

(山野博哉氏)

どうもよろしくお願いいたします。私の方からは世界と日本全国規模でのサンゴ礁生態系の過去から現在、そして今後ですね、どうなっていくのか、そして、それからいくつか見えてきた適応策に向けた取り組みに関して、ご紹介をさせていただきます。非常に基礎的な所になりますが、サンゴ礁はですね、熱帯、亜熱帯を、沖縄を含む沿岸を縁取る、非常に重要な生態系ですね。これだけの分布範囲を持っていて、非常に島嶼国を形成しているわけですが、今までのご紹介がありましたように、今サンゴ礁の生態系というのは非常に危機的な状況にあります。例えば、過去から、カリブ海の報告書をずっと集めて、サンゴの被度を計算した報告書によりますと、かつては、70年代は、海底の半分を、サンゴが覆っていたのですが、今はたった5%しかない。それに加えて、その原因の1つとしましては白化現象が起こる、あるいは陸地から土砂が流れ込むなどの色んなストレスを受けてこういったことが起こっているということが言われています。一方でですね、水温が上がりますと、特に日本の本州や四国といった今まで寒くてサンゴがあまり分布していなかったところにサンゴが北上するという、こういった非常にですね、ダイナミックにサンゴ礁の生態系が今変化を遂げているということが言えるかと思えます。これが全体のサンゴが受けているストレスを表したものですけど、二酸化炭素の排出に伴うグローバルな地球温暖化といった要因、それに加えて陸域からの負荷、その背景としましては社会経済状況があるわけですが、それが組み合わさって現在の状況が生まれている。そして、これは Reefs at Risk という報告書で試算したものですけれどもローカルなストレスで30%が危機的、そしてグローバルな白化も合わせると世界では40%が危機的な状況にある、ということが言われています。こうした状況を受けまして、国際サンゴ礁イニシアチブがですね、総会決議で地球規模サンゴ礁モニタリングネットワークのそれに基づいてGCRMNというものが世界に立ち上がりました。1998年から2008年まで定期的にレポートが出されてきたわけです。ちょっと古いですけど、2008年の状況を全世界でまとめますと、19%が既に失われてしまって、35%が危機的な状況にある。このように世界のサンゴ礁の状況がまとめられています。こうした背景を受けまして、日本で、愛知県で行われた生物多様性条約第10回締結国会議(CBD/COP10)と言っていますが、そこでの目標10で、サンゴ礁は、ある意味、非常に不名誉なことなんですけど、サンゴ礁は名指しで気候変動に対して脆弱な生態系だと、そしてそれを保全するために人為的圧力を最小化する必要があると、こういった条約レベルで現れるような形になってしまいました。それに対応して作られた日本の生物多様性国家戦略の中では、第4の危機としまして、地球温暖化、海洋酸性化などの地球環境の変化による危機というのが、こういった今まで開発などによる危機に加えて、この地球環境の変化というのは大きな問題であるということが認識されるようになってきました。しかしですね、これは2010年にたてられた目標で、2020年まで。特にサンゴ礁の場合、実は、2015年までの目標だったわけですけど、その中間評価というのが最近ありまして、その結果を非常に残念ながら、目標の10ですね、サンゴ礁にかかわる脆弱な生態系が保全されて

いるかと言いますと、その目標は全く達成されていないといったことが中間評価で示されてしまったわけです。こういった中間評価でも、こういった達成されていないという状況に加えて2016年、去年では、オーストラリアのグレートバリアリーフで、先ほども何度かご紹介されていますけれども、大規模な白化現象が起こります。これ航空機で撮った写真ですけれども、そこからでも見えるくらい、非常に大規模な白化現象が起こったわけです。そしてさらに今年もですね、これが去年、これが今年ですけれども、今現在もだんだん白化してなかったところが今年には白化しつつあるということです。この背景としましては、やはり水温が上がっているということが挙げられているわけです。最初の土屋先生の示されたグラフをもう一度私も示しますが、ここが90年でここが60年ですね。それで60年代にオニヒトデが大発生、というのがよく見られていた時は、サンゴの白化は全然なかったわけですが、その後だんだん増えてきてここが20件、その後年代軸はそろえてありますけれども、ここが2012年ですね。その後リーフベースっていう統一的なサンゴ礁のデータベースが立ち上がりました。そこで、報告されている件数はここ20件、ここは200件です。それで98年はこれだけの報告数があって、その後も毎年のようにサンゴの白化は報告されています。最近になっても、どんどん増えてきているという現状だということと言えるかと思えます。ちなみにグレートバリアリーフは98年、2000年と、データはですね実は最近更新されていないんですけど、2016年とあって、日本に関しましては98年、2001年と2007年に関してはあまり報告されていないんですけど、去年、大規模な白化現象が起こったといった状況です。この背景としまして、やはり一番大きいのはですね、水温の変化だと考えられています。これは、こちらまでがですね、実際の観測の水温、こちらからが予測ですけれども既に100年かけて7 くらい上がっていて、今後二酸化炭素の排出の割合によってですね、ひどい場合は100年後も4 くらい上がってしまうということが予測で示されています。そして、こういった水温とですね、サンゴの白化の状況を関連付ける指標としましてはDegree Heating Week っていうですね、平年値の一番高い水温、何年かの、この間の平均した一番高い水温からどれくらい上がったのかが何週間続いたのか、その掛け算をするわけですが、それを用いて、それが8ですね。例えば2度高いのが4週間、 $2 \times 4$ で8になるんですけど。その場合ですと、非常に深刻な白化が起きるという風な、こういった指標が作られている。その後、茅根さんが詳しくご紹介されますけど、それは結構良い白化の状況とよく合うんですね。そして将来予測と、これは現在に関してなんですが、将来に関しましては、実はあの気候変動予測モデルのですね、時間のステップが1か月刻みですから、これをDegree Heating Month と月単位に直したものです。それで、例えば1度高いのが2か月、先ほど言ったように2度が4週間というのは、2度が1か月ということですので、2を超えると大規模な白化が起こってしまう。こういうことを使ってですね、将来の予測が行われています。そうしますと、今のところ得られている1つの結果はですね、2 だとほぼ全域のサンゴ礁が白化してしまう。ただ、1.5 にしますと、当然といえば当然ですがけれども、白化の割合っていうのはかなり抑えられて、結論としましては、2 でもですね、ま

だ不十分で、水温上昇を 1.5 度以下に抑えることが必要と、こういった非常に厳しいですね、結果が出ているわけです。さらにですね、この地球環境の変化を水温上昇だけではなくて、もう 1 つの非常に重要な問題があります。それが海洋酸性化です。二酸化炭素が増えますと、それに伴って気温、水温が上昇する。それに加えて二酸化炭素自身が海水中に溶け込みますと、こういった化学平衡式が起こるわけですが、結果的にですね、サンゴの骨を作っている炭酸カルシウムが非常に作りにくくなるという状況が発生します。それで実際ですね、これはまだ現在進行中で、そんなにまだ影響は出ていないんですが、例えばですね、火山の近くで、海底から二酸化炭素がぶくぶく噴き出しているところが日本にあります。これは硫黄島というんですけど、そういったところはやはり噴き出しているところはサンゴは全然ないと、こういった結果が出ておまして、これが悲観的な見方をすると近未来のサンゴ礁の状況を表しているのではないかといった研究例もあります。実際、海洋酸性化は現在も進んでおまして、これは、大気中の二酸化炭素量ですね。ハワイで取られていたものです。そしてこれが、海水中の二酸化炭素、そしてそれに伴って PH が下がりつつある、ということが、実際に進行中の現象であるということが示されています。さらにこういったことが続くとですね、水温の上昇と、海洋酸性化によってサンゴがいなくなってしまうと。特に今まで数百万年間経験したことのないようなところにサンゴ礁の状態は行きつつあるんじゃないか、と言ったこれも非常に悲観的な予測が出されているわけです。これも水温の上昇と海洋酸性化の度合いですね、それとサンゴのことを関係付ける統計も出ていて、予測してみましたところ、やはりサンゴの分布域のほとんどが不適な環境になってしまうということが示されています。これが世界の状況です。では日本の状況をもう少し詳しく見ていきます。日本はですね、ちょっと基礎的な話になりますけど、実は、世界の中でも非常に海洋の生物の多様性が高い所です。その原因としましては、南から北まで長いので、南の生き物も北の生き物もいるということと、浅い所から深い所まで、多様な環境がありますので、その両方ですね、多様性が高いということが言われています。そしてその多様性を支える、特に南の方の多様性を支えるものがサンゴ礁なんですね。そして、先ほどの、日本は全世界的に見ると、サンゴ礁、サンゴ分布の北限域にあたるのですが、黒潮がこう、流れていますので、種数としてはですね、結構多くて 400 種類くらい、石垣島の周辺ではいるわけです。それでやはりこれは全域の、水温ですけれども、日本周辺でも水温は上がっておりまして、気象庁が実際、船で観測したデータを取りまとめたものですけど、大体 100 年間で 1 から 1.5 くらい、水温が上がっているということですね。それに伴って、水温自体が底上げされてですね、1998 年の場合はエルニーニョ現象と重なってるわけですが、水温自体が底上げされて、さらにそこにエルニーニョの影響が加わって非常に上がりました。そして日本を含む全世界的に白化現象が起こってしまう、ということです。2007 年にもですね、特に石西礁湖の周辺海域で大規模な白化現象が起こってしましまして、そこでも、サンゴが非常にたくさん死んでしまった、ということが報告されています。そしてこれが 2016 年です。これは先ほどモニタリング 1000 の報告でもありました、宮古島の八重干瀬で撮影され

た写真です。こんなふうですね、ミドリイシのサンゴ、枝状のミドリイシが真っ白になってしまった、ということが報告されています。そして、これは新聞に出たものなんですけど、非常にたくさんのサンゴが白化して、やはり死んでしまった、ということが示されています。一方で、水温が上がり続けると、北の方ではですね、サンゴにとってはいい環境になっていくんですね。これは、実は、撮った場所は長崎県です。長崎県の五島列島に、沖縄でよく見るですね、スギノキミドリイシという枝状のミドリイシですけども、それが最近になって現れるようになってきているということが、だんだん明らかになりつつあります。それがどうして明らかにしたかと言いますと、それは1930年代から日本ではサンゴの調査が何時期かに渡って全国規模の調査がされています。その記録を全部つなぎ合わせてみますと、これはちょっと見づらいので恐縮ですけど、こちらが古い方から新しい方です。こちらが南から北の、こちらが東シナ海、こちらが太平洋側の状況です。要するに、この黒い所が記録があったというところで、それが右肩上がりになっていると、だんだん北上しているということですね。先ほどのスギノキミドリイシは非常に速い速度で、年に直すと、14 km、という非常に速い速度で、北上しているということが分かります。それに加えて、いくつかの他のミドリイシでも北上が見られると。これは千葉県にエンタクミドリイシが最近現れるということが明らかになってきました。そして、さらにですね、サンゴ礁は、サンゴは生態系の基盤を成す、生き物ということはよく言われるわけですが、非常に小さな証拠ではありますが、こうやって北上してきたサンゴの中に、早速サンゴガニが、これサンゴにしか共生しない蟹ですけど、住んでいて、当然これも北限記録。だんだん日本の沿岸の生態系は、あるいは生物多様性が、変化しつつあるというのが、ちいさいですが、掴む、そういったことが明らかになったということです。非常にざっくりとまとめますと、水温上昇によって南の沖縄周辺では白化現象がだんだん頻発するようになり、それに対して北の方では南にいるような種類のサンゴがだんだん北上してきている。これが今の日本の状況かと思えます。ですので、楽観的なことを考えると、沖縄にとっては良くないことなんですけど、サンゴだけ見ればサンゴはだんだん北上するからですね、サンゴの種自体は大丈夫なのではないかといったことは時どき言われるわけですけど、実はそれを阻むものはですね、海洋酸性化なんです。先ほど少しご紹介しましたが、これは茅根先生の研究チームがおさめた硫黄島で二酸化炭素がぶくぶくと出ているところでは、サンゴがない、その周辺から少し離れたところではサンゴがいるという、こう言った、海洋酸性化の影響がですね、現れているというところを観察できるサイトがあるんですね。そういったサイトの情報ですね。硫黄島だけでなく、最近、伊豆諸島の式根島でもこう言った、ぶくぶく出ているところが見つかりました。そういった情報を世界にもいくつかサイトがありますので、そこでのですね、これはアラゴナイト飽和度というんですけど、サンゴの骨格を作る炭酸カルシウムがどれくらい水の中にあるかと言ったことを表す資料です。それを計算してみますと、だいたい2.3くらい。これ以下になるとサンゴが分布できないという閾値が設定できるわけです。それでこの閾値と、あとは、このサンゴが分布できる限界の水温ですね、その閾値の両方を用いて、

将来予測ができるというわけですね。これは、1つ古い気候変動のシナリオですけど、B1の方が低炭素社会、排出を抑えるシナリオで、A2の方がこのまま二酸化炭素を出し続けるシナリオです。この両方で、将来予測をやってみました。そうしますと、こちらが、このまま二酸化炭素を出し続けた場合です。そうしますと水温が上がりますので、南の方では白化が起こる。一方北の方では、こちらがサンゴの分布限界を示したんですけど、サンゴの北上が起こっていく、ということです。一方ですね、こちらが海洋酸性化の影響の方ですけども、先ほど申し上げましたように、2.3のラインが現在ここです。それがですね、だんだん北の方から、海洋酸性化の影響が下りてくるんですね。サンゴの北限がどんどん下がってくる。要するに、サンゴは北から酸性化、南からは白化の影響を受けて、その結果は2070年代に日本周辺か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が得られたわけです。一方ですね、二酸化炭素の排出を抑えますと、水温の上昇が抑えられます。こちらは、水温はある程度は上昇はするんですが、白化を起こす程ではないですし、多少の北上ですね。それで、海洋酸性化の方はですね、二酸化炭素の排出が途中から抑えられますので、その影響がこの辺りで下げ止まりです。ですので、二酸化炭素の排出を、これから示唆されるように、二酸化炭素の排出を削減するというのは、やはり非常にですね、重要な、根本的なことであるということです。この予測はですね、現在の分布に基づいていて、サンゴが全く適応できないところと言った、非常に厳しい仮定を置いているものでして、実際、もうちょっとサンゴの分布域は保全されるのかもしれないですけど、少なくともこの2つを比べてですね、二酸化炭素の排出を抑えるというのはやはり非常に、第一のですね、サンゴ礁の保全にとっても、非常に必要なことであるということがいえるかと思います。ただですね、二酸化炭素の排出はすぐに、変わるものでもありませんし、水温の上昇はすぐに止められるものではないですね。それで、これは、環境省では気候変動による適応計画というものを定めました。その中で、特に自然生態系に関しましては、いくつかのオプションが出されています。こういったことを考えてですね、今後の適応を考えていかないといけないということです。そして環境省とうちの研究所とで、適応情報プラットフォームを作って、そういった情報を今、集めて、適応に向けたアクションを開始しているところです。これはちょっと見づらいますが、文章をそのまま持ってきたもので、見づらくて恐縮ですが、その中でいくつかのオプションが考えられています。1つがモニタリングの充実、そして、気候変動に順応性の高い、健全な生態系の保全・再生、ということが示されています。これをサンゴで当てはめてみますと、やはりですね、データベースやモニタリングというのは基礎になる情報ですので、ここはしっかりと進める必要がある。そして、そういったデータをですね、広域で集めると、気候変動の影響が少ない場所が特定できたり、あるいは、将来的にどこのサンゴ礁が残って、そこで生態系のネットワークが形成されるのか、こういったことの検討を進めていく必要があるということです。先ほどのC B D / C O P 10の目標10にも書かれておりましたが、気候変動のストレスも軽減して、とくに、沖縄の場合ですと、赤土の流入という問題がありますので、それを低減していく必要があるというわけですね。さらに、積

極的な干渉としましては、サンゴの移植を行ったりするオプションも考えても良いのではないかと考えています。そしてさらにこれは全体的に、まさにこの会議の目的だと思いますけれども、サンゴ礁保全行動計画と、気候変動対策の両輪で推進していく体制が必要になる、ということです。いくつか、それに関しまして、私や、関係の方が進めていることを紹介いたします。モニタリングに関しましては、先ほどご紹介にありましたモニタリングサイト 1000 事業があったりですね、沖縄県でもサンゴがらほ、と情報プラットフォームを作ったりですね、あとは、ボランティアベースのリーフチェックプログラムがあったりします。あとは紙での場合もあるんですが、1970 年代くらいから各種の調査報告書があり、あと、分布図も環境省が作られています。ただ一つの問題がですね、これがなかなか統一的なデータベースになっていない、ということで、1つは統一的なデータベース、せっかく調査したものですから、それを集めてですね、1つのデータベースとして、全国的な規模で分析を進めていく必要があるかなと、思っています。それで今、こういったデータベースを作っているところですけども、日本のサンゴの色が、結構ダイナミックに、かなりダイナミックに変わってきているといたことがやはり見えつつあります。そして、先ほど、最初の方で 2008 年の状況だけお示ししましたけれど、それは理由があって、2008 年以降、実は G C R M N の活動が最近停滞気味なわけです。こういったことも再構築して、全世界で情報を共有していく必要があるのかなと、思っております。広域でデータを集めるという点ですけど、広域でデータを集める時には先ほどのモニタリングに加えまして、市民の方々とですね、情報をいただくというやり方が非常に効果的なんです。それで 2008 年から市民参加型の調査というのをやっておりまして、それで今年に関しても、白化情報をたくさんいただくことができました。この地点ですね。それと水温を合わせますといくつかですね、慶良間もそうなんですけど、水温があまり上がってないところ、白化していないところっていうのが見えてくるんですね。石西礁湖は先ほどのご紹介もありましたように、たくさん白化してしまったんですけど、慶良間はやや水温が低くてですね、それが多分原因の 1 つだと思うんですけど、ほとんど白化していないわけですね。実は 2013 年にも同様の現象が起こってまして、この青い所は白化してない、赤はたくさん白化したところですけども、2013 年も慶良間はあまり白化していない。こういった広域のデータを集めると、サンゴの避難地という、ここで保全、白化が起こりにくい場所といったことを検出できるようになるわけです。さらにこういったデータを使うと、サンゴ礁間のネットワークを解析することができます。なぜそれが重要かといいますと、サンゴは卵を産んで、特にミドリイシは卵を産んで、それが流れて、ほかのサンゴ礁に行って、定着するわけです。ですから、サンゴ礁間のつながりというのを考えるのは非常に重要なんです。それで今まで慶良間、先ほど慶良間を保全といいましたが、慶良間から幼生がこういう風に漂ってですね、沖縄本島への供給源になっているという結果がありました。ただ、最近の遺伝子を用いた研究によりますと、むしろ慶良間の方に、慶良間がソースじゃなくてシンクになっているという結果も出てまして、これはですね、今後さらに現状を詳細化して進める必要があるんじゃないかと考えています。ただ、海

流を解析しますと、実はこれは将来予測の結果と合わせますと、具体的にどこが重要な海域なのかという事を明らかにすることができます。これはこの海域から、コンピュータの中でですけど、卵を流して、それがどこに到着するかというのを解析したものです。それでその将来予測に関しましては、海流が変化する部分と、水温が変化してサンゴが変化する、その両方を考慮して予測ができるんですね。これが現在の状況ですけど、例えば台湾からの卵が九州まで届いたり、そういったことがいえるわけです。この線上にあるのが自分の生んだところで定着しているということで、これが広がっていれば広がっているほど、遠くまで到達しているということです。これで、先ほどの二酸化炭素を出すシナリオでやってみますと、非常にですね、両方、親群体も白化で死んでしまうし、さらに、サンゴの卵がですね、水温が上がると代謝が増えて寿命が短くなってしまいます。その両方の効果を考えるとですね、結局沖縄本島や、最後まで重要な海域として残るのは、沖縄、石垣、台湾、こういったところが重要になるという、こういった予測も可能になってくるということです。最後、少し、簡単にご紹介しますけど、あとはもう1つのオプションは赤土等の流出や汚染の低減ですね。先ほど申し上げましたように、サンゴ礁はこういった陸からの負荷の影響もたくさん受けています。そしてこれは単純な比較ではあるんですけども、瀬底島の場合ですと、1回、98年に白化し、減ったサンゴが回復しているのに対して、沖縄本島周辺の、特に川の近くのサンゴ礁では、減ったまま全然回復してこない。やはりそのサンゴの回復力自体にですね、この陸からの影響というのはあるのではないかと、考えられるわけです。それで今必要なこと、今、久米島で我々が進めていることは、いろんな環境のですね、川や海の生き物を調べて、それを統計解析行いますと、どれくらい赤土を減らさないといけないのか、ということが出てきます。さらにその発生源は主に農地なわけですけど、そのモニタリングを続けて、さらに土砂流出モデルを使うとですね、こういったところから赤土がたくさん出ているということがいえるわけです。ここに重点的に対策を行っているわけですけど、それが実際に可能かどうかというのは農家の方々にですね、理想的にはこうだけど、実際無理だよとかそういった社会的な状況も考慮しなきゃいけないんですね。あとは対策には、それぞれ費用が掛かりますので、その費用対効果がですね、最適かという必要があるわけです。そうしますと、こちら赤土の削減量ですね、それに対する、いくら投入すればこの畑に対策できて、減らせるのかという関係が出るんですね。それで先ほど、半分に減らす流出と、300万くらいで先ほど示した流失だと、最適化すればですね、分かるといったことが言えるんです。要するにですね、このサンゴの赤土流失問題というのは古くからある問題で、生き物の面だけを見てもですね、やはりなかなか解決しない。それはどこから流出しているか、さらに、そこにどういった対策を、いくらかけて、地元の方々の協力を得ながら進めていかなきゃいけない、とこういったいろんなアプローチをですね、統合して進めていかなければいけない。これは恐らく、サンゴ礁保全行動計画の1つの地域づくりともつながっていくことかと思えます。そして、最後ここの主流化のところですけど、サンゴ礁保全行動計画、こういった2016年から2020年といういくつかのオプションのアイテムが出されている。それと、こ

ういった気候変動の適応をですね、うまく組み合わせて、さらに発生源の気候変動対策ですね、それらを総合的に推進していく必要があるのではないかと考えます。そういったことを今日議論できれば、私も議論に参加して進めさせていただければと思っております。以上です。ありがとうございました。