

## 戒崎計算宇宙物理研究室 Computational Astrophysics Laboratory

主任研究員 戒崎 俊一 (理博)  
EBISUZAKI, Toshikazu (Ph.D)



### キーセンテンス：

1. 超高エネルギー宇宙線の起源の謎に迫る
2. 宇宙史と地球史・生命史の関連を調べる
3. 量子論で地球を理解する
4. 超高速カメラで生体分子の挙動を捉える
5. 新しい科学可視化手法を開発する

### キーワード：

宇宙線、極限エネルギー、国際宇宙ステーション、ブラックホール、ダークマター、雲核、地球環境、量子シミュレーション、中性子散乱、J-PARC、地球深部物質、生体分子高速撮像、Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD)、G-APDカメラ、分子シミュレーション、科学可視化、学校教育

### 研究概要

当研究室では、極限エネルギー宇宙線 ( $10^{20}$ 電子ボルト) を検出し、その起源天体を同定するための JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) を開発している。JEM-EUSOは地球大気を検出器として利用し、宇宙起因の地球大気圏内での瞬間発光現象を観測する口径約2.5m、約60度の視野を持つ超広視野望遠鏡である。高度約400kmの軌道を周回している国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」 (JEM) の船外実験プラットフォームに装着され、直径約400kmの領域の地球大気を一度に観測する。日米欧の三軸のほぼ対等な協力のもとで建設される予定で、2017年頃の打上げを予定している。

その他に、銀河史が地球史に与える影響、とくに銀河のスターバーストが地球を全球凍結に導いた可能性を研究している。また、生体機能の発現機構を解明するためのG-APD 検出器による高速高感度カメラの開発、データのリアルタイム可視化技術の研究やシステム構築、研究成果を研究者が共有しやすいアプリケーションソフトReKOSの開発、計算機の教育利用などを行っている。

#### 1. 超高エネルギー宇宙線研究 (戒崎, 滝澤, 川崎, 篠崎, 津野, 真瀬)

JEM-EUSO は、宇宙から地球を観て宇宙を知るという新しい概念の観測装置“天文台”である。高度約400 km の軌道上を約90分で周回している国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」 (JEM) の船外実験プラットフォームに装着され、超広視野望遠鏡で地球大気を観測し、 $10^{20}$  電子ボルト (eV) を超える極限エネルギー宇宙線が作る微弱な光を捉える。

極限エネルギー宇宙線は地球の大気の原子核と衝突して主に電子・陽電子・ガンマ線などの二次荷電粒子からできた空気シャワーを形成する。空気シャワー中の高エネルギー荷電粒子は大気中の窒素分子を励起して紫外線を放射させる。JEM-EUSOはこのとき励起された窒素分子から放射される蛍光紫外線を2.5マイクロ秒の時間間隔で撮像し、空気シャワーの発達を約0.5 km×0.5 km (角度分解能0.07度)の空間分解能で三次元的に再構築する。これにより、極限エネルギー宇宙線のエネルギーと到来方向を決定することができる。これらは、100平方キロメートルあたり1年に1個程度しか飛来しないので、より多くの事例を得て高統計の議論を可能にすることが何よりも肝要である。JEM-EUSOは、宇宙から観測することにより飛躍的に観測領域を拡大し、3年間の運用で約500個を超える超GZK ( $E > 5 \times 10^{19}$ eV)粒子事例を観測できるよう設計されている。 $10^{20}$ eV以上のエネルギーを持つ粒子は、銀河磁場で一度程度しか曲がらず(陽子の場合)、ほぼまっすぐ地球に飛来するので、到来方向を遡れば起源天体を同定することができる。

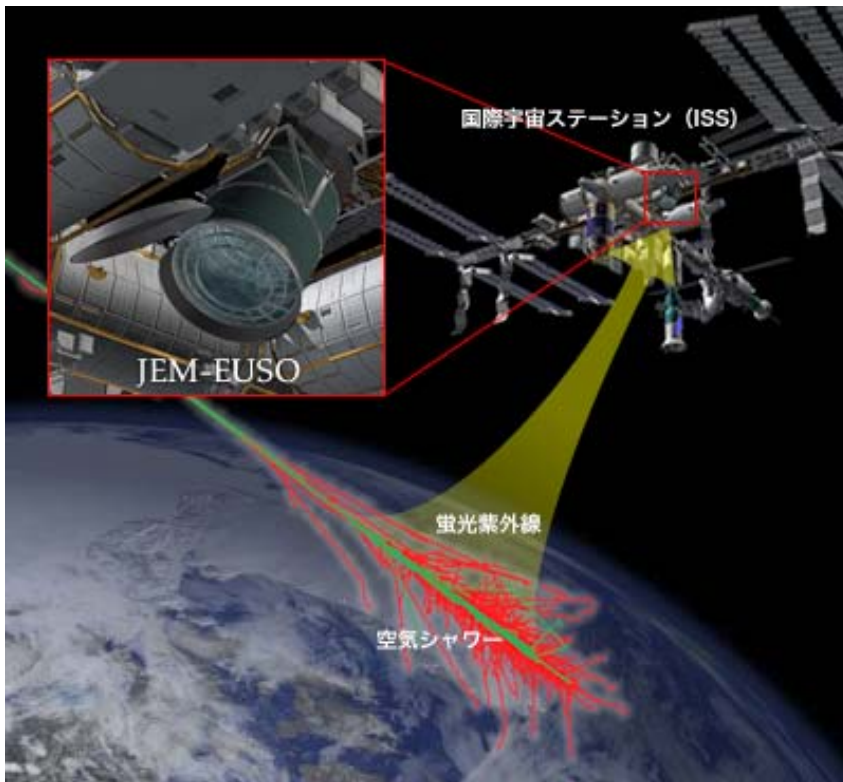
JEM-EUSOはその他にも、超高エネルギーニュートリノによる空気シャワーや雷、夜光、流星などの大気圏内の発光現象なども全球的・網羅的に観測する。

当研究室は、JEM-EUSOを推進する中核的存在として、13ヶ国(日本、米国、イタリア、フランス、ドイツ、スペイン、ポーランド、スロバキア、ブルガリア、ロシア、メキシコ、韓国)、77研究施設の研究者

(2011年12月現在)と協力しながら、JEM-EUSOの製作準備を進めている。JEM-EUSOは、日本のH II B ロケットで打ち上げられ、HTV (H-II Transfer Vehicle) でISSに運ばれる予定である。

JEM-EUSO 望遠鏡は口径約 2.5m で史上最大の屈折望遠鏡である。屈折望遠鏡は、1897年にヤーキス天文台の102cm 屈折望遠鏡が建設されて以来、レンズの重量と色収差のために100年以上にわたって、より大きな物は作られてこなかった。これらの問題は、超軽量フレネルレンズおよび回折光学レンズの製作を可能にした大型超高精度加工技術のブレークスルーで解決し、大森素形材工学研究室と共同で製作している両面フレネル曲面レンズの試作品(口径1.5m)3枚が完成した。米国アラバマ州立大学における光学試験の結果、設計どおりの集光性能を得た。

<http://jemeuso.riken.jp/>



極限エネルギー宇宙線が作る空気シャワーをISSから観測するJEM-EUSO(想像図)



完成した両面フレネル曲面レンズの試作品（口径 1.5m）

## 2. 宇宙史と地球史の関係を調べる（戒崎）

原生時代に、二回起こった（22–24 億年前と 5.5–7.7 億年前）全球凍結事件の原因は、過去 10 年の努力にもかかわらずこれまでよくわからなかった。われわれは、これが天の川銀河がスターバーストを起こした結果、暗黒星雲との遭遇が長く続き、さらには頻繁に超新星残骸と衝突したことによるという仮説を立てて検証を試みている。これらの星雲との衝突遭遇では、地球に降り注ぐ宇宙固体粒子と宇宙線のフラックスが大きく増えて、地球が極端に寒い気候、つまり全球凍結に導かれることが分かった。また、全球凍結事件の中に繰り返し現れる、極端に寒い気候から極端に暑い気候への変化サイクルは、個別の星雲衝突に対応しているのかもしれない。銀河内の恒星や星団の年齢から得られた、天の川銀河のスターバースト時期は、上記の地球科学的に復元した全球凍結事件の時期と一致している。星雲衝突の直接の証拠は堆積速度が遅い深海堆積物の中に見出される可能性が高い。このような星雲衝突は、気候変動とともに、宇宙線照射によるゲノムの不安定を導いて、カンブリアの生物進化大爆発を演出した可能性がある。また、後の顕生代に起こった 5 回の生物大絶滅も同様の星雲衝突の結果である可能性も検討している。

## 3. 量子シミュレーションによる地球と惑星の物質科学（飯高）

水素は宇宙最多の元素であるが、地球大気中の水素分子は宇宙へ拡散してしまい、現在の地球では水素は水(H<sub>2</sub>O)や含水鉱物などの化合物あるいは鉱物やマグマ中の不純物として存在する。この水素は地表から地球最深部の高温高圧領域までのマグマ・鉱物の構造や物性に劇的な影響を与え、原始地球形成、地球深部や火山噴火のダイナミクスなどに関わる重要元素である。また「宇宙の塵から地球がどのように物質進化して生命を育む水の惑星となったか、そしてどうなるか。」という、宇宙生物学の根本問題にも関連する。平成 20 年度採択の新学術領域研究「高温高圧中性子実験で拓く地球の物質科学」（領域代表：八木健彦）では、J-PARC における世界トップレベルの中性子ビームと日本で開発された最先端の実験技術を用いて、地殻から下部マントル最上部相当の高温高圧下におけるマグマ、鉱物中における水素（水）の物質科学を探究する。その計画研究の一つとして我々は世界トップレベルのスーパーコンピュータと最先端の量子シミュレーションを駆使して、地球・惑星内部の高圧下での物質の性質を理解することを目指す。すでに高圧力下での固体メタンの結晶構造の発見、シラン水素複合体の新型化学結合の解明などの成果を挙げつつ

ある。

(<http://www.iitaka.org/~neutron/>)

#### 4. G-APD 検出器による高速高感度カメラの開発と生体分子科学への応用 (滝澤、川崎、宮本)

生体分子の撮像としては、未踏の領域である sub- $\mu$ sec という高速撮像で、生命を司る生体分子の素過程を理解することを目指し、G-APD カメラによる高速撮像システムの開発をおこなっている。このカメラは、CCD や CMOS の代わる次世代検出素子 Geiger mode APD (G-APD)を用いている。G-APD 検出素子は、SiPM、MPPC としても知られ、従来の光電子増倍管に換わる新しい半導体素子である。G-APD は、CCD 等と比べて格段に微弱で高速な発光現象を捉える。潜在的には $< 1$  ns の時間分解能で 1 光子検出ができる。平成 20 年度採択の理事長ファンド (連携)「G-APD 検出器による高速高感度カメラの開発と生体分子科学への応用」では、 $16 \times 16$  画素、読み出し時間 6 ns の G-APD 撮像カメラを開発した。 $1.2 \mu$  sec サンプルングレートでの 40nm 金コロイドおよび、HeLa 細胞表面の 80nm 金コロイドの側方拡散の撮像を行った。

#### 5. 高度情報技術を使ったヒューマンインターフェースの研究 (戒崎、金子)

シミュレーション結果についての人間の直感的な理解を助けるため、データのリアルタイム可視化技術の研究とシステム構築を行っている。科学技術館ユニバースホールが改修されて立体全天シアター「シンラドーム」が完成した。その運営とコンテンツの製作に協力が続けている。

また、研究成果を研究者が共有しやすいアプリケーションソフト ReKOS の開発を推進した。このソフトウェアを用いることにより、研究成果を広く学校教育、社会教育の教育現場で活用できるようにもなる。フリーソフトとして配布を行っている。同ソフトウェアを基礎から完全に再構築し直した Ver. 2.0 をリリースした。これは既存バージョンとの互換性を残しながら、飛躍的な機能の向上と、より多機能で親和性の高いシステムとの連携を可能にするものである。Ver. 2.0 ベータ版は、使用期限を設けて、2011 年 5 月、2011 年 9 月、2012 年 1 月の 3 回にわたって WEB 公開した。

#### Key Sentence :

1. Explore the origin of the extreme energy cosmic-rays
2. Investigation of the relationship between galactic and terrestrial histories
3. Understand the Earth quantum mechanically.
4. Imaging bio molecular dynamics by using an ultra high-speed camera.
5. Create a new method of scientific visualization

#### Key Word :

cosmic-rays, extreme energy, International space station, black hole, dark matter, cloud nuclei, terrestrial environment, quantum simulation, neutron scattering, J-PARC, mantle, magma, Bio molecular high-speed imaging, Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD), G-APD camera, molecular simulation, scientific visualization, formal education

#### Outline

We promote in JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) mission to explore the origin of extreme energy particles above  $10^{20}$ eV. It observes giant-air showers by extreme energy cosmic-ray from the orbit. JEM-EUSO is a super wide-field (60 degrees) telescope with a diameter of 2.5 meters planned to be installed in International Space Station. The feasibility study and conceptual design has continual for past three years under the collaboration with JAXA, RIKEN, and the JEM-EUSO international collaboration of thirteen countries (Japan, USA, Italy, France, Germany, Spain, Switzerland, Poland, Slovakia, Bulgaria, Russia, Mexico, Korea) JEM-ESO is planned to be launched around 2017 by the Japanese heavy lift rocket - the H II B, and then conveyed to ISS by HTV (H-II transfer Vehicle)

Other active studies include studies on the relation of galactic environment with the Earth's surface environment. In particular, we explore the possibility that a starburst in our Milky Way Galaxy lead the snow ball Earth events in the past. They also include development of a G-APD camera with

sub-psec sampling and its application to bio molecular science, development of ReKOS which is a friendly application software for sharing the results among researchers, and education with computers.

### **1. Investigation of Extreme Energy Cosmic-Rays** (Ebisuzaki, Takizawa, Kawasaki, Shinozaki, Mase)

JEM-EUSO is a new type of observatory that uses the earth's atmosphere as a detector. JEM-EUSO will be on orbit on the International Space Station (ISS). It observes transient luminous phenomena taking place in the earth's atmosphere caused by particles coming from space. The sensor is a super wide-field telescope that detects extreme energy cosmic-rays with energy above  $10^{19}$  eV. This remote-sensing instrument orbits around the earth every 90 minutes on board of the International Space Station at the altitude of approximately 400km.

The JEM-EUSO telescope has a super-wide Field-of-View ( $\pm 30^\circ$ ) with two double sided curved Fresnel lenses and records the track of an EAS with a time resolution of 2.5 microseconds and a spatial resolution of about 0.5 km (corresponding to 0.07 degrees). These time-segmented images allow the determination of the energies and directions of the primary particles.

JEM-EUSO instrument can reconstruct the incoming direction of the extreme energy particles with accuracy better than several degrees. It's observational aperture of the ground area is a circle with 250 km radius and its atmospheric volume above it with a 60-degree field-of-view is about 1 tera-ton or more.

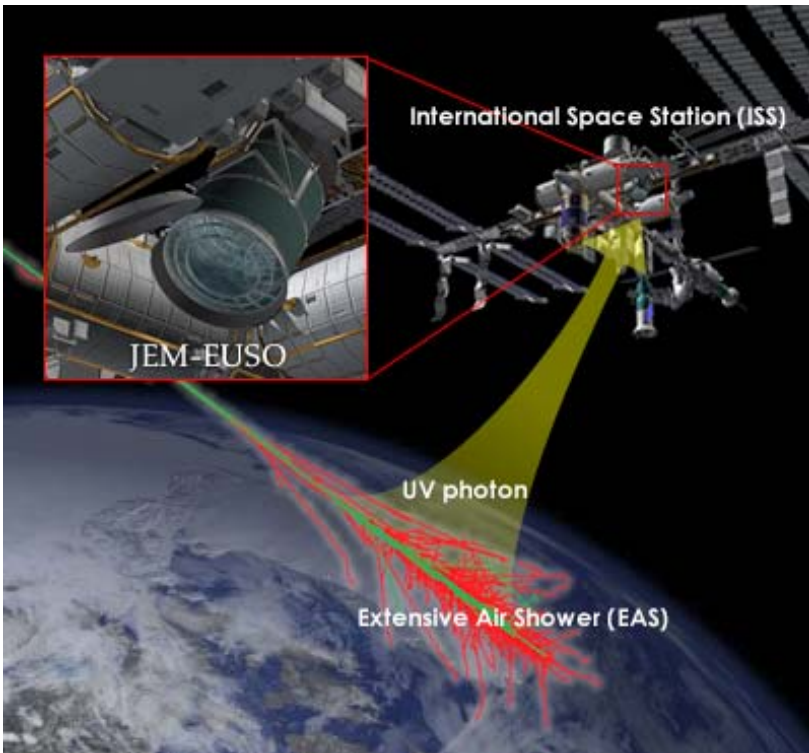
The extreme energy particles can be traced back to their origin by their measured arrival direction with accuracy better than a few degrees. JEM-EUSO will also observe atmospheric luminous phenomena such as lightning, nightglow, and meteors.

JEM-EUSO has been selected as the candidate mission of the second utilization of JEM/EF. A two-year-long Phase-A/B study has started. JEM-EUSO is planned to be launched around by the Japanese heavy lift rocket - the H II B, and then conveyed to ISS by HTV (H-II transfer Vehicle).

The JEM-EUSO telescope is the ever largest refractive telescope with a diameter of 2.5m. Nano precision fabrication technology allows to make highly transparent lens for JEM-EUSO. It uses the Fresnel lens to reduce mass of the lens and eliminate color aberration of the optics.

We succeeded to produce a set of three Fresnel lenses with diameter of 1.5m experimentally with Materials Fabrication Laboratory. They showed a good focusing performance in the optical test done in University of Alabama in Huntsville as designed.

<http://jemeuso.riken.jp/>



Artist's conception of the JEM-EUSO telescope observing air shower.



Experimental Fresnel lens with diameter of 1.5m

## **2. Investigation of the relationship between galactic and terrestrial histories (Ebisuzaki)**

The cause of the Snowball Earth events at 2.2-2.4 Ga and 0.55-0.77 Ga in the Proterozoic eon remains unknown in spite of the intensive studies in the last decade. We here present the star burst model of the Snowball Earth. Frequent and prolonged encounters with nebulae (dark clouds and supernova remnants) take place during a starburst of the Milky Way Galaxy. The increase in flux of cosmic dust particles and cosmic rays during these nebula encounters lead to global super-cool climate, in other words, a snowball Earth event. The individual nebula encounters may correspond to the substructures of super-cool/super-warm cycles in a Snowball Earth event. The star burst periods deduced from the ages of stars and star clusters coincide well with the Snowball Earth events reconstructed from geological records. The direct evidences of the nebula encounters, on the other hand, can be obtained from deep sea sediments deposited during the Snowball Earth events. The radiation dose due to the cosmic rays leads genomic instability, which may produce Cambrian explosive explosion of life. The mass extinction events, like "Big five," may also be caused by such nebula encounters, which took place in later Phanerozoic era.

## **3. Materials science of Earth and planets explored by quantum simulation (Iitaka)**

The most abundant element in the universe is hydrogen. However, most of molecular hydrogen in the Earth's atmosphere escaped into space long time ago. Today hydrogen exists as chemical compound such as water (H<sub>2</sub>O) and hydrous minerals, or as impurities in minerals and magma. Hydrogen is believed to have dramatic impacts on the structure and physical properties of magma and minerals from the surface to the innermost region of the Earth under high pressures and high temperatures. Hydrogen is an important element related to formation of the primitive Earth, eruption of volcanoes and dynamics of the deep Earth. Hydrogen also refers to fundamental questions of Astrobiology: "How the Earth has evolved from space dusts to a water planet filled with life?" and "What is its future?". The MEXT fund for New Research Area "Materials Science of the Earth by Neutron Experiments under High Temperatures and High Pressures" (PI: Takehiko Yagi) was approved in 2008, where the materials science of hydrogen (water) in mantle and magma are explored by the one of the most advanced neutron beam at J-PARC and experimental techniques developed by Japanese high-pressure community. As a part of this project we exploit the state of art supercomputers and quantum simulations to understand the properties of materials under high pressure inside Earth and planets. We have discovered new crystal structures of solid methane and new chemical bonds between silane and hydrogen molecules.

(<http://www.iitaka.org/~neutron/>)

## **4. Development of a G-APD camera with sub-μsec sampling and its application to bio molecular science (Takizawa, Kawasaki, Miyamoto)**

Fundamental processes of bio-molecular activity compose a life. Timescale of its bio-molecular activity is almost μsec. However, imaging technology cannot resolve its activity enough in this timescale. Its main reason is that there are not good detector with both ultra high-speed response and high detection efficiency. So, we are developing a new camera system by using a Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD). G-APD is the next generation detector in place of CCD or CMOS detector. G-APD is known as SiPM or MPPC and functions as silicon-base photo-multiplier tube. G-APD can detect a photon with good time resolution like < 1 ns. The Strategic Programs for R&D (President's Discretionary Fund), Collaboration Research, "Development of a G-APD camera with sub-μsec sampling and its application to bio molecular science" was approved in 2008, where G-APD camera system, with 16x16 pixels and 6 nsec sampling, has been developed. We observed scattering light from 40nm diameter Au colloids and motion of 80nm diameter Au colloids along a wall of HeLa cell.

## **5. Studies of human interface with advanced information technology (Ebisuzaki, Kaneko)**

We are developing a real-time visualization system to assist intuitive understanding of simulation results. For example, we contributed to develop the contents "Shinra Dome" in the Science and Technology Museum. "Shinra Dome" is the renewal version of "Universe Hall", and we are collaborating to operate the system. We developed ReKOS, a friendly application software for sharing the results among researchers. ReKOS is distributed as a free software, enabling

researchers to widely distribute their results for education in various kinds of schools. This year we rebuilt ReKOS from scratch to improve the functionalities, keeping the compatibility with previous version. The software was released as the new version (ver. 2.0) of ReKOS. Period limited 2.0 beta version was distributed on a web site three times of May and September, 2011 and January, 2012.



***Principal Investigator***

戒崎 俊一 Toshikazu Ebisuzaki

John Sak Tse

井田 茂 Shigeru Ida

木舟 正 Tadasi Kifune

***Research Staff***

飯高 敏晃 Toshiaki Iitaka

滝澤 慶之 Yoshiyuki Takizawa

松山 知樹 Tomoki Matsuyama

藤本 桂三 Keizo Fujimoto

塩田 大幸 Daiko Shiota

川崎 賀也 Yoshiya Kawasaki

篠崎 健児 Kenji Shinozaki

宮本 寛子 Hiroko Miyamoto

津野 克彦 Katsuhiko Tsuno

金子 委利子 Iriko Kaneko

谷田貝 文夫 Fumio Yatagai

田島 典夫 Norio Tajima

Gustavo Adolfo Medina Tanco

Kholmirzo Tagoikulovich Kholmurodov

榊 直人 Naoto Sakaki

佐藤 光輝 Mitsuteru Sato

肖 鋒 Feng Xiao

真貝 寿明 Hisaaki Shinkai

高橋 徹 Toru Takahashi

高橋 幸弘 Yukihiro Takahashi

立川 仁典 Masanori Tachikawa

Dmitry Vadimovich Naumov

西堀 英治 Eiji Nishibori

Michael Paul Stopa

眞榮平 孝裕 Takahiro Maehira

牧野 淳一郎 Junichiro Makino

丸山 茂徳 Shigenori Maruyama

三浦 均 Hitoshi Miura

泰岡 顕治 Kenji Yasuoka

安田 耕二 Koji Yasuda

八柳 祐一 Yuichi Yatsuyanagi

矢部 孝 Takashi Yabe

山口 嘉夫 Yoshio Yamaguchi

Alan Aspuru-Guzik

荒井 規允 Noriyoshi Arai

池田 隆司 Takashi Ikeda

石井 晃 Akira Ishii

伊藤 智義 Tomoyoshi Ito

今井 智仁 Tomohito Imai

大島 修 Osamu Oshima

尾久土 正己 Masami Okyudo

奥野 光 Hikaru Okuno

面高 俊宏 Toshihiro Omodaka

片岡 龍峰 Ryuho Kataoka

***Students***

東出 一洋 Kazuhiro Higashide

Saez Cano Guadalupe

Morales Alberto Jose

Silva Lopez Hugo Hector

Nikonov Nikolay

Fenu Francesco

加藤 正堯 Kato Masataka

Nguyen Hai Chau

***Assistant and Part-timer***

大畑 智子 Tomoko Oohata

佐藤 茂 Shigeru Sato

真瀬 洋 Hiroshi Mase

大野 陽子 Yoko Ohno

小野寺弥生 Yayoi Onodera

皆川 敏一 Toshikazu Minagawa

大出 喜之 Ohde Yoshiyuki

小久保英一郎 Kokubo Eiichiro  
五島 正光 Masamitsu Goshima

**Alessandro Marchi Zuccaro**

高幣 俊之 Toshiyuki Takahei  
田中 宏志 Hiroshi Tanaka  
千頭 一郎 Chikami Ichiro  
土屋 旬 Jun Tsuchiya  
長嶋 雲兵 Umpei Nagashima  
永野 元彦 Motohiko Nagano  
西堀 英治 Eiji Nishibori  
野村 晋太郎 Shintaro Nomura  
畠 浩二 Koji Hata

**Fabio Pichierri**

平井 尊士 Takashi Hirai

**Mario Edoardo Bertaina**

**Veniamin Berezinsky**

星 健夫 Takeo Hoshi  
本郷 研太 Kenta Hongo

**Yanming Ma**

町田 学 Manabu Machida  
松原 裕樹 Hiroki Matsubara  
松本 直記 Naoki Matsumoto  
宮崎 剛 Tsuyoshi Miyazaki  
宮崎 芳郎 Yoshiro Miyazaki  
宮原 ひろ子 Hiroko Miyahara

**Thomas Mernik**

八木 清 Kiyoshi Yagi  
吉田 滋 Shigeru Yoshida  
鷺見 治一 Haruichi Washimi

**Mark Adrian Watson**

本間 正充 Masamitsu Honma  
中里 直人 Naohito Nakasato  
重田 育照 Yasuteru Shigeta  
石岡 憲昭 Noriaki Ishioka  
千秋 博紀 Hiroki Sensyu  
前園 涼 Ryo Maezono