

特別実験
iKAGRA のロックロス診断

宮崎祐樹
05-161560
東京大学理学部物理学科 4 年

2017 年 9 月 4 日

目次

0	KAGRA と観測データ	1
0.1	検出原理	1
0.2	使用したデータ	1
1	地面振動のスペクトル解析	4
1.1	地震計	4
1.2	解析方法とその結果	5
1.3	先行研究との比較	7
1.4	考えられる要因の考察	9
1.5	今後の課題	9
2	ロックロスの原因調査	10
2.1	モチベーション	10
2.2	対象と概要	10
2.3	boolean の作成	10
2.4	ロックロス原因の解析方法	11
2.5	今後の課題	14
3	ロックロスと地面振動の関係	15
3.1	モチベーション	15
3.2	対象と概要	15
3.3	対象となるロックロス	16
3.4	地震候補の絞り込み	17
3.5	地震絞り込みの結果	19
3.6	contour map	24
3.7	ロックロスを引き起こした地震からの考察	26
3.8	今後の課題	26
3.9	遠い先の目標	28
4	iKAGRA の改善すべき点	30

0 KAGRA と観測データ

近年世界で重力波を捉えようとする動きが活発になっている。日本もその輪に加わっており、岐阜県神岡市に重力波望遠鏡 KAGRA を建設した。これは他の重力波望遠鏡とは異なり地中に造られているので地面振動の影響が小さくなるとされている。現在の KAGRA は試運転を行える段階 (iKAGRA) へと進んでいるが、ここで得たデータの解析を行うことで一早く次の段階へと歩を進めることができるだろう。そこで今回は地面振動の影響を検証し、また干渉計のロックロス診断を行いロックロスの原因を明らかにすることを目的とした。

まず第一章では地面振動のパワースペクトルを求め、先行研究と比較を行う。第二章ではロックロスの原因を明らかにしてその割合を円グラフで表す。特に地震が原因のものについて第三章で詳しく調査し、ロックロスを引き起こす地震の特徴を考察する。

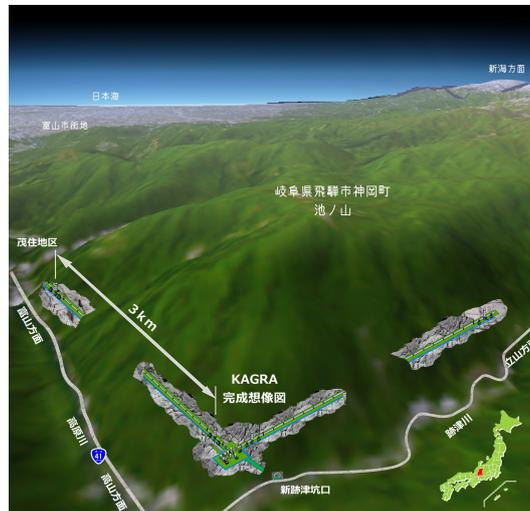


図1 KAGRA の全体図. NAOJ のホームページ [1] から引用.

0.1 検出原理

重力波信号を検出するためにはマイケルソン干渉計を利用する。レーザールームから高出力の光を送り、モードマッチングを行った後にビームスプリッターに入射し2方向に分け、それぞれ3 km 先の鏡まで飛ばす。それぞれの鏡は多段振り子を用いて吊るされている。KAGRA の最終形ではさらに power recycling mirror や signal recycling mirror を挟み、鏡を 20 K まで冷却する予定だが、iKAGRA の段階では未試行である。[3]

0.2 使用したデータ

今回の解析では 2016/4/11/00:00:00~2016/4/25/08:00:00(UTC) の KAGRA の試運転で取得したデータのみを用いる。^{*1} 主に使用したチャンネルはマイケルソン干渉計 (MICH)、インプットモードクリーナー

^{*1} GPS 時間に換算すれば、1144368017~1145606417.

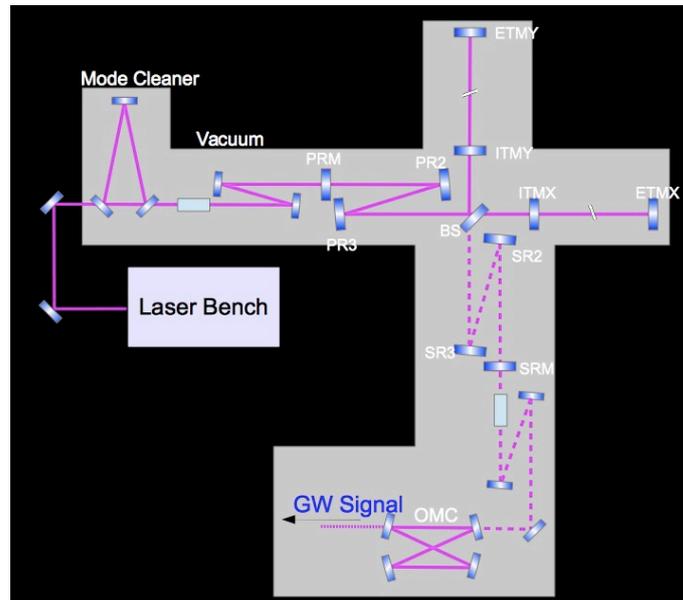


図2 KAGRA の装置の略図. 麻生洋一氏の講義資料 [2] から引用.

(IMC), フィードバック制御信号 (FEED), 地震計 (SEIS) であり, チャンネル名あるいは使用したデータは下の表の通り. 以下では BS_NS のように略記することもある.

表1 チャンネル名または使用したデータ

xx : 地震計の位置を表す. ビームスプリッタ周辺なら BS, X-end なら EX, Y-end なら EY.

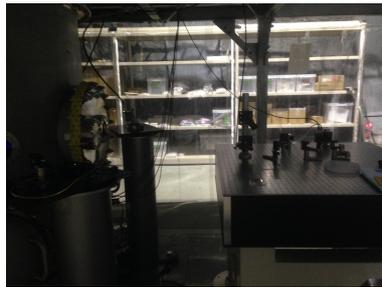
yy : 測定する方角. 南北なら NS, 東西なら EW, 鉛直方向なら Z.

略称	チャンネル名
MICH	K1:GRD-MICH_LOCK_STATE_N
IMC	K1:GRD-IMC_LOCK_STATE_N
FEED	LSC-MICH_OUT16.dat
SEIS	xx_SEIS_yy_SENSINF_IN.dat

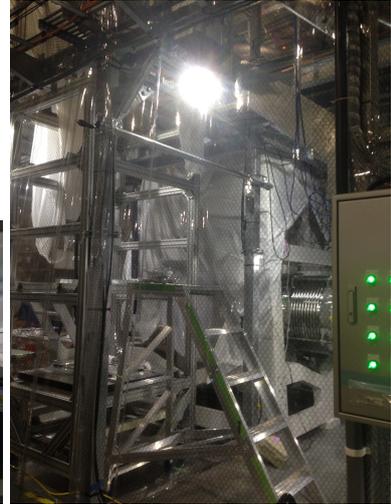
なお, 本解析は MATLAB R2016a を使用して行った.



(a) LASER



(b) Mode Cleaner



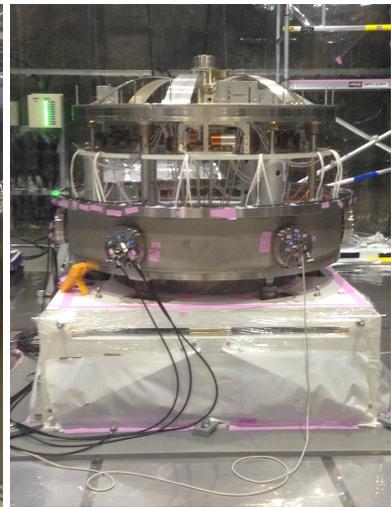
(c) Beam Splitter の設置場所



(d) BS Mirror



(e) Power Recycling Mirror の一端



(f) Y-end Mirror を吊るす機構

図3 KAGRA 内にて撮影した写真

1 地面振動のスペクトル解析

この章では iKAGRA に設置されている地震計のデータを用いて、地面振動のスペクトルを解析する。BS, X-end, Y-end の 3 箇所をそれぞれ独立に解析して (1.2 節), 先行研究との比較を行う (1.3 節)。比較した結果としては, iKAGRA のスペクトルが予想より大きく現れており, 今後は様々なノイズを考慮していく必要があることがわかった (1.4 節)。

1.1 地震計

地震計として使用されたのは Trillium Compact 120 (TC120) である。その伝達関数は図 5 のようであり, 0.02~50 Hz の周波数領域で一定になるように規格化されている。地面振動の速度を測定し, それを電圧 (最大電圧 ± 10 V) として出力している。以下では地面振動の速度のことをそのまま「地面振動」と呼ぶことにする。



図 4 Trillium Compact 120

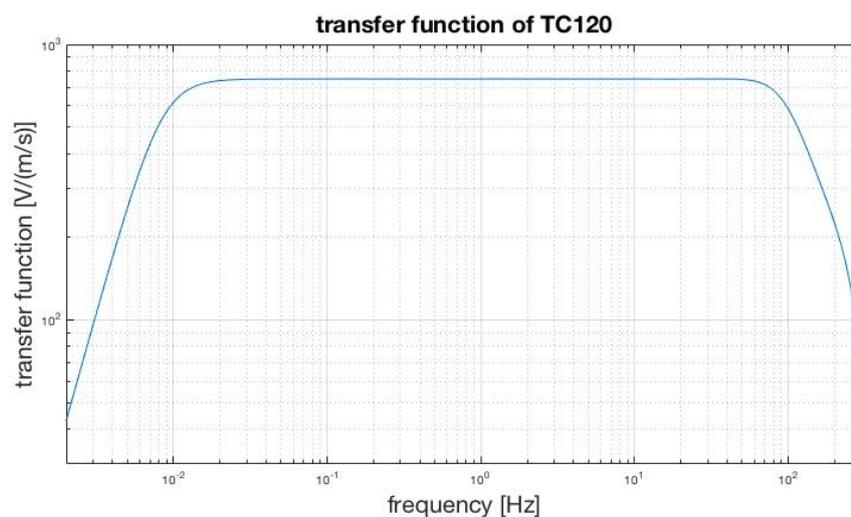
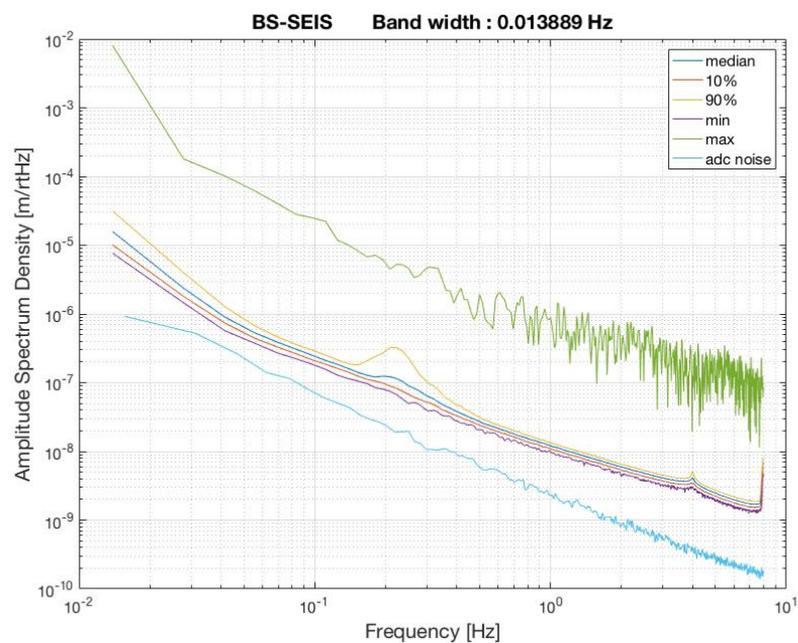


図 5 Trillium Compact 120 の伝達関数 [V/(m/s)]

1.2 解析方法とその結果

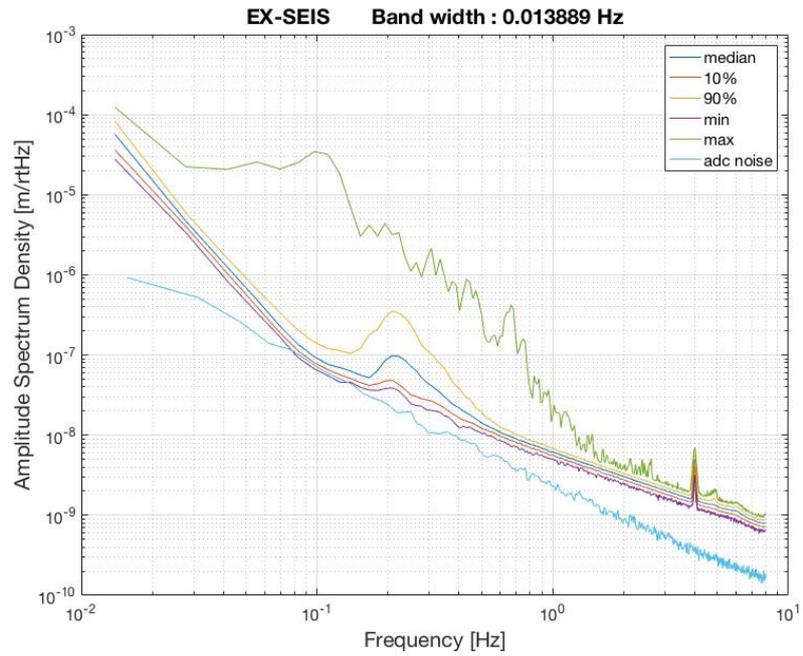
データを1時間ごとに区切ってそれぞれパワースペクトル $S(f)$ を求める。その際、飛びがなく、大きすぎる信号 (± 0.4 V を超えたもの) が無いデータ領域を選んだ。後者の理由は突発的な地震やノイズを除くためである。^{*2} 今回の解析では計 576 組のパワースペクトルが得られた。各周波数 f ごとに $S(f)$ を降順に並び替え、中央値, 10% 分位点, 90% 分位点, 最小値, 最大値をプロットしたものが図 6 である。

0.2 Hz 周辺に micro seismic peak が存在し、地面振動の特徴が現れていることがわかる。その時のパワースペクトルの大きさは BS_NS, EX_NS, EY_NS 共に 1×10^{-7} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。

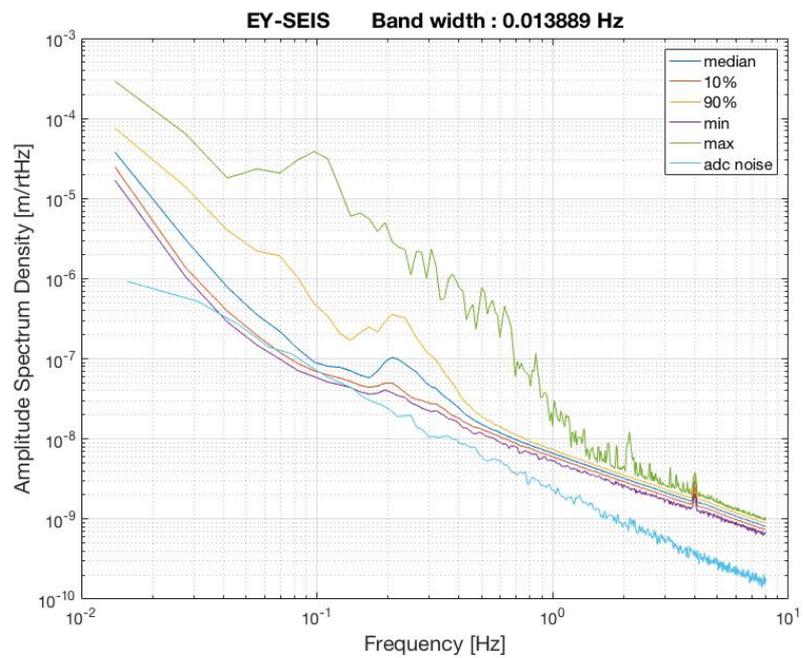


(a) BS-SEIS の地面振動スペクトル

^{*2} 関口氏の先行研究 [4] を参考にした。関口氏は最大 ± 5.12 V の地震計に対して出力が ± 0.2 V を超えたものを除いており、本解析ではその比率に従った。



(b) EX_SEIS の地面振動スペクトル



(c) EY_SEIS の地面振動スペクトル

図6 地面振動のスペクトル解析. 5本のスペクトル線は上から, 最大値, 90%分位点, 中央値, 10%分位点, 最小値である. 水色の線はADC雑音.

1.3 先行研究との比較

同じ神岡鉱山内にある CLIO に設置された地震計を用いて、2014 年に ICRR の関口氏が全く同様の解析を行っている。2009～2011 年の地面振動データから関口氏が求めたパワースペクトルを図 7 に示す.[4] ここに 0.2 Hz 周辺の micro seismic peak が見て取れて、そのスペクトルは $3 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。

iKAGRA と CLIO の結果を比較すると、両者の micro seismic peak が現れる周波数は同じで、関口氏の解析での 10%～90% 分位の範囲の中に私の解析結果が含まれているため、この点において整合していると言える。しかし、関口氏の解析ではプロットした 5 本全てに micro seismic peak の山が見えるが、私の方は一部のみしか現れていない。

さらに LIGO や Virgo などの他サイトの地面振動パワースペクトルを図 8 に示す.[7] micro seismic peak に注目すると、LIGO(Hanford) は $4 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、LIGO(Livingston) は $1 \times 10^{-6} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、Virgo は $2 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、私の解析結果とオーダーが等しくなっている。

表 2 iKAGRA と CLIO と他サイトの地面振動パワースペクトルの比較

場所	micro seismic peak [$\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$]	2 Hz [$\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$]
iKAGRA(BS_NS)	1×10^{-7}	6×10^{-9}
iKAGRA(EX_NS)	1×10^{-7}	3×10^{-9}
iKAGRA(EY_NS)	1×10^{-7}	3×10^{-9}
CLIO	3×10^{-7}	2×10^{-10}
LIGO(Hanford)	4×10^{-7}	2×10^{-9}
LIGO(Livingston)	1×10^{-6}	7×10^{-9}
Virgo	2×10^{-7}	4×10^{-8}

続いて 2 Hz 周辺でのパワースペクトルを見ることにする。(表 2 を参照。) KAGRA は地中に設置されているので地面振動の影響を減らせるはずであるが、iKAGRA のパワースペクトルは他のサイトに対して小さくなっていないことがわかる。ましてや CLIO での値とも一致していない。何らかの要因により iKAGRA でのパワースペクトルがオーダー 1 つだけ大きく現れているためだと考えられる。

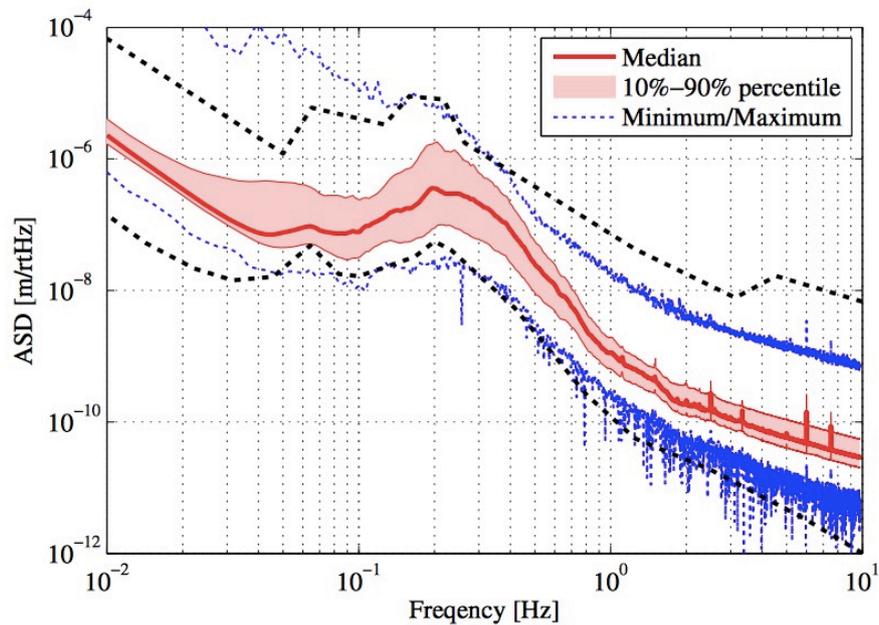


図7 CLIOの地面振動パワースペクトル解析. 関口氏の報告書[4]から引用. 赤線が中央値, 赤い領域が10~90%分位, 青い点線が最大最小を表す. 黒い点線はJ. Petersonによる地面振動のNLNM(New Low Noise Model)およびNHNM(New High Noise Model)である.[5]

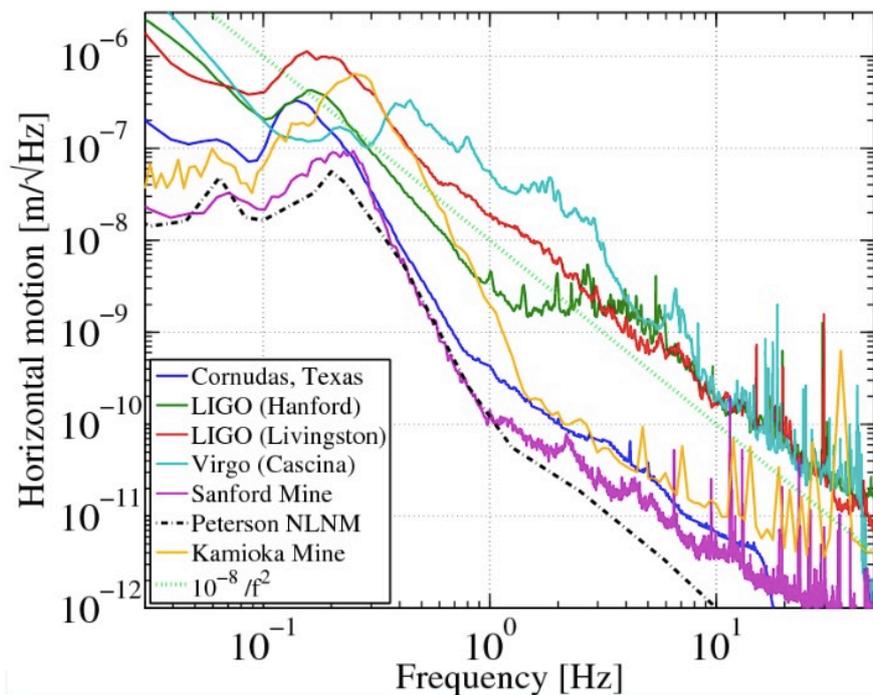


図8 他サイトの地面振動のパワースペクトル. Gravitational Radiation Detection with Laser Interferometry - Adhikari, Rana X Rev.Mod.Phys. 86 (2014) 121 arXiv:1305.5188 [gr-qc] LIGO-P1200121[7]から引用. (黒い点線はJ. PetersonによるNLNM[5], 黄色い線は麻生氏と新谷氏の解析[8]を使用している.)

1.4 考えられる要因の考察

iKAGRA の地面振動パワースペクトルが大きく現れている要因として、iKAGRA で得られたデータにノイズが乗っていることが候補に挙げられる。ノイズの候補としては ADC 雑音と、Trillium Compact 120 の self-noise がある。ADC 雑音については図 6 にプロットしてあるように、2 Hz などの他の周波数領域ではそこまで大きいノイズとは言えない。しかし EX_NS と EY_NS のプロットでは 0.1 Hz 周辺に ADC 雑音より小さいスペクトルが出ており、誤差の影響を今後は見る必要がある。self-noise についてもまだ調査しておらず、これからの課題である。Trillium Compact 120 の self-noise は図 9 の通り。

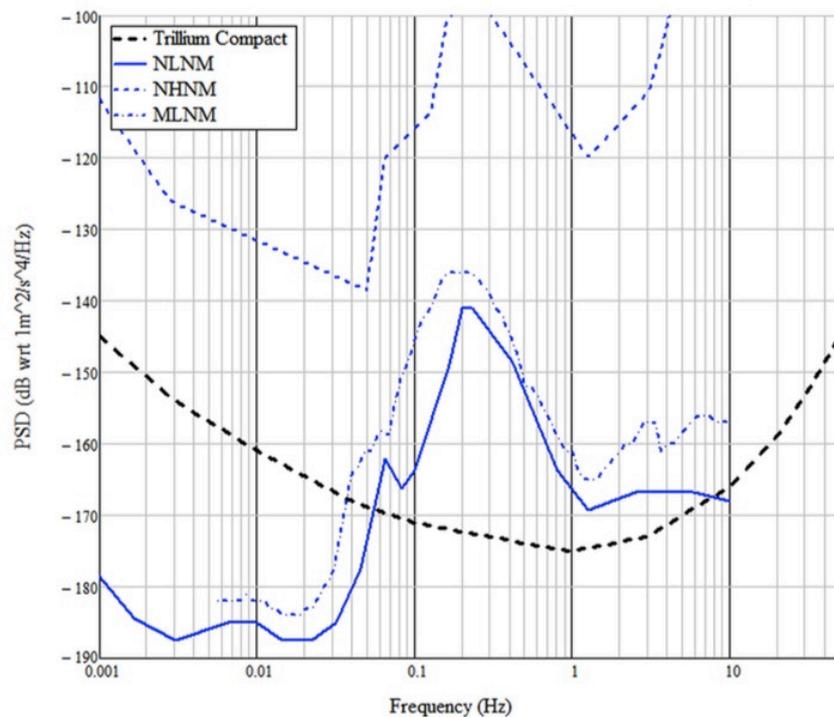


図9 Trillium Compact 120 の self-noise. 同地震計の User Guide[6] から引用.

1.5 今後の課題

- ・ self-noise の山を線形近似して自分で作成し、その影響をみる。
- ・ 自分の作成したプログラムを見直す
- ・ パワースペクトルより ADC 雑音が勝っている部分の原因を確認する。
- ・ NS 方向だけでなく、WE や Z 方向のパワーも使用して解析する。

2 ロックロスの原因調査

ロックロスが起きた時、何が原因なのか知りたい。この章ではロックロスの原因を特定して、その割合を円グラフとして表す。(図 13) 結論としては IMC が半分以上の割合を占めていたことがわかったので、以降はそれを中心に改良していくべきであろう。

2.1 モチベーション

この解析が完了すれば、何が一番ロックロスを引き起こしているのかがわかる。例えばある程度観測を行った後、ロックロス原因の大半が装置 A によるものと判明した場合、次の運転の前に装置 A を重点的に改善すれば良いと目星がつけられて効率が良い。そうして手早くロックロスを減らしていけるので、重力波検出可能時間を増やすことに繋がる。

2.2 対象と概要

解析に使用したデータは、マイケルソン干渉計 (MICH)、インプットモードクリーナー (IMC)、フィードバック制御信号 (FEED)、ビームスプッリター周辺の地面振動データ (SEIS) である。^{*3} それぞれのチャンネル名は 0.2 節で記した通り。

解析の大まかな方法は次のよう。まずは各要素 (MICH, IMC, FEED, SEIS) が正常運転しているかどうかを判別する boolean を作る。次にロックが落ちた瞬間を抜き出して、その時刻での他の要素の boolean を参照して原因を特定する。

2.3 boolean の作成

MICH と IMC に関してはもともとデータが boolean 型 (正常であれば 1, 異常時は 0) になっていたため、そのまま活用する。FEED と SEIS については boolean 型に変更して扱いやすくする。

2.3.1 FEED の boolean

運転時に作動していたプログラムによると、FEED はその信号の絶対値が 25000 を越えるとサチるように設定されていた。FEED が閾値を超えてからまた 0 に戻るまでの時間の出力を 0(異常時)、それ以外の出力を 1(正常時) とする boolean を作成し、FEEDstate と呼ぶことにする。^{*4}

^{*3} X-end と Y-end の地震計のデータは用いていない。

^{*4} この boolean の作成方法は改めるべきだと感じている。後述の通り FEED は閾値を超えた後一旦制御を止め、落ち着いてから再始動する。この停止期間の出力を 0 とするように boolean を作成した方が良いかもしれない。その場合、FEED がいつ停止していつ始動したのかを判定するプログラムが必要になるが、今後の課題である。

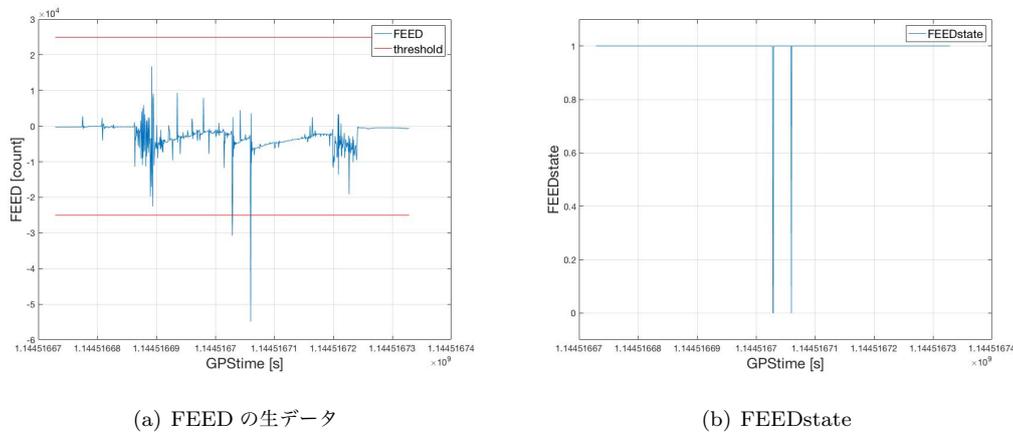


図 10 FEED 信号が閾値を超える様子. (b) は (a) を元に作成した FEEDstate で, 二度出力が 0 になっているのがわかる.

2.3.2 SEIS の boolean

次は SEIS のパワーを計算し, 典型的な値より大きくなっていけば 1(異常時) を, それ以外を 0(正常時) とする boolean を作成し, SEISstate と呼ぶことにする. 移動標準偏差 (movstd) 関数で周辺 3 秒のデータを用いてパワーを割り出し, BS, NE, Z の 3 方向について足し上げた. Root Mean Square ではなく Standard Deviation を使用することで, 地面振動の中心がドリフトする影響を除くことができる.*⁵ SEISstate をプロットすると図 11(a) のようになり, 典型的なパワーを視覚的に求められるので, 閾値を赤線として設定した. この赤線を超えたときに SEISstate が 1 を吐き出す. こうして作成した SEISstate を確認すると, 1 秒未満間隔の $0 \leftrightarrow 1$ 振動が多く現れるので,*⁶ 時刻 t_s で state が 1 となっていれば $t_s - 1 \leq t \leq t_s + 1$ sec の state も 1 とするように (便宜的に) 修正した. 実際に SEIS と SEISstate を同時にプロットしたものが図 11(b) である.

2.4 ロックロス原因の解析方法

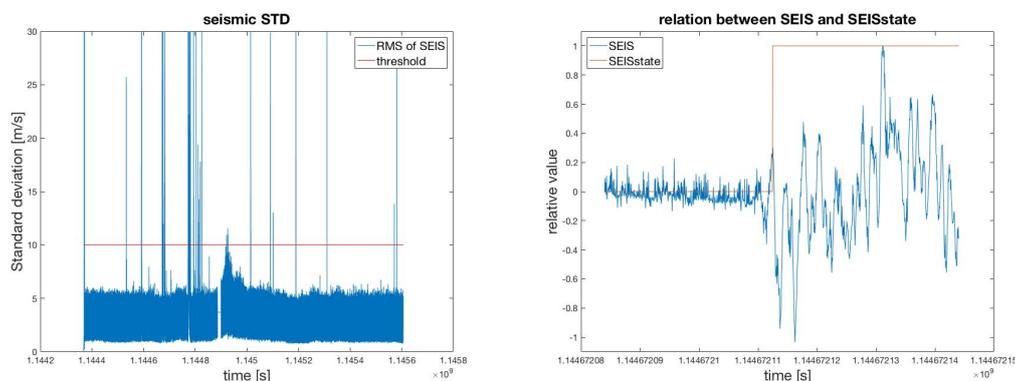
ここまで MICH, IMC, FEED, SEIS の boolean を用意したので, それらを用いてロックロスの原因を決定していく. まず MICH のデータからロックロスが起きた時刻を抜き出し, その時刻に他の要素が異常を示しているか調べる.

2.4.1 データの飛び

まずデータの飛びについて説明する. MICH, IMC, FEED, SEIS のデータには本来飛びがないのだが, 実際には一部欠損がある. 例えば KAGRA logbook[9] にエクアドル地震について記載があるが, 今回使用したデータにはその部分が抜けている. それぞれのデータは 2.8% のデータが喪失しており, 飛んでいる箇所は全く同じである. つまり何かの要因があつて欠損が起きたのだと推測される. 欠損箇所を調べたところ, 512 の

*⁵ 後述するが, 地面振動には周期 100 秒くらいの波などが存在して, その影響を除くことを主な目的としている. またここでは標準偏差を使用しているので, 実際にはパワーではなくその平方根に相当するものを指す.

*⁶ 地震の最中でも一瞬だけ地面振動のパワーが小さくなって閾値を下回ることがある.



(a) SEIS の典型的なパワー (の平方根)

(b) SEIS と SEISstate の関係

図 11 SEISstate の作成. (a) は SEIS のパワーで, 赤線を閾値とした. (b) は SEIS とそれに対応する SEISstate の図.

倍数個の連続データが丸ごと飛んでいることがわかった. サンプル周波数が 16 Hz なのでこれは 32 sec ごとにデータ欠損が起きていることに相当している. つまり地震計は正しく動いていたが, データ取得などの際に破損したものと考えられる.*7

2.4.2 対象となるロックロス

対象となるロックロスの選び方を説明する. MICH がのロックが落ちた瞬間の時刻 $\{t_j\}$ を抜き出し, 次の条件を満たすものに着目する.

- $t_j - 10 \leq t \leq t_j$ sec でデータに飛びがない
- $t_j - 15 \leq t < t_j$ sec の間は常に MICH の出力が 1 になっている

ロックロス周辺のデータを使用して解析するので第一の条件を課した. 第二の条件については干渉計が安定な状態のものを解析したいので課した.*8 条件を満たす時刻は 132 個のみ. 以下でどの要素が原因なのか絞りながら探していく.

2.4.3 原因の特定方法

IMC, FEED, SEIS のデータをどのような優先順位をもって解析すべきか説明する.

まず初めに見るべきは SEIS である. それは地震が来れば干渉計全体に影響を及ぼしてしまうからである. その次に注目するのは IMC で, IMC が正常に動いていなければ光が出て来ないため FEED の制御にも影響を与えてしまう. 簡単にまとめると以下の順序で解析を行った.

*7 飛びのないデータは端山先生にお願いして取得を試みている最中である. 今後はデータ取得の際に欠損がないか確認するステップを導入すべき.

*8 例えば MICH の出力が 0 から 1 に戻った数秒後にまた 0 になったとすると, それはロックが回復した後再び落ちたというより, まだ正常に運転できる状態ではなかったと考えるべきであろう. なお, 15 sec という値は解析に都合の良いように設定した.

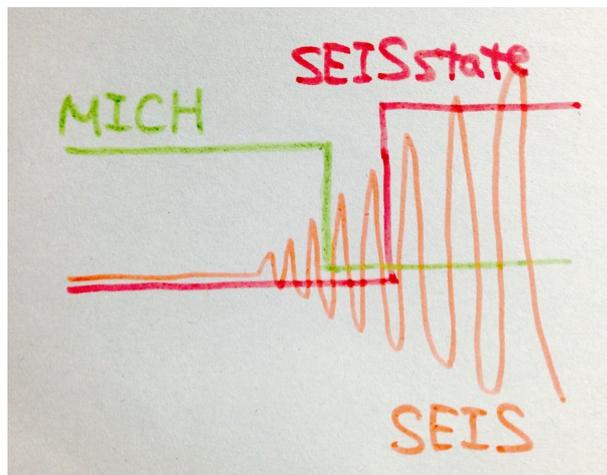


図 12 SEISstate とロックが落ちる瞬間の関係

ロックロス原因の解析手順

- (1) まず SEIS が原因か調べる.
- (2) (1) で決定しないものについて, IMC が原因か調べる.
- (3) (2) で決定しないものについて, FEED が原因か調べる.
- (4) (3) で決定しないものについて, 原因不明 (unknown) とした.

より詳細な説明に移る. SEISstate は地面振動が大きくなったときに 1 を出力するように作成した. しかしロックロスは地震が大きくなる前に起こる傾向があり, その時の地面振動のパワーは (設定した閾値よりも) 低くて boolean に引っかけられない.(図 12 参照.) そのような理由から $t_j - 10 \leq t \leq t_j + 10$ sec に SEISstate が 1 となる時刻があれば, SEIS が原因であると定めた.*9

次に IMC について着目する. もし IMC が原因のロックロスの場合, (どちらのデータも 1Hz でダウンサンプリングしているので,) 同時に落ちているはずである.

最後に FEED について. FEED の絶対値が閾値 25000 を越えると制御を一旦止めて落ち着くまで待つような設定になっている. 閾値を超えるまでは正しく制御できるが, 超えてから停止している間は制御できていない. ゆえに FEEDstate が 1 を超えた後から幾秒の間にロックが落ちていれば FEED が原因である. そのため $t_j \leq t \leq t_j + 10$ 秒に FEEDstate が 1 となる時刻があれば, FEED が原因であると定めた.

上に述べた方法で原因が特定できないロックロスを unknown と分類した. その中で同じ特徴を示すロックロスが存在したので説明する. MICH が落ちた数秒後 (2~9 秒後) に IMC が落ちるものが 7 例あった. MICH と IMC の因果関係を考えるとこれらには相関がないことになるが, あまりにも多く現れているので「IMC-following」として別に扱った. 考えられる原因としては, IMC がふらついて干渉計へ送られる光量が減り, 先に MICH がその制御を失ってから, 後を追うように IMC が落ちた場合である.

以上の解析を行って原因の割合を円グラフで表したものが図 13 である.

*9 では, ロックロスが起きたときの地面振動パワーを閾値に取れば良いと考えるかもしれない. しかしそれでは閾値が低すぎて, ノイズのようなものまで拾ってしまうので今回は却下した.

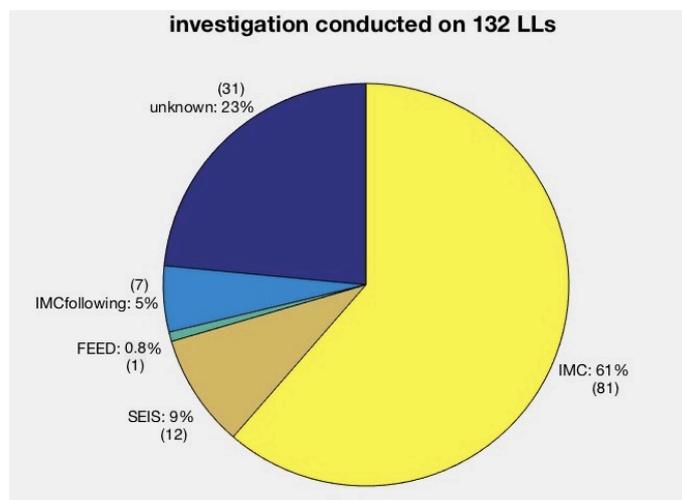


図 13 ロックロス原因の割合. 括弧内の数字は実際のイベント数を表す.

グラフからほとんどの原因が IMC によるものだとわかる. まずこの部分を優先して改善すべきである. その次に SEIS が続き, FEED はあまり影響してこない. SEIS は大きな地震が起きた数にほぼ比例するため, 我々人間にはそう変えられないであろう. 試運転期間はたまたま熊本地震と重なっていたため, 地震の少ない平常時は SEIS の割合が半分以下に減ると思われる. 原因不明の割合は全体の 1/4 もあって, まだまだ詳細な解析が必要であることがわかる.

2.5 今後の課題

この解析を続けるにあたっての今後の課題を述べる.

2.5.1 自動化

取得したデータを常時入力することで, ロックロス原因の割合を示す円グラフを運転中に即時更新しながら表示するようにしたい. そのためには自動化する必要がある.

2.5.2 解析方法の精査

今回の解析では, 勝手に SEISstate の裾を広げたり, 移動平均や移動標準偏差の計算データ範囲, あるいは SEIS のパワーの閾値などを大雑把に設定した. また MICH のロックが回復してから何秒安定状態にあったかを要請すべきかもわからない.(この解析では 10 秒と設定した.) この設定値がどこまで正しいかは, 多くのデータを扱っていく中で決められるものであり, 検証が必要である.

2.5.3 さらなる解析

unknown の割合が 23% もあるので, 別のデータも参照しながら原因追及する必要があると感じる. 特に, ビームスプリッターの並進, 角度揺れデータを優先的に解析すべきであると考えられる.*¹⁰

*¹⁰ 宇宙線研究所の三代氏の解析に基づく考察.

3 ロックロスと地面振動の関係

前章に関連して、地震によるロックロスへの影響を調べることにする。地面振動によってロックロスが起きた場合、それがどの地震によるものなのかを特定することができ、そのデータが蓄積していけば、どのような地震が起きた時にロックが落ちるかがわかる。今回の解析によって、マグニチュード $M < 2.0$ の地震ではロックが落ちないこと、ロックロスを引き起こした地震は $M > 4.2$ であったことが明らかになった。章の最後では contour map を用いてロックロスを起こした地震の距離と方位を図示する。

3.1 モチベーション

この解析が完了すれば「このくらい強い地震だとロックロスが起きる」「この程度の地震ならロックは落ちない」ということが経験則として得られる。実際に地震が起きた時に震源との距離、地震の強さなどのデータが得られれば、経験則を元にして適切な対応が取れる。

具体的には、少し遠いところで大きな地震が起こったとする。地震波が来る前に地震情報を取得し、あらかじめ観測装置を固く制御することでロックロスを防ぐことができる。ロックが落ちてしまうと復旧までに時間がかかる上に、その間に来た重力波を検出できない。未然に防ぐことができれば、早く復旧可能な上、常に観測状態にあることができる。

現在地中にあるのは KAGRA のみで、地中の干渉計に対する地震の影響は詳しく知られていない。この解析が大型重力波観測に役立つかもしれない。

3.2 対象と概要

マイケルソン干渉計 (MICH) はモードクリーナー (IMC) 等によってロックされた状態に保たれている。IMC が機能しなくなる (dead) と、MICH もロックが外れてしまう。大きい地震が神岡に届くと MICH のロックロスを引き起こすが、そこには地震によって MICH のロックを直接外してしまう場合と、地震が IMC を攻撃した結果 MICH がロックロスする場合がある。しかしこの両者を完全に分離することはできない。そこで今回は MICH がロックロスした時に IMC が alive か dead かで分離 (図 14 参照) し、以降は前者を NI (Not Detected by IMC)、後者を DI (Detected by IMC) と呼ぶことにする。^{*11} IMC の方が MICH より固く制御しているため、イメージとしては NI は弱い P 波が、DI は強い S 波が多く占める。

^{*11} 他の要因も考慮していくと、この呼び方はいずれ変える必要がある。とりあえず NI と DI のどちらも地震によって起きたロックロスを指していることに注意して読み進めていただきたい。

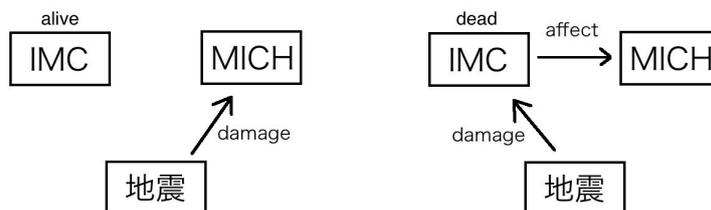


図 14 IMC と MICH と地震の関係. 地震が直接 MICH のみを攻撃する場合 (左) を NI, 地震が IMC を攻撃する場合 (右) を DI と呼ぶことにする.

両者は見ている対象が違うことに注意. NI では MICH が落ちた瞬間を, DI では IMC が落ちた瞬間を捉える.

地震波で対象の制御が外れた場合, もちろんその瞬間の地面振動は大きい. 逆に, 対象が落ちた瞬間に地面振動が大きくなっていけば, 地震が原因である可能性が高い. 地面振動のデータと実際の地震情報を照らし合わせることで, どの地震が原因となっていたのか, あるいは地震は無関係なのかを明らかにすることができる.

3.3 対象となるロックロス

前述のようにデータには飛びが存在するので, 解析では飛びのないところを使用する. 解析方法は下に述べる.

NI の場合

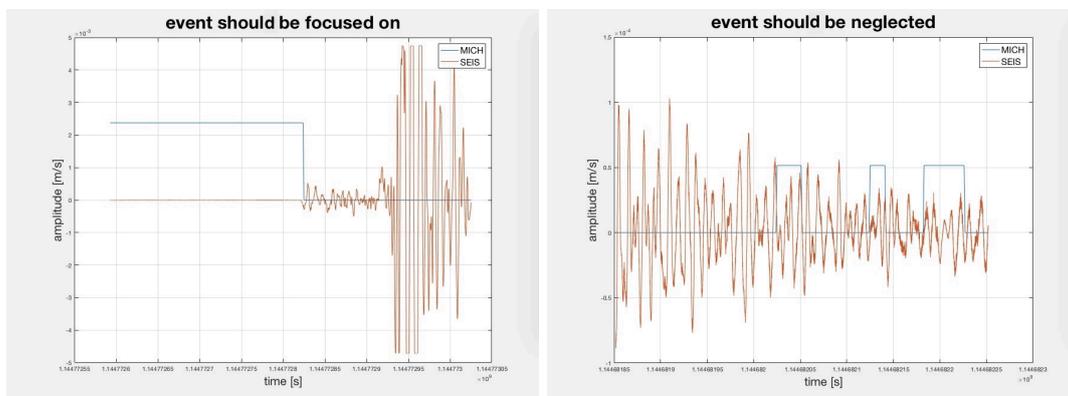
MICH が dead となった瞬間の時刻 $\{t_j\}$ を抜き出し, 次の条件を満たすものに着目する. ただし 3 つ目の条件は目で見て判断する.*¹² 3 つ目の条件を示す例としては図 15 の通り.

- $t_j - 10 \leq t \leq t_j \text{ sec}$ でデータに飛びがない
- $t = t_j$ で IMC が正常に機能している
- 地震到達によってロックが落ちたと判断される*¹³

条件を満たす時刻は 7 個のみ. 以下でどの地震が原因なのか絞りながら探していく.

*¹² ロックロス前後の RMS の比を計算してそれが大きければ「地震波が原因でロックが落ちた」ということが自動的にわかるであろう. しかしこの手法では半分程度までしか絞ることができない. なぜなら, (目で見て判断して) 地震が原因のロックロスの中には RMS 比が 1.23 と小さいものがあるためである. 結局は人間が波形を見て判断しなければならないと思われる. それでもやはり全てを目で見るのは大変なので, 他の判別法を探さなければならない.

*¹³ 図 15 にもある通り, 一つの地震によって複数回ロックロスが起きることがある. 今回の解析では「ロックロスを引き起こすのはどのような地震か」という情報を知りたいので, 地震波到達時のロックロスだけを抜き出すことにする. ただし地震の P 波と S 波は別個にして扱う.



(a) 条件を満たす例

(b) 条件を満たさない例

図 15 3つ目の条件の例. 赤が地震波形を, 青が MICH の状態を表す. (a) は地震によって MICH が落ちている様子が見て取れる. 一方 (b) の時刻も地面振動が大きく地震によってロックが落ちていると考えられるが, これは地震の途中段階であって, 地震到達時のロックロスではないので対象から除かれる.

DI の場合

IMC が dead になった瞬間の時刻 $\{t_j\}$ を抜き出し, 次の条件を満たすものに着目する. ただし 2つ目の条件は目で見て判断する.

- $t_j - 10 \leq t \leq t_j \text{ sec}$ でデータに飛びがない
- 地震到達によってロックが落ちたと判断される

条件を満たす時刻は 2 個のみ. 以下は NI の場合と同様に絞って精査する.

3.4 地震候補の絞り込み

地震によってロックロスが起きた時刻を全て抜き出すことができた^{*14}ので, それぞれのロックロスはどの地震が原因なのかを特定していく. そのために次の 2つの条件を用いた. (i) 各地震の距離情報から求まる地震波予想到達時刻にロックロスが起きていること. (ii) マグニチュードがある程度大きいこと. これらを以下で詳しく解説する.

3.4.1 時刻と距離から特定

USGS[10] と気象庁 [11] の地震情報を取得すれば, 地震発生時刻, 震源 (ならびに震源までの距離) がわかる. また, 気象庁 [11] には地震波の進行速度の情報もある. これらを照らし合わせれば, 時刻に関して候補を絞ることができる.

気象庁の走時表のデータを利用すると, 震源から距離 r 離れた地点に P 波あるいは S 波が t 秒後に到達する, という情報がわかる. それを横軸を時間, 縦軸を距離で表したものが図 16 である.^{*15} ただし距離は (震央

^{*14} 確実に全てを抜き出せたのかについては曖昧さが残る. 現在考えているロックロス時刻検出方法については 3.8.3 節参照.

^{*15} 気象庁のデータは様々な震央距離と深さに対する地震波の到達時間を (誤差なしで) 表すものである. 本解析では震源との直線距離で評価するが, 実際の地震波は直進するわけではないので, その差分が速度曲線の幅のように現れている.

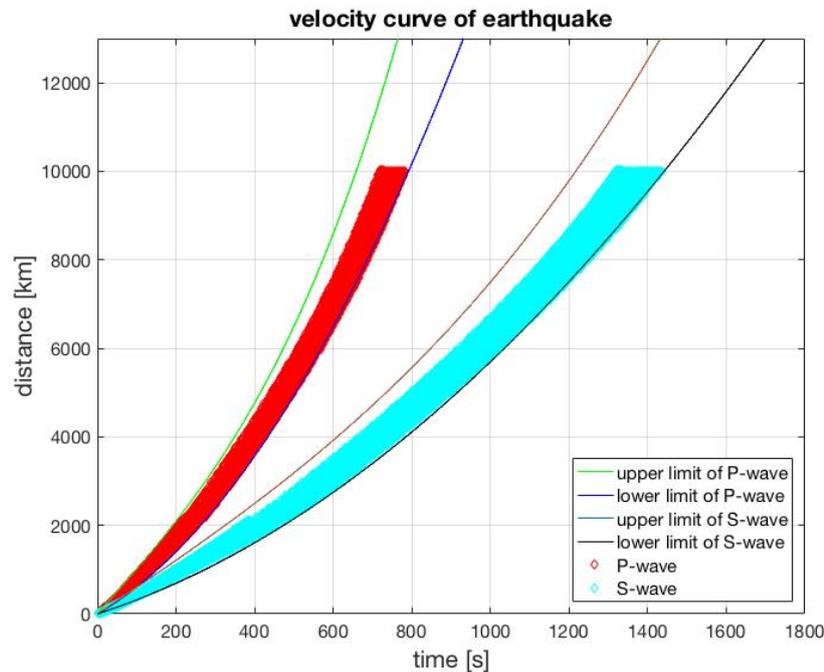


図 16 地震の速度曲線. 気象庁 [11] のデータを利用して作成. 左側が P 波, 右側が S 波を表す.

距離ではなく) 直線距離を採用した. 速度の上限については時間に関する三次関数で, 下限は二次関数でフィッティングした.*16*17 これにより, 震源までの距離が分かれば, その地震波の到達時刻を予測することができる.

3.4.2 マグニチュード (と距離) から特定

上で挙げたサイトにはマグニチュード (M) の情報も載っている. 例えば神岡のすぐ近くで小さな地震が起きてその時ロックが外れなかった, ということがあったとすると, その M 以下ではロックが外れない, つまりその M 以下の地震はそもそも無視して良いということがわかる.

実際に神岡周辺の地震を調べたところ, 半径 30 km 以内で起きた地震 (maxM=2.0) では全くロックが落ちなかった. よって以降はマグニチュードが 2.0 より大きい地震のみを扱う.*18

マグニチュードと距離の情報を利用して地震波の距離減衰を考えるとさらに候補を絞り込むことができる

*16 時間を t , 距離を d としてフィッティング曲線は

$$\text{P 波上限} : d = 0.000012t^3 + 10t$$

$$\text{P 波下限} : d = 0.0095t^2 + 5.12t$$

$$\text{S 波上限} : d = 0.0000015t^3 + 6t$$

$$\text{S 波下限} : d = 0.0028t^2 + 2.9t$$

と設定した.

*17 地球の直径は 12742 km なので, この距離まででフィッティングできていれば十分.

*18 マグニチュードの定義には様々あり, 気象庁マグニチュード M_j やモーメントマグニチュード M_w などがある. その定義の違いによって同じ地震でも値が異なってしまうが, どの定義かによらずマグニチュードが 2.0 以下のものを無視することにする. それは次の 3 つの理由による. 異なる定義間での変換式がないこと, 定義は違えどその値はさほど変わらないこと (1 割以下の差), 神岡から 115 km 以内 (maxM=2.4) でロックロスがなかったためマグニチュード 2.0 で切っても問題ないことである.

が、今回の解析では用いないことにする。^{*19}

3.5 地震絞り込みの結果

上の特定方法を用いた結果、ロックロスを引き起こした地震の候補をあげることができた。注目すべきロックロスは全部で9個 (NI について7個, DI について2個) だけあり、その時の地面振動波形を図17に^{*20}、地震候補を表3,表4に記した。地震の詳細は表5,表6にある。ただしロックロスの内2つ (NI ④と DI ①) は同じ地震を表しているため、対象となる地震は8個である。

具体的な見方としては、表3の num=④に注目すると、そのロックロスは GPS 時刻 1144772825 (2016/4/15 16:26:48 (UTC)) で起きており、その時の地面振動が P 波だと仮定して USGS のデータを用いると、地震番号 356 が候補となる。USGS のデータは表5に記してあり、その 356 番を参照すると熊本で起きたマグニチュード7の地震であるとわかる。なおこのロックロスが起きた時の地面振動波形 (図17(d)) を目で確認すると P 波であった。

別の例として表3の num=⑥に注目すると、これは目で地震波形 (図17(f)) を確認した結果おそらく S 波だと思われるが、P 波がノイズに埋もれているために確証はない。S 波と仮定して気象庁のデータを用いると候補が2つあったので、それをマグニチュードの大きい順に列挙した。そのうち第一候補の地震番号を太文字にしてある。

第一候補の地震は次の基準 (i),(ii) で選んでいる。(i) マグニチュードが (他の候補に比べて) 大きい。(ii) 目で確認した波種 (P または S) と一致する。

一応注意しておくが、USGS と気象庁の両方に候補として挙がっているからといってそれが有力であるとは限らない。USGS データは世界中で起きた大きな地震情報のみを持ち、気象庁データは日本で観測された地震情報のみを持つ。世界の遠くで起きたが日本に届かなかった地震は USGS のみに含まれ、日本近傍で起きた小さい地震は気象庁のみに含まれていることになる。両方に含まれる地震はただそのマグニチュードが大きく日本にまで届いていたという意味でしかない。もちろんロックロスは強い地震によって起きやすく、それは両方に同じ地震データをして含まれているため、どちらからも候補に挙げられることにはなる。

P 波によって起こされたと判断されるロックロスについてさらに第一候補の妥当性を吟味してみる。これらに関しては P 波の後に S 波が現れており、S 波が到達した時刻を知ることができる。^{*21} 一方、候補地震の距離情報から S 波の到達予想時刻がわかる。この両者を比較することによって絞り込みの正当性を調べられる。^{*22} 該当するロックロス (NI ①~③)^{*23} に対して実際に照合してみると確かに到達予想時間内に他一方の波が来ており、第一候補が妥当だと判断される。

^{*19} 地震波は長い距離を移動する間に減衰し、(信憑性はわからないが) それを表した式が提示されている。[12]

$$\ln A = b - \ln(X + c) - kX$$

ここに A は振幅、 X は距離、 b, c, k は定数である。この式を用いて多少絞ることも可能である。

^{*20} 縦軸は統一していない。ここではロックロス時に地面振動が大きくなっている様を見ることを目的としている。異なる地震によって速度のオーダーが違いすぎる (大きいもので 10^{-3} m/s, 小さいもので 10^{-5} m/s) のため、縦軸を揃えると一方が潰れてしまう。また ADC によって地面振動速度 [m/s] が ± 10 V の 16 ビットデータに置き換えられて出力されるため、その逆変換として伝達関数 $G = 749.1$ V/(m/s) で割っているが、これは特定周波数領域外では成り立っていない。(図5参照)

^{*21} P 波だとわかるのはその後に S 波が来ているからである。

^{*22} 逆の調査 (S 波が原因のロックロスから P 波を調べる) も同様に行うことができる。しかし S 波だと判断されるのは DI ②だけであり、これについては P 波がいつ到達したのか決定できなかった。一般に P → S 波を探すのは簡単だが、その逆はノイズに埋もれてしまうことが多く困難である。

^{*23} NI ④も P 波であるが、同地震の S 波は DI ①であってすでに妥当性が示されている。

表3 NIについて各ロックロスがどの地震で引き起こされたのか候補を列挙したもの。
 ここで、num:ロックロス番号, 波形:目で見て判断した地震波形, GPS:ロックロスが起きた時刻. 右の4つは、候補となる地震番号をマグニチュードの大きい順に列挙したもので、0は候補となるものを表す。地震番号は次頁以降の表と対応している。P, Sは仮定した波の種類を、(USGS), (気象庁)は地震データの参照先を意味する。太文字の番号は第一候補の地震で、USGSと気象庁の両方に太文字がある場合は同一地震である。

num	波形	GPS	P(USGS)	S(USGS)	P(気象庁)	S(気象庁)
①	P	1144591374	181	181	2417-2422	2417
②	P	1144672114	245-244-243	245-244-242-243	2992	2992
③	P	1144681548	268	268-265	3414-3413	3414-3411-3413
④	P	1144772825	356	356-355	4644-4645	4644
⑤	S?	1145091371	694	695-692-693	0	12384
⑥	S?	1145190067	799	799-796-797	13493	13493-13491
⑦	S?	1145581285	0	1087	0	17011

表4 DIについて上と同様に候補を列挙したもの。
 なお、DI①はNI④と同じ地震である。(NIやDIの定義は図14を参照のこと.)

num	波形	GPS	P(USGS)	S(USGS)	P(気象庁)	S(気象庁)
①	S	1144772931	0	356-355	4646-4647-4649	4644-4645-4646
②	S	1144778818	0	374	5155-5157-5158-5162-5163-5148-5160	5152-5155-5157-5158-5148-5151-5160-5150

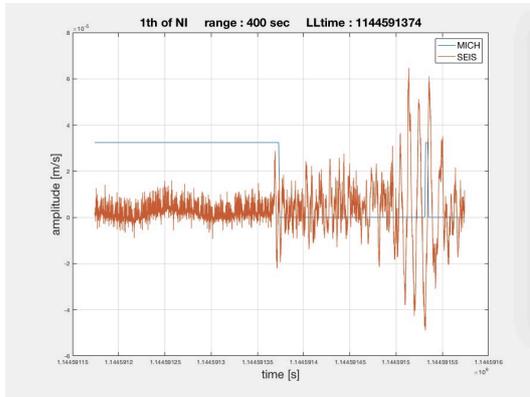
表5 USGSの地震データ。太文字は第一候補の地震であることを表す。
 num:地震番号, GPS:地震発生時刻, lati:緯度 [度], long:経度 [度], depth:深度 [km], dist:神岡までの距離 [km], mag:マグニチュード, magtype:マグニチュードの定義, place:震源場所
 マグニチュードの定義は以下の通り.[13] mww:centeroid moment tensor から計算したモーメントマグニチュード, mwr:moment tensor から計算したモーメントマグニチュード, ml:Richter が定義した最大振幅から計算したマグニチュード, mb:短期間の表面波に対して振幅から計算したマグニチュード, Md:減衰時間から計算したマグニチュード

num	GPS	lati	long	depth	dist	mag	magtype	place
181	1144590935	23.09	94.87	136	4199	6.9	mww	75km SE of Mawlaik, Burma
242	1144671022	36.17	-96.81	5.01	9152	3	ml	11km WNW of Yale, Oklahoma
243	1144671285	36.17	-96.81	3.722	9153	2.5	ml	11km WNW of Yale, Oklahoma
244	1144671442	-14.49	166.5	7.47	6168	5.9	mww	85km NW of Port-Olry, Vanuatu
245	1144672013	32.79	130.7	9	728.4	6.2	mww	3km W of Kumamoto-shi, Japan
265	1144680516	-5.717	149.4	156.4	4684	4.7	mb	56km NNW of Kandrian, Papua New Guinea
268	1144681444	32.7	130.7	8	733.1	6	mww	5km ENE of Uto, Japan
355	1144771814	19.69	-65.14	25	11030	3	Md	150km N of Charlotte Amalie, U.S. Virgin Islands
356	1144772723	32.79	130.8	10	724.4	7	mww	1km E of Kumamoto-shi, Japan
374	1144778608	32.92	131	4.35	696	5.4	mwr	15km ENE of Ozu, Japan
692	1145089558	-55.69	-27.19	10	12510	4.5	mb	112km N of Visokoi Island, South Georgia and the South Sandwich Islands
693	1145090449	-10.23	161.7	68.81	5560	4.4	mb	32km NW of Kirakira, Solomon Islands
694	1145091013	-0.238	124.8	54.79	4184	4.1	mb	110km SSE of Lolayan, Indonesia
695	1145091152	32.56	130.6	5.4	750.5	5.3	mww	6km NNE of Yatsushiro, Japan
796	1145189181	-14.69	166.2	35	6158	4.5	mb	101km WNW of Port-Olry, Vanuatu
797	1145189299	6.946	123.6	32.66	3511	4.3	mb	51km WNW of Gadung, Philippines
799	1145190001	37.8	141.6	33.11	410.8	5.9	mww	65km ENE of Namie, Japan
1087	1145581243	35.17	137.5	45.5	146.3	4.4	mb	29km N of Shinshiro, Japan

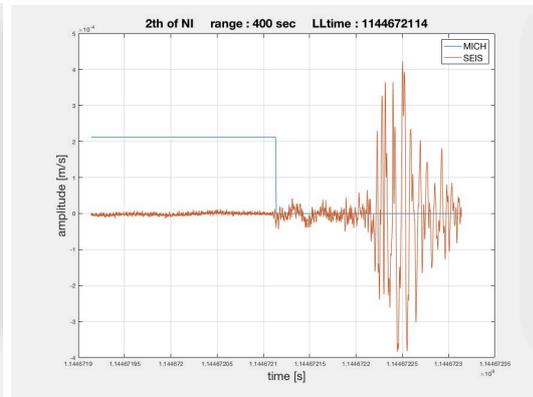
表6 気象庁の地震データ。太文字は第一候補の地震であることを表す。

num:地震番号, GPS:地震発生時刻, lati:緯度 [度], long:経度 [度], depth:深度 [度], dist:神岡までの距離 [km], mag:マグニチュード, magtype:マグニチュードの定義, place:震源場所
 マグニチュードの定義は以下の通り.[11] B:USGS等が計算した実体波マグニチュード, D または V または v:気象庁マグニチュード

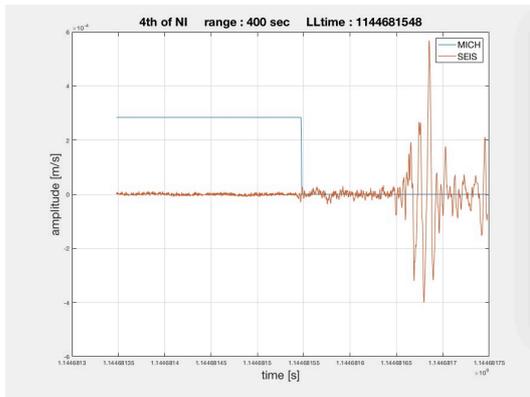
num	GPS	lati	long	depth	dist	mag	magtype	place
2417	1144590935	23.06	94.52	136	4229	6.9	B	MYANMAR-INDIA BORDER
2422	1144591308	40.06	142.1	10	578.2	2.4	V	NE OFF IWATE PREF 40K
2992	1144672011	32.45	130.5	11	767.3	6.5	D	NW KUMAMOTO PREF 19K
3411	1144681368	32.43	130.5	13	771	2.8	V	NW KUMAMOTO PREF 20K
3413	1144681421	32.44	130.5	10	768.4	2.2	V	NW KUMAMOTO PREF 20K
3414	1144681443	32.42	130.5	6	770.6	6.4	D	NW KUMAMOTO PREF 20K
4644	1144772722	32.45	130.5	12	768.8	7.3	D	NW KUMAMOTO PREF 20K
4645	1144772755	33.16	131.2	11	665.6	5.7	v	NORTHERN OITA PREF 18K
4646	1144772830	32.4	130.4	10	774.2	4.7	V	NW KUMAMOTO PREF 20K
4647	1144772840	32.51	130.5	7	758.9	4.6	V	NW KUMAMOTO PREF 13K
4649	1144772874	33.16	131.2	8	665.9	3.7	v	NORTHERN OITA PREF 9S
5148	1144778568	25	124.2	10	1779	2.6	V	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS 12K
5150	1144778581	32.43	130.5	7	769.3	2.2	V	NW KUMAMOTO PREF 12K
5151	1144778587	32.57	131	10	717.6	2.5	V	NE KUMAMOTO PREF 13K
5152	1144778608	32.58	131.1	6	716.5	5.9	D	NE KUMAMOTO PREF 20K
5155	1144778690	32.58	131	10	716.6	3.7	V	NE KUMAMOTO PREF 15K
5157	1144778706	32.59	131	9	716.4	3.6	V	NE KUMAMOTO PREF 11K
5158	1144778715	32.59	131.1	10	714.7	3.3	v	NE KUMAMOTO PREF 11K
5160	1144778726	32.58	131.1	11	714.9	2.5	v	NE KUMAMOTO PREF 7K
5162	1144778739	32.58	131	11	717.2	3.2	V	NE KUMAMOTO PREF 20K
5163	1144778754	32.57	131.1	10	716.2	2.7	V	NE KUMAMOTO PREF 14K
12384	1145091151	32.32	130.4	9	783.5	5.5	D	SOUTHERN KUMAMOTO PREF 20K
13491	1145189838	32.39	130.4	10	776.5	2.2	V	NW KUMAMOTO PREF 20K
13493	1145190001	37.46	141.4	48	382.6	5.8	D	E OFF FUKUSHIMA PREF 34K
17011	1145581242	35.05	137.3	43	156.9	4.2	D	NE AICHI PREF 35K



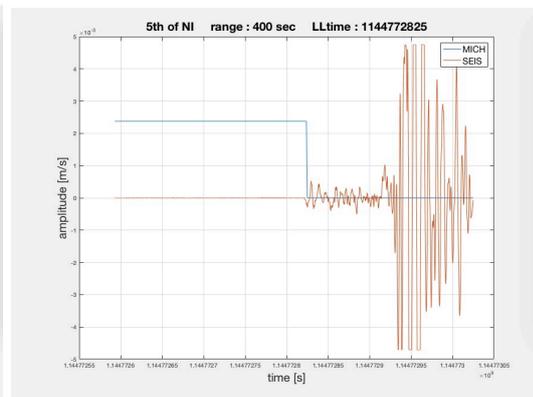
(a) NI ①



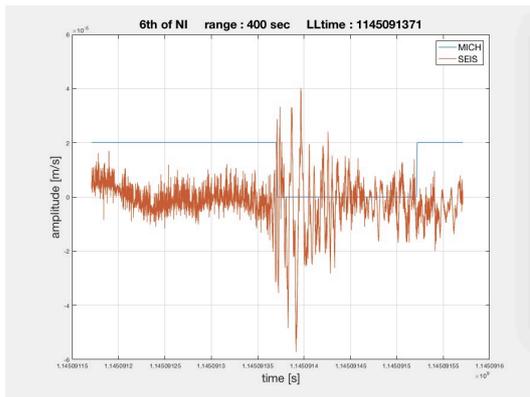
(b) NI ②



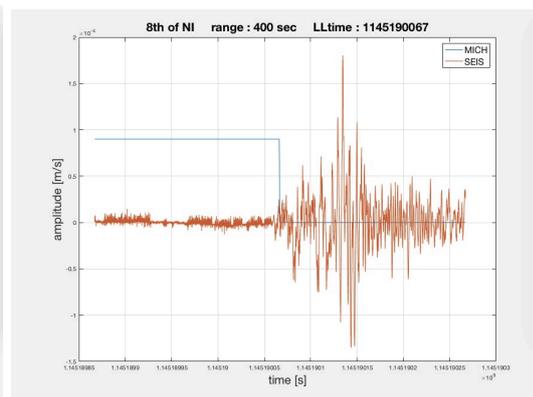
(c) NI ③



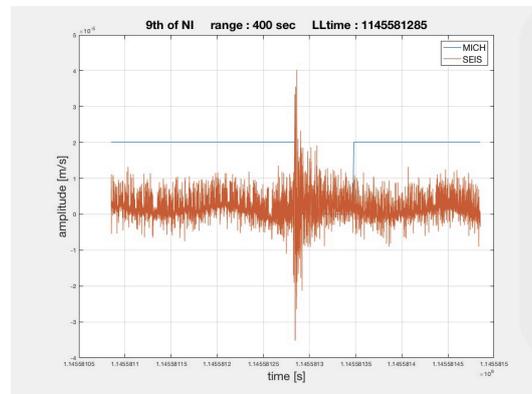
(d) NI ④



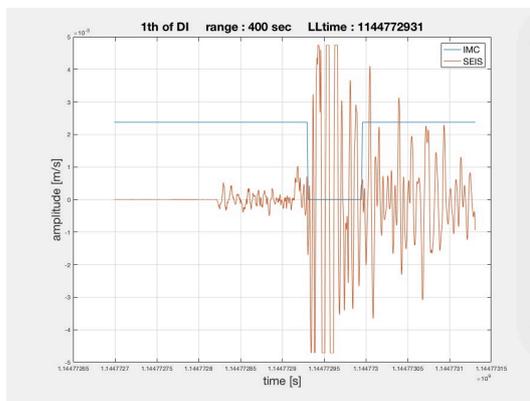
(e) NI ⑤



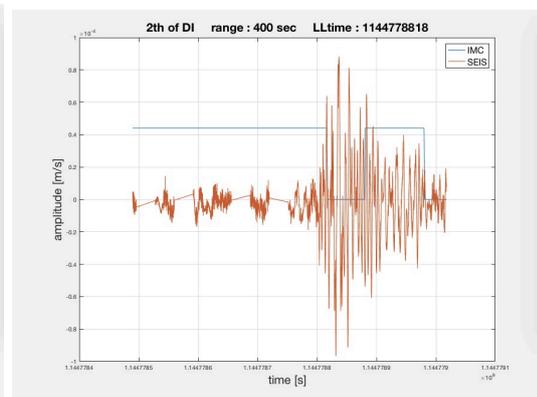
(f) NI ⑥



(g) NI ⑦



(h) DI ①



(i) DI ②

図 17 ロックロスが起きた時の地面振動波形。(横軸:時間 [sec], 縦軸:振幅 [m/s]) ロックロス時に地面振動が大きくなっていることが見て取れる。縦軸は統一していないが、その理由は脚注 (*20) に記載。また、NI や DI の定義は図 14 を参照のこと。

3.6 contour map

ロックロスを引き起こした地震が確定したのでそれを contour map 上に表してみる。この場合の contour map とは、神岡を中心とした正距離方位図に地震情報を加えたものである。

図 18 に contour map を示した。試運転の時期に熊本地震が起きたためもあってか、原因となった地震は日本に集中している。今回のデータではエクアドルで起きた M= 7.8 の地震の時刻がちょうど欠損しているが、Klog によるとその地震によってロックが落ちたと記載されているので、[9] 完全なデータが手に入れば contour map にエクアドルが加わる。

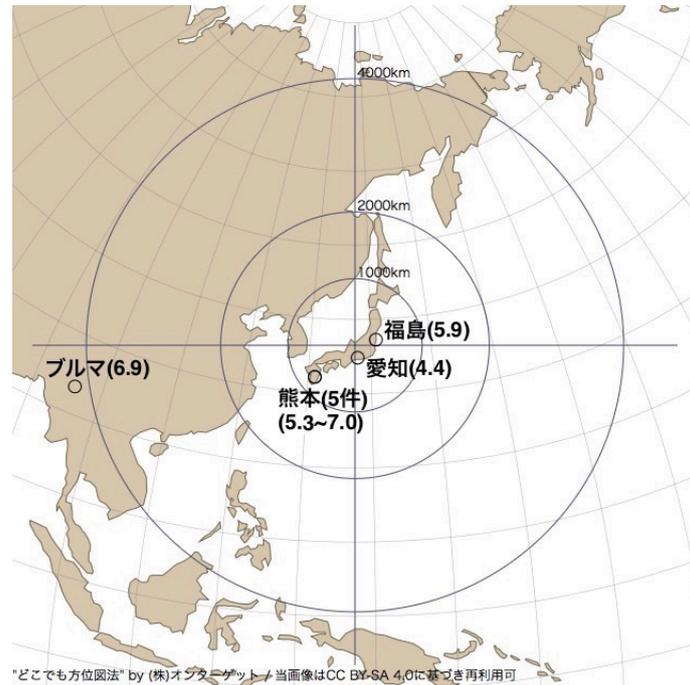


図 18 contour map. 神岡からの距離と方位が正しい。括弧内はマグニチュードで、その定義は USGS での値に従っている。(表 5 参照。) 上を北、右を東に取ってある。どこでも方位図法 (株) オンターゲット [14] の図を使用。

表 7 ロックロスを引き起こした地震の情報をまとめたもの。USGS(表 5) から抜き出した。

GPS:地震発生時刻, mag:マグニチュード, magtype:マグニチュードの定義, place:震源場所
 マグニチュードの定義の詳細は表 5 に記載。

GPS	波形	mag	magtype	place
1144590935	P	6.9	mww	75km SE of Mawlaik, Burma
1144672013	P	6.2	mww	3km W of Kumamoto-shi, Japan
1144681444	P	6	mww	5km ENE of Uto, Japan
1144772723	P&S	7	mww	1km E of Kumamoto-shi, Japan
1144778608	S	5.4	mwr	15km ENE of Ozu, Japan
1145091152	S?	5.3	mww	6km NNE of Yatsushiro, Japan
1145190001	S?	5.9	mww	65km ENE of Namie, Japan
1145581243	S?	4.4	mb	29km N of Shinshiro, Japan

3.7 ロックロスを引き起こした地震からの考察

ロックロスを引き起こした地震の中でマグニチュードの最小値は 4.4 である。^{*24} よってこれより大きい地震が起きた時は警戒する必要があるとわかる。しかしマグニチュード 4.4 のような大きい地震が起きた時に警戒する必要があるのは当たり前なので、警戒すべきかのギリギリのところをより細かに調べる必要がある。

そのためには弱い地震でロックロスが起きた例を知る必要があり、地面振動波形から地震とノイズを高精度で区別できなければならない。

3.8 今後の課題

地震特定最終目標としては、どのような地震が起きた時に対処行動を取らないといけないのかを知ることである。そのためにはロックロスを引き起こす地震の特徴を知ることが必要で、しばらく地震特定を続けることになる。その際一つ一つ地震波形を見て判別するのは大変かつ精度が悪い。この点について 3.8.1 節～3.8.4 節に詳しく書いた。その他の様々な課題についても記した。

3.8.1 プログラムの自動化

現在の段階では、まず

① MICH, IMC, SEIS のデータからロックロスを探し出し、その時刻を抜き出す (自動)

↓

② 目で見て解析すべきロックロスを選ぶ (手動)

という作業を行った後で、

③ USGS, 気象庁からデータを取得する (手動)

↓

④ 文字列を分解して GPS 時間, 震源, マグニチュード情報を取得する (手動)

↓

⑤ ロックロス候補となる地震を見つける (自動)

↓

⑥ 挙げられた候補の中でどれがもっともらしいか判断する (手動)

という流れである。これをできるだけ自動化したいのだが、②と⑥が困難に思われる。これらを実行するには、ロックロスの中から地震によるものだけを抜き出し、しかもそれが P 波なのか S 波なのかも判別する必要がある。現段階では USGS と気象庁のデータの中で、どの地震が同じものを指しているのかを自動判別することもできていない。③と④に関しては自動化を行って、さらにデータベース化したい。すると計算速度が向上する上に誰でも使用できるようになる。

3.8.2 P 波と S 波の判別

P 波と S 波の判別ができるようになれば地震特定の精度が向上する。この解析では原因地震を P (または S) だと仮定して特定した。また、同じ地震について P と S が両方見つまっている場合、その到達時間の差から震

^{*24} ただ、上の表を見てみると M=4.4 の地震 (NI ⑦) だけ、他の地震に比べてマグニチュードがかなり小さく出ているようにも思える。つまり NI ⑦のロックロスは地震が原因ではないかもしれない。さらなる調査が必要である。

源までの距離が精度よく求めることができる。なので波の種類を判別することは非常に重要である。

この解析では BS 周辺の NS 方向のデータしか使用していないが、これに加えて WE 方向や Z 方向のデータも用いれば、揺れの方向依存性から P 波と S 波を区別できるかもしれない。^{*25}

波種がわかっている地震波形をたくさん用意して機械学習を行い、それを元に地震波判別をする方法も考えられる。これができれば自動的に地震波を取り出して波種まで求めることができるので、可能ならば取り組みたい。まずは地震データを手に入れるところから始めてみようと思う。

P 波と S 波を見つけたとしても、それが同一地震によるものだと判断させるのはなかなか難しい。その方法は考えなければならない。

3.8.3 地震とノイズの判別

前項の内容と関連する。ロックロスを引き起こす地震のサンプル数を増やすためには、ノイズに見えてしまう程度の弱い地震を取り出す必要がある。これが完了すれば、警戒地震のマグニチュードの閾値をさらに下げることができる。

その手法として、第一に機械学習をもちいる方法。第二に、複数の地震計データを足し上げることで、地震波を増幅しつつノイズを打ち消す方法がある。後者の注意点として、3 km 離れた地震計には幾秒遅れて到達するので、地震波の方向に応じて時間シフトすることが必要である。あるいは全方向を丸ごとカバーできるように様々な時間シフトを用意して、パワーの最も大きくなった方向を地震波の方向とするのも手である。

地震波検出に成功すれば、データ取得期間に届いた地震波形を自動で検出して、それぞれどの地震に対応しているのかを見ることができる。するとこの地震ではロックが落ちて、この地震では大丈夫だった、ということがわかって警戒地震を下からも評価することが容易になる。

3.8.4 ロックロスに繋がる警戒地震の特徴の調査

現在はまだサンプル数が少なくわからないが、いずれはロックロスを引き起こすような地震の特徴を求めることができる。機械学習によってパラメータ (マグニチュード, 距離, 方向, 深さ, あるいは加速度など) の重みづけを求めることで、実際に地震が発生した時にその情報を取得して危険かどうか判断できるようになる。

また、ロックロスを引き起こす地震の特徴だけでなく、ロックロスを引き起こさないような地震の特徴についても調べる必要がある。前述のように、弱い地震はノイズに埋もれて判別ができないため、ロックロスが起こっていない時刻に到達すべき地震を抜き出すのが良い。

以下、様々な課題を記す。

3.8.5 他のデータも加味した地震解析

今回の解析では、地震が MICH のみを攻撃する場合 (NI) と、IMC を攻撃する場合 (DI) に大別した。しかしこの中にも様々なロックロスの経路があり、ビームスプリッターを揺らしたもの、X-Yend を揺らしたもの、... と色々考えられる。今後は多くのデータを参照して、どこに地震が強く影響していたのかを見るべきである。例えば FEED の情報を用いれば少なくともどの鏡が影響を受けていたかがわかる。すると、どのような地震がどこに攻撃するのかがわかって、対処しやすくなる。

^{*25} 少なくとも表面波は区別できるのではないかと考えている。表面波は距離減衰が小さく、遠方地震では主要波となる。[15]

3.8.6 他の地震計のデータとの相関から Local な雑音と地震を区別

題目の通り. Xend, Yend の 3 方向データも用いる必要がある. 地震だと思って解析していたものが, 実はただのローカルなノイズだったりするかもしれない.

3.8.7 地震とグリッジの相関

地面振動と重力波信号は波形が似ているため, その判別が重要である. グリッジリストと地震リストを比較して相関を取ることで, 地震のグリッジへの影響を調べることができる. グリッジに現れるような地震の特徴 (パワーや波種など) がわかれば解析効率向上に繋がる.

3.8.8 距離減衰の効果を導入

特定できた地震について, 震源と神岡での揺れを比較して距離減衰の式を確認し, 警戒地震の条件に加味する.

3.8.9 地震波の理解

これまで地震波は神岡まで直進するとみなして震源との直線距離しか考えていなかったが, 実際には曲がって伝わることも考えられる. 地球内部には核 (ドロドロの液体) などがあるために, 地震波の進行速度が変わったり特に S 波が多く屈折してしまって地震波の届かない地域 (シャドーゾーン) が存在する.[16] さらに P 波と S 波だけでなく表面波の存在も考えなければいけない. より地震のことを理解してその性質を解析に組み込む必要がある.

3.8.10 contour map の三次元化

距離と方向に加えて深さの情報も考慮することで, 三次元 (立体地球儀型) の contour map を製作する.

3.8.11 飛びのないデータの使用

使用したデータの欠損部分にエクアドルで起きた大きな地震が含まれていた. そこが補えれば地震のサンプル数が増える.

3.8.12 Python にコード変更

現在は Matlab を用いて解析しているが, これは有料ソフトで誰でも所有しているわけではない. 誰もが同じ解析をできるように C あるいは Python に直す必要があるかもしれない.

3.9 遠い先の目標

- ロックロスに繋がる地震が起きた時に自動で警報を出す
- 地震波形の移動に伴う減衰や広がりなどを完全に理解することができれば, 遠くで地震が起きた時にその情報を取得して神岡に到達した時の揺れがわかり, 逆位相をかけてやることで地震-free な干渉計を作ることができる.

- 周期 100 秒程度の波の原因を特定する

ロックロスが起きた時刻周辺の地震波形を見ていると, 周期 100~200 秒の地面振動が現れることがある.(図

19 参照.) 調べてみると”地球自由振動”なるものが候補にあり, これは地球をぐるぐる回る地震波なので周期的に来るはずである. しかしこの地面振動は長時間にわたって常に存在しているので特徴に合わない. 今後はこの波の正体を探ることが必要である. 例えばこの波の前に大きい地震はなかったか, この波は何秒続いていてその間に他のデータに異常がなかったか, など調査するべきである.

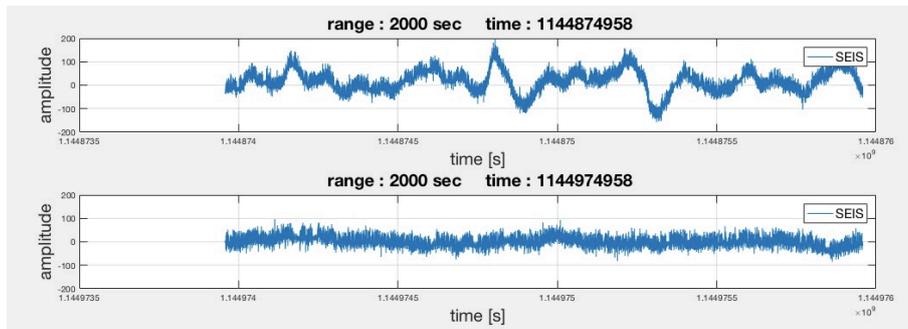


図 19 100 秒周期の地面振動 (上) 長周期の波, (下) 通常時の地面振動

4 iKAGRA の改善すべき点

この章は iKAGRA のプロジェクトチームで用いられているプログラムやデータの改善すべき点を挙げていくもので、本レポートでの解析内容とは独立する。

データの飛び

2.4.1 節でも説明した通り、データ輸送の時に欠損が生まれてしまっている。データが送られてきた時に破損がないかチェックする機能が必要だと考えられる。

Gardian error

2.3.1 節でも説明した通り、FEED はその信号の絶対値が 25000 を超えるとサチるように設定されていた。しかし実際には図 20 のように、信号が頭打ちにならないはずのところ矩形波となっており、FEED を制御する Gardian に不具合が生じていることが見て取れる。

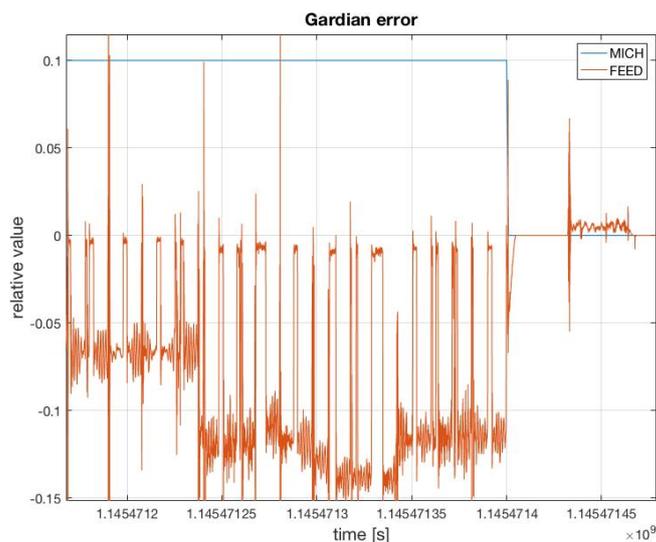


図 20 FEED の機能を制御する Gardian に不具合が生じている様子。FEED に関して縦軸は $1/25000$ に規格化しており、値が ± 1 を超えるとサチる設定となっているはずである。しかし頭打ちになるべきでないところで矩形波が出力されていて、Gardian に何か問題があることがわかる。

IMC と MICH の因果に矛盾

IMC が機能していない時は干渉計に光が入射しないため、MICH もロックが外れた状態になっているはずである。しかし実際には図 21 のように、IMC が落ちているのにも関わらず MICH が 1 を出力している瞬間が存在する。MICH のロックを判断するプログラムに問題があるのではないかと考えられる。

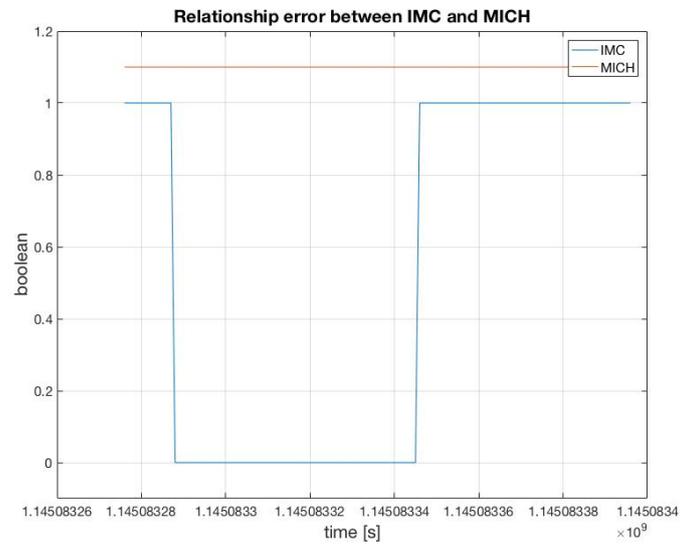


図 21 IMC と MICH の因果に矛盾が生じている様子. 本来は IMC が落ちているときは MICH も落ちていなければならない.

参考文献

- [1] NAOJ, Homepage, news
<https://www.nao.ac.jp/news/topics/2015/20151116-kagra.html>
- [2] 麻生洋一, 国立天文台, 重力波天文学 II 講義資料, 干渉計型重力波検出器 KAGRA の仕組み
<https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/DocDB/0029/G1402990/001/Ochadai-Rigakusouron.pdf>
- [3] 道村唯太, 東京大学, 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状, 日本物理学会 2016 年秋季大会
https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/DocDB/0053/G1605389/003/JPS2016s_michimura.pdf
- [4] Takanori Sekiguchi, Seismic Spectrum in Kamioka Mine
https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/DocDB/0029/T1402971/001/141106_seismic_noise.pdf
- [5] J. Peterson, " Observation and modeling of seismic background noise" , US department of interior geological survey, open-file report 93-232 (1993)
- [6] TrilliumCompact_UserGuide.16889R2
ftp://trovador.iag.usp.br/pub/nanometrics_manuals/TrilliumCompact_UserGuide_16889R2.pdf
- [7] Gravitational Radiation Detection with Laser Interferometry - Adhikari, Rana X Rev.Mod.Phys. 86 (2014) 121 arXiv:1305.5188 [gr-qc] LIGO-P1200121
- [8] Aso, Y., and A. Araya, 2012, Kamioka seismic data, personal communication.
- [9] KAGRA logbook
<http://klog.icrr.u-tokyo.ac.jp/osl/?r=1560>
- [10] The USGS Earthquake Hazards Program
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- [11] 国土交通省, 地震月報
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>
- [12] 司宏俊, 翠川三郎, 東京工業大学, 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式
<http://www.midorikawa.enveng.titech.ac.jp/pdf/attenuation1999.pdf>
- [13] The USGS Earthquake Hazards Program, Magnitudes commonly used by seismic networks include
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/terms.php>
- [14] どこでも方位図法, (株) オンターゲット
<http://maps.ontarget.cc/azmap/>
- [15] 八木勇治, 筑波大学, 地球変動科学の講義資料
<http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/text/2013Geodynamics2.pdf>
- [16] The USGS Earthquake Hazards Program, Earthquake Glossary, shadow zone の説明
<https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?termID=170&alpha=S>

改訂箇所

2017/9/4

- 誤植修正
- 速度曲線の図 16 を変更
- contour map (図 18) のマグニチュードの定義を USGS に変更
- 脚注*24 を追加
- 3.8.4 節に文章を追加