

自然史学におけるフィールド調査の重要性 ～ガラパゴス諸島で見たもの～

倉田 薫子（自然科学科）

「進化の実験室」ガラパゴス

2010年9月から2011年8月までの1年間、南米エクアドル共和国ガラパゴス諸島のチャールズ・ダーウィン研究所へ、客員研究員として滞在した。

ガラパゴス諸島は、南米大陸から赤道に沿って西に1000km、海底のホットスポットから噴出するマグマを起源として形成された海洋島である（図1）。海洋

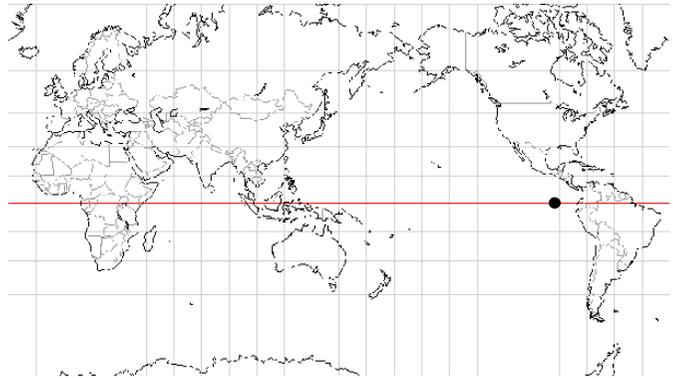


図1. ガラパゴス諸島の位置（●）。

島とは、過去に一度も大陸と陸続きになったことのない島で、大陸島と異なり隔絶された環境のため、生物の移入が著しく困難である。海洋島に外部から生物が長距離散布されるには3つの方法（3W）しかない。1つ目は風に乗ってやってくる方法（Wind、鳥類や羽を持つ昆虫など自力で飛んでくるもの、季節風などに乗ってやってくる軽い種子や孢子、小さな虫など）、2つ目は、海流に乗ってやってくる方法（Wave、海水に強い種子、海洋生物、ハ虫類など代謝が遅い生物も流木などに乗って海流によって到達したと考えられている）、3つ目は鳥によって運ばれる方法（Wing、食べられたり体表について運ばれる種子、小さな虫、カタツムリなど）である。こうして到達することのできる生物は限られており、その不調和な生物相のため海洋島の生態系には空いているニッチが多く存在する。そのため空きニッチへの急速な適応放散が起きて生物の種分化が顕著に起こり、海洋島には固有種が多く存在すると考えられている。

またガラパゴス諸島は大小100以上もの島からなる群島である。そのため同じ祖先種をもつ生物種がそれぞれの島に適応し、固有種を生じている。これを群島効果という。有名なものではフィンチ（13種）、ゾウガメ（11亜種）、ウチワサボテン（6種8変種）、スカレシア（15種）などが知られている。

このようにガラパゴスは極めて特殊な地理的条件から豊富な固有種を生み出している。それゆえに1835年にチャールズ・ダーウィンがここを訪れたとき、不思議な生き物たちを目の当たりにして進化論を着想するに至ったのである。

フィールド調査

筆者がこのような島に長期滞在する目的は、古くダーウィンが見た種分化の実態を一つでも多く観察することである。といっても、進化論の概念自体がなかった時代と同じでは進歩がない。それぞれの島の植物の形態を測り、分子生物学的手法で種分化・種形成を明らかにすることから、新たな進化の過程が明らかになるのではないかと考えた。これまで報告されている種分化研究の多くは動物であるが、植物は一度芽を出した環境から逃れることができないため、より適応し、進化していく必要がある。環境からの選択圧によって形態が顕著に変化し、さらに地理的隔離によって遺伝子交流が絶たれた場合、島の中での交配が進み最終的には固有種として種分化する可能性が高い。これがガラパゴスの固有種率が高くなった要因であると考えられる。

フィールド調査には多くの危険が伴う。ガラパゴス諸島ではほとんどが無人島であるため、通常よりも安全確保が困難になる。そのために国立公園管理局が厳密な管理を行っており、数多くの制約と綿密な計画・準備が必要となる。たとえば装備の1つとして、衛星電話や無線機、鉋や膨大な数の救急用品、GPS、防水バッグ、一人1日4リットル以上の水を持ち歩くことが義務付けられている。ガラパゴス諸島の陸地のほとんどを覆っているパホエホエと呼ばれる粘性の低い溶岩は、風化すると容易に崩落し大事故につながる。過去には有人島から救急ヘリが事故現場へ向かったこともある。また強烈な日差しと溶岩の輻射熱による日射病・熱射病は日常茶飯事だ。無人島へは船をチャーターして向かう。遭難、漂流、事故など、あらゆる可能性を考慮しなければならない。

一方で生態系保護の観点からも制約は多い。研究者が立ち入ったために生態系が大きく破壊されたり、外来種がもたらされたりしてはならない。その管理のためにも、サンプルの島間移動、調査のために立ち入る場所とルートを選定、必要サンプルの種類と数の事前申請など、多くのペーパーワークが義務付けられていた。

フィールド調査は図2に示した7つの島で行った。このうち有人島(●)はSCZ、SCB、ISA、FLOの4つで、これらの島は季節を変えて繰り返し訪れた。

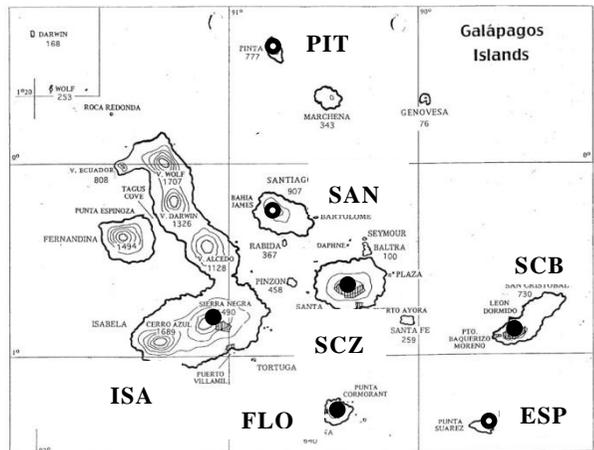


図2. ガラパゴス諸島の地図。●は有人島、○は無人島を示す。()内は略号;サンクリストバル島(SCB)、サンタクルス島(SCZ)、イサベラ島(ISA)、フロレアナ島(FLO)、ピンタ島(PIT)、サンチャゴ島(SAN)、エスピノラ島(ESP)。

熱帯域にある島は降水量が多いと思われがちであるが、ガラパゴス諸島では基本的に乾燥が卓越している。南極からの海流が強い7月から10月まで（ガルア季）は海水温も気温も低く、低地ではほとんど雨が降らない。一方で海流が弱く気温が上がる2月から4月（雨季）には時々低地で比較的強い雨が降る。この季節性が、予想以上にフィールド調査のタイミングを厳密に規定するため苦労することとなった。

フィールドで見た形態的分化(1) - レコカルプス

海洋島では、キク科が顕著な形態変化や種分化を見せることは知られている。ガラパゴスに自生する種子植物85科206属500種のうち、キク科は1つの科としては最多の22属56種を擁し、うち42種が固有種である。つまりキク科植物の固有種率は75%にも達する。

キク科のレコカルプス (*Lecocarpus*) 属はガラパゴス諸島のみ分布する固有属で、3種を擁し、それぞれの種は1つの島にのみ固有化している (*L. dawinii*: SCB, *L. pinnatifidus*: FLO, *L. lecocarpoides*: ESP)。このうち *L. dawinii* と *L. pinnatifidus* を図3に示した。黄色い舌状花をもつ花序の形態は両者に大きな違いが見られないが、特徴的なのは葉の形態である。*L. dawinii* は浅く切れ込み、縁が裏側に巻き込んでいるのに対し、*L. pinnatifidus* は深く羊歯状に切れ込んでいる。

これについては過去に興味深い研究が行われている。Brok & Adersen (2007) は、それぞれの島に生育しているレコカルプスの形態的相違は、環境適応よりも遺伝的浮動による現象ではないかと提唱した。隔離された集団内では遺伝的多様性も減少する一方で、集団間では遺伝子流動が制限されるため分化が促進される。したがって島ごとの形態的相違は、創始者効果と偶発的な遺伝子型の固定によってより適切に説明できる。確かに2種の自生集団はどちらも乾燥条件に生育しているが、形態分化は本当に環境適応と関連がないのであろうか。

フィールドで見た形態的分化(2) - ダーウィニオサタムヌス

同じくガラパゴス諸島固有属であるキク科ダーウィニオサタムヌス (*Darwiniothamnus*) 属の事例を見てみよう。この属は3種2亜種を擁し、*D. lancifolius* (2亜種を含む) は FER (フェルナンディナ島) と ISA に、*D. alternifolius* は ISA に、*D. tenuifolius* は FER、FLO、ISA、PIT、PIZ (ピンソン島)、SCZ、SAN と広域に分布する。このうち *D. lancifolius* と *D. tenuifolius* を図4に示した。この2種もレコカルプスと同様に花の形態は酷似しており、葉の形態が幅広の披針形であるか、針状であるかの違いである。象徴的なのは ISA の Sierra Negra (SN) 火口に沿って分布しているこの2種である。SNの南側斜面は、南東方向から吹いている風によって比較的雨の降りやすい環境である。しかし火口を回り込むと、風が吹かない乾燥した溶岩流跡地になっている。ここまでの約10キロの道のりでは段階的に降雨量が増えるため、乾燥度合いが異なっている。南側斜面よりには幅広型の葉をつける



図 3. レコカルプスの 2 種。左 : *L. dawinii* (SCB)、右 : *L. pinnatifidus* (FLO)。



図 4. ISA のダーウィニオサムスの 2 種。左 : *D. lancifolius*、右 : *D. tenuifolius*。

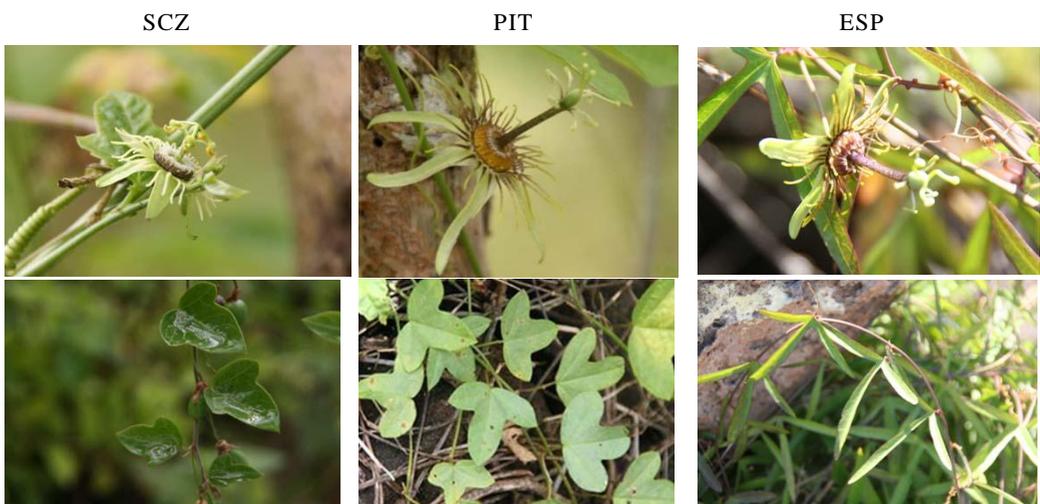


図 5. トケイツウ属 *P. suberosa* または *P. tridactylites* の島ごとの花と葉の変異。左 : SCZ、中 : PIT、右 : ESP. PIT と ESP の花は、雌蕊が SCZ に比べて極端に長い。

タイプが、北東斜面には針状型の葉をつけるタイプが分布している。針状型の葉を持つ *D. tenuifolius* は、湿潤高地から乾燥低地までに自生し、生育環境を厳密に決めていないようである。一方で *D. lancifolius* は乾燥地にみられる。一般に乾燥条件への適応として蒸散を抑えるために葉を細くすることは知られているが、この2種にはそれが当てはまらない。それならば SN 火山における段階的な棲み分けは何を意味しているのだろうか。レコカルプスの例では、小さな集団における遺伝的浮動が形態的分化を明瞭にしているとの見解が示されていた。一方でダーウィニオサムヌスでは、隔離されていない環境下で形態の2型性が現れている。この2種は花の開花時期や形態がほとんど同じことから、生殖的分化を厳密に果たしているようには考え難い。ダーウィニオサムヌスの遺伝的分化に関しては今後の研究が必要である。

フィールドで見た形態的分化(3) - トケイソウ 2種

トケイソウ (*Passiflora*) 属は南米で適応放散したとみられる大きな属で、いくつもの節に分かれている。ガラパゴスには比較的花が小さく目立たない *Decaloba* 節が3種自生しており、うち1種 (*P. colinvauxii*) はガラパゴス諸島でも SCZ にのみ生育するものである。残りの2種 (*P. suberosa*, *P. tridactylites* : それぞれ s 型、t 型と表記) は南米大陸にも広く分布しており、形態が多様であるため分類も混乱している。当初筆者は固有種 *P. colinvauxii* に着目し、この種がどのように祖先種から種分化したのか遺伝的に明らかにしようと考えていた。ガラパゴス諸島に分布する固有種の多くは南米大陸産の近縁種と共通祖先をもち、何らかの方法で移入したのち進化したものであると考えられており、稲川 (2010) もヤドリギ属植物を用いてこれを支持している。しかしながら *P. colinvauxii* については広域種 *P. suberosa* と *P. tridactylites* を含めた属内の系統関係が明瞭に示していない (滝沢、2010)。

多賀 (2010) はこの2種の葉の形態的特性を明らかにするため、ダーウィン研究所に収蔵されている標本を用いて面積や形状を数値化して比較した。それによると、t 型、s 型はそれぞれ明瞭に分化するものの、一部の個体で中間型とみられる形状の葉が存在することが明らかになった。また葉のサイズ、切れ込みの深さなどは島ごとに明瞭に分化する傾向が現れた。これらの種は、今後の島の環境変化や遺伝子流動の有無によって、種内分化が起こる可能性が示された。

一般に葉の形態は環境による影響を受けやすく変異が大きいことが知られているため、植物の分類で多く用いられる花形態を計測することにした。標本から、t 型は無人島の ESP、SAN と ESP に多く分布していることが分かった。実際のフィールド調査では、SCZ では卵形で切り込みの浅い葉と短い雌蕊の花を持ち、完全な s 型であった。一方で ESP では、線状の葉と長い雌蕊の花を持ち、典型的な t 型であった。しかし PIT の試料は、葉の形態は完全な S 型、花の形態は t 型だったのである (図 5)。

これらのサンプルを並べて比較してみると、t 型の葉の面積は極端に小さいことから、

光合成特性が s 型と異なることが予想された。このことが生態学的に何らかの意味を持つとしたら、他の種でも起きている葉の顕著な形態的分化を説明する一助となるかもしれない。もし意味を持たないとしたら、葉の形態的分化はやはり遺伝的浮動の結果であるといえよう。また花の形態に変異があるということは、別の意味を持つ可能性もある。分類の重要な形質である花形態は、繁殖成功にかかわるので葉よりも変異を起こしにくいのである。ガラパゴス諸島内での 3 種の系統関係が明瞭に示せなかったのも、種間交雑等が原因なのかもしれない。今後 t 型と s 型の遺伝子流動や交雑の可能性に関して検討していく予定である。

100 年前の標本が、今、意味を持つ

今回の滞在を通してもっとも重要な情報を与えてくれたのはダーウィン研究所の標本庫である。ダーウィン研究所は 1964 年にベルギー・ブリュッセルに本部を置くダーウィン財団によって設立され、以来この島の研究活動を担ってきた。現在では研究のほかに、住民にこの島の自然環境の素晴らしさを知ってもらうこと、この自然環境を維持することの重要性を啓発する活動に重点を置いている。

標本庫はこの島で採られたサンプルを収蔵している。植物部門に所属するスタッフたちは離島の植物をその環境の一部を切り取る形で選択・採集し、新聞と野冊で挟み持ち帰る。そして標本庫で乾燥、同定、標本作成を行ってデータベース化する(図 6)。それは「いつ、どこに、何があったのか」という記録として何百年も残る重要な情報となる。これは **General collection** (一般収集) と呼ばれ、自然史学研究者にとって、地味であるが重要な仕事である。



図 6. ダーウィン研究所の標本庫。

ガラパゴス諸島には固有種が多く、さらに島ごとに分化しているものも少なくないので、諸島全域の自然を理解するためにはあらゆる植物の基本情報が必要である。また対象植物の個体変異や、小進化の兆候を見つけるためにも、標本資料の役割は大きい。

古いものには価値がある。今は知りえない過去の環境とその変遷、今後どのように我々は生きるべきなのか、進化と保全に対して莫大な情報を与えてくれる。100 年前に採られた標本は、地球環境の歴史の証人なのである。標本は世界人類の宝であり、きちんと管理し後世に伝えていくこと、そして今の環境もまたここに保存し、将来的な研究に役立てる

ことが望まれる。

科学の最先端はフィールドワークにある

フィールドワークというと、汚くて危険で大変な調査、あるいは単に好きなことをやって遊んでいるのだと両極端な誤解を受けることが多い。もちろん野外での調査にはリスクもあるし、慣れてくればそのリスクを楽しんでいることもある。しかし何もリスクイナ冒険が好きでフィールドへ出ているわけではない。机の上だけでサンプルを触っていても、その生物の生き方は見えてこない。生きている対象物をありのままの状態で見ること、その生物持つ周囲との関係性（すなわち自然環境）を見ることが、自然史学の中では重要なのだ。生きている姿がその生物のかたちや生き方を決めていたとしても過言ではない。それを自分の眼で確かめ、環境を理解することにより、正確な進化への考察、自然史的な見方ができるようになるのである。

身の回りを見渡しても、自然からのヒントを得て開発されたものが多くある。グライダーは熱帯雨林に生育するアルソミトラの種子からデザインされたものだし、無重力万能テープ（マジックテープ）はゴボウの種子が服にくっつくことから開発されたものである。今この瞬間に役に立つことが連想できなくても、クラゲの発光物質のように後々人類にとって有用になることは多々ある。近年、基礎科学分野への研究予算が削減されているが、基礎科学なくして応用の発展はない。地球環境の変遷を予測したり、人間が生きていくヒントは、まさに自然の中にあるのである。今回のガラパゴス長期滞在という貴重な経験を生かして、基礎科学の発展へ少しでも貢献できればと思う。

最後に、ご支援いただいた学校法人五島育英会と東京都市大学、ご迷惑をおかけした自然科学科の先生方、卒業研究指導を十分に見られなかったにも関わらずいくつかの知見を得てくれた多賀聡君、滝沢耀君、稲川崇史君へ深く感謝申し上げます。

<参考文献>

Brok C.S., & Adersen H. (2007) Morphological variation among populations of *Lecocarpus* (Asteraceae) on the Galapagos Islands. *Botanical Journal of Linnean Society* 154:523-544.

McMullen C.K. (1999) Flowering plants of the Galapagos. Cornell University Press.

Wiggins I.L. & Porter D.M. (1971) Flora of the Galapagos Islands. Stanford University Press, Stanford, California.

稲川崇史 (2010) ガラパゴス諸島固有ヤドリギ *Phoradendron henslowii* の系統的位罫づけ. 東京都市大学卒業論文.

多賀 聡 (2010) ガラパゴス諸島在来 *Passiflora* 属 4 種の形態的分化と分類の再検討. 東京都市大学卒業論文.

滝沢 耀 (2010) ガラパゴス諸島在来 *Passiflora* 属 4 種の系統的位罫づけ. 東京都市大学卒業論文.