

Astrobiology Center  
FY2020 External Review Report

# 国際外部評価

令和2年度実施

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
アストロバイオロジーセンター





Astrobiology Center  
FY2020 External Review Report

**国際外部評価**

令和2年度実施

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
アストロバイオロジーセンター



## 目次

はじめに センター長 田村元秀	01
外部評価委員による評価レポート要旨（和訳）	02
外部評価委員名簿	03
組織図 / Organization	04
外部評価当日のスケジュール	05
International External Review Committee Report in FY 2020	06
国際外部評価報告書（2020年度）参考日本語訳	22

## は じ め に



自然科学研究機構  
アストロバイオロジーセンター  
センター長 田村元秀

アストロバイオロジーセンター（Astrobiology Center、略称ABC）は自然科学研究機構直轄の新機関として2015年に設立されました。多分野が融合したアストロバイオロジー研究を推進し、日本のコミュニティに貢献する、現在、我が国で唯一の大学共同利用機関内のアストロバイオロジー機関です。設立後6年を経過しましたが、事業・研究は順調に推移しています。

アストロバイオロジーセンターは、太陽系を超えた「場所」に存在する惑星（太陽系外惑星）を検出し、究極的には宇宙における生命のバイオシグナチャーを確認します。そのような地球以外の場所における生命を多数宇宙に検出することによって、宇宙（ユニバース）におけるユニバーサルな生物学の創生が初めて可能になることが期待されます。

そのためには、生命を宿すために最適な惑星候補を発見し、また、現在あるいは次世代の大型望遠鏡のための装置開発を行うことも必要となります。このようなビジョン・ミッションの下に、異分野が連携した国際的研究拠点化を進めると同時に、激しい国際競争に打ち勝つセンターを構築し、国内外の大学・研究機関と協力した先端的な共同利用・共同研究と新分野を担う若手人材育成を推進し、アストロバイオロジーの最先端研究、とりわけ、系外惑星の観測とバイオシグナチャーの研究を推進しています。

2016年度から2021年度は、文部科学省の第3期中期目標期間に対応し、いわばABCの創成期に対応します。そこで、系外惑星、惑星科学、光合成、アストロバイオロジー一般をご専門とする外部の著名な有識者にお願ひし、ABCの事業・研究を国際的な視点で評価していただくことにしました。あいにくCOVID-19の影響によりオンラインによる評価会となりましたが、本センターの沿革、事業内容、研究成果について事前に資料を回覧し、2021年3月にプレゼンテーションを行い、その後質疑応答と講評を受けました。さらに後日、個別の評価報告書をいただき、総合評価報告書にまとめていただくという過程を経ました。ご多忙にもかかわらず、外部評価を快くお引き受けいただいたに各評価委員の皆さまに、この場を借りて厚く御礼申し上げます。本冊子は、総合評価報告書とそのための参考資料をまとめたものです。

幸い本外部評価において、非常に高い評価といくつかの重要な提言をいただきました。これらはアストロバイオロジーセンターの今後の活動にとって極めて貴重と考えます。引き続き、当センターの活躍にご支援とご期待をお願いいたします。

## 外部評価委員による評価レポート要旨（和訳）

令和3年3月

アストロバイオロジーセンター (ABC) は、自然科学研究機構 (NINS) が 2015 年に設立した新しい研究所で、日本で唯一のアストロバイオロジー分野の大学共同利用機関として、日本のアストロバイオロジーコミュニティに貢献している。メンバーは約 25 名で、センター長 1 名、教授相当の外国人研究者 2 名、准教授 2 名、助教 9 名、特任研究員 8 名、等で構成されている。これまでに、2 名の若手研究者が大学の定職に就くことができている。三鷹と岡崎には事務担当者がおり、国立天文台 (NAOJ) の事務部と密接に連携している。現在の予算は年間 3 億円強で、ここ 3 年間はほぼ横ばいで推移している。

比較的限られた人員と予算にもかかわらず、科学研究と装置開発の両面での活動性は非常に高く、2015 年から 2021 年の 6 年間で大きく成長を遂げている。

ABC は 現行の望遠鏡用に 3 つの主要な系外惑星観測装置を開発してきた。(1) 近赤外線波長域での恒星大気の吸収線を利用して、恒星の視線方向の速度変化から惑星を探す装置である、すばる望遠鏡に搭載された近赤外高分散分光器 (IRD) は、すでに素晴らしい結果を出しており、赤色矮星や若い星の周囲にある惑星の特徴を明らかにしている。(2) すばる望遠鏡用の SCExAO/CHARIS は、系外惑星 / 円盤の超高コントラスト補償光学装置 / 面分光装置で、技術革新をもたらすだけでなく、世界の系外惑星直接撮像コミュニティをリードしている。(3) 岡山の MuSCAT 1、カナリア諸島の MuSCAT 2 およびマウイ島の MuSCAT 3 は、NASA/TESS の惑星候補の確認および惑星大気の特徴付けを目指した多チャンネル可視光トランジットの系外惑星観測装置で、すでに Nature や Science などの主要な雑誌を含め多くの研究成果を発表している。

すばる望遠鏡用の装置は一般共同利用でも使用されており、世界中のすばる望遠鏡ユーザーに提供されている。

また、ABC は生物学的な基礎実験、コンピュータシミュレーション、フィールドワーク等に基づいて、赤色矮星まわりのハビタブル惑星における光合成の可能性について検証し地球外生命の新たな描像を提供した。

このような活動の結果、2021 年 2 月現在、掲載されている査読付き論文の数は倍増し、合計 324 本となった。ABC は TMT/PSI や Keck/HISPEC-TMT/MODHIS のような将来の超大型望遠鏡の観測装置にも国際的な協力の下で大きく貢献し始めている。さらに、ABC は大学共同利用機関として、171 件の公募研究を支援し、77 名の若手研究者をサポートし(2016 年度から 2019 年度)、約 20 件の国際 / 国内ワークショップを開催した他、すばる望遠鏡や他の天文台で多くの共同利用観測をサポートしている。

6 年間という短い期間で達成したこれらの高い活動成果に対して、評価者は非常に感銘を受け、総じて非常に高い評価を付けた。

今後の活動に対しては、『資金と人材の適切な調達により、ABC がアストロバイオロジー研究とユニークな装置開発で国際的な大学共同利用機関の COE としての地位をさらに向上させ、「普遍的生物学の確立」という最終的なミッションを達成することが重要である』との提言がなされた。

## 外部評価委員名簿

### ◆委員長

柴田 一成（しばた かずなり）

京都大学名誉教授、2019 年チャンドラセカール賞受賞者、太陽と星 / アストロバイオロジー

### ◆副委員長

中本 泰史（なかもと たいし）

東京工業大学 固体地球惑星物理学 教授

### ◆委員

Michel Mayor（ミシェル・マイヨール）

ジュネーブ大学教授・2019 年ノーベル賞受賞者、系外惑星

Mary Voytek（メアリー・ヴォイテク）

NASA 本部 & ELSI エグゼクティブディレクター、水生微生物の生態と生物地球化学

Chas Beichman（チャズ・バイヒマン）

カリフォルニア工科大学 / NASA Exoplanet Science Institute (NExScI)、  
エグゼクティブディレクター、系外惑星 / 赤外線天文学

永原 裕子（ながはら ひろこ）

日本学術振興会 / 東京工業大学 ELSI フェロー、宇宙化学・隕石学

阿形 清和（あがた きよかず）

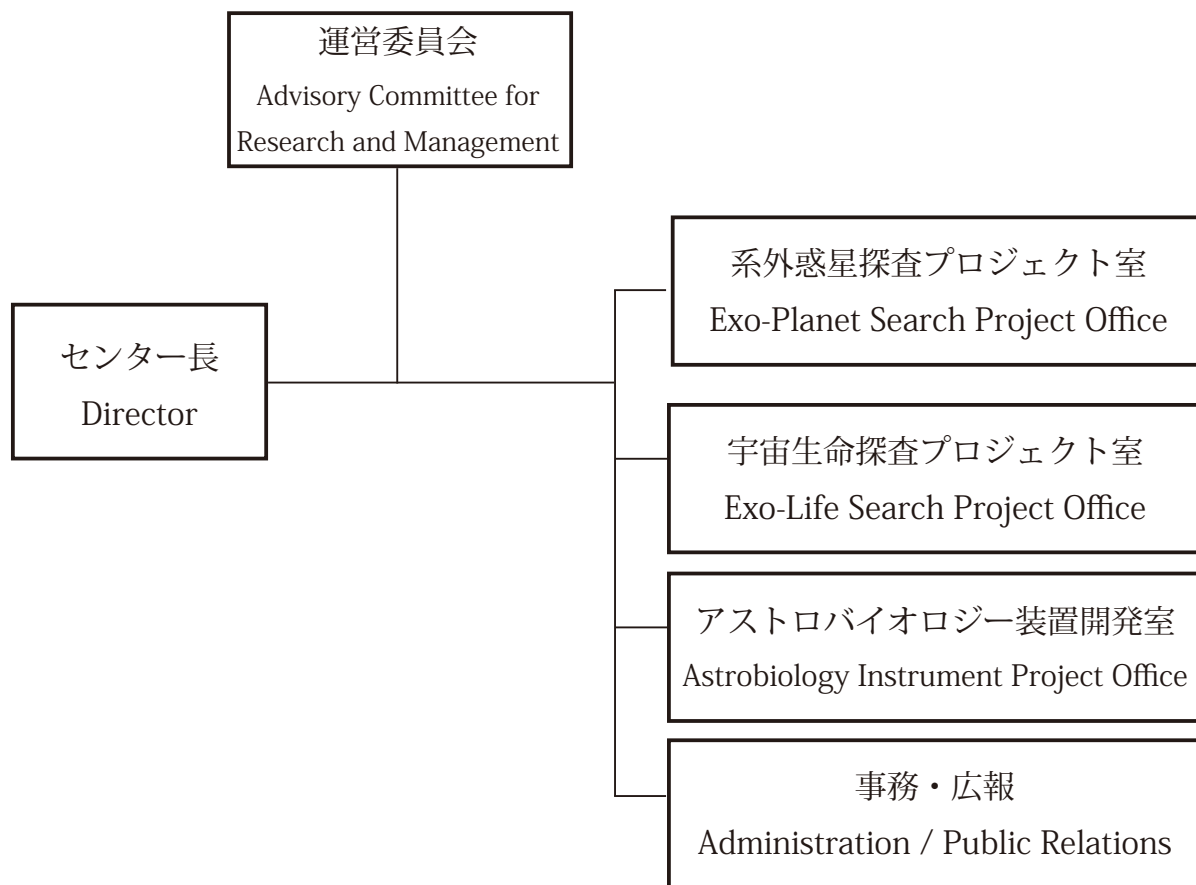
基礎生物学研究所・所長、再生生物学

園池 公毅（そのいけ きんたけ）

早稲田大学教授、光合成

（以上 8 名）

# 組織図 / Organization





## 外部評価当日のスケジュール

令和3年3月2日

17時～(JST)、9時～(SST)、0時～(PST)、3時～(EST)

場所：Zoomによるリモート開催

開会挨拶とABCの全体説明（田村）

系外惑星の発見と特性化（平野）

直接撮像（葛原）

光合成の研究（滝沢）

アストロバイオロジー観測装置（小谷）

質疑応答と全体の感想・推奨事項

評価委員出席者：

柴田 一成

中本 泰史

Michel Mayor

Chas Beichman

永原 裕子

阿形 清和

園池 公毅

Mary Voytek（後日ビデオ視聴）

ABC 出席者：

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)	センター長
平野 照幸 (HIRANO, Teruyuki)	系外惑星探査プロジェクト室 助教
堀 安範 (HORI, Yasunori)	系外惑星探査プロジェクト室 特任助教
滝澤 謙二 (TAKIZAWA, Kenji)	宇宙生命探査プロジェクト室 特任准教授
葛原昌幸 (KUZUHARA, Masayuki)	宇宙生命探査プロジェクト室 特任助教
小松 勇 (KOMATSU, Yu)	宇宙生命探査プロジェクト室 特任研究員
小谷 隆行 (KOTANI, Takayuki)	アストロバイオロジー装置開発室 助教
高橋 葵 (TAKAHASHI, Aoi)	アストロバイオロジー装置開発室 特任研究員
日下部 展彦 (KUSAKABE, Nobuhiko)	特任専門員

Astrobiology Center of National Institutes of Natural Sciences

**International External Review Committee Report in FY 2020**

Chair: Prof. Kazunari Shibata &

Vice Chair: Prof. Taishi Nakamoto

with extensive inputs from

Professors Michel Mayor, Mary Voytek, Chas Beichman,

Hiroko Nagahara, Kiyokazu Agata, & Kintake Sonoike

The Astrobiology Center (ABC) of the National Institutes of Natural Sciences (NINS) had an international external review on March 2, 2021, JST. The review was conducted online because of the COVID-19 situation. The ABC's report **Astrobiology Center Report for External Review** was circulated on February 16, about 3 weeks before the review date and the reviewers were asked to read it beforehand (see Appendix; all the acronyms used here are summarized in the ABC report.).

The review committee is composed of astronomers including exoplanet and solar system experts, biologist including photosynthesis experts, and astrobiologists. The full list is shown below.

**ABC external reviewers** (name/affiliation/position/major and note):

- Kazunari Shibata, Kyoto University, Professor Emeritus & Chandrasekhar Prize Laureate 2019, sun and stars/astrobiology (Chair)
- Taishi Nakamoto, TITECH. Professor, solid earth and planetary physics (Vice-Chair)
- Michel Mayor, University of Geneva, Professor & Nobel Laureate in 2019, exoplanet
- Mary Voytek, NASA HQ & ELSI Executive Director, aquatic microbial ecology and biogeochemistry
- Chas Beichman, Caltech/NASA Exoplanet Science Institute (NExScI), Executive Director, exoplanet/infrared astronomy
- Hiroko Nagahara, JSPS/ELSI, Fellow, cosmochemistry/meteoritics
- Kiyokazu Agata, National Institute for Basic Biology, Director General, regeneration biology
- Kintake Sonoike, Waseda University, Professor, photosynthesis

The review presentation proceeded as follows. Firstly, the ABC's director, Professor Motohide Tamura, presented a summary of the ABC's report in the order of the report chapters. Secondly, several ABC members (Drs. Teruyuki Hirano, Masayuki Kuzuhara, Kenji Takizawa, Takayuki Kotani)

presented a summary of each research/project activity. Thirdly, the Q&A time among reviewers and ABC attendants was held. Finally, several general comments and impressions are expressed by the reviewers. The duration of the meeting was about 3 hours. Since Dr. Voytek could not attend the meeting, she watched the meeting recorded by zoom.

**The reviewers provided their individual detailed reports** by the middle of March. Then the Chair/Vice-Chair summarized **this grand summary report**, based on the individual reports. To keep the “raw voice” from each reviewer, we intentionally use many of the sentences described in the individual report. The grand summary report was also circulated and agreed among the reviewers.

This report is composed of the evaluations of the following items:

1. Summary
2. Mission
3. Organization
4. Major projects
5. Research activities and research highlights
6. Open research and young researcher developments
7. Public education and outreach
8. Future plans
9. Overall impressions
10. Recommendations

Appendix

## 1. Summary

ABC is a new institute established by NINS in 2015 and the only Japanese inter-university astrobiology institute that serves the astrobiology community in Japan. It consists of about 25 researchers; one Director and two foreign middle/senior researchers (equivalently 3 professors), 2 associated professors, 9 assistant professors, and 8 postdoc-class researchers, of which 2 young members were successfully moved to the permanent positions at universities. Appropriate numbers of administrative persons work both at Mitaka and Okazaki, and closely working with the NAOJ's administration office. Its budget is currently about 3M USD and relatively flat in the last 3 years.

**Despite its relatively limited manpower and budget, its activities both in science and instrumentation are extremely high and have grown significantly over the last 6 years of 2015-2021.**

**ABC has developed 3 major exoplanet instruments** for current telescopes. (1) IRD for Subaru is an infrared radial velocity planet-hunting instrument and has already published spectacular results

on the characterization of small-planets around red dwarfs and young stars. (2) SCExAO/CHARIS for Subaru is an exoplanet/disk direct imager/spectrometer and producing not only technical innovations but also leading the world direct imaging exoplanet community. (3) MuSCAT 2 at Canary Island and MuSCAT 3 at Maui Island as well as MuSCAT 1 at Okayama is a series of multi-channel optical transit exoplanet instruments for NASA/TESS planet candidate follow-up and already published many results in major journals including Nature and Science. Those Subaru instruments are also used for the open-use, thus serving to the Subaru users all over the world.

**ABC has also contributed to providing a new “picture” and published on the possible photosynthesis on red dwarfs** based on its basic biological analysis, computer simulations, field works, and laboratory experiments.

As a result of these activities, the number of published refereed papers is doubled and 324 in total as of 2021 February. **ABC has also started to be heavily involved in future instruments**, such as TMT/PSI and Keck/HISPEC-TMT/MODHIS under international collaboration. Furthermore, as an inter-university institute, ABC has supported 171 open use research projects, 77 young researchers between FY2016-2019, about 20 international/domestic workshops, and many open-uses at Subaru and other observatories.

**The reviewers are extremely impressed with these high activities that they accomplished only in 6 years and evaluate very high in general.**

**Among recommendations, it is important that with appropriate raising both fund and manpower, ABC should grow further as a unique international and inter-university COE of astrobiology research and instrument developments and to achieve its final mission of “establishment of universal biology”.**

## **2. Mission**

ABC's vision, mission, and value (top to bottom in this order) are summarized at the bottom of this chapter. **All the reviewers agree that the ABC mission and its strategy are highly rated.**

**To find life in space is one of the ultimate scientific purposes of natural science.** It is quite appropriate that ABC aims to approach the purpose with two different aspects, exoplanet observations and biosignature studies. Unlike existing academic disciplines, there are many possible directions for promoting research in astrobiology. Exoplanet science has grown rapidly as new technologies and facilities both on the ground and in space have returned data on thousands of planets. The long-term goal is to detect and characterize signs of life on temperate Earth-like planets and relies on the relatively new field of “astrobiology” to give an improved understanding of how organism might

evolve in different environments and affect the appearance of a planet via remote sensing.

Unlike existing academic disciplines, there are many possible directions for promoting research in astrobiology. Among the many options, ABC's mission statements reflect the exciting new research directions. ABC stands on NAOJ and NIBB, which enables them to develop unique and most advanced sciences on astrobiology.

Note that not all astrobiology areas, such as life of the solar system planets and the early evolution of life on the Earth, are covered by ABC, but **ABC is collaborating with other universities/institutions and supports open projects and contributes to the community even in those uncovered areas. Therefore, this kind of selection is reasonable.**

The strategy based on 3 complementary paths offers **a perfect synergy** to approach that very ambitious goal: (i) the development of innovative instruments with a special focus for infrared ones, (ii) extensive observational surveys for the detection of many planets suitable for the eventual development of life, and (iii) building the scientific background to recognize biosignatures and to design future instruments for their detection. **The different achievements and research activities carried out on the last 5-6 years are perfectly in line with this strategy.**

#### ***Summary of ABC's vision, mission, and value.***

##### *VISION*

- *Toward the creation of a universal study of biology in the universe," or 普遍的生物学の創成 in Japanese.*

##### *MISSION*

- *"exoplanets and life there"*

##### *VALUE*

- *Advance the astrobiology field by combining multiple disciplines within NINS.*
- *Promote research into extrasolar planets and life both outside and within our solar system.*
- *Develop large observational instruments for these purposes.*
- *Develop young researchers.*
- *Cooperate with foreign astrobiology institutes and invite foreign researchers.*

### **3. Organization**

**It was quite important that both NAOJ and NIBB collaborated to create a multi-discipline institute on astrobiology within their mother institute, NINS.**

The organization of ABC consists of **three project offices that work under the leadership of the ABC Director:** Exoplanet Exploration, Exo-Life Search, and Astrobiology Instrument Development. The first two project offices are closely related with the Astrobiology Instrument

Development Office charged with developing instrument technologies and new instruments which then feed into the Exoplanet Exploration Office for use on existing and new telescopes.

Each project has distinguished or young “foreign researchers”. They are expected to play a role of reinforcing the fields that are relatively weak in Japan but critical for ABC’s mission (extreme adaptive optics and exoplanetary atmospheres). Each project has permanent staffs that are moved from NAOJ and NIBB. This scratch-and-rebuild is also important to create a new institute. **It is worth noting that most of the full-time scientists are young and very active. This is one of strong points of ABC. It is expected that ABC will be one of top institutes in international astrobiology community probably at least a decade.**

**The core mission of ABC is clearly a multidisciplinary domain. This point is fully recognized by linking several NINS major institutes. The role of ABC as an inter- university institute is a perfect structure to coordinate and support the richness and diversity inside Japanese universities. ... A very efficient structure.**

Some concern is addressed that almost all scientists are Japanese and many of them also belong to NAOJ or NIBB. This situation may apparently lower the independent activity of ABC. However, this cross-affiliation is singly for the administration purpose because ABC is too small to have completely independent administration office. **Therefore, to be cost effective within the same NINS institutes, the cross-affiliation seems inevitable.**

**The combination ABC faculty and external collaborations enabled by ABC support provides a robust base for research and student training in the astronomical and biological aspects of astrobiology.** The primary gap in the organization is **the lack of a foreign leader in exoplanet research** who would serve as the counterpart to the foreign researchers. Given the international breadth of the field, this is an important position to fill to ensure that the Japanese community stays abreast of and fully engaged in the dramatic growth of exoplanet research worldwide.

#### **4. Major projects**

ABC's effort has been significantly devoted to instrumentations for existing and near-future telescopes as well as studies on biosignatures concentrating on photosynthesis. These are emphasized as “ABC’s major projects”. These are:

(1) **IRD for Subaru** is designed to observe planets in habitable zones around M dwarfs, which are located much closer to central stars than the Earth around the Sun and which are brighter in the near infrared. They have already succeeded in observing stellar obliquity of TRAPPIST-1 and the mass-radius relationships of many planets with high precision for small planets. The results are exciting in that planets with the rotation period less than one day are finely observed with a ground

telescope. Observation of the obliquity of the central stars would give important information to model spectra of the planets. Early IRD-SSP results are also encouraging and exciting; they will explore the Earth-like planets around late M stars where TESS cannot explore. REACH has been developed to attach to Subaru and succeeded in observing exoplanet atmosphere, which is expected to give important information about several molecules that have not been observed yet. REACH is based on the success of IRD and SCExAO.

(2) **SCExAO/CHARIS for Subaru** have been developed by ABC, NAOJ, and Princeton University, which have already succeeded in directly imaging a planet embedded in a protoplanetary disk around LkCa 15. The instrument with information by longer waves lengths observations will contribute to understand evolution of protoplanetary disks and formation of planet and further to formation of habitable planets.

(3) The **MuSCAT series** multi-band CCD camera for smaller telescopes have been developed and operated by ABC to make a network of exoplanet transit in the world and are extensively following up planet candidates detected by TESS. The project has already published many results in major journals including Nature and Science.

(4) Unique instruments (**SIRPOL, SAND**) for IRSF and the **PRIME** telescopes in South Africa. The former is extremely unique infrared polarization survey facility that provides a clue to understand the origin of homochirality in space.

(5) ABC has started to be heavily involved in future **PSI** for direct imaging and characterization of Earth-like planets around M stars on 30-m telescopes and in future **HISPEC/MODHIS** spectrometer under international collaborations.

There are many comments and suggestions from the reviewer on this item and we list those comments below. **Most of them are very positive and some recommendations are also suggested for future developments.**

- (a) It is extremely clear and well-matched with the ABC's vision that the research scheme to combine two major themes on astronomy (exoplanet) and biology (photosynthesis, biosignatures) with major instrumentation.
- (b) On the short or medium future, clearly **the planets in the habitable zone of very low mass stars will offer the first targets** offering the possibility to search for a possible Life. Most of the instrumental developments are oriented towards that category of targets. This priority is also evident among different projects of nucleosynthesis on the surface of such planets. This is excellent as the claim for habitability on planets hosted by red dwarfs must be explored. **One of the most important comments related to the ABC's projects and current instrumentation: it is immensely impressive.**

- (c) **Photosynthesis study is another critical scientific target of ABC, and the project has already been reported an interesting result** that the photosynthetic environment within water on exoplanets around M-dwarfs would be the same as that in water on the Earth. The prediction was against a previously believed idea that plants on planets around M dwarfs might be controlled by NIR and that their red edge might be at longer wave lengths than that of the Earth.
- (d) **The discovery of green algae that can use low-energy light is an achievement that breaks the common belief that eukaryotes cannot use the energy of far-red light for photosynthesis.** In the report, the description of this achievement was rather modest, and **the importance of this achievement could be emphasized more.** In addition, the fact that photosynthesis by far-red light can be achieved only with chlorophyll a is a result that provides insight into the early evolution of photosynthetic organisms, and a broader discussion of this topic might be possible.
- (e) **The diverse instruments already in operation or in development: IRD, REACH, SAND, SCExAO/CHARIS and MuSCATs offer probably one of the best set of instruments to detect and characterize exoplanets.** We are obviously eager to learn more on the future detections of REACH and CHARIS. A very general comments for several of ABC instrumental developments is the mention that **they have a role to play as precursor of similar instrument for TMT. We certainly endorse such a strategy.** Concerning SAND, we are extremely pleased to see that you will have the possibility to feed that instrument with several telescopes. Large telescopes are crucial for some specific topics as spin orbit alignment measurements or transit spectroscopy. But for surveys, the large sampling of RV offered by medium size instruments as the 1.8 meter telescope offer the largest efficiency for planet detection.
- (f) **The suite of hardware projects in which ABC is engaged is very impressive and represents a major contribution to exoplanet science.** Indirect, semi-direct and direct methods are represented with multiple techniques: IR Precision Radial Velocity currently with Subaru/IRD and Keck/HISPEC and TMT/MODHIS in the future; microlensing with PRIME; transits with MUSCAT; and high contrast imaging/spectroscopy currently with SCExAO and REACH and with Keck/HISPEC and TMT/MODHIS, TMT/PSI in the future. Japan is either leading or playing key roles in these and other initiatives which will pay scientific dividends over the next decade. While TMT may still be many years away, the opportunity to engage with Keck instrumentation as a precursor to TMT provides valuable experience for Japanese instrument builders and scientific opportunities for ABC researchers.
- (g) Of particular relevance to **collaborations with space mission** are: 1) MUSCAT which could



provide important ephemeris data for transit targets for JWST and ARIEL; and 2) PRIME which will provide critical precursor and follow-up opportunities for the Roman microlensing survey.

## 5. Research activities

The scientific efficiency of ABC is certainly measured by the very large number of publications. **They look very high, considering its scale, budget, and manpower. However, looking on the selected highlights is still more significant. The coordinated action of ABC and the synergy with the Japanese universities offer an impressive view of the diversity of outstanding results.** Once again, we particularly appreciate the coordinate efforts (astronomy and biology), interstellar prebiotic chemistry, mechanism of self-organization, high resolution spectroscopy and much more. That diversity of domains is remarkable and **the most convincing argument of the success of ABC.**

The research activities are impressive. The publication record shows the growing number of ABC-sponsored articles. **The number and content of workshops, both local and international, is equally impressive.** The international community is looking forward to a vibrant, in-person Protostars and Planets meeting. **The individual topics were all of high quality. The topics spanned wide breadth within astrophysics (observation and theory) and biology (experiment and theory) and showed the critical linkage between these two disparate areas which is, of course, the goal of an Astrobiology Center.**

**One area of concerns is the flat budget.** The number of planets, the number of exoplanet researchers, and the number of exoplanet papers is growing dramatically world-wide. **If Japan and ABC are to continue to keep pace with this growth, there must be a commensurate increase in the number of Japanese researchers to lead and to take advantage of these opportunities.** Grad students, postdocs and the senior scientists needed to mentor them must be identified and supported. This growth can be accommodated through the research and satellite programs, but some growth within ABC itself is critical.

ABC members have successfully obtained competitive grant, KAKENHI, of which total amount corresponds roughly to a quarter of the annual budget of the center. Although the situation is not bad, the number of grants is not high enough for the average selection rate of ~30% for KAKENHI and for the number of researchers in ABC. We are not sure whether this is because the annual budget fully supports researchers and development of new observation instruments or it is simply results of granted applications.

It is also noted that comparative studies will be beneficial to evaluate the ABC's activity. In future reviews it is recommended to present such a benchmark on activities.

## 6. Open research and young researchers' developments

Two types of open research programs, satellite research and project research, are successfully supporting the activities of ABC. For the satellite research, top-notch astrobiologists who focus on the inner solar system are selected to work with ABC, which specializes in extrasolar research. By sharing the research areas, **they complement the research of ABC very effectively. Simply looking at the number of results obtained from satellite research, the significance of its existence can be fully appreciated.** On the other hand, the main role of project research seems to be to expand the base of astrobiology rather than to directly promote research. The project research seems to be functioning effectively as **a mechanism to encourage a wide range of researchers who are interested in astrobiology but have not had a chance to actually start their own research to enter into astrobiology.** Since the project research is a one-year award, it cannot be expected to produce significant direct results, but **it will play a very important role in establishing astrobiology research in Japan.**

Some reviewers learned for first the time and very impressed that ABC significantly supports astrobiology young researchers with the ABC's budget. This is an important decision of ABC and its impact to the astrobiology community is highly rated and it is excellent to know that not only ABC itself but also these projects also produce many exciting results. Some reviewer has a little question about the effect of Project Research for only one year, which replaces the fundamental role of universities or institutions.

Some of the growth of astrobiology in Japan described above can be achieved by expanding these programs and ensuring that mid-career and higher-level positions become available for these young researchers as they gain experience and seniority.

With regard to the development of young researchers, the main focus is to support their travel expenses to international workshops or for visiting ABC. In this regard, I should note the fact that relatively young staff members introduced their own work in the presentations related to this external evaluation. Such ordinary details may be also leading to the development of young researchers.

It is also recommended that future reviews provide a comparison with those of other foreign astrobiology institutes.

## 7. Public education and outreach

According to the ABC's report, the word "astrobiology" in Japanese appears to have become more popular after the establishment of ABC. The number of hits for "astrobiology" (all) in Japanese has been increasing since 2015, when ABC was established, Therefore, ABC must have played a

significant role in the general media. A reviewer describes that this demonstration seems very interesting.

ABC issued 38 press releases so far, of which about 1/3 was initiated by ABC. **The number of press releases is increasing steadily.**

There are several important recommendations on the ABC's outreach as described below. These could be also true and useful to other NINS institutes.

(a) Science does not always have a positive appreciation in the public. With the domain of exoplanets and astrobiology, ABC has a very privileged situation, having a huge interest by people. ABC must use that special situation to stimulate the interest of children for science. **Outreach is part of the “duties” of ABC.**

(b) Although outreach activities do not seem to be one of ABC's strengths, there is no doubt that its existence has led to the spread of astrobiology in Japan. Compared to the earth science field, the publication of educational books for the public does not seem to be as active, and further efforts are required. However, it may be more realistic to support the activities of suitable researchers/writers by including publication awards for textbooks and educational books in the project research, rather than making efforts in the activities of the ABC itself.

(c) This item is relatively weak; a lack of commitment and resources devoted to public outreach and education. Public outreach and education are an area where ABC can play an important within Japan. The excitement of exoplanet research can play a critical role in the development of scientific literacy. Indeed, at least in the US, politicians regard the ability of astronomical research to reach the public as one of its most important societal functions. Exoplanet science and the search for life can inspire future generations to pursue careers in science and technology. An area of growth for ABC could be 1) working with education professionals to infuse K-12 education curricula with simple but essential astrobiological concepts related to the search for life; and 2) developing public-accessible material on a regular basis. This effort should go beyond the press releases and would require a commitment of a few professionals with relevant experience who could interact with outside groups at NAOJ, JAXA/ISAS, and the appropriate universities.

(d) This activity must be well balanced with the research/development effort, considering the institute scale. However, in general the efforts and results of ABC public outreach are rated high.

## **8. Future plans**

ABC is advancing toward its ultimate goal of astrobiology research. It is “one toward the creation

of a universal study of biology in the universe,” or 普遍的生物学の創成 in Japanese.

The first 6 years (2016-2021), corresponding to the 3rd mid-term planning phase, are in fact devoted to preparation of many best-in-class exoplanet detection for exo-life studies for the current and near-future telescopes. With many of the instruments on these telescopes now operating steadily for observations, the reviewers fully agree that **ABC has successfully reached this goal. ABC has also conducted various astronomy and biology research projects and promoted broad astrobiology research and young researchers through open research. ABC has also started the conceptual design of exoplanet/astrobiology instruments for telescopes in the 2030s.**

The next 6 years (2022-2027), corresponding to the 4th mid-term planning phase, will be devoted to conducting extensive observations of the best targets for exo-life detection. These use various instruments developed by ABC including IRD, the MuSCAT series, PRIME/SAND, SCExAO. ABC will also complete the detailed design of the astrobiology instruments for telescopes in the 2030s and construction of some early instrument (HISPEC/MODHIS) will begin. ABC will also accelerate the studies of photosynthesis and planetary atmosphere.

The following next 6 years (2028-2033), corresponding to the 5th mid-term planning phase, will be devoted to completing the construction of exoplanet/astrobiology instruments and starting observations for various biosignatures around nearby M dwarfs. ABC will also be involved with NASA’s next flagship missions, such as HabEx and LUVOIR (2030s launch), on instrumentation for exo-life studies around solar-type stars.

**The reviewers very positively rate these ambitious future plans and note several caution and recommendation.**

- (a) Nothing to add to the future plans. A convincing and realistic program.
- (b) Generally, the plan appears to be reasonable if we consider the construction of next generation telescopes. It is pointed out that ABC needs to have a new strategy for exo-life observation, because the current plan seems to stand on oxygen and red-edge, which have been targeted by the astrobiology community since the first finding of an exoplanet in 1995. Almost all projects aim to observe oxygen in atmosphere, and it is under severe competition, which is even not a unique scientific target. Thus, ABC should proceed research on new strategy of exo-life observation, which needs further research on biological activity under near-infrared light, new idea for observations, and deeper understanding of geological development of planets. Earth’s life has evolved with a strong interaction with geological evolution, but has not evolved independently.
- (c) The ongoing six-year planning phase is positioned as a preparatory phase for the full-scale exploration of living planets. The next six years will be a developmental phase. As for the direction of the research in the new phase, the reviewer could have a somewhat concrete

image of how ABC will further develop the measurement equipment. However, it seems that it is still at an abstract stage in terms of how the measurement results will advance the academic field of astrobiology. The reviewer expects that the direction of the research will become more concrete in the future.

- (d) The plans are impressive in their ambition for making revolutionary progress in the search for life beyond the solar system. These plans primarily concern future hardware activities, but the ABC review document gave little indication that the relevant funding will be available to realize these ambitions. We trust that the success of ABC's instrumentation projects to date will provide a strong foundation for future funding requests.
- (e) One area missing from these plans which should be developed in parallel with the observational programs is **theory and advanced computation**. Astrophysical and biological theory programs, machine learning, and data pipelines are critical to the interpretation of the data returned by the ever more sophisticated instrumentation. For example, retrievals of atmospheric properties from medium (JWST) and high resolution spectroscopy (REACH, HISPEC, MODHIS) rely on sophisticated computation of 3-D models of spatially and temporally varying atmospheres in or out of chemical equilibrium. Progress in these areas relies on expertise from researchers in global atmospheric modeling for the Earth and other solar system bodies, as well as from computer science and statistical methods.
- (f) It is also encouraged to explore the planetary habitability around M dwarfs **taking into account their magnetic activity**. The effects of flares and coronal mass ejections from M dwarfs should be taken into account for the exoplanet habitability. In Japan, the research on magnetic activity around M and G dwarfs are very active using 3.8-m SEIMEI telescope. Therefore, we recommend ABC to collaborate with those researchers and study the effect of X- /UV-rays and high-energy particles on atmospheric changes, and survival and evolution of life.

## 9. Overall impressions

We list the overall impressions of the reviewers here.

- (a) After 5 years, ABC must be proud of the outstanding quality of the efficiency. It is always difficult to mention a specific activity as being most rated. On the contrary, the most important feature is the complementarity of all these research themes. This is the outstanding characteristics of ABC. The strong instrumental development (existing or in project) is in my mind a fundamental point to be highlight. Discoveries are more and more the result of new instrumentation.

- (b) Overall, ABC has progressed steadily as planned, which is better than they planned, and the results have steadily published. It has played a central role in astrobiology study in Japan. It is expected that ABC will be one of international centers of astrobiology at the next step.
- (c) The most important research objective of ABC currently seems to be the discovery of habitable planets for life. Vigorous efforts are being made to achieve this goal, and steady progress has been made over the past six years. If the ABC can maintain the same level of activity over the next six years, it should be able to lead the world in the search for life on exoplanets. On the other hand, to establish astrobiology as a new academic field in Japan, it is also necessary to consider not only the habitability of planets, but also the possible modes of life on such planets, the origin of life, and the evolution of life. Such considerations can only be generated through the interaction of the ideas of astronomers, biologists, and geoscientists, given the difficulty of supporting them with direct experiments. In the next six years, the reviewer hopes that the ABC will be able to make progress that reflects the characteristics of the multidisciplinary characteristics of astrobiology, and not just the execution of individual research projects.
- (d) It seems that the collaborations between astronomy field and biology field is still limited and can be improved. We understand the current phase is the exoplanet search phase for future life detection. However, once the data for exoplanet atmospheres and surface are obtained, the close discussions with biology researchers are indispensable. ABC should take an initiative well before such a phase. For this purpose, more close collaborations and structures are desirable.
- (e) It will be beneficial if the most striking results are more visible, which makes the evaluation easier.

## 10. Suggested recommendations

Although several recommendations are already addressed in each of the above items, we summarize the points first and then list several additional recommendations suggested by the reviewers.

- (a) Science and Instrumentation: It is essentially important for ABC **to continue the current style of both conducting the cutting-edge science and instrumentation in astronomy and biology**. Their milestones and goals are clear.
- (b) Budget and manpower: One area of concern is the flat budget. The number of planets, the number of exoplanet researchers, and the number of exoplanet papers is growing dramatically world-wide. If Japan and ABC are to continue to keep pace with this growth, there must be a commensurate increase in the number of Japanese researchers to lead and to take advantage of these opportunities. Grad students, postdocs and the senior scientists

needed to mentor them must be identified and supported. **This growth can be accommodated through the research and satellite programs, but some growth within ABC itself is critical.**

- (c) Open research: Depending the community's demand and the ABC's available fund, **it is recommended to keep the Open Research at some level. Similarly, the support of young researchers is also to be continued.**
- (d) Organization: It is worth noting that **most of the full-time scientists are young and very active.** This is one of strong points of ABC. It is expected that ABC will be one of top institutes in international astrophysics community. It is also critically important to increase the number of foreign researchers at least set as a goal (20%), in particular **to lead the international collaborative observations.**
- (e) Future: The ABC's long-term goal might need collaborations with many institutes and facilities. Since the latter is also affected by external factors, it is important to have a **flexibility** to change their goal and system.
- (f) Future: Since astrophysics is an extremely multidiscipline research including biology, chemistry, physics, astronomy, planetary science, and so on, **reviewers recommend ABC to make a concrete future plan on budget and manpower of about 10 times of the present ones** to achieve the mission goal of "exoplanets and life there". The plan should be submitted as **one of the matters plans of the Science Council of Japan.**
- (g) General: It is also important to appeal various communities why ABC is necessary outside of NAOJ. The reviewer guesses that **astrophysics's multidiscipline is suitable for a compact and flexible institute like ABC rather than big NAOJ.** In fact, there are no major exoplanet observation/instrumentation groups within NAOJ now.
- (h) General: In the future reviews it will be important for reviews to **compare ABC with other astrophysics institutes, groups, researchers.** This will make clear the ABC's stance and sharpen the reviews.

Three areas come to mind on future plans and public outreach:

- i) Generally, the long term involvement with space missions (Roman, HabEX/LUVOIR) is promising. However, a significant gap in the research program is the lack of involvement with the enormous research potential of the James Webb Space Telescope (JWST). Particularly, for transit spectroscopy, JWST opens revolutionary new capabilities building on Spitzer and HST. ABC should be encouraged to expand in this area which could unite the remote sensing expertise of its astrophysics arm with the observational expertise of its astronomers. All that is required to grow this area is to identify and support one or two researchers or groups who could develop successful proposals both for Japanese-led projects and through collaborations.

- The new foreign lead of the Exoplanet Office could play a key role in initiating this activity.
- ii) ABC should keep a close eye on is the rapid growth of an Extreme Precision Radial Velocity (EPRV) Initiative in the US along with similar efforts in Europe. A key observational challenge of the 2020s will be the detection of Earth-sized planets orbiting solar-type stars via EPRV and ultimately their direct imaging and spectroscopic study with HabEX/LUVOIR. Because of the higher stellar temperatures of solar type stars and the deleterious effects of the Earth's atmosphere, the required observations will be in the visible and deep red. NIR observations from IRD or HISPEC will play only a niche role. ABC should assess whether it wants to develop any capability for PRV at visible wavelengths. One possible avenue might be to develop an AO-fed, single mode fiber EPRV instrument for visible wavelengths. Even a small telescope (2-3 m) could be used to study the brightest stars ( $V \sim 5$  mag) which will be the targets of HabEX/LUVOIR. The availability of facilities in South Africa could result in a significant role of Japan in a world-wide EPRV Initiative.
  - iii) There is an opportunity for ABC to play a stronger role in education and public outreach. ABC should consider requesting funding for 1-2 professionals who can interact with the relevant educational and public affairs organizations to bring the inspiring message of the search for life to the public.
  - iv) Finally, there is considerable room to grow in the area of advanced computational expertise. Increasing sophistication of the data will require a commensurate increase in the increase in the sophistication of data analysis tools.

## **Acknowledgement**

We greatly thank all the ABC members who prepared for this extensive external review even under the effect of COVID-19. In particular, Professor/Director Tamura kindly led the various aspects of the review. Best wishes for the ABC's continued success in the future.



## 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター

### 国際外部評価委員会報告書（2020年度）

#### 参考日本語訳

議長：柴田一成教授

副議長：中本泰史教授

ミシェル・マイヨール教授、メアリー・ヴォイテク教授、  
チャズ・バイヒマン教授、永原裕子教授、阿形清和教授、園池公毅教授

自然科学研究機構 (NINS) アストロバイオロジーセンター (ABC)では、2021年3月2日に国際外部審査を執り行った。COVID-19の状況のため、ABCの報告書である「アストロバイオロジーセンター 外部評価報告書」（別紙参照）は、審査当日の約3週間前の2月16日に配布され、評価者には事前に読んでいただいた上で、審査はオンラインで行われた。（本報告書の略語は別紙報告書にまとめた）

評価委員会は、系外惑星や惑星科学の専門家を含む天文学者、光合成の専門家を含む生物学者・アストロバイオロジストなどで構成されている。全リストは以下の通り。

#### ABC外部評価者（名前/所属/役職/専攻など）

- 柴田一成、京都大学名誉教授 & 2019年チャンドラセカール賞受賞者、太陽と星/アストロバイオロジー（委員長）
- 中本泰史、東京工業大学 固体地球惑星物理学 教授（副委員長）
- ミシェル・マイヨール：Michel Mayor、ジュネーブ大学教授・2019年ノーベル賞受賞者、系外惑星
- メアリー・ヴォイテク：Mary Voytek、NASA 本部 & ELSI エグゼクティブディレクター、水生微生物の生態と生物地球化学
- チャズ・バイヒマン：Chas Beichman、カリフォルニア工科大学/NASA Exoplanet Science Institute (NExScI)、エグゼクティブディレクター、系外惑星/赤外線天文学
- 永原裕子（日本学術振興会/東京工業大学ELSI フェロー、宇宙化学・隕石学）
- 阿形清和（基礎生物学研究所・所長、再生生物学）
- 園池公毅（早稲田大学教授、光合成）

審査は以下のように進められた。まず、ABCのセンター長である田村元秀教授が、ABCの報告書の概要を章立て順に説明し、続いてABCのメンバーの代表（平野照幸助教、葛原昌幸特任助教、滝澤謙二特任准教授、小谷隆行助教）が、各研究/プロジェクト活動の概要を紹介した。次に、評価者とABC出席者との質疑応答時間を持った。最後に、一般的なコメントと感想が評価者によって述べられ、約3時間にわたる会議を終了した。ヴォイテク博士は会議に出席できなかったため、zoomで録画された会議を視聴した。

3月中旬までに各評価者から詳細な報告書が提出され、議長・副議長が本報告書としてとりまとめた。各評価者の「生の声」を残すため、個別報告書に記載された文章の多くをそのまま取り入れている。本報告書は再度、評価者間で回覧され全員の合意を得た。

本報告書は、以下の項目の評価で構成されている。

1. 概要
  2. ミッション
  3. 組織
  4. 主要プロジェクト
  5. 研究活動
  6. オープンリサーチと若手研究者の育成
  7. 教育とアウトリーチ
  8. 今後の予定
  9. 全体の感想
  10. 推奨事項
- 付録

## 1. 概要

ABCは、NINSが2015年に設立した新しい研究所で、日本で唯一のアストロバイオロジー分野の大学共同利用機関として、日本のアストロバイオロジーコミュニティに貢献している。メンバーは約25名で、センター長1名、教授相当の外国人研究者2名、准教授2名、助教9名、特任研究員8名、等で構成されている。これまでに、2名の若手研究者が大学の定職に就くことができています。三鷹と岡崎には事務担当者がおり、国立天文台(NAOJ)の事務部と密接に連携している。現在の予算は年間3億円強で、ここ3年間はほ

ぼ横ばいで推移している。

比較的限られた人員と予算にもかかわらず、科学研究と装置開発の両面での活動性は非常に高く、2015年から2021年の6年間で大きく成長を遂げている。

ABCは 現行の望遠鏡用に3つの主要な系外惑星観測装置を開発してきた。(1) 近赤外線波長域での恒星大気吸収線を利用して、恒星の視線方向の速度変化から惑星を探す装置である、すばる望遠鏡に搭載された近赤外高分散分光器 (IRD)は、すでに素晴らしい結果を出しており、赤色矮星や若い星の周囲にある惑星の特徴を明らかにしている。(2) すばる望遠鏡用のSCEXAO/CHARISは、系外惑星/円盤の超高コントラスト補償光学装置/面分光装置で、技術革新をもたらすだけでなく、世界の系外惑星直接撮像コミュニティをリードしている。(3) 岡山のMuSCAT 1、カナリア諸島のMuSCAT 2およびマウイ島のMuSCAT 3は、NASA/TESSの惑星候補の確認および惑星大気の特徴付けを目指した多チャンネル可視光トランジットの系外惑星観測装置で、すでにNatureやScienceなどの主要な雑誌を含め多くの研究成果を発表している。

すばる望遠鏡用の装置は一般共同利用でも使用されており、世界中のすばる望遠鏡ユーザーに提供されている。

また、ABCは生物学的な基礎実験、コンピュータシミュレーション、フィールドワーク等に基づいて、赤色矮星まわりのハビタブル惑星における光合成の可能性について検証し地球外生命の新たな描像を提供した。

このような活動の結果、2021年2月現在、掲載されている査読付き論文の数は倍増し、合計324本となった。ABCはTMT/PSIやKeck/HISPEC-TMT/MODHISのような将来の超大型望遠鏡の観測装置にも国際的な協力の下で大きく貢献し始めている。さらに、ABCは大学共同利用機関として、171件の公募研究を支援し、77名の若手研究者をサポートし（2016年度から2019年度）、約20件の国際/国内ワークショップを開催した他、すばる望遠鏡や他の天文台で多くの共同利用観測をサポートしている。

6年間という短い期間で達成したこれらの高い活動成果に対して、評価者は非常に感銘を受け、総じて非常に高い評価を付けた。

今後の活動に対しては、『資金と人材の適切な調達により、ABCがアストロバイオリジー研究とユニークな装置開発で国際的な大学共同利用機関のCOEとしての地位をさらに向上させ、「普遍的生物学の確立」という最終的なミッションを達成することが重要である』との提言がなされた。

## 2. ミッション

ABCのビジョン・ミッション・バリューは、（上位から順に）この章の最後にまとめられている。すべての評価者が、ABCのミッションとその戦略を高く評価した。

宇宙で生命を発見することは、自然科学の究極の科学的目的の1つである。ABCが、系外惑星の観測とバイオシグニチャー（生命存在の証拠）の研究という2つの異なる側面からのアプローチを目ざしているのは極めて適切である。系外惑星の研究は、地上と宇宙の望遠鏡の新しい技術や設備によって何千個もの惑星に関するデータが得られるようになり、急速に発展してきた。その長期的目標には、温暖な地球型惑星で生命の兆候の発見と、その特徴の理解が含まれるが、地球とは異なる環境下で生物がどのように進化し、そうした生命を宿す惑星が望遠鏡によるリモートセンシングでどのように観測されるかについての解明は、比較的新しい学問領域であるアストロバイオロジーにゆだねられている。

既存の学問分野とは異なり、アストロバイオロジーの研究を推進するためには様々な視点および方向性が考えられる。数ある選択肢中で、ABCのミッションステートメントはこのエキサイティングな新しい研究の方向性を反映している。ABCは、国立天文台 (NAOJ) と基礎生物学研究所 (NIBB) を基盤としており、アストロバイオロジーに関するユニークで最先端科学を開拓することができる。

なお、ABCの研究は太陽系惑星の生命や地球上生命の初期進化など、アストロバイオロジーのすべての分野を網羅しているわけではないが、他の大学/研究機関との共同研究と公募研究の支援を通じて、網羅されていない分野を含むコミュニティ全体に貢献できているため、このようなABC独自の研究分野の選択は合理的と言えよう。

以下に述べる3つの相補的な戦略の強い相乗効果により、この非常に野心的な目標に近づくことができる。(i) 赤外線を中心とした革新的な装置開発、(ii) 生命誕生に適した多くの惑星を発見するための大規模な観測、(iii) バイオシグニチャーを認識し、それらを検出するための将来の装置設計のための科学的背景の構築。この5〜6年の間に行われたさまざまな成果や研究活動は、この戦略に完全に合致している。

### ABCのビジョン・ミッション・バリューの概要

#### ビジョン

- "Toward the creation of a universal study of biology in the universe", また日本語では「普遍的生物学の創成」

## ミッション

- 「系外惑星とそこにある生命」

## バリュー

- NINS内の複数の分野を組み合わせることで、アストロバイオロジー分野を前進させる。
- 系外惑星や太陽系内外の生命に関する研究を推進する。
- これらの目的のため、大型観測装置を開発する。
- 若手研究者を育成する。
- 海外のアストロバイオロジー研究機関と協力し、海外の研究者を招聘する。

## 3. 組織

NAOJとNIBBが協力し、母体であるNINSの中にアストロバイオロジーの複合的な研究所を作ったことは非常に重要である。

ABCの組織は、ABCセンター長のリーダーシップのもと、系外惑星探査 (Exoplanet Exploration) ・ 系外生命探査 (Exo-Life Search) ・ アストロバイオロジー装置開発 (Astrobiology Instrument Development) の3つのプロジェクト室で構成され、最初の2つのプロジェクト室はアストロバイオロジー装置開発室と密接に連携している。アストロバイオロジー装置開発室は、技術開発と新しい装置の開発を担当し、それらは既存および新規の望遠鏡で使用するため、系外惑星探査室でも活用されている。

各プロジェクトには、優れた、あるいは若手の「外国人研究者」が参加している。外国人研究者には、日本では相対的に弱い分野だがABCのミッションには欠かせない分野（超補償光学系や系外惑星大気）を強化する役割が期待されている。各プロジェクトには、NAOJやNIBBから移動した常勤スタッフが配置されている。このスクラッチ&ビルドは、新しい研究施設を作る上でも重要である。ABCメンバーの多くが若く、非常に活動的だということは、注目に値する。これはABCの強みの1つである。ABCは、少なくとも10年後には、国際的なアストロバイオロジーコミュニティにおけるトップ研究機関の1つになることが期待されている。

ABCのコアミッションは、明らかに学際的な領域である。この点は、いくつかのNINS主要研究機関を結ぶことで明確に認識されている。大学共同利用機関としてのABCの役割は、国内大学の研究の多様性を支援するために、非常に良い構造となっている。

一方で、まだ日本人メンバーが多く、その多くがNAOJやNIBBに併任していることへの懸念も示された。このような状況は、明らかにABCの独立した活動を阻害するという懸念がある。ただし、ABCは完全に独立した事務局を持つには機関の規模が小さすぎ

るため、この提携はあくまでも運営上の都合による。そのため、同じNINS研究所内で費用対効果を高めるためには、相互提携は適切であると判断した。

ABCの支援によって可能になったABCのメンバーと外部との共同研究は、アストロバイオロジーの天文学的および生物学的側面における研究と学生のトレーニングのための強固な基盤を提供している。現在の組織では、外国人研究者のカウンターパートとなる系外惑星研究の外国人リーダーが欠けているように見える。この分野の国際的な広がりを見ると、世界的に飛躍的に成長している系外惑星の研究に日本のコミュニティが遅れをとらず、十分に関与していくためにもこのポジションは重要である。

#### 4. 主要プロジェクト

ABCの取り組みは、既存および近未来の望遠鏡のための装置や、光合成を中心としたバイオシグニチャーの研究に大きな力を注いできた。これらは「ABCの主要プロジェクト」として強調されている。例えば、

(1) **すばる望遠鏡のIRD**は、太陽の周りの地球よりもはるかに中心星に近く、近赤外線で見やすいM型矮星周りのハビタブルゾーンにある惑星を発見し、観測することを目的としている。すでに、TRAPPIST-1周りの地球サイズの惑星の公転軸と恒星の自転軸のなす角（spin-orbit関係）や、多くの惑星の質量と半径の関係を、小型惑星についても高精度で決定することに成功している。これらの結果は、自転周期が1日以下の惑星を地上の望遠鏡で精細に観測できるという点でも非常に興味深いものである。spin-orbit 関係を観測することは、惑星表面からの反射スペクトルをモデル化する上でも重要な情報となる。すばる戦略枠プログラム観測であるIRD-SSPの初期成果は、TESS衛星でも探査できない晩期M型星の周りにはある地球型惑星を探査するもので、これもまた心強いものである。REACHは、すばる望遠鏡に取り付けるために開発された高分散分光コロナグラフ装置でIRDとSCEXAOの成功に基づいている。REACHは系外惑星の大気観測に成功し、これにより、まだ観測されていない分子に関する重要な情報が得られると期待されている。

(2) **すばる望遠鏡のSCEXAO/CHARIS**は、プリンストン大学・ABC・NAOJが開発し、運営している。すでにLkCa 15周辺の原始惑星系円盤に埋もれた惑星の直接撮像に成功している。より長波長の観測による情報は、原始惑星系円盤の進化と惑星の形成、さらにはハビタブル惑星の形成の理解に貢献するだろう。

(3) 小型望遠鏡用のマルチバンドCCDカメラ**MuSCATシリーズ**は、ABCが開発・運用しており、世界的規模で系外惑星トランジット観測をネットワーク化し、TESSで検



出された惑星候補を広範囲にフォローしている。このプロジェクトは、すでにNatureやScienceを含め多くの科学雑誌に科学的成果を発表している。

(4) 南アフリカのIRSFとPRIME望遠鏡のためのユニークな装置 (SIRPOL・SAND)においては、前者は宇宙におけるホモキラリティの起源を理解する手がかりとなる、世界的にも極めてユニークな赤外線偏光撮像装置である。

(5) ABCは、30m級の次世代望遠鏡でM型星の周りにある地球型惑星を直接撮像し、その特徴を明らかにするための将来の撮像装置であるPSI や、国際的な共同研究による将来の分光装置であるHISPEC/MODHISに大きく貢献し始めている。

この項目については、評価者からこれら以外にもコメントや提案が寄せられており、以下にそれらのコメントを列挙する。そのほとんどが非常に肯定的な意見であり、今後の開発のための推奨事項もいくつか提案されている。

- (a) 天文学（系外惑星）と生物学（光合成・バイオシグニチャー）の2つの主要なテーマを、主要な装置を使って組み合わせて研究するというスキームは非常に明確で、ABCのビジョンとも合致している。
- (b) 短期・中期的には、明らかに**超低質量星のハビタブルゾーンにある惑星が**、生命探査の可能性を秘めた**最初のターゲット**となるだろう。ABCで取り組む、ほとんどの装置開発は、このカテゴリーのターゲットに向けられている。この優先順位は、そのような惑星表面での光合成を調べるプロジェクトにも見られる。これは、赤色矮星周りの惑星が生命居住可能であるという主張を探究するために重要である。**ABCのプロジェクトと現在の装置に関する最も重要なコメントは、「非常に感銘を受けた」。**
- (c) 光合成の研究もABCの重要な科学的ターゲットであり、このプロジェクトではすでに「M型矮星周辺の系外惑星の水の中の光合成環境は、おそらく地球上の水の中の光合成環境と同じである」という**興味深い結果が報告されている**。この予測は、これまで考えられていた「M型矮星周辺の惑星の植物は近赤外光(NIR) に支配されており、そのレッドエッジは地球よりも長い波長を持っているのではないか」という考えに反するものだった。
- (d) 低エネルギー光を利用できる**緑藻類の発見は**、「真核生物は遠赤色光のエネルギーを光合成に利用できない」という常識を覆す**成果**である。今回の報告書では、この成果についての記述はかなり控えめであり、この**成果の重要性をより**

強調しても良いのではないか。また、遠赤色光による光合成がクロロフィルaのみで可能だという事実は、光合成生物の初期進化を知る上で重要な成果であり、より広い範囲での議論が可能だと思われる。

- (e) **すでに稼働中、あるいは開発中のさまざまな装置：IRD・REACH・SAND・SCExAO/CHARIS・MuSCATs**は、系外惑星を発見し、その特徴を明らかにするための最良の装置群だ。REACHとCHARISの今後の発見について、もっと知りたいと思っている。非常に一般的なコメントとして、ABCの一部の装置開発については、TMT用の同様な装置の先駆けとしての役割を担っている。このような戦略を支持する。SANDについては、この装置を複数の望遠鏡に搭載する可能性があることを非常に喜ばしく思う。Spin-orbit関係の測定やトランジットの分光測定など、特定のテーマには大型望遠鏡が不可欠である。ただし、サーベイにおいては、1.8m望遠鏡のような中型装置が提供するRVの大規模なサンプリングが、惑星の発見に最大の能力をもたらす。
- (f) **ABCが取り組んでいる一連のハードウェアプロジェクトは非常に素晴らしく、系外惑星の科学に大きく貢献している。**間接法・半間接法・直接法が、赤外線精密速度測定(現在はSubaru/IRD、将来的にはKeck/HISPECとTMT/MODHIS)、PRIMEによる重力マイクロレンズ、MUSCATによるトランジット、高コントラスト撮像/分光(現在はSCExAOとREACH、将来的にはKeck/HISPECとTMT/MODHIS、TMT/PSI)といった複数の技術・装置で実現されている。今後10年間で、日本は科学的な利益をもたらすであろう、これら(及びその他)のイニシアチブを取り、または重要な役割を果たしているだろう。30メートル望遠鏡(TMT)はまだ何年も先のこともかもしれないが、TMTの前段階としてケック望遠鏡(Keck)の装置に関わる機会は、日本の装置開発者にとっては貴重な経験となり、ABCの研究者にとっても科学的な機会となる。
- (g) 特に、**宇宙ミッションとのコラボレーションに関連するものは以下の通りである。**1) MUSCATは、JWSTやARIELのトランジットターゲットに重要な観測タイミングのデータを提供できる。2) PRIMEは、Roman 宇宙望遠鏡のマイクロレンズ調査の重要な前兆とフォローアップの機会を提供する。

## 5. 研究活動

ABCの科学的な効率性は、非常に多くの成果論文等によって確実に測られている。その規模・予算・人員を考えれば、非常に高い数字である一方、報告書に書かれている



研究ハイライトを読むことでさらに重要であると評価できる。ABCの協調的な活動と大学との相乗効果により、優れた成果の多様性を印象付けている。天文学と生物学の連携・星間前有機化学・自己組織化のメカニズム・高解像度の分光法など、様々な取り組みに評価者は感謝している。この領域の多様性は驚くべきものであり、ABCの成功における最も説得力のある論拠となっている。

研究活動にも目を見張るものがある。出版された論文の統計を見ると、ABCが支援している論文数が増えていることがわかる。また、主催・共催する国内外のワークショップの数と内容も同様に素晴らしいものだ。国際コミュニティは、活気に満ちた対面式の原始星と惑星に関するミーティングを楽しみにしており、実際に発表された個々のトピックはいずれも質の高いものだった。トピックは天文学（観測と理論）と生物学（実験と理論）の広範囲にわたっており、もちろんアストロバイオロジーセンターの目標である、この2つの異なる分野の重要な連携が強い事を示していた。

懸念されるのは、最近の予算のフラット化である。惑星の数・分野の研究者数・分野の論文数は、世界的に劇的に増加している。日本とABCがこの成長に追いついていくためには、ABCの活躍している機会を活かし、活躍する日本人研究者の数がそれに見合っただけで増える必要がある。大学院生・ポスドク・（彼らを指導するために必要な）研究者を特定し、支援する必要がある。このような成長は、公募研究でも可能だが、ABC自体の成長も不可欠である。

ABCメンバーは、競争的資金である科研費の獲得に成功している。状況は悪くないが、科研費の平均採択率が30%未満であることや、ABCの研究者数に対して助成金の数（額）は十分ではない。これは年間予算が研究者や（新しい観測装置の）開発を十分に支援しているからなのか、それとも単に助成金申請の結果なのかは確かではない。

また、ABCの活動を評価するためには、比較研究が有益であることも指摘されている。今後の審査では、活動に関するこのようなベンチマークを提示することが推奨される。

## 6. 公募研究と若手研究者の育成

ABCの活動を支えているのは、サテライト研究とプロジェクト研究という2種類のオープンな公募研究プログラムだ。サテライト研究では、太陽系内を研究対象とする一流のアストロバイオロジストを選抜し、系外を研究対象とするABCと共同で研究を行っている。研究分野を共有することで、ABCの研究を非常に効果的に補完している。サ

テライト研究で得られた成果の数を見れば、その存在意義は十分に理解できる。一方、プロジェクト研究の主な役割は、アストロバイオロジーの裾野を広げることにある。このプロジェクト研究は、アストロバイオロジーに興味があっても実際に研究を始める機会のない幅広い層の研究者に、アストロバイオロジーへの参入を促す仕組みとして有効に機能している。本プロジェクト研究は1年間の期間であるため、すぐさま大きな成果を期待することはできないが、日本におけるアストロバイオロジー研究の確立に向けて非常に重要な役割を果たすだろう。

ABCがアストロバイオロジーの若手研究者を、ABCの予算で大幅に支援していることを初めて知り、非常に感銘を受けた評価者もいた。これはABCの重要な事業であり、アストロバイオロジーのコミュニティからも高く評価されている。また、ABC自身だけでなく、これらのプロジェクトも多くのエキサイティングな成果を生み出していることが素晴らしい。1年間だけのプロジェクト研究が、大学や研究機関の基本的な役割に取って代わる効果があるのかどうか、やや疑問を持つ一部の評価者もいる。

先に述べた日本におけるアストロバイオロジーの発展は、これらのプログラムを拡大し、これらの若手研究者が経験や年功を積むことで、中堅以上のポジションを確保することによって達成されるだろう。

若手研究者の育成に関しては、国際的なワークショップや観測のための旅費を支援することが中心となっている。この点で、今回の外部評価のプレゼンテーションでは比較的若いスタッフが自分の取り組みを紹介していることにも注目したい。こうした当たり前のことが、若手研究者の育成にもつながっているのではないだろうか。

また、今後の審査では、海外のアストロバイオロジー研究機関との比較を行うことを推奨する。

## 7. 公教育とアウトリーチ

ABCの報告書によると、日本語での「アストロバイオロジー」という言葉は、ABC設立後により一般的になったようである。ABCが設立された2015年以降、日本語での「アストロバイオロジー」（完全一致）の検索ヒット数が増加していることから、一般メディアにおいてABCが果たした役割は大きいのではないだろうか。評価者はこの結果がとても面白いと評している。

ABCはこれまでに38回のプレスリリースを行なったが、そのうち約1/3はABCが主導したものだった。プレスリリースの数も順調に増えている。

ABCのアウトリーチについては、以下のようないくつかの重要な提言がある。これ

らは、他のNINS研究所にも当てはまり、役に立つだろう。

- (a) 科学は必ずしも一般の人に好意的に評価されるとは限らない。系外惑星やアストロバイオロジーの分野は人々から大きな関心を寄せられている。ABCはその特別な状況を利用して、子供たちの科学への興味を刺激する必要がある。アウトリーチはABCの「職務」の一部であろう。
- (b) アウトリーチ活動は必ずしもABCの強みではないようだが、ABCの存在が日本でのアストロバイオロジーの普及につながったことは間違いない。地球科学分野に比べると、一般向けの教育用書籍の出版はそれほど活発ではないようで、さらなる努力が必要だ。ただし、ABCの活動そのものに力を入れるのではなく、教科書や教育書の出版を公募研究に盛り込み、適任の研究者/ライターの活動を支援する方が現実的かもしれない。
- (c) この項目の説明は比較的少なく、広報活動・教育への取り組みやリソースが不足しているように見える。広報活動・教育は、日本ではABCが重要な役割を果たせる分野であろう。系外惑星の研究の面白さは、科学的リテラシーの形成に重要な役割を果たす。事実、少なくともアメリカでは、政治家が天文学研究の成果を一般の人々に届けることを最も重要な社会的機能の1つと考えている。系外惑星の科学や生命の探査は、将来の世代に科学技術の道を志す意欲を与えてくれる。ABCの成長分野としては、1) 教育関係者と協力して、幼稚園から高校までの教育カリキュラムに、生命探査に関連するシンプルだが本質的なアストロバイオロジーの概念を盛り込むこと、2) 一般の人々がアクセスできる資料を定期的に作成すること、などが考えられる。この試みはプレスリリースにとどまらず、NAOJ、JAXA/ISAS、そして適切な大学の外部グループと交流できる、関連する経験を持つ数人の専門家のコミットメントが必要となる。
- (d) この活動は、研究所の規模を考慮して研究/開発の試みとうまくバランスをとる必要がある。ただし、一般的には、ABCのパブリックアウトリーチの取り組みと成果は高く評価されている。

## 8. 今後の予定

ABCは、アストロバイオロジーの研究の究極の目的である「Toward the creation of a universal study of biology in the universe」または日本語で「普遍的生物学の創成」に向けて進んでいる。

第3期中期計画フェーズに相当する最初の6年間 (2016-2021) は、事実上、現在およ

び近い将来の望遠鏡に向けて、系外生命研究のために数多くのクラス最高の系外惑星発見の準備をすることに費やされた。現在、これらの望遠鏡に搭載されている多くの観測装置が安定して稼働していることから、ABCはこの目標を見事に達成したと評価される。ABCはまた、さまざまな天文学と生物学の研究プロジェクトを実施し、公募研究を通じて幅広く、アストロバイオロジーの推進と若手研究者の起用を進めてきた。また、ABCは2030年代の望遠鏡に搭載する系外惑星/アストロバイオロジー装置の概念設計にも着手している。

第4期中期計画に相当する今後6年間（2022年-2027年）は、系外生命発見のため、最適なターゲットの広範な観測を行うことに費やされる。これらの観測には、IRD・MuSCATシリーズ・PRIME/SAND・SCEXAOなど、ABCが開発したさまざまな装置が使用される。ABCはまた、2030年代の望遠鏡に搭載するアストロバイオロジー装置の詳細設計を完了し、一部の初期の観測装置 (HISPEC/MODHIS) の開発に着手する。ABCは、光合成や惑星大気の研究も加速させる。

第5期中期計画に相当する次の6年間（2028年-2033年）は、系外惑星/アストロバイオロジーの観測装置の開発を完了させ、近傍のM型矮星周辺のさまざまな生命の兆候を探る観測を開始することに費やされる。またABCは、NASAの次期旗艦ミッションであるHabExやLUVOIR（2030年代打ち上げ）に搭載される、太陽のような星の周辺に存在する系外生命研究のための装置に関わっていく。

この野心的な将来計画について、評価者は非常に肯定的に評価しているが、以下のような注意点や推奨事項がある。

- (a) 特に今後の計画に追加することは何もない。納得のいく現実的なプログラムだ。
- (b) 次世代望遠鏡の建設を考えれば、この計画は合理的であると思われる。現在の計画は、1995年に系外惑星が初めて発見されて以来、アストロバイオロジーのコミュニティがターゲットとしてきた酸素とレッドエッジに立脚しているように見えるため、ABCは系外生命体探査のための新しい戦略も持つ必要があると指摘されている。多くのプロジェクトが大気中の酸素を観測することを目的としており、独自の科学的目標とは言えないほど厳しい競争下にある。また、地球の生命は、環境から独立して進化してきたわけではなく、地質学的な進化と強い相互作用を持ちながら進化してきた。このようにABCでは、近赤外光下での生物活動のさらなる研究・観測のための新しいアイデア・惑星の地質学的発展のより深い理解を必要となる、系外生命探査の新しい戦略の研究を進める必

要がある。

- (c) 現在進行中の6年間の計画段階は、生命を宿す惑星の本格的な探査に向けた準備段階と位置付けられている。これからの6年間は発展的な段階となる。新しい段階での研究の方向性については、ABCが観測装置開発をさらに進展させていくことについて、評価者はある程度具体的なイメージを持つことができた。ただし、観測結果がアストロバイオロジーという学術分野をどのように進展させるのかという点では、まだ抽象的な段階とも言える。今後、研究の方向性がより具体的になっていくことを期待している。
- (d) この計画は、系外の生命探査に革命的な進展をもたらそうとする意欲にあふれている。これらの計画は、主に将来のハードウェア活動に関するものだが、ABCの報告書には、これらの野望を実現するために関連する資金計画や利用可能性についてはあまり示されていなかった。これまでのABCの装置プロジェクトの成功が今後の資金要求のための強力な基盤となることを信じている。
- (e) これらの計画の中で、観測プログラムと並行して開発すべき分野として欠けているのが、**理論と高度な計算**だ。天体物理学や生物学の理論プログラム・機械学習・データパイプラインは、かつてないほど洗練された観測装置から得られるデータを解釈するには不可欠である。例えば、中解像度のJWST望遠鏡や高解像度のREACH、HISPEC、MODHIS による分光法の大気特性の推定には、化学平衡状態にあるかないかにかかわらず、空間的・時間的に変化する大気の3Dモデルを高精度に計算する必要がある。これらの分野での進歩は、（地球や他の太陽系天体のグローバルな大気モデリングの）研究者・コンピュータサイエンス・統計的手法による専門知識に依存している。
- (f) また、**磁気活動を考慮して**、M型矮星周辺の惑星の生命居住可能性を探ることも奨励されている。系外惑星の生命居住可能性において、M型矮星からのフレアやコロナによる質量放出の影響を考慮する必要がある。口径3.8mのせいめい望遠鏡を用いて、M型およびG型矮星周辺の磁気活動の研究が盛んに行われ始めている。これらの研究者と協力して、X線/紫外線や高エネルギー粒子が大気組成の変化や生物の生存・進化に与える影響を研究することを推奨している。

## 9. 全体の感想

ここでは、評価者の方々の全体的な印象を列挙する。



- (a) わずか5年間の際立つ成果についてABCは誇りに思うべきであろう。数ある成果の中で、最も評価されている活動をひとつ挙げることは難しい。逆に、これら多くの優れた研究テーマの相補性が最大の特徴であり、これがABCの優れた特徴だ。また、装置開発（既存のものやプロジェクト中のもの）が充実していることも、強調すべき基本的なポイントだと考えられ、新しい装置はますますの発見につながっていくだろう。
- (b) 全体的には、ABCは計画通りに着実に進んでいるだけでなく、計画を上回る成果を着実に発表している。ABCは、アストロバイオロジー研究において中心的な役割を果たしている。次のステップでは、ABCがアストロバイオロジーの国際的なセンターになることが期待されている。
- (c) 現在、ABCの最も重要な研究目的は、生命の存在に適した惑星を発見することだ。この目標を達成するために精力的な取り組みが行われており、この6年間で着実な進歩を遂げている。これからの6年間、ABCが同じレベルの活動を維持できれば、系外惑星での生命探査で世界をリードすることができるはずだ。一方で、アストロバイオロジーを日本の新しい学問分野として確立するためには、惑星のハビタビリティだけでなく、そのような惑星での生命のあり方・生命の起源・進化などについても考える必要がある。このような考察は、天文学者・生物学者・地球科学者の考えが相互に影響しあって初めて生まれるものであり、直接実験で裏付けることは困難だ。これからの6年間で、ABCが個々の研究プロジェクトの遂行だけでなく、アストロバイオロジーの学際的な特性を反映した進歩を遂げることができるようになることを、評価者は期待している。
- (d) 天文学分野と生物学分野のコラボレーションはまだ限定的な印象もあり、改善の余地があると思われる。現在のフェーズは、将来の生命発見のための系外惑星探査フェーズだと理解している。ただし、系外惑星の大気や表面データが得られれば、生物学の研究者との緊密な議論が不可欠となる。ABCは、そのような段階になる前に、十分なイニシアチブをとる必要がある。そのためには、より緊密な連携と体制が望まれる。
- (e) 強調すべき成果を分かり易くすると、評価もしやすくなるだろう。

## 10. 推奨事項

いくつかの提言は、上記の各項目ですでに取り上げられているが、まずポイントをまとめ、次に評価者から提案されたいくつかの追加提言を列挙する。

- (a) サイエンスと装置：ABCは、天文学と生物学の分野で最先端科学と装置を提供するという現在のスタイルを継続することが本質的に重要である。彼らのマイルストーンとゴールは明確である。
- (b) 予算と人員：懸念されるのは、横ばいな予算だ。惑星の数・系外惑星の研究者数・系外惑星の論文数は、世界的に劇的に増加している。日本とABCがこの成長に追いついていくためには、これらの機会をリードし、活用する日本人研究者の数がそれに見合っただけで増える必要がある。大学院生・ポスドク・（彼らを指導するために必要な）研究者を特定し、支援する必要がある。このような成長は、公募研究のプログラムやサテライトプログラムで対応可能だが、ABC自体の成長も重要だ。
- (c) 公募研究：コミュニティの需要とABCの利用可能な資金に応じて、公募研究をある程度のレベルで維持することが推奨される。同様に、若手研究者への支援も継続して行うことも推奨される。
- (d) 組織：特筆すべきは、メンバーの多くが若く、非常に活動的であることだ。これはABCの強みの1つだ。ABCは、国際的なアストロバイオロジーコミュニティの中でトップレベルの研究機関の1つになることが期待されている。また、少なくとも目標（20%）としている外国人研究者の数を増やすこと、特に国際共同観測をリードすることが極めて重要だ。
- (e) 将来：ABCの長期的な目標のためには、多くの研究機関や施設との共同研究が必要になるかもしれない。施設については外部要因にも左右されるため、目標やシステムを変更できる柔軟性を持つことが重要だ。
- (f) 将来：アストロバイオロジーは、生物学・化学・物理学・天文学・惑星科学などを含む極めて多分野にわたる研究であるため、評価者はABCに対し、「系外惑星とそこに存在する生命」というミッションゴールを達成するために、現在の10倍程度の予算と人員をかけ、具体的な将来計画を立てることを推奨している。この計画は、日本学術会議 (Science Council of Japan) の事案計画の1つとして提出する必要がある。
- (g) 全般：NAOJ以外でABCが必要とされる理由を、さまざまなコミュニティに対してアピールすることも重要だ。この審査では、アストロバイオロジーのような多分野にわたる研究は大きな組織であるNAOJではなく、ABCのようなコンパクトで柔軟性のある研究所に適しているのではないかと、評価者は推測している。事実、現在のNAOJには、系外惑星の観測/観測装置の主要なグループは存在しない。

- (h) 全般：今後の審査で、評価者はABCを他のアストロバイオロジー研究機関・グループ・研究者と比較することが重要になるだろう。そうすることでABCのスタンスが明確になり、審査がシャープなものとなるだろう。

今後の計画や広報活動については、3つの分野が思い浮かぶ。

- i) 宇宙ミッション (Roman、HabEX/LUVOIR) への長期的な関与が期待されている。だが、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST: James Webb Space Telescope) の持つ膨大な研究の可能性に関与していないことが、研究プログラムにおける大きなギャップとなっている。特にトランジットの分光観測において、スピッツァー (Spitzer) やHSTをベースに、JWSTが革新的な新機能を提供する。ABCは、アストロバイオロジーのリモートセンシングの専門知識と天文学者の観測の専門知識を結び付けられるこの分野の拡大を奨励すべきだ。この分野を成長させるために必要なことは、日本主導のプロジェクトや共同研究の両方で、成功する提案を行うことができる1人または2人の研究者やグループを特定し、支援することだ。系外惑星オフィスの新しい外国人リーダーはこの活動に着手する上で重要な役割を果たすだろう。
- ii) ABCが注目すべきなのは、米国におけるEPRV (Extreme Precision Radial Velocity) イニシアチブの急速な発展と、欧州における同様の取り組みだ。2020年代の重要な観測課題は、太陽型星を周回する地球サイズの惑星をEPRVで検出し、最終的にはHabEX/LUVOIRで直接撮像して分光観測を行うことだ。太陽型星は表面温度が高く、地球大気の影響も受けやすいため、可視光の観測が必要となる。現在は重要だが、いずれはIRDやHISPECによる近赤外線観測は、ニッチ的役割しか果たさなくなる。ABCは、可視波長におけるPRVの能力開発を望むかどうかを評価すべきである。1つの可能な手段としては、補償光学を利用したシングルモードファイバーのEPRV装置を可視波長用に開発することである。HabEX/LUVOIRの観測対象となる最も明るい星 (V~5等) の研究には、2~3mの小型望遠鏡でも十分である。南アフリカの施設が利用できるようになれば、世界規模のEPRV構想において日本が重要な役割を果たすことになるだろう。
- iii) ABCは、教育や広報活動においてより強い役割を果たす有利な状況にある。ABCは、生命の探求という感動的なメッセージを一般の人々に伝えるために、関連する教育機関や広報機関と交流できる1-2人の専門家を通じて、資金を要請することを検討すべきである。



- iv) 最後に、高度な計算技術の分野には大きな成長の余地がある。データが高度化すれば、それに応じてデータ解析ツールも高度化する必要がある。

## 謝辞

COVID-19の影響下でも、この大規模な外部審査の準備をしていただいたABCメンバーの皆様は大いに感謝しています。特に、田村教授/センター長には、様々な面で審査を親切にリードしていただきました。今後のABCのさらなる活躍を期待しています。

## アストロバイオロジーセンター外部評価準備委員

田村 元秀  
平野 照幸  
堀 安範  
滝澤 謙二  
葛原昌幸  
小松 勇  
小谷 隆行  
高橋 葵  
日下部 展彦

表紙：低温度星周りの地球型惑星のイメージ。上部の分子は右から水分子・L- アラニン・PAH。

裏表紙：ハビタブルゾーンにある地球型惑星の地表イメージ。上部の分子は光合成に必要なクロロフィル。

画像提供：

Mitaka : (c)2005 加藤恒彦、4D2U Project, NAOJ (一部改変)





*Astrobiology Center*  
*National Institutes of Natural Sciences*