J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 143, p.53 ～ 56 (2019)

バイロイト大学での研究を振り返って

山口敦史 [1]

Report on the study at Bayreuth University in Germany

Atsushi YAMAGUCHI[1]

筆者は筑波大学 生命環境科学研究科の博士後期課程に進学し（現在 3 年目），指導教員である小林幹佳准教授のもとで，土 · 水環境中の物質輸送に係わる土壌コロイド懸濁液のレオロジー特性に関して研究を行っている．この度，またとない機会を得て，博士後期課程 2 年目の 11 か月間にわたり，バイロイト大学（ドイツ）の Georg Papastavrou 教授のもとに滞在し，有機ナノコロイドの吸着に関する研究を行ったので，研究内容と海外での研究を通して得た感想を報告する．帰国した今となっては留学したことは正解であったと言い切れるが，留学当時は喜怒哀楽を感じながら，目まぐるしくも充実した日々を一生懸命に過ごしていたように思う．本稿では先ず，農業工学系の研究室に所属する私が物理化学系の研究室に滞在するに至った経緯を，研究内容とのつながりと併せて述べる．その後，留学の各時期に感じていたことと留学を通して学んだことを振り返り，最後に実際に留学するまでの経過を紹介する．本稿が，これから留学を希望する人の動機付けや，過去に海外滞在経験のある人が当時を思い起こす一助となれば幸いである．

1. 留学の概要と研究内容

2018 年 4 月初めから 2019 年 2 月末までバイロイト大学の Georg Papastavrou 教授のもとで研究を行った．バイロイトはドイツの中央東寄りに位置する小規模な街で，ドイツらしいきれいな街並みと豊かな自然が同居する，のどかで住みやすい街である（Fig. 1）．滞在先の Papastavrou 教授の研究室は化学部門の Physical Chemistry II に所属している．研究内容としては，原子間力顕微鏡などを用いた微細な表面の分析や電気化学の技術などを組み合わせた新たな表面分析手法の開発に取り組み，先端的な成果を上げている．研究室はバイロイト大学内で key laboratory に指定されており，表面分析への卓越した技術と多彩な設備を活かして，大学内外との共同研究を積極的に行っている．留学期間中の私の研究は主に，有機ナノコロイドの最大吸着量に対する，吸着媒の帯電量の寄与に関するものであった．この研究内容は物理化学分野の基礎的な内容であり，一見すると土壌物理学や農業工学とはかけ離れているように思われるかもしれない．しかし，実際には深く関連している．そこで，私の博士後期課程の研究を例に関連性を紹介する．

肥料を効率よく利用する精密農業や，廃棄物の不適切な処理による土壌汚染の防止を行うためには，環境中における物質の輸送挙動を明らかにする必要がある．とくに，粘土粒子や土壌有機物に代表される，数 μm から数 nm の大きさを持つ微細なコロイド画分の輸送挙動は，それ自体が物質の移動であることに加え，栄養塩や汚染物質の担体となることからも，環境中の物質動態において重要な役割を果たす．ここで，コロイドは周囲の水と同時に動くため，コロイドの輸送挙



Fig. 1 世界遺産に指定されているバイロイト祝祭劇場前にて．有名なバイロイト音楽祭はこの歌劇場で開催される．

[1]Graduate School of Life & Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan. 筑波大学大学院 生命環境科学研究科
2019 年 6 月 5 日受稿　2019 年 8 月 27 日受理

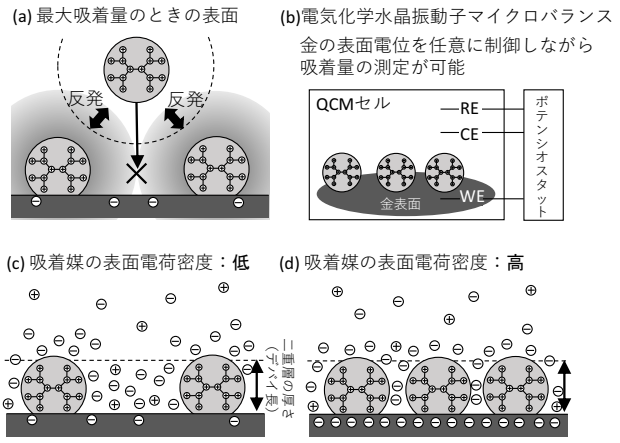


Fig. 2 帯電した球状ナノ高分子電解質が荷電をもつ吸着媒に吸着する様子．(a) 最大吸着量に達した際の粒子間の静電的な反発力の様子，(b) 電気化学水晶振動子マイクロバランス (EQCM)，(c), (d) 吸着媒の表面電荷密度が低いときと高いときの表面の様子．

動を明らかにするためには，懸濁液としての移動を考える必要がある．懸濁液内では，コロイドや凝集体同士が相互作用し，凝集体の形成と破壊，再凝集が繰り返されることで，懸濁液の流動（レオロジー）特性が漸次変化していく．私の研究では，相互作用する単位として，粘土などのマイクロスケールを持つ比較的おおきなコロイドに，ナノスケールを持つ微細な土壌有機物（腐植，多糖類，タンパク質など）が吸着した複合体に着目し，複合体間の相互作用の観点から懸濁液のレオロジーを明らかにすることを目的に研究している．その過程で，ナノサイズの有機物の吸着量や吸着後の配置，吸着メカニズムを明らかにすることが，複合体間の相互作用を議論するうえで不可欠な要素であるとの着想を得た．そこで，表面分析に豊富な知識と経験を持つ Papastavrou 教授のもとで，吸着に関する研究を行うに至った．

一般に環境コロイドは表面荷電を持つ．そのため，疎水性相互作用などが作用することで吸着粒子と吸着媒との間に十分な引力が働く場合を考えると，吸着粒子間の静電反発力により粒子同士が近づいて吸着できないことが最大吸着量を制限する要因となる（Fig. 2 (a)）．とくに吸着粒子がナノサイズの場合には，吸着した粒子が吸着媒周囲の電気二重層内に入り込む形になるため，吸着媒の表面電荷が最大吸着量に与える影響を無視できない．しかしながら実験的にこの現象を扱うためには，吸着媒表面の帯電状態のみを変化させた実験を行う必要があるため技術的に難しく，その様な実験はこれまで行われてこなかった．そこで，私がバイロイト大学で行った研究では，電気化学と表面分析の技術を組み合わせた装置（電気化学水晶振動子マイクロバランス，EQCM）を用いて，金表面の電位のみを系統的に変化させながら，金表面への球状ナノ高分子電解質（ポリアミドアミン（PAMAM）デンドリマー）の吸着量を測定した（Fig. 2 (b)）．この実験により，金表面の電荷密度が増加することで，PAMAM デンドリマー間の反発力が減少し，最大吸着量が増加することを明らかにした（Fig. 2 (c), (d)）．さらに実験値と最新の吸着理論モデルである three-body random sequential adsorption モデルとを比較することで，理論モデルの妥当性を示すとともに，PAMAM デンドリマーが吸着後に変形する影響を組み込むことで理論モデルの展開を図った．この結果は，例えば，腐植や多糖類，タンパク質などの土壌ナノコロイドが砂などのコレクター粒子に吸着する際の pH の影響を定量的に説明することにつながるのでは，と考えている．

バイロイト大学での研究内容は，土壌物理学だけでなく，吸着現象が関与する製薬，塗料，化粧品など広範な分野に応用可能な基礎的な知見を与える，学術的な貢献の大きい内容であった．留学後半に行った研究の成果も含めて複数の論文にまとめられる予定であり，十分な結果を得られたように思う．全体を通してみれば順風満帆な研究生活であったが，その時々では新しい環境で研究する不自由さや，馴染みのない分野に挑戦する難しさを感じることもあった．ここからは，研究の様子と日々の生活を振り返りつつ，バイロイトでの経験を通して得られた学びを報告する．

2. 研究室の様子とバイロイトでの生活

滞在先の研究室は，Papastavrou 教授と Nicolas Helfricht 博士が中心になって研究の舵を取り，秘書と技術者 3 人が研究環境を整え，私を含めて 5 人の博士後期課程の学生と他数人の修士・学部生が実働隊として研究を行う，中規模の研究室である (Fig. 3, Fig. 4)．設備面では，複数の原子間力顕微鏡やリフレクトメトリーなど，質・量ともに高水準な実験設備が揃っている．それに加えて，コーヒーブレイクをとりながら研究について議論を深めたり，仕事終わりにビールを飲みながら同僚と交流したりできる，テラス付きのカフェテリアが付属しており，ストレスを溜めずに存分に働ける設備が整っている．とくに教授陣や技術者の手厚い支えのもとで，学生が活発に議論しながら主体的に研究を進めていたのが印象的であった．この素晴らしい環境下で集中して研究に取り組んだ 11 か月間は，私にとって得難い経験になった．

周囲の人や環境に恵まれた留学にあっても，最初の 3 か月間はとにかく全てが新鮮で，楽しみつつも必死に研究室やドイツでの生活に慣れようとしていたように思う．例えば，滞在先の研究室では安全面への配慮が行き届いており，ひとりで残って実験を続けること

は禁止されていた．同僚は大抵 17 時から 18 時には全員帰宅するので，一回数時間かかる実験は計画的に進める必要があり，1 日のリズムが定まるまでは準備した溶液が無駄になってしまうことも多々あった．このように書くとあたかも苦労したかのようであるが，論文で読んだことしかない装置を使ってデータを取れることがうれしく，舞い上がっている間に徐々に慣れることができたというのが実際のところであった．

学生の間に留学することは，海外の文化に馴染むことに大きなアドバンテージがあるように思う．実際に私の場合は，現地学生のコミュニティに自然に参加できたため，学内のクラブ活動やダンスパーティーなど学生ならではの活動や，ビアフェスやクリスマスマーケットなどのイベントに参加する機会に恵まれ，ドイツの文化に親しむことができた（Fig. 5）．私は学部生の頃に 2 か月間韓国に留学した経験がある．その時の経験と比較しても，所属先が定まっている研究留学は，留学関係の手続きや現地の文化への馴染みやすさの面でハードルが低いように感じる．

留学を通して最も辛かったのは，渡航から 3 ヶ月ほど経ち，ドイツでの生活に徐々に慣れてきたころに体調を崩したことだった．ドイツの美味しくて重たい料理を食べ過ぎたせいか，約半年のあいだ腹痛に悩まされた．海外で体調を崩すと日本にいるときに比べて不安を煽られる．この時の腹痛からは，体が資本だということを改めて思い知らされた．結果的に何度か病院に通ったわけだが，初めて病院に行くまでは言語の問題や保険制度への理解不足から躊躇いがあった．それでも恐る恐る病院に行ってみれば，お互い英語が片言でも意思疎通が図れ，薬を飲んで症状が多少落ち着いたときに安堵したことを良く覚えている．病院に限らずドイツでの生活は，日本にいるときに比べて様々なことが少しだけ難しい．ごみの捨て方がわからない，携帯が契約できないといった小さな問題が起きて，それらをひとつ解決するごとに自信がついての繰り返しだった．この小さな挑戦と成功の繰り返しの中で，大抵のことは何とかなると気楽に構えられるようになり，新しいことに取り組むことへの抵抗感が薄らいだことは，留学を通しての成長と感じている．

留学が半分くらい終わった秋口には，ドイツでの研究にも生活にもだいぶ慣れて余裕が出てきていた．毎日実験している中でふと気が付いたことは，海外でも日本でも研究の本質は変わらない，ということだった．今にして思えば当然のことのように思うが，実験をして結果をまとめ議論する過程は，自分が日本でやってきたことそのものだった．この気づきから，国際的であることに変に気負わず，まずは自分の中に知識と経験を溜め込み，技術を身に付け，発信するに値する成果を得ることが，研究を続けていくうえで重要なことであると思えるようになった．一方で，言語の問題で議論が不十分になることや，研究の成果がうまく伝わらないことは悔しく，道具としての英語能力の必要性を痛感した．留学を通して辿り着いたこれらの考え方は，今後の研究生活に大きく寄与するように感じられる．

バイロイト大学では，博士後期課程の学生が学部生の実験の授業を受け持つため，私も 10 月以降に何度か学生実験を担当した．私自身ドイツで一度も授業を



Fig. 3 研究室付属のカフェテリアのテラスで撮った研究室の集合写真．一番右の男性が Papastavrou 教授．

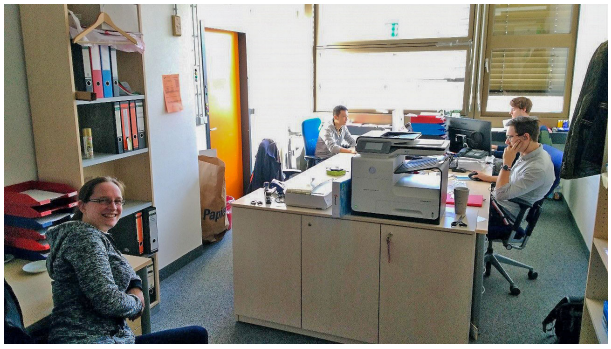


Fig. 4 博士課程学生控室の様子．



Fig. 5 研究室の学生と研究室付属のカフェテリアのテラスにてバーベキューを行っている様子．夏はテラスでバーベキューが，冬は屋内のカフェテリアで懇親会が毎週のように開催される．

受けたことが無く，仕組みも分からず，もともと農学部出身の私と物理化学系の学生とでは背景がまったく異なることから，戸惑いは大きかった．同僚にひたすら質問することで授業制度の概要を掴み，自分で実験の題材や条件を設定し，英語で授業することには四苦八苦させられた．とくに EQCM を用いた実験では，ドイツに来てから自分で本を読んで初めて学んだ電気化学の知識を学生に教える必要があり，容易にはいかない挑戦だった．最終的に学生にとってどれだけ良い授業ができたかわからないが，右も左も分からない中で実験指導の役割を遂げられたことは，研究を続けていくことへの自信につながっている．また，今振り返ると，ドイツの教育現場を体験し，教育方針や制度，日本とドイツの学生の質の違いなどに対して理解を深められたことは幸運であった．この経験を通して，互いの背景知識が異なる場合における認識の擦り合わせの重要さをしみじみと感じたこともあり，帰国後は留学前よりも留学生とコミュニケーションを積極的に取るようにしている．

留学が終わりに近づいた 12 月頃からは，研究の最終目標が定まって少しでも先に進めようと一層意欲的に働いていたことと，腹痛が収まり体調を気にせずクリスマスマーケットなどを楽しめたことから，最も充実した期間だった．最後の数ヶ月は飛ぶように過ぎて，ドイツを離れるのが寂しいと思っていたら，あっという間に帰国の日を迎えていた．留学が充実したものとなったのは，周囲の方々，とくに Papastavrou 研の方々の支えによる所が大きい．研究面だけでなく生活面においても，不慣れな私を常に気遣い手助けしてくれたことには大変感謝している．帰国後も Papastavrou 研の方とは論文を投稿する準備や SNS を通して連絡を取り合っている．遠い海外に同じ学問を志す同僚がいるというのは何だかうれしく，研究のモチベーションに繋がっている．

3. 留学の勧め

本稿の最後に，留学を検討している学生の動機付けやその周りの人の参考になることを期待して，私が留学を希望した理由と留学に至るまでの経過を紹介する．

私は学部から博士後期課程に至るまで，一貫して筑波大学に所属している．このことは専門性を高めることに役立っているが，一方で知識や経験に偏りが生じ，学位取得後に異なる研究環境に適応することが難しくなるのではないかという懸念があった．また，素晴らしい国際論文を多数読み，国際学会を通して海外の学生と交流する中で，自分の研究力が国際的に通用するものなのか疑問を覚えた．そこで博士後期課程に進学することを決めたころから，新しい環境で未知の技術を学びつつ海外の研究状況を肌で感じられる留学を希望していた．

実際の日程としては，博士後期課程 1 年次の 6 月には Papastavrou 教授に留学を希望する旨を伝え，許可を頂いていた．留学先の選定や留学先とのやり取りは，小林幹佳准教授にご助力いただいた．留学に先立って，前年の 9 月に一度 Papastavrou 教授のもとを訪問して打ち合わせを行えたことは，留学の準備や留学後の研究をつつがなく進めることの助けになっただけでなく，留学中の滞在費を獲得するうえで大きなアドバンテージになったと思う．

金銭面は，幸いなことに，日本学術振興会の DC1 と若手研究者海外挑戦プログラムから援助して頂いた．若手研究者海外挑戦プログラムは採択率が高く，3 か月以上の滞在であれば 100 ～ 140 万円の滞在費と航空券代が支給されるため，多少留学期間を絞れば十分な額の援助を受けられる．早くから準備できる人には申請する価値があるように思われる．

留学することが決まる前には，未知の環境で行う質の高い研究への期待に胸を膨らませる一方で，海外での研究生活に適応できるのかという不安と，日本での研究が一時中断されてしまうことで業績が得にくくなるリスクから，臆している部分もあった．しかしながら，実際に留学してみれば，興味深い研究成果と新しい研究手法を得られたことに加えて，素晴らしい同僚に囲まれて，日本では経験できない新鮮な出来ことにあふれた有意義な日々を過ごすことができた．少ないサンプル数ではあるが，私の経験から鑑みるに，多少のリスクを負ったとしても留学にはそれ以上に挑戦する価値があるように思う．もし大学院生で留学するチャンスがあるのなら，ぜひ挑戦することを勧めたい．

Acknowledgements

The author is grateful for Prof. Dr. Georg Papastavrou, Dr. Nicolas Helfricht, and laboratory members in Bayreuth University for giving me the fruitful and happy days. The author also appreciates to Dr. Motoyoshi Kobayashi for giving me this great opportunity to go to Bayreuth. This exchange was financially supported by JSPS programs (JSPS Overseas Challenge Program for Young Researchers, DC1, KAKENHI 17J00332).