

『動物たちのナビゲーションの謎を解く』

原注

◎はじめに 進むべき道を見つけるために

- p.11 長くて困難な海や陸の旅をしている先住民の人々はどうかだろうか。
地図や機器なしでのナビゲーションは、「ウェイファインディング」と呼ばれることがある。しかし話を明確に、かつ簡単にするために、私は通常、この用語を使うことを避けている。
- p.16 実験に使われる動物の数が……最近減少してきている
次を参照のこと。Annual Statistics of Scientific Procedures on Living Animals Great Britain 2017, Home Office, 19 July 2018.

◎第1章 生物がナビゲーションを始めたとき

- p.22 最初の生命の材料となる化学物質と、水が地球に運ばれた
Santosh, M., Arai, T., & Maruyama, S. (2017). "Hadean Earth and primordial continents: the cradle of prebiotic life", *Geoscience Frontiers*, 8 (2), PP. 309-27.
- p.22 熱水が海洋底からもうもうと湧き出していた。
Dodd, M.S., Papineau, D., Grenne, T., Slack, J.F., Rittner, M., Pirajno, F., ... & Little, C.T. (2017). "Evidence for early life in earth's oldest hydrothermal vent precipitates", *Nature*, 543 (7643), pp. 60-4.
- p.23 細菌には生き延びるために……遠ざかったりする能力がある。
Adler, J. (1976). "The sensing of chemicals by bacteria", *Scientific American*, 234 (4), pp. 40-7.
- p.23 生きた状態の走磁性細菌は1975年まで発見されていなかった。
Blakemore, R. (1975). 'Magnetotactic bacteria', *Science*, 190 (4212), pp.377-9.
- p.24 鞭毛を使って自発的に泳ぐこともできる。
Kirkegaard, J.B., Bouillant, A., Marron, A.O., Leptos, K.C., & Goldstein, R.E. (2016). 'Aerotaxis in the closest relatives of animals', *elife*, 5, e18109
- p.24 粘菌は簡単な記憶のようなくみを使って……
Reid, C.R., Latty, T., Dussutour, A., & Beekman, M. (2012). 'Slime mold uses an externalized spatial "memory" to navigate in complex environments', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (43), PP. 17490-4.
- p.25 輸送量を最大化するトンネルだけを残す
Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebbler, D.P., Fricker, M.D., ... & Nakagaki, T. (2010). "Rules for biologically inspired adaptive network design", *Science*, 327 (5964), pp. 439-42.
- p.25 動物プランクトンは月光の強さに基づいたリズムに切り替える。
Last, K.S., Hobbs, L., Berge, J., Brierley, A.S., & Cottier, F. (2016). "Moonlight drives ocean-scale mass vertical migration of zooplankton during the Arctic winter", *Current Biology*, 26 (2), pp. 244-51.
- p.26 移動をつかさどるある種の体内「時計」に依存している
Häfker, N.S., Meyer, B., Last, K.S., Pond, D.W., Hüppe, L., & Teschke, M. (2017). 'Circadian Clock Involvement in Zooplankton Diel Vertical Migration', *Current Biology*, 27 (14), pp. 2194-201.

p.26 線虫の一種は……地球の磁場を使って進む方向を決めている

- Vidal-Gadea, A., Ward, K., Beron, C., Ghorashian, N., Gokce, S., Russell, J., ... & Pierce-Shimomura, J. (2015). 'Magnetosensitive neurons mediate geomagnetic orientation in *Caenorhabditis elegans*', *elife*, 4, e07493
- p.26 イモリの中には、やはり体内のコンパスを使って……
Phillips, J., & Borland, S.C. (1994). 'Use of a specialized magnetoreception system for homing by the eastern red-spotted newt *Notophthalmus viridescens*', *Journal of Experimental Biology*, 188 (1), pp. 275-91.
- p.27 ハコクラゲはどうやら、上を向いている目を使って……
Garm, A., Oskarsson, M., & Nilsson, D.E. (2011). 'Box jellyfish use terrestrial visual cues for navigation', *Current Biology*, 21 (9), pp. 798-803.
- p.28 よく似た別のイヌである可能性はゼロ
'Homesick sheepdog walks 240 miles home to Wales after bolting from his new farm in Cumbria'. *Daily Telegraph*, 25 April 2016.
- p.28 イヌもまた……地球磁場の検知能力が知られている生物のリストに加わる
Hart, V., Nováková, P., Malkemper, E.P., Begall, S., Hanzal, V., Ježek, M., ... & C'ervený, J. (2013). 'Dogs are sensitive to small variations of the earth's magnetic field', *Frontiers in Zoology*, 10 (1), p. 80.
- ◎第2章 ファーブルの庭の昆虫たち
- p.30 消すことのできない下等な起源の印が残っている。
Darwin, C. (1871). *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex* (D. Appleton and Company, New York, 2nd ed., 1875), pt I, p. 619. チャールズ・ダーウィンの『人間の由来』(長谷川眞理子訳、講談社学術文庫)
- p.30 私たちの目が……昆虫などの目と遺伝的に同じ系統にある
Shubin, N., Tabin, C., & Carroll, S. (2009). 'Deep homology and the origins of evolutionary novelty', *Nature*, 457 (7231), p. 818.
- p.31 一度見たことのある画像なら、少なくとも1万件は見分けられる。
Standing, L. (1973). 'Learning 10,000 pictures', *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25, PP. 207-22.
- p.34 経験や言語、理解の基礎を欠いている
Aporta, C., Higgs, E., Hakken, D., Palmer, L., Palmer, M., Rundstrom, R., ... & Higgs, E. (2005). "Satellite culture: global positioning systems, Inuit wayfinding, and the need for a new account of technology", *Current Anthropology*, 46 (5), pp. 729-53.
- p.35 精神的な力が物質的なものを取り込み……
W.E.H. Stanner, quoted in: Lewis, D. (1976). "Observations on route finding and spatial orientation among the Aboriginal peoples of the Western Desert region of Central Australia", *Oceania*, 46 (4), pp. 249-82.
- p.36 グーグ・イミディル語の話し手が車のなかで誰かに……
Deutscher, G., *Through the Language Glass: Why the World Looks Different in Other Languages* (Arrow Books, 2011), pp. 166-7. ガイ・ドイッチャー『言語が違えば、世界も違って見えるわけ』(椋田直子訳、インターシフト/早川書

- 房で文庫化)
- p.36 自分の位置を知らなければ周囲の人々が話す……
同上。 p. 187.
- p.38 教師の職をやめて研究に専念できるようになった。
Cambefort, Y., *Les Incroyables Histoires Naturelles de Jean-Henri Fabre* (Grund,2014), p. 20. イヴ・カンブフォール『ファール驚異の博物学図鑑』(奥本大郎・瀧下代訳、エクスタレッジ)
- p.38 かわいそうなハチはずっと空腹のままだっただろう。
Fabre, J. H. (1882). *Souvenirs Entomologiques* (Vol. 2) Librairie Ch. Delagrav. pp. 137-8.
- p.38 アカサマライアリはクロヤマアリの巣を襲撃し……
Fabre, J. H. 同上。 PP 140-53.
- p.39 アリの通り道に白い小石で印を付けた。
これはペローの「おやゆびこぞう」のことだ。困窮した両親によって、きょうだいとともに置き去りにされた小さな男の子が、道に落とした小石をたどって家に帰り着く。しかしその次には、小石ではなくパン屑を使ったせいで、鳥に食べられてしまっただけで帰りがわからなくなった、という物語だ。
- p.41 特に花と複数のランドマークとの距離という幾何学的関係まで利用できる
以下にまとめられている。Gould, J.L., & Gould, C.G., *Nature's Compass: The Mystery of Animal Navigation* (Princeton University Press, 2012), pp. 173-6.
- ◎第3章 厳しい環境を生き抜く力
- p.43 光子の欠乏のせいで「特に困難になる」
Warrant, E.J., Kelber, A., Gislén, A., Greiner, B., Ribí, W., & Wcislo, W.T. (2004). 'Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee', *Current Biology*, 14 (15), pp. 1309-18.
- p.45 正しい巣に戻ることができた。
Warrant, E.J. (2008). 'Seeing in the dark: vision and visual behaviour in nocturnal bees and wasps', *Journal of Experimental Biology*, 211 (11), pp. 1737-46.
- p.46 液体の「ランドマーク」を手がかりにして、進むべきルートを知る
de Perera, T.B. (2004). 'Spatial parameters encoded in the spatial map of the blind Mexican cave fish, *Astyanax fasciatus*', *Animal Behaviour*, 68 (2), pp. 291-5.
- p.47 キノボリウオは、動かない物体のほとんどが頼りに……
Sheenaja, K.K., & Thomas, K.J. (2011). 'Influence of habitat complexity on route learning among different populations of climbing perch (*Anabas testudineus* Bloch, 1792)', *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 44 (6), pp. 349-58.
- p.47 この魚は、完全な暗闇の中でもそれができる
Cain, P., & Malwal, S. (2002). 'Landmark use and development of navigation behaviour in the weakly electric fish *Gnathonemus petersii* (Mormyridae; Teleostei)', *Journal of Experimental Biology*, 205 (24), PP. 3915-23.
- p.47 電気的情報を使って、蜜をたっぷりとくれる花と……
Clarke, D., Morley, E., & Robert, D. (2017). 'The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception', *Journal of Comparative Physiology A*, 203 (9), pp. 737-48.
- p.50 ハイイロホシガラスは……幾何学的関係が覚えることができる。
Kamil, Alan C. and Jones, Juli E. (1997). 'The seed-storing corvid Clark's nutcracker learns geometric relationships among landmarks', *Nature*, 90, pp. 276-9.
- p.50 最近の研究によれば、ハイイロホシガラスはもっと大きくて……
Bednikoff, Peter A. and Balda, Russell P., (2014). 'Clark's nutcracker spatial memory: The importance of large, structural cues', *Behavioural Processes*, 102, pp. 12-17.
- p.51 ロスチャイルド家は実際にハトを使った通信システムを構築
次を参照のこと。 https://www.rothschildarchive.org/contact/faqs/rothschilds_and_pigeon_post.
- p.52 「コンパス」のコースにも従うことができる。
Biro, D., Freeman, R., Meade, J., Roberts, S., & Guilford, T. (2007). 'Pigeons combine compass and landmark guidance in familiar route navigation', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (18), pp. 7471-6.
- p.52 旅の最終段階でハトがたどるルートは毎回同じで……
同上。
- p.52 ハトは変化に富む風景を飛ぶ場合……変化が多すぎてもよくない
Mann, R.P., Armstrong, C., Meade, J., Freeman, R., Biro, D., & Guilford, T. (2014). 'Landscape complexity influences route-memory formation in navigating pigeons', *Biology Letters*, 10 (1), 20130885.
- p.53 彼らがさまざまな種類のルートをどの程度すぐに記憶できるか……
以下で引用されている。 <http://www.ox.ac.uk/news/2014-01-22-hedges-and-edges-help-pigeons-learn-their-way-around>.
- p.54 実験したコウモリは、地図とコンパスを手にした……
Tsoar, A., Nathan, R., Bartan, Y., Vyssotski, A., Dell'Omo, G., & Ulanovsky, N. (2011). 'Large-scale navigational map in a mammal', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (37), E718-24.
- p.55 「地球上で最も並外れた渡り行動の1つ」だという。
DeLuca, W.V., Woodworth, B.K., Rimmer, C.C., Marra, P.P., Taylor, P.D., McFarland, K.P., ... & Norris, D.R. (2015). 'Transoceanic migration by a l2g songbird', *Biology Letters*, 11 (4), 20141045.
- ◎第4章 砂漠の戦争とアリ
- p.57 (ただし低緯度地帯では太陽がほぼ真上)
低緯度地帯では、正午の太陽が真上に来る日が1年に2日だけあるが、通常は観測者の北か南にある。
- p.57 極域までいくと、太陽は一日中地平線の上にある

極域では、太陽がずっと地平線の下にあって上ってこない時期（真冬）と、逆にずっと地平線の上にある沈まない時期（真夏）がある。

p.59 ウェーヴェル元帥はすぐにバグノルドを呼び……

Bagnold, R.A., *Libyan Sands: Travel in a Dead World* (Eland Publishing, 2010), p. 220.

p.61 星を見れば自分たちの位置を確認できた。

同上。p. 59. 以下も参照のこと。Shaw, W.K. (1943). 'Desert Navigation: Some Experiences of the Long Range Desert Group', *Geographical Journal*, pp. 253-8.

p.61 われわれが思いついたのは、ずっと起きていて……

Bagnold, R.A., *Libyan Sands*, pp. 171-2.

p.63 「光の方向に大きく影響されている」と結論づけた。

Lubbock, J., *Ants, Bees and Wasps: A Record of Observations on the Habits of the Social Hymenoptera* (D. Appleton and Co., New York, 1882), pp. 263-70.

p.63 サンチは1901年、21歳でチュニジアに向かい……

これ以降の話は、以下に基づいている。Wehner, R. (1990). On the brink of introducing sensory ecology: Felix Santschi (1872-1940), *Tabib-en-Neml, Behavioral Ecology and Sociobiology*, 27 (4), pp. 295-306.

p.65 星のパターンを見ることができるとささ考えられた。

以下の記事には、アリのナビゲーションの初期の研究者についての興味深い歴史的記述がある。Wehner, R. (2016). 'Early ant trajectories: spatial behaviour before behaviourism', *Journal of Comparative Physiology A*, 202 (4), pp. 247-66.

p.66 6羽のオスのワタリアホウドリに衛星追跡装置を取り付ける

Jouventin, P., & Weimerskirch, H. (1990). 'Satellite tracking of wandering albatrosses', *Nature*, 343 (6260), p. 746.

◎第5章 動物の見方を変えたすごい発見

p.68 そこにたどり着くまでには長い年月がかかった

フォン・フリッシュの生涯と業績についての素晴らしい解説は、次の本を参照のこと。Munz, T., *The Dancing Bees: Karl von Frisch and the Discovery of the Honeybee Language* (University of Chicago Press, 2016). 本章の記述はこの本にかなり頼っている。

p.73 「真上に進むダンスをすれば、『食料源に到着するには……

同上。p. 151.

p.74 ミツバチは太陽の偏光に反応しているかもしれないというのだ。

同上。pp. 162-3.

p.76 ポラロイドカメラの発明者であるエドウィン・ランドからもらった

同上。pp. 184-5.

p.77 フォン・フリッシュはこの疑問に決定的な答えを出せるようになった

同上。pp. 92.

p.77 ミツバチが太陽の方位角の変化をあらかじめ考慮していたこと以外に……

Von Frisch, K. and Lindauer, M. (1956). 'The "Language" and Orientation of the Honey Bee', *Annual Review of Entomology*, vol. 1, pp. 45-8.

p.78 巣の中の暗い小部屋にいるときでもダンスの方向を調整していた同上。

p.79 重力が作用する方向が太陽光の方向と入射角を表す符号になる

ミツバチは、「ダンス」を解釈するために、どの方向が「上」かを判断できなければならない。暗い巣の中で唯一可能なのは、重力が下向きに引く力を感じるからだ。

p.79 老科学者にとって幸いなことだった。

Munz, T. (2005). 'The bee battles: Karl von Frisch, Adrian Wenner and the honey bee dance language controversy', *Journal of the History of Biology*, 38 (3), pp. 535-70.

p.80 対照的にオランダのアジサシは、アフリカ大陸の南端まで飛んでから……

Fijn, R.C., Hiemstra, D., Phillips, R.A., & Winden, J.V.D. (2013). 'Arctic Terns *Sterna paradisaea* from the Netherlands migrate record distances across three oceans to Wilkes Land, East Antarctica', *Ardea*, 101 (1), pp. 3-12.

◎第6章 デッドレコニングと螺旋運動

p.82 船乗りの大半が新しいテクノロジーを手にして……

このテーマについてのさらに詳細な議論は、著者による次の書籍を参照のこと。*Sextant: A Voyage Guided by the Stars and the Men Who Mapped the World's Oceans* (William Collins, 2014). pp. 61-90.

p.84 デッドレコニング (Dead Reckoning)

デッドレコニングは、科学用語としては「経路積算」ともいう。

p.86 深い海中をめぐる潜水艦では使えなかった

実際には、潜望鏡を通して太陽や星を見ることは可能だが、パトロール中の原子力潜水艦の存在を敵に知られてしまう可能性があるため、代わりとなる何らかのナビゲーション方法は不可欠である。

p.87 「自己運動」

専門用語では「idiothetic」（自己中心）という。

p.89 こんな時間に、こんな寂しい所を、これほどの大集団が旅を……

Twain, M. (1872). *Roughing It*. Hartford, Conn; American Publishing Company. Ch. 31. マーク・トウェイン『苦難を乗り越えて 西部放浪記』（勝浦吉雄・勝浦寿美訳、文化書房博文社）

p.90 私たちが「ぐるぐる同じところを回る」のは……

Dudchenko, P.A., *Why People Get Lost* (Oxford University Press, 2010), pp. 67 ff.

p.90 目隠しをした状態の被験者に広くて平らな飛行場を歩いてもらう実験……

Souman, J.L., Frissen, I., Sreenivasa, M.N., & Ernst, M.O. (2009). 'Walking straight into circles', *Current Biology*, 19 (18), pp. 1538-42.

p.90 進み続けられるのはわずか8秒

Thomson, J.A. (1983). 'Is continuous visual monitoring necessary in

- visually guided locomotion?', *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9 (3), p. 427.
- p.91 その動物がたどる経路は遅かれ早かれ螺旋状に近づいていく。
Cheung, A., Zhang, S., Stricker, C., & Srinivasan, M.V. (2008). 'Animal navigation: general properties of directed walks', *Biological Cybernetics*, 99 (3), pp. 197–217.
- p.91 オオソリハシシギの追跡調査から……たった8日間で飛んだ
Gill, R.E., Tibbitts, T.L., Douglas, D.C., Handel, C.M., Mulcahy, D.M., Gottschalck, J.C., . . . & Piersma, T. (2009). 'Extreme endurance flights by landbirds crossing the Pacific Ocean: ecological corridor rather than barrier?', *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 276 (1656), pp. 447–57.
- p.91 ニューゼalandに到達する頃には……体重の3分の1を失っている。
Piersma, T., & Gill Jr, R.E. (1998). 'Guts don't fly: small digestive organs in obese bar-tailed godwits', *The Auk*, pp. 196–203.
- p.91 アラスカから出発する時期を慎重に決めているというのは興味深い。
Battley, P.F., Warnock, N., Tibbitts, T.L., Gill, R.E., Piersma, T., Hassell, C.J., . . . & Melville, D.S. (2012). 'Contrasting extreme long-distance migration patterns in bar-tailed godwits *Limosa lapponica*', *Journal of Avian Biology*, 43 (1), pp. 21–32.
- ◎第7章 昆虫界の競走馬
- p.97 やがてチューリッヒ大学に職を得て、それ以来この大学を拠点としている。
次を参照のこと。Wehner, R. (2013). 'Life as a cataglyphologist – and beyond', *Annual Review of Entomology*, 58, pp. 1–18.
- p.102 脳の回路の大部分が明らかになっている。
Pfeiffer, K., Homberg, U. (2014). 'Organisation and functional roles of the central complex in the insect brain', *Annual Review of Entomology*, 59, pp. 165–84.
- p.102 サバクアリは……「整合フィルター」を呼んだものを採用している。
Wehner, R. (1987). 'Matched filters – neural models of the external world', *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 161 (4), pp. 511–31.
- p.103 移動距離の計測にも使っていることは……確かめられている。
Srinivasan, M., Zhang, S., & Bidwell, N. (1997). 'Visually mediated odometry in honeybees', *Journal of Experimental Biology*, 200 (19), pp. 2513–22.
- p.104 ウィットリンガーが、アリの歩幅を物理的に変えてしまうという名案
Wittlinger, M., Wehner, R., & Wolf, H. (2006). 'The ant odometer: stepping on stilts and stumps', *Science*, 312 (5782), pp. 1965–7.
- p.107 それぞれの方向の間の角度という形で記憶できる。
Wehner, R., Räber, F. (1979). 'Visual spatial memory in desert ants, *Cataglyphis bicolor* (Hymenoptera: Formicidae)', *Experientia*, 35, pp. 1569–71; Cartwright, B.A., Collett, T.S. (1983). 'Landmark learning in bees: experiments and models,' *Journal of Comparative Physiology A*, 151, pp. 521–43; Möller, R., Vardy, A. (2006). 'Local visual homing by matched-filter descent in image distances', *Biological Cybernetics*, 95, pp. 413–30; Zeil, J., Hofmann, M.I., Chahl, J.S. (2003). 'The catchment areas of panoramic snapshots in outdoor scenes', *Journal of the Optical Society of America A*, 20, pp. 450–69.
- p.107 「サハボット」「サハラロボット」の略という……ロボット車両は
Lambrinos, D., Möller, R., Labhart, T., Pfeifer, R., Wehner, R. (2000). 'A mobile robot employing insect strategies for navigation', *Robot and Autonomous Systems*, 30, pp. 39–64.
- p.107 この素晴らしい動物が進む方向を決めるのに地球磁場も使える
Fleischmann, P.N., Grob, R., Müller, V.L., Wehner, R., & Rössler, W. (2018). 'The geomagnetic field is a compass cue in *Cataglyphis* ant navigation', *Current Biology*, 28 (9), 1440–1444.
- p.108 体温を調節するようになっているものもいる。
Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). "Keeping Cool: enhanced optical reflection and heat dissipation in silver ants," *Science*, aab3564.
- p.108 世界でいちばん素晴らしい原子でできた物質であり……
Darwin, C., *The Descent of Man*, 前掲書, pt I, p. 54. チャールズ・ダーウィン『人間の由来』(長谷川真理子訳、講談社学術文庫)
- p.108 「あらゆる脳が持つ主要な機能の1つが……」
Heinze, S. (2015). 'Neuroethology: unweaving the senses of direction', *Current Biology*, 25 (21), R1034–37.
- p.109 ロボットや自動運転車を設計するときに昆虫を参考にする
たとえば次を参照のこと。Weber, K., Venkatesh, S., & Srinivasan, M.V. (1996, August). 'Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots', in *International Conference on Pattern Recognition, Proceedings*, 1996, p. 156, IEEE; Weber, K., Venkatesh, S., & Srinivasan, M.V. (1998, August). 'An insect-based approach to robotic homing', in *Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, 1998, Proceedings*, vol. 1, pp. 297–9, IEEE; Expert, F., Viollet, S., & Ruffier, F. (2011). 'Outdoor field performances of insect-based visual motion sensors', *Journal of Field Robotics*, 28 (4), pp. 529–41; Graham, P., & Philippides, A. (2014). 'Insect-Inspired Visual Systems and Visually Guided Behavior', *Encyclopedia of Nanotechnology*, pp. 1–9.
- p.109 キノコ体と中心複合体の相互作用が……
Collett, M., & Collett, T.S. (2018). 'How does the insect central complex use mushroom body output for steering?', *Current Biology*, 28 (13), R733–4.
- p.110 「移動放獣」してもほとんど意味がない
Read, M.A., Grigg, G.C., Irwin, S.R., Shanahan, D., & Franklin, C.E. (2007). 'Satellite tracking reveals long distance coastal travel and homing by

translocated estuarine crocodiles, *Crocodylus porosus*’, *PLoS One*, 2 (9), e949.

◎第8章 太平洋の島々をめぐる伝統的航海術

p.111 天の川だ!

Chepesiuk, R. (2009). ‘Missing the dark: health effects of light pollution’, *Environmental Health Perspectives*, 117 (1), A20.

p.112 人工衛星画像を用いた最近の研究

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C., Elvidge, C.D., Baugh, K., . . . & Furgoni, R. (2016). ‘The new world atlas of artificial night sky brightness’, *Science Advances*, 2 (6), e1600377.

p.112 今も着実に悪化している。

Kyba, C.C., Kuester, T., de Miguel, A.S., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., . . . & Guanter, L. (2017). ‘Artificially lit surface of earth at night increasing in radiance and extent’, *Science Advances*, 3 (11), e1701528.

p.112 人間の健康に害をおよぼすだけではない。

たとえば次を参照のこと。Stevens, R.G., Blask, D.E., Brainard, G.C., Hansen, J., Lockley, S.W., Provencio, I., Rea, M.S., Reinlib, L. (2007). ‘Meeting report: The role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases’, *Environmental Health Perspectives*, 115, pp. 1357-62.

p.112 自然光に頼っている他の動物では、光害の影響がさらに大きい。

たとえば次を参照のこと。Longcore, T., & Rich, C. (2004). ‘Ecological light pollution’, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2 (4), pp. 191-8. 以下の文献も参照のこと。Horváth, G., Kriska, G., Malik, P., & Robertson, B. (2009). ‘Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution’, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 (6), pp. 317-25; Gaston, K.J., Bennie, J., Davies, T.W., & Hopkins, J. (2013). ‘The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal’, *Biological Reviews*, 88(4), pp. 912-27.

p.112 深刻な環境問題だが、あまりにも注目されていない。

詳しい情報は、国際ダークスカイ協会のウェブサイト参照のこと。http://darksky.org.

p.117 「星の航路」を繰り返し記憶し、試していくことで習得する

Gladwin, T., *East is a Big Bird: Navigation and Logic on Puluwat Atoll* (Harvard, 1970), pp. 130-1.

p.117 空の別の場所にあっても針路を正確に定めることができた

Lewis, D., *We, the Navigators: The Ancient Art of Landfinding in the Pacific* (University of Hawaii Press, 1994, 2nd ed.), pp. 94-7.

p.117 星空全体の姿に合わせて針路を取っていた

Gladwin, T., *East is a Big Bird*, 前掲書, p. 152.

p.117 長距離航海でのナビゲーションを実際におこなうには……

インド洋や紅海でもアラブ人の船乗りがスターコンパスシステムを使っていた。

そのスターコンパスシステムは、現在のインドネシア出身の人々が移住していたマダガスカルを経由して、アラブ人に伝えられた可能性がある。次を参照のこと。Tolmacheva, M. (1980). ‘On the Arab system of nautical orientation’, *Arabica*, 27 (Fasc. 2), pp. 180-92.

p.118 太陽による舵取りに必要な内挿計算……をするのが習慣になる

Lewis, D., *We, the Navigators*, 前掲書, p. 123.

p.118 陸地が見えない場合でもルート上で自分の位置確認するのに役立った。

同上。pp. 162-3.

p.119 航法師が真っすぐな針路を維持することを可能にした。

同上。pp. 170 ff.

p.119 まだ見えていない島の存在を知ることができた。

同上。pp. 224 ff.

p.119 70 キロから 80 キロも離れた島の存在がわかることがあるのだ。

Gladwin, *East is a Big Bird*, pp. 196 ff.

p.120 インドガンの鳴き声が聞こえた」

Swan, L.W., *Tales of the Himalaya: Adventures of a Naturalist* (Mountain N’ Air Books, 2000).

p.120 きわめて薄い空気に対応できるようだ。

Hawkes, L.A., Batbayar, N., Butler, P.J., Chua, B., Frappell, P.B., Meir, J.U., . . . & Takekawa, J. Y. (2017). ‘Do bar-headed geese train for high altitude flights?’, *Integrative and Comparative Biology*, 57 (2), pp. 240-51.

◎第9章 鳥が真北を見つけられるわけ

p.122 飛びながら寝ているのかどうかはまだ謎のままだ

Hedenström, A., Norevik, G., Warfvinge, K., Andersson, A., Bäckman, J., & Åkesson, S. (2016). ‘Annual 10-month aerial life phase in the common swift *Apus apus*’, *Current Biology*, 26 (22), pp. 3066-70.

p.123 コマドリはどこかに行くのではなく、模様を変えるだけ

Aristotle, *History of Animals*, IX 49B, p. 632. アリストテレス『アリストテレス全集 8・9』所収「動物誌」- (金子善彦・伊藤雅巳・金澤修・濱岡剛訳、岩波書店)

p.123 マグヌス大司教は、ツバメは湖の中で越冬して……

Clarke, W.E., *Studies in Bird Migration* (London and Edinburgh, 1912), vol. 1, pp. 9-11.

p.123 コウノトリが月で越冬すると主張する小論文

https://www.wired.com/2014/10/fantastically-wrong-scientist-thought-birds-migrate-moon/.

p.123 アンダルシア (スペイン最南部の州) にいる弟が、詳細に……

White, G., *The Natural History of Selborne* (Folio Society, 1962), p. 102. ギルバート・ホワイト『セルボーン博物誌』(山内義雄訳、講談社学術文庫)

p.124 矢で射れながらも、たくましく生き延びたコウノトリが……

矢が刺さったコウノトリの話を教えてくれた、甥のフィリップ・モーガンに感謝する。

- p.124 一部の渡り鳥は毎年欠かさずに同じ繁殖地に戻ってきている
Audubon, J.J., *The Birds of America* (New York, 1856), vol. 1, pp. 227–8.
- p.125 環境問題や生態学的問題に光を当てる多くの発見が期待できる
Kays, R., Crofoot, M.C., Jetz, W., & Wikelski, M. (2015). ‘Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet’, *Science*, 348 (6240), aaa2478.
- p.126 外洋上を飛ぶ距離としては猛禽類で最長だ。
Symes, C.T., & Woodborne, S. (2010). ‘Migratory connectivity and conservation of the Amur Falcon *Falco amurensis*: a stable isotope perspective’, *Bird Conservation International*, 20 (2), pp. 134–48.
- p.126 アカアシチョウゲンボウは、同じ方向に渡りをおこなうトンボの……
Anderson, R.C. (2009). ‘Do dragonflies migrate across the western Indian Ocean?’, *Journal of Tropical Ecology*, 25 (4), pp. 347–58.
- p.126 若い鳥が年長の鳥から正しい渡りのルートを学べる
場合によっては、若い鳥に人間のガイドを追いかけさせて、超軽量動力機で並んで飛ぶことができる。この方法は、絶滅の危機にある北アメリカのアメリカシロヅルの保護活動のなかで採用されてきたもので、最近ではヨーロッパのホオアカトキを野生復帰させる取り組みでも使われた。鳥の群れが人間のパイロットをいっしょに追いかけている光景は確かに感動的だが、そうやって人間と密接に接触すると、自分のひなを無事に育てられなくなる恐れもある。
- p.127 他の幼鳥から平均で 164 キロしか離れていない場所に到達
Willemoes, M., Strandberg, R., Klaassen, R.H., Tøttrup, A.P., Vardanis, Y., Howey, P.W., . . . & Alerstam, T. (2014). ‘Narrow-front loop migration in a population of the common cuckoo *Cuculus canorus*, as revealed by satellite telemetry’, *PLoS One*, 9 (1), e83515.
- p.129 鳥は星のパターンをナビゲーションにうまく活用できる
Sauer, E.F., & Sauer, E.M. (1960, January). ‘Star Navigation of Nocturnal Migrating Birds: The 1958 Planetarium Experiments’, in *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* (Cold Spring Harbor Laboratory Press), vol. 25, pp. 463–73.
- p.129 北極星を中心に回転する星のパターンを感知できることを示した。
Emlen, S.T. (1967). ‘Migratory orientation in the indigo bunting, *Passerina cyanea*. Pt I: Evidence for use of celestial cues’, *The Auk*, 84 (3), pp. 309–42. And: Emlen, S.T. (1967). ‘Migratory orientation in the Indigo Bunting, *erina cyanea*. Pt II: Mechanism of celestial orientation’, *The Auk*, 84 (4), pp. 463–89.
- p.129 リリノジコはまったく平気で、それに合わせて進む方向を定めた。
Emlen, S.T. (1975). ‘The stellar-orientation system of a migratory bird’, *Scientific American*, 233 (2), pp. 102–11.
- p.129 夜間に渡りをする他の多くの鳥も、同じ方法で真北を見つけている
Mouritsen, H., & Larsen, O.N. (2001). ‘Migrating songbirds tested in computer-controlled Emlen funnels use stellar cues for a time-independent compass’, *Journal of Experimental Biology*, 204 (22), pp. 3855–65.
- p.131 この鳥を見つけた人は「心底仰天した」

Strycker, N.K., *The Thing with Feathers: The Surprising Lives of Birds and What They Reveal about Being Human* (Riverhead Books, 2014). ノア・ストリッカー『鳥の不思議な生活』(片岡夏実訳、築地書館)

●第 10 章 天の川とフンコロガシ

- p.135 フンコロガシは新しく作った糞玉に……頭上の空を注意深く点検する
Baird, E., Byrne, M.J., Smolka, J., Warrant, E.J., & Dacke, M. (2012). ‘The dung beetle dance: an orientation behaviour?’, *PLoS One*, 7 (1), e30211.
- p.136 太陽の偏光パターンを使っているのと同じ方法だ。
Dacke, M., Nilsson, D.E., Scholtz, C.H., Byrne, M., & Warrant, E.J. (2003). ‘Animal behaviour: insect orientation to polarized moonlight’, *Nature*, 424 (6944), p. 33.
- p.138 この辛抱強いフンコロガシが、天の川^{なな}で……
Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C.H., & Warrant, E.J. (2013). ‘Dung beetles use the Milky Way for orientation’, *Current Biology*, 23 (4), pp. 298–300.
- p.139 ラージイエローアンダーウィング……にはそれができようだし
Sotthibandhu, S., & Baker, R. R. (1979). ‘Celestial orientation by the large yellow underwing moth, *Noctua pronuba* L.’, *Animal Behaviour*, 27, pp. 786–800.
- p.140 太陽の日周運動に合わせた時計と……月のサイクルに合わせた時計
Ugolini, A., Hoelsters, L.S., Ciofini, A., Pasquali, V., & Wilcockson, D.C. (2016). Evidence for discrete solar and lunar orientation mechanisms in the beach amphipod, *Talitrus saltator* Montagu (Crustacea, Amphipoda). *Scientific Reports*, 6, 35575.
- p.140 わずか 2 頭のゼニガタアザラシを対象とした実験は……
Mauck, B., Gläser, N., Schlosser, W., & Dehnhardt, G. (2008). ‘Harbour seals (*Phoca vitulina*) can steer by the stars’, *Animal Cognition*, 11 (4), pp. 715–18.
- p.141 「さらなる研究が必要だ」。
動物による星を使ったナビゲーションについての最近の解説記事は、次を参照のこと。Foster, J.J., Smolka, J., Nilsson, D.E., & Dacke, M. (2018, January). ‘How animals follow the stars’, in *Proc. R. Soc. B.*, vol. 285, no. 1871, p. 20172322, The Royal Society.

●第 11 章 匂いを道しるべにする動物たち

- p.142 オオクジャクヤママユ
学名は *Saturnia pyri* (サトゥルニア・ピリ) で、開翅長は最大 20 センチ。
- p.142 蝨燭を手を持って私たちは部屋に入った……
Fabre, J-H., *Souvenirs Entomologique*, série VII, ch. 23. Author’s translation. ジャン＝アンリ・ファーブル『完訳ファーブル昆虫記(第7巻下)』(奥本大三郎訳、集英社)
- p.144 実はそれほど簡単な話ではない。

- Farkas, S.R., & Shorey, H.H. (1972). 'Chemical trail-following by flying insects: a mechanism for orientation to a distant odor source', *Science*, 178 (4056), pp. 67–8.
- p.144 この匂いをめぐる難題を……議論が繰り広げられてきた。
Kennedy, J.S., Ludlow, A.R., & Sanders, C.J. (1980). 'Guidance system used in moth sex attraction', *Nature*, 288 (5790), pp. 475–7.
- p.144 左右の触角を通過する化学成分の違いに応じて進む方向を変えている
Martin, H. (1965). 'Osmotropotaxis in the honey-bee', *Nature*, 208 (5005), pp. 59–63.
- p.144 キイロシヨウジョウバエも同じことをする。
Borst, A., & Heisenberg, M. (1982). 'Osmotropotaxis in *Drosophila melanogaster*', *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 147 (4), pp. 479–84.
- p.144 その効率を高めていることがわかった。
Steck, K., Knaden, M., & Hansson, B.S. (2010). 'Do desert ants smell the scenery in stereo?', *Animal Behaviour*, 79 (4), pp. 939–45.
- p.145 滝に近づいていたが……
Hasler, A.D., & Scholz, A.T. (2012). 'Olfactory imprinting and homing in salmon: Investigations into the mechanism of the imprinting process', *Springer Science & Business Media*, vol. 14, p. xii.
- p.146 五大湖を浄化した後、そこにサケを呼び戻すのにも有効
Nevitt, G., & Dittman, A. (1998). 'A new model for olfactory imprinting in salmon', *Integrative Biology: Issues, News, and Reviews*, published in association with The Society for Integrative and Comparative Biology, 1 (6), pp. 215–23.
- p.146 魚は鮮明な「嗅覚の経由地」をいくつもたどりながら……
Dittman, A., & Quinn, T. (1996). 'Homing in Pacific salmon: mechanisms and ecological basis', *Journal of Experimental Biology*, 199 (1), pp. 83–91.
- p.148 「今晚ここに泊まるの？」
Gatty, H., *Finding Your Way Without Map or Compass* (Dover Books, 1983), pp. 32–3. ハロルド・ギャティ『自然は導く』(岩崎晋也訳、みすず書房)
- p.148 アリストテレスの影響だといわれることが多い。
嗅覚と味覚は密接に関係しているが、それぞれ鼻と口という別の感覚器官が受け持っている。両方が組み合わさると私たちが「風味」として感じるものになる。この章では嗅覚だけを考えることにする。
- p.148 「精密ではなく、多くの動物よりも劣っている」
Aristotle, *On the Soul*, II.9. アリストテレス「アリストテレス全集7」所収『魂について』(中畑正志訳、岩波書店)
- p.148 アリストテレスの考えでは、人間にとって嗅覚が役立つのは……
Aristotle, *Sense and Sensibilia* II.5. アリストテレス「アリストテレス全集7」所収『感覚と感覚されるものについて』(坂下浩司訳、岩波書店)
- p.148 彼の宗教に対する懐疑的な姿勢とつながっていた。
McGann, J.P. (2017). 'Poor human olfaction is a 19th-century myth', *Science*, 356 (6338), eaam7263.
- p.149 忘れていた場所や風景をありありと思い起こさせる際だった効力
Darwin, C., *The Descent of Man*, pt 1, pp. 17–18. チャールズ・ダーウィン『人間の由来』(長谷川真理子訳、講談社学術文庫)
- p.149 人間の場合は嗅覚の弱さが性的抑圧や精神疾患の原因
Freud, S., *Drei Abhandlungen zur Sexualtheorie* (F. Deuticke, 1905), p. 83. Cited in McGann (2017), 前掲書。
- p.150 最近の研究では、この数を少なくとも1兆種類……
Bushdid, C., Magnasco, M.O., Vosshall, L.B., & Keller, A. (2014). 'Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli', *Science*, 343 (6177), pp. 1370–2.
- p.150 人間は嗅覚システムに問題がなければ……
McGann, J.P. (2017), 前掲書。
- p.150 先カンブリア紀の化学物質のスープを動き回っていた細菌……
Gottfried, J.A. (2009). 'Function follows form: ecological constraints on odor codes and olfactory percepts', *Current Opinion in Neurobiology*, 19(4), pp. 422–9.
- p.151 糸球体の数では人間のほうが多い。
Shepherd, G.M., *Neurogastronomy* (Columbia University Press, 2011), pp. 89–90. ゴードン・M・シェファード『美味しさの脳科学』(小松淳子訳、インターシフト)
- p.151 「ギャップを埋める」
Gottfried, J.A. (2009), 前掲書
- p.151 お菓子のかけらのまじったひと口が……
Proust, M. (trans. Scott Moncrieff, C.K. & Gilmartin, T.), *Remembrance of Things Past: Swann's Way* (Penguin, 1983), p. 48–50. マルセル・プルースト『失われた時を求めて1——スワン家のほうへI』(吉川一義訳、岩波文庫)
- p.152 「人間は、他の動物よりも豊かな香りと風味の世界を授けられている」
Shepherd, G.M., *Neurogastronomy*, p. 111. ゴードン・M・シェファード『美味しさの脳科学』(小松淳子訳、インターシフト)
- p.152 自分と免疫系が大きく異なっている男性を好む。
Pause, B.M. (2012). 'Processing of body odor signals by the human brain', *Chemosens Percept*, 5, pp. 55–63. doi: 10.1007/s12078-011-9108-2;pmid: 22448299.
- p.153 握手をした後に、無意識に手の匂いを嗅いでいる
McGann, J.P. (2017), 前掲書。
- p.153 四つん這いの姿勢になれば匂いの跡をたどるのが驚くほど楽になる。
Porter, J., Craven, B., Khan, R.M., Chang, S.J., Kang, I., Judkewitz, B., . . . & Sobel, N. (2007). 'Mechanisms of scent-tracking in humans', *Nature Neuroscience*, 10 (1), pp. 27–9.
- p.153 自分の嗅覚だけを使って元の場所に戻れることを確かめている。
Jacobs, L.F., Arter, J., Cook, A., & Sulloway, F.J. (2015). 'Olfactory orientation and navigation in humans', *PLoS One*, 10 (6), e0129387.

p.155 どうやって帰り道を見つけていたかは歯がゆくなるほど不透明なままだ。
Rogers, L.L. (1987). 'Navigation by adult black bears', *Journal of Mammalogy*, 68 (1), pp. 185-8.

●第12章 鳥は匂いを頼りに巣に戻れるか

p.157 多くの動物が持つ、目隠しをされて……

Wallace, A. R. (1873). Inherited feeling. *Nature*, 7 (173), 303.

p.158 パピがハトの嗅覚を奪い（つまり「無嗅覚」状態にする）……

Papi, F., Fiore, L., Fiaschi, V., and Benvenuti, S. (1971). 'The influence of olfactory nerve section on the homing capacity of carrier pigeons', *Monitore Zoologico Italiano*, 5, pp. 265-7.

p.158 そのときの風向と結びつけていると考えたのだ。

Papi, F., Fiore, L., Fiaschi, V. and Benvenuti, S. (1972). 'Olfaction and homing in pigeons', *Monitore Zoologico Italiano*, 6, pp. 85-95.

p.159 嗅覚を奪うための処置のせいで、

鳥の嗅覚受容体と嗅球をつなぐ嗅神経を（全身麻酔して）切断する。または局所麻酔薬か、腐食性物質（硫酸亜鉛など）を使用して、嗅覚受容体の感度を一時的に鈍らせる。嗅神経切断手術をした場合、かなり短時間で立ち直るようだが、嗅覚を取り戻すことはない。

p.159 嗅覚を奪われたハトでも、ランドマーク情報を使って……

たとえば次を参照のこと。Benvenuti, S., Fiaschi, V., Fiore, L. and Papi, F. (1973). 'Homing performances of inexperienced and directionally trained pigeons subjected to olfactory nerve section', *Journal of Comparative Physiology*, 83, pp. 81-92; and Biro, D., Meade, J. and Guilford, T. (2004). 'Familiar route loyalty implies visual pilotage in the homing pigeon', *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 101, pp. 17440-3.

p.159 風向の変え方に対応した「間違った」方向に進んだ

Baldaccini, N.E., Benvenuti, S., Fiaschi, V. and Papi, F. (1975). 'Pigeon navigation: effects of wind deflection at home cage on homing behaviour', *J. Comp. Physiol.*, 99, pp. 177-86.

p.159 風の情報に接することが必要になる重要な成長段階

たとえば次を参照のこと。Gagliardo, A., Ioalè, P., Odetti, F. and Bingman, V.P. (2001). 'The ontogeny of the homing pigeon navigational map: evidence for a sensitive learning period', *Proc. Biol.Sci.*, 268, pp. 197-202.

p.159 「風偏向器付き鳩舎」実験には説得力がない

たとえば次を参照のこと。Phillips, J.B., & Waldvogel, J.A. (1988). 'Celestial polarized light patterns as a calibration reference for sun compass of homing pigeons', *Journal of Theoretical Biology*, 131 (1), pp. 55-67.

p.160 パピの仮説を支持する研究者たちは……熱心に研究を続けてきている。

詳しい解説記事は次を参照のこと。: Gagliardo, A. (2013). 'Forty years of olfactory navigation in birds', *Journal of Experimental Biology*, 216 (12), pp. 2165-71.

p.160 異なる種類の実験を17件もリストアップしている。

Wallraff, H.G. (2015). 'An amazing discovery: bird navigation based on olfaction', *Journal of Experimental Biology*, 218 (10), pp. 1464-6.

p.160 いわゆる「偽の放鳥地点」を使ったものだ。

Benvenuti, S. and Wallraff, H.G. (1985). 'Pigeon navigation: site simulation by means of atmospheric odours', *J. Comp. Physiol. A.*, 156, pp. 737-46.

p.161 ナビゲーションの面で役立つような、他の情報を与えることはない

Jorge, P.E., Marques, A.E., & Phillips, J.B. (2009). 'Activational rather than navigational effects of odors on homing of young pigeons', *Current Biology*, 19 (8), pp. 650-4.

p.161 ハトの帰巢能力を実際に弱めていることがわかった

Gagliardo, A., Pollonara, E., & Wikelski, M. (2018). 'Only natural local odours allow homeward orientation in homing pigeons released at unfamiliar sites', *J. Comp. Physiol. A.*, pp. 1-11.

p.162 決着がつかないという声もでている。

C. Walcott, W. Wiltschko, R. Wiltschko, G. K. Zupanc and K. H. Günther, 'Olfactory navigation versus olfactory activation: a controversy revisited', *Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2018, 204 (8), pp. 703-706.

p.162 そのずば抜けたナビゲーション能力にはおそらく匂いが関係している。

Nevitt, G.A. (2008). 'Sensory ecology on the high seas: the odor world of the procellariiform seabirds', *Journal of Experimental Biology*, 211 (11), pp. 1706-13. 同じように、伝書バトの嗅球は通常のハトの嗅球よりも大きい（ただしミズナギドリよりは小さい）。次を参照のこと。Mehlhorn, J., & Rehkämper, G. (2009). 'Neurobiology of the homing pigeon - a review', *Naturwissenschaften*, 96 (9), pp. 1011-25.

p.162 ミズナギドリに追跡装置を取り付けた実験

Gagliardo, A., Bried, J., Lambardi, P., Luschi, P., Wikelski, M., & Bonadonna, F. (2013). 'Oceanic navigation in Cory's shearwaters: evidence for a crucial role of olfactory cues for homing after displacement', *Journal of Experimental Biology*, 216 (15), pp. 2798-805.

p.162 ミズナギドリを地中海西部の陸地が見えない海域で放鳥

Pollonara, E., Luschi, P., Guilford, T., Wikelski, M., Bonadonna, F., & Gagliardo, A. (2015). 'Olfaction and topography, but not magnetic cues, control navigation in a pelagic seabird: displacements with shearwaters in the Mediterranean Sea', *Scientific Reports*, 5, srep16486.

p.163 時間補正式太陽コンパスがミズナギドリのナビゲーションツールの1つ

O. Padget, S. L. Bond, M. M. Kavelaars, E. van Loon, M. Bolton, A. L. Fayet and T. Guilford, 'In Situ Clock Shift Reveals that the Sun Compass Contributes to Orientation in a Pelagic Seabird', *Current Biology*, 2018, 28 (2), pp. 275-279. p. 264, lines 1-2.

p.163 鳥が見えた時点で視覚的なランドマークを見つけられた

Padget, O., Dell'Ariccia, G., Gagliardo, A., González-Solis, J., & Guilford, T. (2017). 'Anosmia impairs homing orientation but not foraging behaviour in

- free-ranging shearwaters', *Scientific Reports*, 7, 9668.
- p.163 風速の影響を受けていることがわかった。
Abolaffio, M., Reynolds, A.M., Cecere, J.G., Paiva, V.H., & Focardi, S. (2018). 'Olfactory-cued navigation in shearwaters: linking movement patterns to mechanisms', *Scientific Reports*, 8 (1), 11590.
- p.163 特にジメチルスルフィド (DMS) という化合物に敏感に反応
Debose, J.L., & Nevitt, G.A. (2008). 'The use of odors at different spatial scales: comparing birds with fish', *Journal of Chemical Ecology*, 34 (7), pp. 867–81. <http://doi.org/10.1007/s10886-008-9493-4>.
- p.164 こうしたランドスケープをよく理解する
Nevitt, G.A., & Bonadonna, F. (2005). Sensitivity to dimethyl sulphide suggests a mechanism for olfactory navigation by seabirds', *Biology Letters*, 1 (3), pp. 303–5.
- p.164 旅の各ステージでそれぞれ違うナビゲーションツールを使う
Mouritsen, H. (2018). 'Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals', *Nature*, 558 (7708), p. 50.
- p.165 そうした条件下でも無事に巣に戻る
Benhamou, S., Bried, J., Bonadonna, F., & Jouventin, P. (2003). 'Homing in pelagic birds: a pilot experiment with white-chinned petrels released in the open sea', *Behavioural Processes*, 61 (1–2), pp. 95–100; Bonadonna, F., Bajzak, C., Benhamou, S., Igloi, K., Jouventin, P., Lipp, H.P., & Dell'Omo, G. (2005). 'Orientation in the wandering albatross: interfering with magnetic perception does not affect orientation performance', *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 272 (1562), pp. 489–95.
- p.165 人工的な磁気源の存在を検出する能力にも影響
Mora, C.V., Davison, M., Wild, J.M., & Walker, M.M. (2004). 'Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon', *Nature*, 432 (7016), p. 508.
- p.165 放鳥地点まで麻酔をかけて運んでも帰巣能力にはあまり影響しない。
Wallraff, H. G. (1980). 'Does pigeon homing depend on stimuli perceived during displacement?', *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 139 (3), pp. 193–201.
- p.165 嗅覚ナビゲーション仮説全体について懐疑的な姿勢
たとえば次を参照のこと。Wiltshcko, R., & Wiltshcko, W. (2017). 'Considerations on the role of olfactory input in avian navigation', *Journal of Experimental Biology*, 220 (23), pp. 4347–50.
- p.166 ウェルズ沖合のスコマー島のニシツノメドリを追跡した科学者チーム
Guilford, T., Freeman, R., Boyle, D., Dean, B., Kirk, H., Phillips, R., & Perrins, C. (2011). 'A dispersive migration in the Atlantic puffin and its implications for migratory navigation', *PLoS One*, 6 (7), e21336.
- p.168 海岸に沿ってずっとユキホオジロの巣があり……
Gatty, H., *Finding Your Way Without Map or Compass* (Dover Books, 1983), pp. 78–9. ハロルド・ギャティ『自然は導く』(岩崎晋也訳、みすず書房)
- p.168 人間の2つの耳は方向探知機として機能
Konishi, M. (1993). 'Listening with two ears', *Scientific American*, 268 (4), pp. 66–73.
- p.169 歩道を歩いていて、木々の横を通るときに……
Wilson, Clare, 'Human bat uses echoes and sounds to see the world', *New Scientist*, 6 May 2015.
- p.169 目の見える人々も (目隠しを着けて) 練習すれば……
次を参照のこと。Flanagin, V.L., Schörmich, S., Schraner, M., Hummel, N., Wallmeier, L., Wahlberg, M., . . . & Wiegrebe, L. (2017). 'Human exploration of enclosed spaces through echolocation', *Journal of Neuroscience*, 37 (6), pp. 1614–27; and Thaler, L., Reich, G.M., Zhang, X., Wang, D., Smith, G.E., Tao, Z., et al. (2017). 'Mouth-clicks used by blind expert human echolocators – signal description and model-based signal synthesis', *PLoS Comput Biol.*, 13 (8), e1005670.
- p.170 オールのハンドルに耳を押し当てれば……
次を参照のこと。Balcombe, J., *What a Fish Knows: The Inner Lives of our Underwater Cousins* (Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2016), p. 44. ジョナサン・バルコム『魚たちの愛すべき知的生活』(桃井緑美子訳、白揚社)
- p.170 ラザロ・スパンランツァーニ (1729～99年) の独創的な実験
Kemp, Christopher, 'The original batman', *New Scientist*, 15 November 2017.
- p.171 周囲のきわめて詳細な三次元「像」を構築する
Griffin, D. R., Webster, F. A., & Michael, C. R. (1960). The echolocation of flying insects by bats. *Animal Behaviour*, 8 (3–4), pp. 141–154.
- p.171 コウモリがガを捕まえるには……
メンフクロウも、聴力だけを使って、暗闇で獲物を見つけることができる。ネズミが草の間をちょこちょここと走るときに立てるかすかな音を感知して、その位置を驚くほどの正確さで突き止める。
- p.172 自分のねぐらから決まった「飛行経路」で猟場に向かうとき
次を参照のこと。Ulanovsky, N., & Moss, C.F. (2008). 'What the bat's voice tells the bat's brain', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (25), pp. 8491–8.
- p.172 イルカがこのシステムを使って、海底地形をたどって移動
Waterman, T.H., *Animal Navigation* (Scientific American Library, 1989), pp. 131–3.
- p.172 ネズミイルカの研究でも、ソナーを利用して……
Verfuß, U.K., Miller, L.A., & Schnitzler, H.U. (2005). 'Spatial orientation in echolocating harbour porpoises (*Phocoena phocoena*)', *Journal of Experimental Biology*, 208 (17), pp. 3385–94.

●第13章 音によるナビゲーションの謎

p.176 伝書バトがインフラサウンドを感知できるのは確か

Kreithen, M.L., & Quine, D.B. (1979). 'Infrasound detection by the homing pigeon: a behavioral audiogram', *Journal of Comparative Physiology*, 129 (1), pp. 1-4.

p.176 コンコルドはフランス沿岸部を越えた後で超音速に達していた

私は、英仏海峡を航行しているときに、コンコルドが「ブーンブーン」というひどく大きな音を2回立てるのをよく聞いた。

p.178 結果を発表するには問題があった。

Hagstrum, J.T. (2000). 'Infrasound and the avian navigational map', *Journal of Experimental Biology*, 203 (7), pp. 1103-11.

p.181 大砲の音がグラント將軍のもとにまったく届かなかった

次を参照のこと。Grant, U.S. (1895), *Personal Memoirs of U. S. Grant. Sampson Low*, ch. 28. その他の例は次を参照のこと: www.nellaware.com/blog/acoustic-shadow-in-the-civil-war.html.

p.181 その結果、ジャージーヒルにいたハトは……

Hagstrum, J.T. (2013). 'Atmospheric propagation modeling indicates homing pigeons use loft-specific infrasonic 'map' cues', *Journal of Experimental Biology*, 216 (4), pp. 687-99.

p.182 ドップラー効果を利用して、鳩舎周辺の特徴的な音がやってくる……

Quine, D.B., & Kreithen, M.L. (1981). 'Frequency shift discrimination: Can homing pigeons locate infrasounds by Doppler shifts?', *Journal of Comparative Physiology*, 141 (2), pp. 153-5.

p.182 聴覚を失ったハトの中にも正しい方向に進めないハトが……

Wallraff, H.G. (1972). 'Homing of pigeons after extirpation of their cochleae and lagenae', *Nature*, 236 (68), pp. 223-4.

p.182 聴覚を失っていない対照群の一部のハトも、正しい方向に進めなかった

Hagstrum, J.T., & Manley, G.A. (2015). 'Releases of surgically deafened homing pigeons indicate that aural cues play a significant role in their navigational system', *Journal of Comparative Physiology A*, 201 (10), pp. 983-1001.

p.183 冬季に北太平洋で発生する嵐が増えるせいで……

Hagstrum, J.T., McIsaac, H.P., & Drob, D.P. (2016). 'Seasonal changes in atmospheric noise levels and the annual variation in pigeon homing performance', *Journal of Comparative Physiology A*, 202 (6), pp. 413-24.

p.184 科学者たちはそうした問題を克服した。

Hoffman, J.I., & Forcada, J. (2012). 'Extreme natal philopatry in female Antarctic fur seals (*Arctocephalus gazella*)', *Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde*, 77 (1), pp. 71-3.

p.185 実質的に現在と同じハーレムの分布パターン

Hoffman, J.I. & Forcada, J. (2012), 前掲書。

●第14章 磁気感覚の正体を探る

p.187 ヨーロッパで独自に発明されたものかどうかについては、いまだに議論

議論について詳しくは、次を参照。Taylor, E.G.R., *The Haven-Finding Art: A History of Navigation from Odysseus to Captain Cook* (Hollis and Carter, 1956), ch. 5.

p.187 液体金属である外核が……磁場を生み出している。

実際には、地球磁場を生み出しているのは、液体の外核と、内核の謎の始原磁場の相互作用である。この点を指摘してくれたジョン・ハグストラムに感謝する。

p.188 磁極は現在、地理極から数百キロ離れており、つねに移動

ややこしいことに、地球磁場の(磁石としての)N極は地理的な南極付近に、S極は地理的な北極付近にある。

p.188 「偏角」と呼ばれている。

船舶の世界では「declination」の代わりに「magnetic variation」という語が使われる。おそらく、天文航海で使われる重要なパラメーターの1つである「celestial declination」(赤緯)との混乱を避けるためだろう。

p.188 磁極に近い場所にいると、偏角が短い距離ですぐに変化

次のサイトでわかりやすく視覚化されている。https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical_declination/.

p.191 磁場強度の変化を表す地図は……

地表での偏角や伏角、磁場強度の場所による違いを示す図は、アメリカ海洋大気庁(NOAA)のウェブサイトにある。<https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml>.

p.191 信頼できる情報を得るのは……

そうした地図は、次のサイトにある。https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_F_MERC.pdf.

p.192 進む方向を決めている可能性がある

Viguier, C. (1882). 'Le sens de l'orientation et ses organes chez les animaux et chez l'homme', *Revue Philosophique de la France et de l'Etranger*, pp. 1-36.

p.193 ミツバチがナビゲーションの補助として磁気情報を使っているのか

Gould, J.L., & Gould, C.G., *Nature's Compass* (Princeton University Press, 2012), pp. 100-4.

p.193 鳥に磁気感覚があるという証拠は……1960年代から登場し始めた。

Merkel, F. W., Wiltshcko, W. (1965), 'Magnetismus und richtungsfinden zugunruhiger rotkehlchen (*Erithacus rubecula*)', *Vogelwarte*, 23 (1), pp. 71-77.

p.193 1971年におこった、ある重要な実験

Wiltshcko, W., & Wiltshcko, R. (1972). 'Magnetic compass of European robins', *Science*, 176 (4030), pp. 62-4.

p.195 伏角コンパスの校正には、空の偏光パターンを使っている。

Able, K.P., & Able, M.A. (1993). 'Daytime calibration of magnetic orientation in a migratory bird requires a view of skylight polarization', *Nature*, 364 (6437), p. 523.

p.195 赤道を越えて進むときでも方向を一定に保つことができる

Cochran, W.W., Mouritsen, H., & Wikelski, M. (2004). 'Migrating songbirds

- recalibrate their magnetic compass daily from twilight cues', *Science*, 304 (5669), pp. 405–8.
- p.195 磁気感覚が珍しい現象ではない
Wiltshcko, W., & Wiltshcko, R. (2005). 'Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals', *Journal of Comparative Physiology A*, 191 (8), pp. 675–93.
- p.195 サンゴ礁に棲む魚
Bottesch, M., Gerlach, G., Halbach, M., Bally, A., Kingsford, M.J., & Mouritsen, H. (2016). 'A magnetic compass that might help coral reef fish larvae return to their natal reef', *Current Biology*, 26 (24), R1266–7.
- p.195 ショウジョウバエ
Phillips, J.B., & Sayeed, O. (1993). 'Wavelength-dependent effects of light on magnetic compass orientation in *Drosophila melanogaster*', *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 172 (3), pp. 303–8.
- p.195 甲虫
Vácha, M., Dršťková, D., & Puřžová, T. (2008). 'Tenebrio beetles use magnetic inclination compass', *Naturwissenschaften*, 95 (8), pp. 761–5.
- p.195 8000 キロメートルを超えることもある。
Rasmussen, K., Palacios, D.M., Calambokidis, J., Saborío, M.T., Dalla Rosa, L., Secchi, E.R., . . . & Stone, G.S. (2007). 'Southern Hemisphere humpback whales wintering off Central America: insights from water temperature into the longest mammalian migration', *Biology Letters*, 3 (3), pp. 302–5.
- p.196 追跡装置を使った最近の研究
Horton, T.W., Holdaway, R.N., Zerbini, A.N., Hauser, N., Garrigue, C., Andriolo, A., & Clapham, P.J. (2011). Straight as an arrow: humpback whales swim constant course tracks during long-distance migration. *Biology letters*, 7 (5), 674–679.
- p.196 水中の大きなノイズがクジラを混乱させる
Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G., & Thompson, P.M. (2010). 'Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals', *Marine Pollution Bulletin*, 60 (6), pp. 888–97.
- p.196 地球磁場強度の勾配がクジラの方向感覚にある程度の役割
Kirschvink, J.L., Dizon, A.E., & Westphal, J.A. (1986). 'Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans', *Journal of Experimental Biology*, 120 (1), pp. 1–24; and Kirschvink, J.L., 'Geomagnetic sensitivity in cetaceans: an update with live stranding records in the United States', in *Sensory Abilities of Cetaceans* (Springer, Boston, MA, 1990), pp. 639–49.
- p.196 マスストランディングは、強力な太陽嵐によって生じた
Vanselow, K.H., Jacobsen, S., Hall, C., & Garthe, S. (2017). 'Solar storms may trigger sperm whale strandings: explanation approaches for multiple strandings in the North Sea in 2016', *International Journal of Astrobiology*, pp. 1–9.
- p.197 海山が……ナビゲーション用のビーコンの役割
Garrigue C, Clapham, P.J., Geyer, Y., Kennedy, A.S., Zerbini, A.N. (2015). Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific humpback whales. *Royal Society open science*, 2 (11), 150489.
- ◎第15章 大集団で数千キロも旅するチョウ
- p.198 昆虫学者フレデリック・アーカート (1911 ~ 2002 年) の功績
オオカバマダラの渡りの謎をめぐる初期の歴史を振り返るには、次を参照のこと。Brower, L. (1996). 'Monarch butterfly orientation: missing pieces of a magnificent puzzle', *Journal of Experimental Biology*, 199 (1), pp. 93–103.
- p.199 まだアーカートを悩ませていたが……
Urquhart, F., *The Monarch Butterfly* (University of Toronto Press, 1960), p. viii.
- p.200 手伝いたいという申し出が殺到した
同上。
- p.200 メキシコの新聞に広告を出した。
この後のオオカバマダラの渡りについての説明は、次の文献を参考にしている。Walbauer, G. (2000). *Millions of monarchs, bunches of beetles: how bugs find strength in numbers*. Harvard University Press. pp. 50–70.
- p.203 遠い土地に点在する越冬地に戻るコースを……
Barker, J.F., & Herman, W.S. (1976). 'Effect of photoperiod and temperature on reproduction of the monarch butterfly, *Danaus plexippus*', *Journal of Insect Physiology*, 22 (12), pp. 1565–8.
- p.203 ペレスの研究チームのメンバーは……
Perez, S.M., Taylor, O.R., & Jander, R. (1997). 'A sun compass in monarch butterflies', *Nature*, 387 (6628), p. 29.
- p.204 モニタリングする実験方法を考案
Mouritsen, H., & Frost, B.J. (2002). 'Virtual migration in tethered flying monarch butterflies reveals their orientation mechanisms', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (15), pp. 10162–6.
- p.204 一種のフライトシュミレーターの中で
この実験方法については第17章でさらに詳しく説明している。
- p.204 ステイプ・レパートの研究チームは……
Reppert, S.M., Zhu, H., & White, R.H., (2004). 'Polarized light helps monarchs migrate', *Current Biology*, 14 (2), pp. 155–8.
- p.205 どのようなしくみなのかは正確にはわからない。
Merlin, C., Gegeer, R.J., & Reppert, S.M. (2009). 'Antennal circadian clocks coordinate sun compass orientation in migratory monarch butterflies', *Science*, 325 (5948), pp. 1700–4; and Guerra, P.A., Merlin, C., Gegeer, R.J., & Reppert, S.M. (2012). 'Discordant timing between antennae

- disrupts sun compass orientation in migratory monarch butterflies', *Nature Communications*, 3, p. 958.
- p.205 その本質的なしくみはまだ確かめられていない。
Heinze, S., & Reppert, S.M. (2011). 'Sun compass integration of skylight cues in migratory monarch butterflies', *Neuron*, 69 (2), pp. 345–58.
- p.206 レパートとパトリック・グエラによる研究
Guerra, P.A., Gegeer, R.J., & Reppert, S.M. (2014). 'A magnetic compass aids monarch butterfly migration', *Nature Communications*, 5.
- p.206 オオカバマダラの触角にある光受容体に基づいて……
Reppert, S.M., Guerra, P.A., & Merlin, C. (2016). 'Neurobiology of monarch butterfly migration', *Annual Review of Entomology*, 61, pp. 25–42.
- p.206 磁気による方向決定の証拠は得られなかった。
Stalleicken, J., Mukhida, M., Labhart, T., Wehner, R., Frost, B.J. & Mouritsen, H. (2005). 'Do monarch butterflies use polarized skylight for orientation?', *Journal of Experimental Biology*, 208, pp. 2399–408.
- p.206 最初にカナダのオンタリオで実験をして……
Mouritsen, H., Derbyshire, R., Stalleicken, J., Mouritsen, O.Ø., Frost, B.J., & Norris, D.R. (2013). 'An experimental displacement and over 50 years of tag-recoveries show that monarch butterflies are not true navigators', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (18), pp. 7348–53.
- p.208 その土地で生まれたトンボが、さらにアフリカ大陸南部まで……
Anderson, R.C. (2009). 'Do dragonflies migrate across the western Indian Ocean?', *Journal of Tropical Ecology*, 25 (4), pp. 347–58.
- p.209 その旅は、インド北部カネパール、さらに……
Hobson, K.A., Anderson, R.C., Soto, D.X., & Wassenaar, L.I. (2012). 'Isotopic evidence that dragonflies (*Pantala flavescens*) migrating through the Maldives come from the northern Indian subcontinent', *PLoS One*, 7 (12), e52594.
- p.209 昆虫が風をとて巧みに使う
Chapman, J.W., Reynolds, D.R., & Wilson, K. (2015). 'Long-range seasonal migration in insects: mechanisms, evolutionary drivers and ecological consequences', *Ecology Letters*, 18 (3), pp. 287–302.
- 第16章 なぜ針路をうまく修正できるのか
- p.210 やはり太陽コンパスを使っている
Nesbit, R.L., Hill, J.K., Woiwod, I.P., Sivell, D., Bensusan, K.J., & Chapman, J.W. (2009). 'Seasonally adaptive migratory headings mediated by a sun compass in the painted lady butterfly, *Vanessa cardui*', *Animal Behaviour*, 78 (5), pp. 1119–25.
- p.211 最大で推定2億4000万匹のガンマキンウワバが……
Chapman, J. W., Bell, J.R., Burgin, L.E., Reynolds, D.R., Pettersson, L.B., Hill, J.K., . . . & Thomas, J.A. (2012). 'Seasonal migration to high latitudes results in major reproductive benefits in an insect', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (37), pp. 14924–9.
- p.212 その総重量は数千トンになる
Hu, G., Lim, K.S., Horvitz, N., Clark, S.J., Reynolds, D.R., Sapir, N., & Chapman, J.W. (2016). 'Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants', *Science*, 354 (6319), pp. 1584–7.
- p.215 ガヤチョウが地磁気をナビゲーションに使っていることを示す……
Chapman, J.W., et al. (2010). 'Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects', *Science*, 327, pp. 682–5.
- p.216 ウミスズメがはるか遠い昔に……
Gaston, A.J., Hashimoto, Y., & Wilson, L. (2015). First evidence of east–west migration across the North Pacific in a marine bird', *Ibis*, 157 (4), pp. 877–82.
- 第17章 スノーウィー山地の「闇の王」
- p.218 その距離は1000キロ以上だ。
オーストラリアには、異なる方向に渡りをする別のボゴングガの集団がいる。
- p.218 岩肌1平方メートルあたり1万7000匹にもなる。
Warrant, E., Frost, B., Green, K., Mouritsen, H., Dreyer, D., Adden, A., . . . & Heinze, S. (2016). The Australian Bogong moth *Agrotis infusa*: a long-distance nocturnal navigator. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10, 77.
- p.219 ボゴングガの驚くべき生活史を報告する面白い論文
Heinze, S., & Warrant, E. (2016). 'Bogong moths', *Current Biology*, 26 (7), R263–5.
- p.219 ボゴングガは、1000キロ離れたところからスタートし……
同上。
- p.224 「肌はつやつやして、大半がかなり太っていた」という記述
Warrant, E. et al (2016), 前掲書。
- p.233 視覚と磁気の「スナップショット」を比較
Dreyer, D., Frost, B., Mouritsen, H., Günther, A., Green, K., Whitehouse, M., . . . & Warrant, E. (2018). The Earth's Magnetic Field and Visual Landmarks Steer Migratory Flight Behavior in the Nocturnal Australian Bogong Moth. *Current Biology*, 28 (13), 2160–2166.
- p.234 ヘビで観察されたのは初めて
Pittman, S.E., Hart, K.M., Cherkiss, M.S., Snow, R.W., Fujisaki, I., Smith, B.J., . . . & Dorcas, M.E. (2014). Homing of invasive Burmese pythons in South Florida: evidence for map and compass senses in snakes', *Biology Letters*, 10 (3), 20140040.
- 第18章 動物はどんなマップを使っているか
- p.237 「他者中心型ナビゲーション」と「自己中心型ナビゲーション」
専門用語としてはそれぞれ「アロセントリック」と「エゴセントリック」という。
- p.239 「地図・コンパス」ナビゲーション
「真のナビゲーション」と呼ばれることもある。

- p.241 観測された3つの音の大きさを表す円が地図上で交わる点
2つのシグナルでは十分ではない。その円は異なる2点で交わるため、あいまいさが生まれるからだ。
- p.244 パーデックの実験では……
Perdeck, A.C. (1958). 'Two Types of Orientation in Migrating Starlings, *Sturnus vulgaris* L., and Chaffinches, *Fringilla coelebs* L., as Revealed by Displacement Experiments', *Ardea*, 46 (1-2), pp. 1-2.
- p.246 ハトにすりガラス状のコンタクトレンズを装着させ……
Schmidt-Koenig, K., & Schlichte, H.J. (1972). 'Homing in pigeons with impaired vision', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69 (9), pp. 2446-7; and Schmidt-Koenig, K., & Walcott, C. (1978). 'Tracks of pigeons homing with frosted lenses', *Animal Behaviour*, 8 (26), pp. 480-6.
- p.246 見知らぬ遠い放鳥地点まで麻酔をかけた状態
Walcott, C., & Schmidt-Koenig, K. (1973). The effect on pigeon homing of anesthesia during displacement. *The Auk*, 90 (2), 281-286.
- p.247 匂いマップは……
Wallraff, H.G. (2013). 'Ratios among atmospheric trace gases together with winds imply exploitable information for bird navigation: a model elucidating experimental results', *Biogeosciences*, 10 (11), pp. 6929-43.
- p.247 その種の匂配マップとして表せることを示した研究
Wallraff, H. (2005). 'Beyond familiar landmarks and integrated routes: goal-oriented navigation by birds', *Connection Science*, 17 (1-2), pp. 91-106.
- p.248 東西方向の変化はわずかしかない
Boström, J.E., Åkesson, S., & Alerstam, T. (2012). 'Where on earth can animals use a geomagnetic bi-coordinate map for navigation?', *Ecography*, 35 (11), pp. 1039-47.
- p.248 考えるべき事柄は非常にシンプルです……
For fuller discussion, see Mouritsen, H. (2013). 'The Magnetic Senses', in: C.G. Galizia, P.-M. Lledo (eds.), *Neurosciences - From Molecule to Behavior: A University Textbook*, DOI 10.1007/978-3-642-10769-6_20, pp. 427-43.
- p.249 渡り鳥が太陽コンパスの較正に偏光を使っている
Muheim, R. (2011). 'Behavioural and physiological mechanisms of polarized light sensitivity in birds', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 366 (1565), pp. 763-71.
- p.250 空にある e - ベクトルとほぼ同じ方法で使えば方角を知ることができる
Waterman, T.H. (2006). 'Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals', *Biological Reviews*, 81 (1), pp. 111-15.
- p.250 水中の e - ベクトルは動物が位置を決定するのも役立つ
Powell, S.B., Garnett, R., Marshall, J., Rizk, C., & Gruev, V. (2018). 'Bioinspired polarization vision enables underwater geolocalization', *Science Advances*, 4 (4), eaao6841.
- 第 19 章 時差ボケのヨシキリが教えてくれたこと
- p.251 カスパー・トールップが発表した研究
Thorup, K., Bisson, I.-A., Bowlin, M.S., Holland, R.A., Wingfield, J.C., Ramenofsky, M., & Wikelski, M. (2007). 'Evidence for a navigational map stretching across the continental U.S. in a migratory songbird', *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, pp. 18115-19.
- p.254 リバチで捕まえたヨシキリを……モスクワ近くの場所まで
Chernetsov, N., Kishkinev, D., & Mouritsen, H. (2008). 'A long-distance avian migrant compensates for longitudinal displacement during spring migration', *Current Biology*, 18 (3), pp. 188-90.
- p.255 哺乳類の「概日時計」
Piggins, H.D., & Loudon, A. (2005). 'Circadian biology: clocks within clocks', *Current Biology*, 15 (12), R455-7.
- p.255 渡りをするヨシキリの体内時計を人工的にシフトさせる実験
Kishkinev, D., Chernetsov, N., & Mouritsen, H. (2010). 'A Double-Clock or Jetlag Mechanism is Unlikely to be Involved in Detection of East-West Displacements in a Long-Distance Avian Migrant', *The Auk*, 127 (4), pp. 773-80.
- p.256 人工的な磁場を作り出した
Kishkinev, D., Chernetsov, N., Pakhomov, A., Heyers, D., & Mouritsen, H. (2015). 'Eurasian reed warblers compensate for virtual magnetic displacement', *Current Biology*, 25 (19), R822-4.
- p.256 三叉神経を切断すると……補正できないことも明らかにした。
Kishkinev, D., Chernetsov, N., Heyers, D., & Mouritsen, H. (2013). 'Migratory reed warblers need intact trigeminal nerves to correct for a 1,000 km eastward displacement', *PLoS One*, 8 (6), e65847.
- p.257 チェルネツォフたちはとても興味深い発見をした。
Chernetsov, N., Pakhomov, A., Kobylkov, D., Kishkinev, D., Holland, R.A., & Mouritsen, H. (2017). 'Migratory Eurasian reed warblers can use magnetic declination to solve the longitude problem', *Current Biology*, 27 (17), pp. 2647-51.
- p.260 サケは地球磁場と同じ強度の磁場内では方向を正しく決める
Quinn, T.P., and Brannon, E.L. (1982). 'The use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts', *J. Comp. Physiol.*, 147, pp. 547-52.
- p.263 ベニザケが磁気マップを使うのは……プットマンは考えている。
Putman, N.F., Lohmann, K.J., Putman, E.M., Quinn, T.P., Klimley, A.P., & Noakes, D.L. (2013). 'Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism in Pacific salmon', *Current Biology*, 23 (4), pp. 312-16.
- p.263 海の真ん中にある餌場を目指して進む方向を決める
Putman, N.F., Scanlan, M.M., Billman, E.J., O'Neil, J.P., Couture, R.B., Quinn, T.P., . . . & Noakes, D.L. (2014). 'An inherited magnetic map guides ocean navigation in juvenile Pacific salmon', *Current Biology*, 24 (4), pp.

446-50.

p.263 ノロジカの群れを驚かせる実験

Obleser, P., Hart, V., Malkemper, E.P., Begall, S., Holá, M., Painter, M.S., . . . & Burda, H. (2016). 'Compass-controlled escape behavior in roe deer', *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 70 (8), pp. 1345-55.

●第20章 ウミガメの驚きの回帰能力

p.269 恋愛中のウミガメは恐ろしいくらい熱心だ……

Carr, A. F., *The Sea Turtle* (University of Texas, 1986), pp. 26-7.

p.270 アセンション島を見落としたら……

同上。p. 159.

p.272 ナビゲーションのプロセスには、これ以外の何かがある

同上。pp. 163-5.

p.274 渡りの最後の475キロでは一定の方角を保っていた

Papi, F., Liew, H.C., Luschi, P., & Chan, E.H. (1995). 'Long-range migratory travel of a green turtle tracked by satellite: evidence for navigational ability in the open sea', *Marine Biology*, 12 (2), pp. 171-5.

p.275 マレーシアからはるばるボルネオ島北部まで泳いでいたし……

Luschi, P., Papi, F., Liew, H.C., Chan, E.H., & Bonadonna, F. (1996). 'Long-distance migration and homing after displacement in the green turtle (*Chelonia mydas*): a satellite tracking study', *Journal of Comparative Physiology A*, 178 (4), pp. 447-52.

p.275 ある移動実験では、メスのアカウミガメが最大70キロの距離から

Papi, F., Luschi, P., Crosio, E., & Hughes, G.R. (1997). 'Satellite tracking experiments on the navigational ability and migratory behaviour of the loggerhead turtle *Caretta caretta*', *Marine Biology*, 129 (2), pp. 215-20.

p.276 強い海流の効果もあったかもしれない。

Hughes, G.R., Luschi, P., Mencacci, R., & Papi, F. (1998). 'The 7000-km oceanic journey of a leatherback turtle tracked by satellite', *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 229 (2), pp. 209-17.

p.276 アセンション島で18頭のメスのアオウミガメを捕獲し……

Luschi, P., Åkesson, S., Broderick, A.C., Glen, F., Godley, B.J., Papi, F., & Hays, G.C. (2001). 'Testing the navigational abilities of ocean migrants: displacement experiments on green sea turtles (*Chelonia mydas*)', *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 50 (6), pp. 528-34.

p.276 アオウミガメの営巣地への回帰に匂いが重要であること

Hays, G.C., Åkesson, S., Broderick, A.C., Glen, F., Godley, B.J., Papi, F., & Luschi, P. (2003). 'Island-finding ability of marine turtles', *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270 (suppl. 1), S5-7.

p.277 コモロ諸島で大変な実験

Luschi, P., Benhamou, S., Girard, C., Ciccione, S., Roos, D., Sudre, J., & Benvenuti, S. (2007). 'Marine turtles use geomagnetic cues during open-sea homing', *Current Biology*, 17 (2), pp. 126-33.

p.278 アイランド沖で再捕獲されたタラのうち、95パーセントが……

Bonanomi, S., Overgaard Therkildsen, N., Retzel, A., Berg Hedeholm, R., Pedersen, M.W., Meldrup, D., . . . & Nielsen, E.E. (2016). 'Historical DNA documents long-distance natal homing in marine fish', *Molecular Ecology*, 25 (12), pp. 2727-34.

●第21章 コスタリカでの冒険

p.280 ローマンは誰よりも詳しく、過去30年になしとげてきた素晴らしい発見
ローマン教授の研究室のウェブサイトには研究内容がわかりやすくまとめられており、役に立つ画像や、研究チームの論文リストなどがある。<http://www.unc.edu/depts/oceanweb/turtles/>.

p.287 小さな子ガメたちは岸を目指して泳いだ。

Lohmann, K.J., & Lohmann, C.M. (1992). Orientation to waves by green turtle hatchlings. *Journal of Experimental Biology*, 171 (1) pp. 1-13.

p.289 キタゾウアザラシもやはり驚異的な大洋横断の旅をする

Stewart, B.S., & DeLong, R.L. (1995). 'Double migrations of the northern elephant seal, *Mirounga angustirostris*', *Journal of Mammalogy*, 76 (1), pp. 196-205.

p.289 メスは1年間で少なくとも1万8000キロの距離を移動

Bonfil, R., Meyer, M., Scholl, M.C., Johnson, R., O'Brien, S., Oosthuizen, H., . . . & Paterson, M. (2005). 'Transoceanic migration, spatial dynamics, and population linkages of white sharks', *Science*, 310 (5745), pp. 100-3.

p.290 サメの仲間の中には磁場に反応する種もいる

Anderson, J.M., Clegg, T.M., Veras, L.V., & Holland, K.N. (2017). 'Insight into shark magnetic field perception from empirical observations', *Scientific Reports*, 7 (1), p. 11042.

p.290 ザトウクジラやゾウアザラシ、ホオジロガメの追跡データを分析

Horton, T.W., Hauser, N., Zerbini, A.N., Francis, M.P., Domeier, M.L., Andriolo, A., . . . & Holdaway, R.N. (2017). 'Route Fidelity During Marine Megafauna Migration', *Frontiers in Marine Science*, 4, p. 422.

●第22章 生まれた場所の磁気を伝える遺伝子

p.293 実際には、子ガメはきっぱりと南に向いた

Lohmann, K.J., & Lohmann, C.M. (1994). 'Detection of magnetic inclination angle by sea turtles: a possible mechanism for determining latitude', *Journal of Experimental Biology*, 194 (1), pp. 23-32.

p.294 伏角を使っている可能性

Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F., Ehrhart, L.M., Bagley, D.A. and Swing, T. (2004). 'Geomagnetic map used in sea-turtle navigation', *Nature*, 428, pp. 909-10.

p.294 若いカメが決して受動的に漂っているのではない

Putman, N.F., & Mansfield, K.L. (2015). 'Direct evidence of swimming demonstrates active dispersal in the sea turtle "lost years"', *Current*

- Biology*, 25 (9), pp. 1221–7.
- p.295 北大西洋循環というベルトコンベアに安全に乗り続ける方角に進む
Lohmann, K.J., & Lohmann, C.M. (1996). 'Detection of magnetic field intensity by sea turtles', *Nature*, 380 (6569), p. 59.
- p.295 子ガメが選択した方角は、仮想的な移動で送られた場所によって……
The hatchlings became disoriented when 'sent' to a location well outside the gyre: Fuxjager, M.J., Eastwood, B.S., & Lohmann, K.J. (2011). 'Orientation of hatchling loggerhead sea turtles to regional magnetic fields along a transoceanic migratory pathway', *Journal of Experimental Biology*, 214 (15), pp. 2504–8.
- p.295 子ガメはポルトガル沖に送られると……
Lohmann, K.J., Cain, S.D., Dodge, S.A., & Lohmann, C.M. (2001). 'Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles', *Science*, 294 (5541), pp. 364–6.
- p.296 子ガメが意味のある方角決定行動をみせたのは……
Putman, N.F., Verley, P., Endres, C.S., & Lohmann, K.J. (2015). 'Magnetic navigation behavior and the oceanic ecology of young loggerhead sea turtles', *Journal of Experimental Biology*, 218 (7), pp. 1044–50.
- p.296 全体としての結論は変わらない。
Summarised in Lohmann, K.J., Putman, N.F., & Lohmann, C.M. (2012). 'The magnetic map of hatchling loggerhead sea turtles', *Current Opinion in Neurobiology*, 22 (2), pp. 336–42.
- p.296 2点を区別できる可能性があることを明らかに
Putman, N.F., Endres, C.S., Lohmann, C.M., & Lohmann, K.J. (2011). 'Longitude perception and bicoordinate magnetic maps in sea turtles', *Current Biology*, 21 (6), pp. 463–6.
- p.298 生まれた砂浜の地磁気の特徴がこのプロセスの重要な要因になっている
Putman, N.F., & Lohmann, K.J. (2008). 'Compatibility of magnetic imprinting and secular variation', *Current Biology*, 18 (14), R596–7.
- p.299 磁気特性を示す等値線……の間隔が狭くなった地域では
Brothers, J.R., & Lohmann, K.J. (2015). 'Evidence for geomagnetic imprinting and magnetic navigation in the natal homing of sea turtles', *Current Biology*, 25 (3), pp. 392–6.
- p.299 初めての遺伝的な証拠
Brothers, J.R., & Lohmann, K.J. (2018). 'Evidence that Magnetic Navigation and Geomagnetic Imprinting Shape Spatial Genetic Variation in Sea Turtles', *Current Biology*, 28 (8), pp. 1325–9.
- p.300 嗅覚も関与しているかもしれない
Endres, C.S., and Lohmann, K.J. (2013). 'Detection of coastal mud odors by loggerhead sea turtles: a possible mechanism for sensing nearby land', *Marine Biology*, 160 (11), pp. 2951–6.
- p.300 他の手がかりを使っている可能性も非常に高い。
Endres, C.S., Putman, N.F., Ernst, D.A., Kurth, J.A., Lohmann, C.M., & Lohmann, K.J. (2016). 'Multi-modal homing in sea turtles: modeling dual use of geomagnetic and chemical cues in island-finding', *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10, p. 19.
- p.300 疑問の答えはまだ見つかっていない。
Lohmann, K.J., Lohmann, C.M., & Endres, C.S. (2008). 'The sensory ecology of ocean navigation', *Journal of Experimental Biology*, 211 (11), pp. 1719–28.
- p.304 イセエビには磁気コンパス感覚がある
Lohmann, K., Pentcheff, N., Nevitt, G., Stetten, G., Zimmer-Faust, R., Jarrard, H., & Boles, L.C. (1995). 'Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: experiments with undersea coil systems', *Journal of Experimental Biology*, 198 (10), pp. 2041–8.
- p.305 ボレスとローマンは、2003年に『ネイチャー』誌に発表した……
Boles, L.C., & Lohmann, K.J. (2003). 'True navigation and magnetic maps in spiny lobsters', *Nature*, 421 (6918), pp. 60–3.
- p.306 ベイカーはその実験で……
Baker, R.R. (1980). 'Goal orientation by blindfolded humans after long-distance displacement: Possible involvement of a magnetic sense', *Science*, 210 (4469), pp. 555–7.
- p.306 特に厳重な条件でおこなわれた実験では……
Fildes, B.N., O'Loughlin, B.J., Bradshaw, J.L., & Ewens, W.J. (1984). 'Human orientation with restricted sensory information: no evidence for magnetic sensitivity', *Perception*, 13 (3), pp. 229–48.
- p.307 その研究成果はすでに論文として発表
Wang, C. X., Hilburn, I. A., Wu, D. A., Mizuhara, Y., Cousté, C. P., Abrahams, J. N., . . . & Kirschvink, J. L. (2019). Transduction of the Geomagnetic Field as Evidenced from Alpha-band Activity in the Human Brain. *eneuro*, 6 (2).
- p.308 ウェールズのセバーン川に遡上してきたシラスウナギを捕まえて
Naisbett-Jones, L.C., Putman, N.F., Stephenson, J.F., Ladak, S., & Young, K.A. (2017). 'A magnetic map leads juvenile European eels to the Gulf Stream', *Current Biology*, 27 (8), pp. 1236–40.
- p.308 はるか遠方で孵化したばかりのウナギの行動に適用できるかどうか
Durif, C.M., Bonhommeau, S., Briand, C., Browman, H.I., Castonguay, M., Daverat, F., . . . & Moore, A. (2017). 'Whether European eel leptocephali use the earth's magnetic field to guide their migration remains an open question', *Current Biology*, 27 (18), R998–1000.
- 第23章 磁気之谜はどこまで解けたのか
- p.311 ほとんどの動物が磁鉄鉱を使ったメカニズムを受け継いでいる
Kobayashi, A., & Kirschvink, J.L. (1995). 'Magnetoreception and electromagnetic field effects: sensory perception of the geomagnetic field in animals and humans'.

- p.311 磁鉄鉱を含んだ数百万個の細胞が並んでいれば
Taylor, B. K., Johnsen, S., & Lohmann, K.J. (2017). 'Detection of magnetic field properties using distributed sensing: a computational neuroscience approach', *Bioinspiration & Biomimetics*, 12 (3), 036013.
- p.311 ミツバチの伏角コンパスになっている
Gould & Gould, *Nature's Compass*, 前掲書, pp. 111–14.
- p.312 磁気を帯びたターゲットを感知して近づくように訓練されたサメ
Anderson, J.M., Clegg, T.M., Vêras, L.V., & Holland, K.N. (2017). 'Insight into shark magnetic field perception from empirical observations', *Scientific Reports*, 7 (1), 11042.
- p.312 2007年には、ハトのくちばしにある感覚神経終末に
Fleissner, G., Stahl, B., Thalau, P., Falkenberg, G., & Fleissner, G. (2007). 'A novel concept of Fe-mineral-based magnetoreception: histological and physicochemical data from the upper beak of homing pigeons', *Naturwissenschaften*, 94 (8), pp. 631–42.
- p.312 ハトが、三叉神経を切断されると感知できなくなる
Mora, C.V., Davison, M., Wild, J.M., & Walker, M.M. (2004). 'Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon', *Nature*, 432 (7016), p. 508.
- p.312 マクロファージという免疫細胞の一種だった
Treiber, C.D., Salzer, M.C., Riegler, J., Edelman, N., Sugar, C., Breuss, M., . . . & Shaw, J. (2012). 'Clusters of iron-rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons', *Nature*, 484 (7394), p. 367.
- p.312 夜間に渡りをする数種の鳥は……まったく問題なく渡りができた
Zapka, M., Heyers, D., Hein, C.M., Engels, S., Schneider, N.L., Hans, J., . . . & Mouritsen, H. (2009). 'Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird', *Nature*, 461 (7268), p. 1274.
- p.313 伝書バトが無事に帰巢するのに……三叉神経はなくてもよかった。
Gagliardo, A., Ioalè, P., Savini, M., & Wild, J.M. (2006). 'Having the nerve to home: trigeminal magnetoreceptor versus olfactory mediation of homing in pigeons', *Journal of Experimental Biology*, 209 (15), pp. 2888–92.
- p.313 一方でヨシキリは……修正できない
Kishkinev, D., Chernetsov, N., Heyers, D., & Mouritsen, H. (2013). 'Migratory reed warblers need intact trigeminal nerves to correct for a 1,000 km eastward displacement', *PLoS One*, 8 (6), e65847.
- p.313 夜間に渡りをする鳴禽の成鳥の方向決定を妨害している
Holland, R.A., & Helm, B. (2013). 'A strong magnetic pulse affects the precision of departure direction of naturally migrating adult but not juvenile birds', *Journal of The Royal Society Interface*, 10 (81), 20121047.
- p.313 ヘンリック・モウリトセンは、「三叉神経に関係した……
詳細な解説は次を参照のこと。Mouritsen, H. (2015). 'Magnetoreception in birds and its use for long-distance migration', *Sturkie's Avian Physiology*, pp. 113–33.
- p.313 鳥の耳の中にある壺嚢という重力センサーが……
Wu, L.Q., & Dickman, J.D. (2012). 'Neural correlates of a magnetic sense', *Science*, 336 (6084), pp. 1054–7.
- p.313 1978年にはすでにクラウス・シュルテンが……
Schulten, K., Swenberg, C.E., & Weller, A. (1978). 'A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion', *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 111 (1), pp. 1–5.
- p.314 「ラジカル (遊離基) 対」が生成するプロセス
ラジカル対に関係する証拠の詳細な解説は、次を参照のこと。Hore, P.J., and Henrik Mouritsen (2016). 'The radical-pair mechanism of magnetoreception', *Annual Review of Biophysics*, 45, pp. 299–344.
- p.316 クラスターンを破壊すると……
Zapka, M., Heyers, D., Hein, C.M., Engels, S., Schneider, N.L., Hans, J., . . . & Mouritsen, H. (2009). 'Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird', *Nature*, 461 (7268), p. 1274.
- p.316 クリプトクロムは、ショウジョウバエによる磁場の感知に
Gegear, R.J., Casselman, A., Waddell, S., & Reppert, S.M. (2008). 'Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*', *Nature*, 454 (7207), p. 1014; Gegear, R. J., Foley, L.E., Casselman, A., & Reppert, S.M. (2010). 'Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism', *Nature*, 463 (7282), p. 804.
- p.316 哺乳類が持つものと同じクリプトクロムをゴキブリの目に……
Bazalova, O., Kvalicova, M., Valkova, T., Slaby, P., Bartos, P., Netusil, R., . . . & Damulewicz, M. (2016). 'Cryptochrome 2 mediates directional magnetoreception in cockroaches', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (6), pp. 1660–5.
- p.318 鳥の内耳にある半規管に入っている流体は電気伝導度が高く……
Jungerman, R.L., & Rosenblum, B. (1980). 'Magnetic induction for the sensing of magnetic fields by animals – an analysis', *Journal of Theoretical Biology*, 87 (1), pp. 25–32.
- p.318 鳥の半規管を覆う有毛細胞に磁性鉱物の粒子を含む構造が……
Lauwers, M., Pichler, P., Edelman, N.B., Resch, G.P., Ushakova, L., Salzer, M.C., . . . & Keays, D.A. (2013). 'An iron-rich organelle in the cuticular plate of avian hair cells', *Current Biology*, 23 (10), pp. 924–9.
- p.318 電磁誘導仮説は、他の2つの仮説と比べると……
Nordmann, G.C., Hochstoeger, T., & Keays, D.A. (2017). 'Magnetoreception – a sense without a receptor', *PLoS Biology*, 15 (10), e2003234.
- p.318 繁殖海域と採餌海域の間をかなり予測可能なルートで移動
Tawa, A., Ishihara, T., Uematsu, Y., Ono, T., & Ohshimo, S. (2017). 'Evidence of westward transoceanic migration of Pacific bluefin tuna in the Sea of Japan based on stable isotope analysis', *Marine Biology*, 164 (4), p. 94; Block, B.A., et al. (2005). 'Electronic tagging and population structure

- of Atlantic bluefin tuna', *Nature* 434, pp. 1121-7.
- p.319 クロマグロは「急激潜行」という奇妙な泳ぎ
Willis, J., Phillips, J., Muheim, R., Diego-Rasilla, F.J., & Hobday, A.J. (2009). 'Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role?', *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 64 (1), p. 57.
- p.319 他のマグロの仲間が磁場に応答することは知られている
Walker, M.M. (1984). 'Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*', *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 155 (5), pp. 673-9.
- 第24章 ナビゲーションの脳科学
- p.321 霊長類学者のフランス・ドゥ・ヴァールは次のように述べている
I De Waal, F., *Are We Smart Enough to Know How Smart Animals Are?* (Granta, 2016), p. 55. フランス・ドゥ・ヴァール『動物の賢さがわかるほど人間は賢いのか』(柴田裕之訳、紀伊國屋書店)
- p.321 1948年に発表した有名な論文で、トールマンは……
Tolman, E.C. (1948). 'Cognitive maps in rats and men', *Psychological Review*, 55 (4), p. 189.
- p.323 ドイツの優れた心理学者ヴォルフガング・ケーラーは……
次の資料にまとめられている。Gould & Gould, *Nature's Compass*, pp. 155-7.
- p.324 実験心理学者のジョージ・ミラーは簡潔な言葉で……
Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B., & Mangun, G.R., *Cognitive Neuroscience* (W.W. Norton, 2002), p. 18.
- p.325 脳の視覚野のさまざまな部位のニューロンが異なる刺激に反応……
たとえば次を参照。Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1963). 'Shape and arrangement of columns in cat's striate cortex', *The Journal of Physiology*, 165 (3), pp. 559-68.
- p.326 「率直に言って実験的な」手術
同様の「側頭葉切除術」は今でも広くおこなわれているが、てんかんの原因と考えられる病変組織を、はるかに慎重かつ正確に取り除く手術だ。
- p.326 深刻な記憶障害は年月が経過しても消えなかった
Scoville, W.B., & Milner, B. (1957). 'Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions', *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 20 (1), p. 11.
- p.327 ケージを探索中のラットが特定の地点にいるときのみ発火
O'Keefe, J., & Dostrovsky, J. (1971). 'The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat', *Brain Research*, 34 (1), pp. 171-5.
- p.328 トールマンの認知地図の物理的基盤だ
O'Keefe, J., & Nadel, L., *The Hippocampus as a Cognitive Map* (Oxford University Press, 1978).
- p.330 特定の場所を訪れて、特定の方向を向いているときだけ発火
Fyhn, M., Molden, S., Witter, M.P., Moser, E.I., & Moser, M.B. (2004). 'Spatial representation in the entorhinal cortex', *Science*, 305 (5688), pp. 1258-64; Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.B., & Moser, E.I. (2005). 'Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex', *Nature*, 436 (7052), p. 801.
- p.330 ナビゲーションに関与している特殊化した細胞は……増え続けている
最新の一文は次を参照。Grieves, R.M., & Jeffery, K.J. (2017). 'The representation of space in the brain', *Behavioural Processes*, 135, pp. 113-31.
- p.331 モーセル夫妻とオキーフが共同受賞
ノーベル賞には、同時受賞は3人までという規則がある。
- p.331 ハトの海馬は、ラットの海馬とはかなり構造が違うもの
Sherry, D.F., Grella, S.L., Guigueno, M.F., White, D.J., & Marrone, D.F. (2017). 'Are There Place Cells in the Avian Hippocampus?', *Brain, Behavior and Evolution*, 90 (1), pp. 73-80.
- p.331 海馬自体に見つかっている別の細胞がルート計画に関与
Geva-Sagiv, M., Las, L., Yovel, Y., & Ulanovsky, N. (2015). 'Spatial cognition in bats and rats: from sensory acquisition to multiscale maps and navigation', *Nature Reviews Neuroscience*, 16 (2), p. 94.
- p.332 このきわめて複雑な問題をどう切り抜けているのか
Finkelstein, A., Las, L., & Ulanovsky, N. (2016). '3-D maps and compasses in the brain', *Annual Review of Neuroscience*, 39, pp. 171-96; Grieves, R.M., & Jeffery, K.J. (2017). 'The representation of space in the brain', *Behavioural Processes*, 135, pp. 113-31.
- p.332 イスラエルの科学者ナホム・ウラノフスキーは高度な手法を開発
Ulanovsky, N., & Moss, C.F. (2007). 'Hippocampal cellular and network activity in freely moving echolocating bats', *Nature Neuroscience*, 10 (2), pp. 224-33.
- p.332 ナビゲーションの成功を左右する記憶の貯蔵庫
Eichenbaum, H., & Cohen, N.J. (2014). 'Can we reconcile the declarative memory and spatial navigation views on hippocampal function?', *Neuron*, 83 (4), pp. 764-70.
- p.332 機械論的観点で最初に理解されるべき認知機能の1つだ
Moser, E.I., Moser, M.B., & McNaughton, B.L. (2017). 'Spatial representation in the hippocampal formation: a history', *Nature Neuroscience*, 20 (11), pp. 1448-64.
- p.333 時間と空間は単に、世界と私たちの物理的相互作用から生じる構成物
Buzsáki, G., & Llinás, R. (2017). 'Space and time in the brain', *Science*, 358 (6362), pp. 482-5.
- p.334 カエルがどうやってそうした移動をしているのか
Pašukonis, A., Loretto, M.C., & Hödl, W. (2018). Map-like navigation from distances exceeding routine movements in the three-striped poison frog (*Ameerega trivittata*). *Journal of Experimental Biology*, 221 (2), jeb169714.

◎第 25 章 思考や創造力を支える

p.335 アルツハイマー病の始まりの前兆として方向感覚の喪失が起こる

Hort, J., Laczó, J., Vyhánek, M., Bojar, M., Bureš, J., & Vlček, K. (2007). 'Spatial navigation deficit in amnesic mild cognitive impairment', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (10), pp. 4042-7.

p.336 建築家は、患者がナビゲーションしやすい建物を設計できる

次を参照。http://www.niallmclaughlin.com/projects/alzheimers-respite-centre-dublin/.

p.336 エレノア・マグワイアの研究チームは……

Maguire, E.A., Gadian, D.G., Johnsrude, I.S., Good, C.D., Ashburner, J., Frackowiak, R.S., & Frith, C.D. (2000). 'Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97 (8), pp. 4398-403.

p.336 海馬のサイズの増加度合いは……

ただし面白いことに、これには代償があるようだった。対照群の海馬前部はタクシー運転手よりも大きく、これはタクシー運転手がある種の視覚情報を思い出すのがあまり得意ではないことを意味している。

p.336 ロンドンのバス運転手では……

Maguire, E.A., Woollett, K., & Spiers, H.J. (2006). 'London taxi drivers and bus drivers: a structural MRI and neuropsychological analysis', *Hippocampus*, 16 (12), pp. 1091-101.

p.337 ナビゲーションのために空間記憶を長時間使えば……

Konishi, K., & Bohbot, V.D. (2013). 'Spatial navigational strategies correlate with gray matter in the hippocampus of healthy older adults tested in a virtual maze', *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5.

p.337 海馬が比較的小さい患者の「認知的予備力」が……

Stern, Y. (2006). 'Cognitive reserve and Alzheimer disease', *Alzheimer Disease & Associated Disorders*, 20, S69-74. Also: Xu, W., Yu, J.T., Tan, M.S., & Tan, L. (2015). 'Cognitive reserve and Alzheimer's disease', *Molecular Neurobiology*, 51 (1), pp. 187-208.

p.339 概念的なナビゲーションにも関わっている可能性

Epstein, R.A., Patai, E.Z., Julian, J.B., & Spiers, H.J. (2017). 'The cognitive map in humans: spatial navigation and beyond', *Nature Neuroscience*, 20 (11), p. 1504.

p.339 健康な海馬がなければ不可能

Rubin, R.D., Watson, P.D., Duff, M.C., & Cohen, N.J. (2014). 'The role of the hippocampus in flexible cognition and social behavior', *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, p. 742.

p.339 人間の位置をより正確に推定できる

Kuehn, E., Chen, X., Geise, P., Oltmer, J., & Wolbers, T. (2018). 'Social targets improve body-based and environment-based strategies during spatial navigation', *Experimental Brain Research*, pp. 1-10.

p.339 ラットやマウス、コウモリには同じ種の他の個体の位置を……

Omer, D.B., Maimon, S.R., Las, L., & Ulanovsky, N. (2018). 'Social place-cells in the bat hippocampus', *Science*, 359 (6372), pp. 218-24; Danjo, T., Toyozumi, T., & Fujisawa, S. (2018). 'Spatial representations of self and other in the hippocampus', *Science*, 359 (6372), pp. 213-18; Okuyama, T., Kitamura, T., Roy, D.S., Itohara, S., & Tonegawa, S. (2016). 'Ventral CA1 neurons store social memory', *Science*, 353 (6307), pp. 1536-41.

p.340 海馬が損傷されておらず健全な状態にある

Beadle, J.N., Tranel, D., Cohen, N.J., & Duff, M. (2013). 'Empathy in hippocampal amnesia', *Frontiers in Psychology*, 4, p. 69.

p.340 18 人の参加者が、脳スキャナーで海馬のモニタリングを……

Tavares, R.M., Mendelsohn, A., Grossman, Y., Williams, C.H., Shapiro, M., Trope, Y., & Schiller, D. (2015). 'A map for social navigation in the human brain', *Neuron*, 87 (1), pp. 231-43.

p.340 ナミビアの部族民についての最近の研究……

Vashro, L., & Cashdan, E. (2015). 'Spatial cognition, mobility, and reproductive success in northwestern Namibia', *Evolution and Human Behavior*, 36 (2), pp. 123-9.

p.341 海馬が健康であることも「創造力」の鍵を握っている

Duff, M.C., Kurczek, J., Rubin, R., Cohen, N.J., & Tranel, D. (2013). 'Hippocampal amnesia disrupts creative thinking', *Hippocampus*, 23 (12), pp. 1143-9.

p.342 ターゲット語を見つけるのに苦労

Warren, D.E., Kurczek, J., & Duff, M.C. (2016). 'What relates newspaper, definite, and clothing? An article describing deficits in convergent problem solving and creativity following hippocampal damage', *Hippocampus*, 26(7), pp. 835-40.

p.342 格子細胞で生じる特徴的な発火パターン

Constantinescu, A.O., O'Reilly, J.X., & Behrens, T.E. (2016). 'Organizing conceptual knowledge in humans with a gridlike code', *Science*, 352(6292), pp. 1464-68.

p.343 「シー・ヒーロー・クエスト」というモバイルゲームをプレイする

Coutrot, A., Silva, R., Manley, E., de Cothi, W., Sami, S., Bohbot, V., . . . & Spiers, H. (2017). Global determinants of navigation ability. *Current Biology*, 28 (17), 2861-2866. アプリは次のサイトからダウンロードできる。http://www.seaheroquest.com/site/en/.

p.344 アフリカゾウが、必要なあらゆるリソースに対して……

Polansky, L., Kilian, W., & Wittemyer, G. (April 2015). 'Elucidating the significance of spatial memory on movement decisions by African savannah elephants using state-space models', in *Proc. R. Soc. B.*, vol. 282, no. 1805, p. 20143042, The Royal Society.

p.345 ゾウもおそらく、こうした情報を使って好みの食べ物を……

Schmitt, M.H., Shuttleworth, A., Ward, D., & Shrader, A.M. (2018). 'African elephants use plant odours to make foraging decisions across multiple

spatial scales', *Animal Behaviour*, 141, pp. 17–27.

◎第26章 地球の言語

p.348 なぜなら森は、探し求めるもの一人一人に……

Levi, P. (trans. Wolf, S.), *The Truce* (Abacus, 1987), pp. 349–51. プリーモ・レーヴィ『休戦』(竹山博英訳、岩波文庫)

p.351 レベッカ・ソルニットは、次のように書いている

Solnit, R., *A Field Guide to Getting Lost* (Canongate, 2006), p. 10. レベッカ・ソルニット『迷うことについて』(東辻賢治郎訳、左右社)

p.353 まずオートメーション過信は、コンピューターが私たちに……

Carr, N. (2013). 'All can be lost: The risk of putting our knowledge in the hands of machines', *The Atlantic*, 11, pp. 1–12.

p.353 飛行機の墜落や船の難破などの大事故につながる

Parasuraman, R., & Manzey, D.H. (2010). 'Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration', *Human Factors*, 52 (3), pp. 381–410.

p.354 ローモンド山の郵便番号をよく質問される

<https://www.telegraph.co.uk/news/earth/countryside/9090729/Warning-over-decline-in-map-skills-as-ramblers-rely-on-sat-navs.html>.

p.354 女性はこの問題を抱えていることを進んで認める傾向が強いかも

Iaria, G., & Barton, J.J. (2010). 'Developmental topographical disorientation: a newly discovered cognitive disorder', *Experimental Brain Research*, 206 (2), pp. 189–96.

p.355 若者がGPSに、ある場所がどこなのかたずねれば……

Aporta, C., Higgs, E., Hakken, D., Palmer, L., Palmer, M., Rundstrom, R., . . . & Higgs, E. (2005). Satellite culture: global positioning systems, Inuit wayfinding, and the need for a new account of technology. *Current anthropology*, 46 (5), 729–753.

p.356 GPSを装備したスノーモービルに乗っているイヌイット……

Carr, N. (2013), 前掲書。

p.357 アーネスト・ヘミングウェイの小説

Hemingway, Ernest, *The Sun Also Rises* (Scribner's, 1926), ch. 13, p. 136. アーネスト・ヘミングウェイ『日はまた昇る』(土屋政雄訳、早川書房)

p.360 私の遺体を見つけたら……

<http://www.pressherald.com/2016/05/25/report-geraldine-largay-kept-journal-during-weeks-lost-in-maine-woods/document/>.

◎第27章 私たちはどこへ向かうのか

p.361 グリホサート系除草剤がミツバチのナビゲーション能力を弱める

Balbuena, M.S., Tison, L., Hahn, M.-L., Greggers, U., Menzel, R. & Farina, W.M. (2015). 'Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation', *The Journal of Experimental Biology*, 218, pp. 2799–805. doi:10.1242/jeb.117291.

p.361 農業の生産性を脅かす深刻な問題

For more information see: International Dark Sky Association (<http://darksky.org>).

p.364 豚の群れを溺れさせたという聖書の記述

次に引用されている。Singer, Peter, *Animal Liberation* (Random House, 1990), p. 192. ピーター・シンガー『動物の解放』(戸田清訳、技術と人間)

p.364 トマス・アクィナスがより穏健な立場を取って

St Thomas Aquinas, *Summa Contra Gentiles*, bk 3, pt 2, ch. 112. 聖トマス・アクィナス『異教徒に与ふる大要』(酒井瞭吉訳、中央出版社)

p.365 アリストテレスも、自然はあらゆるものを……

Aristotle, *Politics*, bk 1, ch. 8. アリストテレス『アリストテレス全集 17 —— 政治学 家政論』(内山勝利、他訳、岩波書店)

p.368 バイオフィリア

Wilson, E.O., *Biophilia: The Human Bond with Other Species* (Harvard, 1984), p. 85. エドワード・O. ウィルソン『バイオフィリア』(狩野秀之訳、ちくま学芸文庫)

p.368 戦争の被害者が、数週間かけてコロラド川の急流を……

<https://aeon.co/essays/why-forests-and-rivers-are-the-most-potent-health- tonic-around>.

p.369 免疫系の機能向上

Kuo, M. (2015). 'How might contact with nature promote human health? Promising mechanisms and a possible central pathway', *Frontiers in Psychology*, 6, p. 1093.

p.369 利己的な行動を控え、より協力的になる

Piff, P.K., Dietze, P., Feinberg, M., Stancato, D.M., & Keltner, D. (2015). 'Awe, the small self, and prosocial behavior', *Journal of Personality and Social Psychology*, 108 (6), p. 883.