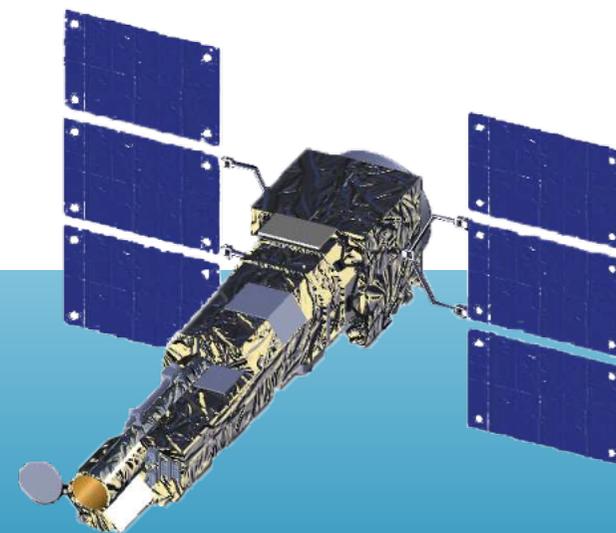


SOLAR-C (EUVST) : 国際プロジェクト としての立ち上げ

2021年9月7日



清水 敏文

JAXA宇宙科学研究所(ISAS/JAXA)
Solar-C(EUVST)プリプロジェクト候補チーム長

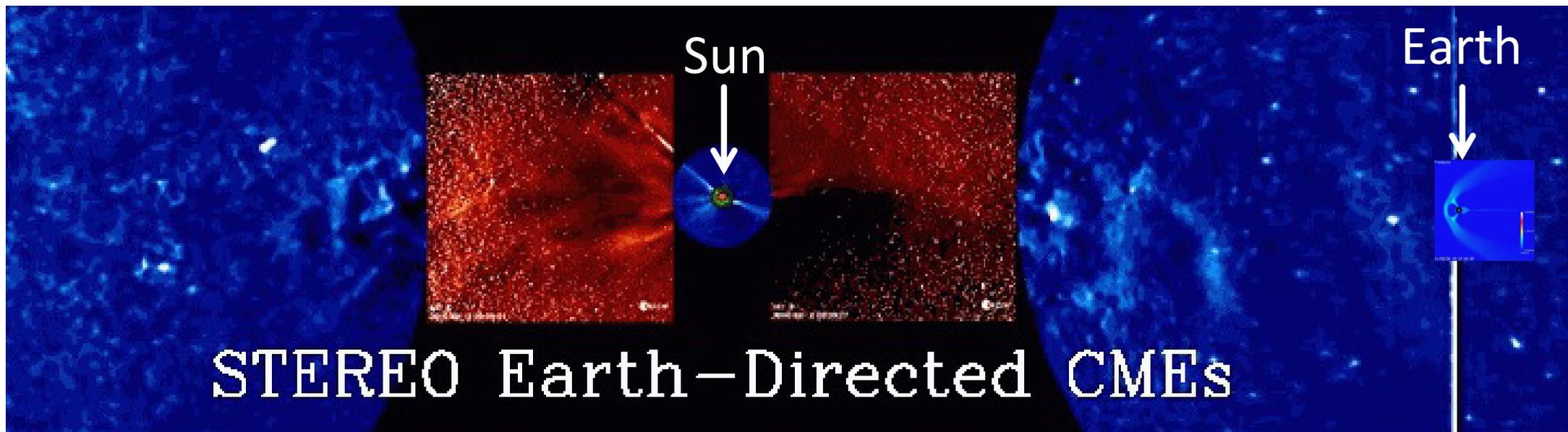
プロジェクトの立案段階、実現段階、運用段階で行なわれてきたこと、問題となったことと克服の仕方、そしてコミュニティの役割と期待することをレビュー

- Solar-C (EUVST)について
- 立案段階
 - 戦略的中型SOLAR-C
 - 公募型小型への舵きり: NGSPM-SOTの活動, Solar-C (EUVST)の提案

高感度太陽紫外線分光観測衛星 SOLAR-C (EUVST)とは

ミッションの意義・研究状況

- ミッションの学術的意義
 - 1) 宇宙に如何に高温プラズマが作られ、2) 太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのか、という命題を探求するミッション。
- 今までの研究状況
 - これまでの太陽観測によって、1) 太陽プラズマ大気は定常的な成分(高温コロナ形成と太陽風の流れ出し)と突発的な成分(フレア等爆発的エネルギー解放)で構成、2) 大気へのエネルギー入力とその解放・加熱(出力)の振舞い、を明らかにしてきた。
 - その振る舞いが起きる仕組みやその背景にある基礎物理過程は、謎のまま、つまりブラックボックスである。



ミッションの科学目的

ブラックボックスな”物理過程”の理解には、エネルギー注入と解放の間で、エネルギーや物質がどのように輸送され、また解放の現場を捉えて、何が起きているかを診断すること。

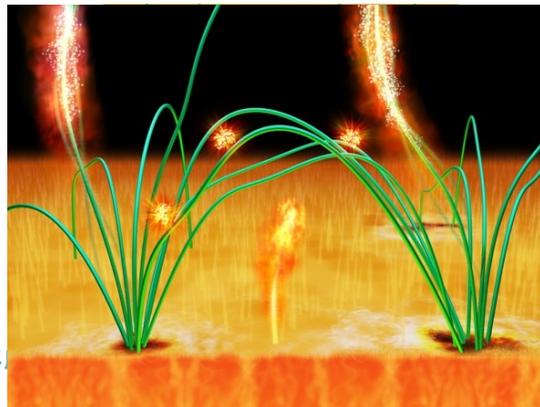
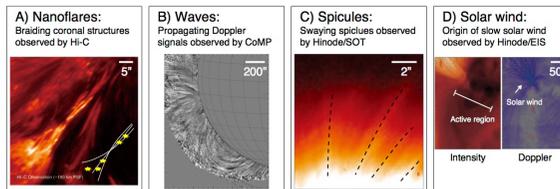
■ 目的1：太陽大気・太陽風の形成を導く基礎物理過程を解明する。

A) ナノフレアのコロナ加熱への寄与を定量化

B) 波による散逸のコロナ加熱への寄与を定量化

C) 彩層微細構造(スピキュール)の形成機構とコロナ加熱への寄与を定量化

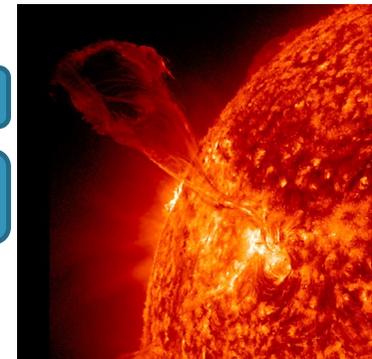
D) 太陽風の流源と加速機構の理解



■ 目的2：太陽大気が不安定化しフレア・プラズマ噴出を引き起こす物理過程を解明する。

A), C) 磁気リコネクション機構の高速化の理解

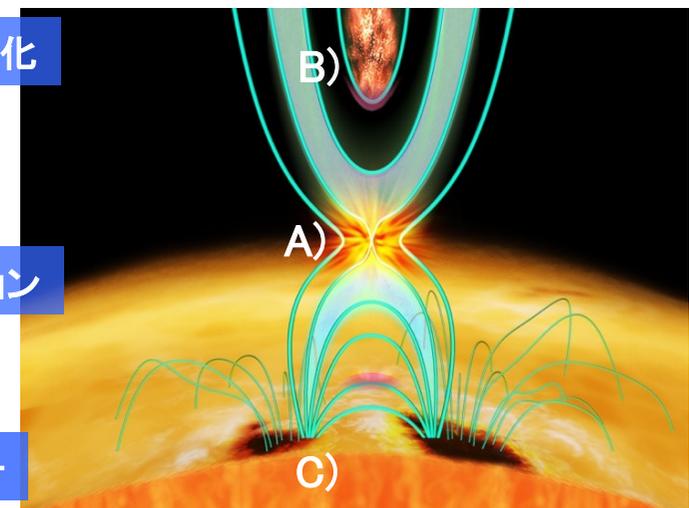
B), D) フレアや噴出に至るエネルギー蓄積とトリガーの理解



プラズマ不安定化

磁気リコネクション

フレアトリガー

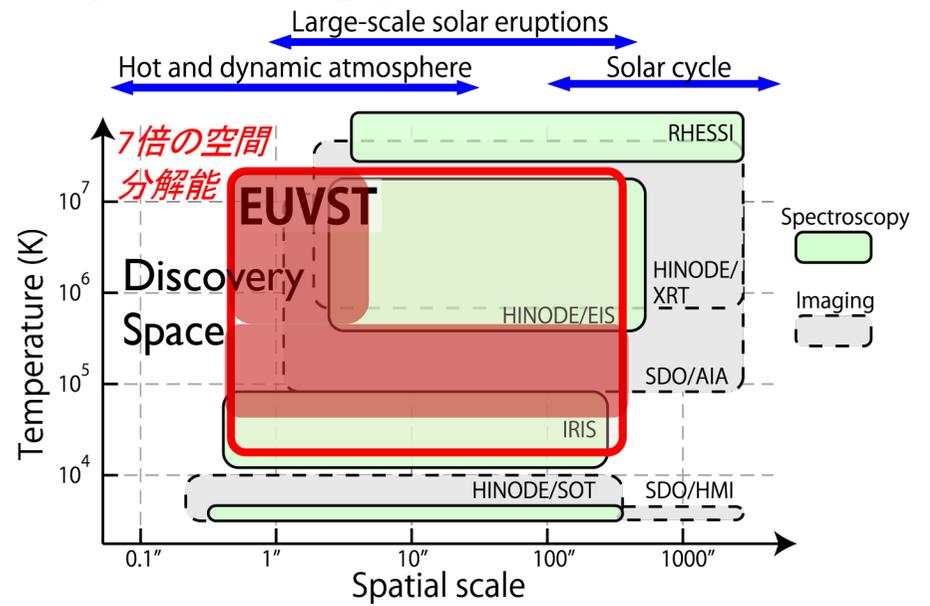


ミッションの優位性・独自性

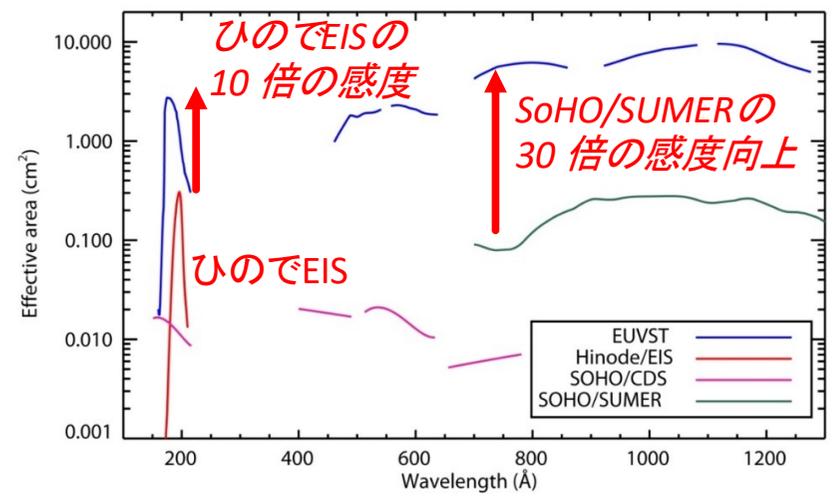
目的達成には、以下の3つの要素を同時に実現する**世界初のEUV分光望遠鏡**、が有効。

- A) 3桁以上の温度帯域 (彩層(2万度)からコロナ(100-1500万度))にわたる太陽大気的全温度層を同時に隙間なく観測できる能力
- B) 10-30倍の感度向上して、観測する現象に高空間・時間分解能で追隨できる能力 (0.4", <1s)
- C) 基礎物理過程を診断できる分光情報(速度, 温度, 密度等)を獲得できる能力

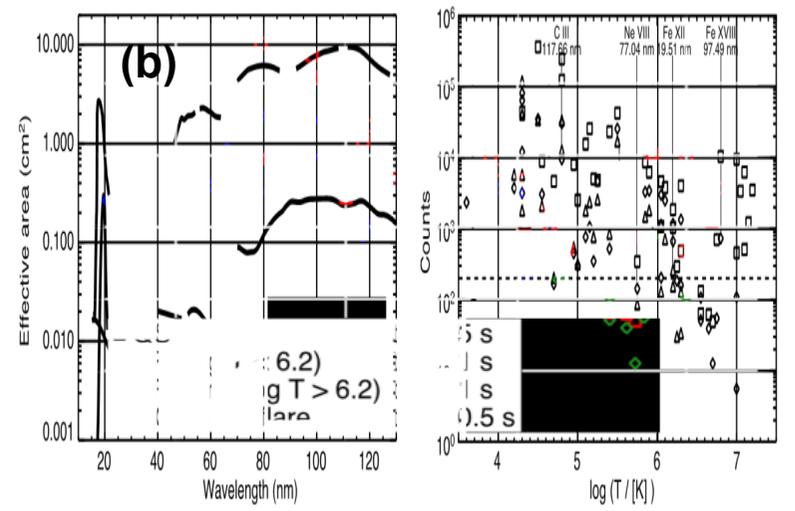
温度 vs. 観測できる空間スケール



有効面積 vs. 観測波長



分光観測できる輝線 vs. 温度



ミッション構成概要

- 小型衛星バス上に、極端紫外線高感度分光望遠鏡 EUVST (EUV high-throughput Spectroscopic Telescope)を搭載し、イプシロンSロケットにより太陽同期極軌道(高度600km以上)に投入する。
- EUVSTは、**日本が主導して国際協力により世界一丸となって実現させる**ものであり、日本は、EUVST全体構造(鏡筒)と主鏡機構(口径28cm指向駆動可能な単鏡)および衛星バス等を担当。EUVSTの分光器コンポーネントは、国際協力により米国・欧州諸国から提供。

主な観測性能

計測温度範囲:

分光 - 2万~1500万度の全温度層を隙間なくカバー
(波長: 17-21.5, 46-122nm)

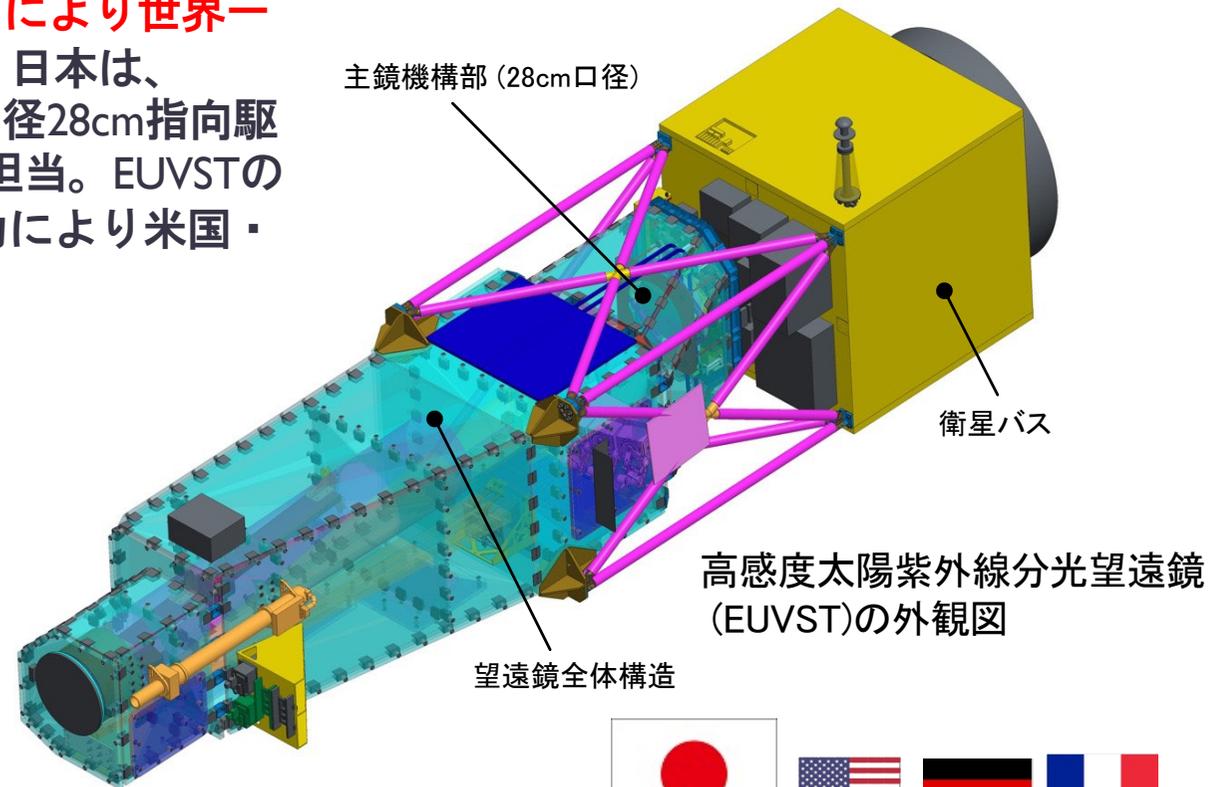
画像 - 6000-1万度
(波長: 280-285nm)

空間分解能: 0.4''

時間分解能: 0.5s (最短)

ドップラー速度精度: 2 km/s

観測視野: 300''x280''

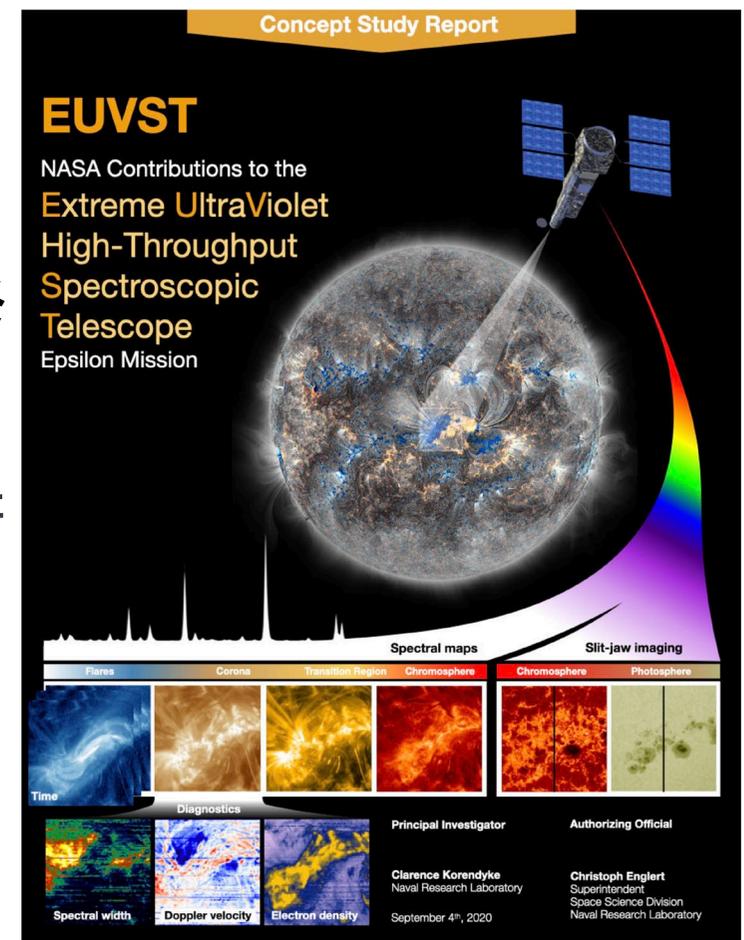


EUVSTフライト品
開発参加国



JAXA主導の国際ミッション

- EUVSTは、日本のみならず世界の研究者が切望し、2020年代に最優先で実現すべき観測装置とNGSPM-SOT提言(後ほど)がNASA/ESA/JAXAに出され、JAXAが先導するSolar-Cという形で調整が進む。
- NASA： Heliophysics分野のMoO公募の第一段階ダウンセクションで「Solar-Cへの米国貢献」提案を採択(3件のうち1件)し、概念検討作業(2019.10-2020.9)の結果、2020年12月に最終選定したことを公表、Phase B検討を開始。
- 欧州： ドイツ、フランス、イタリア、スイスの宇宙機関は、ISASにH/W開発に関する参加表明書簡を発出(2020.7-10)し、開発に着手。英国は、設計活動に参加しESAと協力してfunding確保で調整中(現在)。ESAは、英国不首尾の場合の代替案も含め、ESAによる貢献(ひのどと同様な地上局支援等)の実現に向けた公募発出調整を本格化させている。



日本(JAXA)におけるミッション立上げ状況

2018.07	「平成29年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト提案」において、宇宙科学研究所 宇宙理学委員会・宇宙工学委員会による科学審査結果、HiZ-GUNDAMと共に選定され、アイデア実現加速プロセス (Pre-Phase A1b)に進む。
2018.12	国際科学審査の実施、国際的にミッション意義など高く評価。
2019.03	「プリプロジェクト候補選定審査」と受審し、「ミッション定義段階」(Pre-Phase A2) への移行が可能と判断され、移行。
2020.1	日本学術会議マスタープラン2020 学術大型研究計画No.89として掲載
2019.12- 2020.02	「Solar-C_EUVSTコスト評価小委員会」(第3者評価)によるコスト評価 「公募型小型4号機 プリプロジェクト候補ダウンセレクション前審査」を受審。検討達成状況の確認が行われ、現時点におけるダウンセレクション候補として妥当であると結論される。
2020.04	ISASは、Solar-C(EUVST)を公募型小型4号機としてミッション選定。
2020.05	政府宇宙科学・探査小委員会に報告され、宇宙基本計画工程表に掲載。
2021 現在	事項化を目指し、JAXAからFY2022概算要求中。 MDR/プリプロ化 (年内, 調整中)

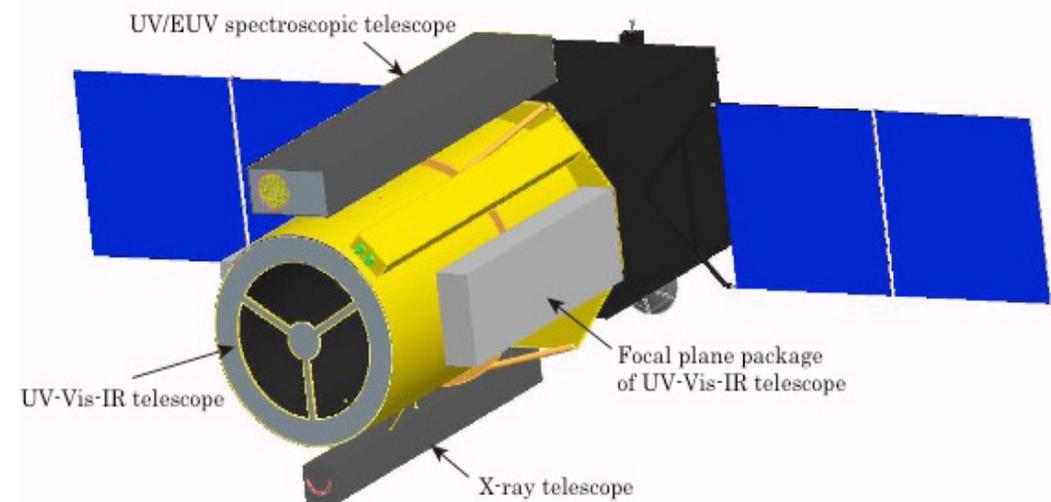
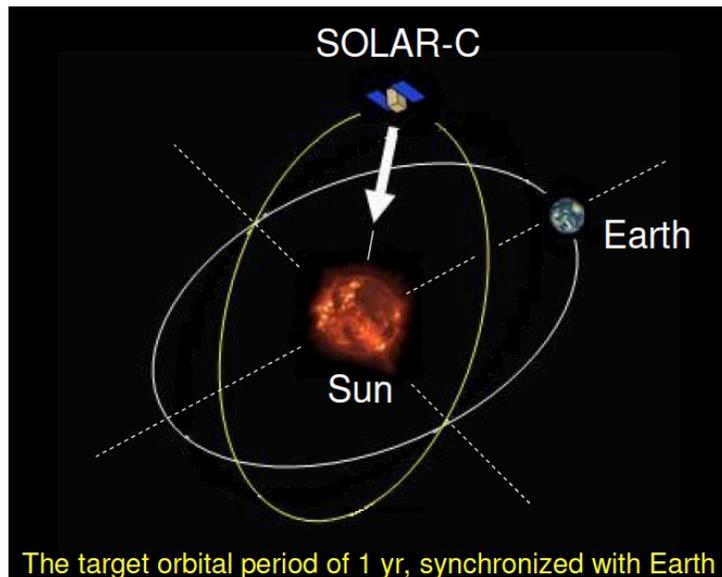
2018年(コンセプト提案採択)から 12年遡る

SOLAR-B(ひので)と太陽将来計画WG

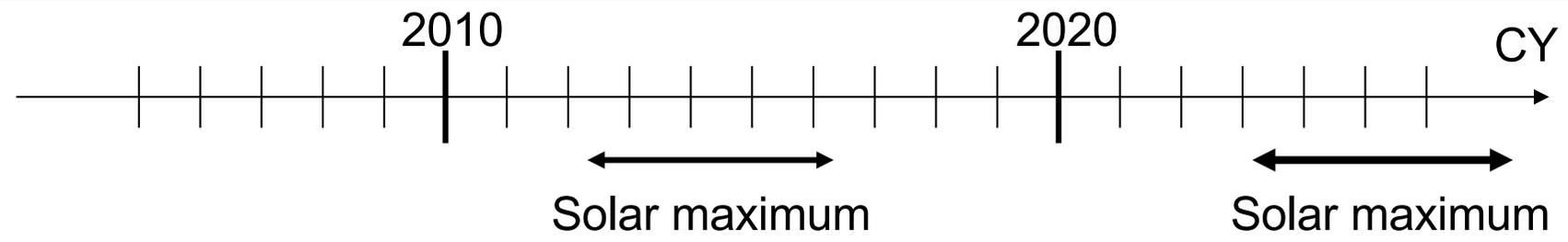
- SOLAR-B 打上げ前から、サイエンス将来計画の議論が始まる
 - 2006.3頃から太陽将来計画WG (コミュニティレベル) による活発な検討活動
 - SOLAR-Bの次に目指すサイエンスは何か？
 - 各機関・グループの将来計画は何か？ (NAOJ, 京大天文台, 名大STE研、情報通信研、数値研究)
 - 2006.6 第1回太陽将来計画WSを開催し、その後2007.10 第3回太陽将来計画WSまで
 - 太陽分野全体にわたる話題 (地上、宇宙、野辺山ヘリオグ将来、数値理論、太陽以外との連携)を継続的に議論
- 「ひので」 (SOLAR-B)は、2006年9月23日に打上げられた
 - 0.2”の光球面磁場や撮像動画などから、サイエンス推進
- 次期太陽スペースミッションSOLAR-C検討会
 - 2007/7から、極域観測ミッション、太陽同期軌道ミッション(ひので-II)についてサイエンス目標の具体化、技術的観点も考慮した観測装置などを検討
- 2007.12 ISAS宇宙理学委員会にSOLAR-Cワーキンググループの設立提案
 - 国際協力対応型WGとして設立
 - 主査: 常田佐久、主査補佐: 坂尾太郎、清水敏文、渡邊鉄哉

2 案並行検討の時代

- プランA: 未踏の太陽極域探査
 - 黄道面(目標60度)を離れ未踏の太陽極域の太陽内部診断と太陽ダイナモ機構の解明
- プランB: 高分解能観測の追求: 撮像から分光へ・可視光から紫外線へ
 - 大型望遠鏡で、ひので望遠鏡の分光能力の大幅向上により、彩層を中心とした光球-コロナシステムの観測と彩層コロナ加熱機構の解明
- 2015年2月打上げ要求、H-IIAによる打上げ [戦略的中型]



2008年頃: 世界の計画とSOLAR-C



Hinode

SOLAR-C

Plan B 2015 Feb. 2026-27

Plan A 2015 Feb. Orbit trans

ATST (NSF)

2014 2021

SDO (NASA)

2008 Dec 08.

Solar Orbiter (ESA&NASA)

2015 May

2019

▲ 2018 summer reach obs-deck ▲ 2021 summer Helio-lat. 15 degree ▲ 2022-23 Helio-lat. 35degree

- Note1 : Plan A orbit trans. period not accurate, being studied.
- Note2 : NASA decadal plan beyond SDO not available.
- Note3 : ESA SOLAR ORBITER reach 0.22AU on summer of 2018.

コミュニティにおける国際協力の立ち上げ

Space Science & solar system exploration meeting between NASA and JAXA @ISAS/JAXA
Solar Physics session: Hinode, Solar-C, discussions

2007/12/17-18

Solar-C Science Definition Meeting (I) @ISAS/JAXA

- Distinguished scientists 19 from US, 11 from Europe
- Significant scientific attractiveness.

2008/1/18-21

2008/1/30-2/1

Hinode/Solar-C/Solar Orbiter meeting @Max-Planck太陽圏研究所
• 協力可能性、意見交換 [WG]



→ **4 international sub-WGs** in SOLAR-C WG established to identify top-level solar physics & instrumentation in the next decade. 23 sub-WG members from U.S., 11 from Europe, 24 from Japan.

国際協力の枠組み構築の模索 (2009-)

Solar-C meeting JAXA/ISAS-NASA
@NASA HQ

- 会議後 joint statement を NASA が作成。SOLAR-C への NASA 参加可能性に関して初期議論を開始したという趣旨。可能性を探る動きがあるという外部へのメッセージ。

2009/10

Solar-C Science Definition Meeting (3)
@Palermo, Italy

コミュニティへの計画や状況説明

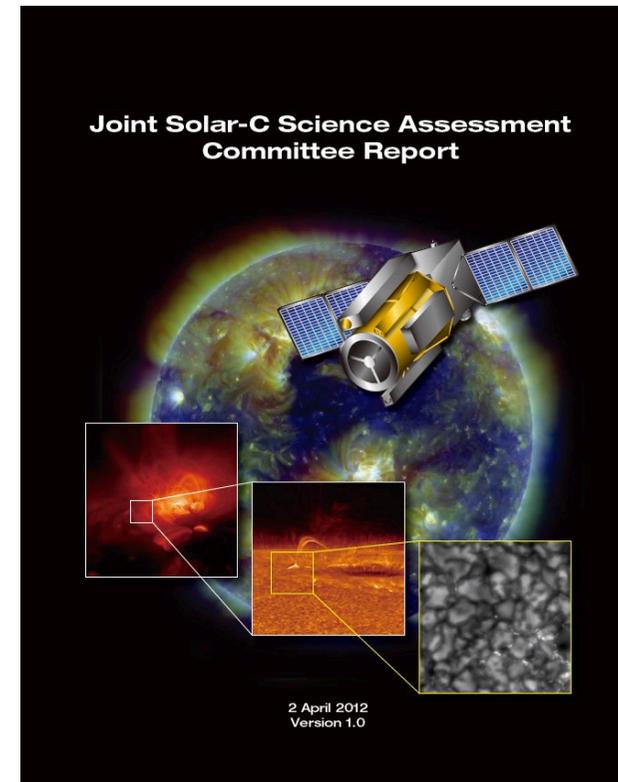
2010/10

2010/3

2010/3 Solar-C Science Definition Meeting (2)
@ISAS/JAXA

- NASA-JAXA Joint Solar-C Science Assessment Committee (JSSAC) 設立
- 主目的: 科学目標の文書化、JAXA/NASA 優先度と如何に協調するかの評価、Decadal Survey 結果に NASA 対応加速

JSSAC 活動 2010/10-2011/2
報告書を NASA に提出



日本としてプランBを選定 (2011/3)

- Sub-WG活動 (2-5が国際sub-WG)
 1. Plan A: Engineering Investigation of Plan-A spacecraft
 2. Plan A: Helioseismology & Solar Dynamo
 3. Plan B: Measurement of chromospheric magnetic fields
 4. Plan B: UV/EUV High-Throughput Spectroscopy
 5. Plan B: Next Generation X-ray Telescope
- Sub-WG活動に基づいた検討結果をまとめた Interim Reportを公表して、日本としてPlan Bに SOLAR-Cを絞ることを表明

Interim Report on the SOLAR-C Mission Concept



SOLAR-C Working Group

US HELIOPHYSICS DECADAL SURVEY (2013~ 10 YEARS)



- 2010/7 Decadal study-Request for Information (RFI) from community
 - SOLAR-CのWhite Papers提出 (米国コミュニティ代表: 主著者)
- 2012/8 National Research CouncilがHeliophysics Decadal Surveyを公表

The Solar-C mission is an example of a future opportunity for the United States to provide instrumentation to a major foreign mission and in so doing to obtain high science return for relatively low cost.

2012/4 NASA/HQ

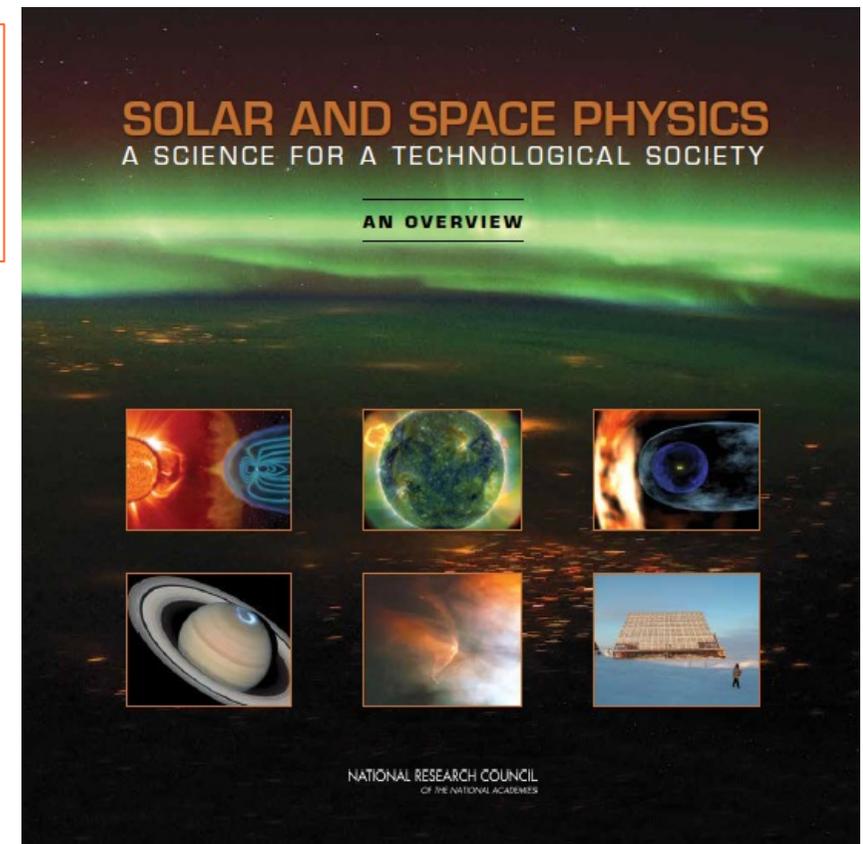
1. Solar atmosphere/origins of space weathersが最優先decadalサイエンスなら、SOLAR-CがUSがこの目的を達成することを可能とするかを調整が可能になるはずだったが...

Strategic partnership > 200M\$ collaboration

2. 公募プロセス Explorers, Missions of Opportunity

2012/11 NASA a WG chairからMoO等促進のためにNASAへレター発出

2021年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム



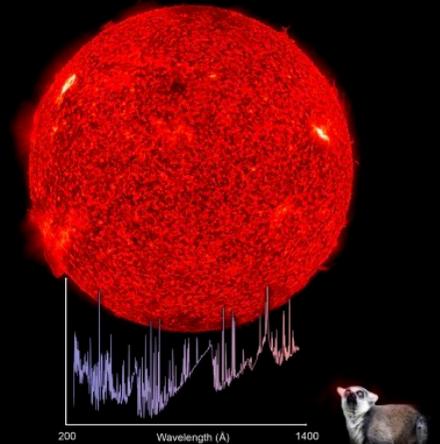
ESAへの多様なアプローチ

- 欧州の枠組み: 観測装置は各国宇宙機関、衛星などはESA
- 2010 Cosmic Vision M2 (2022打上げの機会)公募
 - 海外主導のミッションへの参加
 - 観測装置“LEMUR”の提案 by 欧州研究者中心 with UV/EUV High-Throughput Spectroscopy sub-WG (chair: Shimizu) in SOLAR-C WG
- 2014 Cosmic Vision M4 公募機会
 - EPIC (European Participation in Solar-C)提案。SPICAもあることもあり、2015/6に不採択
- LL) 公募の仕組みの中で、3つの宇宙機関の歩調を合わせるのは、各100億円以上では、ほぼ不可能。
- 2015年 ISAS戦略型中型公募選考では最優先で宇宙理学委員会から推薦されたが、欧州の国際協力不首尾からWGでの再検討に差し戻し

2021年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム

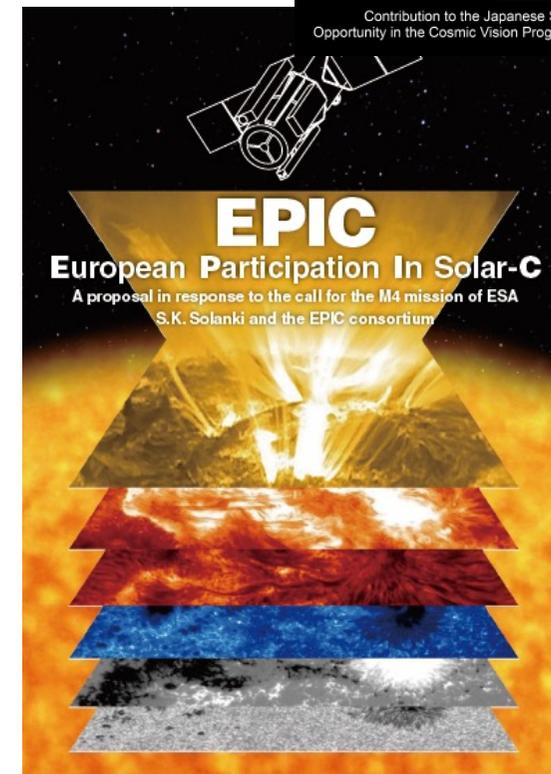
ref. 052
LEMUR: Large European Module
for Solar Ultraviolet Research

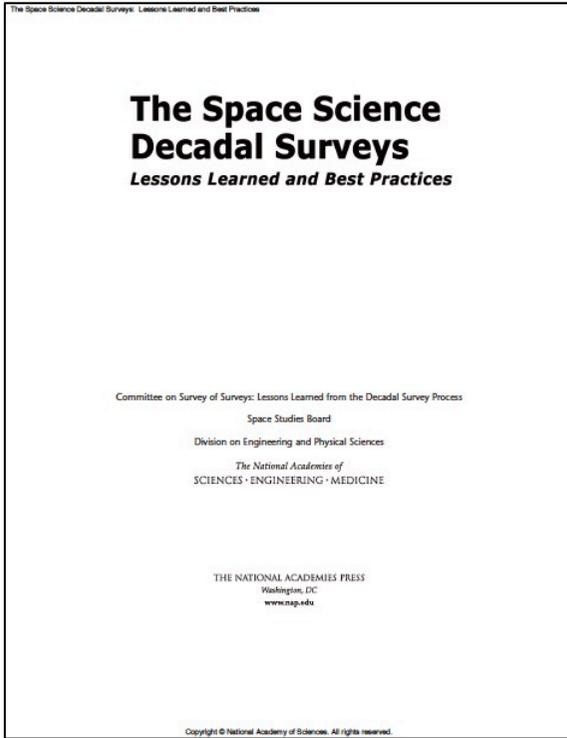
European contribution to JAXA's
Solar-C mission



Coordinator Luca Teriaca

Contribution to the Japanese Solar-C mission as a Mission of Opportunity in the Cosmic Vision Programme of the European Space Agency.





U.S. DECADAL SURVEYS LESSONS LEARNED



(2015発行の報告書)

A specific example in the field of heliophysics illustrates the difficulty and complexity of putting together an international mission in connection with a decadal survey. The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) was in the process of selecting their next solar mission during the early and middle phase of the solar and space physics (heliophysics) decadal survey. JAXA ultimately selected a high-resolution telescope to observe small-scale features on the Sun. The Solar-C mission crucially required a \$100 million to \$200 million contribution for a U.S. instrument, but at that point the decadal survey committee was unwilling to commit. Science considerations aside, this was partly because of uncertainty with the cost and technical evaluation (CATE) process for a relatively small U.S. contribution to an international mission, partly because of the timing relative to the establishment of priorities by the panels, and partly because of funding constraints early in the decade. The decadal survey ultimately endorsed the mission as a possible competitor in the Explorer/Mission of Opportunity program. Because the U.S. contribution was an essential component of their next major mission, the uncertainty engendered by the survey's endorsement of a competition was not well received by JAXA. Solar-C is currently waiting for a new start.

困った、コミュニティとして、新たな戦略へ

- 戦略的中型SOLAR-C: 次の機会での捲土再来
 - 3つの望遠鏡(X線/EUV/可視)を搭載したままでの尖鋭化
- コミュニティとしては、より機会の多い小型衛星等による部分的な計画実施の可能性も考慮したい

コミュニティ(太陽研連)の議論で優先度付け

- 2015/12/15 若手将来計画WS@名大

SOLAR-Cと小型ミッション： 実行性のあるプランへ

- 太陽コミュニティ – SOLAR-C 基幹
- SOLAR-C 戦略中型実現
 - 競争激し、時間がかかる可能性
 - 2020~2025年ころに次ミッション実現の有無：大きな違い
 - 待つか？
 - それとも、部分的に小型で実現ところから？
(SUVIT/SP気球 検証目的) DKIST
EUVSTの小型衛星化探る？
(SOLAR-Cの切り売り → UV偏光分光化)
 - それとも、別アイデアで食いつなぐ？

清水からの
コメントスライド

- 2016/2 ~ 2017/7 4回の太陽研連シンポ等で、複数の案についての検討や議論を進め、“NGSPM-SOT報告”も考慮の上、コミュニティとして案の絞り込みを行い最終的に公募型小型Solar-C_EUVST案に優先度を設定。

NEXT GENERATION SOLAR PHYSICS MISSION – SCIENCE OBJECTIVES TEAM (NGSPM-SOT)



- A study team was formed as a means of **improving international coordination in solar physics**, and developing a multilateral solar physics mission concept for **the next decade**.
 - Motivated by the Solar-C situation happened in 2015.
- This advisory team (14 selected scientists, chair: Shimizu) was chartered by NASA, ISAS/JAXA, and ESA in June 2016.
- Developed and documented **scientific objectives and priorities** for an NGSPM concept
 - within the resources and framework by the agencies.
 - with community inputs, via white papers
- The NGSPM-SOT final report was delivered to the agencies in July 2017.

<http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/SOLAR-C/>

[Documents/NGSPM_report_170731.pdf](#)

次世代太陽ミッション(NGSPM)提言 (2017)

- Next Generation Solar Physics Mission (NGSPM) – Science Objectives Team (日米欧から選抜された研究者14名の検討チーム) が、2020年代の優先すべき太陽研究課題・観測装置・実施方法を検討し、提言をJAXA/NASA/ESAに2017年に答申。

科学課題の優先付 NGSPM提言: 優先度の高い雛形の観測装置

- ① 0.3" coronal/TR spectrograph (T-9)
外部大気に渡る隙間ない温度プラズマ診断
- ② 0.2"-0.6" coronal imager (T-7)
超高解像度のコロナ撮像
- ③ 0.1" – 0.3" chromospheric imager and magnetograph (T-4)
0.1" photospheric magnetograph (T-1)
0.1" chromospheric spectrograph (T-5)
彩層の磁場・速度場

① 2020年中盤以降にJAXA戦略的中型ミッションとして実現させる

② 2020年中盤に小型・中型ミッションのconstellation (群れ)で実現させる

公募型小型として Solar-C (EUVST)

NASA MiDEX ミッション等に期待

偏光分光観測の実証:
CLASPI/2 (UV), 大気球 Sunrise-3(1m)
地上大型望遠鏡 DKIST(4m)との協働
→ 1m級宇宙望遠鏡は2030年代への検討事項

160000 km

NGSPM提言の後

- 日本及び米国での競争機会に、NGSPM-SOT提言に沿った提案がなされる (Constellation)。
 - JAXA Solar-C WG: 公募型小型Solar-C (EUVST)
 - NASA公募機会: MUSE (SMEX, MiDdX) など
- 宇宙機関の反応、例えば NASA/HQ
 - 競争機会の結果動向を注視しつつ、一方で、NGSPM-SOT提言の実現、特に、1m径望遠鏡の実現手段方法、を考察



Triennial Earth-Sun Summit (20-24 May 2018, Leesberg, VA)でのNASA/HQ発表表紙

Dear Shimizu-san, Chair of NGSPM-SOT,

We wish to thank you very much for delivering the Report produced by the *Science Objectives Team (SOT)* for a *Next Generation Solar Physics Mission (NGSPM)*.

We acknowledge that the Report fully accomplishes the tasks indicated in the SOT Charter.

We express our compliments for the tremendous effort produced by the SOT to involve, through different consultation mechanisms, the widest possible international heliophysics scientific community, in order to gather a comprehensive view on the subjects to be considered for a NGSPM.

We recognise that the SOT, also based on the community consultation, has done a very detailed and thorough analysis of the scientific objectives for future solar physics missions and has provided clear scientific priorities for a NGSPM.

We warmly thank the SOT for providing indications on possible instrument configurations and mission scenarios of different sizes, capable to accomplish, at different levels of complexity, the prioritised scientific objectives, taking into account various possible international cooperation schemes among NASA, JAXA and ESA.

We take note of the recommendations produced by the SOT that will be carefully considered.

We kindly ask you to transmit to the whole Science Objectives Team our congratulations for the complete fulfilment of the assigned mandate and sincere appreciation for the excellent work performed.

With our best regards,

Margaret Luce, NASA Heliophysics Division, Acting Director
 Luigi Colangeli, ESA Science Directorate, Head of the Science Coordination Office
 Masaki Fujimoto, JAXA/ISAS Solar System Sciences

October 2nd, 2017

最後に

- SOLAR-Cは、国際協力対応型WGとして、活動を始めた。
- NASA及びESAとは、ISAS/JAXAを通じて、実現の方策を探った。
- 国際コミュニティの研究者による献身的な立上げ支援 (検討や各国調整) は、ボトムアップの宇宙科学では重要
- 100-200 M\$の国際協力の実現は、対1宇宙機関でも極めて難しい。
- 戦略的中型SOLAR-Cは、コミュニティでの議論や合意もとれ、尖鋭化した公募型小型Solar-C(EUVST)で一部のサイエンスの早期実現の道を歩むことができた。
 - 国際協力規模: NASA 55M\$, 欧州National Agency 5カ国、ESA
- 一方、1m口径クラスの望遠鏡実現は、(heliophysics分野では)、NASAでさえも頭を悩ます課題。
 - JAXA主導で国際協力を実現するには、新たな枠組みが必須 (機関主導)。
 - 2020年代は、4m地上望遠鏡DKIST, 大気球実験Sunrise-3 でカバー