

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02174

研究課題名(和文) 新型光検出器で築く次世代南極ニュートリノ望遠鏡による深宇宙高エネルギー現象の解明

研究課題名(英文) Development of the new optical sensors for exploration of deep Universe with the next generation neutrino telescopes

研究代表者

石原 安野 (Ishihara, Aya)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：40568929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,040,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノによる宇宙観測は、ガンマ線や宇宙線では難しい深宇宙・高エネルギー現象の直接観測と、可視光やガンマ線といった電磁波望遠鏡とのマルチメッセンジャー観測の両方を可能とした。2011年に完成したIceCubeニュートリノ望遠鏡は、2012年の1PeVを超えるエネルギーを持つ宇宙ニュートリノの初検出から、より詳細な宇宙ニュートリノ流量の測定へと進んでいるが、観測統計量の少なさがその感度を大きく制限している。この状況を打破するため、本研究では高エネルギーニュートリノ検出効率を格段に強化させる新型チェレンコフ光検出器モジュールの開発・製作、及び次世代実験を視野に入れた物理解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノは通常の望遠鏡では観測が難しい高エネルギー宇宙の情報をもたらす。しかし、その検出は難しいという困難もある。その困難な観測の精度向上を、検出器と解析手法の両面から行い、将来のニュートリノ望遠鏡への道筋をつけることに成功した。天体のマルチメッセンジャー観測は今後の発展が期待される新しい重要な分野へと成長しつつある。また、地上加速器では不可能な高エネルギー現象を解明するために宇宙からくる素粒子ニュートリノを使うという新たな可能性をも示すものであり宇宙天体観測に変革をもたらした。

研究成果の概要(英文)：Cosmic neutrinos bring us with more direct information from the high energy Universe. Furthermore, it allowed us to realize the multi-messenger observation with conventional telescopes using e.g., visible light and gamma rays. The IceCube detector measured distributions of the high energy cosmic neutrino fluxes for the first time. However, the low statistics of the high-energy neutrinos limit its capability. To overcome the situation, we have developed a new optical sensor module that can significantly enhance the efficiency of high-energy neutrino detection. We also have performed several searches for extremely-high energy cosmic neutrinos. These analyses have placed the world's best limit on neutrino flux at energies above 10 PeV placing important constraints on ultra-high energy cosmic ray origins. Moreover, observations of a flaring blazar in coincidence with IceCube real-time alert made the neutrino and multimessenger astronomy a reality.

研究分野：ニュートリノ天文学

キーワード：ニュートリノ 超高エネルギー宇宙線 マルチメッセンジャー ニュートリノ検出器

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

2011年に南極点において世界初となる一立方キロメートル容量を持ち高エネルギー宇宙ニュートリノ観測を可能とする IceCube ニュートリノ望遠鏡が完成した。この IceCube 実験ではニュートリノが地球を通過中、原子核と相互作用を起こした際に生成する荷電粒子が氷中出すチェレンコフ光を1立方キロメートルのにわたり検出する。つまり光を検出することによるニュートリノの観測を行う。IceCube 検出器は南極点直下の氷河中、1500m から 2500m の深さに埋められた 5160 個の光検出器の配列及びそれをコントロールし電源供給、データの取得やフィルターを行うコントロールセンター ICL (IceCube Lab) から成る。2005年に建設を開始し、研究計画責任者の石原は 2005 年の建設開始当初から IceCube 実験に参加している。

建設機の完成直後の 2012 年に石原が初の宇宙ニュートリノ候補の同定に成功した。この観測を皮切りに、その後様々な観測チャンネルの開発をし、高エネルギー宇宙ニュートリノ信号数を増やしていった。当初は、それでも年間約 30 事象程度の宇宙ニュートリノの観測となっており統計量が十分でないことが感度を制限していた。一方、これらの初期観測結果から、世界で初めて宇宙の中でどの程度の放射が高エネルギー宇宙ニュートリノとして分布しているのを見積もることが可能となったことは世界の天文学において大きなブレイクスルーとなった。その宇宙ニュートリノ放射量は、IceCube ニュートリノ望遠鏡のデザイン時にベンチマーク流量として採用されてきた Waxman-Bahcall 制限にはかからないものの、この上限値に近い値を持っていた。これは人類が観測可能な範囲で最も高いエネルギー領域の放射である超高エネルギー宇宙線放射分布に近いエネルギー密度の値である。ここから超高エネルギー宇宙線源天体と高エネルギーニュートリノ発生天体とが、何らかの関係を持っているだろうということ、特に宇宙線源天体が宇宙ニュートリノを効率的に生成している可能性が高いこと、が示唆された。つまり、超高エネルギー宇宙をニュートリノで観測するということの重要性が示されたのである。

## 2. 研究の目的

ニュートリノによる宇宙観測は、ガンマ線や宇宙線では難しい深宇宙・高エネルギー現象の直接観測を可能とし、また、可視光やガンマ線といった電磁波望遠鏡とのマルチメッセンジャー観測を可能とする。2011年から全稼働を始めた IceCube ニュートリノ望遠鏡は 1PeV を超えるエネルギーを持つ宇宙ニュートリノの初検出から、より詳細な宇宙ニュートリノ流量及びそのフレーバー分布等の測定へと進んでいるが、観測統計量の少なさがその感度を大きく制限している。

本研究では IceCube 検出器による世界最高感度での高エネルギーニュートリノ観測を進め、高エネルギー粒子放射天体の描像を明らかにすることを目的とする。このために IceCube 実験のデータを引き続き使用しながら次世代検出器でより効率的に観測を進めるための解析手段を開発し、これまで観測されてこなかったニュートリノを用いた高エネルギー宇宙の探査を行う。統計量が限られた中で少しでも多くの観測を行うことで、より多くの知見から効率的に次世代検出器の方向性を定めることも可能となる。

さらに、もう一つの目的として、そこから得られた知見を基に、南極点アムンゼンスコット基地 IceCube 国際共同実験サイトに建設する高エネルギー拡張型次世代ニュートリノ検出器 IceCube-Gen2 の R&D 研究を行うことを設定する。現在の一立方キロメートルから 10 立方キロメートルスケールの次世代検出器へと拡大するためには現在の光検出器をそのまま 10 倍の数にして埋設することは現実的ではない。現在最もコストのかかる掘削費用を抑えコスト削減を図るために第一に感度をし、必要台数の削減を図る。次に穴に収まり易い細長い形の光検出器モジュールを開発し一台当たりの埋設コスト削減を行う。その限られた細長い形状の中に入りうる最大の光電子増倍管を封入し UV 透過性能を高めつつ光を光電子増倍管カソード面に集めることが本計画の挑戦である。

## 3. 研究の方法

高エネルギーニュートリノ検出効率を強化させる新型チェレンコフ光検出器モジュールを開発する。また、IceCube による世界最高感度での高エネルギーニュートリノ観測を主導してきた経験に基づき、次世代実験を視野に入れた物理解析を行う。

IceCube 日本グループは IceCube 向けの光検出器モジュールの詳細な較正経験を持つ。この強みを生かし、IceCube 実験モジュールのチェレンコフ光検出能力を超える新型光検出器 D-Egg の開発を行う。D-Egg は、8 インチの高量子効率(High QE)光電子増倍管(PMT)二つを上下に高い紫外線透過率を持つ楕円球上の耐圧ガラスの中に設置し、円盤状の読み出し基板、リング状の較正用 LED 光源配列、及びカメラ配列などから構成される。10 インチの下向き PMT 一つを IceCube の光検出器が含むのに対し、D-EGG では上向き PMT を加えた二つの PMT を、一つのモジュール内に収めることである感度当たりの価格を抑えつつ、上方からの光の検出効率を格段に高め、感度を全方位に拡張し、ニュートリノ事象検出能力を大幅に向上させることが可能である。また、現行機よりも小さい横半径を達成することで南極点での埋設費用を抑制する。本研究では D-Egg のデザインを完成させ IceCube-Gen2 Phase1 における光検出器への採用を目指した。さらに、詳細な検出器性能の確認や特性の理解、シミュレーション研究を行う。

IceCube 実験を用いた解析手法の向上においては、世界初の PeV 宇宙ニュートリノの発見、超高エネルギーニュートリノ解析や研究代表者が務める大気宇宙ニュートリノ物理ワーキンググループリーダーとしての経験を通し、次のような IceCube データ解析を行いその手法を IceCube-Gen2 のデザインの効率化のインプットとする。

主として

- マルチメッセンジャーによるトランジエントな宇宙ニュートリノ起源天体の同定
- 10PeV を超える超高エネルギーニュートリノの検出やより精度の高い宇宙ニュートリノ流量測定による最高エネルギー宇宙線起源・組成の解明
- 新たなニュートリノフレーバー測定解析手法の開発と宇宙ニュートリノフレーバー比からの生成機構の推定

といった研究を行う。

## 4. 研究成果

### (1) IceCube-Gen2 の R&D 研究：D-Egg 次世代型南極点光検出器の開発

D-Egg 次世代型南極点光検出器の開発に成功し IceCube-Gen2 Phase1 における光検出器への採用が確定した。以下に本研究から得られたこのテーマにおける特に大きな成果を説明する。

代表論文：

"Development of the front-end electronics for the new optical module "D-Egg" for IceCube-Gen2", R. Nagai, JPS Conf. Proc. 27, 011012 (2019), Proceedings of the 5th International Workshop on New Photon-Detectors.

"D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2", A. Ishihara, J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012166, Proceedings of the 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2019).

#### 1 性能要求値を満たすデザインの完成及び IceCube-Gen2 Phase-1 計画への正式採用

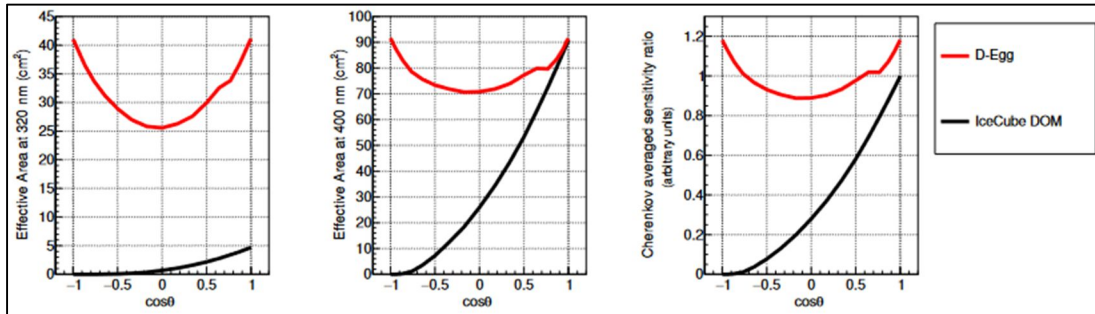
右の写真が完成した D-Egg の外観、その隣の図は D-Egg 内部の部品配置を表したものである。南極点において 10 年以上にわたる安定動作が要求される D-Egg では、満たさなくてはならない多くの重要な要求条件がある。次の項目で説明する光子検出感度性能も重要な指標の一つであるが、それ以外にも、各検出器の消費電力が 4W 程度であること、各 PMT が 1000Hz 以下のダークノイズを持つこと、70MPa の耐圧性能、+20 から -40 への急激な温度変化に耐えること、-40 の環境下での安定動作、また +20 から -40 の間の温度での確実な電源入り切り作動、非舗装道路輸送に耐え得る振動耐性能力や人的ミスにおける落下に耐え得る落下耐性、そして、モジュール内部に氷河較正のための光源や様々な較正装置を持つことなど、多岐にわたる。5 回にわたる共同研究者からなる委員会によって 2018 年から 2020 にかけて各性能評価を行った。そのうえで正式に IceCube-Gen2 Phase-1 計画での採用が認められた。



#### 2 先行機の 2.8 倍の高感度の達成

D-Egg の感度の研究開始当初の到達目標はこれまでに南極に埋設し稼働中の IceCube DOM と呼ばれる現行光検出器モジュールの 2 倍であった。ベースラインとなる保守的なデザインからさらに細かい性能向上や部品の精査を行うことで本研究により開発製造された D-Egg はチェレンコフ光に対する感度が現行 IceCube-DOM の 2.8 倍に向上したことが確認した。図 1 は波長に対する感度に相当する実行感度面積を表している。下のテーブルの数値は全角度で積分をした時の実行感度面積及びその比較を表している。

**図 1** D-Egg(赤線)とDOM(黒線)でそれぞれの有効感度面積を表す。それぞれ左から320nm、400nm波長での実行感度面積の値、右がチェレンコフ光スペクトルにおける比較を表す。



これらの感度向上の主な要因は、PMT そのものの感度向上に加え、ガラスや光結合シリコンの紫外線透過特性の向上、ガラスの形状の工夫による PMT の側面から入射する光に対する感度の向上などである。特に短波長領域ではガラスやシリコンの透過性が大きな役割を果たしている。Cos( )=0 付近での減少が穏やかになっている部分については、ガラスの形状の工夫とシリコンによる大面積光学結合が効果を発揮している。実験室内の測定及び GEANT4 による詳細な応答シミュレーションにより確認した。

**テーブル 1** 全方向からの感度の比較(図 1 で得られた感度の角度依存性分布を積分)。

Name	Effective area (320 nm) [cm <sup>2</sup> ]	Effective area (400 nm) [cm <sup>2</sup> ]	Cherenkov-averaged sensitivity [Ratio to IceCube DOM]
IceCube DOM	1.3	32	1
D-Egg	31	77	2.8

\* An efficiency due to the threshold of 0.25 PE is included in the detection efficiency of PMTs.

### 3 南極点へ埋設される D-Egg 12 台の製造

計画では 10 台の製造を計画していたが、製造手法の工夫により厳しい審査を経た光検出器 D-Egg12 台の製造に成功した。これらを用いて実験室内における詳細な性能試験及びその較正を行った。

### 4 検出への較正装置の導入と検出器自体の詳細な較正

南極点への輸送に耐え、氷河中の正常動作を確かめるために製造した D-Egg に対しても多く耐性試験を行い、要求値を満たすことが確かめられた。全数検査のための試験装置の開発をした。

(2) 10PeV を超える超高エネルギーニュートリノの検出やより精度の高い宇宙ニュートリノ流量測定による最高エネルギー宇宙線起源・組成の解明

代表論文:

“ Constraints on Ultra-High-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos Above 10 PeV with IceCube ”, Physical Review Letters 117, 241101 (2016).

“ Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data ”, Physical Review, D98, 062003 (2018).

超高エネルギー宇宙線(UHECR)陽子は、銀河間空間を伝播する間に宇宙背景輻射(CMB) と衝突してニュートリノを必ず生成する。Cosmogenic ニュートリノと呼ばれるこの超高エネルギーニュートリノは、EeV(=1000 PeV) 領域に分布し、その量は UHECR 放射源天体の宇宙論的進化度(遠方宇宙での輝度) が高い天体ほど増える。UHECR 起源天体として有力視されてきた FSRQ(クエーサー) や FR-II 電波銀河などの巨大高輝度天体は進化度が極めて高いため、Cosmogenic ニュートリノの量は多い。IceCube 実験での探査はそれぞれ当時最大統計量のデータを用いて世界最高感度での流量の上限値をつけた。解析から得られた上限値は、このような強い進化天体を否定している。比較的近傍宇宙でも活動的な天体である可能性、もしくは UHECR 中の陽子の量が少ないという 2 つの可能性があり、いずれもニュートリノからの新しい知見が得られた。

### (3) マルチメッセンジャーによるトランジェントな宇宙ニュートリノ起源天体の同定

代表論文:

“The IceCube realtime alert system”, *Astroparticle Physics*, 92, 3 0-41 (2017).

“Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A”, *Science* 361, eaat1378 (2018).

電荷を持たず弱相互作用にしか関係しないニュートリノは、遠方宇宙から方角・時間情報を失わずに飛来するメッセンジャーである。また高エネルギー宇宙ニュートリノは陽子の相互作用から生ずる中間子の崩壊で生成されるため、ニュートリノを放射する天体は宇宙線起源天体である。この特色を活かす一つの有力な道は、宇宙ニュートリノ事象を南極点現地で即時解析・同定し、その情報を瞬時に世界の天文観測施設に送信して、フォローアップ観測をしてもらうことで天体同定につなげる手法である。リアルタイム事象同定の重要性を早くから IceCube 共同研究者内で指摘し、IceCube 実験は 2016 年春から即時解析とアラーム送信システムの運用を開始した。我々は上(2)の 10PeV を超える超高エネルギーニュートリノ探査で開発したニュートリノ信号検出手法を応用し超高エネルギーニュートリノチャンネル(EHE stream)を開発・運用することに成功した。また、この EHE チャンネルから、世界初となるニュートリノ発生天体の同定へと導くことに成功した。2017 年 9 月 22 日(日本時間 23 日) EHE Stream で推定 120 TeV のニュートリノ信号が同定され、アラートが即時配信された。

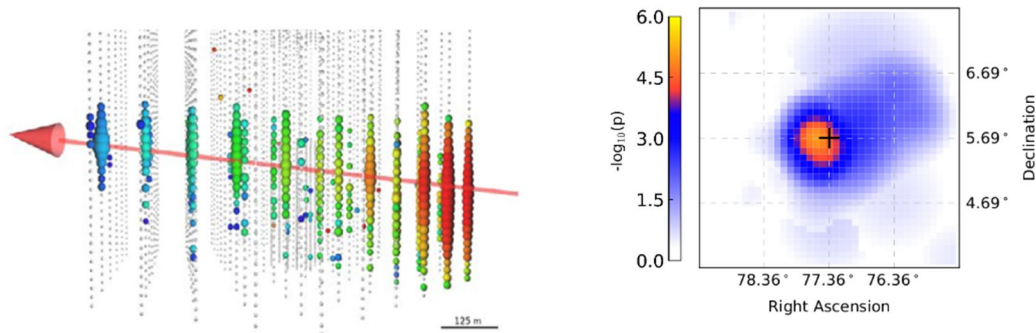


図 2 (左)2017年9月23日(日本時間)に検出されたニュートリノ事象IceCube170922A。水平にIceCube検出容積内を突き抜けるトラック型で、到来方向が分かりやすいなど好条件で検出された。(右)ニュートリノ事象の有意性を表す空間分布。+の印は、ブレイザー天体TXS 0506+056の方向を表す。

この到来方向内に Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡衛星で検出されている BL Lac 天体 TXS 0506+05 が存在し、しかも通常時の 6 倍の輝度でフレアを起こしていることが明らかになった。さらに MAGIC 線望遠鏡が追観測でこの天体から 100 GeV 以上の線放射を検出し、史上初めて、ニュートリノ事象に対応する天体が同定された。この結果は、IceCube 実験による宇宙ニュートリノ信号をトリガーにしたマルチメッセンジャー観測の有効性を証明するもので、こうした観測を積み重ねていくことで宇宙線起源天体とその放射メカニズムを解き明かすことができることを示す重要な結果である。

### (4)新たなニュートリノフレーバー測定解析手法の開発と宇宙ニュートリノフレーバー比からの生成機構の推定

代表論文: IceCube Collaboration: Detection of a Particle Shower at the Glashow Resonance with IceCube, *Nature* 591, 220-224 (2021)

2016 年 12 月 6 日飛来した反電子ニュートリノと呼ばれる粒子が初めに上記(2)で書かれている本研究計画責任者の石原が行った超高エネルギーニュートリノ解析から、次いでその感度向上研究を行った千葉大学の研究員の Lu 氏の解析により検出された。Lu 氏はこの反電子ニュートリノは地が作った粒子のシャワー現象の詳細な解析により、この現象が Glashow 共鳴という反応であった確率が高いことを見出した。また、Glashow 共鳴は反電子ニュートリノによってのみ引き起こされる反応であるため、今回の検出は高エネルギー宇宙ニュートリノの中に反粒子が含まれることを世界で初めて実証する結果となった。ニュートリノと反ニュートリノの僅かな違いを検出するためには特別な精密実験が必要で、宇宙からの稀な信号に含まれるかもしれない反ニュートリノを識別することはこれまで不可能と考えられていたが、Glashow 共鳴事象であることを高い精度で確認した。このことから PeV 領域における反電子宇宙ニュートリノの量の測定が可能となり、そのニュートリノと反ニュートリノの比率を明らかにすることで、宇宙ニュートリノの起源へと迫る手段を得たことになる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 20件 / うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 A. Ishihara, 他 IceCube Collaboration	4. 巻 886
2. 論文標題 Search for Sources of Astrophysical Neutrinos Using Seven Years of IceCube Cascade Events	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 12 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4ae2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Ishihara, 他 IceCube Collaboration	4. 巻 872
2. 論文標題 Detection of the Temporal Variation of the Sun's Cosmic Ray Shadow with the IceCube Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaffd1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Ishihara, 他 IceCube Collaboration	4. 巻 2019
2. 論文標題 Efficient propagation of systematic uncertainties from calibration to analysis with the SnowStorm method in IceCube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/10/048	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Ishihara, 他 IceCube Collaboration	4. 巻 124
2. 論文標題 Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 51103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.051103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase, S. Yoshida, L. Lu, Y. Makino 他 IceCube Collaboration	4. 巻 361
2. 論文標題 Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 147-151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aat2890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Ishihara, S. Yoshida 他 IceCube Collaboration	4. 巻 98
2. 論文標題 Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 62003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.062003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: Aartsen M.G., Ishihara A, et al.	4. 巻 92
2. 論文標題 The IceCube realtime alert system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 30 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2017.05.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: Aartsen M.G., Ishihara A, et al.	4. 巻 551
2. 論文標題 Measurement of the multi-TeV neutrino interaction cross-section with IceCube using Earth absorption	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 596-600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature24459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 LIGO Scientific and Virgo Collaborations, IceCube Collaboraitons and many more collaborations: B.P. Abbott, A. Ishihara et al.	4. 巻 848
2. 論文標題 Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L12-L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa91c9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 117
2. 論文標題 Constraints on Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos above 10 PeV with IceCube	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 241101-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.241101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 833
2. 論文標題 Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 3-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/833/1/3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 93
2. 論文標題 High-energy neutrino follow-up search of gravitational wave event GW150914 with ANTARES and IceCube	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 122010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.122010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する



1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 125
2. 論文標題 Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 121104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.121104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Measurements of the time-dependent cosmic-ray Sun shadow with seven years of IceCube data: Comparison with the Solar cycle and magnetic field models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 4200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.042005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara L. Lu et al.	4. 巻 591
2. 論文標題 Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 220 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03256-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 835
2. 論文標題 THE CONTRIBUTION OF FERMI-2LAC BLAZARS TO DIFFUSE TEV-PEV NEUTRINO FLUX	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 45 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/835/1/45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P03012 ~ P03012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/12/03/P03012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 361
2. 論文標題 Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 147-151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aat1378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 99
2. 論文標題 Measurements using the inelasticity distribution of multi-TeV neutrino interactions in IceCube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.032004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 IceCube Collaboration: M. G. Aartsen, A. Ishihara et al.	4. 巻 872
2. 論文標題 Detection of the Temporal Variation of the Sun's Cosmic Ray Shadow with the IceCube Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaffd1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Constratins on UHECR sources with 9 years of the IceCube EHE data
3. 学会等名 VLVnT - 2018 Very Large Volume Neutrino Telescopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Nagai
2. 発表標題 Development of the front-end electronics for the new optical module "D-Egg" for IceCube-Gen2
3. 学会等名 5th International Workshop on New Photon-Detectors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Recent results on astrophysics and particle physics from IceCube
3. 学会等名 XLVIII International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 アイスキューブ・ジェンツ (IceCube-Gen2)で視る宇宙ニュートリノ
3. 学会等名 "2019年 春季物理学会 シンポジウム 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」" (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Recent progresses on the multi-messenger astronomy with neutrinos and cosmogenic neutrino searches
3. 学会等名 The 7th PACIFIC conference (PACIFIC 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 The recent progress on the observation of ultra-high energy universe with neutrinos
3. 学会等名 The second KIAA international Workshop on Astroparticle Physics, "KIAA-WAP II: Cosmic rays in a new era" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Aya Ishihara for the IceCube-Gen2 collaboration
2. 発表標題 Overview and performance of the D-Egg sensor for IceCube-Gen2
3. 学会等名 the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeru Yoshida and Aya Ishihara for the IceCube collaboration
2. 発表標題 Differential limit on an EHE neutrino flux component in the presence of astrophysical background from nine years of IceCube data
3. 学会等名 the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 High Energy Neutrino Astronomy: An experimental view
3. 学会等名 International workshop on Astroparticle physics at Yachay (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Constraints on UHECR sources from IceCube
3. 学会等名 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Neutrino and multimessenger astrophysics with IceCube
3. 学会等名 International Symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 高エネルギー宇宙ニュートリノから展開するマルチメッセンジャー天文学
3. 学会等名 2018年天文学会 シンポジウム 「高エネルギー宇宙ニュートリノから展開するマルチメッセンジャー天文学」(兵庫県立大学姫路工学 キャンパス) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2
3. 学会等名 TAUP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 The IceCube Upgrade - Design and Science Goals
3. 学会等名 the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayumi Kiriki
2. 発表標題 Calibration LEDs in the IceCube Upgrade D-Egg Modules
3. 学会等名 the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Recent progresses on the high energy neutrino astrophysics
3. 学会等名 第33回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」(オンライン)(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Neutrino Astrophysics: Experimental
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Photo-sensors for the South Pole Neutrino Observatory: IceCube and IceCube-Gen2
3. 学会等名 the IEEE Nuclear Science Symposium on "Advanced technologies for future large-scale neutrino experiments" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 マルチメッセンジャー観測時代における 高エネルギー宇宙ニュートリノ観測
3. 学会等名 第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター ニュートリノ天文学 研究成果  
<http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/result.html>

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	永井 遼 (Nagai Ryo)  (00801672)	千葉大学・理学研究院・特任助教  (12501)	
研究協力者	吉田 滋 (Yoshida Shigeru)  (00272518)	千葉大学・理学研究院・教授  (12501)	
研究協力者	ヒル コルトン (Hill Colton)	千葉大学・理学研究院・博士研究員  (12501)	
研究協力者	メイア マキシミアン (Meier Maximilian)	千葉大学・理学研究院・博士研究員  (12501)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Wisconsin at Madison	Michigan State University	Penn State University	
ドイツ	DESY	University of Munster		
韓国	Sungkyunkwan University			