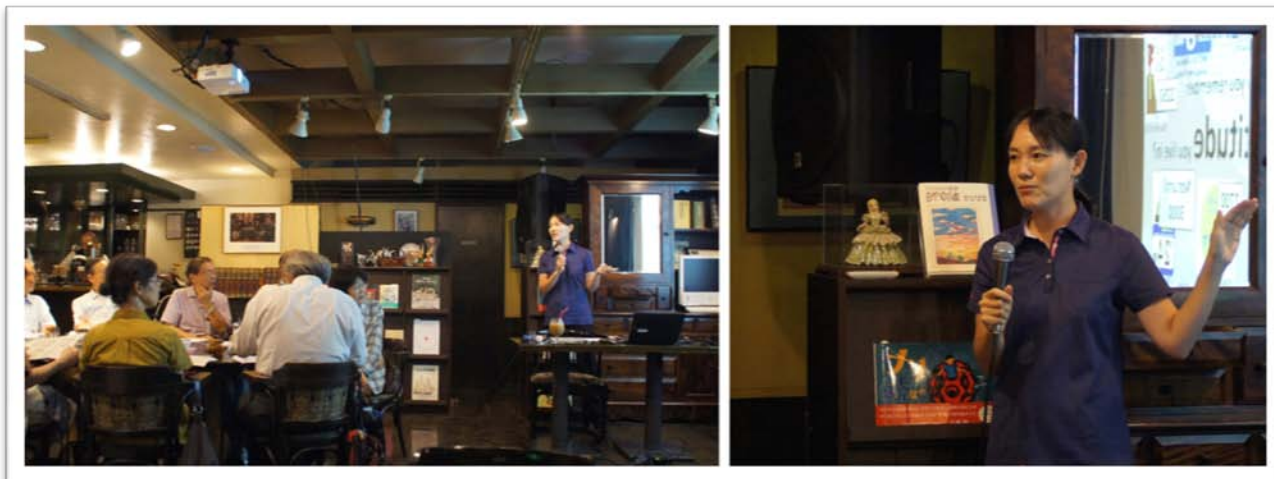


第28回 環境サイエンスカフェ

テーマ 温暖化による世界の氷河融解—海面上昇と水資源への影響—
 講師 平林 由希子さん（東京大学大学院 工学系研究科付属総合研究機構 准教授）
 日時 2015年7月29日（水）18：30～20：00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio
 参加者 38



サイエンスカフェ 「温暖化による世界の氷河融解」 ～海面上昇と水資源への影響

平林 由希子
 東京大学大学院工学系研究科
 付属総合研究機構
 （社会基盤学専攻 兼任）

1

1. はじめに

平林です。本日は気候変動による影響の一つ、氷河とまたそれによる海面上昇、または水資源についていくつかの研究の例をご紹介しますと思います。

まず少し自己紹介をします。(図2)このパンフレットは東大の駒場の学生に配っていたものです。実は私が2011年に一人目を産む直前にパンフレットを作ると言われて、ちょっとお腹が大きい写真ですけれども、私の同僚と一緒に撮った写真です。写っている3人は研究分野が全く異なります。

この方の専門は化学の触媒反応工学で、この方はカーボンナノチューブを作っている方で、私は

水循環に関する研究をしています。スーパー若手准教授と書いてありますが、工学系研究科のやっている若手育成研究者事業というもので、国際公募で選ばれて、出身の研究分野のある専攻には所属せずに総合研究機構というところに所属して、特別に広い研究設備を置くスペースと、スタートアップの研究費をもらいまして、ノーベル賞を目指してください、という身分です。私の研究分野にはノーベル賞はないので、世界のトップレベルを目指しています。



私の研究室は地球水循環インフォマティクス研究室という長い名前で、何をやっているかと言

ますと、衛星データや各種の実験データなどを集めて、地球環境のモニタリングをする研究、それから今日の話のメインになりますけれども、地球観測や数値の予報データを使いまして、自然系や人間系の水循環を数値シミュレーションするモデリング研究、またそれを使った風水災害の軽減に関する研究や、世界の持続可能性を実現するための情報基盤の構築に関する研究をしています。

IPCC というものを聞いたことがある方、ここにほとんどの方だと思うのですが、何をしているかと言いますと、IPCC というのは世界で唯一、最もオフィシャルな地球温暖化の状況をまとめて報告する団体で、数年に1度、電話帳のような分厚いレポートを出すことが主な仕事です。一昨年から昨年にかけて、新しいレポートが出たのですが、私たちの研究室ではこのレポートが出るのを見越して、世界の、私の専門である水循環、川の洪水や氷河がどう変化してきて、今後温暖化でどう変化するかというのを成果として出して、レポートに出したいと考え、ここ数年研究していました。

最終的には、我々は2つの研究成果を最新のレポートに無事載せることができたのですが、その1つが本日のメインテーマであります地球温暖化の世界の氷河の質量変化で、もう1つは洪水リスクの変化です。洪水リスクのほうはかなり新聞などに取り上げていただきまして、これは Nature Climate Change という、Nature という有名な雑誌の姉妹誌に載せていただいたので、かなり日本語の新聞にも載せていただきました。

何をしたかと言いますと、この地図の青い所が将来温暖化すると洪水が増える場所、赤い場所が

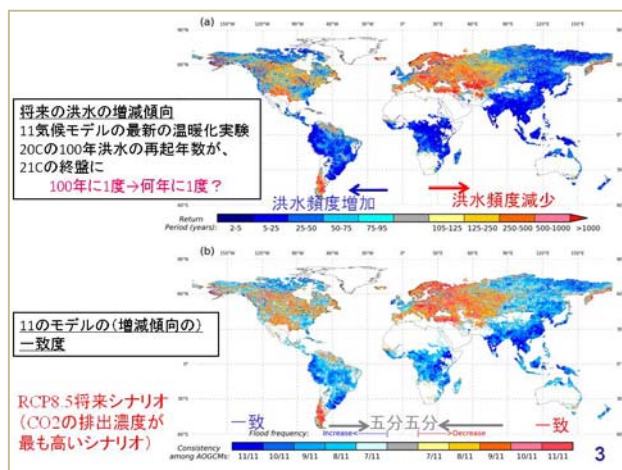
減る場所です。このような数値実験から、どこで洪水が増えるか減るかということを調べる研究をしました。(図3)

研究には温暖化実験というものを使っています。温暖化実験にはいろいろなシナリオがあります。シナリオとは何かと言いますと、人間社会がどういうふうに関後発展して、どれぐらい二酸化炭素を出して、それが大気中にどのぐらいとどまるのかというのを、想定したものです。将来の予測を当てるためではなくて、こういうシナリオだったらこうなりますよという見通しをいくつか想定した実験をします。先ほどの図はこの左上のもっとも温暖化が進行する最悪シナリオでして、もちろん世界中がかなり再生エネルギーを使って持続可能なシナリオをすれば、この右下の色が薄くなるというように、シナリオによってかなりこの差が大きくなるということがお分かりいただけるかと思えます。

こういう計算をして、例えば縦軸に人間、横軸に年を取りますと、温暖化すると洪水によって何人ぐらいの影響があるのかというのを、シナリオごとに計算することができます。例えばわれわれの結果ですと、20世紀の平均ですと、だいたい毎年平均560万人ぐらいがかなり大きい洪水に遭うリスクがあるのですが、これは私たちの計算もそうですし、既存の災害統計データもこれぐらいの値になっています。それが、温暖化して2度上昇すると、3000万人ぐらいになります。4度になると6000万人、6度になると9000万人というように増えます、ということを経験として出しました。

本日のお話のほうはもう1つの成果でして、世界の氷河が2100年までにどのぐらい解けるかと、それが海の高さをどのぐらい変えるのかという計算をしました。ただしIPCCレポートには、将来予測ではなくて、過去にどのぐらい変わったかという、このあまり変化がなさそうな線のほうが載りました。

自己紹介が大変長くなってしまいましたけれども、私の専門は総合研究機構という若手育成プログラムにいますけれども、もともとの出身は社会基盤学、いわゆる土木工学というところの河川工学を専門にしています。河川工学の中でも特に水の循環に関する水文学、どこに雨が降るとか、ど



のぐらい流れるとかですね。後はそういった水がどのぐらい使えるかという水資源学、こういったものが私の専門になります。

道具はほぼ計算機を使っています。大型計算機を研究室のサーバー室に置きまして、数値モデルや衛星画像や数値実験データなどの大規模データの解析を行って検討しています。4～5人の学生と2～3人の研究員と助手さんがいます。

もちろん外に出かけることもありまして、研究に直接は関係しないのですが、自分達が使っているデータがどういう場所で採られているとか、学生さんなどは教育のために、川の見学は年に2～3回必ずどこかに行っています。

2. 氷河の過去・現在

今日のテーマに入りますけれども、私たちのグループは世界の山岳氷河、グリーンランドや南極の氷床ではなくて、山にある小さい氷河に関する研究を行っています。

2010年にサイエンスに出た有名な論文に、アジアの5つの河川（黄河、長江、インダス、ガンジス、ブラマプトラ）の上流の氷河が融解と、将来6千万人の食糧安全保障に影響するであろうということが書いてありました。この論文はかなり有名になりまして、いろいろな新聞ニュースでも取り上げられました。

これまでの様々な研究で、グリーンランドと南極の氷床を除く、小さい氷河や氷帽などが、特に温暖化によって縮退しているということが懸念されてきました。氷河の融解が進むと水資源へ影響がありますし、実は海の高さも変わると言われています。人によって推定している値が違いますが、地球温暖化によって海の高さが変わる原因は、熱膨張による分が大きいのですが、全体の2～3割、あるいは3～4割ぐらいは、氷河が解けてその水が海に流れ込むことも効くということも分かってきました。

ただし、氷河と言うのは人が住んでいないようなところにありますので、実は現状の理解すら不十分で、将来予測もなかなか難しいということが問題です。世界で観測されている氷河もありますが、その多くで、質量がどんどん減っているということが分かっています。特に1990年代以降に減少量が加速しているというのがIPCCレポート

でも言われていますし、他の研究者も報告しています。

今日、氷河の話をしてくださいと言われたのは、毎日暑いので涼しい写真をいっぱい見せろということかなと思いましたが、いくつか持って参りました。（著作権の関係で講演録への写真掲載は省略しています。）これはスイスのローヌの氷河、アルプスのほうの一つの氷河なのですが、有名な観光地です。それで昔から多くの人が旅行に行って写真を撮ったり絵を描いたりしているので、結構昔の氷河の記録が残っている場所です。

1840年のときの氷河の分布がこれです。この山の形を覚えておくと同じ場所だというのが分かるかと思うのですが、30年後には少し後退していますね。1870年に、この氷河を見に行く観光地で出されたポストカードでも、こういう絵が描かれています。とはいえ、当時はこれぐらいの場所まで氷河があったらしいです。これは1900年前後の絵画だそうです。30年前よりはさらに後退しています。1940年から49年ごろに撮られた写真ですと、ちょっとこれは角度が違うのですが、大分氷河が後退しているのが分かるかと思います。2005年は奥のほうに一応氷河がありますが、こちら辺まで後退しています。

世界で山岳氷河はどのぐらい存在するかと言いますと、だいたい10万個以上です。スイスにWorld Glacier Inventoryという氷河台帳があるので、その中には13万個の登録があります。さらに、衛星画像から氷河の外形を推定したデータでは16万個ぐらいといわれています。



(図4) その13万個ぐらい氷河があるうちの、質量の変化、去年に比べてその氷河が増えている

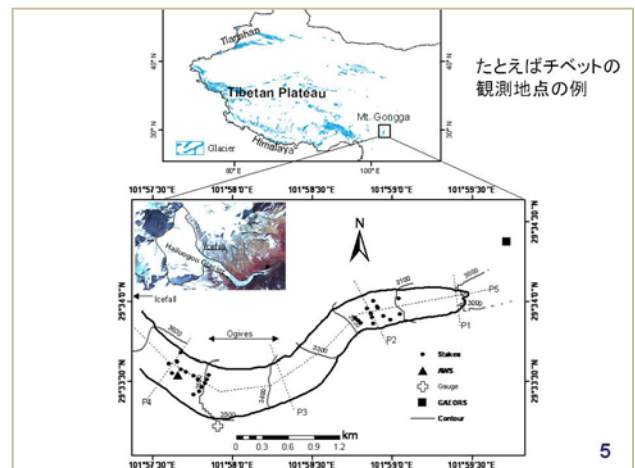
のか減っているのか、大きさが小さくなっているのか大きくなっているのかという観測が少なくとも1年間はある場所は400地点ぐらいです。特定の年の変化だけだと、やっぱり雪の多い年とか少ない年とかそういう影響が出てきてしまうので、その場所が増えているか減っているかという、定性的な情報を得るにはだいたい5年から10年ぐらいのデータが必要です。5年から10年ぐらいの質量の変化を継続的に観測しているのは、160ぐらいだそうです。さらに長期的な過去の変化を見て、増加傾向にあるのか、減少傾向にあるのかというトレンドを見るには30年ぐらいの継続的な観測が必要なのですが、それがあつたデータというのは50個ぐらいです。さらに夏と冬をそれにさらに分けて観測しているのは34、というように、世界に10万以上の氷河があつても、これぐらいしか直接観測はされていないということがお分かりいただけるのではないかと思います。

観測が無いならば、氷河の数値的な計算、例えば雨や気温は過去から将来までデータがそろっているの、そういったデータを入れて数値実験をすればいいと思うかもしれません。実は、私が研究を始めた2009年頃は、氷河の数値モデルというのは世界中にありましたが、それは雪氷の水文学者による、彼らが研究したい、特定の氷河に対して開発されたモデルが主で、世界全体の氷河を計算してやろうという乱暴なことをしている人はいませんでした。また、氷河研究者は対象とする氷河について詳しい情報を調べていましたが、私のように土木という、水資源に興味がある研究者がそういった研究はあまりしていなかったの、広域の水資源研究に氷河の融解がどのぐらい影響するのかという応用的な研究は、その時点では始まったばかりでした。

全地球上、または大陸ごとに氷河質量がどのぐらい変化したかというのを算定する方法としては、3つぐらい考えられます。1つ目は質量観測。面積の重み付け平均です。何かと言いますと、観測されている氷河があつたら、その限られた情報を無理やり外挿して世界全体の平均を作ることです。少し高級なやり方ですと、雨や気温と氷河の質量変化との関係を考慮して計算することもあります。もう1つは、地球上の質量の変化を観測する、重力観測衛星GRACEというのがございまして、そ

の衛星観測から、氷河がその場所で増えているか減っているのかを推定する方法が最近出てきました。最後の1つが、我々の行っている、広域を対象とした数値モデルによる算定です。

氷河の質量観測はどうやっているのかというのをご説明します。1つめの方法は氷河に杭を打ち込んで観測する方法です。これは世界中で最もよくやられているものです。氷河の上に雪がなくて氷だけむき出しの時期に穴を開けて、杭を一番下の基盤岩まで打ち込みます。そうしておいて、上からの杭の高さを測ることによってその差を見る、まあ非常に簡単なことです。杭を打つのではなく、GPSで氷河の高さを観測する方法もあります。GPSは楽でいいのですけれども、山の上ではGPSは衛星が3つ以上飛ばないとうまく測れません。正確さという意味では杭を打つ方が本当は良いです。



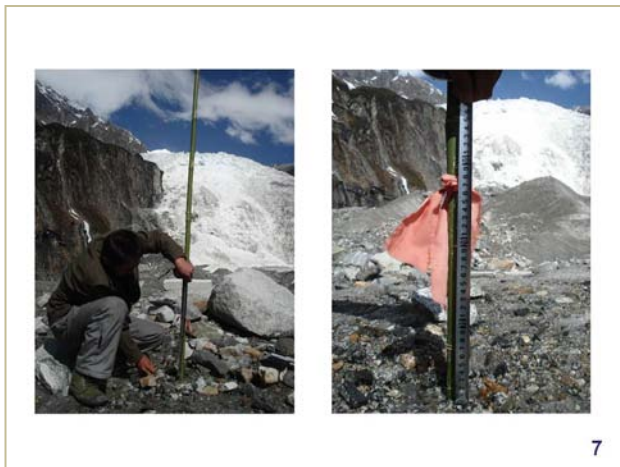
私が昔一緒に働いていた同僚が、ずっとこういう観測をしていた人なんですけれども、これはチベットのゴンガー山というところの一つのハルギー氷河というところの観測の地図です。これが氷河の末端のところの拡大図です。黒い丸があるところが、彼と彼の同僚が穴を掘って杭を埋めた場所です。(図5)

どういうふうに埋めるかと言いますと、スチームドリルというのですけれども、蒸気で氷を温めて、溶かしながら穴を掘っていきます。この場所ですと基盤岩からの氷河の厚さは10~20メートルぐらいです。だいたい平均数メートルから10メートルぐらいの場所で観測をしていることが多いのですけれども、一番下まで穴を開けて、岩に当たるまで開けてそこに杭をこういうふうに入れ

ます。ここでは観測に竹の杭が使われました。最初は金属の杭をたくさん持って行って埋めたのですが、次の年になったら全部盗まれてしまいました。竹にしたところかなり取られる率は減りましたが、それでもやっぱり子供が抜いてしまったりして、なかなか難しいです。本当に原始的な方法ですけども、上からの高さを測って比べることで、その場所ほどのぐらい氷河が解けているかというのを観測します。



6



7

これは先ほど写真で 100 年前からの変化をお見せしたところと同じですが、北海道大学の研究者が学生実習で毎年観測をしている、ローヌ氷河というところの写真です。(図6) 彼らの実習に、うちの学生と一緒に参加したときのものです。場所を決めておいて、毎年同じ場所の高さを GPS で測っています。使った GPS は最大 3 センチぐらいの誤差がある精度でして、氷河を縦方向と横方向に高さを等間隔で測ります。

私が参加したのは 2010 年と 2013 年です。びっくりすることに、たった数年でも、これは 3 年間

ですけど、氷河の高さは 15~20 メートルも低下しています。(図7) 毎年学生を連れて実習に行くだけで風景が変わるぐらい、急激に下がっているというのが分かります。



下流に行くほど氷河の中のモレーンが多くなり、色が汚くなっていく。

(図8) 氷河は、上のほうが白くてきれいな雪が積もっていて、下に行くほどどんどんモレーン(氷河によって削り取られた岩石や土砂などが堆積した地形)が多くなって、色が汚くなっていきます。左側の写真の右端にいるのは私ですけど、氷河の高さだけではなく、数値計算や他の研究にも使うための、いろいろな観測をしています。(図9) この写真は、氷河と雪の反射率を、こういう機械を使って測っています。



新雪が降ったので、氷河とその上の雪上のアルベド観測を行った。30秒の平均値 x 上下アルベド2セット。

半導体のダイオードで1秒に1回電圧をはかる。10:30には雪がとけだして、水の筋が雪の表面にういてきた。

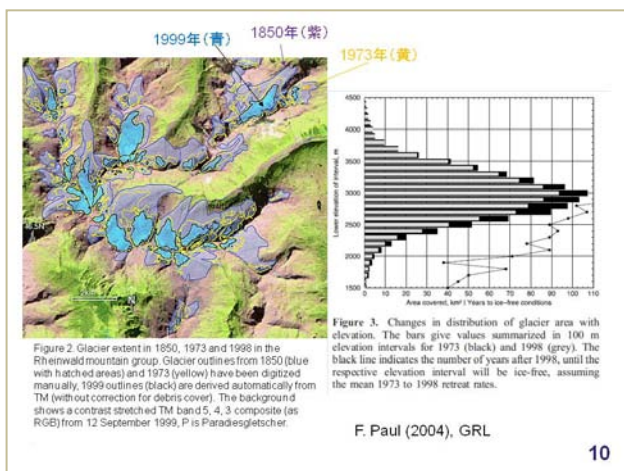
新雪は0.9~0.85など高く、下流の氷上は0.6など。

9

ここは観光地なのでこの近くにホテルがあって、かなり行きやすい場所なのですが、そうではないと、山登りのテクニックがないと氷河の研究はできません。日本でもかなり氷河の研究をやっている方がいらっしゃるのですが、大学の山岳部出身の方がたくさんいらっしゃいます。私は

インドアな人間なので、この観測に行くのは結構大変で、トレーニングしてから行きましたから、山に行くのはちょっと大変ですね。

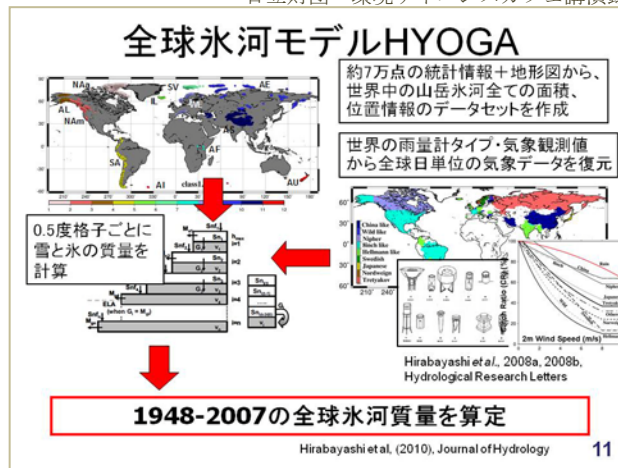
このように、直接観測もするのですが、それですとやっぱり人間が行ける場所では、氷河の大きさというのは継続的に測れません。そこで、最近は衛星観測によって、その氷河の変化を検知するという研究も多くあります。



(図 1 0) これはちょっと見づらいなのですが、山登りのグループが作成した、1850 年と 1973 年の現地の氷河外形データがこの紫と黄色の線です。それに対して青色の線、青色で塗ってある場所は、1999 年に衛星画像からその場所がどのぐらい氷河があるかというのを作成したものです。99 年の段階ではこの青く塗られた場所しか、もう氷河は残っていません。こういうふうにして、いつ、どこで、氷河がどのぐらいの大きさまでになっているかということが、わかるようになってきました。

3. 全球氷河質量のシミュレーション

一方、われわれの研究グループでは、数値モデルによる氷河の質量を計算しています。アイデアとしては観測、雨や気温や気象のデータというのは、割と長期間観測データがありますし、温暖化すると雨や気温がどう変わるのかというデータが、モデルの推定値としてありますので、それを使えば氷河の観測に似た変動が得られるのではないかと考えてみました。

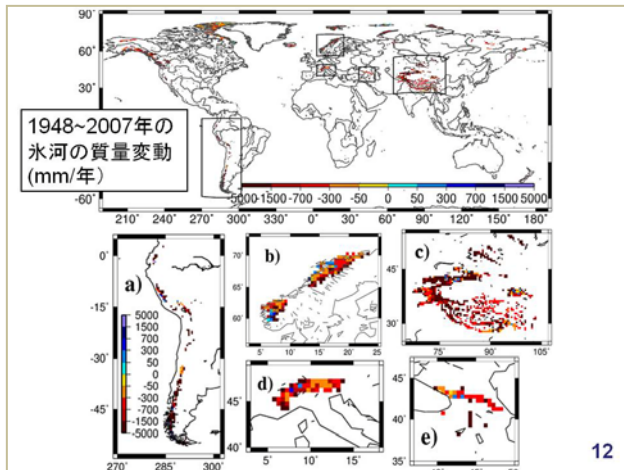


(図 1 1) モデルの名前は全球氷河モデル HYOGA といいます。私がドイツにいる時に作ったので、あまり考えずに氷河という名前をつけて、ドイツ人が喜んで「おお日本語で氷河はヒョウガと言うのか」というので、モデルの名前にしてしまいました。

どうしているかと言いますと、地球表面を 720×360 の、0.5 度ごとの格子に分けます。その中にどのぐらい氷河が含まれているかというのを、高さ 50 メートルごとにデータセットを作っておいて、その場所で氷河が増えるか減るかというのを、数値モデルで計算をすることをしました。最初に HYOGA を開発した時点では、氷河のデータは 7 万地点しかなかったのですが、数年後には 16 万個、全部の氷河の計算をしています。

雨データは、観測された雨のデータと言うのがやはり世界中で手に入るのですが、雨データというのは雨量計で測るので、風が強い場所ですと、雨量計に雨や雪が入らなくて、出てきたデータというのが実は過小評価されることが問題です。

ちょっと細かい話ですけど、その補正を雨量計のタイプごとに行います。雨量計には物によって、風の影響を少なくするためのカバーというのが付いていて、そのカバーのタイプというのが世界中で違うのです。特に雪は軽いので、風が吹くと雨量計に入るか入らないかという率がものすごく変わるので、どの国はどのようなタイプの雨量計を使っているのかという情報が、実はかなり重要になります。雨データをどのぐらい正確に作成するのかというところが 1 つポイントだったので示しました。



(図12)が結果です。これはちょっと見づら
いのですが、点があって色が付いているところが
1948年から2007年に氷河があって、そこでわれ
われのモデルが質量を計算している場所です。下
の図が拡大図でして、これは全部地球を0.5度ご
とに分けて全部計算しているの、この四角1個
は0.5度、だいたい50キロ×50キロぐらいだ
とってください。

この赤いところが48年から2007年の間に氷河
が減ったところ、青いところは氷河が増えている
ところです。観測データで示されていた、スカン
ジナビアで氷河が増えている場所というのは、割
と私たちのモデルでも出ています。一方で、ヒマ
ラヤの辺りの氷河はものすごい勢いで解けている
というのがモデル計算では出ました。

全球の氷河質量の時系列で比較すると、他の研
究者が観測データを無理やり外挿して推定したも
のと、だいたい私たちのモデルの計算結果は近くな
っていました。また、先ほどちょっとだけ申し上げ
た、重力観測衛星GRACEの推定値との比較も
行いました。GRACEとは2つの双子衛星を同じ
スピードで並んで飛ばします。同じスピードなの
ですけれども、下に質量が大きいときは重力が増
えるので衛星が引っ張られるので、距離がほんの
少しだけ変わります。そこで、2つの衛星の距
離を測りながら同じスピードで飛んでいる衛星を
比較すると、衛星が飛んでいる軌道に沿って地球
上の重力、すなわち質量がどのぐらい変わるのか
を計算できるのです。

観測値の外挿からは、アジアのヒマラヤを含む
地域の氷河は、1961年から2003年の平均ではだ
いたい1年あたり24ギガトン減少すると推定されて

います。私たちによるモデル実験でも、同じ期間
だと1年あたり25ギガトン氷河が解けているとい
う近い結果になりました。一方、重力観測衛星
GRACEは2003年からしか飛んでいないのです
けれど、2003年から2008年ですと、この場所
の質量はだいたい年あたり47ギガトンぐらい減
っていました。われわれのモデル計算では、同じ
時期には氷河の減少量は37ギガトンぐらいと少
な目でした。この理由は詳しくはわかりませんが、
GRACEは全ての質量の変化を含んでいるので、
季節的な雪や地下水の変化も45ギガトンの中
に含まれているためだと考えられます。

以前のHYOGAモデルでは、1つの50キロ×
50キロの中に、仮想的な氷河を1個仮定して置き
まして、その中心の標高からどのぐらい解けるか
というのを計算していたのですが、新しい13万個
の氷河のデータを手に入れたので、新しいモデル
HYOGA2では、一つひとつの氷河を計算するよ
うに変わっています。

どこにどの大きさの氷河があるかという情報は、
Glacier Inventory、氷河台帳というものの情報を
基にしているのですが、それをさらに補足するこ
とを目的に、独自に衛星データを使って、氷河の
面積情報も独自に推定しています。

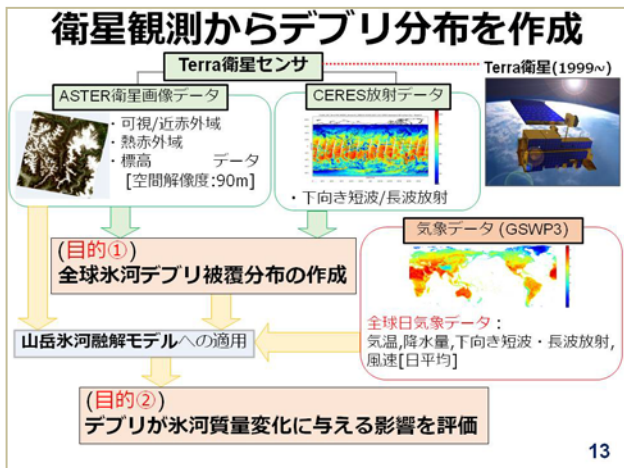
そういう研究をしていますと、とても大きな問
題にわれわれは気づきました。何かと言いますと、
氷河の上に岩くずや砂があるのをデブリと呼ぶの
ですけれども、私たちが衛星から自動で判別して
作るとこういった場所、要は氷河が汚い場所は黒
っぽいので、他のものだとわれわれは認定してし
まって、その場所に氷河があるということに分か
らないのです。

氷河というのは流れるのですが、そうすると
周りの岩を削りながら流れるので、だんだんその
流れる方向に従って、砂みたいな岩みたいなもの
がだんだんたまっていきます。そうすると氷河
が上から見ても黒っぽくなっている。これがデブ
リ氷河です。

また、モデル計算をすると、この氷河の黒っぽ
さが計算にもものすごく効くことが分かってしま
した。氷河というのは解けるときには、周りの気温
で解けるよりは、上からの日射で解けるのです。
日射で解けるので、氷河は黒いところだったらた
くさん太陽のエネルギーを吸収するので解けやす

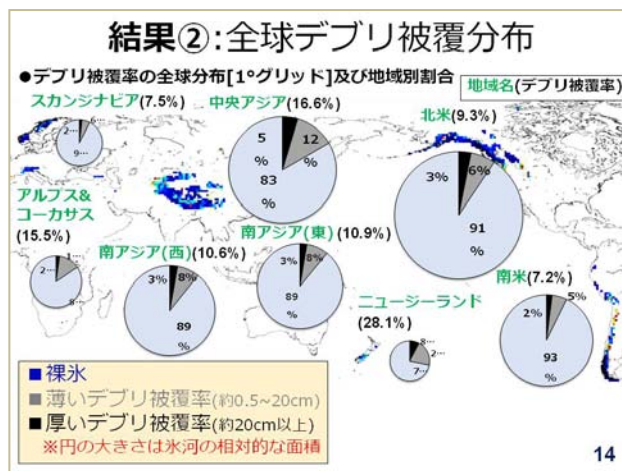
くて、白っぽいと反射するのです。ただし、上にあまりにも大きい岩みたいながあると、今度は逆にエネルギーをこれが反射してしまって下まで届かないので、こういうふうに大きな岩の下は氷が残る、というように、かなり複雑なことが分かってきました。

そこで氷河の過去から将来の計算をするためには、このデブリ、どのくらい汚いのかという情報を入れざるをえないということに途中で気づきました。繰り返しになりますけども、薄く砂が氷の上にあるときは、反射率、太陽の熱を結構吸収するのでたくさん解けます。ただしさっきの岩みたいに、氷河の上はかなり分厚く岩が乗っている場合には、断熱効果が働いて氷河が解けるのを抑える役割があります。



そこで、どのくらいの分厚さで、どのくらい岩があるのかというのを、また衛星を使って情報を作成しました。(図13)うちの学生が頑張りました、いろいろな衛星画像、衛星データを組み合わせることによって、分厚い氷河と薄い氷河というものの世界中の分類というのを作りました。デブリの現地観測のある場所と比べても、衛星から我々が推定したものはだいたい同じような分布をしているということが分かりました。

(図14)これが、全球の氷河の上にどのくらい砂が乗っているのかという情報です。もとの衛星画像の解像度が30メートルごとなので、30メートル×30メートルごとに、その場所が何パーセント砂で覆われているかというのを計算できるようになっています。これを見ますと、氷河が解けるほうに働くような薄い氷河がこのくらいのパーセンテージで、氷河が解けるのを抑制するような



分厚い岩が乗っているところは、ある程度はある。ただし大半の氷河はきれいなままであるということがわかります。

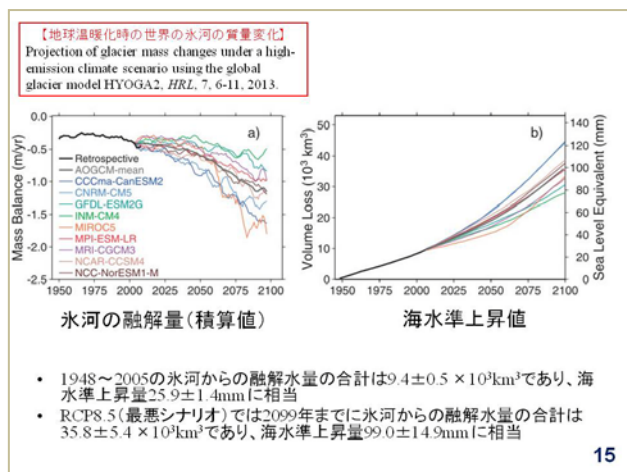
これを使うと何ができるかと言いますと、先ほど申し上げた通り、薄い氷河が解けやすい、分厚い氷河が解けにくいというようなのをモデルに組み込むことができます。そうしますと例えばヒマラヤのアジアの氷河ですと、東側では割と分厚い岩くずが乗っているので、氷河が解けにくいのですが、北や西側の氷河では、割と薄くて黒いデブリが乗っているので、解けやすくなっていくというようなことをモデル計算に入れることができます。

4. 氷河の将来

さて、今日の最後の主題なのですが、将来の氷河の質量シミュレーションの話をしたと思います。

将来に関しましては、当てるものではございません。将来地球がどうなるかといういくつかのシナリオを想定しまして、そのシナリオを与えることによって、将来の予測というか見通しを計算します。たとえば、最も人間が何も考えずに化石燃料を使い続けて、CO₂がたくさん大気に放出されると、だいたい21世紀末には気温は4.3度くらい上昇するという見通しが数値モデルで計算されています。一方、これはなかなか達成できないかもしれませんが、ほとんど化石燃料に頼らず省エネも進んで、世界中がCO₂の濃度をかなり抑制できた場合には、2100年くらいで、世界平均気温は1.6度くらいの上昇に押さえられます。こういうシナリオにもとづく将来の気象データを計算数値シ

ミュレーションで与えることによって、氷河がこのシナリオならこのぐらい解ける、このシナリオならこのぐらい解けるということを計算することができます。



(図15) 左側の図が最も温暖化が進む最悪シナリオのときに、氷河がどのぐらい解けるのかというのを積算値で示しています。この色の線がたくさんあるのはシナリオの違いではなくて、世界中で気候モデルというものがたくさんありまして、同じシナリオでも気温の上がり方などの計算結果が違うのです。たくさんの線はモデルによる温暖化実験の不確実性の幅だと思ってください。

たくさんの実験の平均、真ん中が灰色の線です。例えば過去に関しては1948年から2005年の氷河からの融解水量の合計というのが、 9.4×10^3 の3乗立方キロメートルぐらいでした。この値を海の面積で単に割ったものが右側になりまして、そうすると2005年までですと、海の高さを2.5センチぐらい上げることに寄与していました。

最も温暖化が進行するシナリオでは、氷河が2100年まで解ける量は 35.8×10^3 の3乗立方キロメートルぐらいで、これを海の面積で割ると、だいたい10センチぐらいになります。われわれの研究グループの推定は他の推定値よりちょっと小さめだと言われています。その原因は分からないので、まだ研究を進めているところです。

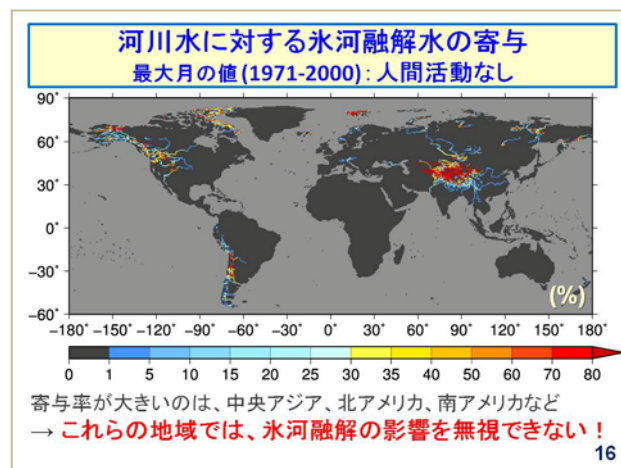
最新のIPCCレポートでは、過去20年の間にグリーンランドと南極の氷床は減少している、さらにわれわれが対象としている山の氷河はほぼ世界中で縮小しているということが書いてあり、氷河の損失は1971年以降で、1年あたり226Gt(ギ

ガトン)で、93年以降ですとそれが加速して1年あたり275Gtぐらいと推計されているということを書いてありました。レポートの図の推定の線の1本はわれわれの推定値になります。

IPCCレポートには南極の氷床に関しても書いてあったのですが、1992年から2001年に1年あたり30Gtの減少と、氷河に比べるとそんなに多くないですね。2002年から2011年の間にはそれが加速して、1年あたり147ギガトン減っているということも書いてありました

私は水資源の専門家なので、氷河が解ける、海の高さが上がるということだけではなくて、それが水資源にどのぐらい影響するのかというのを本当は研究したいと思っています。なかなかそこまで行かないのですが、1つだけその例をご紹介します。

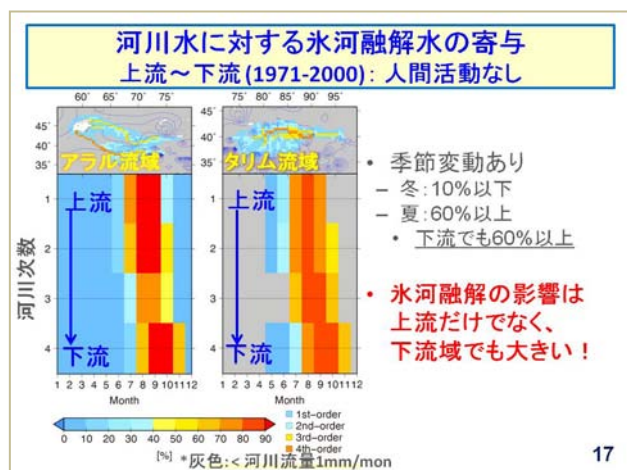
私の研究グループと一緒に開発している統合型全球水資源モデルというのがありまして、これは国立環境研の花崎博士という人が、作っているモデルです。これは川の水の量をどのぐらい使えるかとか、ダムがどのぐらいあるのかとか、そういう人間活動が入っている水資源のモデルです。その水資源のモデルに、氷河モデルで計算した氷河の解け水を入力することによって、氷河の解け水が人間活動を続けるための水資源にどのぐらい効いているか、というのを計算しました。



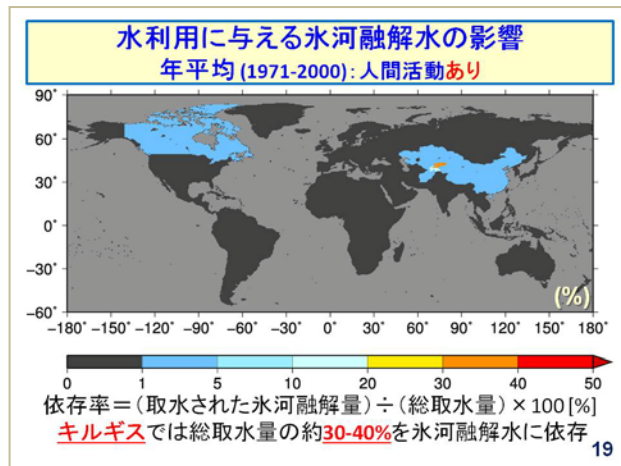
(図16) この図は、まず人間活動がない状態で、その場所を流れている川の水の何割ぐらいに氷河からの解け水が入っているのかという割合を示しています。赤いほどそこを流れている川の水に対して、氷河が解ける水がたくさん入っていることを示しています。川の水に対して氷

河からの融解水の寄与率が多いのは、中央アジアや北アメリカや南アメリカの氷河がある場所です。

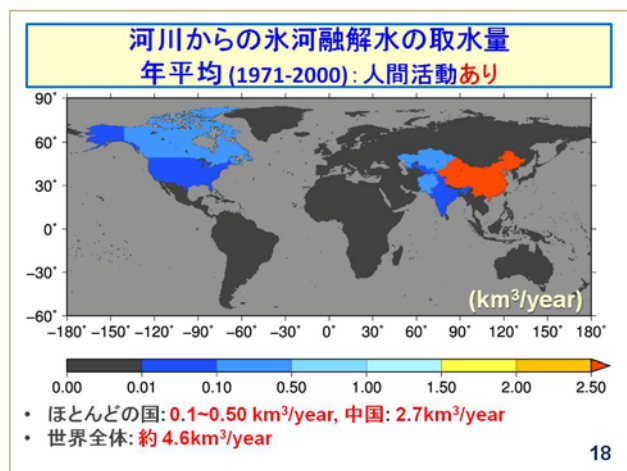
と多くて、1年あたり2.7立方キロメートルぐらい氷河の水を使っているらしいです。ただし世界全体ではそんなに大きくなくて、1年あたり4.6立方キロメートルぐらいに過ぎません。



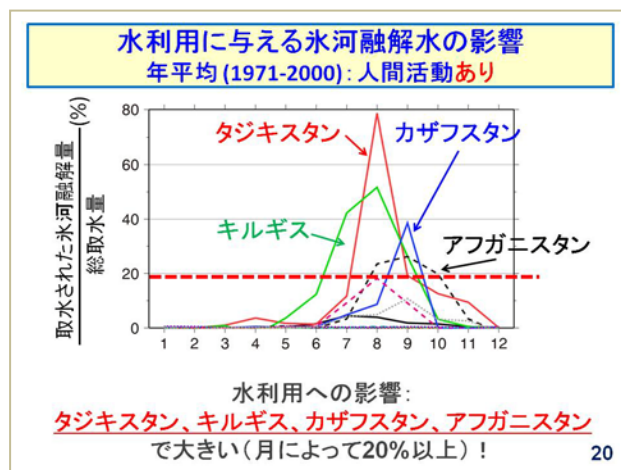
(図17) この図は先ほどの河川水に対する氷河融解水の寄与について、影響の大きい2つの河川、アラル流域とタリム流域で見たものです。いずれも乾燥地ですけれども、そういう場所では上流だけではなくて、下流でも氷河からの解け水がある程度の割合で、川の水に含まれていることがわかります。



(図19) では氷河が全部解けてしまうとどこが困るかというのを計算するために、水利用に与える氷河融解水の割合を、国ごとに計算してみました。要は氷河融解水への依存率です。この図から、世界全体では限られた国しか水資源に対する氷河融解水への依存率は高くないことがわかんと思います。



(図18) 次に、人間がどのぐらい採っているかという水の中に、どのぐらい氷河の解け水が入っているのかというのを、国ごとに計算しました。河川の水の量や氷河の融解量は0.5度グリッドぐらいの水平解像度で計算をするのですが、どれぐらい人間が水を使っているのかという情報は国ごとにしかないなので、最終的に出てくる値は国の全体の値にならざるを得ないので、国ごとに色をつけてあります。絶対量で見ますと、人間が使う水の量に含まれる氷河融解水の量は中国が割



(図20) そこで、依存率が高い国だけを抜き出したものがこの図になります。横軸は1月から12月です。そうすると、乾燥地のキルギスやタジキスタンやカザフスタンやアフガニスタンでは、氷河が解ける時期によっては氷河からの解け水をかなり使わせてもらっているということがわかります。

(図 2 1) この表は、取水された水に含まれる

水利用に与える氷河融解水の影響 貯水量との比較(1971-2000): 人間活動あり			
国	(a) 取水された 氷河融解量 (km ³ /year)	(b) 大規模貯水池の 貯水量 (km ³)	(a)/(b) (%)
中国	2.702	324.6	0.83
キルギス	0.460	22.8	2.02
カナダ	0.309	1093.2	0.03
アフガニスタン	0.226	2.6	8.86
カザフスタン	0.205	88.8	0.23
パキスタン	0.186	3.0	6.15
タジキスタン	0.097	28.2	0.34
インド	0.095	575.0	0.02
ウズベキスタン	0.083	7.1	1.16
アメリカ	0.062	1010.7	0.01

21

氷河融解量を、その国のダム貯水量と比べてみたものです。前の図では、アフガニスタンでは取水量に対する氷河融解水への依存率が高いので、氷河が万が一無くなると困るように見えたのですが、この国全体の貯水池の貯水量が 2.6 立方キロメートルぐらいありまして、そのうちの 8 パーセントぐらい貯水量を増やせば、氷河が全部解けてなくなったとしても耐えられるということがわかります。

5. 事前質問への回答

ここまで駆け足で説明してきましたが、最後に、参加者の皆さんから事前に頂いた質問への回答を話します。

まず、温暖化について一般人が基礎知識を習得するために適当な書籍があれば紹介してほしいということを書いていた方が数名いました。

私の一番のお勧めは、国立環境研究所の「ココが知りたい地球温暖化」というものです。これは数回に渡るシリーズで、一般市民が温暖化に対して聞きたいような質問に対して、専門家がちゃんと答えているのをずっと連載していたものです。

Web ページ

http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/qa_index.html

でも読めるのですが、それを 2 冊の本でまとめたものが発売されています。その分野の専門家がかなり丁寧に答えている最新の情報でありながら、一般市民にも分かりやすく書かれています。

次の質問、氷河融解は海面上昇の原因のどのぐらいのパーセントを占めるか。2100 年までの温暖

化の実験では 3~4 割と言われているのですが、2013 年に Nature Geoscience というところに、かなりセンセーショナルな論文が載りまして、この論文は何をしているかと言いますと、先ほどご紹介した GRACE という重力を測る衛星によって、陸上の重さの変化を計算して、後は世界中の海面上昇変化の推定値をそれと比べることによって、結局その海の高さというのが、陸の重力の変化によるものなのか、海の体積の変化になるものなのか、過去に関して推定したものです。

その結果によると、2005 年から 2011 年に、海の高さというのは、これは他の研究者も言っている通り、だいたい 1 年あたり 2.4 ミリの上昇傾向にあるのですが、そのうちのかなりの 75 パーセント、1.8 ミリについては、陸上の水の変化が効いているという推計を示しました。陸上の水の変化には、陸上の雪や氷の変化と、土壌水分の量、化石地下水を汲み上げて使ったものが海へ入っているものなどの全てが含まれます。

この論文はかなり話題になっていまして、その確かさを調べるために他の研究も行われているところです。ちなみに温暖化実験では、将来の海面上昇に対する陸からの淡水供給の影響は 3~4 割といわれています。

- 海面上昇の理由が、地球温暖化が原因である客観的なデータと二酸化炭素濃度のデータなどを教えて頂きたい
- 温暖期～氷河期の従来からの周期が、現在のようない人為的と思われる温暖化によって変化しているものなのか、あるいは、従来の周期変動内であるものなのか

22

(図 2 2) 海面上昇の理由が、温暖化が原因である客観的なデータと、これと関係する二酸化炭素濃度のデータを教えて欲しい。温暖期から氷河期の過去の長期間の(気候の)周期が、現在のようない人為的と思われる温暖化によって変化しているものなのか、あるいは従来の周期変動内であるものなのか? という、かなり難しいご質問も頂きました。

まず温暖化についてですけれども、産業革命以降、世界の地表気温は、まだ実は1度から1.5度ぐらいしか上昇していないのです。なので、これぐらいの変化について、皆さんは温暖化と言っているということになります。とはいえ、様々な証拠から、近年の急激な気温の上昇は人間活動が主要な原因であると多くの科学者は確信しています。それに関しては、前述の Web ページや教科書もご参照ください。過去の海面上昇に関しては、地表気温と海水の温暖化の他に、陸からの淡水供給の増加など複数の原因であると考えられています。

CO₂についてはいろいろな観測データがあります。一番有名なのはハワイ島のマウナロア観測所でキーリングさんがずっと観測していたものですが、それによると大気中の CO₂濃度はずっと上昇傾向にあります。解説には、1964年春に資金が底をついたのでここに観測がありませんと言うことが書いてあったりします。それはともかく、継続的に測られてきたデータを見ると、どんどん増えているということは確かみたいです。

CO₂濃度の上昇が近年の気温上昇、温暖化の原因なのかということ調べるのに、証明はできませんけれども、数値実験をすることはできます。因果関係を調べるために、われわれは数値実験をするのですが、何をしているかと言いますと、温暖化実験に使う同じ気候モデルを使って、過去の計算をします。過去の計算をすると、気温の変化というのがモデルでも計算できます。黒いのが東京大学と国立環境研究所と JAMSTEC が開発しているモデルによる、ある気候モデルによる過去の気温の変化です。赤い色が観測値です。合わせているのではないと言われるかもしれませんが、なかなかぴったり合わせるようなモデルではなくて、ちゃんと物理的な式を解いているので合わせることはできないのですが、結構近い値だと言えらると思います。

それに対して過去のシミュレーションから、温室効果ガスの変化というのを抜いた実験をしてみます。ただし、太陽の黒点活動や火山の活動なんかは入れている条件のみにしますと、計算される気温はこれぐらいかけ離れるのです。そうすると、CO₂濃度を入れないと、この気温上昇というのはモデルでは再現できないではないか、ということが示されます。

- 原発が温暖化防止に貢献するという考え方について意見を聞きたい→有馬元東大総長から質問が来ました
- 温暖化でも少ない人口で少ない住みやすい地域をシェアして平和で豊かに暮らす将来像は描けないか
→貧困問題、社会経済変化のスピードが鍵
- 既にどのような問題が発生しているか
→今後の変化が大きい。まだたかだか1.5度。都市温暖化の影響の除去、イベントへの温暖化の寄与をはかる研究が行われている
- 大西洋の塩分濃度が変わり深層海流の停滞が生じるといった変化の恐れは？→tipping point(付加逆な変化、壊滅的な変化が生じるか)研究が行われている。南極氷床の崩壊もその1つ
- ツバル、ベニス、東京や大阪などいつ水没？
→最悪シナリオで2100年に0.86m。

23

(図2.3) 駆け足で、次の質問にいきます。原発が温暖化防止に貢献するという考え方について意見を聞きたい。私の意見は別にないのですけれども、1つエピソードをお知らせしますと、われわれが温暖化で洪水が増える、減るというのを論文で発表したことがニュースに出たら、とある日に、原発の是非について考える会で示すために、論文の発表資料を下さいというメールがある偉い人から届きました。アジアの洪水の増加予測を温暖化の悪影響の1つとしてその会で紹介をして、温暖化を防止するのに原発を使うという可能性について考えるみたいです。

次の質問、温暖化が進んでも、少ない人口で少ない住みやすい地域をシェアして、平和で豊かに暮らす将来像を描けないでしょうか。可能性としてはありますけれども、問題としてはやはり、温暖化問題も結局は貧困問題でして、日本のように発展した社会なら、エアコンを付けるなど様々な適応策をとれば耐えられたりもするのですが、貧しい国では無理だと思われれます。もう一つ、将来の見通しを計算する際に、人口が減少するシナリオもあるのですけれども、やっぱり今後の温暖化の悪影響が増えるスピードに比べると、ずいぶん遅いのです。人口増加だけでなく、社会経済変化、人口や経済や貧富の差みたいなものの変化のスピードが鍵ではないかと思えます。

次の質問。温暖化によってすでにどのような問題が発生しているか教えてください。過去の様々な気候や環境の変化に関して、どの程度温暖化が影響を与えたか、という研究はまさに進んでいます。ただ、私が申し上げたいことは、やっぱり過去の変化はまだまだたかだか1.5度で、今後の変化が

大きいということを申し上げたいです。全球平均の気温が 1.5 度上がっていますが、都市部では、都市温暖化、ヒートアイランドの影響が大きくて、そちらの問題のほうが大きかったりします。

ある年にもものすごい熱波が来たとか、大洪水などの異常気象が起きると、全部温暖化のせいだとか言ったりする人もいます。それで最近のはやりとして、熱波や大きな洪水の発生確率を、温暖化していない場合と、した場合で数値シミュレーションして、確率がどのくらい変化するかを調べる。極端なイベントに対して、過去の温暖化の影響を測る研究をイベントアトリビューションという研究が行われています。

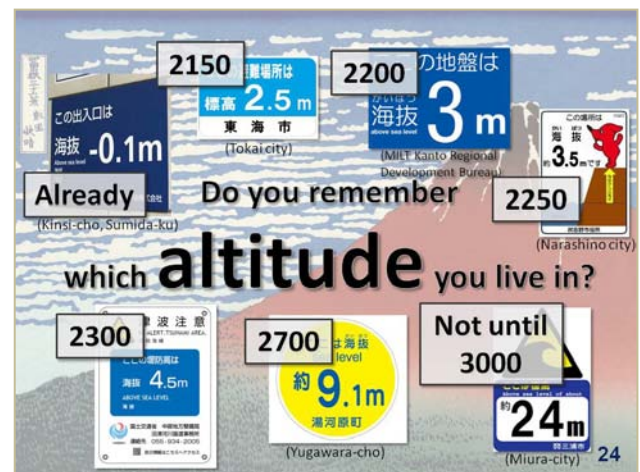
次の質問。大西洋の塩分濃度が変わり、深層海洋の停滞が生じるといった変化の恐れはあるのか？私は専門家ではないので詳しくは分かりませんが、これだけではなくて、ティッピングポイント、すなわち温暖化によって不可逆的な、壊滅的な変化が生じるのかどうか、そのしきい値はどこか、という研究が行われています。たとえば、ある温暖化レベルを超えてしまうと、南極の氷床が崩壊することで、より大きな影響が出るというような研究など、温暖化によって戻ることができない状況になる可能性がいくつか指摘されています。地表気温が何度になったら、CO₂ ならあと何トン排出すると、その不可逆的な変化が生じる恐れがある、というような研究が行われています。

次の質問。ツバル、ベニス、東京や大阪などはいつ水没するのか？ IPCC レポートで、海の高さがどう変わるかという推定が出ていまして、最も温暖化が進んで、最悪なモデルでは 2100 年までに 0.86 メートルぐらい上昇すると言われていました。さらに、世界の平均気温の上昇が 2100 年ぐらいにはほぼ止まったとしても、海の温度や高さの変化は反応する速度が遅いので、3000 年ぐらいかけて徐々に上がっていくといわれています。さらに、先ほどのティッピングポイントの話と同じですが、気温上昇がある値を超えるとグリーンランドや南極の氷床が崩壊して、海の高さが急激に変わるのではないかということが指摘されています。

たとえば、グリーンランドは、とある人の論文では、世界気温が 1.4 度ぐらい上がると、ティッピングポイントを超えて急激に解けてしまうという説があります。最も持続可能なシナリオだった

ら、2100 年でも 3000 年でも、このティッピングポイントになる気温上昇 1.4 度は超えないです。ただし、最悪のシナリオはもちろんですけど、そこそこの温暖化レベルにまで抑えることに成功した将来シナリオでも、1.4 度を超えてしまうのです。

南極とグリーンランドの氷床崩壊も入れた海面上昇の推計値を見てみますと、一番持続可能なシナリオだけ 1.4 度を超えないので、グリーンランドの氷床は崩壊しないので、海の高さというのはそんなに高くなりません。けれど、他のシナリオですと、海の高さが変わります。先ほど、最悪な将来シナリオの場合は 2100 年までの海面上昇の推計は 0.8 メートルと言いましたが、海は徐々に上がって行くので横軸は 3000 年まで延長しています。それを使って、各海拔にある場所が何年に水没するかを示しているのがこの図になります。



(図 2.4) この推計方法では、三浦市は 3000 年時点でも水没しない、湯河原市は 2700 年ぐらいまでは水没しまい、というようなことが示せます。というところで今日の発表は終わります。ありがとうございました。(図 2.5・2.6)

最後に・・・ 最先端の研究をするということ

- ◆いつも新しいアイデア・面白い研究の対象を考える
 - ・ 1/3がアイデア、1/3が作業、1/3が論文化 (by 米沢富美子)
 - ・ 何をやらないか、を選ぶことが重要 (by 利根川進)
- ◆参考文献を勉強する
 - ・ 良い雑誌(高いインパクトファクタ)や、被引用件数が多い論文から調べる→その分野の「常識」や「常連」がわかってくる。
[Science](#), [Nature](#), [PNAS](#), [Journal of Hydrology](#)
- ◆考えるだけでなく、小さいことから手を動かしてみる。
- ◆他の人とディスカッションをする／他の人に説明してみる
- ◆国際場で研究を発表する。投稿論文を書く。

Thank You !



26

◇質疑応答

会場：今日はカラーのスライドで大変良く分かりました。ありがとうございました。温暖化が進むと、氷河が溶解して、海面上昇がおきるといことも言われるのですが、逆に一方陸地のほうでは砂漠化も進むということがありますよね。最後の先生の水利用の話で、氷河溶解水の影響で貯水量との関係を、中央アジア付近で 2000 年までの利用率というのが一応出ているのですが、どうも中央アジアのほうの砂漠地帯では、砂漠化がどんどん進んでいて、氷河で解けた水が、あまり有効利用されていなくて、どこへ行ってしまうのだろうかという疑問があるのです。実際にもしこの氷河で解けた水がうまく砂漠化のほうに行けば、もっと緑地化が進んで、地球温暖化が少しは防げるのではないかという気もするのですが、そう簡単にはうまくいかないとは思いますが。

この水がどこへ行ってしまうのか。例えば衛星関係でそういうのが追跡された記録みたいなものはあるのでしょうか。あるいは試みみたいなものはあるのでしょうか。

平林さん：ありがとうございます。中央アジアの砂漠化は、気候変化によるもの、人間の土地利用や水利用による環境変化によるものなどが考えられます。中央アジアのどこの場所かわかりませんが、たとえばアラル海周辺の乾燥化、砂漠化は人間が灌漑水を使って綿花などを作っており、上流で水が使われて河川に流れる水が減ってしまったためです。すなわち、河川から畑などにまかれて、その水は蒸発してしまっています。

氷河からの解け水が河川の水にどのぐらい入っ

ているのかというのは、私たちはモデル実験から出しましたけれども、実は氷河の解け水というのは雨や河川の水とは同位体比が違います。同位体というのは水分子のある割合に重い分子が入っている割合ですが、水の蒸発の回数や場所によって値が変わります。雨の同位体比というのも測れるので、雨によって川からその場で水が流れていくのと、氷河から解けた水というのを分離して、観測から独立した情報を得ることもできます。去年出た論文ではガンジスの流域で同位体分析を使ってその水のうち何割が氷河で、何割が雨が降って流れてきた水かという分けられた結果が示されました。

実は今日は何もお話もしませんでしたけど、統合型水資源モデルや、川のモデルなどで、現在から将来までのシミュレーションをして、それが人間社会にどのぐらい影響するのかというものを計算しています。そのうちの 1 つが、乾燥地、半乾燥地の農業がどうかというものを、農業関係の人と一緒に共同研究をしています。

彼らは温度が上がることで、小麦とかの収量が落ちるとか、CO₂ がたくさんあると収量が上がるとか、そういったものを全て組み込んだ数値モデルを使って、その場所の穀物がどのぐらい生産が変わるのかというものを計算しています。

われわれはそれに対して、水がないとやはり収量が下がるので、水の情報を彼らに与えています。ポイントとして、水は、使いたいと思ったときにその場所にないと使えないですね。どこかに水に関して困った地域があるとして、水を有効利用しようとしても、水というのはとても安いというのがポイントでして、運ぶエネルギーのほうが割に合わないのです。

それで、灌漑水路を作れば使える部分も少しはあるんですけども、あまり遠い場所では、水は有効利用できません。運ぶだけのコストを掛けると、水はとても安いので、なかなか難しいということがあります。答えになりましたでしょうか。

会場：中央アジアのインド洋側のほうに流れるのは今のお話で分かるのですが、中央アジアの北側のほうに流れるモデルというのは何かあるのでしょうか。

平林さん：私たちのシミュレーションは全地球、

全部計算しています。500メートルぐらいの水平解像度でその場所が何メートルかという標高情報を基に、降った雨がどちらに流れるかというようなモデルを持っていて、そうするとどちらに降った雨はこっちに流れるという方向が計算できます。標高が低い方に流れるので、海に届かない内陸の湖に流れ込む河川も計算できます。

会場：氷河というのにはグリーンランドと南極の氷は氷河とは言っていないということでもいいのでしょうか。

平林さん：世界全体のわれわれの推計値には、氷床は入っていないです。われわれの研究は、氷床はやはり解けるメカニズムが違うので、そのモデルはまた違う研究グループがやっています。われわれは山の氷河のほうをやっています。私が水資源の研究者なので、人間の水資源に関係ない氷床は労力を掛けてやる手間というか、得られる情報がちがうという意味で、やっていません。

会場：地球上の水で、海水とかは別として人間が使える、人間が真水のほんの一部だと思うのですが、それが0.001パーセントかちょっと忘れてしまったんですけど、それは変わるのですか。何か科学的な進歩によって、使える水の量というのは、真水というのは増えるのですか。

平林さん：雨が増える場所も温暖化で増える場所もあるので、増える場所では雨水をそのまま使えるのであれば増えます。減る場所は減る場所であります。

会場：遍在性を言いますと、ちょっとキリがないと思うのですが、マクロ的に数字と言うのは。と言うのは、人口がどんどん増えていくと。食糧とかそういうものは、何となく科学技術の進歩によって少しずつ種類も増えていく。けれど水の全体量というのは増えないのじゃないかなと思うのです。全体量が増えてもしょうがないし、人間が使える0.何かな、何分、0.1パーセントか何かのやつが増えないと、やっぱり人間の人口の増加に対してついていけないですよ。

平林さん：おっしゃる通りだと思います。先ほども申しあげたとおり、遍在性というか、どの場所で何が作られていて、それがどのぐらい水を必要としているかというモデルと、後は温暖化によってその品種改良がどのぐらい進むかという科学技術の変化で、世界全体の穀物貿易がどうなるかという研究を、まさに今しているところです。

水が増やせるかどうかということ、水が安いというのがポイントだと先ほど申し上げた通り、エネルギーをかければ、海水淡水化もできるのです。そういうのはお金持ちのバーレーンの国とか、水は足りないけどお金を持っている国では、ガソリンを燃やしてエネルギーを使って、膜に水を通すことで淡水化をしているので、飲み水ぐらいは作れる、ペイするんですけど、農業用水は安くないといけないので、そういったことでは使えません。

それで、どの場所で農業用水がどのぐらい変化するのかという予測をしておいて、それを基にどのぐらい食糧に影響があるのかというのは場所ごとに計算を今しているところです。地球全体で増えます、減りますとざっくり言うことはできません。

会場：例えば農業が、農業技術の進歩によって、必要な食糧は増えている、人口に比例していると思うのです。水と言うのは絶対量、変わらないとしても、人間が利用できる真水のまた、利用できるやつというのは増えるのか、増えないのか。増えなかったらやっぱり。

平林さん：増えていますよね。ダムを作ることで必要な季節に採れるようにするとか、あとは灌漑水路を作ることで、昔は使えなかった場所まで水を引っばってくるという意味では、使っている水というのは増えています。

会場：GRACE という、重力で測るという方法で質問です。この間もネパールなどで地震がありましたけれど、地殻変動したりするから地震が当然影響しますよね。一方で、実際に地震があると、氷河もいろいろ地震の影響を受けたりすると思うのです。それで地震などがあると地殻の変動の影響というのは、氷河の変化とちゃんと分離して、数値的に計算できると思っただけいいのですか。かな

り精度高く。

平林さん：私は GRACE などの専門家ではないのですが、他の衛星を使っている研究者もふくめて、陸の状態ですね、膨張するとかマンツルの変化とか、元々そういう変化の観測もその衛星を使ってやりたいという研究者が別にいまして、論文を出す段階ではそういった影響は、一応取り除くような式を入れているようです。

会場：先ほど氷河は日射で解けるといふうに仰っていました。この場合日射の強弱の話といわゆる気温の話、気温なんかの関係というのはどんなものがあるのでしょうか。例えばヨーロッパの氷河というの、1840 年から例えば 1900 年ぐらいまでだと、基本的に言うと最近では一番低いところで、そんなに変わっていません。でも、この量というのはぐんと減っているように見えるという辺りは、あまり気温とは少なくとも関係なさそうではあるのですが、その辺は日射と気温と氷河の増減という、この 3 つの問題というのはどういうふうに考えたらいいでしょう。

平林さん：ありがとうございます。まず補足しなければいけないのは、1840 年にここまで氷河が成長しているのは、いわば小氷期と呼ばれる寒い時期に、だいぶ氷河が成長したものの名残を示しています。それで、この時期のそのままの気温がずっと同じだったとしても、多分後退していたのではないかなと思います。

さらに日射と気温の関係というのは正の相関がありまして、気温データはたくさん測られているので研究者はそれを使います。一方、気温の変化というのは実はその場所の放射の変化とかなり強い相関があるので、間接的な影響になりますけれども、気温との相関係数を使って氷河をモデル化しているので、それは何と言いますか、どちらが先かというのは難しいのですが、同じことだと思っただけだと思います。

この場所に関してですけれども、現地の気温データと雨のデータを比較している研究者がいます。スイス連邦工科大学の先生ですけれども、この継続的な気温の変化を見ますと、雨はたいして変化していないのですが、気温はかなり

急激に上昇している。そのために解けているのではないかという論文を出されています。もちろんそれは気温に見えているけれども、放射の変化が見えているのかもしれないです。ただデータがあるのが気温だけなので、そういう説明になっています。

会場：分かりやすいプレゼンテーションをありがとうございました。氷河というと、やっぱり南極のほうかなと思っていたので、山のほうとは違うということではびっくりしました。南極や北極では白熊さんが気の毒だなというのがありますが、ちょっとご専門ではないかもしれませんが、山のほうでそういう生態系の影響と言いますか、この氷が解けることで脅威にさらされる動物はあるのでしょうか。

平林さん：またまた専門ではないのですが、氷河だけではなくて、温暖化によって動物や植物にどのぐらい影響するのかという研究はやはり IPCC レポートに載っています。ポイントとしては、変化がゆっくりであれば、また動物のように足があれば移動できるので何とか適応できる。ただし高山植物ですとか、移動のスピードが比較的遅いものに関しては、急激に温暖化が進むと、その影響がかなり無視できないと言われる、その生物が適応できるか適応できないかという種によって、危険レベルが違うというようなことが、いろいろなものに関して言われております。

会場：シミュレーションをどういうふうにご覧いただけるのでしょうか。水の雨、降水量と気温とそれからアルベドというか、反射、太陽の影響というようなものを入れて計算をしているということなのでしょうか。ちょっとその辺が、シミュレーションの基本的な考え方がちょっと分からなかったものですから、教えていただければと思います。

平林さん：モデルのバージョンによってだいぶ違うのですが、昔のモデルですと雨や気温ぐらいから相関をしている係数で氷河を解かしているようなものです。一番最新のモデルはデブリと呼ばれる反射率も入れまして、気温と下向き短波放射と

長波放射というデータを入れまして、それを基にどのぐらいのエネルギーが氷河に入って、どのぐらい解かすのに使われているのか計算しています。

会場：氷床と氷河の計算はどこがちがうのでしょうか。たとえば氷床の場合は例えばたくさん積もっていくと、それで厚さによって温度が変わってくるということがありますよね。

平林さん：氷床は計算をしていません。氷河は、標高ごとにその高さの温度ですとか、雨ですとか放射を基に、その場所では何ミリ解けるというのを、毎時間毎日計算するようなものを計算しています。氷床は温度分布もダイナミクスも違うので、異なる数式や計算手法が必要となります。