

海洋アライアンス イニシャティブ報告書

平成26年2月14日

主提案者 田中 宏幸

期 間： 2013年度 前期
イニシャティブ計画名：素粒子を用いた海陸境界域地下構造探査新技術勉強会
主提案者名・所属・身分：田中宏幸・地震研究所・教授
共同提案者名・所属・身分： ブレアソートン・生産技術研究所・特任准教授 松島潤・工学系研究科・准教授 沖野郷子・大気海洋研究所・准教授
研究成果： 1. はじめに 近年、宇宙線ミュオン粒子（ミュオン）を利用する巨大物体内部における密度コントラストのイメージング技術の方法（ミュオグラフィ）が確立され、火山、断層などの密度構造（密度の空間分布）がこれまでにない空間分解能でマッピングされた。宇宙線ミュオンを利用するイメージング技術は弾性波や電磁波を用いる従来の物理探査法と比較して、プローブ自体の直進性が良く、初期フラックスの変調が密度長（密度×経路長）という一つの物理パラメータのみによるため、モデル依存性がほとんどなく、対象物体の密度構造を得ることが出来る。しかし、仰角にして正の方向のみから飛来する（つまり地下からはやってこない）宇宙線を使う従来の方法ではイメージングする対象が山体や丘陵地など、地平面に対して凸状の幾何学形状を持つ陸上の物体に限られてきた。この限界を乗り越える方法を検討するのが、当初から大きな課題の一つであった。 この目標を実現させるために、本勉強会では、国内外から広く①素粒子原子核物理学の技術を背景に持つ研究者、②海底・海底下へのアクセスに関するノウハウを持つロボット工学者、③海洋地質学者、④コントロールボーリング、孔井内システム制御技術に関するノウハウを持つ工学者から成る研究者組織を形成し、議論を行うことで、陸域だけでなく海域の地下構造を扱っていく上で重要となる技術開発を目指した。その一環として、素粒子地球物理学国際シンポジウムの一部として、国際ワークショップを主宰した。このワークショップは、素粒子、地球物理学、地質工学、海洋地質学等、多数の要素が交錯する「素粒子を用いた海陸境界域地下構造探査新技術」というものに着目し、国内又は海外において海洋と素粒子を結びつけた地球科学的研究の現況、技術的課題等について幅広く把握し、今後の展望を探ろうとして企画したものである。

また、実際の要素技術開発を通じた技術的課題の検討も行うことで、このワークショップをより有意義なものとした。具体的には素粒子センサーのダウンサイジングの検討を行い、ミュオグラフィ技術の地下構造探査への可能性について、現状の問題点の洗い出しと今後の展開について議論を深めた。このような地下構造探査へ向けたダウンサイジングは陸域での炭素貯留槽モニタリングや資源探査等を目的に最近、世界各国においても進められ、そうした知見に基づいた研究活動は、海洋観測学に対する新たな選択肢の提示に結びついていくことが期待される。以下に国際ワークショップのプログラムを示す。

2. 国際ワークショップ

2-1. プログラム

日時 2013年7月26日

場所 東京都千代田区

主催 東京大学地震研究所、理学系研究科物理学専攻

10:30-10:45	(12+3)	Taro Kusagaya	Muography in Usu
10:45-10:58	(10+3)	Ryuichi Nishiyama	Muography in Showa-Shinzan
10:58-11:11	(10+3)	Izumi Yokoyama	Volcanological interpretation in Usu
11:11-11:26	(12+3)	J.F. Lenat	Volcanological interpretation in Puy de Deome
11:26-11:39	(10+3)	Eleazar Padron	Muography in Canary Islands
11:39-11:52	(10+3)	Taro Kusagaya	Muography for volcanologicsts
11:52-12:42			Discussion
14:10-14:23	(10+3)	Stefano Davini	What we found with Borexino
14:23-14:36	(10+3)	Hiroko Watanabe	What we found with KamLAND
14:36-14:49	(10+3)	Tetsuya Yokoyama	
14:49-15:02	(10+3)	Kyoko Okino	Marine volcanoes
15:02-15:15	(10+3)	William McDonough	HANOHANO
15:15-17:00			Discussion

以下パラレル：

14:55-15:08	(10+3)	Morgan Murray	Muon tracking and tomography
15:08-15:21	(10+3)	Ryuichi Nishiyama	Joint inversion betwwen muography and gravimetry
15:21-15:34	(10+3)	Akimichi Taketa	EM radiography
15:34-15:47	(10+3)	Daisuke Nakadachi	Borehole muography

午前中のセッションでは火山のミュオグラフィ最新技術に対するレビューと最新の研究成果に対する紹介があり、海域地下構造探査新技術に結びつけるために必要な技術的要件及び、海域、陸域の素粒子探査で解決すべき共通課題を確認した。午後のセッションではニュートリノを用いた地下深部構造探査新技術に対するレビューと最新の研究成果に対する紹介があり、続いて、共同提案者である沖野郷子氏による海底地殻浅部の内部構造探査に対して、ミュオグラフィがどのような形で貢献できるかについての提案がなされた。また、メリーランド大学のWilliam McDonough氏の講演では、海底に設置する方式の巨大ニュートリノ検出器の提案がなされ、これにより海底深部の重元素化学構造を探れるとした。パラレルセッションでは主に、要素技術開発についての議論がなされた。以下、ワークショップで行われた議論について、スライドの一部を示す。

MNR2013 2013.7.26

Can muon radiography unravel the mystery of seamounts?

Kyoko OKINO

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

スライド1. 共同提案者である沖野郷子氏による講演。

Difference from on land volcanism

- **increasing pressure: less explosive eruption**
- **dense and viscous ambient water: absorbing momentum**
- **large heat capacity of water: rapid cooling of lava**

Can muography be applicable to observation/ monitoring of submarine volcanoes?

Targets should be

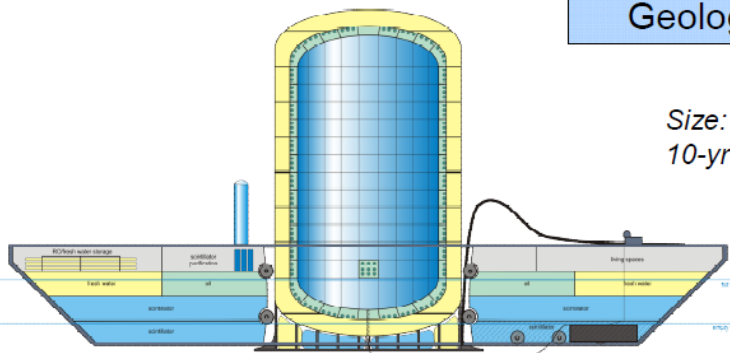
- **scientifically significant**
- **only-obtained at sea**
- **water depth ~1000m?**

スライド2. 沖野氏によるミュオグラフィ海底構造探査に対する候補ターゲットの提案。

Hanohano

An experiment with joint interests in Physics, Geology, and Security

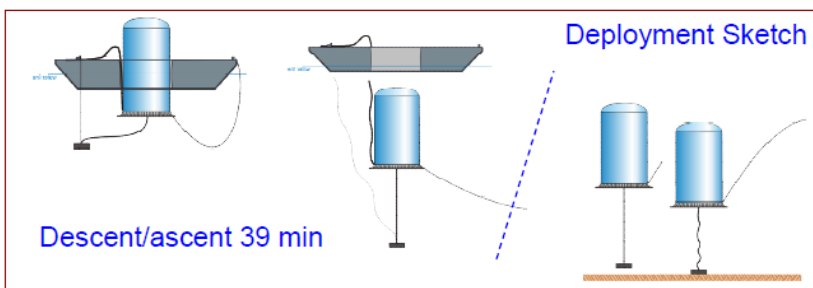
Size: scalable from 1 to 50 kT
10-yr cost est: \$250M @ 10 kT



- multiple deployments
- deep water cosmic shield
- control-able L/E detection

A Deep Ocean

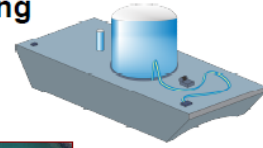
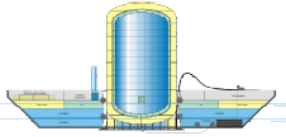
$\bar{\nu}_e$ Electron
Anti-Neutrino
Observatory



スライド3. McDonough氏によるニュートリノグラフィによる海底構造探査に対する提案。

Engineering Studies

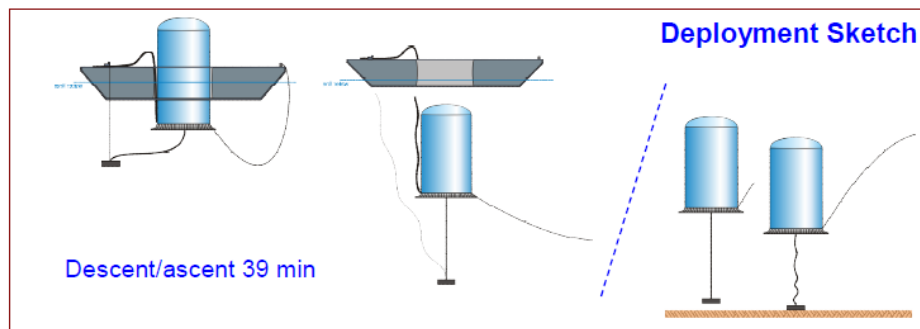
Makai Ocean Engineering



- Studied vessel design up to 100 kilotons, based upon cost, stability, and construction ease.
 - Construct in shipyard
 - Fill/test in port
 - Tow to site, can traverse Panama Canal
 - Deploy ~4-5 km depth
 - Recover, repair or relocate, and redeploy



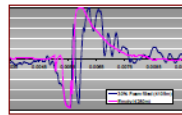
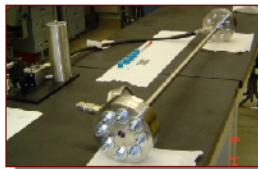
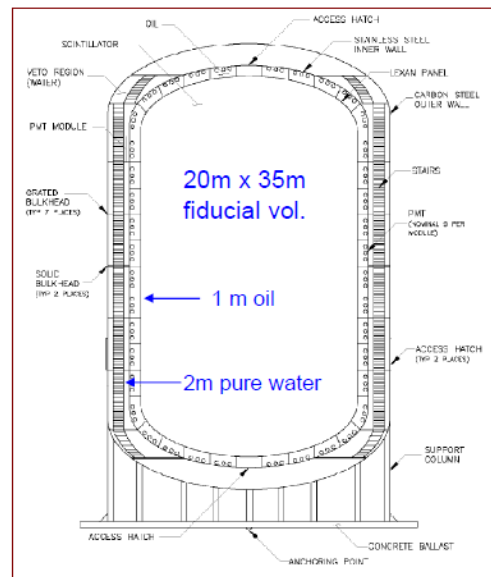
Barge 112 m long x 23.3 wide



スライド4. 海域におけるニュートリノ観測に必要な海底へ巨大素粒子検出器のアクセス技術。

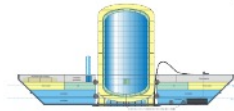
Addressing Technology Issues

- Scintillating oil studies in lab
 - P=450 atm, T=0° C
 - Testing PC, PXE, LAB and dodecane
 - No problems so far, LAB favorite... optimization needed
- Implosion studies
 - Design with energy absorption
 - Computer modeling & at sea
 - No stoppers
- Power and comm, no problems
- Optical detector, prototypes OK
- Need second round design

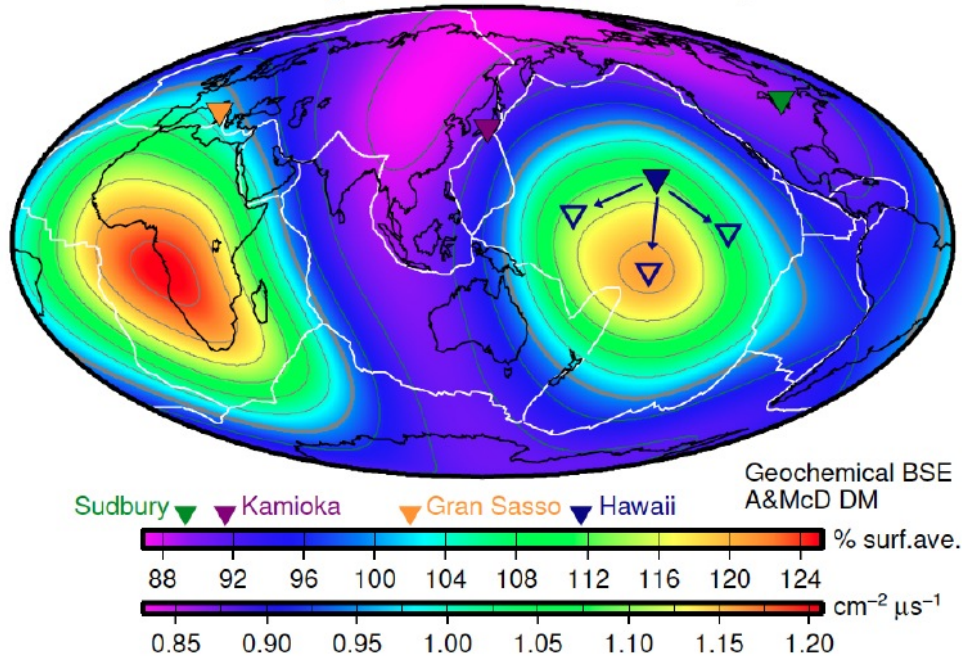


スライド5. 海域におけるニュートリノ観測に必要な技術的要件。

Testing Earth Models



Mantle geoneutrino flux ($^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}$)



Srámek et al, 2012, EPSL

スライド6. 海域におけるニュートリノ観測で明らかになる海洋底地下深部の重元素部分布のコンピュータシミュレーション。

このように最新の素粒子地球観測技術の海洋への進出は大きな展開をもたらす可能性があることを確認した。技術開発課題、探査の対象となる候補ターゲットを横に並べて、比較検討の視点を導入しながら、今後、海洋における素粒子地球観測についてどのような展望が開けていくのかということを中心的な関心に、幅広く議論を行った。

本勉強会のホームページを作成したことで、この分野の研究者同士のみならず素粒子を用いた地球内部探査とそれを海域で行うことの重要性に関心を有する方に広く知ってもらうことができるようになった。上記のスライドはホームページ上で公開されており、ワークショップに出席しなかった方にも議論の流れが分かるようになっている。

今後の展開：

素粒子を用いた地球観測フロンティア研究における技術開発とそのアウトプットの解釈については、様々な主体により独自の取組が進められているのが現状である。本勉強会のようなソフトな枠組みの中で、海洋に関係する素粒子による地球観測研究を通じて科学的知見を充実させるとともに、全体として、海洋底下革新的観測技術の創出を狙うこ

とが可能となってくると期待している。

本ワークショップでは、そうした複数の学術領域を融合させる素粒子を用いた地球観測技術のうち、海洋の利用及び海洋底への応用に着目して、現況、問題点について幅広く把握することができた。また、検討された技術要件との間で各々の研究課題（例えば陸上火山と海底下深部）でマッチングを試み、両者が整合する形式に、解決が必要な技術的課題を再定義できたと同時に、未開発の要素機能を明らかにすることができた。得られた知見をもとに今後の展望を探っていきたい。