼ばれる特徴的な短いDNA配列に出  
会うたびに、そこにくっつきます。このPAM配列とは、protospacer adjacent motifと言いまして、NGG  
で出来上がってくるDNA配列です。わずか数塩基ですけれども、Cas9がDNAをつかまえるのに必要です。  
PAM配列をつかんだCas9は、二重らせんのごく一部を解きほぐします。そこにガイドRNAが滑り込んで、  
くっつく配列を探し回ります。くっついたらCas9がDNAを2つに切断します。プチッと切ってしまいます。  
切断され修復される際にミスが起きて、遺伝子の機能を破壊することができます。ノックアウトとは破壊という  
意味です。

CRISPR/Cas9を使った研究が世界中で行われていまして、例えば代表的なモデル生物である酵母や  
ゼブラフィッシュ、ショウジョウバエ、私が研究に使っている線虫や、シロイヌナズナ、植物ですね、マウスな  
どが使われています。

例えば線虫を使った当研究室の実験例を紹介しますと、ある遺伝子、例えばCE46、CE11.2という遺  
伝子をCRISPR/Cas9で遺伝子を切ってしまう。その方法として、この線虫にCas9たんぱく質とガ  
イドRNAを注射で入れます。ガイドRNAとCas9が働くと遺伝子をチョコチョコと2か所、ガイドRNA  
を設計していて、2か所がチョコチョコと切れてしまって、ここの部分がなくなってしまうんですね。遺伝子機  
能が失われます。そうすると遺伝子に異常を持った線虫変異体というものをつくれます。この変異体、通常の線  
虫は15℃で、2℃に置くと冷たいところでも生き残れますが、この変異体は死んでしまいます。ちょっと専門  
的な説明をいたしました、ここからはより一般的なお話をさせていただきます。

2019年9月に「解禁ゲノム編集食品」ということで、「食卓への影響は」ということで、NHKのクロ  
ーズアップ現代で紹介されています。実際にゲノム編集でつくられた、人工的につくられた食品が実際に市場に出  
回ってきております。まだ出回っていないものも、もちろんたくさんあります。どういう食品がゲノム編集でつ  
くれるかと言いますと、例えば養殖しやすい鯖、血圧を下げる成分が多いトマト、アレルギー物質が少ない卵、  
収穫量の多い稲、筋肉の量が多い真鯛、食中毒を起こさないジャガイモなどが実際に作られました。

生命の設計図を改変してつくられるゲノム編集食品。2019年9月、国内で解禁され、既に販売されていま  
す。ゲノム編集の技術を使えば肉厚の真鯛や栄養価が高いトマトなどを短期間で開発することができ、私たちの  
食卓に大きな影響を及ぼす可能性があります。果たして、その安全性は。そして従来の遺伝子組み換え食品との  
違いは。日本に先行し、既にゲノム編集食品の流通が始まっているアメリカの動向、ヨーロッパ、新たな技術と  
の向き合い方をこれから少し紹介します。

まず、最初に興味があるのが安全性だと思います。安全性につきましては同じくNHKクローズアップ現代の、  
販売のルール策定に関わる明治大学教授の中島先生の解説から少し引用させていただきます。

従来の遺伝子組み換え食品は別の遺伝子を別の食品に入れるという、新しい遺伝子を入れるという技術で出来  
上がってきました。今、遺伝子組み換えによって出来上がってきている食品は、日本国内でも世界中でもたくさ  
ん販売されています。

この遺伝子組み換え食品に関しましては、安全性審査が日本国内では義務づけられています。一方、ゲノム編  
集で出来上がってきた食品とかに関しましては安全性審査は不要、要らないと言われております。ただ、要らない  
ですけれども実際には安全性審査を要求することはあります。厚生労働省では、企業への届出を求める前に事前  
相談のシステムを敷いておりまして、まず事前相談をしてもらおうと。そこで専門家の手によって、本当に安全  
性審査は必要なのか、本当に品種改良に比べてリスクが上っていないのかをチェックすると。そして安全性  
審査が必要であると。さらに遺伝子組み換えに該当することになれば、厳密な安全性審査を要求することにな  
ると。このことから安全性は担保できると厚生労働省はしております。

実際に海外ではどうなっているかと言いますと、アメリカでは従来の品種改良と区別できないとして、安全性

審査は必要ないと言われていました。どういうことかと言いますと、いわゆる自然界で紫外線を当てるなどすると、自然に植物なり動物なり、ゲノムDNAに異常が入るんですね。その異常は、悪くなる異常もありますが、実際にはより食べやすい食料とか、よりアレルギーの少ない卵とか、におわない納豆とか、そういうものは品種改良から出来上がってきたんですね。品種改良は、自然が起こした遺伝子変異。ゲノム編集は、人間の手で起こした遺伝子変異。いずれにせよ品種改良を繰り返していくと、いつかはゲノム編集と同じような生き物が出来上がってくるということで、区別できないことから安全性審査の必要はないと言われていました。

一方でEU、ヨーロッパでは、遺伝子組み換えと同じ規則を適用すべきだということで、安全性審査を必要としています。2018年時点ですけれども、国によっていろいろと安全審査の基準が異なります。ここについても今後、いわゆる化学分野だけではなくて、法律の分野、倫理面の分野などでも議論していく必要が、まだまだあると考えられます。

さて次に、ゲノム編集技術を使うと人に対する医療や医療につながるような基礎研究もできるのではないかとされており。実際に人の、生命倫理専門調査会は2016年4月22日、ゲノム編集技術で人の受精卵を操作することについて、基礎研究に限って認める報告書をまとめています。将来的に不妊治療や遺伝性疾患の予防につながるような研究に道を開く内容であるとも考えられます。ただ、臨床応用や改変した受精卵を子宮に戻すことをめぐっては、安全性や倫理面で問題が残るとして認めませんでした。報告書などによると、受精卵で働く遺伝子を調べる研究などが生殖補助医療や遺伝性の難病の予防開発のほか、がんなどの新たな治療法開発といった研究に広がる可能性があるとして、基礎研究は認めました。基礎研究であっても親が望んだ能力や容姿を持つ、いわゆるデザイナーベビーにつながるような特定の才能を高めるといった研究については倫理的な問題が残ると指摘し、臨床医療や改変した受精卵を子宮に戻すことは、狙った遺伝子以外が改変されるリスクや次世代に影響を残すとして認めませんでした。これは、2016年4月22日の朝日新聞デジタルに載った竹石涼子氏の文章から引用させていただきました。実際に「ゲノム編集、遺伝病を防ぐ副因か、多様な功罪、線引きは」ということで、もう一度、図を使って紹介します。こちらも朝日新聞デジタルから引用しております。

ゲノム編集で受精卵の遺伝子を書き換える方法として、まず精子と卵子を体外受精させます。その受精卵に関しまして、ゲノム編集で遺伝子を書き換えます。書き換えた遺伝子を子宮に戻して、そしてゲノム編集ベビーが生まれてくるというようなことが将来起きるかもしれません。こういう将来考えられる活用の例として、例えば遺伝病になることを防ぐ。もともとの遺伝子があるとして、その遺伝子が遺伝病の原因となる部分を持っているとします。この部分を大多数の人と同じタイプに書き換えることで遺伝病を発症しないタイプに置き換えることができます。それによって病気のリスクを減らす。例えばアルツハイマー病やがんや糖尿病などのリスクを減らすことができます。一方で病気とは無関係な応用、筋肉量を増やすとか、持久力を高めるなどといったことも行われるかもしれません。これがいわゆるデザイナーベビーですね。DNAドーピングに当たるかもしれません。

主な課題として、今の技術は精度が低く、ほかの病気になるおそれがあります。影響は子孫にも広がります。子供の能力強化に応用され格差の拡大が起きるかもしれません。

基礎研究として、今申しましたような、人を使って実際のデザイナーベビーをつくるのは法律で禁止されています。一方で基礎研究に関しまして、例えば京都大学IPS細胞研究所の堀田先生らは、筋ジストロフィーの患者さんからつくったIPS細胞にCRISPR/Cas9を使うことで原因遺伝子であるジストロフィーの遺伝子を変異させ、改変させ、正常な細胞にすることに成功しました。これはIPS細胞のレベルですね。次世代の子供の遺伝子を編集することも可能になるかもしれません。そのときにどのように使うのかが問題でしょう。そういう場合には、実際に化学だけの問題ではないと思います。CRISPR/Cas9は万能ではありません。時には予定外の場所を切断することもあります。

例えば実験生物でCRISPR/Cas9を使ったところ、目的の遺伝子以外に変異があり原因不明な異常が生じるという報告が出ております。実際に私の研究室でも線虫でCRISPR/Cas9を使って、目的の遺伝

子以外に恐らく変異が入って、原因不明な定温に対する耐性の異常が生じたことも実際に見つかりました。そして、改良が進むほどこのテクノロジーを取り巻く倫理的問題はますます顕在化すると考えられます。

例えばデザイナーベビーはどう考えるべきでしょう。善悪の境界線をどこに引くかを決めるには、化学だけでは不十分です。政策立案者や一般大衆を巻き込んだ議論が必要です。なぜなら近い将来、問題はCRISPR/Cas9でできるかどうかではなく、やるべきかどうかという局面に向かうからだと考えられます。これらの文章は、それぞれ赤のサイトから引用しましたが、まさに近い将来、本当に人のゲノム編集ができるかどうかという議論ではなくて、やるべきかどうかという局面になるかもしれません。

さて、ここから少し話題が変わります。ところで今回のノーベル化学賞は女性研究者、お二人が受賞しました。先ほど御紹介しましたエマニュエル・シャルパンティエ先生とジュニファー・ダウドナ先生です。お二人とも女性研究者でございます。実はこれまで女性のノーベル賞受賞者は、キュリー夫人は伝記があったりしますが、有名ですけれども、女性研究者でノーベル賞を受賞される方はかなり少なかったんです。ところがここ5年の間に、近年の間に女性研究者のノーベル賞の受賞がどんどん増加しております。それはいろいろな要因があると思います。例えばお二人、2016年にロレアル・ユネスコ女性科学者賞、女性科学者に対する賞も受賞していて、女性研究者をより応援しようという世界的な流れも大きいかもしれません。

実は甲南大学、私たち甲南大学大学院自然科学研究科においても、大学院生2名が2019年と2020年にロレアル・ユネスコ女性科学者の、先ほどのお二人は世界全体の科学者賞でしたが、お二人は若い女性研究者に向けた日本奨励賞を受賞されました。こちらが岡畑美咲さん。2019年、当時大学院生でした。岡畑さんです。中央が奈良哲さん、日本ユネスコ国内委員会副事務総長。こちらがジェローム・ブリュア、日本ロレアル株式会社社長。こちらがローラン・ピック、在日フランス大使様ですね。そして岡畑さん。岡畑さんだけじゃなくてさらに2020年、申請したときには大学院生だったですけれども、特別研究員の高垣菜式さんが2年連続でロレアル・ユネスコ女性科学者日本奨励賞を受賞しました。生命科学分野において連続受賞は、私立大学では全国初です。全国の大学を合わせても、生命科学分野の連続受賞は東京大学、名古屋大学、北海道大学は病院も含めています。甲南大学は3番目、もしくは4番目でございます。このように甲南大学の女子大学院生の活躍は近年、目覚ましいものがございます。

本日、ここまで紹介しましたCRISPR/Cas9は、将来的にはゲノム変異を人工的に起こすことで生き物の多様性にも関与してくるかもしれません、もしかしたら。そのような多様性に関与する技術が、女性研究者という科学コミュニティの多様性の中から創出されたのも何かの御縁があるかもしれません。私たちは今後も研究を通じて、知の探求を続けられる成熟した多様性社会をぜひ応援していきたいと思っております。

本日は、ノーベル化学賞のCRISPR/Cas9の解説ということで最後までお付き合いいただきまして、誠にありがとうございました。心より感謝申し上げます。以上です、ありがとうございました。

【大神】 御紹介ありがとうございます。研究員の大神隆幸と申します。本日はよろしく申し上げます。ちょうどブラックホールの研究をしているということでやらせてもらうことになりました。

タイトルは「SFの世界だったブラックホールの存在が証明される時代へ」とタイトルになっています。このタイトルのとおり、昔、ブラックホールが理論的に考えられていたんですけど。その当時は、「こんなものあるわけがない」ということで、あくまでSFの世界だったんですけども。それがどんどん観測されたりすることで、本当にブラックホールがあるんじゃないかということで観測的に証明されてくる時代になりました。そういう話を今回させていただけたらと思います。

2020年ノーベル物理学賞なんですけれども、今回、この3人が取りました。ロジャー・ペンローズさんとラインハルト・ゲンツェルさんとアンドレア・ゲッズさんですね。一番左のロジャー・ペンローズさんが理論の方で右二人が観測の方になります。今回この3人のノーベル物理学賞を取った受賞理由なんですけれども、英語でいうと *The darkest secret of the universe*. 日本語に訳すと「宇宙の最も暗い秘密」と格好いいタイトルになっています。ざっくり言うと、これはブラックホールの研究で今回、物理学賞を受賞されたということです。

この発表が日本時間の10月6日、午後7時ぐらいだったんですけども、去年が宇宙に関してのものだったので連続して今回、宇宙のことになったので物理学者、特に僕なんですけれども、びっくりしたところになります。

それぞれの方がどうして受賞されたのかということをござっくり説明しますと。まずペンローズさんですね。理論家です。ブラックホール形成が一般相対論の確固たる予測であることを発見。ということになっています。どういうことかということ一般相対性理論が正しいとするとブラックホールがあることはしょうがない。絶対にできてしまうということをおっしゃったわけです。なので、今のところ一般相対性理論が正しいとされてきているので、「じゃあ、この世にブラックホールがあってもいいじゃないか」ということを言った方です。あくまで理論の話なので、あるかどうか分からないですけども、右のお二方、ラインハルト・ゲンツェルさんとアンドレア・ゲッズさんが、天の川銀河、私たちの住んでいる天の川銀河の中心に超巨大なコンパクト天体、コンパクトというので、めちゃめちゃ重たくて、めちゃめちゃ小さい天体が本当に存在するということを観測的に示したということになります。つまり、ブラックホールをちゃんと見つけたというわけではないんですけども。ブラックホールとしか考えられないような天体を見つけたということで、ブラックホールに関してのノーベル賞を受賞されたということになっています。

一番左のペンローズさんなんですけれども、聞いたことがある方はいらっしゃると思いますが、この方は数学者なんですけれども有名になります。どういうことを数学者としてやってきたのかということ、不可能立体ですね。こんな見たことあると思うんですけども、この一番左下のペンローズの階段。どれだけ登っても、てっぺんに着かないような、こういう階段を考えたり、この三角形ですね、こんなものは実際には組めないんですけども、こういう三角形を数学的に考案したという方になっています。ほかに、平べったい面を1つ、または2つ、複数でもいいんですけども、多角形を用意して、その多角形を平面にペタペタペタと貼っていく。そうやって平面を埋めていくという数学的思考があるんですけども。それをペンローズ・タイルという名前をつけて、2種類のひし形だけで、この平面を埋めていくという、このタイルを考案した方でもあります。これでロジャー・ペンローズさんの紹介なんですけれども。

今回のノーベル物理学賞のキーワードは、一言で言うと「ブラックホール」です。このブラックホールなんですけど、ブラックホールは何なの、というのをまず御紹介します。一番よく聞くのは、めちゃめちゃ重たいというものです。ほかに、光も脱出できないぐらい重力が強い。これも後できちんと説明します。図がよく出てくると思うんですけども。真っ黒に描かれることが多いです。簡単にいうと、この3つ

なんですけれども、せっかくなので、もう少し詳しく歴史的背景も含めて、もう少し詳しく紹介していきます。

このブラックホールの紹介をするに当たって、どうしても一般相対性理論を話さないといけないので、まずそこからお話しします。

一般相対性理論は1915年11月にアルベルト・アインシュタイン、有名なアインシュタインですね。この方が提唱した理論になります。この中でアインシュタイン方程式というものがあるんですけれども、こんな式です。この式は何を表しているのかというと右辺が物質の状態ですね。エネルギーがどんな状態になっているのか。どんな状態で物質が分布しているのか、というものを表したものになります。その左辺が時空のゆがみを表している。時空のゆがみと物質の状態がイコール、「物質があれば時空がゆがむよ」ということを言っているんですけれども。この式が何を言っているか。物質があれば、その重力場を記述できると言っているんですけれども。なので重力場が時空のゆがみだと言っているんです。しかし、普通の人からすると時空のゆがみと重力場というのが引っかけないので「何を言っているんだ」ということになります。少し、時空のゆがみと重力がどんな関係にあるのかというのを遡っていきたいと思います。

まず平坦な場所で、最短距離を結ぶ線と書いているんですけれども。普通に地面があったとして、「そこを真っすぐに歩いてください」としたときに、その真っすぐな線を赤い矢印で書いたんですけれども、外から見た人にとっても、真っすぐですね。これが中にいる人、つまり平面を歩く人にとっても真っすぐですし、外にいる人、我々からしても、これは真っすぐに見えます。これが時空が平坦ということですね。

対して、地球のように平坦じゃない場所があります。地球を外から見ると平坦じゃないように見えます。こんな場所で、どんな最短距離を結ぶ線ってどうなるのかというと、この矢印のように書いているんですけれども、例えば地球を生きる私たちからすれば、この日本からヨーロッパに真っすぐ行こうとしたときに、私たちからすれば歩ける距離じゃないんですけれども、歩くとすれば真っすぐ歩いていけた。海も渡らないといけないんですけれども、取りあえず真っすぐ行こうと思えば行ける。私たちからすれば真っすぐ。ただ宇宙から見たら、そうではありません。地球上にいる人たちからして真っすぐだとしても、宇宙から見ると、これは「弧」の形になるんですね。ということで、地球の中にいる人は真っすぐに見える。ただ外から見ると、これは真っすぐに見えません。なので、どこで見ているのかということで、それが真っすぐなのか、真っすぐじゃないのかということが変わってきてしまいます。これが相対性理論。一般相対性理論、核になっているところなんですけれども。

これでアインシュタイン方程式に少し戻ってみます。アインシュタイン方程式は、時空のゆがみと物質の状態がイコールですと言っていました。この図のように、取りあえず平坦な場所があったとして、そこに重たい地球みたいな天体を置いたとします。すると、その周りの時空がこのような形でグワッと曲がってしまいます。この図、本当は正しくないんですけれども。想像するのに優しいので持ってきました。こんな感じで地球の周りで空間がゆがんでしまいます。時空が曲がってしまいます。すると、この時空上を真っすぐ進んだとしても、さっき言った地球上で真っすぐ進んでも弧のように見えるのと同じように、中の人、このゆがんだ時空を真っすぐに進んでいると感じているんですけれども。外から見たら曲がってしまいます。この時空上を進んでいるので曲がってしまいます。これがあたかも外の人からすると、地球の重力で加速度を受けて曲がってしまったというように感じるわけです。外の人からするとですね。なので、それがあたかも重力を受けて曲がっているかのように感じているということで、時空の曲がりか重力の正体ということになります。

ここで、このスライドに戻ってくるんですけれども。アインシュタイン方程式は、この物質の状態。地球が地球であるわけですね。物質がどんな状態か、エネルギーがどんな状態であるか。「その周りで時空が曲がりますよ」というのを記述している式になります。なので物質の状態が分かれば、周りの時空の状態が分かるので、時空の状態が分かれば、どんな重力をしているのか。重力場をしているのかが分かります。なので、これを解きたいんですけれども、一見シンプルな式に見えるんですけれども、非常に解くのが難しいです。なんですけれども、さっき言った一般相対性理論を出したのが1915年11月なんですけれども、これを2か月で解いた人がいます。ある特定の条件なんですけれども、最初の厳密解として、1916年1月カール・シュバルツシルトさんと



いう人が、2か月でこれを解きました。課した条件というのは、球対称、静的、真空というものです。球対称は特別な方向がないということですね。静的は時間で変化しない。ずっと同じ時空場をしますよというものです。さらに真空、地球があったとしたら、その周りは何もない。周りの空間だけの重力場を記述しますよ、という条件。と言って解いた。一番簡単な条件なんですけれども、2か月で解いちゃったということです。

つまり、この解を使うと星の周りの重力場を記述することができます。なので、この人すごい人なんですけれども。ただ問題があったわけですね。特にシュワルツシルト半径と呼ばれる量が出てくるんですけれども、これはGとC、ニュートンの万有引力定数と光の速度、これは両方とも定数なので、重力源にしている地球の質量だけで周りの重力場が決まります。

ほとんどの場合は、シュワルツシルト半径に対して、例えば地球の半径とか太陽の半径というのがシュワルツシルト半径に比べて、非常に小さいので、相対論的な重力の影響としては、非常に小さいものです。なので、後で説明する問題点は出てこないんですけれども。「半径が小さかったらどうなる」という話になります。拡大してシュワルツシルト半径が点線で書いています。それよりも星の大きさが小さかった場合に、どんな影響があるか。シュワルツシルト半径より外側に光源を置いて、内向きの光、外向きの光というのを2種類用意しました。これをどんどん近づけていくとどうなるでしょう。内向きの光は、どんどん重力に従って吸い込まれていくので問題ありません。ただ外側の光は、重力に引っ張られるので、外に行きにくくなっていきます。シュワルツシルト半径のところを出た光はどうなるでしょう。これは、内向きの光は重力に従っているので問題ありません。ただ外側の光はシュワルツシルト半径のところでは、重力が強すぎて外に出ることができなくなってしまいます。さらに内側でどうなるかという、緑色の光はもともと外向きに光を出したと定義していたんですけれども、外側に出しても内側向きのベクトルになってしまいました。という訳の分からないことになってしまいました。

シュワルツシルト半径より内側の光源は、光を外に出すことができないので、外にいる私たちの元に、その中の光が届くことは絶対にならないことになります。つまり、中の光が見えないので、真っ黒になってしまいますね。なので真っ黒な穴として、ブラックホールと呼ばれるようになっていきます。

これは宇宙に存在していると考えられているので、宇宙に浮かぶ黒い穴。ブラックホールと名づけられていました。特に光が出てこれないということは、その中から物質が何も絶対に出ないということになってくるので、中の情報は知ることは絶対にできません。なので、シュワルツシルト時空に関して言えば、シュワルツシルト半径で貼られる球面になっているんですけど、この球面のことを事象の地平面、イベント・ホライズンと呼ぶこともあります。

どうすればシュワルツシルト半径より天体が小さくなるのかというのを考えないといけないんですけれども、普通の星というのは、膨張する力と重力で釣り合っています。重力があるのはいいんですけれども、膨張する力は何があるのかというと、熱的なエネルギーですね。例えば空気の入った袋を温めると。パンパンに膨らむと思うんですけれども、熱があるものは、どんどん膨らもうとします。そういう感じで星は普通、熱エネルギーを持っているので膨張しようとしてしまいます。なので、それが釣り合って、普通は潰れないんですけれども。

星が持つエネルギーというのは有限なので、どんどんエネルギーを使ってしまって、膨張する力が弱くなってしまいます。すると重力のほうが大きくなってしまって、めちゃめちゃ重い星はどんどん潰れてブラックホールに入る。超新星爆発を起こしてブラックホールになってしまうということです。

ここで問題点にもう一回、戻っていくんですけど。シュワルツシルト解というのは、この式を見ると、ちょっと分からないかもしれませんが、 $R$ イコール0とか、 $R$ がシュワルツシルト半径、ちょうどその部分で計量が発散するという問題がでてきてしまいました。これはどういう問題かということ、ゼロ分の1という、算数のときにやっちゃだめと言われたものだと思うんですけど。ゼロ分の1というところが出てきてしまって、そこでは物理は使えないよという、特異点と呼ばれるものなんですけれども、そういう場所が出てきてしまいます。

右下に書いてるんですけど、後の研究でシュワルツシルト半径の特異点というのは、座標の取り方の依存性なので、後で消せるよということが分かったんですけれども、どっちにしろ $R$ イコールゼロの点の特異点というの

は、消せないことになってしまいます。その点で物理は使えない。変な点があるということになってしまいます。

なので、この多くの研究者は数学的に、こんな解が得られただけで現実にはあり得ないことをアインシュタインさんも言っていたそうです。「特異点なんて存在しようがない」ということを言っています。なので、ブラックホールの存在というのは、あくまで算数の話で、SFの世界でSFの域を抜け出せなかったということになっています。それに対して、ペンローズさん、ホーキングさん。今回受賞したペンローズさんと、映画にもなったスティーブン・ホーキングさん。この二人が物理的に妥当な状況、エネルギー密度が正とか、光も出てこれない領域が存在する。この2つの仮定だけで、特異点が必ずできてしまう。一般相対性理論の枠組みでは、絶対に特異点が存在するということを行いました。

つまり重力崩壊して潰れる星は、絶対、特異点を持ったブラックホールになるということを行ったわけですが、ざっくり言うと、普通の場合を考えて、一般相対性理論であり得そうな状況を考えて、特異点が絶対に出てきてしまうと。いつか特異点を生成してしまう。つまり「ブラックホールが絶対にできちゃうんだよ」ということを言った方たちになります。この後に宇宙にも応用して、宇宙の初期、「宇宙の最初は何なんだ」という特異点ということを実証した方たちになります。

彼たちがブラックホールを考えたわけではないですが、彼たちの考えているブラックホールの概念というのは、こんな感じになります。さっき紹介したのと一緒ですね。中心に特異点があって、周りにイベント・ホライズン、事象の地平面があるという形になります。

これは難しい図なんですけれども、さっき光が外に出てこれないという話をしたときの図をざっくり書かれたものになっていて、下から上のほうに向かって時間が進んでいるんですけれども、右上に光円錐と書いているものがあります。これは、三角錐が2つつながったものになっていますが、内向きの光と外向きの光。三角錐なんでも左側にある三角錐のこっち方向が外向きに出る光。こっち方向が内向きに出る光になっていて、それがどんどんブラックホールに傾いていくんですね。なので両方とも内向きになっちゃうので「光が出てこれないよ」というのを示した分になります。こんなブラックホールなんですけれども、ブラックホールが一般相対性理論の範囲で絶対にできちゃうよということがあったとしても、ブラックホールが本当にあるのかというのは、また別問題になります。

ただ、1950年代にクエーサーという天体が発見されて、ブラックホールじゃないのかということの言われていました。クエーサーって何かというと、クエーサステラ、準星の略になります。めちゃめちゃ遠くにあって、めちゃめちゃ明るい星になります。その明るさがどういふものかということ、普通にある銀河の100倍程度のエネルギーを放出していると言われていました。そんなめちゃめちゃ大きなエネルギーをどうやって出しているのかと考えた場合に、ブラックホールみたいに、変な天体を考えないと、こんな説明できないよねということでこのクエーサーのところにブラックホールがあるんじゃないかということが大昔から言われていました。

今回見つけたものをここにありますが、銀河ということは、私たちの銀河。天の川銀河を考えたときにどうなるのかということ、そこにもありそうだということが昔から言われていました。天の川銀河の中心、これはいて座エー・スターと名前がつけられているんですけど。そこに強い放射元、フレアと呼ばれる強い放射元があることが分かっていた。強い放射元があるということは、何かしら重たい天体があるということなので、これがブラックホールじゃないかと言われていたわけです。

さっきの天の川銀河の中心を見てやれば、割と近いので見てやれば見つかるんじゃないかという話になるんですけれども。観測するときの問題点として、まず見える星は全て、自分で光っています。それに対して、ブラックホールというのは、さっき言ったとおり、中にある光源は外に光を放せないで、真っ暗に映ってしまう。なのでブラックホールは、自分で光らないので、このままだと見えません。それに対して、どうしたかということゲンツェルさんとゲッツさん、ここから出てきました。この人たちは、天の川銀河の中心に超コンパクトな天体があると言っていたんですけれども。どういふことをやったかということ、ものすごい小さい領域に、ものすごい大きな質量があるということ、これを両方満たす天体がある。つまり超コンパクトな超大質量ブラックホールを発

見たとやっているんですけども。あくまでこれは、ブラックホールを見たというより候補ということにしています。

どうやって見つけたのか。さっき言ったとおりブラックホールは暗いので見えません。天の川銀河の中心に、点線のようにブラックホールがあったとしても、私たちからすると暗いので見えません。ブラックホールが見えないのならば、周りの見える星を見てやろうということをしました。何を使うかという、大きな望遠鏡を使いました。VLT, 8.2メートルの鏡を持つVLTと10メートルの鏡を持っているKeckという望遠鏡を使いました。距離は天の川銀河の中心にあるので、大体2万6,000光年先のものを見えています。さっき言ったとおり、周りの星を見ているので、星の位置を精密に測定しました。その結果がこれです。名前のついているS0何とかとついているものが、彼らが観測した星なんです。

1995年からずっと観測しているんですけども、これ動画なんで映してみます。

(動画放映)

このように動いていることが分かるんですけど、これを見ていると分かるんですが、星のマークのある中心の部分を中心にして、ほかの星も動いているように見えます。星の部分には、何も見えていないんですけども、この星のマークの重力に従って動いています。そのとおり、この中心には何かしらコンパクトな天体がある。さっき言った、これを発見したわけですね。特にS2と呼ばれている星ですね。これがすごい重要で軌道周期が約16年、すごい短いものになっています。非常に近くを通ります。近点でいうと17光時、時で表せるようになっているんですけど。それぐらい、すごい近いところを通ります。太陽から海王星まで約30天文単位なので、すごい近いことが分かると思います。このバツ印のところに「いて座エー・スター」があるよ、と今回言ったんですね。

さっきのS2なんですけれども、2002年と2018年に近点を通過しました。それで何がうれしいのかというと、視線速度と呼ばれる自分たちから、その星の方向を見たときの速度を横軸、時間、縦軸、視線速度をプロットなっていて、2002年と2018年、近点通過のときにもものすごい大きな変化をしていたんですね。これがすごい重要で、すごい大きな変化を示すということは、何かしらのパラメーター、今回特に中心の天体の質量にもよるんですけど、中心の質量がどれだけのかというのを精密に測定するために、大きな変化が目された。6,000キロメートル/秒というものの変化を示したんですけども、その変化を示すためには、その中心に重たい天体がないと駄目。それを量で表すと太陽の約4,000万倍の質量が見積もられました。

まとめるとS2がものすごい近くを通るので、それよりも小さいところに持っていく。小さい天体でなければいけません。それが大体、太陽系と同じぐらいです。それぐらいの領域に太陽の400万倍分の質量が要することで、ものすごいコンパクトな天体がここにあるんじゃないかと思積もることが出来ます。これが天の川銀河の中心に存在すると。こんなのを説明するためには、ブラックホールぐらいじゃないかと言われているので、これがブラックホールの可能性が非常に高いということになりました。

これで今回のノーベル賞をまとめると、一番左のペンローズさんがブラックホールは自然にできるといって、その右の2人がブラックホールの天体を見つけたということで、ブラックホールの存在をSFの世界から現実のものにしたという方たちになります。

ここまでがノーベル物理学賞の紹介なんですけれども、日本でもブラックホールの研究をいろいろやっているんで、僕の研究も併せて紹介しようと思います。

さっきこの図を出して、ゲッツさんとゲンツェルさんは、VLTとケックというヨーロッパの望遠鏡を使ったんですけども、日本には、すばる望遠鏡という8.2メートルの鏡がある望遠鏡があります。これを使って星を観測したというのが僕たちのグループになります。ちょうど、すばる望遠鏡はハワイにあって、ケックの天文台の隣にあります。

すばる望遠鏡で何がうれしいかという、視線速度を計るのに、すごい適しているカメラです。IRCSという分光装置があるんですけども、これを使うと、すばるを使うと位置決定精度は、そんなによくありません。

れども、視線速度をすごい精密に計ることができます。ほかのグループにも競走できるという能力があります。これを使って、僕たちのグループは論文を出していて、何をしたかというところと一般相対性理論の効果を検証したとなります。詳しく説明すると時間がかかるので飛ばします。

ほかにイベント・ホライズン・テレスコープ、これは日本のブラックホール研究ということではないんですけれども、日本人も参加している研究ということで紹介させていただいてます。イベント・ホライズン・テレスコープ、イベントホライズンとは、さっき言った事象の地平線ですね。これを望遠鏡で見てやろうという研究グループになります。どこを見たかというところとM87の中心を見ました。ここに、こんなドーナツ状の構造をしている天体があるということを見ました。これはブラックホールが中心にあって、その周りに光源があった場合、こんなふうに見えるよということが理論的に予測されていました。それをきちんと観測で示したという、すごい重要な結果になります。

最後に、重力波望遠鏡になります。これは大型低温重力波望遠鏡KAGRAという名前がついているんですけれども、これがブラックホール連星合体、ブラックホールが2つ以上あって、それがグルグルッと回って合体というイベントが実際に発見されているんですけれども、そういうイベントから出てくる重力波というものを検出しようとしている望遠鏡になります。これは、多分まだこのイベントに関しては、まだ検出されていないという問題がある。これは、2019年秋に完成したという、2020年2月25日に観測を開始しました。それより観測開始より先に、LIGO（ライゴ）とVirgo（バーゴ）が観測をずっとやっていたんですけれども、それに協働することで位置決定制度、この重力波がどこから来たのかというのを3台でやると、三角測量の原理でものすごい精密に、どこから来たのか計ることができます。

今の重力波の観測は終わってしまったんですけれども、次の観測プランは2022年後半ということで、次の観測が始まるとKAGRAは活躍してくれるんじゃないかと期待しています。

まとめると一般相対性理論からのブラックホールというのが、アインシュタインの一般相対性理論を基に考案されました。それに対して、ペンローズさんとホーキングさんが、このブラックホールの形成というのが自然に起きている。一般相対性理論を仮定すると、ブラックホールが自然にできるということを言いました。それに対して、ゲンツェルさんとゲッズさんは、実際にブラックホールっぽいものがあるということを観測によって示唆しました。さらに今回の最後に紹介した、現在のブラックホール研究では、直接撮像されたり、EHTによって、イベント・ホライズン・テレスコープによって視察をしたり、KAGRAはまだですけれども、LIGO（ライゴ）とVirgo（バーゴ）が重力波を観測することによって、ブラックホールの合体というイベントも確認されたりしています。つまり、ブラックホールというのは実際にあって、いろいろ観測が行われているということで、決してSFの世界じゃないということが今言われていることになります。

以上になります。ありがとうございました。