

第30回 環境サイエンスカフェ

テーマ 【シリーズ：気候変動の影響(3)】 サンゴから見た世界—地球温暖化と海洋酸性化—
 講師 山野 博哉さん（国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター長）
 日時 2015年10月21日（水）18：30～20：00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio
 参加者 43名



1. はじめに



皆さん、こんばんは。どうぞ、気楽に聞いていただきたいと思います。

私は今回、サンゴから見た世界ということで、サンゴは今どんな環境変化にさらされているのか、特に、最初にお話いただいたとき、気候変動との関わりで話をしてほしいという依頼を受けましたので、気候変動に関わる、地球温暖化、ちょっと耳慣れない言葉かもしれませんが海洋酸性化、これは二酸化炭素が海水の中に溶け込んで起こる現象で、これも後から、この講演の中でご説明させていただきたいと思います。

それで、事前になんか皆様からご質問をいた

だいておまして、なるべくそれに答えられるかたちで、このプレゼンの資料を作ってきました。大きく分けて、どうしてサンゴなのかというご質問、私が、なぜサンゴをこんなにおもしろいと思ってやっているのか、これももちろんご説明いたします。あとは、気候変動の影響がどうなっているのか、特に海洋酸性化とはどういうものなのかというご質問をいくつかいただいています。あとは、サンゴがどういった分布をしているのか、サンゴ礁は化石になったりすると石灰化するわけですが、たぶん、カーボネート（炭酸塩）とシリケート（ケイ酸塩）との存在比率がどうなっているのかというご質問をいただきまして、そういったかたちで、現在のサンゴ礁として、岩石となったサンゴ礁がどれくらい分布しているのかもお示ししたいと思います。また、中国が南シナ海の南沙諸島の岩礁を埋め立てていて、ほかにもそういったサンゴ礁があるのですが、そういった質問をいただきましたので、それも世界のサンゴ礁の分布をお示ししてお答えになればと思っています。

それで、1 つ今の最前線、特に我々が非常に関心を持っているご質問がありました。気候変動は生息環境によって新種や環境適応能力の見られる種があるのかというご質問です。これは、我々

がまさに取り組んでいるところでして、答えは、おそらくいる、ということです。これから予測の結果も示しますけれども、たぶんサンゴというのは、適応のかたちを変えながら、もっとしぶとく生きていくのではないかと、私としては思っています。それをご紹介できればと思います。そういったところで講演を始めさせていただきたいと思っています。

表紙の写真は、この間、西表島に行ったときに撮った写真です。今は残念ながら、これだけきれいなサンゴというのは、なかなか見られなくなってきました。その原因は、やはり地球温暖化による水温上昇と、もう1つは陸からの土砂の流入とか、そういった様々なストレスです。西表島は、幸いと言ってはあれですが、あまり人がいなくて開発もされていませんので、おそらく、それでストレスが少なく、こういう状況になっている、まだサンゴが健全な状況でいられるのではないかと私は考えています。それで今回は、サンゴになった気持ちで、サンゴがどういう生き物であるのかということと、もう一つ、環境に対して、どういうふうに応答しているのかということをお話させていただきます。

にサンゴ礁の地形などを研究しています。それが、なぜ生き物につながるかということも、この後ご説明させていただきます。その後、今の研究所に就職しまして、在外研究の機会をいただきまして、これ幸いと、ニューカレドニア、これは南の方にある島なのですが、フランスの研究所があります。そこで2年間過ごしました。そういったことをして、サンゴ礁の研究をずっとやってきました。私自身は、生き物の分布や地形の働き方をやってきたのですが、最近は、やはりサンゴ礁の保全に深く関わるようになってきてまして、その一環として、気候変動の影響や、それを考えた保全計画といったことを進めています。



これが私の対象地で、だいたい南の島ばかりです。(図3) 太平洋の島で研究をしていることが多くて、これも後でご説明しますが、最近は水温が上がって、サンゴがどんどん北に上がっていているということが報告されています。その関係で、日本の温帯にいるサンゴにも研究対象を広げているところです。

2. サンゴ礁とその分布

それでは本題に行かせていただきます。サンゴ礁は非常に高い生物多様性の場だと言われていいます。どういう根拠から言われているかということ、2001年から2010年まで、全世界の生物学者、特に海洋生物の生物学者が、いろいろな生き物のデータベースを作りました。(図4) 統一的なデータベースを作って、全世界の比較をしてみました。そうすると、日本周辺というのは、非常に生物の多様性が高い場所であることがわかってきました。その原因としましては、日本が南北に長く、北か

山野博哉
 国立環境研究所
 生物・生態系環境研究センター長

研究内容

- サンゴ礁の...
 - ・造礁生物分布
 - ・地形形成史
 - ・リモートセンシング
 - ・気候変動影響評価(データマイニング、モニタリング、将来予測)
 - ・保全計画(重要海域選定、保護区配置、陸域負荷の低減)

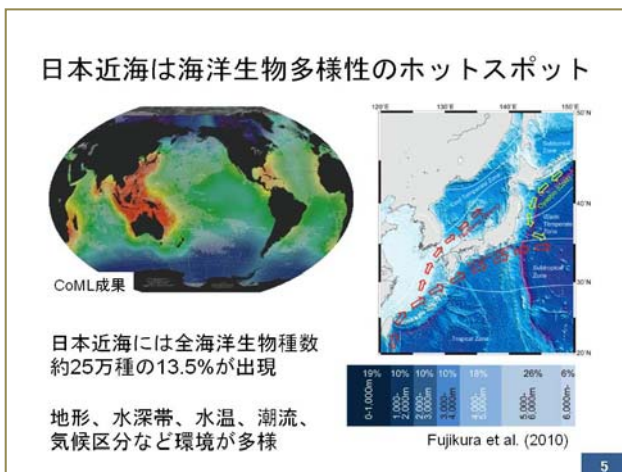
専門: 自然地理学
 1993: 沖縄に行く、卒論開始
 1999: 東京大学大学院
 理学系研究科地理学専攻修了
 1999-現在: 国立環境研究所
 2005-2007: ニューカレドニア
 フランス開発研究所(IRD)で在外研究

私自身は、今45歳で、卒論のときからサンゴ礁の研究をやっています。(図2) ですので、私もさっきそうだなと思って驚いたのですけれども、私の人生の半分はサンゴ礁を研究しているという、そして今もやっていますので、どんどん、その割合は大きくなっていくと思います。93年に初めて沖縄に行きまして、卒論を開始しました。私自身は、今、私は、生物系のセンターにいますのでけれども、バックグラウンドは自然地理学です。特

ということになります。



ら南までの環境があるということと、日本のEEZ、排他的経済水域には深海の環境もありますので、縦方向にも横方向にも多様な環境があります。水温の面でも、深さの面でも、多様な環境があるということです。それで日本近海というのは、非常に高い多様性を持っているということがわかりました。この多様性を支えている、特に南の方の多様性を支えているのがサンゴ礁なわけです。(図5)



それで、サンゴ礁というのは、サンゴでできた地形や生態系を指します。サンゴは生き物、動物なのですが、その体内に褐虫藻という共生藻と共生しているわけです。そうすると、その褐虫藻が光合成をして、ほかの生物のエサになるというような、海の森を作ります。サンゴ自身は、こういったように、石灰質の骨を作って成長していきますので、それが、どんどん重なっていくと、こういった巨大なサンゴ礁の地形になるわけです。それで、このサンゴ礁の地形というのは、生き物にとって棲み処になります。エサと棲み処があるので、たくさんの生き物が、この中で生きられる



では、人間は、このサンゴ礁からどういう恩恵を受けているかといいますと、1つは、このサンゴ礁の地形から本当に直接的な恩恵を受けています。その上に人が住んだりしているわけです。(図6) これは、ツバルという太平洋の中の島国ですけれども、この陸地のすべての部分はサンゴやサンゴ礁にすむ生き物の死骸です。死骸と言うとあれですけれども、殻からできているわけです。ここはもう、人間にとっても非常に重要な居住の場になっています。それと同時に、人間は、この多様な生物群種の中から食べられるものを水産資源として得ているわけです。ですので、生き物が地形を作り、多様な生物を支え、それがさらに、我々人間を支えるという、サンゴ礁というのは、そういう場であるということです。

これを最近、生態系サービスという言葉で、生態系がもたらす恵みをそのように言ったりしていますけれども、たとえば、漁業や、あるいは沖縄のきれいなサンゴ礁に行ったり、観光資源になったり、あとは、このサンゴ礁自身が天然の防波堤になって、この島を守ったり、あるいは、この場合ですと、島を作ったり、そういうサービスを提供しているわけですね。生き物なのですが、動物なのですが、植物のようでもあり、さらに、こういう骨格を作りますので、鉱物みたいな特色も持っている、非常におもしろい生き物なのです。これが私は非常におもしろくて、ずっとサンゴ礁の研究を、どっぷりとやっているわけです。

いくつか写真をお見せします。これは、石垣島で10年ぐらい前に撮った写真です。(図7、図8) これは、全部生きた、健全なサンゴですけれども、



石垣島平久保崎

7

これは、死んだサンゴのかけらです。(図9) サンゴが死んだ後も、そのまま溶けるわけではありません。石灰質の骨格を持っているので、それが集まる場があると、こういったように島を作ります。先ほど、35コーヒーの話が出ましたが、35コーヒーは、聞いてみたところ、この死んだサンゴの骨を石焼き芋の石みたいに使って焙煎していると聞きました。たぶん熱の保持能力があると思うのですが、サンゴは結構多孔質で、中がスカスカだったりするのです。それでおそらく、熱をきちんと保持するので、うまく焙煎ができるのではないかと、先ほど聞いて考えたのですけれども、たぶん、そうですね。このような感じで、島を作りあげたりします。



サンゴに共生するサンゴガニ(写真:中井達郎)

8

その間には、こういった魚が住んでいたり、このサンゴを直接食べる魚も住んでいたりします。サンゴをよくよくのぞき込んで見ると、サンゴにしかならない、これはサンゴガニというカニなのですが、そこには、こういった小さな生き物が、サンゴがないと生きられない生き物もすんでいます。サンゴはほかの生き物を支えているわけです。棲み処としても支えているし、エサとしても支えているということです。



西表島 ユツン川河口

10

あと、このゴツゴツした庭石みたいなものがありますが、これは実は死んだサンゴです。(図10) これは、人間によって死んだわけではなくて、昔は海面がここまで高かったのですけれども、その海面の高さが下がって、干上がって死んでしまったものです。死んだ後も、こういった地形として残りますので、これはマングローブなのですが、マングローブの種がここに入ってきて林ができたりと、ほかの生き物を、やはり、支えるようになっているということです。

これは、先ほどお見せしたツバルの写真です。(図11) ツバルの首都のあるフォンガファレ島という所です。ここに4,000人が住んでいます。



西表島 パラス島

9

会場A: すごい人口密度ですね。

山野さん: そうですね。人口密度はすごく高いです。それで、皆さん、ツバルというのは海面上昇

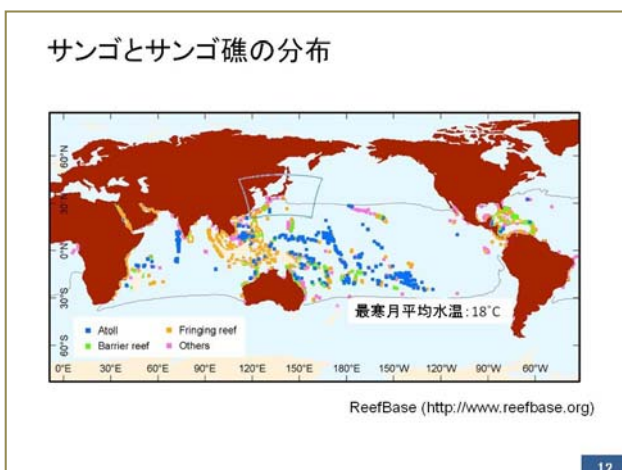


によって沈む国とよく言われているのですが、これだけ平らな所にたくさん人が住んでいるので、海面上昇ですごく危機にあるというのは、これを見ていただければわかるかと思ひます。

会場 B：その滑走路の長さはどのくらいですか？

山野さん：これですか。これは 1.5 キロぐらいだと思います。ジャンボジェットというか、ジェット機は止まれません。プロペラ機で行きます。で、この飛行場は、元々こういう湿地を埋め立てて、米軍が造ったものです。こういった所では、ここにサンゴ礁がずっと輪のようにあるのですが、サンゴ礁から死んだサンゴが流れてきたり、あるいは、サンゴの上に、ほかの石灰化する生き物がいたり、有孔虫などがいますので、それが流れて溜まって、陸地を作っているわけです。全部、石灰質のサンゴ礁由来の土地になっているということです。

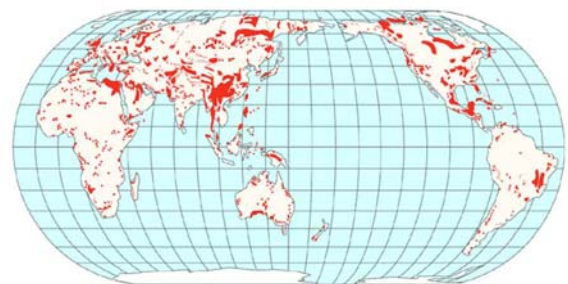
サンゴとサンゴ礁が、どこに分布しているのかというのを示した図が、こちらです。(図 1 2) サ



12

ンゴは、やっぱり、暖かい所の生き物ですので、だいたい最寒月、日本ですと 2 月ですが、その平均水温が 18 度を超えるところだと、サンゴ礁という地形を作ります。それより温度が低いと地形を作らなくなって、普通の生き物といひますか、地形を作ることはできなくなります。南シナ海のサンゴ礁はここにあつて、結構同じようなサンゴ礁はたくさんあるのですが、この辺りでは、アトールという輪になっているサンゴ礁がある、非常に珍しい所です。

炭酸塩岩(石灰岩、古いサンゴ礁含む)の分布



炭酸塩アトラス (<http://www.scs.kyushu-u.ac.jp/earth/kano/Carb/1/110101.html>)

炭酸塩岩は全堆積岩の 15~20% を占める

13

先ほどは、今あるサンゴ礁ですが、これは、もっと古い、地質時代の、数百万年前とか数億年前のサンゴ礁がどこに散らばっているかです。

(図 1 3) これは、大陸も移動しますので、いろいろな所に散らばるわけですが、これだけ石灰岩として残っています。それで、一部は古いサンゴ礁を含んでいるわけだ。これは、全世界にあるわけですが、我々に身近なところで、セメントの材料になっていたり、中東の古いサンゴ礁では、先ほどサンゴは非常に多孔質でというお話をしましたけれども、空隙が非常に大きく、そこに石油が溜まって油田になったりします。こういう古いサンゴ礁の中に石油が溜まって油田になっている所は、結構いろいろな所で見られます。

会場 C：石灰岩というのは、すべてサンゴなのですか。

山野さん：すべてではありません。外洋でも、たとえばプランクトンで有孔虫というものがいるのですが、それは石灰質の殻を持っていて、それが溜まってできたところもあります。それで、よく

サンゴ礁はどれぐらいの割合なのですかと聞かれるのですが、それは実はわかっていません。サンゴ礁が、この中でどれぐらいあるのかという、きちんとした比率は、まだわかっていません。

会場 D：北極圏近くのは、どちらのものかわかりますか。

山野さん：ここですか。たとえば、ドイツとかだとサンゴ礁です。ジュラ紀のサンゴ礁があったり、ヨーロッパのものはサンゴ礁が多いです。

会場 D：それより北はわかりませんか。

山野さん：それより北は、ここは何でしょうか。すいません、それは、私がわからないだけかもしれませんが。寒い所のものでも、大陸が動きますので、南にいたものが運ばれるというのは十分あります。

3. サンゴの生態



では、生き物としての話を再度します。(図14) サンゴはイソギンチャクと同じ仲間の、実は、動物です。ちょっと実物はないのですが、サンゴを見ると、プツプツ穴が開いているのですけれども、その穴の1つ1つにイソギンチャクが住んでいるという、そういうイメージです。ただ、イソギンチャクと一番違うのは、こういう石灰質の骨格を作るということと、イソギンチャクも一部は共生しているやつがいるのですが、この体の中に褐虫藻という非常に小さい藻類を共生させているということです。ですので、サンゴは基本的には

動物で、動物なのでエサも当然食べるわけですが、この褐虫藻が光合成をして作るものも受け取って生きています。ですので、後でご説明しますが、この褐虫藻が抜ける白化現象というものが起こるとサンゴは死んでしまうわけです。で、サンゴは動物なのですが、こういった褐虫藻を共生させていますので、植物みたいな振る舞いもします。光合成をするわけです。さらに、この骨格を作って、地形を作りあげますので、まるで鉱物のようでもあるということですね。ですので、先ほども言いましたが、ここがほかの生き物にない、すごくおもしろいところだと私は思っています。

会場 E：質問なのですが、藻類が作ったものをいただいているのですか。プランクトンを食べているわけではない？

山野さん：両方です。それで、どうも弱ってきて褐虫藻が抜けると、プランクトンを食べるようになっていたりとか、そういう戦略で生きているみたいです。両方使っています。でも、普段は主に、こちらの光合成をしたものを使っています。

サンゴは、先ほども申し上げたように、ほかの動物と同じように卵を産みます。毎年5月の末ぐらいになると、時々、新聞で、サンゴが一斉に産卵したとかいうニュースが流れるのですけれども、それも実は種類によって違うのですが、多くの種類は一斉に産卵して、産卵した後、漂っている間に卵子と精子が受精して、しばらく、その状態で海流に乗って遠くまで流れていきます。受精している間に、卵からプラナラ幼生というものになって、それが一定期間経って、いい所を見つけると、沈んでそこにくっつくわけです。そこから、どんどん分裂して、サンゴというのは、1人ではなくて、どんどん分裂して増えていきます。クローンを作って増えます。ですので、我々がサンゴと言うときは、サンゴの個体ではなくて、サンゴ群体という言い方をします。これは、クローンでどんどん増えていきます。ですので、卵も産むのですが、成長するときは分裂して、クローンを作って増えていきます。

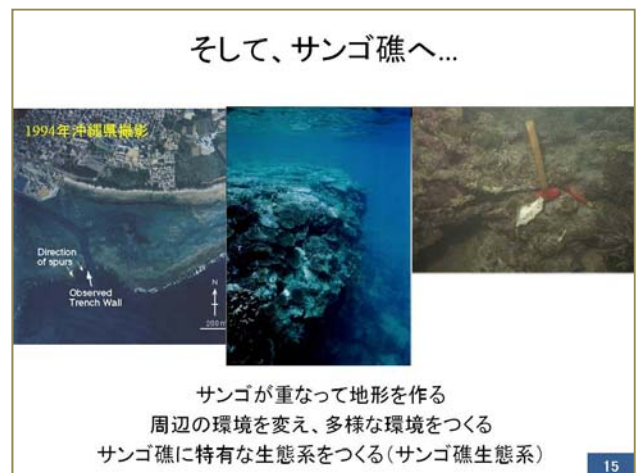
会場 F：褐虫藻はいつ入るのですか。

山野さん：それは、いろいろです。親からもらう場合もあるし、こうやって漂っている間に、褐虫藻は普段水の中にもたくさんいますので、口から取り込んでいる場合もあります。それにもいくつかタイプがあります。この卵の産み方にも実は2種類あって、卵と精子を含めたバンドルというものを、ワーツと産んで、その間に受精するやつもあれば、オスとメスがいて、体の中で一定期間飼って、このプラヌラを直接出すようなタイプもあります。ですので、褐虫藻の獲得の仕方とか、この子供の育て方とかは、いくつかのパターンがあったりします。あと、卵を産む時期も、年1回だったり、毎月産むやつもいたり、たぶん、そのようにいろいろな戦略を持つサンゴがいてサンゴというのは数百種類いますので、そういう数百種類のサンゴが共存できているのではないかと思います。全体的なパターンとしては、卵を産んで、受精してプラヌラ幼生になって定着し、それで分裂して増えていく、ということになります。

卵は全体的に少しピンクがっています。そして卵と精子が混ざって1つになったものをバンドルと呼びます。あるときになると、サンゴはバンドルを放出します。これがそこかしこに起こるので、一斉産卵と言われます。一斉産卵をするメリットは、同じ種類のサンゴですけれども、ほかの群体と交わる機会ができるので一斉産卵をされると言われています。ただ、産卵された後、生き残る卵は実は少なく、次の日、浜に打ち上げられて終わる卵もたくさんいます。それがゆえに、たくさん卵を産むということだと思います。うまく成功すると、サンゴ礁の外に行くと、先ほどの精子と卵子が一緒になったものが、ずっと海流に乗って流れていきます。この間に受精をおこなって、いい場所を見つけて定着します。

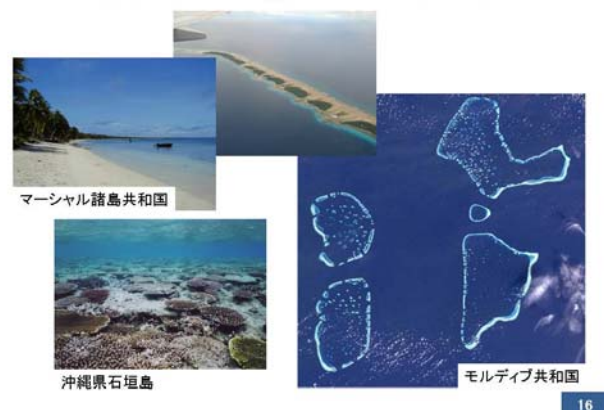
これは、生物の実験でウニの発生などを観察された方は同じような感じだと思いますけれども、受精をして、分裂をして、最後、プラヌラになります。このプラヌラは多少自分で動けるので、いい場所を探して、探せれば定着して、それが変態と言っていますが、初期のポリプというサンゴの1つの個体になります。これが分裂して増えていって、ある段階で褐虫藻を持ちます。ミドリイシという種類は、漂っている間の段階では褐虫藻がいまないので、定着したか定着直前ぐらいに褐虫

藻を獲得しているのだと思います。これが、成長して死んで、さらにその上に、また次のプラヌラが入ってきて成長して、というのを何千年繰り返すと、サンゴ礁という地形になります。



(図15) これは石垣島で、ここが港で、船を通すためにサンゴ礁を切ったところがあるのですが、こんな感じでサンゴが何十にも積み重なっています。私は、ここにダイビングしてサンゴ礁のでき方を調べたのですが、割ってみると、やはり、テーブル状のサンゴですが、重なって、このサンゴ礁ができていました。こういった地形をサンゴ礁と言ったり、あるいは、ここに住む生き物を全部含めて、この生態系自身を、サンゴ礁生態系と言ったり、サンゴ礁という言葉は両方の意味で使われることがあります。

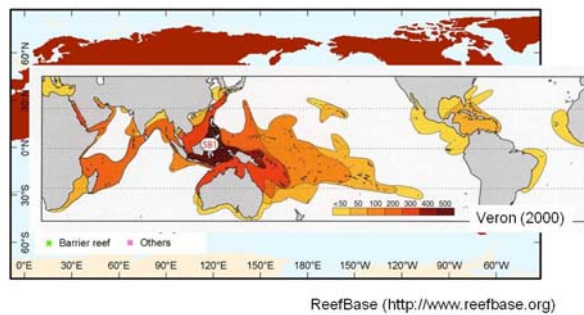
サンゴ礁：熱帯から亜熱帯にかけて広く分布



(図16) サンゴ礁というのは、先ほど図でお見せしましたが、熱帯から亜熱帯にかけて広く分布していて、これはモルジブですが、衛星から撮った写真で、半径だいたい100キロという、それぐらい非常に大きなサンゴ礁を作ったりしています。

南の方は、いわゆるテレビなどでよく流れているサンゴ礁なのですが、北に行くと、だんだん種類が変わっていきます。(図19~図21) 雰囲気だけでもつかんでいただければと思うのですが、サンゴ礁ではなくて、石の上にサンゴがペタッとくっついてます。このようにサンゴ自身が積み重なって地形を作るといのはなくなってきます。

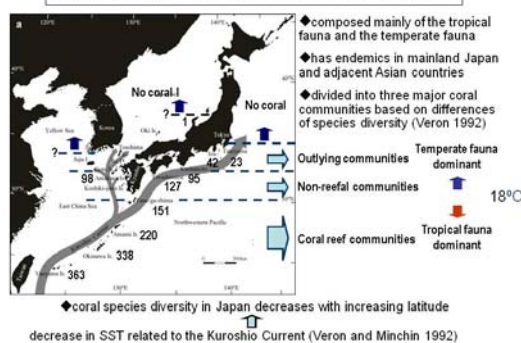
日本はサンゴとサンゴ礁分布の北限域にあたる



黒潮の影響で、サンゴの種類数は多い 17

それで、我々のいる日本は、サンゴとサンゴ礁から見ると、寒い所、分布の北限域に当たるわけです。(図17) ただし、北限にしては種類は多くて、沖縄で400種類ぐらいです。これは多様性の中心のインドネシアのところで600種類ぐらいです。なぜ、こんなに高いかという、黒潮が流れて、卵をどんどん運んでいるというのと、周辺に比べると比較的暖かいからです。

Hermatypic coral fauna in Japan

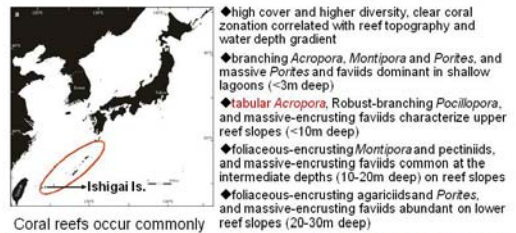


18

では、日本に実際どのくらいサンゴがいるのかというと、石垣島で400種類ぐらいです。それで、サンゴの北限というのは、実はこの近くにもサンゴがいて、千葉県には20何種類サンゴがいたり、一番北限は佐渡島で、佐渡島に1種類だけですけれどもサンゴが見つかったりしています。水温が低下すると、どんどんサンゴの種類数がどんどん落ちて、寒い所に耐えられる種類だけになります。何種類かは、この辺りにしかいません。完全に温帯に適応したサンゴも、数種類ですがあります。(図18)

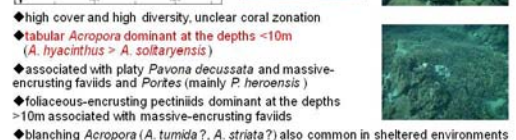
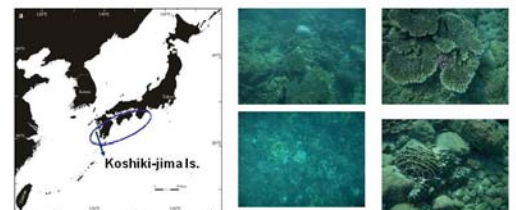
それに伴って景観もどんどん変わってって、

Latitudinal changes in coral communities
Coral reef communities in Ishigaki Island



19

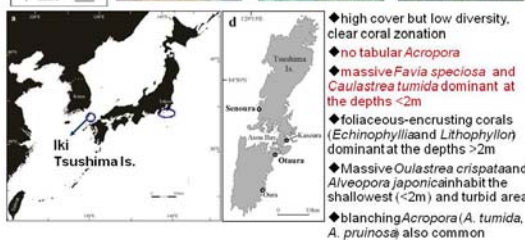
Non-reefal communities in Koshiki-jima Is.



No coral reef is found

20

Outlying communities in Iki and Tsushima Is.



high cover but low diversity, clear coral zonation

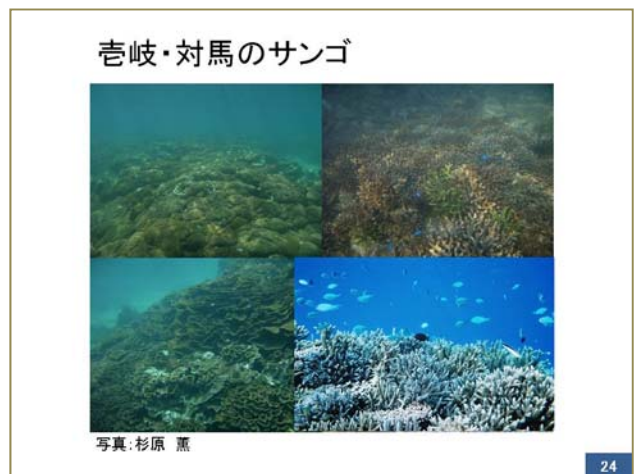
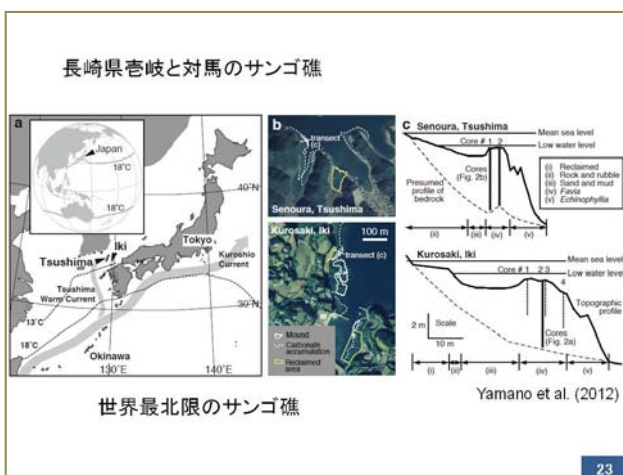
21

これは長崎県ですけれども、ここまで行くと、塊

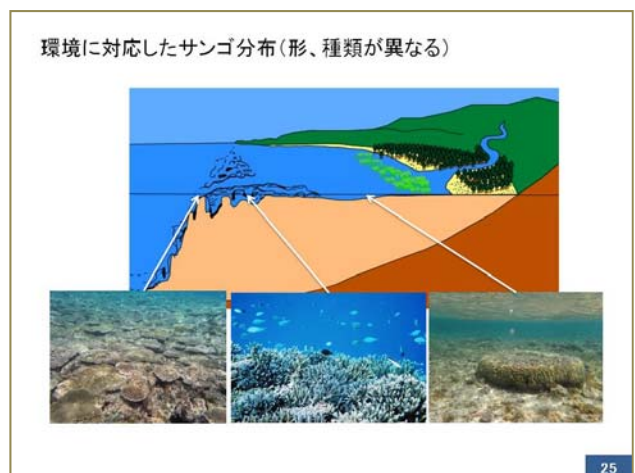
状の、これは南の方では結構マイナーなサンゴなのですが、それが、ストレスに強いのと、おそらく水温耐性があるので、そういうサンゴばかりになってきます。地形的にも、南の方は立派なサンゴ礁が発達しています。これは、沖縄本島の近くの島です。それが、これは小笠原ですけども、わかりにくいですが、少しだけサンゴ礁の地形があります。高知まで行くと、岩盤の上にサンゴがくっついていただけと、こんな感じで、地形や景観もどんどん変わっていきます。(図22)



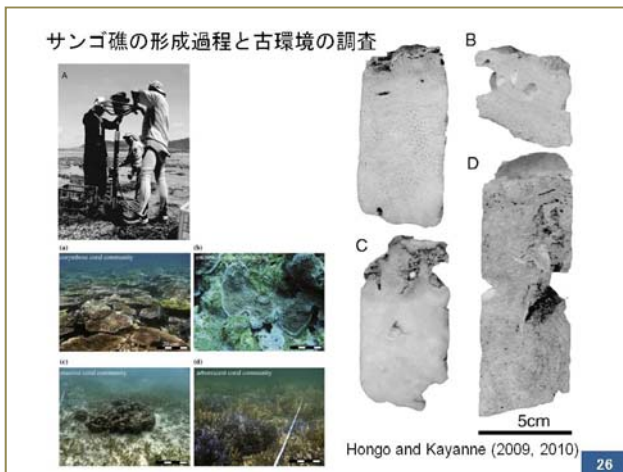
ちなみに、世界で一番北にあるサンゴ礁というのは、実は長崎県の対馬にあります。対馬にちょっとだけサンゴでできたマウンドを見つけて、そこをボーリング調査しました。掘ったんですね。そうすると、5メートル以上のサンゴが積み重なっていて、立派なサンゴ礁が、実は長崎県にあったわけです。種類は、先ほどお見せしましたけれども、全然違う種類のサンゴでできていて、ここはここで結構おもしろい場所です。(図23、図24)



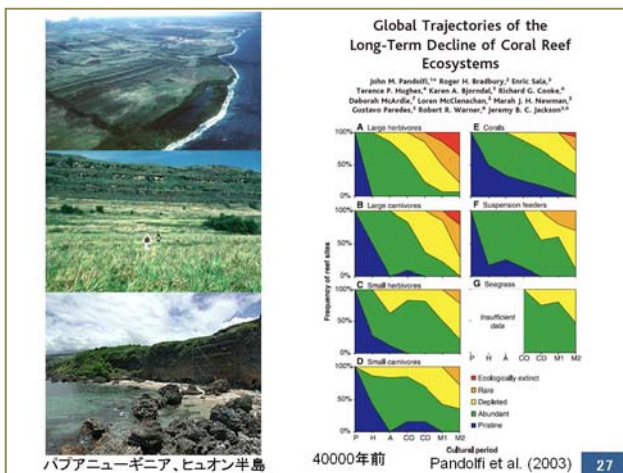
先ほど、サンゴは何種類もいるとお話しましたが、基本的には環境に対応してサンゴが分布しています。これは模式図です。(図25)これがサンゴ礁で、こちらが外洋です。外洋の方は波が強いですので、こういったところに潜ると、波に対して非常に強いかたちを持ったサンゴが、ベタッと張り付いています。あるいは太い枝だとか、そういうサンゴがあります。その内側で、波が穏やかで潮通しのいいところは、こういった枝状のサンゴがいますし、もっと岸に近い、川の影響を受けた、ちょっと泥っぽいところには、塊状のサンゴと、それぞれ種類も違うし、形態も違うサンゴが、非常にわかりやすく分布しています。



で、我々といいますか、地質学者、あるいは地形学者の人は、こういった特徴を利用して、昔からのサンゴ礁のでき方、あるいは昔の環境を推定するわけです。そのために、これはサンゴ礁でコアを掘っているところですけども、直径5cmとか10cmぐらいの管を、ドリルを回して、その中に入ったコアを採るわけですが、それを半分に割っ



て、これはどういったサンゴかというのを解析します。(図26)たとえば、なかなか見慣れないとわかりづらいのですが、これは、実はここに太い枝がこういうふうにあるのです。それで、こういったサンゴが出てくると、ここは非常に波当たりの強い所だし、おそらく水深も浅い所だ、ということがわかるわけです。それによって、昔の海面の高さや水温など、昔の環境が復元できたりするわけです。サンゴがこんな感じで化石として残るので、そういったことにも活用できるわけです。さらに化石で残るという特徴を利用というか、それを考えますと、昔どれくらい、何種類ぐらいサンゴがいて、今は何種類しかいないとか、特に人間の影響が大きくなった過去数千年でどれくらい影響が出たかということが、こういう化石を調べるとわかるわけです。



その調べる場所で、非常に地震が多くて、どんどん地面が隆起している所があります。(図27)パプアニューギニアにあるヒュオン半島という非常に有名な所なのですが、そこにもサンゴ礁があ

って、昔のサンゴ礁がどんどん陸に上がっているわけです。ここに1つ1つの筋が見えますけれども、この1個1個が昔のサンゴ礁です。こういった所でサンゴの種数を調べると、昔何種類いて、今は何種類しかいない、というようなことがわかります。

それをやった人が、このパンドルフィという人達で、やはり予想どおりといいますか、昔、人間の影響が少なかったときは、サンゴの種数もたくさんいたし、サンゴだけではなく、貝などのほかの化石も全部調べて、たくさん原初的な状態だったのが、どんどん状態が悪くなり、今は種数も非常に減っており、人間の影響は非常に大きいということが、こういった長期間の化石記録を使ってわかってきたわけです。

会場 G：地層だと下の方が古いのですけれども、サンゴ礁の場合は上と下とどちらが古いのですか。

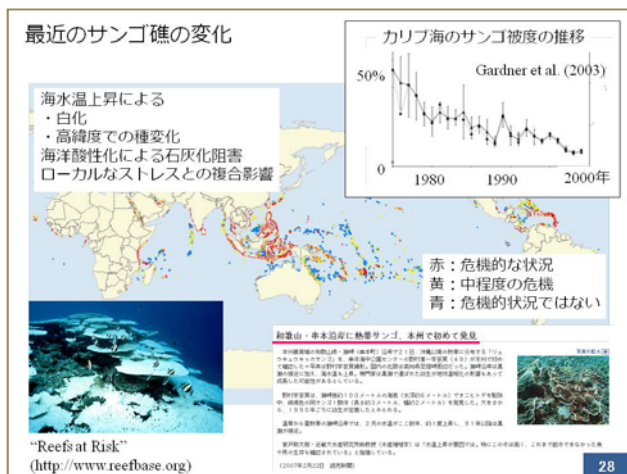
山野さん：やはり基本的には下が古いです。どんどんサンゴが積み重なっていきますので、下が古くなります。

会場 G：そうすると、隆起したものの、下の方を見ないといけないということですね。

山野さん：そうですね。ただ、こういうところは結構、川があたりして、崖になっていたりするのです。そういった所を狙ってやるわけです。これは、実はここに櫓を組んで、すごく大規模にやっているのですが、こういったところで、上から下まで、ちゃんと、どういった環境かというものも考えながら化石を見ていきます。そういったことを、ここではやっています。

4. グローバルストレス：水温上昇

(図28)では、だんだん現在から未来の話に移っていきます。最近のサンゴ礁の変化なのですが、非常に残念なことに、サンゴというのは、今、非常に危機的な状況にあります。これは1つの例として、カリブ海のサンゴがどれくらいいるかというのを、昔の報告書や研究例をすべて網羅して計算したものですけれども、かつては、海底の50%がサンゴでした。それが今はどんどん



減って行って、海の中の 5% ぐらいしかサンゴがない状況になっています。なぜ、こういうことが起こったかという、実はいろいろな原因があるのですが、1 つは、やはり海水温が上がりすぎて、褐虫藻が一言で言うとおかしくなってしまう、ストレスを受けて光合成がうまくいかなくなって、活性酸素を出すようになるわけです。そうすると、それをサンゴが嫌って褐虫藻を追い出してしまったり、あるいは褐虫藻自身が死んでしまって色素が抜けたりします。その状態が、これです。真っ白になっています。これがサンゴの白化、白く化けると書いて白化です。そういったことが起こるわけです。

また、この図は、世界のサンゴ礁が、どれぐらいの危機的な状況にあるかということを示した図ですけれども、陸に近い所のサンゴ礁が非常にまずいということです。真っ赤な所です。これは、どうしてかという、陸からの流入の影響、土砂や廃棄物といったものの影響を受けている、あるいは人が利用しすぎた、それで危機的な状況になっています。カリブ海の場合は、その両方が重なって、こういった状況を招いているということが言われています。一方で、水温が上がった場合は、今までサンゴが住めなかった所までサンゴが住めるということで、北上するわけです。日本の場合は、ですが、こういうことも起こっています。それを、これからお話いたします。

こういった背景を受けて、サンゴ礁というのは、皆さんご存じの方もいらっしゃると思いますが、生物多様性条約国の締結国会議が、2010 年に名古屋でおこなわれました。(図 2 9) それも、気候変動条約と同じときにできた条約なのですけれども、

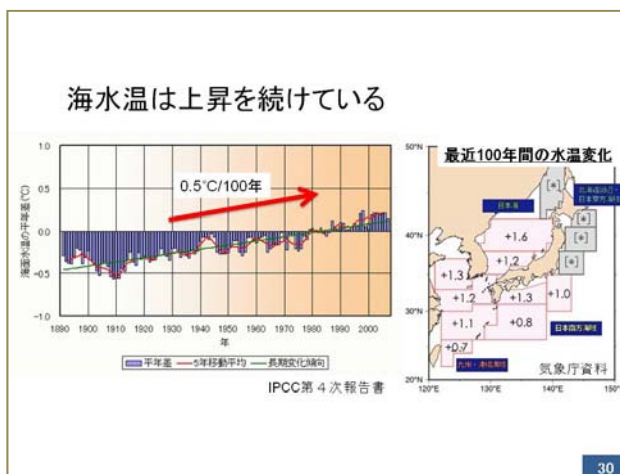
生物多様性国家戦略：生物多様性の 4 つの危機
第 1 の危機：開発など人間活動による危機
第 2 の危機：自然に対する働きかけの縮小による危機
第 3 の危機：外来種など人間により持ち込まれたものによる危機
第 4 の危機：地球温暖化や海洋酸性化など地球環境の変化による危機

CBD/COP10 愛知ターゲット

- 目標 10：気候変動又は海洋酸性化により影響を受けるサンゴ礁その他の脆弱な生態系の健全性・機能の維持
- 目標 11：効果的な保護地域の設定・管理（沿岸域及び海域の 10% が保全される）

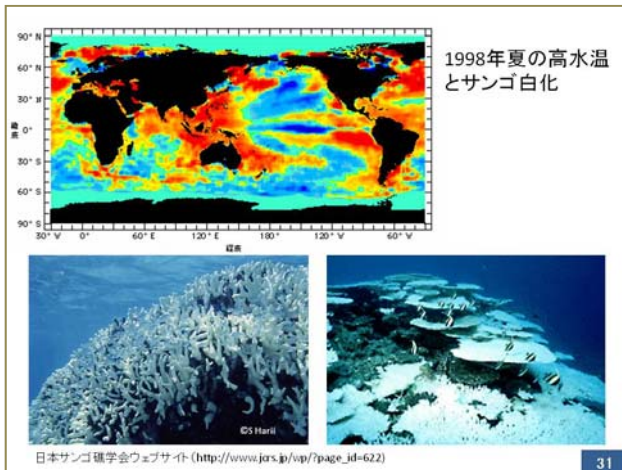
気候変動と同じように、Conference of Parties、COP (数字) というので、1 年か 2 年おきにやっているものです。2010 年にそれが開かれて、その中で、生物多様性の状況が非常に危機的であるということで、いくつか目標が立てられました。その中に、これは非常に不名誉なことではあるのですが、サンゴ礁は今、非常に脆弱な状態にある生態系ということで、名指しで挙げられるようになってきたわけです。

これに対応して環境省が中心となって生物多様性国家戦略というものを作ったのですが、この原因としては、開発などの人間活動による危機や、あるいは、第 4 の危機として、これは実は今まで入っておらず、ここから入るようになったのですが、気候変動の影響が大きいのではないかとことが、だんだんと取りざたされるようになって、サンゴ礁は非常に象徴的な生態系になりました。

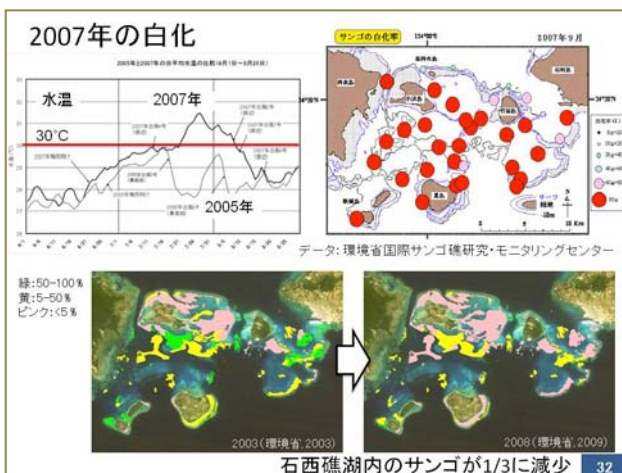


日本のサンゴ礁とサンゴの状況を説明いたしますと、やはり世界平均でも水温が上がり続けてい

るのですが、日本の周辺でも上がっています。(図30) これは実際の観測記録ですけれども、本当に上がっているということです。気象庁が船などで測った記録を公表しているのですが、100年間で1度から1.5度ぐらい温度が上がっています。ベースがそのように上がって行って、さらにエルニーニョで、ある年にポンッと水温が上がる、これは1998年に顕著に起こったことですが、水温が全世界的にエルニーニョで上がって、サンゴの白化現象が全世界的に起こりました。(図31)



私は1993年に研究を始めたと申し上げましたが、そのときは、こんな問題はほとんど言われていなくて、まじめに研究しているのですが、遊びに行っているというか、そういう目で見られることもありましたが、ですがこれ以降、私にとっては非常に悲しいことでもあるのですが、サンゴ礁の研究をしていると言うと、温暖化とか、そういうことで広く皆さんに認めてもらえるようになりました。これは、非常に皮肉なことです。

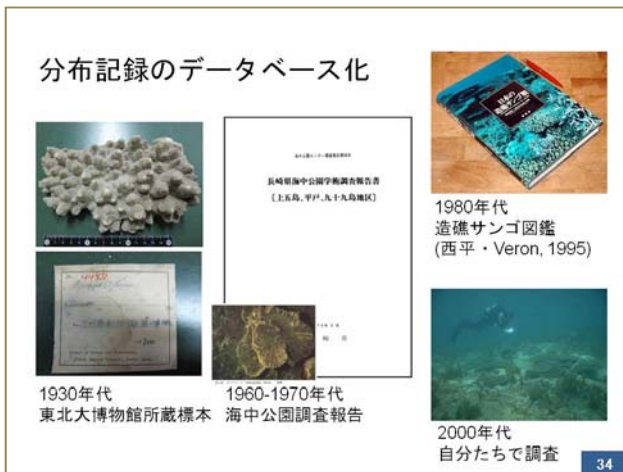


(図32)そして、2007年にも、これは沖縄周辺

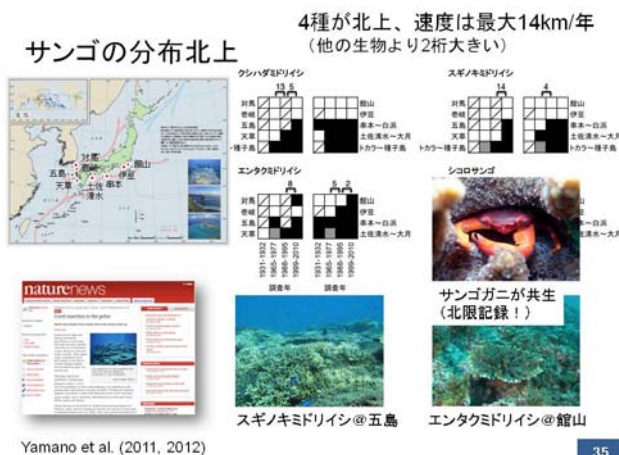
だけですけれども、やはり水温が上がって、夏場30度を超える日が続きました。そうすると、これは石垣島と西表島の間にある石西礁湖という非常に大きなサンゴ礁ですけれども、その中のサンゴがほぼすべて白化してしまって、その多くは死んでしまいました。それで、私が航空機で調べてみますと、このダメージで、このサンゴ礁の中のサンゴは、だいたい3分の1ぐらいに減ってしまったということが明らかになりました。このような感じで、南のサンゴは非常に傷んでいるわけです。



ただ、今度は逆に北に目を向けてみますと、これは実は、沖縄ではなく長崎です。(図33)長崎の海の中の写真です。五島列島ですね。このサンゴは、南に非常に多いスギノキミドリイシという種類ですけれども、基本的には南に住んでいるサンゴなのですが、最近、五島列島まで分布を拡大してきています。それで、我々は昔からの記録をさかのぼってみました。そうすると、日本というのは、実は昔からサンゴ研究が盛んで、昔は地質学的な観点でやっていました。東北大学の地質学教室の先生が、日本全国のサンゴの分布の調査をしていまして、幸いなことに標本をたくさん採っていて、博物館にあります。そうすると、博物館に行ってそれを調べると、昔どういサンゴがいたかということがわかるわけです。その後、1960年代、70年代に、今、環境省の海域公園と言っていますけれども、その全身として、海中公園というものを作る調査が全国規模で、各県でおこなわれました。その中にも幸い、これは元々、景観のいいところを国立公園にしようということで、同じもので始まったものですが、景観がいいということで、サンゴも景観の一要素として調査対



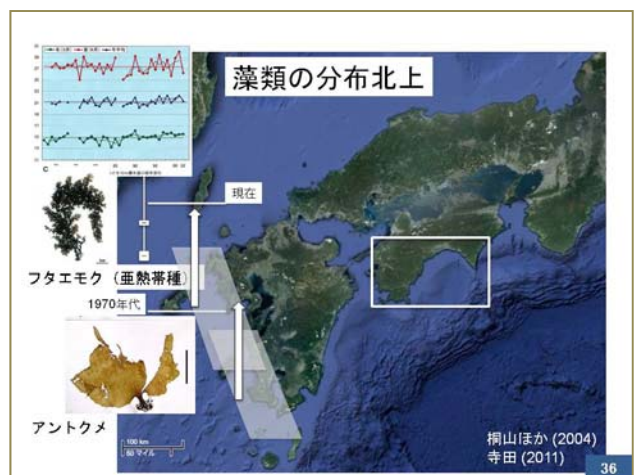
象に入ったのです。それで写真がたくさんあったり、種のリストもあったりしますので、ここでまた全国レベルでどういうサンゴがいたかということがわかります。(図34)その後、1980年代に、だんだんサンゴの研究が盛んになってきて、これは、Veron というオーストラリアの分類学者なのですが、その方が日本に来て、南から北にどんどん種類が変わっていくので、非常におもしろがって帰っていったのですが、その後、西平先生という方と2人で、この図鑑を作りました。これも全国的に調査をしています。結構追えます。それで2000年代になりますと、我々が、昔調査された所に行って調査して、どういサンゴがいるかということ調べたわけです。



(図35) そうしてわかったことが、ちょっと見にくい図で恐縮なのですが、たとえば、これは種です。スギノキミドリイシ、これは、1960年代は、トカラ列島、種子島、この辺りまでしかいなかったのですが、今は長崎県の五島列島までいます。これは、30年代、60年代、80年代、現在、です。いたら黒、いなかったら白、調査がなかつ

たら斜線、グレーというのは、たぶんいただろうというものです。サイズなどを見ると、だいたい何歳かということがわかるので、そういうものを見ると、たぶんいたということで、印を付けています。ようするに、右肩上がりになっていると、北上しているということです。これが日本海側、これが東シナ海側、これが太平洋側です。そうすると、スギノキミドリイシは、先ほど申し上げたように、種子島から五島列島まで北上していて、そのスピードが、年平均すると14キロと非常に早い速度で北上しています。ほかの種類に関しても、いくつか北上していて、たとえば、千葉県館山に、こういうやや南の方のサンゴが最近表れています。そういったことが明らかになってきたわけです。全国的にこういった傾向があることがわかりました。

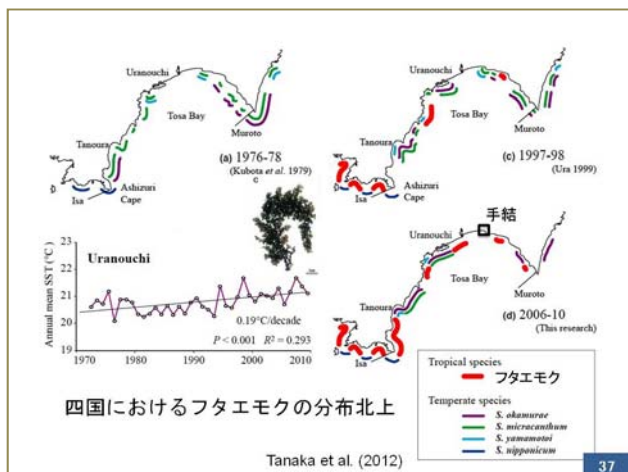
それで、先ほど、カニの写真をお見せしましたが、これの中に住んでいるカニの写真です。それで、このサンゴガニも、このサンゴにしか住めないカニですので、ようするにサンゴが北上してくると、やはり、それに合わせて、ほかの生き物も北上してくるということです。そういったことも明らかになっています。



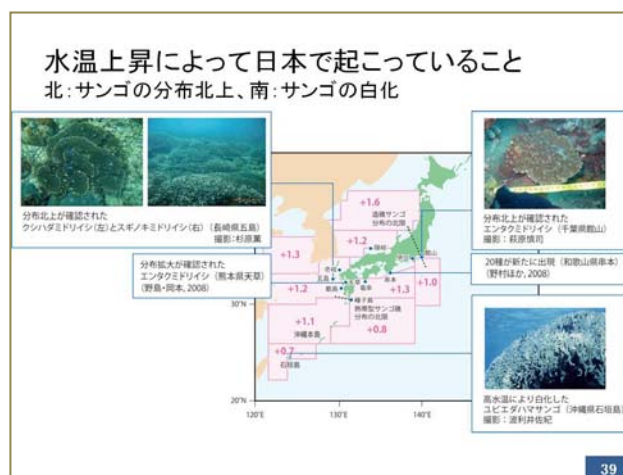
もちろん、こういった変化はサンゴだけに起きているものではなくて、ほかの海藻にも、やはり同時に、当然と言えば当然なのですが、変化は起きている。(図36)海藻も同時に記録を調べてみますと、これはアントクメというコンブの仲間ですが、昔は天草から種子島ぐらいまでしかいなかったのが、今は、そのままシフトして天草から壱岐するまで分布するようになりました。また、フタエモクという、これは暖かい所にいる種

ンゴがどんどん増えていると、こういった変化が、まさに今、現在進行形で起きているということです。

それを受けて、私自身で、今、うちの研究所でモニタリングを始めまして、これは伊豆なのですが、定点サイトを、伊豆だけでなく全国 8 カ所に設けて、潜って調査をしています。これは富士山ですね。この日晴れていたもので、富士山が見えました。寒いので、ウェットスーツではなくて、中に水が入らないドライスーツというものを着て潜っています。こういう感じで海の中に定点のサイトを設けて、そこを毎年毎年、しつこく見に行っています。(図 3 9)



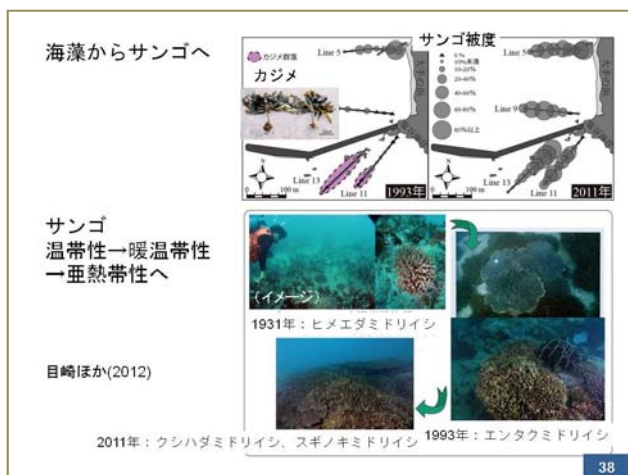
なのですけれども、それが今、対馬まで上がってきています。そういったことも同時に調べていくとわかります。これは、私ではなくて、ほかの方が調べたものですが、四国の沿岸では、やはり先ほどのフタエモクが、70年代から2000年代にかけて、どんどん増えているということが各界の調査でも明らかになっています。(図 3 7) さらに、この手結という所では、今度は寒いところにいる海藻ですけれども、それがまったくいなくなってしまっていて、今はことごとくサンゴに置き換わっています。サンゴに関しても、昔、寒い所にいたサンゴが、どんどん暖かい所にいるサンゴに変わってきています。このように日本全国規模で見ても、どんどん沿岸の生態系が変わってきていることが、こうやってデータを積み重ねていくことによりわかってきました。(図 3 8)



これは、おそらく最近入ってきた、先ほどのエンタクミドリイシというものです。これも今、伊豆でどんどん増えていて、それが毎年成長している状況なのではないかと思えます。これが水温のお話です。

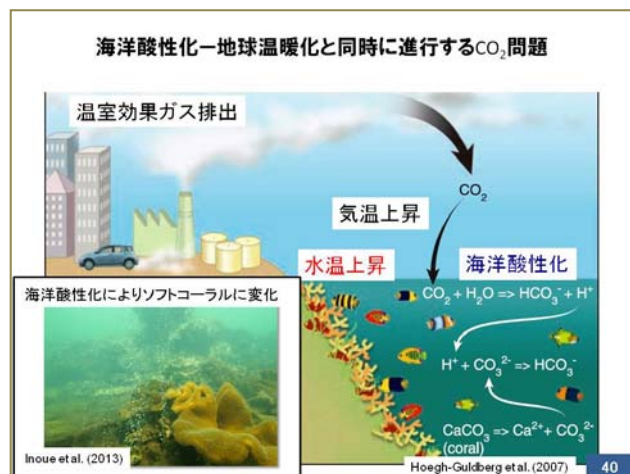
5. グローバルストレス：海洋酸性化

今までは水温のお話ばかりをしてきましたが、元々は水温上昇、地球温暖化によってもたらされていて、その元の1つの大きな原因は、二酸化炭素の排出なわけです。二酸化炭素の排出は、この水温上昇だけではなく、同時に海洋酸性化も起こしています。これはどういうものかというところ、二酸化炭素が排出されて、それが海の中に溶けます。そうすると、海の中では、カルシウムとほかのものがイオンの状態で共存していますが、ここに二酸化炭素が加わると、この反応が、こちらに移動するわけです。それで、これが出てきて、こっち



まとめると、簡単なのですが、南の方では、こういった水温上昇によってサンゴがどんどんやられていると。それに対して、寒い方、北の方では、逆にサンゴにとっていい環境になっているのでサ

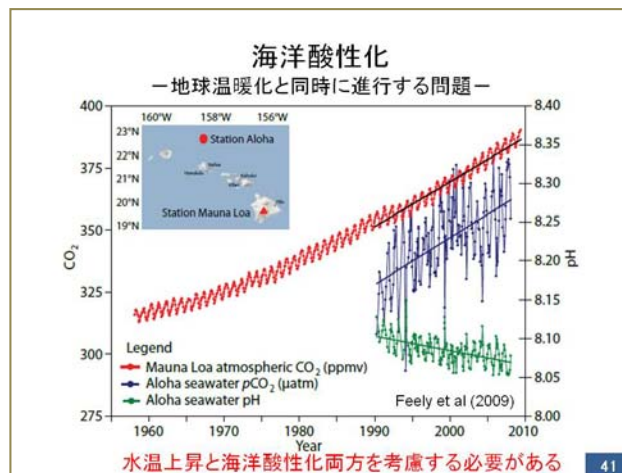
にくっついて、これが増えるわけです。そうすると、これを中和するために、この炭酸イオンが使われて、こういうかたちで中和されます。それで、これが使われるとどういうことになるかという、この骨の材料、炭酸カルシウムの材料が奪われてしまうということになりますので、骨が作りにくくなるのです。(図40)



これはもちろん、サンゴだけではなくて、骨格を持つすべての生き物に相当します。貝もそうですね、ウニもそうです。あと、魚の耳石とかもそうですね。そういった炭酸カルシウムの骨や殻、そういったものすべてに影響する現象です。ですので、これは非常に深刻なのではないかということで、今、盛んに研究が進んでいる、まさにホットなところなんです。研究的にもホットだということです。どういった影響があるのかとか、そもそも影響があるのかないのかも含めて、いろいろな生き物で、水槽の中に二酸化炭素を入れて、実験的な研究をやったり、あるいは、世の中には賢い人がいるもので、現場で二酸化炭素が出ている所があるので、そういった所を見つけてきて調査したりするわけです。

これは日本の硫黄島という奄美大島の近くにある火山島なのですが、そこは火山性の炭酸ガス、ようするに二酸化炭素が、海底からこんな感じで吹き出しているところがあります。そこで生き物の分布を調べてみると、やはりサンゴはいなくて、こういったソフトコーラルと呼ばれる多肉質のブヨブヨした生き物がサンゴに取って代わっていたりします。やはり、海洋酸性化というのは、サンゴにとって非常によろしくない、こういった骨格を持つ生き物にとっては良くないとい

うことが、現場でも、実験結果からでも、だんだん示されつつあるわけです。これは、近未来を示しているような感じになると思います。



この海洋酸性化は、今まさに進行中の問題です。これは非常に有名な、ハワイのキーリング博士が測った、大気中の二酸化炭素の増加を示したものです。(図41)それで、ここのステーションで、海水中の二酸化炭素の濃度がどれぐらいあるかということ測ると、やはり上がっていました。それに対応して pH は下がってきています。これは言葉の問題ですけれども、これはまだアルカリ性で、酸性になっているわけではありません。海水が酸性の方に向かうということで、酸性化と言います。本当に酸性になったら大変なことになります。そこまでは行っていません。ですので、まさにこの海洋酸性化というのも現在進行形の現象なわけです。

ただ、今のところは幸いなことに、まだサンゴの骨格の形成を阻害するレベルには至っていないといいますが、現在の状況では、まだ影響が出るレベルではありません。こんなに濃度は高くないということです。ただ、近未来を考えると、このくらい濃度が高くなってしまいますので、まずいということです。水温はもう、現在進行形で影響が出ていますが、海洋酸性化はまだ出ていません。

会場 H : p(CO₂) (液体とそれに接する気体で含まれる二酸化炭素量が平衡状態になったときの気体の二酸化炭素分圧) は、温度が上がれば小さくなりますよね。

山野さん：はい、なります。

会場 H：その当たりの矛盾は、どういうふうに考えれば、つじつまが合うのですか。CO₂ は温度が上がれば、その分、溶け込まなくなりますよね。その分のバランスは、どうやってわかるのですか。

山野さん：そうですね。そこのバランスはどうやってわかるかといいますか、これはもう、直接 CO₂ の濃度を測っているわけです。それはもちろん、各地で違うわけです。

会場 H：温度が下がれば下がるほど、p(CO₂) は上がるわけですよね。

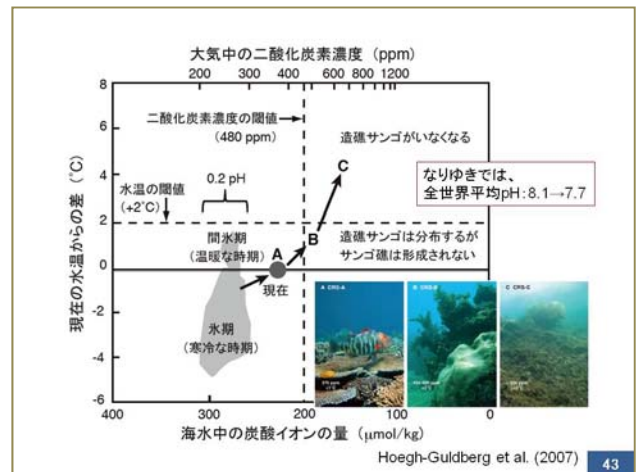
山野さん：そうです。溶け込みやすくなります。

会場 H：逆に言えば、温度が上がれば CO₂ は出ていってしまうのではないですか。

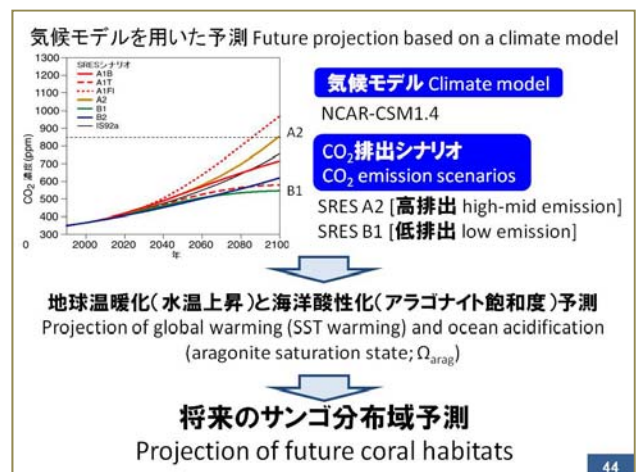
山野さん：出てはいかないですね。というのは、先ほどの、このような感じでイオン化されているので、ブクブクとは出ていきません。この中で、海水の中でバッファーみたいに溜まっているわけです。その溶け込みやすさが、まさに水温によって変わりますので、後でお示ししますけれども、寒い所ほど、この海洋酸性化の影響というのは大きくなります。これは、先ほどの硫黄島です。(図 4 2)こんな感じで、このブクブクしている所には、当然サンゴがありますが、その周りはソフトコーラルばかりになっています。



それで、これは全体的な予測です。(図 4 3)今の二酸化炭素濃度は、この辺りです。現在の水温をゼロにしています。ただし、このまま二酸化炭素

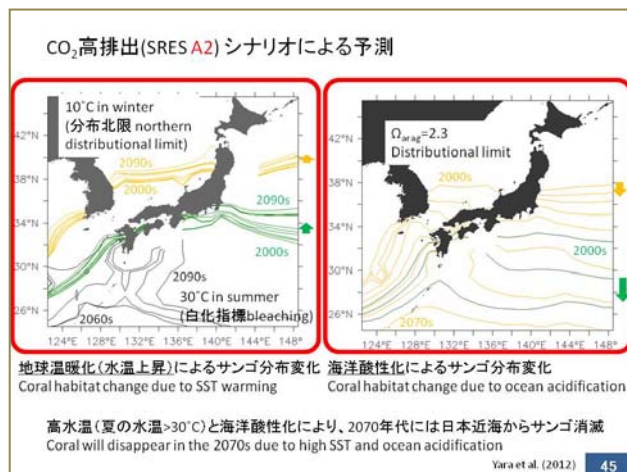


を出し続けると、これが、どんどんこちらに移動して、この景観がこうです。非常に模式的な図ですが、ここまで行くとサンゴはいなくなってしまう。pH に直すと、全世界平均で 8.1 から 7.7 ぐらいまで下がってしまいます。pH も水温などに依存しますから、全世界、場所によって変わりますが、全世界平均では、このぐらいになってしまうということが言えます。重要なのは、サンゴは過去数百万年ぐらいの間、こんなに高いレベルは経験していなかったということです。ですので、今までになかったような環境変化にさらされているということです。



それを、気候モデルの出力を用いて予測してみました。(図 4 4) 気候モデルには、いくつかシナリオがあるということは、皆さんご存じかと思いますが、これは、1 つ前のバージョンのシナリオなのですが、このまま二酸化炭素を出し続ける場合、これが少し古いシナリオで A2 のシナリオです。あとは、我々が努力して排出を抑えたシナリオ、これは B1 のシナリオです。これだけ暑さが違う

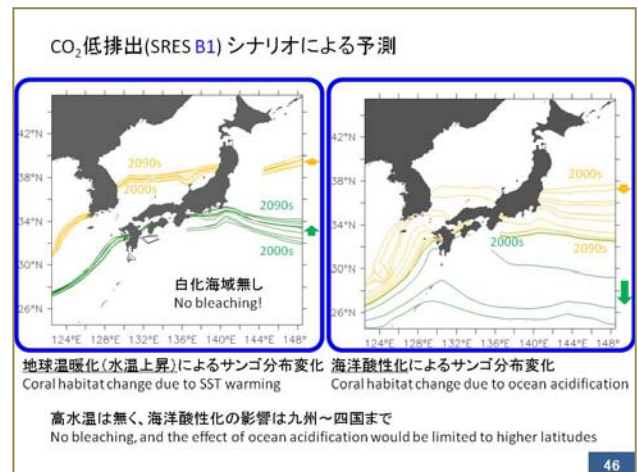
わけです。それによって、どれくらい変わるかということ予測しています。



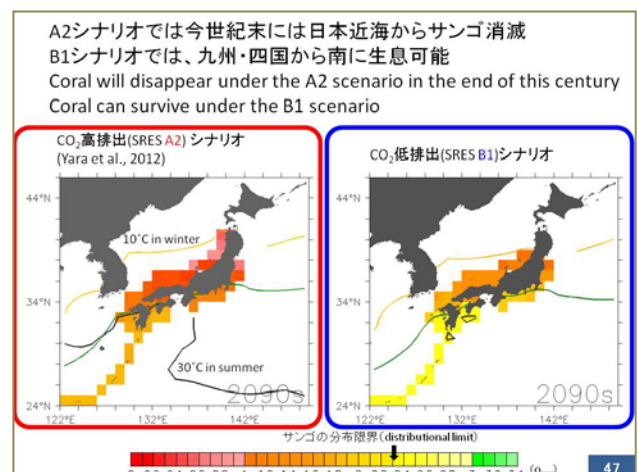
(図4.5) そうすると、二酸化炭素をこのまま出し続けた左側の場合、南の方では、30度を超え、白化する温度になります。30度を超える海域がどんどん広がっていきます。ただ、もちろん北の方では、サンゴが北上していきます。ただし、こちらは水温だけを見たもの、こちらは海洋酸性化の影響を考慮したものですけれども、海洋酸性化の影響を見てみますと、これはオメガアラゴナイトという今までご説明していなかったものを出していますが、これは、この海水の中に骨を作る材料がどのくらいあるかということを示した量です。それで、今、サンゴの限界のオメガアラゴナイトが2.3くらいになります。佐渡島もそうですし、先ほどの硫黄島も、計算し直してみると、オメガアラゴナイトは、だいたいこの辺りになります。これがサンゴが今いられるギリギリの限界ということです。

その限界が、先ほど温度の話が出ましたけれども、温度の低い方から二酸化炭素が溶け込んでいきますので、海洋酸性化の影響はこちらから広がっていきます。そのスピードを比べていただくと、水温が上がって北上するスピードに比べると、はるかに早いわけです。2070年で、これだけ行ってしまいます。こちらは、2000年から2070年でこれだけしか行きません。はるかに大きいスピードで海洋酸性化の影響が出てくるということです。これとこれを合わせてみますと、南では白化が起こるし、北の方では海洋酸性化の影響が出てきて、今のままのペースで二酸化炭素を出し続けると、日本周辺には残念ながらサンゴがいなくなってしまうという、非常に悲観的な結果になるのです。

ただし、これは今の分布の限界に基づいて指標を決めていますので、先ほど、適応しつつあるサンゴがいるのではないかという話をしましたが、私は、自分でこの結果を出しておきながら、本当にこうなるのかな、こうならなければいいという願望も込めて、思っています。

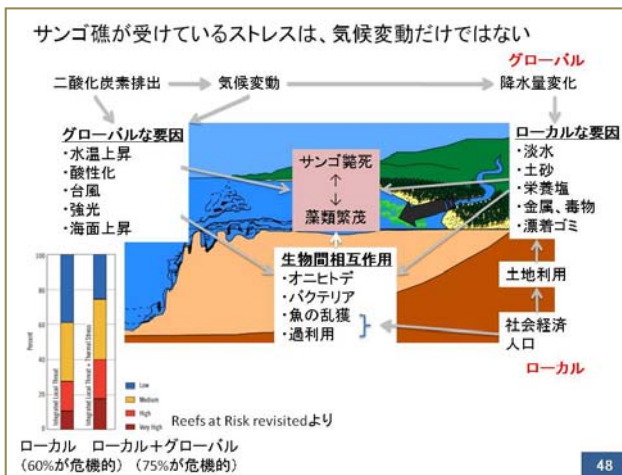


(図4.6) 重要なのは、こちらの低炭素シナリオの方です。二酸化炭素の排出を抑えた場合、そうすると地球温暖化も当然抑えられますので、水温が上がる海域もありません。しかも、だいたいこのシナリオは、2030年ぐらいから安定化しますので、それ以降、海洋酸性化は進まないわけです。ようするに、この辺りで下げ止まります。そうすると、これを合わせると、こちらの成り行きではだめなのですが、我々が頑張れば、この辺りではちゃんとサンゴが残るとい、やや希望のある結果になっています。(図4.7) もちろん、繰り返しになりますが、サンゴはきっと適応する力があると思いますので、これは本当に最悪のシナリオだと私は思っています。



ということで、海洋酸性化の影響は、今のサンゴの状態を考えると、非常に影響が大きいというのが、この結果からも示されています。今は影響が出ていなくても、将来的に非常に大変なことになるだろうということです。それで、我々は、当然、私だけでなく、いろいろな研究者が、まさに海洋酸性化の問題に取り組みつつあります。

6. ローカルストレス：土砂の流出



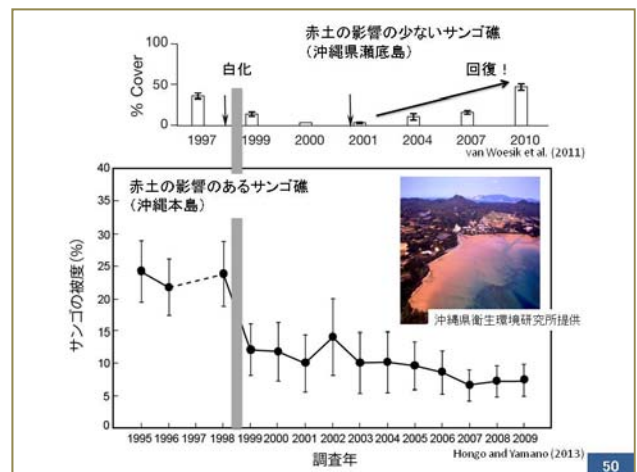
それで、今まではグローバルな話を中心してきましたけれども、これからは、こちらのローカルなストレスのお話もして、やや希望のある話に持っていきたいと思います。

サンゴが今実際に受けているストレスは、大変複合的なものです。気候変動だけではなくて、陸からの影響も受けていますし、もちろん人が利用する影響も複合的に受けています。これは全世界のサンゴ礁がどのくらいの危機にあるかということ、各国から情報を出してもらって調べたものですが、ローカルなもので60%、ローカルとグローバルを合わせると全世界の75%サンゴ礁が危機的であるということが言われています。ですから、全世界で見ると、やはり、まだローカルな影響の方が非常に大きいということです。(図48)

その1つの例が、沖縄の石垣島の例です。1945年に米軍が撮った空中写真です。これが現在、2010年に人工衛星が撮った画像です。これを見比べてもらって一目瞭然ですが、農地が非常に広がっています。(図49) そうすると、この農地から、今これはちょうどサトウキビの刈り取りが終わった後、裸地の状態ですが、そこに

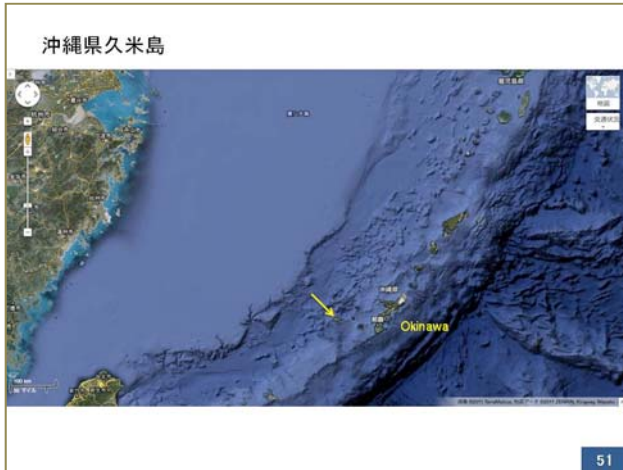


雨が降ると、この畑から土が流れてきて、海に流れてきます。それでサンゴが死んでしまいます。これは赤い色をしているので、赤土と言っています。赤土の流出問題というのは、実は沖縄では地球温暖化問題よりも古くから問題とされていて、特に1972年の復帰後に土地開発が盛んにおこなわれるようになって、この問題が非常に顕在化しているということです。



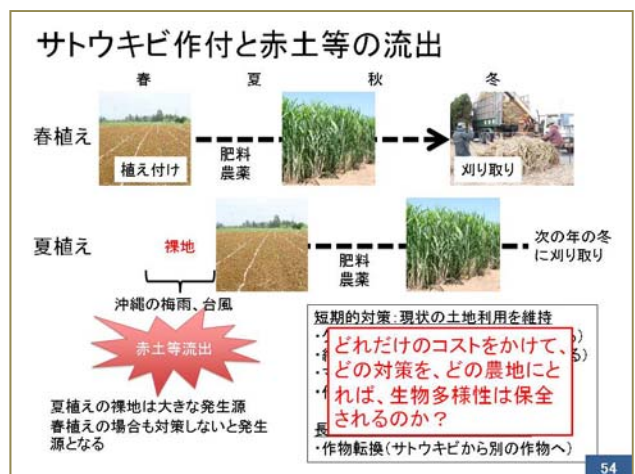
それで、先ほどいろいろな所のサンゴのデータを調べたと申しあげましたが、そのデータベースを使うと、こんなこともわかります。(図50)こちらが、赤土の影響がある河口域のサンゴです。そのサンゴは98年に水温が上がって、白化して、ガクッと減りました。その後、まったく回復してきていません。それに対して、こういった赤土の土砂の影響がない小さな島のサンゴは、一旦減るのですが、その後ちゃんと回復します。ですので、今受けているストレスのうち、これだけでも減らせれば、サンゴはちゃんと回復力を維持しているということです。この陸での対策が、非常に喫緊

に重要になってくるわけです。気候変動というのは、すぐには止められませんので、それに対しては、しばらくは適応も考えざるを得ないのですけれども、これに対しては、我々ががんばれば何とかなる話ですので、喫緊の対策としては、これを何とかするということが挙げられるわけです。



ということで、これは沖縄県の久米島というところですが、ここで研究をいろいろと始めました。(図5 1～図5 2)ここにはサトウキビの畑が広がっているのですが、こんな感じで裸地になって、ここに何も対策をしていないところでは、雨が降ると流れて、川に溜まって、海に流れていく、という感じです。これは通常のとときの川です。それが、台風の雨の後は、海の中まで流れ込んで、海まで真っ赤にしてしまいます。ここでサンゴは死にますし、川の生き物も死んでしまいます。いいことはまったくないと思います。

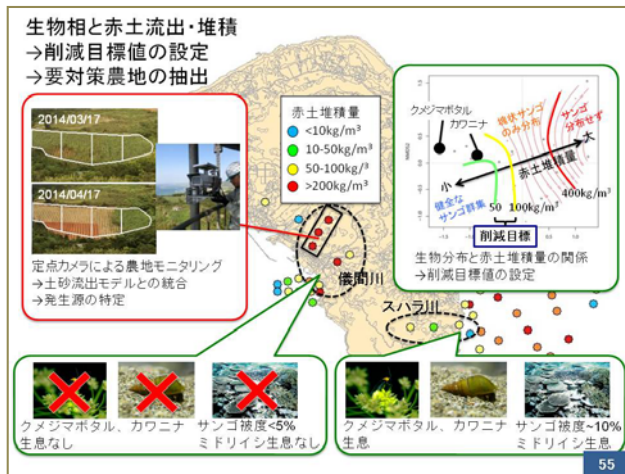
これがメカニズムです。(図5 3～図5 4)サトウキビの、これは植え方の問題で、ちゃんと対策すれば大丈夫なのですが、何も対策しない場合の話



です。サトウキビは、冬に刈り取ります。だいたい2月から3月に一番糖度が上がると言われていて、そのときに刈り取って砂糖にします。その後、植え付けをするのですが、春植えと夏植えがあって、そのすぐ後に植えるのが春植えです。しばらく置いて夏に植えるのが夏植えです。その場合は、一冬越して、次の年の冬に刈り取ります。そうすると、特に夏植えの場合は、この間ずっと裸地になっていますので、そのときに沖縄の梅雨が6月ぐらいに来たり、台風が来たりすると、ここからいっぱい流れてきます。春植えの場合も、やはり育っている間に流れていきます。これに対する対策はいろいろ考えられていまして、この周りに草を植えて、土手みたいにして止めるやり方ですとか、裸地をなくすためにヒマワリなどの緑肥を植えたり、あるいは葉殻を蒔いたり、もしくは、なるべく夏植えをやめて春植えにするなど、いろいろあります。ただ、今までの問題は、これは当然、すべてお金と手間がかかりますから、いったいどれくらいのコストをかけて、どの対策を

採ればいいのかということがわかりませんでした。

いかと思って、これを今、まさに進めているところ
です。こういった陸域での対策をちゃんとやる
ということが、1つこれからの喫緊の課題です。



(図55～図56) それで我々は、まず基礎的なところですが、生き物を調べて、どのくらい土砂を減らせば大丈夫かという削減目標を決めたわけです。統計的な解析をして、赤土の量をこれくらいに抑えれば、サンゴも大丈夫だし、川の生き物も大丈夫だ、というものを決めています。一方、この農地の状態がどうかということ、定点カメラで監視したり、あるいは土砂の流出モデルを使って、どこの農地から出ているかということ、を明らかにしたりしています。さらに、その上で、そこにコストをどれくらいかけて、どれくらい減らせるかという関係を出して、それで、ここまで対策すれば大丈夫だろう、というものをしています。それに基づいて、まだごく一部ではあるのですが、グリーンベルトという対策を打ったりということをはじめたところです。これはまだ、非常に限られた取り組みなのですが、このフレームワークを発展させて、沖縄の農地、さらにはサンゴ礁の保全につなげられるのではな

7. 再生技術

もう一つは、これは何人かの方からご質問をいただきましたけれども、サンゴの再生技術です。これが今どういう状況にあるのかを少しご説明します。結論から言いますと、今、サンゴの卵を採って、育てて、海に帰して、さらにそのサンゴが育って卵を産むという、完全養殖の状態まで持っていくことができています。沖縄県の阿嘉島にある阿嘉島臨海実験場というところが開発しました。卵を集めるところから結構大変なのですが、一通りのサイクルを回せるようになっていました。ただ、問題は、どこの海域に優先的に植え付けていくのか、ということです。特に昔からいなかった所、そもそもいられない所に植えても仕方がないですから、そういったところを検出したり、ちゃんとポテンシャルを持っているところに植えないといけません。これが課題です。ですので、技術的には確立されているのですが、どうやって実海域に持っていくかということが、今の課題となっています。(図57) これは、小さくて恐縮ですが、阿嘉島臨海実験場のパンフレットです。卵を集めて育てて、ここまで大きくなって、これもサンゴ礁にしたというのが示されています。



(図58) ということで、現在、このような美しいサンゴ礁、サンゴと褐虫藻が共生してサンゴ組織を作って、生き物を支えて、人間も支えているというのが、今、気候変動によって、温暖化、酸性化両方が劣化をもたらしています。さらに人

にくっつきます。その火山がプレートによって動いている間に――。

会場 I：十和田湖と一緒にですか。

山野さん：十和田湖ではありません。あれは火山口です。

会場 J：あれはカルデラでしょう。カルデラのへりなのか。

山野さん：カルデラのへりではなくて、山があって、海面がここにあると、最初はそこにくっつきます。ですから、最初は陸地があって、周りにくっつきます。それで、だんだん火山がプレートに乗って移動していくと、沈むわけです。そうすると、山は沈むのですが、サンゴは当然生きていますから、どんどん、その上に積み重なっています。そうすると、山だけ沈んで、へりだけ上がっていくような感じになって、最後に輪っかになります。それが環礁です。

会場 K：閉じていない、三日月になっているのは何なのですか。

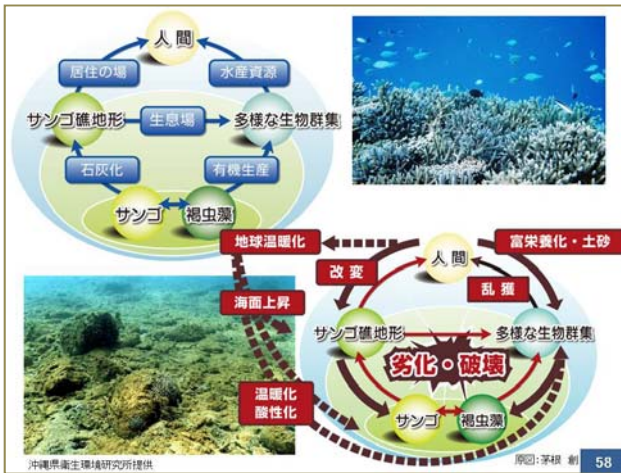
山野さん：三日月になっているものがありましたか。完全に閉じているのもあるのですが、閉じていないのは、たぶん、元の地形がそうだったのだと思います。最初の山の形がそうだったとか、あとは海水の流動がどこかで切れると、そこから海水がどんどん通るようになって、そこは切れっぱなしになります。

会場 K：潮の流れで、エサもいっぱい流れているのですよね。

山野さん：エサは流れます。

会場 K：そうすると、流れてくる海水側のエサのある側だけ成長して、反対側がないから、三日月になるのですか。

山野さん：ああ、そうですね。それは風下と風上を考えると、風上の方がやはり成長がいいです。



間が土砂を流出させたり、今回はお話しませんでした。埋め立てたり、そういうことでも、やはり変化が進んでいます。その様々なストレスを受けて、残念ながら、こういうひどい状況になっています。ですが、すぐには難しいですけれども、こういったストレスを一つ一つ取り除けるところから取り除いて、さらに、それだけだと回復が間に合わない所には、こういった技術を用いて、再生を上げてやるような策を施せば、きっと元のサンゴ礁に戻っていくのではないかという希望を、私は持っています。といったところで、こんな感じで調査を続けています。これでおしまい。ありがとうございました。(図59)



《質疑応答》

会場 I：サンゴは環礁になるのですか。

山野さん：はい。なります。でき方としては、図を持ってくれば良かったのですが、ハワイなど火山があるような所だと、火山ができて、その周り

ですから、こちらの方がたくさん発達して、こちらにはあまり発達しないような感じになります。まさに仰るとおりです。波当たりのいい方が発達します。

会場 L：炭酸ガスによる海洋の酸性化についてお伺いしたいのですが、炭酸ガスが海水に溶け込むと酸性化して、それでサンゴの骨格を形成している炭酸カルシウムが溶け出すというお話ですよね。サンゴが骨格を作るためには、海水中に含まれている炭酸イオンが必要なわけですよね。過剰にあった場合にまずいということなのでしょうか。

山野さん：いえ、過剰にあった方がいいのです。

会場 L：過剰にあった方がいいのですか？

山野さん：ああ、CO₂ですか。

会場 L：そうです。CO₂が過剰に溶け込めば。サンゴが骨格を作るためにはCO₂が必要なのですよね。それはもう十分、海の中にあるので必要ないということですか。

山野さん：そういうことです。海の中には巨大なバッファーがあって、そのイメージです。

会場 L：それで、現状では、今のところうまくバランスが取れているのだけれども、これ以上入ってきた場合に、8.いくつが 7.いくつまで下がる可能性がありますよということですね。

それで、これが本当なのかかわからないのですが、読売新聞の記事に、コケムシというものが炭酸ガスを十分吸収するから温暖化にいいのだという記事が出ていたのですが、同じ炭酸カルシウムでできている骨格なのに、コケムシは良くて、サンゴにはなぜ悪いのでしょうか。

山野さん：たぶん、そもそも、コケムシもサンゴも炭酸カルシウムの骨格ですので、コケムシにとっても良くないはずですよ。

それで、この化学平衡式を見ていただくと、炭酸カルシウムができると、このやじるしが逆にな

ります。こちらで使って、これも逆になります。そうすると、これも全部逆になって、実は二酸化炭素が出るのです。石灰化自身は、実は、炭素は固定するのですが、海水中にあるものを出してしまします。そういう意味で、放出なのです。それで、コケムシもまったく同様な化学プロセスで放出なはずですよ。

会場 L：ですよ（笑）。

山野さん：ひょっとしたら、その記事は知らなかったのですが、1 つあり得るのが、細かい話なのですが、サンゴとコケムシなどは、同じ炭酸カルシウムでも、結晶の結びつき方が違います。サンゴはアラゴナイトというもので、コケムシはカルサイトです。それで、カルサイトの方が酸性化すると溶けやすいらしいです。それで、そのカルサイトが溶けることによって、この酸性化を緩和するという事は考えられます。ただ、そういう記事ではないですよ（笑）。だから、それはちょっと不思議です。カルサイトが先に溶けて緩和するという報告はあります。

会場 M：サンゴの分布を決める要因について教えていただきたいのですが、今 2 つ気になっていることがあって、1 つが、同じ刺胞動物であるクラゲや、見た目が似ているイソギンチャクなどは結構北の方にいるのに、なぜ、そもそもサンゴは北の方に少ないのかということ。もう一つが、海水温の上昇に対して北上する速度が、ほかの動物より速いということを知っていたので、意外と水温適応というか、強い卵なのかということを知りたい。それがサンゴの分布を決めているのかということを知りたいのですが。

山野さん：実は、サンゴは北極海などにもいます。ただ、同じ仲間なのですが、一番の違いは褐虫藻を持っていないところですよ。ですから、その共生をするところが鍵で、そこは本当に推測でしかないのですが、共生するために暖かい所でないといけないのかもしれないかもしれません。まだそこはわかっていないのです。ただ、サンゴ自体は実はい

会場 M：では、共生する褐虫藻が、北の方にいないということですか。

山野さん：それも、実はいるのです。でも、北の方では共生関係は築かないのです。

会場 M：南の方だけ共生するのですね。

山野さん：そうなのです。もちろん、サンゴの種類も違うのですが、同じ刺胞動物ということで、目レベルで同じなのですけれども、その共生関係を築くのに、ひょっとしたら何かあるのかもというところ。ただ、そこはもう現象論でしかないで、わかりません。でも、共生が鍵なのではないかと私は推測しています。前半の部分は、そういうお答えでよろしいでしょうか。

後半の、サンゴが水温適応が高いかどうかなのですけれども、実際に今、北上してきているサンゴというのは、南にいるものが北上しているのです。ようするに、自分が居心地のいい場所に来ているだけです。ですから、そういう点では、適応が高いというか、全体として適応はしているのでしょうかけれども、自分自身というか、サンゴ自身が適応しているというわけでは、たぶん、ないと思います。その適応が表れるとすれば、今は高水温の方だと思っていて、高水温の観点からすると、実はこの、こういうところ、アラビア海などは、夏にすごく水温が高くなり、塩分も高いです。それでもサンゴはいます。同じ種類のサンゴがいます。それで、こちらでは白化するのに、こちらでは普段水温の高い所なのに白化しないので、たぶん、個体としてというか、適応もちゃんとあるのだと思います。そういう事実がいくつか出てきているので、先ほど予測で非常に悲観的なものを見せましたが、そこまで悲観的にならなくてもいいのではないかと思います。

会場 N：先ほどオメガアラゴナイトという指標が出てきましたが、オメガというのは、どのように算出するのですか。外洋の pH や温度や、線形関係の推定式みたいなものがあるのですか。

山野さん：あります。オメガは基本的に乖離定数で求められています。全体的にこのイオンがある

かということをお求めています。ですので、化学的に求められた量です。式があると明確なのですが、乖離定数に基づいて、どれぐらい見られるかというものを出したものです。

会場 N：では、海洋の温度はあまり関係していないのですか。オメガを出すのに、温度もパラメーターだと考えていいのですか。

山野さん：はい。温度も関係しています。

会場 O：お疲れ様です。スライドの一部の中に、ウニのスライドが挟まれていて、説明がなかったものがあるのですが。何が聞きたいかというところ、サンゴにとって天敵となる生物として、ウニやオニヒトデを認識しているのですけれども、今回の説明の中では、あまり、ほかの生物との共存という話では出てきませんでした。そのあたりは、実際のインパクトとしては大きいのでしょうか、小さいのでしょうか。

山野さん：オニヒトデの影響というのは、やはり大きいです。ただ、オニヒトデは大発生したり、しなかったりという、そのメカニズムもまだよくわかっていないのですが、来るときは来るし、いないときはいません。いけば、もちろん甚大な被害を起こしますが、いないときはいないので、本当に、気象で言うと、台風とか洪水とか、そういう感じです。それで、こちらのグローバルなベースラインとしては、そういういろいろなストレスのタイプがあるのですけれども、1つ、大発生したら、すごく影響があることはあります。あと、生き物との関係で言うと、魚の乱獲というものがありますが、これがどうしてサンゴに影響するかというと、魚を捕りすぎると、特に海藻を食べる魚を人が捕りすぎると、たくさん藻が茂ってしまって、サンゴと藻は場所の競争をしていますから、藻が増えるとサンゴが減るということが起こったりします。カリブ海で減ったのは、そのせいではないかと思われています。ただ、太平洋では、その兆候はあまりありません。ですので、たぶん地域的な何かがあるのだらうと思います。ただ、そのメカニズムまでは我々はまだつかめていないのですが、現象としてそういう地域性があ

るということと、オニヒトデも、発生する年と発生しない年で、当然ですが、全然被害が違うという証拠はつかんでいます。ですが、どこがどれぐらい影響していて、どういうメカニズムでその差が現れているかということは、まだちゃんとつかめていません。そういう状況です。

会場 P：ツバルは、全部サンゴ礁でできているのですか。

山野さん：そうです。

会場 P：そうすると、サンゴ礁というのは、死ぬと、上から過重がかかりすぎると、だんだん沈んでいくということはないのですか。乱開発したり、人間が住んで汚染したりしているうちに、その島自体が沈下していくということはないのでしょうか。

山野さん：それは、たぶんないですね。たとえば、那覇空港や奄美大島の空港はサンゴ礁の上に作られています。でも、それが沈下したという話はないですし、モルジブみたいに、モルジブはこの上にビルがいっぱい建っているのですけれども、沈下はしていません。ですから、サンゴ礁は、地盤としては結構強いのだと思います。そこは大丈夫ではないかと思います。セメントみたいなものです。

会場 P：では、要は人が住みすぎなのですね。

山野さん：ツバルの問題ですか。ここの問題は、人が住みすぎているというのと、ここが昔、湿地だったものを埋め立てて、今は何となくそれっぽくなっていますけれども、元々湿地だったので、そういうところから潮が高いときに水が湧いたりとかするのです。この間の水害の例をとってもそうですが、元々、水が染みやすい所にまで人が住んでいるというのが問題です。ですから、あたかも地球温暖化の影響が甚大化しているような報道がされるのですが、実は住み方の問題もすごく大きく関わってきています。水害と一緒に。豪雨頻度も増えているし、元々そういう氾濫原みたいな所に住んでいる人がやられているという、まっ

たく同じ構造です。

会場 Q：貴重なお話ありがとうございます。CO₂の高排出シナリオで、2070年代に日本近海からサンゴが消滅するというお話についてなのですが、サンゴが消滅するという予測というのは、具体的にどのようになされているのか、ちょっと気になったのでご説明いただけますか。

山野さん：これは、非常に乱暴な仮定なのですが、この値、たとえばオメガアラゴナイトの場合ですと、2.3以下になるといられない、2.3以上ないといられないという、これは現在の分布から推定した値です。水温に関しては10度以上だといられるというようにして、環境面から見て、いられそうな所を出しているということです。

会場 Q：それは、コンピューターシミュレーションか何かで出されているのですか。気候モデルと一緒にですね。

山野さん：そうです。気候モデルの出力、こういうNCARのモデルを使ったものです。

会場 Q：何か、室内実験で、サンゴを酸性化した環境に暴露させているとかいうことではないのですか。

山野さん：そのデータも使っています。そのデータは、こういう値を決めるときに使っています。それで、実際の、将来、酸性化がどうなるか、水温がどうなるかというのを、この気候モデルの出力を簡単に用いているということです。

会場 R：サンゴ礁は多孔質というお話だったと思うのですが、先ほどの沈むとか、違う話でも、普通の炭酸カルシウムの材料に使われるようなものも、稠密な感じがするのですが、あれは、地質にある間に一旦溶けて再結晶するとかいうことがあるのですか。

山野さん：あります。大理石とか結構緻密になっていますよね。あれは1回溶けたものが再結晶しています。それはもう、さらされている時間と、

あと、どういう環境にいたかで決まります。それで、ある環境では多孔質のまま残ったりしますので、そういうところに石油がもしあれば溜まったりします。

以上