

第 42 回 ATI 公開フォーラム

気候変動コンピューターシミュレーション から予測する首都圏の水事情

高橋 桂子

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球情報基盤センター長

時空のゆがみを見る時計：光格子時計

香取 秀俊

東京大学大学院工学系研究科 教授

理化学研究所主任研究員

2019 年 11 月 30 日(土)

御茶ノ水 ワテラスコモンホール



公益財団法人 **新世代研究所**
FOUNDATION ADVANCED TECHNOLOGY INSTITUTE

－ 目 次 －

◇ 開会あいさつ	伊達 宗行	1
◆ 気候変動コンピューターシミュレーション から予測する首都圏の水事情	高橋 桂子	2
◆ 時空のゆがみを見る時計：光格子時計	香取秀俊	24

開会あいさつ

理事長 伊達 宗行

ご来場の皆様、本日はご多忙のところ大勢の方にお集りいただきまして、誠にうれしく思っております。ありがとうございます。

主催者である我々のことを簡単に紹介申し上げます。公益財団法人新世代研究所は、既に 30 年を超える歴史を持っており、主なミッションは科学技術の振興です。現在はナノサイエンス分野にフォーカスしております。



そして活動当初より、セイコーインスツル株式会社のお世話になっており、活動資金は 100%、同社の公益目的寄付で賄われております。

科学技術振興としての事業活動は、研究会の企画運営、そして若手研究者への研究費助成と 2 本立てで運営されております。そして我々は更にもうひとつ事業をおこなっております、それが本日の公開市民講座です。広く社会の皆様に科学の話題を提供し、楽しんでいただこうという試みであります。これは我々としても外部の方と直接繋がりがもてる唯一機会であります。

どうやってテーマを選ぶかですが、最新の科学・技術でかつ社会で話題になっていて知的好奇心を引かれるもの、そういう観点で毎年選択をしております。本日は、ご覧のような大変魅力あるテーマ 2 つが選ばれました。どうぞエンjoyしていただきたいと思います。

以上、簡単ではございますがご挨拶といたします。ありがとうございました。

講演者 高橋 桂子 氏 紹介

専務理事 久良木 博史

高橋先生は 1985 年に津田塾大学学芸学部数学科を卒業され、その後東京工業大学にて工学博士の称号を取得されました。博士課程終了後 1991 年に花王株式会社 の文理科学研究所に入られ、1993 年以降はケンブリッジ大学コンピュータ研究所の客員研究員、東京工業大学の準客員研究員、宇宙開発事業団の招聘研究員を歴任され、2002 年に独立行政法人海洋研究開発機構に入られました。2014 年からは現在の地球情報基盤センター長として、地球とその環境に関わる研究を行なわれていらっしゃいます。また 2005 年から現在まで、5 期に亘り日本学術会議の会員としての活動も継続されておられます。

もともと純粋数学が大好きだった先生は、大学で数学科を専攻されましたが、より現実に即した問題を解きたいと考えられシミュレーションに関わるようになられたそうです。開発が進められていた海洋研究開発機構の地球シミュレータは、当時のスーパーコンピュータの 1000 倍に近い速さで、そこにも大きな魅力を感じられ、本日の講演テーマにもあるコンピュータシミュレーションを研究のベースとされていらっしゃいます。

先生がそもそも地球環境に興味をお持ちになられたのは、恩師から環境に関する話題提供がなされた事がきっかけだったとの事です。話題と言えば最近の台風 15 号、19 号、それに続く集中豪雨など、災害のニュースが記憶に新しいわけですが、地球温暖化、気候変動というキーワードには皆様の関心度も高いのではないのでしょうか。世界的な気候変動は、その影響が様々なところで想定外として現れ、我々の日常生活を脅かすまでになっていますが、その原因は人間活動そのものに多くが起因すると、先生は述べられておられます。

研究に行き詰まった時は、絵や俳句の鑑賞をして気分転換されるという一面をお持ちの先生ですが、今まで研究されてきたコンピュータシミュレーションから分かってきた、気候変動の仕組み、原因等につきお話を頂き、併せて今後我々が留意すべき事についての提言も頂けるものと存じます。それでは高橋先生のご講演をお聞きしましょう。

気候変動コンピュータシミュレーション から予測する首都圏の水事情

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球情報基盤センター長

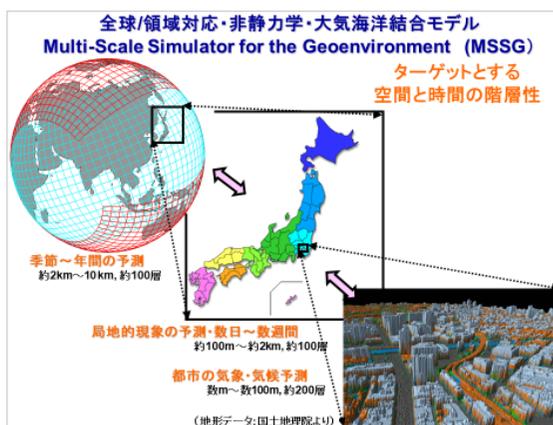
高橋 桂子

地球規模の環境から都市や街区の環境まで異なる時空間スケールの環境をコンピュータでシミュレーションすることによって、よりよい環境を実現するための施策を示す研究を進めております。シミュレーションの醍醐味は、将来を予測するという点にあると思います。予測は非常に難しいのですが、物理法則を基盤にして複雑な系が時間を経過してどのように変わってゆくのかを見通し、その中のどの要素を変えればよいか、つまりどのようなアクションをとればよいかを洞察する科学であると考えています。



今日は、日本と身近な首都圏の環境を中心に考えてみようと思います。タイトルにあるように、はじめは飲み水など私たちの身の回りにある水の話を考えましたが、今年は台風による大きな災害もありましたので、それらも含めて水に関連するさまざまな研究の状況と課題をお伝えして、私たちは今後どう行動をすべきかを一緒に考えることができればと思っています。

右の図は、私たちが開発を進めてきた地球環境から都市環境まで複数の異なる時空間スケールをシミュレーションできるモデルの概要です。スーパーコンピュータ「地球シミュレーター」や、神戸にある「京」なども使い、物理方程式をコンピュータ上で計算し、地球環境や都市環境の将来を予測することができます。



私たちが進めている地球環境の最先端の予測研究では約 1 km から 10 km の間隔で、都市や街区の環境の予測研究では数 m 間隔でシミュレーションし、目的に合わせてズームインやズームアウトして異なる時空間スケールの現象や現象間の相互影響をとらえることができます。地球の環境をシミュレーションする物理方程式をそのまま都市環境の計算にも使うことができ、様々な環境を統一的な物理表現でシミュレーションできることが私たちの研究の特長のひとつになっています。私たちはこのモデルを「メッセージ (MSSG)」と呼んでいます。地球全体の気候変動にフォーカスしたり、あるいは日本や都市にフォーカスしたり、というふういろいろな時空間スケールを一度に扱うことができるシミュレーションモデルとして世界に先駆けて開発したものです。今日はこのモデルを使用したシミュレーションとその研究成果を中心にお話をしますが、その前にまず私たちの研究分野をご紹介します。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC と略します) がありまして、皆さんも報道などでお聞きになることがあると思います。その IPCC は地球温暖化についての科学的研究の取りまとめをしている専門家で作られた国際的な組織で、1988 年に

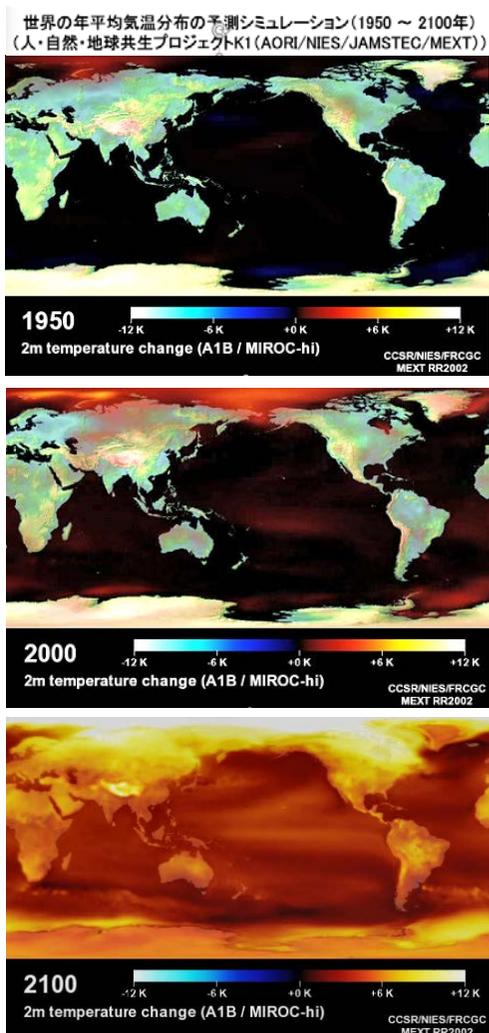


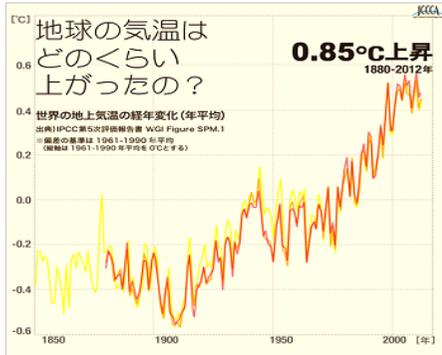
設立されました。数年に一度、地球温暖化に関する「評価報告書」がとりまとめられ公表されています。2002 年に「人、自然、地球共生プロジェクト」が文科省によって立ち上がりました。このプロジェクトは東京大学と国立環境研究所、私たち JAMSTEC が中心となったオールジャパンプロジェクトで、この成果が IPCC 第 4 次評価報告書に大きな貢献をしました。その貢献の基盤は当時世界一の性能だったスーパーコンピュータ「地球シミュレーター」です。あまり報道されなかったかもしれませんが、2007 年に IPCC がノーベル平和賞を受賞したときに、IPCC 第 4 次評価報告書に大きな貢献をした日本の科学者の皆さんは、このノーベル賞の証明書を研究者各自のお名前で受け取っています。さらに貢献の基盤となった「地球シミュレーター」に対しても感謝状を IPCC からいただきました。日本の地球温暖化研究は世界の最先端を拓き、世界を大いに牽引して地球

環境科学の発展に非常に大きな貢献をしてきました。

前述のオールジャパンプロジェクトの結果の一部を写真でお見せします。1950年から2100年までに地球がどれだけ暑くなるかをコンピュータ上で計算し、1970年を基準の年として気温を差し引きした結果を可視化したものです。世界地図上で気温差が高くなるとだんだん赤色、黄、色、白色と変わり、地球全体が暑くなっていく様子がシミュレーションされています。

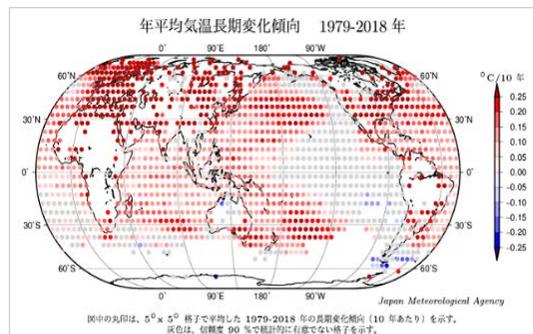
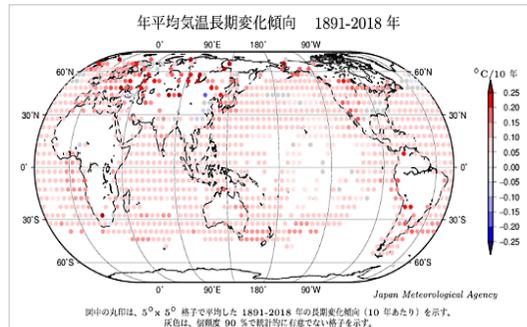
2000年までは過去のデータを用いて検証を行ったシミュレーション結果、それ以降の年は予測シミュレーション結果です。二酸化炭素の増加が雲の放射過程の状況を変えることを外的条件として設定したシミュレーションにより、将来の地球全体の温暖化の様子を示すことができるのです。当時スパコン性能世界一だった地球シミュレーターを最大限に活用して得られた日本の科学者による予測結果は、地球温暖化研究の発展に非常に大きな貢献をしました。つまり、地球温暖化を予測することができるシミュレーションモデルは、現在では世界で約50程度ありますが、当時は20程度で、その中でも前述の日本のプロジェクトの成果は最も精緻な成果だったのです。その後も地球温暖化研究は予測シミュレーションから得られた結果が世界の研究者から収集され、比較検討されて、その成果をもとにIPCC評価報告書が作成されているのです。これまでに第5次評価報告書までが公表されていまして、第5次評価報告書は、地球温暖化は人為的行動が原因であると初めて明記された地球温暖化研究上の転機となる報告書になっています。



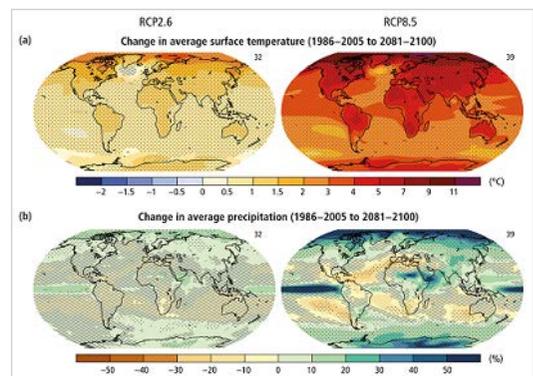


ことが大変大きな問題です。

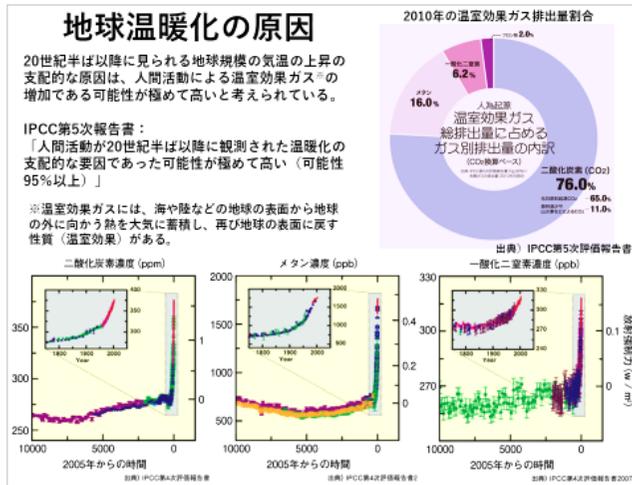
次の図は、観測によって得られた年平均気温の変化の傾向です。上の図は1891年から2018年までの変化、下の図は1979年から2018年までの変化です。2つの図を比べると期間は短いですが下図の気温上昇が著しいことが分かります。これは1979年から2018年までの近年の気温の上昇が急激になっていることを示しています。



さらに下の図は、シミュレーションの結果です。シミュレーションにはシナリオと言われる幾つかの計算条件が用いられており、それらの条件は経済発展等を想定した条件となっています。左は徐々に二酸化炭素が増えるシナリオを設定した場合のシミュレーション結果、右はより顕著に二酸化炭素が増えるシナリオ設定の場合で、気温の上昇の仕方が異なることが明白です。その下側は、降水量の変化で、特に北極域で非常に増えています。この降水量の増加は地球温暖化による気温上昇に



原因があると考えられており、気温上昇と降雨のダブル効果で北極域の氷はかなりの勢いでとけることが予想されます。

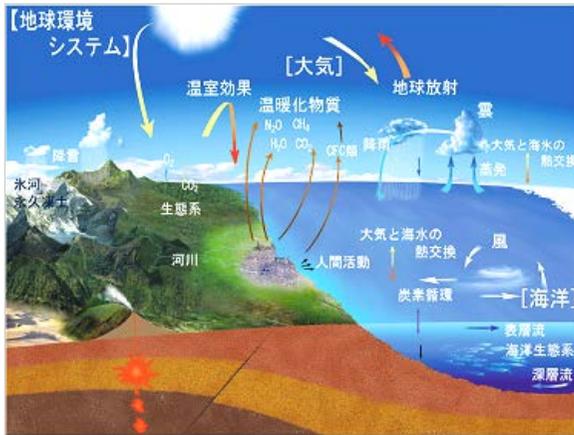


地球温暖化による影響の大きさには誤差が含まれますが、地球温暖化によってこのような変化傾向があることは確かであると言えます。今日はその原因の詳しいお話はしませんが、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素の濃度が急激に上がっています。

温暖化はこういった温室効果ガスが大きな原因であると考えられています。日本でも気温が上昇しています。日本の場合は、さらに考えなくてはならない要因として都市化の影響があります。右の図は、東京や熊谷など関東の都市の気温変化のグラフです。東京ではこの100年間で3℃以上も上昇していて、関東地域の他の都市でも上がっています。銚子も海の近くですが上がっています。名古屋や福岡、京都などの大都市も上がっています。日本全体では平均 0.18℃の上昇でしたが、日本の大都市では、それ以上の速度で気温が上昇しています。

このような状況を踏まえて、今日これからご紹介する私どもの研究のキーワードとして「スケール」があります。空間スケールとは、例えば、地球規模、都市や街区、そして各建物の庭先などのレベルが挙げられます。地球規模のスケールが都市のスケールに、つまり大きなスケールが小さなスケールに影響を与えるのですが、それだけではなく反対に、都市スケールの現象がもっと大きなスケールに影響を与えることも指摘されています。時間スケールとは、例えば 100 年は地球温暖化のスケールですが、数日や数時間のスケールをもつ現象として非常に激しい豪雨や台風が挙げられます。こういった幾つかの典型的な空間や時間のスケールがどういうものなのかをこれからご紹介します。さらにもう1つ、自然環境は人間活動と相互に影響を及ぼしあっていることを頭の中に置いておいてください。

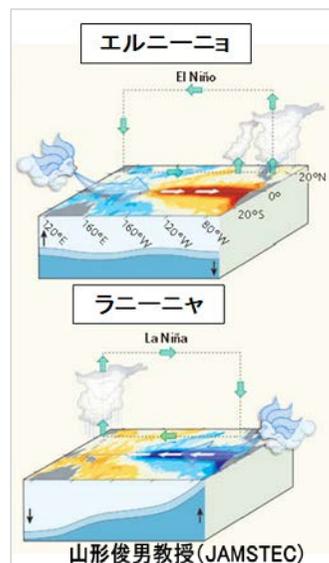
都市では人間活動が活発で、地球温暖化に影響をあたえていると考えられている物質を排出しています。私たちの研究は主に海洋と大気が中心ですが、大気と海洋の間では熱を交換し、風を媒介として運動量も交換して海洋の表層流を形成しています。海洋には生態系があり、物理的にも化学的にも大気と海洋は相互に影響を及ぼしあっています。



海は地球の 70~80%を占めていますが、そこから水が蒸発し、雲になり、雲が降雨となって陸地にもどり、海に流れて循環しています。陸地には山もありますので、そこで積雪となり水を貯え、川として流れ、人間圏つまり私たちの暮らしの中に入ってきます。

これを自然環境の循環として考えることができます。これらを全部、先ほどご紹介したシミュレーションモデルの中に入れていきます。地球全体のスケールとして入れるのか、あるいは人間活動のスケールとして入れるのかというところには入れ方の工夫がありますが、私たちが開発したモデルは、同じ方程式の中に条件として複数のスケールを導入することができるので、様々な現象のメカニズムをシミュレーション結果をもとに解明することができます。

地球温暖化はさまざまな地球上の現象に変化をあたえます。気温や降水量などという大気の状態だけでなく、海の中の状況も変わってきているといわれています。皆さんよくご存じのエルニーニョとラニーニャの図です。右がチリ沖、左がユーラシア大陸側です。赤道域の太平洋の水温は、エルニーニョでは東側が暖かく、西側が冷たくなっています。ラニーニャではそれとは逆に、チリ沖の方が冷たく、ユーラシア大陸側が暖くなるパタ

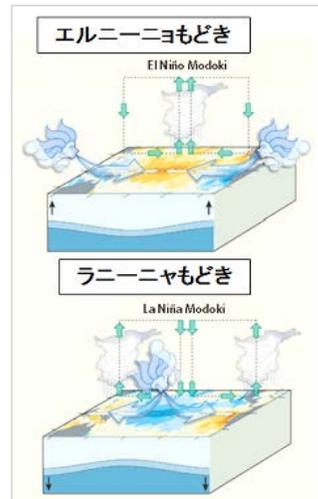


ーンになります。このパターンの変化を私たちは「振動する」と言っていますが、数年ごとにエルニーニョになったりラニーニャになったりして行ったり来たりするわけです。海の中ではこのように熱が運ばれて、太平洋の熱的状态、ひいては地球の熱的な平衡状態を保つように、このような振動をしていると考えられています。

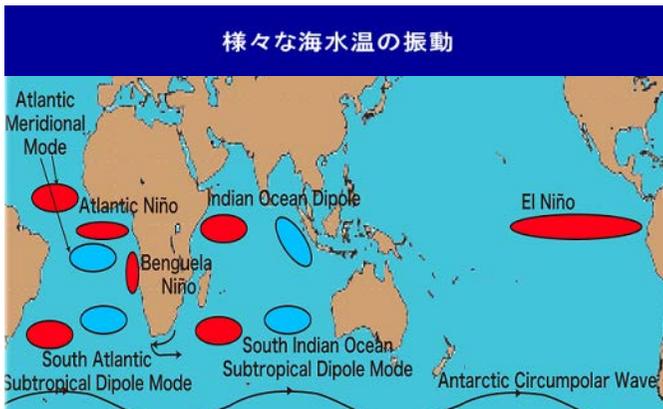
なぜ海から話をしているかというと、海の熱の貯蓄量が大气に比べて大きく、一度暖まるとそのパターンが維持され、数カ月から1年以上かかり変化をします。暖かい海域では水蒸気がたくさん発生しますので、気圧が下がり低気圧が発生します。海の上の大气はこのような矢印の循環になります。ラニーニャのときはその逆です。つまり、海がどのように熱的な振動をするかによって、大气もその影響を受けることとなります。

ところが、地球温暖化によってこのパターンが変わってきてしまったとされています。「エルニーニョもどき」とか「ラニーニャもどき」と山形先生は命名されましたが、太平洋の真ん中の海域が暖くなるパターンが観測されています。地球温暖化によってどうしてこのようなパターンが生成されるのかについてはまだ分かっていませんが、こういうことがよく起こるようになったということは、大气の状況も変わってきているのだと考えられます。

エルニーニョなどのように海洋の熱的な振動現象は、他にもインド洋のダイポールや、南インド洋の

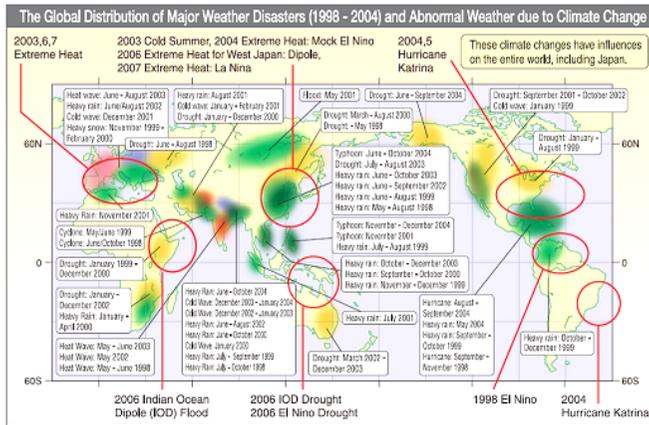


(Ashok and Yamagata, Nature, 461, 481-484, 2009)



ダイポールなどが知られており、下の図では赤と青で表現していますが、そのほかにもあることが報告されています。海の熱的な状態が変わると、先ほどお話ししたように上空の

大気の対流が変わります。そのパターンの組み合わせはいろいろあり、それらがさまざまな現象が起こる要因のひとつと考えられています。例えば非常に強くて大量の記録的な雨が降ったり、台風の強度が強くなるなどの原因と考えられています。



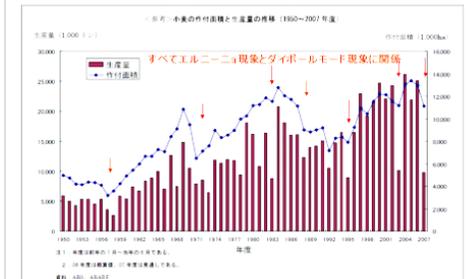
左の図は、2004年までに実際に起きた極端な大気現象の分布です。これらの現象の原因が温暖化なのか、それとも振動のパターンの組み合わせなのかは、実はあまりよく分かっていません。そこは研究

の最先端のひとつです。

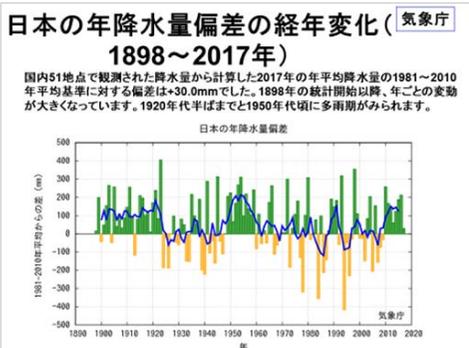
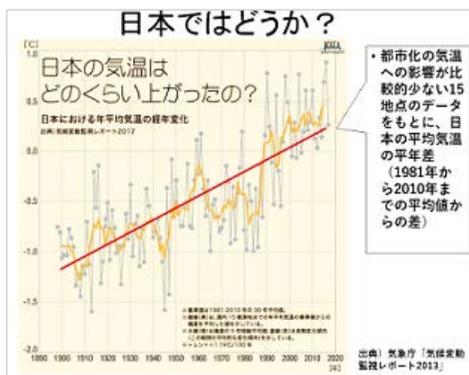
右の写真は、2010年のオーストラリアの洪水です。その下は2011年のブラジルの豪雨です。航空写真で見ると、ありとあらゆる山がずたずたになっていることがよくわかります。日本においてもこのような豪雨があったことは記憶に新しいですが、日本だけでなく世界中で起きている現象です。右下のグラフは、エルニーニョ現象及びインド洋ダイポールモード現象が起きた年とオーストラリア小麦生産量を示したグラフです。生産量が急落しているところは必ずと言っていいほどエルニーニョやダイポールが起きています。ダイポール等によって雨の降り方や気温が変わり、収穫量に影響していること



After JICA
オーストラリアの小麦生産量の経年変動



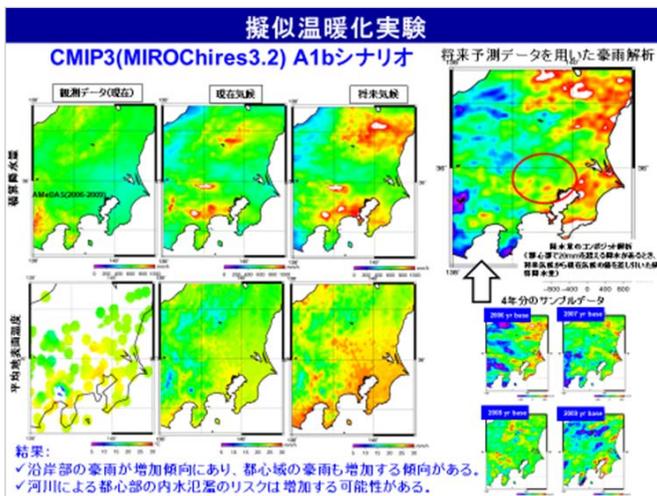
を示しています。日本はオーストラリアから小麦を輸入していますから、日本の産業へも影響があります。お米なども同様で、温暖化の状況でさまざまな農業にも影響があるということが言えます。海の変化が大気に影響し、雨の降り方が変わり、農作物への影響を通して、人間活動へつながっています。



日本の気温変化について都市化の影響が少ない 15 地点のデータをもとに気象庁がまとめていまして、気温は上がっていますが、上がり方は都市化の影響よりは少しマイルドという感じです。降水量はどうでしょうか。1890 年ぐらいからの変化を年平均でとっていますが、降った年と降らない年の差が大きくなり、振幅が開いてきていますが、トータルの降水量はあまり変わっていないというのが今の見解です。

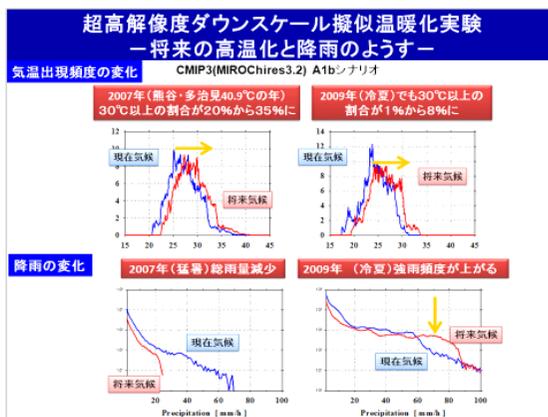
今後どうなる可能性があるのかを、私たちのモデルを使ってシミュレーションしました。疑似温暖化実験といひまして詳しい説明は省きますが、地球温暖化の

基本的な特性をとらえたシミュレーションです。下の図で、上段が積算降水量で、下段が地表面の温度です。地表面は 2メートルで人の頭ぐらいの高さです。将来的に、沿岸部では降雨が増加傾向で、都心部も多少増えていく傾向にあります。河川による都心部の内水氾濫リスクは増加する傾向がありますが、これは川の水の

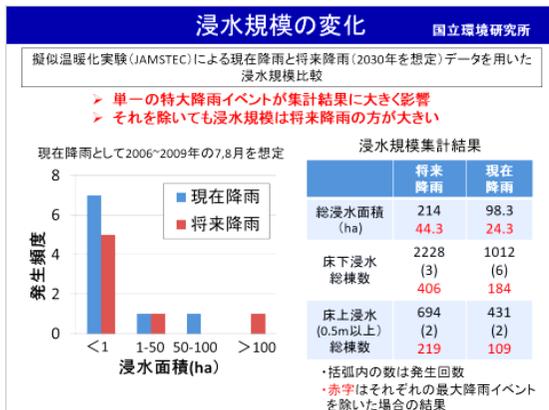


トータルの量を考えてみると、都心部の内水氾濫は大量の雨が川に流れ込めないことで起こってしまう。雨が大量に降ってしまうと、本線の川に流れ込むことができなくて、内水氾濫になる可能性があるということを、今から5年前にはシミュレーションの結果として得られていました。今年の台風でもそのような災害があったことを考えると、このシミュレーションの確からしさをさらに定量化して、その値によっては対策をどの程度強化するのかの検討に役立てたいと思います。

2007年に熊谷や多治見では40.9℃を記録した年がありました。シミュレーションの結果では現在が青線、将来が赤線です。この結果から、将来は30℃以上の割合が20%ぐらいにシフトします。こうなると、最高気温に相当する分布のテールの部分は非常に高い気温になる可能性を示しています。冷夏の場合でも気温が上がる方にシフトします。さらに降雨も、1時間当たりどれだけ降るかという雨の強度が強くなる可能性があります。しかし総雨量は減る傾向なので、降るときには一度に大量に降る可能性が高いと言えます。さらに解析を進め、さまざまなパターンを導出をしないではいけません。温暖化が進むと、日本の都市域では水についても、気温についても、大きな変化がありそうだということです。



冷夏の場合でも気温が上がる方にシフトします。さらに降雨も、1時間当たりどれだけ降るかという雨の強度が強くなる可能性があります。しかし総雨量は減る傾向なので、降るときには一度に大量に降る可能性が高いと言えます。さらに解析を進め、さまざまなパターンを導出をしないではいけません。温暖化が進むと、日本の都市域では水についても、気温についても、大きな変化がありそうだということです。



私たちは、数m~数kmという間隔で計算する高解像度のシミュレーションを実行しています。先の台風でも問題となりましたが、都心でどのくらい浸水の危険が上がるのかを国立環境研究所との共同研究においてシミュレーションし、浸水の評価をしてみました。

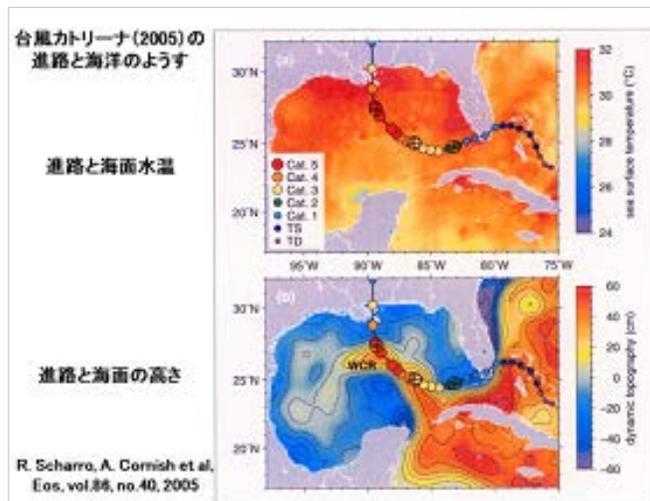
その結果、現在の降雨よりも将来の降雨の方が、浸水する面積と浸水戸数が増加する結果が得られています。一回の降雨イベントで降雨量が最大となるのは大体は台風であり、台風がどのような経路で日本に到達するかによっても変わりますが、将来の方が危険度は上がっていると言えます。



これはNASA による台風の写真です。非常によく撮れていて、台風の日と雲の形がよくわかります。台風は直径約 1000 キロメートルの大きな渦で、その渦はレインバンドと言われる雲の帯から形成されています。そのレインバンドの下には鉛直の対流が連なる構造がありまし

て、その対流によって雨が降っています。非常にひらべったい大気の層の中で、水平の渦と鉛直の対流構造が保たれつつ全体として大きな渦が動いていくという大変特徴的な構造と挙動をします。

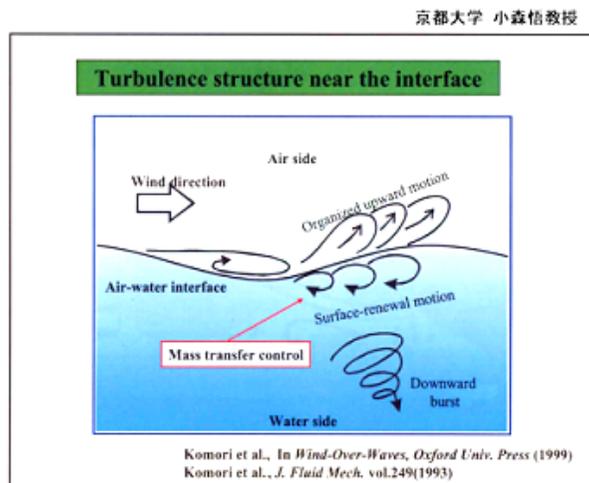
台風は大気だけではなく海の影響も受けています。気象予報士がテレビで、日本近海の海水温が高いので台風が強くなっていると言ったりしていますが、その通りで、日本の近海域は最近非常に温度が高いときがあります。右下の図は、大きな被害をもたらした台風カトリーナの進路データです。2005 年にアメリカのニューオーリンズを襲って町を壊滅させた台風です。海面の赤い部分が海表面の温度が高く、黄色いところはそれより少し低く、青色が海表面の温度が低いところ。カトリーナがどのような進路でメキシコ湾を進み、どこで発達したかと

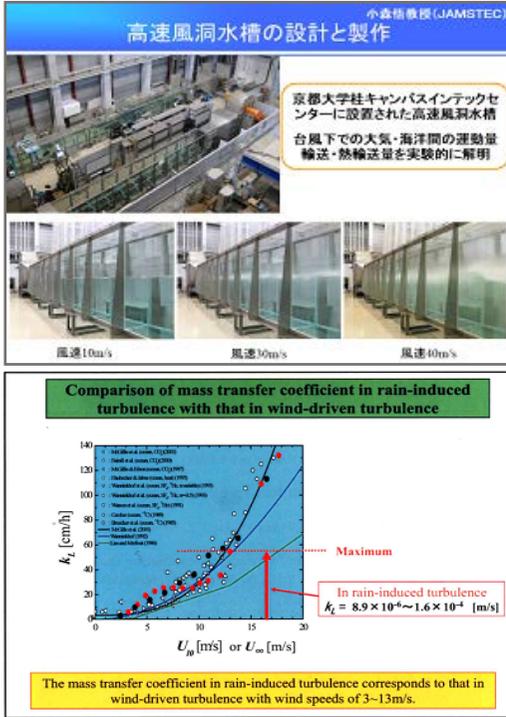


いうことを、線と円の大きさと色で示しています。赤くて大きい丸が台風の勢力が強いところです。海面の高さは衛星から測れまして、海面の高いところで発達していることが分かりました。海面が高いということは、その海面が膨張しているわけです。つまり、熱エネルギーがたくさんある。表面ではなくもっと下のエネルギーがたくさんあるところで発達していることが分かります。これを見たとき私は仰天しました。

なぜかと言うと、海の表面の温度でしたら太陽からの日射や風などからの影響を考慮して海の表面温度を予測することが比較的易しく、衛星からの観測データもあるわけです。海の表面の温度が台風の強さに影響をあたえるのであれば、シミュレーションや観測データを駆使することで、おそらく台風の強度の予測精度を向上させることが可能になると考えられるのです。しかし、海の中の蓄熱が大きな影響をあたえているということになれば、海の中の蓄熱量は現状では観測が難しく、海の中の暖かいところと冷たいところの構造がどうなっているかを予測することは、海の表面の温度を予測するのに比べて格段にむずかしいのです。この結果から予測の難しさがすぐに予想されて、仰天したわけです。

以前、MSSGを使って大気と海洋の相互作用をシミュレーションした結果からは、海の表面の下1キロメートルの深さぐらいまでは、強風によってかき混ぜられることが分かっています。強風がそんな深いところまで影響を及ぼしているということは、台風の強さを予測するにはそれくらい深い海の状態（蓄熱の状態）まで予測することが必要である、ということが示唆されます。右の図は、風によって発生する波にどんな力が働き、どんな現象がおこるかを描いたポンチ絵です。風が強くと波ができ、そこからどういう渦ができて混ざっていくのかを示しています。この一連の現象にも複数のスケールの現象が影響を及ぼしあっています。

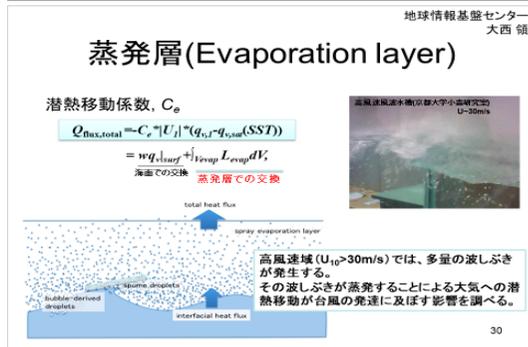
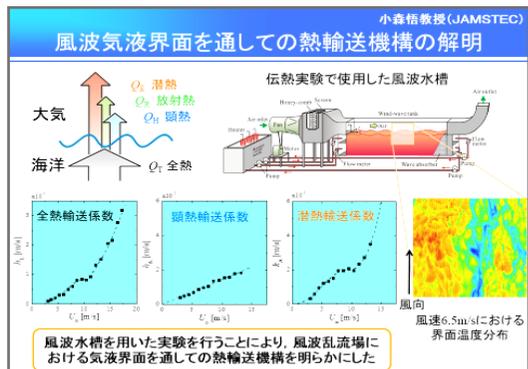




当時京都大学におられた小森先生との共同研究で、実験とシミュレーションによって、表面とその下の部分でどんなかき混ぜが起きているのかということ調べました。流れだけでなく風波気液界面を通しての熱の輸送メカニズムの解明を試みたのです。波が立ち、それによって運動量だけでなく熱が交換されることまで考慮に入れないと、台風の強さは正確に予測ができないだろうという理由からです。

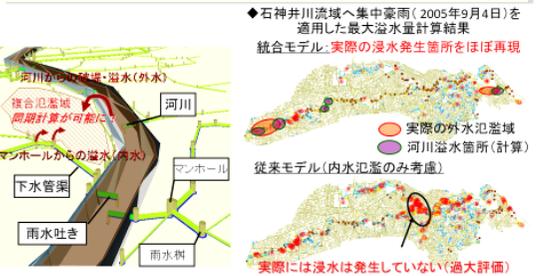
これも驚くことなのですが、強風によって水面には水しぶきがあがり

ます。その水しぶきが台風の強度に影響を与えているということが分かってきました。強風によってあがる水しぶきがどれぐらいかは、先ほどの実験装置を使った実験結果を、そのままシミュレーションの設定としたわけです。その結果、波しぶきを考慮した場合と考慮しない場合では、予測期間が長くなるにつれて水しぶきの有無による影響が強くなり、水しぶきを考慮した場合のシミュレーション結果は観測値に近くなります。つまり、水しぶきが台風の強度に影響を与えているということ、水しぶきの数mmオーダーのスケールが 1000 km スケールの台風の強さに影響を与えているということなのです。



高精度下水道管渠網データの整備と統合型氾濫シミュレーションモデルの構築

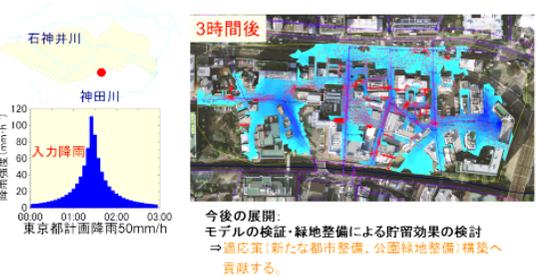
- 神田川、石神井川各流域を対象に下水道管渠網の詳細モデル化
 - 河道網と統合し統合型(雨水流出+内水氾濫+外水氾濫)モデルを構築
- ⇒マンホールからの溢水現象をより精緻に再現
⇒大規模集中豪雨による“内外水複合氾濫”の再現性を改善



3次元氾濫シミュレーションの実施

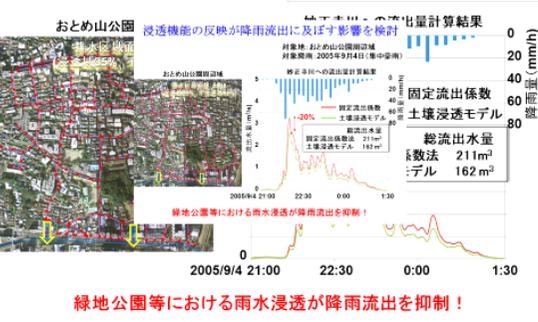
下水道渠水理解析(1次元)+地表面洪水氾濫解析(2次元) 国立環境研究所/JAMSTEC

- ▶高精度・高解像度な地表面情報の整備
(数値標高:1m, 航空写真:20cm解像度, 建物・土地利用現況:縮尺1:2,500, ...)
 - ▶シミュレーションの実施
- 結果の1例:計画降雨を入力データとした神田川落合崖線下での氾濫計算結果



浸透機能の反映が降雨流出に及ぼす影響を検討

対象地:おとめ山公園周辺域
対象降雨:2005年9月4日(集中豪雨)



シミュレーションしてみました。その結果、樹木を植えることによって水の流出量が約20%軽減することがわかりました。雨が降り始めてからすぐに 20%が軽減することが、実際には浸水するかどうか効いてきて、浸水の総流出量を抑制できることがわかってきました。今日は詳しく申し上げませんが、樹木の種類と植えられる状態によって保水力は変わりますので、植樹をうまく利用すれば、内水反乱を抑制する施策としての有効性があるということです。

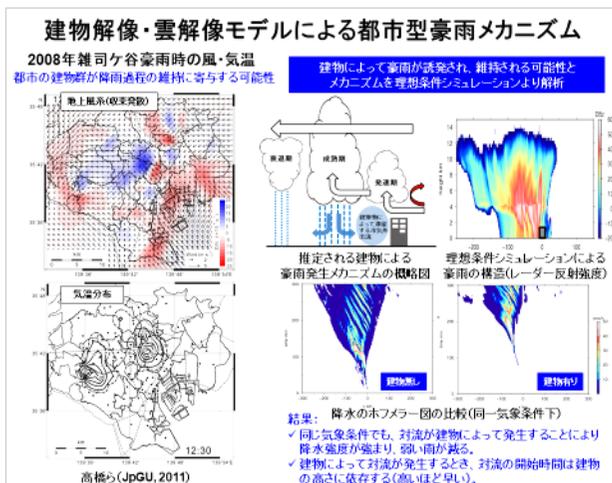
ここからは施策の話題に変わります。先ほど触れましたが、豪雨が起きたとき都市の浸水はどうなるのか、このシミュレーションを国立環境研究所と共同研究したことがありました。浸水を予測するモデルは、河川と都市のマンホールがどうつながっているかまでモデル化されており、平常時の逆流までが表せる内水氾濫をシミュレーションできるモデルです。理想的に入れた突発的な集中豪雨の1時間後、2時間後、2.5時間後、3時間後の内水氾濫の様子をシミュレーションすることができます。そのシミュレーション結果を観測値と比較し、このモデルとシミュレーションがどれくらい正確かを検証することができます。

中央大学の先生方とも共同研究させていただいて、樹木を植えることによってどれくらい浸水を抑えられるかどうかを、樹木が持っている地面の保水効果を導入して

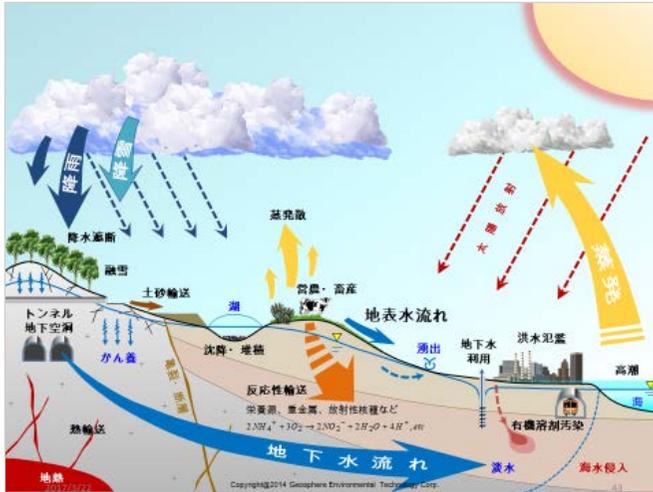
共同研究をしていた中央大学では、さらに研究を進めて、緑地創出のシナリオを考え、緑地を創出した場合としない場合を考えると、浸水を軽減できる場合があることがわかりました。そのほかにも、公園内に貯蓄の装置や施設を造るとか、公共施設や校庭の貯水池、屋上の貯水など、内水氾濫を防ぐためのさまざまな浸透の公共施設や施策が考えられています。



研究中の課題ですが、建物は風を遮ったり、通り道となるだけでなく、降雨の状況に影響を与える、例えば、降雨時間を長びかせる状況に影響を与えている可能性があることがわかってきました。首都大学東京の高橋先生たちは、2008年の雑司ヶ谷豪雨を対象に、複数の建物が連立して建っているような特徴が、強い雨が降っている降雨時間を長引かせているのではないかという仮説を観測結果から出されています。その仮説をもとに、私たちはシミュレーションを数mという非常に高い解像度で実行してみたところ、建物のあるなしで雨の降り方が変わることがわかってきました。つまり、都市域の建物の分布は雨の降り方に影響を与える可能性があるのです。これまでは建物が降雨に影響をあたえるということはほとんど考えられてきませんでした。



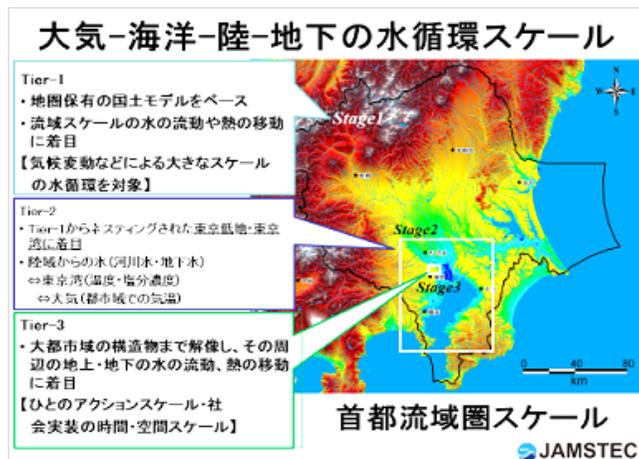
ほとんど考えられてきませんでした。建物を変える、樹木を植えるなどによって、雨の降り方が変わる、あるいは豪雨の際の内水氾濫の状況が変わることが、さらに定量的に理解できれば、実現可能な施策として用いることができます。さらに、様々な条件を設定して施策



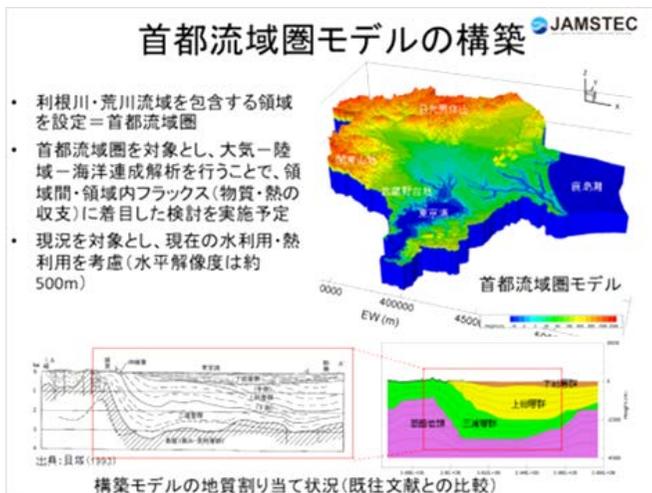
の中でも何が最も効果が高いか、などの検討にもシミュレーションを用いることが期待できます。現在、私たちは、大気や海洋、陸の表層部分だけでなく、大気から降ってきた雨がどんなふうに地面の表面を流れて地下にも浸み込み、地下水の流

動や最終的には海に流れるさまざまなスケールを持つ水の循環がどうなっているのかを表すモデルを開発しています。

このモデルを使ったシミュレーションから、水の循環の全体像を再現し、将来の予測をしようとしています。山に降った水が地表をどう流れて、地表水は比較的わかりやすいですが、地下水はどう流れて、湧き出したり溜まったりしているのか、川の何倍もの水が川の下を流れているといわれているけれどそれほどのように水が集まって流れているのか。水の循環は人間活動に影響を及ぼし、また人間活動も水の循環に影響を及ぼしています。これら水の循環全体を把握し、予測し、よりよい水環境をつくるために貢献したいと考えています。



関東圏全体の水の循環や都市域の水循環、さらに構造物まで解像できるような小さなスケールでの水循環もターゲットとしたシミュレーションを私たちは考えています。先ほどからお話ししている私たちが開発した大気と海洋を結合したモデルに地下水モデルを合体させて、水循環の全体を表現できるモデルを構築中です。

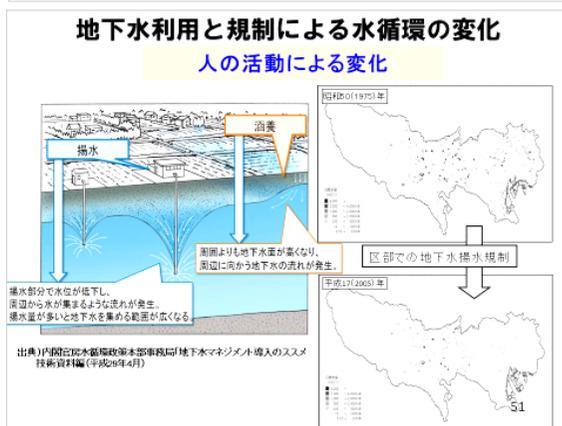
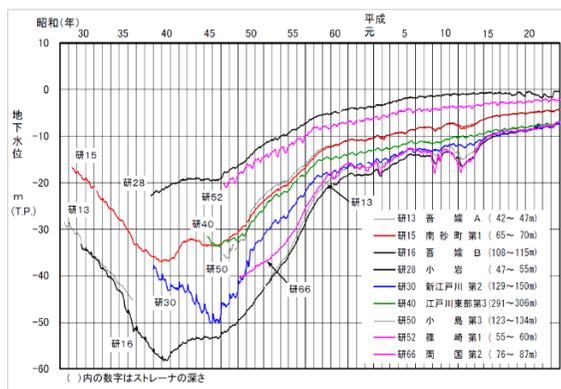


これができると、大気、海洋に加えて陸の表面から地下までの水の流れの全体像がわかります。まだ検証の途中ですが、左の図は関東域の地質のある断面です。このような地質構造もシミュレーションに設定して、観測データと比較しながら地下

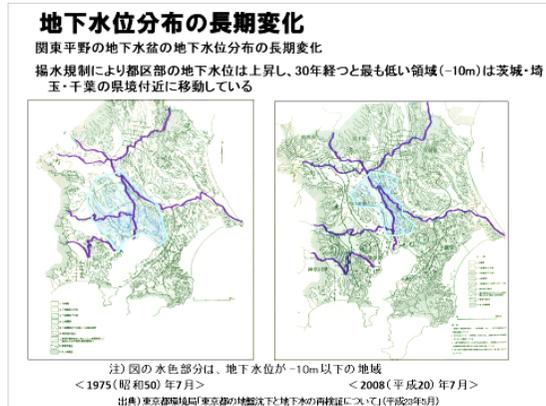
の流動を検証し、モデルが表現できる精度を高めます。

このような水の大循環シミュレーションを行うことで、土地の利用の変化や地下構造が変わったとき、地下水をくみ上げたり川や地下に熱を放出したりする人間活動による水環境への影響を評価したり、予測することが可能になります。

よく知られている人間活動の水循環への影響は、地下水のくみ上げによる影響です。都市域の人口増加と工業化によって地下水を大量に汲み上げたことが原因で、1950年～60年代の高度経済成長期に首都圏の地下水位は右の図のようにどんどん減少したのです。地下水の減少が原因で地盤沈下が発生したとされました。昭和30年～40年の間に地下水の揚水規制が設定されたことによって、地下水の水位はもとに戻ってきました。水位がもどるのに30～40年はかかっているのでしょうか。



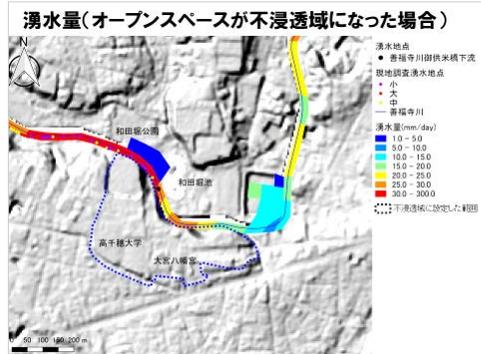
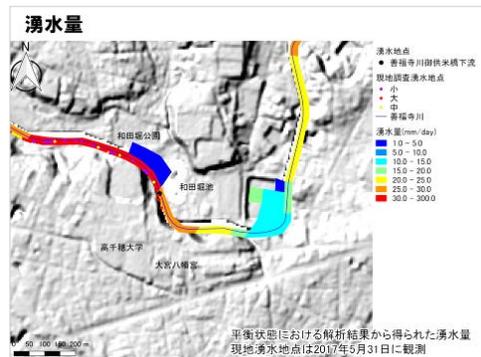
右の図で、水色の部分は地下水位-10m以下の地域を示しています。左側の昭和50年は東京周辺の南関東にあったのですが、現在は北関東へ移動しています。これは人間活動による水のくみ上げ場所が変化したためだと考えられています。詳細はわかっていますが、



せん。水がどこに浸透し、どこからくみ上げられ、どのように流れるかということは、井戸や揚水をしているところの観測によってわかる部分もありますが情報は非常に不足しています。また、地下水位が下がって地盤沈下によって変質してしまったと考えられる土壌の状態はもとに戻りません。井戸の観測では地下水位が増加してはいますが、おそらく地下水の流れ方は過去とは違ってしまっているでしょう。さらに将来はどのような地下水変化がありえるのか。私たちは、地表に降る雨の変化、そしてそれが地表や地中において人間活動によってどのように変化するかということも調べていきたいと考えています。

様々な水の情報データベースを作りながらこの研究を進めているのですが、水の大循環の形相というか、水の循環の詳細な様子を解析中です。解析結果の1つの例を説明します。

右の図は、青い点線で囲んだオープンスペースがアスファルトなどで水が浸透しなくなった場合はどうなるかというシミュレーション結果です。このような解析により、埋め立てたり、建物を建てたりすると水の流れがどう変わり周辺にどう影響が出るかが分かります。この解析結果からは湧水量が変化することがわかります。





逆に、この湧水がどこの水が集約されて湧水となっているのか、ということもシミュレーション結果を解析することでわかります。左の図は赤いポイントで示した湧水が、どの地域の水が集まってできているかを示したものです。この結果は、例えば、湧水を守るため

にはどういった都市計画を考えなければならないかという地域施策に利用することが考えられます。このような成果を使って、共同研究している中央大学石川幹子先生が中心になって区に対して提言をしています。このようなシミュレーションと施策の検討や評価を繰り返すことによって、サステナブルな水の循環を実現したいと考えています。タイトルには水事情ということを挙げましたが、降雨の話、地下水の話、施策の話、私たちが取り組んでいる水をどうコントロールし、施策をどう打ち出したらいいのか、水環境をよりよいものにするための試みはシミュレーションを基盤にしています。いかに現実に近い精緻な物理モデルを構築し、大規模なシミュレーションを通して現実を見通し、課題を同定し、解決にむすびつきたいと考えています。

時間がなくなってきましたので、また別の機会にお話しできればと思いますが、皆さんご存知の SDGs のゴールにも、水に関わる課題が幾つか挙げられています。実際にはこれらの一つ一つの問題は別ものではなく、その繋がりものも考えていかななくてはならないだろうと思います。

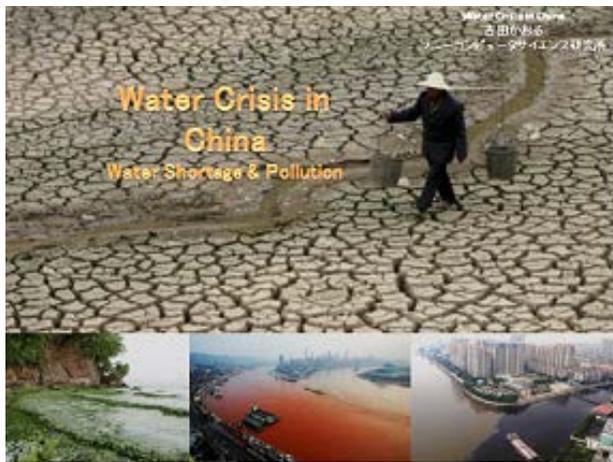


また、世界的に水の事情はどう変わるか、既にいろいろなところでいろいろなことが言われていますが、私たちの研究は、海外では、まずはカリフォルニアの干ばつと洪水の劇的な変動の予測と施策に応用したいと考えています。カリフォルニアでは水が多いときと少ないときが、同じ川で繰り返し起こっていて、



これがどうして起こるのかはまだ分かっていません。こういうことが起きてしまうので、カリフォルニアでは飲み水や捨てた水を全部リサイクルしようという話もあります。ものすごい雨が降り、年々の変動で起きる異常乾燥

と異常湿潤の急激な切り替わりには名前がつけられ、もう少しこのような状況をコントロールあるいは予測はできないのかということが、研究の最先端のトピックスになっています。



左の写真は共同研究者の四石田さんからいただいた中国のようすです。栄養過多の海、です。都市の河川の中央の赤い部分は、化学物質の汚染と思われます。このような干ばつや汚染などにも、私達の研究を活かしていきたいと考えています。

ご清聴ありがとうございました。

講演者 香取 秀俊 氏 紹介

専務理事 久良木 博史

香取先生は 1988 年に東京大学工学部物理工学科を卒業され、94 年に同大学にて工学博士の称号を取得されました。1994 年から 97 年までは、ドイツのマックス・プランク量子光学研究所に客員研究員として赴かれ、その後は現在まで東京大学と理化学研究所を主な拠点として光格子時計の研究を重ねられていらっしゃいます。2010 年からは挑戦的な基礎研究を推進し、科学技術イノベーションの創出を先導することを目的とした、科学技術振興機構（JST）の創造科学技術推進事業・香取創造時空間プロジェクトで研究総括を務められ、さらに 2018 年からは、JST の未来社会創造事業のプログラムマネージャを務められていらっしゃいます。また、2017 年には光格子時計の考案、実証および高精度化の功績で、江崎玲於奈賞を受賞されるなど、長年の研究が高く評価され、多くの受賞歴をお持ちでいらっしゃいます。

これからお話を頂く「光格子時計」の概念は、2001 年の国際会議で先生が世界初として発表されたものと伺っております。セシウム原子時計が現在の 1 秒を定義している中で、先生の提唱には賛否両論があったようですが、今や先生は光格子時計分野で、まさに世界をリードするご活躍をされていらっしゃいます。

誰もやらない研究領域で、かつ皆の役に立つことが大事という思いで、光格子時計の研究を推進されてきたとの事です。また若い人には、好きなことをとことん突き詰めて考える事が大事とも語られ、難しい課題の研究を続ける原動力は好奇心とも語られています。誰もやらない研究なら気持ちが良いとおっしゃる先生ですが、気が付けば多くの世界の研究者が、先生の提唱した光格子時計の研究領域に興味を持ち、必死に突き詰めている状況になっているようです。今までの時計の概念を大きく変え、正確な時を刻む以上の新たな役割を担う未来の時計。光格子時計をひとつのインフラとして捉え、その上に多くのアプリケーションが展開されることで、将来の我々の生活に多大な利便性をもたらす可能性を先生は考えられておられるようです。それでは光格子時計について、その原理から応用まで、最新の研究成果をお伺いしましょう。

時空のゆがみを見る時計：光格子時計

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授
香取 秀俊

これから、原子時計の話をしてします。今回お話をいただきまして、ぜひセイコーで光格子時計を作ってほしいと思ってやってきました。

先ほど高橋先生のお話を聞いていて、きれいなアニメーションがたくさん出てきて羨ましいです。私のほうは数式が並びますが、気軽に聞いてください。



今までの時計は時間を共有するための道具でしたが、精度が上がるといろいろなことが見えてくるという話をします。

原子時計は物理の研究で使う特殊な装置と思われるかもしれませんが、現代人は原子時計のヘビーユーザーです。今日ここに来るとき、初めての場所なのでスマホを見ながらやって来ました。スマホのナビゲーションで使う GPS 衛星には高精度な原子時計が入っています。自分の位置を知りたいければ、自分の位置と原子時計の入っている GPS の衛星の位置の相対的な関係を、時間を使って知ります。自分の x 、 y 、 z の座標と、(スマホに入っている時計は大した精度はないので) 正確な時間 t も知る必要があります。これら 4 つの未知数を求めるには、4 つ方程式を解けばいい。

このために、頭上の 4 台以上の GPS の衛星を見て自分の位置を計算するのがスマホのナビゲーション機能です。グーグルマップのサービスが 10 年前に始まって、最近では皆さんスマホのナビを見ながら道を歩くようになりました。



もうひとつ、工学的にも大成功していると思うのが、電波時計です。電波時計は、スーパーに行くと 980 円で売っているのです、いつの間にか家中に何台もあります。複数時計を持つと、時間合わせが面倒くさいのですが、電波時計は勝手に原子時計に時間を合わせてくれます。電池さえあれば、調整不要で正確な時を刻みます。このように非常に正確な原子時計の時間が身の回りに溢れているのが現在の状況です。

どうやって時間を測るか。
一番簡単なものが振り子時計です。振り子の長さが分かれば、地上の重力加速度で周期が決まります。ある一定の周期現象を見出すのが、時計を作るための基本です。

今、1 秒を刻んでいるのは、セシウム原子の原子時計です。

セシウム原子の振り子が 92 億回振動したら 1 秒とするように時間を測ります。

このように T の周期現象を見出して、 n 回数えたら t が経過すると時間を測るので、時計で大事なのは、周期現象がどれだけ一定かです。周期がほんの少しだけ変わっても、 n 回数えると n 倍時間が変わってしまう。したがって正確な周期現象をいかに見出すかが大事になります。

時計の精度は何時間たって何秒狂うと表現します。時計の精度を決めているのは周期やその逆数の周波数です。これらが、どれだけ一定であるかが、時計の性能を表わす大事な指標です。

いい時計を作ることは、いい振り子を見つけて正確に測ることです。我々物理学者は、物理定数は不変だと信じているので、原子の振り子を数えれば不変な 1 秒を皆で共有できるはずで、このための道具が原子時計です。でも、物理定数が不変と仮定しているだけで、検証されてはいません。いい時計を作ると、最終的にはこのような物理の重要なことが分かるかもしれないと思って研究しています。

どうやって時間を認識する？

周期: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$
振動数: $\nu = 1/T$

$\nu = 9\,192\,631\,770$ 回振動すると1秒

^{133}Cs 原子

周期: $T = 1/\nu$

- 周期 T の現象を見出す: 地球の自転、振り子、原子の振動...
- 繰り返しの回数 n を数える: 経過時間 $t = n \cdot T = n/\nu$
- 周期が δT 狂うと、時間も $\delta t = n \cdot \delta T$ だけ狂う
→ 時計の(相対)精度: $\delta t/t = \delta T/T = \delta\nu/\nu$
- 精度の高い時計を作るには、いい時計の振り子を見つけて、正確に測るのが大事
- 物理定数は不変と思うと、原子の振り子の振動数も不変なはず

時計の精度の表現

(いい時計を作ることはいい発振器を作ること)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{10 \text{ s}}{1 \text{ yr.}} = \frac{10 \text{ s}}{60 \times 60 \times 24 \times 365 \text{ s}} \approx 3 \times 10^{-7} \left(= \frac{\Delta \nu}{\nu} \right)$$

(高精度なクォーツ腕時計)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{6000 \text{ 万年}} \approx 5 \times 10^{-16}$$

(国際原子時、セシウム原子時計)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{2 \times 138 \text{ 億年}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

(光格子時計)

つ目に数字、この場合は 3、が来るというものです。この指数部の数字を使って、7 桁の精度の時計という呼び方をします。今の 1 秒の元になっているセシウム原子時計は、新聞で紹介される時は 6000 万年たって 1 秒の精度と言われます。1 秒を 6000 万年で割ってみると、 5×10^{-16} 、従って 15 桁か 16 桁ぐらいの精度です。

これから、光格子時計の話をしていきます。ゼロが 18 個並ぶ、18 桁の精度の時計です。これを言い換えて、宇宙誕生から 138 億年、さらにその 2 倍たっても 1 秒も狂わない時計ですと言うと新聞記者さんには喜ばれます。とは言え、そんなに長生きする人はいないので、1 秒狂っても狂わなくても、その精度の恩恵にあずかる人はいないだろう、と考える人も多いだろうと思います。どうありがたいのか、どう世の中の見方が変わるかのお話をしていきます。

ちょっと脱線します。大きな数の呼び方は、何億円、何兆円、と聞きなれていますが、小さい呼び方はあまり聞きません。便利な時代で、ウィキペディアで小さな数の数え方を調べるとすぐに出てきます。分、厘、毛ぐらい迄は何となく知っています。

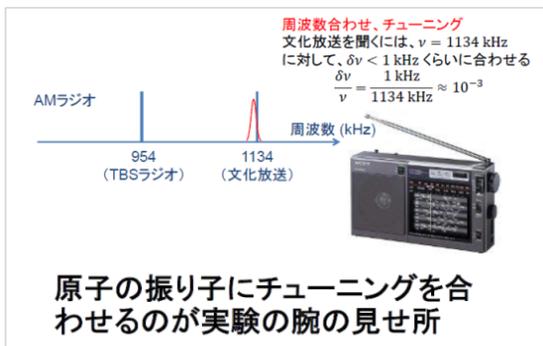
10^{-18} 、マイナス 18 乗はどう呼ぶか、格好いい名前がついていて、「刹那」というらしいです。ということで、光格子時計は「刹那」を測る時計です。

小さな数の数え方(分、厘、毛、糸、…)

分	ぶ	$0.1(10^{-1})$
厘	りん	$0.01(10^{-2})$
毛	もう	$0.001(10^{-3})$
糸	し	$0.0001(10^{-4})$
忽	こつ	$0.00001(10^{-5})$
微	び	10^{-6}
	——中略——	
遼巡	しゆんじゆん	10^{-14}
須臾	しゆゆ	10^{-15}
瞬息	しゆんそく	10^{-16}
彈指	だんし	10^{-17}
刹那	せつな	10^{-18}
六德	りつとく	10^{-19}
虚	きよ	10^{-20}
空	くう	10^{-21}
清	せい	10^{-22}
淨	じよう	10^{-23}

光格子時計は“刹那”
を測る時計

5



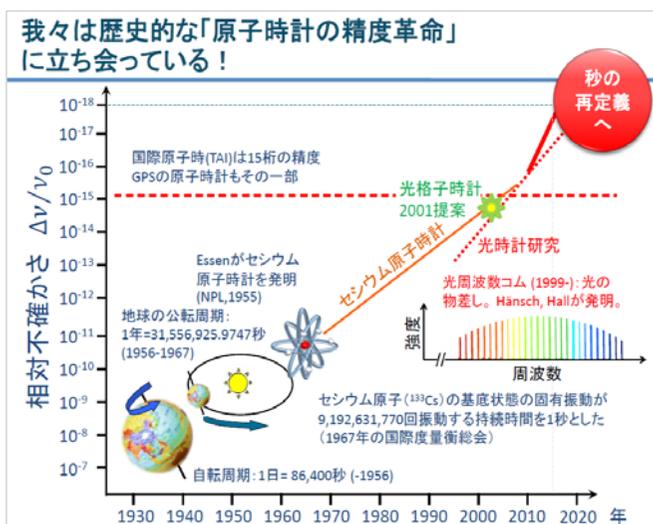
原子時計を作る時に我々がやることは、原子の振りにチューニングを合わせることです。チューニングと言っても、今の若い学生には全然通じません。恐らくこの会場にいる世代だと、チューニングは分かると思います。

昔の AM ラジオ、例えば文化放送が聞きたいと思ったら、1134 キロヘルツにチューニングのノブを回す。うまく回すと文化放送のラジオが聞こえる。この時ほどのぐらいの精度で、手でチューニングしているかという、恐らく 1134 キロヘルツに対して、1 キロヘルツの精度まで手で合わせると、音が聞こえてくるといいます。そうすると、このチューニングの精度は 10^{-3} です。我々の腕の見せ所は、原子の振動に合わせて 10^{-18} の精度でチューニングすることです。

今、原子時計の精度革命に立ち会っています。

昔、時計を作るのは天文学者の仕事でした。天体観測をして時間を刻む、そういう人は王の側近でした。実際、この天文学的な秒が、半世紀前までは現役でした。地球の公転周期で時間を刻み、時間の測定精度は 10 桁ぐらいでした。

1967 年に天体観測から、セシウム原子の振動を使った原子時計に変わりました。今 Google が量子超越を言っていますが、時計の量子超越はもう 50 年も前に起きていました。セシウム原子時計で、10 桁の精度で 1 秒の定義を引き継いで以来、その精度はどんどん向上して、今は 15 桁から 16 桁の精度でセシウム原子時計は刻んでいます。GPS のナビゲーションもこのような高精度な原子時計のたまものです。



セシウムの原子の振り子は、先に言ったように 1 秒間の 92 億回振動するマイクロ波の振動です。これに比べて 1 万倍以上も早く振動する、光の振動を使うと、時計の高性能化が期待できます。1960 年にレーザーが発明されると、光の発振器を使った原子時計を作ろうという流れができました。レーザー技術の成熟した 1980 年ぐらいから、光原子時計の研究が本格化しました。

今日お話しする光格子時計は、2001 年に提案した方法です。光格子時計ではセシウム原子時計の精度を 3 桁改善して、18 桁の精度で時間が読めるようになりました。セシウム原子時計よりも 1000 倍も精度よく 1 秒を定義できるので、10 年ぐらいのうちに、秒の新しい定義がなされるだろうと予想されています。

- GPS/GNSSの利用で、原子時計は日常で不可欠な道具になった
- さらに、3桁精度が向上すると何ができるだろう？
- 不連続な精度向上がもたらす、不連続な未来を考えよう

原子時計は日常に不可欠なツールです。今セシウム原子時計で十分用が足りているからいいとも思えますが、時計の精度が更に 3 桁上がるとどんなことが見えてくるのか。そんな未来を考えてみたいと思います。

原子時計が測っているのは花火の色です。花火を見ていると、どの原子が光っているのかを考えたくになります。だいたい色はナトリウムの原子が光っていて、青緑色はバリウムや銅が光っています。

これからお話しする光格子時計で使う原子はストロンチウムで、青と赤のスペクトルの炎色反応を示します。下の写真で、赤と青が混ざって紫色に見える部分がありますが、これがストロンチウムの花火です。今回時計に使うのは赤色で、1 秒間に 400 兆回、光の波が振動します。光格子時計はこの 400 兆回の振動を正確に測って時計を作ります。

これからの話の前に、量子の世界の説明をする必要があります。今使っているレーザーポインタもそうですが、光は粒であり光子と呼ばれています。光子はエネルギー、プランク定数×振動数、を持つ粒子です。

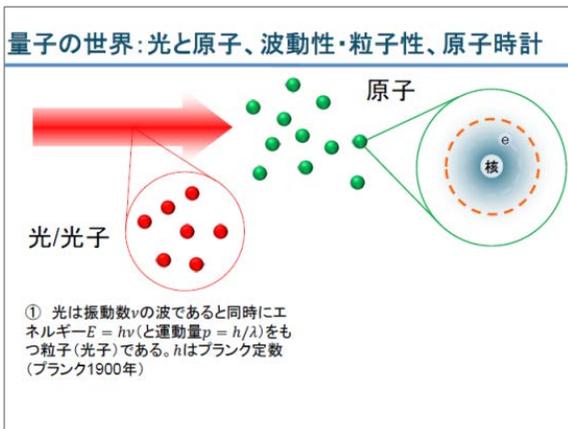


この光子が原子に当たります。原子の中身は、図のように核の周りを電子が回っています。ちょうど特定の振動数のエネルギーの光子が来ると、基底状態を回っている電子の軌道が励起状態になります。これを量子跳躍と呼びます。花火の場合、火薬を爆発させて基底状態の原子を励起状態に量子跳躍させます。励起状態の電子が基底状態に緩和するというプロセスで、光を出します。その光を見ているのが花火です。

花火で見た色の光の振動をきちんと数えるのが原子時計です。原子時計では原子の振り子の振動数、つまり、花火の色を正確に数えて振動の基準にします。

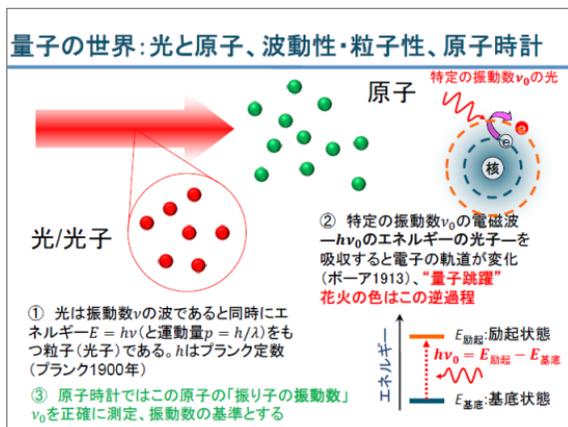
それをどうやって時計にするか。原子（緑）に光（赤）を当てます。この時、原子の共鳴周波数に光の周波数が合うようにうまくチューニングする仕組みを作ります。そして原子の周波数を発振器にコピーすることができたら、歯車を使って分周します。そして何回数えたら1秒、とすれば時計になります。

今日お話しするのはこの部分で、レーザー光の周波数を、うまく原子の振り子



にチューニングを合わせて、原子の振り子の周波数に合った、安定した発振器を作るという話です。

原子の周波数を高精度に読み取るためには、できるだけたくさん原子を集めて、強い信号を得ることが必要です。たくさんの原子を捕まえるために光格子を使います。難しい話は省略しますが、原子を掴むと、原子の振り子の周波数が変わります。何とかうまく周波数を変えないように掴む方法はないかと考えたのが、光格子時計です。



時計の研究はなぜ面白いのか。時計は、原子のミクロな世界と

マクロな世界が出会うところで、振動はマイクロもマクロも一緒です。研究者が顕微鏡を覗いて小さな世界を見るように、我々はマイクロな振動をマクロな時計にコピーすることで、マイクロな振動を研究します。マイクロな世界で何が起きているかに興味があります。

これは私のセイコーの時計です。20年ぐらい前、光格子時計の最初の研究を始めたころにある賞を頂いたときの副賞です。確かに狂わなくて、いい時計は素晴らしい。これは、時計の研究をなさしてもらった副賞のような気がします。

時計はマクロとマイクロの世界が出会うところ

マクロな水晶振動子の振動



マイクロな量子(原子)の振動



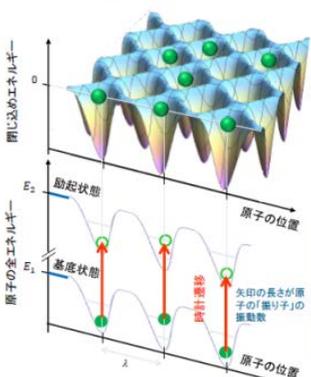
- ミクロでも、マクロでも、振動は同じ
- ミクロな振動をそっくりマクロな振動にコピーするのが原子時計
- 時計の研究では、マイクロな「量子の世界」をマクロな世界に直接つなげて、マイクロな世界を調べられる

そのころ光格子時計という方法を考えました。原子を捕まえるために、光の定在波で卵パックみたいな原子の容器をたくさん作ります。たくさんの容器を作れば、そこにたくさんの原子が捕まえられます。原子を捕まえるには、空間的に原子のエネルギーを変えればいい。エネルギーが一番小さくなる場所に、原子が捕まえられます。

しかし、原子時計で正確に測りたいのは原子の基底状態と励起状態のエネルギー差です。もし原子のエネルギーが空間的に変わると、時計の周波数が変わってしまうので、せっかくの原子時計が台無しです。

光格子時計で考えたことは、原子をつかむために基底状態のエネルギーを空間的に変えるとき、全く同じように励起状態のエネルギーも変えることができれば、

光格子時計：奇想天外な企て



光で「原子の魔法の箱」を作って、「原子の振り子」に気付かれないように原子をつかんで運動を凍結

- ドップラー効果をゼロに
- 多数個の原子を同時に観測
- 高精度原子時計実現の突破口

2001年、香取、Frequency Standards and Metrology Symposium (原子時計の国際会議)

- 原子に余計なエネルギー変化を与えないように原子をつかむ：

$$h\nu = h\nu_0 - \frac{\alpha_g(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m)}{2} E^2 + \text{高次項}$$
- 魔法周波数、magic frequency

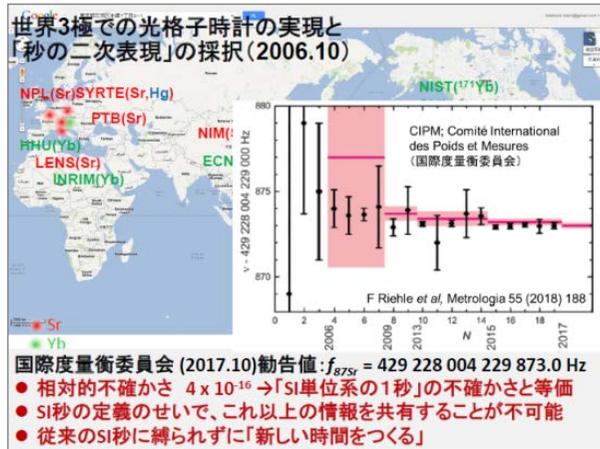
$$\Delta\alpha(\omega_m) = \alpha_g(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m) = 0$$
- 高次項の影響：18桁目ではしか現れない

14

このエネルギー変化が相殺して正確な時計が作れるだろうということです。そんな提案をしたのが、2001年の会議でした。18桁ぐらいまではこのエネルギー変化を正確に合わせられるだろうと計算し、18桁の時計ができます、と発表しました。

この提案をした 2 年後の 2003 年に最初の実験が成功しました。その後、2005 年には光格子時計ができました。その翌年には、同じ手法をフランスやアメリカのグループが採用して、日本、フランス、アメリカで同じ時計ができ上がりました。

世界 3 極で実現できたので、この時計を、将来の秒の定義の候補にしようと議論されたのが 2006 年です。今では、世界で 30 ぐらいのグループが光格子時計の開発を進め、ストロンチウムを使った光格子時計では 16 桁の測定ができています。



2005 年に開発が始まったころは、おおきな不確かさがありました。しかし、それから 15 年経ち、世界中の測定が高精度になりました。

国際度量衡委員会という機関があり、世界中で得た周波数から勧告値を決めています。有効数字を見ると 16 桁です。これは、今 1 秒の定義の実現精度が 16 桁しかないので、それ以上の周波数を書きたくても、表現する手段がないためです。秒の定義の精度を超えて数値を共有することは不可能です。

研究者としては、こういう状況が面白い。従来の枠組みにとらわれずに自由に研究にして、新しい時間をつくることができます。科学者としては、いままで見ることができなかった時間の隙間にどんな新しい物理や応用があるのかを、探していきたいと思っています。

国際単位系の秒は科学技術の要です。最初にご紹介した GPS を使った時刻同期は、現代社会の基幹技術です。

質量原器が廃止され、プランク定数で質量を定義するという定義の変更が今年の 5 月に行われ、大きなニュースになりました。新聞を読むのを楽しみにしていましたが、どの紙面にもプランク定数の説明はありませんでした。これは、すごく難しい話です。

なぜプランク定数を定義すれば質量になるか。光速は 1983 年に既に定義され

ています。一方、アインシュタインの質量とエネルギーの等価性から $E=Mc^2$ 、が成り立ちます。このエネルギーはプランク定数×周波数で測れるので、プランク定数を定義しておけば、質量を知りたいければ周波数を測ればいい、ということになります。難しいですが、次の世代の

若者は、きっとこれを普通に理解するようになるのだらうと思います。

こうなると質量を測るのも時計の仕事です。将来、セイコーで質量を測れるという話にしてもいいだらうと思います。

先ほど度量衡という言葉が出てきました。度量衡の言葉は、秦の始皇帝が国家を築くときに度量衡を整備しました、と中学校や高校で習いますが、それ以降ほとんど使うことはありません。

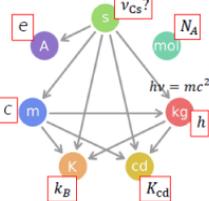
度量衡、特に時間は、重要な社会基盤です。時計のグローバルスタンダードは何か。英国議会の決定でハリソンに精巧なクロノメーターを作らせました。そのおかげで航海の安全が保障され、世界の海を制覇して、大英帝国が誕生しました。そのころ時間を測る役割をしていたのは天文学者でした。グリニッジ天文台を時間の原点にする、グリニッジ標準時が設定されました。若い人は知らないかもしれ

ませんが、ここにいる世代の皆さんは記憶にあるのではと思います。そうして日本は9時間のオフセットを持つことになりました。

フランス革命以来の近代度量衡でメートル法ができました。先ほどから SI 単位ができてきます。英語ならインターナショナル・システムですが、

国際単位系の秒(SI秒)は科学技術の要

- GNSS(Global Navigation Satellite System)による時刻同期、測位は現代社会の基幹技術
- Cs原子時計は、人類が科学知を共有するためのリファレンス： $(\nu_X/\nu_{Cs}) \times 9,192,631,770$ Hz
- SI秒を頂点とする、新しいSIの定義(2018年、国際度量衡総会)、質量原器の廃止、プランク定数を定義、2019年5月20日発効
- Cs原子によるSI秒は破綻の危機 (記述できない物理量が出現)
- 10年程度でSI秒の再定義
- SI秒の精度を超える計測の有効利用、物理定数の安定性、量子標準差計への応用…



度量衡は重要な社会基盤

「ソーシャルキャピタル」が及ぼすグローバル化へのインパクト

交易が加速度的に進むためのポイントは、社会基盤である。

たしかに、始皇帝がつくった秦(BC778-BC206年)という国家があったように、中国には大きな帝国が昔からあった。しかし、実質的に始皇帝はほとんど統治をしていなかった。にもかかわらず始皇帝の業績が素晴らしいのは、交易を促進する仕組みづくりを工夫したことだ。度量衡の尺度を統一したこと、通貨を統一したこと、文字を統一したこと。見ず知らずの人と交易できる仕組みをつくることが重要で、国家がそれを助長してきたことは紛れもない事実である。(新しいグローバルビジネスの教科書、山田英二)

時計のグローバルスタンダード:

- ① 英国議会、ハリソンのクロノメーター、大英帝国、グリニッジ標準時へ
- ② 近代度量衡、フランス革命、メートル法、Système international d'unités (SI)
- ③ カーナビ、測位、時刻同期のデファクトスタンダード、GPS(米国、DARPA=Defense Advanced Research Projects Agency、国防総省の機関)

メートル法以来、フランス人が守ってきた分野なので、フランス語、システム・インターナショナルなのです。

現在、時刻同期のデファクトスタンダードになっているのは GPS です。これは米ソ冷戦下、米国の国防総省が進めた大プロジェクトです。このように、国際戦略の要は時計であると思うと、時計開発は力を入れるべき研究課題です。

トピックス

光格子時計の小型・可搬化と高精度化をどこまで進められるか？

- 可搬光格子時計の青写真を作る、ラボ外運転
- スカイツリーの高さを利用した重力赤方偏移の検証
- 19桁の光格子時計もできそう。1mmが測れる
- まとめ

これからお話するトピックスです。光格子時計を作ったので、次は小型化、可搬化を考ます。

まず、小型化の青写真を作ります。今まで実験室で使っていれば満足で

したが、実験室から出してみよう。その一環でちょうど去年の今ごろ、光格子時計をスカイツリーに持って行きました。そしてスカイツリーの高さを利用して、相対論の検証をしてみました。

今は 19 桁の時計を作ろうとしています。そうすると、1 ミリの高さも時計で分かります。それが何に使えるか、考えていきましょう。

写真は我々の実験室です。光格子時計が入っている黒い箱は、1 辺 60 センチぐらいの立方体です。2 台の時計を作るのに 20 台の半導体レーザーがあり、その制御のために、多数のエレクトロニクスやオシロスコープがあります。

20 年近く前にこの研究を始めました。将来技術の大事な基



実験室のエレクトロニクスと光学系を19桁ラックに搭載可能な2箱にまとめる島津製作所との共同開発を2017.04に開始

礎研究であると言って研究費をもらったので、20年たった今、これを技術として成熟した形にしたいと思っています。

こんな多くのレーザーを使った複雑な装置は実験室では使えても、実用にはならないと多くの研究者が思っていました。この常識を変えてみたいと思っています。

ちょうど2年前、島津製作所と、光格子時計を小型化する共同研究を始めました。島津製作所にエレクトロニクスの部分を担当してもらいました。我々もレーザーを小さくまとめて、箱に入れました。実験室いっぱい広がっていた装置が、この2箱と光格子時計の本体だけに集約できました。時計は比べないと意味のある数字が測れないので、同じ性能の時計を2台作り、比較する実験を始めました。

時計は高さのセンサーになるという話をします。これは相対論の話です。高いところの時計は早く進みます。この最初の実験が、60年前のハーバードタワー実験です。そのときは、ハーバード大学の20メートルのビルの高低差で、わずかな違いが見えました。

(=位置エネルギー)

時計は(量子)重力ポテンシャル計になる

アインシュタインの相対性理論: 上方の時計は速く進む
 ● ハーバードタワー実験(1960): 高低差 $\Delta H = 22.6 \text{ m}$ で 2×10^{-15} 変化

$E_0 = h\nu_0$: 励起エネルギー
 原子時計は ν_0 を振り子にする

励起された原子 $|e\rangle$ は、励起光子のエネルギー分だけ重くなる: $M + h\nu_0/c^2$
 静止した光子の質量 ($h\nu_0 = mc^2$) 22

基底状態と励起状態のエネルギー差を見るのが原子時計です。エネルギー差をプランク定数で割った、原子の振り子の振動数が測定できます。

では、この振り子の周波数、振動数が高さでどう変わるのか。共鳴するエネルギーの光を入れると、原子が励起状態になります。この時、原子の重さはどうなっていると思いますか。核分裂で質量欠損が起こるとその分エネルギーに変わって原子力エネルギーになりますが、その逆のことが起こります。

励起された原子は、基底状態の原子に比べて励起エネルギーをもらっ

(=位置エネルギー)

時計は(量子)重力ポテンシャル計になる

アインシュタインの相対性理論: 上方の時計は速く進む
 ● ハーバードタワー実験(1960): 高低差 $\Delta H = 22.6 \text{ m}$ で 2×10^{-15} 変化

$E_0 = h\nu_0$: 励起エネルギー
 原子時計は ν_0 を振り子にする

励起された原子 $|e\rangle$ は、励起光子のエネルギー分だけ重くなる: $M + h\nu_0/c^2$
 静止した光子の質量 ($h\nu_0 = mc^2$) 23

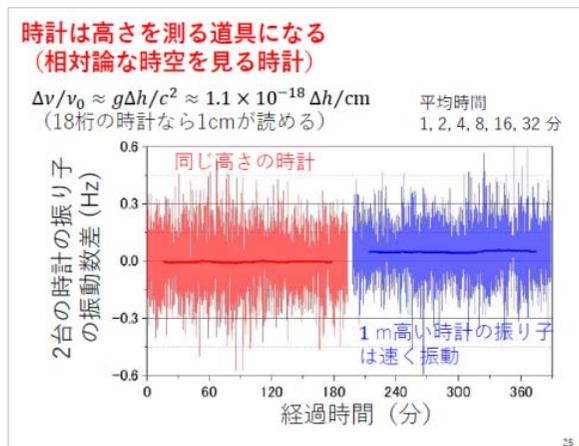
原子は余分の重力ポテンシャルエネルギーを獲得: $(M + \frac{h\nu_0}{c^2})gH$
 原子は振動数 $\nu = (1 + \frac{gH}{c^2})\nu_0$ の光子を放出
 → 上方の原子時計は $\frac{gH}{c^2}$ だけ速く進む

ています。そうすると、励起エネルギー分だけ重くなっています。先ほど、今年の5月からプランク定数で質量を定義すると言いましたが、まさにその話です。光子のエネルギー分だけ重くなった原子をビルの上まで持ち上げていくと、原子は、重力加速度 g と高さの差 H を掛けた重力のエネルギーを受け取ります。

ビルの上の原子が光を出すときには、この重力のエネルギー分、原子は高い振動数の光を出します。つまり、上の原子の振りは早くなります。早くなった振り子を見て時間を決めていたら、早く時間が進むことになります。

去年の9月にNHKが取材に来て、実験室の中で高さを変えてみてと言われて、時計を持ち上げる実験をしました。

2台の原子時計を用意して、1つはリフターで1メートル持ち上げ、両方の時計の振動数を比較したのが右の図です。横軸が経過時間で縦軸が2台の時計の振動数差です。赤色が2台を床に置いたとき、青色が片方を1メートル持ち上げたときです。最初は、



2台の時計が同じ高さなので、原子時計の振りの振動数の差は0でした。太い線が30分間の隣接平均で、振動数の変化がよくわかります。1メートル高い時計は早く振動し、このデータでは47mHz上の時計は早く振動しています。

刹那を見る光格子時計、18桁目の時間が測れるという話をしましたが、1cm時計の高さが変わると、18桁目で時間の進み方が速くなります。従って、18桁の精度の時計を使うと、1センチメートルの高さの違いが分かります。

こうなると、時計は時間を共有するための道具というより、むしろ、時計を見比べることによって高さの違いを知る、相対論的な時空を測る道具です。ということで、今日の講演タイトルになるわけです。

時計で、重力で曲がった時空間を映し出すことを、サルバドール・ダリは80年も前に想像していました。アインシュタインの相対論にインスパイアされて、サルバドール・ダリは、時空は地球の重力で曲がっているのを、「記憶の固執」

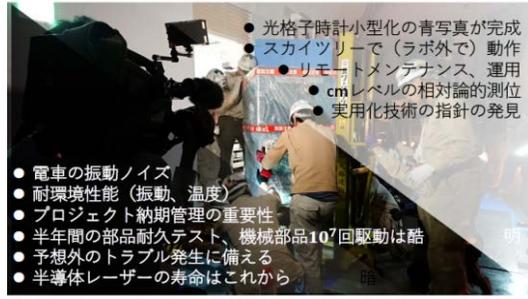
と名付けられた絵の中で、曲がった時計で表現しました。天才画家はすごいと思います。アインシュタインの理論を聞いてもなかなかこういう世界は想像できません。我々は、実験してみてようやく実感できました。

スカイツリーに小さくまとめた光格子時計を持って行きました。営業終了後、深夜の 2 時に 450 メートルの小さな部屋まで運んでもらいました。スカイツリーでの実験の為に、小型化の青写真を作ることができました。しかしかなり苦労もしました。スカイツリーは電車が 3 本乗り入れているので、いつも振動があります。また、営業中はお客さんがいるので 20℃ですが、夜中になると夏は 30℃になり、冬は 10℃になります。実験室と違い過酷な環境で、高精度な時計を動かさなければいけません。なんとか時計を動かして、センチメートルレベルで、スカイツリーで高さが測れました。

スカイツリーで使った時計の本体はこんな形をしています。ずいぶんコンパクトになって、長さは約 40 センチぐらいです。この中は超高真空になっていて、ストロンチウムの原子を捕まえます。これを運転するのに多くのレーザーが必要で、レーザー部分は横幅 40 センチ、長さ 60 センチ程度に小さくまとめました。レーザー調整はなかなか手間のかかるもので、溶接して固め可動部がないようにしました。この辺のプロセスは、今のクオーツの時計が実用化された時と通

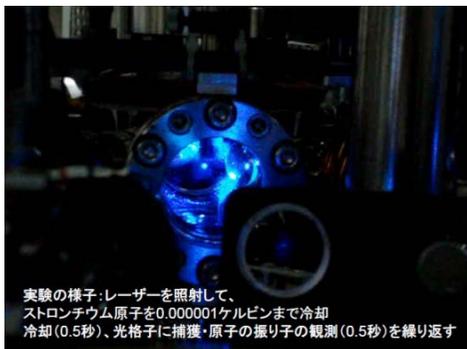


スカイツリー実験、相対論の検証、成功と失敗
—失敗は最高の教師である—



2018.10.03 2 am、スカイツリー450 m、天望回廊～2019.04.08まで実験

じるものがあります。昔の実験の教科書には、水晶の発振器は大事に扱いなさい、角を曲がる時は加速度を掛けないように曲がるようにと書いてありました。少し昔のレーザーはまさにそんなもので、レーザーは注意深く取り扱わないと思うように動きませんでした。



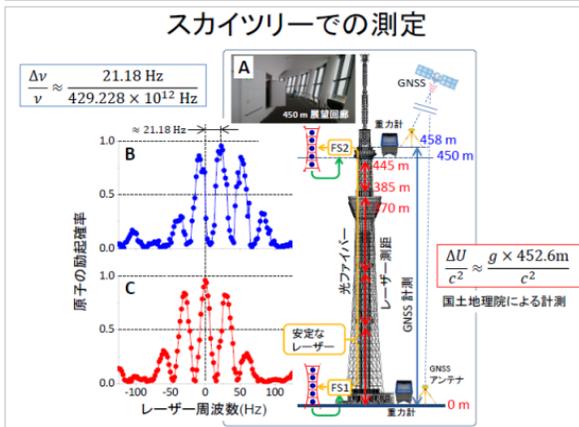
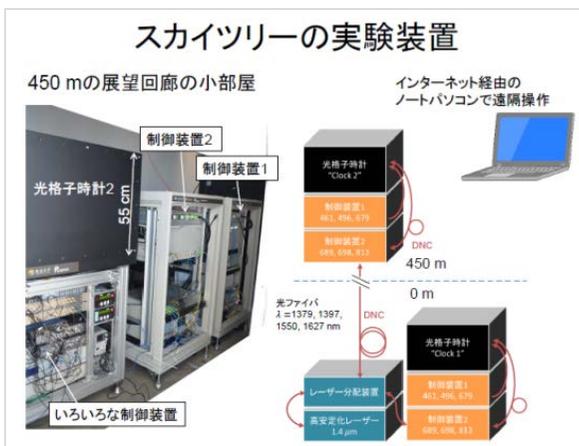
今回のように調整箇所をなくして安定したレーザーを作ると、今後はどんどん小型化する可能性があると思います。

この中で、原子をレーザー冷却するというプロセスがあります。ストロンチウムの原子にレーザー当たてるだけで、 10^{-6} ケルビンという極低温まで冷えます。そ

の極低温の原子を、光格子に捕まえて実験を進めて行きます。スカイツリーの上の時計と下の時計を、光ファイバーでつなげておきます。先ほどお話したのと同じように、上の時計の振り子の振動数、下の振り子の振動数を比較します。スカイツリーには頻繁に行くのは大変なので、全てをインターネット経由でリモートコントロールできるようにしました。そうすると研究者は、自宅や実験室からパソコンを操作すれば、この時計が動くということになります。

右の図は、スカイツリーで使った実験装置とその結果です。地上0メートルと、450メートルの展望回廊の小部屋に時計を置きました。二つの時計の振り子の振動数を比較すると、上の時計は21ヘルツ早く振動しました。

この結果が相対論と合っているかどうかを検証するために高低差を調べ、重力のポテンシャルを調べます。それを国土地理院にお願いして、やってもらいました。そうすると、時計の重力赤方偏移は重力のポテンシャル差から計算した値とぴったり合いました。



2018年10月31日

スカイツリーの上と下 時の流れ違う?

日本が開発の高精度時計で計測

「重力が強い場所では時間が少し遅く進む」という相対論の予測を検証する実験が、東京スカイツリーの展望台で行われた。地上実験で最高精度の検証

■ スカイツリーの450m展望台の振り子は20Hz早く振動
 ■ スカイツリーの450m展望台の時間は1日で4ナノ秒早く進む
 ■ スカイツリーの450m展望台の時間は1年で1.5マイクロ秒早く進む
 ■ 相対論は5桁の精度で正しかった(地上実験で最高精度の検証)

新聞が取材してくれるのはありがたいですが、どれだけ早く時間が進むのかという質問の説明が難しいです。上の方が 21 ヘルツ速く振動しています、と言われても実感は難しい。1日 で 4 ナノ秒速く進みます、というのもよく分からない。

では1年にしたらどうか。1.5 マイクロ秒、上にいると確実に速く進みます。これもまだわかりにくいようです。サイエンスとしては、この地上実験で相対論を5桁の精度で検証できたことが大きいです。時計は時間を共有するための道具から高さを測る道具、高度差計になる、と実感してもらえれば大成功です。光格子時計をこれからどんどん小さくして、道端にある水準点を光格子時計に置き換えるようになるかと思っています。そうすると、地面の高さが時間的にどう変化しているのかリアルタイムで読める世の中が来ます。

この手始めに、数年前、東大の時計と理研の時計を比べてみました。地形の断面を見ると、理研は東大に比べて標高が高いところにあります。国土地理院の方をお願いして、東大の時計と理研の時計の高さがどれだけ違うか、水準測量をしてもらったところ、標高差は15mでした。

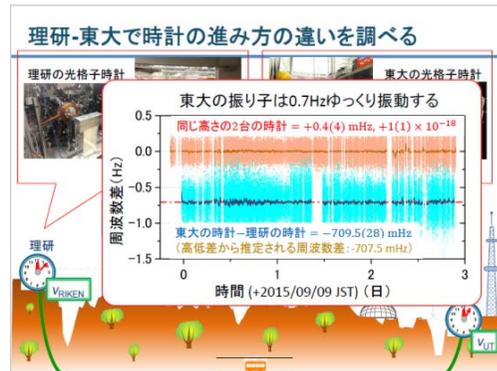
その間に、我々は時計の周波数の違いを測定しました。理研で同じ高さに置いた時計は、18桁まで周波数は合っていました。しかし、東大に置いた時計を見ると、700 ミリヘルツ、ゆっくり振動していることが分かります。

時計は量子・高度差計



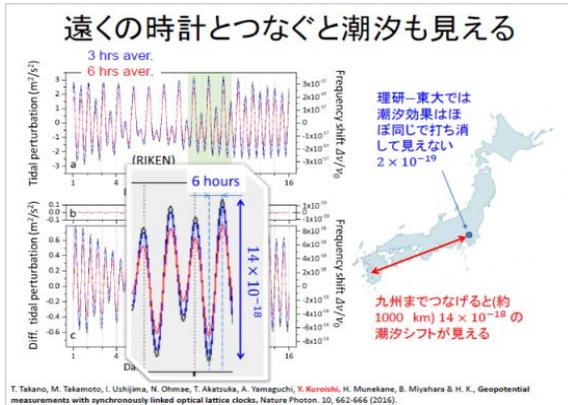
東大と理研の時間を比べてみよう

- 異なる機関間での時計の比較はSI秒の再定義に重要なステップ
- 18桁の比較では、むしろ重力ポテンシャル差を測っている！→相対論的測地
- 測地応用のためには、短時間で計測できることが大事→安定度のいい光格子時計の出版



これは国土地理院の方をお願いして測ってもらった 15 メートルの標高差とぴったり一致しています。

相対論の検証という目的なので 2 つの方法で測りましたが、時計の周波数差だけを見ていれば、高低差がわかるので水準測量が不要になる、というのが次のステップです。



時計をつなぐと、潮汐効果も普通に見えるようになります。東大と理研は 15 キロメートルしか離れていないので、月や太陽による潮汐はほぼ同相で起こり、同じように上がったり、下がったりするので、その差分はわずかミリメートル程度です。

ところが、例えば東京と九州の時計を繋げると、潮汐を受ける位相が 1000 キロメートル分違い、東京から見ると九州の時計は 6 時間で 14 センチぐらい上下しているように見えるはずです。そうすると、標高とは何かという話にもなってきます。非常に堅牢な時計、時間を持っていると地球の柔らかさが見えるようになります。

時計を使って高さを測ろうというのはもう現実の話です。ヨーロッパ、例えばドイツとフランスは国境を接していますが、ドイツとフランスの標高の基準は一緒ではありません。そうすると、ドイツからフランスの国境を渡るときに、標高がいきなり 10 センチずれるということが起こります。

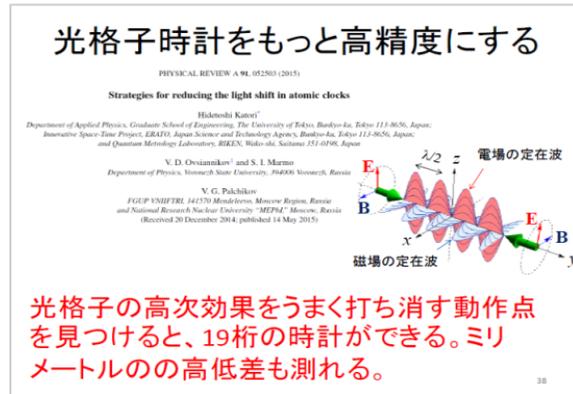
それでヨーロッパ圏で、標高の統一をしたいということになり、そのためにドイツ、フランス、イギリスで光格子時計を作って、光ファイバーで繋いで、欧州で標高の基準を作ることを始めています。



日本は、プレート境界に位置した特殊な環境にあるので、火山が噴火したり、地震がおきたりします。光格子時計でリアルタイムに標高差の変動が見えるようになると、予兆を捉えて減災するという応用もあると思います。

時計を使ってどんなことが見えるのか、いろいろな予想がされています。時計のネットワークを作って、そこにダークマターが来ると、時計のネットワークがずれてダークマターが見えるでしょう、とか理論家たちがいろいろ予想をしています。

正確な時計を比較することによって、今までの物理で見えなかった新しい物理が発見できたらいいです。応用も面白いのですが、新しい物理を探るプローブとして非常に興味があります。



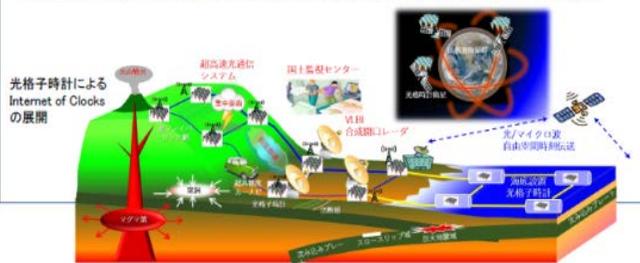
現在は 18 桁の時計で、高さの精度が 1 センチで測れます。もっといい光格子時計を作り 19 桁の精度を目指しています。恐らく 1~2 年後には、ミリメートルの高低差が測れるようになると思います。

光格子時計を提案したころは、そんなアイデアは上手くいかないだろうと多くの人が言うので、Curiosity driven に研究を進めました。いまや、これが技術として成立したので、次はそれを使って新しい産業の創出を考えたいと思っています。まず実験室から出して、無人運転とリモートメンテナンスがスカイツリーの実験でできました。次は、時計のネットワークを作ると、地下でどんなことが起こっているのか、プレートがどう動いて地上が変動しているのか、あるいはマグマが上がってきて、山腹が上昇するのも見えるでしょう。山腹の上昇を捉えることができれば、噴火の予測ができるのではないかと。小さな時計を作り、それで時計のネットワークを作り、新

Curiosity drivenなサイエンスから産業創出へ

光格子時計技術の産業化と基礎研究へのフィードバック

- 光格子時計のラボ外・無人運転化、リモートメンテナンスの実証
- 小型乗用車に光格子時計を実装(2019)、全世界の標準研に正確な時間を選ぶ(秒の再定義の布石)。相対論的測地の地震学、火山学へ適用の調査
- 通信ネットワーク網への光格子時計の網羅的設置による高精度時間インフラ構築、GNSS非依存な高度非同期ネットワークの構築
- 相対論的時計ネットワークによる国土環境監視、減災利用、物理定数の恒常性、相対論的検証を通した標準理論を超える物理学の実験的解明、光格子時計による秒の再定義



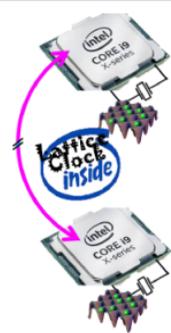
しい現象を見ていきたいと思っています。

今日の初めのスライドでは、時計の精度を表すのに 1 秒ずれるのにどれだけかかるか、という話をしました。実際に、通信や、情報処理で時計を使った装置を設計している人には、むしろクロックがナノ秒ずれるのに

かかる時間の方が、もっとリアルな話だと思います。

例えばペンティアムの CPU のクロックは数ギガヘルツです。そうすると、1 クロックサイクルは1 ナノ秒です。最初に出したスライドを書き直してみます。水晶が入っているクォーツ時計だと、1 ナノ秒ずれるのに 3 ミリ秒しかかからない。そうしたら、PLL で常に同期していなくては使えないということになります。商用の原子時計は 3000 万円ぐらいしますが、それを使っても 1 ナノ秒ずれるのに 5 時間。日々時間合わせをしていたら使いにくい。

システムクロックが1ナノ秒ずれるのにかかる時間



通信や情報処理では、1秒のずれよりも、nsのタイミングジッターのほうが気になる

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{3 \text{ ms}} \approx 3 \times 10^{-7}$$

(最高級のクォーツ腕時計)

msごとに時間合わせが必要

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{5 \text{ hours}} \approx 5 \times 10^{-14}$$

(商用の最高級原子時計、3000万円)

数時間ごとに時間合わせ

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{32 \text{ yrs.}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

(光格子時計)

30年以上時間合わせ不要、装置寿命より長い

光格子時計を小型化したらどうなるか。18 桁の精度だと、1 ナノ秒ずれるのに 30 年かかります。装置のシステム寿命より長いでしょうから、工場出荷時に 1 回時間を合わせたらそれで大丈夫です。2 つのペンティアムプロセッサが、光格子時計のクロックを持っていれば、クロックをつないで同期をすることなしに、30 年間もクロックサイクルがずれることなく同期動作するはずで

グーグルタイムライン
を使われている方はいま
すか。グーグルマップの
入ったスマホを持って歩
くと、GPS で自分の場
所のログが常に取られて
います。これは、先月ス
イスに行った時に、ホテ
ルと会議場の往復でつま
らない 1 日でしたとい



う証拠です。GPS のナビゲーション技術は米ソ冷戦下に端を発し、それが民生転換されると、この技術はあっという間に、ユーザーを広げました。カーナビに使われ、次は自動運転の時代になりつつあります。

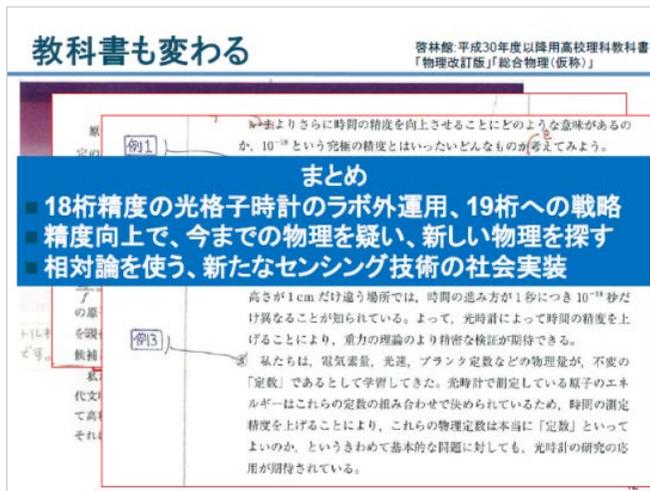
時空間情報や情報集約は、情報サービス産業の最高位に置かれています。前の講演の高橋先生のスライドにもグーグルの写真がたくさんありました。彼らは、戦略的にビジネスのコア戦略を練っていました。グーグルマップのサービスが始まったのは 2010 年で、我々はそれに依存した生活に慣れ切っています。それ以前の GPS が作られたころ、そして今のインターネットの前身 ARPANET が 1969 年。セシウム原子時計は 1950 年。こういう 60 年以上前の技術で、今の便利な世の中ができています。

光格子時計はセシウム原子時計の 1000 倍に精度を上げて、どんな使い道があるのか。今はそれを想像できる人がいません。しかし、歴史は繰り返します。これから半世紀後、どんなアプリケーションが待っているか。そこからバックキャストとして今何をすべきか。まさに想像力と構想力が問われているのだと思っています。

教科書も変わります。数年前、啓林館からホームページの写真を使わせてとの問い合わせが来ました。平成 30 年以降の物理の教科書に、光格子時計が登場するらしいです。そして、今日話したようなことを高校生が習うようです。時計の性能をどうやって評価するか、18 桁の精度ができる、そしてその時計でどんなアプリケーションがあるのか、ということが書いてあります。

相対論によると 1 センチで 18 桁目が変わるのを、高校生が習う。その高校生が大学生になったら、きっと光格子時計のいいアプリケーションを見つけてくれると期待しています。

この教科書の最後に、私たちは電気素量、光速、プランク定数等の物理量が定数だと教えてきましたが、実はそれが定数かどうか検証されていません、ということまで書いてあります。疑うことから学問が始まる、という意味で教訓的です。



最後にまとめです。光格子時計は実験室から離れて使えるようになりました。19 桁が見えるのももうすぐです。今までの物理を疑って新しい物理を探す。今まで想像しなかったような精度で今度は相対論を使った新しい先進的技術ができてくる。20 年、30 年、半世紀先を見据えて、社会実装することを考えていきたいと思っています。

ご清聴ありがとうございました。

公益財団法人 新世代研究所

〒 101-0063

東京都千代田区神田淡路町 1-23-5

淡路町龍名館ビル 4 階

TEL 03-3255-5922 FAX 03-3255-5926

<http://www.ati.or.jp/>

