David B. Wake 1999. A crisis for the world's amphibians: an issue in biodiversity science. Aeramook, Asahi Shimbun Extra Report & Analysis, Special Number 54:88-91 (In Japanese)

フィールドから生物ワールドへ⑬

カエル

絶滅しゆくカエルは何を教えるか

世界中の両生類が危機的状況

一九八〇年代に世界中の生物学者が個々に両生類の多くの種、特にカエルの仲間が以前より減少していることに気付き始めていた。そして、八九年末に英国カンタベリーで開かれた第一回両生類・爬虫類国際会議において研究者たちは各々の経験を比較し、お互いの観察がよく似ていることを発見する機会を初めて持った。しかし一方では、まったく減少のみられない多くの種や、減少に関する報告のない地域があった。初めは集団密度が自然に変動しているにすぎないのではないかという疑いがあった。なかには一部の研究者が過剰反応をしていると考える生物学者もいた。別の大方の見方は、生息域の変化が多くの減少例を説明できるというものであった。

一九九〇年代半ばまでに蓄積した報告は、何か異常なことが進行し世界中の両生類が事実、危機的状態にあるという最初の印象を裏付けていた。不思議なことに、両生類が減少したりその姿が見えなくなったというのは、オーストラリアやアメリカ合衆国の広大な国

David B. Wake

デービット・B・ウェイク

カリフォルニア州立大学バークレー校総合生物学教授。同脊椎動物博物館長。米国国立科学アカデミー会員。一九三六年南ダコタ州ウェブスター生まれ。南カリフォルニア大学大学院博士課程修了。著書のほか二百二十五編以上の論文、ポピュラー科学記事などを執筆。

立公園を含む比較的保護されている地域や、十分に保護されていることで有名なコスタリカのモンテヴェルデクラウド森林保護区で報告されたことである。九七年までに、ある種の絶滅や他の種の減少に関する確かな証拠が著名な科学雑誌に発表された。もはや危機が差し迫っていることは疑う余地もなかった。

環境指標としてのカエル

研究者が不思議に思ったことは、最もヒトの手の加えられたいくつかの生息域におけるカエルが明らかな影響を何ら受けていないことである。インド、ベトナム、インドネシア、中国、日本、アメリカ東部、西ヨーロッパの農業圏にはあいかわらずたくさんのカエルが生息している。ヒトと共存する地域のカエル集団が明らかな安定性を示す一方、保護区に棲むカエルが減少したり姿が見えなくなったのは一体どうしたことだろう?

ひとつの可能性は、ヒトの手が強く入った土地に生息するカエルは長い間、おそらく日本、東南アジアあるいは西ヨーロッパの場合には数千年をかけて、次第に増加したヒト集団と共進化したことが考えられる。その結果、こうした地域では(例えば、田んぼのように多くのカエルにとって食物、生殖、生活に好都合な機会を与える)、変化する農業環境に適した個体が生き延びてきた。しかしながら、保護地域に生息する種は生活環境の変化などほとんど経験してこなかったのだ。いいかえれば、これらのカエルは他の生物に対しても同様に影響を与える可能性のある、ある種の最近の環境変化を測るもっともよい生物的指標であるかもしれない。

カエルのもつ多くの性質は、環境の健全な状態を測る有効な指標であることを示唆している。カエルは幼生のときは水棲で、成体になると半水棲ないし陸棲という両棲の典型的な生活環をもつ。だから、一世代の間にさまざまな環境を経験する。オタマジャクシは草食性だが、成体のカエルは肉食性である。そのためカエルはいろいろな食物をとっている。カエルは湿った半透性の皮膚を持ち、その皮膚を通して呼吸をする。このように、カエルと環境はまさに直接的な関係を持っている。カエルの生活史の特徴(例えば、一度にたくさん卵を生むこと)や実験操作の容易さは、環境要因の影響を生態学的に研究するのに適している。

一方で、カエルは約二億年という古い歴史を持つグループである。もしヒトの一生というくらいの短い期間に何かがカエルに起こるならば、私たちはそのことを真摯に受け止めなければならない。

私たちにわかっていることは、数種のカエルが完全にその姿を消したことである。これらのうちの主なものは、コスタリカの有名なオレンジヒキガエル(Bufo periglenes)とクイーンズランドのイブ

クロコモリガエル(Rheobatrachus)(訳注:メスが胃袋の中でオタマジャクシを育てる)であるが、他にもあまり知られていない種が相当数いる。カエルの減少はコスタリカやパナマ、オーストラリア、北アメリカ西部で著しい。カリフォルニアのラッセン火山国立公園では長い間繁殖地として知られてきた場所の九〇%以上で、もはやカエルの姿を見かけることはない。また、ヨセミテ国立公園でも五〇%の繁殖地にカエルの姿はない。

一九九九年七月、私はフィールド経験の非常に豊かな生物学者とともにメキシコにいたが、あまりに多数のサンショウウオやカエルがいなくなっていることに衝撃を受けた。かつてのセロ・サン・フエリペには、百匹ものサンショウウオを一時間あまりの間に集めることができるほどたくさんいた。それがいまでは、四人で一日中探しても一匹も見つからなかったのだ。幸いなことに、他の場所ではこれほどは悪くはなかった。場所ごとに異なる理由は、謎のままである。

途方もない数の原因

科学者がこの現象を詳細に調べるにつれ、減少に関与する途方もない数の要因が出てきた。例えば、モンテヴェルデ保護区の五〇%もの種で観察された減少とエルニーニョ現象に関係した大干ばつの時期とが一致する強い証拠がある。しかし、多くの生物学者にとって、そんなにも長く生存してきた種が、私たちの経験からは極端とも思える一時的な気候変動によって一掃されてしまわなければならないなどという理由は考えにくい。確かに過去百万年の間にはもっと厳しい気候の変動があったであろう。そしてこのエルニーニョ現象によって、オーストラリアの水棲のカエルやカリフォルニアの山岳地帯のカエルの絶滅を説明するわけにはいかないだろう。

すべてではないにしても、多くの絶滅危惧種が山岳地帯に生息する。南極大陸上空のオゾンホールと、増加した紫外線照射量の生態系への影響については社会的関心が集まっている。ある生物学者はオレゴン州の山岳地帯のある種が環境中のUV-B(訳注:波長が三一五〜二八〇ナノメートル=十億分の一メートルの紫外線で、このほかにUV-A[四〇〇〜三一五ナノメートル]とUV-C[二八〇〜一〇〇ナノメートル]に分類される)によって悪い影響を受けていることを厳密な実験によって示した。ある種では卵が正常に孵化しないが、同じ池の別の種ではUV-Bによる損傷を修復する酵素(フォトリアーゼ)によって明らかな害は出ない。紫外線は世界のいろいろな地域で重要な要因であるかもしれないが、それでもすべての場合を説明できないだろう。相互効果があると話はややこしくなる。UV-Bで損傷を受けた卵には藻類が着きやすくなるのだが、この藻類はすぐに卵をダメにしてしまう。

さらに困惑させられる事実は、病気や死んでしまったカエルがめったに見つからないことである。奇形や死にかけている、あるいは死んだカエルが報告されたのは、つい最近のことである。これらは何が起こっていて、どう対処すればよいのかを見つけるよい手がかりを与える。

重度の異常をもったカエルの出現

最近人々の注目は、両生類の減少と関連している一つの現象に集中している。北米では、無肢のカエルやサイクロピア(中央にある単眼)だけでなく多肢や多指あるいはこれらの両方を持つ重度の発生異常を示すカエルの発見例がたくさんある。複数の肢のカエルは特に話題になり、さまざまな示唆がその説明のために与えられた。あるグループの人々は環境汚染物質が原因であると議論している。その理由は、殺虫剤や除草剤が分解してできるレチノイドという一群の化学物質が、実験室で四肢の奇形をもたらす催奇形物質として知られているからである。汚染物質はカエルにそれとは別の影響を与えた可能性もある。

別のグループの人々は多肢のカエルや無肢のカエルでは、後肢の近くに包嚢をつくる吸虫の幼虫がオタマジャクシに感染しやすくなっている結果であると議論している。異常は圧倒的に後肢にあらわれる。カエルの前肢は鰓を覆う鰓ブタの中で発生している期間は、外界から保護されている。また、包嚢が機械的に正常な肢の発生をさまたげるといっても、それが肢芽を完全になくしているのか、あるいは発生の初期で肢芽が分裂し一つであるべきところに二つまたはそれ以上の肢や指を形成する原因になっているかどうかは、議論が分かれている。なぜ寄生虫の負荷がそんなにも大きいのかも不明であるが、カエルの免疫防御機構が弱められている兆候かもしれない。

たくさんの異なった種のカエルが、初めは東コスタリカで、その後西パナマで死にかけたり死んだりしているのが発見された。これらのカエルは、ツボカビ属に属する未知のカビに感染している。このカビは皮膚に感染し、なかんずく正常な呼吸を阻害する。ほぼ同じころ、類似の、いや多分同種の菌類がオーストラリアのカエルで見つかっている。その同じ菌類がカリフォルニアでも見つかった。これは最近の新しい感染原が多くのカエルの減少や絶滅に重要な影響をあたえた可能性を示している。しかしながら、他のすべてのありうる説明と同様に、これが一般的

A Crisis for the World's Amphibians: an Issue in Biodiversity Science

David B. Wake
Museum of Vertebrate Zoology and Department of Integrative Biology
University of California, Berkeley, CA 94720-3160, U. S. A.

During the 1980's biologists around the World independently began noticing that many species of amphibians, especially frogs, were less abundant than they had been previously. Only during the First World Congress of Herpetology, held in Canterbury, England, in late 1989, did these researchers have an opportunity to compare experiences and to discover that their observations were similar to those of others. Yet, many species seemed to be unaffected, and in some regions there were no reports of declines. At first there was a suspicion that only normal cycles of population density were involved, and some biologists thought others were over-reacting. The other common explanation was that habitat modification accounted for many instances of decline.

By the time of the mid-1990's accumulated information supported the earlier impression that something unusual was taking place and that amphibians around the world were indeed at risk. Curiously, amphibian declines and disappearances were being recorded from relatively protected areas, including large national parks in Australia and the United States of America, and the renowned and well protected Monteverde Cloud Forest Reserve in Costa Rica. By 1997 solid evidence of the disappearances of some species and the declines of many others had been published in highly respected scientific journals, and there was no longer any doubt that a crisis was at hand.

Researchers were puzzled because frogs in some of the most highly modified habitats were not evidently affected. Frogs remained abundant in agricultural districts of India, Vietnam, Indonesia, China, Japan, eastern United States and western Europe. What could explain the apparent stability of frog populations in areas where they co-occurred with humans, but declines and disappearance where frogs were living under protection?

One possibility is that frogs in areas of intense human occupancy have co-evolved with slowly growing human populations for a long time, perhaps several thousand years in the case of Japan, southeastern Asia and western Europe, and survivor phenotypes have been heavily selected in these areas for agricultural habitats (such as rice paddies, which provide opportunities for feeding, breeding and a good life for many frogs). However, those species in protected areas had never experienced much habitat change; they might be the best biological indicators of some recent environmental change that has implications for organisms other than frogs as well.

Many attributes of frogs suggest that they might be effective as indicators of the state of health of the environment. They typically have a bimodal life cycle, being aquatic as larvae and semiaquatic to terrestrial as adults, and thus experience a range of environments during a single life span. As larvae they are herbivorous, whereas as adults they are carnivorous, so they are sampling a variety of food. They have moist, semipermeable skins, and they respire through their skin, thus placing them in a very direct relationship with the environment. Attributes of their life history (e.g., large clutch sizes and ease of experimental

な説明であるかどうかは疑わしいくつかの理由がある。例えば、死にかけたカエルが見つかっていないモンテヴェルデ保護区の状況をこれで説明できると期待するわけにはいかない。

次世紀に生物の大量絶滅か

カエルに何が起きているにせよ、何らかの形でヒトの活動と関係があると信じるたくさんの理由がある。カリフォルニアのシエラネバダでは農業が進んだセントラルバレーからの距離と、最も遠く離れた山岳地帯の生息地域にいるカエルも含めて、カエルの生息域との間に驚くべき相関がみられた。殺虫剤、除草剤そして化学肥料の残留物が関連している。カリフォルニアでは外来種（ウシガエルやニジマスなど）の悪い影響が分かっている。ヒトは、UV－Bの照射量を変えるような気象変化に一役かっているし、世界中にツボカビ菌類を拡散させるのに関係してきたかもしれない。

カエルは全世界に衝撃を与えている広範な生物多様性の危機を示す一つの例である。次の世紀には、私たちは膨大な種の絶滅を目撃するだろう。それは多分古生物学の記録で知られている大量絶滅に匹敵しよう。カエルはこうした衰退を示す一つの例だ。そしてカエルは、人口爆発やそれに伴う自然環境の劇的な変化の結果がもたらす明らかな直接的影響とは別の、生物絶滅の原因の本質とは何かを理解することを助けてくれるだろう。

（訳・堀田薫子　総合研究大学院大学先導科学研究科助教授）

参考文献

Sedgkin, R. C. and N. W. Cohen. Declining Amphibians. In A Natural History of Amphibians. pp210-251 (Chapter 20). Princeton University Press, Princeton, 1995.

Duellman, W. E. Global distribution of amphibians: patterns, conservation and future challenges. In Patterns of Distribution of Amphibians: A Global Perspective. pp 1-30 (Chapter 1). W. E. Duellman (ed). The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1999.

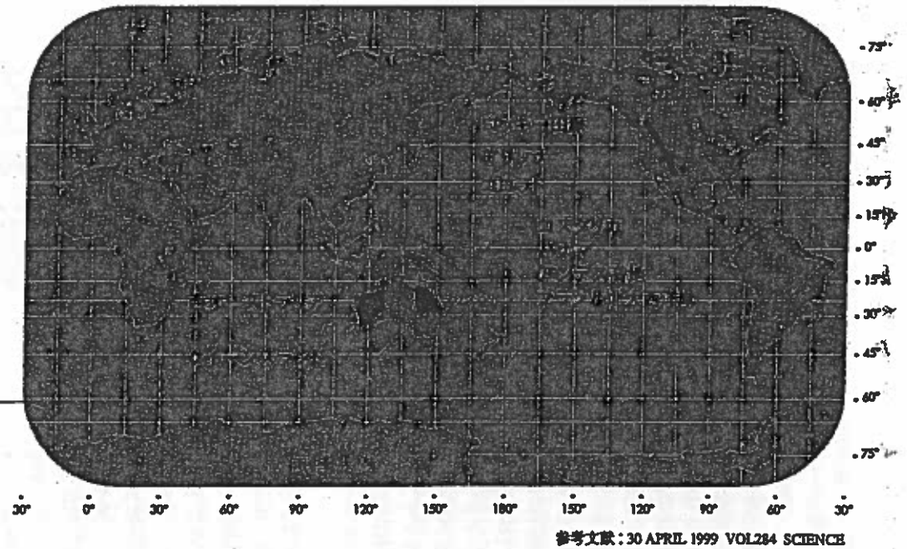

図　カエルの減少または絶滅が報告されている地域

参考文献：30 APRIL 1999 VOL284 SCIENCE

manipulation) make them suitable subjects for ecological studies of the impacts of environmental variables. However, they are an ancient group (ca. 200 million years old); if something is happening to them during our short life spans, we should be concerned.

What we do know is that several species have completely disappeared. Chief among these are the famous Golden Toad (Bufo periglenes) of Costa Rica, and the Stomach-brooding Frogs (Rheobatrachus) of Queensland, but there are also a number of other less well known species. Declines are severe in Costa Rica and Panama, Australia, and western North America. More than 90% of historical breeding sites no longer have frogs in Lassen Volcanic National Park in California, and 50% of the known breeding sites in Yosemite National Park now lack frogs.

As scientists studied this phenomenon in greater detail, a confusingly large number of potential factors responsible for the declines emerged. For example, there is strong evidence that the declines and disappearances of about 50% of the frog species in the Monteverde Reserve coincided with a period of extraordinary drought associated with an El Niño climatic effect. But to many biologists it seems extraordinary that species that have existed so long should be wiped out by a period of weather that is only extreme in our experience. Surely there have been more severe climatic events during the past one million year, one supposes. And this event will not account for the disappearance of aquatic frogs in Australia, or for the montane frogs in California.

Many, but not all, of the declining species occur in montane areas. There has been public concern about the ozone hole above the Antarctic Continent and the possibility of increased ultraviolet light (UV) and its impact on living systems. Biologists have demonstrated in rigorous experiments that some species in the mountains of Oregon are negatively affected by ambient levels of UV-B. Eggs fail to hatch normally in some species, whereas other species in the same ponds have an enzyme (photolyase) that is capable of repairing the damage done by UV-B and there is less evident harm. This factor may be of importance in different parts of the world, but it, too, will not explain all cases. Synergistic effects complicate the story; eggs damaged by UV-B are more susceptible to attack by an alga that is capable of rapidly destroying eggs.

A perplexing fact is that sick frogs and corpses are rarely found. Only recently have deformed, dying and dead frogs been reported, and these offer the hope of discovering what is happening and then taking corrective actions.

Recently public attention has been drawn to a phenomenon possibly related to the decline of amphibians. In North America, in particular, there have been numerous instances of the discovery of frogs that have severe developmental anomalies, such as missing limbs, and cyclopean eyes (single median eyes), but also with multiple limbs, multiple digits, or both. The multilegged frogs have received a lot of publicity, and several suggestions have been made to explain their occurrence. One group of workers has argued that environmental pollutants are the cause, because a group of chemicals known as retinoids result from the breakdown of pesticides and herbicides and these are known teratogenic chemicals that will cause limb abnormalities in laboratory experiments. Pollutants could be having other impacts on frogs. Another group of workers argues that the multilegged frogs, and even frogs with missing legs, are the result of high levels of infection of the larvae of frogs by larvae of trematode worms, which encyst in the vicinity of the hind limbs. Abnormalities overwhelmingly affect hind limbs, and in frogs the forelimbs are protected from the environment during their development within the operculum, which covers the gills. The argument is that the cysts mechanically interfere with normal limb development, either obliterating the limb bud entirely, or causing it to split early in development and form two or more limbs, or digits, where there should have been only one. Why parasite loads are so high is unclear, but it could signal a weakening of the frog immunological defense mechanisms.

Frogs of many difference species have been discovered to be dead or dying, initially in eastern Costa Rica and then in western Panama. These were discovered to be infected by a previously unknown fungus, belonging to a group known as chytrids. This fungus infects the skin and may interfere with normal respiration, among multiple effects. At about the same time a similar, possibly even the same, fungus was found in a number of Australian frogs, and the fungus has also been found in California. This raises the possibility that a recent and maybe new infectious agent is responsible for many of the declines and disappearances. However, as with all of the other potential explanations, there are reasons to question if this is a general explanation. For example, there is no reason to expect this explanation to work for the Monteverde Reserve, where dying frogs were not seen.

There are many reasons to expect that whatever is happening to frogs is related in some way to human activities. In the Sierra Nevada of California there is a striking correlation between distance from the heavily agricultural Central Valley and the presence of frogs, with frogs persisting in only the most distant mountains. Pesticide, herbicide and fertilizer residues have been implicated. In California the negative impact of alien species (introduced bull frogs and trout) on frog populations has been demonstrated. Humans play a role in climate change that is changing levels of UV-B, and humans may have been involved in moving the chytrid fungus around the world.

Frogs exemplify the general biodiversity crisis that is impacting the entire world. Within the next century we will certainly see an enormous amount of extinction, perhaps equivalent to the mass extinctions known in the paleontological record. Perhaps the frogs will serve as an example and as a waning, and help us understand some of the causes of extinction beyond the obvious direct impact we as humans have as a result of our rapidly growing population and associated dramatic modification of natural environments.