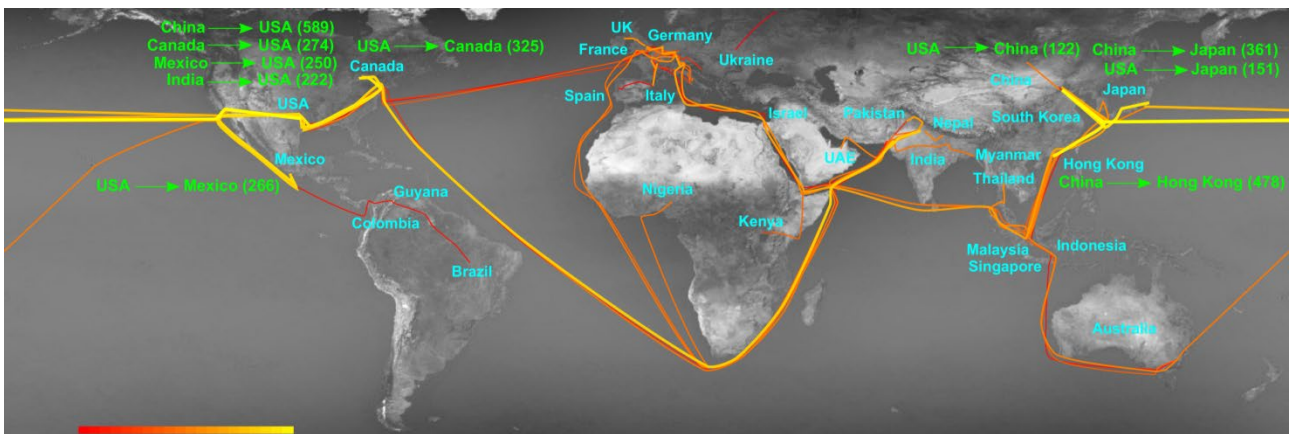


「国際貿易が引き起こす窒素汚染の実態」論文発表に実を結んだ共同研究

環境情報学府環境リスクマネジメント専攻
(現所属・川崎市環境総合研究所)

おいた
種田 あずさ

農産物への施肥や化石燃料の燃焼によって水域や大気に活性窒素が排出されます。その排出量は、二酸化炭素と同様に増え続けています。排出された活性窒素は、酸性雨、海洋や湖沼の富栄養化、地下水汚染、大気汚染、地球温暖化といった窒素汚染をもたらします。この窒素汚染と、私たちが消費する商品との関係を地球規模で初めて分析した共同研究の成果が、[Nature Geoscience](#) 誌の 2016 年 2 月号に掲載されました (Oita et al., 2016a)。海外メディアなどに多数取り上げていただいたこの研究の主要部分は、統合的海洋教育・研究センターが提供する副専攻プログラム「統合的海洋管理プログラム」の海外派遣研修中に行ったものです。ここでは、研修に関する体験を中心にご紹介します。(詳しい研究内容については、プレスリリース資料 <http://www.ynu.ac.jp/img/news/id-15185-jp.pdf> をご覧ください。)



統合的海洋管理プログラムの受講：研究のヒントを得たかった

副専攻の統合的海洋管理プログラムを受講することにしたのは 2014 年春、博士課程 3 年になる頃でした。なぜ、修了に向かうこの時期に受講を始めたのか？それは、その頃、水産物消費に由来する窒素汚染に取り組み始めたことと、研究を展開していくヒントを得たいという思いからでした。

窒素汚染と商品の需要との関係を定量的に示す指標を「窒素フットプリント」といいます。私が窒素フットプリントをテーマに研究を始めたのは、副専攻プログラム受講開始の 1 年ほど前、博士課程 2 年になる頃でした。普段食べているものと、関連する環境問題との関係を分かりやすいモノサシで測りたかったからです。既存の分析方法は、窒素フットプリントのうち、エネルギー消費由来のものは生産過程での排出量と消費金額、食料消費由来のものは商品の消費量から計算するものです。消費生活と窒素汚染との量的関係が良くわかる反面、汚染がどの地域にどんな影響を与えているかはわかりませんでした。

まず、既存のエネルギー消費由来の窒素フットプリント解析に使う「産業連関分析」という経済学の手法を学ぶため、長谷部勇一先生の講義を受講しました。産業連関分析は、生産過程での排出量と経済的波及効果を基に商品の需要と排出量の間関係を測る方法です。次に、長谷部先生と居城琢先生のご指導の

下、日本の9地域の関係を分析しました(種田ら、2013)。この発表内容を深め、食料消費由来の窒素フットプリントの計算を産業連関分析に統合しようとしたのですが、どうしてもうまくいきませんでした。

そこで、既存の方法では詳しく評価されていなかった水産物に焦点を絞ることにし、指導教官の松田裕之先生と日本水産(株)中央研究所の永野一郎博士に助言をいただいて分析しました(種田ら、2014)。そして、副専攻プログラムの講義から、海流や水深など様々な影響を受ける海洋生態系は陸上生態系と大きく異なること、食料をはじめたくさんの物資が海洋貿易で取引されていることなどを学びました。

海外派遣研修応募へ：受け入れ先への依頼には研究への思いを込めた

新しい分析方法や関連するフットプリント分析により研究を進展させる契機に、海外派遣研修を利用したいと考えました。そこで、国内の研究者に相談後、興味深い論文の著者と連絡を取ってみました。

1 通目。A 国の A 博士へ。「…私は現在、窒素フットプリントに取り組んでおります。研究生として 2-3 ヶ月間受け入れていただける可能性はありますか。当方は…に興味があり、X 博士に A 博士も興味をおもちと伺っております。…」。4 日後、同団体 B 国の管理部局から「…A 博士からの転送であなたのメールを受け取りました。…私たちの B 国での研究と重なる部分があるかどうか知りたいので、研究領域や〇〇への関心について教えてください。部屋の余裕あまり無いので受け入れは保障できませんが…」との返信でした。つまり、A 博士との共同研究はできないということ。そこで、「海外 ポスドク カバーター」などと検索し、向こうの研究に対するこちらの関心を強調するべきだと学習しました。

2 通目は、松田先生にご助言いただき、オーストラリア・シドニー大学統合持続可能性分析センターの Manfred Lenzen 教授へ。「…私は現在、窒素フットプリントに取り組み…2-3 ヶ月間受け入れていただける可能性は…先生が九州大学(現所属・信州大学)の金本圭一郎氏らと執筆した Nature 誌の生物多様性フットプリントの論文に大変感銘を受けました。なぜなら、私は地方行政や NGO 業務の経験から、生物多様性や生態系サービスと消費を関連付けたいという思いで研究しているからです。…金本氏にも先生の下で研究することを勧められました。先生の最近の奴隷労働フットプリントの論文も興味深く…私は先生のグループに生態学や業務経験から新しい見地を提供できると思います。…」。翌日、ご本人から「…あなたの経験に基づく見解は当研究センターの使命に大変合っています。…当方のデータベースを使い、産業連関分析で世界の窒素フットプリントを評価するのはいかがですか。…帰国前に査読付学術誌に共著論文を投稿する目的に同意しますか。そのためにも半年間の滞在はいかがですか。…」との返信でした。承諾の嬉しさ半分、産業連関分析に再挑戦した上での論文執筆への不安半分でした。

海外派遣研修の手続き：シドニーの宿泊費高騰と事務処理スピードが壁になった

松田先生と、海外派遣研修担当の水井涼太先生にご相談したところ、ビザの取得に問題がなく、滞在中の宿泊費を抑えられるならば、研修に応募してくださいとのことでした。調べると、学生の 3 ヶ月以上の研究滞在に必要な職業研修ビザ(大学講師職)は 2-3 ヶ月で下りる見込みでしたが、利用可能な大学寮は食事なしで週 3 万円、大学から離れた民間施設の 4 人部屋などで週 1.5 万円程度と高額でした。

研修応募のハードルは宿泊費。友人の友人にまで協力を得て、大学から電車とバスで 1 時間余りの所で週 1 万円+光熱費のホストファミリーを見つけ、9 月 15 日渡豪予定で応募しました。採択していただき、ビザ取得へ。5 月 16 日からシドニー大学とやりとりしたものの、当初担当者の長期休暇もあり、ビザ要件である受け入れ機関認定とあわせてオーストラリア政府に申請できたのは 6 月 23 日でした。

保険の英文証明の内容や追加書類を心配すること 2 ヶ月。大使館を含めあらゆる手段で連絡を試みるも発給見込み日の返信は得られず、渡航延期に。諦めかけていた 9 月 23 日、突然ビザが発給されました。

共同研究の準備：多方面の準備をできる範囲で行った

研究面での準備に関して、Lenzen 先生からの宿題は、現状のデータベースにある窒素関連の排出量について完全に理解することと、MATLAB というプログラミングソフトを使えるようになることでした。まず、金本氏に現状の大気汚染データ（亜酸化窒素と窒素酸化物）について教えていただきました。世界各国の活性窒素の水域への排出量データは既存のものが無いことがわかり、推計方法について金子信博先生にご相談するなどして検討を始めました。ノートパソコンの環境も整え、MATLAB もヘルプを見て少し使える程度には習得しました。産業連関分析によるフットプリントの主要論文も、時間のある限り読みました。また渡航後に全力を共同研究に注ぐため、水産物由来の窒素フットプリント分析 (Oita et al., 2016b) については出発前に投稿しようと、初の原著論文執筆に奮闘した日々でもありました。

シドニー生活の開始：手続きはオージー流に気長に待った

9 月 29 日、シドニーへと旅立ちました。翌朝、空港に来てくれたホストファミリーは親切で一安心。日本から予約した銀行口座の開設に行きましたが、なぜか初めから手続きが必要で、その後 2 度訪れることになりました。料理嫌いのホストマザーとは自炊する約束だったので、スーパーで食材とスマートフォンを調達し、台所のコンロは電気代が高いとのことで庭先にあるガスコンロ使用法を習いました。

登校初日は、ホストファミリーがバスを心配して、大学まで一緒に行ってくれました。広い大学内には伝統的な建物と新しい建物があり、研究センターのある物理学研究科は、1924 年築の細長い 3 階建てに 2 つの塔がある造り。研究センターは塔部分にあり、私の部屋は 5 階でした。お手洗いは 1 階と 2 階にしか無いのに、時間外入館は IC チップで管理されました。大学での身分証の発行と共用プリンタへ接続など諸々の利用手続きには 3 週間かかりました。労働者はマイペースに仕事をし、利用者が待つのがオージーの暮らしです。



初めてのミーティング：とんでもない目標を設定してしまった

Lenzen 先生と、一緒に研究した Arunima と 3 人での初めてのミーティングは、燦々と輝く太陽の下、最上階の先生の部屋の外のバルコニーの机で行われました。Lenzen 先生は、「データが使える最新年の国単位の分析と、より長い期間や詳細な分析を含めた 2 本の論文を書こう。掲載雑誌は米国科学アカデミー紀要(PNAS)と Global Environmental Change を目標にしよう。」と提案されました。

私は、国際的評価の高い雑誌名に圧倒されながら、「精一杯やりますが、各国の活性窒素の水域排出量は推計が必要で、山梨大学の新藤純子先生のモデルを参考に、データセットも含め方法を検討中で、時間がかかります。」と説明しました。しかし、「2 週間で大まかな方法を決めてください。2 本の論文の意義と各セクション担当者もね。あと、セクションを担当しないで、最後に原稿にコメントをくれるだけの人は、共著者にできないよ」と返答され、あっという間に各月 To Do リストができていきました。

2回目のミーティング：ほとんど発言できなかった

膨大な気象や地質のデータを扱わずにある程度妥当な水域排出量の推計をするにはどうすればよいのか。「新藤モデルのほかにもできればいくつかのモデルを比較して、選んだ理由を書けるようにして。」とも指示されたので、2週間必死に調べ考えました。何とか案を作って次のミーティングを迎えました。

しかし、いつまで経っても、Lenzen 先生の語りに切れ目ができません。予定時間があと 5 分という時になって、突然、Lenzen 先生が数式を書き出しました。「わからないなら、こんなモデルはどうか。」とまで。「いや、案を考えてみたんですが。」と言ったものの、うまく伝わらないうちに終わってしまいました。これからどうしたらいいのか、途方に暮れてしまい、Arunima に何とか伝えました。沈んでいる私に、研究室の仲間が紅茶を入れてくれ、再度 Lenzen 先生に時間をいただくことになりました。

Arunima がわかりやすく事情を説明してくれると Lenzen 先生は、「おーそうか。いつでも遮って発言してくれて良かったんだよ。ごめんなさい。」と申し訳なさそうでした。私が「こちらでのディスカッションの仕方を学びます。」と言うと、「それはみんな学ばないとね。」と Lenzen 先生。私が新藤モデルを参考に、国際連合食料農業機関 (FAO) のデータを使う推計方法を提案すると、「窒素の詳しいことはわからないけど、これでいこう。まず排出量の多くを占める要素の大まかな推計からとりかかり、改良していけばよい。貿易データベースとの組み合わせは、生物多様性フットプリントの論文と同様にできるだろう。」と背中を押していただきました。「多量のデータの扱いが難しそうなら、松田先生か誰か、プログラミングが得意で日本語で相談できる協力者を得たらいい。」ともおっしゃったので、当時、松田研究室ポスドクだった西嶋翔太氏 (現所属・中央水産研究所) の協力を得ることにしました。

メルボルンでの国際学会：類似研究が進行していた

細部の計算方法について西嶋氏の協力を得て検討した結果、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の係数を使うことに決めました。その矢先、11 月中旬にメルボルンで開催される国際エコロジー学会のアジア太平洋部会で、東北大学の松八重一代先生が、国際産業連関表を用いた窒素の分析について発表されるとわかりました。そこで、私も急遽、得ていた研究推進費を使って傍聴参加することにしました。

研究内容が重複していた場合を想定してドキドキしながら発表を聞いたところ、松八重先生の研究は窒素の流れそのものに焦点を当てたもので、消費者に焦点を当てた私たちの研究とは少し違うことがわかり、ホッとしました。松八重先生に自己紹介をして窒素フットプリントを研究しているという、翌年 3 月に札幌で予定されていた窒素フットプリント国際ワークショップにまでお誘い頂きました。

解析の日々：豆と米の格安自炊生活と持ち寄りパーティーで乗り切った

メルボルンから戻ると、Lenzen 先生と Arunima に「今のところ重複していないけど、松八重先生の研究が広く知られたら、重複するものが必ず出てくる。時間勝負だね。」と言われ、とにかく急いで解析を進めることになりました。テレビ大好きで悠々自適生活のホストファミリーご夫婦には、サマータイムでも暗くなる 21 時にはなるべく帰宅するようにと言われ、心配されながら研究に励んだ日々でした。

調理をする間も惜しみなかったのですが、オーストラリアは最低労働賃金が約 2000 円で、ファーストフードでも日本の倍ほどの値段がするのです。ところが、米は 2 キロ 600 円足らず、豆の 400g 缶はセールになると 100 円ほど、野菜や果物の安いものは 100 グラム 20 円前後で売っています。渡航資金が少なく、週の食費予算は 3000 円ほどだったので、乗換駅で安い材料を買って帰宅する、自炊生活でした。

Lenzen 先生の研究室には社会人学生や夫婦で滞在している留学生が多く、コアタイムもなかったのも、家で研究をする人が多く、平日でもあまり人がいませんでした。そこで、給湯設備と冷蔵庫がある休憩室で、物理学棟の他の研究室の人とお弁当を食べるようになりました。特に仲良くなった人たちと、土曜日に半日研究した後で遊びに行ったり、持ち寄りパーティーや BBQ をしたりして楽しみました。

Nature 誌への挑戦：帰国まで全力で具体例を調べ執筆した

12 月も中旬になると、オーストラリアは 1 月下旬まですっかり夏休みモード。大学にはアジアからの留学生や急ぎの研究がある人がまばらに来る程度になりました。そんな中、私はようやく MATLAB のプログラミングがわかりだし、解析が進んできた状況でした。そこに、Lenzen 先生から、「先に序論を 2 本分書いてみて。1 本は再来週 26 日、2 本目は 1 月 4 日までね。」と宿題。できないと第一著者から外される勢いだったので、必死で提出しましたが、3 時間後には真っ赤になって返ってきました。「なんでここは Thus なの？」などと聞かれ、日本語と英語の論理展開の違いを痛感しながらの執筆でした。

Arunima が帰省先から戻ってきた 1 月下旬からは、最終段階の解析と、並行しての執筆でした。Lenzen 先生は、「一流雑誌にはストーリーが大切」とおっしゃって、世界規模の分析だけでなく、具体例も調査しました。国際的にも重要な貿易ルートになっていたのは、日本が米国から輸入している牛肉・豚肉、そして、中国から輸入している衣類でした。重要な地域と判明したのは、米国カリフォルニア州の農畜産業地域で、地下水が硝酸態窒素で汚染されていました。乳児の酸欠状態を引き起こす汚染ですが、スペイン語圏からの移民を中心とする貧困層は地下水に頼って暮らしていて、汚染を避けるためにはペットボトルで水を買うしかありません。中国でも衣類生産の影響で水や大気が汚染されていました。

2 月に入って 1 本目の論文投稿に集中することになり、原稿の輪郭が見えてきた頃、Lenzen 先生が、「Nature 誌に投稿しないか」と提案されました。Arunima にも「手伝うから頑張ろうよ」と励まされ、まずは全力を尽くしてみることにしました。語数制限も厳しく、とても帰国までに間に合わないと思ったのですが、そこは Lenzen 先生、絶対に間に合わせようと、連日夜中までメールを交換しました。私は何晩か机で寝てしまい、帰国前に物理学棟仲間が企画してくれたフェアウェル・パーティーにも遅れて参加するほどギリギリ勝負でしたが、何とか 3 月に投稿までこぎつけることができました。そして帰国の翌日に札幌へ。窒素フットプリント国際ワークショップでも高い関心を得ることができました。

4 人の審査員への返答：寿命が縮まる思いで大改訂した

Nature 誌からの連絡は、投稿から約 1 週間後でした。「研究の重要性はわかりますが、一般向けというよりは、環境分野の人向けの段階だと考えます。Nature グループ専門誌の Nature Geoscience 誌への投稿はいかがですか」との判断でした。同誌に投稿し直して待つこと 2 ヶ月。5 月中旬、4 人の審査員のコメントと「掲載不可 (リジェクト)。ただし、再投稿を認める」という厳しい判断が届きました。

私が 7 月末までに改訂する案を共著者たちに送ると「6 月末までに仕上げないと、先を越されるよ」と猛反対。再び徹夜の日々でした。審査員の方からの指摘に加え、審査員並みに専門知識のある担当編集者からの指摘にも答えるべく、引用文献を見直して根拠を強化し、わかりやすく構成し直しました。産業生産だけでなく下水などへの消費者からの直接排出量も加え、手分けして 2008 年から直線的に予測していた 2010 年の大気汚染データを回帰で求め、再解析しました。誤差の推計だけは、数学者の Arne の協力を得てもデータの質の違いなどにより時間がかかり、結局、再提出できたのは 7 月下旬でした。

受理までの道のり：祈る思いで編集者とやりとりをした

その後しばらくは、Lenzen 先生たちとの 2 本目の共著論文や、札幌のワークショップを基にした共著論文など、投稿結果を心配する暇もなく研究に取り組み、卒業に向けて予備審査を受ける日々でした。10 月初め、Nature Geoscience 誌から、条件付き受理の連絡が来ました。Nature スタイルに編集された第一段落も提案されましたが、4 人中 2 人の審査員はまだ納得していませんでした。少しの嬉しさとたくさんの不安の中、Arunima と図の改訂を相談し、今度はほぼ私一人で指摘への回答素案を作成しました。その素案を Lenzen 先生、Arunima、金本氏と議論して推敲し、祈る思いで再提出しました。

12 月初めに、再度連絡が来ました。最も熱烈に批判していた審査員からは、「とてもよく改良されて興味深く魅力的になった。出版にふさわしい素晴らしい原稿だ。」とのコメントと、2 カ所の微修正提案がありました。編集者からの、誤解を防ぐためのコメントと合わせて、Lenzen 先生と相談して修正しました。編集上の相談にさらに数日かかった末、日本時間の 12 月 15 日未明、ついに受理されました。

プレスリリースと出版：暗中模索の体験から報道戦略の必要性を実感した

無事に受理された喜びの中、共著者たちの次の話題は論文の広報でした。「シドニー大学はプレスリリースをするけど、横浜国立大学もやるよね？」と聞かれました。シドニー大学では、受理された論文の内容に話題性があれば、社会への還元や大学の宣伝を兼ねて、気軽にプレスリリースが行われています。報道専門の担当官が複数人いて、原稿を書き、記者発表を設定して、メディアに働きかける体制になっているのです。著者は結果の要点を箇条書きにして、内容を口頭説明し、記者発表に出るだけなのです。

横浜国立大学の広報課へ確認すると、普通は教員の業績として日本語で発表するとのことで、今回は統合的海洋管理プログラムの成果として発表することに決まりました。また、通常、原稿送付のみとのことだったので、博士論文執筆・就職活動中の私には、例外的に記者発表を設定する余裕はありませんでした。日本では通常、すべてを著者が行う体制になっていて、横浜国立大学も例外ではなかったからです。暗中模索の末、プレスリリース案を考え、広報課の助言を受けて修正し、記者クラブへ送りました。

論文が Nature Geoscience 誌オンライン版でまず公開されたのは、博士論文審査会の数日前のことでした。正式な形になった原稿を見られ、感無量でした。そのすぐ後で、英語での報道に衝撃を受けました。英国のガーディアン誌をはじめ、30 近くのメディアに取り上げられたのですが、そのほとんどが、Nature グループのプレスリリースではなく、シドニー大学のものを情報源にしていました。そのため、記事中には横浜国立大学や私を含めた 3 人の日本人著者の名前は無かったのです。国内外の研究者から私に反響が届いたのは、しばらく経ってからでした。そのうち 2 組とは、今も共同研究を続けています。

謝辞：統合的海洋管理にとどまらない貴重な体験に感謝

統合的海洋管理プログラムの履修、特に海外派遣研修やその成果としての論文発表を通して、多様な研究アプローチや共同研究の進め方、文化的違いを体験し、著名な論文雑誌の編集者を含む様々な方々と窒素フットプリント研究について議論する機会を与您いただきました。統合的海洋管理プログラム履修及びこれまで研究をご支援頂きました国内外の先生方・関係者の皆様に心からの感謝を申し上げます。

【記事中の論文・学会発表】

種田あずさ・居城琢・長谷部勇一・松田裕之. 地域間産業連関表を用いた環境負荷分析. 環太平洋産業
連関分析学会第 24 回 (2013 年度) 大会, 10-1, 名古屋. 2013 年 10 月.

Oita, Azusa, Arunima Malik, Keiichiro Kanemoto, Arne Geschke, Shota Nishijima, and Manfred
Lenzen. 2016a. "Substantial Nitrogen Pollution Embedded in International Trade." *Nature
Geoscience* 9 (2): 111–15.

種田あずさ・永野一郎・居城琢・長谷部勇一・松田裕之. 日本の魚介類消費に起因する窒素負荷量の評
価. 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 1039, 函館, 2014 年 3 月.

Oita, Azusa, Ichiro Nagano, and Hiroyuki Matsuda. 2016b. "An Improved Methodology for
Calculating the Nitrogen Footprint of Seafood." *Ecological Indicators* 60: 1091–1103.