

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19340053  
 研究課題名（和文） IceCube ニュートリノ望遠鏡による  
 極高エネルギー宇宙線放射機構の解明  
 研究課題名（英文） Study of radiation mechanisms of extremely-high energy cosmic rays  
 with IceCube neutrino observatory  
 研究代表者  
 吉田 滋 (YOSHIDA SHIGERU)  
 千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：00272518

研究成果の概要（和文）：IceCube ニュートリノ望遠鏡は、南極点直下の深氷河に紫外光検出器約 5000 個からなるアレイを埋設し、宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノを検出する国際共同宇宙観測装置である。本研究では EeV (=10<sup>6</sup> TeV)帯の極高エネルギー領域での宇宙ニュートリノ信号探索を実施した。2011 年初頭に完成する装置の、一部埋設済み検出器を用いた 2006-2007 年の 2 年間に取得されたデータを用いて、信号探索手法の開発、及び検出感度向上に要求される系統的不定性の低減を行なった。信号弁別手法はほぼ確立し、現在得られているニュートリノ流量上限値は世界で最も厳しいものである。

研究成果の概要（英文）：IceCube is a cubic-kilometer scale high energy cosmic neutrino telescope currently under construction as well as in operation at the geographic South Pole. We search for extremely-high energy (EHE) neutrinos with energies around EeV obtained with the partially constructed IceCube in 2006-7. The robust signal search algorithm has been established and the relevant systematic uncertainties in the neutrino selection criteria has been reduced and well-understood. The obtained upper limit of the neutrino flux is the strongest in EeV range.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2009 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

研究分野：宇宙線物理学、高エネルギー宇宙物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、ニュートリノ、南極、素粒子、天文学、宇宙

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙から放射される光や粒子は 30 桁近くに及ぶエネルギー領域に存在している。このうち最もエネルギーの高い成分は宇宙線粒

子である。宇宙において生成される(素)粒子のエネルギーは最高で 10<sup>20</sup> eV にも達することが知られており、X 線(エネルギーは～keV)やγ線(GeV～TeV)放射を通して構築されて

きた高エネルギー宇宙線を越える極限の物理過程が存在することを示している。この超高エネルギー粒子放射機構として、天体現象に基づく加速モデルから標準理論を超える素粒子物理にその起源を求めるモデルまで数多く提案されているが、それぞれに理論的困難を抱え観測事実を矛盾なく説明するには至っていない。しかしこれら放射機構モデルの多くは、異なったスペクトルの高エネルギーニュートリノ放射を予言する。ニュートリノは宇宙線原子核と異なり電荷を持たないため到来方向と放射源方向が一致する。しかも、光が通過不可能な高密度、あるいは宇宙論的距離を経た領域からエネルギーを失わずに伝播するという特徴を持つ。このため宇宙ニュートリノ観測から得られる情報は、宇宙における高エネルギー現象を理解する直接の指針となる。特に超高エネルギー領域では、宇宙は光( $\gamma$ 線)・原子核に対して不透明になるため、我々の近傍の宇宙しか観測できない。このことは銀河団中の比較的強いと予想される磁場中での荷電粒子の伝播の複雑さとあわせ、これまでの極高エネルギー宇宙観測の原理的な限界となっている。しかし、こうした困難を伴わないニュートリノ、特に宇宙線原子核が宇宙背景輻射光子と衝突して生成する**極高エネルギーニュートリノ(GZKニュートリノ)**を検出できれば、遠方宇宙における高エネルギー粒子生成過程を探る直接的観測手段を手にいれることになる。我々は**IceCube**観測装置を用いて、 $10^7$ - $10^{10}$  GeV に達する GZK ニュートリノ事象を探索するための準備研究を行ってきた。主観測帯域が  $10^3$ - $10^7$  GeV である **IceCube** 実験においても解析手法を工夫すれば十分に超高エネルギー領域が狙えるという見通しに立って研究を開始した。

## 2. 研究の目的

**IceCube** 観測装置において高エネルギー  $\mu$  粒子事象のエネルギーを推定し、その到来方向推定と併せて大気  $\mu$  雑音を除外する手法はほぼ確立してきた。本研究はこの成果を推し進め、世界初の超高エネルギー宇宙ニュートリノの検出を実現する最初の挑戦であった。**IceCube** 実験の建設は平成 17 年度に始まり、現在全検出器の一割強が深氷河に埋設され、稼動中である。計画年度中に約半分の検出器が埋設される。この間に取得される部分観測データを用いて GZK ニュートリノ事象を探索し、極高エネルギー宇宙線放射機構の説明を目指した。

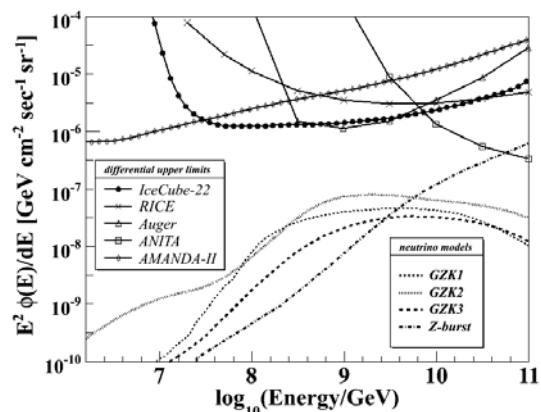
## 3. 研究の方法

**IceCube** 実験は、南極氷河の地下 1400 m の深さに六角柱形状に約  $1\text{km}^3$  の衝突容積を持ち、その中を伝播する  $\mu$ 、 $\tau$ 、あるいは  $\nu$  相互作用

による電磁・ハドロンカスケードからのチェレンコフ光を検出する世界最大の装置である。チェレンコフ光検出器(Digital Optical Module - **DOM**)は10インチ光電子増倍管と電源・データ読み出し回路を耐圧ガラス球内に紫外透過ジェルを用いて収納したものである。ストリングと呼ばれる縦穴を計80本切削し、総計4800本の**DOM**を埋設する。トリガー、データ収集装置は氷河表層に設置するハットの中に収容する。平成17年1月から6年をかけた建設の最中であり、本研究期間中に全体の5割が完成見込みである。埋設された検出器群から順次データ収集を開始する。10%の検出器が稼動中の現時点においても既に世界最大の宇宙ニュートリノ検出装置である。この検出器群からのデータを解析する。

## 4. 研究成果

**IceCube** 実験データにおける超高エネルギーニュートリノ由来事象を探索するための解析手法基本アルゴリズムを確立した。主要雑音となる大気  $\mu$  束事象と識別するために、通常の大気シャワーシミュレーション(**CORSIKA**)の他に、実データ分布のフィットから雑音事象の頻度を推定する経験的モデル(**Elbert Model**)を構築し、 $\nu$ 信号事象を抽出する手法を決めることができた。その基本は、南極氷河深度毎に、天頂角-チェレンコフ光輝度平面において水平方向から高エネルギーで飛来する事象を拾いあげるカットを決定することにある。その際の最も大きな系統的不定性はエネルギー推定測定量であるチェレンコフ光子数のエネルギースケール因子であるが、それを絶対校正された窒素レーザーを埋設して紫外光を人工的に照射させ、絶対校正された光検出器で受光するという手法で実験的に抑えることに成功した。この手法を2007年に約240日間に亘って継続観測を行なったデータに適用した。この観測では、当時埋設が終了していた、全体の約25%に相当する検出器群による観測である。探索の結果、有意な信号は見つからなかったが、



結果として得られたニュートリノ流量上限

値は上図に示すように(“IceCube-22”の曲線)、他実験に比べ、GZK ニュートリノの主エネルギー帯域である  $10^8$  GeV において最も厳しいものである。僅か 25% の検出器で1年に満たない観測からここまでの感度を達成したことは、年々増加する観測データを使った近い将来、また IceCube が完成する 2011 年初頭以降の観測で、超高エネルギーニュートリノを世界に先駆けて検出し、長年の謎である宇宙線放射機構に新しい知見を加えるという道筋を確実につけたことになった。実際、予備的な結果ながら、翌 2008 年データの解析では、感度の大幅な向上によって、ニュートリノ強度理論的予想範囲に観測が届く結果が得られており、今後の確実な進展を期したい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. IceCube Collaboration (R. Abbasi, K.Mase, S.Yoshida et al)  
"Calibration and Characterization of the IceCube Photomultiplier Tube "  
arXiv:1002.2442, Nuclear Instruments and Methods (2010) 掲載決定
2. IceCube Collaboration (R. Abbasi, K. Mase, S. Yoshida et al.)  
"Limits on a muon flux from neutralino annihilations in the Sun with the IceCube 22-string detector"  
Phys. Rev. Lett. 102, 201302 (2009)  
(著者は約 200 名から構成される全員 ABC 順、吉田は前から約 200 番目)
3. IceCube Collaboration (R. Abbasi, K.Mase, S. Yoshida et al.)  
"Determination of the Atmospheric Neutrino Flux and Searches for New Physics with AMANDA-II"  
Phys. Rev. D 79, 102005 (2009)  
(著者は約 200 名から構成される全員 ABC 順、吉田は前から約 200 番目)
4. IceCube Collaboration (R. Abbasi, K.Mase, S. Yoshida et al.)  
"The IceCube Data Acquisition System: Signal Capture, Digitization, and Timestamping"  
NIM A 601 294 (2009)  
(著者は約 200 名から構成される全員 ABC 順、吉田は前から約 200 番目)
5. K. Mase, A. Ishihara and S. Yoshida

for the IceCube Collaboration,

"The extremely high energy neutrino search with IceCube"

Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference (ICRC) 2009, Lodz, Poland

#### 6. IceCube Collaboration (M. Ackermann, K.Mase, S. Yoshida, et al.)

"Search for Ultra High Energy Neutrinos with AMANDA-II",

Astrophysical Journal 675, 1014 (2008)

(著者は約 200 名から構成される全員 ABC 順、吉田は前から約 100 番目)

#### 7. A.Ishihara for the IceCube Collaboration

"EHE Neutrino Search with the IceCube 9 String Array"

Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, 3-11 July 2007, Merida, Yucatan, Mexico, session HE2.3; in arXiv:0711.0353 [astro-ph], 87-90 (2007)

(A.Ishihara は本研究課題専任の特任研究員)

[学会発表] (計 25 件)

国際会議 3 件

#### 1. S.Yoshida,

"Explore High Energy Universe with IceCube v Observation"

Fujihara Seminar、湘南国際村 (2009 年 5 月 2 7 日)

#### 2. K.Mase, for IceCube Collaboration,

"The extremely high energy neutrino search with IceCube"

the 31st International Cosmic Ray Conference (ICRC), Lodz, Poland (2009 年 7 月 14 日)

#### 3. A.Ishihara for IceCube Collaboration, "EHE Neutrino Search with the IceCube 9 String Array"

the 30th International Cosmic Ray Conference (ICRC), 3-1, Merida, Yucatan, Mexico (2007 年 7 月 5 日)

物理学会 計 22 件

(1) 吉田滋、「超高エネルギー宇宙線とニュートリノで素粒子物理を探る」、日本物理学会、2007 年 9 月 2 2 日、北海道大学

(2) 石原安野、「ニュートリノ観測 - IceCube 最新観測結果」、日本物理学会、2007 年 9 月 2 3 日、北海道大学 (石原安野は本研究課題専任の特任研究員)

(3) 長谷川裕介, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 小野美緒, 保科琴代, 宮本寛子, 間瀬圭一, 吉田滋, C.Rott, M.Krasberg他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 30: IceCube用光検出器の長期間モニタリング及び基本性能評価」、日本物理学会、2007年9月24日、北海道大学

(4) 稲場未南, 石原安野, 間瀬圭一, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 宮本寛子, 吉田滋, F.Halzen, M.Krasberg, K.Hanson, A.Karle, C.Rott, I.Taboad, M.D'Agostino 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 31: 絶対較正された光検出器を用いた氷中での光の伝搬の研究」、日本物理学会、2007年9月24日、北海道大学

(5) 間瀬圭一, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 宮本寛子, 吉田滋, D. Boersma, S. Grullon, F.Halzen, G. Hill, A.Karle, C.Rott, D. Turcan, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 32: 2007年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索」、日本物理学会、2007年9月24日、北海道大学

(6) 小野美緒, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 長谷川裕介, 保科琴代, 間瀬圭一, 宮本寛子, 吉田滋, B.Voigt, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 33: 超高エネルギー領域におけるニュートリノ直接反応事象の検出効率」、日本物理学会、2007年9月24日、北海道大学

(7) 石原安野, 間瀬圭一, 吉田滋, A. Karle, Dmitry Chirkin, Tom Gaisser, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験拡張計画によるGZKニュートリノ検出」、日本物理学会、2008年3月23日、近畿大学

(8) 稲場未南, 石原安野, 間瀬圭一, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代<sup>A</sup>, 宮本寛子, 吉田滋, C.Wendt, I.Taboad, K.Woschnagg, M.D'Agostino, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 35: 絶対較正された光検出器を用いた氷中での光の伝搬の研究 2」、日本物理学会、2008年3月24日、近畿大学

(9) 間瀬圭一, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代<sup>A</sup>, 宮本寛子, 吉田滋, D. Boersma, S. Grullon, F.Halzen, G. Hill, H. Johansson, A. Karle, C. Rott, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 36: 2007年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索 II」、日本物理学会、

2008年3月24日、近畿大学

(10) 小野美緒, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 長谷川裕介, 保科琴代<sup>A</sup>, 間瀬圭一, 宮本寛子, 吉田滋, B.Voigt, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 37: 超高エネルギー領域におけるニュートリノ直接反応事象の検出 II」、日本物理学会、2008年3月24日、近畿大学

(11) 吉田滋, 「IceCube実験による $\nu$ 核反応断面積の制限及び高エネルギー $\mu$ 束測定」、日本物理学会、2008年9月21日、山形大学

(12) 間瀬圭一, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代<sup>A</sup>, 宮本寛子, 吉田滋, D. Boersma, S. Grullon, F.Halzen, G. Hill, H. Johansson, A. Karle, C. Rott, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 38: 2007年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索 III」、日本物理学会、2008年9月22日、山形大学

(13) 石原安野, 稲場未南, 小野美緒, 長谷川裕介, 間瀬圭一, 吉田滋, F.Halzen, A. Karle, T. Gaisser, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 39: 超高エネルギーニュートリノ探索における氷河中 $\mu$ 束雑音の南極表面空気シャワー観測データを用いた実験的理理解」、日本物理学会、2009年3月27日、立教大学

(14) 間瀬圭一, 石原安野, 稲場未南, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 吉田滋, D. Boersma, S. Grullon, F.Halzen, G. Hill, H. Johansson, A. Karle, C. Rott, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 40: 2007年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索 IV」、日本物理学会、2009年3月27日、立教大学

(15) 吉田滋, 「IceCube実験における $\sqrt{s} = 50$  TeVでのニュートリノ核子衝突断面積の上限値と余次元ブラックホール蒸発模型に対する制限」、日本物理学会、2009年9月11日、甲南大学

(16) 稲場未南, 石原安野, 小野美緒, 長谷川裕介, 間瀬圭一, 吉田滋, 他 IceCube Collaboration, 「IceCube実験 43: 氷中における再凍結氷の減衰長測定に向けた装置開発」、日本物理学会、2009年9月12日、甲南大学

(17) 間瀬圭一, 石原安野, 稲場未南, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 吉田滋, 他

IceCube Collaboration、「IceCube 実験 44：波形情報を用いた氷の性質の再精査」、日本物理学会、2009年9月12日、甲南大学

(18) 石原安野, X. Bai, T. Gaisser, 間瀬圭一, 吉田滋、「IceCube 実験 42：10PeV 超エネルギー領域の深地下  $\mu$  束事象」、日本物理学会、2009年9月13日、甲南大学

(19) 石原安野, 間瀬圭一, 吉田滋, F. Halzen, A. Karle, T. Gaisser, 他 IceCube Collaboration、「IceCube 実験 46: IceCube 実験の現況と 2008 年度取得データ解析の報告」、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学

(20) 河内明子, 稲場未南, 石原安野, 間瀬圭一, 河合秀幸, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 吉田滋, C. Wendt, K. Wochnagg, I. Taboada, M. D'Agostino, 他 IceCube Collaboration、「IceCube 実験 47：絶対較正された光検出器を用いた氷中での光の伝搬の研究 3」、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学

(21) 間瀬圭一, 石原安野, 小野美緒, 長谷川裕介, 保科琴代, 吉田滋, 他 IceCube Collaboration、「IceCube 実験 48：氷の性質の再精査 II」、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学

(22) 吉田滋, 石原安野, 間瀬圭一, Albrecht Karle, Kara Hoffman, Kael Hanson、「IceCube 実験 49：ARA-IceCube 拡張計画」、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学

[図書] (計1件)

1. 吉田滋 日本評論社 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学 (共著 井上一その他編) 2008 208p.-222p.

[その他]

新聞・雑誌記事

1. 日本経済新聞夕刊「ドキュメント挑戦 地球の極を極める」⑨ 2008年2月15日
2. 日経サイエンス「南極点の氷の中で宇宙ニュートリノを観測」2008年11月号

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 滋 (YOSHIDA SHIGERU)  
千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：00272518

### (2) 研究分担者

間瀬 圭一 (MASE KEIICHI)  
千葉大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80400810

### (3) 連携研究者

河合 秀幸 (KAWAI HIDEYUKI)  
千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：60214590