

高感度地震観測網 (Hi-net) による花崗岩地帯の ILC 施設への発破振動影響検討

A STUDY OF BLASTING VIBRATION INFLUENCE TO ILC PROJECT USING HIGH SENSITIVITY SEISMOGRAPH NETWORKS (HI-NET) IN GRANITE SITE

関根一郎^{#, A)}, 若竹亮^{A)}, 吉岡正和^{B)}, 佐貫智行^{B)}, 山下了^{C)}, 汐見勝彦^{D)}, 坪川恒也^{E)}
Ichiro Sekine^{#, A)}, Ryou Wakatake^{A)}, Masakazu Yoshioka^{B)}, Tomoyuki Sanuki^{B)}, Satoru Yamashita^{C)},
Katsuhiko Shiomi^{D)}, Tsuneya Tsubokawa^{E)}

^{A)} Toda Corporation, ^{B)} Tohoku University, ^{C)} Tokyo University, ^{D)} NIED, ^{E)} Shin_ei Keisoku

Abstract

ILC is expected of invitation to Japan. In order to increase collision energies, it's considered that ILC extends the length of beamline during an experiment. Blasting is used for extended excavation in tunnel facilities, so it's necessary to study the influence that blasting vibration gives for an experiment. In this report we studied the blasting vibration observed by seismograph of Hi-net etc. and researched the data about the spread of the blasting vibration to the distant place. As a result, the blasting vibration from the distant place was attenuated and was getting very small.

1. はじめに

日本への立地が期待されている国際リニアコライダー (ILC) は段階的な施設整備が検討され (ステージング)、実験を行いながら衝突エネルギーを上げるために施設を延長することが検討されている。トンネル施設の掘削延長には発破を使用することが想定され、発破振動が実験に与える影響を調べる必要がある。発破振動が周辺民家等に与える影響を検討することはトンネル工事でも行われており予測式もあるが、通常 100m 以内の至近距離にある場合が対象であり、掘削位置での発破振動が 1 km 以上離れた遠隔地に伝わる状況に関するデータは多くない。

国立研究開発法人防災科学技術研究所では、阪神・淡路大震災の後、全国に地震観測網を配備した。高感度地震観測網 (Hi-net) では地下約-100m に高感度の地震計を設置し貴重なデータが収集保存されており、そのデータを活用して ILC の立地する基盤の調査分析を進めてきた [1][2]。本報告では、Hi-net と江刺地球潮汐観測施設に設置した地震計を利用し、花崗岩地帯での発破による振動が遠隔地に伝わる状況に関するデータを収集し、遠隔地からの発破による振動の伝搬について検討した。

2. 花崗岩地帯における掘削に伴う発破振動

2.1 測定位置及び振源、振動計測方法

花崗岩地帯に掘削したトンネルの発破振動の伝播を掘削時の発破記録と Hi-net の観測データを使用して調べた。実施地点は 2 か所で、位置関係図を Figure 1, 2 に示すように、茨城県桜川市の岩瀬トンネルの発破振動を Hi-net の岩瀬観測点で、長野県木曾郡の棧トンネルの発破振動を上松観測点の観測データで調べた。観測点と発破位置の距離はそれぞれ約 4,000m, 2,700m である。

Hi-net の地震記録は 100Hz でサンプリングされており、

[#] ichiro.sekine@toda.co.jp

Figure 3 に示すように、40Hz よりも高周波の成分はフィルターによりカットされている。発破による高周波成分は岩盤伝播中に減衰が大きいと考えられるが、高周波成分のデータ取得には課題が残っている。



Figure 1: Location of Iwase tunnel and Iwase station.

2.2 測定結果

測定結果の一例を Figure 4, 5 に示す。Figure 4 は岩瀬トンネルの発破振動を 4,045m 離れた岩瀬観測点で観測した UD 方向のデータで、a) 図が速度波形である。1 Hz 程度の低周波の常時微動が卓越するため、b) 図では 5Hz でフィルター処理して示した。c) 図ではそれを積分して変位に変換した結果である。変位への変換には建築研究所の公開ソフト View Wave を使用した。Figure 5 は同様に棧トンネルの発破振動を約 2,700m 離れた上松観測点で観測した結果で、明瞭な発破振動が読みと

れる。なお、発破は通常多段でかけられるので、全体の装薬量は多いが、ここでは一段当たりの最大の装薬量をもって装薬量とした。



Figure 2: Location of Kakehashi tunnel and Agematsu station.

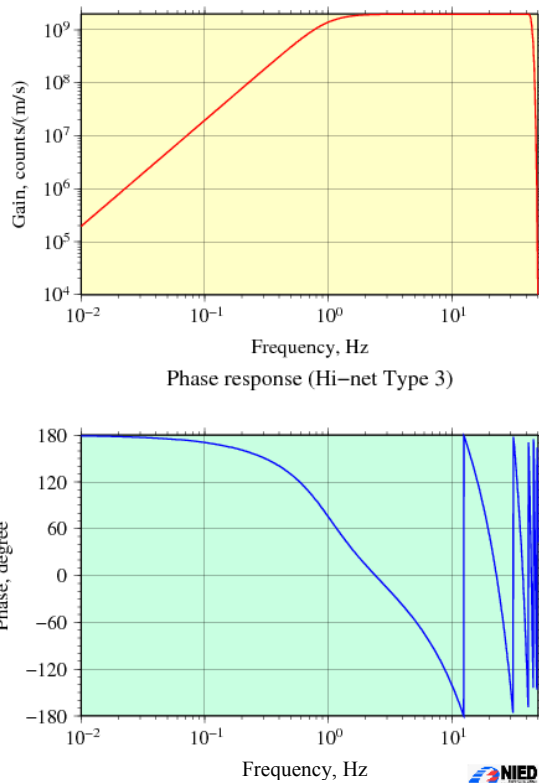
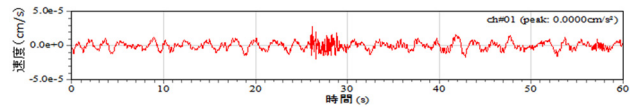


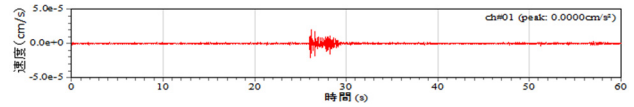
Figure 3: The sensitivity of seismometer used with Hi-net.

次に発破振動の予測に使われる式(1)による推定結果と対比した。

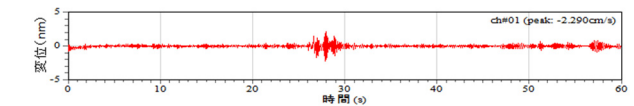
$$V=K \times W^m \times D^n \quad (1)$$



a) Velocity wave form.

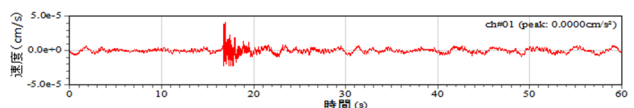


b) Velocity wave form filtered under 5Hz.

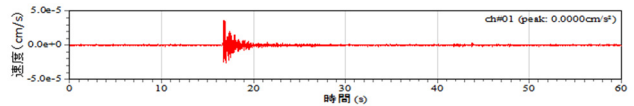


c) Displacement wave form filtered under 5Hz.

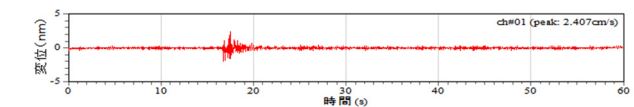
Figure 4: Typical waveform observed at Iwase station caused by blasting at Iwase tunnel. (Time: 2006.3.28 02:19, Charging weight for blasting: 39.9kg/step, Distance: 4,045m).



a) Velocity wave form.



b) Velocity wave form filtered under 5Hz.



c) Displacement wave form filtered under 5Hz.

Figure 5: Typical waveform observed at Agematsu station caused by blasting at Kakehashi tunnel. (Time: 2012.6.13 09:34, Charging weight for blasting: 24kg/step, Distance: 2,660m).

ここに、V:変位速度(cm/s)、K:発破条件や岩盤特性によって変化する係数で200~900程度、W:段当たりの装薬量(kg)、D:発破場所からの距離(m)で、mは通常0.5~1.0の範囲、nは-2前後の値となることが多いとされている[3]。

Figure 6には発破振動の式(1)による推定値と今回の調査の結果得られた上下動成分の変位速度を示した。推定値より実測値はやや低めの値であるが、ほぼ推定値に近い値となった。

Figure 7は発破位置からの距離と上下動成分の変位の関係を整理した結果である。距離による傾向は得られなかったが、発破掘削位置から2~4km離れた観測点で

変位振幅は 1~10nm 程度との結果が得られた。

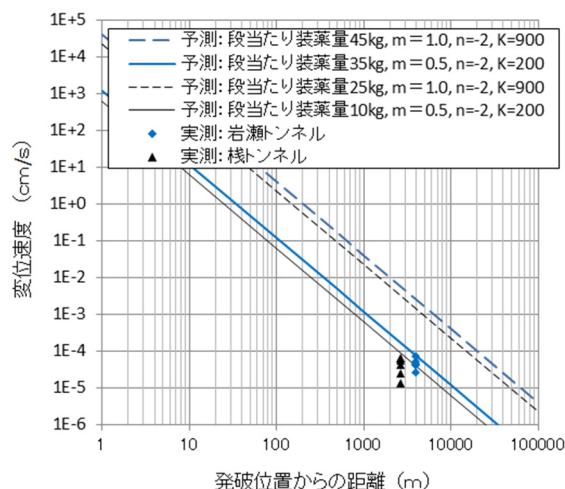


Figure 6: Relation between distance from blasting place and displacement velocity.

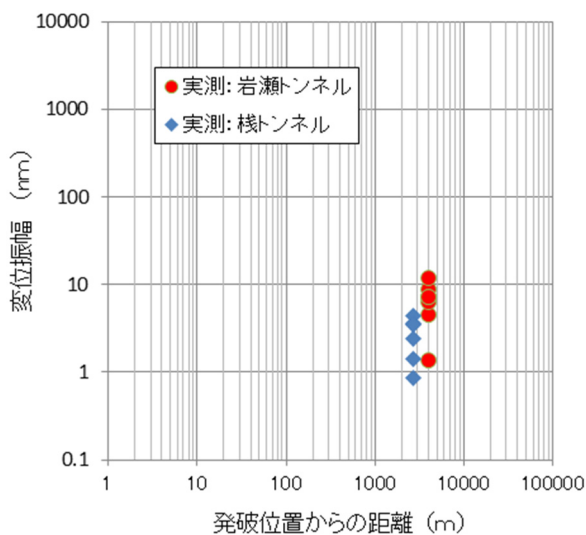


Figure 7: Relation between distance from blasting place and displacement.

3. 北上候補サイトにおける発破振動計測

3.1 測定位置及び振源、振動計測方法

北上候補サイトの人首花崗岩の分布地域において弾性波探査の際の発破振動の伝播について調べた。

Figure 8 に調査位置と ILC の概略位置との関係を示す。阿原山の北斜面で行われた弾性波探査の発破による振動を江刺地球潮汐観測施設の地震計と、Hi-net の東和観測点の地震計で測定した。

Table 1 に本調査で使用した発破の時刻と発破したボーリング孔 No.、江刺地球潮汐観測施設と東和観測点までの距離、発破深度と装薬量を示した。発破孔から江刺地球潮汐観測施設までの距離は、275m~2,950m、東和観測点までの距離は 17.3~20.3kmであった。

Table 2 に本調査で使用した江刺地球潮汐観測施設に設置されている地震計の仕様を示した。地震計は Nanometrics 社製で、100Hz までを測定帯域としている。東和観測点の設置されている地震計の特性は Figure 3 の通りで発破振動の多くが 20~100Hz の帯域にある[4]とされるのに対し、高周波成分が地盤中で減衰しやすいと一般に言われているが、さらに広い帯域での測定も吟味する必要がある。



出典：国土地理院ウェブサイトに加筆

Figure 8: Location of blasting hole, Esashi Earth Tides Station and Towa station.

Table 1: Blasting for This Study

発破時刻 (2016/)	発破孔 No.	江刺地球潮汐観測施設までの距離 (m)	東和観測点までの距離 (m)	発破深度 (m)	装薬量 (kg)
12/5/13:20	Bor.3	1,147	19,103	14.5	1.0
12/6/13:10	Bor.1	2,950	17,300	22.0	2.0
12/6/13:30	Bor.3	1,147	19,103	14.5	1.0
12/6/13:54	Bor.4	275	20,250	14.0	0.2
12/6/14:25	Bor.2	2,022	18,228	20.0	1.0
12/8/12:57	Bor.2	2,022	18,228	20.0	3.0
12/8/13:27	Bor.3	1,147	19,103	20.0	1.5
12/8/14:02	Bor.4	275	20,250	14.0	3.0

Table 2: The Specification of Seismometer Used with Esashi Earth Tides Station

機種	Nanometrics 社製 120s
感度	750V-s/m
帯域(-3dB point)	120 s 100 Hz
速度出力	40 V p-p differential
消費電力	180 mW
動作温度範囲	-40~+70 °C
寸法重量	φ 90mm×H100mm-body 1.2Kg

3.2 測定結果

Figure 9 に江刺地球潮汐観測施設での計測結果の一例を、Figure 10 に同じ発破振動に対する東和観測点での測定結果を示した。図中で a) 上図は 1 分間の UD 方向の速度波形で 1Hz 程度の常時微動が卓越している。a) 下図は発破振動を含む 6 秒間を拡大して示しており、明瞭な発破振動が認められる。b) は a) 下図に 5Hz のフィルターをかけた結果で、1Hz 程度の卓越した常時微動が除去されている。この図から変位速度の最大振幅を求めた。また、c) は変位速度を積分し、変位を求めた結果である。この作業を UD, NS, EW の 3 方向について実施した。

Hi-net では自然の微小地震と発破振動を区別するために、発破位置の推定が行われている[5]。同様な手法により、12/8 14:02 の発破について振動を捉えた青字で示す観測点のデータから震源を求めた結果を Figure 11 に示した。発破位置と求められた震源は整合しており、今回の対象とした振動が発破によるものであることが確認できた。

Table 3 に各発破に対する速度振幅、変位振幅をまとめて示した。上下動成分の変位速度と発破位置からの距離との関係を図化して示したのが Figure 12 で、発破振動の予測に使われる式(1)による推定結果と幅を持って示し、対比した。推定結果と実測値は、0.2~20km の遠隔地でも推定値と比較的近い値が得られた。

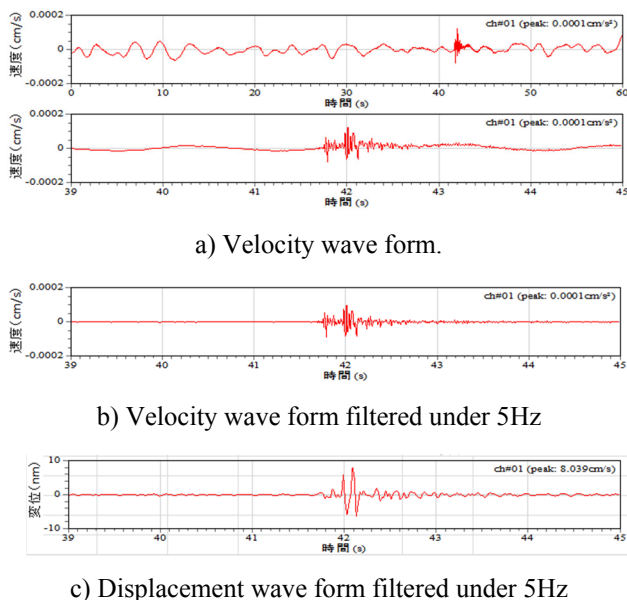


Figure 9: Typical waveform (UD) observed at Esashi Earth Tides Station caused by blasting at Bor.1. (Time: 2016.12.5 13:20, Charging weight for Blasting: 1.0kg, Distance: 1.15km).

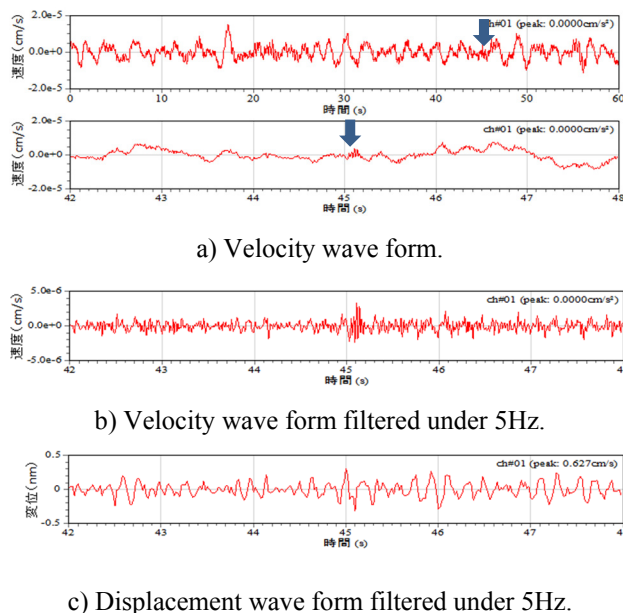


Figure 10: Typical waveform (UD) observed at Towa station caused by blasting at Bor.1. (Time: 2016.12.5 13:20, Charging weight for blasting: 1.0kg, Distance: 19.1km).

また、Figure 13 には発破位置からの距離と上下動成分の変位振幅の関係を示した。発破位置から 1~2km の離れでは変位振幅は 10nm 程度、20km 程度離れた場合は 1nm 程度であることがわかった。この結果は前述したトンネル掘削時の発破の観測結果とも整合的である。但し、この結果は Hi-net の地震計の特性から高周波成分を含んでいない可能性があり、今後さらに調べる必要がある。発破振動はトンネルを掘削する一切羽あたり 0~4 回/日程度の頻度であり、極めて小さな振動が発生するにすぎないことがわかった。

また、掘削時の機械振動については CERN の資料[6]によれば、最も大きなウォーターハンマーでも発破振動より 1 オーダー以上小さく、機械振動の影響はより限定的であると考えられる。

Table 3 の右欄は江刺地球潮汐観測施設と東和観測所の間で測定された弾性波速度である。平均弾性波速度は 5.35km/s で、これは一般的な花崗岩の弾性波速度 2.8~5.3km/s[7]の上限に相当し、このエリアの花崗岩の基盤岩が全体として良好であることを示す一つの根拠になると考える。

Table 3: Measurement Result of Blasting Vibration in Kitakami Candidate Site

発破情報		江刺地球潮汐観測所			東和観測点 (Hi-net)			江刺～東和
発破日時分 (2017.12)	方向	受振時間 秒	速度振幅 (cm/s)	変位振幅 (nm)	受振時間 秒	速度振幅 (cm/s)	変位振幅 (nm)	弾性波速度 (km/s)
5/13:20	UD	41.67	1.89E-04	14.5	45.03	5.75E-06	0.63	5.34
	NS	41.60	2.04E-04	10.1	45.01	7.46E-06	0.37	5.27
	EW	41.65	1.63E-04	8.6	45.06	5.25E-06	0.33	5.27
6/13:10	UD	6.85	1.06E-04	5.80	9.52	8.39E-06	0.51	5.37
	NS	6.80	1.60E-04	8.03	9.53	8.87E-06	0.94	5.26
	EW	6.88	1.16E-04	6.62	9.52	7.67E-06	0.72	5.44
6/13:30	UD	37.42	2.51E-04	20.5				
	NS	37.42	2.65E-04	14.4				
	EW	37.41	2.27E-04	10.7				
6/13:54	UD	5.86	4.94E-03	304.0				
	NS	5.81	2.20E-03	133.0				
	EW	5.78	4.05E-03	207.0				
6/14:25	UD	41.04	2.90E-05	2.14				
	NS	41.05	3.87E-05	1.82				
	EW	41.04	2.49E-05	1.40				
8/12:57	UD	21.99	1.43E-04	11.20	25.06	1.11E-05	0.76	5.28
	NS	22.10	1.84E-04	8.90	25.04	1.37E-05	0.95	5.51
	EW	22.08	1.22E-04	6.67	25.05	7.98E-06	0.61	5.46
8/13:27	UD	36.68	2.26E-04	16.9				
	NS	36.60	2.22E-04	12.3				
	EW	36.61	2.01E-04	10.5				
8/14:02	UD	25.12	6.65E-02	6530	28.82	1.21E-05	0.72	5.32
	NS	25.14	2.94E-02	2570	28.81	1.04E-05	0.75	5.37
	EW	25.11	4.64E-02	2680	28.84	8.45E-06	0.65	5.28

※速度振幅、及び変位振幅については、5Hz以下の振動波をフィルタ処理

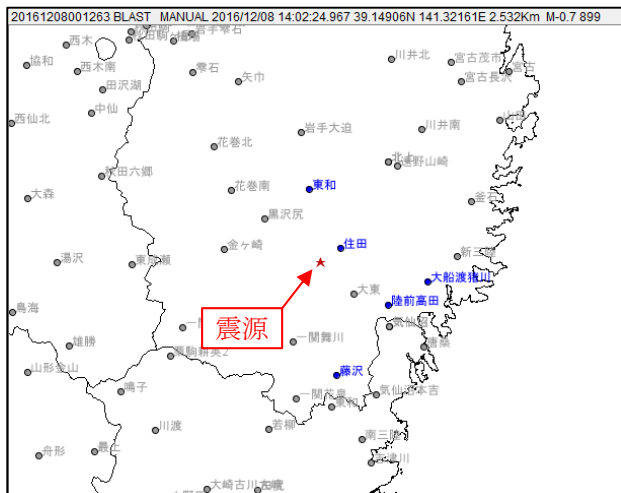


Figure 11: The estimate location of epicenter of vibration.

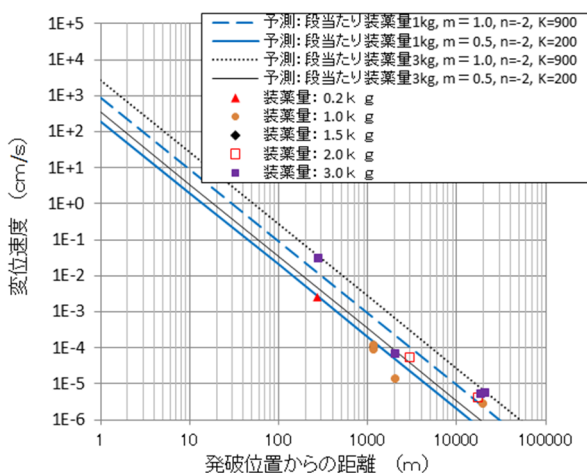


Figure 12: Relation between displacement velocity and the distance from blasting place.

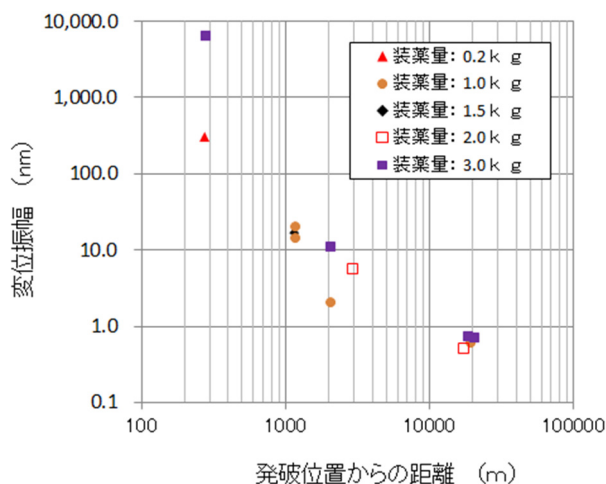


Figure 13: Relation between displacement and the distance from blasting place.

4. まとめ

1) 花崗岩地帯のトンネル掘削時の発破データから、発破に伴う変位振幅が距離 2~4km で 1~10nm 程度との結果が得られた。

2) 人首花崗岩体内で発破振動による遠隔地での振動を調べた。変位速度は従来から使われる発破振動予測式にほぼ整合する結果となった。

3) 変位振幅は、発破位置から 1~2km の距離で 10nm 程度であり、トンネル掘削での発破の頻度が 0~4 回程度であることを踏まえると微小地震に比べて発破振動の影響は極めて少ないと言える。

4) 人首花崗岩の平均弾性波速度は、阿原山北斜面から東和観測点の 20km に渡り 5.35km/s で、極めて良好な花崗岩体が分布することが確認できた。

以上の結果から、発破振動に伴う振動について参考となるデータが得られたと考える。本報告がステージングによる施設整備の参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] 吉岡正和・山下了・佐貫智行・汐見勝彦・関根一郎: ILC 北上候補サイト周辺の高感度地震観測網 Hi-net に併設された高感度加速度計による地盤変動の把握について、第 12 回日本加速器学会年会、2015.
- [2] 関根一郎・早野仁司・吉岡正和・佐貫智行・山下了・汐見勝彦: 基盤強震観測網 KiK-net で得られた ILC 北上候補サイト周辺の地震動の地表・地下比較、第 13 回日本加速器学会年会、2016.
- [3] 日本火薬工業会; あんな発破こんな発破、発破事例集、2002.3.
- [4] 内山成和・大山卓夫・金子忠夫; 発破振動の性状について、応用地質調査事務所年報、No1、1979.
- [5] 汐見勝彦; Hi-net 自動震源決定処理のための発破頻発地域データベースの構築、防災科学技術研究所研究報告 第 83 号、2017.1.
- [6] CERN 資料、ILCAA Civil Subcommittee CERN Visit 13 July 2017.
- [7] 物理探査学会; 物理探査ハンドブック、1998.