

甲南大学 総合研究所報

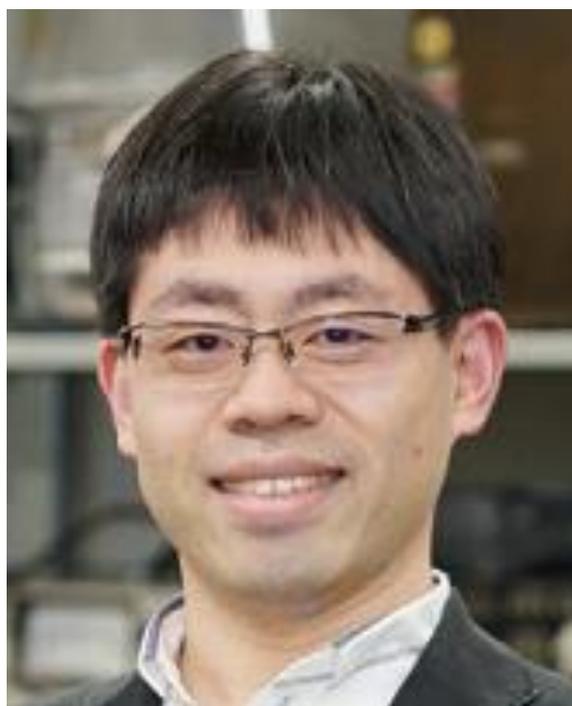
第75回 総合研究所公開講演会 (オンライン)

「甲南の教員が解説する Nobel Prize2021」

～ノーベル物理学賞～

講師 高吉 慎太郎 (甲南大学 理工学部准教授)

2021年12月10日 (金) 12:20～12:55 (Zoom 配信)



令和3年12月10日

甲南大学理工学部准教授 高吉 慎太郎

【司会】では、時間になりましたので、始めたいと思います。甲南の教員が解説するノーベル賞2021ということで、今日はノーベル物理学賞の解説を、昨年度、甲南の物理に来ていただきました高吉先生にお願いしたいと思います。それでは、よろしくお願ひいたします。

【高吉】御紹介ありがとうございます。理工学部物理学科の高吉と申します。よろしくお願ひいたします。

今日は2021年、今年のノーベル物理学賞の解説ということで、『「複雑」の中にある「秩序」』というタイトルでお話させていただきたいと思います。今年2021年ノーベル物理学賞は、こちらの絵に描いてある三氏に贈られました。左のお二人が真鍋淑郎さんとクラウス・ハッセルマンさんで、テーマが地球気候の物理的モデル化とその変動の定量化及び地球温暖化の信頼できる予測、一番右の方がジョルジョ・パリージさんで、原子から惑星のスケールにわたる物理系における乱れと揺らぎの協力現象の発見です。これは日本語だけ読んで、よく分からないと思うのですが、二つの非常に大きく異なる研究を併せて受賞したという形になっています。ノーベル財団としては、今年の大きなテーマとして複雑系の理解に対する画期的な貢献ということで、この二つの研究をまとめたわけです。

ここに使われている複雑系という単語なのですが、英語で言うとコンプレックスシステムですね。この複雑系というのは、一体何なのかという話なのですが、複雑な系のことです。読んで字のごとく。そうは言ってもよく分からないのですが、どういうものかという、例えば気候とか生態系、細胞、人間の脳、交通や通信、経済社会、ネットワークなど、多岐にわたる分野なのですが、実は、物理的に複雑系の正確な定義というのはなくて、何となくみんなそれぞれ思い思いに使っているような単語になります。一応、共通する特徴といたしましては、多数の部分、構成要素ですね。多数の構成要素と環境から成っている。物理の問題では、環境を無視する、つまり閉じた系というのを考えることも非常に多いのですが、複雑系では要素がたくさんあって、さらに環境というものも存在するという系を考えることが多いです。それら構成要素、部分の間には、依存関係や競合関係といった複雑な相互作用がある。それらが互いに関係し合って、何か現象を引き起こしているというような系を考えます。

さらに、ほかの特徴といたしましては、複雑な相互作用がもたらす非線形性があります。物事は線形、つまり、やったらやった分だけ、その分だけ増えるというような反応をすることも多いのですが、複雑系は、強い非線形性を持っていて、さらに秩序が自然的に発生する。ほかにも、創発性、適応性、フィードバックのような性質を持っている。このような系に迫るためには、統計物理学とか情報理論、気象学、経済学、心理学、生物学といった従来型の、これまで取り扱ってきた物理とはちょっと違うアプローチが必要です。学際的なアプローチですね。もちろんそれぞれの問題に応じて、それぞれの問題の研究の知見というのがたまっていますから、物理だけではなくて、そういうものと組み合わせて、何か得るところがないかというようなアプローチが必要になってくるわけです。

まず、初めの地球温暖化についての話ですが、地球温暖化の原因は、温室効果と呼ばれている効果になります。この効果自体は非常に歴史が古くて、これを初めて指摘したのは、1824年のフーリエだと言われています。太陽から放射、可視光線とか赤外線とか、いろいろ飛んでくるわけなのですが、それがいったん地表に当たります。地表に当たったら地表が温められて、その赤外放射があって、宇宙に熱が逃げていくわけなのですが、それが、星に大気というものがあることによって、そこで再吸収されます。そのことによって地球が保温されているのだと。もし、大気での再吸収がなければ、もっともっと地球は寒いはずなのだということを指摘するのがフーリエです。有名なフーリエさんですね。1896年にアレニウスは、温室効果ガスという

のを指摘しました。これは、二酸化炭素が特に赤外線吸収に大きく寄与しているということです。

それから60年ぐらいたって、それまでは、単にガスのスペクトルのこのあたりに吸収があるといった話なのですけれども、この60年代になって、真鍋さんが大気をモデル化して、それを計算機を使って、定量的に評価しようという試みを始められたということです。計算機を用いて、当時のスーパーコンピューターを用いているのですけれども、60年代のスーパーコンピューターは当然、今のスマートフォン以下の性能ですから、そんなに複雑な計算はできないわけです。なので、もちろんモデルといっても、本当に本質だけを取り出した、非常に簡単なモデルというのを扱う必要があるということになります。

現代では、このモデル化がさらに詳細を取り入れて、どんどん精緻なモデルになっています。現代のスーパーコンピューター、兵庫県にある富岳や、あるいは地球シミュレーター、こういうものを使って気象や気候の計算がなされています。

真鍋さんの初めに提唱した気候モデルというのは、本当に非常に単純なもので、1次元の空気中、つまり大気を1次元系で、しかも空気中だと思って単純化します。ただし、対流、垂直方向の輸送ですね、対流や水蒸気の潜熱の効果は取り入れて計算します。ですから、太陽から放射が来て地表に当たると、当たった地表から赤外線が出てきますが、一部が大気によって吸収される。また、大気で反射されることもあるかもしれません。さらに対流圏といって、このあたりの空気では対流が起こっていて、さらに水蒸気などの潜熱の効果も取り入れましょうという、1次元の割と単純なモデルを使って計算したところ、大気に含まれているCO₂の濃度をこのように変えると、地表付近での温度が、CO₂を増やすほど上昇するのだというようなことを指摘して、二酸化炭素が、実際に地球温暖化に寄与するということを指摘しました。

もちろん、コンピューターの性能というのは、ムーアの法則というのがあるくらいですから、年々性能がよくなるわけで、そのコンピューターがよくなったらよくなった分だけ、より複雑な詳細を取り入れたモデルというのが計算できるようになってきました。

初めてモデルを提唱した2年後には、大気海洋結合モデルという海洋の効果も取り入れようというモデルや、さらに6年後には、単に1次元ではなくて、3次元のモデルを取り扱おうというように、年々コンピューターの性能というのは上がっていますから、より複雑化したモデルを取り扱うことができるようになってきました。ただ、やはり一番最初は、複雑なものを扱うために、本質だけを抜き出した単純化が鍵になるという示唆が得られます。

真鍋さんの次に、ハッセルマンさんについて少し説明したいのですけれども、まず、気象はカオスと呼ばれている現象とされています。カオスというのはどういうものかといいますと、大気の時間発展は、決定論的ではなくて、ある瞬間の大気の状態が全部分かれば、その時間発展というものも、基本的には、もう決まっているはずだということになります。これを決定論といいますね。ある初期条件を与えれば、その後の時間発展はもう決まってしまうというのが決定論の意味です。しかし、気象などの複雑な現象の場合には、与える初期条件が僅かに異なるだけで、その後の時間発展が大きく変わってくるというようなことが起こりまして、こういうものをカオスと呼んでいます。

カオスの代表的で有名なものが、バタフライ効果と呼ばれているもので、標語としては、「ブラジルでチョウが羽ばたくと、テキサスで竜巻が起きる。」つまり、僅かに初期条件を変えただけで、その後に大きな時間発展の変化が起こってしまうというような効果が知られています。ここにお見せするのは有名な例で、二重振り子、振り子が二つ重なっているだけのものでも、これを振りし始めると、最初は一本に見えるのですが、二つの10のマイナス9乗ラジアンだけ初期条件を変えた2本の振り子を実は重ねています。少しずれてきました。ある程度時間がたつと、結構大きな運動の変化になるということで、最初は本当に10のマイナス9乗という微妙な違いしかなかったのですけれども、その後の時間発展で、運動が大きく変わってしまうということが起こります。

このように、初期条件が少し変わっただけで、その後が大きく変わってしまうので、ある意味で予測不可能だ

とすることができます。決定論的なものだけれど、複雑で予測不可能な変動。こういうものをどうやって扱うかといったときに、ハッセルマンさんは、こういうものは、確率的なノイズだと思ってしまおうと考えました。このような決定論的なものを確率的だとみなすというのは、すごく大胆な考え方の変更のように思うかもしれませんが、実は我々も普通に日常生活で行っていることです。

例えば、コインとかサイコロとかを投げるときって、サイコロを例えば投げ出したら、サイコロにどれだけの速度で、どのくらいの回転をかけて投げ出したかということさえ決まっていれば、その後の地面について、いろいろ当たって、最後どの面を上にして止まるかということは、もう最初に決まっているはずなんです。本当は決定論的な運動のはずなのです。サイコロを投げて、投げ出した瞬間の条件を決めれば、その後何の目が出るかというのは、もう決まるはずなんです。ところが、ちょっと投げ出す速度とか、かける回転とかが変わるだけで、出る目が全然変わってしまうわけです。なので、そういう意味で予測不可能なので、我々は、「サイコロは、目が6分の1ずつ確率的に出る」というように考えるわけですね。同じような考え方です。本当は決定論的なはずなのですが、複雑で予測不可能だから、こういうのは確率的なものだとみなしてしまいたいということを考えるわけなのです。

こういう乱雑なものが乗った運動で有名なのは、ブラウン運動と呼ばれているもので、こちら、下の画像なのですが、水中の微小な粒子は、顕微鏡で見ると何か揺れ動いているわけです。このように、揺れ動いていることをブラウンさんが発見しました。この微粒子は生き物でも何でもなくて、単なる無生物の微小粒子なのですが、こういったものが揺れているという発見に対して、1905年にアインシュタインは、これは媒質、今の場合は水ですけども、媒質が熱運動をしていて、その分子が不規則に衝突していることが原因だと指摘しました。

このような確率的ノイズが、時間発展に影響を与えるのですが、こういったものを記述する方程式、ブラウン運動などを記述する方程式として、ランジュバン方程式が挙げられます。これは、速度 v に関する、普通の運動方程式です。この最後の項がなければ、単に速度に比例する抵抗があるような、大学1年生で習う運動方程式なのですが、ここに、ホワイトノイズという確率的なノイズの力を加える。これをランジュバン方程式といいます。このような方程式ではランダムな力がありますから、短時間の変動はもちろん全く予測できないのですが、長期的な振る舞いを理解することは可能です。

例えば、ランダム・ウォークとって、ある原点からスタートして、その四方八方に、好きな方向に一定時間動いて、またその後は方向を変えてというようにランダムに動き回ると、もちろん、個々の動きというのは全く予測できないのですが、それが平均的にどのように広がると期待されるかとか、そういうことは理解できるわけです。こういうのは、実は金融とか経済を理解する上でも応用されていて、有名な例が、ブラック・ショールズ・モデルと呼ばれているものです。Sというのが株価とか金融商品の値段というものだと思うと、このような運動方程式で書いて、これをランジュバン方程式と見比べると、全く同じ方程式になっています。違いは、こちらはマイナス、抵抗力なのに対して、こちらはプラスで、基本的に、経済というものは成長するだろうという期待が込められているわけです。このような項に加えて、ランダムな上下があるというわけで、株価とか金融商品の価格を見ていると、毎日大きく下がったり上がったりして、全然予測できないように思うわけですが、ある決まった日、満期日と呼ばれていますが、その日に金融商品を売買する権利に価格がつくわけですね。毎日大きく上がったり下がったりするものの、例えば1か月後とか、1年後の売買権に、どうやって価格がつけられるのかという話なのですが、毎日ランダムに上がったり下がったりするかもしれないのだけれども、それが一定期間経った後にどうなっているべきかという振る舞いが理解できるので、そういうものに対して価格が決められるということになるわけです。

ハッセルマンさんは、気候もそのように取り扱えるだろうと考えました。今言ったようなことは、確率過程と呼ばれているものなのですが、1976年に確率過程の気候モデルというのを提唱して、カオス的な気象、つまり短期間では全く予測ができないような気象は、ランダムノイズだとみなしてしまって、長期的な影響だけを理解することに努めようと考えました。

この青線は、自然影響、火山が噴火したりして二酸化炭素濃度が変わったりとか、自然の影響で、二酸化炭素濃度が変わったりするというのはよくあるわけです。そういう影響を込めてシミュレーションしたのが、この青いグラフで、そこに人為的影響を乗せるとどうなるかということ、このように気温が上昇するというような傾向が見られましたということで、人間の活動が実際に観測した結果は、実は赤のほうに非常に近い。観測結果は黒線ですね。この観測結果は非常に赤のほうに近くて、人間の活動が地球の平均気温の上昇に影響を及ぼしているのだというように結論づけました。

ちょっとここで大きく話がかわって、これまで真鍋さんとハッセルマンさんの業績について説明したのですが、最後にパリージさんの業績について、ちょっと説明したいのですが、いきなり話が大きく変わって、スピングラスと呼ばれているものです。グラスってガラスなのですから、ガラスの性質って一体何でしょうか。固体というのを習うと思うのですが、固体って何ですかと聞かれたら、高校までは、「硬くて形が変わらないもの」という定義だと思のですが、大学ではもう少しきちんとした定義をしていて、「原子とか分子が規則的に配列していて、長距離にわたって秩序が存在するもの」という、ちょっと硬い言い方になります。言葉が硬いということで、硬い表現になるのですが、ガラスって硬いですよね。そんなドロドロと溶けて、熱したら溶けますが、室温で、いきなり窓ガラスがドロドロ溶け出したりはしない。硬くて、時間経過に対して非常に安定なのですが、実は、その中の原子とか分子の並びというのをよくよく見てみると、何か不規則に並んでいる。不規則な並びが固まっているような状態です。なので、厳密な意味では、ガラスはすごく硬くて形は変わらないのですが、固体ではないと言うことができます。つまり、空間的には秩序がないわけです。不規則に配列して秩序がないのですが、時間方向には安定だというような物質がガラスです。

一方で、スピングラスなので、スピンのほうを説明しないといけないのですが、スピンというのは、大まかに言うと磁石の非常に小さいものと見ることができます。磁石には、こういう方位磁針とか、こういう磁石がありますよね。磁石は、必ずN極とS極がペアになっています。だから、こういう棒磁石のN、Sを真ん中でぶった切っても、Nだけとか、Sだけとかの磁石にはならず、NとSのペアが二つ。こういうものを、磁気単極子というのですが、こういうものは存在しないということが知られています。この、今二つに割りましたが、これを、さらに細かく、細かく割っていったら、これ以上分けられない最小の磁石のもとというのがあるはずだということで、最小のものをスピンという。これが集まって磁石が形成されていると思うわけなのですが、これの一番簡単なモデル（モデル）は、イジングモデルと言われていて、隣同士のこういうスピン、非常に小さい磁石のもとがあるのですが、それが例えば、Nが上だったら上に矢印で書いて、Sが上だったら下向きに矢印で書くことにして、隣同士の矢印、スピンの向き、つまり磁石の向きがそろっていたらエネルギーが低くて、こういうのはエネルギーが低いわけです。逆向きになっていると高いという、このようなモデルを考えた。温度一定の系では、ヘルムホルツ自由エネルギーというものを最小にしようとします。

ヘルムホルツ自由エネルギーとは何かというと、エネルギーから、温度掛けるエンタルピーという状態量を引いたもので、このエンタルピーというのは、状態が何個あるか、何通りあるかという数だと思ってください。そうすると、低温のときには、このTSって、このTが小さい。Tが温度です。温度なので、低温ということは、このTが小さいですね。Tが小さいときには、Eが小さい状態を目指そうと、エネルギーを下げようとするので、エネルギーが低いのはどういう状態だったかということ、全部そろっている状態はエネルギーが低かったわけです。こういうのを強磁性相といいます。

ところが、温度を大きくしていくと、このTというのが、どんどん大きくなります。Tというのが、どんどん大きくなってくると、このエンタルピー、状態の取り得る種類、数、というのを増やしたほうが、Fというのを最終的に小さくできるので、高温では状態の数を増やそうとします。そうすると、これ、全部そろっている状態は1通りしかないのですが、例えば、上向きと下向きが半分半分といった場合には、いろんな配置の仕方があります。つまり、状態数が増えるので、こういう状態のほうが高温では好まれる。つまり、無秩序な並びのほうが好まれるということになって、これは簡単なモデルなのですが、低温でそろっていると磁石になっている。

そろっていないと磁石になっていないので、磁石はすごく温めると磁石ではなくなってしまいます。そういう意味で、高温で磁性が失われるという性質をちゃんと反映したモデルになっています。

スピングラスというのが何かということなのですが、スピンをさっきそろえたほうが安定と決めたのですが、そろったほうがいいのか、逆向きのほうがいいのかというのが、線によって違ってくるとというのが、スピングラスの模型になります。線が2種類あって、実線で書いていると隣同士がそろったほうが得、点線で書いていると逆向きのほうが得ということにしましょう。そうすると、実はエネルギーを最安定にできないような線の結び方というのがあって、例えば、実線、実線、実線、点線とかになっていると、3辺はこれをそろえたい、そろえたい、そろえたいなのですが、ここは逆にしたいとなりますので、ここを上にしたほうが得なのか、下にしたほうが得なのか、よく分からなくなるわけです。こういうのをフラストレーションがあると呼びます。

パリージさんは、スピングラスを研究するのは、シェイクスピアの人間悲劇を見るようなものだと言っているのですが、つまり、こっちを立てればあっちが立たずみたいなことが起こって、見ていてフラストレーションがたまるということで、シェイクスピアの人間悲劇を見ているようなものだというようにしたのでありますが、そのような、こういうフラストレーションというようなことが起こります。そうすると、実線と点線がバラバラにあると、上向きと下向きの合計がゼロになって、空間的な意味で、磁石にはなくなって、秩序がないというようになるのですが、時間的にはこの配位が安定なので、ほかの配位が安定になるわけではないのです。この配位、エネルギー的に安定だから単にバラバラになっているだけで、別にさっきみたいに、いろんな状態を取りたいからこうなっているわけではないというのが、スピングラス状態です。

まとめますと、結局、強磁性状態というのは、低温とか低エネルギーで起こることで、状態数が少ない。全部そろっている場合は1通りであるわけで、これは空間的に秩序があって、しかも時間的にも安定だと。無秩序というのは、逆に高温のもので、空間的にバラバラになっていて、しかも時間的にも次の瞬間には全然違うような矢印の配置になっている。スピングラスはそろっていないで、空間的な秩序はないのだけでも、低温で起こるようなことで、時間方向には、時間がたっても、次々状態が移り変わっていくというようなものではない。こういうものがスピングラスと呼ばれます。

先ほど言ったフラストレーションのために、フラストレーションは、あっちを立てればこっちが立たずみたいな状態なので、ここの部分を上にしようが下にしようが、エネルギーは変わらないわけです。こういう性質のために、エネルギーが極小になるようなスピンの並べ方というのが多数存在して、こういうものを多谷構造といい、エネルギーで書くと、このように局所的に小さくなっているところがたくさんある。スピンをひっくり返したりしても、エネルギーが変わらないようなフラストレーションがありますので、このように極小のところがたくさんあるというような構造になっています。

このような系に対して、物理量を計算する手法という新しい理論を、数理構造を解き明かしたというのが、パリージさんの業績になっています。スピングラスは、実際に実験的にもありまして、希薄な磁性合金ですね。この括弧の中が希薄な元素なのですが、金属の中に磁性を持ったものが希薄にあるような状態では、希薄な磁性不純物が、その周りを取り囲む金属の中にたくさんある伝導電子を介して、相互作用します。

こういう相互作用のことを、RKKY相互作用というのですが、それを実はグラフで書くと、このようになっていて、距離によって、そろるかそろわないか、逆向きにすべきか、というのが異なってくるわけです。合金などはスピン間の距離が長く、希薄なのでランダムなのですが、そのためにそろえたほうがいいのか、逆にしたほうがいいのかというのもランダムになっているということで、このような物質でスピングラスが見られる。

こういったスピングラスは、何も磁石だけではなくて、いろんなところで応用が利きます。最近、非常に活発な応用になっているのが、ニューラルネットワークというモデルで、これは脳の働きを模したモデルです。実際の脳はこんなに単純ではないのですが、脳の働きを非常に単純化したモデルになっていて、先ほど言ったスピンで表します。上向きか下向きかの矢印、これをニューロンとみなしましょう。ボンド、つまりスピンをつないでいる線をシナプスとみなして、スピンが上を向いているか、下を向いているかは、このニューロンが発火

しているのか発火していないのかということと対応させましょうというモデルが、ニューラルネットワークと呼ばれているモデルです。

このボンド、結んでいる線ですね。ボンドごとに、ある数が割り当てられています。この、場所 i と場所 j にあるそれぞれの矢印は、上を向いていたらプラス 1、下を向いていたらマイナス 1 というように割り当てます。エネルギーに、ある数 J というのを割り当てておいて、このように書いておくと、この J というのが正だと、同じ向きを向きたがる。 J が負だと、スピンの向きが逆向きを向きたがるというような線の結びになっているのですけれども、この状態の更新というのを、この周りにある矢印を全部、 J という重みをつけて足して、それがある値を超えていると発火する。脳も周りのこういうニューロンからシナプスで信号が来て、それが一定値を超えると発火するのですけれども、こういう感じで、次々時間発展していくようなモデルを考えます。閾値が例えば、簡単にゼロだったとしましょう。つまり、正のときに発火して、負のときは発火しないというようなモデルにしますと、実は、周りのスピンの多数決で決めるモデルになります。

だから例えば、これ上、上、上、下とかだったら、ここはひっくり返してみても、これのほうが安定となったら 100% 採用、もし、上にしたことによって不安定になったら、全く採用しないというような時間発展になります。これは、実は専門的には、モンテカルロ法と呼ばれているものと全く同じになっています。これによって、連想記憶というのができまして、白いマスと黒いマスのパターン、画像があります。こういうものを、先ほどの J という結びつきの強さのネットワークとして記憶させることができます。このマスの白黒というのが、スピンの上向きか下向きかというのに対応していて、この接する辺に、何かさっきの J みたいな、 E と今書いていますけれど、プラス 1 かマイナス 1 かを割り当てればいい。

例えば、そろっているところにプラス 1、白白だったら、ここプラス 1 を割り当てて、ここ黒黒なので、ここもプラス 1 を割り当てて、白黒みたいになっているところは、この辺にはマイナス 1 を割り当てるというようなことをすると。この覚えさせたいパターンが、エネルギー最小状態になるわけです。先ほどのダイナミクスで、どんどんエネルギーを下げていくダイナミクスになっていたんで、このように J のネットワークをつくっておくと、先ほどの発火の時間発展によって、最終的には、これを思い出すことができるわけです。これを覚えさせておいて、これをちょっとでたらめな乱した状態でスタートしても、最終的にこれに落ち着くでしょう。

1 個のものしか思い出せないというのは、それは全然記憶ではないので、覚えさせたいものが複数あったらどうすればいいかということ、この P 個のパターンに、さっき言ったような E を割り当てて、それを平均すればいい。その和ですね。その全部の和を、何か、この辺の結びつきの強さとすればいいということが知られています。これによって、幾つかの記憶、幾つかの状態というのをエネルギー最小にする。つまり思い出す状態にすることが可能になります。

では、その N 個のマスのあるときに、何個ぐらいこのパターンを覚えさせられるのだろうか。この辺の結びつきですね。このマスとマスとの結びつきの値を何かいろいろまくいじることによって、何個ぐらいまでパターンを覚えさせられるのだろうかということ、実は相図の研究があって、温度というのは、上げていくと、だんだん覚えにくくなるのですが、実は左下のこのゾーンが、覚えられるゾーンになります。なので、十分温度が低くて、 T がほぼゼロだとしましょう。温度が十分低いとアルファ、アルファとは何かということ、パターン数割るマスの数なので、マスの数の 1/3、8% ぐらいのパターン数までは覚えられるという結果になっています。

実はこれは、いっぱい覚えさせ過ぎると、スピングラスの相に行くのです。これはどういうことかということ、記憶をさっき言ったような、こういうパターンを覚えている状態というのは、ある種の秩序状態なのです。こういう秩序状態に、覚えられている状態というのは、秩序状態なのですけれども、こういう記憶をいっぱいし過ぎると、今度は逆に無秩序に、先ほどの J の結びつきが無秩序になってしまって、無秩序のパターンで固まってしまうわけです。つまり思い出せなくなる。もう無秩序のパターンで固まってしまう思い出せなくなるということが起きる。なので、ここがまさにスピングラスの転移が起きることになります。

まとめますと、複雑系というのは、伝統的な物理が扱ってきた問題よりも、ずっと困難な問題になってきます。

こういう問題に対するアプローチとしては、系の本質を残して、ばつさりと切り捨てることによって単純化しようというのが真鍋の研究になります。

予測不可能性はランダムなもののみならず、ブラウン運動というものがあるから、既存物理を単純化した後で、既存物理を適用していこうという方法もあります。こういうのはハッセルマンさんの手法になります。やっぱり、新しい理論を構築することも大事、それはもちろん大事なことで、乱れて固まった系などを解析するための新しい手法を構築したというパリージさんの業績につながります。

というわけで、複雑系は、それこそ金融とか経済とか気候とか生物などそういうものに対し、研究対象は幅広くて応用例も様々なので、これからも非常に発展が期待できるということになっています。

発表は以上になります。

【司会】高吉先生、どうもありがとうございました。温暖化の問題から株価の変動とか、最後、機械学習とかに使われているニューラルの話で、非常に興味深く聞かせていただきました。

質問とかありましたら、ぜひこの機会によろしくお願いします。

【質問者A】今日はどうもありがとうございました。ちょっとお尋ねしたいのは、真鍋先生とハッセルマン先生の業績というのは、今日のお話を聞いている限り、特につながりというのは、あまり感じられなかったのですが、実際には真鍋先生のほうにも確率的なモデルがあったりとか、流れがあったりするのですか。

【高吉】そうですね。もちろん研究というのは、お互い直接面識があったかどうかは存じ上げないのですが、論文が出たら、その論文を読んでということは、もちろんどの研究者もやっていることなので、そういう意味で何らかで影響し合ったということは十分あり得ると思うのですが、直接的に真鍋さんがそういう確率まで取り入れたモデルのシミュレーションとかを行ったかどうかまではちょっと調べていない。何らかの意味で影響は当然、し合っていると思います。

【質問者A】どうもありがとうございました。

【司会】ほか、ありますでしょうか。オンラインの方もぜひ。オンラインの方もありましたら。

【質問者B】質問していいですか。

【司会】お願いします。

【質問者B】ものすごく分かりやすい話で、ありがとうございました。覚えるところの話で、「大」とか書いてあったところ。あれの1個覚えるというのが、ネットワークの強さみたいなやつで、エネルギー最小状態になるまでは分かったのですが、複数覚えさせるというところがよく分からなかった。何で、そんな複数覚えられるのかなというのが。ごちゃ混ぜにならないのは何でなんですかね。

【高吉】もちろん、すごく近い状態、例えば、「犬」とか、点が1個だけ違うとか、そういう二つというのは、覚えさせられないのです。近過ぎる二つのパターンというのは覚えさせられなくて、ある程度異なったパターンである必要があります。その異なったパターンの場合には、実は今、だから、この一つのパターンに対して、辺について、 E_{ij} っていうのをプラス1、マイナス1の割り当てというのができまして、ほかのパターンに対しても同じように、 E_{ij} の割り当てというのができまして、実はこの二つを単に足し併せれば、この二つがエネルギー極小になるようなネットワークをつくることができるということが知られています。なので、覚えさせたいパターンの数だけ E_{ij} を割り当てて、それらを全部足したものにしておけば、実はそれだけパターンが覚えられるということが知られています。

【質問者B】へえ。足したら、何か情報が減ってしまう気がするのだけれど、減らない。

【高吉】そうなんです。そこはちょっと非自明なところで、実は、普通に足すだけで、複数のパターンをエネルギー極小に持っていく、近過ぎなければ、「近過ぎる」の定義とかももちろん難しいのですが、近過ぎない状態であれば、単にボンドの強さを足すだけで、複数のエネルギー極小をつくることができるということが知られています。

【質問者B】ありがとうございます。

【質問者】今の話、例えば、サイコロの1とサイコロの2があって、覚えさせたら3というのは、極小にはならないということですか。

【高吉】覚えさせていないものは、もちろん、極小にはならない。

【質問者C】単に合成したものが。

【高吉】ああ、そういうことか。

【質問者C】1覚えさせて。

【高吉】2覚えさせても、3は極小にはならない。

【質問者C】だから、1のところと2のところ。

【高吉】2のところに極小ができる。

【質問者C】3のパターンはエネルギーが高い。

【高吉】高いということです。

【質問者C】ああ、なるほど。

【司会】ほか、いかがでしょうか。はい。では、ちょうど時間になりましたので、高吉先生、どうもありがとうございます。もう一度、拍手をお願いします。

【高吉】 どうもありがとうございました。今日はこれで終わりですけれども、次3回目、13日の月曜日に、今度はノーベル化学賞ですかね、ありますので、ぜひ、御参加ください。どうもありがとうございました。

— 了 —