



NIES RESEARCH BOOKLET

環境儀

NO. 62 SEPTEMBER 2016

国立環境研究所の研究情報誌

地球環境 100年 モニタリング

波照間と落石岬での
大気質監視



MONITORING
STATION
HATERUMA



国立研究開発法人
国立環境研究所
<http://www.nies.go.jp/>

グローバルに 大気の質を 監視する
南に北に 置き！ステーション

波照間島



落石岬

百年で 低減すべき 温暖化
 ガスの濃度を 今日も調べる

大気中の二酸化炭素の濃度は、産業革命以前は約280ppm程度でしたが、ここ300年の間に化石燃料の使用や森林の破壊などによっ



て、ついに年平均で400ppmに達しました。二酸化炭素だけでなく、メタンや亜酸化窒素、フロン類、オゾンなどの温室効果ガスの濃度も上昇しています。1997年の京都議定書や2015年のパリ協定などに基づいて、



温室効果ガスの削減計画が進んでいるものの、今世紀末には温室効果ガスの排出量をほぼゼロにしなければ、地球の平均温度は産業革命以前より2℃以上も高くなると言われています。

このような地球の温暖化を監視するため、大気中の温室効果ガス濃度を世界各地で観測する必要があります。地球環境研究センターでは、1995年から日本の南端（沖縄県波照間島）や北東端（北海道落石岬）で長期観測をしています。

本号では、沖縄県波照間島ならびに北海道落石岬で行われている温室効果ガスの長期モニタリングについて、最新の研究成果を交えながら紹介します。



CONTENTS

地球環境 100 年モニタリング
 波照間と落石岬での大気質監視

- Interview 研究者に聞く
 100 年続けることをめざす…………… p4 ~ 9
- Summary
 温室効果ガスの長期的変動を
 モニタリングする事業…………… p10 ~ 12
- 研究をめぐって
 温室効果ガス観測の現状…………… p13
- 地球環境モニタリングステーションの
 あゆみ…………… p14 ~ 15

100年続けることをめざす

二酸化炭素などの温室効果ガスは、地球の熱の出入りに関係する働きをしています。近年は人間の活動によって、大量の温室効果ガスが大気中に放出され、地球の気温を上昇させています。このまま、温室効果ガスが増え続ければ、地球温暖化はどんどん進むと懸念されています。センター長の向井人史さんと主任研究員の笹川基樹さんは、地球環境研究センターのメンバーと共に、地球環境モニタリングステーションで大気中の温室効果ガスの濃度を観測し、その変動の要因を探っています。



向井 人史
(むかい ひとし)
地球環境研究センター
センター長



笹川 基樹
(ささかわ もとぎ)
地球環境研究センター
大気・海洋モニタリング推進室
主任研究員

地球環境モニタリングステーションの建設

Q：お二人のモニタリングステーションでの役割は？

向井：以前は全体を運営していましたが、現在は二酸化炭素の観測を中心に担当しています。

笹川：数年前から向井さんに代わり、全体の運営とデータ整理や解析の一部を担当しています。ただ研究の比重としては、シベリアでの温室効果ガス観測も大きいです。

Q：地球環境モニタリングステーションはいつできたのですか。

向井：1993年に沖縄県の波照間島に、1995年に北海道根室市の落石岬にモニタリングステーションが設置されました。世界的には、温室効果ガスの長期モニタリングは、ハワイにあるマウナロア観測所で、1958年に始まっていました。そのころは、地球温暖化への関心はまだ低かったのですが、1990年代になると関心が高まり、国立環境研究所にも地球環境研究センターが設立されました。これをきっかけに、日本でも温室効果ガスの観測施設を設置することになりました。

Q：どうして波照間島と落石岬に作ったのですか。

コラム① 濃度標準ガスの開発

二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの大気中濃度を決定する際には、精度が高い標準ガスが必要です。長期的な観測では、それぞれのガスに応じた精度の標準ガスを長期間保持しなければなりません。例えば、二酸化炭素では0.1ppm以下の精度が必要です。地球環境研究センターでは観測を始めた当初より、ガスメーカーの協力のもとで、独自に重量充填法（ガスの重さを測り、混ぜ合わせる方法）による標準ガスシリーズの開発に力を注ぎ、測定すべき濃度範囲に調整した一連の標準ガスを作製しました。この最初に作った標準ガスを1次標準ガスと呼び、この値を基準値として、通常の校正に使う2次標準ガスの濃度の値を決めています。現場で使う標準ガスは3次標準ガスといい、2次標準ガスを用いて濃度を決めます。1次標準ガスは消費してしまうと困るので、大切に長期保存しています。定期的に1次標準ガスの濃度をチェックし、国際的な機関同士での比較を行うことで、地球環境研究センターの標準ガスの値が国際的にずれていないかを確認しています。



■ 図2 二酸化炭素ガスの1次標準ガスシリーズ（左棚）と2次標準ガス（右棚）

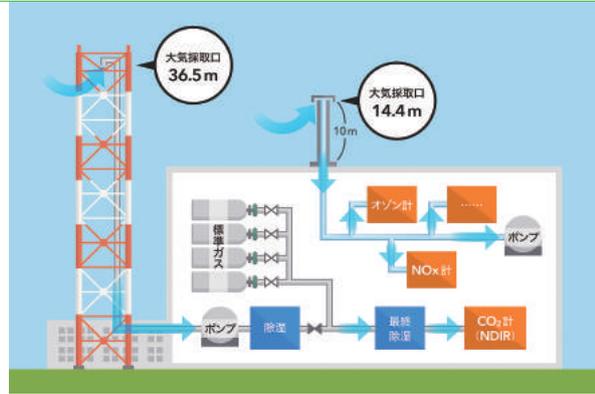
向井：大都市では、車や工場などの二酸化炭素発生源が影響し、地域の代表的な温室効果ガス濃度（バックグラウンド濃度）を測定できません。そこで、なるべく人為的な二酸化炭素の発生源から離れて測りたいのです。南の波照間島に設置したのは、1990年ごろ、日本の南にはまったく観測点がなかったからです。波照間ステーションはアジア大陸に近く、経済発展するアジア諸国の影響を観測できると考えていました。一方、北の落石岬は、高緯度帯にあるユーラシアの森林域の二酸化炭素の吸収を観測できると考えていました。日本が、南北に長い国であることを利用した配置です。最近では両者の真ん中の緯度にある富士山でも観測を始めています。

Q：北と南の端ですね。

笹川：電気がないと装置を動かせないのも、まったくの無人島ではなく、インフラのある環境だったことも、これらの場所が選ばれた理由です。ただ、どちらの場所に行くのも大変です。とくに波照間島行きは天候による欠航が多くて、途中の石垣島で足止めされることもよくあります。しかも、小さい船なので、波が高いと、波の上から下へ急降下するようなスリルを何度も味わうことになります。そんな時は、港に着くとすでにぐったりです。

向井：落石岬も波照間島と同じように遠いのですが、船に乗らないので予定通りに行くことができます。落石岬は、歴史のある南半球タスマニアのケーブルグリム観測所と赤道をはさんでちょうど対称の位置にあるんです。

Q：わざとそうなるようにしたのですか。



■ 図1 波照間ステーションにおける観測システムの概略図
長寿命ガス測定用のステンレスラインと大気汚染物質測定用のガスライン用の2つの採取口がある。

向井：詳細はよくわかりませんが、たぶん当時の担当者がそんなイメージで作ったのだと思います。訪れてみるとケーブルグリムも落石岬の観測所もよく似た自然環境であることに驚きます。

Q：ステーションでの観測はすぐに軌道に乗ったのですか。

向井：いいえ。二酸化炭素の測定はもっと簡単だと考えていましたが、実際は違いました。

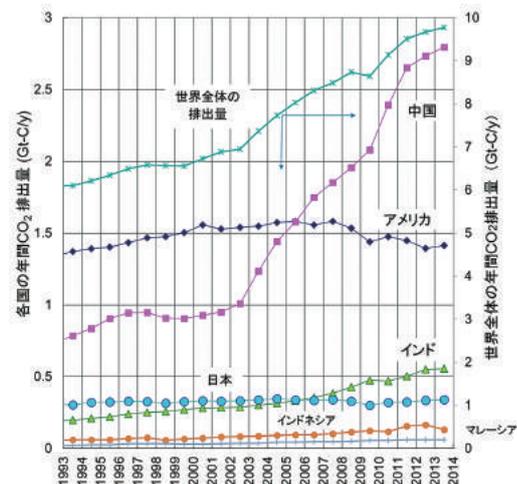
簡単ではなかった二酸化炭素の観測

Q：二酸化炭素はどうやって観測するのですか。

笹川：まず、モニタリングステーションの鉄塔上部に取り付けた採取口から上空の大気をポンプで引き込みます(図1)。二酸化炭素が赤外線を吸収する性質を利用したNDIRという装置で濃度を測定します。あらかじめ濃度がわかっている標準ガスを測定して、得られた出力値を基準に大気中の二酸化炭素の濃度を決めま

コラム⑩ 温室効果ガスの各国の発生量推移

温室効果ガス、特に化石燃料やセメント生産起源の各国からの二酸化炭素の排出量の推定はいろいろな方法で行われています。その精度にまだ改良の余地はあると考えられているものの、例えば、CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) というデータベースを基準にして、図のようにそれぞれの国レベルでの発生量の変化が示されています。世界全体でも二酸化炭素の排出量は2003年以降増加率が高いことが知られており、観測当初(1993年)に比べ2013年は60%も増加しています。アジア諸国の中では、中国やマレーシア、インドやインドネシアが急速に排出量を伸ばしています。



■ 図3 各国ならびに世界全体の人為起源二酸化炭素排出量の推移

す。モニタリングステーションはつくばから遠く、人は常駐していないので、自動で連続的に分析できるようにしています。

向井：このシステムができるまでは、試行錯誤の連続でした。観測を始めた当初は、すでにアメリカで観測が始まっていましたが、市販の観測システムは無く、自分たちで独自の技術をつくろうとしました。測定値の基準となる標準ガスの取り扱い方や濃度を決めることにも新たな技術の開発が必要でした(コラム1)。

笹川：大気中には、二酸化炭素以外にも赤外線を吸収する物質がたくさんあり、測定値に影響します。その中でも特に水の影響が大きいので、大気中の水分を除く装置を測定器の前に取り付けています。

Q：どうやって水分を除くのですか。

向井：試料の大気をマイナス45度に冷やしたガラス容器に通すと、その中で水分が凍り付くので、取り除けます。湿度がとても高い波照間島では、大気中の水蒸気の量が多くどんどん氷がたまって流路がつまるので、冷却容器を2つ置いて、半月ごとに自動で切り替えるようにしています。

笹川：観測装置には、たくさんの配管がつながっています。その配管のつなぎ目から空気もれていることや、そのせいで知らないうちに外気ではなく、室内の空気を測定していることもあります。このような空気の漏れに気づいて場所を探し当て、修理するのは、配管や装置がどんどん複雑になっているので大変です。

Q：測定はいろいろな影響を受けるのですね。

笹川：はい。温度や気圧などの影響を受けて、センサーの感度が変わります。そこでときどき標準ガスを流し



■ 図4 波照間島の海岸

ながら、連続的に測定しています。データの変化は機械の不具合による場合もあるので、慎重に検討する必要があります。

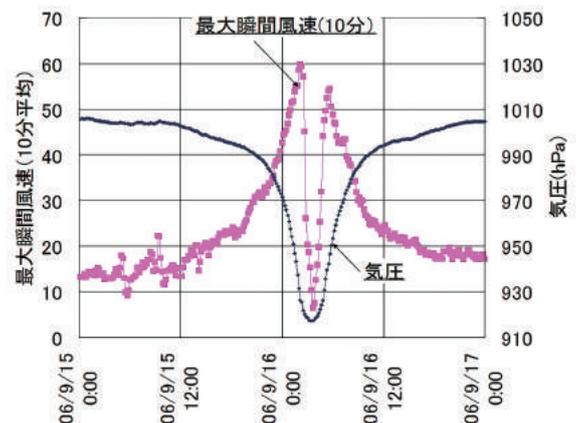
向井：装置の材料も影響します。銅の配管は、長年使っていると、錆びて測定に悪影響を及ぼすことが最近わかりました。ステンレス製の配管でも、ステンレスには炭素が含まれているので、ゆっくりと二酸化炭素が出ているかもれません。観測は長期にわたるので、こちらも検討しなければなりませんね。

Q：かなり繊細な分析なのですか。

向井：ええ、0.1ppmくらいの精度で測定しています。大気中の濃度が約400ppmなので全体濃度のわずかに0.025%の違いを測定していることになります。また、地表付近に二酸化炭素がたまるので、なるべく高いところで大気を採取するようにしています。落石岬では、51メートルの高さで大気を採取しています。それでも、地面に二酸化炭素がたまりやすい夜間にな

コラム③ 波照間島と台風

沖縄県付近の台風は発生すると、勢力が衰えないうちに波照間島に到達します。そのため、台風時の風速は70m/秒程度を想定する必要があります。ステーションばかりでなく、電気供給にも配慮しなければなりません。例えば、2006年の台風は、波照間島の真上をゆっくり通過したケースで、その時の気圧と風速のデータを見てみると、風速は最大60m/秒に達していることがわかりました。気圧は、台風の目の中に入った時点で915hPaまで下降し(まるで筑波山の山頂にいるぐらいの気圧)風速も5m毎秒まで落ちて、穏やかな夜空が2~3時間広がった後、再び50m/秒という強い風が吹いたことがわかります。このような強い台風は、関東地方ではなかなかお目にかかれないものです。この時、海岸線を走る電柱が多数倒れて、電気が復旧するまでに1週間ほどかかりました。自家発電機が稼働しましたが、自家発電機だけでは1週間を乗り切ることはできませんでした。



■ 図5 平成18年(2006年)9月16日 台風13号が波照間島を通り過ぎた時の風速と気圧の変化



■ 図6 波照間ステーションでの見学会で、島の子供たちに標準ガスについて説明する藤沼管理官（当時）

ると測定値に少し影響が出ます（コラム7）。

Q：二酸化炭素以外には何を測定していますか。

向井：メタンやフロン、オゾンなどの温室効果ガスや窒素酸化物などの大気汚染物質も測定しています。大気汚染物質を測定するためには、ガラスの流路をチタンで覆ったタワーも建てました（図1、コラム4）。

台風と雷に、絶えない苦勞

Q：観測ステーションにはどれくらいの頻度で行きますか。

笹川：装置や設備のメンテナンスのため、毎月4～5日ほど行く必要があります。フィルターの交換や配管に漏れがないかを確認します。研究所で測定するための大気サンプルを持ち帰るのも重要な仕事です。これらのルーチンワークは専門の業者の協力で行っていますが、装置の更新や大きなトラブルが発生した時には

研究者が駆けつける体制をとっています。

向井：年に1～2回は配管のそうじをし、ポンプや標準ガスを交換します。それ以外の急な対応も必要です。例えば、両ステーションでは、台風や雪で電線が切れることがあるので、停電対策も欠かせません。今では、ステーションが停電すると研究所にメールが来るようにしてあります。

笹川：波照間ステーションは、自家発電の装置があるので、停電しても2～3日は大丈夫です。

向井：台風で高潮の被害にあったこともありました。2006年に電柱や防風林が倒れるほどのひどい台風がきたときは、島を始めステーションも数日間停電しました。その時は、担当者らが出向き、何日もかかってなんとか復旧できました（コラム3）。

Q：沖縄は台風が多いですからね。

向井：ステーションには、ウェブカメラをつけてあり、台風の予報があれば、つくばからずっと様子を見ています。停電しても、電話線が切れなければ状態を確認できるし、データも転送できるので、現場に行くかどうかは、様子を見ながら決めます。

笹川：台風がきはじめる6月ごろから、みんなひやひやしています。また、ステーションは海岸にあるので、塩害もひどいです。鉄塔や施設のドアなどは錆びるし、装置も被害を受けます。特に鉄塔は、防錆塗料を毎年塗りなおすなど船と同じようなメンテナンスが必要です（コラム4）。

向井：しかし、北の落石岬でも大変なことは多いんです（コラム5）。

コラム④ 錆びても錆びなくても困ること

波照間ステーションが海岸際に建っているがゆえに、潮風の影響でタワーなど鉄製のものは「錆」との戦いです。毎年、計画的にタワーを塗り替え、変えられるパーツはステンレスに交換しています。これは、毎年大変な作業です。2005年に新たに建てた10mの大気汚染物質観測用タワーは、これまでの錆問題を一挙に解決するために、外側をチタンで被覆しました。チタンは錆びないし、強度もあり軽いのでタワーにはもってこいの素材だと判断したためです。実際に運用すると、まったく錆びずに、メンテナンスが不要でした。これで万歳ということなのですが、一つだけ錆びないがゆえに困ったことがあります。それは、ネジがまったく錆びないので、閉めたはずのネジがいつまでも軽く回ってしまうことです。台風による振動でチタン製ネジが緩んでくるという現象もみられ、錆びないことによる課題も学びました。



■ 図7 (a) 長寿命ガス測定用の鉄塔（左）と大気汚染物質測定用のガラスの流路をチタンで覆ったタワー（右）、(b) チタン製の採取口。鳥や虫の混入を防ぐためテフロンネットで覆っている。

Q：研究所にステーションの担当者は何人いますか。

笹川：装置ごとに担当者が分かれていて10名ほどでしょうか。4～5人のコアメンバーで施設全体の管理をしています。

Q：現地の人との関わりはありますか。

向井：現地の方々には、月に何回か装置の状態の確認や草刈りなどをしてもらっています。観測を続けるためには、現地の方々の協力は欠かせません。エコスクールという環境学習のプログラムにも参加し、地域にも貢献しています(コラム6)。

笹川：落石岬の小学校と波照間島の小学校をインターネットでつないで、交流会も実施しました。このような活動で、地球温暖化への理解を一層深めてもらいたいと思っています。

二酸化炭素の濃度は増加

Q：これまでの測定でどんなことがわかりましたか。

笹川：波照間島も落石岬も観測以来、二酸化炭素の濃度は増加し続け、20年で35ppm以上、全体濃度の1割以上も増加しました。落石岬では、北海道やシベリアの森林帯の影響を受け、季節変動が大きいことがわかりました。一方、波照間島では、中国などアジア大陸の影響が大きく、アジア諸国の経済活動の活発化に伴って、二酸化炭素の短期的な濃度変動が大きくなっています。20年以上も観測していると、このような変化が見えてきます。

向井：全体としては、両地点での大気中の二酸化炭



■ 図8 空気をガラスボトルに採取するための作業。4日ごとに13:00頃自動的に採取している。

素の濃度は有名なハワイの観測点と同じように増加し続けていて、昨年は、ハワイよりも早く年平均が400ppmを超えました。

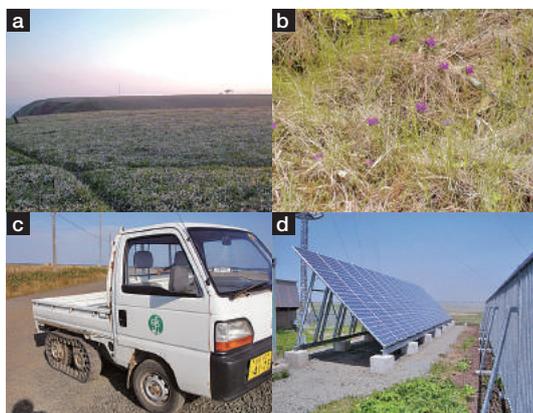
笹川：波照間ステーションのデータと他のバックグラウンドサイトのデータも利用して、アジア地域から放出される二酸化炭素の量を見積もることができます。各国では統計的に二酸化炭素の放出量を報告していますが、実際の観測から、別の科学的な方法として二酸化炭素の放出量を評価できます。

向井：地球は広いので、場所によって二酸化炭素の濃度は違います。地球全体の変化を見るためには、世界中のあらゆるところで観測することが求められています。また、私たちの観測データでは、アジア大陸近辺のほうが、太平洋中心域より二酸化炭素の濃度が増加しているように見えます。地域によって、濃度の変化率も異なります。

Q：二酸化炭素の量はかなり増えているのですか。

コラム6 落石岬ステーションの自然環境

落石岬は、海底だった場所が隆起してできたと考えられています。地面は粘土質で水はけが悪く、霧が多いため、多くの場合地面は湿っています。天然記念物のサカイツツジの保護区がすぐそばにあり、水芭蕉など冷帯の植物も育っています。周辺の自然環境を守るため、建設する際には十分配慮し、月に1度の点検時にも、環境負荷の小さな専用の特殊な車(クローラー)でしか入らないようにしています。そのため、ここには重油を使う自家発電装置を置いていません。冬は、大雪や吹雪による停電が起きますが、岬の突端で、人が住んでいないので、停電しているかどうか分からないケースも多く、機器の状態をリモートで確認することが困難な場合もあります。その後、蓄電池付きの太陽光パネルを導入し、停電時にネットワークや主要なPCなどの電源をカバーできるようになったため、施設の運用はかなり楽になってきました。また、冬季は地面が凍るせいで、地面に打ち込んである柵などの杭が持ち上がってくるので、周りの柵や野外に置いた酸性雨の測定器の土台などを時々修繕しています。



■ 図9 (a) 落石岬の平らな大地と、(b) 天然記念物のサカイツツジ、(c) クローラー、(d) 太陽光パネル(全体の10%程度の電気を供給している)



■ 図10 落石岬ステーションでのエコスクールの様子。町田室長が二酸化炭素による海洋の酸性化について実験を行っている。

向井：産業革命前の二酸化炭素の濃度は280ppmですから、明らかに増えています。でも、地球の歴史を振り返ると、原始地球の大気中の二酸化炭素の濃度はいまよりかなり高かったと考えられています。その頃に比べれば、二酸化炭素の濃度はずいぶん低くなっています。でも、過去に地球の凍結があったように、二酸化炭素の濃度が低すぎれば、気温が下がってしまいます。一方、濃度が高すぎると暑すぎます。いったいどのくらいの濃度が適当なのか、地球環境における二酸化炭素の役割を探るのも研究の目的です。

笹川：科学的基盤となるデータがないと、地球温暖化に対する対策も立てられませんし、対策の効果もわかりませんから、このまま測定を続けていくことが大切です。

向井：100年後、200年後になっても、必要な人が使える精度の高いデータとして残しておかないといけません。

観測を長く続けるには

Q：観測にはどんな人が向いていると思いますか。

笹川：注意深い人が向いています。長期間の観測ですから、気づかぬうちに徐々に装置の調子が悪くなることもありえます。装置の音がちょっと違うとか、普段との微妙な変化に気づけることが大切です。ステーションに関わるメンバーは個性的ですが、慎重で細かい人が多いですよ。

向井：この観測は相当な長期戦ですから、ひとりではできません。みんなでステーションを運営し、観測できる体制を整えることが重要です。

Q：測定の方法を改善していますか。

向井：長い研究ですから、先人たちの開発した方法を残しながら、改善しています。急に別の方法に変えてしまうと、以前のデータと整合しなくなるからです。

笹川：最近は二酸化炭素と同時にメタンと一酸化炭素も同時に測定できる装置を導入したのですが、従来の方法による分析と並行しながら、徐々に新しい方法に切り替えていく予定です。

向井：波照間ステーションの二酸化炭素の測定装置は、20年以上使っています。この装置は壊れず、ずっと使っているのですが、落石岬ステーションの装置は壊れて新しいものにしました。観測は長期的な視点が必要です。長く観測を続けても、精度が維持できるように方法を考えながら改善を重ねています。

笹川：人の引き継ぎもそうですね。

向井：観測が100年続くことをめざしています。私たちがいる間に、その土台を固めておきたいです。

コラム⑥ 環境学習の場としての活用

毎年、落石岬ステーションではエコスクールという行事を、根室振興局、根室市、教育委員会と共に行っています。近くにある小学校3校（統合により2015年からは2校）の内、毎年異なる小学校の5～6年生を対象に、温暖化の話をし、自転車発電の体験やステーション見学などを行っています。どの小学校も5～6年生合わせて10名程度と小規模ですが、子供たちはいつも活発で、積極的に授業に参加してくれるので、感心させられます。

波照間島にも小学校、中学校があるので、節目ごとにステーションの見学会、学校行事としての見学会などを、教育委員会、公民館、青年会議所などのご協力を得ながら行っています。2013年には波照間島の小学校と落石小学校の間で同時にエコスクールを行い、インターネットをつないで交流会を行いました。



■ 図11 落石ステーションでのエコスクールの様子

温室効果ガスの長期的変動を モニタリングする事業



地球環境としての大気組成が変化し、温室効果ガスの濃度が長年の人為的活動によって変化しています。このことは、重要な事実として科学的に記録し、その原因を突き止めなければなりません。地球環境研究センターでは、長期的に運用できる波照間、落石岬モニタリングステーションを建設し、そこでの20年以上に渡るデータからさまざまな解析を行っています。

地球環境モニタリングステーション(波照間、落石岬)―これまでの運営の歴史

波照間、落石岬での観測が20年以上も継続できたのは、決して個人の力によるわけではありません。何十人もの担当者が、それぞれの時代に必要な仕事を自らに課して、各人の努力でこなしながら長い年月の運営を引き継いで初めて継続できるもので、組織としての運営の成果と言えます。先人の良きアイデアを引き継ぎつつ、改良や合理化を重ねることで、ステーションは徐々に良くなり、観測精度が向上するとともに、観測項目の多様化・高度化などが実現できるようになってきました。

最初の地球環境研究センターのモニタリングステーションは、①人が常駐しないステーション、②科学的に高度な情報を得る戦略的モニタリングの二つをコンセプトとして設置されました。気象庁とは異なり、測候所や常駐するための人を持たない研究機関が高度な大気組成の観測を長期的に進めるためにとった手法は「観測の自動化」と、「遠隔(リモート)管理の手法」でした。同時に標準ガスの作製もモニタリング事業の大きな柱でした(コラム1)。

地球環境研究センターでは、特定の観測施設を持っていないことを逆に利用して、よりよいバックグラウ

ンド大気の観測場所を探すことから始めるとともに、観測用に必要で大気採取タワーの設置などを含め、ステーションづくりを一から組織的に行ってきました。施設の建設にあたっては、まず地元の方々との協力体制づくりを進めました。例えば、温室効果ガスのモニタリングの意義を理解していただきました。また、こちらでは建設や運営に伴う自然への負荷を最小にする方法を検討するとともに(コラム5)、観測値に影響を与えないように地元の方の協力をお願いしています。

観測は、二酸化炭素とメタンから始まりました。観測の装置や標準品の市販品がほとんどないため、自分たちで観測システムを開発し、改良を重ねました。亜酸化窒素は、放射性物質を用いた電子捕獲検出器(ECD)で観測するために、放射性物質使用の手続きなども新たに行いました。さらに、大気汚染物質である窒素酸化物、硫黄酸化物、オゾン、一酸化炭素などの観測が加わりました。また、PM2.5やPM10を測定するために、専用のガラス製10mの大気取り込みタワーを波照間に作りました。

今では、フロン類を測るためのGC-MSという精密な機器が自動で動き、また酸素濃度の測定や同位体測定用の自動ボトルサンプリング装置、ラドン観測装置もステーション内に完備しています。これらの装置を遠隔地から管理できるよう、機器の動きやその状態、関わるガスの流量、標準ガス圧力、部屋や機械の温度、外部の気象要因、停電などの情報や動画などのリモート監視体制が確立されています(14~15ページ参照)。

しかし、ここに至るまでには、多くの困難を乗り越える必要がありました。台風や塩害、雷の多い波照間ステーションでは施設の補強や修理など管理の仕方の課題がありました(コラム3)。落石岬ステーションでは、霧の多い北の大地ならではの地面の安定性の問題、雪や吹雪による停電対策や交通の遮断など多くの施設運営の課題がありました(コラム5)。また、以前はリモートでアクセスするために電話を用いていましたが、今ではインターネットの設備も完備しています。

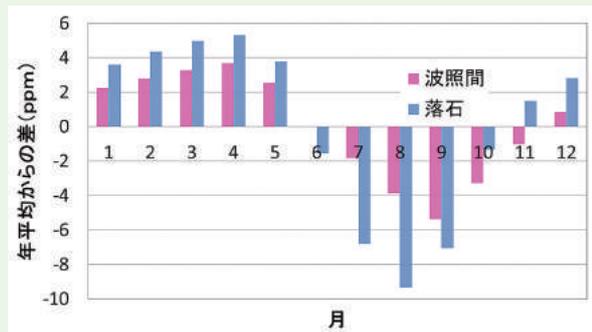


■ 図12 波照間ステーションの内部
右からボトルサンプラー、 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 各観測装置が並ぶ。

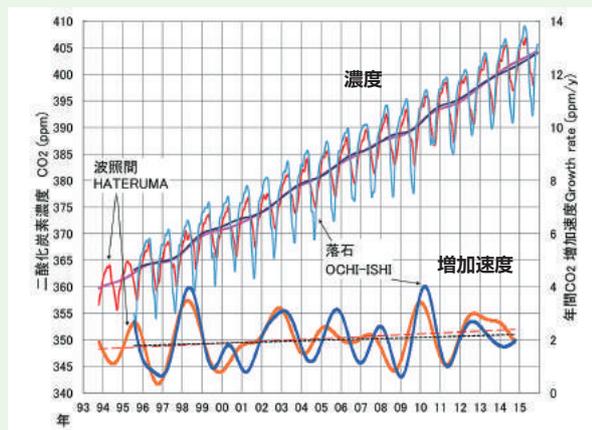
23年の観測から見えるもの—CO₂、酸素、ハロカーボン、大気汚染物質などの動きとグローバルな収支の話

二酸化炭素濃度は5秒ごとに観測されており、それらのデータを平均して「日平均値」を作ります。波照間、落石岬の二酸化炭素濃度の日変化は非常に小さいので(コラム7)、年間の濃度などにするときには、日平均値を用いて議論を行うことで十分な精度が出ます。

このような運用をたゆまず23年繰り返して行うことによって、二酸化炭素の地球上での動きが見えてきます。図に二酸化炭素の季節変化(図13)と長期変化(図14)を示しました。この図13から、夏に二酸化炭素の濃度が減少することがわかります。これは北半球の植生が、春から夏にさかんに光合成を行い、大気中の二酸化炭素を多く使うために大気中の濃度が減少することを示しています。また、北海道にある落石岬の方が二酸化炭素の濃度が大きく減少することもわかります。これは北海道やシベリアを含むこの緯度帯にある森林の面積が大きいことと関係しています。この緯度帯で7~8月に二酸化炭素が植生に吸収された大気の影響が徐々に南に伝播し、波照間では二酸化炭素の



■ 図13 波照間、落石岬ステーションの二酸化炭素濃度の月変動の平均のパターン



■ 図14 波照間、落石岬ステーションにおける二酸化炭素濃度変化(上)と濃度増加速度(下)の変動

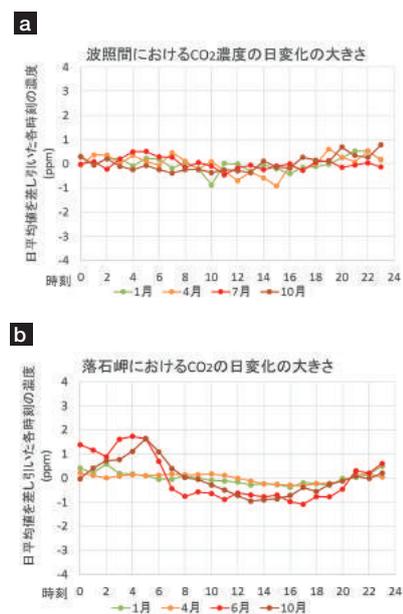
コラム① バックグラウンド大気の観測と二酸化炭素濃度の変動

1日の間に、二酸化炭素濃度は変化するものなのでしょうか?この非常に基本的な問いが、実は大問題なのです。私たちは、観測している大気が、地域の代表であってほしいわけですから、なるべくすぐ隣に車や工場など二酸化炭素の人為発生源がない場所を選びます。しかし、実は工場などがなくても植物の呼吸などに代表されるように自然起源発生源は地上にあります。

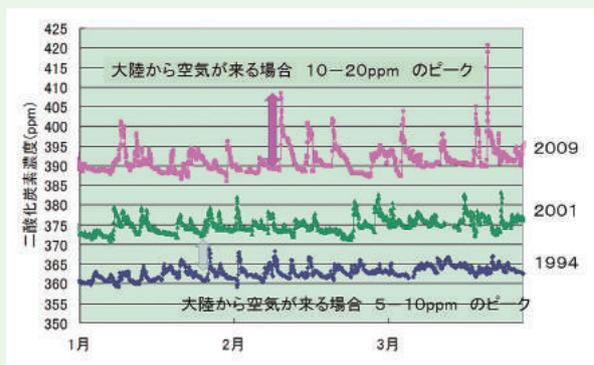
通常、観測点周辺の発生源の影響は濃度変動に現れますが、特に1日の変化に現れます。夜から朝に向けて地上付近が冷えることによって接地逆転層と呼ばれる空気の層ができ、地表から発生したものが上空に広がっていかずに地表付近の大気に蓄積する現象があります。こういった地表付近の発生源の影響を防ぐには、接地逆転層より高いところからよく混ざった代表的な濃度(バックグラウンド濃度)の大気を探るか、接地逆転層のあまりできない場所を選ぶか、二酸化炭素の発生・吸収量が少ない場所を選ぶかということになります。

波照間と落石岬での月ごとの1日の平均の二酸化炭素濃度変化を見てみると、図のようになります。波照間の場合は、どの月でも1日の変化が1ppm以内と非常に小さいことから、地面からの影響がかなり少ない理想的な場所と言えます。これはステーションが海岸に面していることに加えて、選んだ波照間島という島の大きさが直径5km程度と小さく周りが海であることが功を奏している結果だと思われます。台風や塩害の心配はありますが、場所としては非常に良いサイトです。

落石岬の場合は、岬の先端に位置しており、高さ51mのタワーから大気を採取しているので、良い場所であると考えられ、実際、冬季から春季の日変化は波照間と同等であることがわかります。しかし6~10月の夏~秋季の間は風速や接地境界層の高さなどが関係し、夜には陸の影響が少し出る場所のようです。その影響は少ない場合もありますが、厳密なバックグラウンド濃度として用いる場合は日中のデータを選ぶなど工夫する必要があります。



■ 図15 平成25年の月ごとの平均の二酸化炭素濃度日変動の様子 (a) 波照間ステーション (b) 落石岬ステーション



■ 図 16 各年の冬季 3 カ月分の波照間での二酸化炭素濃度変動比較

濃度の極小が8～9月に現れます。これは、各緯度帯の季節の特性とも関係があり、熱帯域にいくと季節変化はかなり小さくなります。長期的にはこの季節変化の大きさが二酸化炭素の吸収量や放出量に影響されることに注目して研究しています。

長期変化を見ると、両地点とも全体として二酸化炭素の濃度が上昇しており、世界的な傾向と合致しています。1年当たりの濃度の増加速度は、1～4ppm/年と毎年同じではありませんが、23年間で徐々に上昇しています。これは、人間による二酸化炭素の排出量が23年間で増加していることと整合しています(コラム2)。つまり二酸化炭素の排出量が増えれば、モニタリングされる大気中の濃度上昇として現れるということで、このような大気濃度変化は地球温暖化の監視のための重要な情報源です。単純に計算してみると、平均的な濃度の年間上昇速度は、人間が排出した毎年の二酸化炭素量に対して約60%程度の量を示すことがわかりました。よく言われている、40%が自然界(森林や海など)に吸収されたということはこのようなモニタリングからわかってきたことです。我々が二酸化炭素を排出すれば、ある部分は大気に残り濃度上昇を引き起こすだろうこと、逆に排出を少なくすると、それが抑えられるだろうことがわかります。

一方、大気中の二酸化炭素濃度の増加速度は23年間一定ではなく2～3年で変化することがわかりました。これは、我々が放出している二酸化炭素の量が毎年常に増加している(コラム2)ことと合致しません。このことは、自然界による吸収量が毎年変化することを示しています。特に陸域の森林などの吸収量の変化が、大気中二酸化炭素濃度上昇の変動を引き起こしています。エルニーニョが起こった年のように、地球全体の気温が高い場合は陸域の吸収量が抑えられて、二酸化炭素の増加速度が増えます。北海道と沖縄では増加速度変化が少し異なり、地域的な自然界の応答が異なることが見てとれます。今後、気候変動によって、自然界の吸収量の変化がどのように起こるかを明らか

にすることは重要な研究課題と言えます。

また、アジアという地域性で見ると、我が国が中国という現在世界一大きな二酸化炭素発生国の隣にあることの影響が、二酸化炭素のモニタリングに現れるだろうと予想されました。モニタリングの結果、これは特に濃度変動の大きさに現れていることがわかりました。わかりやすく比較するために、1994年冬季の二酸化炭素の濃度変化と2009年に取られたものを図16に示しました。冬季は時々中国大陸から濃度の高い大気が流れてきますが、2009年のデータの方が、明らかに高い濃度の大気が波照間に流れていることがわかります。1994年では、濃度が増加していますがその程度はかなり小さく、この間に中国での二酸化炭素の発生状況が一変しているであろうことが、モニタリングデータから読み取れます。コラム2にあるように中国では、2008年の北京オリンピックに向けた急激な経済発展により、2009年時点では90年代の2倍程度、現在では3倍程度まで二酸化炭素発生量が増加していると報告されています。

これらの二酸化炭素の由来にまつわる事情は、酸素濃度の精密測定や炭素の安定同位体比、放射性炭素濃度などを調べることによってさらに研究が進んでいます。また同様の地域的な発生量変化については、大気汚染物質やメタン濃度測定にも現れています。最近では、非常に高い濃度のPM2.5が観測されるようになってきました。また、フロンなど人為起源発生しかない物質のモニタリング結果に、中国での生産の様子が現れていることもわかってきました。

このような長期的な変化は、精度の高いモニタリングを継続することによってしか検出できません。人為起源のみならず、自然による長期的な変化は記録しておかないと失われていくものであることが、モニタリングをしているとよくわかります。また、地球全体の状況把握のためには、観測の精度の向上が重要です。なぜならば、地域ごとに測定の精度が異なると、データが比較できなくなるからです。そのためにも、ここで使っている標準ガスの管理の技術開発に関しては、世界の各機関との比較を含めてたくさんの活動を行ってきました。過去のデータと未来のデータとの比較が非常に重要なため、標準ガスの基礎技術を確立にすることでモニタリング事業が成り立っています(コラム1)。

今後も、このような地球大気のモニタリングは継続しなければなりません。地球温暖化は100年規模の問題なので、数十年後の担当者が現在の記録まで遡り、変化を見つけられるように、精度の高い正確なデータを残しておくことが、現在の担当の役目です。

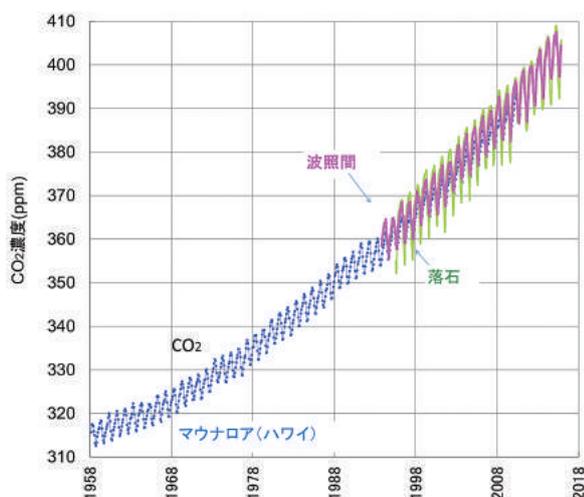
温室効果ガス観測の現状



1957～58年の国際地球観測年を契機として、ハワイや南極での二酸化炭素観測が始まりました。その後、各国に観測所が設置され、徐々に国際的なネットワークができています。近年では、船舶、航空機、衛星などによる観測も始まっています。

世界では

もっとも早く大気観測を開始したのは、有名なキーリング博士のハワイのマウナロア山と南極での観測です。ハワイのデータと波照間、落石岬のデータを比べてみると、増加度合いなどがよく一致しています。現在、地上には100近い観測所があり、世界の気象や環境関連機関、大学などによる観測が行われています。これらのデータなどの集積は、世界気象機関(WMO)の下で行われています。しかし、観測点の多くは北半球の先進諸国に集中しており、南米やアフリカ、ロシアやアジアでの観測ステーションが少ないことが問題になっています。



■ 図17 マウナロア（ハワイ）と波照間・落石での二酸化炭素濃度比較



■ 図18 研究所で行っている主な温室効果ガス観測の場所

日本では

日本では、気象庁がWMOの下で観測活動を行っています。岩手県綾里、与那国島、南鳥島での定点観測を行っており、また、海洋での観測も行っています。気象庁と当研究所は精度管理などで連携しながら研究を行っています。

国立環境研究所では

モニタリング事業として、シベリア上空での航空機観測や富士山での定点観測をしています。研究プロジェクトとして中国、マレーシア、インド、インドネシア、バングラデシュ、ハワイなどで定点観測も行っています。また、海洋船舶を用いて、オーストラリア、ニュージーランドへ太平洋を縦断する航路やアメリカとの間で太平洋を横断する航路に加えて、アジアへの航路における観測や、シベリアでのタワーネットワーク、旅客機を用いた観測なども行っています。これらの観測では、現場の大気を直接分析機器に導入するために、高い精度や高い時間分解能で測定できます。

近年では、衛星(GOSAT)による二酸化炭素濃度の観測が始まっています。現在のGOSATは、上空から赤外線を利用し3日ごとに昼間のみ同一の場所で観測します。そのために、広い範囲の平均的な二酸化炭素の濃度分布はわかりますが、時間変化や高い精度での観測はできません。一方、ステーションによる観測では、広い範囲のデータをまだ取得できません。そこで、両者のよい部分を組み合わせると、複雑な二酸化炭素の動きを捉えることができるシステムになると考えられています。



■ 図19 マレーシア気象局、オーストラリアCSIROとの共同観測(ダナン巴厘WMO観測所にて)

地球環境モニタリングステーションのあゆみ

(1) 波照間ステーション

平成 3年度
1991

平成 4年度
1992

平成 5年度
1993

平成 6年度
1994

平成 7年度
1995

平成 8年度
1996

平成 9年度
1997

平成10年度
1998

平成11年度
1999

平成12年度
2000

平成13年度
2001

平成14年度
2002

平成15年度
2003

平成17年度
2005

平成19年度
2007

平成20年度
2008

平成21年度
2009

平成22年度
2010

平成23年度
2011

平成24年度
2012

平成25年度
2013

平成26年度
2014

平成27年度
2015

- ☐ 地球環境モニタリングステーションを波照間に決定
植物活動や人為的な活動の影響を受けにくく、太平洋や亜熱帯地方の大気環境を長期間モニタリングするのに最適な場所として波照間を選定。温室効果ガスを完全自動化で継続的に高精度に測定し提供する世界で初めての試み
- ☐ 地球環境モニタリングステーションー波照間 竣工
- 二酸化炭素、気象観測開始
- ☐ 台風被害後のステーション再整備
- オゾン観測開始
- メタン、亜酸化窒素観測開始
- 一酸化窒素、水素、フロン類観測開始
- ☐ 試験観測から定常観測への移行を機に一般公開を実施
- 窒素酸化物(NOx)観測開始
- 硫酸酸化物観測開始、自家発電機設置、PCをFA-PCに変更
- 自動ボトル大気採取装置導入
- ☐ 監視用CCDカメラ導入
- ☐ 鉄塔大改修
- ☐ 10周年記念講演会・施設公開を実施
- 大気浮遊じん観測開始、ISDNによるネットワーク開通
- ガスクロマトグラフ-質量分析計(GC/MS)によるハロカーボン類観測開始
- ☐ 大気浮遊じん、オゾンサンプリング用チタン製10m塔(ガラス製空気取り込みライン)を建設
- ☐ 波照間中学校総合学習会を実施
- ☐ 科学技術振興機構主催、国立環境研究所共催のサマー・サイエンスキャンプを実施
- ☐ 台風で破損した鉄塔ステージの補強
- メタン、亜酸化窒素システム更新、イベント用ボトルサンプラー設置
- ☐ 蛍光灯をLED化、ネットワークをADSL-VPNに
- ☐ 地球環境研究センター20周年記念行事の一環として一般公開と講演会(波照間青年会共催)を開催
- ☐ 空調機室外機室改修
- 総窒素酸化物(NOy)観測開始
- ラドン計高感度化
- ☐ 漏水防止対策工事ならびにマスブロック入れ替え
- ☐ 波照間ステーション竣工20周年記念イベントにおいて、シンポジウムと一般公開を開催
- CRDS設置(CO₂, CH₄, CO測定)
- ☐ 鉄塔の配管・配線の更新
- ☐ ネットワークのLTE化、データ収集口ガー更新、雨水利用室外機洗浄装置の設置

波照間



本号で紹介した研究は、以下の研究者ならびにスタッフにより実施されました(担当は当時、敬称略、順不同)

〈研究担当者〉

管理官等	井上元、植弘崇嗣、古田直樹、藤沼康実、向井人史、町田敏暢
関連研究者	笹川基樹、寺尾有希夫、谷本浩志、遠嶋康徳、斎藤拓也、横内陽子、野村渉平
データ管理	橋本茂、勝又敬一、勝元正之
観測運営	荒木真一、大橋孝生、福澤謙二、世一良幸、福島健彦、浮貝太一、 外山洋一、遠藤浩、安西大成、高田雅之、田代浩一、長濱強、五十嵐聖貴 尾高明彦、樽井義和、坂川信昭、井桁正昭、鈴木千那津、田上厚子
現場管理	島野富士雄、織田伸和、津田憲次、湯本康盛(地球人間環境フォーラム) 加屋本伸光、船附誠正、阿利修一、坂井宏明、滝田隆

(2) 落石岬ステーション



平成 4年度 1992 地球環境モニタリングステーションに落石岬を選定

平成 6年度 1994 地球環境モニタリングステーションー落石岬竣工

平成 7年度 1995 ■ 二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、オゾン(O₃)、窒素酸化物(NO_x)、気象の試験観測開始

平成 9年度 1997 ■ 硫酸化物(SO_x)観測開始
 試験観測から定常観測への移行を機に一般公開を実施

平成10年度 1998 ■ 自動ボトル大気採取装置導入
 落石地区の小学生を対象にしたエコスクール開催(以後、毎年開催)

平成11年度 1999 ■ 亜酸化窒素(N₂O)観測開始、WMO-WDCGGおよびNOAAにデータ提供開始
 サイエンスキャンプ開催(平成15年度まで毎年開催)

平成12年度 2000 ■ 酸性雨試料採取開始

平成14年度 2002 ■ 一酸化炭素(CO)、水素(H₂)観測開始
■ ハロカーボン用サンプリング開始

平成15年度 2003 ■ 大気浮遊粉じん観測開始
 ISDNによるネットワーク開通

平成16年度 2004 サンプリングラインを新たに設計、テフロン管設置

平成17年度 2005 大気採取用ステンレスラインを追加
 ラドン計、酸素/窒素(O₂/N₂)計設置
 植生は10年で回復

平成18年度 2006 GC-MC(ハロカーボン測定装置)設置
 無停電電源更新
 大風による停電、落雷による被害

平成19年度 2007 温度・湿度計更新、CO₂計をWindows化
 鉄塔支線張力調整、フェンスの片面の改修

平成20年度 2008 太陽光パネル完成、フェンス工事、総窒素酸化物(NO_y)観測装置設置
 日中韓環境研会議出席者来訪

平成21年度 2009 エコメッセ2009 in ねむる開催(2010年、2012年も開催)
 蛍光灯をLED化、太陽光パネル作動

平成22年度 2010 倉庫完成、酸性雨装置故障
 波照間ステーション管理人の落石岬視察

平成23年度 2011 ■ 二酸化窒素(NO₂)計測開始

平成24年度 2012 NO_x、SO₂、O₃データシステムをWindows化

平成25年度 2013 北海道根室市落石小学校と沖縄県竹富町波照間小中学校のインターネットビデオ通話による交流会の開催
 空調設備更新
■ CO₂計の更新

平成26年度 2014 ■ CRDS設置(CO₂、CH₄、CO測定)、イベント用ボトルサンブラー設置
 「大地みらいフットパス・ウォーク」に参加の100名以上の方が見学

平成27年度 2015 ネットワークのLTE化、データ収集口ガー更新










落石岬

環境儀 No.62

—国立環境研究所の研究情報誌—

2016年9月30日発行

編集 国立環境研究所編集分科会

(担当 WG: 横島徳太、向井人史、笹川基樹、石濱史子、小林弥生、青野光子、滝村 朗)

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

編集協力 有限会社サイテック・コミュニケーションズ

印刷製本 朝日印刷株式会社 つくば支社

「環境儀」既刊の紹介

No.16 2005年 4月	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	No.39 2011年 1月	「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質—フェリーを利用してそれらの因果関係を探る
No.17 2005年 7月	有機スズと生殖異常—海産巻貝に及ぼす内分沁かく乱化学物質の影響	No.40 2011年 3月	VOCと地球環境—大気中揮発性有機化合物の実態解明を目指して
No.18 2005年 10月	外来生物による生物多様性への影響を探る	No.41 2011年 7月	宇宙から地球の息吹を探る—炭素循環の解明を目指して
No.19 2006年 1月	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	No.42 2011年 10月	環境研究 for Asia/in Asia/with Asia—持続可能なアジアに向けて
No.20 2006年 4月	地球環境保全に向けた国際合意をめざして—温暖化対策における社会科学的アプローチ	No.43 2012年 1月	藻類の系統保存—微細藻類と絶滅が危惧される藻類
No.21 2006年 7月	中国の都市大気汚染と健康影響	No.44 2012年 4月	試験管内生命で環境汚染を視る—環境毒性の <i>in vitro</i> バイオアッセイ
No.22 2006年 10月	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	No.45 2012年 7月	干潟の生き物のはたらきを探る—浅海域の環境変動が生物に及ぼす影響
No.23 2007年 1月	地球規模の海洋汚染—観測と実態	No.46 2012年 10月	ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響—分子サイズにまで小さくなった超微小粒子と生体との反応
No.24 2007年 4月	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	No.47 2013年 1月	化学物質の形から毒性を予測する—計算化学によるアプローチ
No.25 2007年 7月	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	No.48 2013年 4月	環境スペシメン/ノンキング—環境の今を封じ込め未来に伝えるパトナリレー
No.26 2007年 10月	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	No.49 2013年 7月	東日本大震災—環境研究者はいかに取り組むか
No.27 2008年 1月	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	No.50 2013年 10月	環境多媒体モデル—大気・水・土壌をめぐる有害化学物質の可視化
No.28 2008年 4月	森の息づかいを測る—森林生態系の CO ₂ フラックス観測研究	No.51 2014年 1月	旅客機を使って大気を測る—国際線で世界をカバー
No.29 2008年 7月	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	No.52 2014年 4月	アオコの有毒物質を探る—構造解析と分析法の開発
No.30 2008年 10月	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	No.53 2014年 6月	サンゴ礁の過去・現在・未来—環境変化との関わりから保全へ
No.31 2009年 1月	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB 処理の一翼を担う分析研究	No.54 2014年 9月	環境と人々の健康との関わりを探る—環境疫学
No.32 2009年 4月	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	No.55 2014年 12月	未来につながる都市であるために—資源とエネルギーを有効利用するしくみ
No.33 2009年 7月	越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎	No.56 2015年 3月	大気環境中の化学物質の健康リスク評価—実験研究を環境行政につなげる
No.34 2010年 3月	セリング型洋上風力発電システム構想—海を旅するウィンドファーム	No.57 2015年 6月	使用済み電気製品の国際資源循環—日本とアジアで目指す E-waste の適正管理
No.35 2010年 1月	環境負荷を低減する産業・生活排水の処理システム—低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化—	No.58 2015年 9月	被災地の環境再生をめざして—放射性物質による環境汚染からの回復研究
No.36 2010年 4月	日本低炭素社会シナリオ研究—2050年温室効果ガス 70%削減への道筋	No.59 2015年 12月	未来に続く健康を守るために—環境化学物質の継世代影響とエピジェネティクス
No.37 2010年 7月	科学の目で見える生物多様性—空の目とミクロの目	No.60 2016年 3月	災害からの復興が未来の環境創造につながるまちづくりを目指して—福島発の社会システムイノベーション
No.38 2010年 10月	バイオアッセイによって環境をはかる—持続可能な生態系を目指して	No.61 2016年 6月	「適応」で拓く新時代!—気候変動による影響に備える

●環境儀のバックナンバーは、国立環境研究所のホームページでご覧になれます。
<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

「環境儀」



地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一
 (環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字 N.I.E.S で構成されています。N= 波(大気と水)、I= 木(生命)、E.S で構成される○で地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切った左側に進むとする動きは、研究所の運動性・進歩・向上・発展を表現しています。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。