

図1 神岡鉱山内の観測装置群。スーパーカミオカンデの周辺に、重力波、暗黒物質、カムランドが設置されている。

2. ニュートリノが降る街、神岡へ

ここで神岡という場所を紹介しておきたい。正しくは岐阜県吉城郡神岡町といい、観光名所の飛騨高山の近くにある。東京から電車で行く場合は、新幹線に乗って越後湯沢で北々線、富山で高山線、さらに猪谷で神岡鉄道に乗り換えて約6時間の旅をすることになる。このおかげでスキーもしないのに「国境の長いトンネルを越えると雪国であった」は何回も経験したし、その度に単行本が一冊読めるという感じであった。

神岡鉱山は亜鉛鉱として有名であるが、今年の6月末で亜鉛・鉛鉱石の採掘が中止され、今後は石灰石の採掘や地下利用の推進が主業務になる。

地下利用はいろいろ考えられるが、なんといってもスーパーカミオカンデの設置場所として知られているように、サイエンスがその筆頭であろう。この街では老若男女を問わずニュートリノという言葉が浸透しており、コンビニの名前にまでなっていたほどである。これはスーパーカミオカンデの前身であるカミオカンデの時代から地域連携を重視してきた努力の賜物であろう。当時はトロッコで入坑していたが、現在では特殊な触媒を装備した一般車両（ディーゼル車）で出入りができるようになっているし、研究棟や宿泊施設もあるので、研究環境は驚くほど良くなっている。

まず、神岡鉱山内に観測機器を設置することのメリットは、バックグラウンドとなる宇宙線が山に

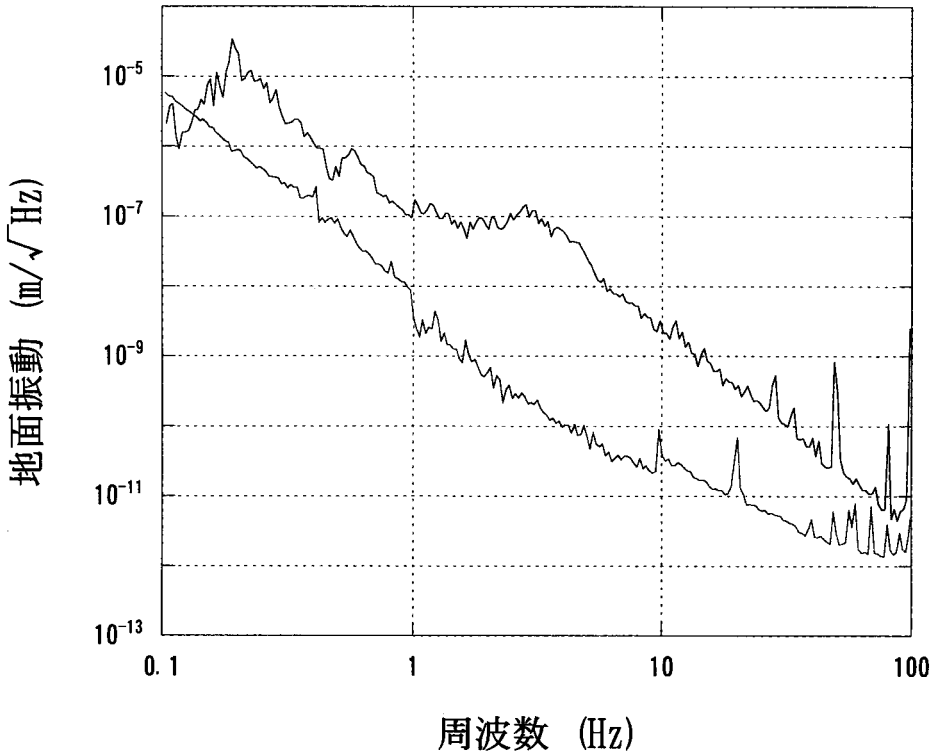


図2 神岡と三鷹の地面振動スペクトルの比較。黒が三鷹、青が神岡の地面振動を表す。

よって非常に低減されることである。スーパーカミオカンデの建設場所は地下 1000 m にあり、ミュオンは地上から水に換算すれば 2700 m もの物質を通過する間に激減する。それでもスーパーカミオカンデのフォトマルを光らせるのはミュオンが一番多いのであるが、こうして物質との相互作用が弱い「ニュートリノが降る」環境がつくられたのである。ただし、地上にはないラドンガスの影響が深刻になるので、装置内の純水を循環させて新たなラドンが純水に溶け込むことを避けるという対策がとられている。この環境を活かして、今ではスーパーカミオカンデの周辺には暗黒物質の観測装置も設置され、カミオカンデは東北大のカムランドという原子炉からのニュートリノを観測する装置に生まれ変わりつつある (図 1 参照)。

さて、それではこの地で重力波観測するメリッ

トは何であろうか。それは図 2 に示すように、地上に比べて 2 桁も小さい地面振動と、温度などの環境の抜群の安定性である。重力波検出器の低周波感度は地面振動でリミットされるのが普通であり、地面振動が小さいことはそれだけでメリットであるが、それに加えて地面ひずみが小さく環境も安定しているため、観測の長期安定性が確保できることが恩恵となる。わかりやすい例で示すと、鉦山内では採掘のための発破でパルス的な振動が発生するが、都市部ではそれが四六時中起きているような振動レベルであると思えばよい。この地下の静けさこそが重力波将来計画 LCGT の建設サイトとして神岡が選ばれた最大の理由であり、20 m レーザー干渉計移転の目的の一つがこの優位性を実証することであった。

観測機器にとって低バックグラウンドというのは

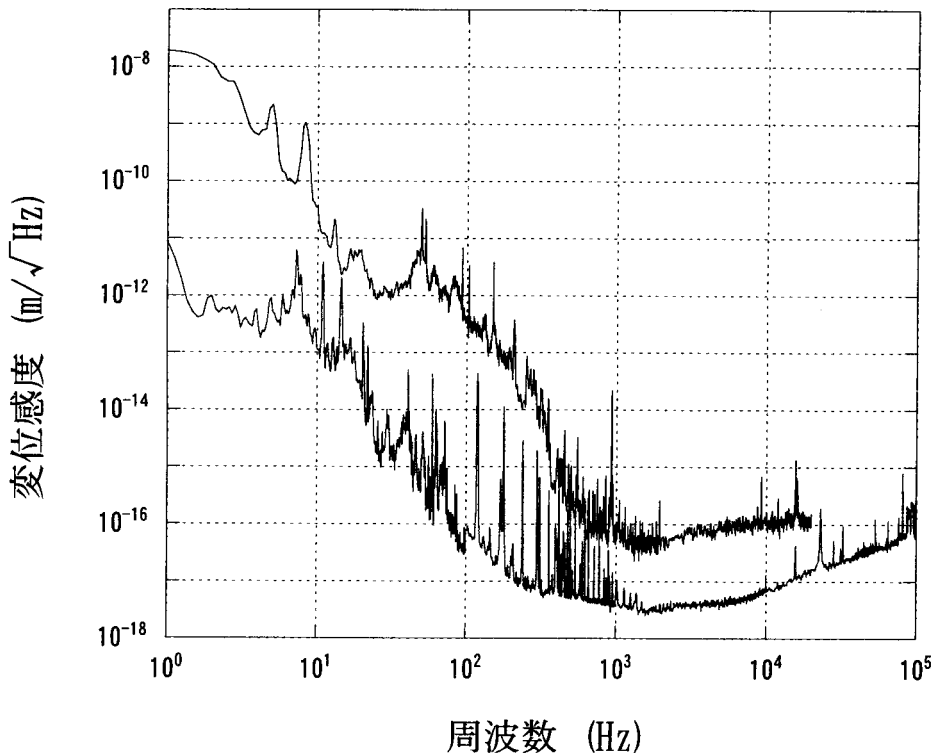


図3 20 m レーザー干渉計の変位雑音スペクトル。移転前後での感度の変化を表す。黒が三鷹時代のベスト感度、青が最新のものである。

大事である。環境を改善する場合には、「元の何分の一」という指標で示されるとおり固有の状態に左右されるのである。クラス 100 のクリーンルームという場合、あたかもそのクリーン度を実現する素晴らしい機械があるような錯覚を与えるが、実は空気中の粒子を何分の一にするフィルターを必要だけ重ねるに過ぎない。望遠鏡が電磁波の吸収や大気揺らぎの小さな高山をめざすのと同じ論理で、ニュートリノや重力波の観測機器は鉱山（深地下）に理想的な環境を求めるわけである。世界的にも、宇宙線観測で有名なグランサッソ（イタリア）があるし、太陽ニュートリノにおけるニュートリノ振動をスーパーカミオカンデに続いて証明したのもサドバリー金山（カナダ）の地下 2000 m に設置された重水を満たしたニュートリノ検出器

である。ありとあらゆる揺らぎに影響される重力波観測を目指すために、低バックグラウンドの環境があればそれを利用したいというのが神岡移転の素朴な動機であった。

次に、この環境で 20 m レーザー干渉計の性能がどのように改善されたかを解説する。

3. 20 m レーザー干渉計の感度

最初に三鷹から神岡へ 20 m レーザー干渉計を移転したことで感度がどう変わったかを図 3 に示す。このグラフは、干渉計の雑音をミラーの変位に換算したものをスペクトルで示したものである。単位は $\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、これを二乗して観測帯域で積分するとミラーの揺らぎが計算できる。例えば重力波に対する感度が 10^{-18} であるという場合には、このミ

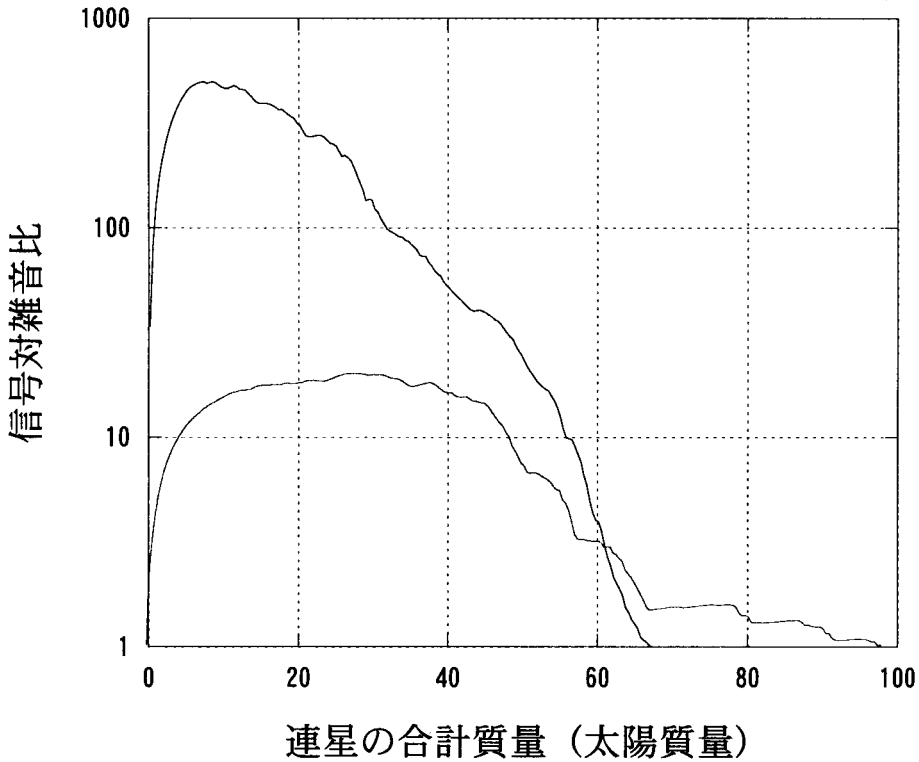
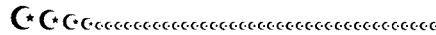


図4 連星からの重力波に対する信号対雑音比. 1 kpc 離れた連星からの重力波に対して chirp 波形を仮定した場合の信号対雑音比を表す. 青が 20 m レーザー干渉計, 黒が TAMA300 の感度を表す.

ラーの揺らぎが (基線長) $\times 10^{-18}$ ということになるわけである. 制御なしの状態では, 糸でつるされたミラーは 1 ミクロン程度の振幅で揺れているので, 重力波検出器における制御が如何に大変かがわかっていただけであろう. 話を戻して, まず観測帯域全体で一桁以上の感度改善があった. 特に低周波では地面振動が小さくなった分が上乘せされて, 100 Hz では 3 桁以上向上したことがわかる. 実は神岡移転の際にファブリーペロー光共振器のフィネスを 500 から 25,000 に上げているので, 1 kHz 付近では共振器の積分特性により感度を損しているにもかかわらず, これだけ感度は向上したのである. フィネス 25,000 という値は, 少なくとも重力波検出器では最高の値である. ミラーの反射率は 99.987% もあり, 光損失は 30 ppm 程度である.

フィネスを共振器中でのフォトンの寿命に換算すると 1 msec ということになる. これは数百 Hz の重力波に対して最適化されたレーザー干渉計ということを表すので, この意味では既に大型計画と同等と言えることになる.

ミラーの揺れに換算した変位雑音スペクトルだけでは, 重力波検出器の感度を表すには不十分である. そこで, 典型的な重力波を発生するコンパクト連星に対してどれくらいの信号対雑音比が得られるかを示したのが図 4 である. 1 kpc 離れた中性子星同士の連星が発生する重力波に対して信号対雑音比が 10 になることがわかる. この 10 という値は, それが信号であると判断できる最小レベルと考えている. 1 kpc では話にならないと思う読者が多いであろうから, 比較として TAMA300 の感度を

入れている。この場合は信号対雑音比が500ぐらいあるので、重力波の振幅が距離に反比例することを考えれば、信号対雑音比が10になる距離は50 kpcである。つまり銀河ハローまでカバーするわけだから、観測すれば十分な意義があることになる。補足となるが、ここでの感度はポストニュートン近似で計算された連星合体時のチャープ重力波形を最適フィルターとして用いたものである。具体的には、チャープ波形をフーリエ変換したもの（周波数の6分の7乗に反比例する）と干渉計データを掛け算して積分するのであるが、積分区間の下限はスペクトル感度が良くなる100 Hz、上限は連星合体時の重力波の周波数1.5 kHzにとっている。

以上の性能は実際の信号を見ないとイメージがなかなかつかめないが、次節では副産物的な例をあげてみることにする。

4. 重力波観測

20 m レーザー干渉計が三鷹から神岡鉱山内に移設されたのは1999年9月で、それから再び組み上げて、レーザー干渉計全体が運転可能になったのは2000年の年明け早々であった。その後、調整とテストランを繰り返して、3月には42時間の連続運転ができるようになっていた。当時は丸1日以上運転可能なレーザー干渉計はどこにもなく、まずは神岡の重力波観測サイトとしての優位性を実証したのである。現在では、数日に一度調整すれば、100時間程度の連続運転ができるようになっている。

2001年に入り、TAMA300の観測時期に合わせて、長時間のデータ取得を試験的に行った。このデータを解析してみると、レーザーの周波数安定化に使われる電圧には12時間周期が見えていた。レーザーの周波数はファブリーペロー共振器長に追随するように制御されているので、このデータは地面の歪みを表しているものと考えられる。そこで、これは地球潮汐ではないかと考え、早速BAYTAP-G^{15), 16)}

というプログラムで地球潮汐の予想値を計算してみると、相対値がピタリと一致した。このグラフを図5に示す。この解析を順を追って説明すると以下のようになる。まず、地球潮汐の振幅と位相を未知数として生データをフィッティングする。この予想値を生データから引き算すると、トレンドが計算できるのである。定数倍の自由度は、地殻の硬さをどう仮定するかで出てくる因子で、逆に言えば、これから神岡の地殻の硬さが求められることになる。レーザー干渉計は直行する2本の腕を持つが、両方でこの一致が見られたので、地球潮汐により地面が伸び縮みしているのを測定したと断定することができた。歪みの大きさ（振幅）は 10^{-8} 程度であり、測定精度は基線長20 mに対して10 nm程度である。もちろんこのような測定は地球物理計測では歪計によって以前から行われており、なんら珍しいものではない。しかし、ワイヤで吊られたミラー間の距離にこれほど顕著に地球潮汐の効果が観測されることはあまり予期していなかった。これもまた、神岡の安定性を示す証拠になるであろう。トレンドについては、レーザーの発振周波数の変動と岩盤のドリフト（圧力による変形や地下水の汲み上げ等による）が合わさったものと考えている。2001年7月16日からスーパーカミオカンデは数百本のフォトマルの交換を主とした改善作業のために水を抜き始め、年内には再び満水となる予定である。その期間中の岩盤の歪みを長期にわたって測定すれば、貴重なデータとなるであろう。

重力波観測に話を戻すと、重力波検出を確固たるものにするには2台以上で同時観測するのが望ましい。米LIGO計画がレーザー干渉計を東西海岸に1台ずつ建設するのはそのためである。オシロで重力波形が見えるぐらいならば大丈夫であるが、チャープ信号解析においても信号対雑音比が100以上もある偽イベントがかなり存在することがわかってきた。データ解析法も洗練されてきたし、レーザー干渉計の安定性を増す努力も続けられているが、これを棄却するには相関解析するのが一番で

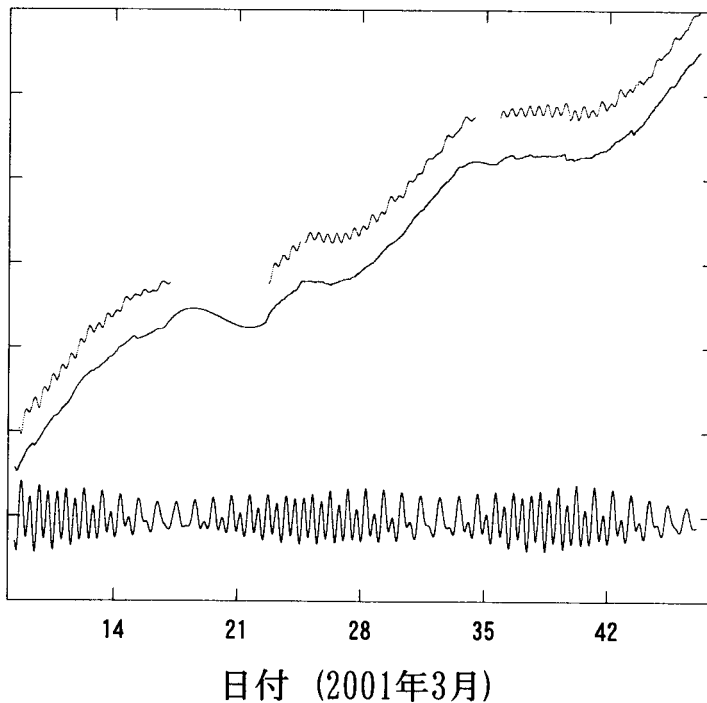


図5 地球潮汐による基線長の伸縮。黒線が生データ、その下の青線がトレンドで、一番下に示す地球潮汐の予想値（スケールを5倍してある）を引いたもの。

ある。高感度レーザー干渉計の相関解析が実現すれば、例えば銀河当たり100万年に一度と予想されている連星中性子星合体の頻度に対応する上限値を与えることができる。たとえ直接観測でなくとも、物理結果を出すことが可能だと言えるわけである。そこでTAMA300の観測時には神岡でもデータを取るようにはしており、既に解析グループは相関解析の準備に取りかかっている。図4に示したとおり感度にかなり差はあるが、解析法を整備するためのデータは提供できるのではないかと考えている。それと至近距離のイベントが起きた場合に、感度の高いレーザー干渉計では出力が飽和することが無いとは言えないので、この意味でも20mレーザー干渉計でモニター観測する価値はあるだろう。

現在は、レーザー干渉計の安定性を増すこととオートロック機構の開発をしており、これがうまくいけば無人で長時間の観測ができるようになるは

ずである。それと同時に、低周波域での感度をさらに上げるためのミラー懸架装置の交換を予定している。これはTAMA300用に開発された懸架装置で、この記事が出る頃には作業に着手しているであろう。

5. 今後の展開

今年度から特定領域「重力波研究の新しい展開」が新たに発足する。このなかでは、20mレーザー干渉計はTAMA300と同時観測データを取得したのちに、低温ミラーを組み込んだプロトタイプに再構築するという研究計画が立てられている。将来計画LCGTの低温ミラーは熱雑音を低減するために組み込むものであり、それを実証するには低周波域の感度が高いレーザー干渉計が必須である。その実現のためには神岡は絶好のサイトであり、ここで20mレーザー干渉計は10年前の設計を完全に捨てるような大改造により、生まれ変わることになる。

参考文献

- 1) M Ohashi., et al., 1994, in Proc. of MG7, p.1370.
- 2) A Araya., et al., 1997, Applied Optics, 36, p.1446.
- 3) M Musha., et al., 1997, Optics Communications, 140, p.323.
- 4) M Ohashi., et al., 1997, in Proc. of TAMA Workshop, p.147.
- 5) 中村卓史・三尾典克・大橋正健編, 1998, 「重力波をとらえる」
- 6) S Sato., et al., 1999, Applied Optics, 38, p.2880.
- 7) 大橋正健, 1999, 応用物理, 68, p.663.
- 8) A Ueda., et al., 1998, Laser Physics, 8, p.697.
- 9) K Kuroda., et al., 1999, Int. J. of Mod. Phys. D8, p.557.
- 10) M Ohashi., et al., 1999, In Proc. of TAMA Workshop, p.369.
- 11) H Tagoshi., et al., 2000, Int. J. of Mod. Phys. D9, p.319.
- 12) S Sato., et al., 2000, Applied Optics, 39 p.4616.
- 13) H Tagoshi., et al., 2001, Phys. Rev. D63, p.1.
- 14) M Ando., et al., 2001, Phys. Rev. Lett., 86, p.3950.
- 15) M Ishiguro., et al., 1981, In Proc of 9th Int. Sympo. on Earth tides, p.283.
- 16) Y Tamura., et al., 1991, Geophys. J. Int., 104, p.507.

20m Laser Interferometer in Kamioka Mine
Masatake OHASHI
Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo Kashiwa, Chiba, 277-8582, JAPAN

Abstract: We moved 20m interferometer from TAMA300 site into the Kamioka Mine. The new place near Super-Kamiokande neutrino detector is a planned site of the Japanese future project LCGT. The aim of this program called LISM is to get a long and high-quality data by taking advantage of low seismic noises in the underground space. Stable operations over 100 hours were already realized and its sensitivity was improved by one order of magnitude.