

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K16241

研究課題名(和文)採食適応に着目した霊長類と非霊長類哺乳類のゲノム・メタゲノム収斂進化の解明

研究課題名(英文)Elucidation of convergent evolution of genome and metagenome of primates and non-primate mammals in terms of feeding adaptation

研究代表者

早川 卓志 (Hayakawa, Takashi)

北海道大学・地球環境科学研究所・助教

研究者番号：00758493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：動物の食性は非常に多様である。古典的な食性分類である肉食、雑食、草食に加え、葉食、果実食、樹液食、花蜜食など、多様な採食資源に対する動物種特異的な適応がある。さまざまな動物分類群の中でも、約500種いる霊長類にはこれらのすべての食性を有する種が属しており、採食適応放散の重要なモデルである。同じ食性を収斂進化させている霊長類と非霊長類哺乳類のゲノム・メタゲノム適応の解析をおこなった。例えば樹液食をするスローロリス(霊長類)とオポッサム(有袋類)の腸内細菌マイクロバイオームや、葉食をするコロブス(霊長類)とコアラ(有袋類)の味覚受容体遺伝子を比較し、共通方向への進化メカニズムがあることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

哺乳類の味覚や腸内細菌は、その種が消化・吸収・代謝できる食物に適している必要があり、実際そのように適応進化させてきた。各大陸に存在する森や草原や海で、異なる哺乳類が食性を収斂させている。味覚や腸内細菌は、それぞれゲノムやメタゲノムという形で分析することができ、今回、分子レベルでの収斂メカニズムを発見した。いまや4分の1の哺乳類種が絶滅の危機に瀕している中、ただ個体を保護するだけではなく、適応したゲノムやメタゲノムに基づいて、適応している森や草原といった生息地を保全する必要がある。そうした新しい形の「保全ゲノミクス」の実践を提供する上でも意義が高い研究となった。

研究成果の概要(英文)：Animals have extreme diverse diet characteristics. In addition to carnivores, omnivores, and herbivores as classical understanding, there are species-specific adaptations to a variety of feeding resources, such as folivores, frugivores, Exudivores, and nectarivores. Among the various animal taxa, primates, with around 500 species, have species with all of these diet types and are an important model of adaptive radiation in terms of feeding traits. Genomic and metagenomic adaptations were analyzed in primates and non-primate mammals with similar feeding traits under the convergent evolution, such as the exudivorous gut bacterial microbiome of slow loris (primates) vs opossum (marsupials) and taste receptor genes in the folivorous colobines (primates) vs. koala (marsupial). We found that there are evolutionary mechanisms shared between primates and non-primate mammals.

研究分野：分子生態学

キーワード：採食 霊長類 有袋類 単孔類 味覚受容体 腸内細菌 ゲノミクス 収斂進化

1. 研究開始当初の背景

動物の食性は非常に多様である。古典的な食性分類である肉食、雑食、草食に加え、葉食、果実食、樹液食、花蜜食など、多様な採食資源に対する動物種特異的な適応がある。さまざまな動物分類群の中でも、約 500 種いる霊長類にはこれらのすべての食性を有する種が属しており、採食適応放散の重要なモデルである。たとえば、類人猿は果実食傾向の強い雑食、コロブスやホエザルは葉食、スローロリスやマーモセットは樹液食である。またオナガザルの中には花を好んで食べる種類も多い。私は研究開始前のいくつかの研究で、こうした食性に対して、味覚受容体や消化管共生細菌の進化的適応があることを発見していた。例えば、チンパンジーは様々な植物を食べるため、植物に含まれる毒性のある二次代謝物質に直面しやすい。そうした植物二次代謝物質は舌に発現した苦味受容体によって苦味として受容され、摂取の回避という行動をもたらすが、生息するアフリカの地域によって、チンパンジーの持つ苦味受容体遺伝子が進化的に分化していることがわかった (Hayakawa et al. 2012 PLOS ONE)。また、コロブスの 1 種であるテングザルは、生息環境の利用できる植物の多様性によって、繊維分解細菌が共生する胃内細菌の多様性が大きく変わっており、柔軟に共生消化管細菌が適応していることがわかった (Hayakawa et al. 2018 Environmental Microbiology Reports)。

2. 研究の目的

こうした霊長類で解明してきた食性に対する味覚受容体や消化管共生細菌の適応メカニズムが、広く哺乳類でも共通しているか。すなわち収斂進化しているかを、同じ食性を生態的・生理的に収斂進化させている非霊長類哺乳類でも、ゲノム・メタゲノム解析の手法をもちいて解析をおこなった。例えば葉食をするコロブス(霊長類)とコアラ(有袋類)の味覚受容体遺伝子や、樹液食をするスローロリス(霊長類)とオポッサム(有袋類)の腸内細菌マイクロバイオーームを比較し、共通方向への進化メカニズムがあるかどうかを検証した。

3. 研究の方法

霊長類は森林性の種が多いため、こうした収斂進化の研究は、熱帯アジア、南米、オーストラリアなどの世界各国の森林地域で調査・分析する予定だった。しかし、2020年3月にオーストラリアで調査をしたのを最後に、コロナ禍がはじまり、海外渡航ができなくなったため、国内の野生哺乳類ならびに動物園動物を主な研究対象として実施した。野生哺乳類では、長野県地獄谷のニホンザル、奈良公園のニホンジカ、北海道のヒグマ、トガリネズミを対象とした。個体追跡法による糞便からや、行政による捕獲個体からの二次利用によって、検体を収集し、ゲノム DNA や遺伝子発現産物 RNA、共生細菌 DNA を抽出・精製した。

動物園では、日本モンキーセンター、札幌市円山動物園、名古屋市東山動物園、鹿児島市平川動物公園、かごしま水族館等と連携し、同様に飼育個体からの糞便や、亡くなった個体からの DNA や RNA を抽出・精製した。

精製した DNA、RNA は、サンガーシーケンサーとイルミナシーケンサーで網羅的に塩基配列を解析し、味覚受容体を含むゲノム規模変異、舌や消化管などでの遺伝子発現、消化管共生細菌を分析して、種内個体差や種間差を同定した。

4. 研究成果

論文として出版された成果としては、霊長類が持つ旨味受容体(食物中の遊離アミノ酸や遊離ヌクレオチドに旨味を感じる)の機能が、食性によって変化していることを解明した。要約すると、ヒト、類人猿、オナガザルなどの植物食傾向の強い霊長類グループの旨味受容体は、共通する特定の塩基変異によって遊離グルタミン酸に特異的に応答するのに対し、昆虫食傾向の強い霊長類グループや祖先型の哺乳類は遊離ヌクレオチド単体に強く旨味応答をすることがわかった。屋久島で収集したニホンザルの食べる植物の化学成分分析から、植物には遊離ヌクレオチドがあまり含まれないのに対し遊離グルタミン酸は一貫して含まれるため、こうした食性進化に連動して旨味受容体の適応がもたらされたものと明らかになった (Toda, Hayakawa et al. 2021 Current Biology)。

また、私たちヒトからもっとも系統的に離れており、いわゆる「原始的な」特徴を保持しているオーストラリアの卵生哺乳類(単孔類:カモノハシとハリモグラ)の全ゲノムプロジ

エクトに参画し、カモノハシとハリモグラの持つ化学受容体遺伝子のレパートリーを明らかにした。カモノハシは半水生で水中の無脊椎動物を電気感覚を用いて摂食するのに対し、ハリモグラは地上で嗅覚などを頼りにアリ塚からアリやシロアリ食べる。ハリモグラの方が食性が専門家しているため、苦味受容体遺伝子レパートリーの縮減が起きていることを発見した (Zhou et al. Nature 2021)。さらに、明治大学の糸井川壮大博士らとの共同研究で、ハリモグラの苦味受容体は、その遺伝子レパートリーだけでなく、個々の機能も非常に狭い (多くの苦味物質を受容できない) ことがわかった (Itoigawa, Hayakawa et al. Molecular Biology and Evolution in press)。さらに、ハリモグラを飼育する名古屋市東山動物園と共同研究を実施し、飼育下ハリモグラの 24 時間の行動を、天井に広角カメラを設置して完全記録し、行動分析をおこなっている。

腸内細菌についても、ニホンザル、ニホンジカ、スダスローロリス、シンリンオオカミ、トガリネズミ、ジャイアントパンダ、コアラ、クオッカ、オポッサムなど、多様な食性を持つ哺乳類分類群について調査することに成功し、食性との関係について分析を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Purba Laurentia Henrieta Permita Sari, Widayati Kanthi Arum, Suzuki-Hashido Nami, Itoigawa Akihiro, Hayakawa Takashi, Nila Sarah, Juliandi Berry, Suryobroto Bambang, Imai Hiroo	4. 巻 61
2. 論文標題 Evolution of the bitter taste receptor TAS2R38 in colobines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Primates	6. 最初と最後の頁 485 ~ 494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10329-020-00799-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shirasu Mika, Ito Satomi, Itoigawa Akihiro, Hayakawa Takashi, Kinoshita Kodzue, Munechika Isao, Imai Hiroo, Touhara Kazushige	4. 巻 30
2. 論文標題 Key Male Glandular Odorants Attracting Female Ring-Tailed Lemurs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 2131 ~ 2138.e4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2020.03.037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hanya Goro, Tackmann Janko, Sawada Akiko, Lee Wanyi, Pokharel Sanjeeta Sharma, de Castro Maciel Valdevino Gisele, Toge Akito, Kuroki Kota, Otsuka Ryoma, Mabuchi Ryoma, Liu Jie, Hatakeyama Masaomi, Yamasaki Eri, von Mering Christian, Shimizu-Inatsugi Rie, Hayakawa Takashi, Shimizu Kentaro K., Ushida Kazunari	4. 巻 80
2. 論文標題 Fermentation Ability of Gut Microbiota of Wild Japanese Macaques in the Highland and Lowland Yakushima: In Vitro Fermentation Assay and Genetic Analyses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microbial Ecology	6. 最初と最後の頁 459 ~ 474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00248-020-01515-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsumoto Takuya, Hanamura Shunkichi, Kooriyama Takanori, Hayakawa Takashi, Inoue Eiji	4. 巻 62
2. 論文標題 Female chimpanzees giving first birth in their natal group in Mahale: attention to incest between brothers and sisters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Primates	6. 最初と最後の頁 279 ~ 287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10329-020-00886-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Yang、Shearwin-Whyatt Linda、Li Jing、Song Zhenzhen、Hayakawa Takashi、他	4. 巻 592
2. 論文標題 Platypus and echidna genomes reveal mammalian biology and evolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 756 ~ 762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-03039-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Itoigawa Akihiro、Hayakawa Takashi、Suzuki-Hashido Nami、Imai Hiroo	4. 巻 286
2. 論文標題 A natural point mutation in the bitter taste receptor TAS2R16 causes inverse agonism of arbutin in lemur gustation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20190884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspb.2019.0884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hanya G, Morishima K, Koide T, Otani Y, Hongo S, Honda T, Okamura H, Higo Y, Hattori M, Kondo Y, Kurihara Y, Jin S, Otake A, Shiroisih I, Takakuwa T, Yamamoto H, Suzuki H, Kajimura H, Hayakawa T, Suzuki Hashido N, Nakano T.	4. 巻 34
2. 論文標題 Host selection of hematophagous leeches (Haemadipsa japonica): Implications for iDNA studies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 842 ~ 855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1440-1703.12059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lee Wanyi、Hayakawa Takashi、Kiyono Mieko、Yamabata Naoto、Hanya Goro	4. 巻 -
2. 論文標題 Gut microbiota composition of Japanese macaques associates with extent of human encroachment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Journal of Primatology	6. 最初と最後の頁 e23072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajp.23072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Laurentia Henrieta Permita Sari Purba, Kanthi Arum Widayati, Nami Suzuki-Hashido, Akihiro Itoigawa, Takashi Hayakawa, Sarah Nila, Berry Juliandi, Bambang Suryobroto, Hiroo Imai	4. 巻 -
2. 論文標題 Evolution of the bitter taste receptor TAS2R38 in colobines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Primates	6. 最初と最後の頁 485 ~ 494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10329-020-00799-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Evolution of gut microbiota in animals: Host-microbe interactions and mechanisms
3. 学会等名 第43回 日本分子生物学会年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Japan-Australia Wildlife Science Collaboration
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Primatology and Wildlife Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kotaro Kondo, Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Genetic Origin of Koalas Captive in Japan: toward the Investigation of Innate Diet Preference
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Primatology and Wildlife Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Ezawa, Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Genetic Analysis of Captive Echidnas in Japanese Zoos using Noninvasive Spine Samples
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Primatology and Wildlife Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北山遼, 白井温, 根本慧, 田和優子, 綿貫宏史朗, 早川卓志
2. 発表標題 クモザルのるつぼ
3. 学会等名 第22回日本進化学会年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Kitayama, Atsushi Shirai, Kei Nemoto, Yuko Tawa, Koshiro Watanuki, Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Zoo acts as a “melting pot” of spider monkeys
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Primatology and Wildlife Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北山遼, 白井温, 根本慧, 田和優子, 綿貫宏史朗, 早川卓志
2. 発表標題 集団遺伝学的解析が明らかにした日本のクモザル類の多様性
3. 学会等名 第36回日本霊長類学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北山遼, 峠明杜, 橋本千絵, 五百部裕, 今井啓雄, 古市剛史, 早川卓志
2. 発表標題 ゲノムから探るグエノン類の混群形成メカニズム
3. 学会等名 第65回プリマーテス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金網航平, Leonardo de Oliveira Melo, Valdir Luna da Silva, 他
2. 発表標題 複数種の樹液給餌により飼育下コモンマーモセットの腸内細菌叢は変動するか
3. 学会等名 第65回プリマーテス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西島明日香, 柳川洋二郎, 早川卓志
2. 発表標題 クマ類における着床遅延の分子メカニズム研究
3. 学会等名 第65回プリマーテス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早川卓志, 明石涼, 伊藤毅, 揚妻-柳原芳美, 揚妻直樹
2. 発表標題 屋久島のサル、シカ、イタチの同所的進化をゲノムから探る
3. 学会等名 屋久島学ソサエティ 第8回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝島日向子, 小木万布, 早川卓志
2. 発表標題 御蔵島のミナミハンドウイルカ野生個体群における授乳行動の報告
3. 学会等名 日本生態学会第68回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明石涼, 石川周, 甲斐義明, 立澤史郎, 早川卓志
2. 発表標題 COVID-19の拡大による観光客減少は「奈良の鹿」の腸内細菌叢を変化させたのか?
3. 学会等名 日本生態学会第68回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Hayakawa
2. 発表標題 Gum feeding induces short-term gut microbiome change in captive slow loris
3. 学会等名 The 14th International Conference on Environmental Enrichment (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川卓志、平田聡
2. 発表標題 飼育下チンパンジーにおける腸内細菌叢の多様性
3. 学会等名 第35回日本霊長類学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川卓志, 辰本将司, 岸田拓士, 鈴木彦有, 樋口拓人, 石川裕恵, 二階堂雅人, 郷康広
2. 発表標題 全ゲノム解析が示すスローロリスの特殊生態の進化
3. 学会等名 日本進化学会第21回大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>早川研究室 https://noah.ees.hokudai.ac.jp/hayakawa/</p> <p>カモノハシとハリモグラの全ゲノム解読に成功！ https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/01/2-48.html</p> <p>卵を産む哺乳類、カモノハシとハリモグラの高精度ゲノム解読に成功（natureダイジェスト） https://www.natureasia.com/ja-jp/ndigest/v18/n5/%E5%8D%B5%E3%82%92%E7%94%A3%E3%82%80%E5%93%BA%E4%B9%B3%E9%A1%9E%E3%80%81%E3%82%AB%E3%83%A2%E3%83%8E%E3%83%8F%E3%82%B7%E3%81%A8%E3%83%8F%E3%83%AA%E3%83%A2%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%81%AE%E9%AB%98%E7%B2%BE%E5%BA%A6%E3%82%B2%E3%83%8E%E3%83%A0%E8%A7%A3%E8%AA%AD%E3%81%AB%E6%88%90%E5%8A%9F/107426</p> <p>霊長類の旨味受容体の進化を解明！～ヒトは樹の上の葉に含まれるグルタミン酸に旨味を感じるよう進化した～ https://www2.sci.hokudai.ac.jp/dept/bio/research/3437</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------