



地下深部岩盤の歪変化のメカニズムに関する研究

(共同研究)

Study on Mechanisms of Strain Variation at Great Depth

(Joint Research)

堀内 泰治 平野 享 池田 幸喜 松井 裕哉

Yasuharu HORIUCHI, Toru HIRANO, Koki IKEDA and Hiroya MATSUI

地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

July 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

地下深部岩盤の歪変化のメカニズムに関する研究
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

堀内 泰治[※]、平野 享^{*}、池田 幸喜⁺¹、松井 裕哉

(2010年4月1日受理)

大深度立坑を掘削する際に掘削前方の岩盤のひずみ変化は、立坑掘削において安全上最も重要となる突発湧水や山はね等の突発事象の発生可能性を予測し、それらに対する施工対策を講じるための情報のひとつと期待される。

このような観点から、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所では、名古屋大学との共同研究として研究坑道掘削工事において掘削したパイロットボーリング孔に高精度ひずみ計を設置し、研究坑道掘削中に取得した深度 500m 地点での岩盤のひずみデータを用いて、地球潮汐といった定常的な外力変動や地震および発破などの瞬間的な外力変動等により、岩盤がどのように変形したかを分析した。

その結果、評価できるデータの取得期間は短かったものの、その間のデータ分析などから以下のような知見を得た。

- ・ひずみを生じさせる外力には、地下水位変動や地震動および発破による応力解放などがある。研究坑道掘削に伴う地下水面低下による地下水位変動は、長期的な岩盤の変形を生じさせる要因として重要と考えられる。
- ・地震動および発破による応力解放は非常に短時間に生じるものであり、これらによるひずみ変化は、ほとんどが岩盤の弾性範囲内での微小変形であるため、残留変化を起こすような事例は一部の地震動を除いて見られない。
- ・長期にわたる累積で発生するひずみの変化量やその方向は、初期応力の方向や地質状況の影響を大きく受けると考えられるため、累積したひずみ変化の評価には、周辺の地質環境の情報が非常に重要と考えられる。

また、今回使用した高精度ひずみ計は、鉛直深さで 300m 程度離れた場所の発破による微小変形を観測しえたことから、掘削面前方の岩盤の剛性の違いなどの岩盤状況を相当離れた位置から把握できる可能性が示された。一方で、立坑掘削再開後、本計測においてデータ取得が極めて困難な状況になったことから、新たなデータ収録方法の検討の必要性も明らかとなった。

東濃地科学センター (駐在) : 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

+1 ; 東濃地科学センター施設建設課

※ ; 技術開発協力員

* ; 西松建設株式会社 (元 技術開発協力員)

Study on Mechanisms of Strain Variation at Great Depth
(Joint Research)

Yasuharu HORIUCHI✂, Toru HIRANO*, Koki IKEDA⁺¹ and Hiroya MATSUI

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received April 1,2010)

Knowledge of strain variations at an excavation face is important for the prediction of rock bursts and for the application of the appropriate supplementary construction methods for excavation of shafts to great depths.

With the above as objectives, JAEA (Japan Atomic Energy Agency) installed “intelligent” strain meters (resolution in the order of 10^{-9}), developed by TRIES (Tono Research Institute of Earthquake Science), at G.L-500m depth in pilot boreholes drilled from the 200m level in the ventilation and main shafts of the Mizunami URL (Underground Research Laboratory) in the Joint research with Nagoya University.

Strain variations due to several events including the excavation itself were monitored and analyzed. Because of the breakdown of the monitoring system, the data is very short term. Nevertheless, it was possible to do some analysis for the study and important understanding derived from the analysis includes:

- Ground water pressure changes due to earth tides, stress relief due to earthquakes and blasting are main factors for very small strain changes. Especially, changes to the groundwater table due to excavation are important to understanding the mechanism for long-term continuous strain change.
- Strain changes due to earthquakes and blasting are instantaneous and most of the change is within the elastic limit. A total of eighteen earthquakes were observed from October 2007 to February 2008. A small residual deformation was measured from one of the observed earthquakes.
- The magnitude and the direction of the strain increment over the long-term are influenced by the *in-situ* stress state in the geological structure. Therefore, information on the geological environment where strain is monitored is considered necessary to understand behavior.

Monitoring results indicate that the intelligent type strain meter is able to measure very small fluctuations (10^{-9}) and detect rock deformation from blasting with 300m vertical separation from the measurement section. The strain meter can detect conditions in the rock mass such as differences in deformability. On the other hand, it is very important to improve the total measurement system for stable monitoring.

Keywords: Strain Variation, Earth Tide, The Intelligent Type Strain Meter

⁺¹ ; Geoscience Facility Construction Section, Tono Geoscience Center

✂ ; Collaborating Engineer

* ; Nishimatsu Construction Co., Ltd (Formerly, Collaborating Engineer)

目 次

1. 共同研究の目的	1
2. 共同研究の概要	1
2.1 共同研究名	1
2.2 共同研究先	1
2.3 研究内容	1
3. 実施内容	2
3.1 高精度ひずみ計の概要	2
3.2 パイロットボーリング孔への高精度ひずみ計の設置作業	4
3.3 高精度ひずみ計による計測作業	7
4. 計測結果	9
4.1 計測結果の整理方法	9
4.2 計測結果	10
4.2.1 主立坑の計測結果	13
4.2.2 換気立坑の計測結果	81
4.3 計測結果のまとめ	116
4.3.1 計測結果全般	116
4.3.2 主立坑側	116
4.3.3 換気立坑側	117
5. まとめと今後の課題	118
参考文献	122
付録 (CD-R) : 高精度ひずみ計 仕様書	
高精度ひずみ計 検査成績書	
高精度ひずみ計 計測データ	

CONTENTS

1. Aim	1
2. Outline of the collaboration	1
2.1 Title	1
2.2 Procedure	1
2.3 Study items	1
3. Summary of the monitoring	2
3.1 Intelligent type strain meter	2
3.2 Installation of intelligent type strain meters into pilot boreholes	4
3.3 Repair history of the monitoring system	7
4. Monitoring results	9
4.1 Method of analysis	9
4.2 Results	10
4.2.1 Main shaft	13
4.2.2 Ventilation shaft	81
4.3 Summary of the results	116
4.3.1 General variations of strain, temperature	116
4.3.2 Variations on Main shaft side	116
4.3.3 Variations on Ventilation shaft side	117
5. Discussion and recommendations	118
Reference	122
Appendix (CD-R): Specifications of intelligent type strain meter	
Inspection reports on the intelligent type strain meter	
Monitoring data	

目 次

図 3.1-1	高精度ひずみ計の概略図	3
図 3.2-1	高精度ひずみ計の設置位置図	4
図 3.2-2	高精度ひずみ計の設置手順模式図	6
図 4.1	研究所用地内および研究所周辺の観測孔位置図	9
図 4.2-1	主立坑の高精度ひずみ計による記録（全データ）	11
図 4.2-2	換気立坑の高精度ひずみ計による記録（全データ）	12
図 4.2.1-1	主立坑の高精度ひずみ計による計測結果	14
図 4.2.1-2	主立坑の鉛直ひずみ変化	15
図 4.2.1-3	主立坑の水平ひずみ変化（2007/10/31～2007/11/10）	17
図 4.2.1-4	研究坑道からの揚水量変化	18
図 4.2.1-5	揚水量変化と MSB-3 号孔の水頭変化（主立坑安定期）	18
図 4.2.1-6	揚水量変化と MSB-3 号孔の水頭変化（2007/10/31～11/14）	18
図 4.2.1-7	水平ひずみ変化と MSB-3 号孔の水頭変化（2007/10/31～2007/11/10）	19
図 4.2.1-8	水平ひずみ変化と MSB-3 号孔の水頭変化（2007/12/11～2007/12/21）	20
図 4.2.1-9	名古屋港の天文潮位変化と DH-15 号孔の水頭変化	21
図 4.2.1-10(1)	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+0：CH1）	22
図 4.2.1-10(2)	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+0：CH6）	22
図 4.2.1-10(3)	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+90：CH2）	23
図 4.2.1-10(4)	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+90：CH7）	23
図 4.2.1-10(5)	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+135：CH3）	24
図 4.2.1-11	水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（H+45：CH4）	24
図 4.2.1-12	鉛直ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化（V：CH5）	25
図 4.2.1-13	主立坑側のひずみ変化 H+0(CH1)の期間区分	25
図 4.2.1-14	主立坑側のひずみ変化 H+0(CH6)の期間区分	26
図 4.2.1-15	H+0(CH1) および H+0(CH6)の期間①におけるトレンドの推定	26
図 4.2.1-16	トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1), H+0(CH6)：期間①	26
図 4.2.1-17	トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1,CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間①	27
図 4.2.1-18	トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1,CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間②	27
図 4.2.1-19	トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1,CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間③	28
図 4.2.1-20	トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1,CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間④	28
図 4.2.1-21	主立坑側のひずみ変化 H+90(CH2)の期間区分	29
図 4.2.1-22	主立坑側のひずみ変化 H+90(CH7)の期間区分	29
図 4.2.1-23	トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH2,CH7)と DH-15 号孔の水頭変化：期間①	29
図 4.2.1-24	トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH2,CH7)と DH-15 号孔の水頭変化：期間②	30
図 4.2.1-25	トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH2,CH7)と DH-15 号孔の水頭変化：期間③	30
図 4.2.1-26	トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH2,CH7)と DH-15 号孔の水頭変化：期間④	30
図 4.2.1-27	主立坑側のひずみ変化 H+135(CH3)の期間区分	31
図 4.2.1-28	トレンド除去後のひずみ変化 H+135(CH3)と DH-15 号孔の水頭変化：期間①～④	31
図 4.2.1-29 (1)～(2)	主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化（発破①）	33
図 4.2.1-29 (3)	主立坑の水平ひずみ変化：H+45(CH4)	34

図 4.2.1-30(1)～(2) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破②)	35
図 4.2.1-31 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破③)	36
図 4.2.1-32(1)～(2) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破④)	37
図 4.2.1-33 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑤)	38
図 4.2.1-34 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑥)	39
図 4.2.1-35 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑦)	40
図 4.2.1-36 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑧)	41
図 4.2.1-37(1) 主立坑の発破の影響による鉛直ひずみ変化 (発破①～⑤)	42
図 4.2.1-37(2) 主立坑の発破の影響による鉛直ひずみ変化 (発破⑥～⑧)	43
図 4.2.1-38 発破作業期間の MSB-3 号孔 (区間 No.7) の水頭変化	44
図 4.2.1-39 各発破前後の MSB-3 号孔 (区間 No.7) の水頭変化	44
図 4.2.1-40 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	45
図 4.2.1-41 揚水量の変化と 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	45
図 4.2.1-42 MSB-3 号孔(区間 No.7)と 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	45
図 4.2.1-43 主立坑の水平ひずみ変化と 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	46
図 4.2.1-44 発破作業期間の 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	47
図 4.2.1-45 各発破前後の 07MI08 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	47
図 4.2.1-46 発破作業期間の 07MI09 号孔 (区間 No.5) の水頭変化	48
図 4.2.1-47 各発破前後の 07MI09 号孔 (区間 No.4) の水頭変化	48
図 4.2.1-48 発破作業期間の 06ME05 号孔 (区間 No.9) の水頭変化	49
図 4.2.1-49 各発破前後の 05ME06 号孔 (区間 No.9) の水頭変化	49
図 4.2.1-50 震央距離とマグニチュードとの関係	50
図 4.2.1-51 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(1))	51
図 4.2.1-52 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(2))	52
図 4.2.1-53(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(3))	53
図 4.2.1-54(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(4))	54
図 4.2.1-55(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(5))	55
図 4.2.1-56(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(6))	56
図 4.2.1-57(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(7))	57
図 4.2.1-58(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(8))	58
図 4.2.1-59(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(9))	59
図 4.2.1-60(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(10))	60
図 4.2.1-61(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(11))	61
図 4.2.1-62(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))	62
図 4.2.1-63(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))	63
図 4.2.1-64 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(14))	64
図 4.2.1-65(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))	65
図 4.2.1-66(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))	66
図 4.2.1-67(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))	67
図 4.2.1-68(1)～(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(18))	68
図 4.2.1-69(1) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(1)～地震(6))	69
図 4.2.1-69(2) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(7)～地震(13))	70

図 4.2.1-69(3) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(14)~地震(18))	71
図 4.2.1-70 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE1	73
図 4.2.1-71 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE2	74
図 4.2.1-72 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3	74
図 4.2.1-73 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3(2008/1/14~2008/2/6)	75
図 4.2.1-74(1) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破①)	76
図 4.2.1-74(2) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破②)	76
図 4.2.1-74(3) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破③)	77
図 4.2.1-74(4) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破④)	77
図 4.2.1-74(5) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑤)	78
図 4.2.1-74(6) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑥)	78
図 4.2.1-74(7) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑦)	79
図 4.2.1-74(8) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑧)	79
図 4.2.1-75 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (地震(13))	80
図 4.2.2-1 換気立坑の高精度ひずみ計による計測結果	82
図 4.2.2-2 換気立坑の鉛直ひずみ変化	83
図 4.2.2-3 換気立坑のひずみ変化 (CH3,CH4): 2008/1/9~2008/2/6	83
図 4.2.2-4 換気立坑のひずみ変化 (CH3,CH4) と DH-15 号孔の水頭変化	83
図 4.2.2-5 換気立坑側のひずみ変化 H+0(CH6)の期間区分	84
図 4.2.2-6 トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH6)と DH-15 号孔の水頭変化: 期間①~③	84
図 4.2.2-7 トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH2)と DH-15 号孔の水頭変化	85
図 4.2.2-8 換気立坑側のひずみ変化 H+90(CH7)の期間区分	85
図 4.2.2-9 トレンド除去後のひずみ変化 H+90(CH7)と DH-15 号孔の水頭変化: 期間①~③	85
図 4.2.2-10 換気立坑側のひずみ変化 V(CH5)の期間分け	86
図 4.2.2-11 トレンド除去後のひずみ変化 V(CH5)と DH-15 号孔の水頭変化: 期間①~③	86
図 4.2.2-12(1)~(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破①)	88
図 4.2.2-13(1)~(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破②)	89
図 4.2.2-14(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破③)	90
図 4.2.2-14(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破③)	91
図 4.2.2-15(1)~(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破④)	92
図 4.2.2-16(1)~(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑤)	93
図 4.2.2-17(1)~(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑥)	94
図 4.2.2-18 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑦)	95
図 4.2.2-19 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑧)	96
図 4.2.2-20(1) 発破の影響による換気立坑の鉛直ひずみ変化 (発破①~発破⑤)	97
図 4.2.2-20(2) 発破の影響による換気立坑の鉛直ひずみ変化 (発破⑥~発破⑧)	98
図 4.2.2-21(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))	100
図 4.2.2-22(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))	101
図 4.2.2-23(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(14))	102
図 4.2.2-24(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))	103
図 4.2.2-25(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))	104
図 4.2.2-26(1)~(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))	105

図 4.2.2-27	地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化（地震(18)）	106
図 4.2.2-28(1)	地震発生前後の換気立坑の鉛直ひずみ変化（地震(12)～地震(15)）	107
図 4.2.2-28(2)	地震発生前後の換気立坑の鉛直ひずみ変化（地震(17)～地震(18)）	108
図 4.2.2-29	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE1	109
図 4.2.2-30	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE2	110
図 4.2.2-31	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3	110
図 4.2.2-32	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3(2008/1/14～2008/2/6)	111
図 4.2.2-33(1)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破①）	112
図 4.2.2-33(2)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破②）	112
図 4.2.2-33(3)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破③）	113
図 4.2.2-33(4)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破⑥）	113
図 4.2.2-33(5)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破⑦）	114
図 4.2.2-33(6)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（発破⑧）	114
図 4.2.2-34(1)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（地震(16)）	115
図 4.2.2-34(2)	換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE3（地震(17)）	115
図 5.1	立坑壁面地質観察結果の例（主立坑）	118
図 5.2	浅層、深層ボーリング孔における地下水水圧モニタリング結果の例	120
図 5.3	深度 200m レベルにおける坑道の平面配置図と割れ目調査結果の例	121

表 目 次

表 4.1-1	各チャンネルの計測方位	9
表 4.2.1-1	主立坑の発破日時	32
表 4.2.1-2	主立坑の安定期における地震発生日時	50
表 4.2.1-3	発破後および地震後の主ひずみの変化	80
表 4.2.2-1	主立坑の発破日時	87
表 4.2.2-2	換気立坑の安定期における地震発生日時	99

1. 共同研究の目的

大深度立坑を掘削する際には、掘削前方の岩盤のひずみの変化を把握することで、より安全かつ適切に立坑掘削を進めることが可能となることが期待される。例えば、立坑切羽とパイロットボーリング孔に設置したひずみ計との相対深度の変化に対して、観測されるひずみの変化が追従しない場合は、地下水が被圧されている可能性が考えられ、突発湧水が想定される、というシナリオが考えられる。また、立坑掘削に伴う岩盤ひずみの変化を把握することにより、山はね発生の有無を確認することができる。このように、立坑切羽前方のひずみ変化の観測により、立坑掘削において安全上最も重要となる突発湧水と山はねといった突発事象に対する施工対策を講じるための情報を得ることが可能になる。そこで、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所は、以下の2点について、ひずみ計測の有効性を評価する。

- ・突発湧水や山はねに対する施工対策を実施するための情報としての有効性の評価
- ・前方探査手法としての有効性の評価

名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・防災センターが実施している地震予知研究では、岩盤の微少な変動を観測して、地殻に作用する応力の変化をひずみ変化としてモニターする。設置深度が浅い場合、岩盤は気象変化、特に降雨に伴う地下水変動の影響により、ひずみが局所的に大きく変化し、広域応力場の変化を反映しなくなる。地震発生に関連する岩盤の微少な変動を検出する場合、地下水変動に伴う影響量を除去することが重要である。一方、立坑掘削では、強制的に地下水を汲み上げるため、パイロットボーリング孔に設置したひずみ計によるモニタリングから、地下水面の変化が、ひずみに与える影響の関係を定量的に明らかにできる。その結果、降雨に伴う地下水変動の影響で生じた局所の変動と、広域応力場による変動とを分離するための知見が得られる。そこで、名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・防災センターは、以下の3点について、ひずみ計測の評価を行う。

- ・比較観測による立坑掘削に伴う水位変化の影響量の評価
- ・比較観測による立坑掘削に伴う水位変化とひずみ計設置深度の評価
- ・広域応力の長期変化の評価（地下水変化に伴う影響量の除去後に評価）

2. 共同研究の概要

2.1 共同研究名

「瑞浪超深地層研究所における地下深部岩盤のひずみ変化のメカニズムに関する研究」

2.2 共同研究先

名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・防災センター

2.3 研究内容

瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事において掘削したパイロットボーリング孔に設置した、高精度ひずみ計により取得された岩盤ひずみのデータについて、立坑掘削や地震に伴う地下水の異常変動等のイベントとの相関を理論的あるいは数値解析的に検討することにより、ひずみ計測の前方探査技術としての有効性を評価するとともに、深部岩盤におけるひずみ変化のメカニズム解明のための検討を実施する。

3. 実施内容

3.1 高精度ひずみ計の概要

一般的なひずみ計測での分解能は 10^{-6} オーダーである。しかし、変形性の小さい結晶質岩に対し、時間依存性挙動や掘削影響評価のための観測においてこの分解能は十分満足なものとはいえない。また、潮汐変動や地震等の影響によるひずみ変化を把握する場合にも、 10^{-6} オーダーを超えるさらに高分解能なひずみ計が必要である。

そこで名古屋大学との共同研究により高精度ひずみ計を 2 基製作し、これらをパイロットボーリング孔（06MI02 号孔と 06MI03 号孔）にそれぞれ設置し、得られたデータの有効性について検討した。高精度ひずみ計の仕様は以下の通りである。また、図 3.1-1 に高精度ひずみ計の概略図を示す。なお、高精度ひずみ計の仕様の詳細および検査成績書は巻末の付録に添付した。

(1) ひずみ計

- ・ 成分数：7 成分（水平 6 成分、垂直 1 成分）
- ・ 測定範囲： 10^{-9} ～ 10^{-3} オーダー
- ・ 検出方式：磁気センサ方式

(2) 方位計

- ・ 測定範囲：0～359.9°
- ・ 分解能：0.1°
- ・ 検出方式：磁気センサ方式

(3) 温度計

- ・ 測定範囲：-10～50℃
- ・ 精度： ± 0.2 ℃
- ・ 分解能： 10^{-3} ～ 10^{-4} °C（サンプリング時間：5～60 秒）
- ・ 検出方式：水晶センサ方式

(4) メモリー・制御回路・電源

- ・ メモリー：8Mbyte フラッシュメモリー
- ・ 制御回路：16 ビット
- ・ 電源：内部バッテリー方式・外部電源供給方式

(5) ケーブル

- ・ FRP ロッドに挿入（通信用・外部電源用）
- ・ ケーブル長：400m 以上
- ・ せん断強度：5t 以上

(6) 寸法・材質

- ・ 寸法：図 3.1-1 のとおり
- ・ 材質：ステンレス

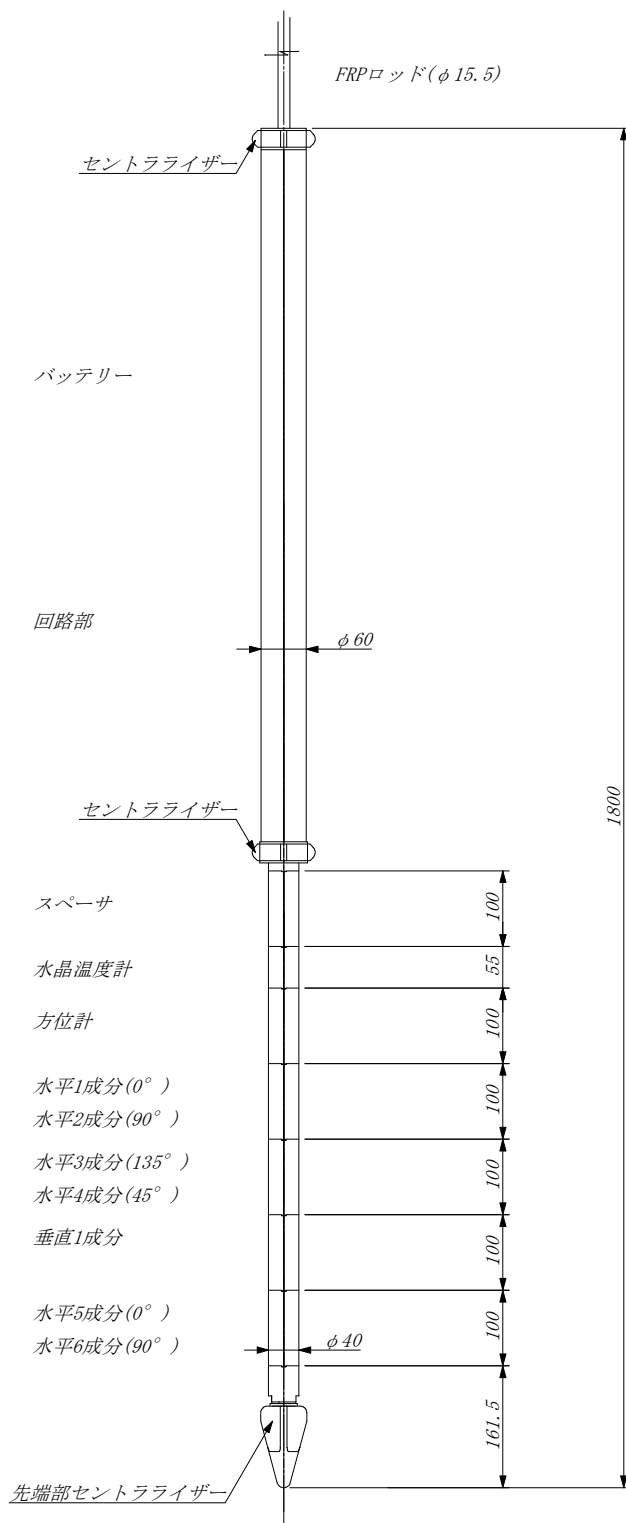


図 3.1-1 高精度ひずみ計の概略図

3.2 パイロットボーリング孔への高精度ひずみ計の設置作業

(1) 設置深度

高精度ひずみ計の設置深度は、パイロットボーリング孔の孔底付近で、地質特性（岩盤の強度や亀裂などの分布状況）、水理特性（湧水量や水圧の状況）に応じて決定した。

図3.2-1に高精度ひずみ計の設置位置図を示す。なお、主立坑のひずみ計の設置深度はGL-540m、換気立坑はGL-526mである。

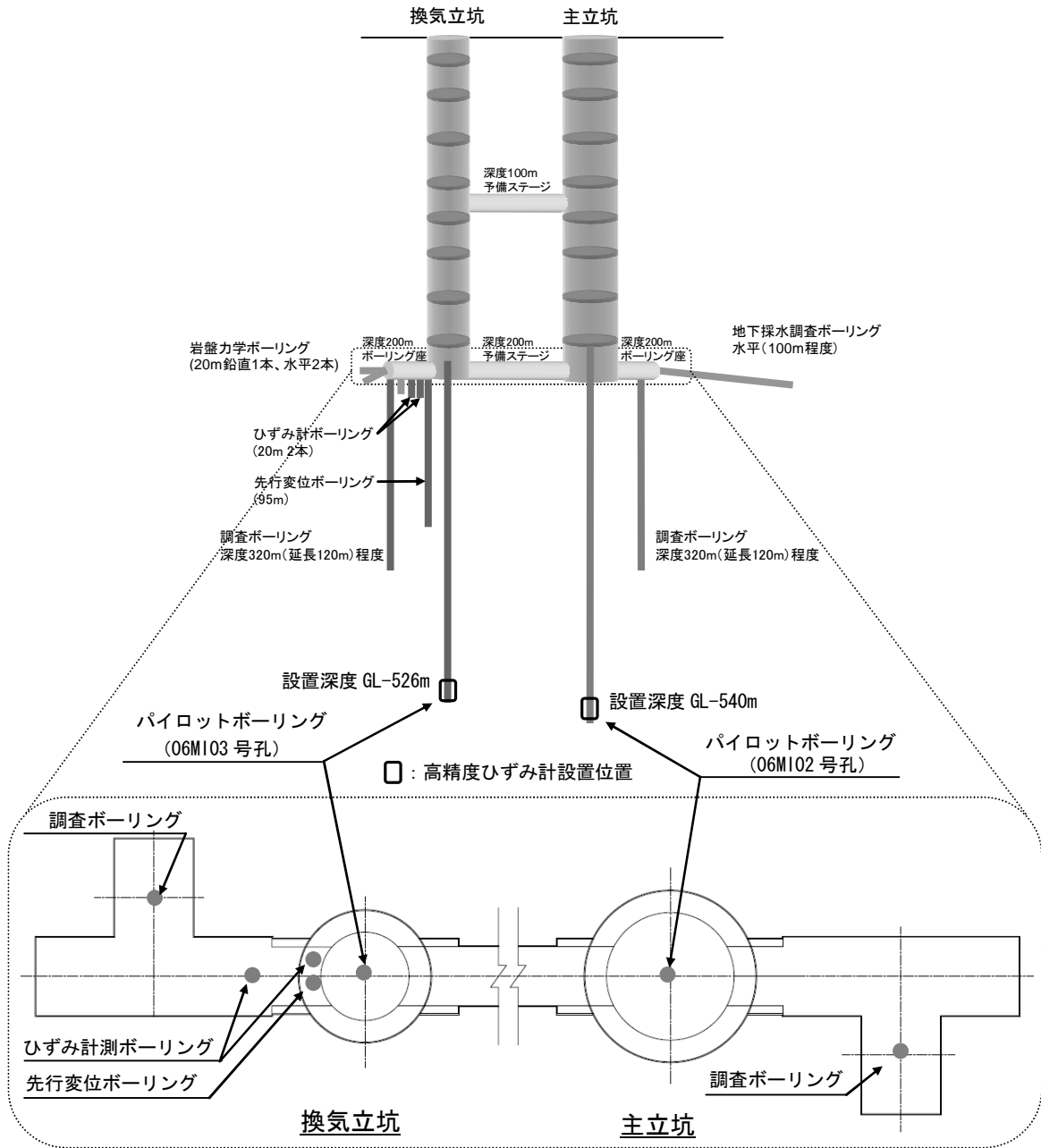


図 3. 2-1 高精度ひずみ計の設置位置図

(2) 設置方法

高精度ひずみ計の設置方法を以下に示す。また、図 3.2-2 に設置手順模式図を示す。

①湧水量測定

パイロットボーリング孔の孔内浚渫・洗浄後、ひずみ計設置区間の湧水量を測定。

②確認用セメンチング

湧水量測定後、測定区間部のセメンチング。

③リボーリング

養生完了後、確認用セメンチングコアを採取し、設置位置のセメンチングコアを確認。

④通り試験

本設置に先立ち、ベアラーおよびダミー計器の通り試験を実施。

設置手順・設置所要時間・設置位置の確認。

⑤設置用セメンチング

ベアラーにより、ひずみ計設置区間へのセメントミルクを充填。

⑥ひずみ計設置

地上にてひずみ計の作動確認を行った後、送り出し装置により所定の深度に設置。

⑦養生

設置完了後、孔口の FRP ロッドを固定。

設置後のひずみ計の作動確認。

⑧作動確認

養生完了後のひずみ計の作動確認。

なお、主立坑のパイロットボーリング孔はひずみ計設置深度の 12m 上までケーシングパイプで保護されているが、換気立坑のパイロットボーリング孔は全長裸孔であり、ひずみ計設置前に、GL-400m～GL-450m 付近から毎分約 150 リットル以上の湧水が確認されたため、GL-400m 以深へのセメントミルク注入による湧水抑制工を実施した後にひずみ計を設置した。

また、ひずみ計設置後にも換気立坑のパイロットボーリング孔では、毎分約 80 リットルの湧水が確認され、施工および排水対策上で問題となりうるため、GL-492m 付近までセメンチングを行っている。

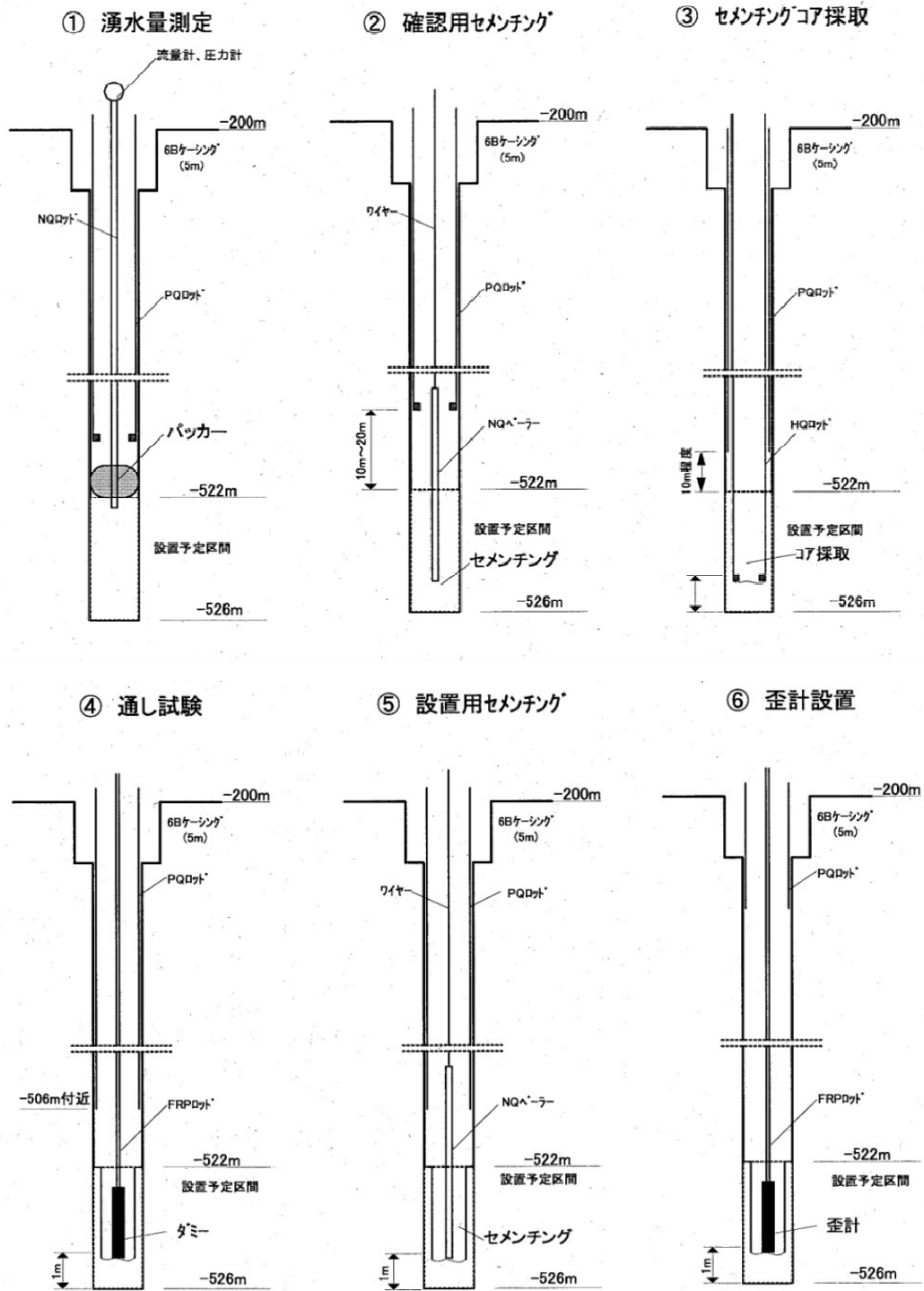


図 3. 2-2 高精度ひずみ計の設置手順模式図

3.3 高精度ひずみ計による計測作業

高精度ひずみ計の計測データ回収は、研究坑道掘削中は立坑掘削深度 25m 毎に、掘削中断中あるいは水平坑道掘削中は 1 ヶ月毎の間隔で実施した。パイロットボーリング孔は立坑の中央部にあり、埋設されている FRP ロッドおよびケーブルは立坑の発破毎に損傷を受けるため、データ回収時には、それらの損傷部を切断、加工したのちデータロガーを接続してデータ回収を行う方式を取った。なお、巻末に付録として主立坑および換気立坑の計測データを添付した。

以下に、今回確認された高精度ひずみ計のデータの不具合について述べる。

(1)換気立坑のデータ欠測（2007年11月24日～2008年1月9日）

- ・状況

データ回収時に計器内メモリーにデータが全く記録されていなかった。

- ・原因調査

内部バッテリーの電圧値は正常であり、バッテリーの消耗に因るものではないと確認。

計測開始後の外部電源切り離しを、FRP ロッド末端に接続しているクリップ側から行った場合、内部バッテリーと回路との接続リレーがオフ状態となり、その時点で計測部が機能しなくなったものと判断。接続リレーがオフ状態となった原因は、外部電源切り離し時に FRP ロッド末端に接続しているクリップの切り離しの際、瞬間的に繰り返し生じる電源の ON-OFF 動作（チャタリング）により内部バッテリー接続リレーが誤作動したものと判断。

- ・対策

計測開始後の外部電源供給ラインの切り離しを、FRP ロッド末端に接続しているクリップ側から行わず、チャタリングが生じない緩やかな電圧低下となるように、AC コネクタ側から切り離しを行う。

(2)換気立坑の2008年2月14日以降のデータ欠測、通信接続不可

- ・状況

2008年2月14日以降のデータが欠測し、ひずみ計との通信接続が不可能となった。

- ・原因調査

絶縁抵抗値測定などの調査・点検結果により、FRP ロッドケーブル上端から FRP ロッドケーブル内の介在物を經由し、計器接続部まで水が浸透した可能性が高く、不具合の原因は水による影響であると推測される。

- ・対策

不具合発生の原因はケーブル内への浸水であると予測されるため、加圧式フロリナート置換（浸水したロッドに電氣的支障のないフロリナート液を圧入することでロッド内の水を除去する方法）による通信復旧の可能性はあると考えられる。しかし、所要時間および加圧による内部計器への影響が不明であり、成功を保証できるものではない。また現在、計器内部との通信不能状態であるため現時点で内部計器が正常に作動中であるか不明である。

(3)主立坑の2008年10月15日以降のデータ欠測

- ・状況

2008年10月15日に計測が停止して以来、計測自体を行っていない状態。データロガーから

高精度ひずみ計へのアクセスは可能である。

・原因調査

FRP ロッド内ケーブル間の短絡の有無を調査するため、絶縁抵抗値を測定したところ、一部で絶縁抵抗値が低下していることを確認。消費電流も正常時に比べ異常な電流値であることを確認。計器－FRP ロッド接続部への水の浸入により、リークした事によるものと判断される。

また、データロガーとひずみ計との通信接続より、ひずみ計の内部バッテリー電圧が異常な電圧値（正常時約 14V に対し、0.188V）であることを確認。データ欠測の直接的な原因は、バッテリーの消耗による計測停止であることが判明。ひずみ計器内部における結露、本体内部への水の浸入、FRP 素線間のリーク等、本体内部への水の浸入によりバッテリーが消耗した可能性が考えられる。

・対策

本計器の内部バッテリーは長期観測を目的とするため、ひずみ計製作時の仕様書に則り、大容量の一次リチウムイオン電池を採用している。そのため充電することは不可能である。（二次リチウムイオン電池は大容量がなく、また定期的な充電時間も必要。）しかしながら、バッテリー消耗原因が特定されていないので、GL-540m 掘削時に回収し原因の特定を行うことが肝要である。

4. 計測結果

4.1 計測結果の整理方法

ひずみ計は、機械的な寸法の微小な変化を電気信号として検出するセンサで、計測結果は電圧値で与えられる。この電圧値を各ひずみ計の持つ出力特性をパラメータとして、ひずみ値に換算した。計測で使用した計器には 7 つのチャンネル (CH) のひずみ計と水晶温度計、方位計が備わっており、各 CH の計測方位は表 4.1-1 に示すとおりである。

なお、表中の計測方向の角度は、ボーリング孔を鉛直下向きに覗いたとき、方位計の基準に対して右回り方向の角度である。また、引張りひずみを正、圧縮ひずみを負として整理した。

表 4.1-1 各チャンネルの計測方位

チャンネル	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
計測方向	水平0度	水平90度	水平135度	水平45度	垂直方向	水平0度	水平90度
表記方法	H+0	H+90	H+135	H+45	V	H+0	H+90

また、地下水位変動とひずみの変化挙動との関連性について検討する目的で、図 4.1 に示す研究所用地内および研究所周辺の地下水長期モニタリング孔で観測された間隙水圧変化とひずみ変化とを比較した。なお、07MI08 号孔および 07MI09 号孔は立坑内に掘削された観測孔、DH-2 号孔および DH-15 号孔は広域地下水流動研究¹⁾²⁾における観測孔である。

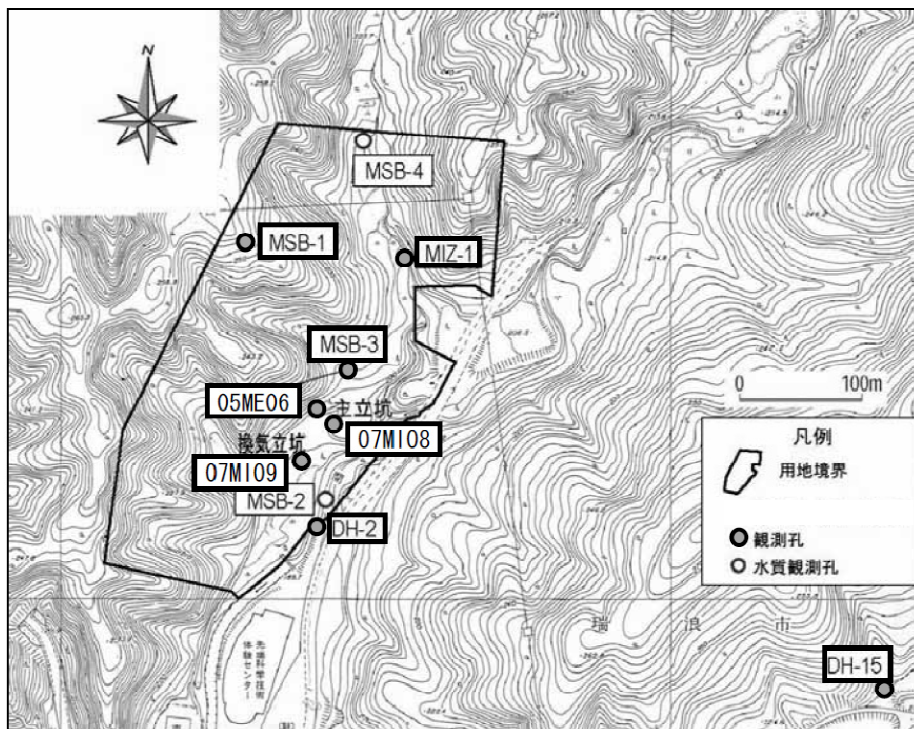


図 4.1 研究所用地内および研究所周辺の観測孔位置図

(地形図：瑞浪市都市計画基本図に加筆)

4.2 計測結果

計測は2007年10月に開始し、2008年の10月までの約1年間のデータを取得している。

図4.2-1～4.2-2に主立坑および換気立坑の計測記録図を示す。

主立坑での計測値は、図4.2-1に示すように、初期の短期的なドリフト（ひずみ計設置に用いたセメント系充填剤の養生変化の影響）が収束した後、2008年2月7日まで連続的で変化が少ない（以後、ここを安定期と呼ぶ）。しかし、それ以降、ひずみは最初に不連続で大きく変動したあと、ひずみ計の不良で欠測となり、それが回復した後は、安定期には認められなかった複雑な変化を示すようになった（以後、不安定期と呼ぶ）。このうち、H+90（CH2）とH+45（CH4）の変化量が 1000×10^{-6} 以上と大きく、レンジオーバーを起こしている。

不安定期を細かくみると、切羽で発破を行っている期間の変化が特に著しく、一方、切羽発破のなかった2008年3月頃などでは、安定期に比べれば変化量は大きい、比較的小さく滑らかな変化を示していることが確認された。方位計は安定期にほぼ一定の値を示したが、不安定期の初めに約 45° 変位し、以降は落ち着いた値を示している。また、温度計は一定の値を示したが、特定の期間にノイズが発生している。

換気立坑での計測値は、図4.2-2に示すように、計測初期にひずみ計が不良を起こして欠測が発生し、初期に予想される充填剤の養生影響によるドリフトを観測することができなかった。その後、2008年1月にひずみ計が復旧し、約1ヶ月間のデータを採取することができた（以後、ここを安定期と呼ぶ）が、ひずみ計の不良が再発し、その後のデータは得られていない。安定期での計測値をみると、二つあるH+0方向のひずみ計のうち、CH1でドリフト状の変動を起こしているが、その他のCHはほぼ一定の値を示した。また、方位計、温度計は一定の値を示したが、温度計では特定の期間に集中したノイズが認められる。

これ以降、計測結果を整理するにあたっては、安定期のデータ（主立坑は2007年10月13日から2008年2月7日、換気立坑は2008年1月9日から2008年2月6日）を使用した。

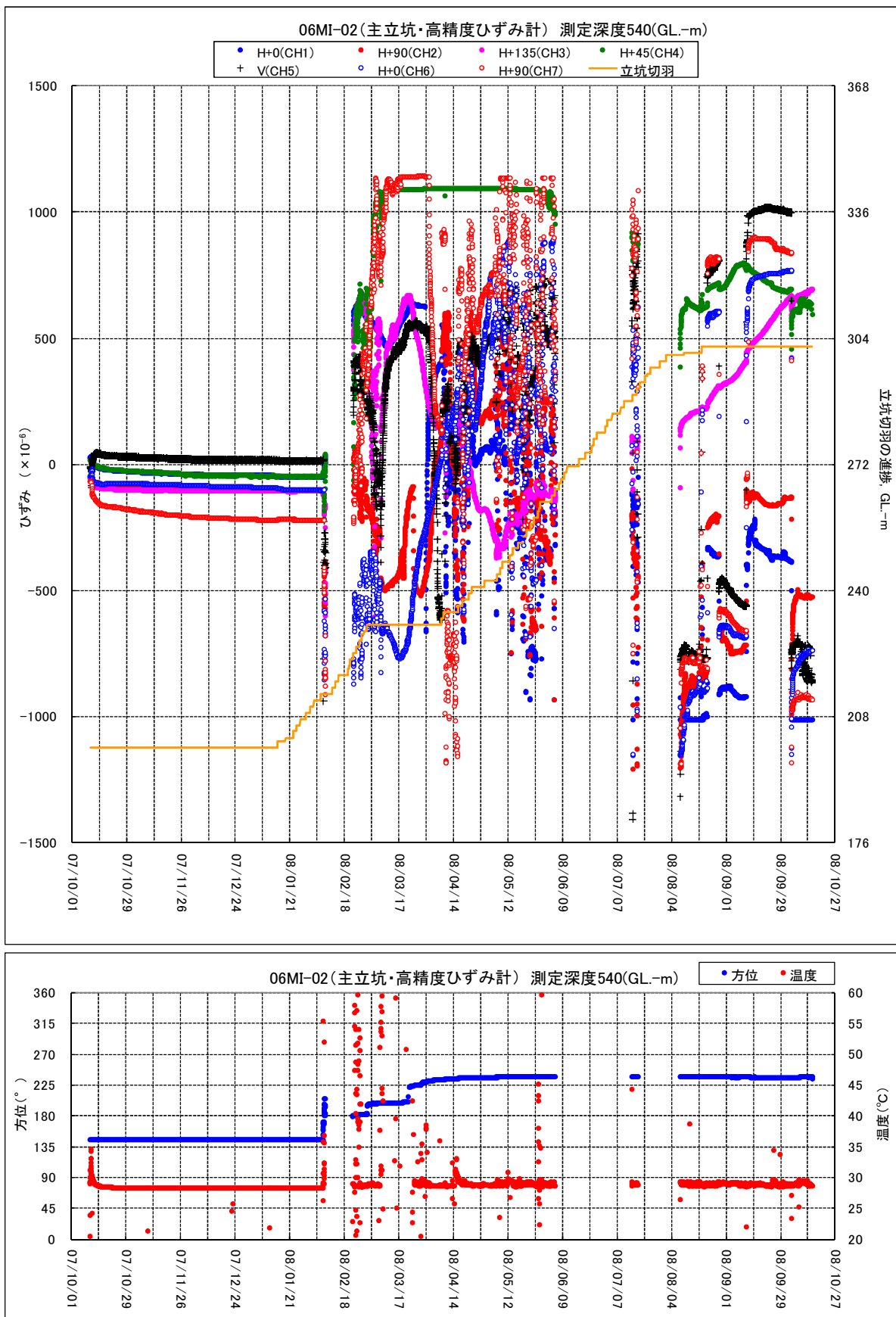


図 4.2-1 主立坑の高精度ひずみ計による記録 (全データ)

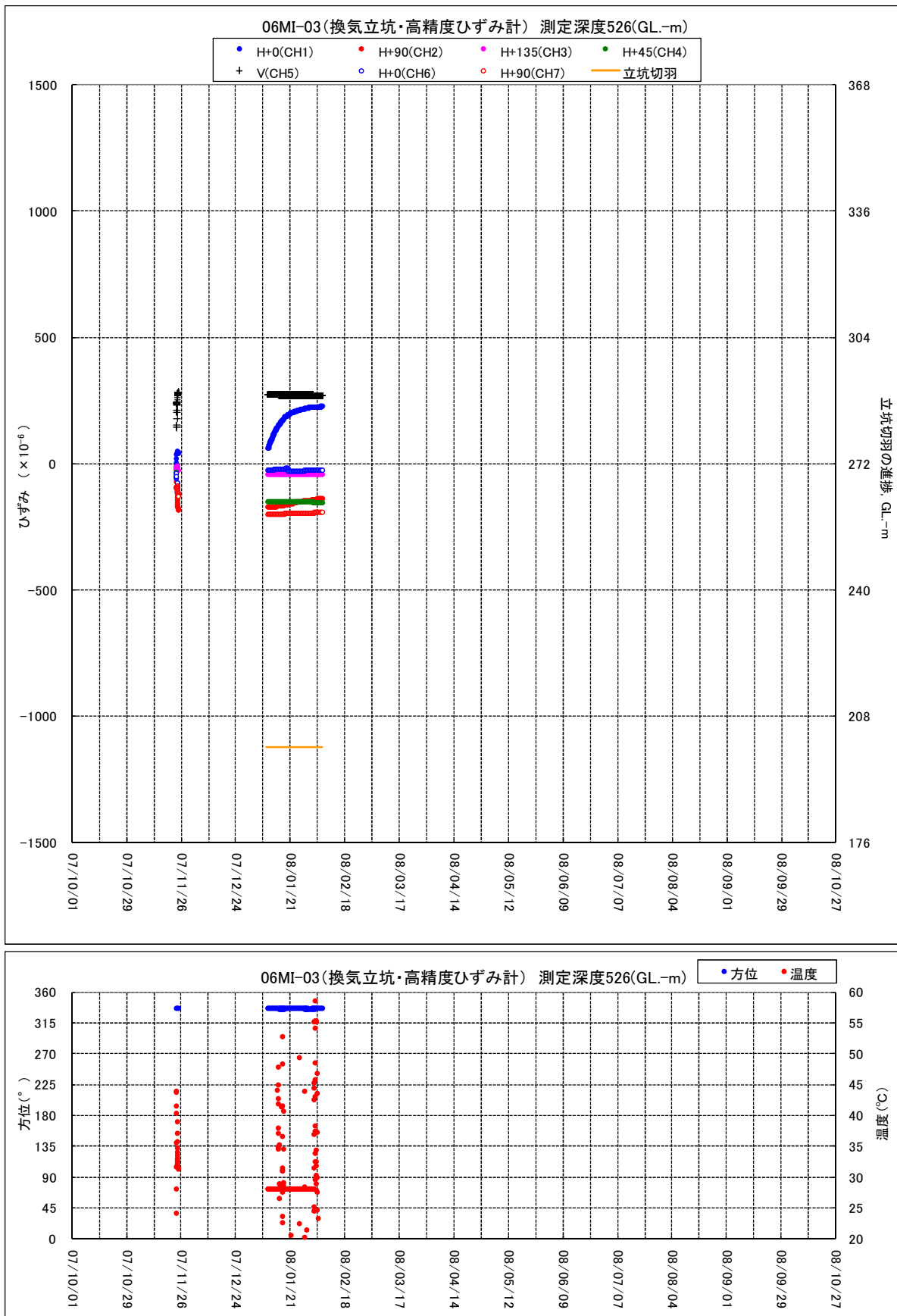


図 4.2-2 換気立坑の高精度ひずみ計による記録 (全データ)

4.2.1 主立坑の計測結果

(1) 水平ひずみ、方位、温度の変化

図 4.2.1-1 に、主立坑の安定期における計測結果を示す。

なお、ここでは 2007 年 10 月 13 日 12 時の値を初期値とした相対変位をプロットし、ひずみの経時変化を示している。

図 4.2.1-1 に示すように、主立坑で計測されたひずみは、全 CH で経時的に圧縮ひずみが増加している。また、2007 年 10 月 30 日から 2007 年 11 月 16 日頃までは全 CH で同じような振幅をしながら変動している。CH4 については、終始振幅しながら変動している。

方位計は、 0.1° 以下の微小変化はあるが、初期値の 144.8° から概ね一定の値を示している。

温度計は、初期値の約 28.9°C からドリフトの収束とともに低下して約 28.3°C で落ち着き、以降は不規則にノイズが認められるが、安定した値を示している。

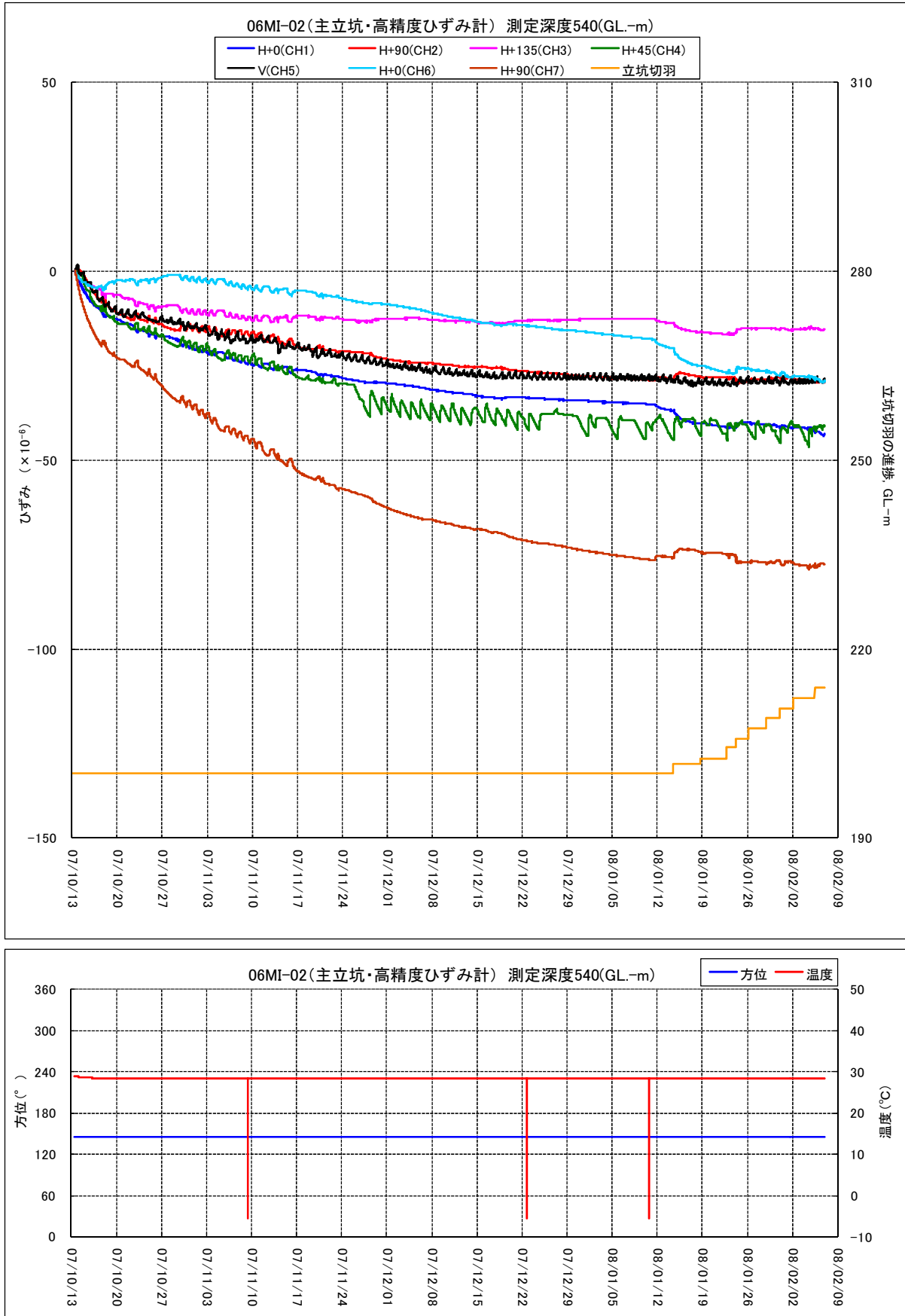


図 4.2.1-1 主立坑の高精度ひずみ計による計測結果

(2) 鉛直ひずみの変化

図 4.2.1-2 に主立坑の安定期における鉛直ひずみ変化を示す。ここでは、2007 年 10 月 13 日 12 時のデータを初期値としたひずみの相対変位をプロットした。図に示すように、測定開始から常に約 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ の幅で振幅しながら圧縮ひずみが増加している。圧縮ひずみの増加は、ドリフトが収束する 2007 年 10 月 20 日頃までは $1.8 \times 10^{-6}/\text{day}$ 程度、2007 年 10 月 20 日から 12 月 9 日の期間は $0.5 \times 10^{-6}/\text{day}$ 、以降は $0.03 \times 10^{-6}/\text{day}$ 程度で変化している。測定開始から 2008 年 2 月 7 日までの累積の圧縮ひずみは 30×10^{-6} 程度である。

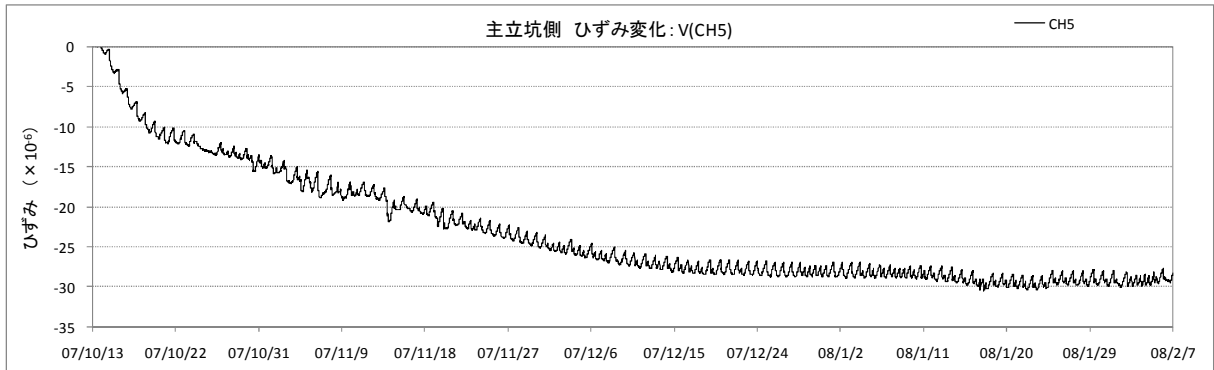


図 4.2.1-2 主立坑の鉛直ひずみ変化

(3) 研究坑道からの揚水の影響

水平ひずみ変化においてドリフトが収束し、ひずみが線形的増加を開始する 2007 年 10 月 29 日頃からの変化をみると、2007 年 11 月 14 日頃までの期間で、日に $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 程度の振幅変化をしているのがわかる。特に、10 月 31 日から 11 月 10 日まで 10 日間の各チャンネルの水平ひずみ変化を詳しくみると、図 4.2.1-3 に示すように、朝 8 時頃から変位増加を開始し、その増加分の変位が午後 8 時頃から減少し始めるという変化を繰り返しており、この期間の水平ひずみの変化挙動は人為的な影響を受けている可能性が考えられる。

ひずみを生じさせる外力のひとつに地下水位の変動があり、地下水位が人為的に変動する要因としては、研究坑道からの揚水の影響があげられる。図 4.2.1-4 は、主立坑の安定期における研究坑道からの揚水量変化であり、主立坑と換気立坑からの揚水量の合計をプロットしている。なお、研究坑道から汲み上げられた地下水の処理を行う排水処理施設で計測された揚水量データは 1 日に 1 データである。図をみると、日々 500m^3 以上の揚水が行われており、特に水平ひずみに振幅変化がみられた 11 月 14 日頃までの期間は、日によっては 800m^3 以上の揚水があることがわかる。

図 4.2.1-5 に、研究所用地内の地下水位長期モニタリング孔のひとつである MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭変化と揚水量変化を併せて示す。図に示すように、揚水量と MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭には相関がみられ、この水頭変化は揚水の影響を受けた変化であるといえる。特に、約 800m^3 を超える揚水量がある日には、水頭の変動が顕著に表れているのがわかる。

ここで、水平ひずみに振幅変化がみられた期間における MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭変化を詳しくみると、図 4.2.1-6 に示すように、研究坑道掘削工事作業の休日（11/4、11/10～11）を除き、毎朝 8 時頃に水頭低下が始まり、夕方から夜にかけて急激に水頭が上昇するという変化が繰り返されている。また、日によっては午後 0 時頃に水頭が上昇し、午後 1 時頃に再度水頭が低

下するという変化もみられる。研究坑道掘削工事作業の休日に大きな水頭変化が見られないのは、休日の揚水量が 600～700m³程度と作業日に比べて少なかったために、揚水の影響が水頭変化に表れなかったと考えられる。

次に、水平ひずみ変化と MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭変化を比較すると、図 4.2.1-7 に示すように、非常に良い相関がみられる。

これらのことから、この期間の水平ひずみ変化は、揚水により変動した地下水位の影響を受けた挙動を示しているといえる。各方位の水平ひずみと水頭の関係については、H+0(CH1,CH6)および H+135(CH3)では水頭低下に伴い引張りひずみが増加し、H+90(CH2,CH7)、H+45(CH4)では水頭低下に伴い圧縮ひずみが増加している。

2007 年 11 月 14 日以降、揚水量が 800m³/day を超えない 2007 年 12 月 14 日頃までは、MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭に大きな変動はなく、水平ひずみも H+45(CH4)を除いて、ほぼ線形的に変動しており、水平ひずみ変化と揚水量変化との相関性は明確ではない。

再び揚水量が約 800m³/day に増加する 2007 年 12 月 15 日頃の水平ひずみ変化は、図 4.2.1-8 に示すように、MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭変化と比較すると、水頭低下に伴うひずみ変化が確認できる。各方位のひずみと水頭変化の関係は、H+0(CH1,CH6)および H+135(CH3)では水頭低下に伴い圧縮ひずみが増加し、H+90(CH2,CH7)では水頭低下に伴い引張りひずみが増加しており、前述の振幅変化を示していた期間とはひずみの変化が逆転している。また、ひずみの変動差も $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$ 程度とかなり小さい値となっている。

2007 年 12 月 20 日以降の研究坑道からの揚水量は 600m³/day 程度であるため、MSB-3 号孔（区間 No.7）の水頭変化に明確な揚水影響は表れていない。また、他の地下水位モニタリング孔においても揚水の影響と考えられる水頭変動は確認できず、ひずみ変化と揚水影響との関連性の検討は不可能であった。

H+45(CH4)については、2007 年 11 月 26 日以降の安定期において、約 5×10^{-6} の幅で振幅変化が続いているが、揚水の影響による地下水位変動との相関はみられない。

鉛直ひずみ V(CH5)については、MSB-3 号孔の水位変動との相関は確認できなかった。

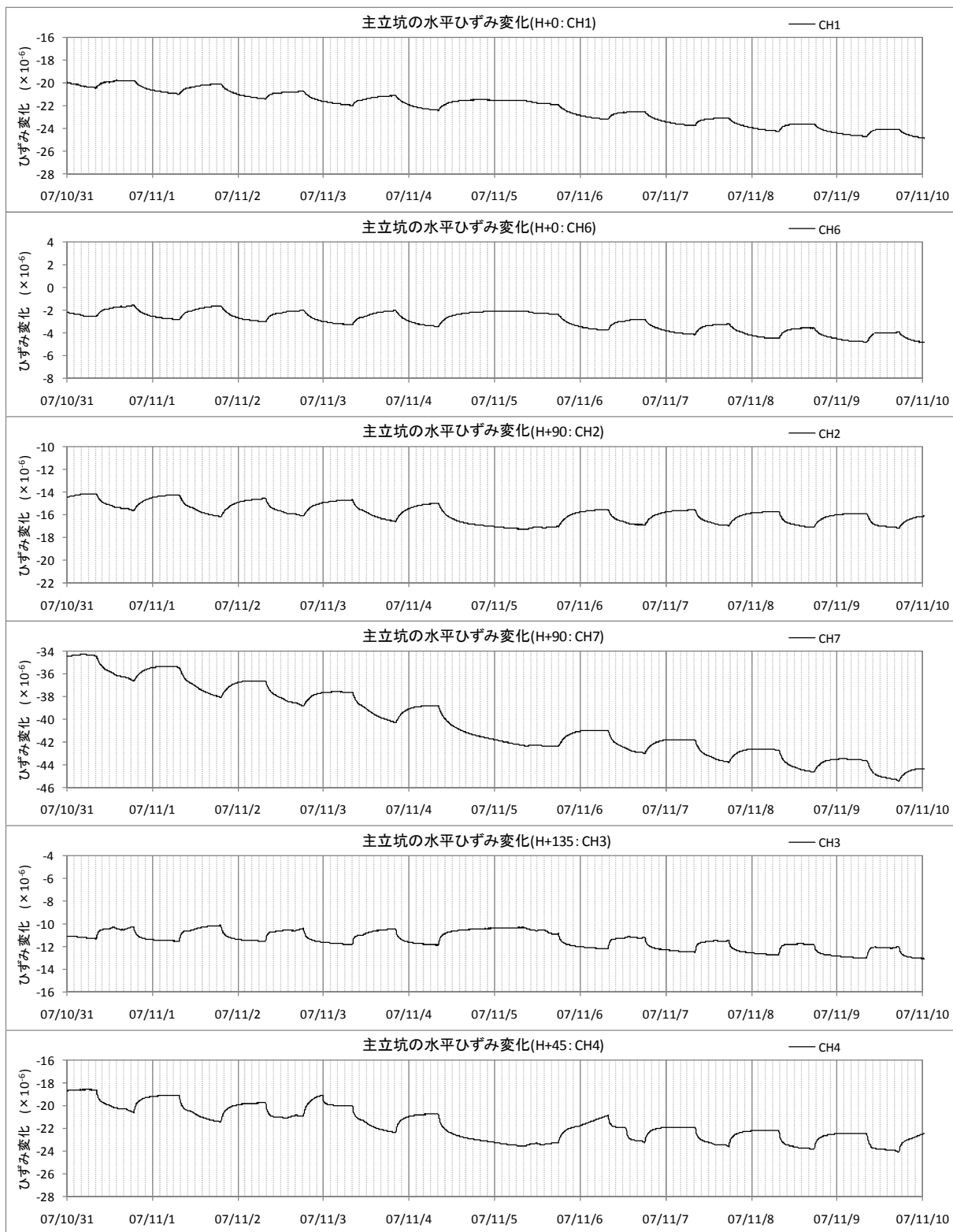


図 4. 2. 1-3 主立坑の水平ひずみ変化 (2007/10/31~2007/11/10)

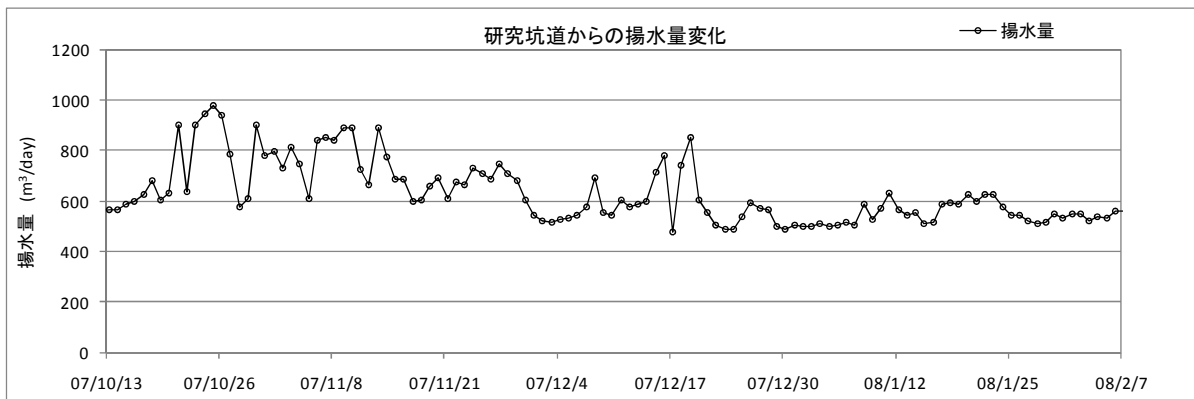


図 4. 2. 1-4 研究坑道からの揚水量変化

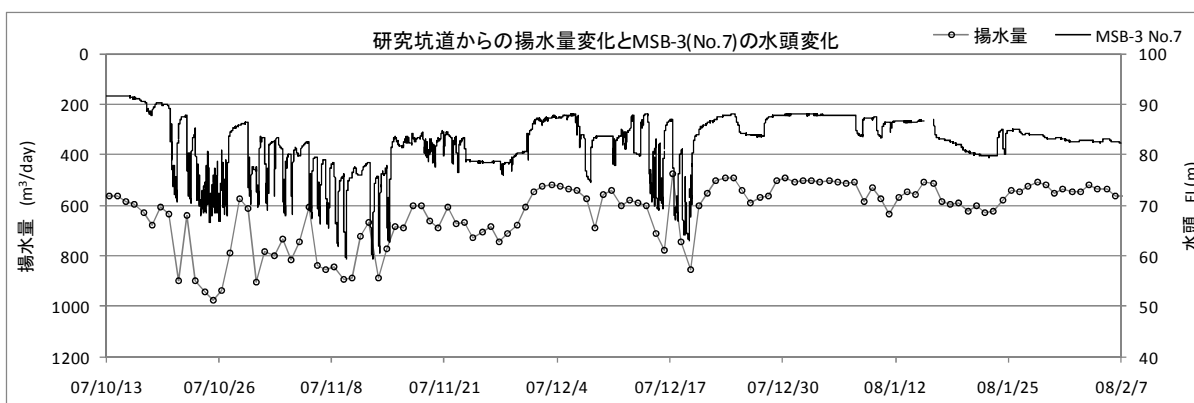


図 4. 2. 1-5 揚水量変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (主立坑安定期)

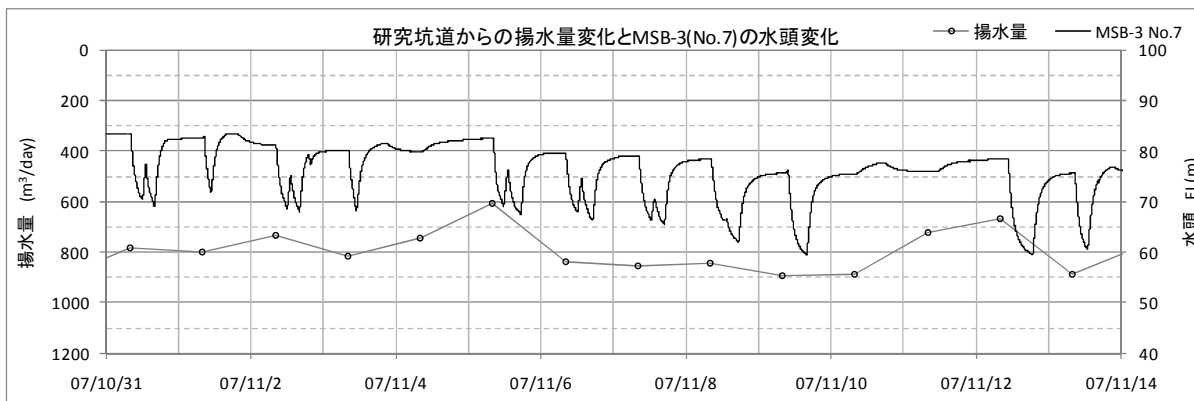


図 4. 2. 1-6 揚水量変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (2007/10/31~11/14)

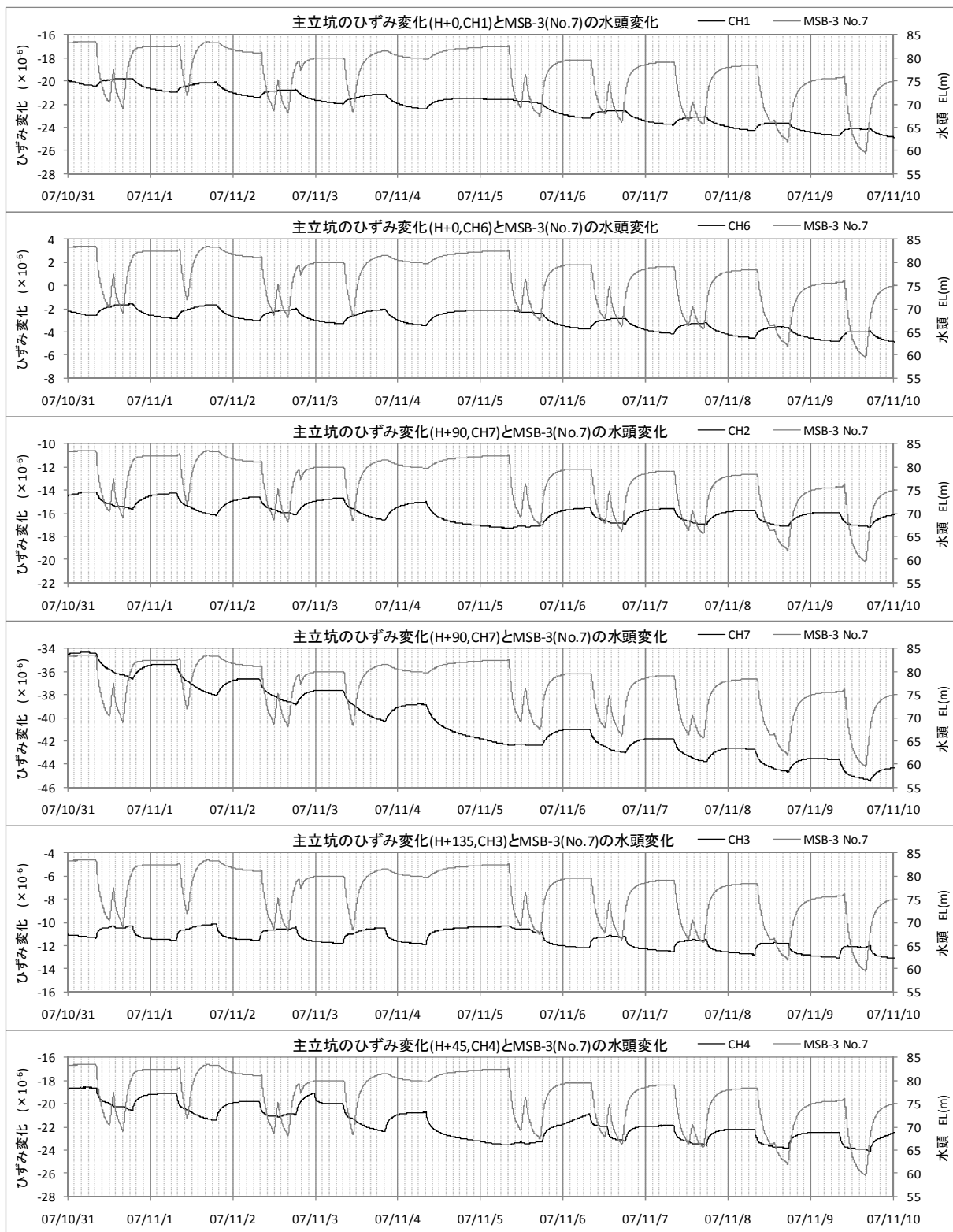


図 4. 2. 1-7 水平ひずみ変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (2007/10/31~2007/11/10)

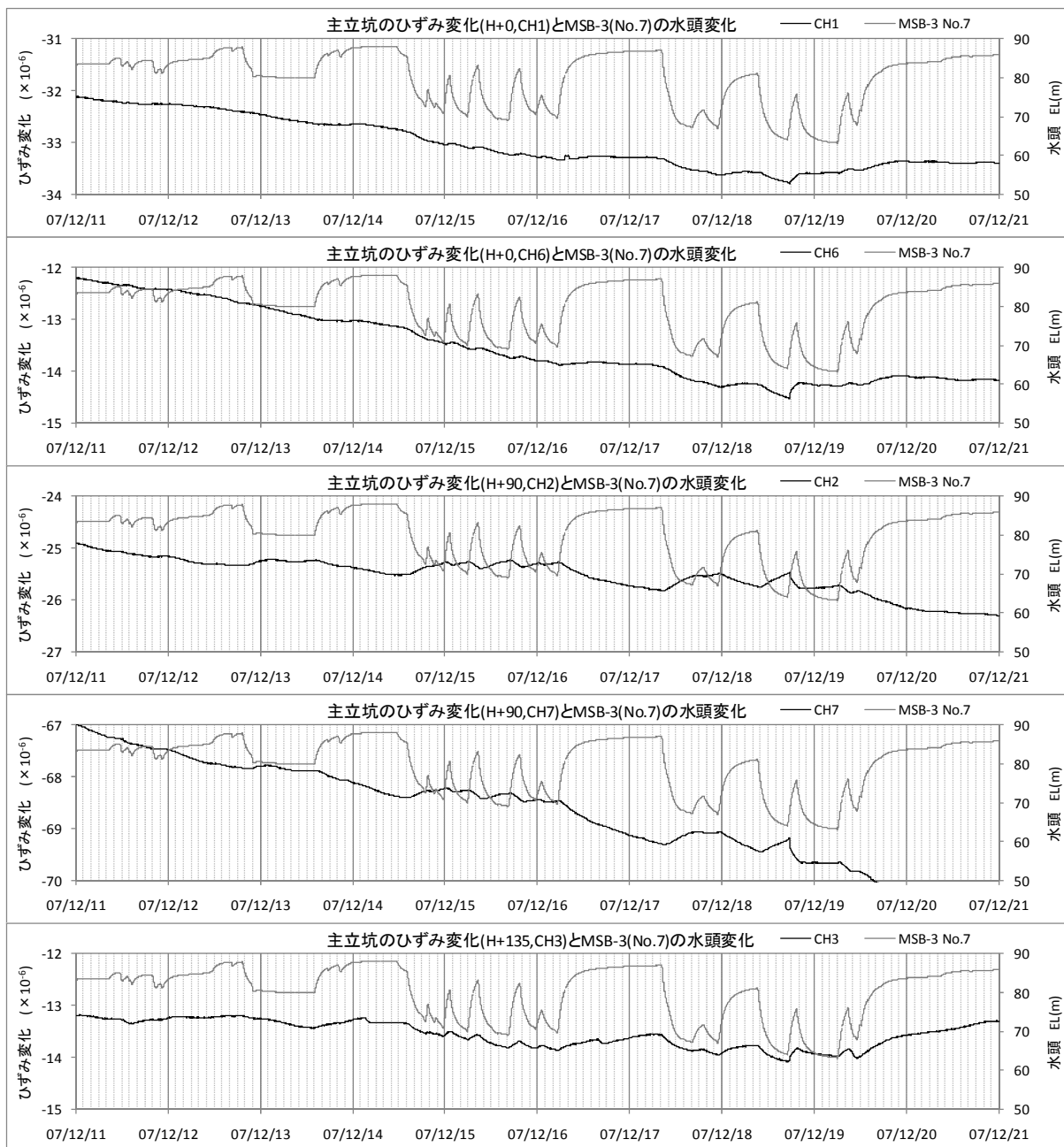


図 4. 2. 1-8 水平ひずみ変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (2007/12/11~2007/12/21)

(4) 潮汐力の影響

潮汐力は1サイクル約12.4時間に変動している。ひずみは、その潮汐力が岩盤マトリックスに直接働いて変化するものと、移動可能な岩盤の間隙水を動かして地下水位が変動したことによるものが考えられる。

2007年12月20日から2008年1月10日までの3週間の水平ひずみ変化をみると、H+45(CH4)を除き、日に 0.1×10^{-6} ~ 0.3×10^{-6} 程度の圧縮ひずみの線形的増加を示し、大きなひずみの変動はみられない。

ここで、上記の3週間における名古屋港の天文潮位と研究所周辺の地下水位長期モニタリング孔のひとつであるDH-15号孔(区間No.5)の地下水位とを比較すると、図4.2.1-9に示すように、水位変動幅に違いはあるが、位相はよく同調していることがわかる。

DH-15号孔は研究坑道から十分離れた距離に位置しており、主立坑の発破作業や研究坑道からの揚水の影響もみられない。そこで、DH-15号孔の地下水位が潮汐変動を表しているものとし、図4.2.1-10(1)~(5)に、1週間毎の水平ひずみ変化とDH-15号孔(区間No.5)の水位変動の比較を示す。図に示すように、DH-15号孔の水頭低下時に各CHで引張りひずみの増加、水頭上昇時に圧縮ひずみの増加といった同調した変動がみられることから、この期間の水平ひずみは潮汐力を受けた変動をしているといえる。潮汐力による水平ひずみの変動は、潮汐の1サイクルで最大でも 0.1×10^{-6} 程度であった。

この期間におけるH+90(CH7)の変動は日に約 0.3×10^{-6} であり、潮汐力の影響によるひずみの変動は他のCHと比べ明確ではない。また、各CHで上記の3週間以外の期間においても、1日の変動が大きい場合には明確な潮汐変動が表れていない。ひずみ変化に明確な潮汐変動が表れるのは、ひずみが線形的に変動し、1日の変動が約 0.2×10^{-6} 以下の場合と考えられる。

H+45(CH4)は、1日に 3×10^{-6} ~ 4×10^{-6} 程度と大きく変動しているが、変動が小さい期間に限っては、図4.2.1-11に示すように、潮汐力の影響を受けた変化挙動が確認できる。

鉛直ひずみV(CH5)は、振幅しながら圧縮ひずみが増加しているが、図4.2.1-12に示すように、DH-15号孔の水頭変化と比較すると位相に同調はみられず、波形も大きく違った形を示していることから、潮汐力の影響は受けていないといえる。

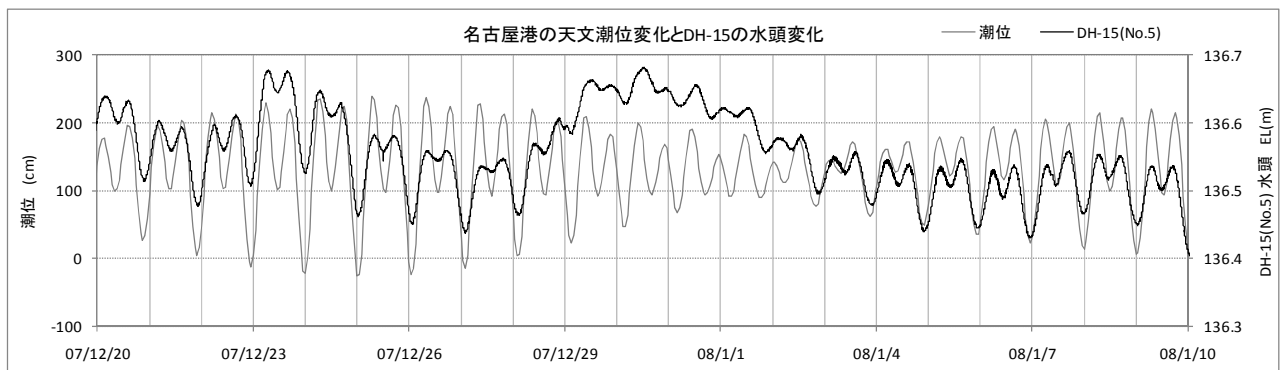


図 4. 2. 1-9 名古屋港の天文潮位変化と DH-15 号孔の水頭変化

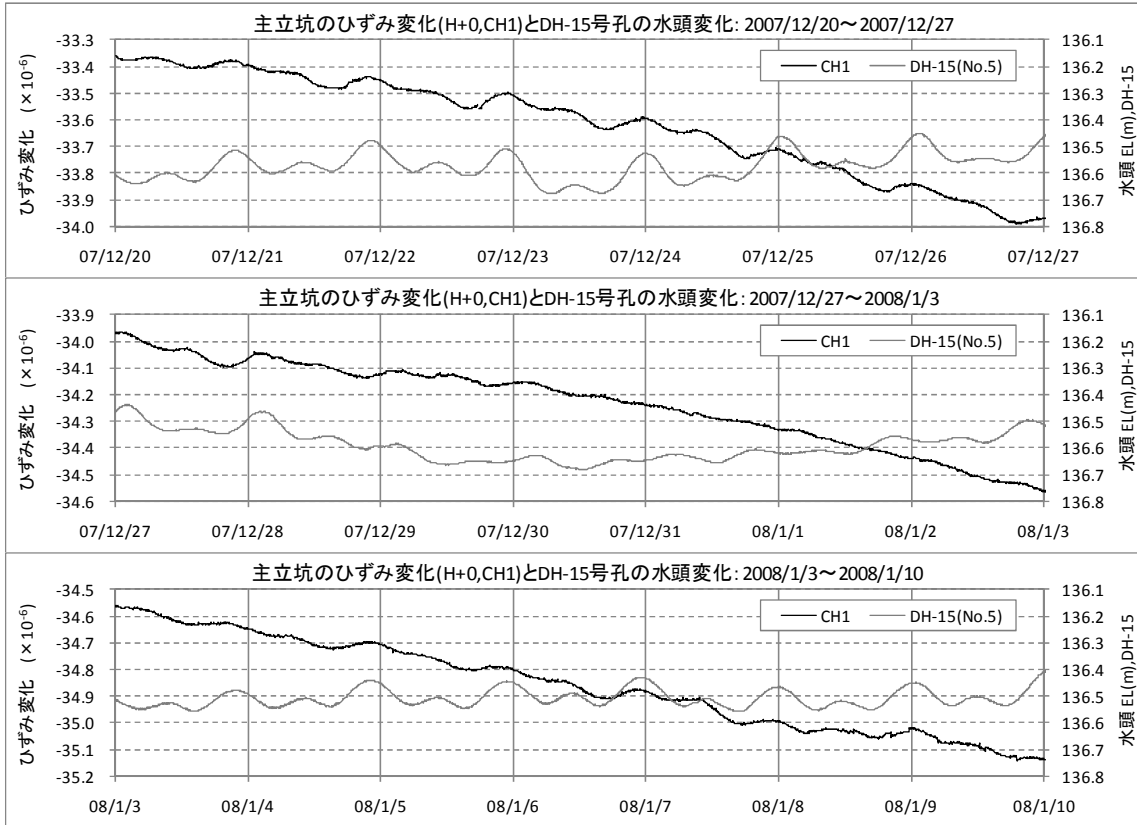


図 4.2.1-10(1) 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+0 : CH1)

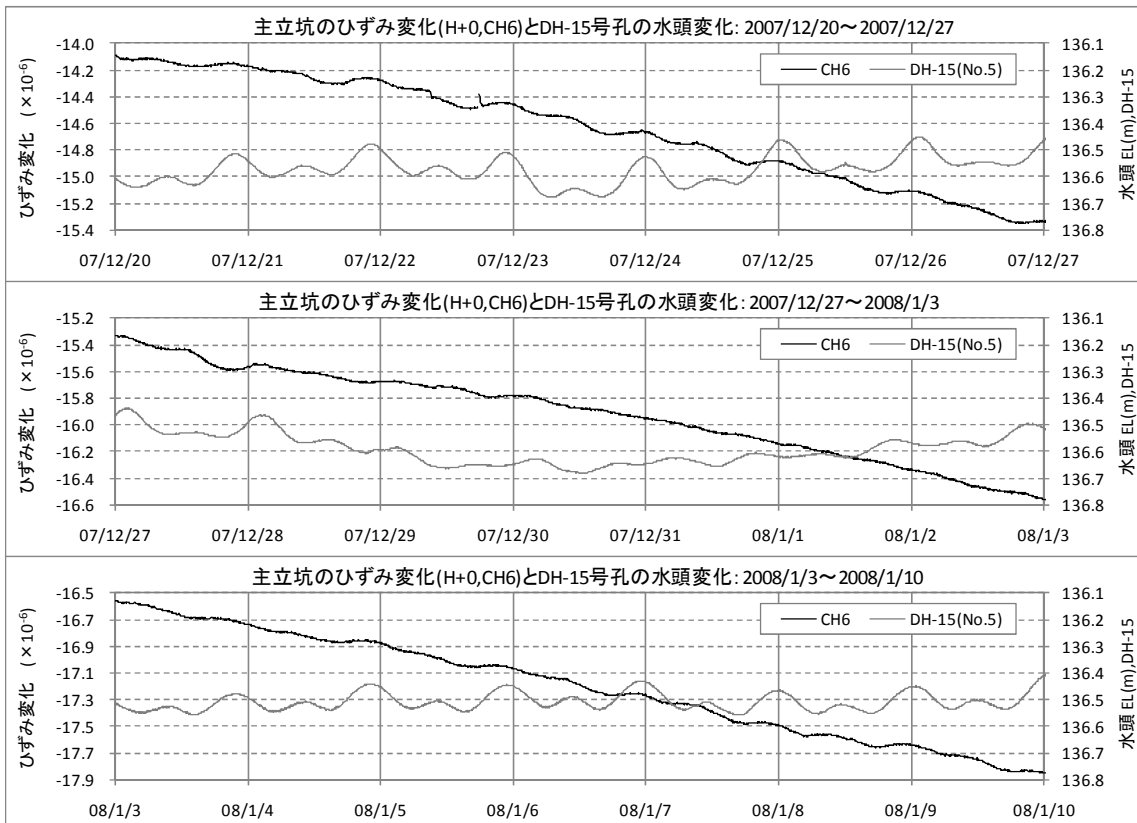


図 4.2.1-10(2) 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+0 : CH6)

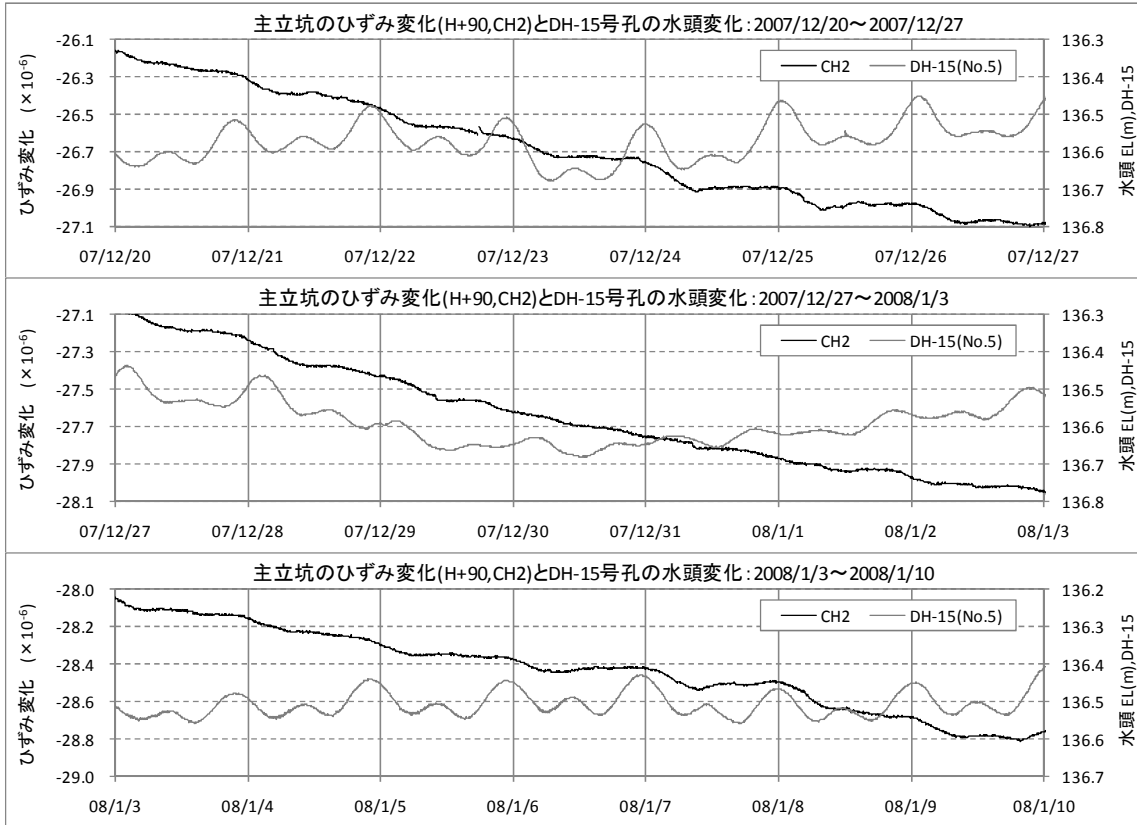


図 4. 2. 1-10 (3) 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+90 : CH2)

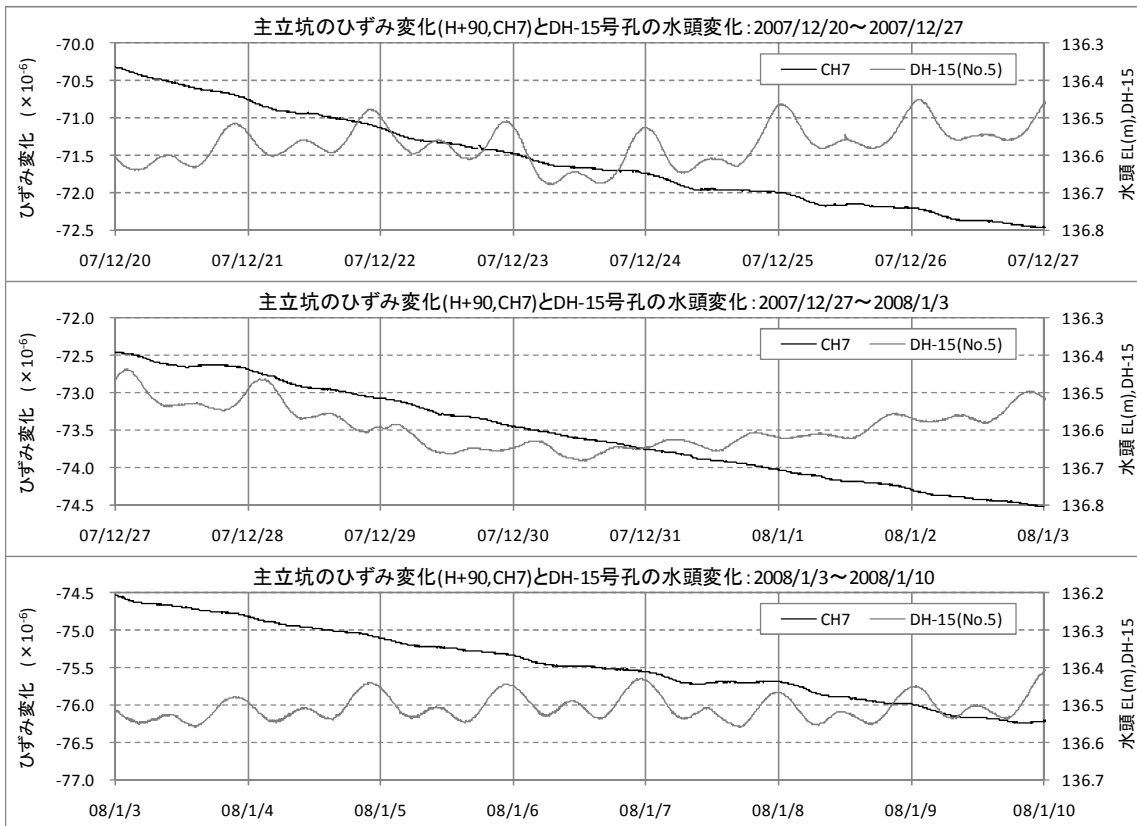


図 4. 2. 1-10 (4) 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+90 : CH7)

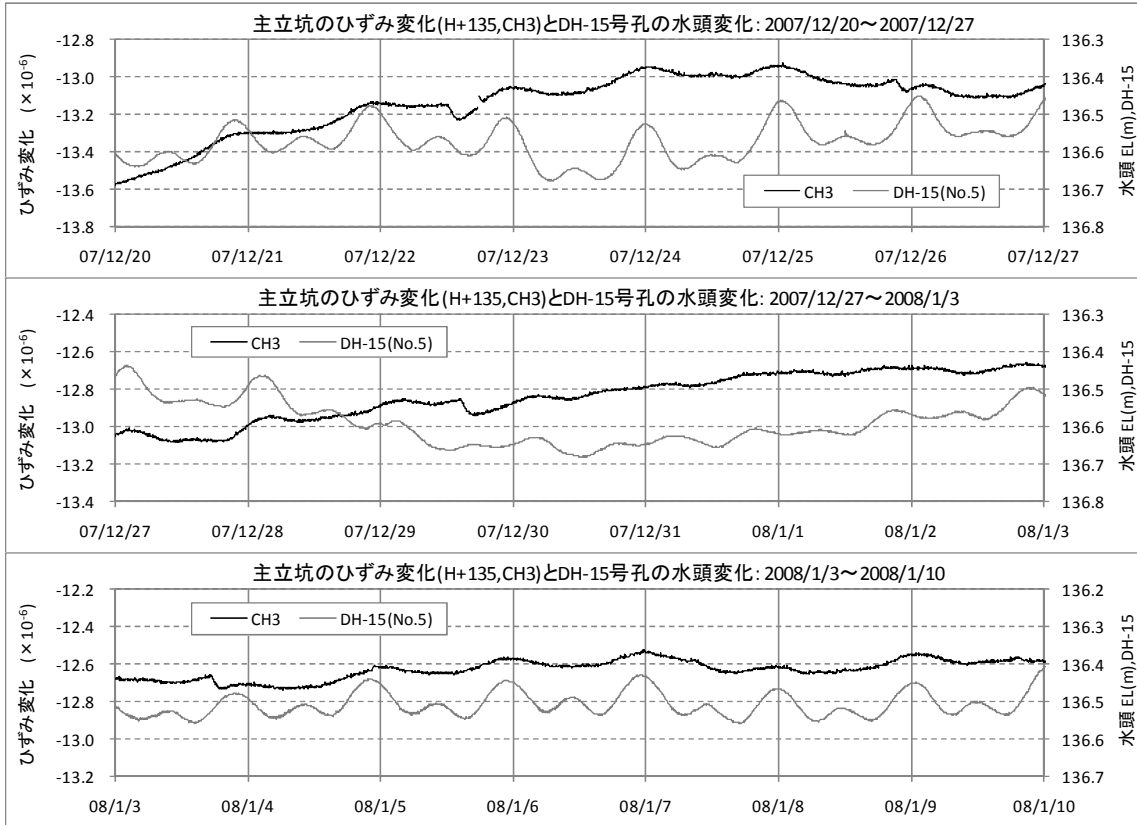


図 4. 2. 1-10 (5) 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+135 : CH3)

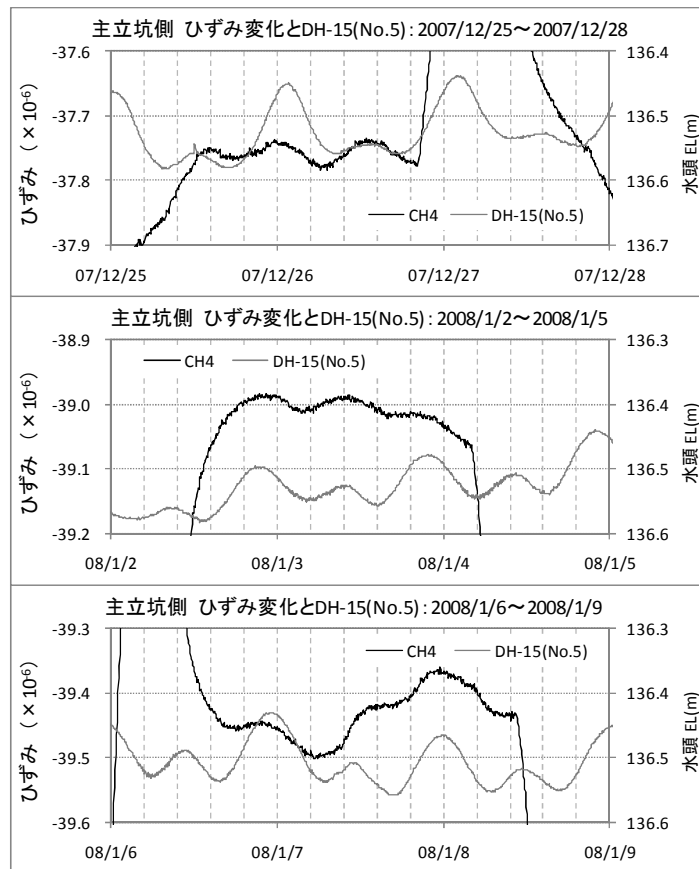


図 4. 2. 1-11 水平ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+45 : CH4)

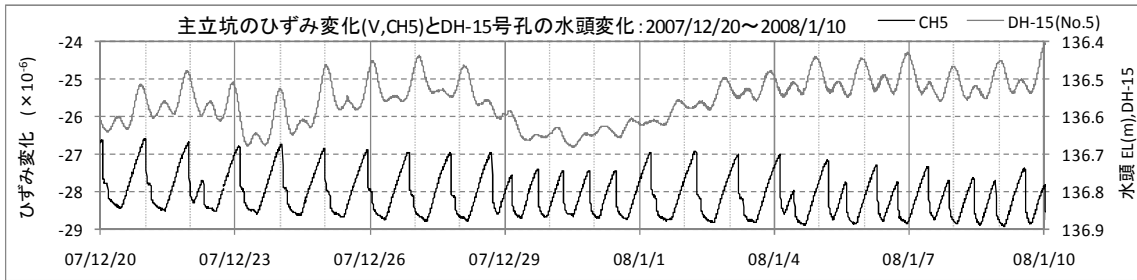


図 4. 2. 1-12 鉛直ひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化 (V : CH5)

先述したように、1日の累積ひずみが約 0.2×10^{-6} 以上あった場合には、潮汐力の影響によるひずみ変化が表れにくい。そこで、主立坑のひずみのうち H+0(CH1,CH6)、H+90(CH2,CH7)および H+135(CH3)について、線形変化とみなせる期間のひずみからトレンドを除去し、トレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔 (区間 No.5) の水頭変化とを比較して潮汐力の影響の有無を確認する。なお、ここではドリフトが収束し、立坑からの揚水の影響を受けたひずみ変化を示す期間 (2007年10月27日～11月16日) および主立坑の発破作業が再開される期間 (2008年1月10日以降) を除く期間をトレンド除去の対象とした。

トレンドを除去するためには、トレンドを何らかの関数として仮定し、フィッティングによってパラメータを求める方法が一般的である。ここでは、(1.1)式のようにトレンドを一次関数と仮定し、最小二乗法によって適切なパラメータ α 、 β を求め、(1.2)式を用いてトレンドの除去を行った。

$$\varepsilon_{\text{trend}} = \alpha t + \beta \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{\text{detrend}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{trend}} = \varepsilon - (\alpha t + \beta) \quad (1.2)$$

ここに、 t は時間、 ε はひずみ、 $\varepsilon_{\text{trend}}$ はトレンド、 $\varepsilon_{\text{detrend}}$ は除去後のひずみである。

実際の作業を H+0(CH1)および H+0(CH6)を例にして述べると、図 4.2.1-13～図 4.2.1-14 に示すように期間を①～④に分割し、分割した期間の時系列データを、図 4.2.1-15 に示すように平均値がゼロになるように平行移動させ、その図上で最小二乗法によってトレンドと仮定した一次関数の二つのパラメータ α と β を求めた。次に、図 4.2.1-13～図 4.2.1-14 に示した時系列データからトレンドとして求めた一次関数を引くことにより、トレンドを除去した時系列データである図 4.2.1-16 を得た。

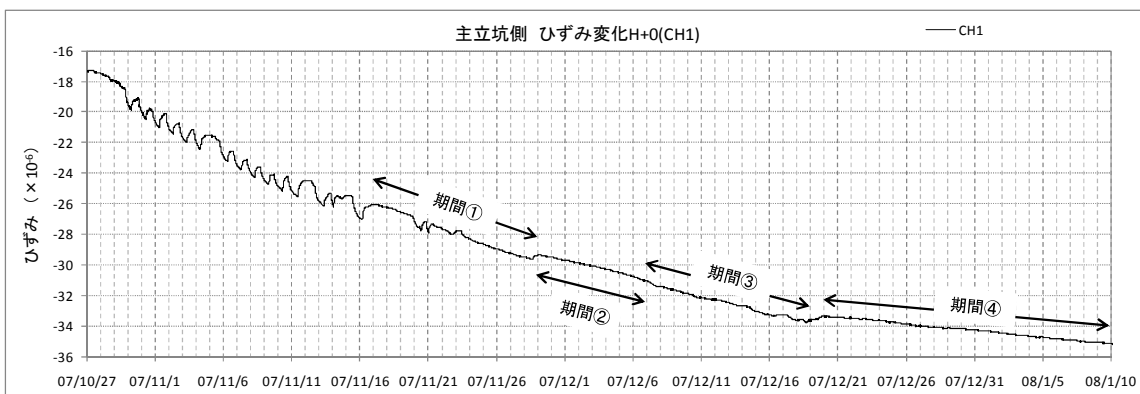


図 4. 2. 1-13 主立坑側のひずみ変化 H+0(CH1) の期間区分

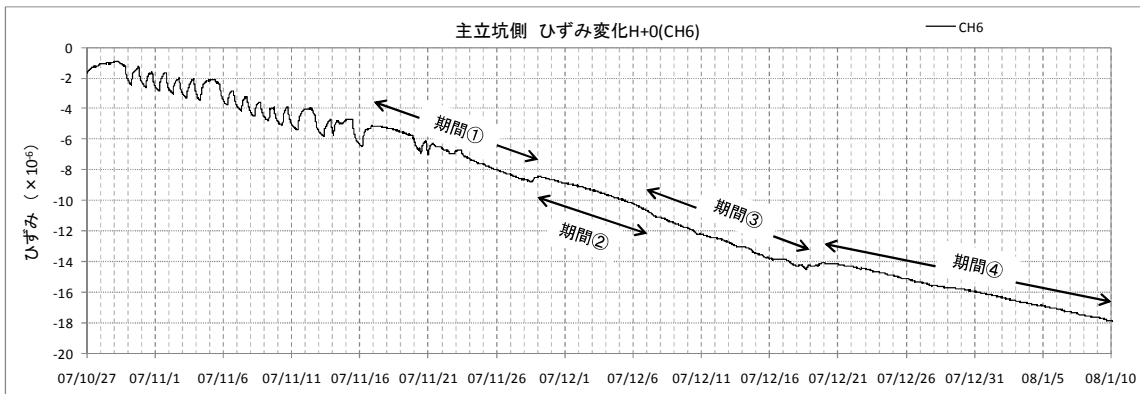


図 4.2.1-14 主立坑側のひずみ変化 H+0 (CH6) の期間区分

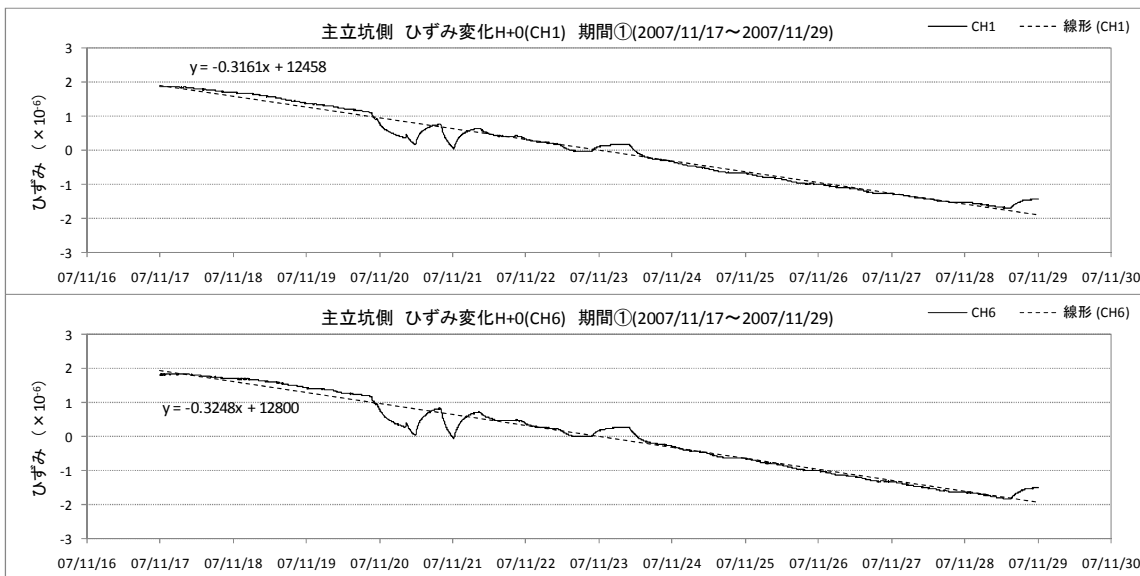


図 4.2.1-15 H+0 (CH1) および H+0 (CH6) の期間①におけるトレンドの推定

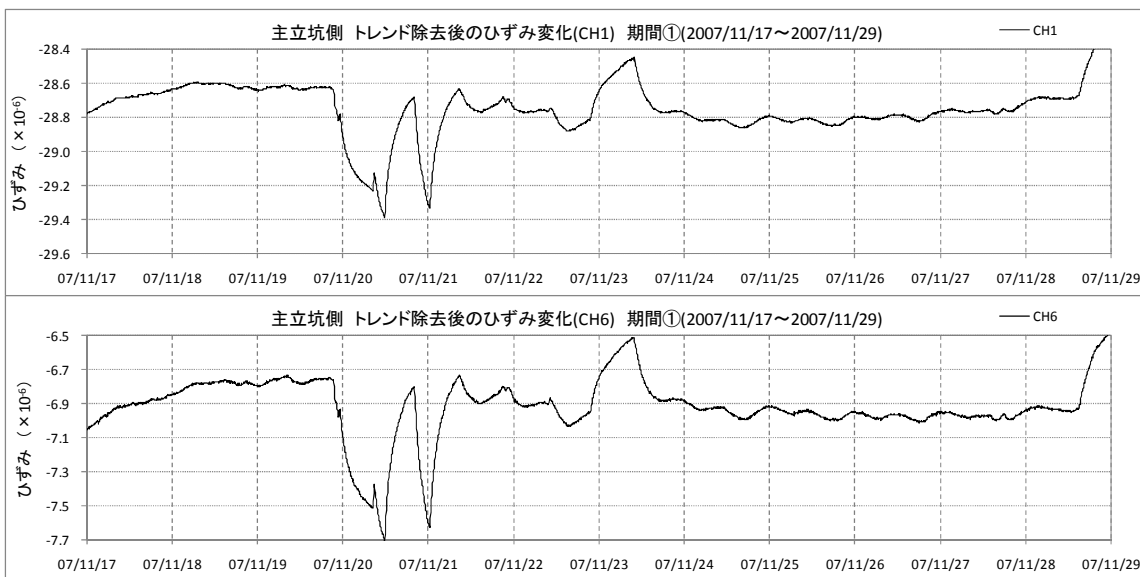


図 4.2.1-16トレンド除去後のひずみ変化 H+0 (CH1), H+0 (CH6) : 期間①

次に、トレンドを除去したひずみ変化と名古屋港の天文潮位とよい相関を示す DH-15 号孔（区間 No.5）とを比較し、潮汐力の影響の有無を検討する。なお、DH-15 号孔（区間 No.5）のデータも同様の方法でトレンドを除去している。

図 4.2.1-17～図 4.2.1-20 に H+0(CH1)および H+0(CH6)における期間①～④のトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化を示す。図に示すように、CH1 と CH6 は同じような変化する挙動を示しており、トレンド除去後のひずみ変化においても下記に示す期間（図中の矢印で示した期間）で潮汐変動との同調が確認できる。

期間①：2007年11月21日～11月22日、11月24日～11月27日

期間②：2007年11月30日～12月6日

期間③：2007年12月8日～12月10日

期間④：2007年12月20日～12月27日、2008年1月3日～1月10日

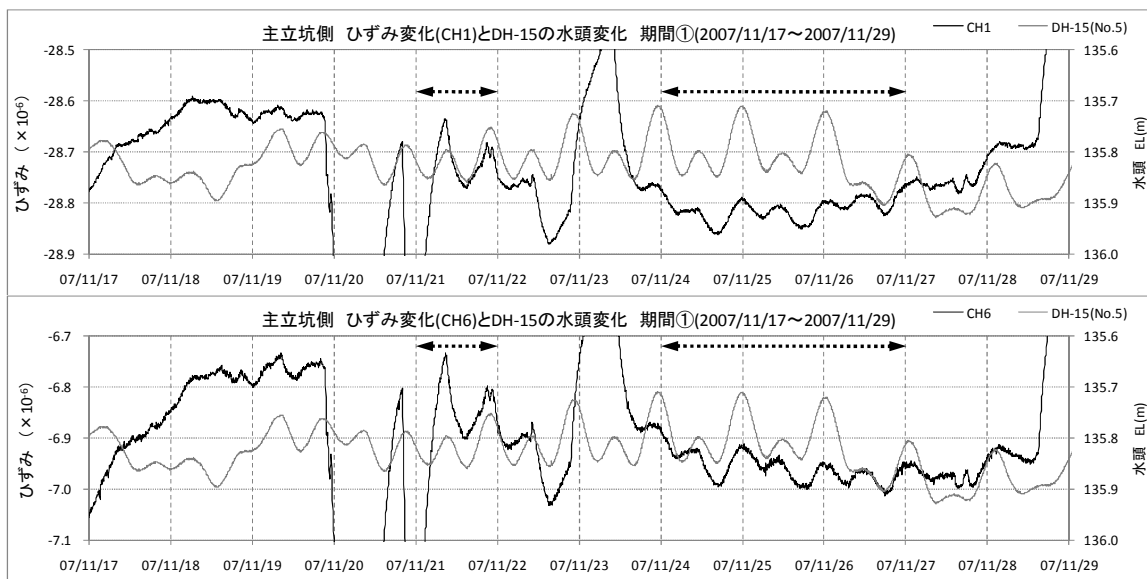


図 4.2.1-17 トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1, CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間①

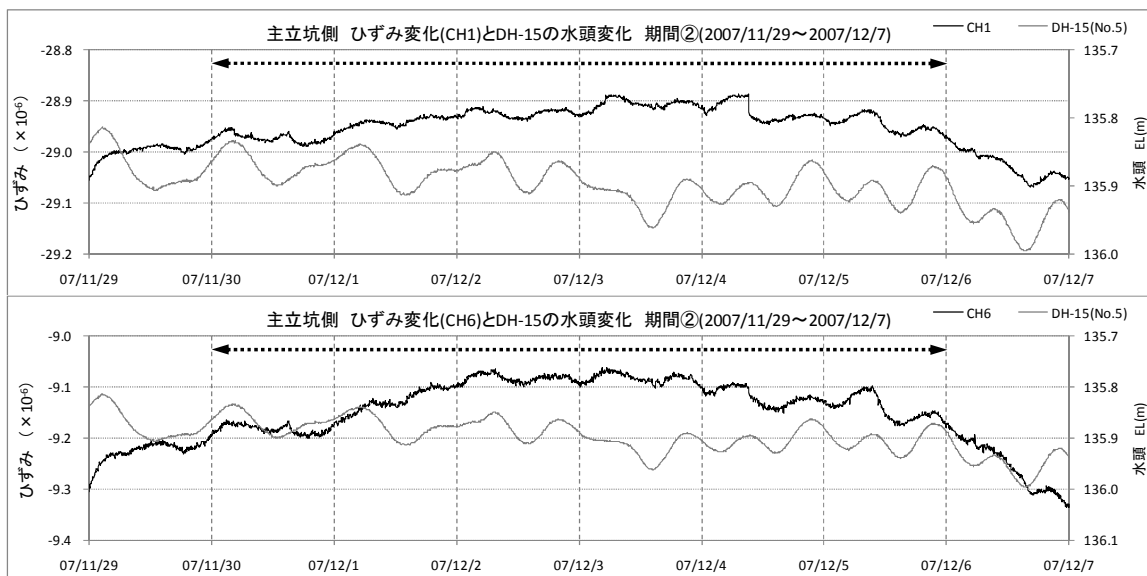


図 4.2.1-18 トレンド除去後のひずみ変化 H+0(CH1, CH6)と DH-15 号孔の水頭変化：期間②

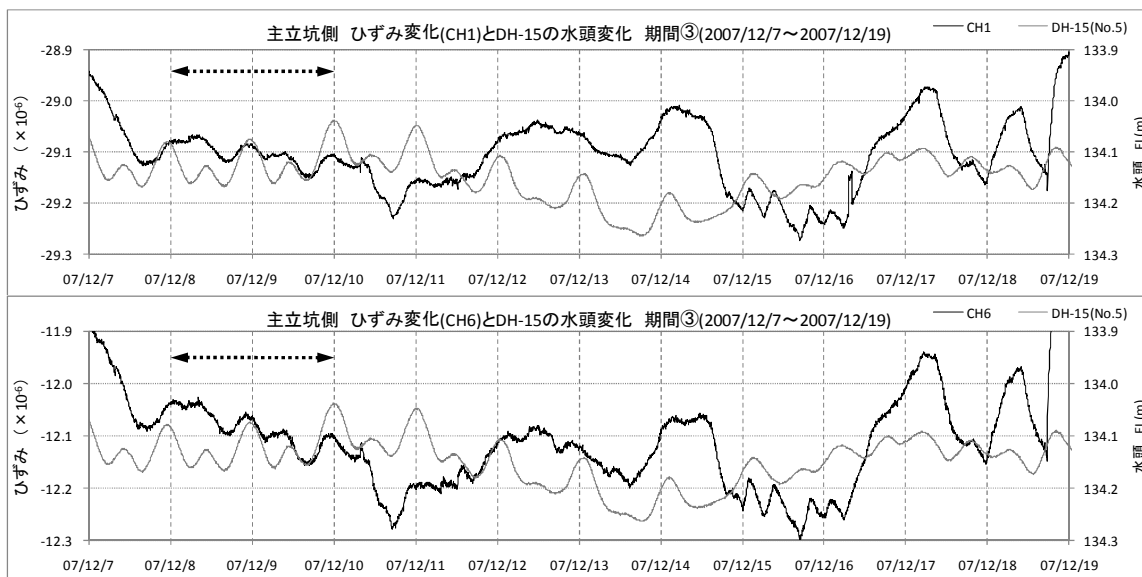


図 4. 2. 1-19 トレンド除去後のひずみ変化 H+0 (CH1, CH6) と DH-15 号孔の水頭変化 : 期間③

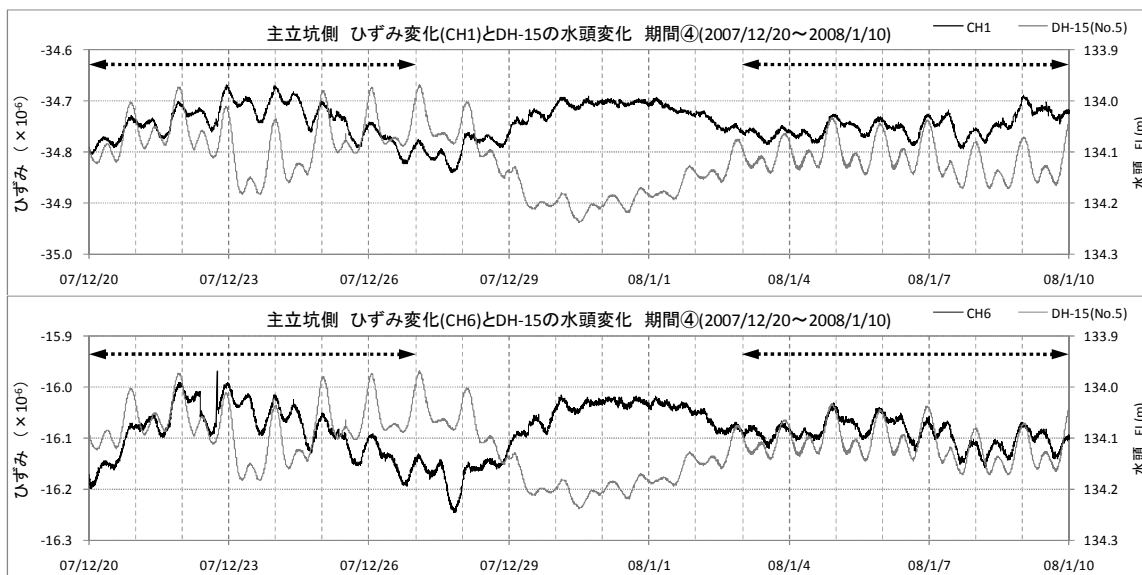


図 4. 2. 1-20 トレンド除去後のひずみ変化 H+0 (CH1, CH6) と DH-15 号孔の水頭変化 : 期間④

H+90(CH2)および H+90(CH7)のひずみ変化と期間区分を図 4.2.1-21～図 4.2.1-22 に示すとともに、図 4.2.1-23～図 4.2.1-26 に期間①～④のトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化を示す。図に示すように、CH2 と CH7 は同じような変化挙動を示しており、トレンド除去後のひずみ変化においても下記に示す期間①と期間④の一部で潮汐変動との同調がみられる。

期間①：2007年11月24～11月27日

期間④：2007年12月23日～12月29日、2008年1月2日～1月8日

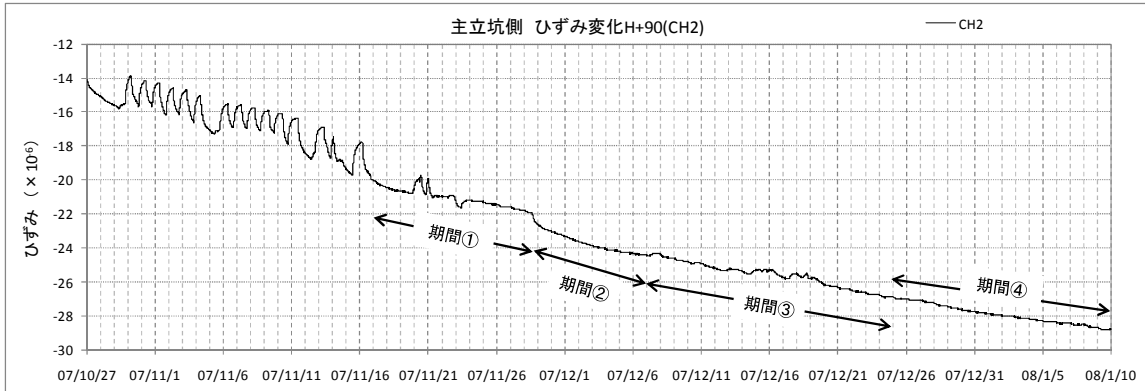


図 4.2.1-21 主立坑側のひずみ変化 H+90 (CH2) の期間区分

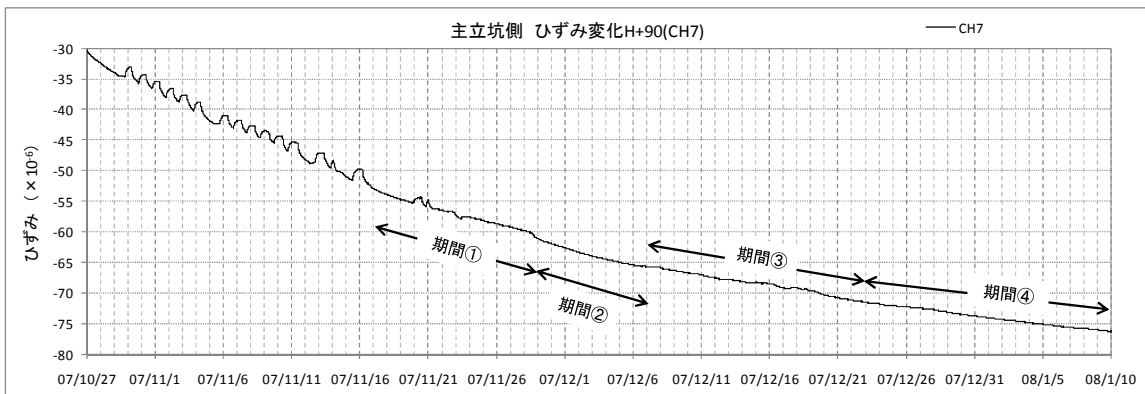


図 4.2.1-22 主立坑側のひずみ変化 H+90 (CH7) の期間区分

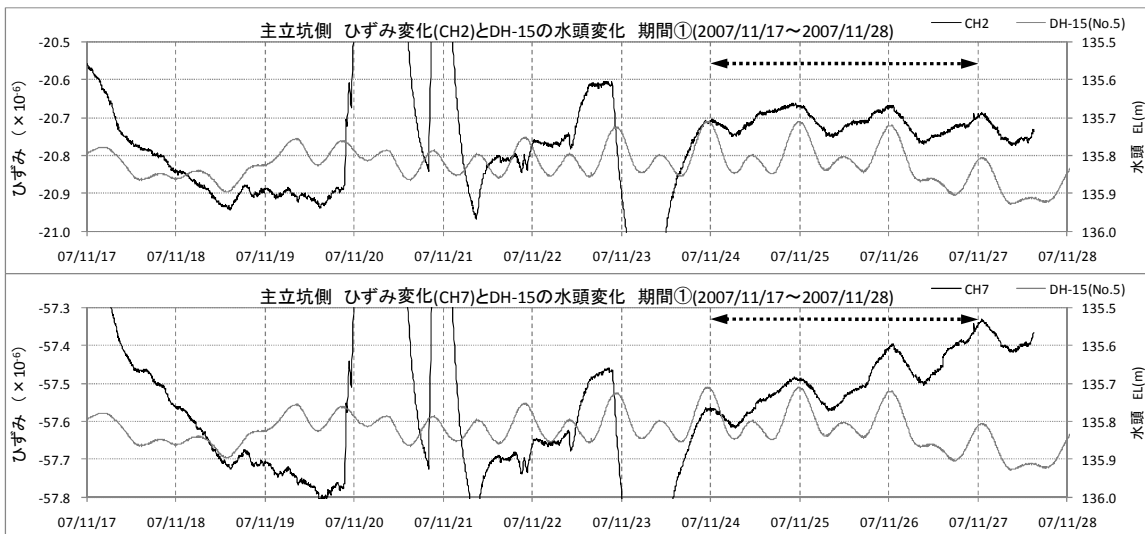


図 4.2.1-23 トренд除去後のひずみ変化 H+90 (CH2, CH7) と DH-15 号孔の水頭変化：期間①

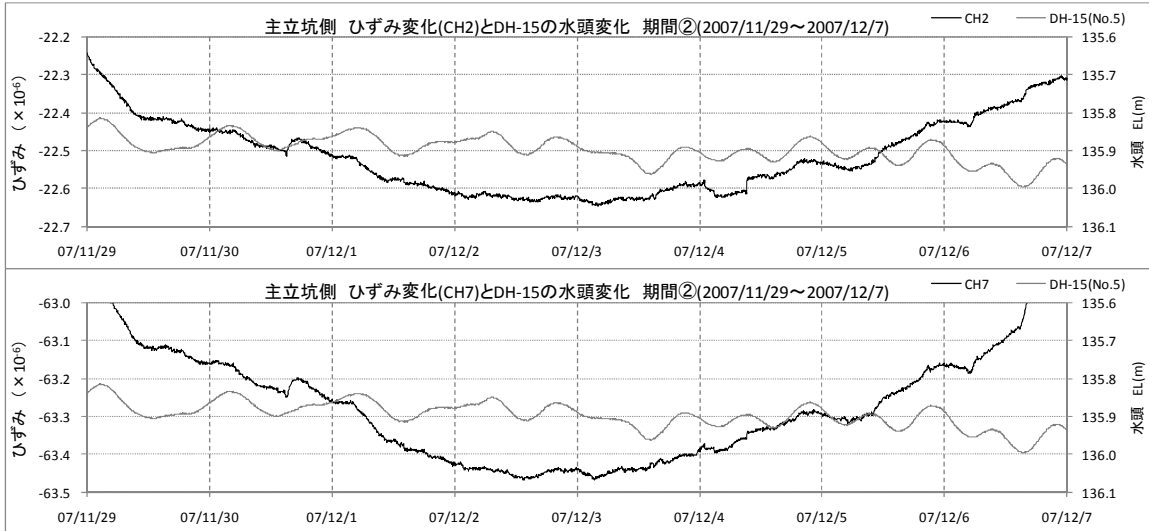


図 4.2.1-24 トレンド除去後のひずみ変化 H+90 (CH2, CH7) と DH-15 号孔の水頭変化 : 期間②

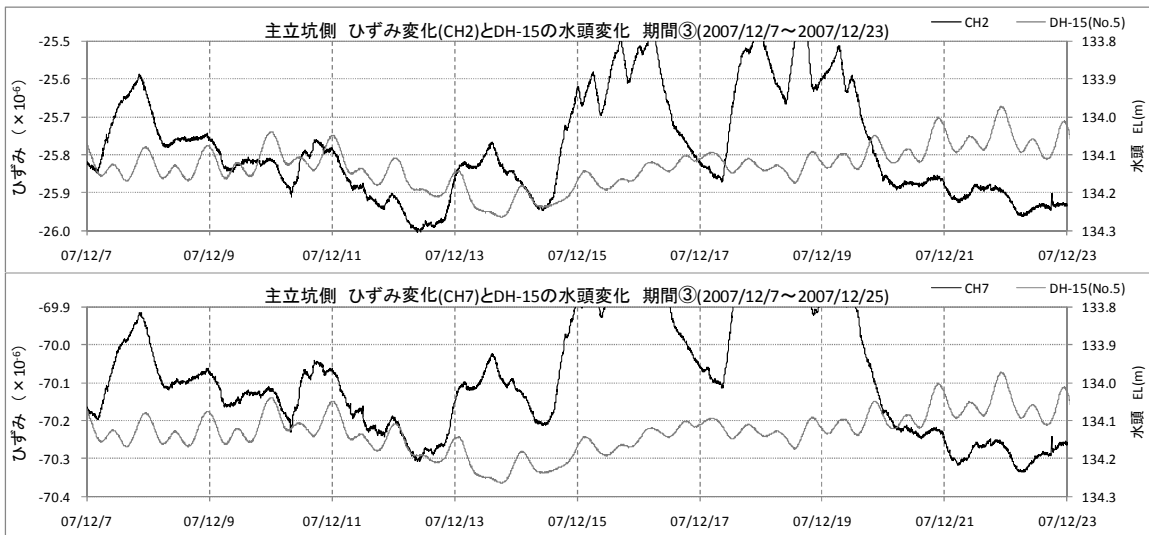


図 4.2.1-25 トレンド除去後のひずみ変化 H+90 (CH2, CH7) と DH-15 号孔の水頭変化 : 期間③

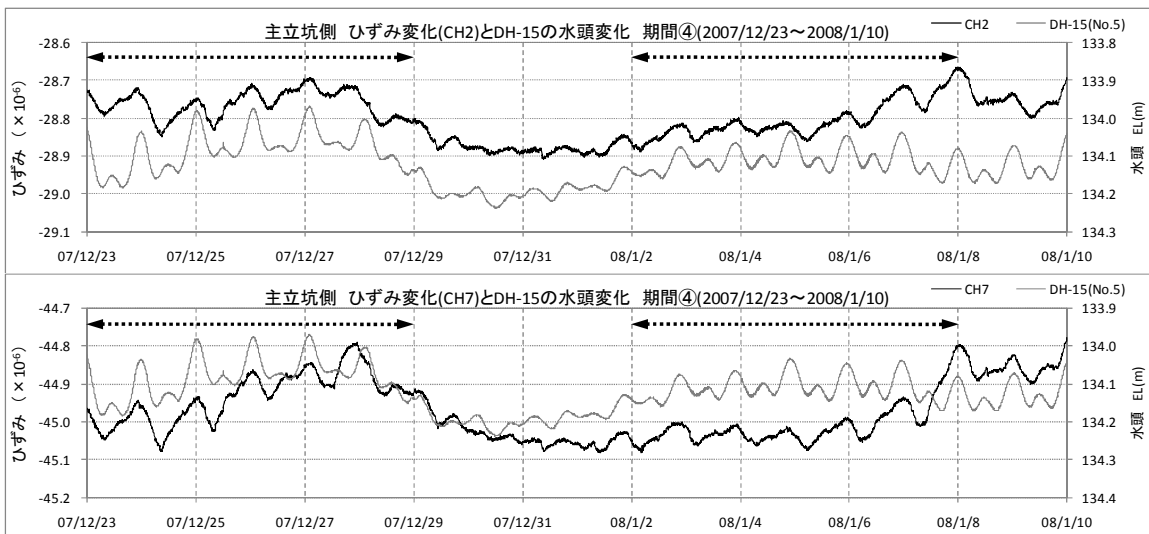


図 4.2.1-26 トレンド除去後のひずみ変化 H+90 (CH2, CH7) と DH-15 号孔の水頭変化 : 期間④

H+135(CH3)は、図 4.2.1-27 に示すように、線形変化しているとみなせる期間①～④においてトレンドを除去する。図 4.2.1-28 にトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化を示す。図をみると、下記に示す期間で部分的に潮汐変動と同調したひずみ変化がみられる。

期間①：2007年11月24日～11月26日 期間②：2007年11月29日～12月1日
 期間③：2007年12月9日～12月11日 期間④：2007年12月23～2008年1月10日

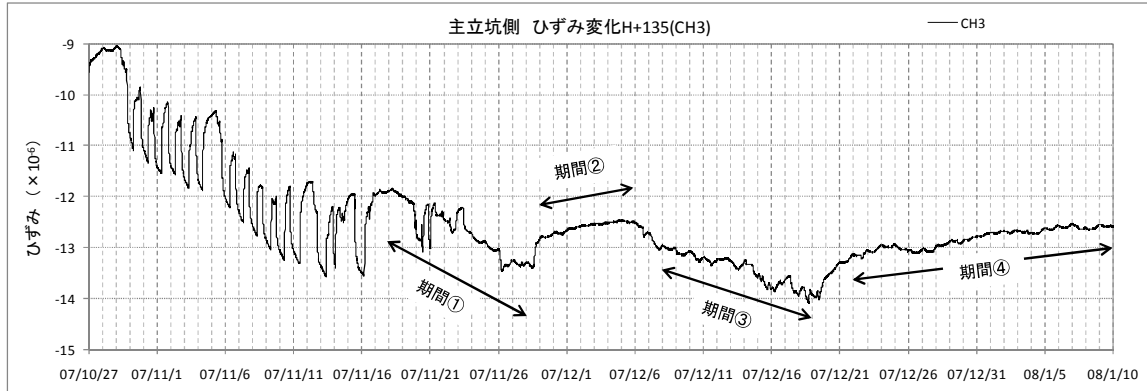


図 4.2.1-27 主立坑側のひずみ変化 H+135 (CH3) の期間区分

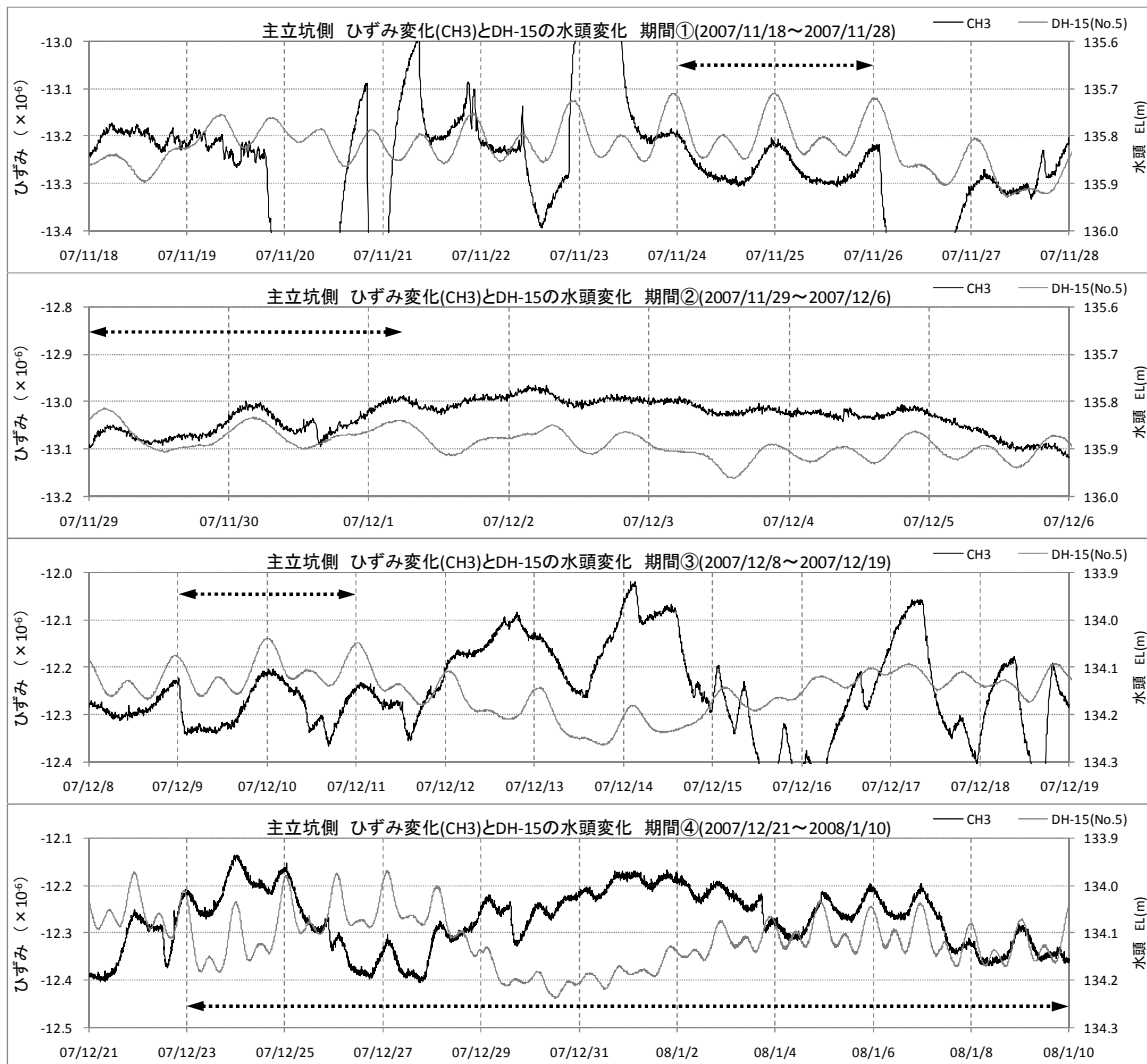


図 4.2.1-28 トренд除去後のひずみ変化 H+135 (CH3) と DH-15 号孔の水頭変化：期間①～④

(5) 発破の影響

主立坑では2008年1月14日から発破作業が再開された。表4.2.1-1に主立坑における発破日時と掘削深度および使用した火薬量を示す。

表4.2.1-1 主立坑の発破日時

発破日時	立坑深度 (m)	火薬量 (kg)
発破① 2008/1/14 12:50	201.8	55.4
発破② 2008/1/22 19:15	204.4	56.5
発破③ 2008/1/24 6:50	205.8	46.7
発破④ 2008/1/26 5:17	207.4	45.7
発破⑤ 2008/1/28 23:30	209.0	44.0
発破⑥ 2008/1/31 2:31	210.6	44.1
発破⑦ 2008/2/2 5:15	212.2	43.7
発破⑧ 2008/2/5 12:15	213.8	50.8

図4.2.1-29～図4.2.1-37に、発破の約5時間前から発破後約6時間のひずみ変化を示し、各発破後のひずみ変化について述べる。

なお、ここでは発破の約5時間前のひずみ値からの相対変位を示し、横軸の時間0は発破時間を表している。

1) 水平ひずみ

・発破① (2008/1/14 12:50)

図 4.2.1-29 (1)に示すように、発破前に H+0、H+90 および H+135 の水平ひずみに大きな変化はみられなかったが、発破後には H+0 と H+135 で圧縮ひずみの増加傾向、H+90 で引張りひずみの増加傾向に転じている。H+0 の CH1 では、発破直後に 0.25×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じた後に圧縮ひずみの増加傾向に転じている。H+90 では、発破直後に $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.45 \times 10^{-6}$ 程度の引張りひずみが生じている。

一方、H+45 については図 4.2.1-29 (2)に示すように、他のチャンネルとは 1 オーダー違った変化を示し、発破直後に 1.6×10^{-6} 程度のひずみが生じたあと、大きく引張りひずみの増加に転じている。しかしこれは、図 4.2.1-29 (3)に示すように、発破時刻が周期性のあるひずみ変化と重なったものであり、発破の影響による変化ではないと考えられる。

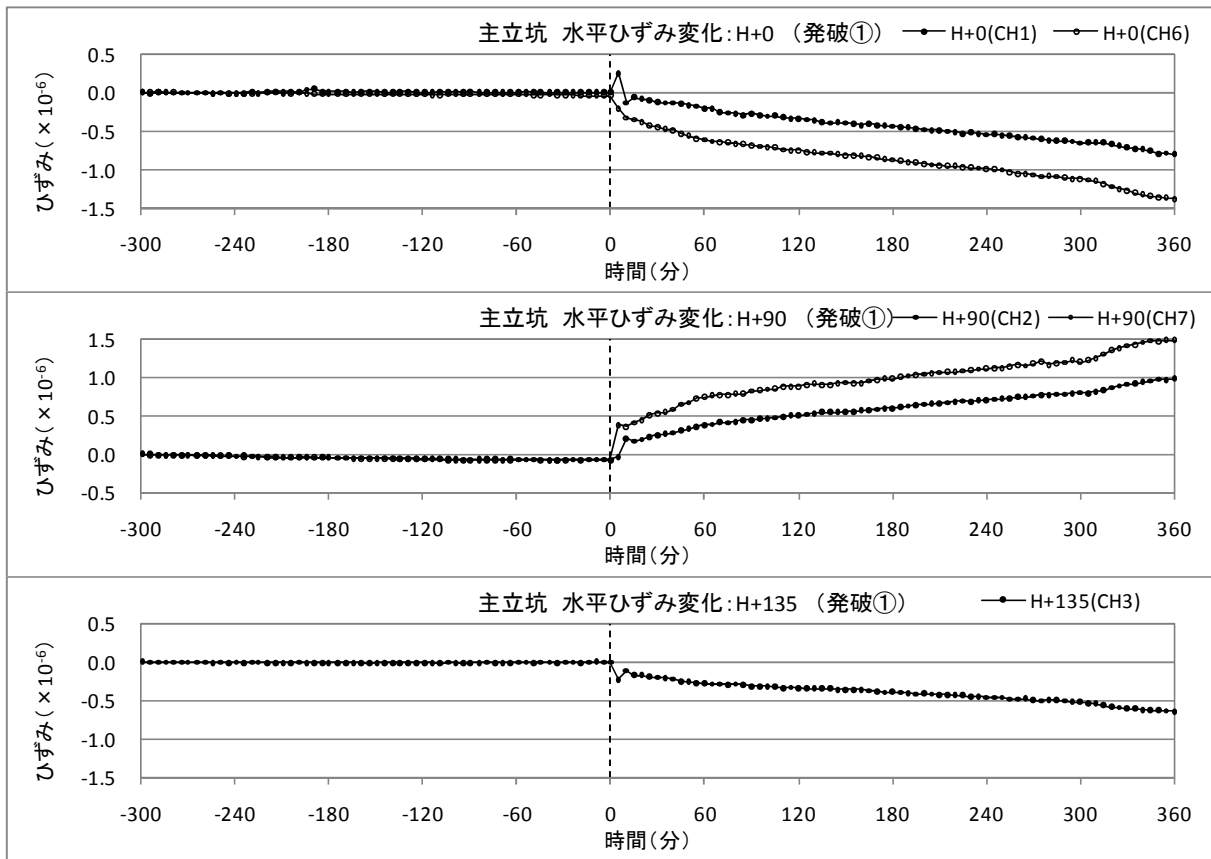


図 4.2.1-29 (1) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破①)

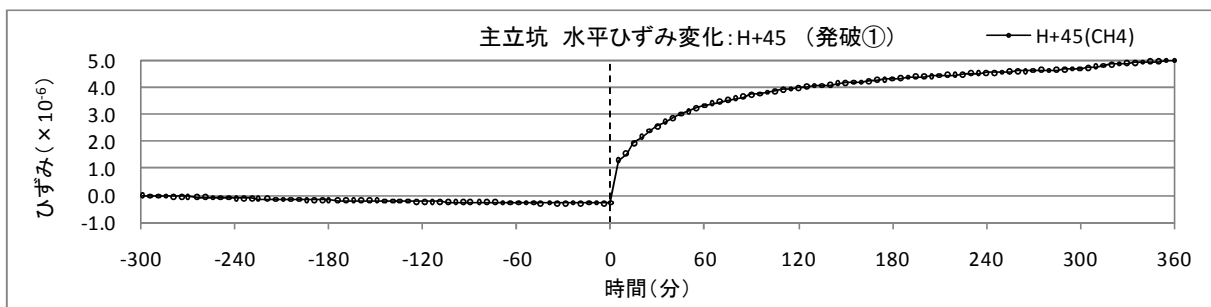


図 4.2.1-29 (2) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破①)

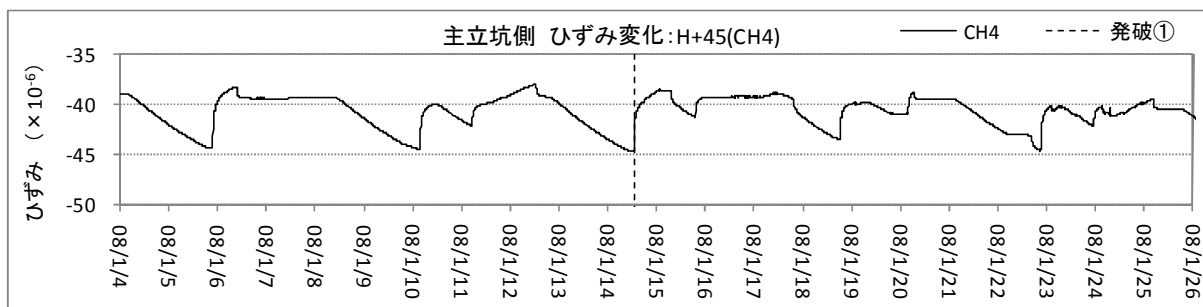


図 4. 2. 1-29 (3) 主立坑の水平ひずみ変化 : H+45(CH4)

・発破② (2008/1/22 19:15)

図 4.2.1-30(1)に示すように、H+0 は発破前に圧縮ひずみの微増傾向にあったが、発破後約 30 分間で引張りひずみが急増し、その後は発破の約 2 時間後頃まで引張りひずみの増加が続き、以降は圧縮ひずみの増加に転じている。H+90 は発破前に大きな変化はなかったが、発破後 30 分間で圧縮ひずみが急増し、約 2 時間後からは引張りひずみの増加に転じている。H+135 は、発破前に大きな変化はなかったが、発破後の約 2 時間まで引張りひずみの増加を示している。

一方、図 4.2.1-30(2)に示すように、H+45 は発破前後の圧縮ひずみ増加傾向のなか、発破直後に 0.1×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが発生している。

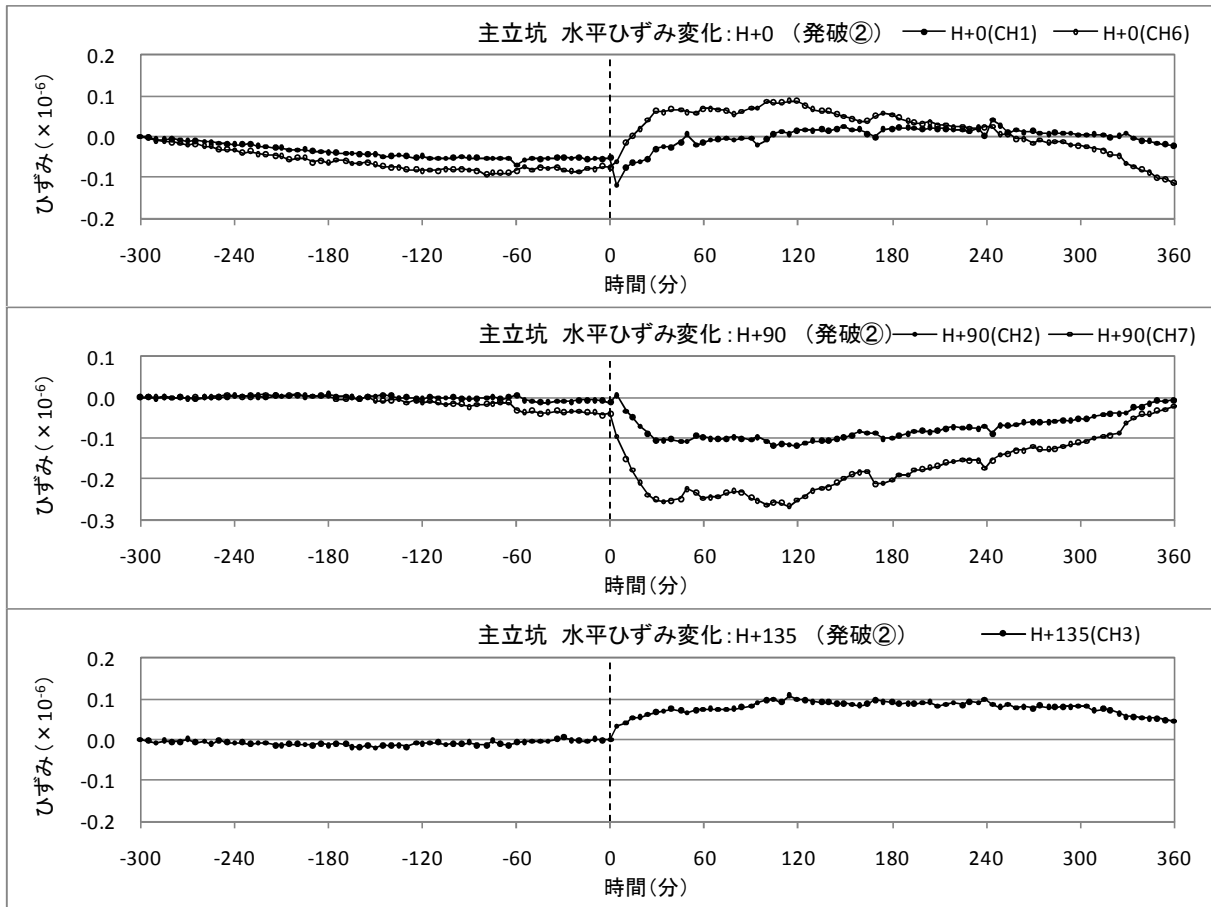


図 4.2.1-30(1) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破②)

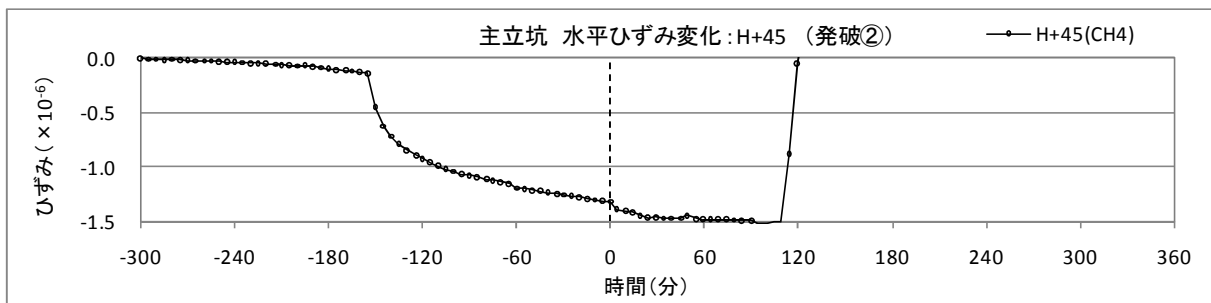


図 4.2.1-30(2) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破②)

・発破③ (2008/1/24 6:50)

図 4.2.1-31 に示すように、H+0 および H+135 では、発破前の引張りひずみ増加傾向のなか、発破後約 30 分で 0.3×10^{-6} ~ 0.8×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが生じ、発破後約 40 分から 1 時間で元のトレンドに戻っている。H+90 および H+45 は圧縮ひずみの増加傾向のなか、発破後約 30 分で 0.5×10^{-6} ~ 1.0×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じ、約 40 分から 1 時間後で元のトレンドに戻っている。

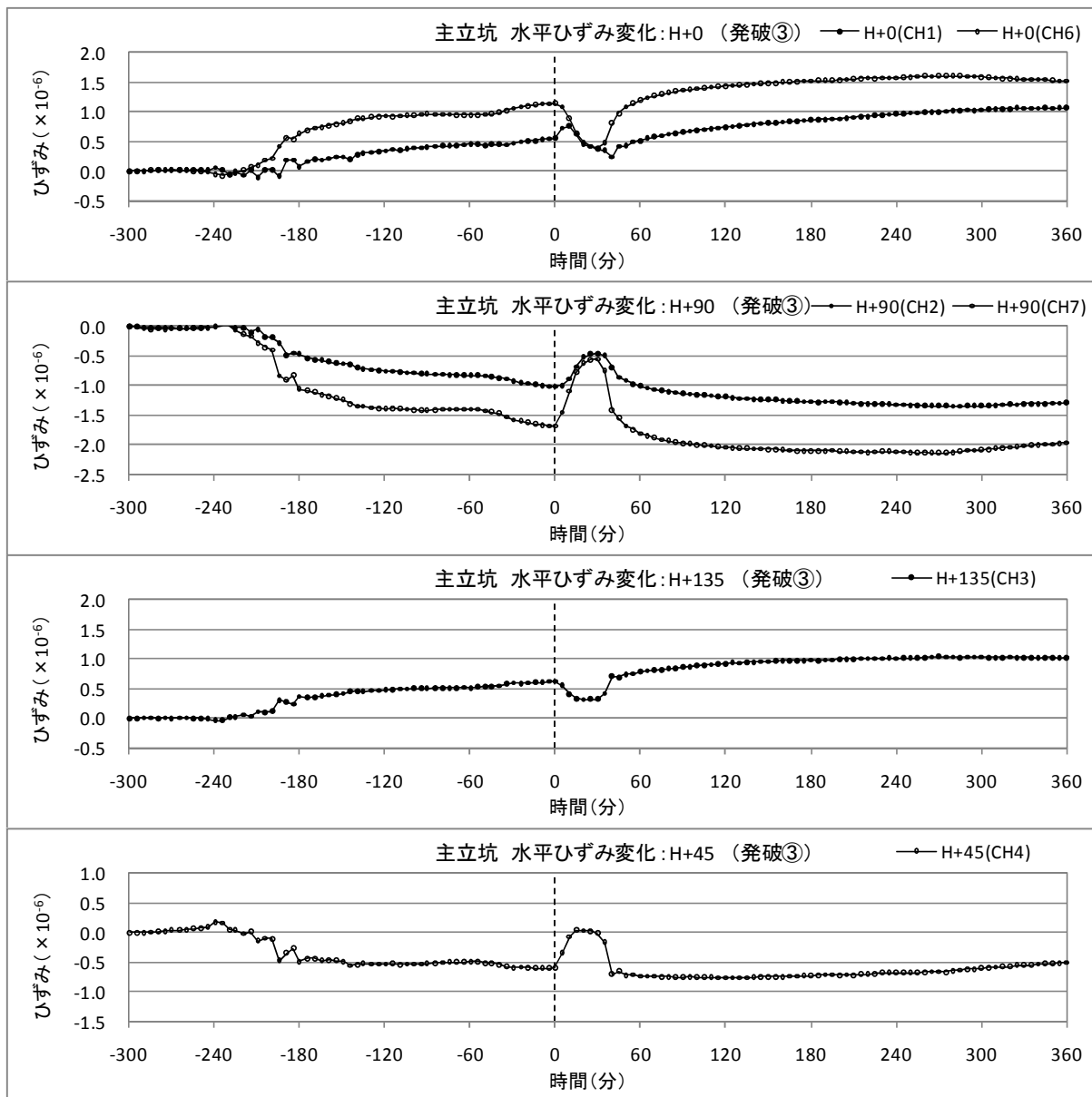


図 4.2.1-31 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破③)

・発破④ (2008/1/26 5:17)

図 4.2.1-32(1)に示すように、H+0 は発破前のひずみに大きな変化はなかったが、発破後に圧縮ひずみの増加傾向に転じている。H+90 は発破前にやや圧縮ひずみの増加傾向にあったが、発破後に引張りひずみの増加傾向に転じている。H+135 は発破前に引張りひずみの増加傾向にあり、発破直後に計測値がバラついた後に圧縮ひずみの増加傾向に転じている。

一方、H+45 は図 4.2.1-32(2)に示すように、他のチャンネルと比べ 1 オーダー大きい割合でひずみが増加している。また、発破前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、発破後に大きなひずみ変化はみられない。

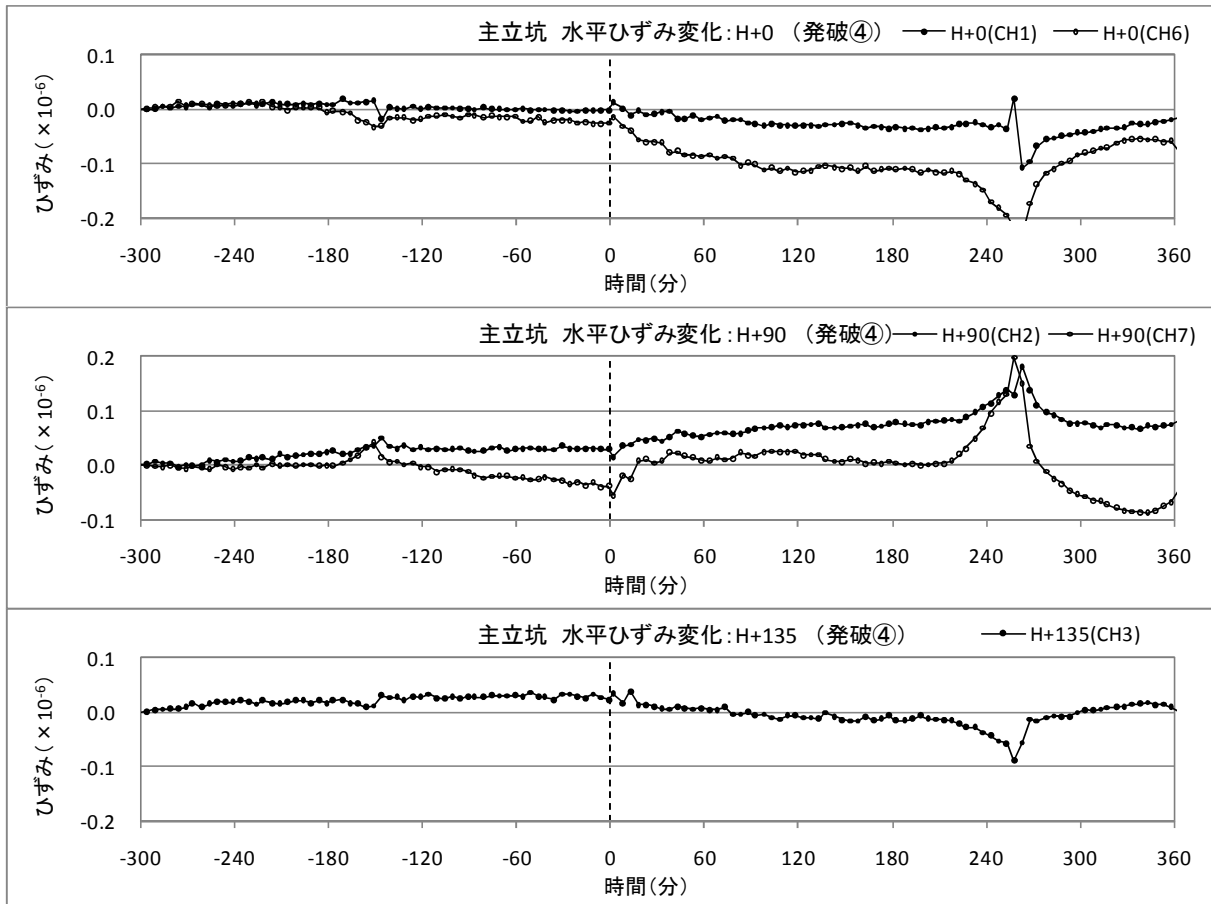


図 4.2.1-32(1) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破④)

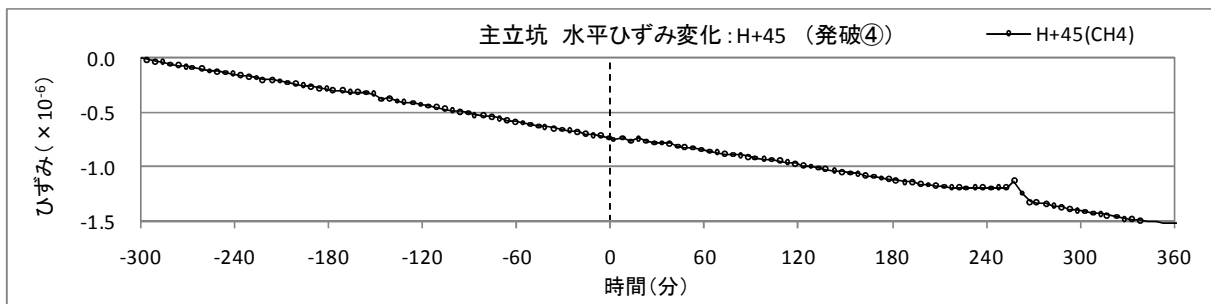


図 4.2.1-32(2) 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破④)

・発破⑤ (2008/1/28 23:30)

図 4.2.1-33 に示すように、H+0 および H+135 では発破 2 時間前からの引張りひずみの増加傾向のなか、発破直後に 0.1×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じ、発破後約 3 時間で元のトレンドに戻っている。H+0 の CH1 で発破の約 10 分後に遅れて生じた引張りひずみは、 0.01×10^{-6} と小さかった。H+90 および H+45 は、発破直後に 0.15×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが増加したあと、引張りひずみの増加傾向に転じている。

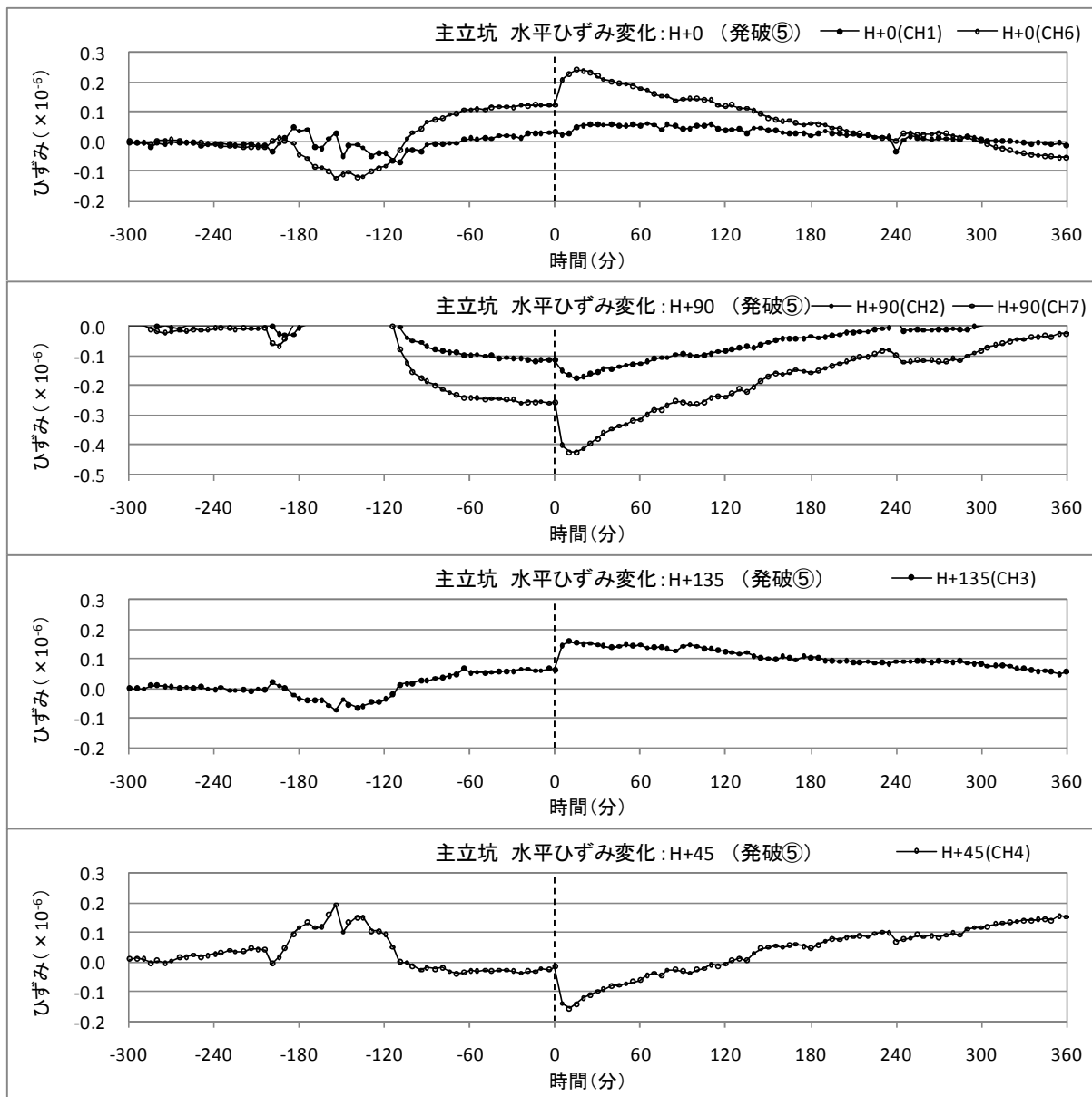


図 4.2.1-33 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑤)

・発破⑥ (2008/1/31 2:31)

図 4.2.1-34 に示すように、H+0 および H+135 では、発破前に圧縮ひずみの増加傾向であったが、発破後は引張りひずみの増加傾向に転じている。H+0 の CH6 および H+135 の CH3 では、発破直後に 0.2×10^{-6} ～ 0.3×10^{-6} 程度の引張りひずみが発生したが、H+0 の CH1 では 0.2×10^{-6} の圧縮ひずみが発生した。H+90 および H+45 では、発破直後に 0.2×10^{-6} ～ 0.4×10^{-6} の圧縮ひずみが生じた。H+90 は発破後、圧縮ひずみの増加傾向に転じている。

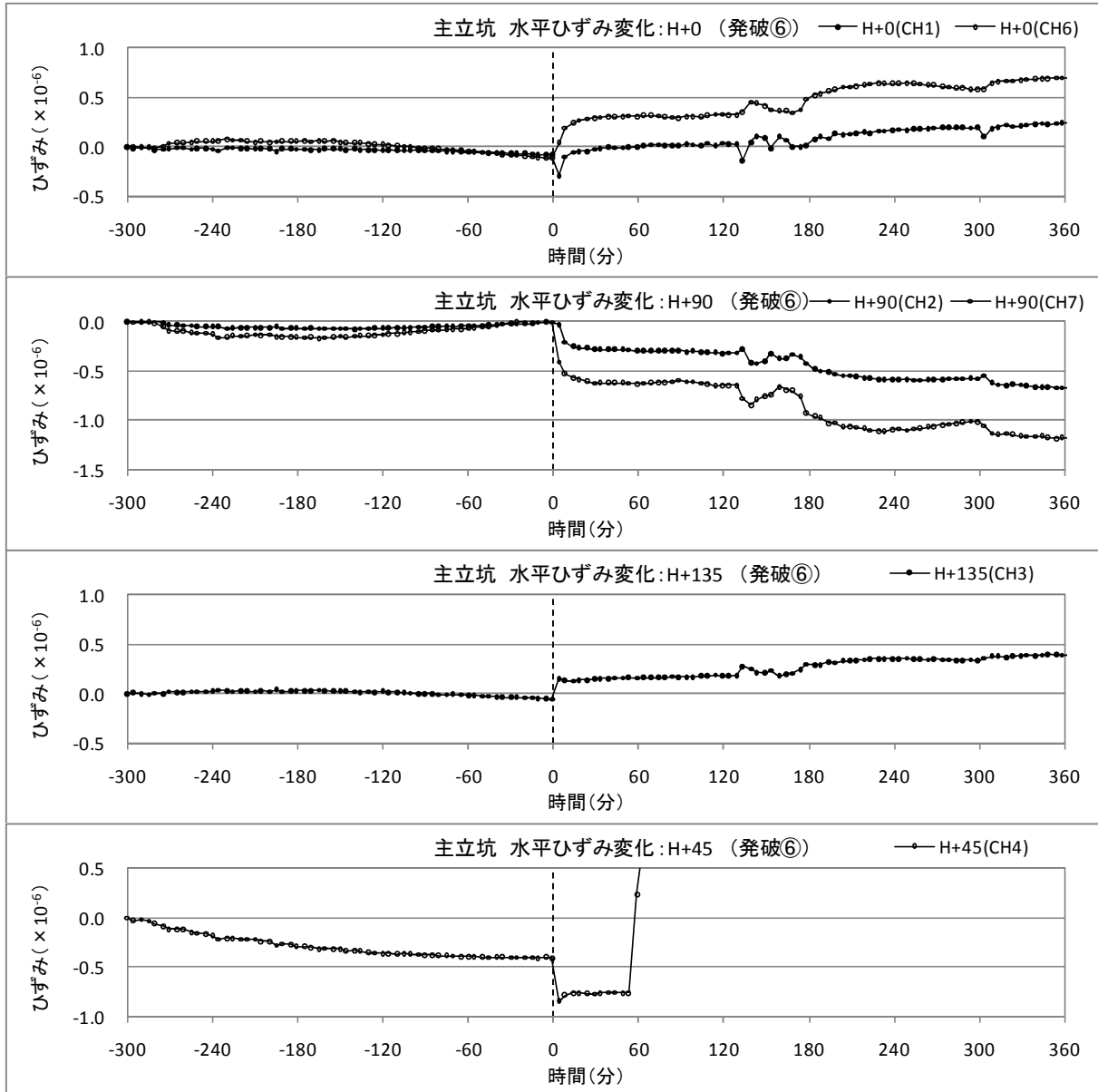


図 4.2.1-34 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑥)

・発破⑦ (2008/2/2 5:15)

図 4.2.1-35 に示すように、H+0 は、発破後に $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.2 \times 10^{-6}$ 程度の引張りひずみが生じている。H+0 の CH1 では発破後に引張りひずみの微増がみられるが、CH6 では発破の約 30 分後から 2 時間後程度は圧縮ひずみの微増がみられたあと、安定した値を示した。H+135 は発破直後に 0.2×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じたが、その後は大きな変化はみられなかった。H+90 は発破後に $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが生じ、発破の約 2 時間後以降は安定した値を示した。H+45 では、発破直後に 0.2×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが発生している。

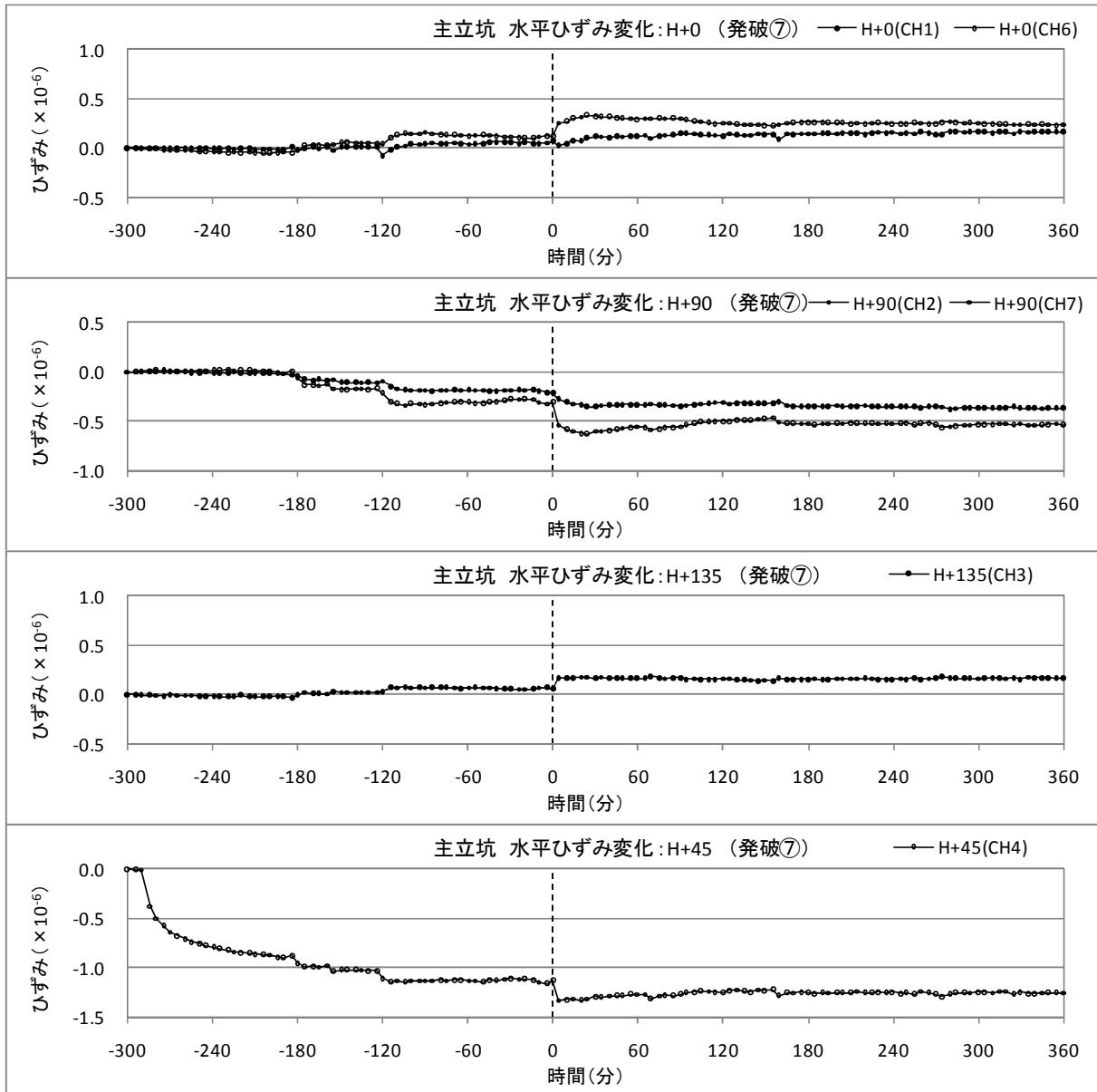


図 4.2.1-35 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑦)

・発破⑧ (2008/2/5 12:15)

図 4.2.1-36 に示すように、H+0 および H+135 は発破直後に $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.4 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが増加した後、2 時間程度は圧縮ひずみの増加が継続し、その後元のトレンドに戻っている。H+90 および H+45 では、発破直後に $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$ 程度の引張りひずみが急増し、発破後 2 時間で元のトレンドに戻っている。

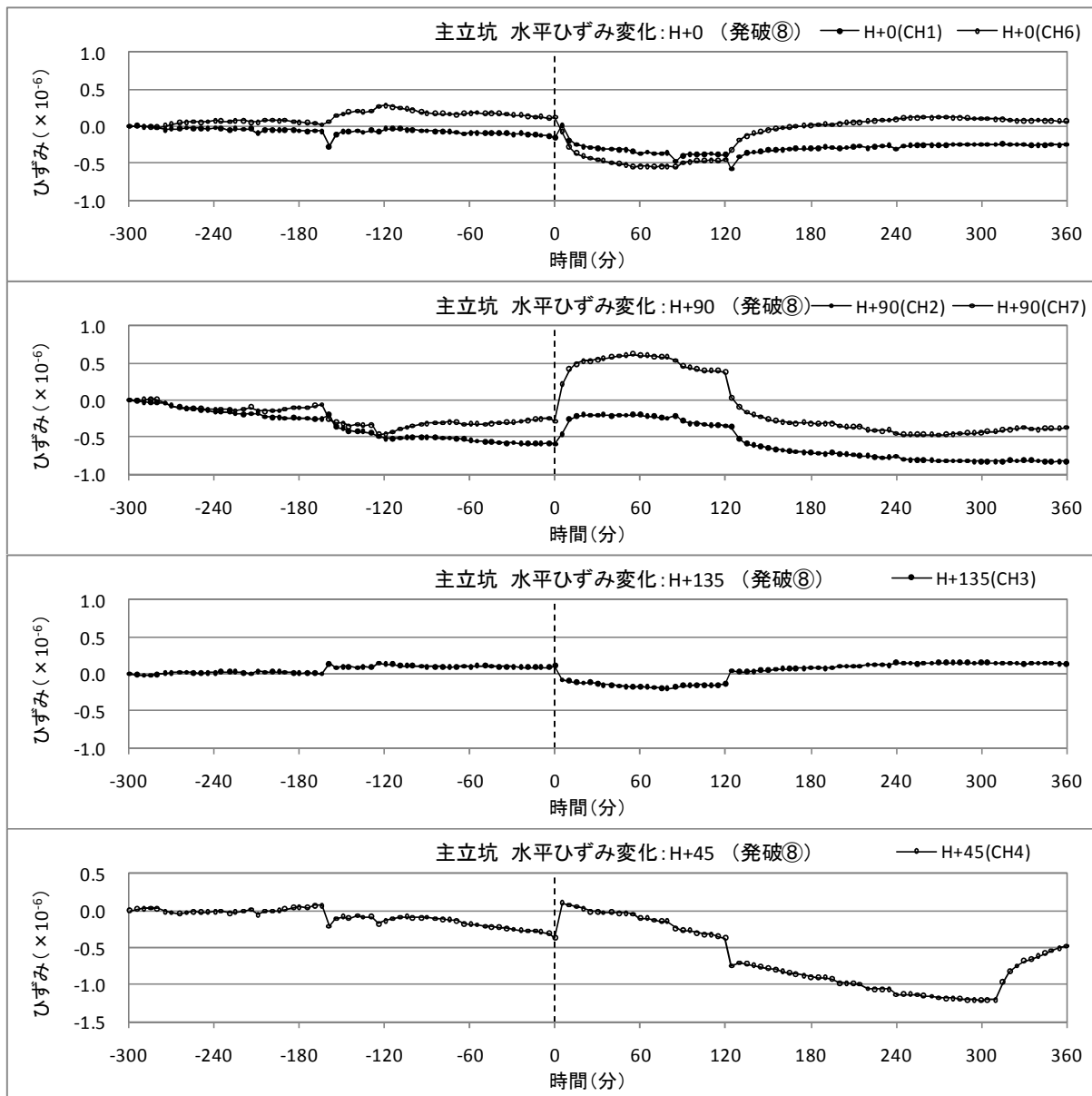


図 4.2.1-36 主立坑の発破の影響による水平ひずみ変化 (発破⑧)

2) 鉛直ひずみ

主立坑側の鉛直ひずみは図 4.2.1-37(1)～(2)に示すように、水平ひずみに発生したような目立った変化は、発破③を除いて生じておらず、発破直後に発生したひずみ変化は発破①、⑥、⑧で 0.1×10^{-6} 程度であった。一方、発破③においては、発破後約 15 分で 0.15×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが増加し、発破後約 40 分までに元のトレンドに戻るという変化を示した。

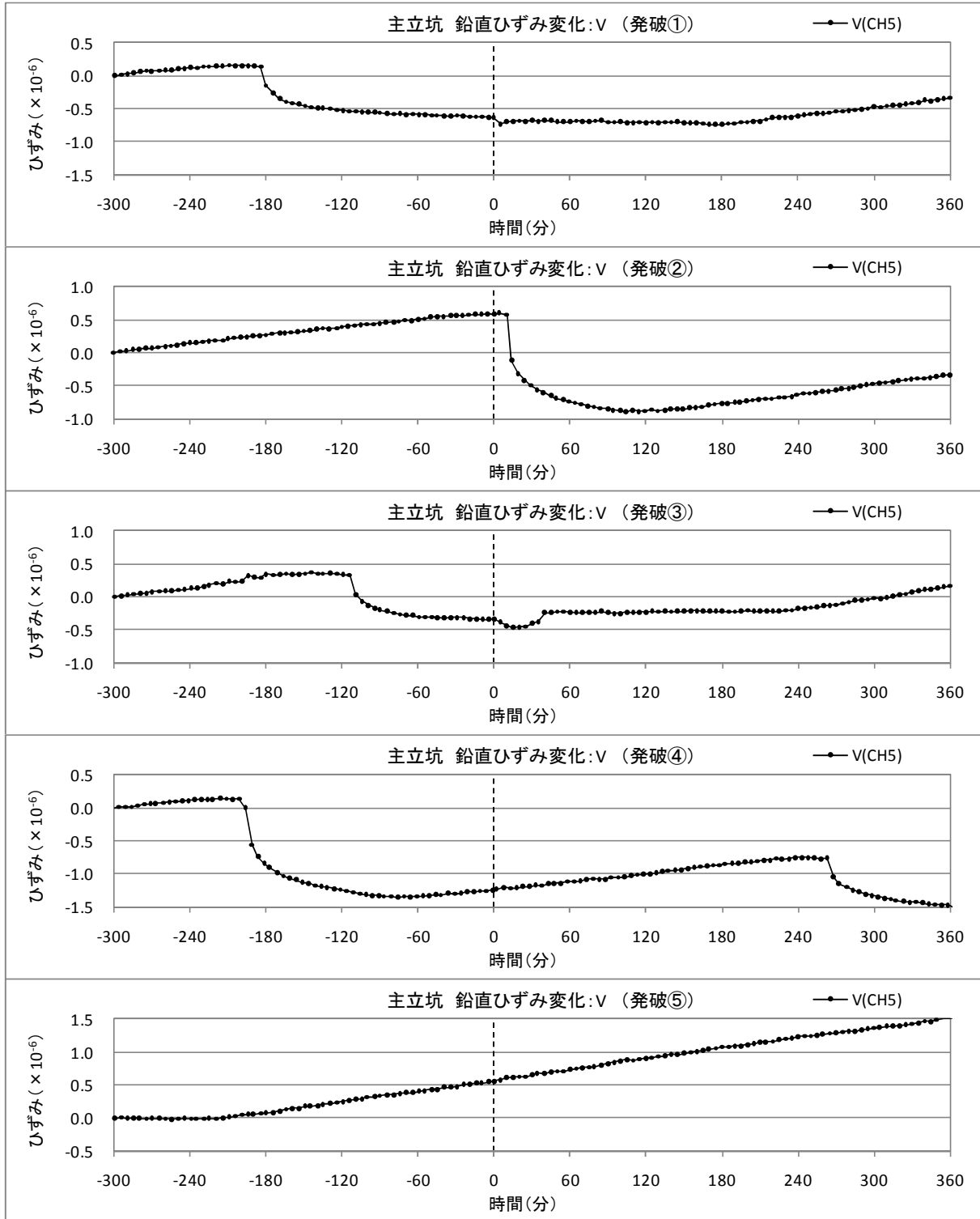


図 4.2.1-37(1) 主立坑の発破の影響による鉛直ひずみ変化 (発破①～⑤)

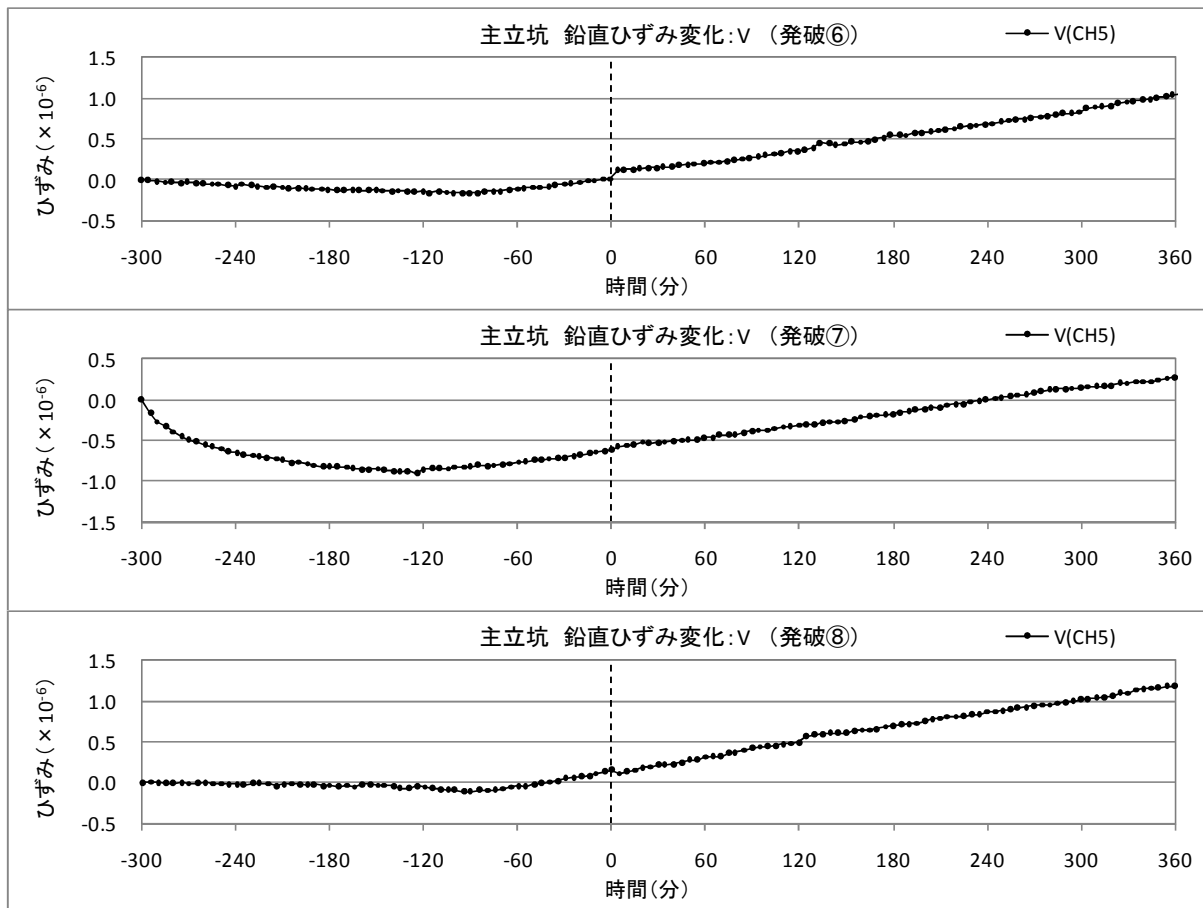


図 4. 2. 1-37 (2) 主立坑の発破の影響による鉛直ひずみ変化 (発破⑥~⑧)

3) 地下水位長期モニタリング孔における水頭変動

図 4.1 に示した研究所用地内および研究所周辺にある地下水長期モニタリング観測孔うち、MSB-3号孔、07MI08号孔、07MI09号孔、05ME06号孔の4孔において発破の影響と考えられる水頭変動が確認された。以下に、これらの4孔で発破後に水頭変動が確認された計測区間について述べる。

・MSB-3号孔（区間 No. 7）

MSB-3号孔は主立坑の北北東約50mに位置し、水圧計測の最下端区間である区間 No.7は、主立坑の切羽深度より標高が約30m上に位置する区間である。図4.2.1-38に主立坑の発破作業期間における水頭変化を示す。この区間 No.7において、発破後に明確な水頭変化が確認されたのは、図4.2.1-39に示すように、発破①～②、⑥～⑧であり、いずれも発破後に0.1～0.3m程度の緩やかな水頭の上昇がみられる。

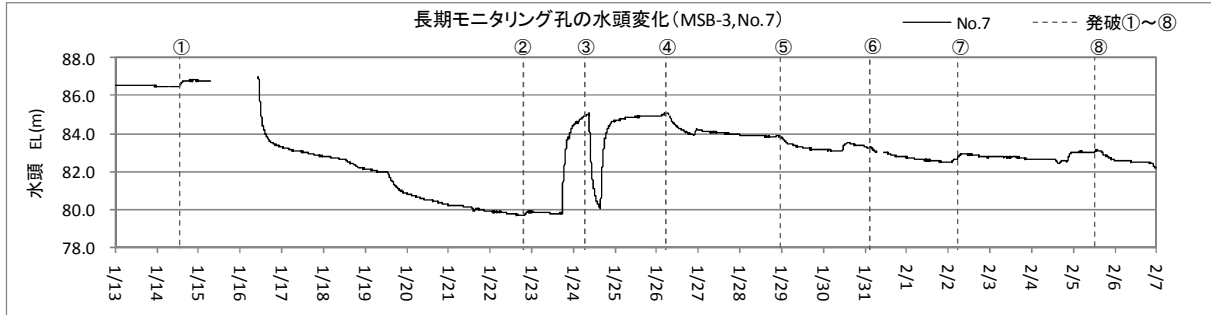


図 4. 2. 1-38 発破作業期間のMSB-3号孔（区間 No. 7）の水頭変化

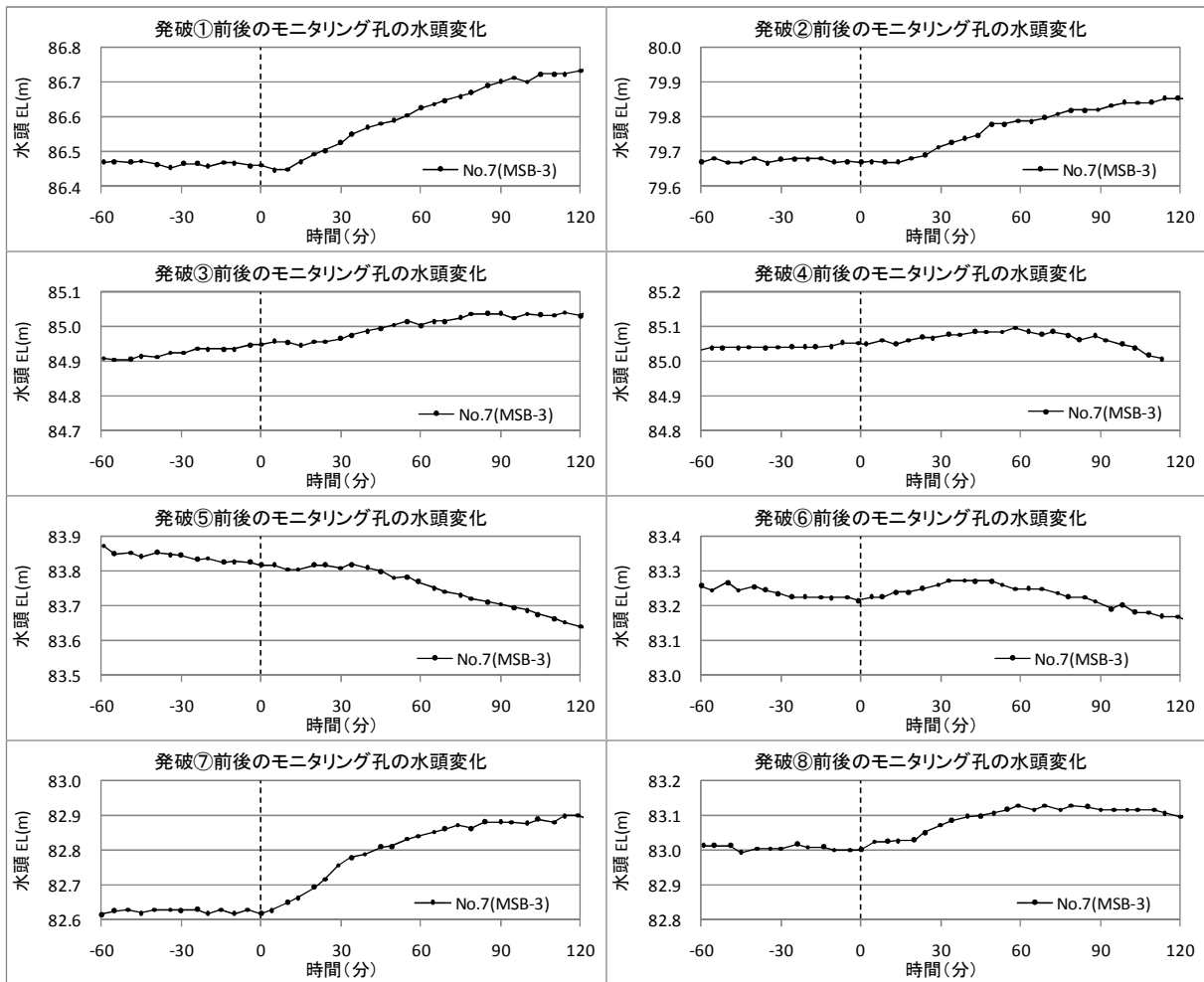


図 4. 2. 1-39 各発破前後のMSB-3号孔（区間 No. 7）の水頭変化

・07MI08号孔（区間 No. 4）

07MI08号孔は主立坑内の200mボーリング横坑から掘削されたモニタリング孔であり、2007年12月7日に間隙水圧の計測が開始された。区間 No.4 は水頭変動が顕著な区間で、主立坑の切羽深度から約80m下に位置している。図4.2.1-40に示すように、主立坑の発破作業が再開される2008年1月10日頃から大きな水頭の変動がみられる。

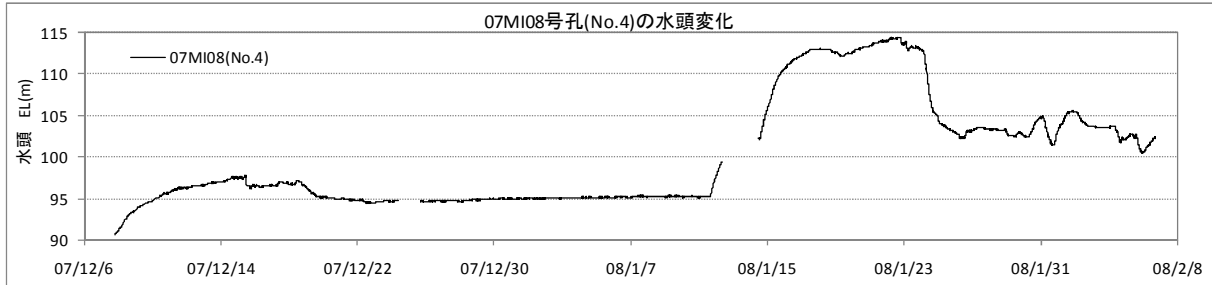


図 4. 2. 1-40 07MI08号孔（区間 No. 4）の水頭変化

ここで、07MI08号孔（区間 No.4）の水頭変化と研究坑道からの揚水量とを比較すると、図4.2.1-41に示すように、2008年1月以降に若干の相関がみられるが、揚水量の増加に対して水頭は上昇するという関係である。また、MSB-3号孔（区間 No.7）と比較しても、図4.2.1-42に示すように、若干の相関がみられるが、水頭の変化挙動が反転していることがわかる。

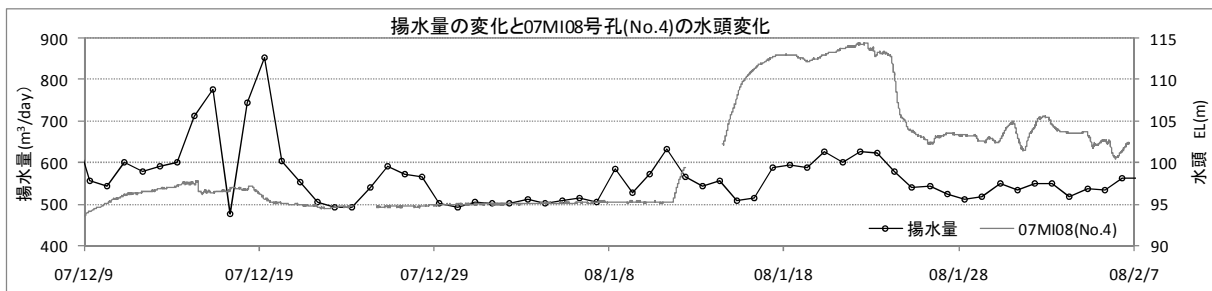


図 4. 2. 1-41 揚水量の変化と07MI08号孔（区間 No. 4）の水頭変化

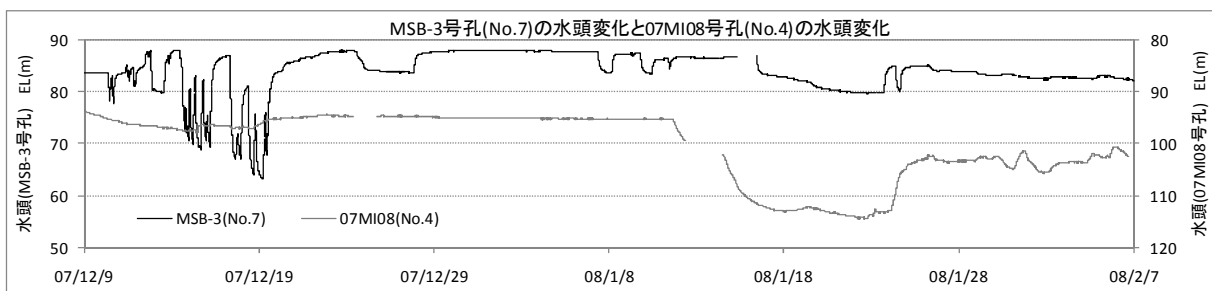


図 4. 2. 1-42 MSB-3号孔(区間 No. 7)と07MI08号孔（区間 No. 4）の水頭変化

次に、07MI08号孔（区間 No.4）の水頭変化と主立坑の CH4 を除く水平ひずみ変化とを比較すると、図 4.2.1-43 に示すように、発破作業再開後の変化に相関がみられる。

07MI08号孔（区間 No.4）の水頭変化と主立坑の水平ひずみ変化との関係については、水頭の上昇時に H+0(CH1,CH6)および H+135(CH3)では圧縮ひずみの増加、H+90(CH2,CH7)では引張りひずみの増加がみられる。

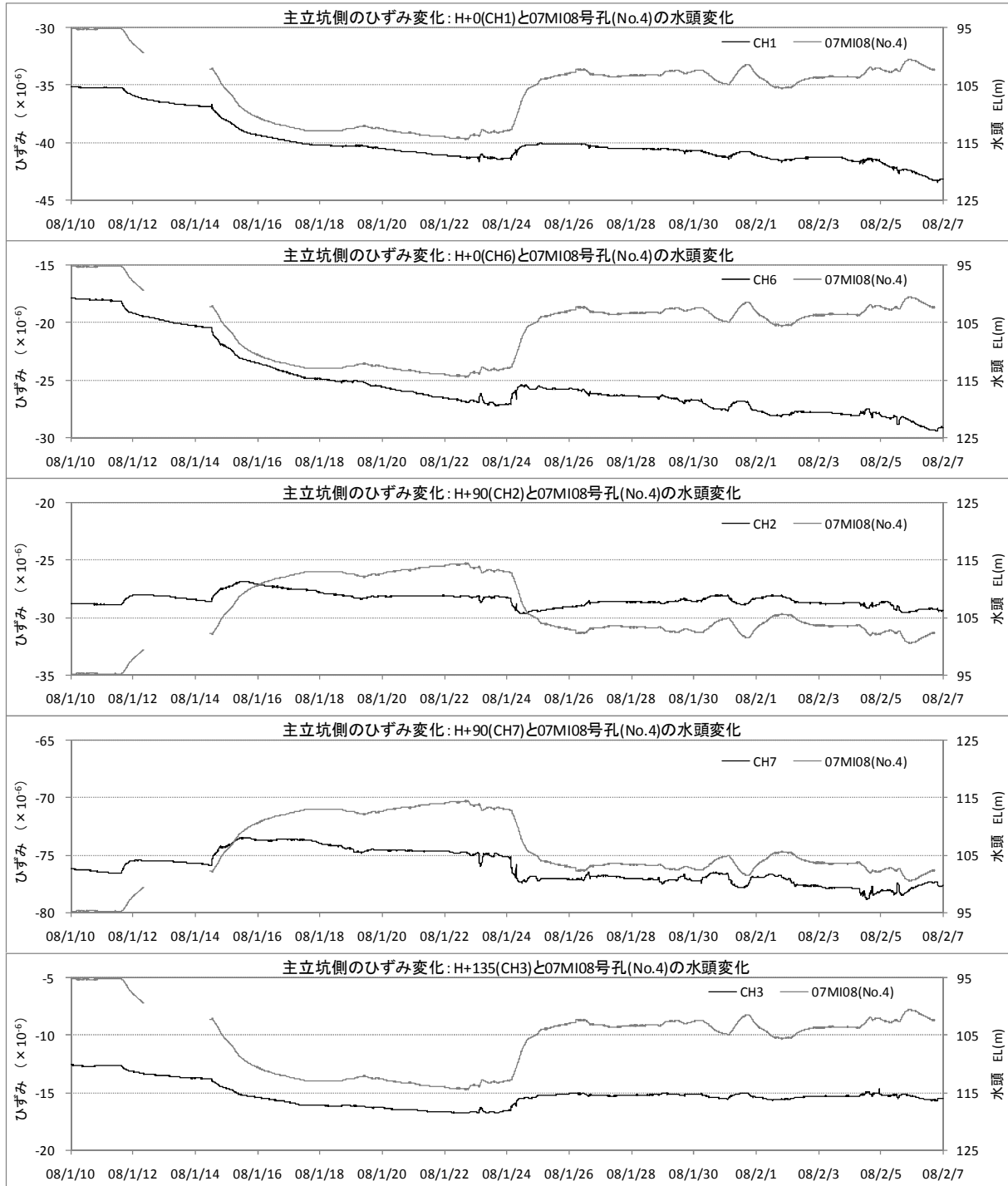


図 4.2.1-43 主立坑の水平ひずみ変化と 07MI08号孔（区間 No.4）の水頭変化

次に、主立坑の発破作業期間中の 07MI08 号孔（区間 No.4）の水頭変化を図 4.2.1-44 に示す。なお、2008 年 12 月 12 日から発破①直前の 2008 年 1 月 14 日 11:00 までは欠測であった。

区間 No.4 において、発破後に明確な水頭変化が確認されたのは発破①、②、④であり、図 4.2.1-45 に示すように、発破後に 0.2~0.7m 程度の水頭の低下がみられる。

前述したように、07MI08 号孔（区間 No.4）の水頭変化は、主立坑の水平ひずみの長期的な変化挙動との相関性はみられるが、図 4.2.1-29~図 4.2.1-37 に示した発破の影響による水平ひずみ変化と比較すると、短期的な変化挙動との相関はみられないことがわかる。

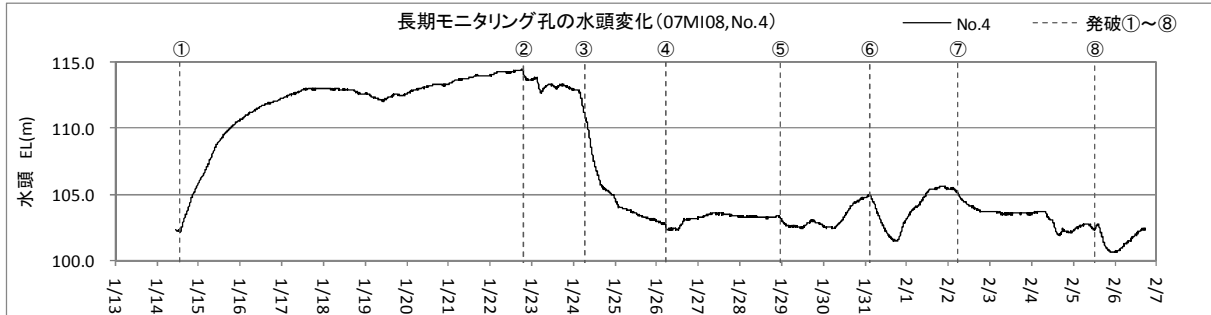


図 4.2.1-44 発破作業期間の 07MI08 号孔（区間 No.4）の水頭変化

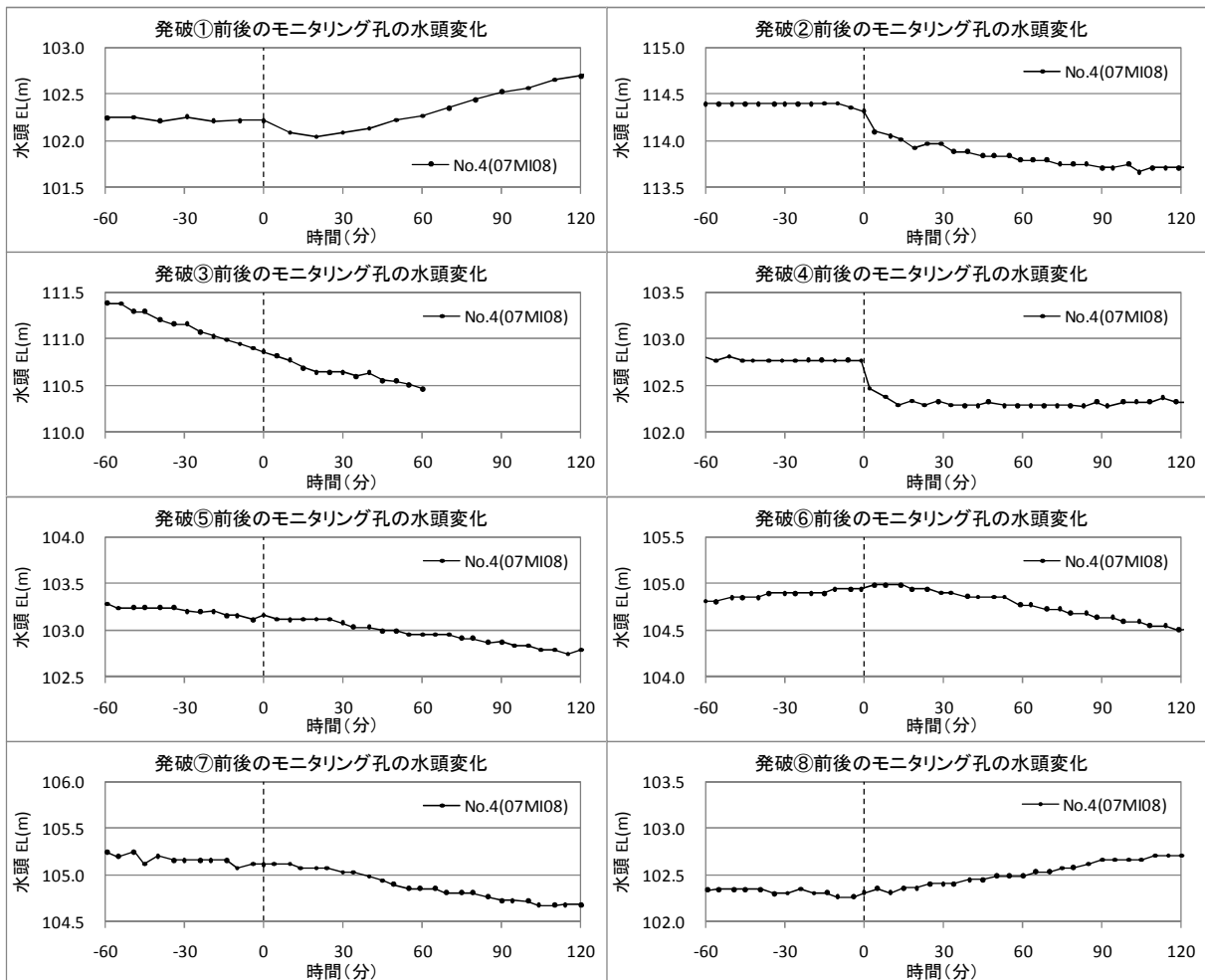


図 4.2.1-45 各発破前後の 07MI08 号孔（区間 No.4）の水頭変化

・07MI09 号孔（区間 No. 5）

07MI09 号孔は換気立坑内の 200m ボーリング横坑から掘削されたモニタリング孔であり、水圧計測の最下端区間である区間 No.5 は、主立坑の切羽深度から約 65m 下の区間である。

図 4.2.1-46 に主立坑の発破作業期間における水頭変化を示す。計測は 2008 年 1 月 24 日に開始され、発破⑧においては欠測であった。計測値全体に 0.1m 程度のノイズが認められるため、発破後の変化は明確ではないが、発破④～⑥において水頭低下、発破⑦では水頭上昇がみられる。

各発破前後を詳しくみると、図 4.2.1-47 に示すように、発破④～⑥の水頭変化は約 50 分～90 分の遅れが生じている。一方、発破⑦では直後に 0.2m 程度の水頭上昇が確認できる。

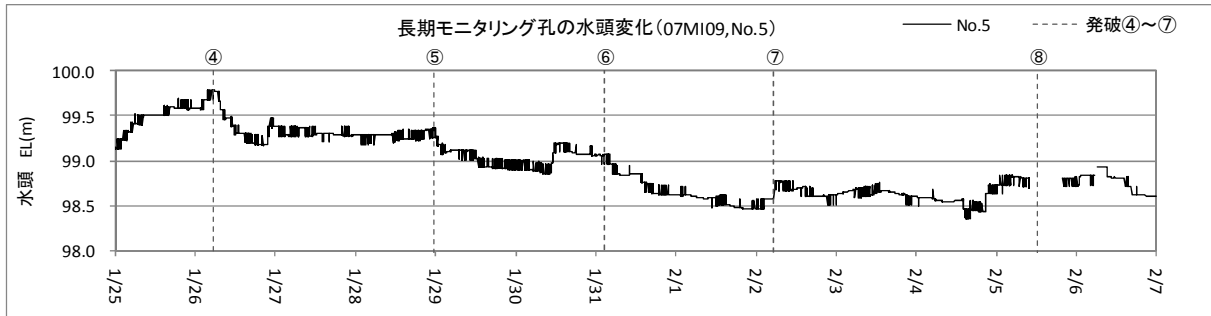


図 4.2.1-46 発破作業期間の 07MI09 号孔（区間 No. 5）の水頭変化

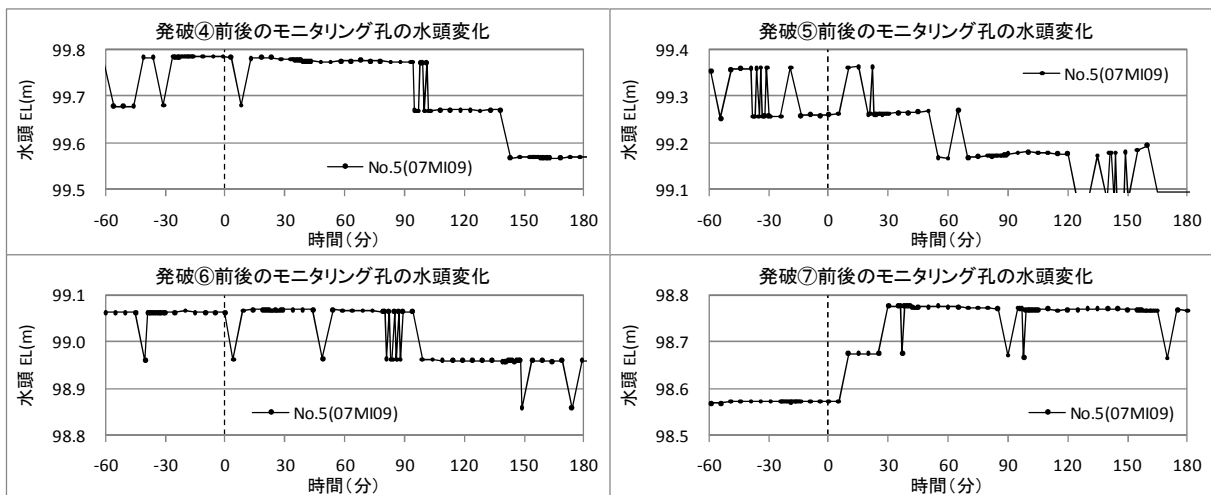


図 4.2.1-47 各発破前後の 07MI09 号孔（区間 No. 4）の水頭変化

・ 05ME06 号孔 (区間 No. 9)

05ME06 号孔は主立坑の北西約 15m の近傍に位置している。区間 No.9 は深部の水頭変動が比較的明瞭な区間で、主立坑の切羽深度から 60m 程度下の区間である。計測は 2007 年以前に開始されたが、2007 年 9 月 30 日から 2008 年 1 月 30 日の期間は欠測であった。図 4.2.1-48 に主立坑の発破作業期間における水頭変化を示す。計測値全体に 0.05m 程度のノイズが認められるが、発破直後に水頭の上昇が確認できる。各発破前後の水頭変動を詳しくみると、図 4.2.1-49 に示すように、発破直後に 0.1~0.2m 程度の水頭上昇が確認できる。

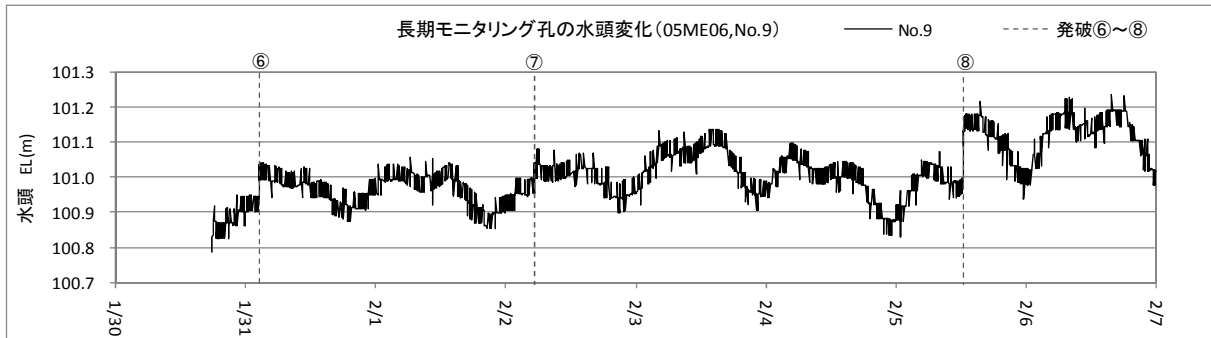


図 4.2.1-48 発破作業期間の 06ME05 号孔 (区間 No. 9) の水頭変化

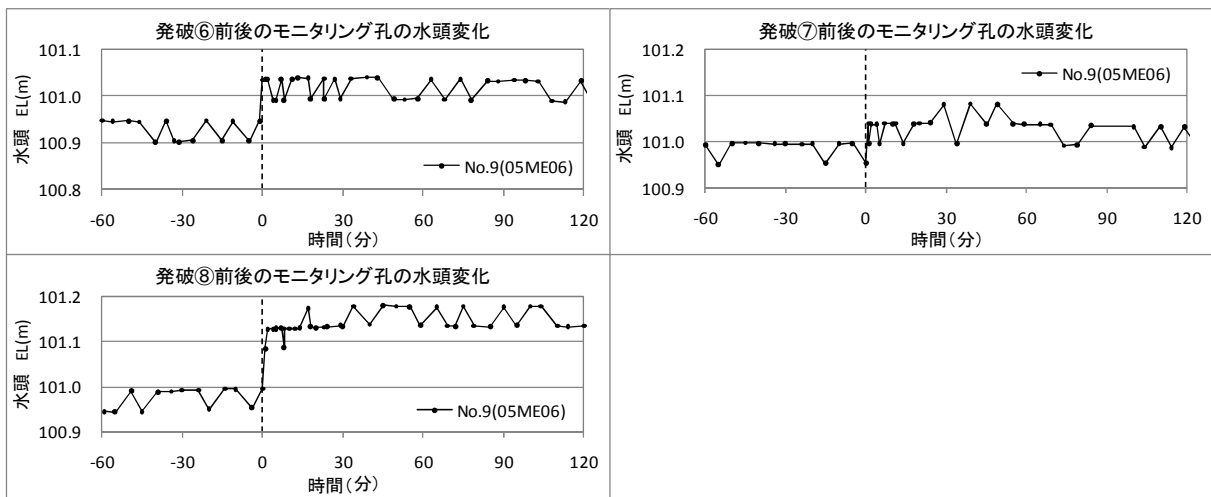


図 4.2.1-49 各発破前後の 05ME06 号孔 (区間 No. 9) の水頭変化

4) まとめ

- ・ 水平ひずみは、発破④を除き、H+0 と H+135、H+90 と H+45 がそれぞれ発破後に同じような変化挙動を示す。発破④では、変化挙動の明確な対応はみられない。
- ・ 鉛直ひずみは、発破の影響によるひずみ変化は小さく、発破③を除き、発破直後に生じた変化は 0.1×10^{-6} 程度であった。一方、発破③では、発破後 15 分間で生じた約 0.15×10^{-6} の圧縮ひずみが発破の約 40 分後までに減少し、元のトレンドに戻るといった変化を示した。
- ・ 各発破後のひずみ変化挙動に共通性はみられない。ひずみの変化量と発破で使用した火薬の量との関連性もみられない。また、研究所用地内および研究坑道内の地下水長期モニタリング孔において確認された発破の影響による水頭の変化挙動との明確な関連性もみられない。

(6) 地震の影響

主立坑の安定期において、岐阜県内で感知した震度1以上の地震は18回であった。表4.2.1-2に地震発生日時と震度、震源地を示す。

研究所周辺および研究坑道内にある地下水長期モニタリング孔では、地震の影響と考えられる明確な水圧変化は確認できなかった。

ここで、図4.2.1-50に震央距離とマグニチュードとの関係図を示す。なお、震央距離は対数表示となっている。また、この関係図に Dobrovolsky et al.(1979)による 10^{-6} ~ 10^{-8} までの理論ひずみ量曲線³⁾を書き込んでいる。これまでの研究で、震央距離とマグニチュードから計算される理論ひずみ量が 10^{-8} を超えると水圧変化する例が出始め、 10^{-6} を超えるとほとんどの場合で水圧変化するようになることがわかっている。図に示すように、主立坑の安定期での地震は、いずれも理論ひずみ量が 10^{-8} を超えていないために水圧変化が発生しなかったと考えられる。

表 4.2.1-2 主立坑の安定期における地震発生日時

地震発生日時	震度	マグニチュード	震源地	震央距離 (km)	
地震(1)	2007/10/27 2:50	1	2.7	長野県南部	63
地震(2)	2007/11/3 5:09	1	1.6	岐阜県飛騨地方	77
地震(3)	2007/11/27 7:01	1	2.3	岐阜県飛騨地方	68
地震(4)	2007/12/1 4:46	1	3.2	滋賀県北部	90
地震(5)	2007/12/5 8:37	1	3.1	愛知県西部	53
地震(6)	2007/12/10 2:29	1	3.3	岐阜県美濃東部	19
地震(7)	2007/12/10 16:38	1	2.0	岐阜県飛騨地方	97
地震(8)	2007/12/16 9:35	1	2.0	岐阜県飛騨地方	74
地震(9)	2007/12/18 2:53	1	3.9	石川県能登地方	211
地震(10)	2007/12/21 14:22	1	4.5	福井県嶺北	102
地震(11)	2007/12/21 16:01	2	4.2	福井県嶺北	102
地震(12)	2008/1/15 23:55	1	2.2	長野県南部	68
地震(13)	2008/1/18 17:18	1	2.2	岐阜県飛騨地方	70
地震(14)	2008/1/20 11:19	1	4.0	静岡県西部	80
地震(15)	2008/1/26 4:33	2	4.8	石川県能登地方	219
地震(16)	2008/1/27 10:33	1	4.1	静岡県西部	86
地震(17)	2008/1/27 10:53	1	4.2	静岡県西部	86
地震(18)	2008/2/1 17:03	1	3.1	静岡県西部	77

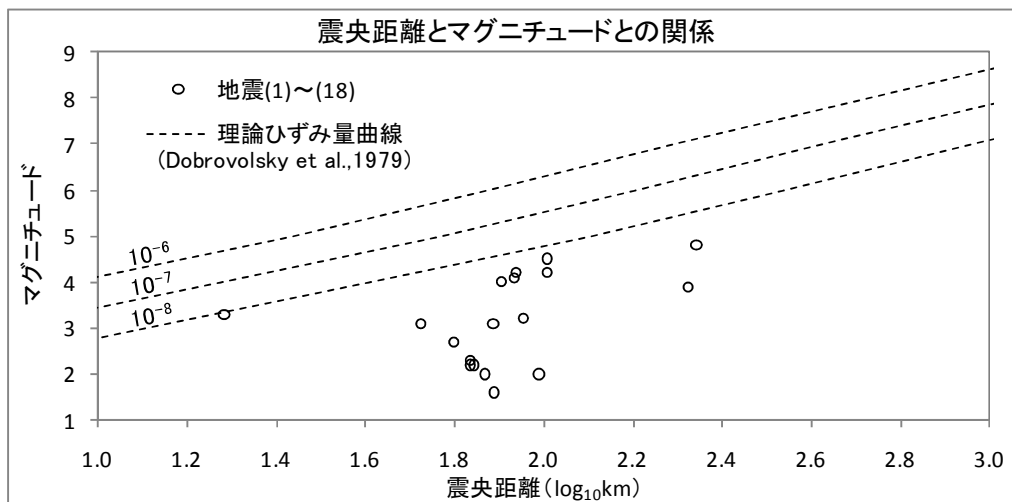


図 4.2.1-50 震央距離とマグニチュードとの関係

1) 水平ひずみ

図 4.2.1-51～図 4.2.1-68 に、各地震発生前後の主立坑側の水平ひずみ変化を示す。

なお、ここでは地震発生時刻の約 5 時間前のひずみ計測値からの相対変位をプロットした。また、横軸の時間 0 は地震発生時刻を表している。

・地震(1) (2007/10/27 2:50)

図 4.2.1-51 に示すように、地震(1)の発生前後で水平ひずみは、ほぼ線形的に変動しており、地震発生後の水平ひずみの変化はみられない。

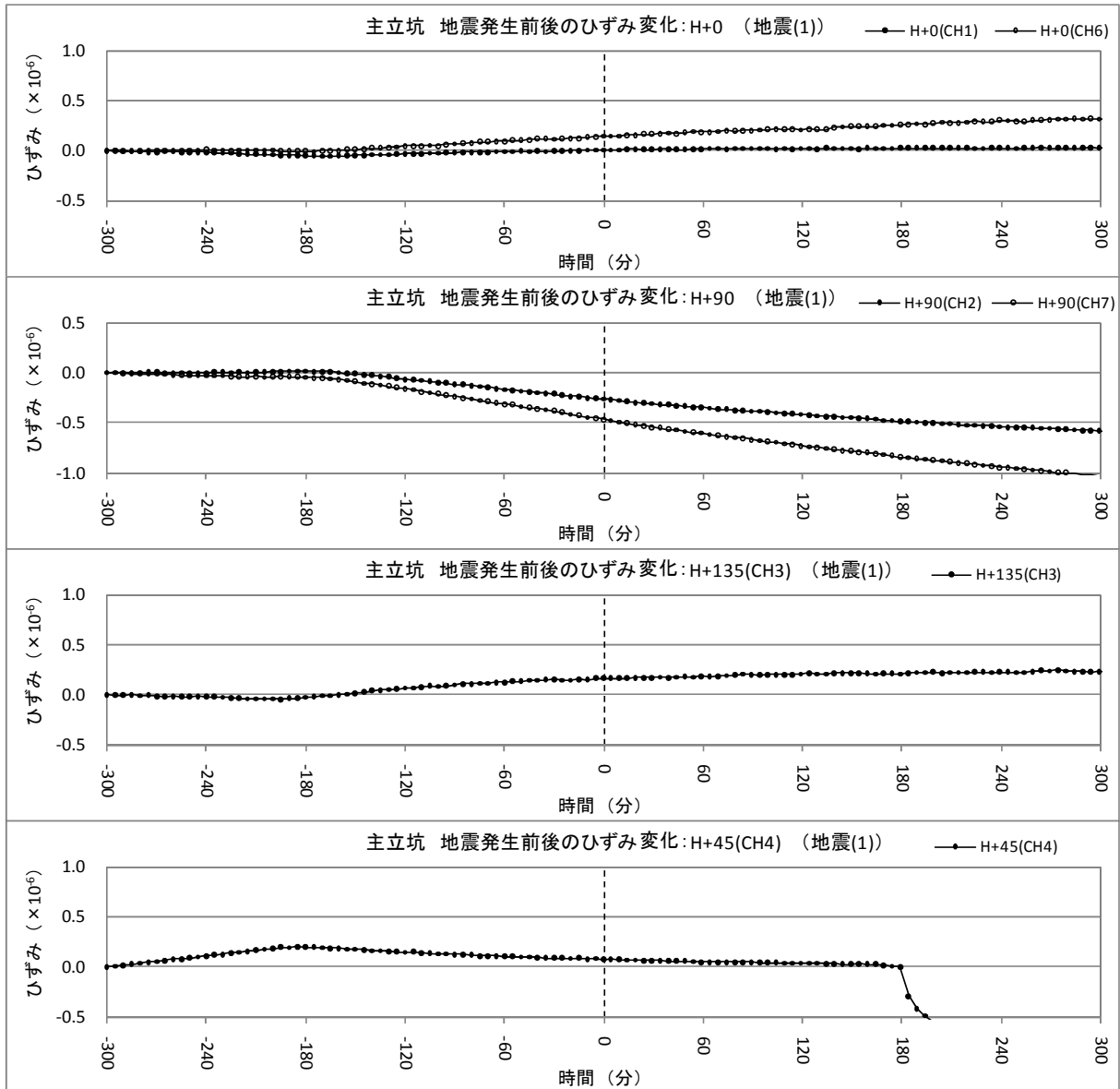


図 4.2.1-51 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(1))

・地震(2) (2007/11/3 5:09)

図 4.2.1-52 に示すように、地震(2)の発生前後で水平ひずみは、ほぼ線形的に変動しており、地震発生後の水平ひずみの変化はみられない。

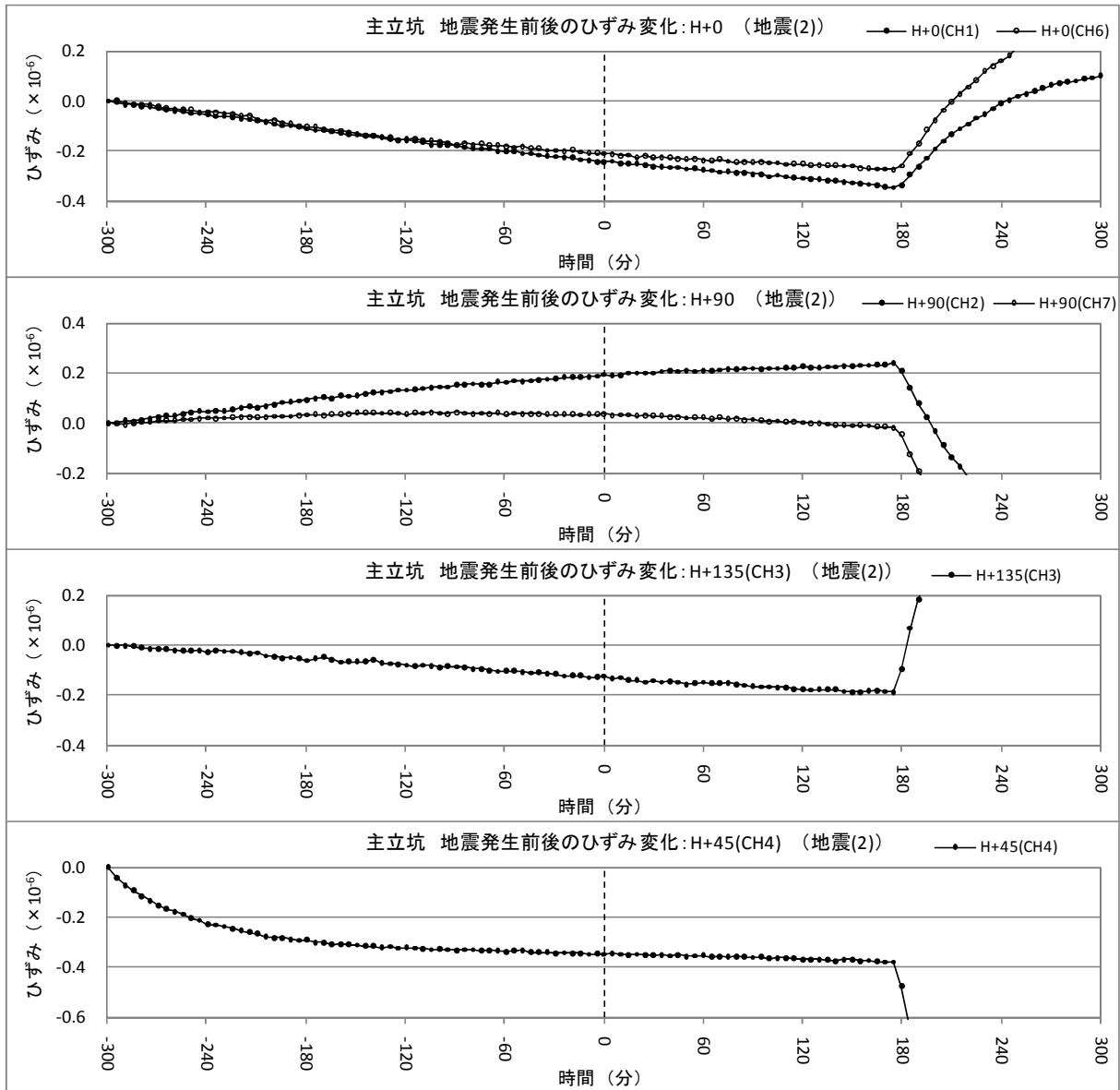


図 4.2.1-52 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(2))

・地震(3) (2007/11/27 7:01)

図 4.2.1-53(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震(3)発生前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後の水平ひずみの変化はみられない。また、H+45 も図 4.2.1-53(2)に示すように、地震直後の変化はみられない。

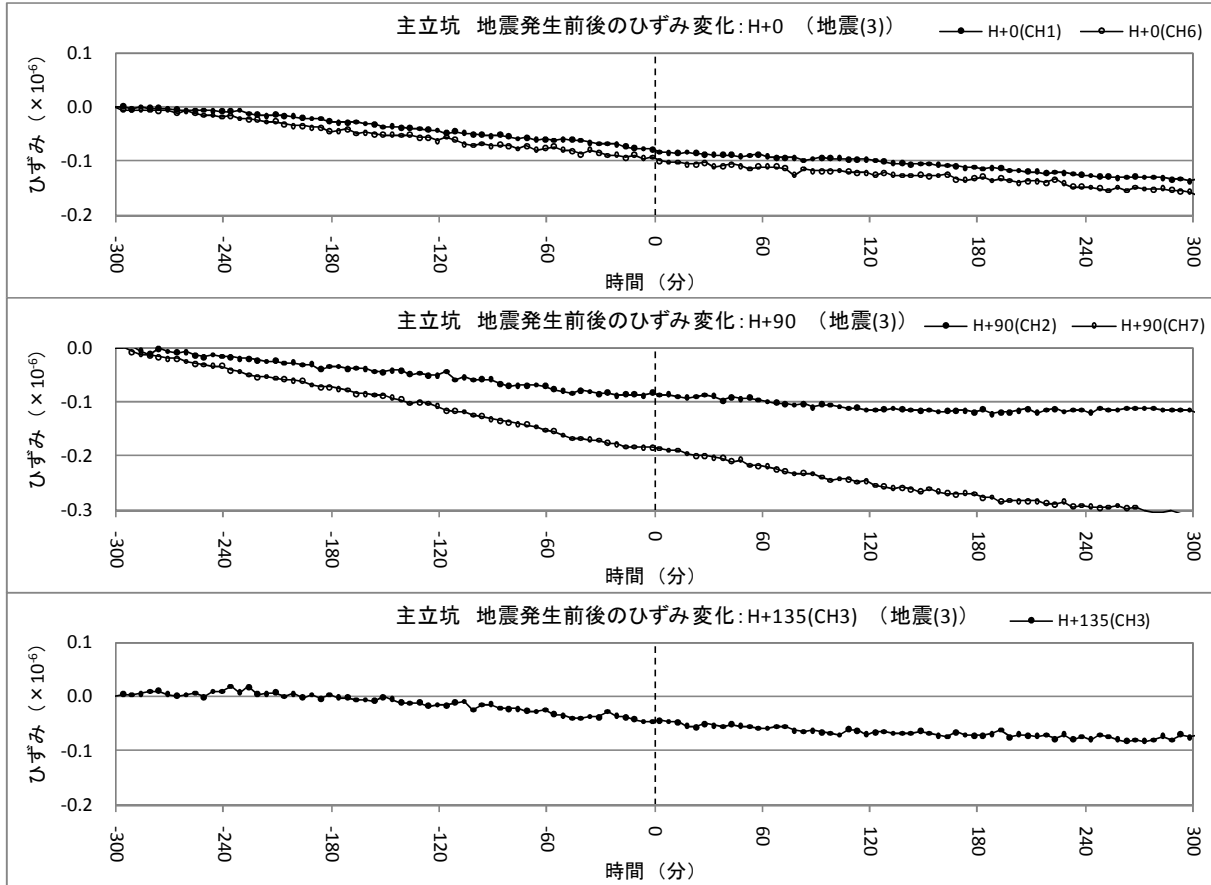


図 4. 2. 1-53 (1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(3))

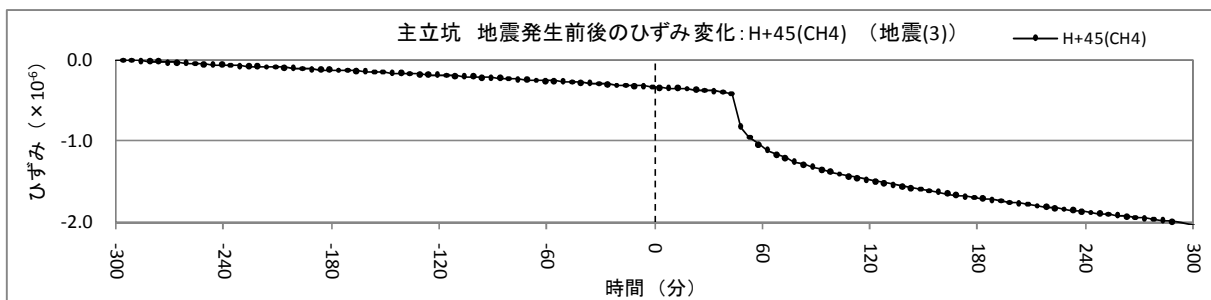


図 4. 2. 1-53 (2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(3))

・地震(4) (2007/12/1 4:46)

図 4.2.1-54(1)をみると、H+0 および H+135 は地震(4)の発生前後で水平ひずみがほぼ線形的に変動しており、地震後の変化はみられない。H+90 も地震発生前後で水平ひずみがほぼ線形的に変動しているが、CH2 で地震発生後はやや変動勾配に変化がみられる。

一方、図 4.2.1-54(2)に示すように、H+45 は地震発生前に他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみが増加し、地震発生後はひずみの変動勾配に変化がみられる。

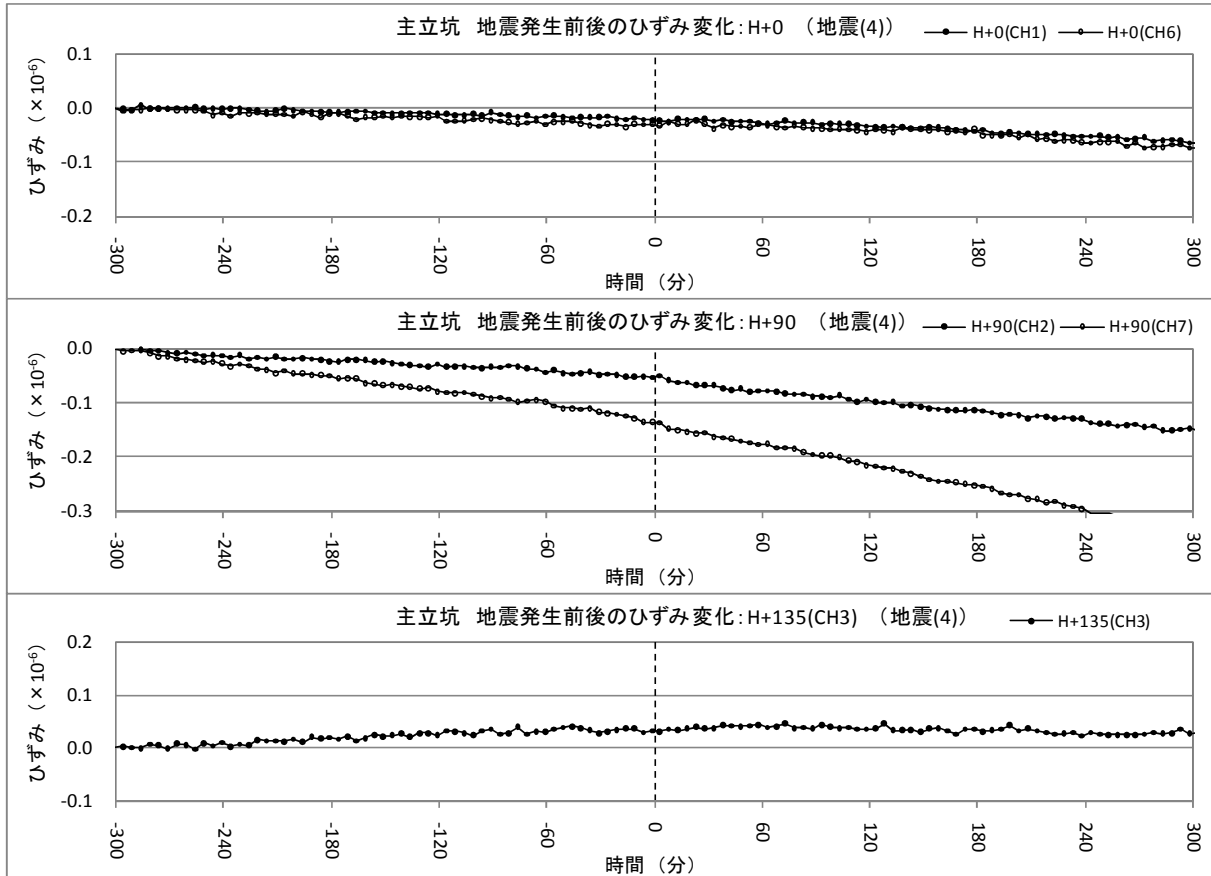


図 4.2.1-54(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(4))

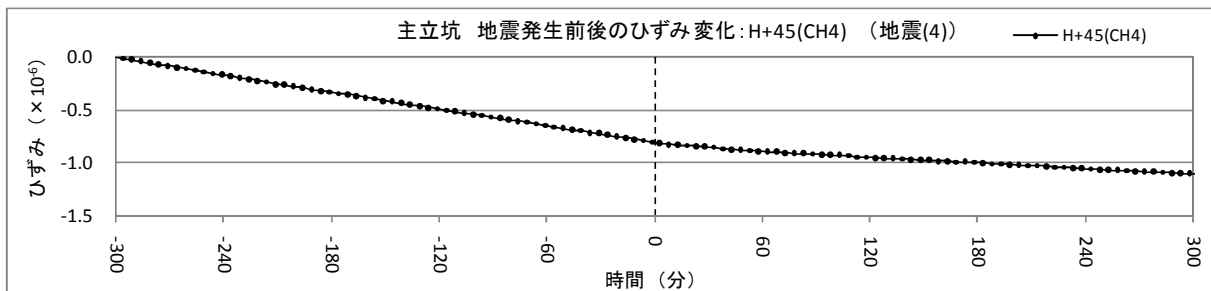


図 4.2.1-54(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(4))

・地震(5) (2007/12/5 8:37)

図 4.2.1-55(1)に示すように、H+0 および H+90 は圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。H+135 は地震前後で目立ったひずみ変化はみられない。

一方、図 4.2.1-55(2)に示すように、H+45 は他のチャンネルより 1 オーダー大きい割合で線形的にひずみ変動しており、地震発生後のひずみ変化はみられない。

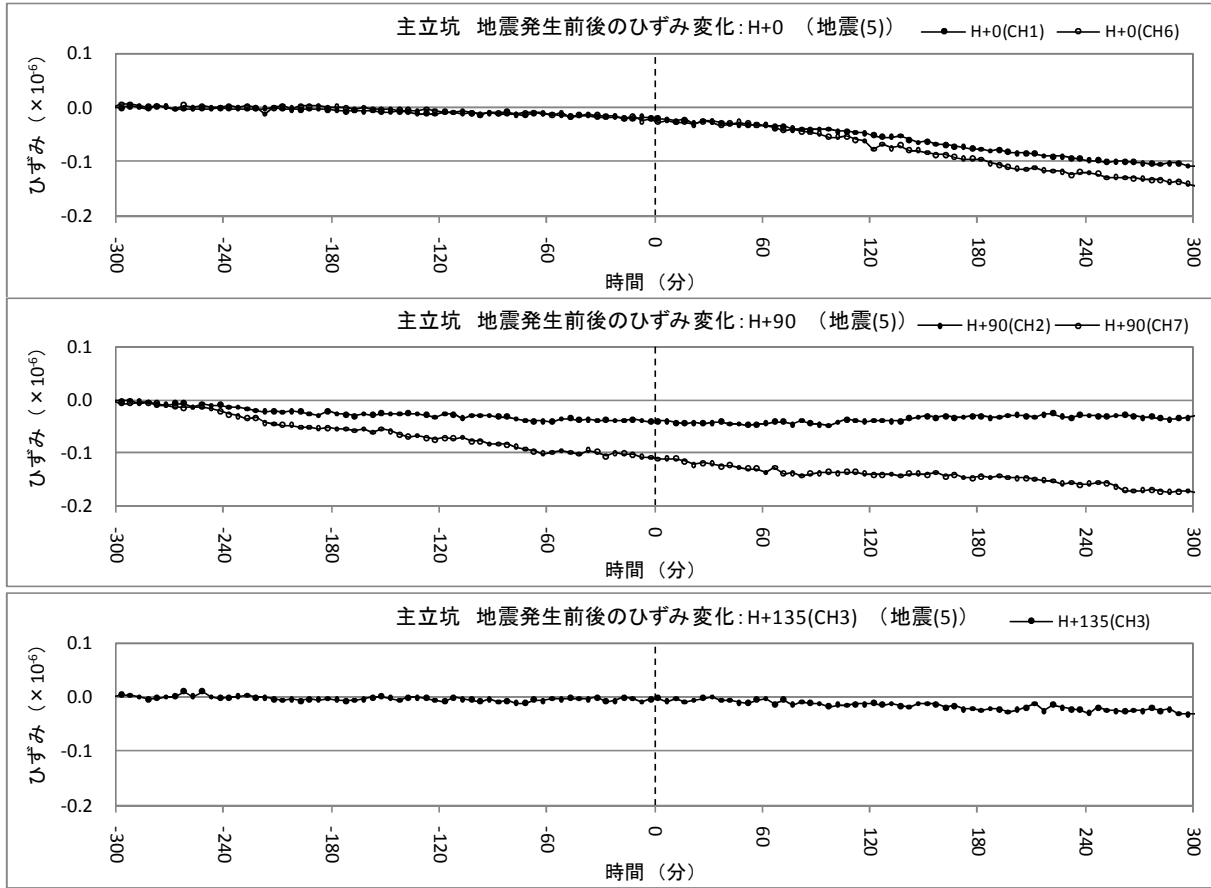


図 4. 2. 1-55 (1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(5))

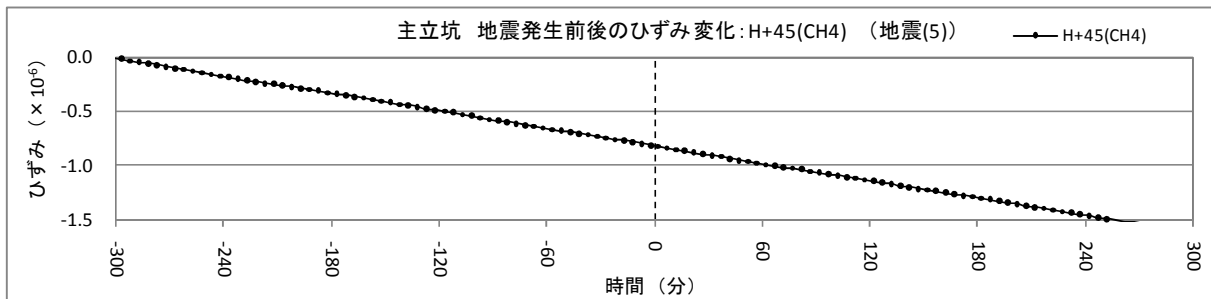


図 4. 2. 1-55 (2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(5))

・地震(6) (2007/12/10 2:29)

図 4.2.1-56(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震(6)発生前後で線形的に変動しており、地震発生後の水平ひずみに変化はみられない。

一方、図 4.2.1-56(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震発生後のひずみ変化はみられない。

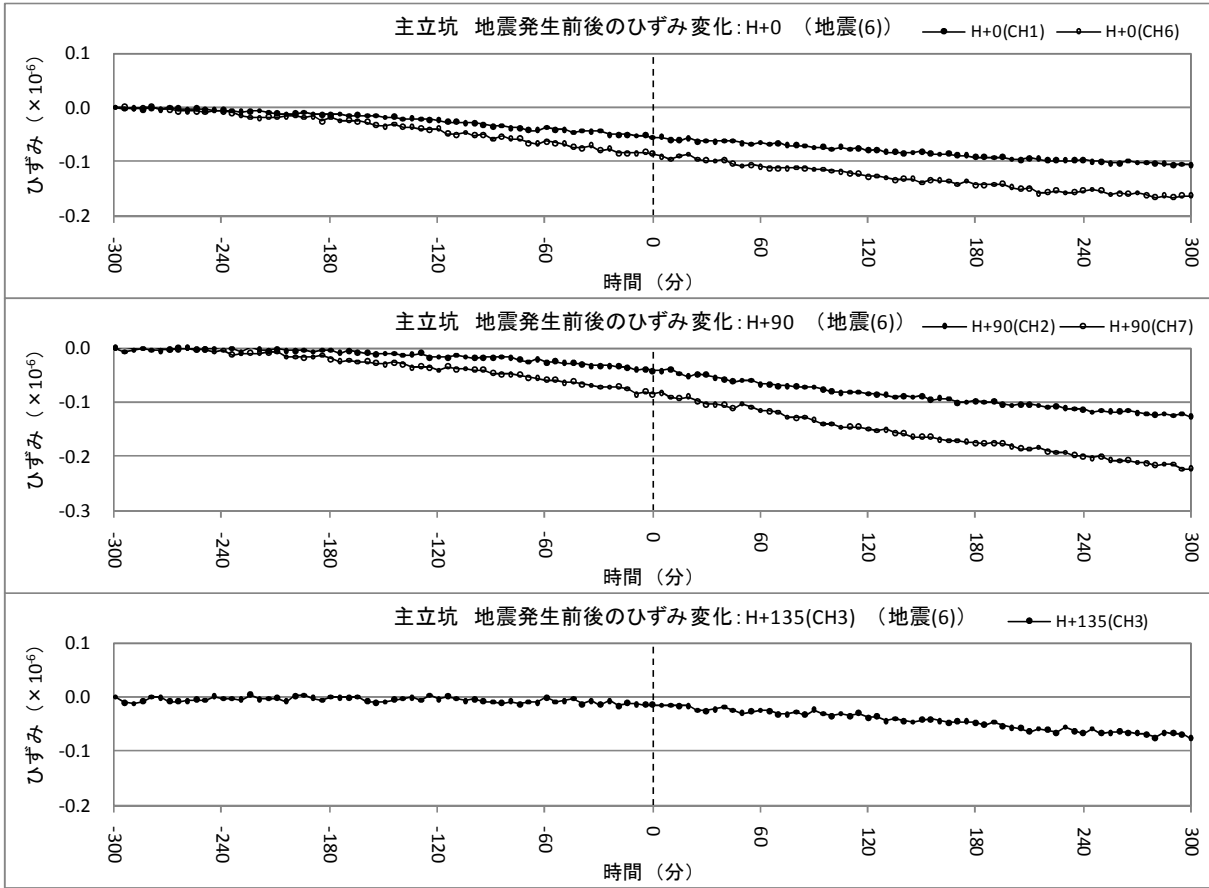


図 4. 2. 1-56 (1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(6))

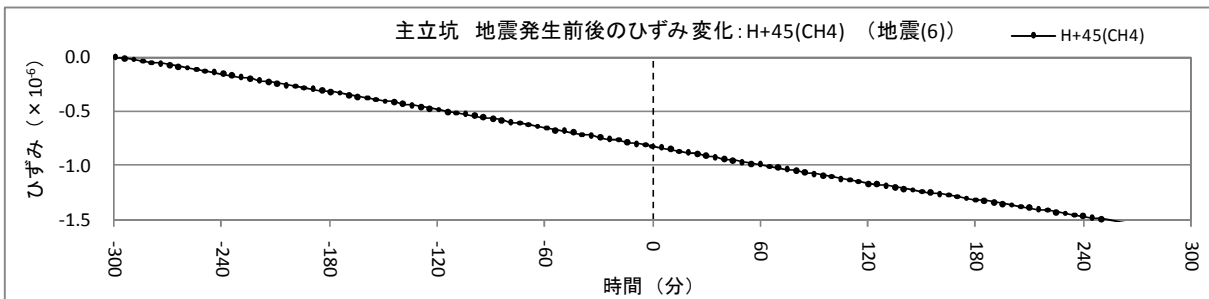


図 4. 2. 1-56 (2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(6))

・地震(7) (2007/12/10 16:38)

図 4.2.1-57(1)に示すように、H+0 および H+135 は地震(7)発生前に圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後に大きなひずみ変化はみられない。H+90 は地震前に引張りひずみの増加傾向にあり、地震直後に大きなひずみ変化はみられない。

一方、図 4.2.1-57(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震発生後のひずみ変化はみられない。

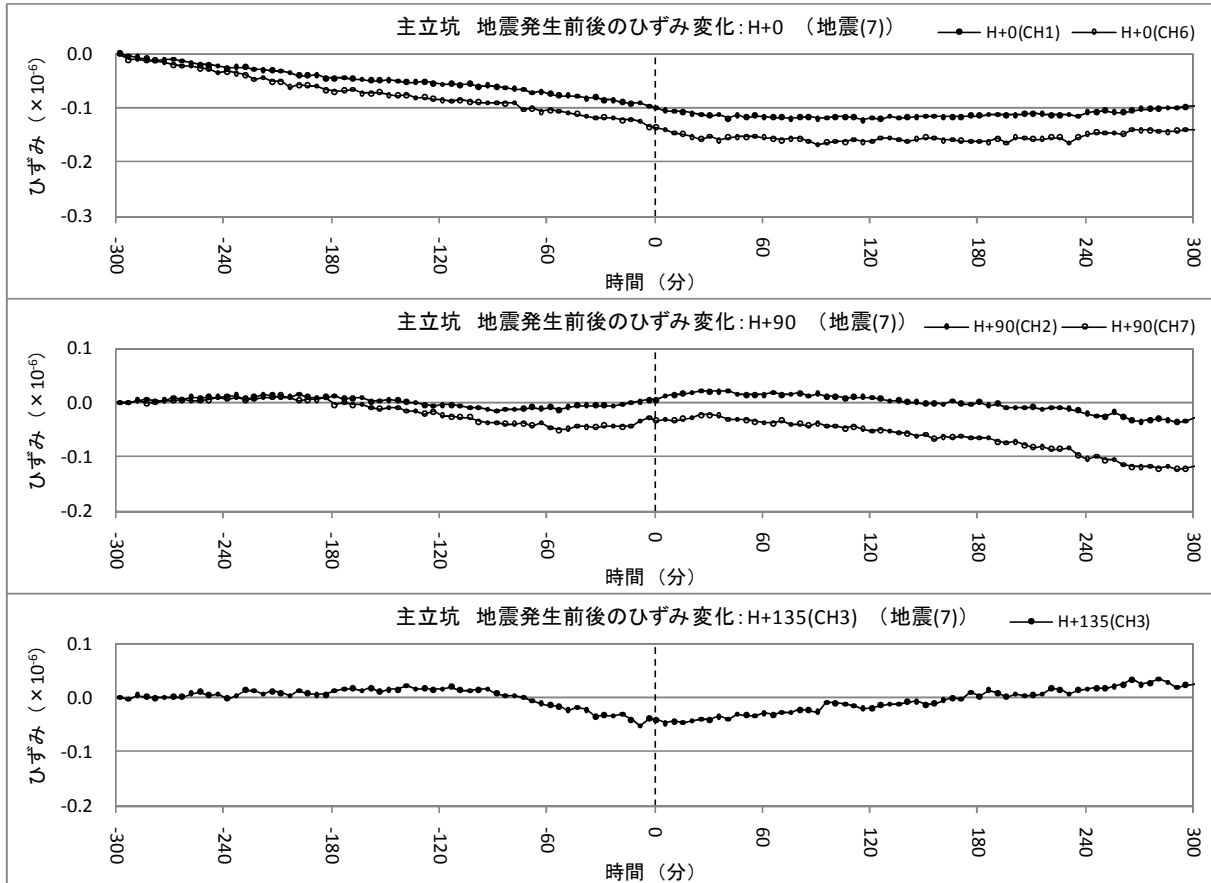


図 4.2.1-57(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(7))

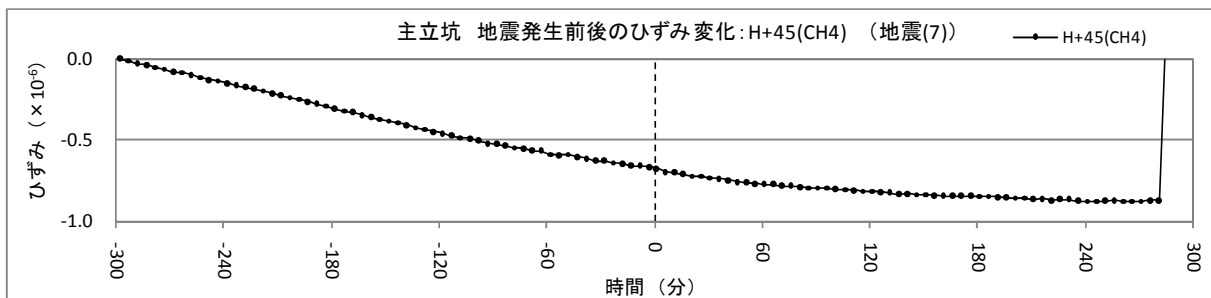


図 4.2.1-57(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(7))

・地震(8) (2007/12/16 9:35)

図 4.2.1-58(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震(8)発生の前後で線形的に変動しており、地震発生後に水平ひずみの変化はみられない。

一方、図 4.2.1-58(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震発生後のひずみ変化はみられない。

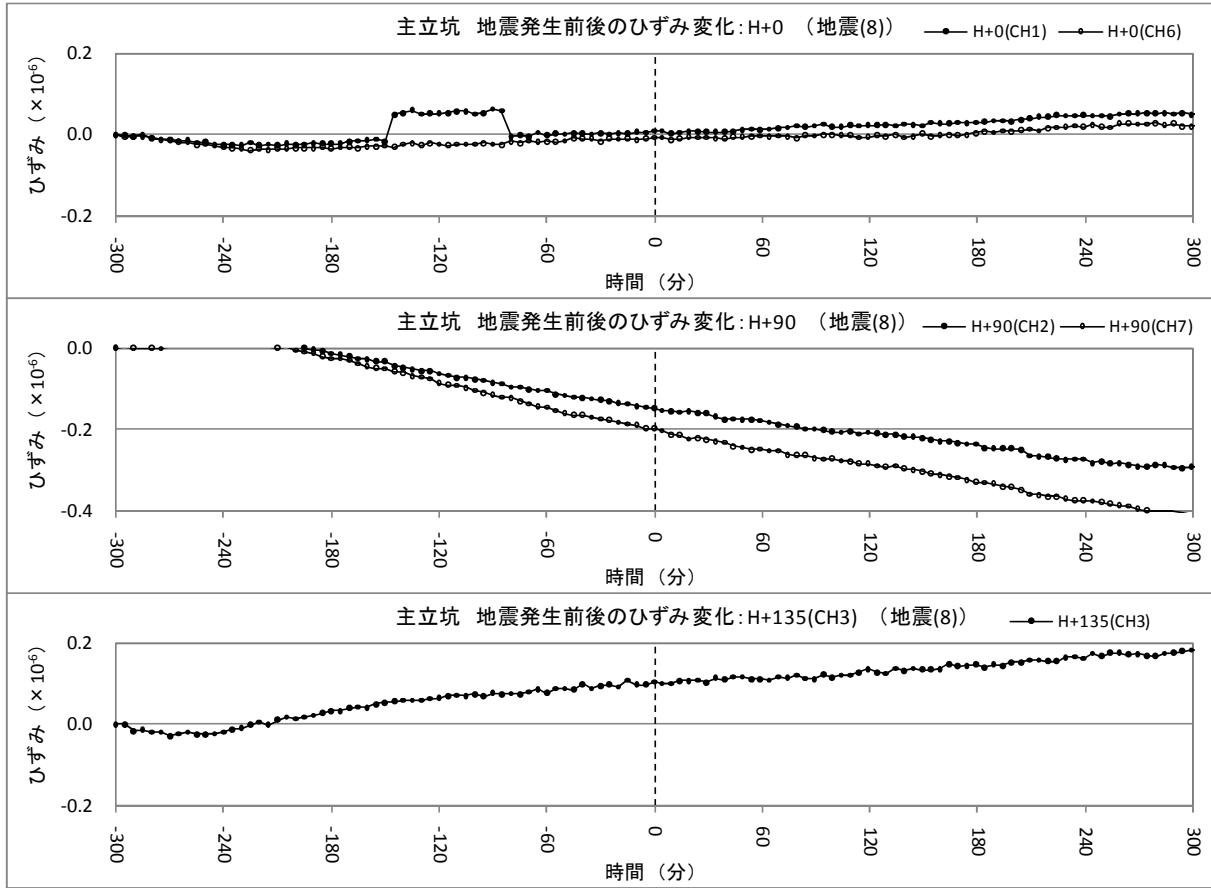


図 4. 2. 1-58 (1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(8))

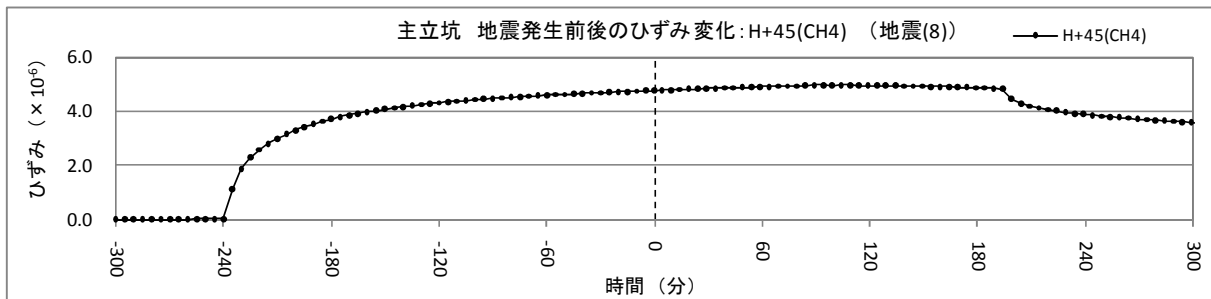


図 4. 2. 1-58 (2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(8))

・地震(9) (2007/12/18 2:53)

図 4.2.1-59(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震発生の前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後に水平ひずみの変化はみられない。

一方、図 4.2.1-59(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

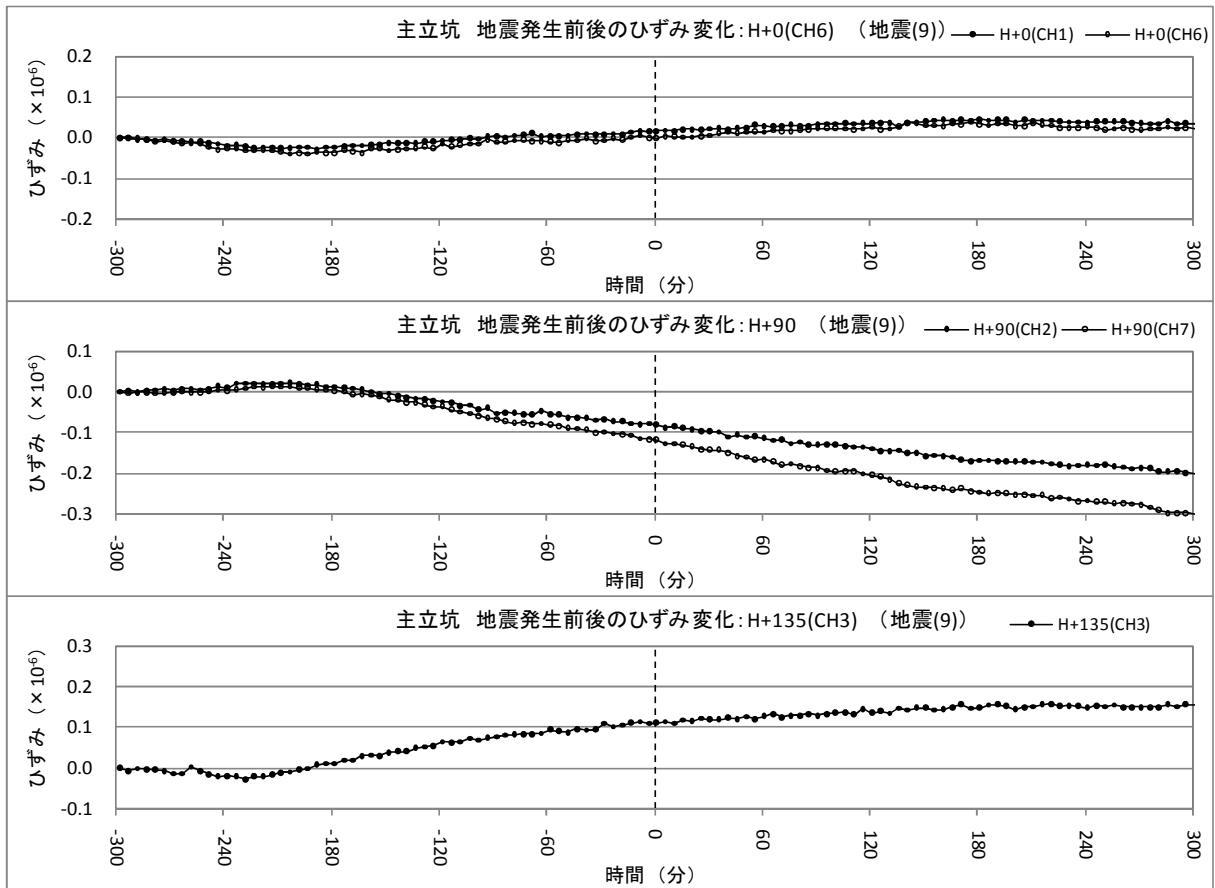


図 4.2.1-59(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(9))

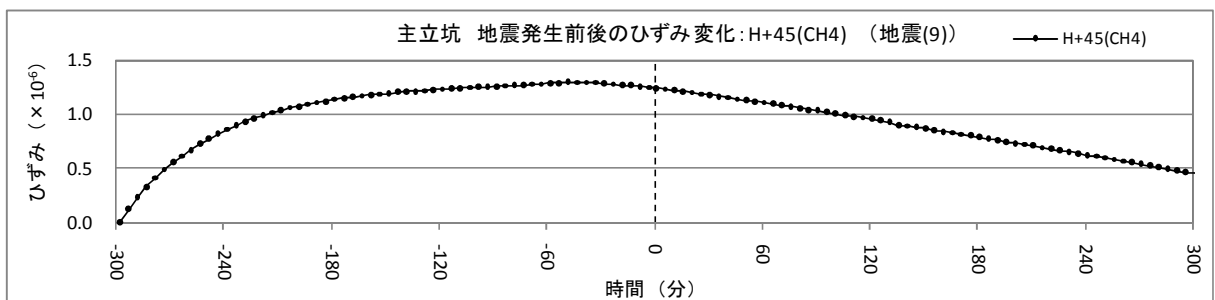


図 4.2.1-59(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(9))

・地震(10) (2007/12/21 14:22)

図 4.2.1-60(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震発生の前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後に水平ひずみの変化はみられない。

一方、図 4.2.1-60(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震発生後にひずみ変化はみられない。

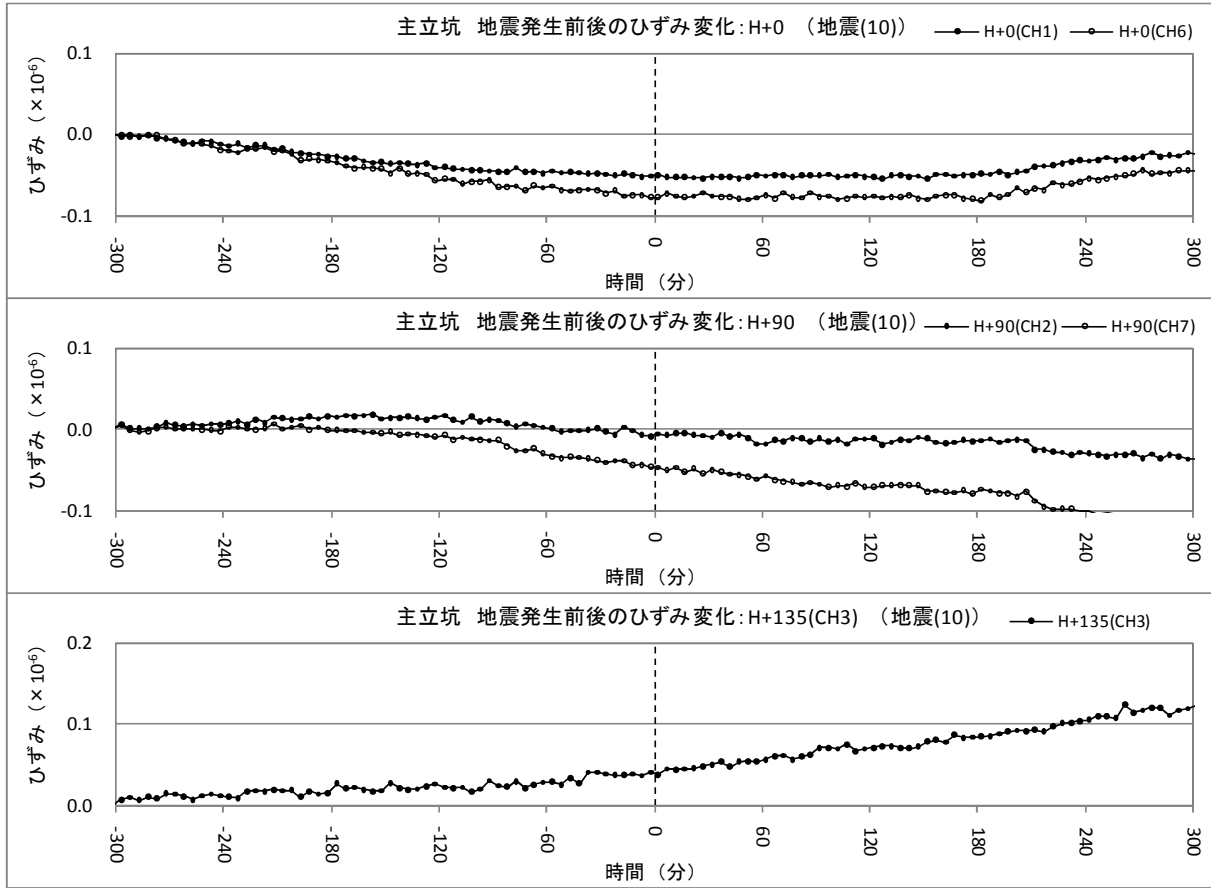


図 4.2.1-60(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(10))

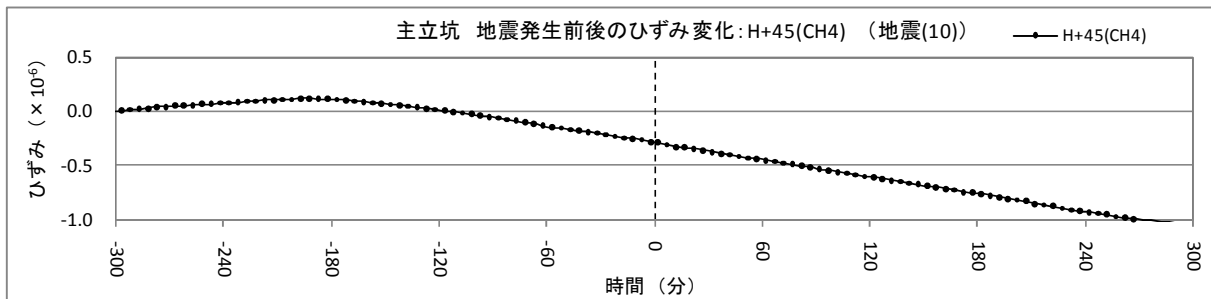


図 4.2.1-60(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(10))

・地震(11) (2007/12/21 16:01)

図 4.2.1-61(1)をみると、H+0 は地震の前後で比較的安定した値を示し、地震直後のひずみ変化はみられない。H+90 は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後のひずみ変化はみられない。H+135 は地震の前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震直後のひずみの変化はみられない。

一方、図 4.2.1-61(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

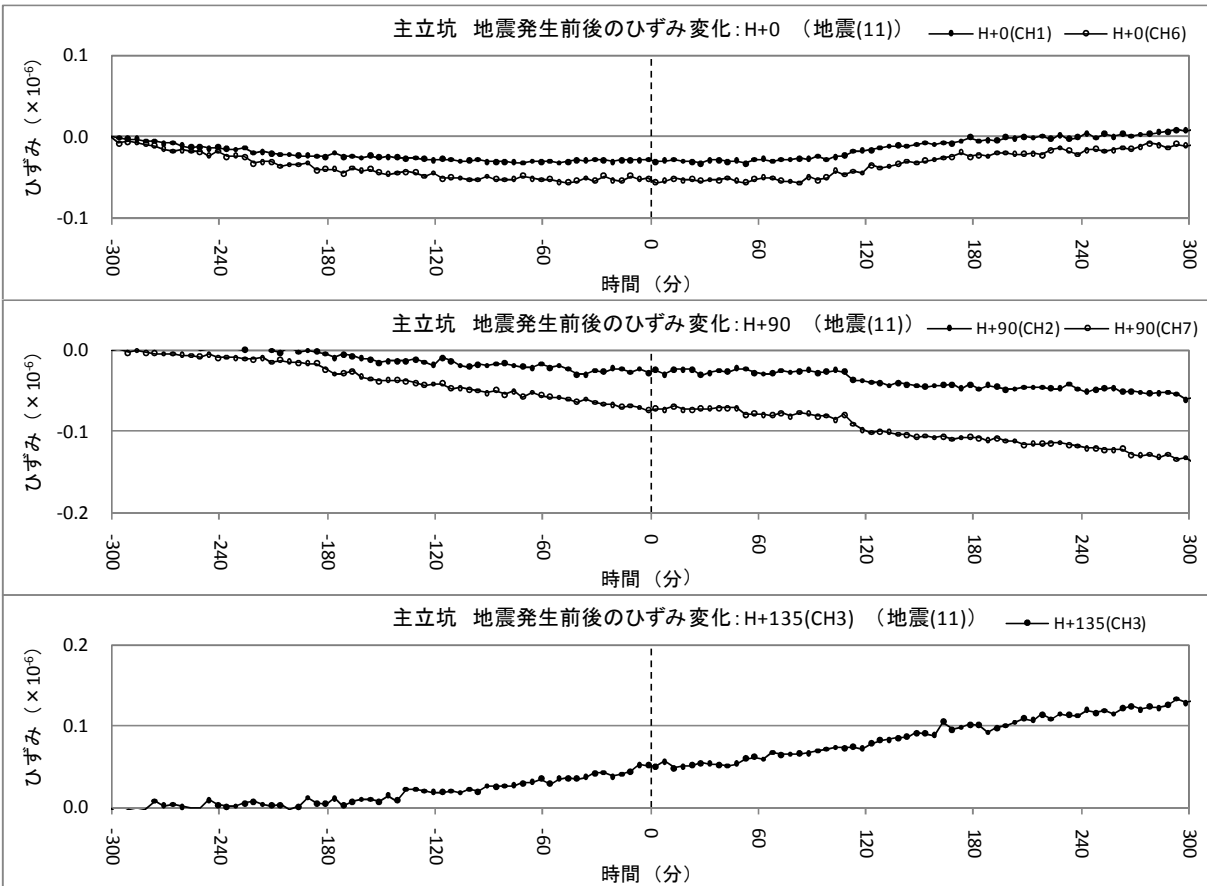


図 4.2.1-61(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(11))

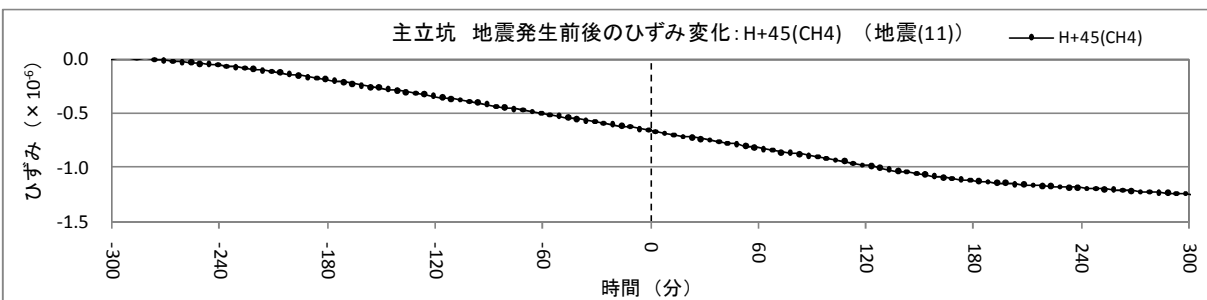


図 4.2.1-61(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(11))

・地震(12) (2008/1/12 23:55)

図 4.2.1-62(1)に示すように、H+0、H+90 および H+135 は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。

一方、図 4.2.1-62(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみ変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

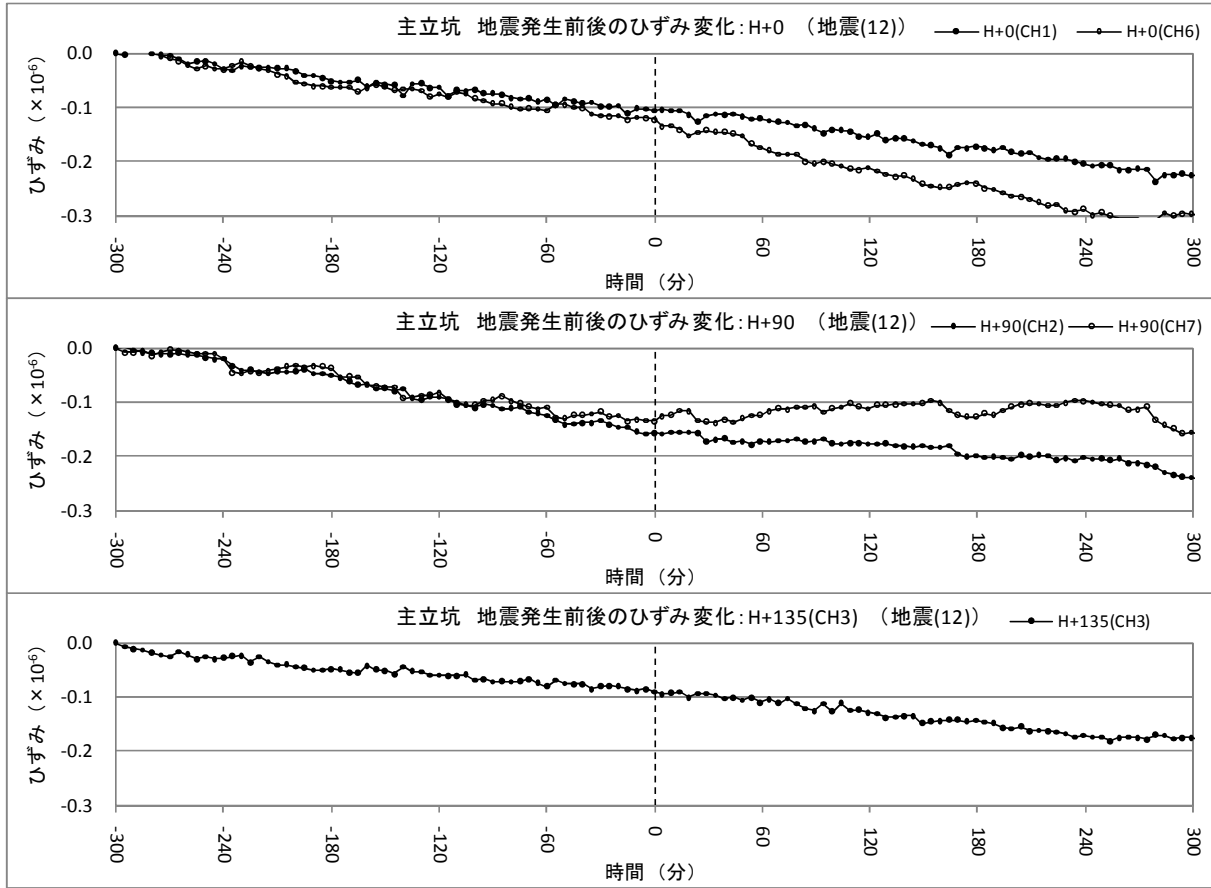


図 4.2.1-62(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))

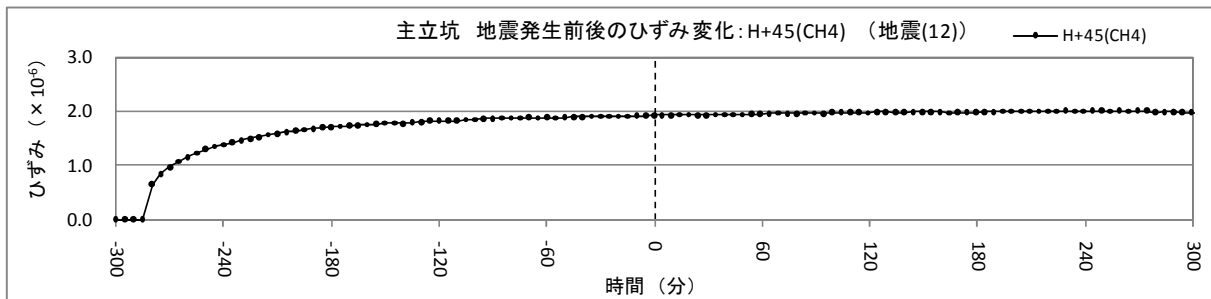


図 4.2.1-62(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))

・地震(13) (2008/1/18 17:18)

図 4.2.1-63(1)に示すように、H+0 では地震前にやや圧縮ひずみの増加傾向にあったが、地震後約 20 分間で 0.08×10^{-6} 程度のひずみが生じ、その後の約 3 時間は引張りひずみの増加傾向に転じている。H+90 では地震後約 15 分間で 0.15×10^{-6} 程度のひずみが生じ、その後は圧縮ひずみが増加する。H+135 は地震前に引張りひずみの微増傾向にあり、地震直後に 0.05×10^{-6} 程度のひずみが生じている。

一方、H+45 は図 4.2.1-63(2)に示すように、他のチャンネルより 1 オーダー程度大きくひずみ変動しており、圧縮ひずみの増加傾向のなか、地震直後に 0.1×10^{-6} 程度のひずみが生じている。

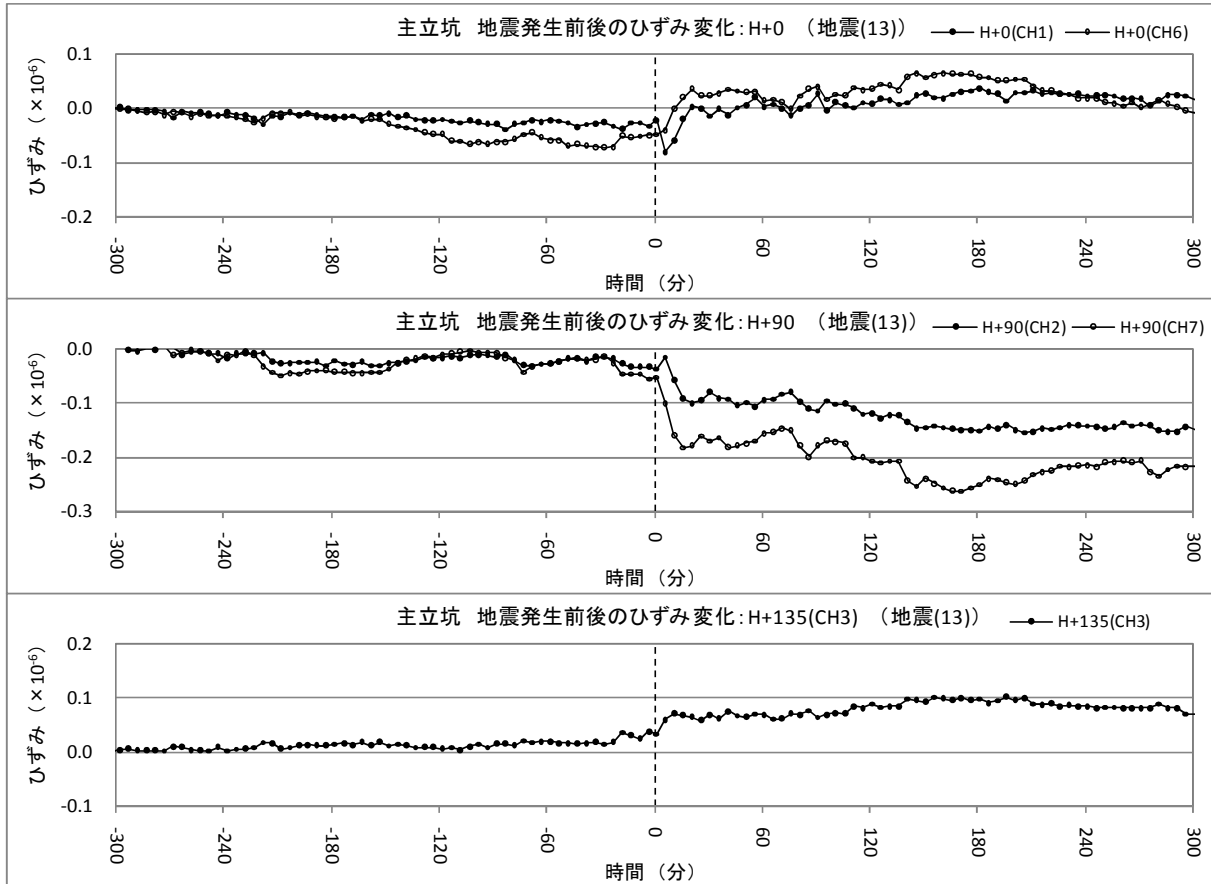


図 4.2.1-63(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))

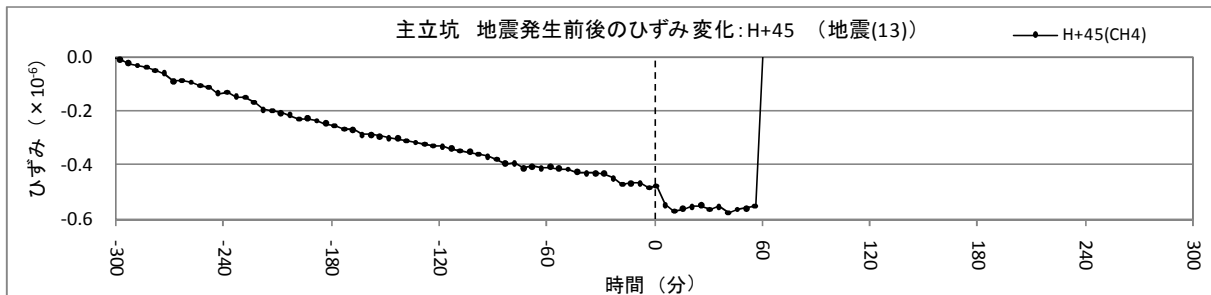


図 4.2.1-63(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))

・地震(14) (2008/1/20 11:19)

図 4.2.1-64 に示すように、H+0 および H+135 は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。H+90 は地震の前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。H+45 は地震の前後で計測値にややバラつきはみられるが、地震直後に大きなひずみ変化はみられない。

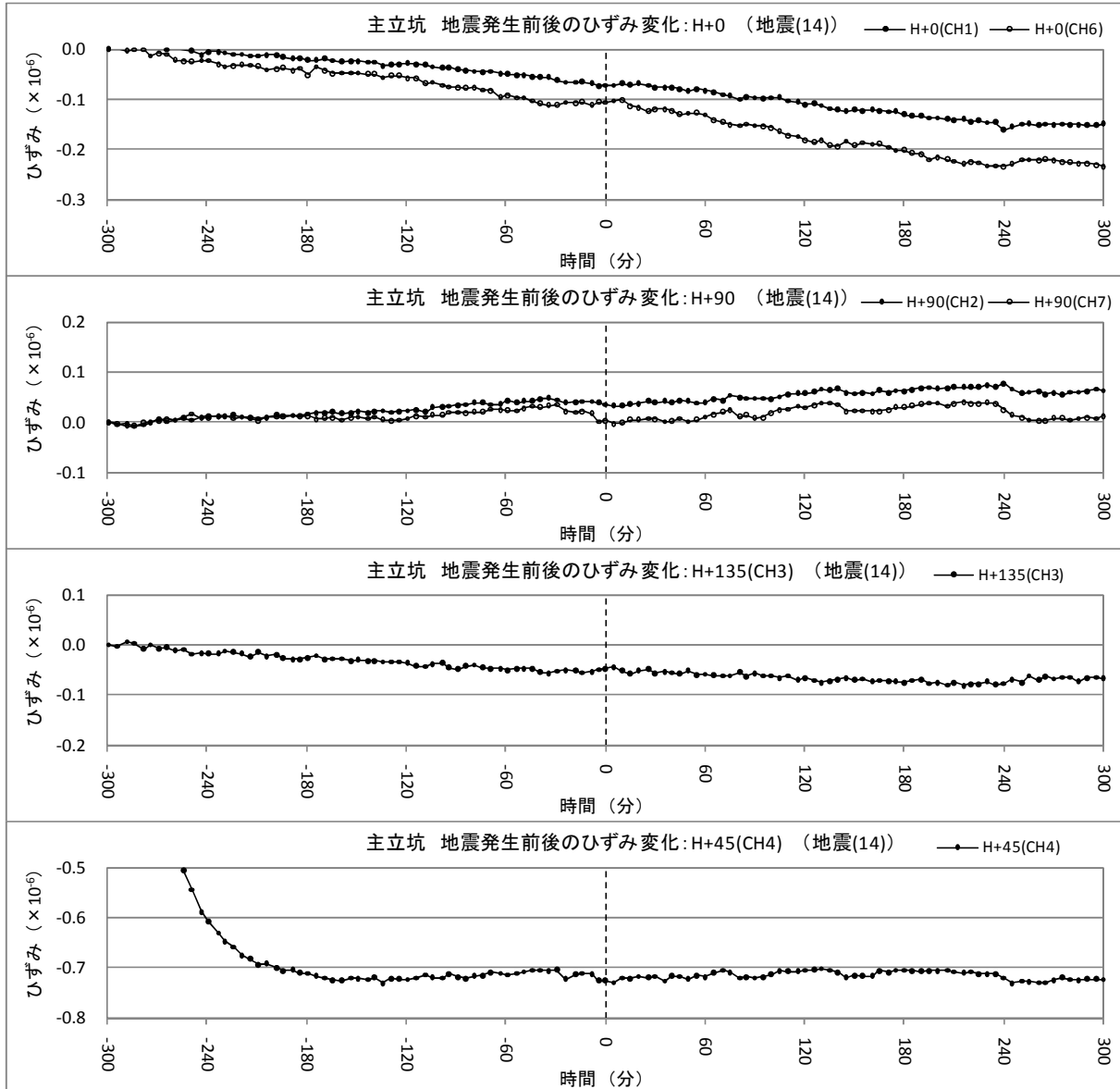


図 4.2.1-64 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(14))

・地震(15) (2008/1/26 4:33)

図 4.2.1-65(1)に示すように、H+0、H+90(CH2)および H+135 は地震の前後で落ちついた値を示している。H+90(CH7)は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後のひずみ変化はみられない。

なお、H+0、H+90 および H+135 において、地震発生の約 45 分後に表れているひずみ変化は、主立坑での発破④(2008/1/26 5:17)の影響によるものである。

一方、図 4.2.1-65(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー程度大きい割合でひずみが変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

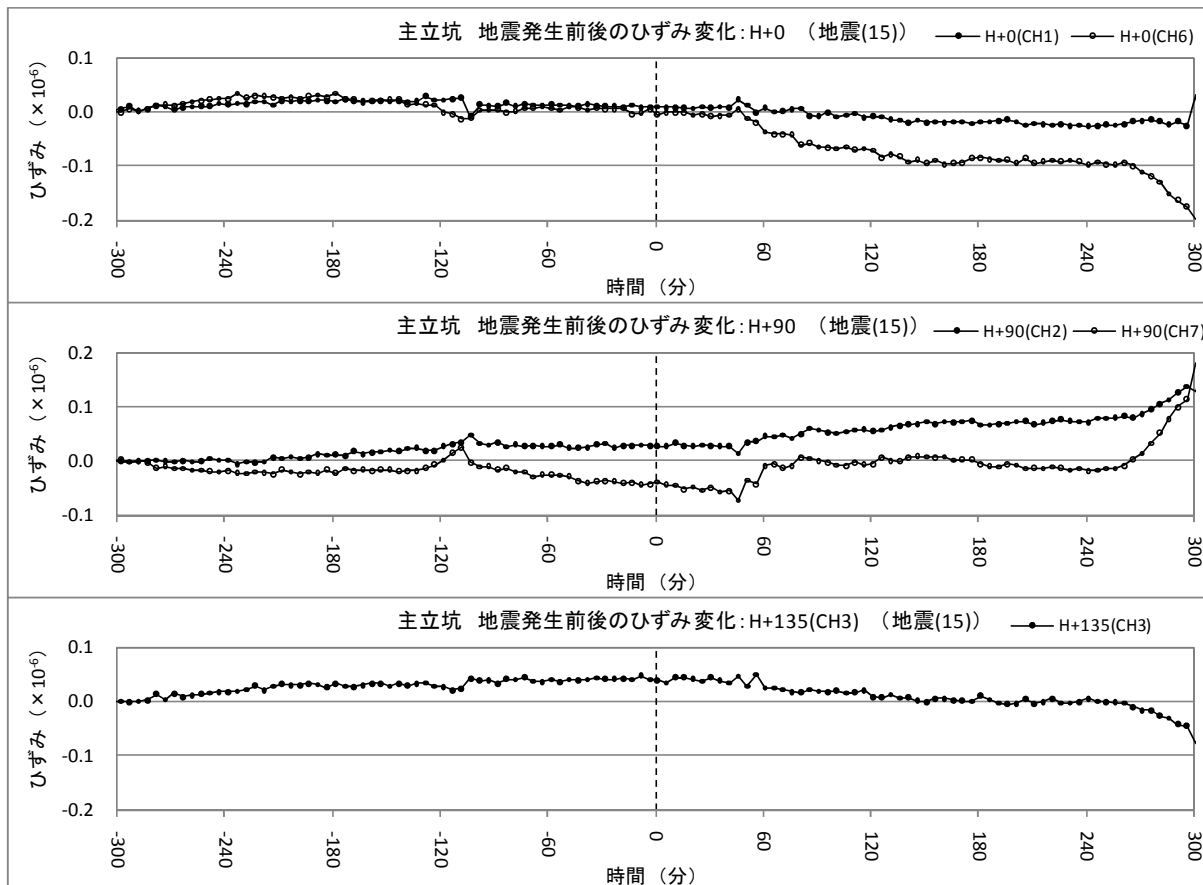


図 4.2.1-65(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))

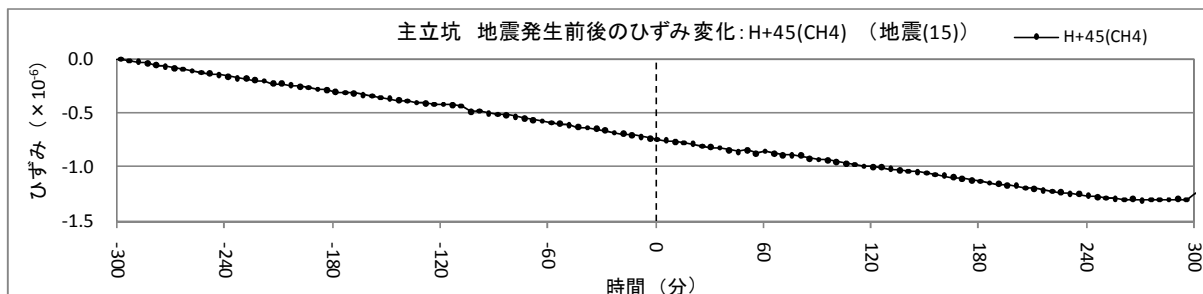


図 4.2.1-65(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))

・地震(16) (2008/1/27 10:33)

図 4.2.1-66(1)に示すように、H+0、H+90(CH2)および H+135 は地震の前後で値にバラつきがみられるが、地震の直後に大きなひずみ変化はみられない。H+90(CH7)は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。

一方、図 4.2.1-66(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー大きい割合でひずみ変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

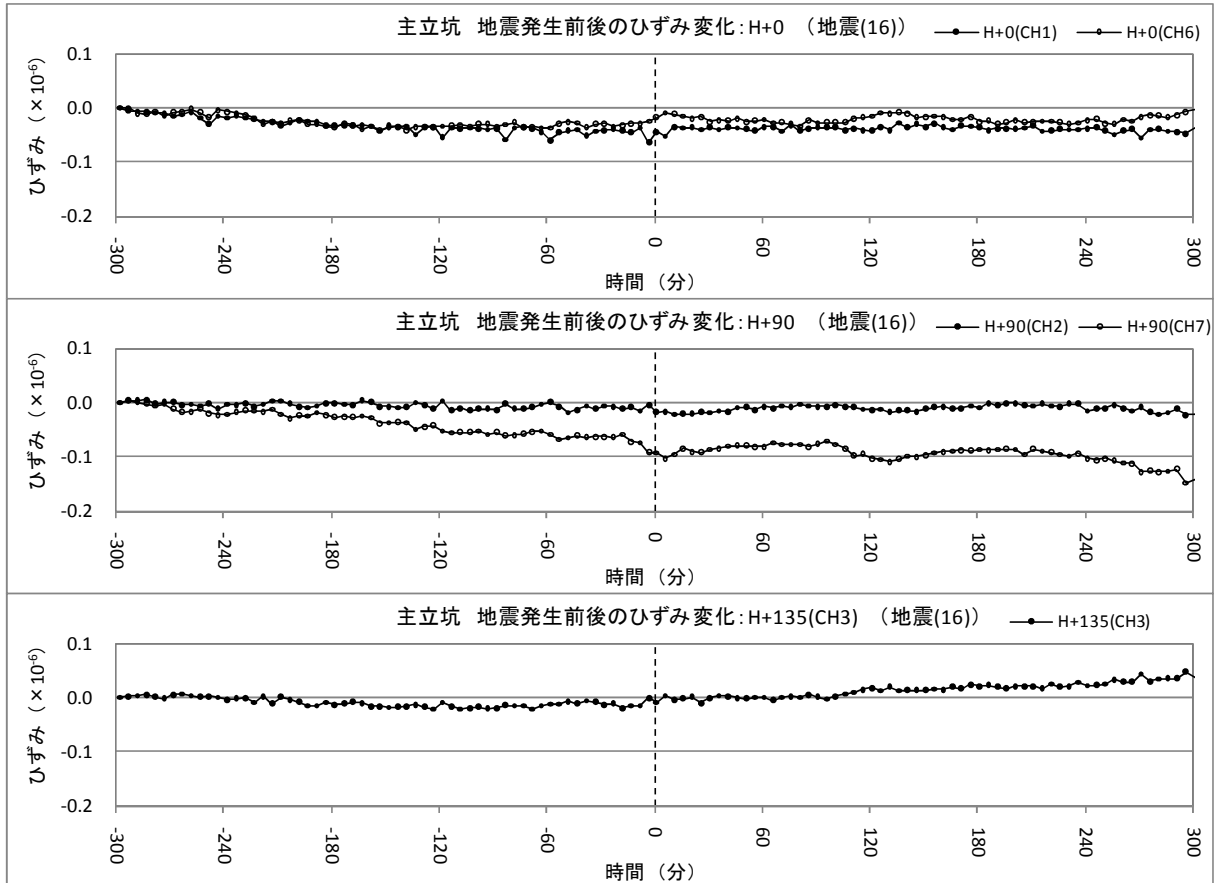


図 4.2.1-66(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))

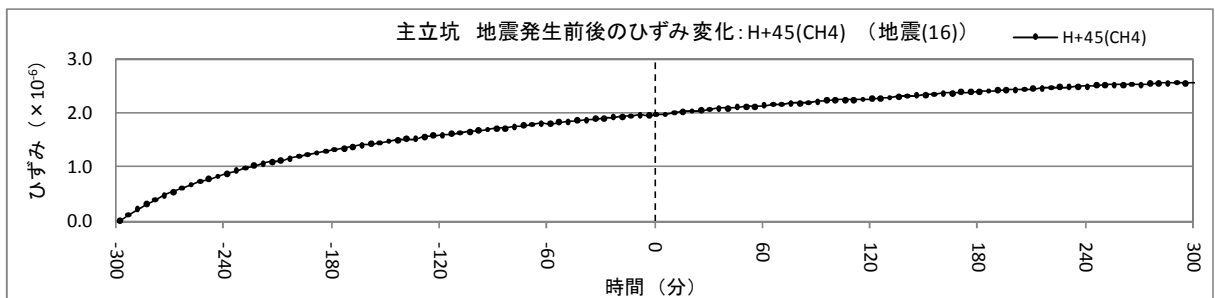


図 4.2.1-66(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))

・地震(17) (2008/1/27 10:53)

図 4.2.1-67(1)に示すように、H+0、H+90(CH2)および H+135 は地震の前後で値にバラつきがみられるが、地震の直後に大きなひずみ変化はみられない。H+90(CH7)は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。

一方、図 4.2.1-67(2)に示すように、H+45 は地震発生前後で他のチャンネルより 1 オーダー大きい割合でひずみ変動しており、地震発生後にひずみ変化はみられない。

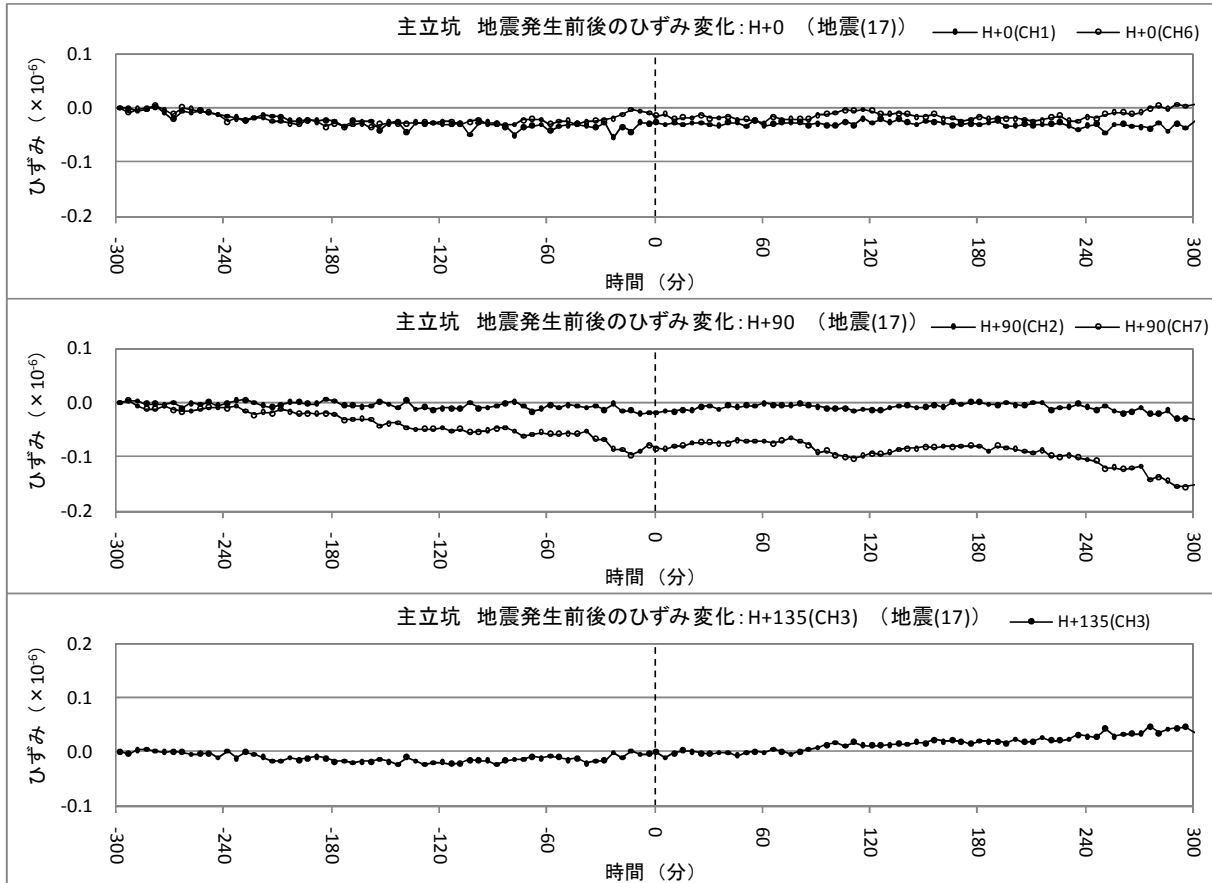


図 4.2.1-67(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))

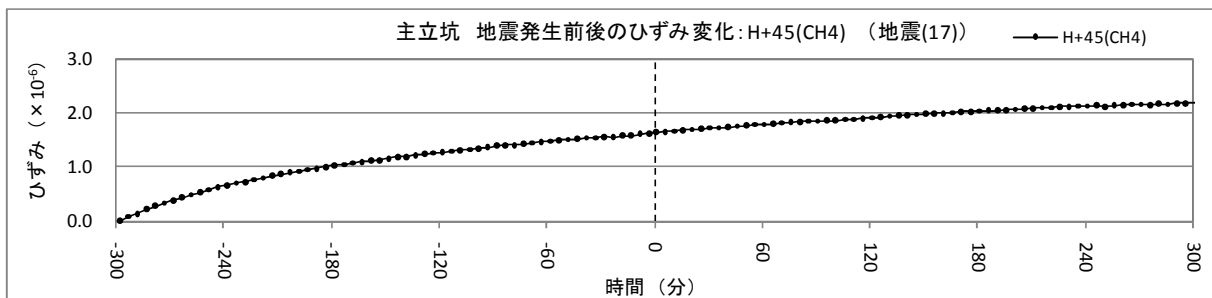


図 4.2.1-67(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))

・地震(18) (2008/2/1 17:03)

図4.2.1-68(1)に示すように、H+0およびH+135は地震の前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震直後に大きなひずみ変化はみられない。H+90は地震の前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震直後の大きなひずみ変化はみられない。

一方、図4.2.1-68(2)に示すように、H+45は地震発生前後で他のチャンネルより1オーダー大きい割合でひずみ変動しており、地震後のひずみ変化はみられない。

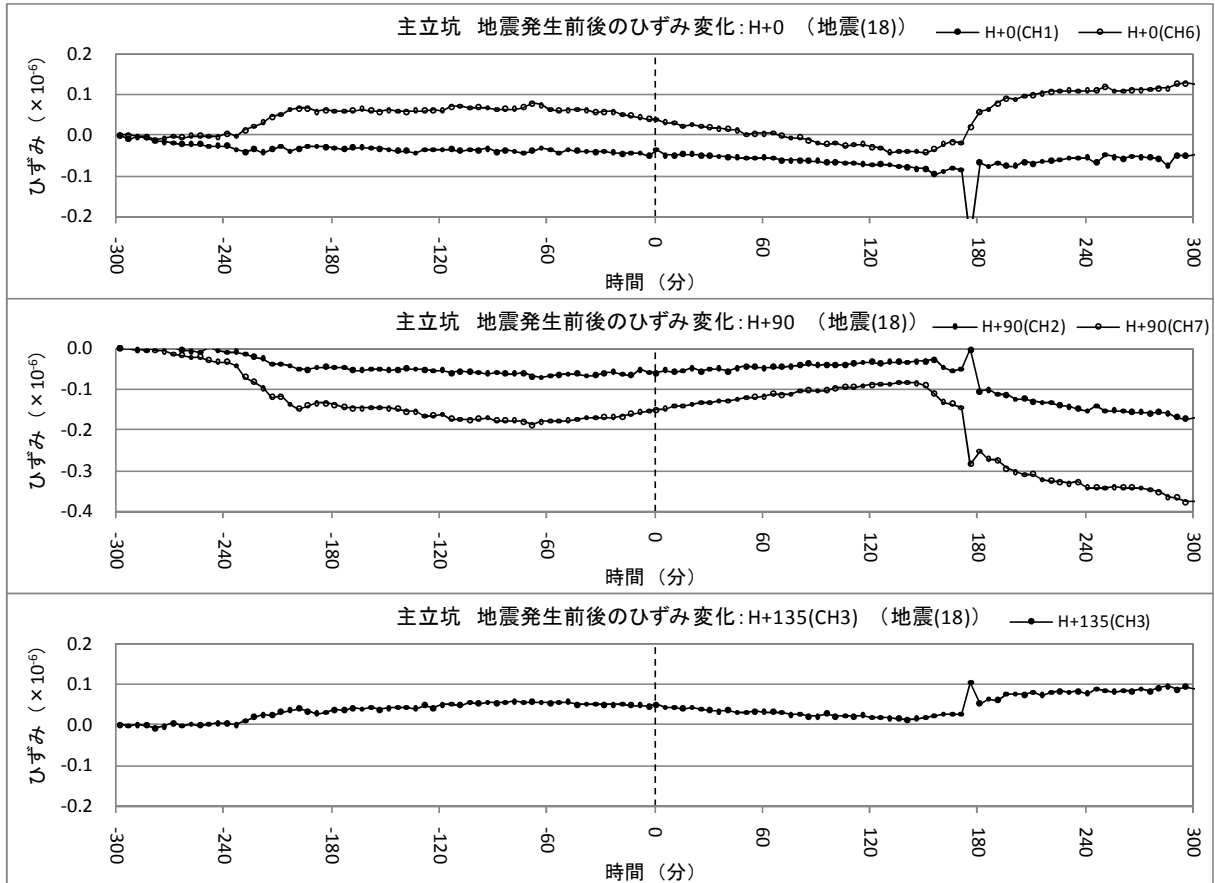


図4.2.1-68(1) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(18))

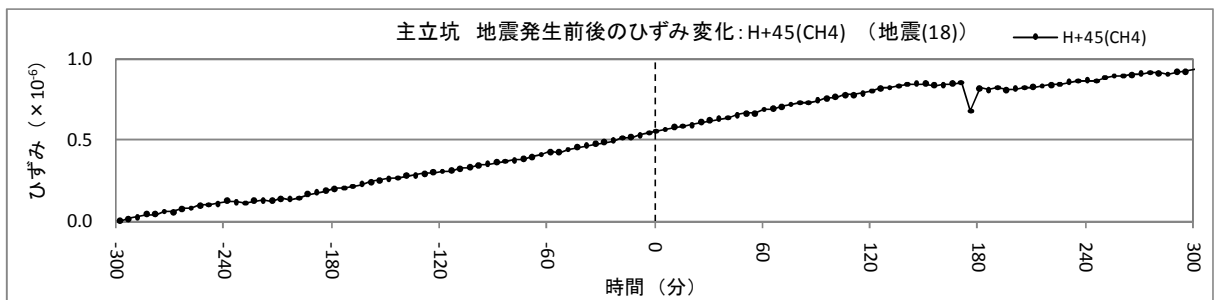


図4.2.1-68(2) 地震発生前後の主立坑の水平ひずみ変化 (地震(18))

2) 鉛直ひずみ

図 4.2.1-69(1)~(3)に各地震発生前後の主立坑側の鉛直ひずみ変化を示す。

なお、ここでは地震発生時刻の約 5 時間前のひずみ計測値からの相対変位をプロットした。また、横軸の時間 0 は地震発生時刻を表している。

図をみると、主立坑側の鉛直ひずみは、地震発生前後ではほぼ線形的に変動しており、地震の影響によるひずみ変化はないと言える。

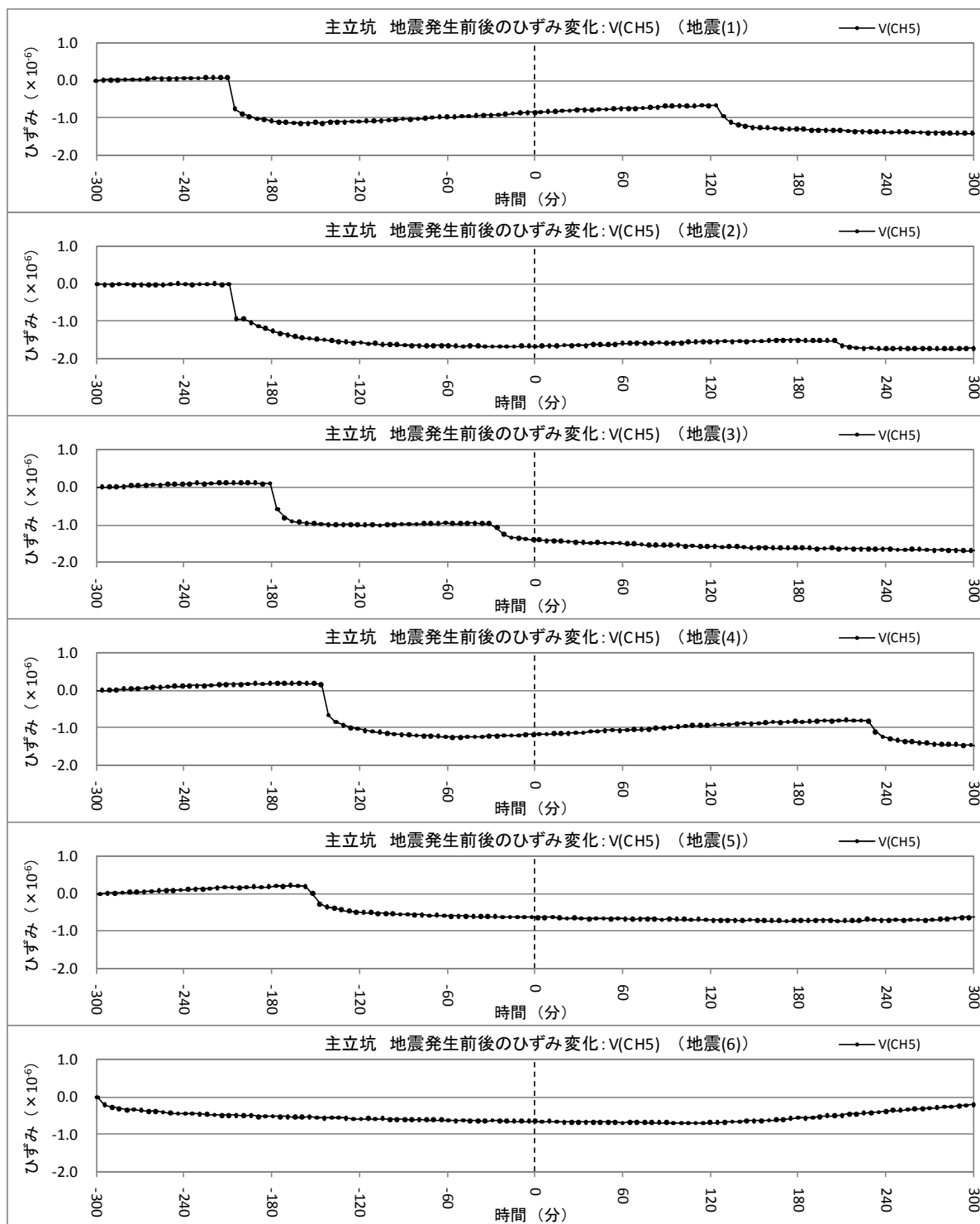


図 4.2.1-69(1) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(1)~地震(6))

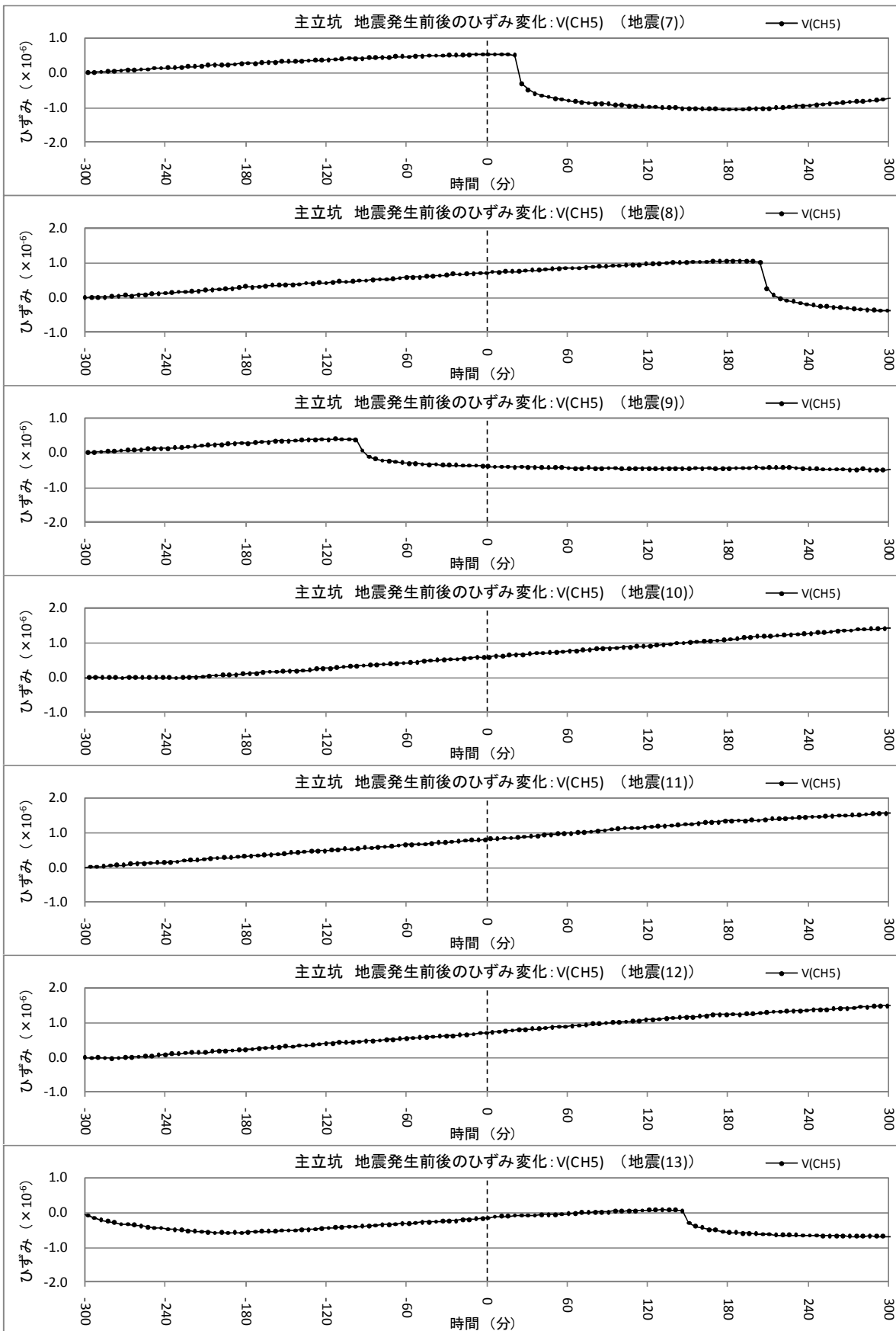


図 4. 2. 1-69(2) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(7)～地震(13))

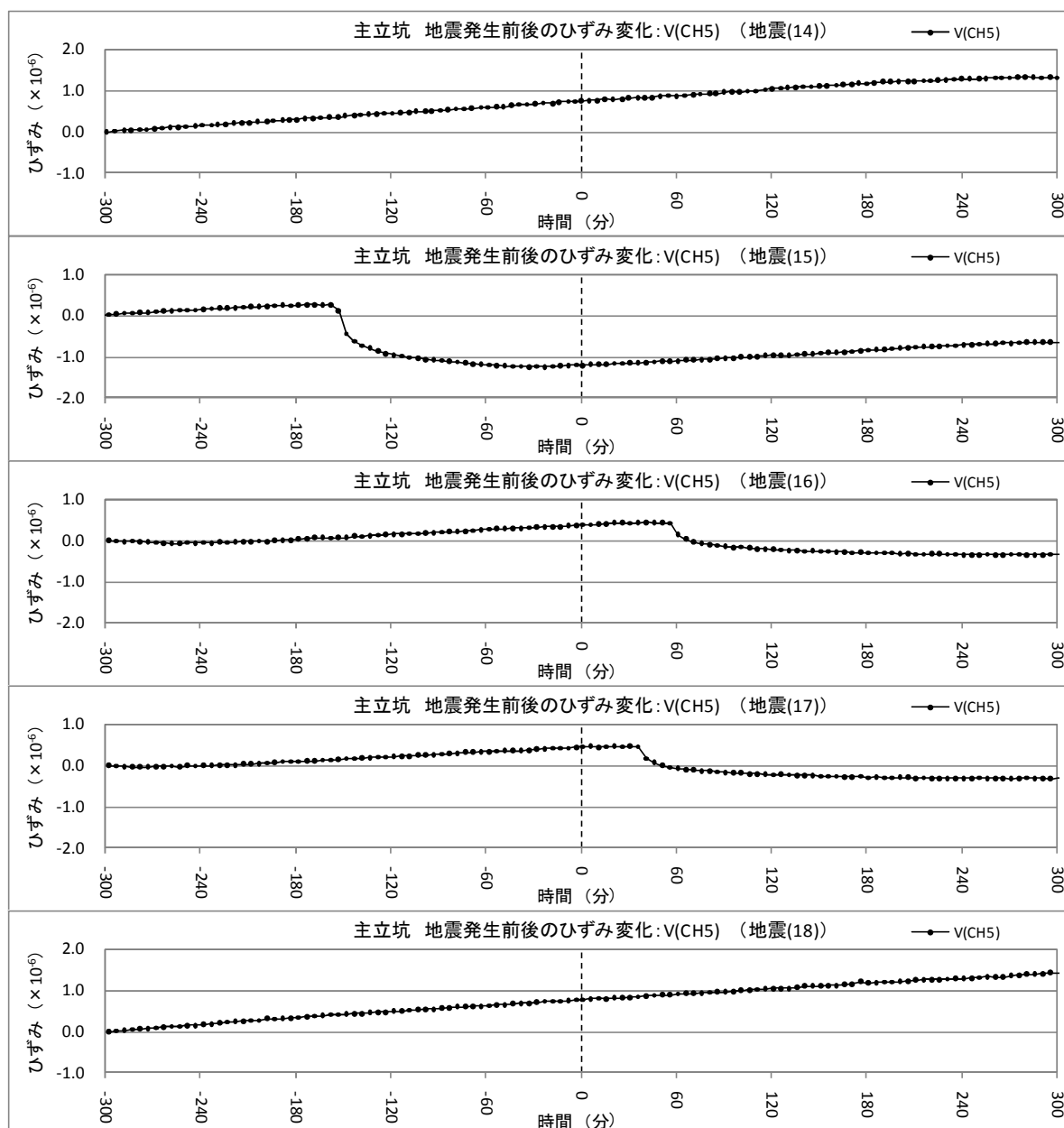


図 4. 2. 1-69 (3) 地震発生前後の主立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(14)～地震(18))

3) まとめ

- ・ 主立坑側の水平ひずみでは、地震(4)および地震(13)において地震発生後の変化がみられた。地震(4)では、CH4 でのみ圧縮ひずみの増加勾配に変化がみられた。地震(13)では、H+0 および H+135 で引張りひずみの増加、H+90 および H+45 で圧縮ひずみの増加がみられた。
- ・ 鉛直ひずみは、地震発生前後ではほぼ線形的に変化しており、地震の影響によるひずみ変化はみられない。
- ・ 研究所周辺および研究坑道内にある地下水長期モニタリング孔においては、地震の影響と考えられる水頭変動はみられない。

(7) 最大・最小主ひずみとその方向

ここでは、ひずみ計で計測された水平面内の4成分（H+0、H+90、H+45、H+135）のひずみ計測値を用いて、次式により最大主ひずみ（ ϵ_{\max} ）および最小主ひずみ（ ϵ_{\min} ）を算出する。

$$\epsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left[\epsilon_0 + \epsilon_{90} + \sqrt{2\{(\epsilon_0 - \gamma_{\max})^2 + (\epsilon_{90} - \gamma_{\max})^2\}} \right]$$

$$\epsilon_{\min} = \frac{1}{2} \left[\epsilon_0 + \epsilon_{90} - \sqrt{2\{(\epsilon_0 - \gamma_{\max})^2 + (\epsilon_{90} - \gamma_{\max})^2\}} \right]$$

ここで、

ϵ_0 : 計器方位 0 度（H+0）のひずみ（CH1、CH6）

ϵ_{90} : 計器方位 0 度から水平 90 度方向（H+90）のひずみ（CH2、CH7）

γ_{\max} : 最大せん断ひずみ

なお、最大せん断ひずみ（ γ_{\max} ）はテンソルひずみとして扱い、CH3 および CH4 のデータを用いて次式により換算し、平均値を用いた。

$$\gamma_{\max} = \epsilon_{45} - \frac{1}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_{90})$$

および、

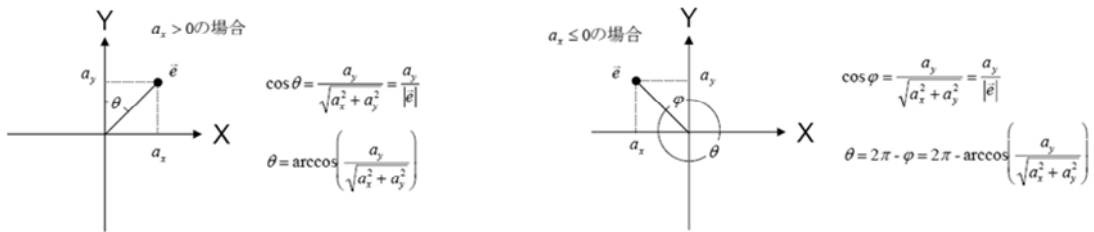
$$\gamma_{\max} = \frac{1}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_{90}) - \epsilon_{135}$$

ここで、

ϵ_{45} : 計器方向 0 度から水平 45 度方向（H+45）のひずみ（CH4）

ϵ_{135} : 計器方位 0 度から水平 135 度方向（H+135）のひずみ（CH3）

主ひずみの方向（ θ ）は、以下に示す方法で算出したのち、ひずみ計の計器方位（安定期における方位計の平均値 144.8° を採用）により補正して求めた。



ここで、

a_x : 計器方向 90° の方向余弦

a_y : 計器方向 0° の方向余弦

e : 主ひずみ

最大主ひずみと最小主ひずみ、およびそれらの方向の算出は、計測で得られたひずみデータの組み合わせを変えて行った。

初めに CASE1 として、計測された全 CH のデータを用いて主ひずみとその方向を算出し、図 4.2.1-70 に示す。なお、ここでは主ひずみ方向のグラフにおける縦軸の 0 は磁北を意味し、磁北から時計回りの角度を正、反時計回りの角度を負として表す。

CASE1 の最大主ひずみおよび最小主ひずみは、図 4.2.1-70 に示すように、経時的に増加傾向にある圧縮ひずみである。2007 年 10 月 13 日から 2008 年 2 月 6 日までの累積ひずみは、最大主ひずみが約 60.2×10^{-6} 、最小主ひずみが約 29.3×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、ドリフト収束後に磁北から時計回りで約 35° を示したあと、徐々に変化し、約 30° の値で落ち着いている。

次に CASE2 として、水平 90 度方向のひずみデータのうち、CH7 のデータを除外し、CH2 のデータのみで主ひずみとその方向を算出し、その結果を図 4.2.1-71 に示す。これは、図 4.2.1-1 に示したように、CH7 のひずみ変化が同方向を計測する CH2 と比較すると、非常に大きいためである。最大主ひずみおよび最小主ひずみは、図 4.2.1-71 に示すように、経時的に増加傾向にある圧縮ひずみで、2007 年 10 月 13 日から 2008 年 2 月 6 日までの累積ひずみは、最大主ひずみが約 46.0×10^{-6} 、最小主ひずみが約 19.6×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、ドリフト収束後に磁北から反時計回りで約 30° を示したあと、経時的に変化し、安定期の最後には、ほぼ磁北の値を示している

CASE1 および CASE2 において、2007 年 11 月 26 日頃以降に表れている主ひずみの振幅変化は、CH4 の変化挙動によるものと考えられる。そこで、CASE3 として、CH4 を除いたデータで主ひずみとその方向を算出した。CASE3 での最大主ひずみおよび最小主ひずみは、図 4.2.1-72 に示すように、経時的に増加傾向にある圧縮ひずみで、2007 年 10 月 13 日から 2008 年 2 月 6 日までの累積ひずみは、最大主ひずみが約 75.3×10^{-6} 、最小主ひずみが約 14.2×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、計測開始時に磁北から時計回りで約 15° を示したのち、ドリフトとともに時計回りに増加したのち、安定期の最後には、磁北から時計回りで約 20° の値を示している。

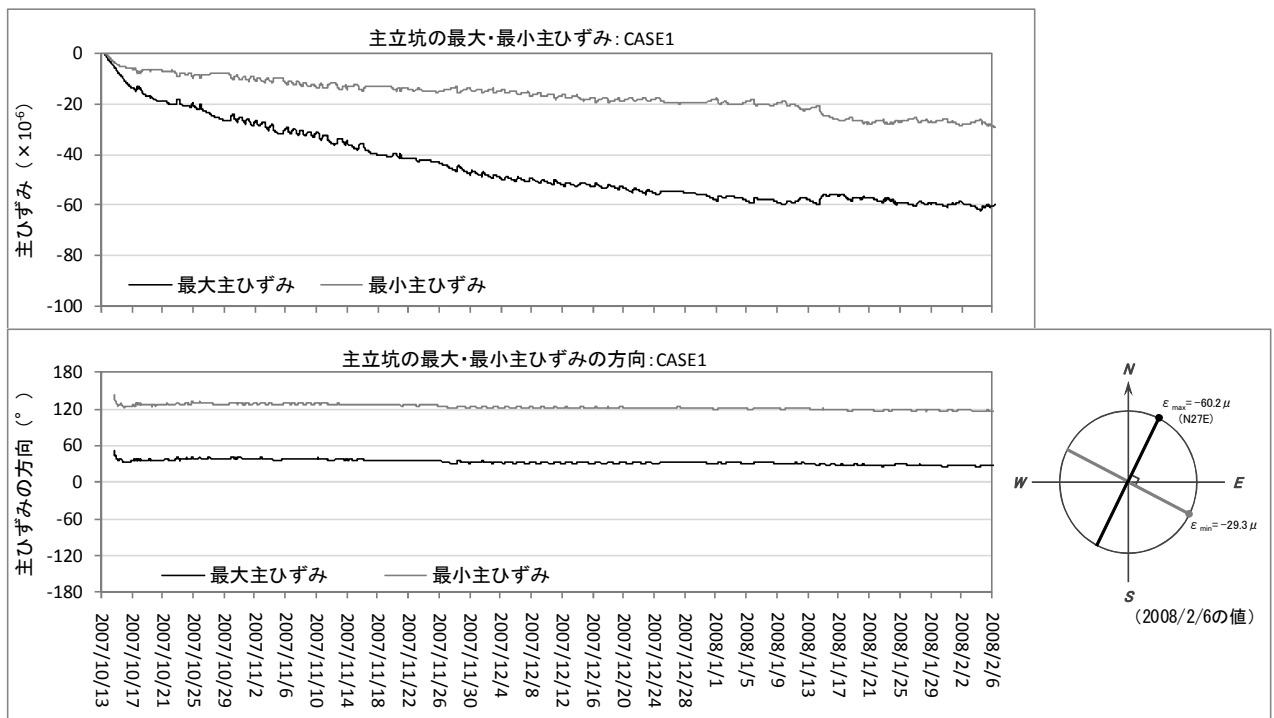


図 4.2.1-70 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向：CASE1

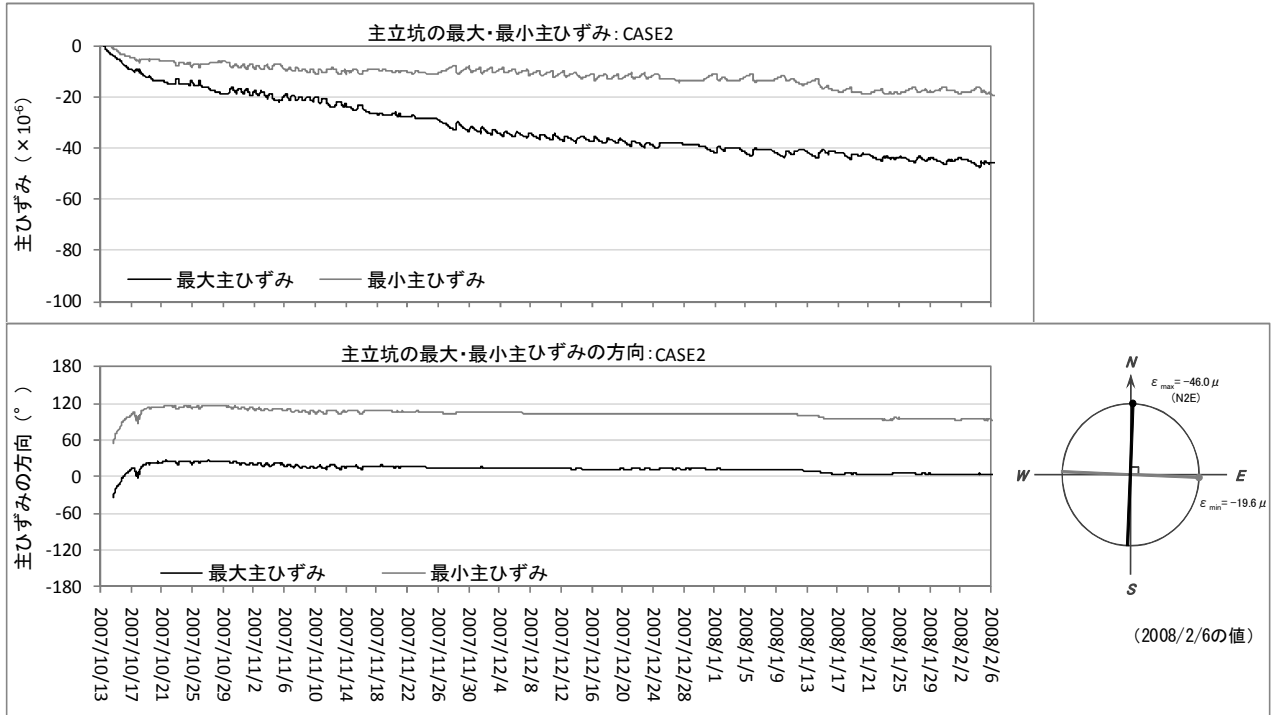


図 4.2.1-71 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE2

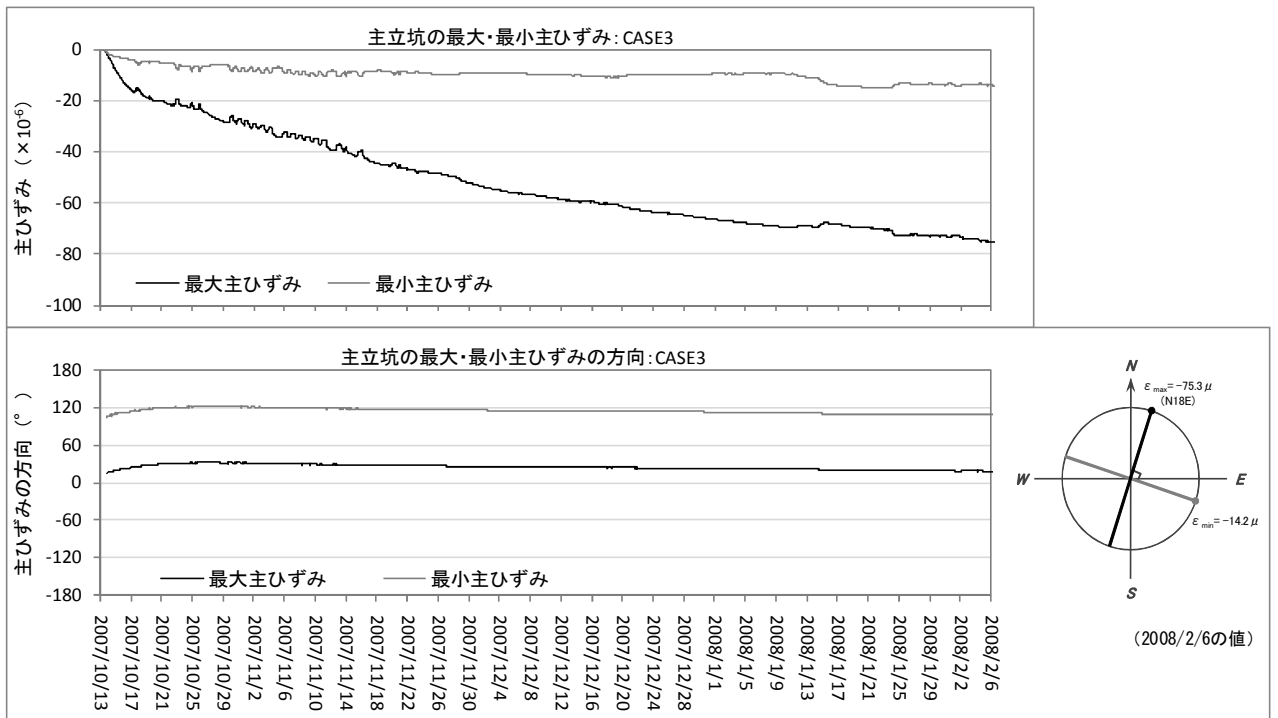


図 4.2.1-72 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3

次に、この CASE3 の場合において、主立坑での発破の影響および地震の影響と考えられる主ひずみの変化について述べる。

図 4.2.1-73 に、主立坑において発破作業が再開された 2008 年 1 月 14 日からの主ひずみおよび主ひずみの方向の変化を示すとともに、図 4.2.1-74(1)～図 4.2.1-74(8)には、各発破の前後 1 時間の変化を示す。

また、地震発生後に計測値の変化がみられた地震(13)についての主ひずみおよび主ひずみの方向の変化を図 4.2.1-75 に示し、発破後および地震後に生じた変化を表 4.2.1-3 にまとめて示す。

これらを見ると、発破後に生じた変化の挙動は、最大主ひずみと最小主ひずみの正と負の符号が逆になっている他は特に規則性はみられない。

発破③においては、発破後約 30 分間ひずみの変化が継続し、その後の約 30 分間で元のトレンドに戻るという、他とは違った挙動を示した。

地震発生後に生じた主ひずみ変化は、最大主ひずみが -0.1×10^{-6} 、最小主ひずみが $+0.05 \times 10^{-6}$ である。しかし、これらはトレンドに追随している変化であるので、地震の影響による実際の変化量はこれより少ないと考えられる。最大主ひずみの方向は、地震発生後 $+0.05^\circ$ の変化が生じている。

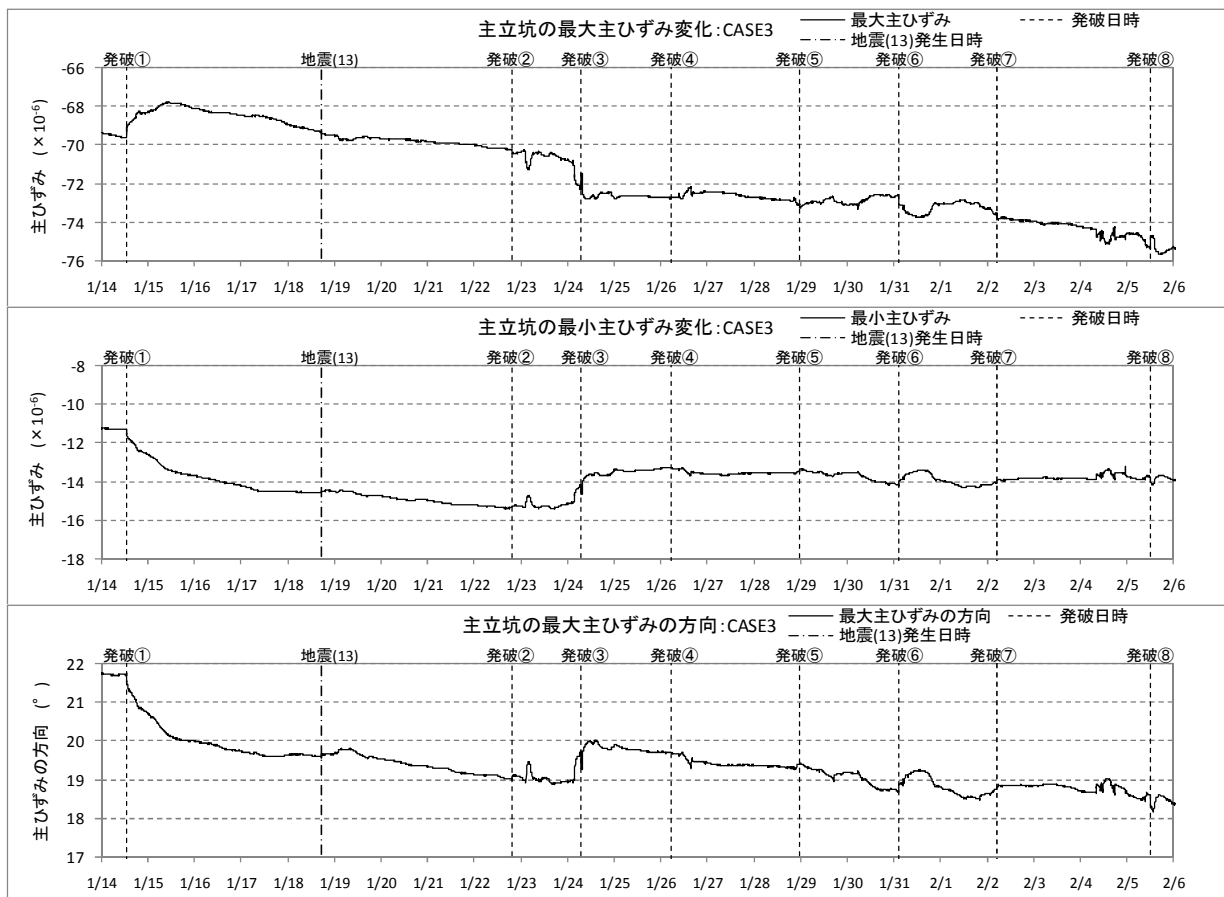


図 4.2.1-73 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (2008/1/14～2008/2/6)

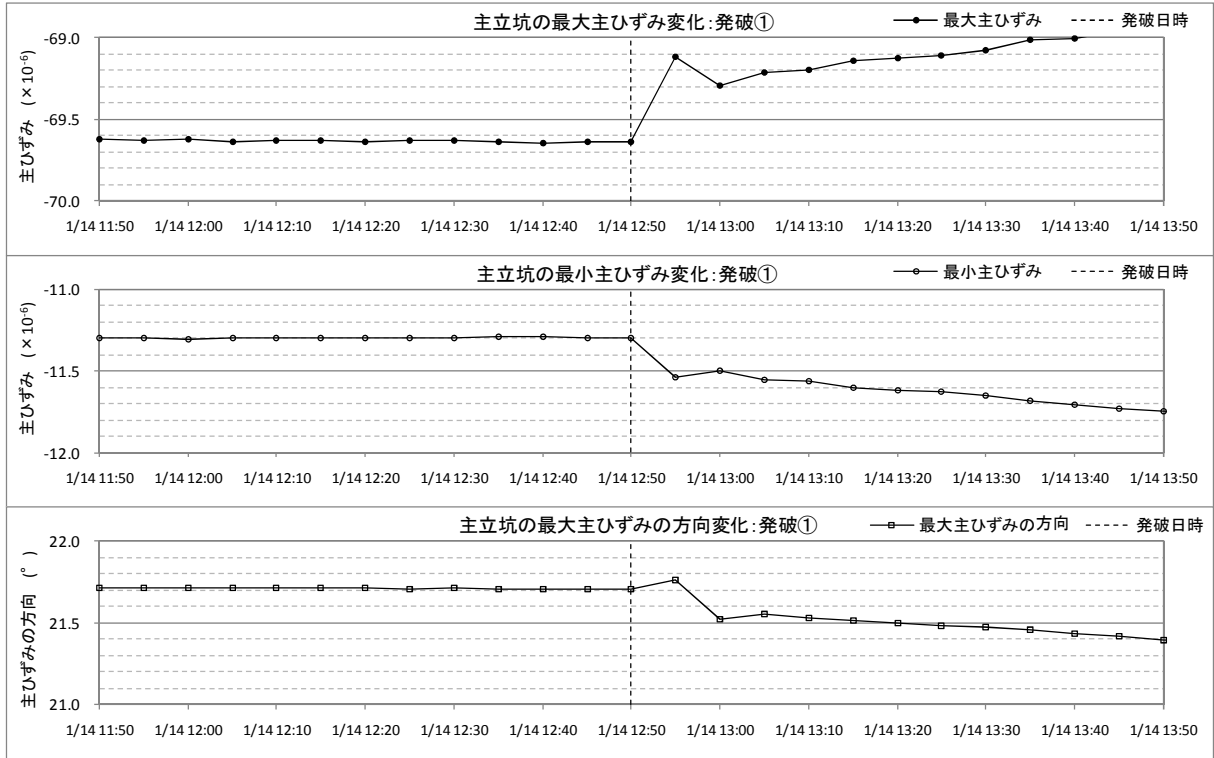


図 4. 2. 1-74(1) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破①)

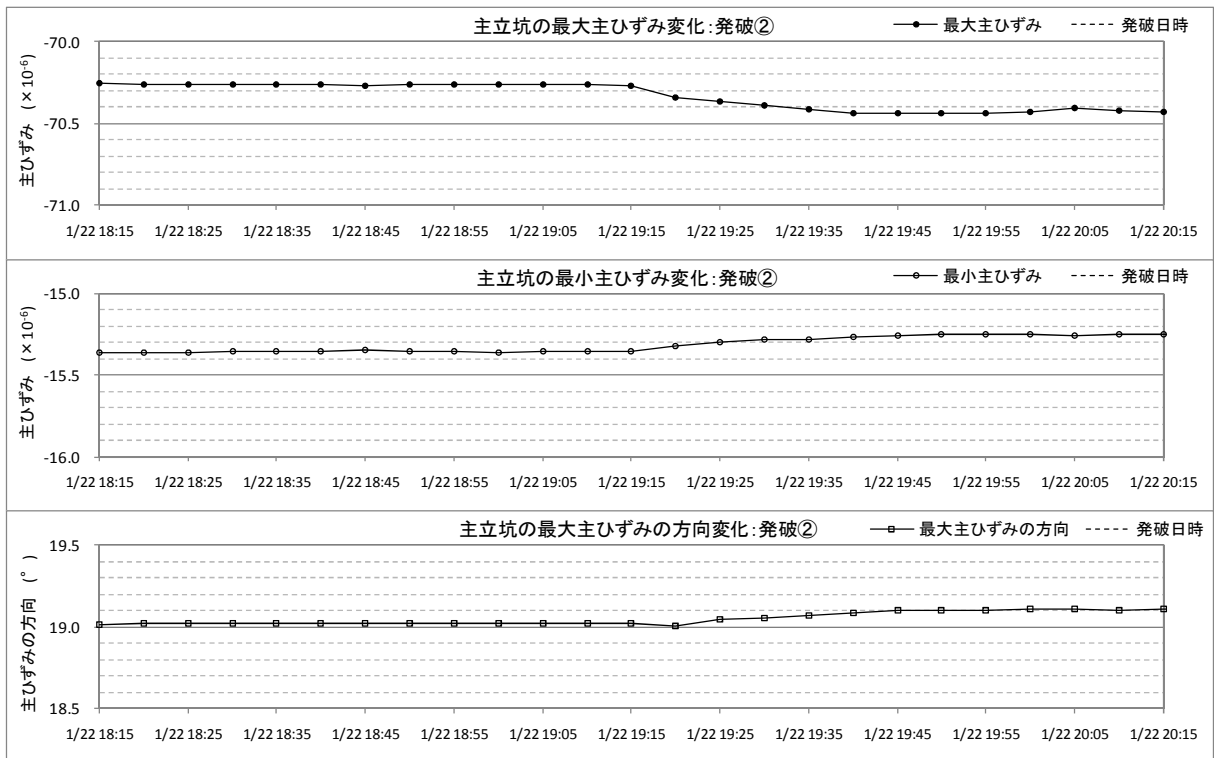


図 4. 2. 1-74(2) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破②)

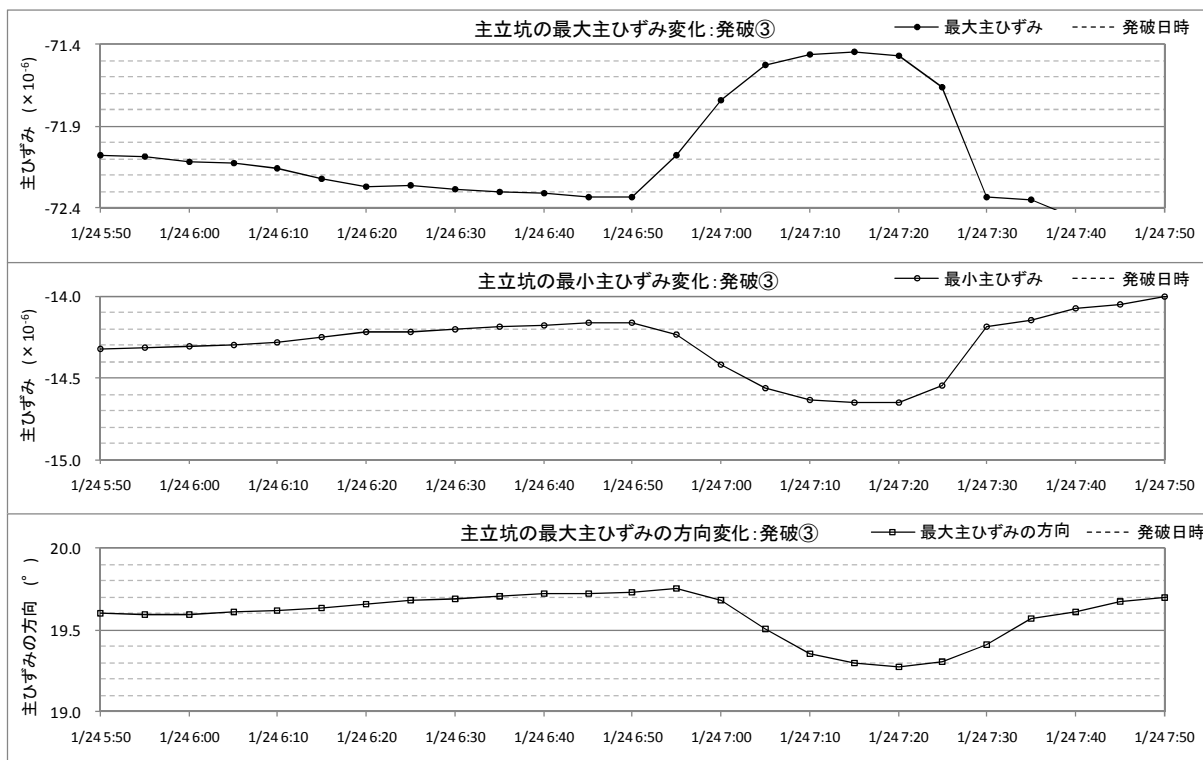


図 4. 2. 1-74(3) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破③)

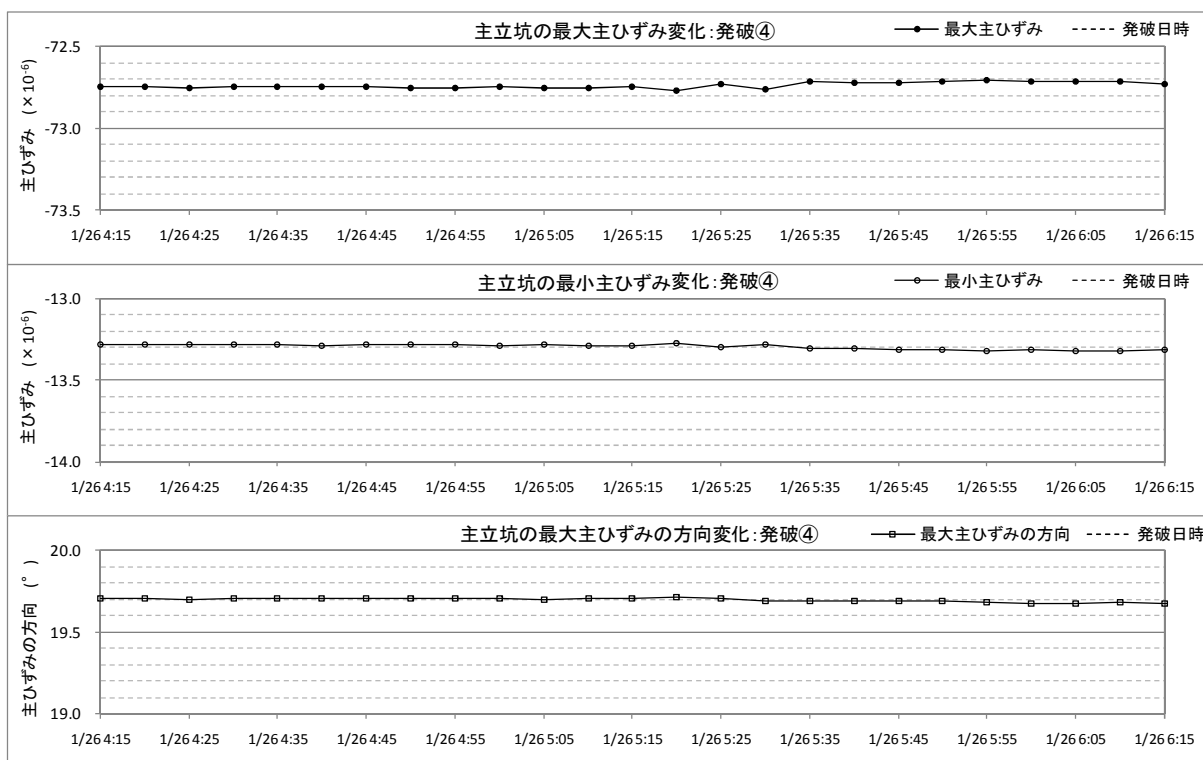


図 4. 2. 1-74(4) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破④)

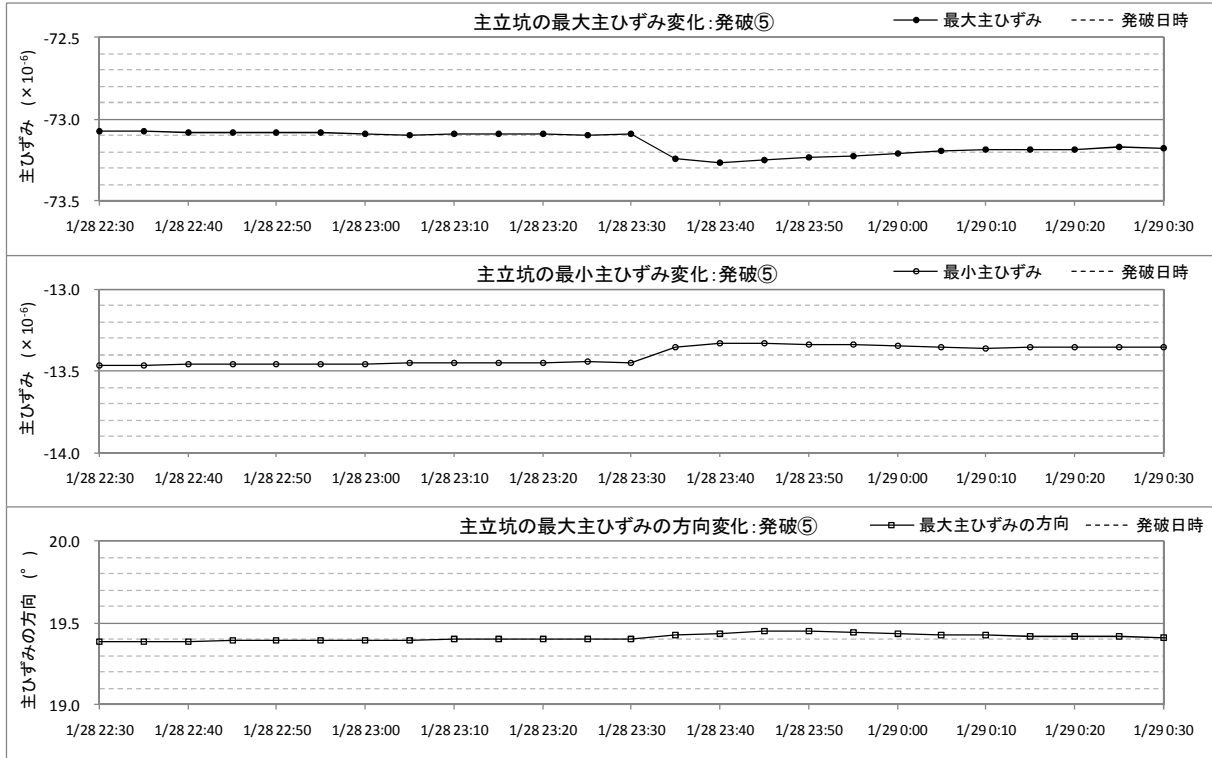


図 4. 2. 1-74(5) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破⑤)

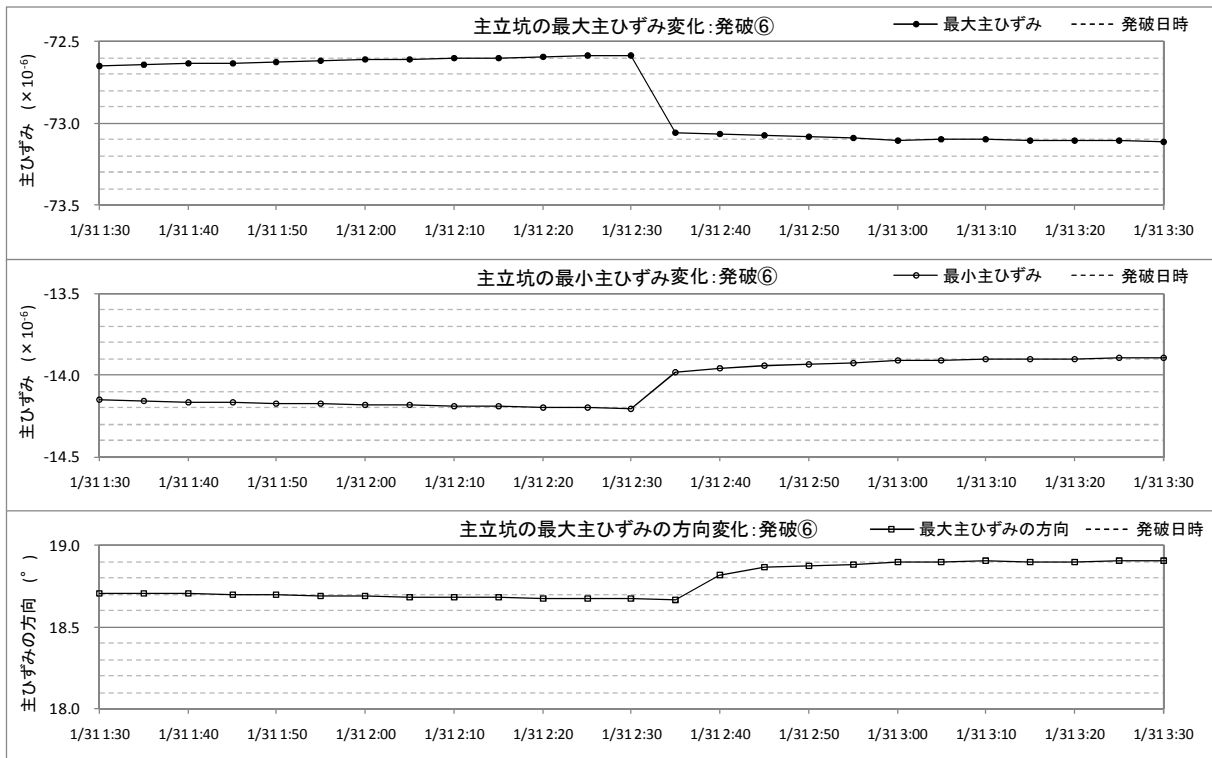


図 4. 2. 1-74(6) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破⑥)

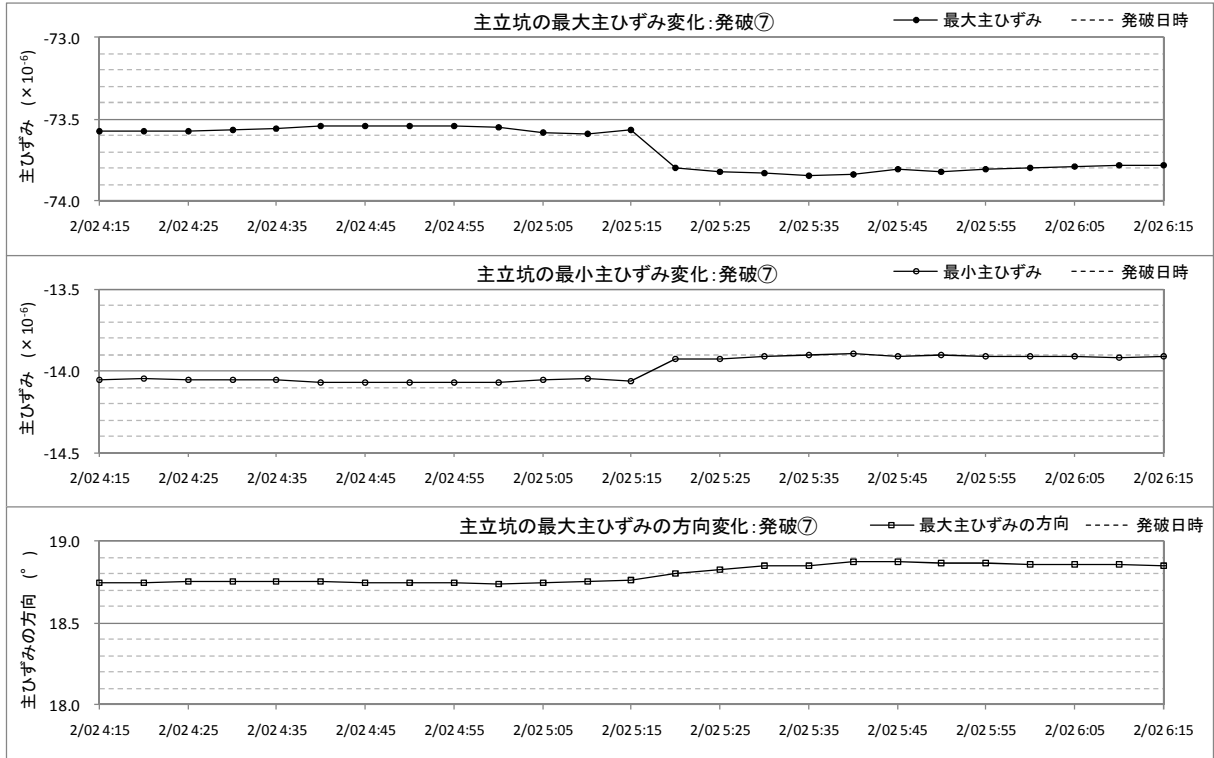


図 4. 2. 1-74(7) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破⑦)

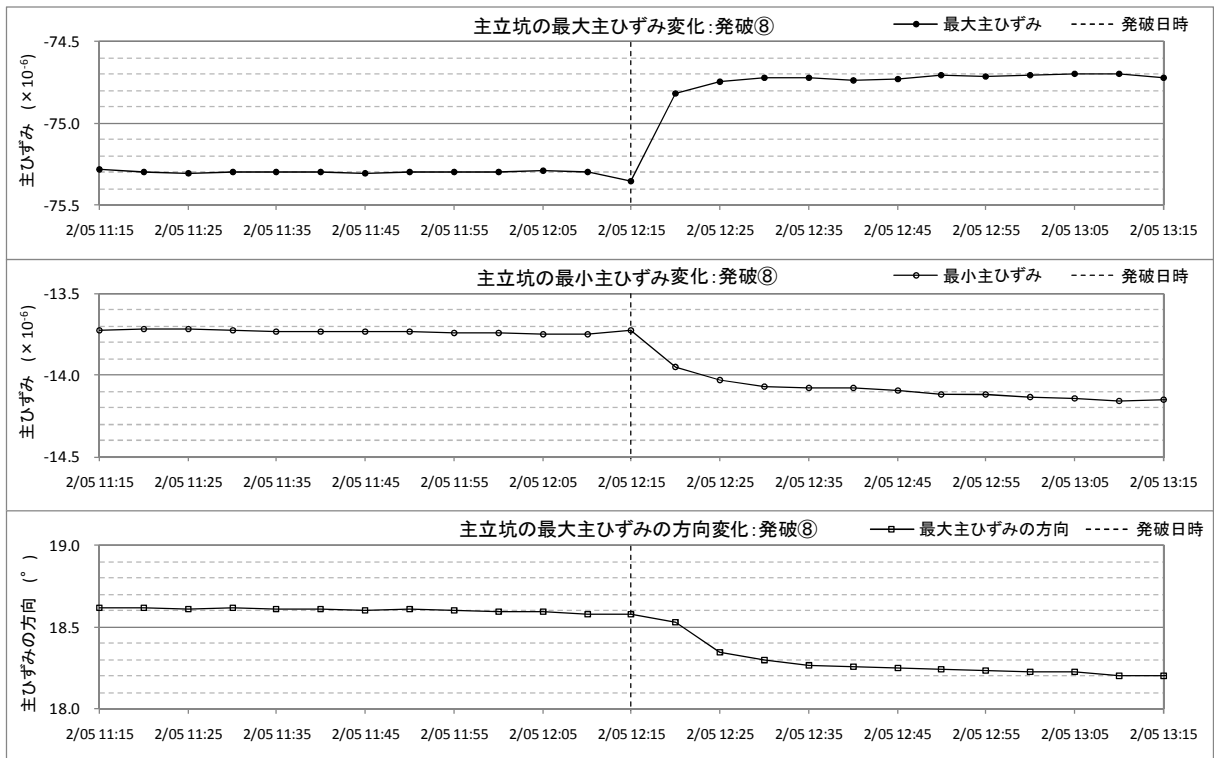


図 4. 2. 1-74(8) 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破⑧)

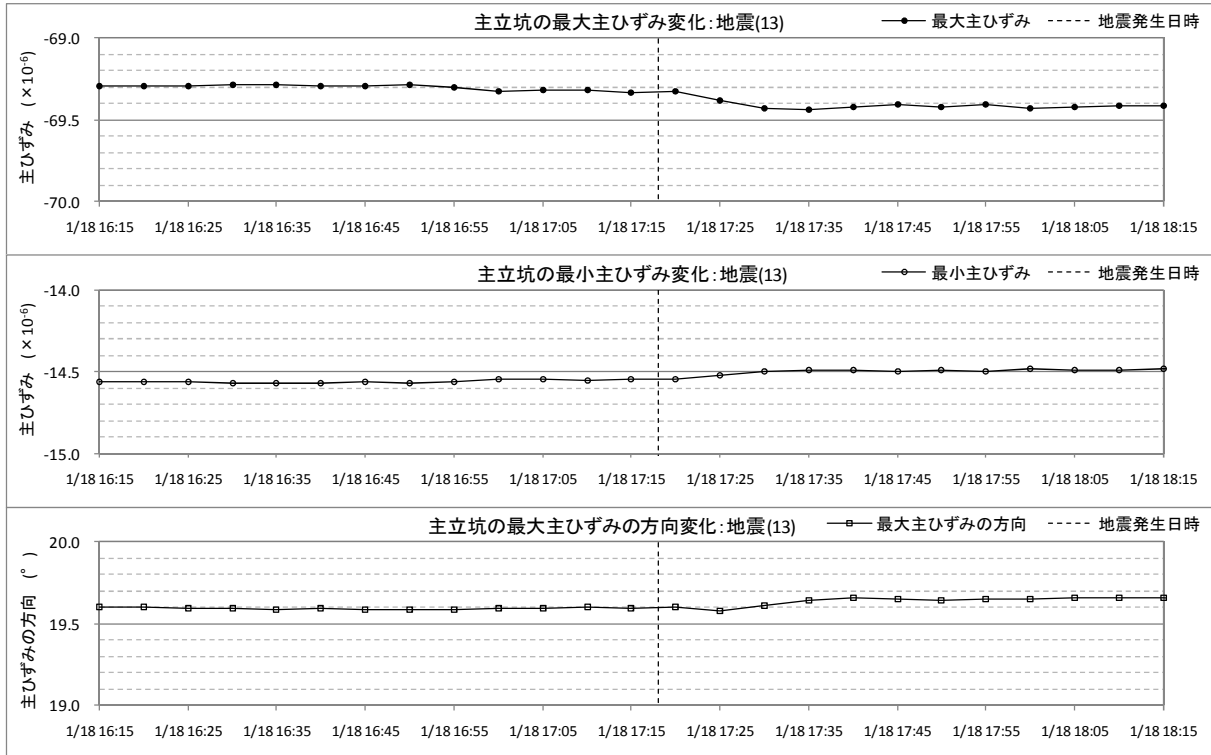


図 4. 2. 1-75 主立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (地震(13))

表 4. 2. 1-3 発破後および地震後の主ひずみの変化

	最大主ひずみ ($\times 10^{-6}$)	最小主ひずみ ($\times 10^{-6}$)	最大主ひずみ の方向
発破①	+0.55	-0.25	-0.20°
発破②	-0.15	+0.10	+0.10°
発破③	+0.90	-0.50	-0.45°
発破④	+0.05	---	---
発破⑤	-0.15	+0.15	+0.05°
発破⑥	-0.50	+0.25	+0.20°
発破⑦	-0.20	+0.15	+0.10°
発破⑧	+0.55	-0.30	-0.30°
地震(13)	-0.10	+0.05	+0.05°

※: ---はほとんど変化なし

4.2.2 換気立坑の計測結果

(1) 水平ひずみ、方位、温度の変化

図 4.2.2-1 に、換気立坑の定期における計測結果を示す。

ここでは、2008 年 1 月 9 日 14 時の値を初期値とした相対変位をプロットし、ひずみの経時変化を示した。なお、ノイズが非常に多かった温度計のデータは、あらかじめノイズを除去してプロットした。

図 4.2.2-1 に示すように、換気立坑で計測されたひずみは、CH1 を除くと 30×10^{-6} 程度である。各 CH を詳しくみると、CH1 は経時的に引張りひずみが増加し、累積のひずみ変化は 165×10^{-6} 程度である。一方、CH1 と同方向を計測する CH6 では、引張りひずみが 12×10^{-6} 程度となっている。CH2 は、引張りひずみが段階的に変動し、 30×10^{-6} 程度まで増加している。一方、CH2 と同方向を計測する CH7 では、引張りひずみが線形的に変動し、 7×10^{-6} 程度の増加となっている。CH3 および CH4 は、ひずみ変化が比較的少なく、 1×10^{-6} 以下の圧縮ひずみとなっている。

方位計は、初期にややばらつきがみられたほか、 0.1° 程度の振幅変化はあるが、概ね一定で約 336.0° を示している。

温度計は、初期にややばらつきがみられたほか、ノイズが多く記録されたが、約 28.1°C の一定した値を示している。

(2) 鉛直ひずみの変化

図 4.2.2-2 に換気立坑の安定期における鉛直ひずみ変化を示す。ここでは、2008 年 1 月 9 日 14 時のデータを初期値としたひずみの相対変位をプロットした。図 4.2.2-2 に示すように、換気立坑の鉛直ひずみは、ほぼ線形的に圧縮ひずみが増加している。2008 年 1 月 9 日から 2008 年 2 月 6 日までの累積の圧縮ひずみは 4.5×10^{-6} 程度である。

(3) 研究坑道からの揚水の影響

換気立坑の安定期においては研究坑道からの揚水量が $600\text{m}^3/\text{day}$ 程度であるため、MSB-3 号孔の水頭変化に明確な揚水影響は表れていない。また、他の地下水位モニタリング孔においても揚水の影響と考えられる明確な水頭変動は確認できず、換気立坑のひずみ変化と揚水の影響との関連性の検討は不可能であった。

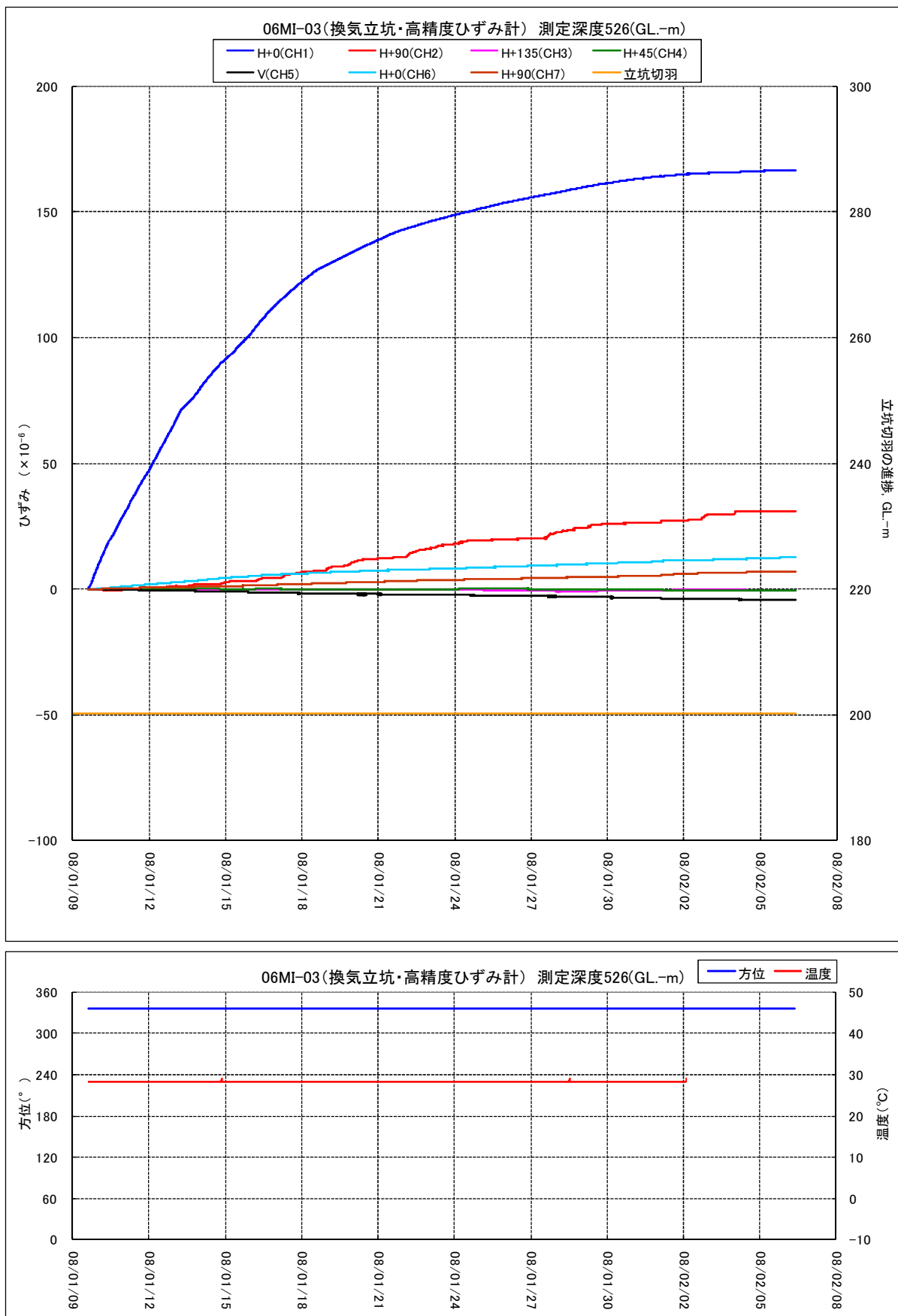


図 4. 2. 2-1 換気立坑の高精度ひずみ計による計測結果

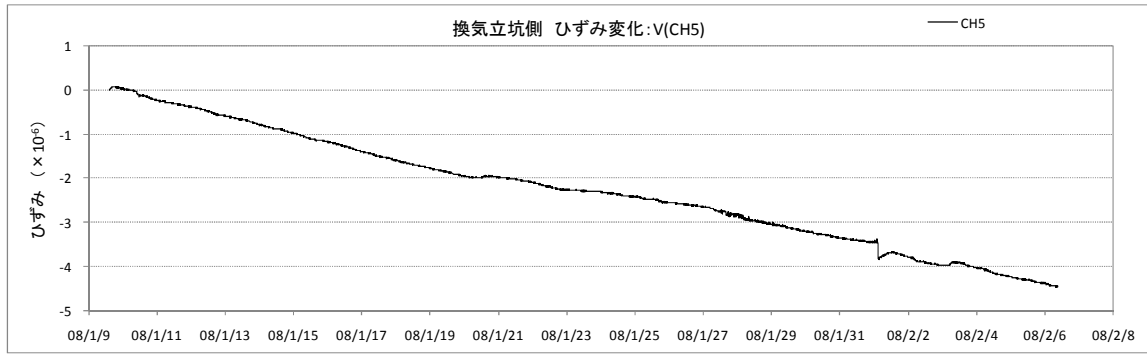


図 4.2.2-2 換気立坑の鉛直ひずみ変化

(4) 潮汐力の影響

換気立坑のひずみは、CH1を除いてほぼ線形的に変動しており、安定期において大きな変動はみられない。H+135(CH3)およびH+45(CH4)については、安定期の累積ひずみが 1×10^{-6} 以下であり、特に2008年1月9日から1月23日までの2週間は、図4.2.2-3に示すように、比較的落ち着いた値を示している。ここで、この2週間におけるCH3およびCH4のひずみとDH-15号孔の水頭変動を比較すると、図4.2.2-4に示すように、位相の同調がみられる。

このことから、CH3およびCH4のひずみは潮汐力の影響を受けた変動をしているといえる。潮汐力によるひずみの変動は、潮汐の1サイクルで最大でも 0.05×10^{-6} 程度であり、主立坑側のひずみと比較すると1オーダー小さい値となっている。

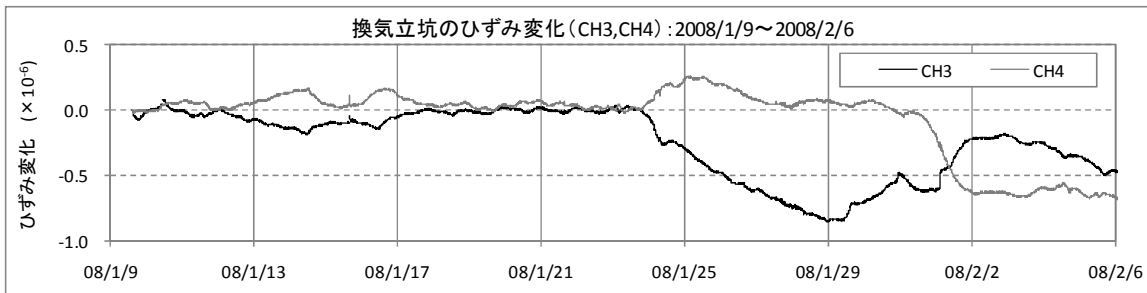


図 4.2.2-3 換気立坑のひずみ変化 (CH3, CH4) : 2008/1/9~2008/2/6

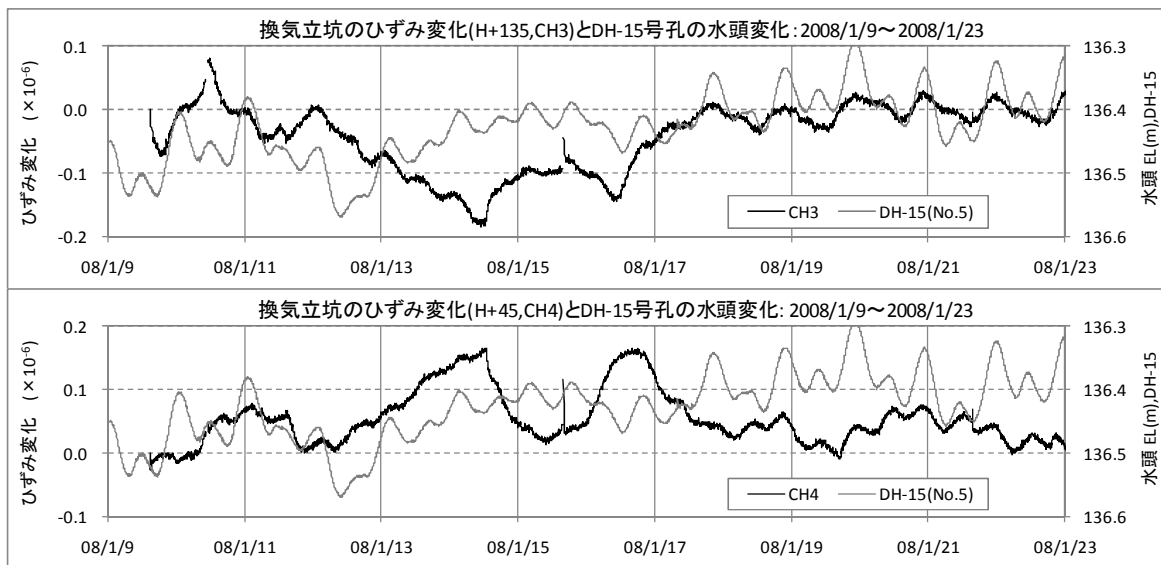


図 4.2.2-4 換気立坑のひずみ変化 (CH3, CH4) と DH-15 号孔の水頭変化

次に、ほぼ線形的にひずみが増加している H+0(CH6)、H+90(CH2,CH7)および V(CH5)において、4.2.1(4)に述べた方法でトレンドを除去し、トレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔（区間 No.5）の水頭変化を比較して潮汐力の影響の有無を確認する。

図 4.2.2-5 に H+0(CH6)のトレンド除去の期間区分を示すとともに、図 4.2.2-6 に期間①～③のトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化を示す。図をみると、期間①では 2008 年 1 月 11 日から 12 日、期間③では 1 月 22 日から 27 日までに潮汐変動との同調がみられるが、変動幅に規則性はみられない。期間②においては潮汐変動との明確な同調はみられない。

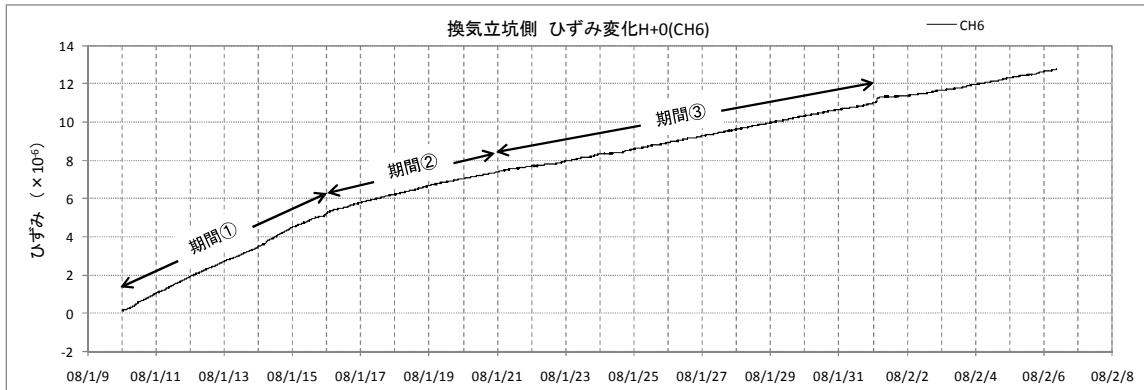


図 4.2.2-5 換気立坑側のひずみ変化 H+0 (CH6) の期間区分

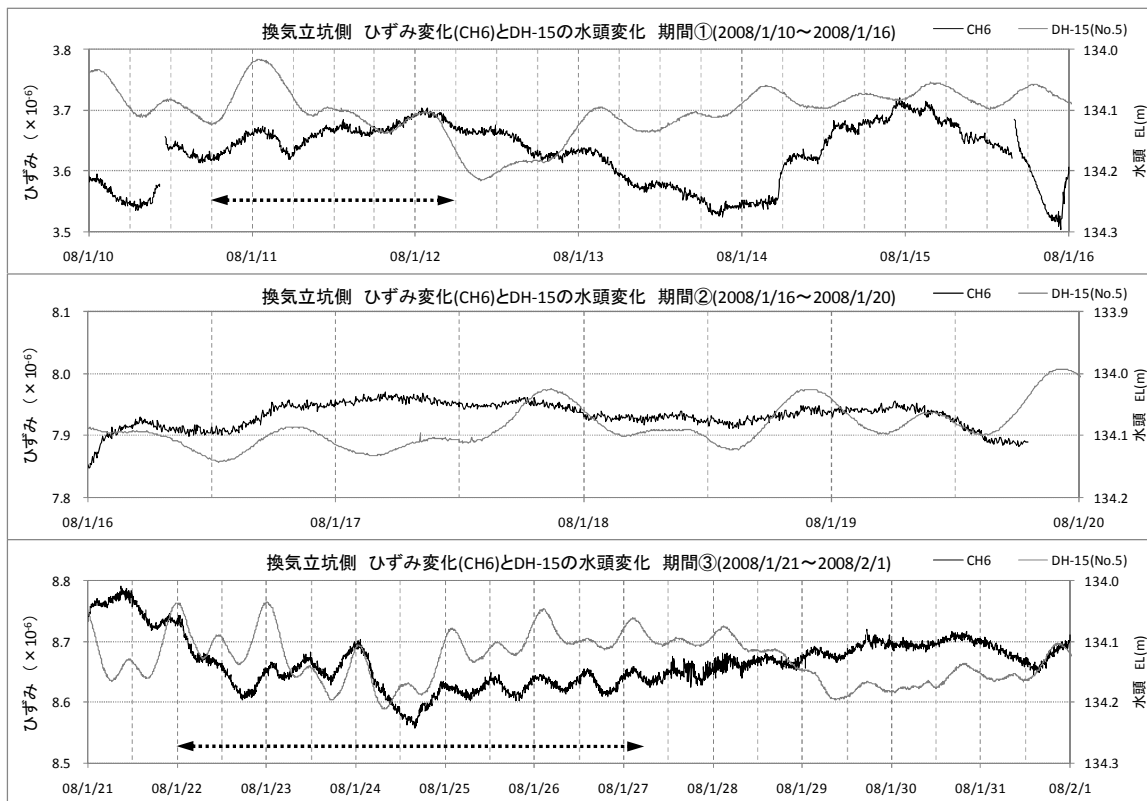


図 4.2.2-6 トренд除去後のひずみ変化 H+0 (CH6) と DH-15 号孔の水頭変化：期間①～③

H+90(CH2)については、全期間を通してのトレンドを除去した。図 4.2.2-7 にトレンド除去後の CH2 のひずみ変化を示すが、不規則な変動であり、潮汐変動との相関はみられない。

図 4.2.2-8 に H+90(CH7)の期間区分を示すとともに、図 4.2.2-9 にトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化との比較を示す。図をみると、期間②の 1 月 19 日から 23 日において潮汐変動との同調がみられる。

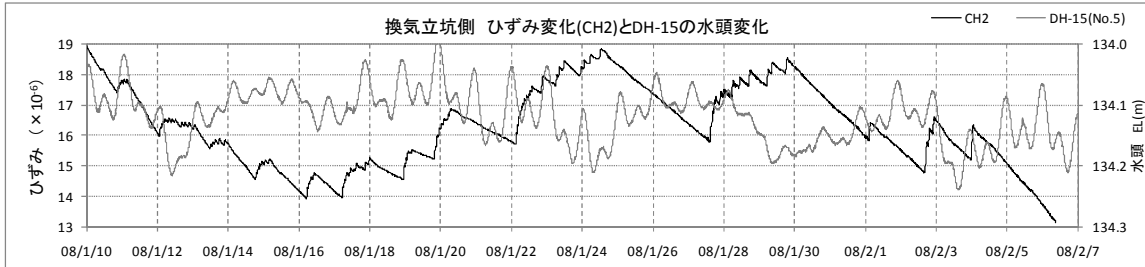


図 4.2.2-7 トレンド除去後のひずみ変化 H+90 (CH2) と DH-15 号孔の水頭変化

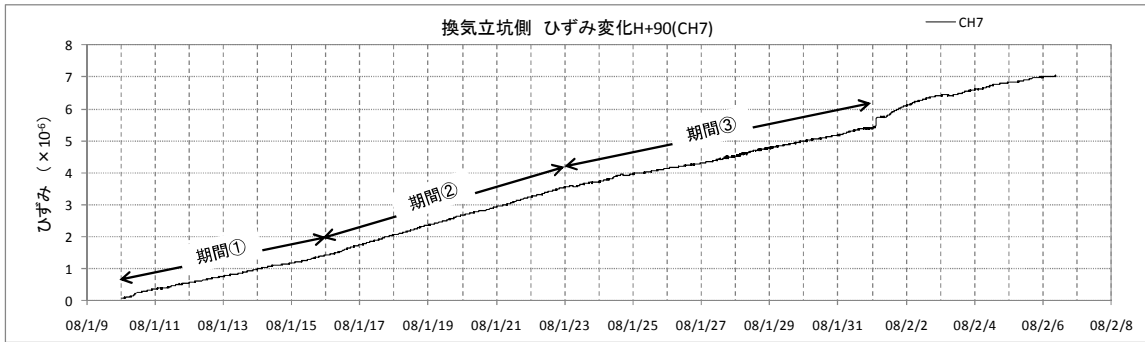


図 4.2.2-8 換気立坑側のひずみ変化 H+90 (CH7) の期間区分

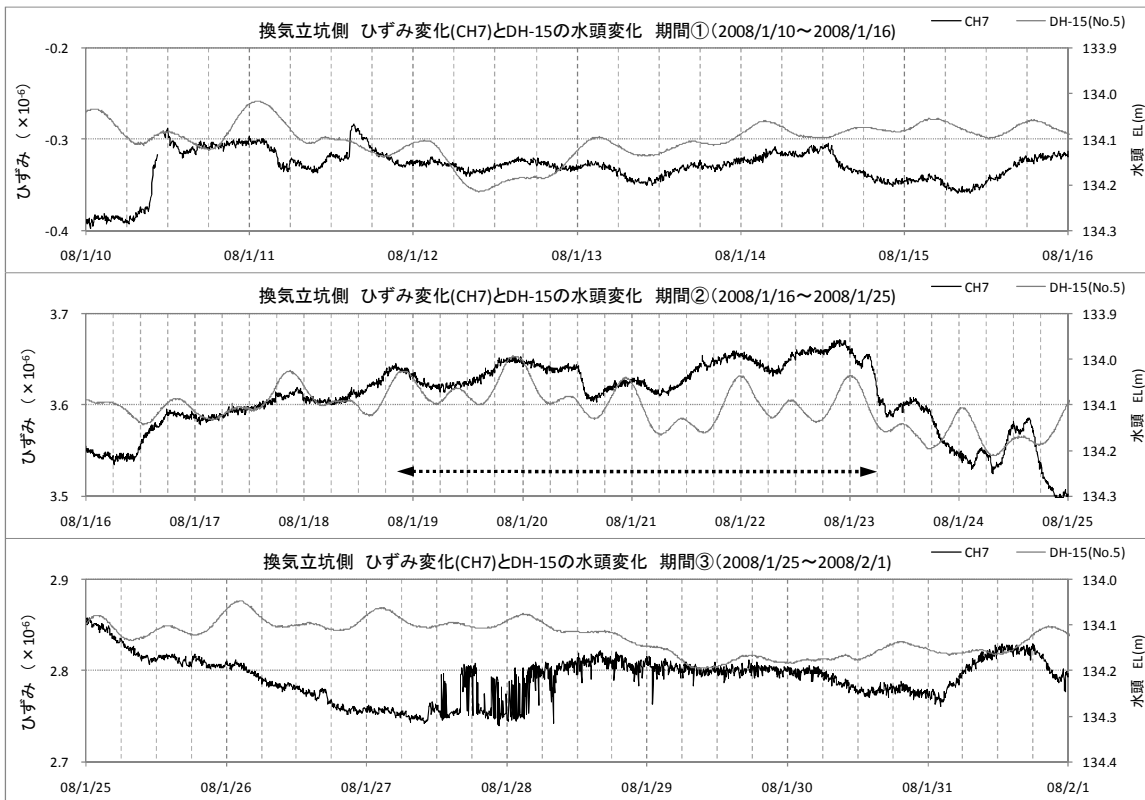


図 4.2.2-9 トレンド除去後のひずみ変化 H+90 (CH7) と DH-15 号孔の水頭変化：期間①～③

図 4.2.2-10 に V(CH5)の期間分けを示すとともに、図 4.2.2-11 にトレンド除去後のひずみ変化と DH-15 号孔の水頭変化との比較を示す。図に示すように、鉛直ひずみは潮汐変動との明確な同調はみられない。

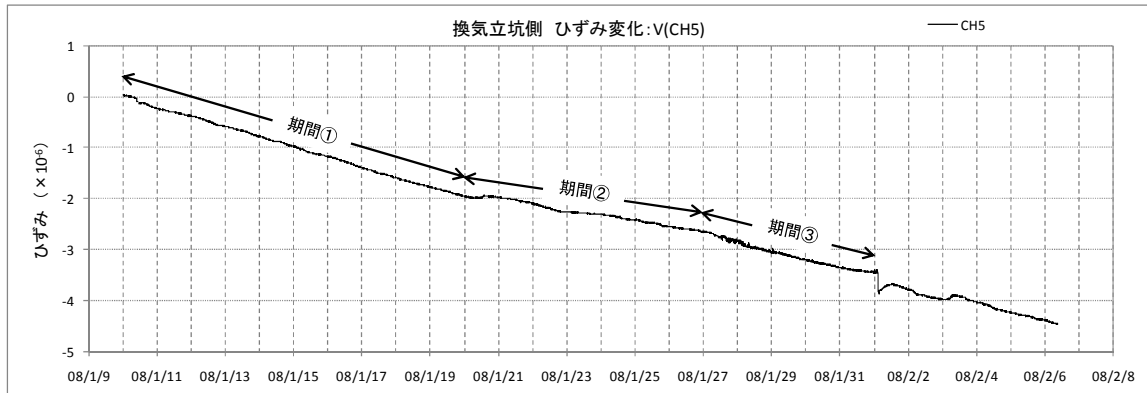


図 4.2.2-10 換気立坑側のひずみ変化 V(CH5)の期間分け

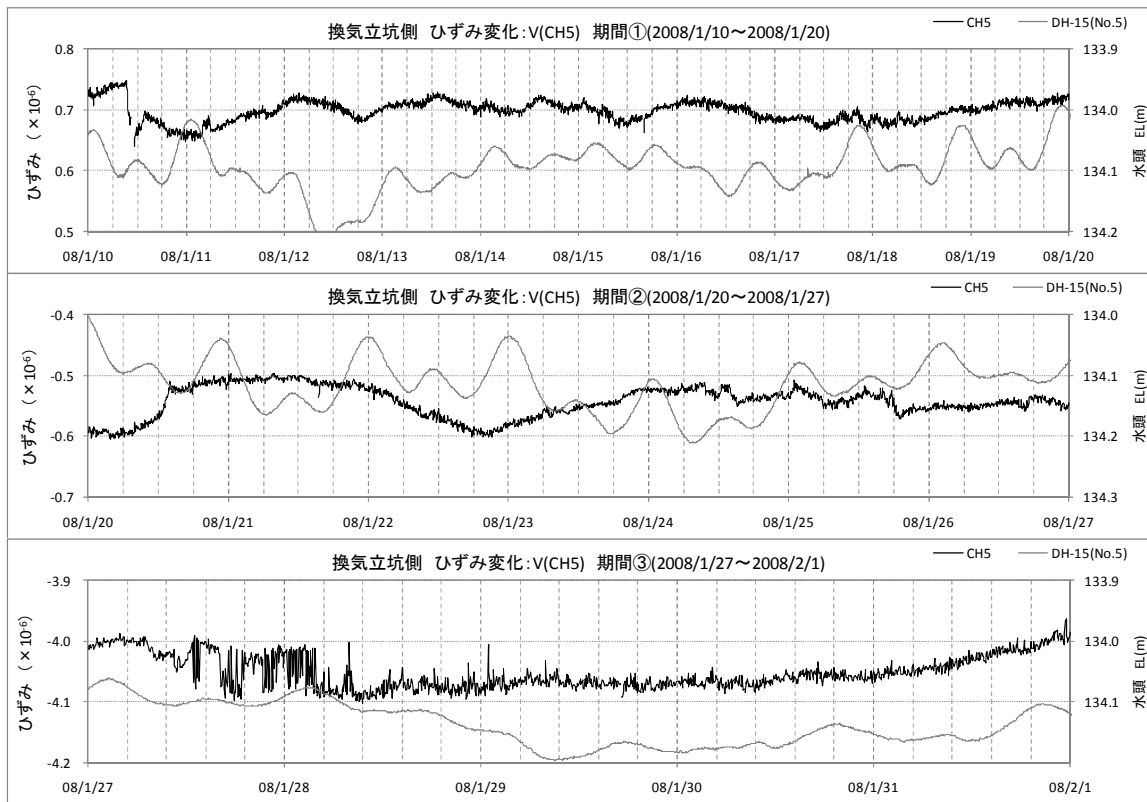


図 4.2.2-11 トренд除去後のひずみ変化 V(CH5)と DH-15 号孔の水頭変化：期間①～③

(5) 発破の影響

換気立坑では、安定期のデータ取得期間に発破作業は行われていないが、表 4.2.2-1 に示すように、主立坑で 2008 年 1 月 14 日から 2008 年 2 月 6 日までに発破が 8 回行われた。

主立坑における発破が換気立坑側のひずみ計測にどのような影響を与えたかを検討するため、各発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-12～4.2.2-20 に示すとともに、各発破後のひずみ変化について述べる。なお、ここでは主立坑における発破の約 5 時間前のひずみ計測値からの相対変位をプロットした。また、横軸の時間 0 は発破時間を表している。

表 4.2.2-1 主立坑の発破日時

	発破日時	立坑深度(m)
発破①	2008/1/14 12:50	201.8
発破②	2008/1/22 19:15	204.4
発破③	2008/1/24 6:50	205.8
発破④	2008/1/26 5:17	207.4
発破⑤	2008/1/28 23:30	209.0
発破⑥	2008/1/31 2:31	210.6
発破⑦	2008/2/2 5:15	212.2
発破⑧	2008/2/5 12:15	213.8

1) 水平ひずみ

・発破① (2008/1/14 12:50)

初めに、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-12(1)に示す。図をみると、CH2 および CH4 は発破前に引張りひずみの増加傾向であったが、発破後に圧縮ひずみの増加傾向に転じている。CH7 は発破前に引張りひずみの増加傾向にあったが、発破後は落ち着いた値を示した。CH3 は発破前にひずみ変化はなかったが、発破後に引張りひずみが増加している。

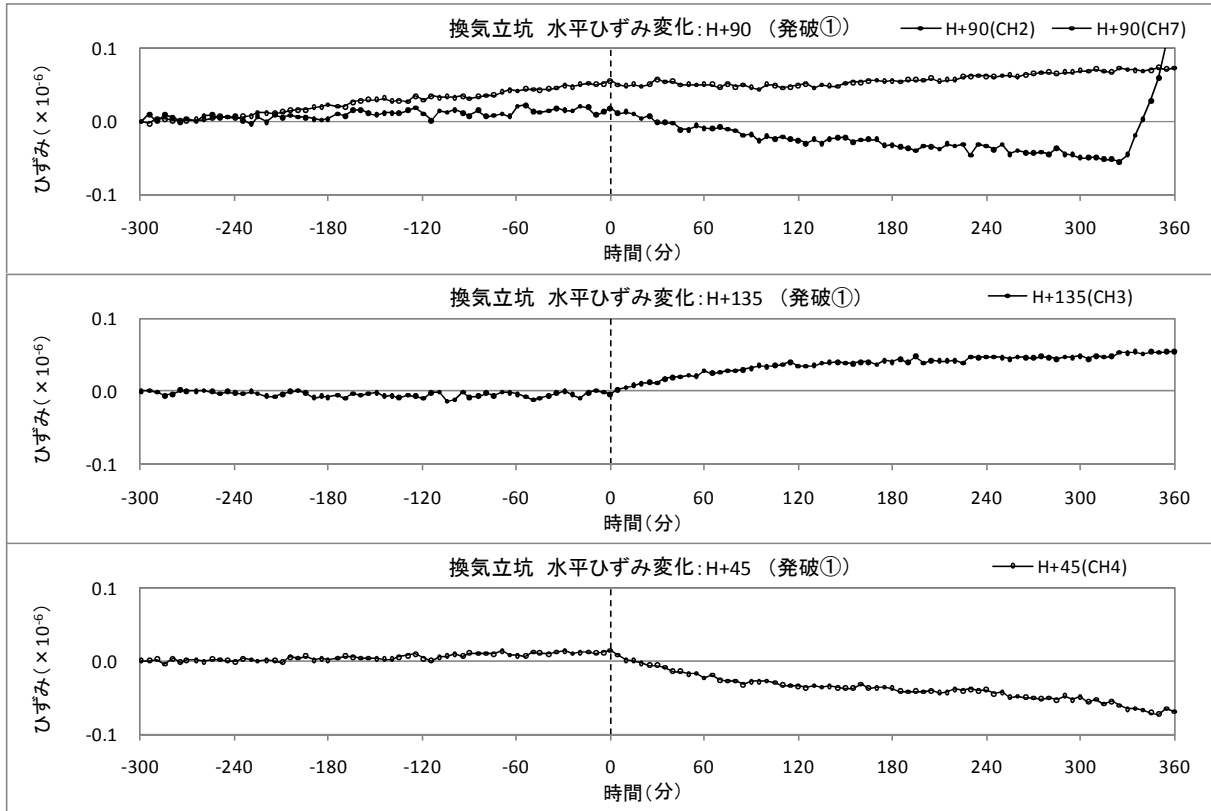


図 4.2.2-12(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破①)

次に、H+0 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-12(2)に示す。これをみると、H+0 は発破前後で引張りひずみが線形的に増加しており、発破後のひずみ変化はみられない。

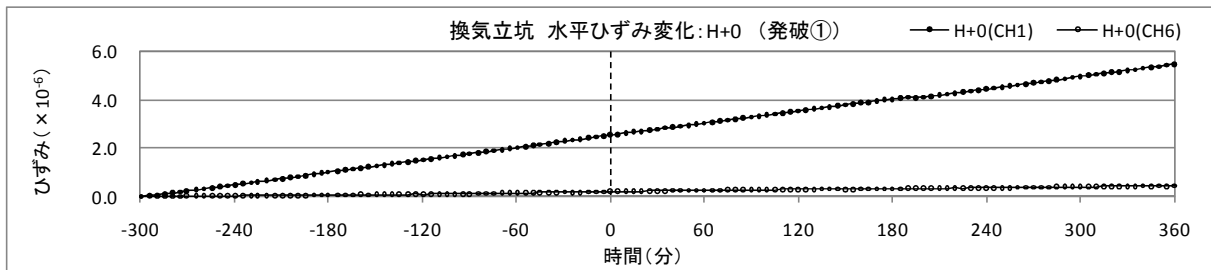


図 4.2.2-12(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破①)

・発破② (2008/1/22 19:15)

初めに、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-13(1)に示す。図をみると、CH6、CH2 および CH7 は発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後のひずみ変化はみられない。CH3 は発破前に大きなひずみ変化はみられなかったが、発破後に引張りひずみの増加傾向に転じている。CH4 は発破前に圧縮ひずみの増加傾向にあったが、発破後約 1 時間は引張りひずみの増加を示し、その後圧縮ひずみの増加傾向に転じている。

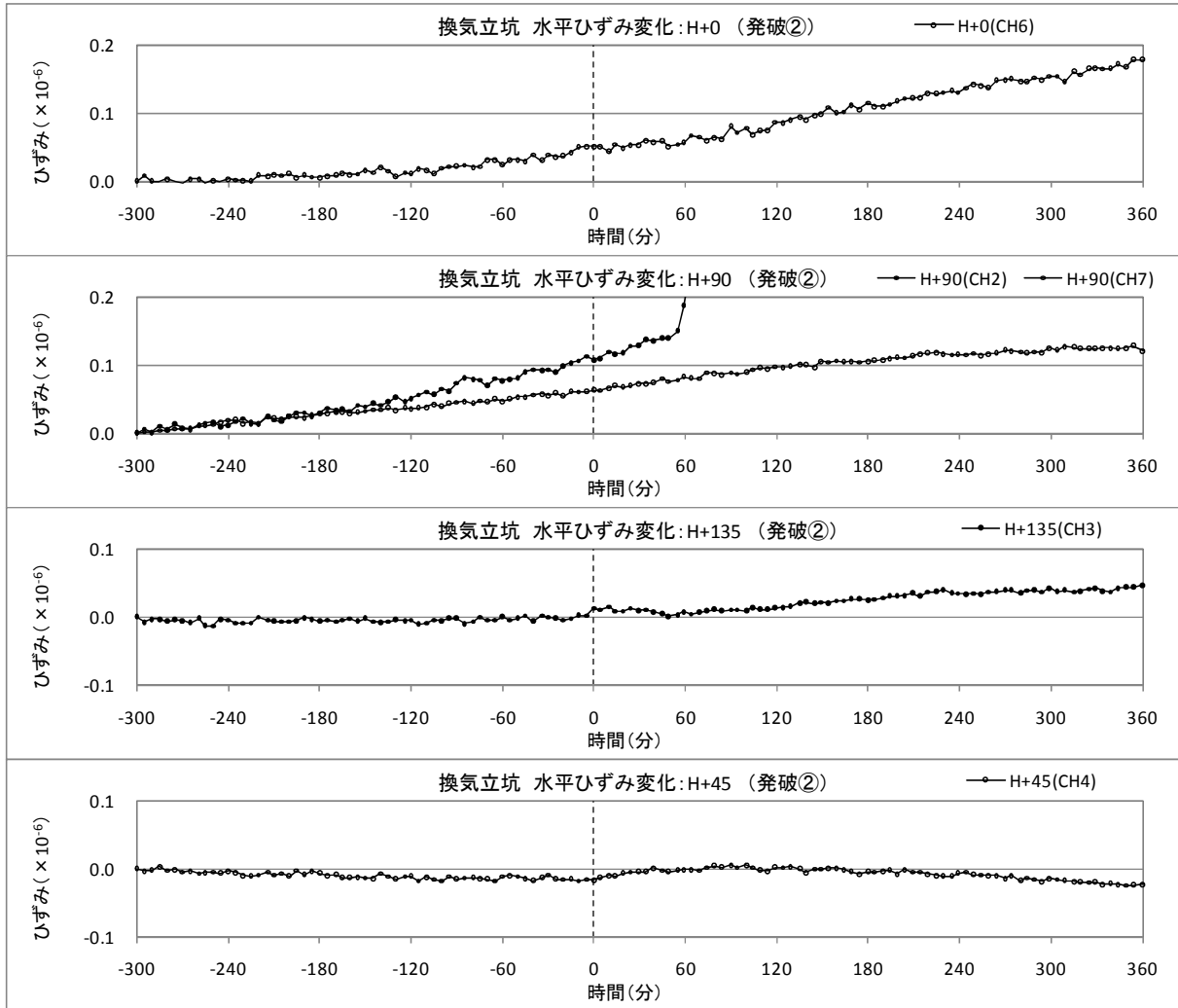


図 4.2.2-13(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破②)

次に、H+0(CH1)の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-13(2)に示す。図をみると、CH1 は他のチャンネルと比べ 1 オーダー大きい変動を示し、また、発破後のひずみ変化はみられない。

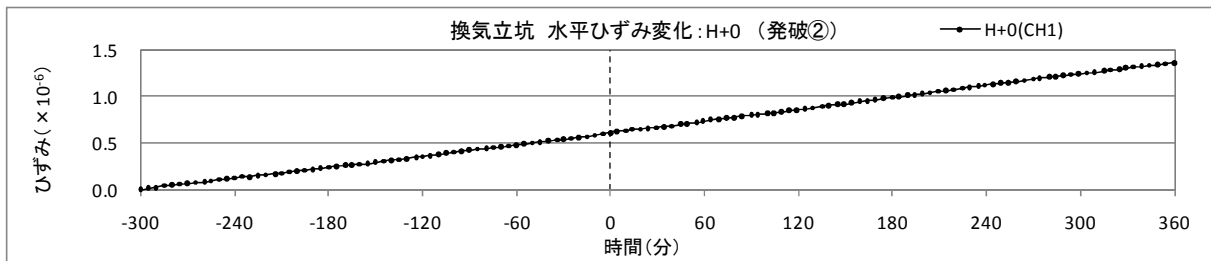


図 4.2.2-13(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破②)

・発破③ (2008/1/24 6:50)

初めに、H+0(CH1)および H+90(CH2)の発破前のひずみ変化を図 4.2.2-14(1)に示す。図をみると、CH1 は他のチャンネルに比べ 1 オーダー大きい割合でひずみ変動している。また、発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後のひずみ変化はみられない。

一方、CH2 は発破前後で引張りひずみの増加傾向にあるが、発破後の約 1 時間に 0.02×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが生じている。

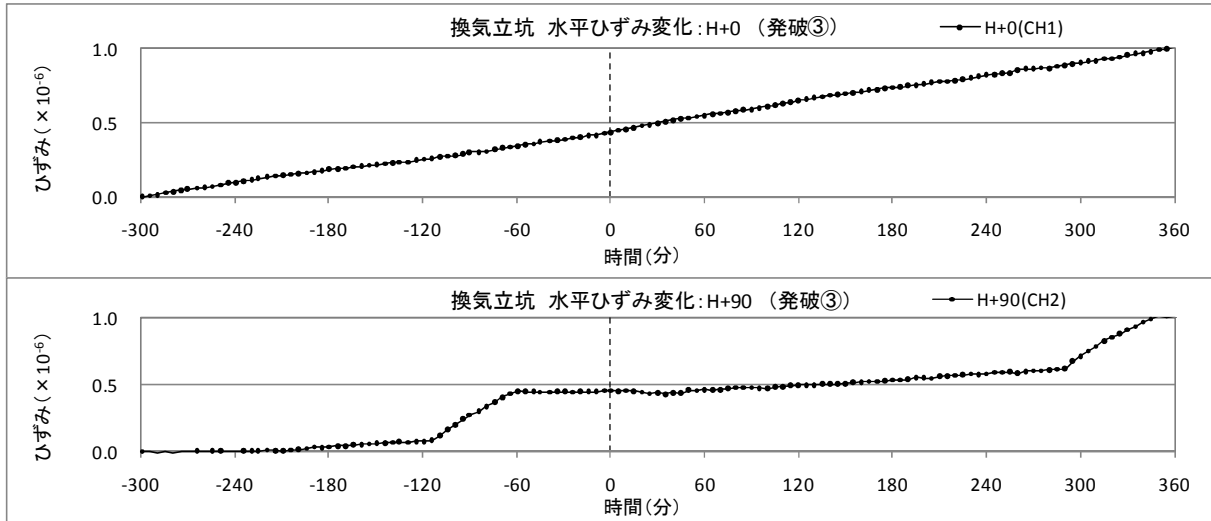


図 4.2.2-14(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破③)

次に、H+0(CH6)、H+90(CH7)、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-14(2)に示す。図をみると、H+0(CH6)は発破の約 2 時間前から引張りひずみの増加傾向にあり、計測値に微少なバラつきがみられるが、発破後の大きなひずみ変化はみられない。H+90(CH7)は発破前後の引張りひずみの増加傾向のなか、発破後約 1 時間は 0.01×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが発生している。CH3 は発破前後の圧縮ひずみの増加傾向のなか、発破後約 30 分で 0.03×10^{-6} 程度の引張りひずみが増加し、発破後約 2 時間で元のトレンドに戻っている。CH4 は引張りひずみの増加傾向のなか、発破後約 30 分で 0.04×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが増加したあと、発破後約 2 時間で元のトレンドに戻っている。

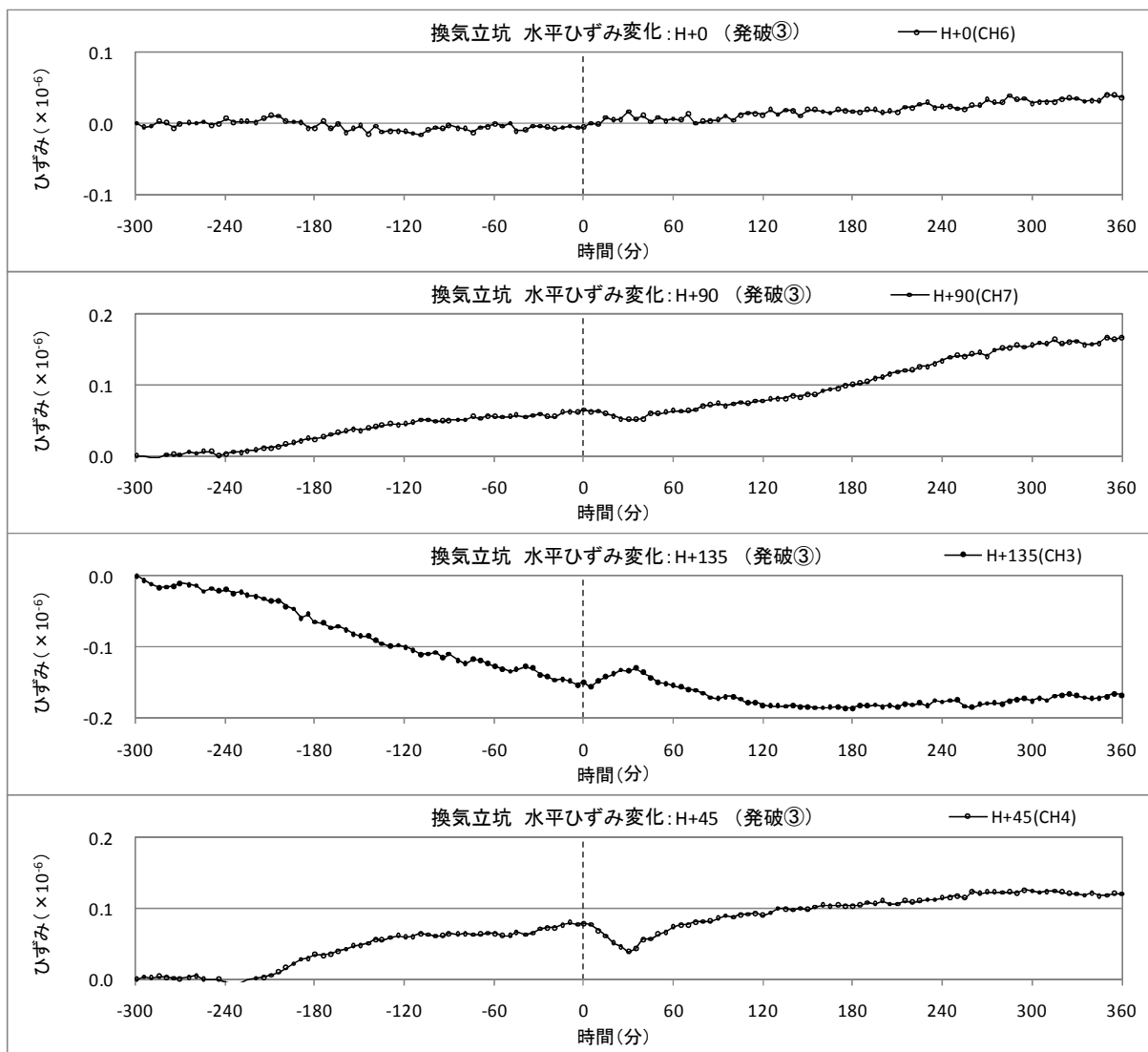


図 4.2.2-14(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破③)

・発破④ (2008/1/26 5:17)

初めに、H+0(CH1)の発破前のひずみ変化を図 4.2.2-15(1)に示す。図をみると、CH1 は他のチャンネルと比べ 1 オーダー大きい割合でひずみ変動している。また、発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後のひずみ変化はみられない。

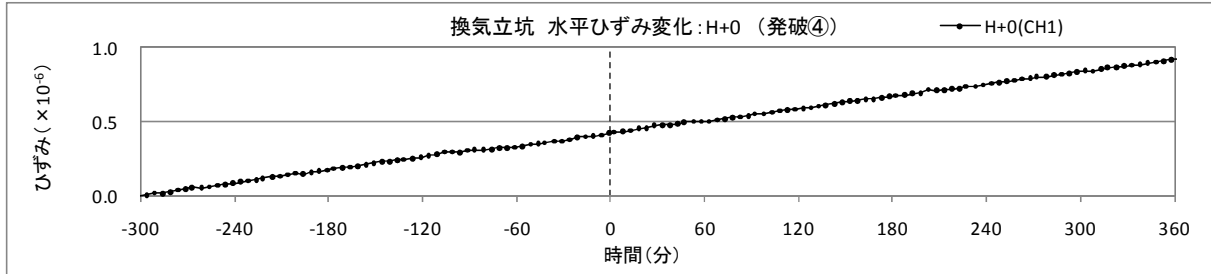


図 4.2.2-15(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破④)

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-15(2)に示す。図をみると、計測値にややバラつきがみられるが、ほぼ線形的に変動しており、発破後の大きなひずみ変化はみられない。

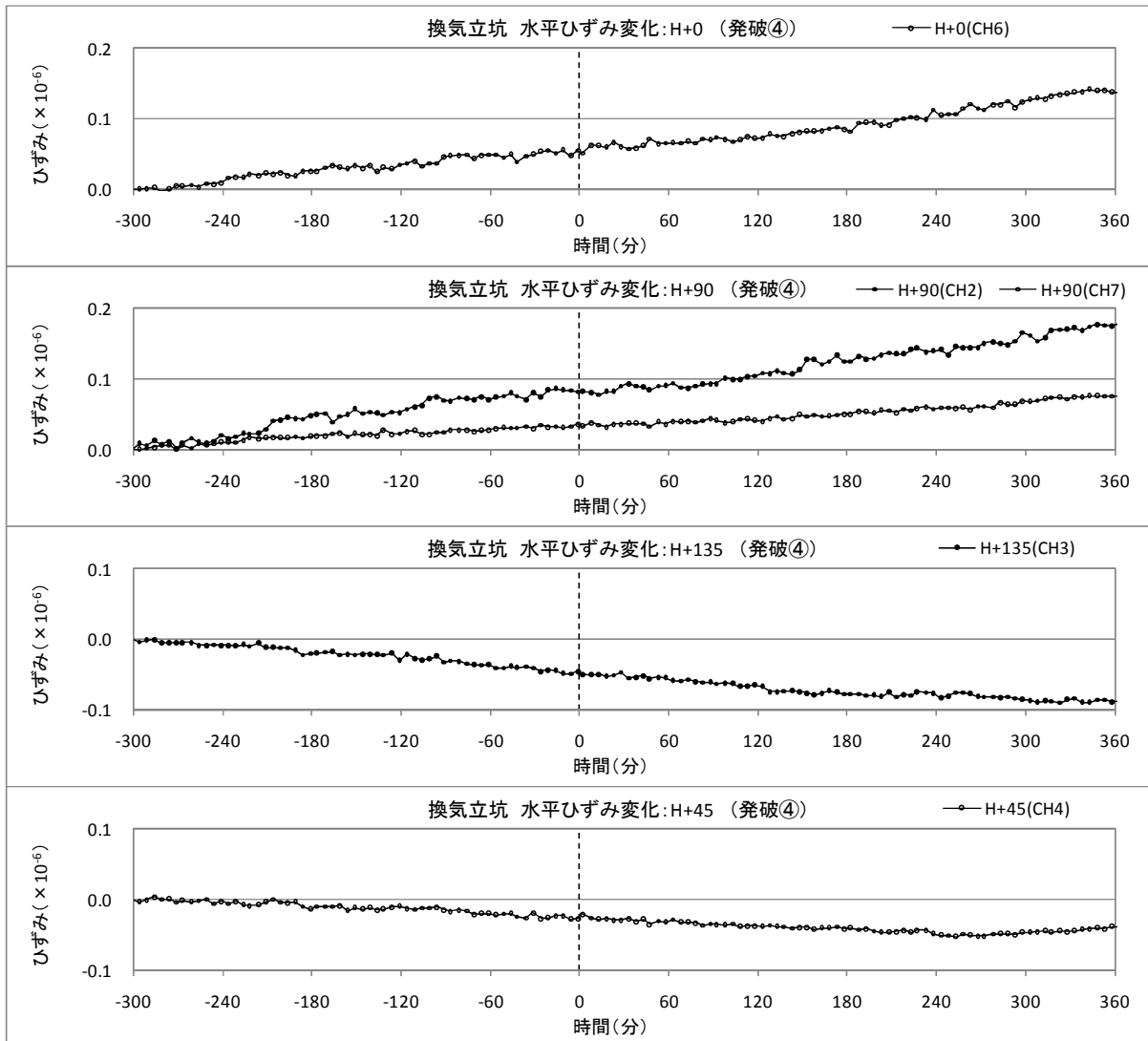


図 4.2.2-15(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破④)

・発破⑤ (2008/1/28 23:30)

初めに、H+0(CH1)の発破前のひずみ変化を図 4.2.2-16(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい割合でひずみ変動している。また、発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後のひずみ変化はみられない。

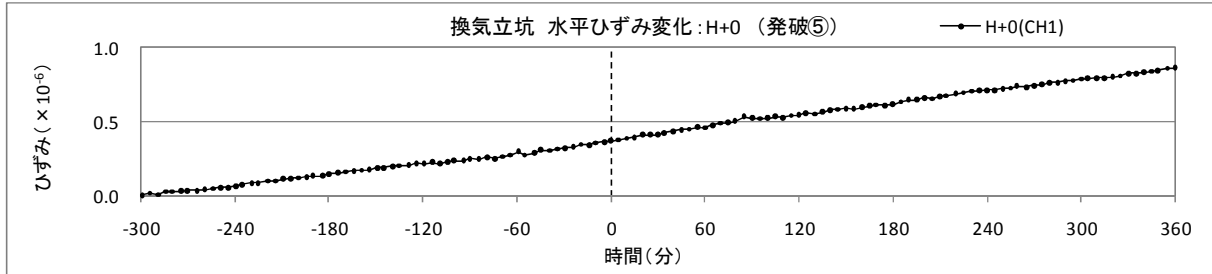


図 4.2.2-16(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑤)

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-16(2)に示す。図をみると、H+90 の計測値にややバラつきはあるが、発破後に大きなひずみ変化はみられない。

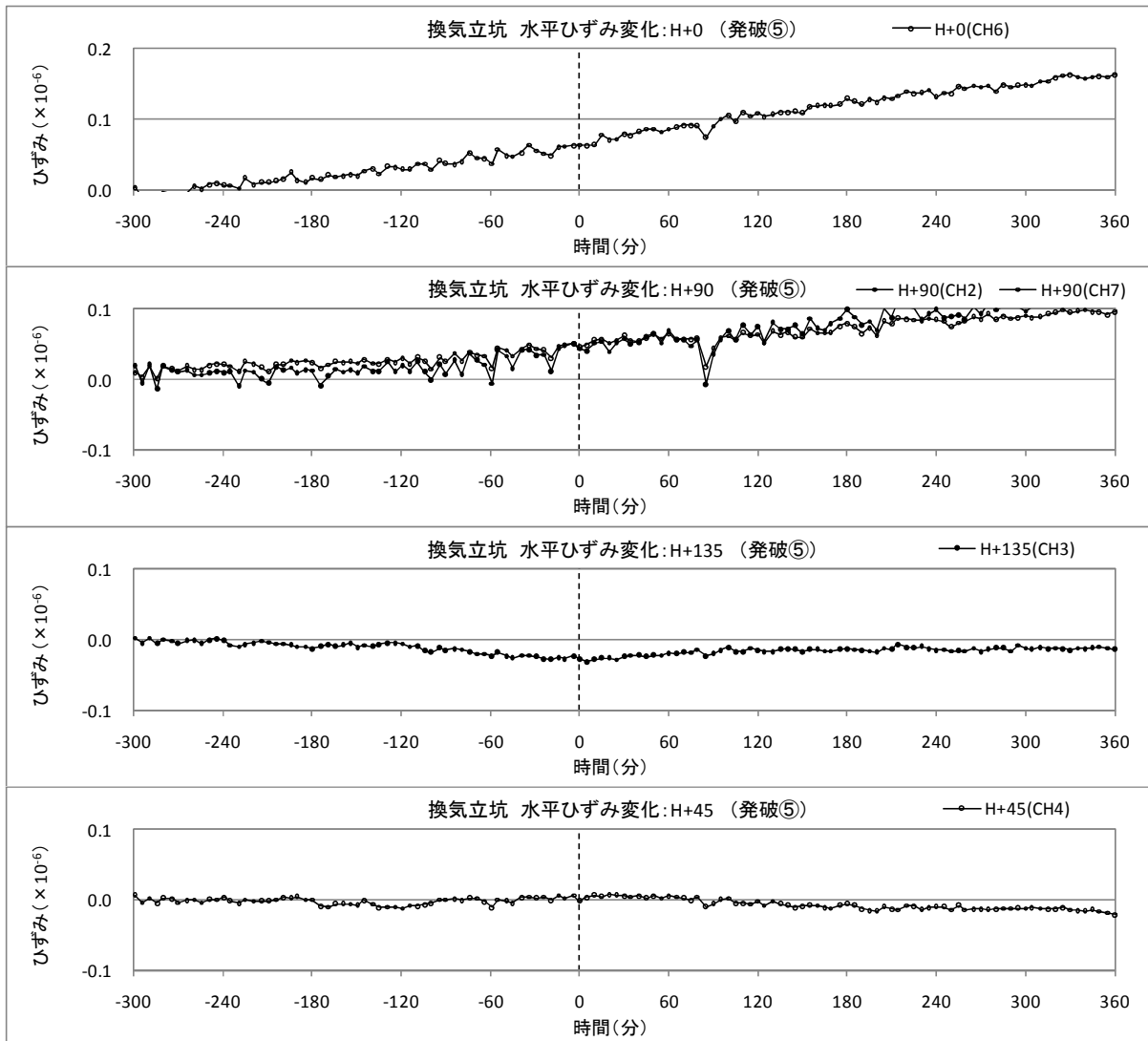


図 4.2.2-16(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑤)

・発破⑥ (2008/1/31 2:31)

初めに、H+0(CH1)の発破前のひずみ変化を図 4.2.2-17(1)に示す。図をみると、CH1 は発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後のひずみ変化はみられない。

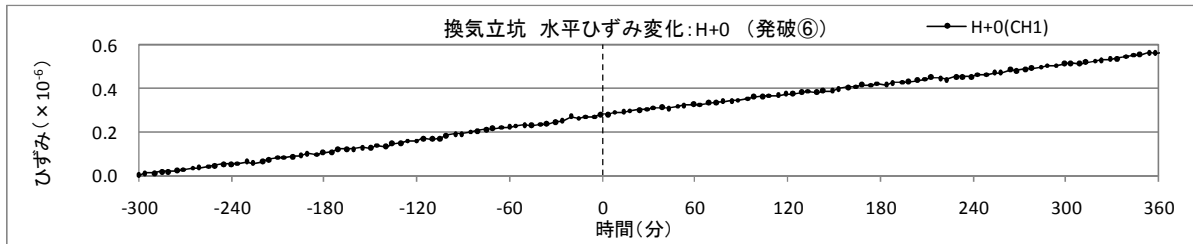


図 4.2.2-17(1) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑥)

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-17(2)に示す。図をみると、H+0(CH6)には発破後の大きなひずみ変化はみられない。H+90 は発破前に引張りひずみの微増傾向であったが、発破後は引張りひずみの増加率が大きくなっている。CH3 は圧縮ひずみの増加傾向のなか、発破後は引張りひずみの増加率がやや大きくなっている。CH4 は発破前に圧縮ひずみの増加傾向にあったが、発破後に約 20 分で 0.02×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じた後、引張りひずみの増加傾向に転じている。

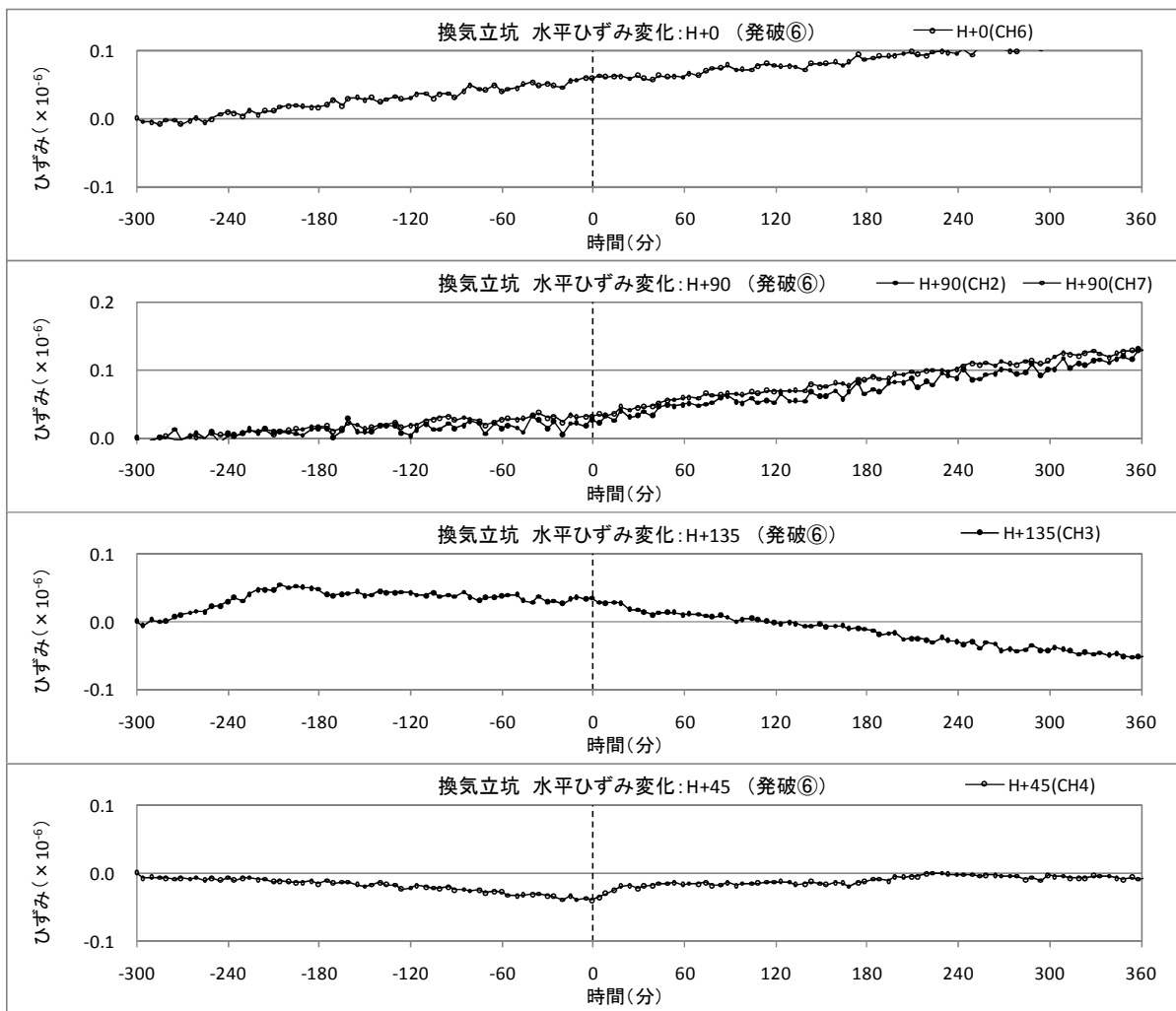


図 4.2.2-17(2) 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑥)

・発破⑦ (2008/2/2 5:15)

H+0、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-18 に示す。図をみると、H+0 および H+90 は発破前後で引張りひずみの増加傾向にあり、発破後に大きなひずみ変化はみられない。CH3 は発破前後で大きなひずみ変化はみられない。CH4 は発破前にひずみ変化はみられなかったが、発破後約 30 分で 0.02×10^{-6} 程度の引張りひずみが発生している。

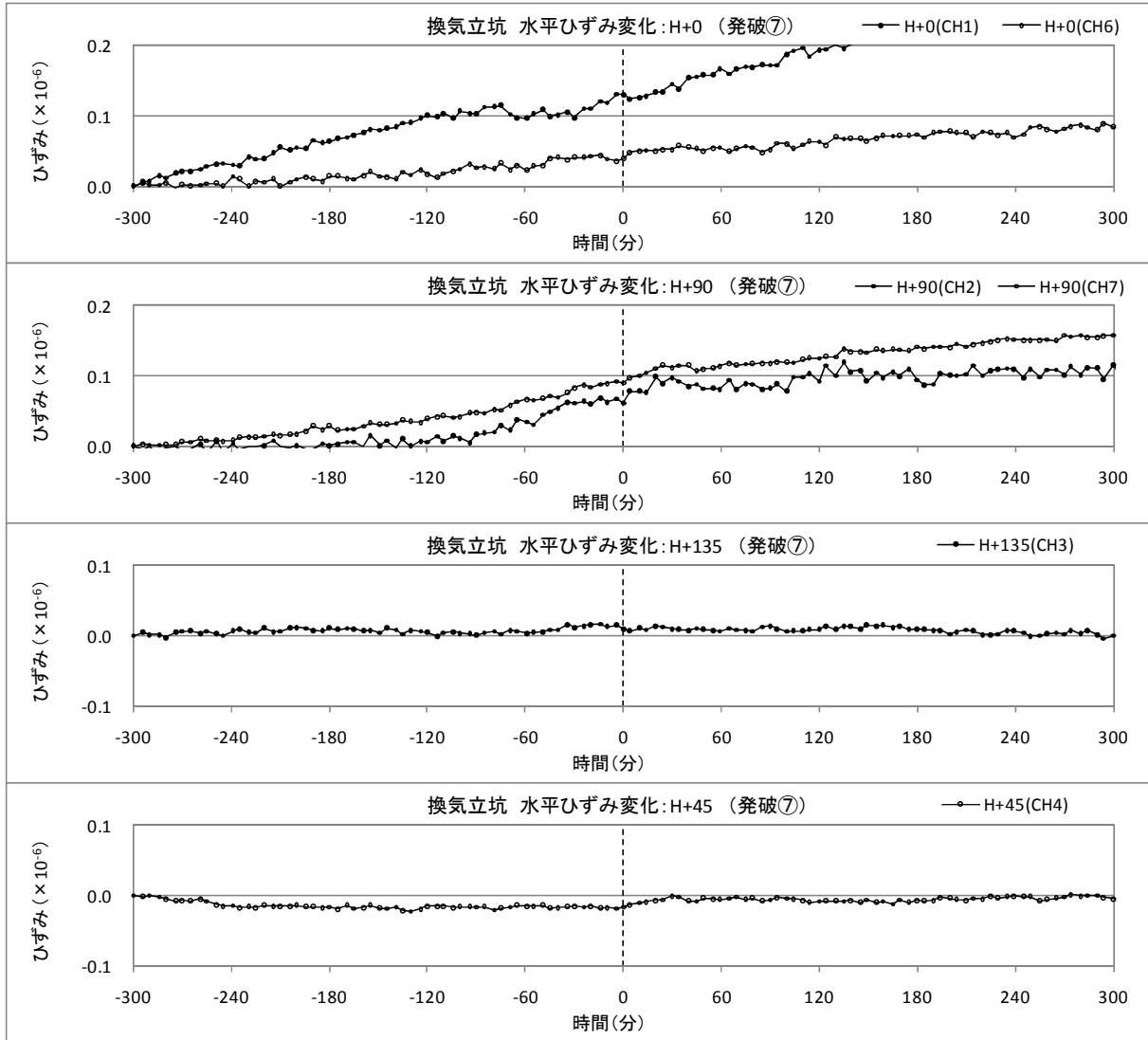


図 4.2.2-18 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑦)

・発破⑧ (2008/2/5 12:15)

H+0、H+90、H+135 および H+45 の発破前後のひずみ変化を図 4.2.2-19 に示す。図をみると、H+0 は発破の約 3 時間前から引張りひずみの増加傾向にあり、発破直後に目立ったひずみ変化はみられない。H+90 は発破前に引張りひずみの増加傾向にあり、発破後に微少ながら圧縮ひずみの増加がみられる。H+135 は圧縮ひずみの増加傾向にあり、発破後約 20 分は引張りひずみの発生がみられる。H+45 は引張りひずみの増加傾向のなか、発破後 1 時間で 0.03×10^{-6} 程度の引張りひずみが発生するが、発破後 2 時間で減少して元のトレンドに戻っている。

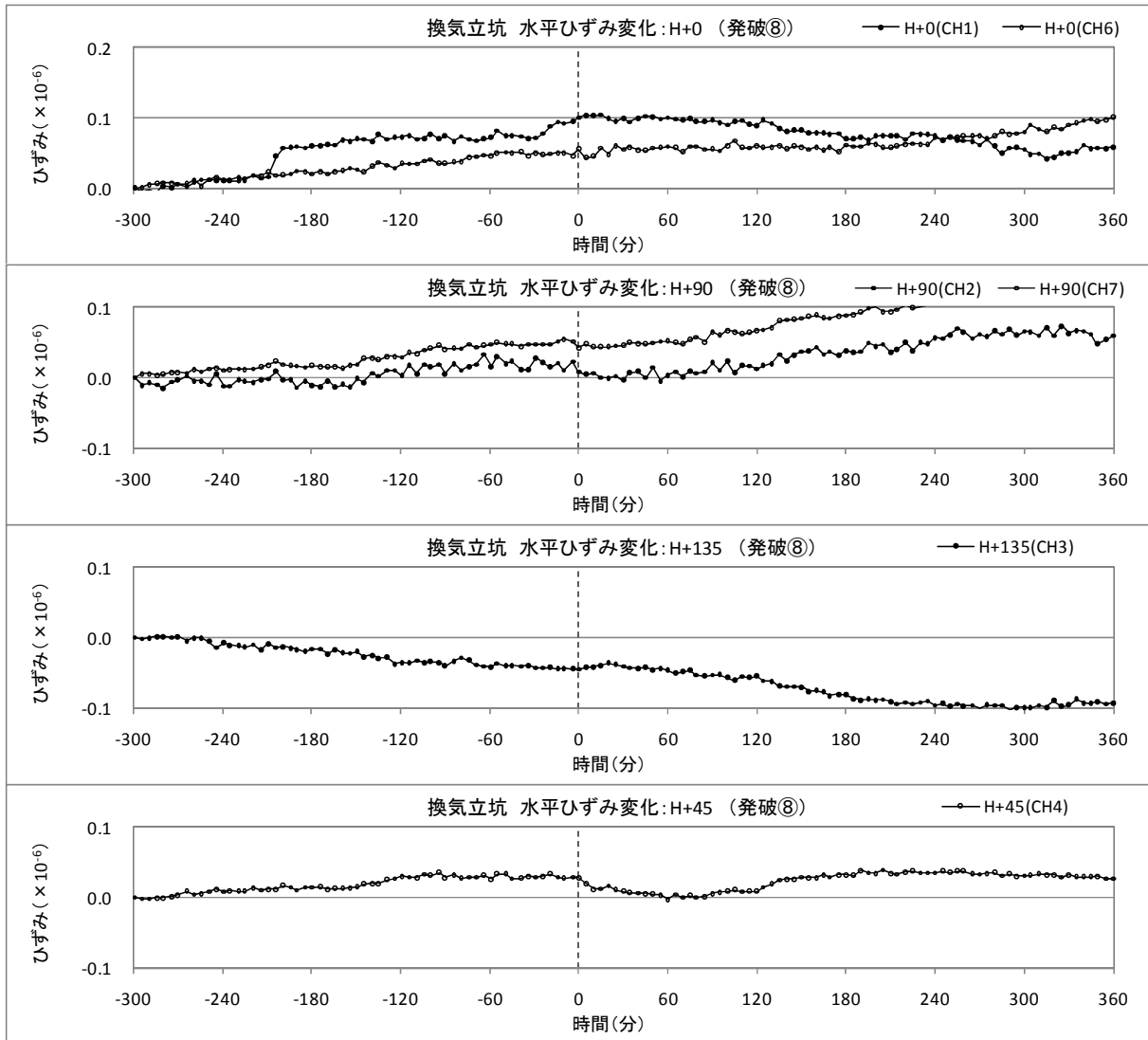


図 4.2.2-19 発破の影響による換気立坑の水平ひずみ変化 (発破⑧)

2) 鉛直ひずみ

換気坑側の鉛直ひずみ変化は図 4.2.2-20(1)～図 4.2.2-20(2)に示すように、発破⑦以外は目立った変化はみられない。発破⑦では、発破前に圧縮ひずみの増加傾向にあったが、発破後は比較的落ち着いた値を示した。ただし、これは発破の約 30 分後からの変化であるため、発破の影響によるものではないと考えられる。

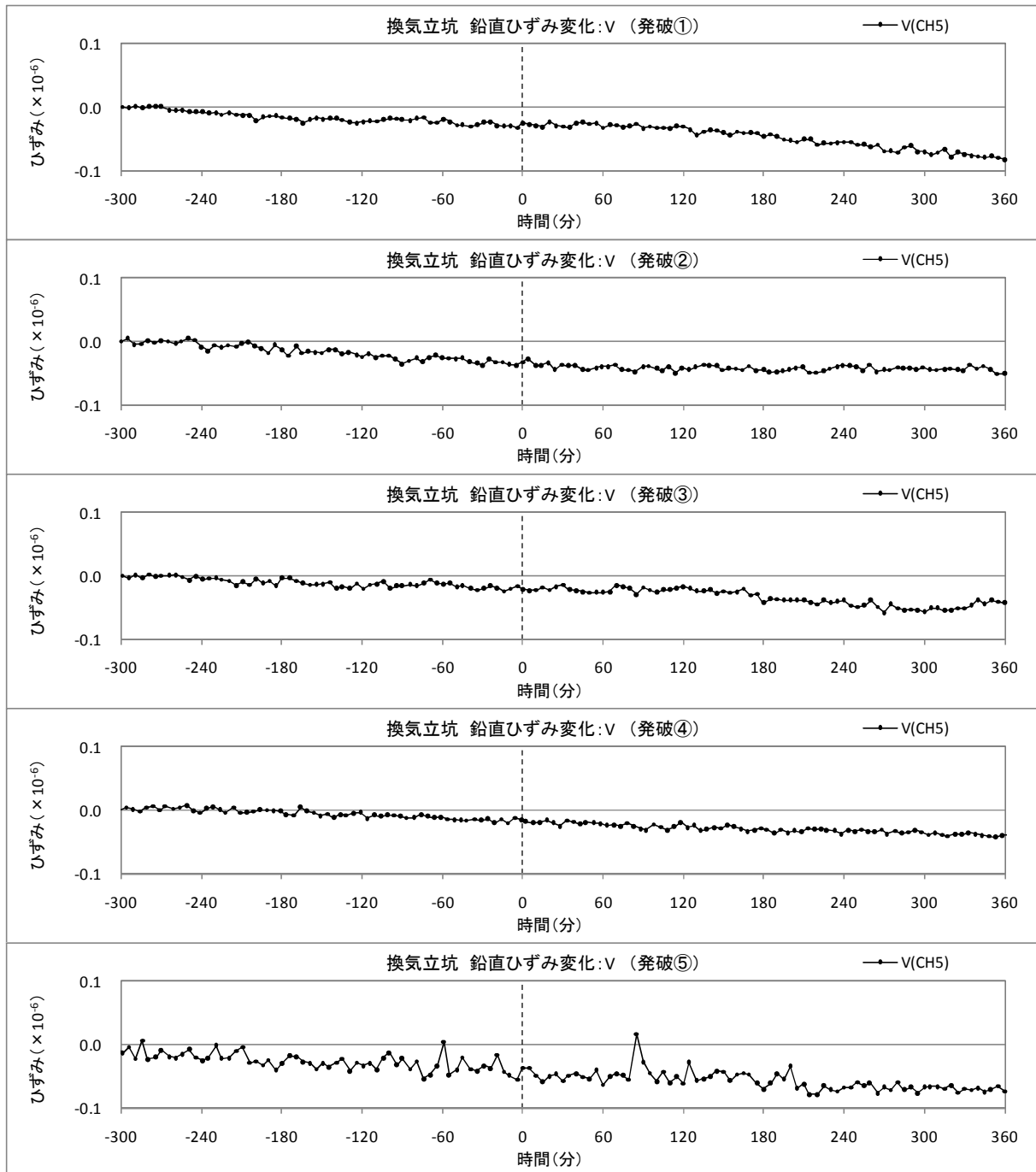


図 4.2.2-20(1) 発破の影響による換気立坑の鉛直ひずみ変化 (発破①～発破⑤)

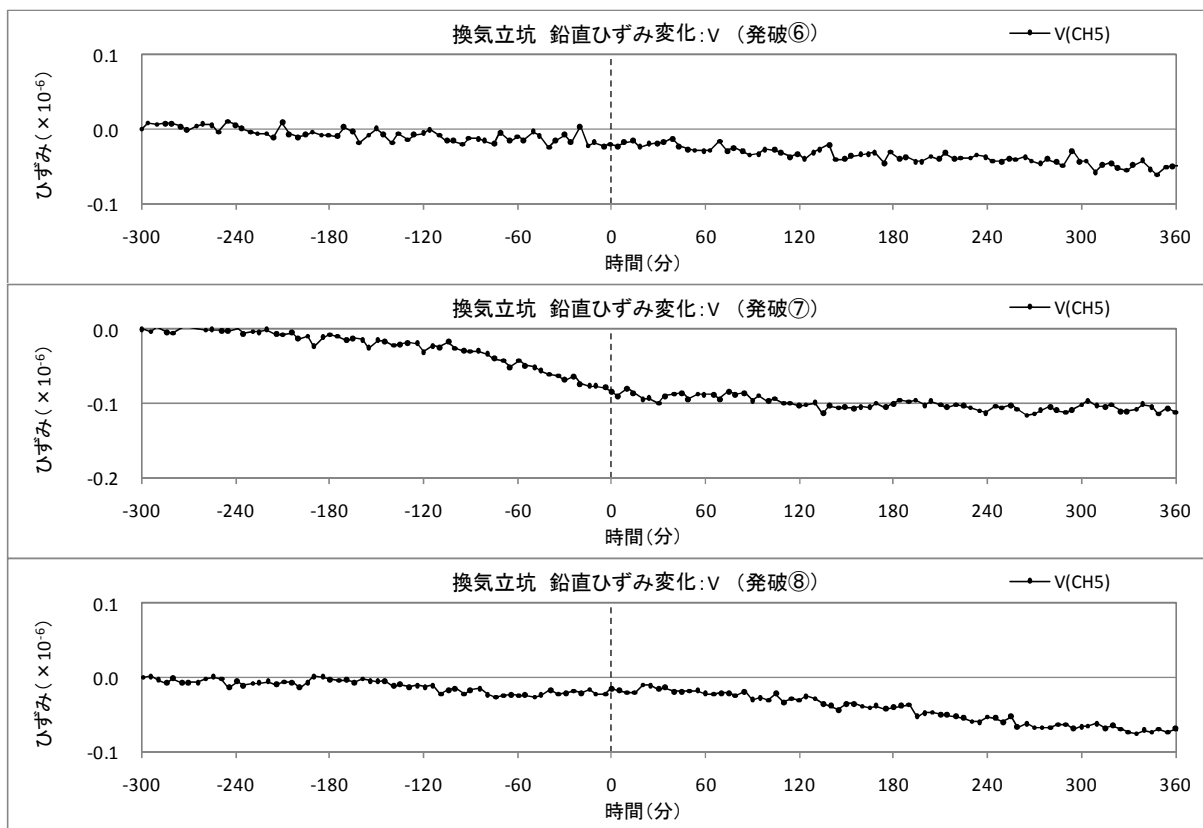


図 4. 2. 2-20 (2) 発破の影響による換気立坑の鉛直ひずみ変化 (発破⑥～発破⑧)

3) まとめ

- ・換気立坑側で計測された水平ひずみ変化は、主立坑側で計測された変化と比較すると、1 オーダー程度小さい。また、発破直後に大きなひずみ変化は発生せず、発破後のひずみ変化は経時的に緩やかである。
- ・換気立坑側の水平ひずみ変化には、主立坑側の水平ひずみ変化のような変化挙動の明確な対応はみられない。
- ・鉛直ひずみには、発破の影響と考えられるひずみ変化はみられない。

(6) 地震の影響

換気立坑の安定期において、岐阜県内で感知された震度1以上の地震は7回であった。表 4.2.2-2 に地震発生日時と震度、震源地を示す。

表 4.2.2-2 換気立坑の安定期における地震発生日時

	地震発生日時	震度	震源地
地震(12)	2008/1/15 23:55	1	長野県南部
地震(13)	2008/1/18 17:18	1	岐阜県飛騨地方
地震(14)	2008/1/20 11:19	1	静岡県西部
地震(15)	2008/1/26 4:33	2	石川県能登地方
地震(16)	2008/1/27 10:33	1	静岡県西部
地震(17)	2008/1/27 10:53	1	静岡県西部
地震(18)	2008/2/1 17:03	1	静岡県西部

1) 水平ひずみ

図 4.2.2-21～図 4.2.2-27 に各地震発生前後の換気立坑側の水平ひずみ変化を示す。

なお、ここでは地震発生時刻の約 5 時間前のひずみ計測値からの相対変位をプロットした。また、横軸の時間 0 は地震発生時刻を表している。

・地震(12) (2008/1/12 23:55)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-14(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルと比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

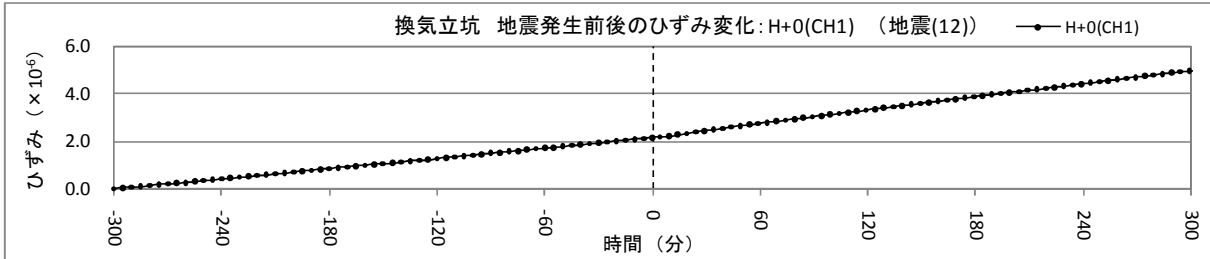


図 4.2.2-21(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-21(2)に示す。図をみると、水平ひずみは地震発生前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変化はみられない。

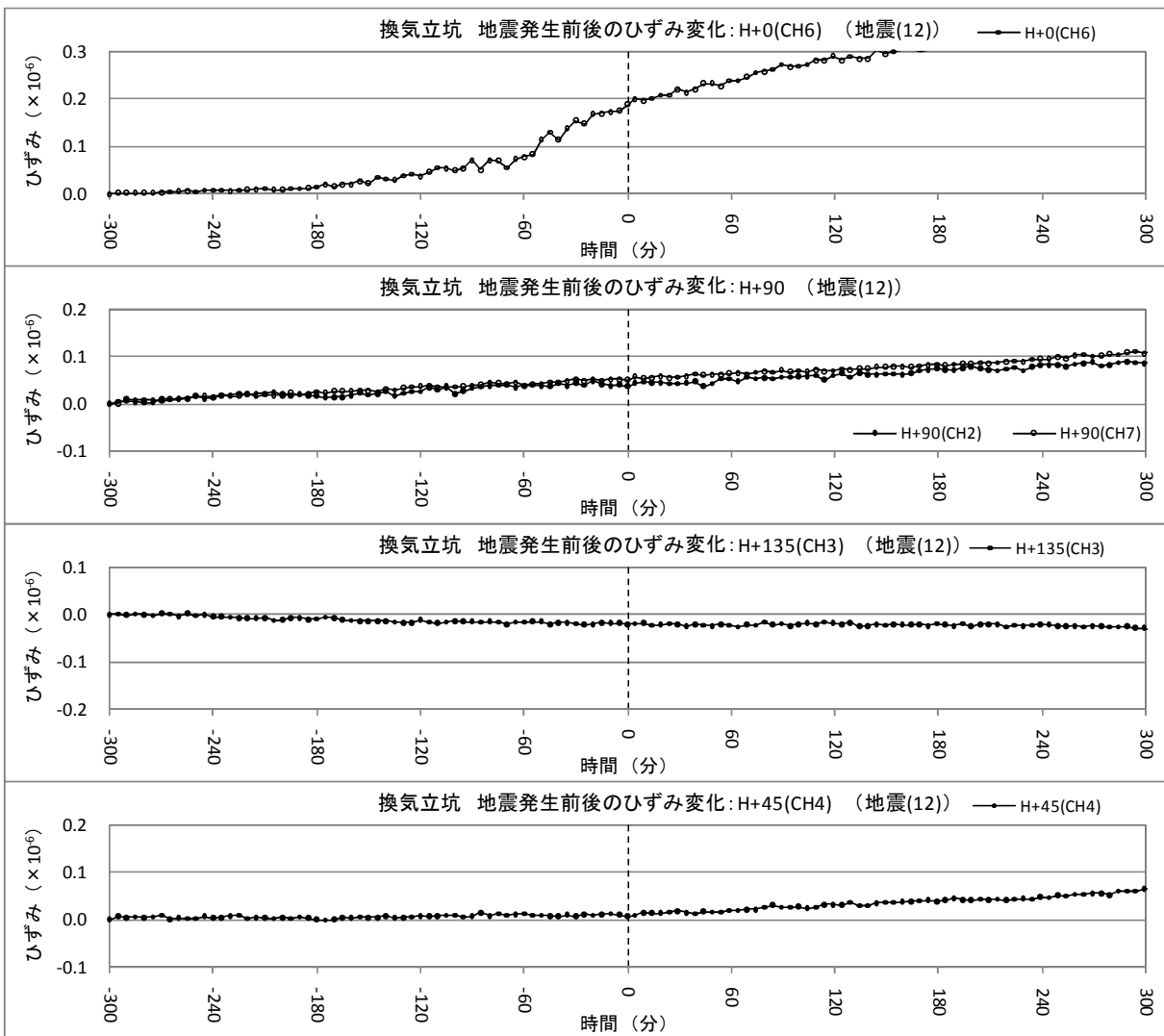


図 4.2.2-21(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(12))

・地震(13) (2008/1/18 17:18)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-22(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

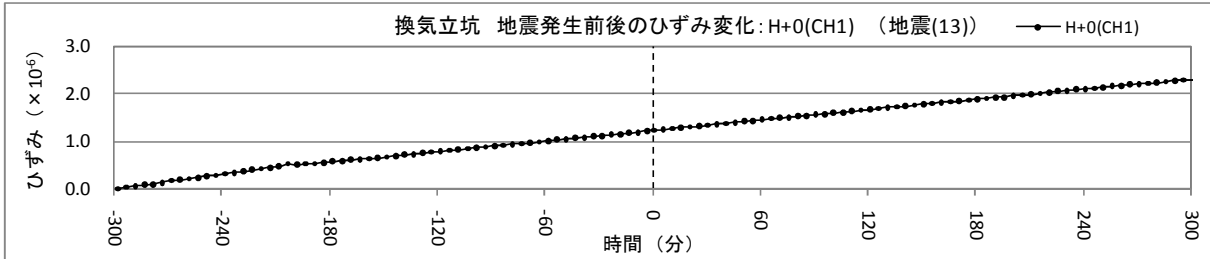


図 4.2.2-22(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-22(2)に示す。図をみると、水平ひずみは地震発生前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変化はみられない。

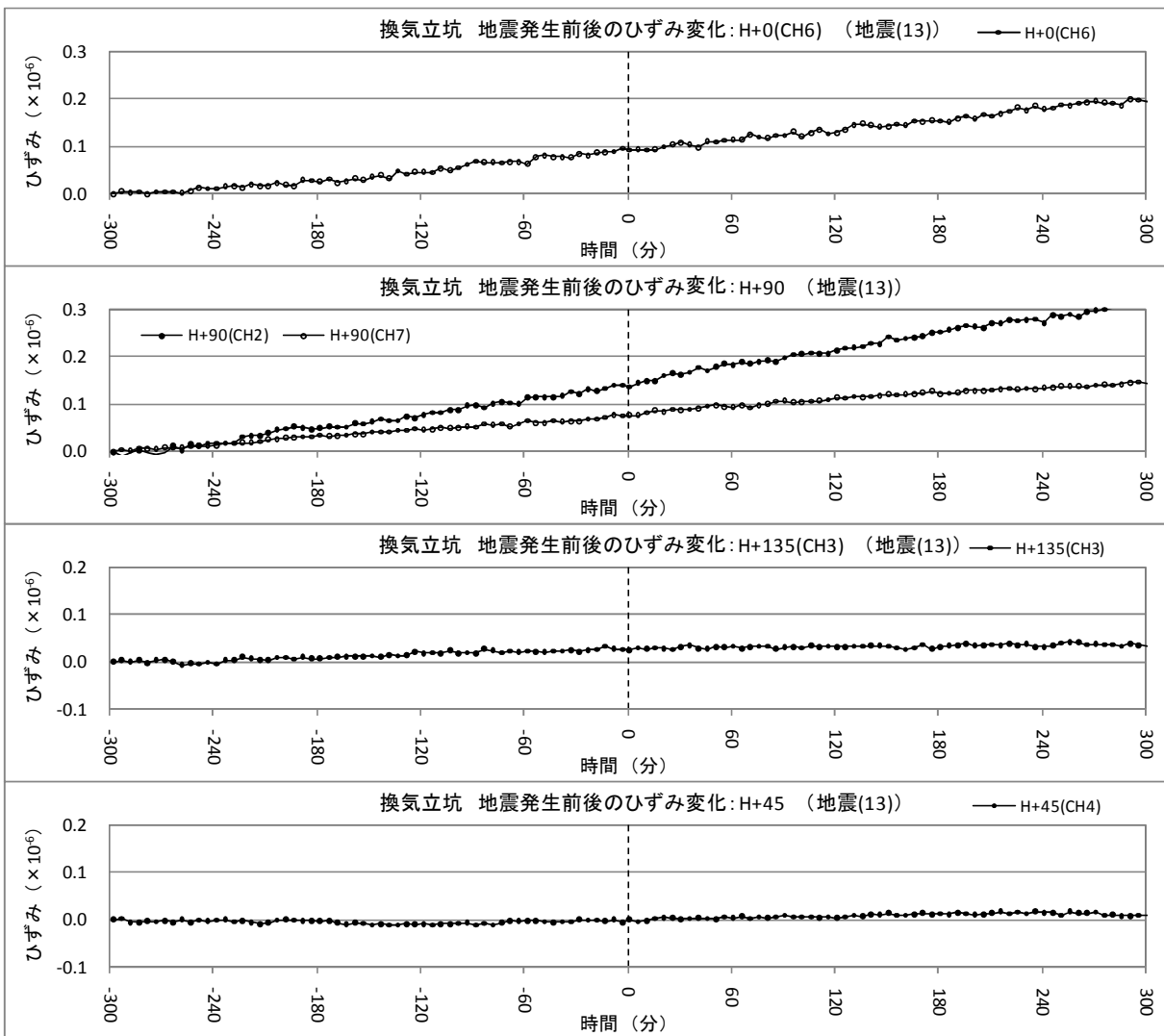


図 4.2.2-22(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(13))

・地震(14) (2008/1/20 11:19)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-23(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

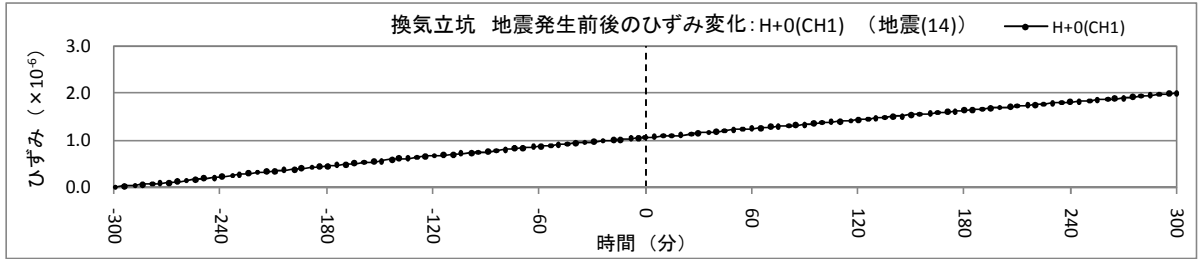


図 4.2.2-23(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(14))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-23(2)に示す。図をみると、水平ひずみは地震発生前後でほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変化はみられない。

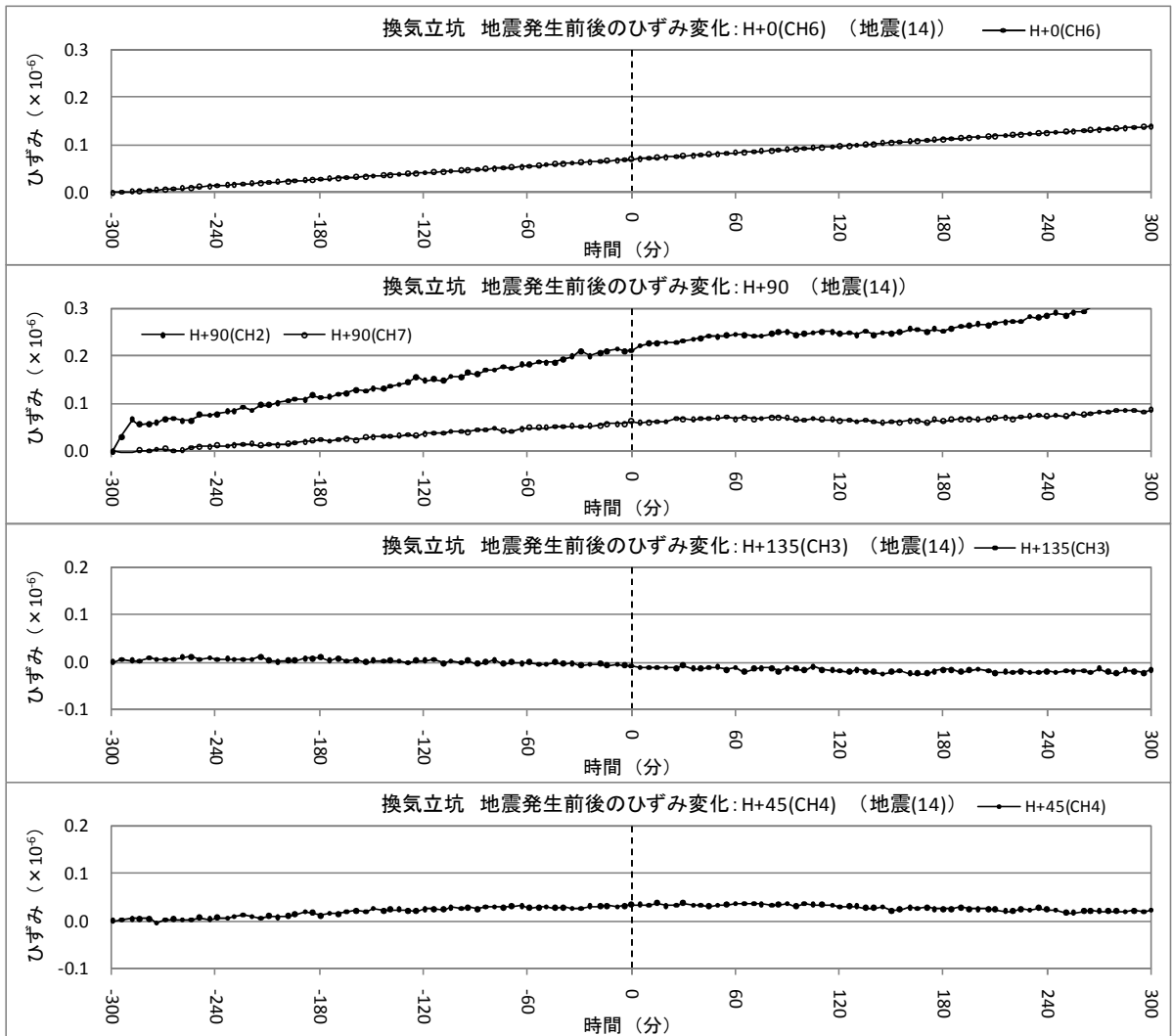


図 4.2.2-23(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(14))

・地震(15) (2008/1/26 4:33)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-24(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

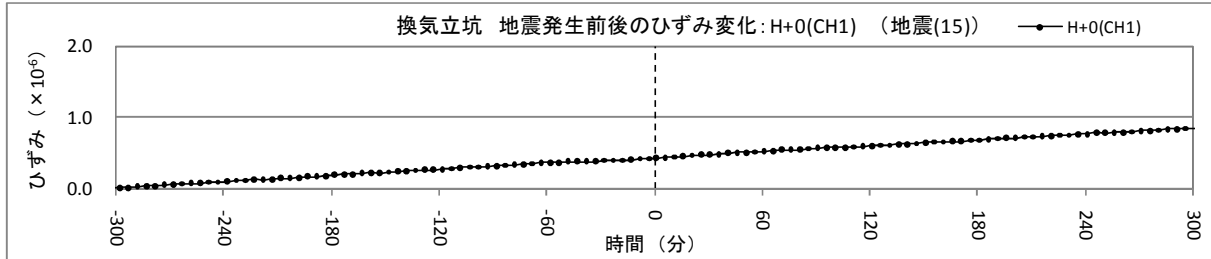


図 4.2.2-24(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-24(2)に示す。図をみると、水平ひずみは地震発生前後でやや計測値にバラつきがみられるが、ほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変動はみられない。

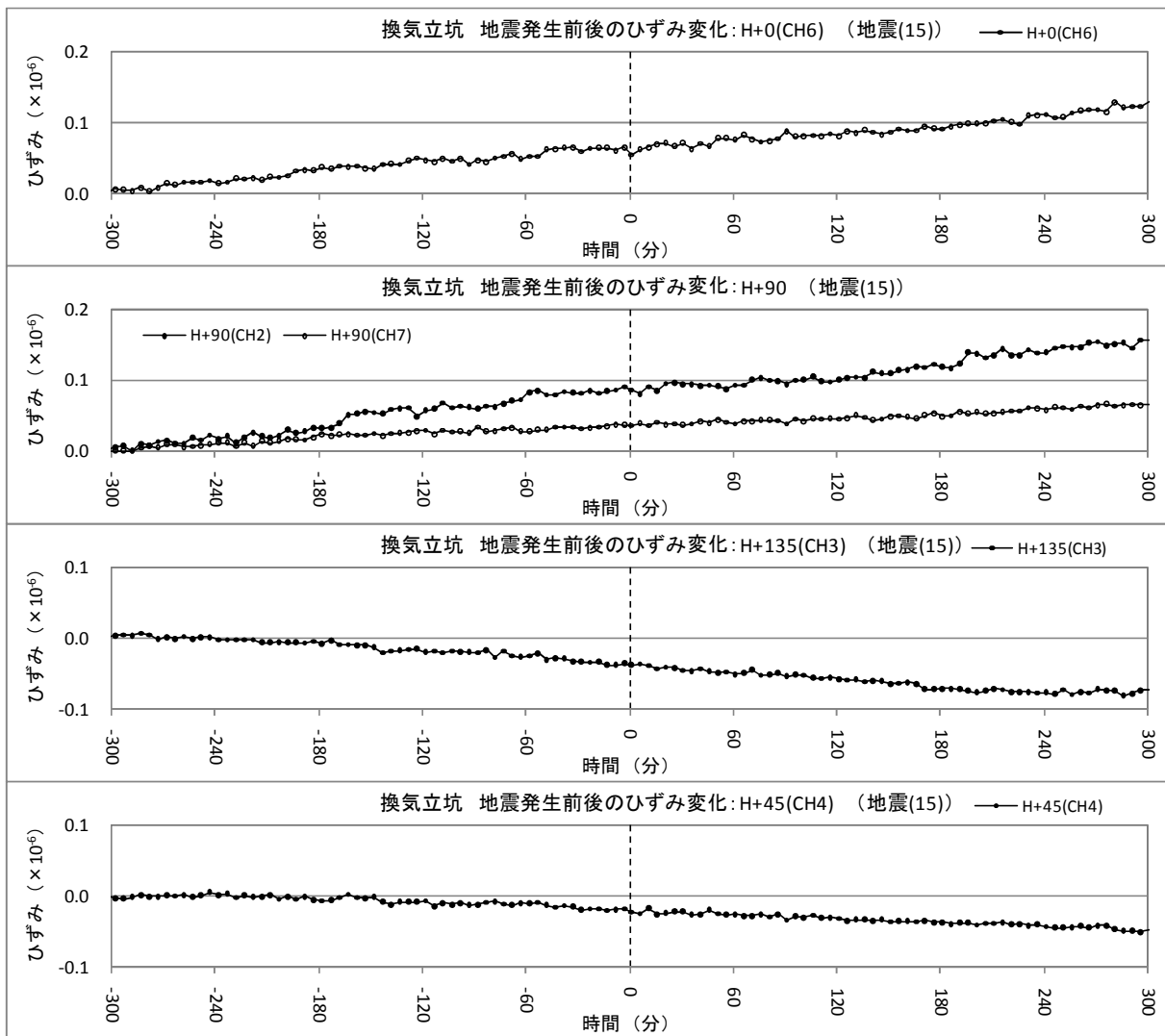


図 4.2.2-24(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(15))

・地震(16) (2008/1/27 10:33)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-25(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

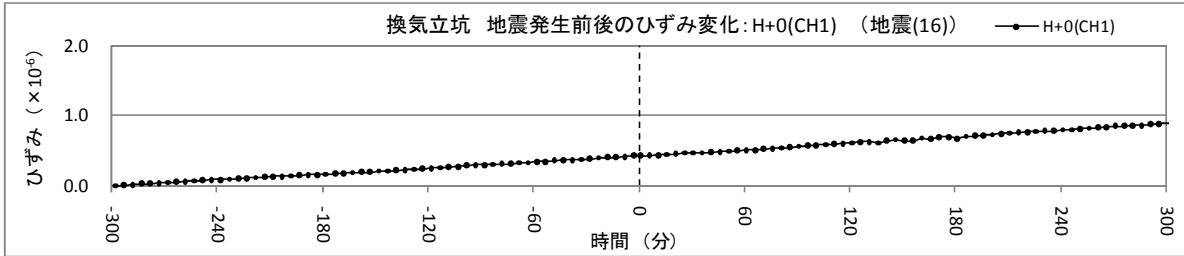


図 4.2.2-25(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-25(2)に示す。図をみると、H+90 以外は、地震発生前後でひずみがほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変化はみられない。一方、H+90 では、地震発生後の約 30 分間に 0.02×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じている。

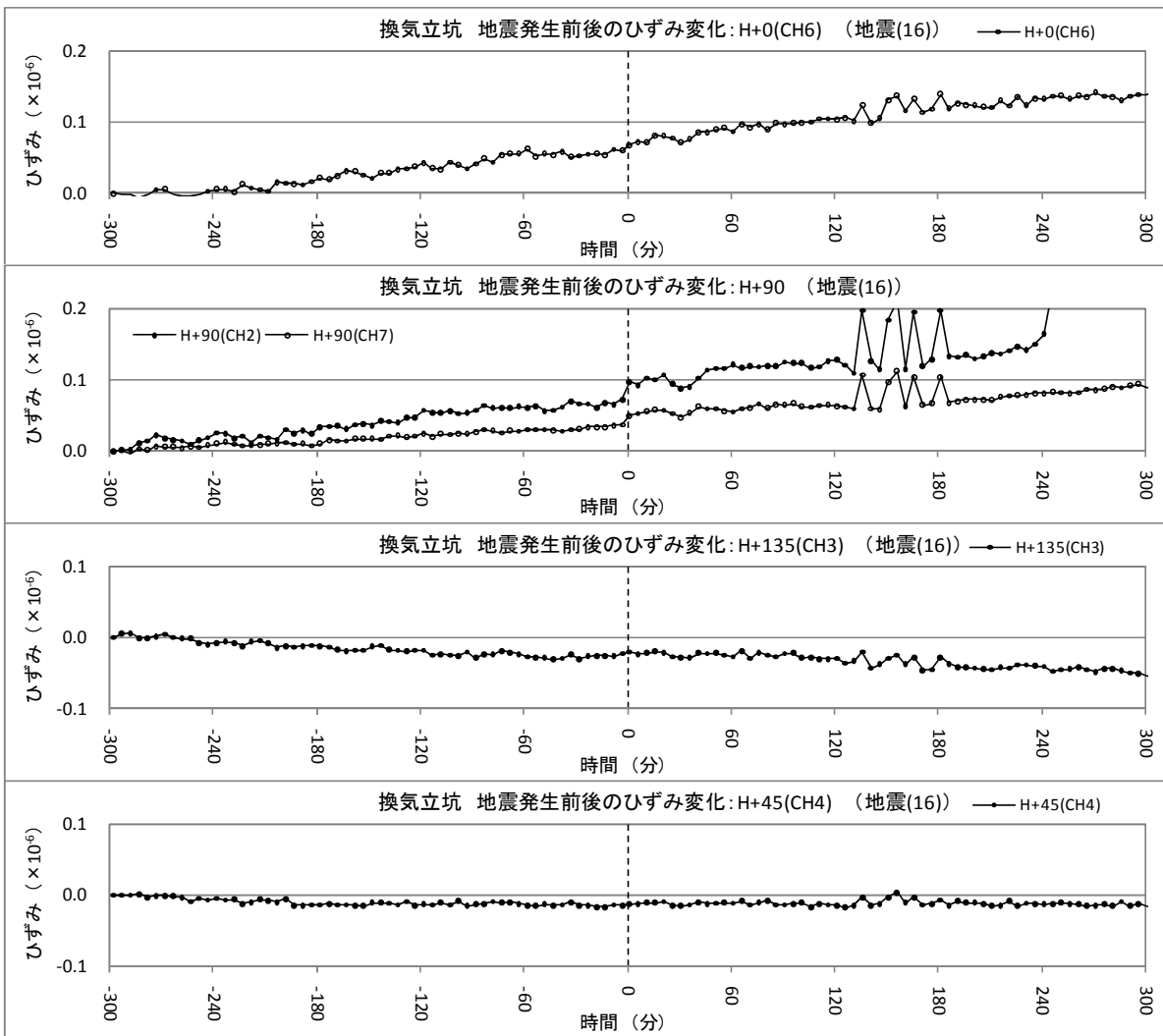


図 4.2.2-25(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(16))

・地震(17) (2008/1/27 10:53)

初めに、H+0(CH1)の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-26(1)に示す。図をみると、CH1は他のチャンネルに比べ1オーダー大きい変動を示し、地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震後のひずみ変化はみられない。

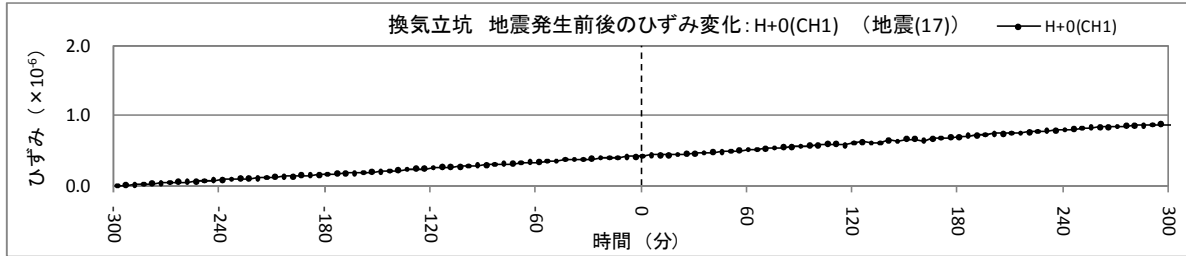


図 4.2.2-26(1) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))

次に、H+0(CH6)、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-26(2)に示す。図をみると、H+90 以外は、地震発生前後でひずみがほぼ線形的に変動しており、地震発生後に大きな変化はみられない。一方、H+90 では、地震発生後の約 10 分間に 0.02×10^{-6} 程度の圧縮ひずみが生じている。

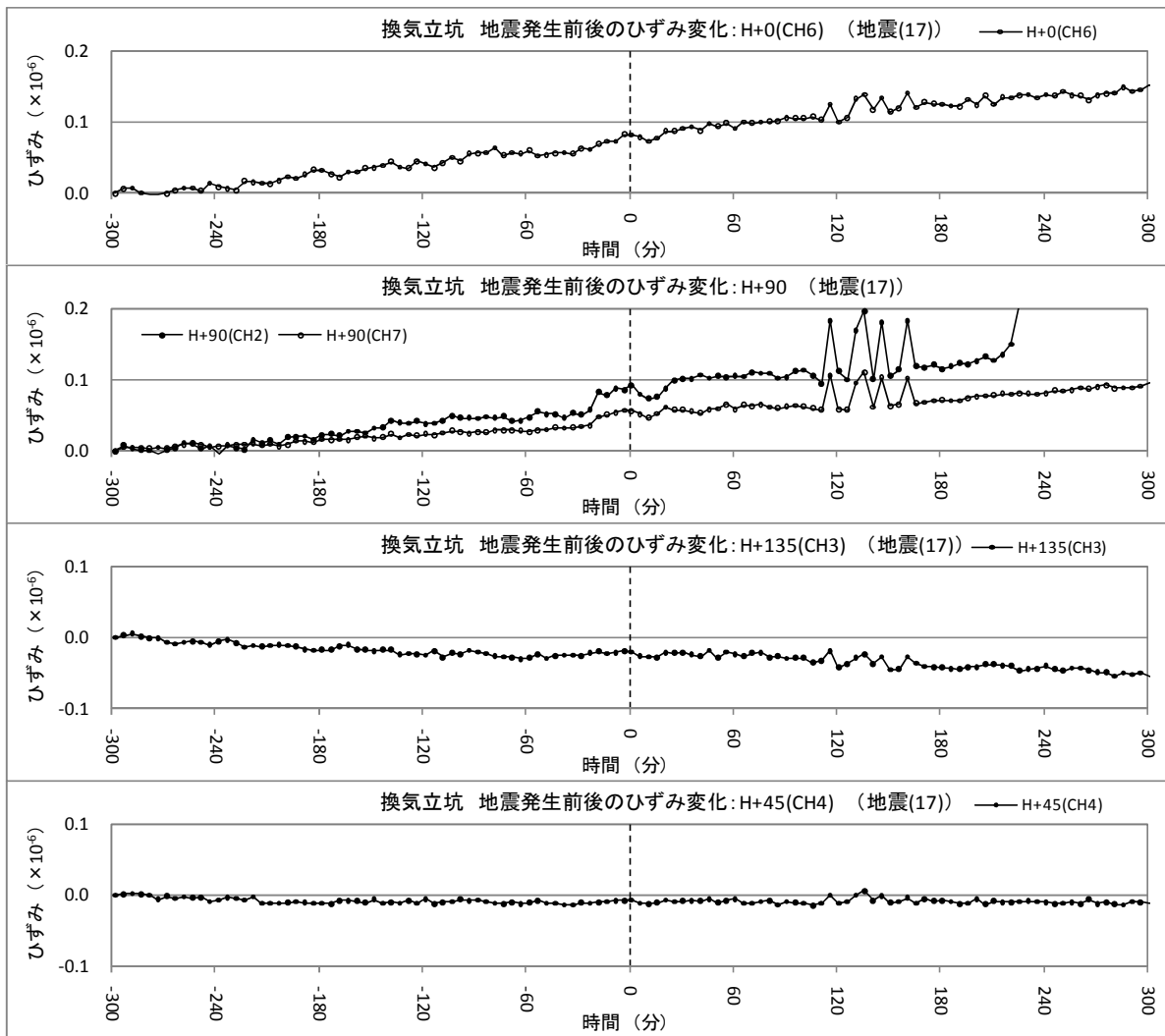


図 4.2.2-26(2) 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(17))

・地震(18) (2008/2/1 17:03)

H+0、H+90、H+135 および H+45 の地震発生前後のひずみ変化を図 4.2.2-27 に示す。図をみると、H+0(CH1)、H+90(CH2)および H+135 は地震発生前後で引張りひずみの増加傾向にあり、地震発生後のひずみ変化はみられない。H+0(CH6)は地震発生前後で比較的落ち着いた値を示し、地震発生直後のひずみ変化はみられない。H+90(CH7)は引張りひずみの増加傾向にあるが、地震発生前後の 1 時間は落ち着いた値を示している。H+45 は地震発生前後で圧縮ひずみの増加傾向にあり、地震発生後のひずみ変化はみられない。

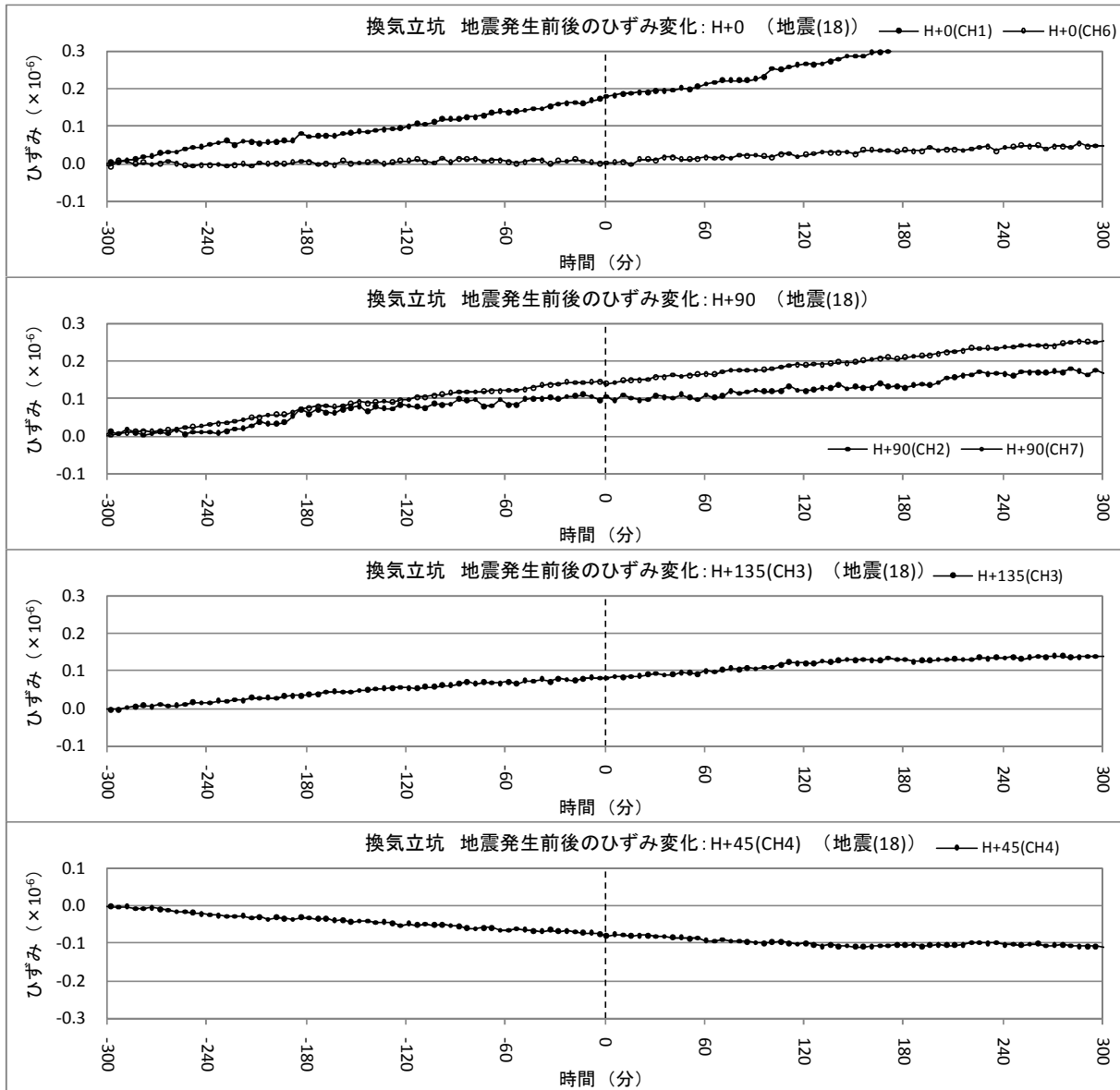


図 4.2.2-27 地震発生前後の換気立坑の水平ひずみ変化 (地震(18))

2) 鉛直ひずみ

図 4.2.2-28(1)~(2)に各地震発生前後の換気立坑側の鉛直ひずみ変化を示す。

なお、ここでは地震発生時刻の約 5 時間前のひずみ計測値からの相対変位をプロットした。また、横軸の時間 0 は地震発生時刻を表している。

図をみると、換気立坑側の鉛直ひずみは、地震(17)を除き、地震発生の前後でほぼ線形的に変動しており、地震の影響によるひずみ変化はないと言える。

一方、地震(17)では、地震発生後約 10 分で 0.02×10^{-6} 程度の引張りひずみが発生し、地震発生後 20 分までに元のトレンドに戻る変化を示した。

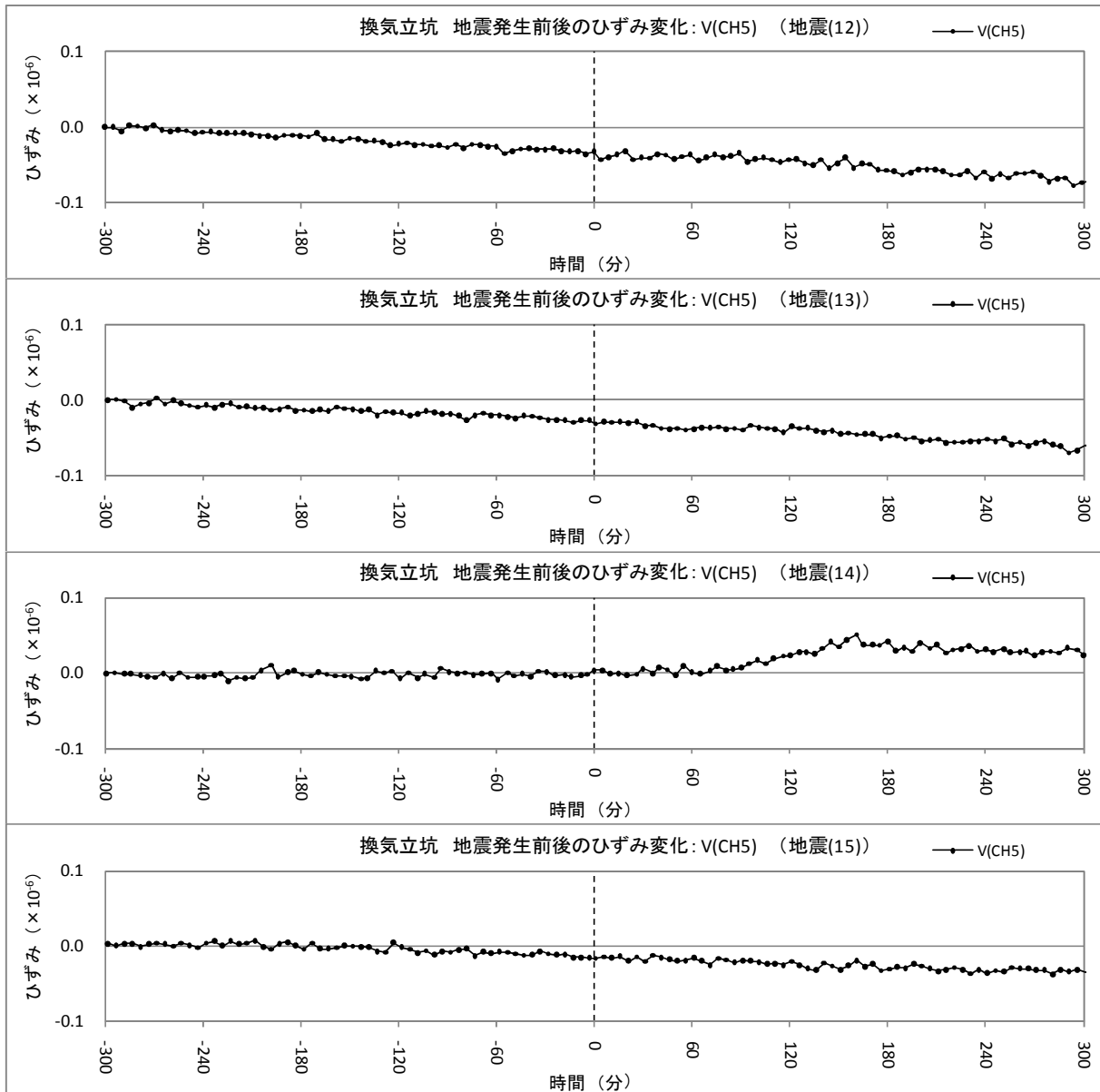


図 4.2.2-28(1) 地震発生前後の換気立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(12)~地震(15))

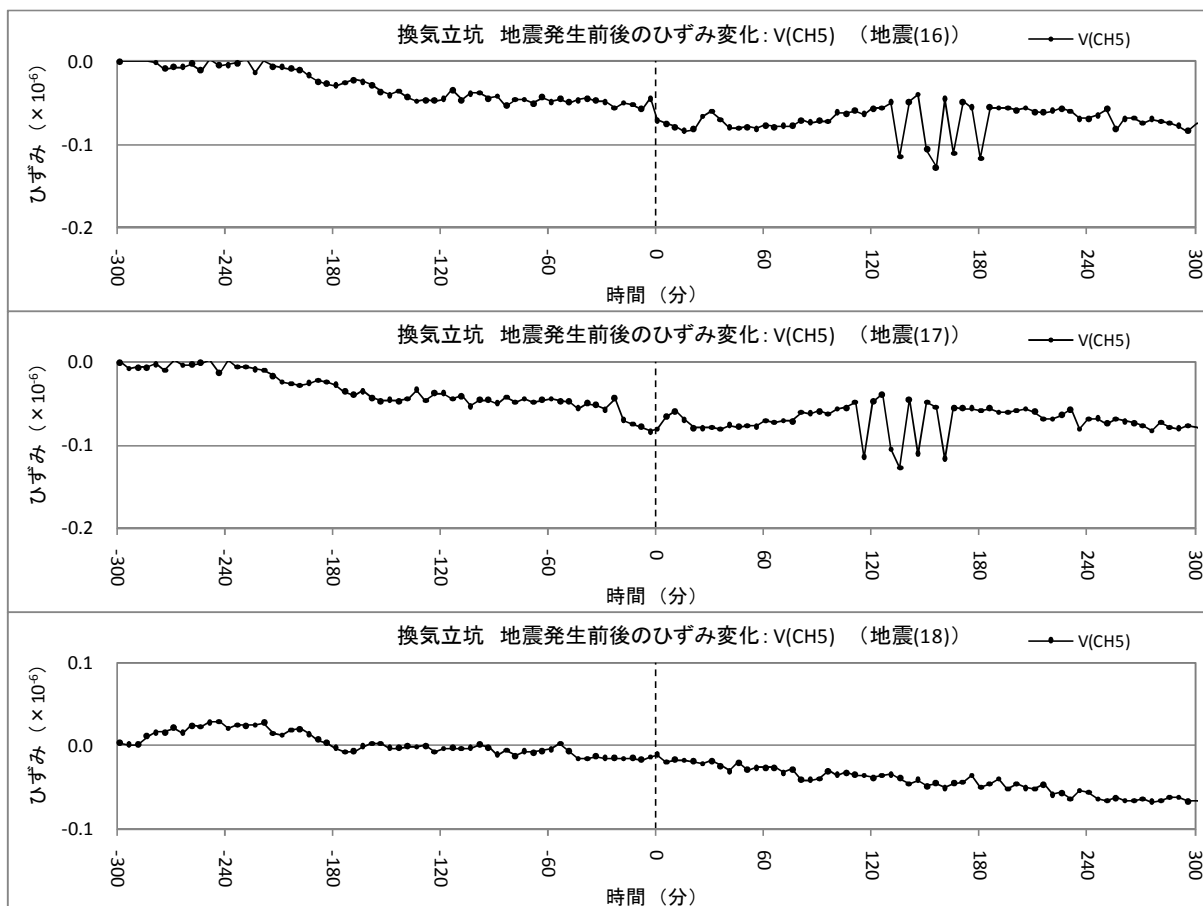


図 4. 2. 2-28(2) 地震発生前後の換気立坑の鉛直ひずみ変化 (地震(17)～地震(18))

3) まとめ

- ・換気立坑側の水平ひずみは、地震(16)および地震(17)の H+90 でのみ変化がみられた。地震(16)では、地震発生直後に $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.03 \times 10^{-6}$ 程度の引張りひずみが生じた。地震(17)では、地震発生後約 10 分で $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.03 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが生じ、その後の 10 分で元のトレンドに戻る変化を示した。
- ・換気立坑側の鉛直ひずみは、地震(17)のみで変化がみられ、地震発生後約 10 分で 0.02×10^{-6} 程度の引張りひずみが生じ、その後の 10 分で元のトレンドに戻る変化を示した。

(7) 最大・最小主ひずみとその方向

ここでは、ひずみ計で計測された水平面内の4成分(H+0、H+90、H+45、H+135)のひずみ値をもとに算出した最大主ひずみ、最小主ひずみ、およびその方向について述べる。

なお、ひずみ計の方位は、換気立坑の安定期における方位計の平均値 335.9° (磁北から時計回りの角度)を採用した。

初めに CASE1 として、計測された全 CH のデータを用いて算出した主ひずみとその方向を図 4.2.2-29 に示す。なお、ここでは主ひずみ方向のグラフにおける縦軸の 0 は磁北を意味し、磁北から時計回りの角度を正、反時計回りの角度を負として表す。図に示すように、最大主ひずみおよび最小主ひずみは、経時的に増加傾向にある引張りひずみである。最大主ひずみは CH1 の影響により変動が大きく、2008年1月9日から2008年2月6日までの累積ひずみは約 89.7×10^{-6} である。最小主ひずみの累積ひずみは約 19.0×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、ドリフト時に小さな動きがあるものの、その後は一定して磁北から反時計回りで約 24° を示している。

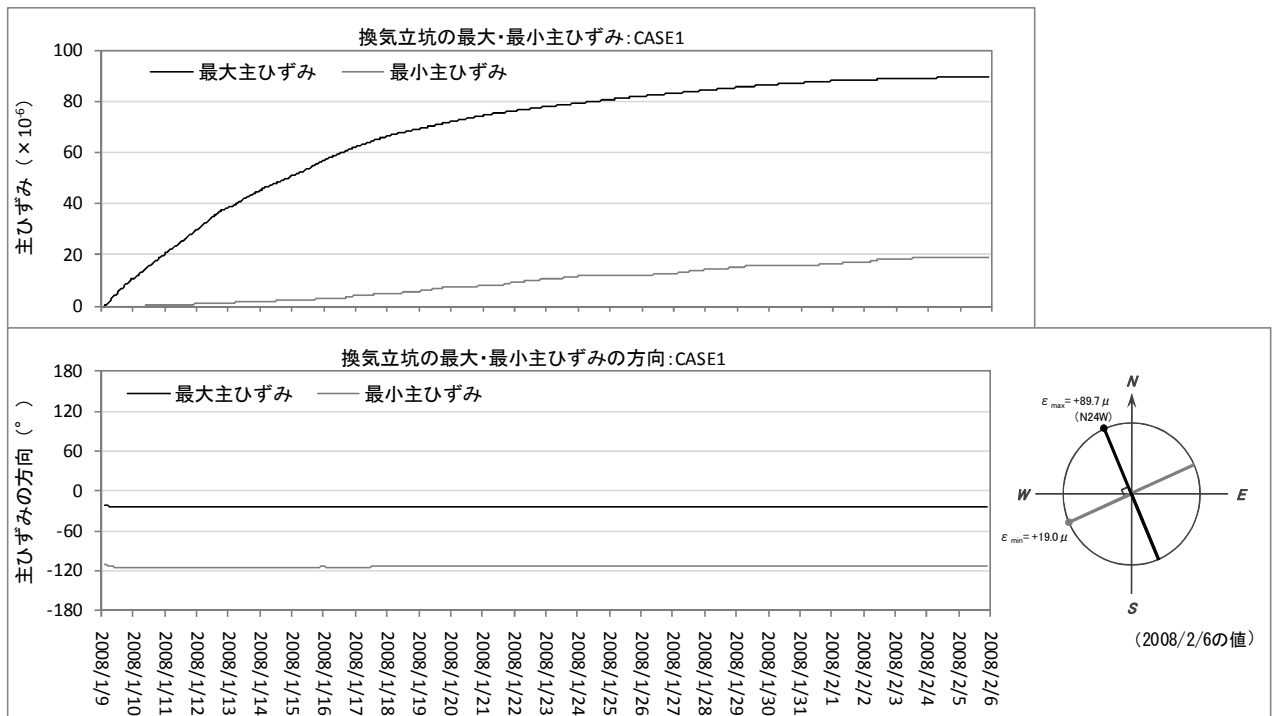


図 4.2.2-29 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE1

次に、CASE2 として、他の CH とは桁違いに変動の大きかった CH1 を除外したデータにより算出した主ひずみとその方向を図 4.2.2-30 に示す。図に示すように、最大主ひずみおよび最小主ひずみは、経時的に増加傾向にある引張りひずみである。2008年1月9日から2008年2月6日までの累積ひずみは、最大主ひずみが約 19.0×10^{-6} 、最小主ひずみが約 12.8×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、ドリフト後に磁北から反時計回りで約 25° を示したあと、最大主ひずみと最小主ひずみの値が近似する 2008年1月20日から1月21日頃に乱れが生じた他は、約 20 から 30° の間で緩やかに変化している。

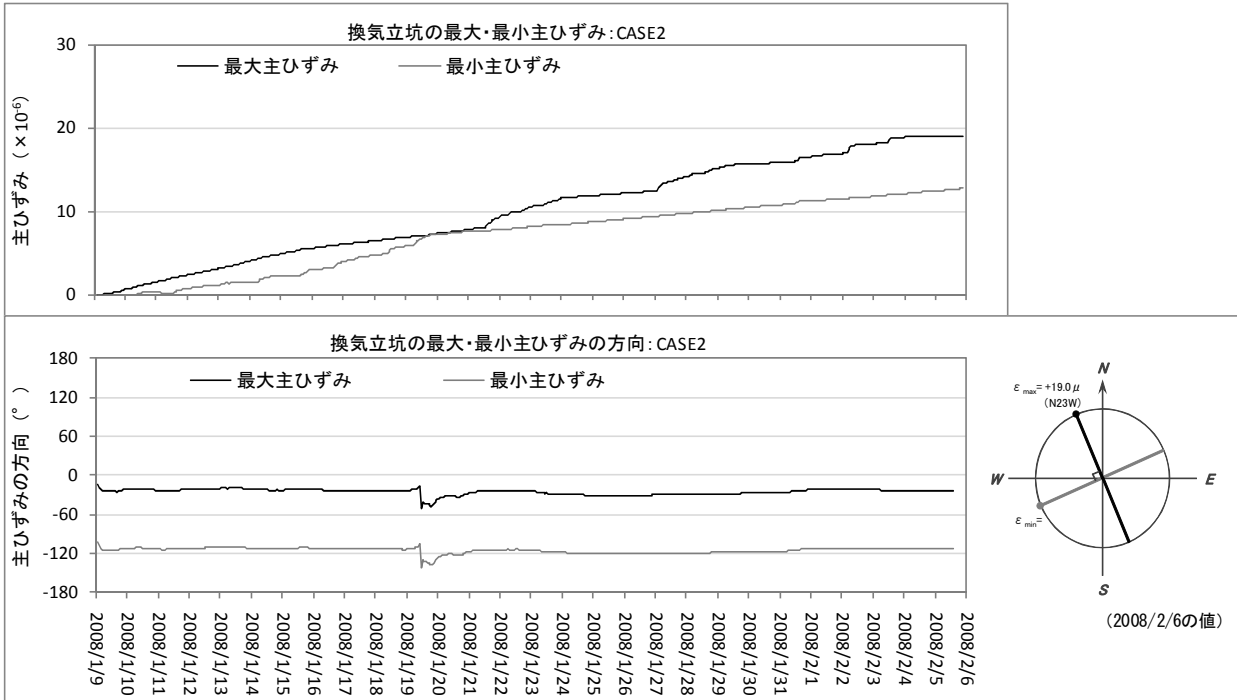


図 4. 2. 2-30 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE2

次に、CASE3として、水平90度方向を計測するCH2とCH7のうち、ひずみの変動が大きく、増加勾配にばらつきがみられたCH2を除去したデータにより算出した主ひずみとその方向を図4.2.2-31に示す。図に示すように、最大主ひずみおよび最小主ひずみは、経時的に増加傾向にある引張りひずみである。2008年1月9日から2008年2月6日までの累積ひずみは、最大主ひずみが約 12.8×10^{-6} 、最小主ひずみが約 7.1×10^{-6} である。最大主ひずみの方向は、ドリフト後に磁北から反時計回りで約 25° を示したあと、約 20 から 25° の間で緩やかに変化している。

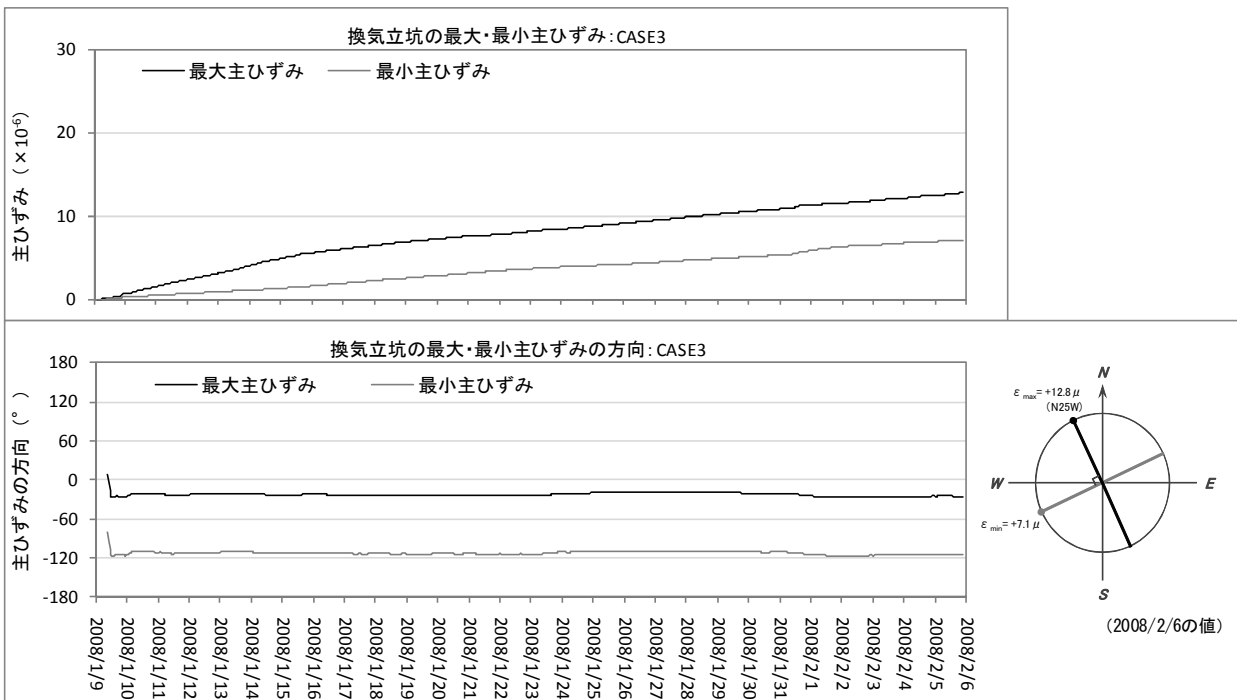


図 4. 2. 2-31 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3

次に、この CASE3 の場合において、主立坑での発破の影響および地震の影響と考えられる主ひずみの変化について述べる。

図 4.2.2-32 に、主立坑において発破作業が再開された 2008 年 1 月 14 日からの主ひずみおよび主ひずみの方向の変化を示すとともに、図 4.2.2-33(1)～図 4.2.2-33(6)には、発破直後にひずみ変化がみられなかった発破④および発破⑤を除いた各発破の前後 1 時間の変化を示す。

また、地震発生後に計測値の変化がみられた地震(16)および地震(17)についての主ひずみおよび主ひずみの方向の変化を図 4.2.2-34(1)～図 4.2.2-34(2)に示す。

これらをみると、発破直後に生じた主ひずみの変化は大きくても 0.01×10^{-6} 程度であり、主立坑側でみられたような明確で大きな変動はみられない。

地震発生後の主ひずみは、明確な変化ではないが、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.02 \times 10^{-6}$ 程度の変化が生じている。

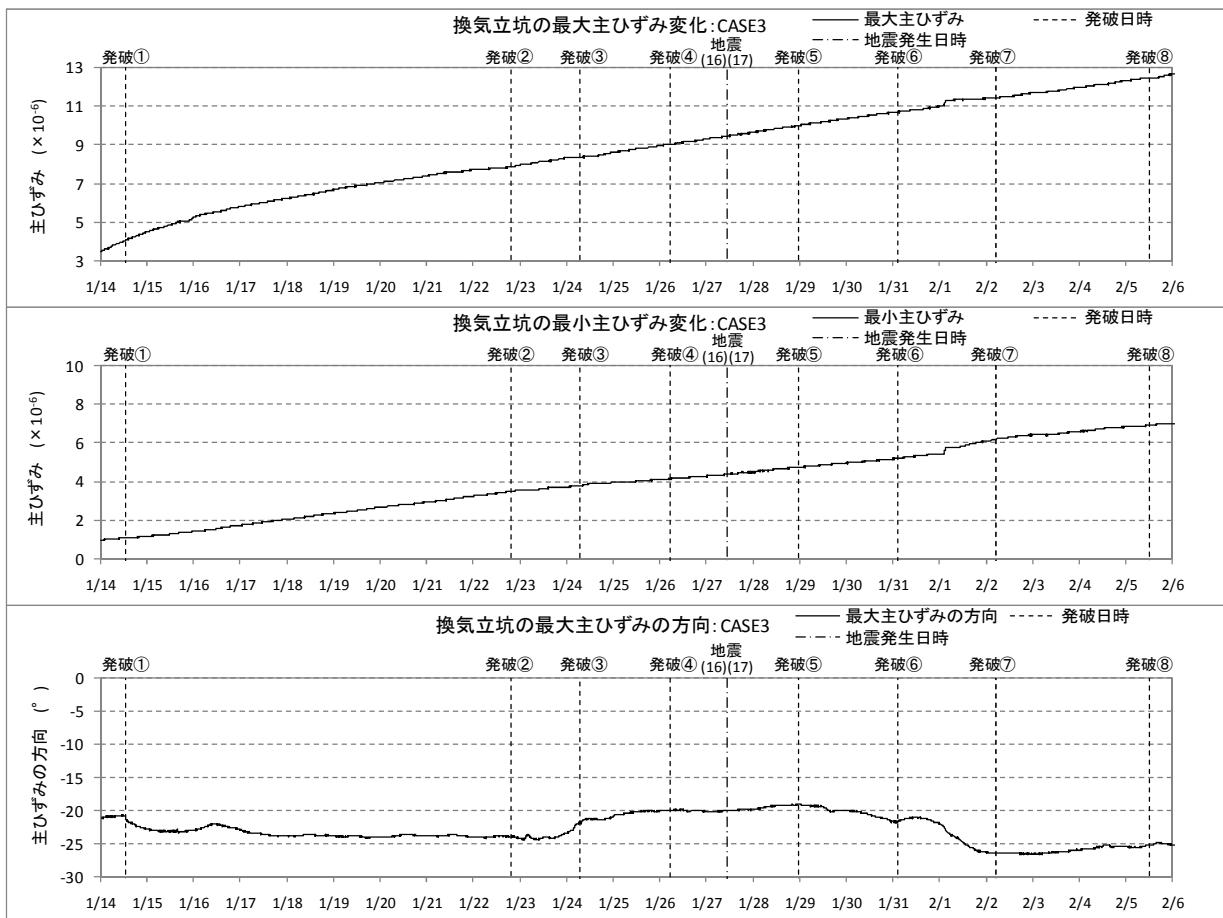


図 4.2.2-32 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (2008/1/14～2008/2/6)

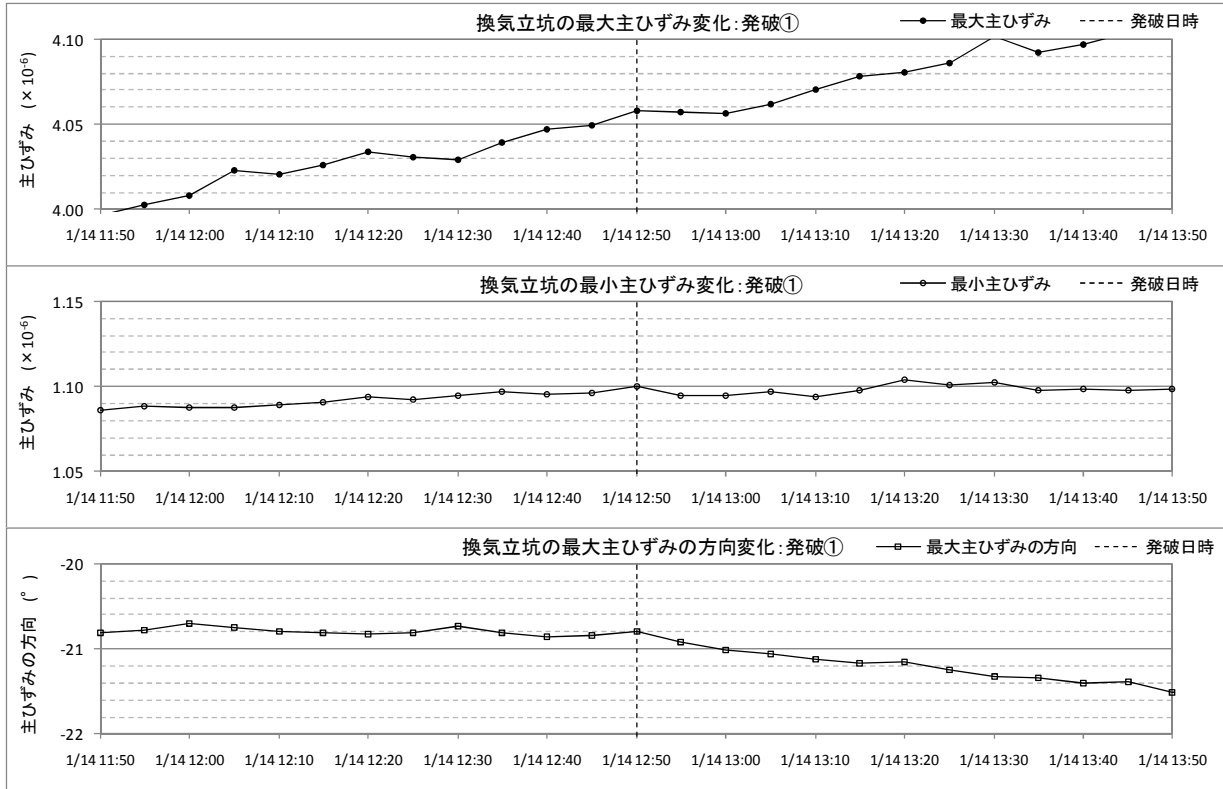


図 4. 2. 2-33(1) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破①)

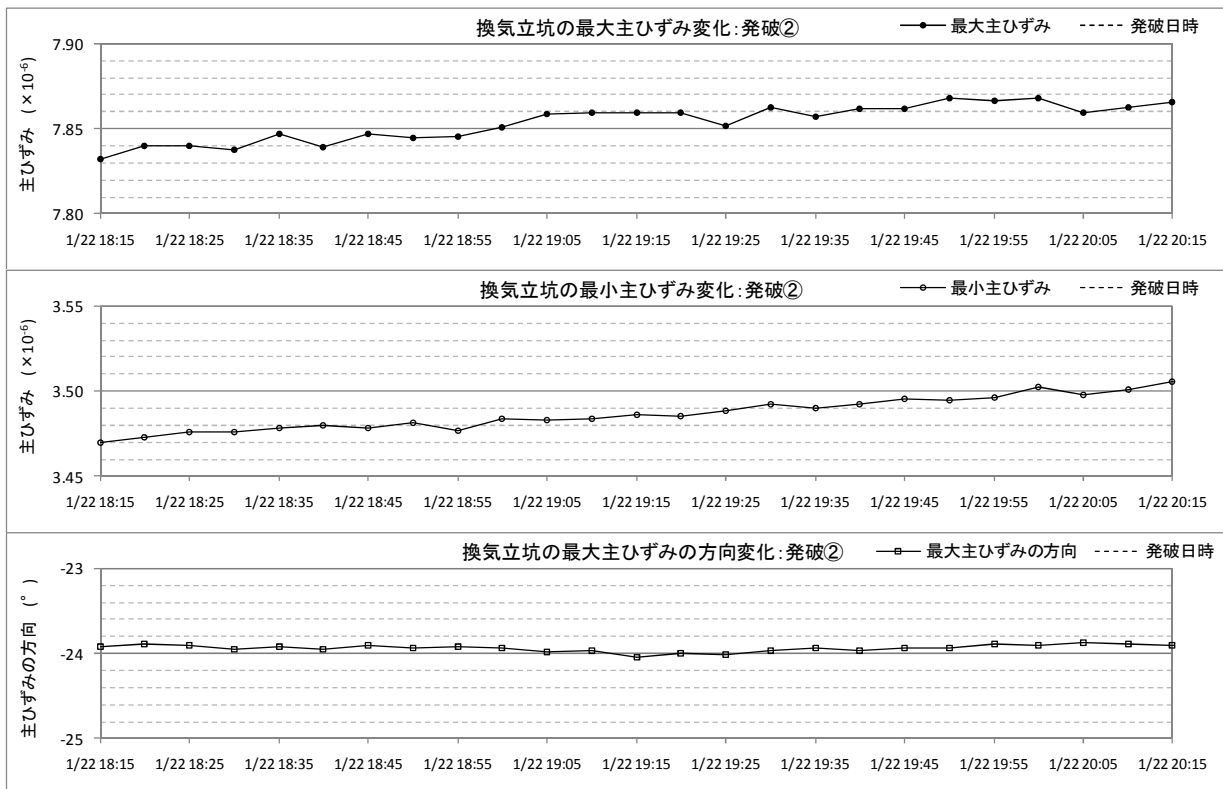


図 4. 2. 2-33(2) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破②)

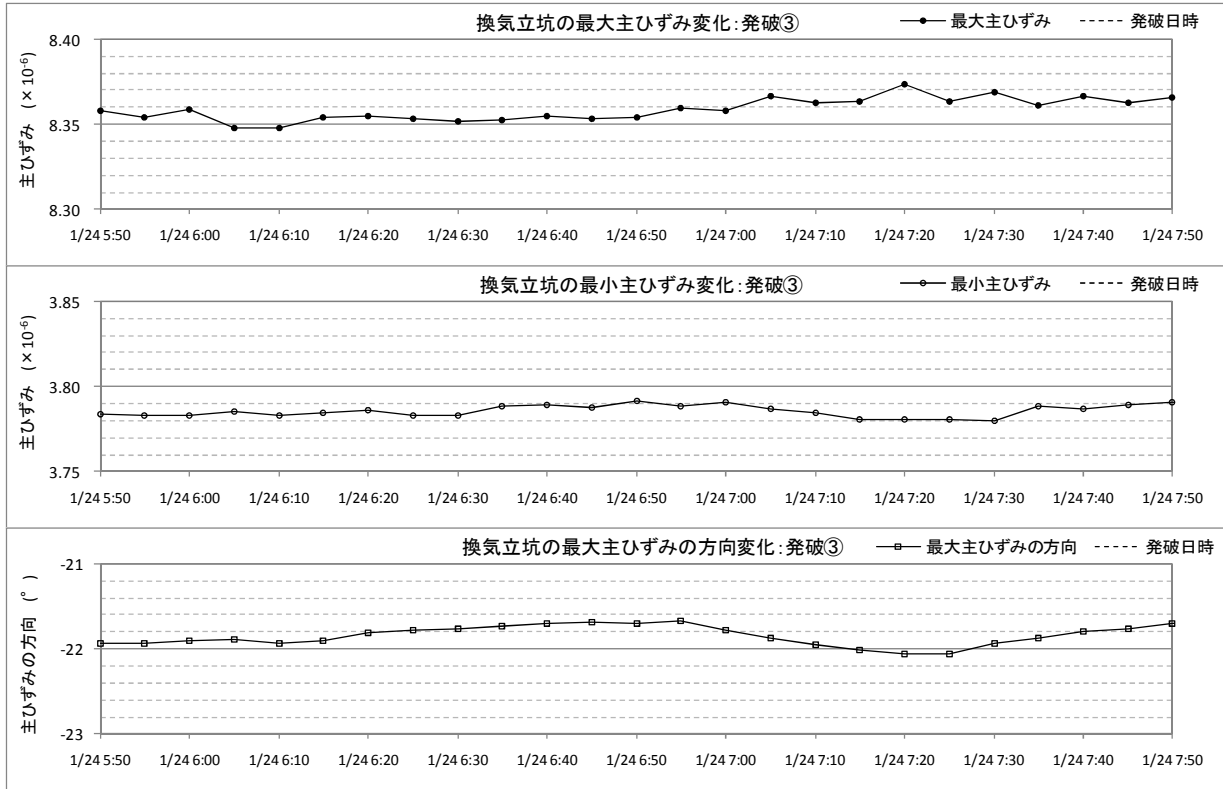


図 4. 2. 2-33 (3) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破③)

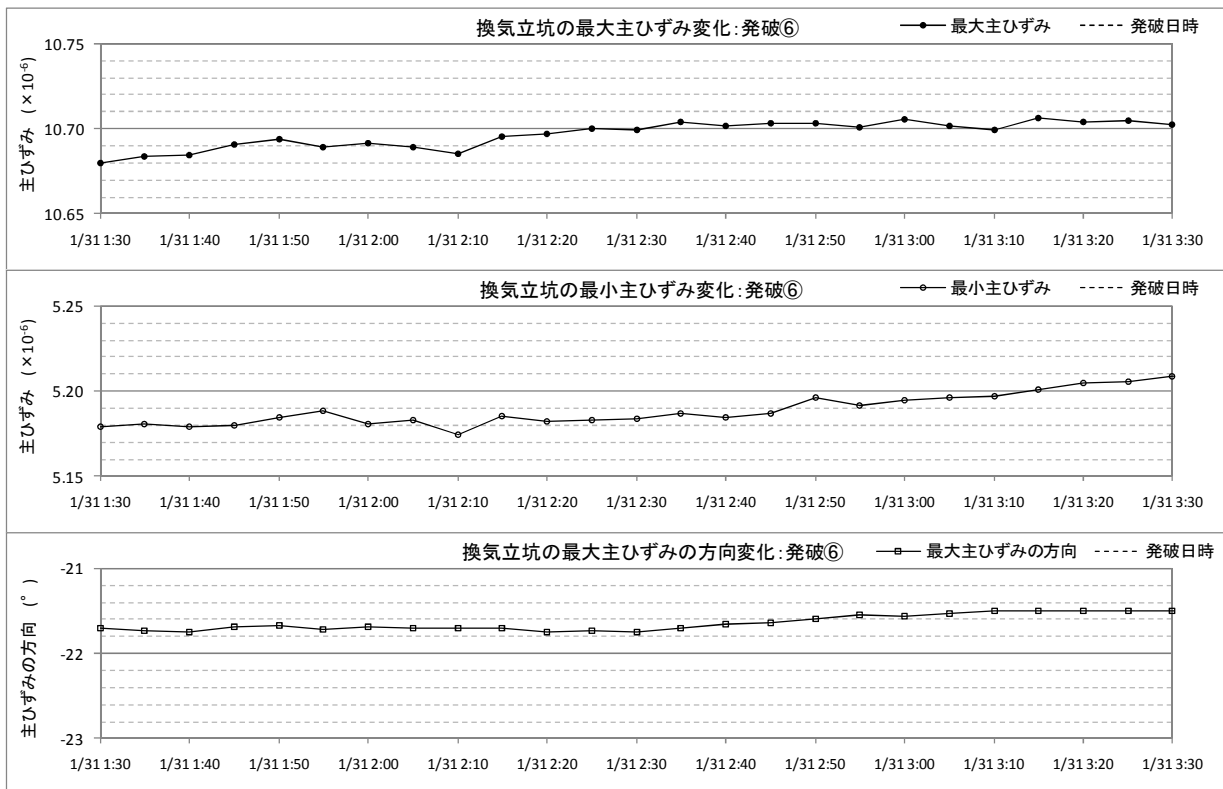


図 4. 2. 2-33 (4) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (発破⑥)

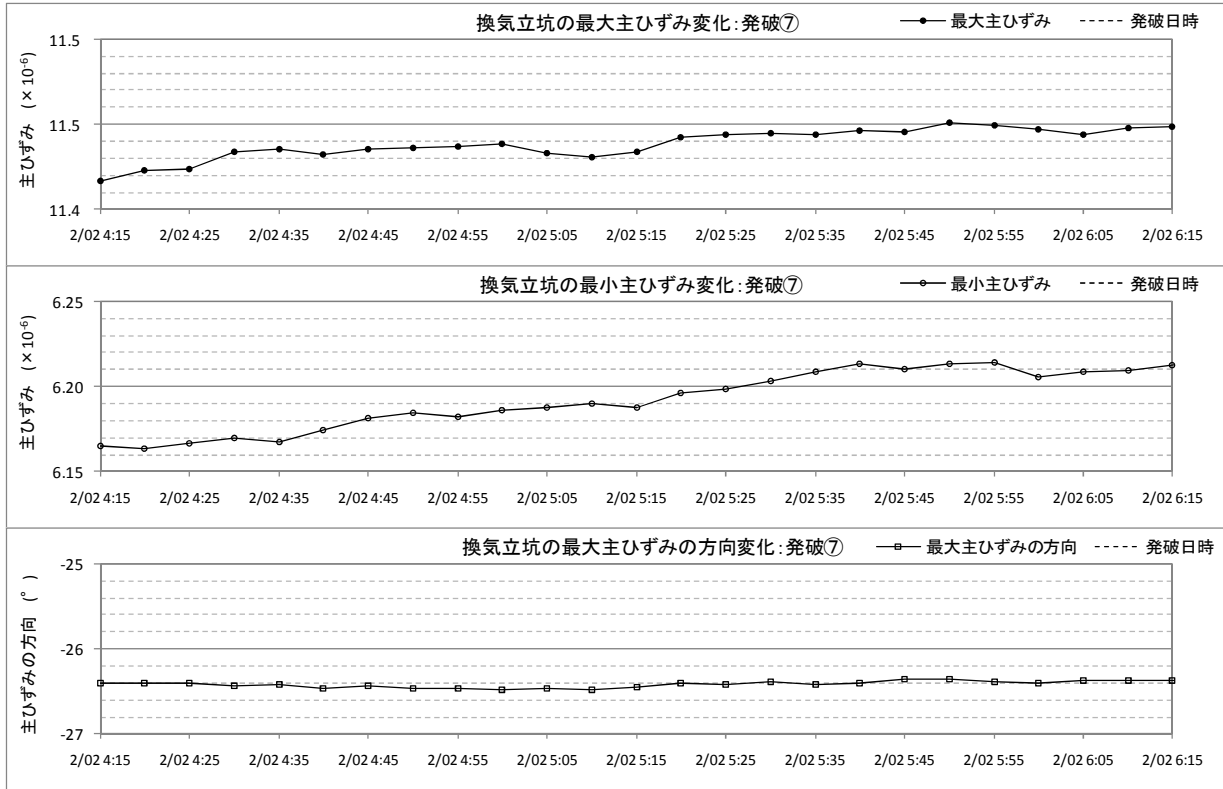


図 4. 2. 2-33 (5) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑦)

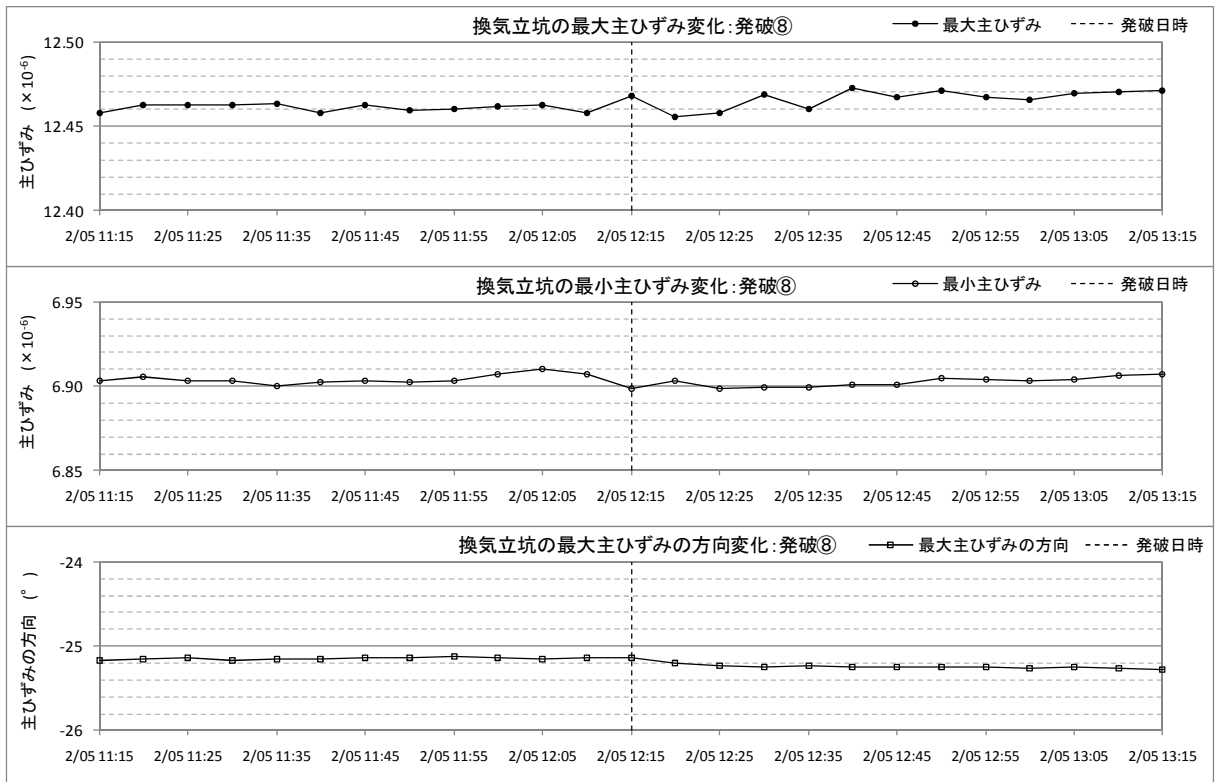


図 4. 2. 2-33 (6) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向: CASE3 (発破⑧)

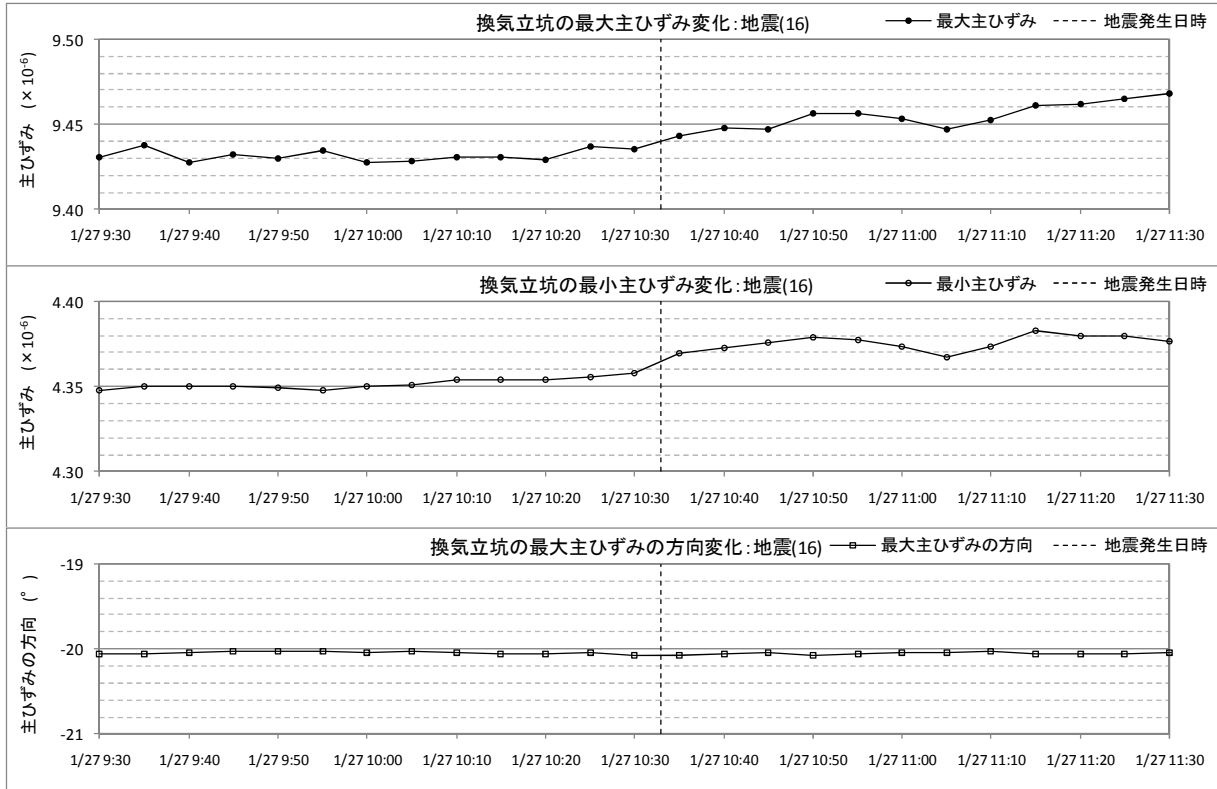


図 4. 2. 2-34(1) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (地震(16))

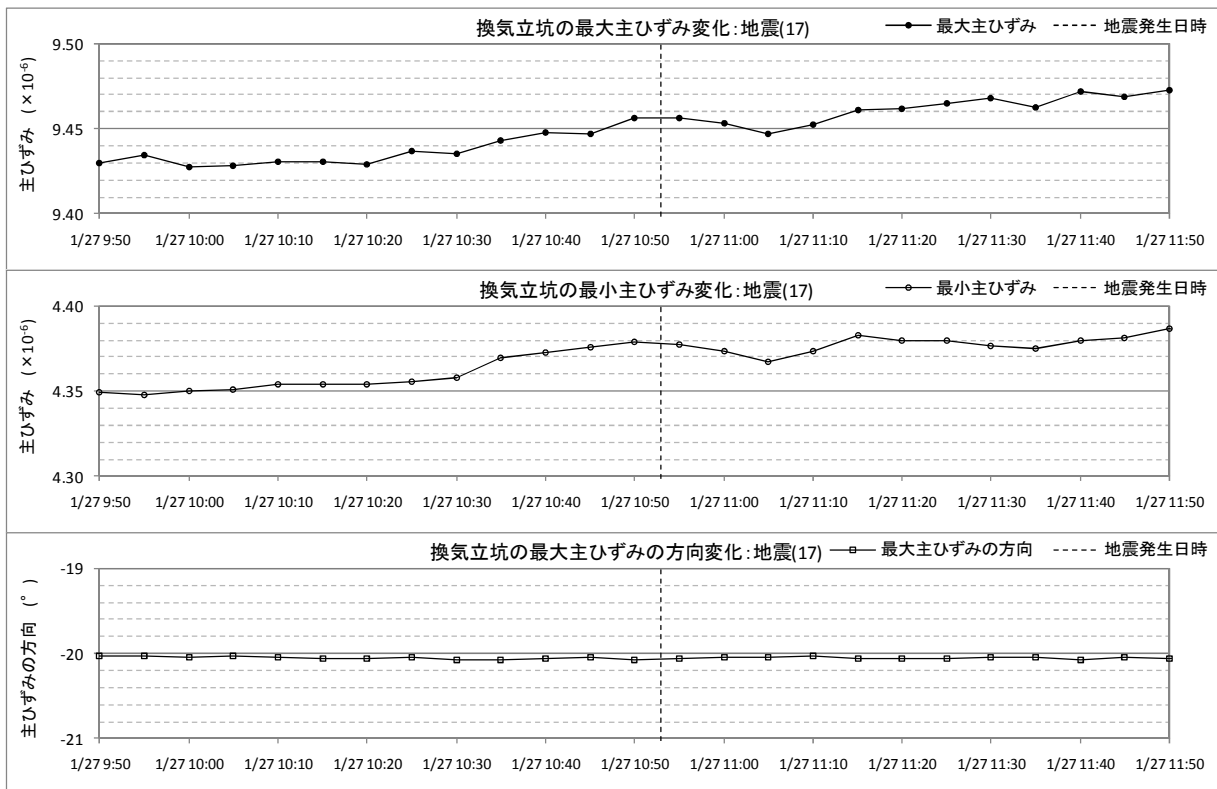


図 4. 2. 2-34(2) 換気立坑の最大・最小主ひずみとその方向 : CASE3 (地震(17))

4.3 計測結果のまとめ

4.2 に示した計測結果を以下にまとめる。

4.3.1 計測結果全般

- ・主立坑側のひずみおよび方位の計測値は、初期の短期的なドリフトが収束した後安定する。しかし、2008年2月7日以降、データの欠測や不安定な挙動を示す。温度は、計測期間ほぼ一定値を示しているが特定の時期にノイズが発生している。
- ・換気立坑側の計測値は、計測開始直後にデータの欠測が発生。その後2008年1月に復旧しデータ取得を開始したが約1か月後ふたたびデータの欠測が発生し、それ以降データは取得できていない。
- ・計測結果の評価は、データが安定して取れていた期間（安定期：主立坑側は2007年10月13日～2008年2月7日の間、換気立坑側は2008年1月9日～2008年2月6日）で実施した。

4.3.2 主立坑側

1) ひずみ、方位、温度の変化

- ・全CHで圧縮ひずみが時間とともに増加する。方位は初期値の 144.8° 、温度は 28.3°C で大きな変化はない。最大値は、CH2で約 75×10^{-6} 程度の値を示すが、それ以外は $20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 程度の値であった。鉛直ひずみは、ドリフト収束後時間とともに $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}/\text{day}$ 程度の割合で増加する。2008年2月7日時点での累積圧縮ひずみ量は約 30×10^{-6} 程度である。
- ・水平ひずみは、発破時に一時的に変動している($0.1 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6}$ 程度)。ただし、発破後1～3時間程度で元のトレンドに戻っている。鉛直ひずみも同様の傾向を示す。

2) 揚水の影響

- ・研究坑道からの揚水に伴う地下水位変動と水平ひずみを比較した結果、一部の期間で相関が確認された。地下水位変動により発生するひずみは計測方向で違いがみられた。鉛直ひずみには揚水の影響と考えられる変化はみられなかった。

3) 潮汐力の影響

- ・海面潮位と同調する地下水位観測結果(DH-15号孔)とひずみを比較した結果、一部の期間中に潮汐変動との相関が確認された。DH-15号孔の水頭変化とひずみ変化との関係は、水頭上昇時に圧縮ひずみの増加、水頭低下時に引張りひずみの増加という関係である。水頭の変動幅とひずみの変動幅は日によってバラつきがあり、規則性はみられない。潮汐力の影響による変動量は最大で 0.1×10^{-6} 程度であった。
- ・鉛直ひずみは、ある一定の周期で変動しているものの、潮汐位変動との相関は確認できない。

4) 地震の影響

- ・安定期の期間中に生じた18回の地震のうち、1回のみ明確な変化が認められた。水平ひずみに関しては、方向によって圧縮傾向と引張傾向のひずみ変化が生じ、変化量は最大で 0.07×10^{-6} であった。鉛直ひずみに関しては、有意な変動は見られなかった。

5) 最大・最小主ひずみとその方向

- ・取得したひずみデータの組み合わせを変え、最大主ひずみおよび最小主ひずみを算出したが、安定期における最大主ひずみの方位はNS～N27Eの方向と考えられる。最大主ひずみ値は、データの組み合わせにより算出した値が異なるが、 $46 \times 10^{-6} \sim 75.3 \times 10^{-6}$ 、最小主ひずみ値は、 $14.2 \times 10^{-6} \sim 29.3 \times 10^{-6}$ でありいずれも圧縮方向である。発破時の変化は、1)で述べたように元のト

トレンドにもどる場合とそうでない場合があり規則性が認められない。地震の影響については、4)で述べた地震時に 0.05° 程度の主ひずみ方位の変化が生じている。

4.3.3 換気立坑側

1) ひずみ、方位、温度の変化

- ・方位計は、初期にややばらつきがみられたが、概ね一定で約 336.0° を示す。
- ・温度計は、初期にややばらつきがみられたほか、ノイズが多く記録されたが、約 28.1°C の一定した値を示している。
- ・ひずみ値に関しては、CH1 で約 160×10^{-6} という大きな値を示したが、それ以外は $0 \sim 40 \times 10^{-6}$ 程度の値であった。
- ・鉛直ひずみに関しては、主立坑同様圧縮側のひずみの増加を示しているが、それ以外は引張側にひずみが増加しており、主立坑側とは異なる傾向を示した。
- ・換気立坑側では安定期の期間中に発破は行われていない。主立坑側の発破の影響によるひずみ変化は、主立坑側で計測された値より 1 オーダー程度小さく、発破後に緩やかに変化する。鉛直ひずみに関しては発破の影響は認められていない。

2) 揚水の影響

- ・研究坑道からの揚水に伴う地下水位変動による岩盤の変形挙動への影響は、揚水と比較できる地下水位データを得られなかったため確認できなかった。

3) 潮汐力の影響

- ・海面潮位と同調する地下水位観測結果 (DH-15 号孔) とひずみを比較した結果、CH3 と CH4 において、ひずみ変化が少ない期間のみで潮汐変動との相関が確認されたが、その変動量は 0.05×10^{-6} 程度と非常に小さい。
- ・線形的なひずみ変動を示す CH について、一次関数でトレンドを仮定することによりトレンドを除去し、トレンド除去後のひずみ変化挙動と DH-15 号孔の水頭変動とを比較した結果、CH6 および CH7 の一部の期間において潮汐変動と相関のあるひずみ変化挙動が確認された。CH2 および CH5 については、潮汐変動との明確な相関は確認されなかった。

4) 地震の影響

- ・換気立坑の安定期の期間中に生じた 7 回の地震のうち 2 回の地震で微少なひずみ変化が認められた。地震発生後に生じたひずみは、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.03 \times 10^{-6}$ 程度であった。
- ・鉛直ひずみに関しては、1 回の地震で変化が認められ、生じたひずみは 0.02×10^{-6} 程度であった。

5) 最大・最小主ひずみとその方向

- ・主立坑側と同様に、水平面内のひずみ計測結果の組み合わせを変えて主ひずみの方位を算定したが、最大主ひずみの方位は、 $\text{N}23\text{W} \sim \text{N}25\text{W}$ とほぼ一定の方位を示した。最大主ひずみの値は、 $12.8 \times 10^{-6} \sim 89.7 \times 10^{-6}$ 、最小主ひずみ値は、 $7.1 \times 10^{-6} \sim 19 \times 10^{-6}$ となった。いずれも引張側である。発破時の変化は、主立坑でみられたような大きな変動はなく、大きくても 0.01×10^{-6} 程度の変化であった。地震の影響については、明確な変化ではないが、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.02 \times 10^{-6}$ 程度のひずみ変化が生じている。

5. まとめと今後の課題

4章に示したように、評価できるデータが取得できた期間は短いものの、その間のデータ分析などで重要な知見がいくつか得られている。本章ではまとめとして、それらについて、本研究の目的である以下の観点から考察を加えることとする。

1) 地下深部のひずみ変化のメカニズムについて

4章では、地球潮汐といった定常的な外力変動や地震および発破などの瞬間的な外力変動によって高精度ひずみ計を設置した深度 500m 地点の岩盤でどのような変形が生じたかを分析した。

深度 500m 地点の岩盤は、40m しか離隔がない換気立坑、主立坑地点でも地質的に大きな違いがあることが既往のパイロットボーリング調査や両立坑における地質観察などからわかってきている。具体的には、換気立坑は健全な土岐花崗岩であるが、主立坑およびその周辺は断層やそれに伴う強い変質領域で構成されることが推定されている (図 5.1)。この地質の違いは岩盤の物性とも関連しており、健全な土岐花崗岩部は硬質であるものの割れ目の集中部で高い透水性を示すという特徴がある。一方、断層およびその周辺部は、相対的に軟質であるが透水性は低いことがこれまでの調査研究の結果で明らかになってきている。

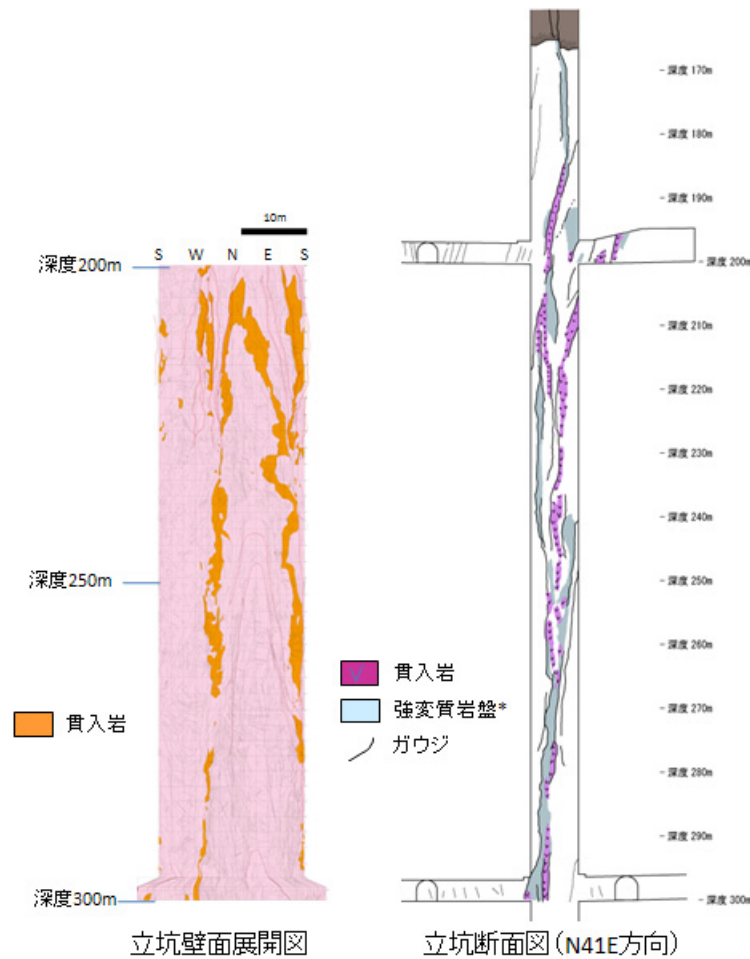


図 5.1 立坑壁面地質観察結果の例 (主立坑)

このような地質的な違いを考慮しつつ 4.3 に示した計測結果をみなおすと短期的な岩盤の変形に対しては以下のような特徴が見出される。

- ①健全な土岐花崗岩や断層およびその周辺部において岩盤の変形を生じさせる外力となっているのは、地球潮汐や揚水などによる地下水位の変動や地震動、および発破による応力解放と考えられる。
- ②地球潮汐による地下水の変動による岩盤の変形は、地球潮汐の周期とほぼ対応した形で生じ、水位が上昇すれば岩盤は鉛直・水平とも圧縮されるが、水位が低下すればそれは解放される。
- ③地震や発破のような岩盤の応力解放によっても岩盤の変形は生じる可能性があるが、今回の計測結果では、ほとんどの場合一時的な変化しか見られていないことから、それらの影響が残存するか否かは観測点と震源との距離に依存すると考えられる。

一方、観測期間を通じた岩盤の変形の状況や水平面内の最大・最小主ひずみの方向・その大きさを分析すると2つの測定地点で違いがあることがわかる。それは、

- ④岩盤の変形として、時間経過に伴い変形が増大する状況は両観測地点で同じであるが、主立坑側はすべての方向のひずみが圧縮方向に増大するのに対し、換気立坑側は鉛直ひずみ成分以外は引張方向にひずみが増大している。計測されたひずみ値は、極端に大きいCHを除くと概ね同程度のひずみ変化値となっている。
- ⑤主立坑側では、水平面内の全てのひずみ成分で潮汐に対応した周期的な変化が見られるのに対し、換気立坑側では一部の水平面内のひずみ成分にしかそれが表れていない。また、潮汐変動による変化量の絶対値としては、主立坑側は換気立坑側の4倍以上の変形が生じていることになる。
- ⑥水平面内の最大・最小主ひずみの方向は、主立坑側がNS～NE方向のトレンドにあるのに対し、換気立坑側はNW方向のトレンドにある。

④については、地質の違いとそれに伴う研究坑道掘削の地下水流動への影響度の違いによって生じていることが示唆される。具体的には、主立坑およびその周辺にほぼ鉛直方向に延びる低透水性ゾーンによって換気立坑などで実施している坑道掘削やボーリング作業によって生じる地下水の排水の影響は、その北側まで及ばないために（図 5.2）、換気立坑が存在する領域の圧力低下の分だけ応力解放が生じ、結果として引張側の変形モードとなっている反面、断層およびその周辺は脆弱部であるため水圧が保持されている断層北側からの圧力が集中して作用し、圧縮変形が卓越するといった解釈が可能である。

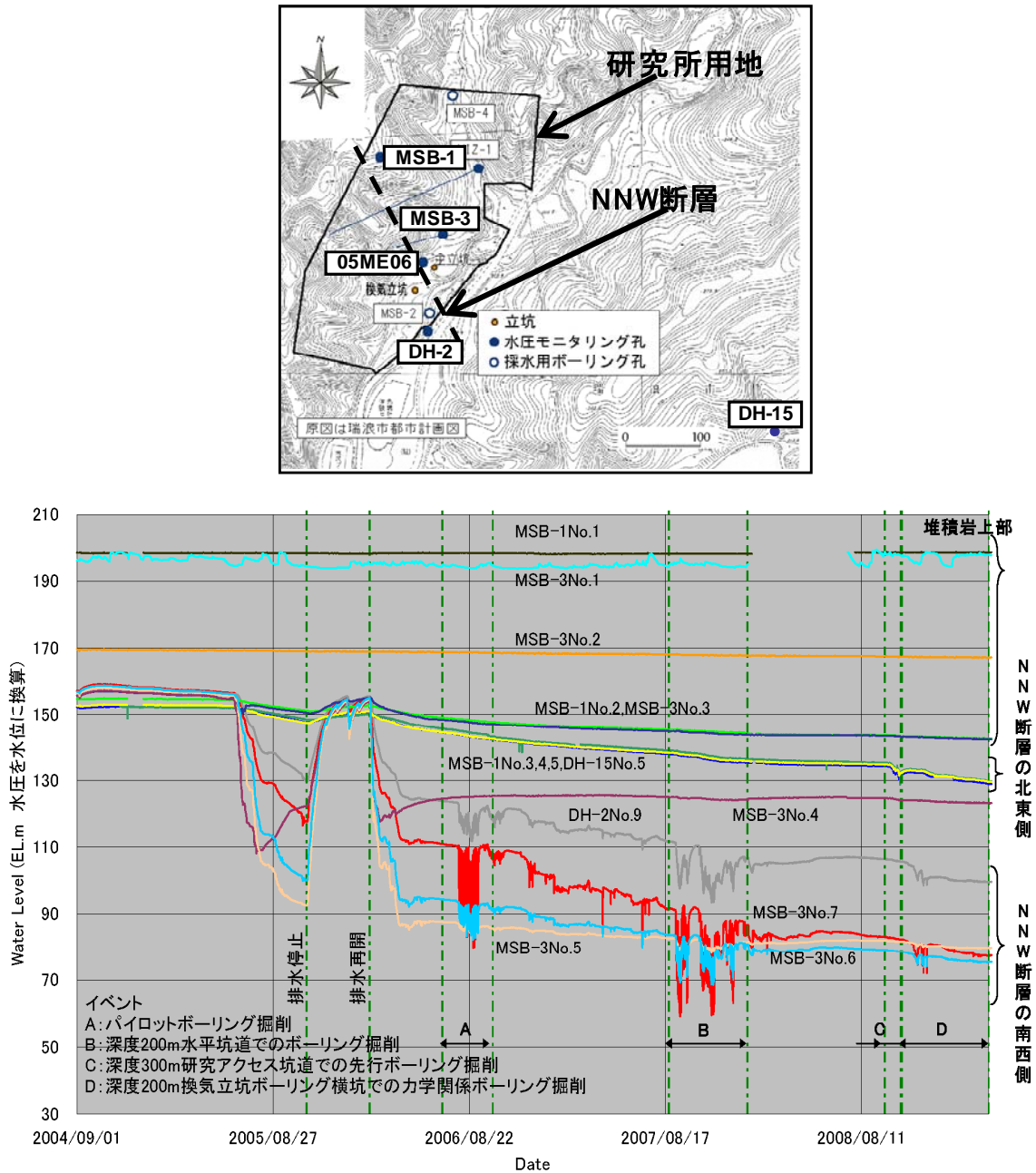


図 5.2 浅層、深層ボーリング孔における地下水水圧モニタリング結果の例

⑤は地質の違いや換気立坑側の岩盤の力学的な異方性に起因している可能性がある。地球潮汐による水位変動は断層の両側でほぼ同程度の大きさで作用していると考えられるため同一応力変化での変形量の差は、そのまま岩盤の剛性の差としてとらえることが可能である。よって主立坑側の脆弱部の弾性係数は、換気立坑側の 1/4 程度しかないことが見積もられる。さらに換気立坑側で潮汐変動による鉛直ひずみの変化が認められていないことは、深度 500m 地点の岩盤の状況が鉛直方向に硬く水平方向は相対的に剛性が低いことを示唆している。これは、同時に割れ目の分布特性から判断して、高傾斜の割れ目が水平方向に比べ多いことを示している。なお、研究坑道の掘削がより深部まで進み地下水などの圧力の解放が進むと、換気立坑側の岩盤でも鉛直方向のひずみ変化が表れてくる可能性があると考えられる。

⑥は、水平面内最大主応力の方向や割れ目や断層の方位分布と密接に関連する可能性がある。図 5.3 に 200m レベルにおける研究坑道の平面レイアウトと割れ目の分布状況を示すが、換気立坑側の領域では NNW から NW 方向の高傾斜割れ目が卓越するが、主立坑に現れている断層を境に NW の他に NE 系の高傾斜割れ目が表れていることがわかる。別途実施している初期応力測定の結果では、換気立坑側の水平面内最大主応力方向は NW 方向にあるため、割れ目の卓越方向との関係から初期応力状態の下で割れ目卓越方向に並行な NW 方向に岩盤の変形が蓄積されていることが推定できる。この状態で坑道掘削などによる水圧低下に伴う圧力低下が生じ、結果的に変形が蓄積していた方向のひずみの解放量が大きくなったことが、引張方向の最大主ひずみが NW 方向にある要因と考えられる。これら、高傾斜割れ目は地下水の流動経路になっているため、潮汐変動や揚水量変化と水平方向のひずみ変化に相関があることは整合的である。主立坑側領域では、断層の方向は NNW であるが、MIZ-1 孔における初期応力測定の結果では、500m 地点の最大主応力方向が WNW 方向になっており、南北系に近い断層の走向方向と斜交する方向であることから、断層面に沿うあるいはそれに直交する変形の両方が生じていることが推察される。

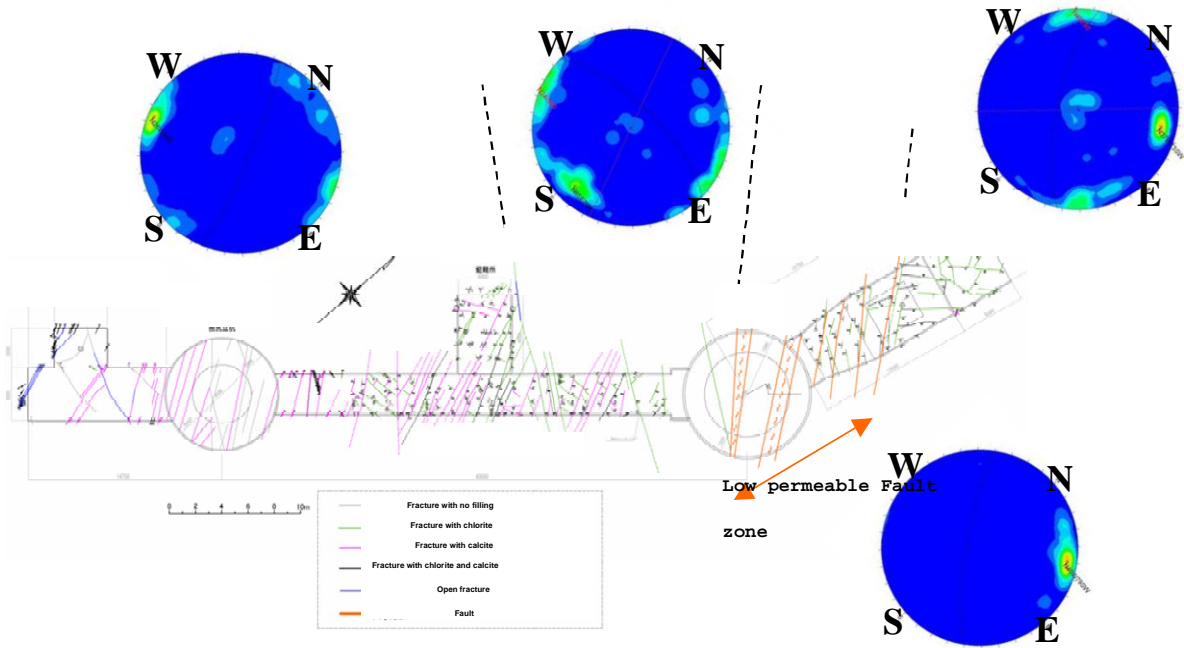


図 5.3 深度 200m レベルにおける坑道の平面配置図と割れ目調査結果の例

以上の考察をまとめると、地下深部のひずみ変化のメカニズムについて以下のようなことが考えられる。

- ・ ひずみを生じさせる外力は、地下水位の変動や地震動および発破による応力解放などがある。地下水位変動は、主に地球潮汐といった周期性を有するものと、研究坑道の掘削による地下水面低下といった単調な変化に分けられる。後者は、長期的な岩盤の変形を生じさせる要因として重要と考えられる。地震動や発破による応力解放は非常に短時間に生じるものである。

- ・ 短期間に生じるひずみ変化は微小であり、ほとんどが岩盤の弾性範囲内での変形であるため、残留変形をおこすような事例は一部の地震動を除いて見られない。
- ・ 長期にわたって累積で発生するひずみの変化量やその方向は、初期応力の方向、地質の状況により大きな影響を受けると考えられる。このため、累積したひずみ変化の評価には、周辺の地質環境の情報が非常に重要と考えられる。

2) 前方探査手法としての有効性

4.3 に示したように、今回使用した高精度ひずみ計は、鉛直深さで 300m 程度離れた場所の発破による微小変形を観測している。従来、土木・資源工学で使用されてきている変形計測装置は通常測定位置からトンネルなどの掘削面が 1 坑道径程度近づいた所から有意な変形が観測できるように設計されており、その意味では高精度ひずみ計を用いた今回の計測・評価により掘削面前方の岩盤状況（たとえば岩盤の剛性の違いなど）を相当離れた位置（数 100m 程度の離隔）から把握できる可能性が示された。

一方で、立坑掘削が本格的に再開された後は、本計測でデータを取得することが極めて困難な状況となった。その主たる要因は、掘削面内での計測であったため、ひずみ計からパイロットボーリング孔の孔口まで延びる FRP ロッドやケーブルを発破によって切り飛ばしながら計測するという計測方法自体にあったと思われる。今後このような測定を掘削面内で実施する場合には、ひずみ計設置位置を掘削面外にする、あるいはケーブル接続ではない別のデータ収録方法（例えば無線の接続や、計測時にのみひずみ計と接続できるようなデータ収録システム）が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 長谷川 健：“DH-2 号孔における調査研究報告書”，動力炉・核燃料開発事業団，JNC-TN7400 2000-007 (1997)
- 2) 鶴田 忠彦，藤田 有二，鑑 顕正，彌榮 英樹，富士代 秀之：“広域地下水流動研究におけるボーリング調査(DH-15 号孔)”，核燃料サイクル開発機構，JNC-TN7400 2005-025(2005)
- 3) Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I. and Miachkin, V. I. : Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pageoph, 117, pp.1025-1044. (1979)

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		SI単位	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

