

---

## 気候温暖化と両生類の繁殖のタイミング： 東京都多摩地区における両生類個体群の一例

草野 保<sup>1</sup>・井上 雅文<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 192-0397 八王子市南大沢1-1 首都大学東京・理工学研究科・生命科学

<sup>2</sup> 612-8393 京都市伏見区下鳥羽渡瀬町35-1 株式会社京都科学

Climate warming and timing of breeding of amphibians:  
A case of amphibian populations in the Tama district, Tokyo

By Tamotsu Kusano<sup>1</sup> and Masafumi Inoue<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Biological Sciences, Graduate School of Sciences and Engineering, Tokyo Metropolitan University, Minami-ohsawa 1-1, Hatchioji-shi, Tokyo 192-0397, Japan*

<sup>2</sup> *Kyoto Kagaku Co., Ltd., 35-1 Shimotoba, Watarise-cho, Fushimi-ku, Kyoto 612-8393, Japan*

---

近年、地球規模での両生類の減少が危惧されているが、ここ日本でも、特に大都市近郊でのこの数十年の両生類個体群の衰退は際立っている。両生類の減少や絶滅の原因としては、人為的な環境破壊が際立つが、これ以外に酸性雨、残留農薬の拡散などとともに、地球温暖化に伴う気候の変化も上げられている（松井，1996；Blaustein et al., 2003；Pounds and Puschendorf, 2004）。両生類の皮膚は薄く、外界からの様々な影響を受けやすい。極端な温度変化や乾燥は致命的だろう。また、彼らの繁殖活動は温度や降雨の影響を受けるために、気候の変化は個体群に深刻な影響を与える可能性がある（Blaustein et al.,

2001）。しかしながら、地球温暖化に伴う気候変動のような変化は、長期間に徐々に進行するため、その両生類個体群への影響を検出するのは容易ではない。短期間の調査では不可能で、最低でも数十年レベルの調査が必要だろう。地球温暖化の生物群集への影響が頻繁に話題に上がっている今日でも、その両生類の繁殖への影響の有無を検証した報告はまだ数少ない。

英国のカエル類3種とイモリ類3種に関して、17年間にわたり繁殖活動をモニタリングした結果、カエル類1種を除きすべての種で温暖化に伴う繁殖活動の早期化の傾向が明らかとなった（Beebee, 1995）。カエル類では

初産卵日が2~3週間早まり、イモリ類では繁殖場への初出現日が5~7週間早まったという。また、北米でも6種のカエル類の初鳴き日を、20世紀の初めと終りのそれぞれ約10年間のデータを比較し分析したところ、4種で10~13日の早期化の傾向が見られた(Gibbs and Breisch, 2001)。一方、英国での19年間のヒキガエル(*Bufo bufo*)の繁殖調査(Reading, 1998)や、北米での20年弱の4種のカエル類の調査では(Blaustein et al., 2001)、上記のような繁殖開始時期に統計的に有意な早期化傾向は検出できなかった。このように、両生類の繁殖活動開始時期の長期的な変動パターンは、種により地域により様々で、一貫した結果は得られていない。それでは、同じ温帯地域の日本では、両生類の繁殖活動パターンに温暖化の影響が現れていないのであろうか。残念ながら、そのような繁殖開始時期の長期的な変化を定量的に分析した報告は、今のところ見当たらないようである。

我々は、東京都多摩地区における2箇所の調査地において、両生類4種5個体群の繁殖活動を10年から30年にわたって観察してきた。今回は、それらの調査データからそれぞれの個体群の初産卵日を分析し、繁殖開始時期の長期的な変動の傾向および気候要因との関連性について報告する。

#### 調査地及び方法

今回の調査は、東京都多摩地区の2箇所において行った。一つ目は、日の出町羽生のスギ(*Cryptomeria japonica*)およびヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の植林地で行った(北緯35°44', 東経139°14', 標高200 m)。北向き斜面の端にある小さな池(面積は10 m<sup>2</sup>弱、水深は最大でも15 cm程度)では、1975年よりトウキョウサンショウウオ(*Hynobius tokyoensis*)の繁殖活動の観察を行ってきた。この池では、他にヤマアカガエル(*Rana ornativentris*)、シュレーゲルアオ

ガエル(*Rhacophorus schlegelii*)、アカハライモリ(*Cynops pyrrhogaster*)なども繁殖している。調査地やトウキョウサンショウウオ繁殖個体群についての概要は、Kusano (1980, 1981, 1982)及びKusano and Miyashita(1984)も参照されたし。

日の出町羽生の調査地においては、繁殖活動が始まる直前より(2月中旬以降)、少なくとも週1回は現地を訪れ、池およびその周辺を探索し、トウキョウサンショウウオの繁殖個体及び卵のうの確認に努めた。本種の繁殖活動の開始には、温度の上昇及び降雨が重要であるので(Kusano, 1980; 草野・川上, 1999)、このような状況が生じた際は、できるだけすみやかに調査地を訪れ産卵の有無を確認した。また、卵のうが発見された際には、卵のう中の卵の発生段階も観察し、発生の進み具合で産卵が行われた日付を推定した。この調査地では、繁殖個体群サイズは比較的安定しており、最近では毎年60~90対の卵のうが1シーズンに産卵されている(未発表データ)。

二つ目の調査は、八王子市南大沢にある首都大学東京キャンパス内の緑地に存在する“イモリ池”(北緯35°37', 東経139°23', 標高120 m)で行った。直径10 m(面積約100 m<sup>2</sup>)で最大水深50 cm程度のこの池は、コナラ(*Quercus serrata*)、シラカシ(*Q. myrsinaefolia*)、アラカシ(*Q. glauca*)などからなる二次林に周囲を囲まれている。ここでは、トウキョウサンショウウオ、アズマヒキガエル(*Bufo japonicus formosus*)、ヤマアカガエル、モリアオガエル(*Rhacophorus arboreus*)の4種の繁殖活動の観察を行ったが、他にアカハライモリ、シュレーゲルアオガエル、ツチガエル(*R. rugosa*)の繁殖も確認されている(Kusano, 1998; Kusano et al., in press)。

この調査地のトウキョウサンショウウオとモリアオガエルの繁殖集団は、1991年より

行われた幼生の放流による移植により定着した集団である。八王子市戸吹より毎年1~2対トウキョウサンショウウオの卵のうを採集し、研究室で飼育した幼生を数年間にわたって放流した結果、1995年よりトウキョウサンショウウオの産卵が見られるようになった(草野, 2004)。最近では、毎年20~30個体のメスの産卵が見られている。モリアオガエルに関しては、八王子市上川町の今熊山山麓より毎年泡巣1個を採集し、数年間にわたりトウキョウサンショウウオ同様、イモリ池に幼生を放流した。その結果、1993年より毎年モリアオガエルの繁殖が確認され、最近数年間は1シーズンに20~30個体のメスの産卵が見られている。

これらの4種の繁殖活動開始時期の調査のため、1992年より毎年2月からほぼ毎日池の観察を行い、トウキョウサンショウウオの場合は卵のう、アズマヒキガエルやヤマアカガエルの場合は卵塊、モリアオガエルの場合は泡巣の有無を確認して産卵開始日を決定した。

繁殖開始の日付は、それぞれの年の1月1日からの日数(1月1日を1とする)に換算して分析した。今回の調査では、繁殖開始時期の長期的な早期化傾向を検証するために、初産卵日と観察年の間に負の相関関係が存在するかどうかをPearsonの積率相関係数( $r$ )で分析した(片側検定,  $\alpha=0.05$ )。有意な相関が検出できなかった場合は、プログラムGpower(Erdfelder et al., 1996)を用いて検定の検出力( $1-\beta$ )を計算した。その際、ユーエンの効果量規約で効果の大きさが大の場合の条件を用いた( $r=0.5$ ; Cohen, 1988)。

トウキョウサンショウウオの繁殖活動には、温度の上昇と降雨が強く影響することが分かっているが(Kusano, 1980; 草野・川上, 1999)、他の3種に関しても繁殖活動と気象要因の間には同様な関係が見られると考えられる。そこで、繁殖開始時期と気温

や降雨などの気象要因との関係を分析した。東京都多摩地区の気象データとして、日の出町羽生の調査地からは11 km、南大沢の調査地からは8 km離れた場所にある地域気象観測システム(AMEDAS)八王子観測所(北緯35°40', 東経139°19', 標高123 m)の1977年1月から2005年5月までの月平均気温および月降雨量のデータを利用した(気象庁, 2005)。繁殖開始時期とこれらの気象データとの関係を、重回帰モデルにより分析した。また、モデル簡略化の標準的な手順に従い、最適なモデルを求めた(Crawly, 2002参照)。統計分析の計算には、ソフトウェアR 2.1.1(R Development Core Team, 2005)を使用し、特に記述がなければ、検定は有意水準( $\alpha$ )を0.05として両側検定で行った。

## 結果と考察

### 1. 繁殖活動開始時期の長期的トレンド

日の出町羽生の調査地においては、1976年から2005年までの30シーズン中21シーズンについてトウキョウサンショウウオの繁殖開始日(初産卵日)を確定することができた(図1)。最も早かったのは2002年2月3日で、1月1日からの日数では34日目となった。逆に、最も遅かったのは1984年3月27日で、87日目であった。平均は、61.0日目( $SD=13.7$ )で3月2日か3日に相当する。年により大きな変動が見られるが、繁殖開始日と観察年の間には有意な負の相関が検出され( $r=-0.41$ ,  $P=0.033$ ; 図1)、羽生のトウキョウサンショウウオの繁殖活動には長期的な早期化の傾向が検出された。

南大沢においては1992年から2005年までの調査期間中、トウキョウサンショウウオでは11シーズンの繁殖開始日を確定できた(図2)。最も早かったのは2003年1月31日で31日目、遅かったのは1996年4月10日で101日目であった。平均は、67.3日目( $SD=21.3$ )で3月6日か7日に相当する。羽生と同様有

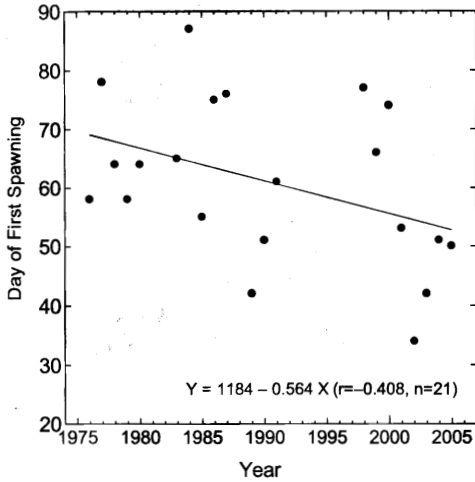


図1. 日の出町羽生におけるトウキョウサンショウウオの繁殖活動開始時期の長期的な変動。毎年の繁殖開始は初産卵日とし、1月1日からの通算日数で表した。

Fig. 1. Long-term fluctuations of timing of reproductive activity of *Hynobius tokyoensis* at Habu, Hinode-machi in Tokyo. Days of first spawning are shown as days counted from January 1.

意な繁殖活動の早期化傾向が検出され ( $r = -0.80$ ,  $P = 0.0016$ ), その速度は今回調査した全種中で最大で、10年間で50日初産卵日が早まったことになる (図2)。

アズマヒキガエルは、1992年より1997年までは繁殖が見られたが、1998年以降まったく繁殖が見られなくなった。最も早かったのが1992年3月15日で75日目、遅かったのが1993年4月3日で93日目であった (図2)。他の種に比べて最も変動が小さかったが、データ数も少なく今回の分析対象からは除外した。

ヤマアカガエルは、1992年から2005年までの14シーズン毎年繁殖開始日を確定できた。他種に比較して、繁殖メスの個体数変動は2~50頭と大きかったが、繁殖開始日の変動は、ほぼ同じ時期に繁殖するトウキョウサンショウウオに比べて少し小さ目であった。最も早かったのは2003年1月21日で21日目、最も遅かったのが2000年3月5日で65日目であった (図2)。平均は、42.1日目 ( $SD = 11.5$ ) で2月11日に相当する。分析した

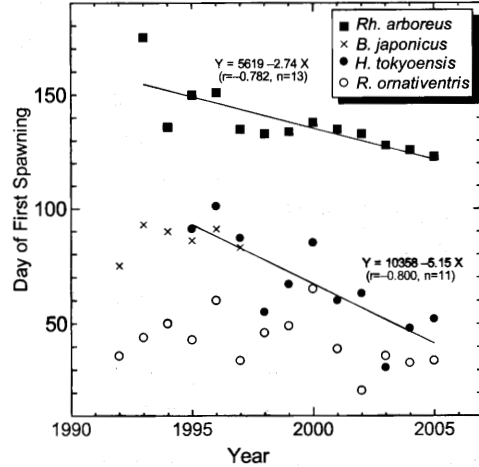


図2. 八王子市南大沢における両生類4種の繁殖活動開始時期の長期的変動。毎年の繁殖開始は初産卵日とし、1月1日からの通算日数で表した。

Fig. 2. Long-term fluctuations of timing of reproductive activity of four species of amphibians at Minami-osawa, Hatchioji-shi, in Tokyo. Days of first spawning are shown as days counted from January 1.

種の中で唯一、繁殖活動開始の有意な早期化傾向が検出できなかった ( $r = -0.37$ ,  $P = 0.094$ )。ただし、検定の検出力は0.66と必ずしも充分でなく、最低限の検出力 ( $>0.8$ ) を得るには標本数が最低でも21必要である。ヤマアカガエルでも、さらに調査を継続して標本数を増やせば、有意な負の相関が得られる可能性が高いと思われる。

モリアオガエルは、1993年から2005年までに13シーズンで繁殖開始日を確定できた (図2)。最も早かったのは2005年5月3日で123日目、最も遅かったのは1993年6月24日で175日目であった。平均は、138.2日目 ( $SD = 13.7$ ) で5月16日か17日に相当する。トウキョウサンショウウオ同様、繁殖活動開始の有意な早期化傾向が検出された ( $r = -0.78$ ,  $P = 0.001$ ; 図2)。モリアオガエルの早期化の速度は、トウキョウサンショウウオに比べて遅く、10年間で30日弱程度のようなのだが、バラツキが小さくより確実に早期化が進んでいるように見える (図2)。

## 2. 繁殖活動と気候

今回の調査で分析の対象とした3種4個体群のうち、2種3個体群で有意な繁殖活動開始時期の早期化傾向が明らかとなった(図1・2)。両生類の繁殖活動の開始には、温度と降雨が重要といわれているので(例えば, Kusano, 1980; Duellman and Trueb, 1986; 久居, 1987), これらの気象要因との関係を分析した。早春2・3月に繁殖を開始するトウキョウサンショウウオとヤマアカガエルに関しては、その活動開始に影響すると考えられる2月の月平均気温と月降雨量, 初夏5月に繁殖を開始するモリアオガエルに関しては、4月の月平均気温と月降雨量のデータを用いた。図3にはそれぞれの月の1977年から2005年までの気象データを示した。2月・4月とも気温に関しては長期的な上昇傾向が見て取れる。回帰分析によると温度の上昇率は、2月では $0.08^{\circ}\text{C}/\text{年}$  ( $P=0.012$ ), 4月では $0.06^{\circ}\text{C}/\text{年}$  ( $P=0.013$ )とこの30年ほどで着実に $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 上昇したことが分かった。それに対して、降雨量のほうは、特に4月の場合は2000年以降少雨傾向が見られるが、一貫した長期的増加または減少傾向は検出できなかった(2月,  $r=-0.20$ ,  $P=0.35$ ; 4月,  $r=-0.23$ ,  $P=0.23$ )。

それぞれの個体群に関して、繁殖開始時期と気象要因の関係を分析するために、月平均気温と月降雨量, およびその相互作用の項を含めたモデルにより重回帰分析を行った。モデル簡略化を行い最適なモデルを求めたところ(Crawly, 2002), 南大沢のトウキョウサン

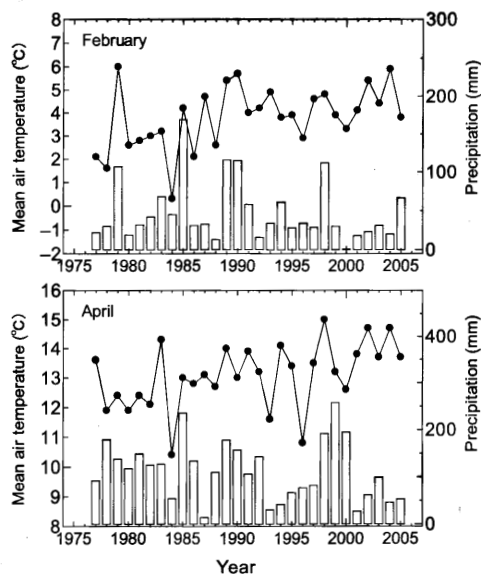


図3. 東京都多摩地区の2月(上図)と4月(下図)の月平均気温(黒丸と実線)と月降雨量(縦棒)の年次変化。アメダス八王子観測所のデータを使用(気象庁, 2005)。

Fig. 3. Yearly changes in monthly mean air temperature (closed circles) and precipitation (open bars) in February (upper) and April (lower) at the AMEDAS weather station of Hatchioji, Tokyo (Japan Meteorological Agency, 2005)

ショウウオを除くすべての個体群において、説明変数として月平均気温のみが残る(係数の推定値はいずれも負で有意), 気温の上昇が繁殖活動の開始時期の早期化に有意な影響を及ぼしていると推定された(表1)。ただし、南大沢のトウキョウサンショウウオの場合だけは、標本数が最も少ないこともあってか、最適なモデルには定数項のみ残り有意な気象データの項は検出できなかった。

今回有意な繁殖開始の早期化傾向を検出で

表1. 繁殖開始時期に気温が与える影響の回帰分析による評価。

調査地	種	N	回帰直線			
			切片	係数	SE	P
羽生	<i>H. tokyoensis</i>	20	84.2	-5.95	1.62	0.002
南大沢	<i>H. tokyoensis</i>	11	125.5	-13.62	6.72	0.073
	<i>R. ornativentris</i>	14	87.2	-10.53	2.83	0.003
	<i>Rh. arboreus</i>	13	246.4	-8.05	2.41	0.007

きなかったヤマアカガエルでも(図2), 2月の月平均気温が有意に繁殖開始時期に影響したという表1の結果は, このまま早春の気温が上昇し続ければ, 遅かれ早かれ有意な早期化傾向が検出されるだろうという予測を支持する. 今回の結果から, 東京都多摩地区において, 分析に用いたほぼすべての種および個体群で, 10年から数10年といったレベルで温暖化に伴い繁殖活動の開始時期が急速に早期化している傾向が見て取れた.

南大沢のトウキョウサンショウウオとモリアオガエルの2種に関しては, 移植個体群であると言うことが, この結果に影響している可能性は否定できないかもしれない. なぜならば, 両生類の一部の種では繁殖場への出現時期と繁殖個体の体サイズ(場合によっては年齢)に負の相関関係が知られている(例えば, Kusano, 1980). 移植個体群の場合, 最初はすべて若く体の小さな繁殖個体のみで繁殖活動が行われるので, 繁殖開始時期が遅れる可能性がある. 年が経過するにしたがい, 老齢で体の大きな個体が増えてきて, 彼らが早めに繁殖活動を始めるようになれば, それだけで繁殖開始時期の早期化は起こるだろう. ただし, 今回の結果のように, 10年以上にわたってそのような傾向が続くとは考えがたい. また, 日の出町羽生のトウキョウサンショウウオのような自然個体群でも早期化が見られていることから, 移植個体群という特殊な条件にすべてを帰することはできないだろう.

長期的な温暖化傾向が我が国の両生類の繁殖活動に多大な影響を与えていることが今回の調査で明らかとなったが, 現在までのところ, 幸いにして個体群サイズの減少や絶滅と言った保全上の問題にはなっていないようである. ただし, 今後も気温の上昇や降雨パターンの変化など, 地球規模での気候変動が続いていけば, 当然我が国でも両生類の種や個体群の絶滅などが問題となってくるかも

しれない(Blaustein et al, 2001). 多摩地区に生息するトウキョウサンショウウオやモリアオガエルでも, 温度の上昇に伴い, 卵死亡率の上昇が危惧される. 実際, トウキョウサンショウウオの野外での卵死亡率は, 気温の上昇した産卵期の後期(4月中旬以降)に産卵された卵のうで高まる(Kusano, 1980). また, モリアオガエルでも, 卵の高温への耐性は弱く, 30°C近くの温度に保った卵のほとんどは孵化できなかった(Kusano et al., in press). 温度の上昇は, 卵や幼生の死亡率の上昇につながり, 徐々に個体群サイズを減少させるかもしれない.

今後は, より広範な地域で, より多様な種について, 初産卵日の観察を含めた両生類の繁殖活動についての長期的なモニタリングの試みが広がることを期待したい.

#### 謝 辞

本調査を進めるにあたり, 日の出町羽生の羽生訓雄氏およびその家族の方々には, 調査地での観察を許可していただいただけでなく, 長期間多方面にわたって便宜をはかっていただいた. 心より感謝いたします.

#### 引用文献

- Beebee, T. J. C. 1995. Amphibian breeding and climate. *Nature* 374: 219-220.
- Blaustein, A. R., L. K. Belden, D. H. Olson, D. M. Green, T. L. Root, and J. M. Kiesecker. 2001. Amphibian breeding and climate change. *Conservation Biology* 15: 1804-1809.
- Blaustein, A. R., A. C. Hatch, L. K. Belden, E. Scheessele, and J. M. Kiesecker. 2003. Global change: Challenges facing amphibians. p. 187-198. In: R. D. Semlitsch (ed.) *Amphibian Conservation*. Smithsonian Books, Washington and London.
- Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Lawrence Erlbaum, New Jersey. 567 p.
- Crawley, M. J. 2002. *Statistical Computing: An Introduction to Data Analysis Using S-plus*. John

- Wiley and Sons, West Sussex. 761 p.
- Duellman, W. E. and L. Trueb. 1986. *Biology of Amphibians*. McGraw-Hill, New York. 670 p.
- Erdfelder, E., F. Faul, and A. Buchner. 1996. GPower: A general power analysis program. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers* 28: 1–11.
- Gibbs, J. P. and A. R. Breisch. 2001. Climate warming and calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1990–1999. *Conservation Biology* 15: 1175–1178.
- 久居宣夫. 1987. I・4 行動生態学. p. 40–52. 浦野明央・石原勝敏(編著) ヒキガエルの生物学. 裳華房, 東京.
- 気象庁. 2005. 気象観測(電子閲覧室). URL <http://www.data.kishou.go.jp>
- Kusano, T. 1980. Breeding and egg survival of a population of a salamander, *Hynobius nebulosus tokyoensis* Tago. *Res. Popul. Ecol.* 21: 181–196.
- Kusano, T. 1981. Growth and survival rate of the larvae of *Hynobius nebulosus tokyoensis* Tago (Amphibia, Hynobiidae). *Res. Popul. Ecol.* 23: 360–378.
- Kusano, T. 1982. Postmetamorphic growth, survival, and age at first reproduction of the salamander, *Hynobius nebulosus tokyoensis* Tago, in relation to a consideration on the optimal timing of first reproduction. *Res. Popul. Ecol.* 24: 329–344.
- Kusano, T. 1998. A radio-tracking study of post-breeding dispersal of the treefrog, *Rhacophorus arboreus*. *Jpn. J. Herpetol.* 17: 98–106.
- 草野 保. 2004. 東京から姿を消しつつあるサンショウウオたち. 東京都立大学環境安全広報(3): 29–34.
- 草野 保・川上洋一(編著). 1999. トウキョウサンショウウオは生き残れるか?: 東京都多摩地区における生息状況調査報告書. トウキョウサンショウウオ研究会, 東京. 69 p.
- Kusano, T. and K. Miyashita. 1984. Dispersal of the salamander, *Hynobius nebulosus tokyoensis*. *J. Herpetol.* 18: 349–353.
- Kusano, T., A. Sakai, and S. Hatanaka. In press. Ecological functions of the foam nests of the Japanese treefrog, *Rhacophorus arboreus* (Amphibia, Rhacophoridae). *Herpetological Journal*.
- 松井正文. 1996. 両生類の進化. 東大出版会, 東京. 302 p.
- Pounds, J. A. and R. Puschendorf. 2004. Clouded futures. *Nature* 427: 107–109.
- R Development Core Team. 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>.
- Reading, C. J. 1998. The effect of winter temperatures on the timing of breeding activity in the common toad *Bufo bufo*. *Oecologia* 117: 469–475.