

7. 掘進管理システムのデータ分析

7. 1 掘進管理システムについて

密閉型シールド工事では、掘進時の地盤性状を切羽圧やジャッキ推力等から把握するとともに、裏込注入圧・量やシールドマシンの姿勢計測等の掘進管理データを逐次入手することで安全性の高い施工を実現している。本節では、当該工事に使用されていた掘進管理データのソースとなる（１）掘進管理システム、（２）掘進指示書、（３）掘進日報について、その概略を記載する。

（１）掘進管理システム

図 7.1.1 に掘進管理システムの構成図を示す。掘進管理システムは、ジャイロセンサー、レベル計、ジャッキストローク量等によって、シールドマシンの姿勢を計測し、掘進を管理する。その他、使用ジャッキ番号、総推力、ジャッキ圧力等も計測し、中央管理室にて計測モニターを通じて常に確認できるようになっている。

図 7.1.2、図 7.1.3 にジャイロセンサー及びレベル計の設置位置、設置状況写真をそれぞれ示す。

図 7.1.4 に具体的にシールドマシンの姿勢（左右偏差及び鉛直偏差）の計測方法を示す。

・左右偏差の計測手順

- ① 掘進開始時（掘削モード＋カッタ回転＋ジャッキ伸）の代表ストローク（左右で大きい値）を最大ストロークとしてセット。
- ② 同様に左右偏差値を初期の左右偏差値としてセット。
- ③ 約 3 秒毎に以下の計算を行う。
- ④ $\text{左右偏差} = \text{前回左右偏差} + \tan(\text{ジャイロ方位角} - \text{計画方位角}) \times (\text{代表ストローク} - \text{最大ストローク}) \div 1000$
- ⑤ ここで、前回左右偏差＝左右偏差、最大ストローク＝代表ストローク、である。

・鉛直偏差の計測手順

- ① 初期掘進前に坑内の基準ユニット(h2)とシールド機内の計測ユニット(h1)との差(h2-h1)を MP-25.475m（計画標高）としてセット。
- ② $\text{鉛直偏差} = \text{MP} - 25.475 - ((h1 - h3) / 1000)$
- ③ ここで、h3 は計画標高と現在の計測ユニットとの標高差である。

上述のとおり、左右偏差（法線偏差）は、ジャイロ方位角とストローク値を用いて算出された 2 次データである。ジャイロ方位角は変動するデータではあるが、シールドマシンの位置を測量するまでは、左右偏差（法線偏差）と鉛直偏差の値によりシールドマシンの姿勢を把握することが可能である。特に、災害発生直前のシールドマシンの姿勢は、左右偏差（法線偏差）と鉛直偏差の値に頼らざるを得ない。

掘進管理システム
構成図
(O57T 本掘進時)

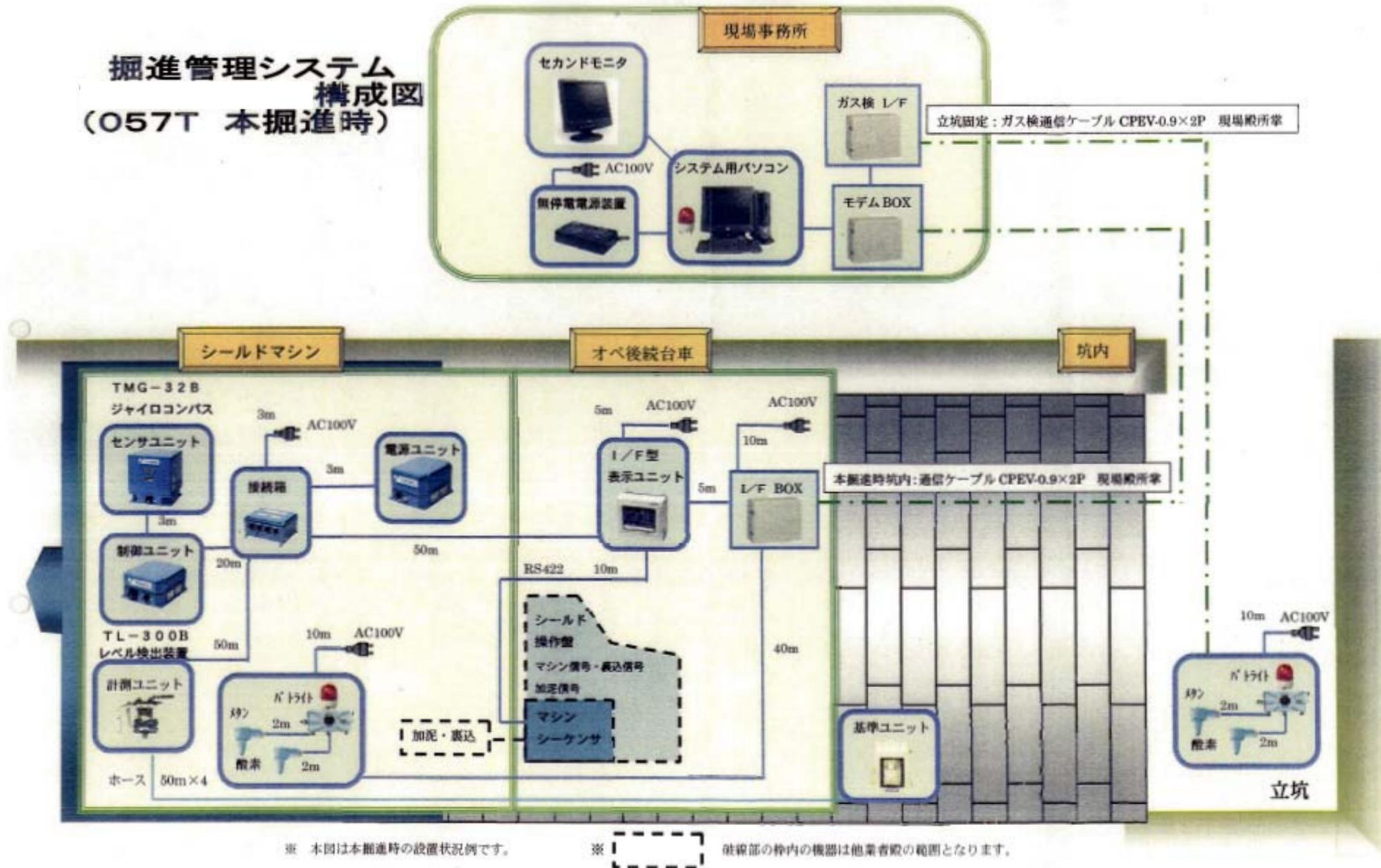
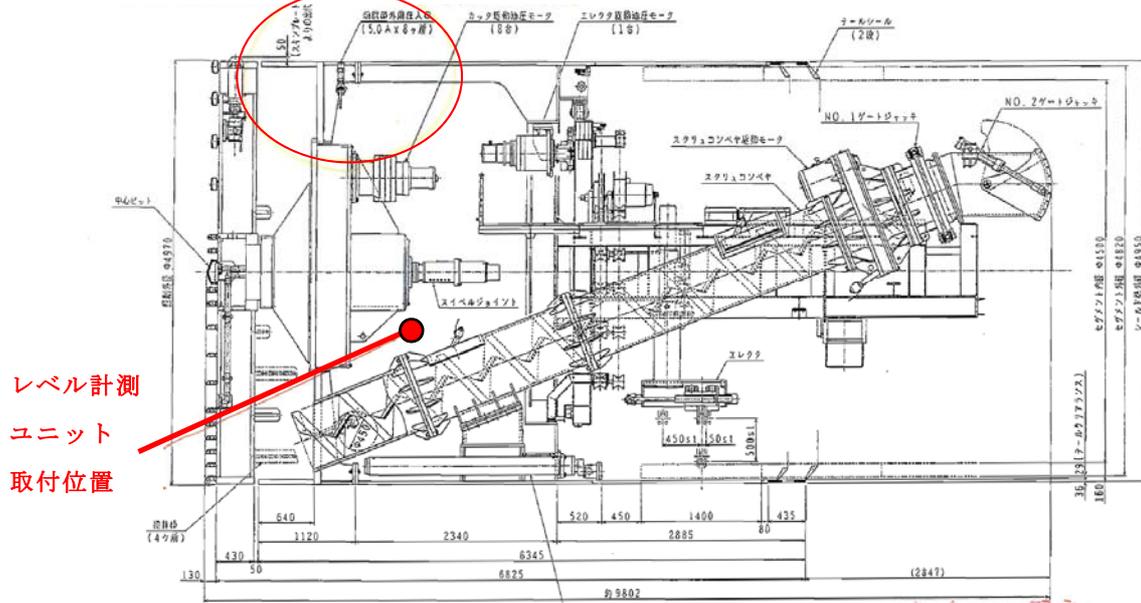


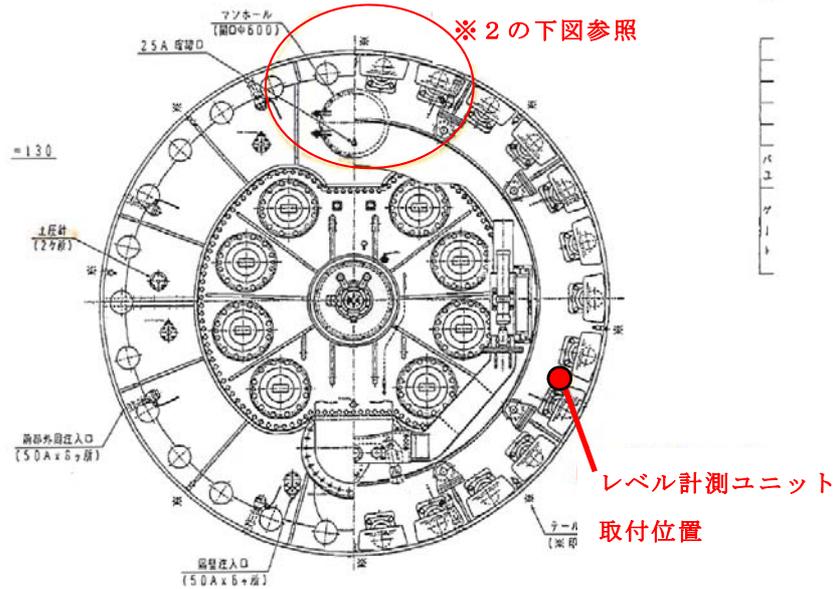
図 7.1.1 掘進管理システムの概略図

ジャイロ取付箇所 ※1の下図参照

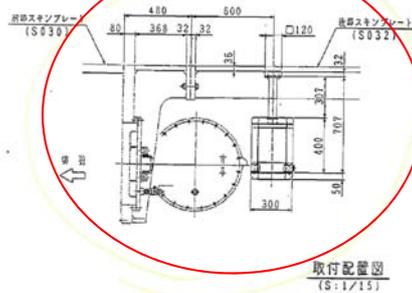


ジャイロ取付箇所

※2の下図参照



※1



※2

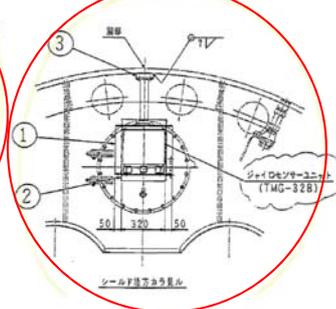
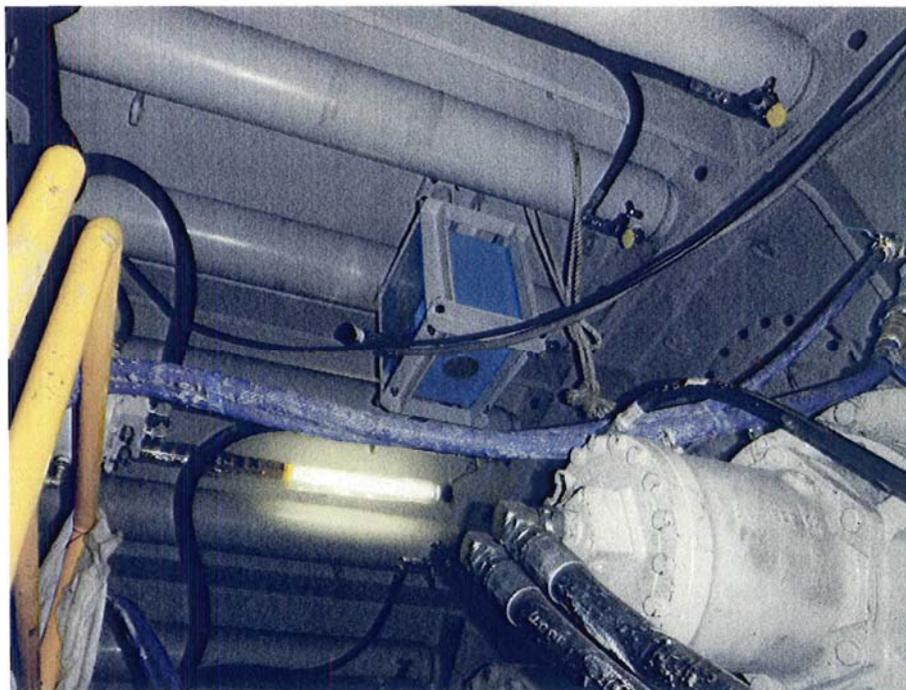
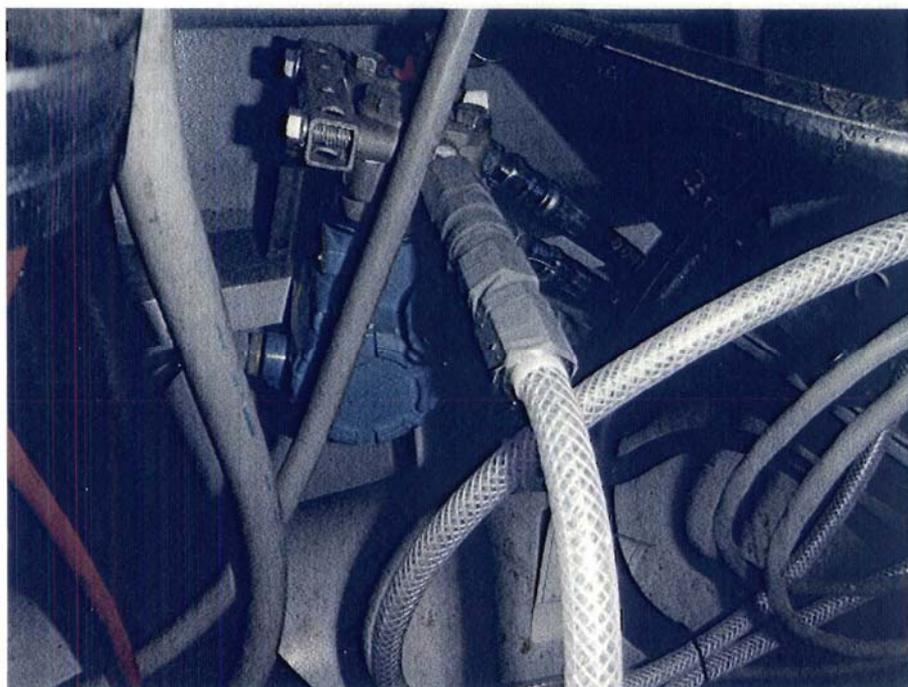


図 7.1.2 ジャイロセンサー及びレベル計の設置位置



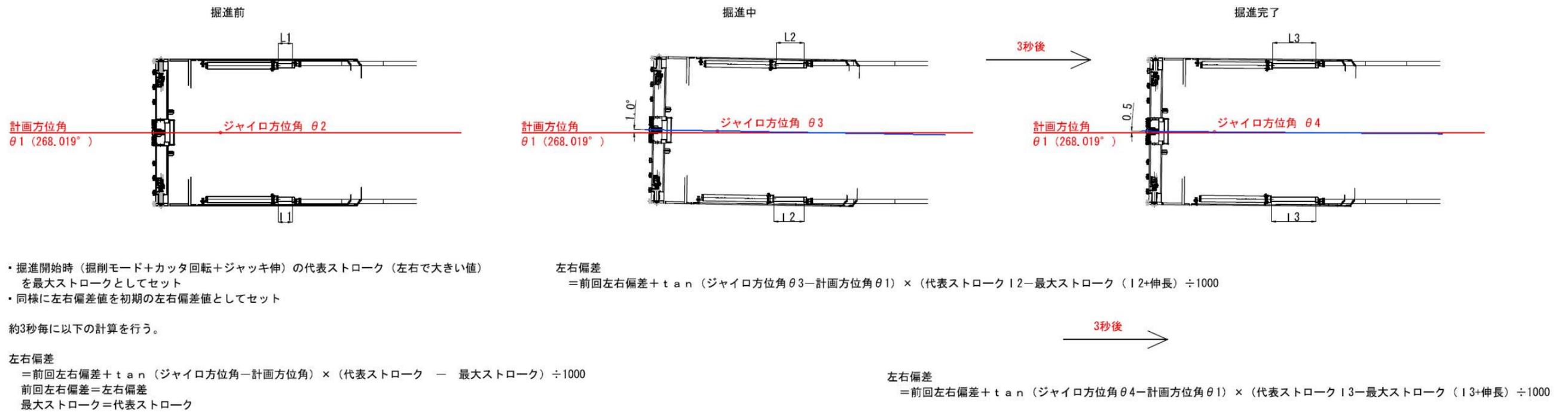
(a) ジャイロセンサーの設置状況



(b) レベル計の設置状況

図 7.1.3 ジャイロセンサー及びレベル計の設置状況写真

【左右偏差】



【鉛直偏差】

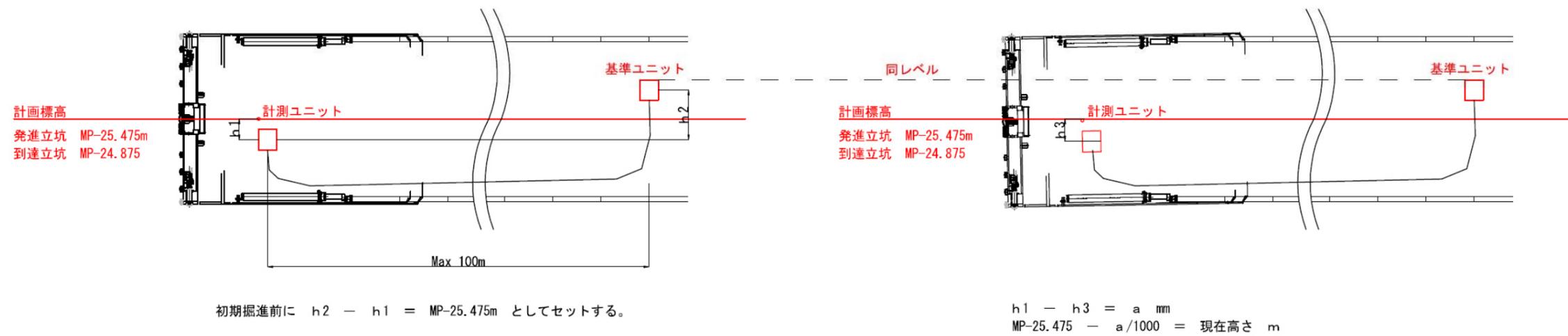


図 7.1.4 左右偏差（法線偏差）と鉛直偏差の計測方法

(2) 掘進指示書

当該工事では、掘進管理システムの他にも坑内からトランシット、コンベックス等を用いて、セグメント及びシールドマシンの法線偏差（左右偏差）、標高偏差（鉛直偏差）、テールクリアランス、真円度等を計測していた。それらの結果と掘進管理システムのジャッキストローク、ピッチング、ジャイロ方位角等をまとめ、それに基づき、昼勤、夜勤ごとに次の勤務に向けた掘進指示書を施工者が作成していた。表 7.1.1 は災害発生前、2012 年 2 月 7 日昼勤に向けた指示書である。作成されたのは、同年 2 月 6 日夜勤後である。

同表の掘進指示書から、標高偏差に着目すると、108 リングのセグメントとシールドマシンの後ろは 11mm の差があることがわかる。シールドマシンのターゲットの位置を図 7.1.5 に示す。ターゲットの位置は、

マシン前：エレクター付近（定点）

マシン後：エレクターから坑口側（テールブラシまでの間の定点）

であり、休憩時間や昼勤・夜勤の交代時などの合間をみて、トランシットやレベル計により計測していた。

ターゲット間の距離は、図 7.1.5 から $1.021\text{m} = 1021\text{mm}$ である。表 7.1.1 からマシン前の標高偏差 3mm、マシン後の標高偏差 2mm であるから、その傾きを算出すると、 $\text{atan}[(3\text{mm}-2\text{mm})/1021\text{mm}] \times 180^\circ / \pi = 0.056^\circ$ となり、マシンピッチングの値 0.12° と若干の差はあるが傾向は一致している。しかしながら、法線偏差を見ると、マシン前の法線偏差-271mm、マシン後の法線偏差-269mm となり、切羽に向かって左向きであるのに対し、ジャイロ方位角は切羽に向かって右向きを示しており、傾向が異なっている。この原因は定かではない。

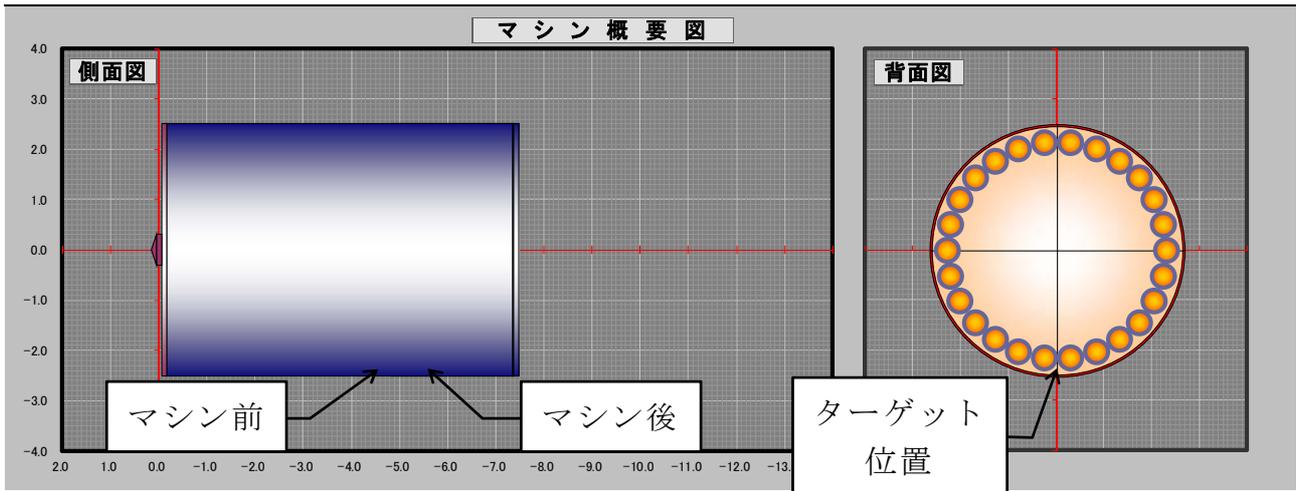
同表の掘進指示書の下欄には、『測量では、セグメントがマシンを抜けてから左と上方向に動いている結果となっています。』とある。このことから、シールドマシンのテール部からセグメントが荷重を受けていることがわかる。

テールクリアランスについては、図 7.1.6 に示すように、シールドマシンの内径とセグメントの外径の差をコンベックスにより計測している。上下のテールクリアランスは、シールドマシンの中心を通る上下の位置で計測しており、左右のテールクリアランスは、シールドジャッキ No.7 と No.20 の上あたりで計測している。上下の合計値と左右の合計値の差でセグメントリングの真円度を計測している。

真円度は上下真円度の方が左右真円度よりも小さくなっており、セグメントリングが縦につぶれる（横に広がる）ような変形を呈していることがわかる。シールドマシンのテール部からセグメントが下方に押され、このような変形を呈したものと推察される。

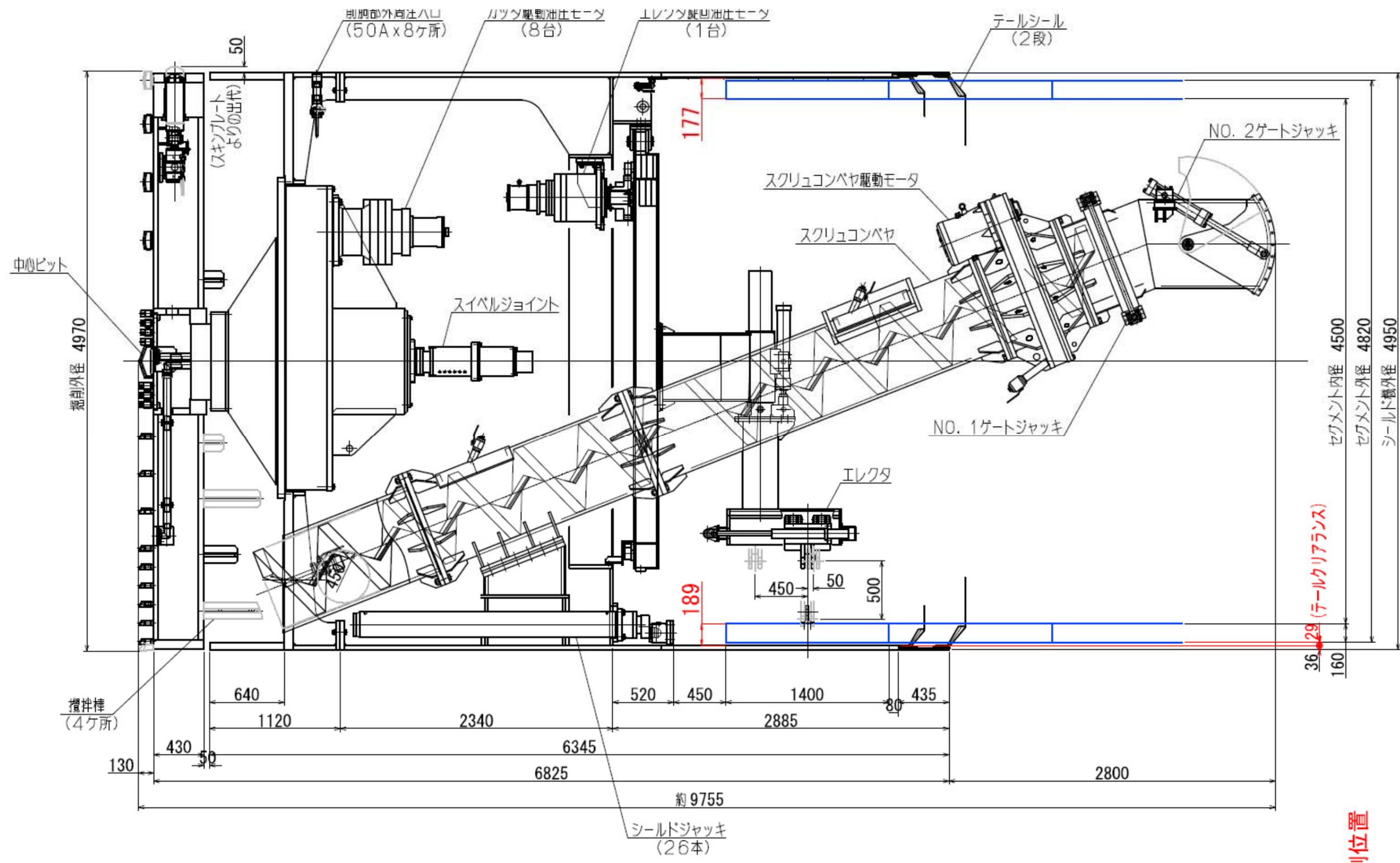
表 7.1.1 掘進指示書 (2012年2月7日昼に宛てたもの、2月6日夜勤務後作成)

平成24年 2月7日(火)		(昼) ・ 夜 掘進指示書																									
2月6日	(夜) 出来高	押 105~109R	計 5R																								
組く押しあがり	組	104~108R	計 5R																								
◆ 測量結果																											
<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>C</td><td>27</td></tr> <tr><td>S</td><td>1908</td></tr> </table>		C	27	S	1908	<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>左</td><td>12</td><td>mm</td><td>勝ち</td></tr> <tr><td>下</td><td>7</td><td>mm</td><td>勝ち</td></tr> </table>		左	12	mm	勝ち	下	7	mm	勝ち												
C	27																										
S	1908																										
左	12	mm	勝ち																								
下	7	mm	勝ち																								
<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>C</td><td>27</td></tr> <tr><td>S</td><td>1917</td></tr> </table>		C	27	S	1917	<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>C</td><td>35</td></tr> <tr><td>S</td><td>1905</td></tr> <tr><td>左右真円度</td><td>6</td></tr> </table>		C	35	S	1905	左右真円度	6														
C	27																										
S	1917																										
C	35																										
S	1905																										
左右真円度	6																										
<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>C</td><td>29</td></tr> <tr><td>S</td><td>1915</td></tr> <tr><td>上下真円度</td><td>-6</td></tr> </table>		C	29	S	1915	上下真円度	-6	<table border="1" style="margin-bottom: 5px;"> <tr><td>設計</td><td>0.044</td><td>deg</td><td>差(+上)</td><td>0.076</td><td>deg</td></tr> <tr><td>設計</td><td>268.02</td><td>deg</td><td>差(+右)</td><td>0.281</td><td>deg</td></tr> <tr><td>設計</td><td>0.077</td><td>%</td><td>差(+上)</td><td>-0.076</td><td>%</td></tr> </table>		設計	0.044	deg	差(+上)	0.076	deg	設計	268.02	deg	差(+右)	0.281	deg	設計	0.077	%	差(+上)	-0.076	%
C	29																										
S	1915																										
上下真円度	-6																										
設計	0.044	deg	差(+上)	0.076	deg																						
設計	268.02	deg	差(+右)	0.281	deg																						
設計	0.077	%	差(+上)	-0.076	%																						
◆ 掘進指示																											
No.	R-No.	セグメント種別	鉛直偏差	方位角	水平偏差	ピッチング																					
1.	109R	標準・(インサートA) インサートB・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
2.	110R	(標準) インサートA・インサートB・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
3.	111R	(標準) インサートA・インサートB・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
4.	112R	標準・インサートA・(インサートB)・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
5.	113R	(標準) インサートA・インサートB・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
6.	114R	(標準) インサートA・インサートB・インサートC・蛇行修正	—	268.3~268.4	—	0.05~0.10																					
<p>・水平方向：今後100Rで50mm右に寄せます。5Rで2~3mm右に寄せる計算です。 ジャイロ268.20~268.30では、右に向いて行かない測量結果なので、ジャイロ268.30~268.40の間で掘進して下さい。</p> <p>・高さ方向：ピッチングを0.10前後で維持してください。</p> <p>・測量では、セグメントがマシンを抜けてから左と上方向に動いている結果となっています。</p> <p>・土被りが薄くなってきており、地山も若干変化していますので噴発する恐れがあります。土圧、推力、排土状況に特に注意して下さい。</p> <p>・セグメントの「キャップ・ボルト」がなくなりそうな時は、早めに教えてください。</p>																											

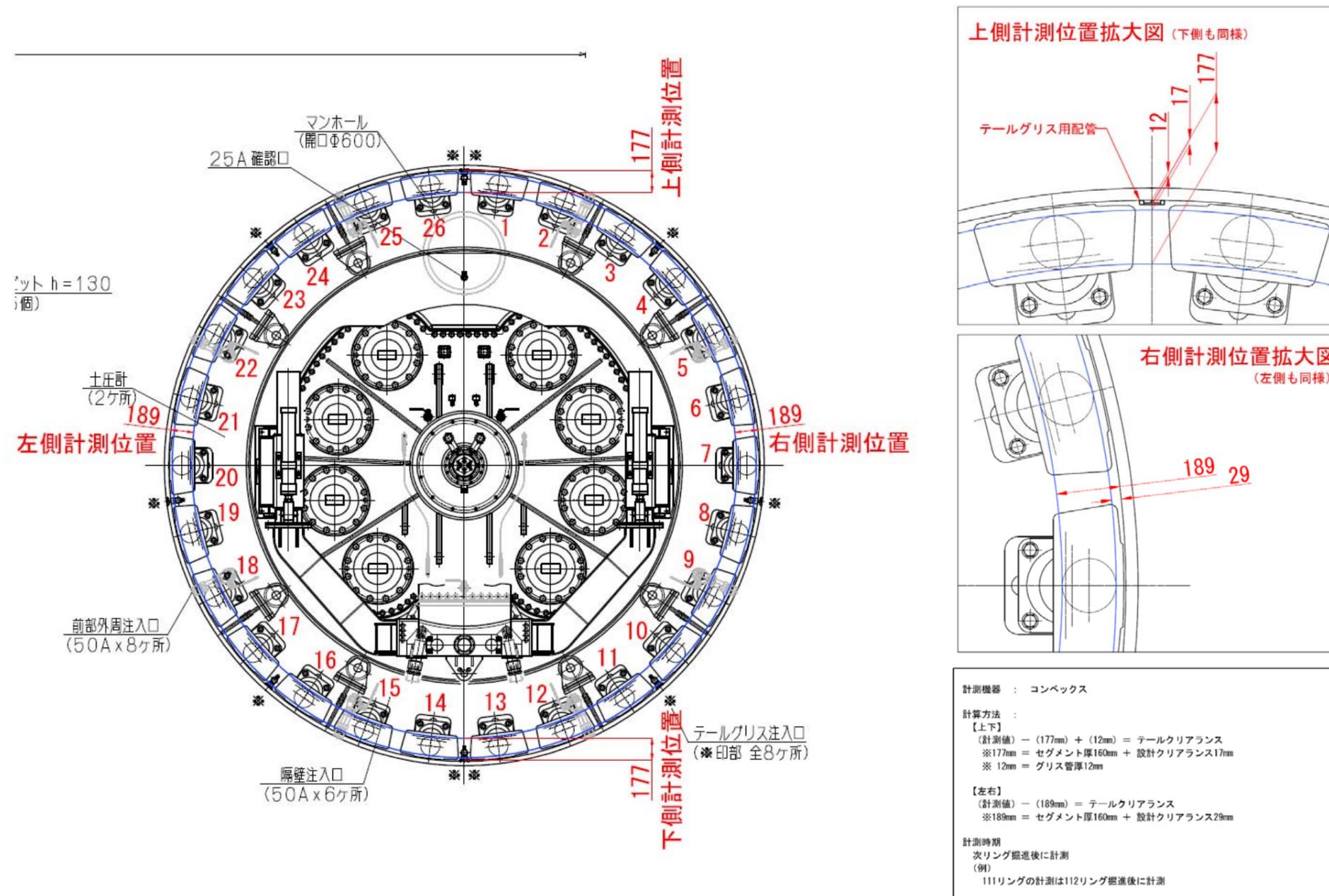


登録					
マシンターゲット表					
測点ID	測点名	前後距離 (m)	左右距離 (m)	上下距離 (m)	前胴/後胴
1	マシン前	-4.578	0.000	-2.439	前胴
2	マシン後	-5.599	0.000	-2.439	前胴

図 7.1.5 シールドマシン内のターゲットの位置



(a) テールクリアランスの計測位置 (側面図)



(b) テールクリアランスの計測位置 (テール部と詳細図)

図 7.1.6 テールクリアランスの計測位置

(3) 掘進日報

掘進指示書に合わせて、現場では 1 リングごとに掘進日報も作業員が記載することとなっていた。表 7.1.2 は 81～85 リング、105～109 リングの掘進日報である。

同表から 82 リングの K セグメントが割れていること、85 リングでは裏込め注入材がテール部から坑内に出てきたことがわかる。また、104 リングでは再度 K セグメントが割れている。

その他、掘進日報では、加泥材、裏込め注入材の量も記載するようになっている。

表 7.1.2 掘進日報
(a) 81~85 リング

掘進日報		平成 22 年 月 日 () 昼・夜										
運転者:		81		82		83		84				
リングNo.	81		82		83		84					
セグメントタイプ	標準・インナーA・インナーB・インナーC・走行修正		標準・インナーA・インナーB・インナーC・走行修正		標準・インナーA・インナーB・インナーC・走行修正		標準・インナーA・インナーB・インナーC・走行修正		標準・インナーA・インナーB・インナーC・走行修正			
掘削開始時間	0時 35分		10時 44分		12時 49分		14時 40分		16時 45分			
掘削終了時間	7時 47分		時 分		13時 51分		15時 56分		17時 52分			
土 圧	280~340 Mpa		Mpa		Mpa		Mpa		280~360 Mpa			
カッター圧力	1500~2000 Mpa		Mpa		Mpa		Mpa		1500~2000 Mpa			
ジャッキ速度	40~80 mm/min		mm/min		mm/min		mm/min		mm/min			
使用ジャッキ	コビー使用種類	方向	コビー使用種類	方向	コビー使用種類	方向	コビー使用種類	方向	コビー使用種類	方向		
	コビーストローク	mm	コビーストローク	mm	コビーストローク	mm	コビーストローク	mm	コビーストローク	mm		
ジャッキ位置		[Diagram]		[Diagram]		[Diagram]		[Diagram]		[Diagram]		
ジャッキストローク	No.3	前進量	460 mm	No.2	前進量	mm	No.3	前進量	480 mm	No.3	前進量	480 mm
	No.3	前進後	1703 mm	No.3	前進後	mm	No.3	前進後	1097 mm	No.3	前進後	1876 mm
ジャッキ方位	No.3	掘削開始	268.188 度	No.3	掘削開始	267.55 度	No.3	掘削開始	268.57 度	No.3	掘削開始	268.60 度
	No.3	掘削終了	268.30 度	No.3	掘削終了	268.14 度	No.3	掘削終了	269.78 度	No.3	掘削終了	268.12 度
レベル	No.3	掘削開始	254.76 mm	No.3	掘削開始	254.10 mm	No.3	掘削開始	254.70 mm	No.3	掘削開始	254.06 mm
	No.3	掘削終了	254.07 mm	No.3	掘削終了	254.06 mm	No.3	掘削終了	254.06 mm	No.3	掘削終了	254.09 mm
ローリング	No.3	掘削開始	0.26 度	No.3	掘削開始	0.50 度	No.3	掘削開始	-0.03 度	No.3	掘削開始	0.33 度
	No.3	掘削終了	0.35 度	No.3	掘削終了	-0.04 度	No.3	掘削終了	-0.35 度	No.3	掘削終了	0.39 度
ピッチング	No.3	掘削開始	-0.01 度	No.3	掘削開始	0.03 度	No.3	掘削開始	0.08 度	No.3	掘削開始	0.07 度
	No.3	掘削終了	0.04 度	No.3	掘削終了	0.03 度	No.3	掘削終了	0.04 度	No.3	掘削終了	0.07 度
掘土状況	固め・良好・軟弱・硬塊		固め・良好・軟弱・硬塊		固め・良好・軟弱・硬塊		固め・良好・軟弱・硬塊		固め・良好・軟弱・硬塊			
土 質	砂・砂礫・粘土・その他		砂・砂礫・粘土・その他		砂・砂礫・粘土・その他		砂・砂礫・粘土・その他		砂・砂礫・粘土・その他			
加 差	タックスルー 951 [L]		タックスルー 976 [L]		タックスルー 948 [L]		タックスルー 890 [L]		タックスルー 936 [L]			
掘込め	A深	2100	B深	120	A深	2157	B深	123	A深	2280	B深	128
	合計			合計			合計		合計			
備 考					82R K29"				7-16.0S表裏からマ きた			

2012年 2月 15日 17時 22分
全量掘進機
NO.4073 P.7

(b) 105~109 リング

運転者:		掘削日報										平成 22 年 月 日 () 昼・夜			
リングNo.	105		106		107		108		109						
セグメントタイプ	標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		標準・Cサ-A・Cサ-B・Cサ-C・総行修正		
掘削開始時間	20 時 19 分		21 時 32 分		23 時 02 分		1 時 02 分		3 時 05 分						
掘削終了時間	20 時 48 分		22 時 27 分		0 時 09 分		2 時 16 分		3 時 50 分						
主 圧	280~320 Mpa		270~330 Mpa		280~330 Mpa		270~340 Mpa		270~340 Mpa						
カッター圧力	1500~2000 Mpa		1500~2100 Mpa		1500~2100 Mpa		1500~2100 Mpa		1500~2100 Mpa						
ジャッキ速度	40~50 mm/min		40~50 mm/min		40~50 mm/min		40~50 mm/min		40~50 mm/min						
後戻りジャッキ	コピ-使用範囲 方向		コピ-使用範囲 方向		コピ-使用範囲 方向		コピ-使用範囲 方向		コピ-使用範囲 方向						
	コピ-ストローク min		コピ-ストローク min		コピ-ストローク min		コピ-ストローク min		コピ-ストローク min						
ジャッキ種類	油中から使用 △ 油中で使用 ×		油中から使用 △ 油中で使用 ×		油中から使用 △ 油中で使用 ×		油中から使用 △ 油中で使用 ×		油中から使用 △ 油中で使用 ×						
ジャッキストローク	No.1 掘削前 460 mm 掘削後 1883 mm		No.1 掘削前 463 mm 掘削後 1888 mm		No.1 掘削前 470 mm 掘削後 1894 mm		No.1 掘削前 467 mm 掘削後 1892 mm		No.1 掘削前 477 mm 掘削後 1886 mm						
	No.2 掘削前 471 mm 掘削後 1892 mm		No.2 掘削前 473 mm 掘削後 1895 mm		No.2 掘削前 483 mm 掘削後 1897 mm		No.2 掘削前 480 mm 掘削後 1896 mm		No.2 掘削前 488 mm 掘削後 1888 mm						
ジャイロ方位	掘削開始 268.47 度 掘削終了 268.03 度		掘削開始 268.32 度 掘削終了 268.28 度		掘削開始 268.35 度 掘削終了 268.23 度		掘削開始 268.31 度 掘削終了 268.27 度		掘削開始 268.47 度 掘削終了 268.24 度						
レベル	掘削開始 253.85 mm 掘削終了 253.82 mm		掘削開始 253.81 mm 掘削終了 253.79 mm		掘削開始 253.76 mm 掘削終了 253.74 mm		掘削開始 253.76 mm 掘削終了 253.73 mm		掘削開始 253.74 mm 掘削終了 253.72 mm						
ローリング	掘削開始 -0.06 度 掘削終了 0.27 度		掘削開始 0.27 度 掘削終了 0.47 度		掘削開始 0.41 度 掘削終了 0.77 度		掘削開始 0.17 度 掘削終了 0.33 度		掘削開始 0.32 度 掘削終了 0.18 度						
ピッチング	掘削開始 0.05 度 掘削終了 0.03 度		掘削開始 0.09 度 掘削終了 0.10 度		掘削開始 0.15 度 掘削終了 0.21 度		掘削開始 0.15 度 掘削終了 0.11 度		掘削開始 0.19 度 掘削終了 0.21 度						
土 質 状 況	固め・良好・軟弱・破砕		固め・良好・軟弱・破砕		固め・良好・軟弱・破砕		固め・良好・軟弱・破砕		固め・良好・軟弱・破砕						
加 速	タックスルー 719 [L] クレイシヨック 92 [L]		タックスルー 726 [L] クレイシヨック 96 [L]		タックスルー 726 [L] クレイシヨック 94 [L]		タックスルー 724 [L] クレイシヨック 92 [L]		タックスルー 888 [L] クレイシヨック 91 [L]						
掘削量	A液 172 L B液 93 L		A液 160 L B液 150 L		A液 168 L B液 96 L		A液 174 L B液 125 L		A液 222 L B液 128 L						
備 考	104R 掘削機 76 (CK)														

2012年 2月 15日 17時30分

全機工機株式会社 掘削部

NO.4073 P. 2

7. 2 シールドマシンの軌跡

図 7.2.1 に掘進指示書から読み取ったテールクリアランスとリング No.の関係を示す。また、掘進日報に記載されていたコメントも合わせて示している。掘進日報には、85R において『テールから裏込めがでました』との記述がある。同図から 85 リングでテール部から裏込め注入材が坑内に漏れてきた後、テールクリアランスの値が一定値となり、設計テールクリアランスとほぼ同等になっている。これらのことから、テールブラシ内に裏込め注入材が入り固着したものと考えられる。なお、後述する第 9 章 9.2.2 や本報告書の巻末参考資料『テールブラシの固着物の分析，裏込め注入材とテールシール材との混合物の一軸圧縮試験結果，p.1~p.74』によると，テールブラシ内の固着物から，裏込め注入材やテールシール材の成分が検出されている。また，裏込め注入材と当該現場でテールシール材として使用された止水材が混ざり合った場合，裏込め注入材単体よりも強度を発揮することを確認した。

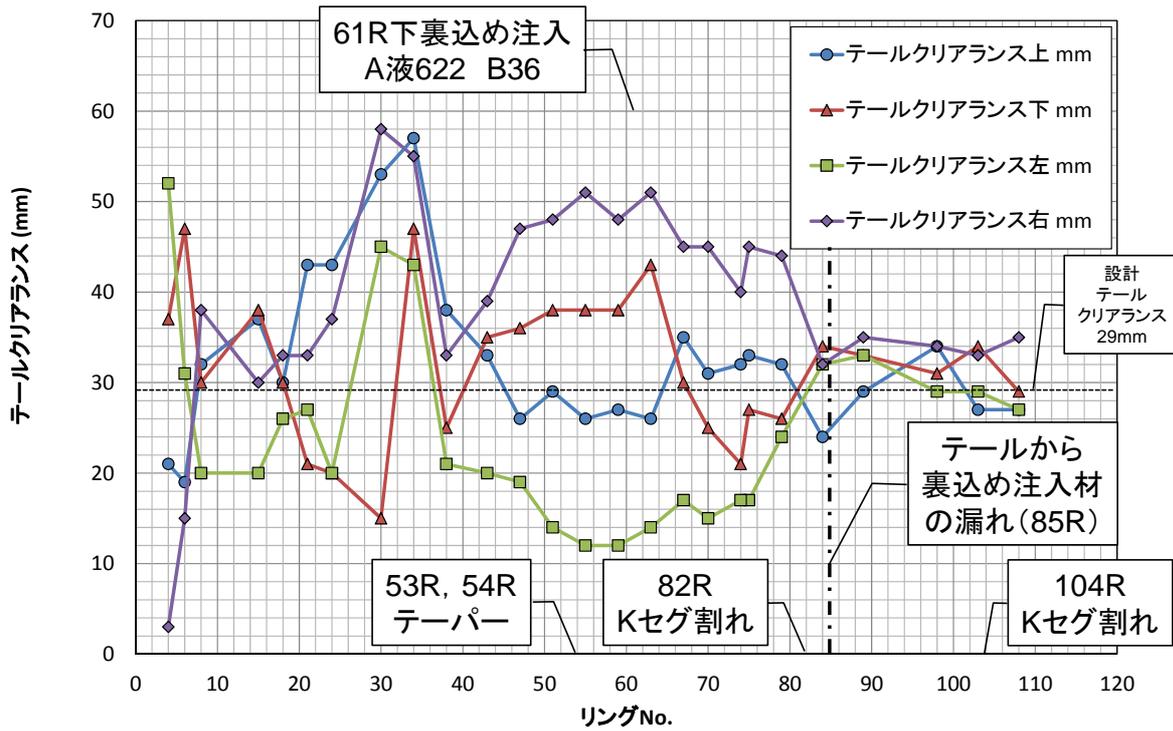
図 7.2.2 に法線偏差（左右偏差）とリング No.の関係を示す。同図には掘進指示書に記載されていた測量に基づく「セグメント（測量結果）」と「マシン前後（測量結果）」の法線偏差だけでなく、掘進管理システムのデータから計測されたシールドマシンの左右偏差（法線偏差）も示している。同図から 26 リング以降、法線偏差の値が-197.9mm（約-200mm）と急激に大きくなっている。

発進立坑を掘削した時に立坑がわずかに回転していたため，立坑の発進口が設計計画線から許容範囲内ではあるがわずかにずれていた。発進口のコンクリートはシールドマシンが掘削しやすいように予め作製されていた。発進口からシールドマシンを発進させるため，立坑のずれ量及び回転量が多いほど，実際のトンネルの線形に誤差を含むこととなる。一般的に，そのずれ量及び回転量は初期掘進後の線形管理により補正する。後続台車の長さはシールドマシントール部から約 33m であるから，約 33m 以上は発進口からほぼ直線的に横坑を構築しなければならず，施工上の計画線に沿ってほぼ直進していたものと推察される。法線偏差が急激に大きくなった 26 リング付近は切羽延長距離にして約 36m であり，26 リング付近から線形の補正ができるようになるかと推察される。そのため，26 リング付近で再度精密な測量を実施し，設計計画線からの法線偏差及び鉛直偏差を正確に計測したと考えられる。したがって，26 リング以降，設計計画線からの法線偏差を精密に測量した結果，法線偏差の値が-197.9mm となったものと推察される。

また，同図から 85 リング以降，掘進管理システムデータであるシールドマシンの法線偏差と測量データであるセグメントの法線偏差の値が異なる傾向を示している。セグメントはわずかに左方向に向かっているのに対し，シールドマシンは右へ右へとセグメントを設計計画線に戻そうとしていることがわかる。掘進管理システムデータのシールドマシンの法線偏差（左右偏差）は，図 7.1.4 で示したように，ジャイロ方位角とジャッキストローク量（ジャッキ No.7 と No.20）から算出している。このため，シールドマシンが右を向きながら真っ直ぐに進んでいたとしても，シールドマシンの法線偏差の値は増加（より右向き）することとなる。裏込め注入材がテールブラシ内で固結した場合，シールドマシンを右に向けると，セグメントはシールドマシンから押され，より余裕のある左へ遷移する。したがって，85 リング以降，

トンネルの線形を修正しようとシールドマシンを右に向けることによって、逆にセグメントは左へ向かうという現象が発生していたと推察される。

図 7.2.3 に同じく法線偏差 (左右偏差) と切羽延長距離の関係を示す。同図から「セグメント (測量結果)」は設計計画線 (方位角 268.02 度) に対して 0.035 度左に向いていることがわかる。



(注：□内は掘進日報の備考欄から記載)

図 7.2.1 テールクリアランスとリング No.の関係

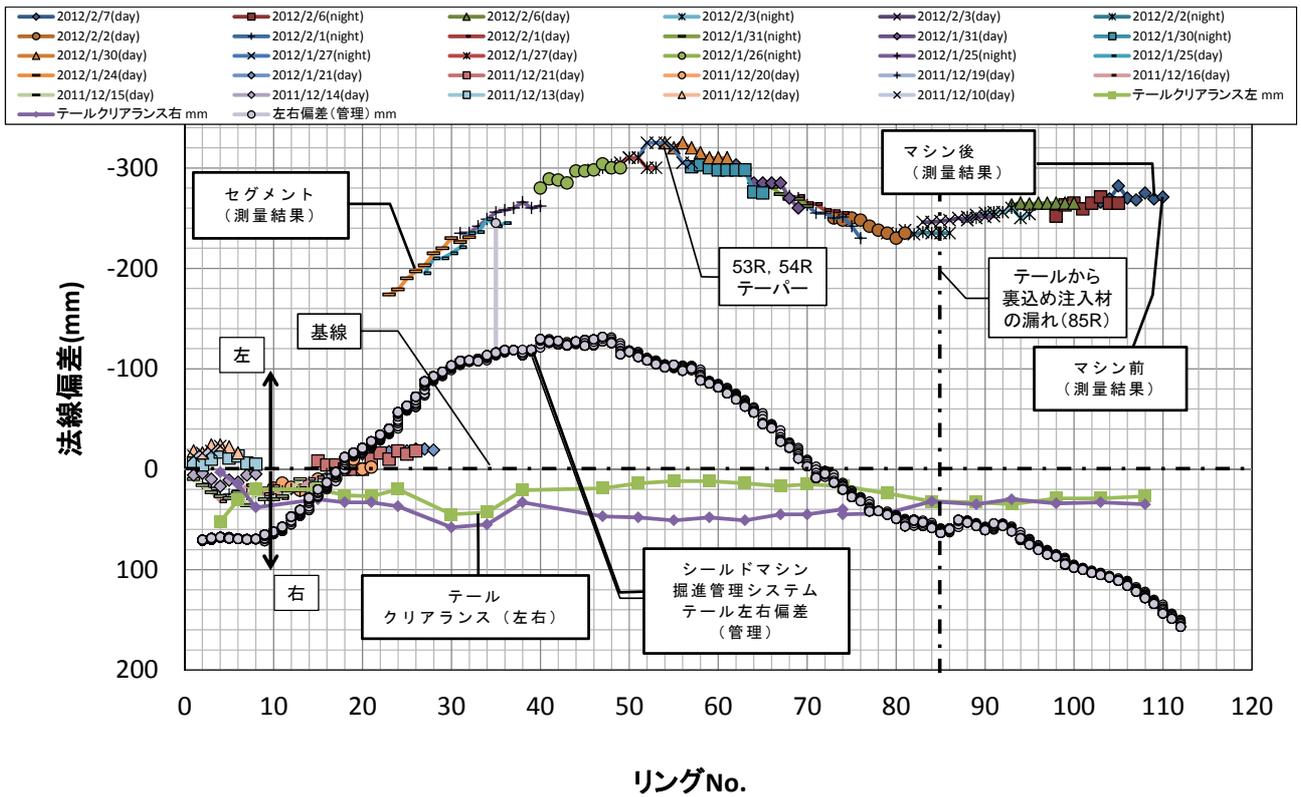


図 7.2.2 法線偏差（左右偏差）とリング No.の関係

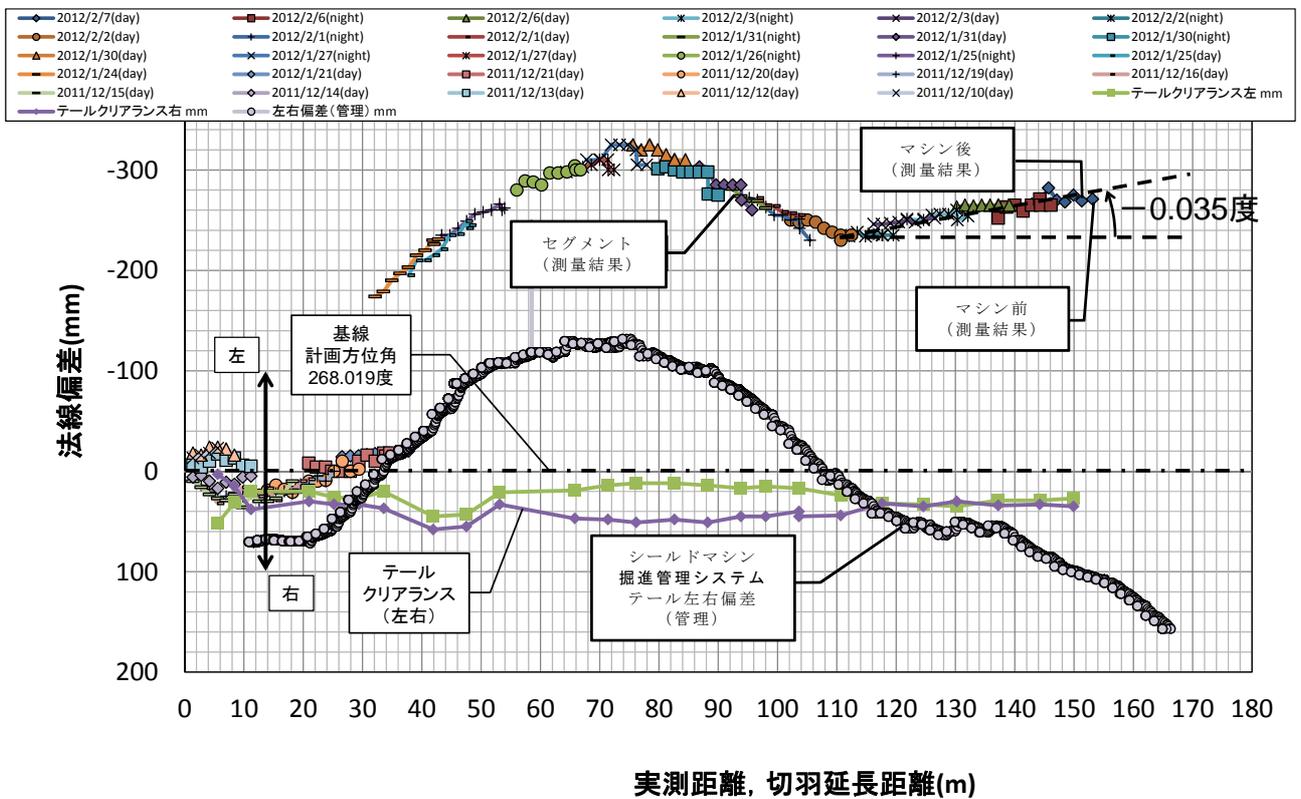


図 7.2.3 法線偏差（左右偏差）と切羽延長距離の関係

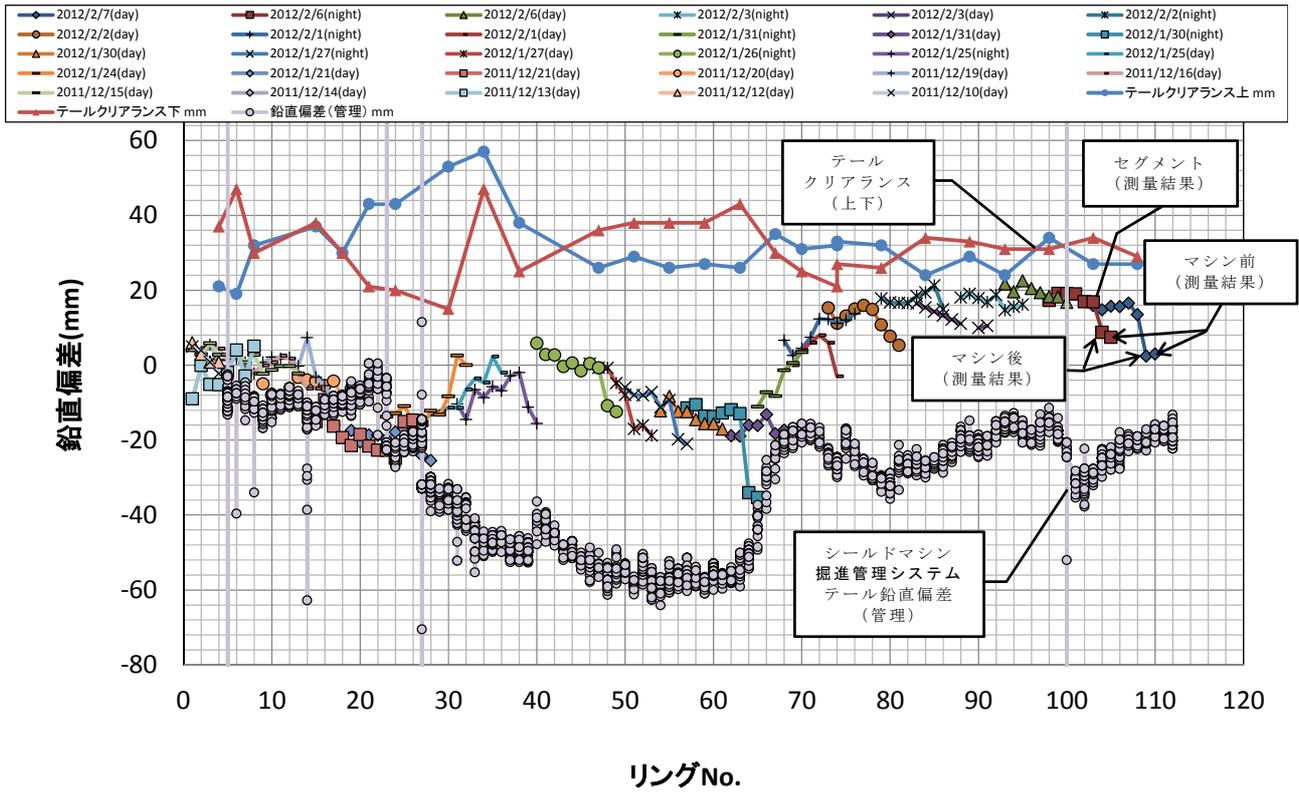


図 7.2.4 鉛直偏差とリング No.の関係

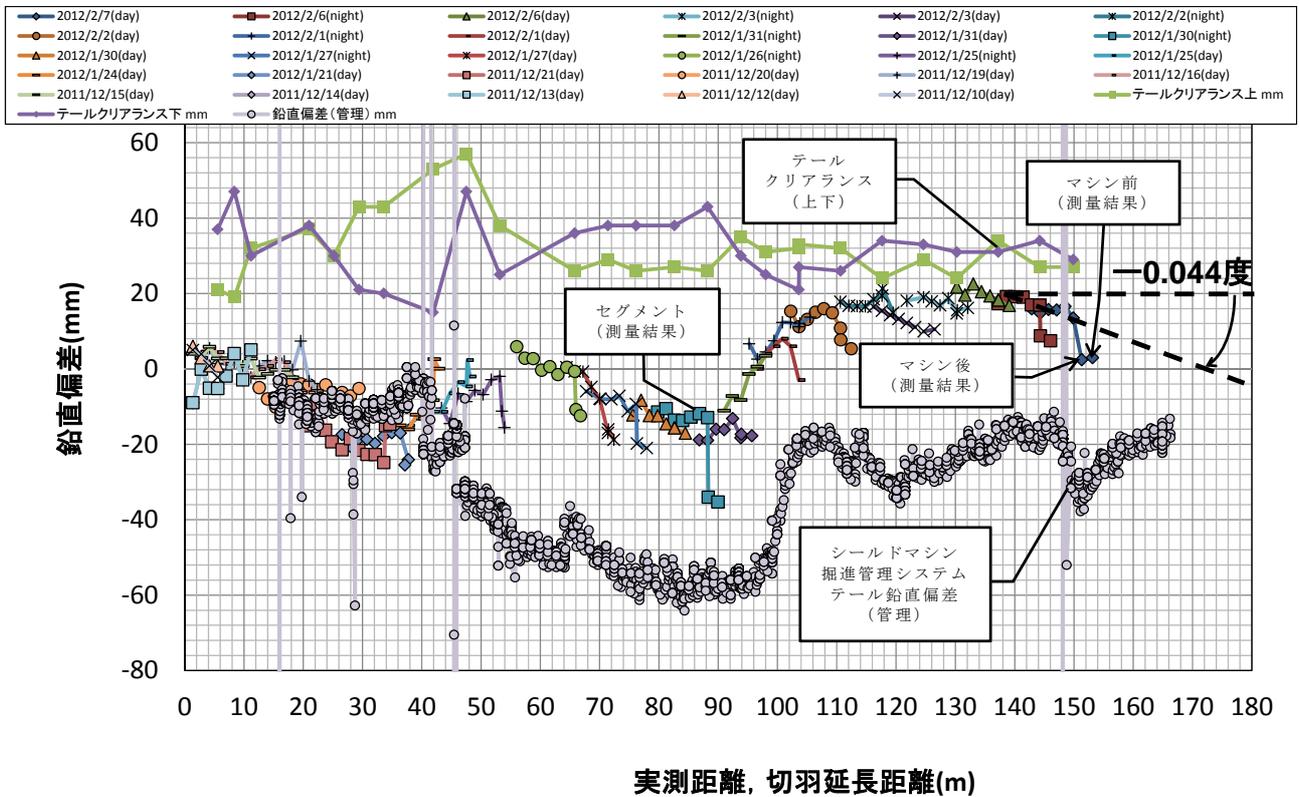


図 7.2.5 鉛直偏差と切羽延長距離の関係

図 7.2.4、図 7.2.5 に鉛直偏差（標高偏差）とリング No.の関係、鉛直偏差と切羽延長距離の関係をそれぞれ示す。先ほどと同様、掘進指示書から読み取った「セグメント（測量結果）」と「マシン前後（測量結果）」の標高偏差の値、掘進管理システムからシールドマシンの鉛直偏差及びテールクリアランス（上下）をプロットしている。図 7.2.4 から、100 リング以降、「マシン前後（測量結果）」と「セグメント（測量結果）」の鉛直偏差の差が大きくなっていることがわかる。つまり、セグメントがシールドマシンを抜けてから上方向に動いていたことがわかる。また、図 7.2.5 から、99 リング以降のセグメント（測量結果）の標高偏差と切羽延長距離の関係からセグメントの傾きを算出すると、0.044 度下向きであった。これに対し、掘進管理システムデータによると、シールドマシンの姿勢は上向きであり、シールドマシンのテール部が結果的にセグメントを下方に押し付ける形になっているものと推察される。

セグメントの蛇行修正には、テーパセグメントの挿入、コピーカッタによる一方向への余掘りの拡大等が挙げられる。

当該工事で使用する全セグメントリングの総数は 557 リングである。その内、テーパリングは 20 リング含まれている。つまり、標準のセグメントリングが 537 リング、テーパリングが 20 リングである。当該工事では 5、6、24、32、39、53、54、62 リングにテーパリングを使用しており、20 リング中 8 リング（40%）を使用していた。総数 557 リング中、災害発生時には 111 リングまで組み上がっており、20%程度の進捗状況であった。進捗状況に対して、テーパリングの使用割合が多くなっており、62 リング以降テーパリングの使用を控えていた可能性も示唆される。

コピーカッタの使用に関して、掘進管理システムのデータから「コピーカッタストローク」及び「コピーカッタ位置」とリング No.の関係を示す。掘進管理システムのデータは 2、3 秒毎に各項目のデータを出力するが、初期掘進から 112 リングまでのデータ量を 1 つの図面で示すと容量が大きくなり過ぎることから、1 分間隔のデータに間引いて示している。したがって、1 分以内の間に動きがあった場合には図示されていない可能性もある。コピーカッタストロークは、-15mm から 0mm まで変化しており、負値の場合は、コピーカッタがシールドマシン外径から出現していない状態を示していると考えられる。一方、正值の場合は、シールドマシン外径からコピーカッタが出現している状態を示し、「コピーカッタ位置」の地盤を「コピーカッタストローク」量ほど掘削すると考えられる。

同図からコピーカッタストロークは 27 リングと 108 リングで反応している。27 リングは 2011 年 12 月と 2012 年 1 月の年末年始に当たり、シールドマシンは停止している状態であると考えられる。108 リングについて、2、3 秒毎に出力された掘進管理システムのデータを詳細に見ると、2012 年 2 月 7 日 3:04:57 から 3:05:04 まで 8 秒ほど、コピーカッタストロークが -10 → 50 → 50 → -14mm と変化しているが、証言等から誤操作であると考えられる。それ以外の掘進ではコピーカッタを使用しておらず、初期掘進から災害発生までコピーカッタを使用していないようである。なお、コピーカッタ位置は 0 度から 360 度まで変化しており、シールドマシン切羽面のカッタの動きに合わせてコピーカッタも回転するためだと考えられる。

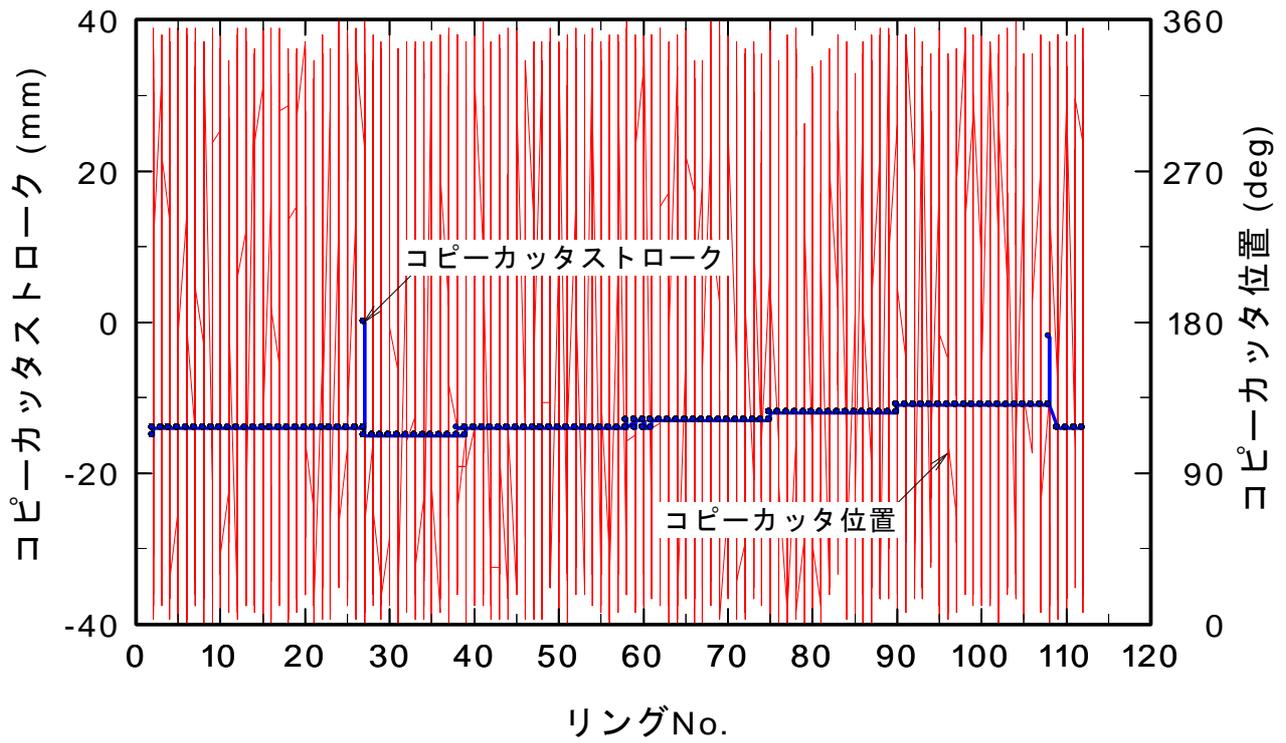


図 7.2.6 コピーカッタストローク及びコピーカッタ位置とリング No.の関係

7. 3 災害発生時のシールドマシンの動き

ここでは、主に掘進管理システムのデータから、災害発生直前のジャッキ操作、切羽圧の変化、ジャイロとピッチングの変化、セグメントとシールドマシンの位置関係について述べる。

7. 3. 1 ジャッキ操作

掘進管理システムのデータから使用したシールドジャッキ No.、総推力等がわかるため、どのジャッキを押したり抜いたりしているかがわかる。

図 7.3.1 は災害発生日である 2012 年 2 月 7 日（火）の掘進が終了した時点からのジャッキ操作の図を示したものである。赤丸で示した箇所が使用しているジャッキである。枠内左下に総推力の上昇が記載されている場合（例えば p.7-23 右上図）、ジャッキがセグメントを押している。したがって、それ以外はジャッキを抜いていることになる。切羽から坑口を見るように図を示している。

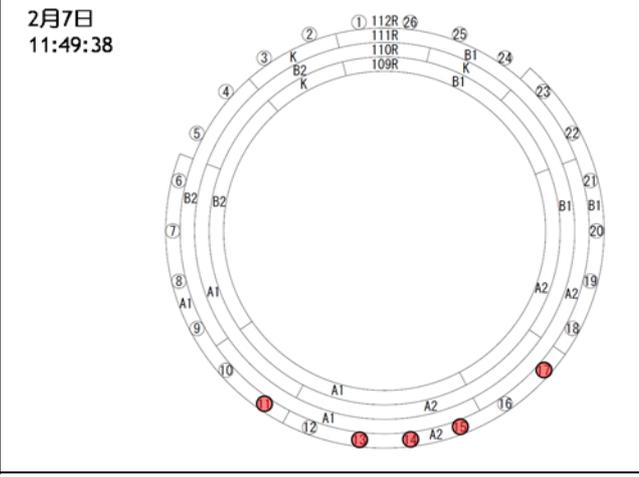
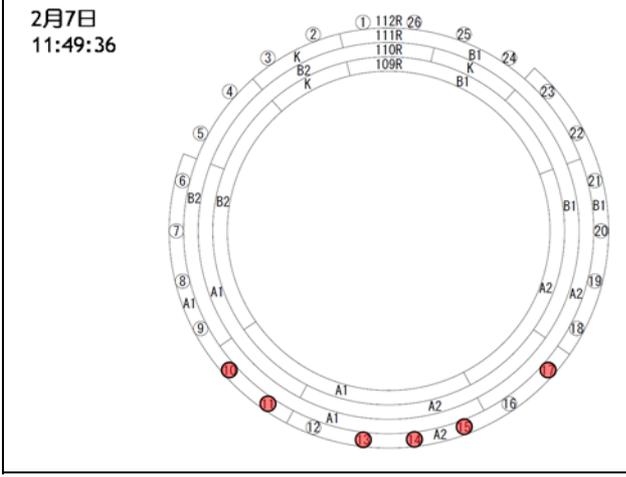
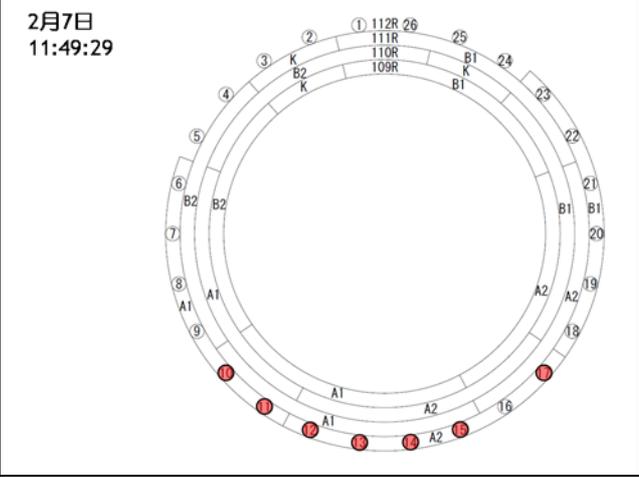
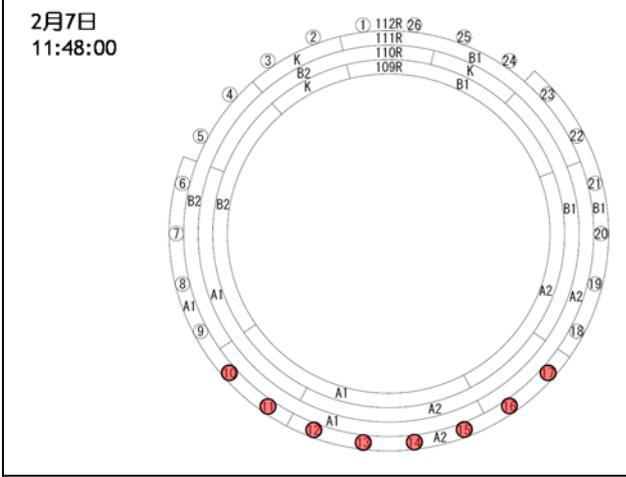
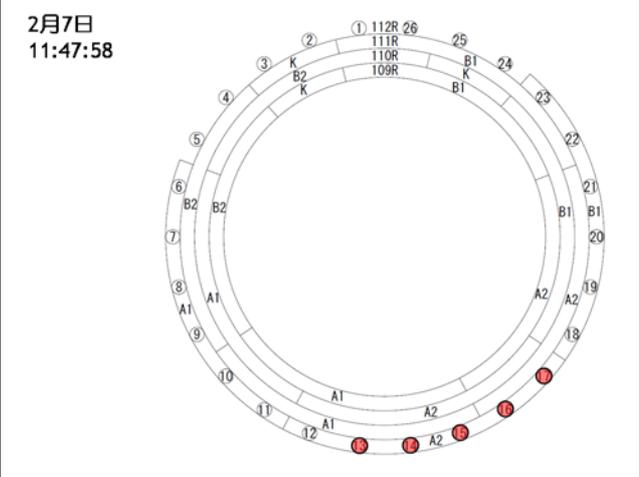
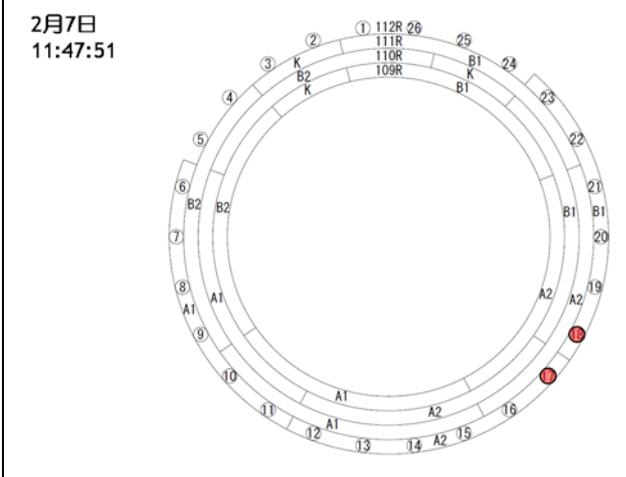
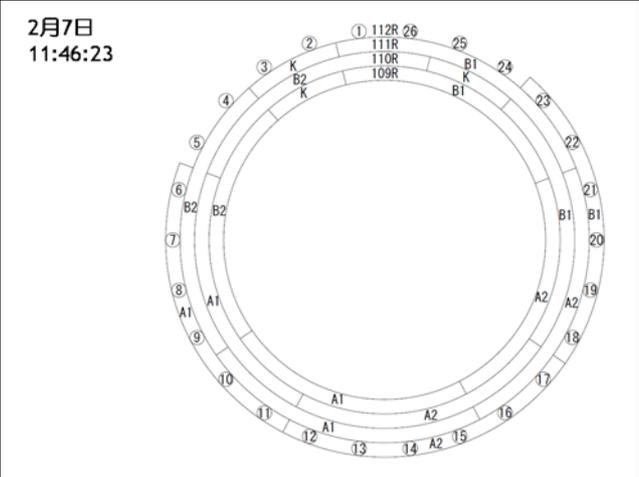
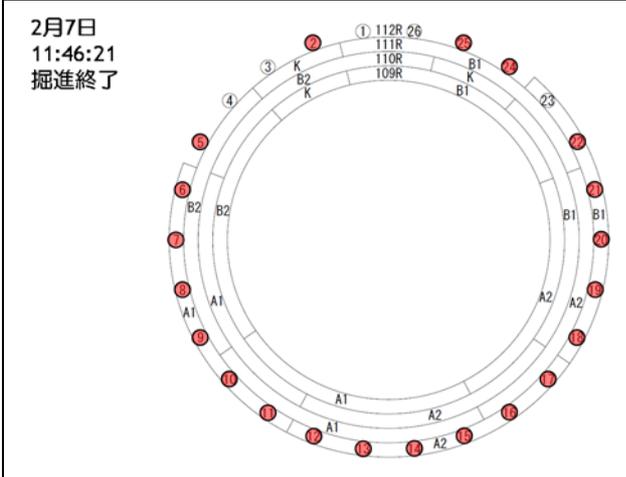
同図から、掘進時には計 21 本のジャッキを使用していることがわかる（11：46：21 時点）。まず、11：47：51～11：52：09 まで 112 リングの A2 セグメントにかかるジャッキを抜いていることから、同 A2 セグメントを挿入しようとしていることがわかる。挿入後、11：52：12 からジャッキ総推力が上昇しており、同 A2 セグメントが挿入されたことを示している。

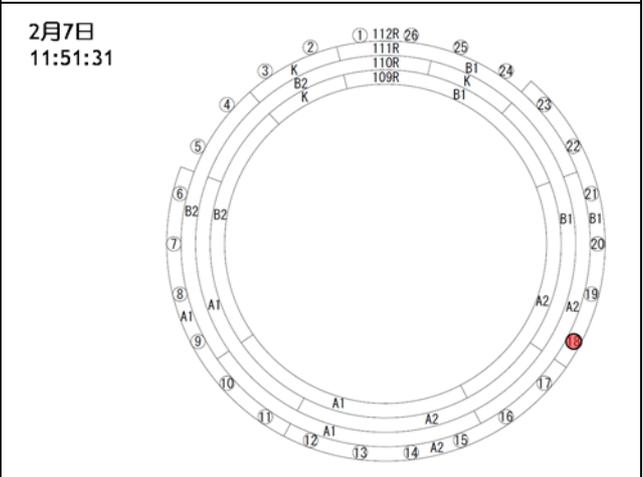
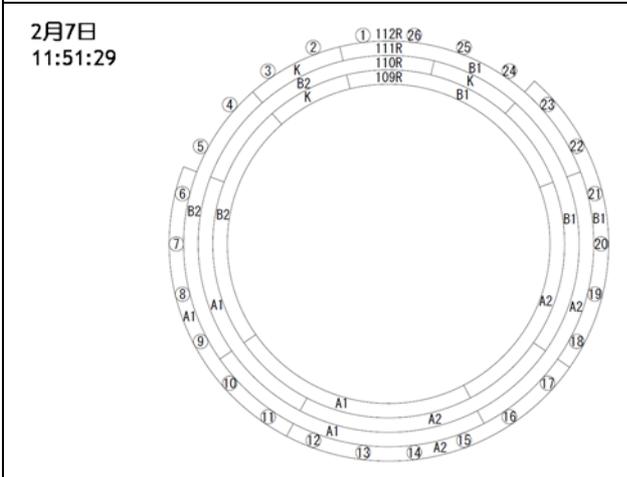
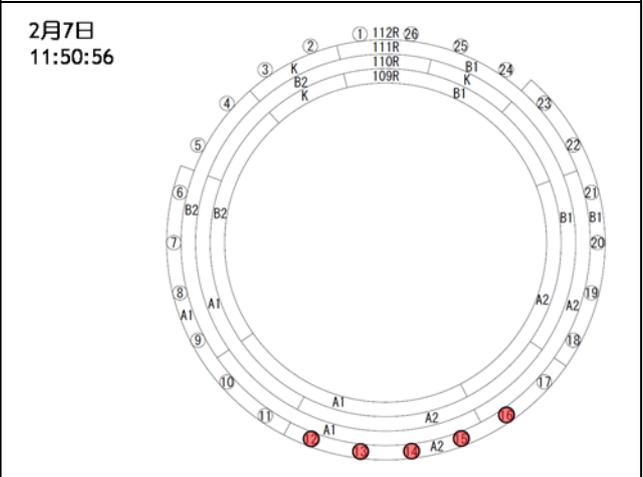
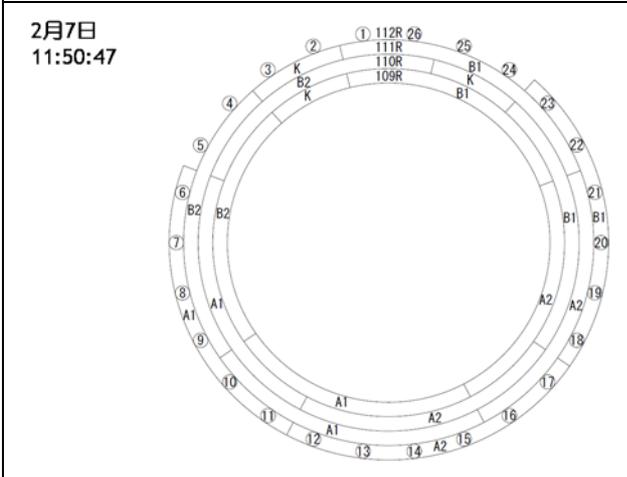
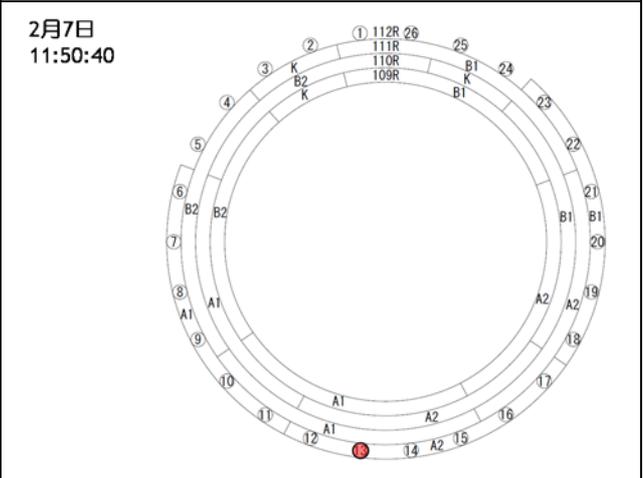
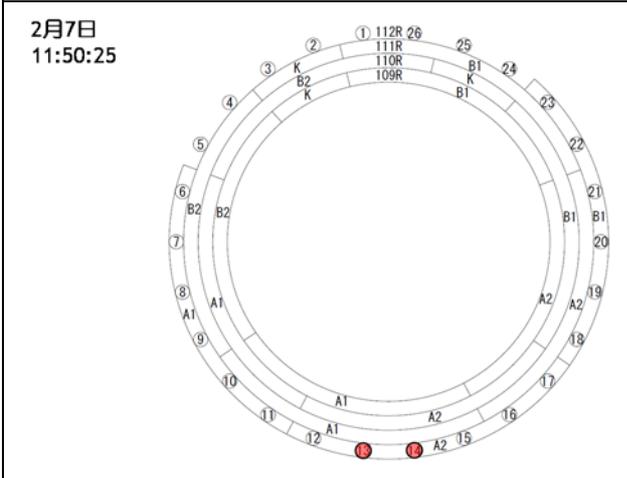
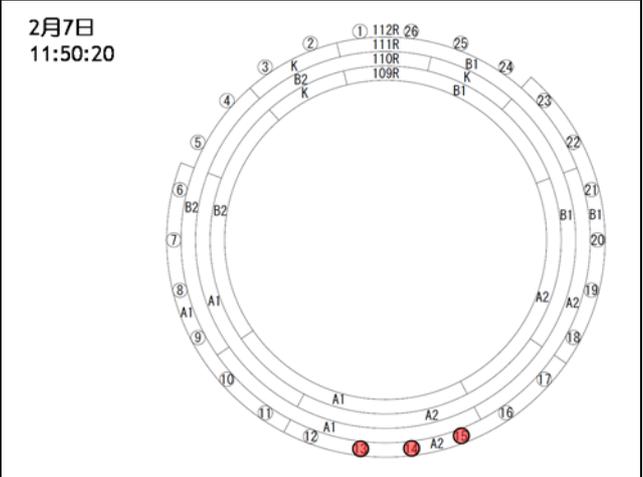
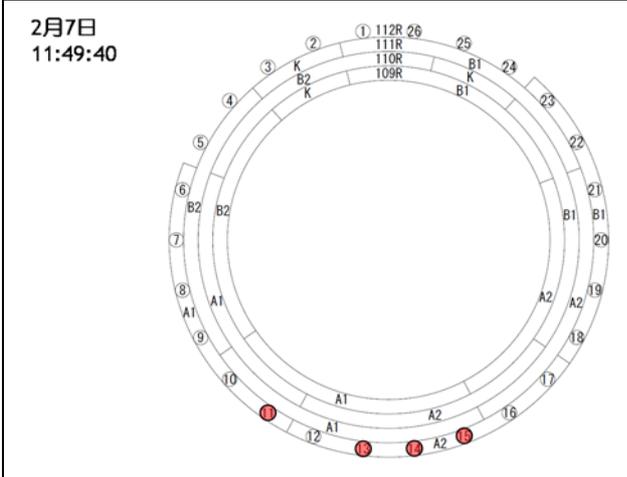
同様に、11：58：21 に 112 リングの A1 セグメントが挿入されている。

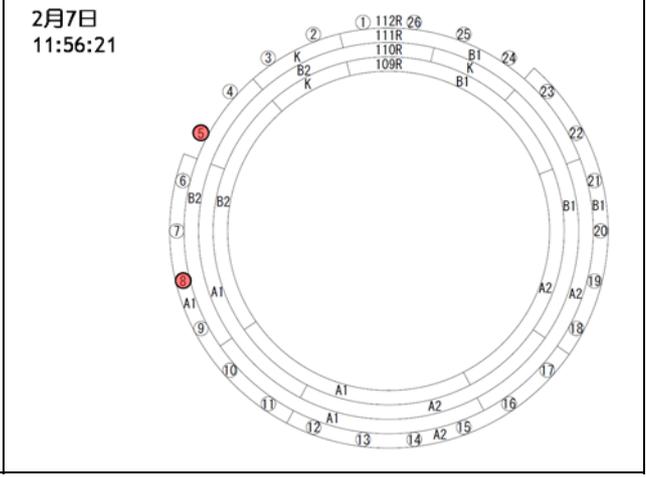
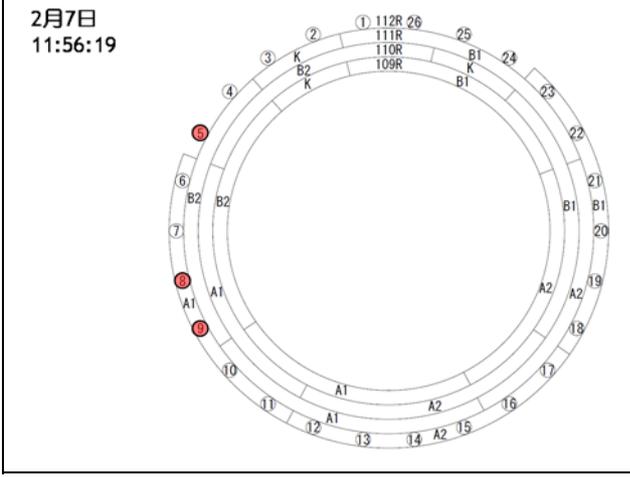
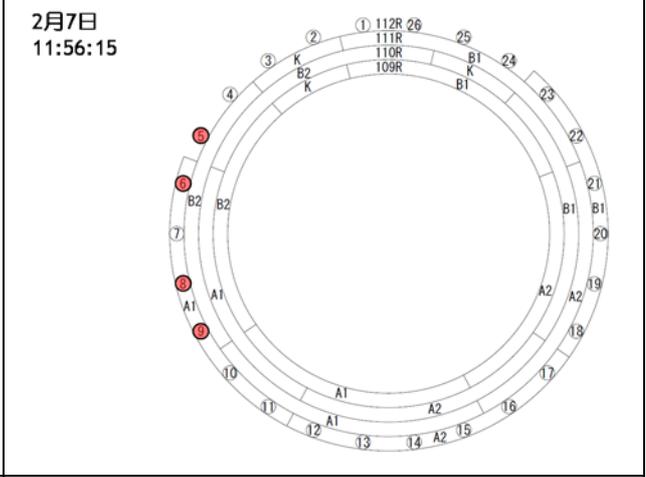
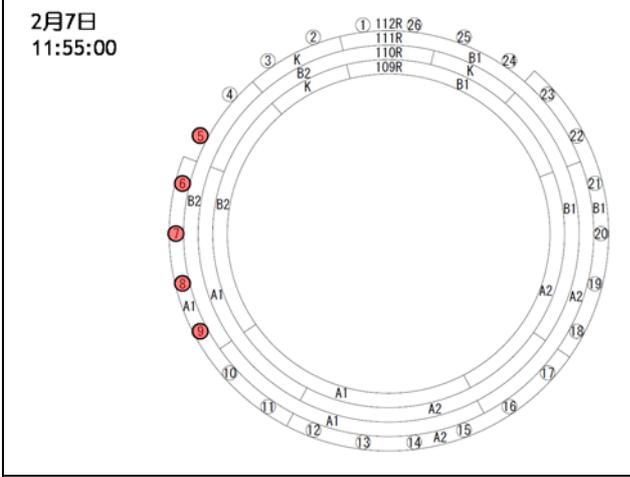
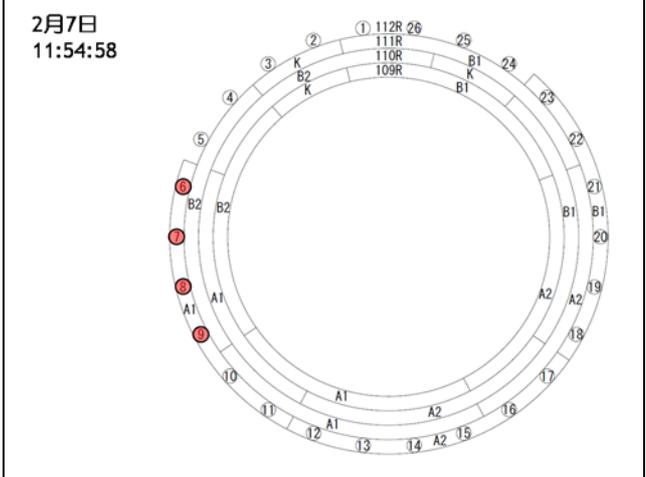
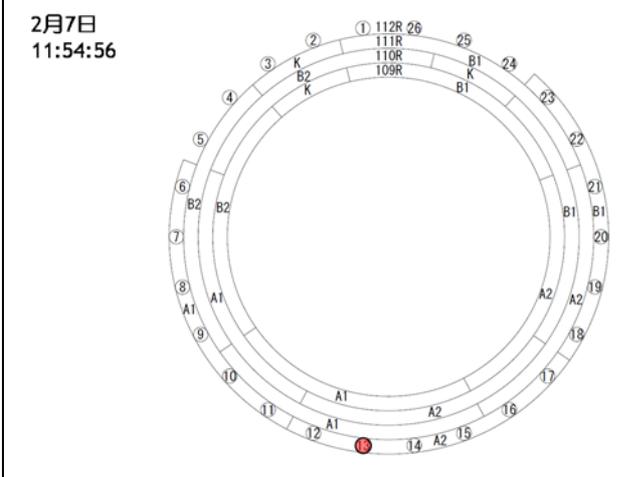
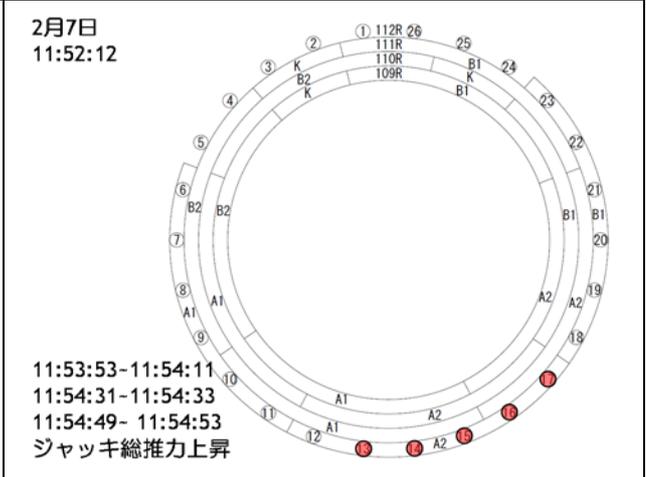
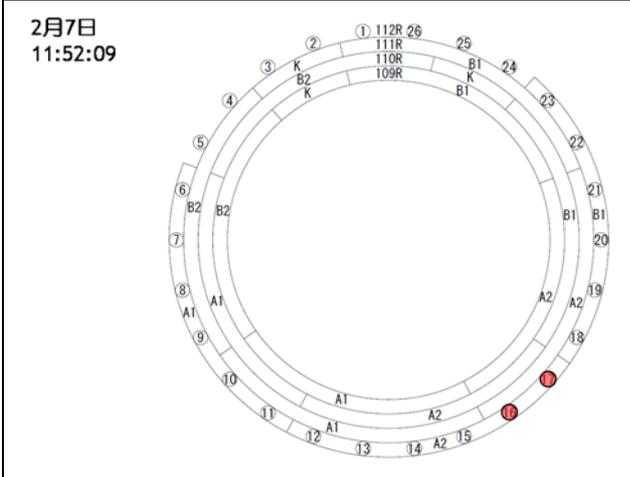
また、12：03：30 に 112 リングの B1 セグメントも挿入されている。

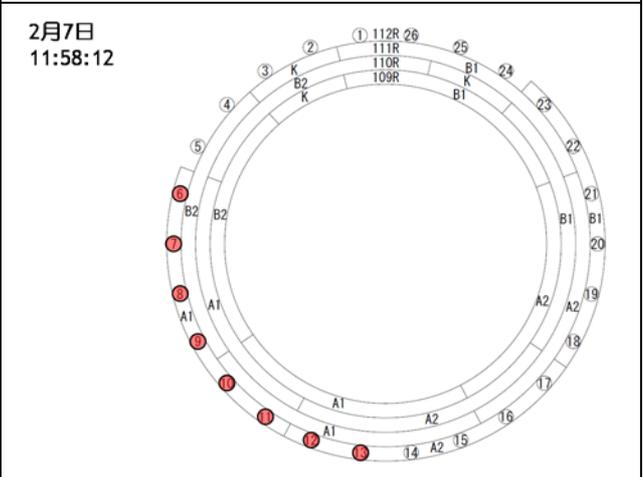
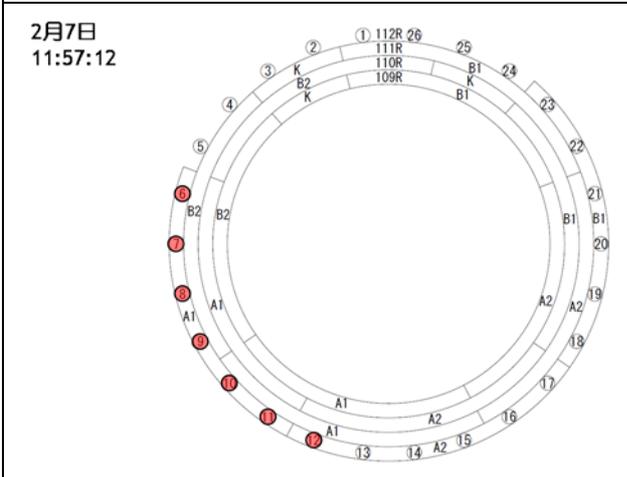
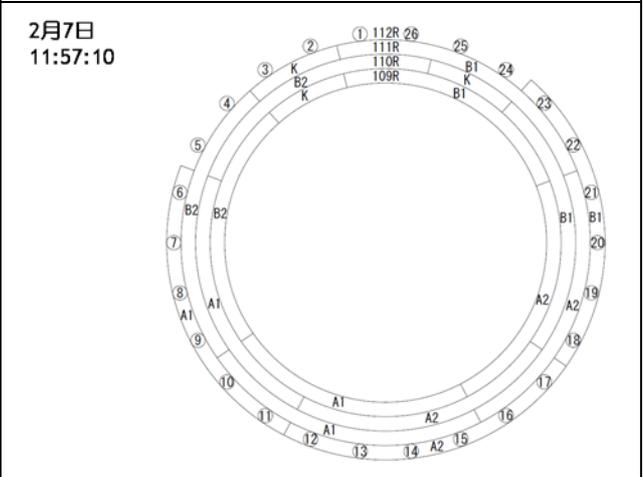
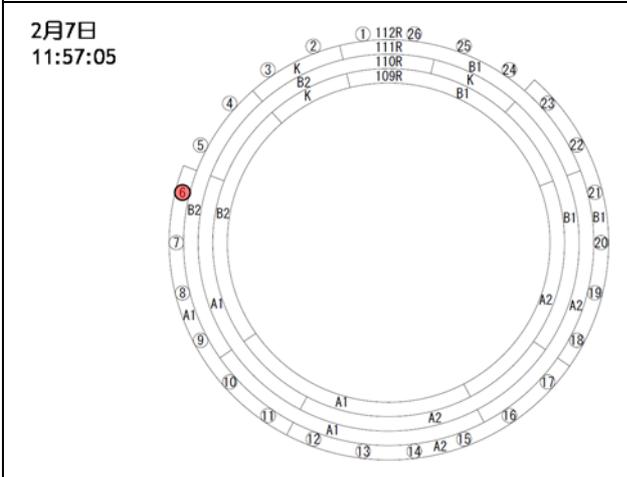
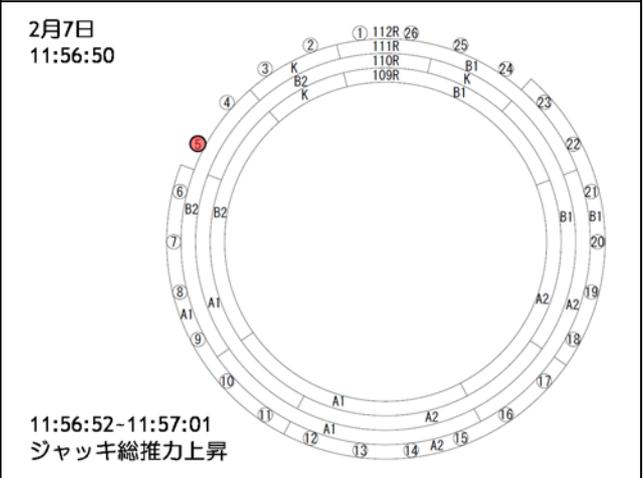
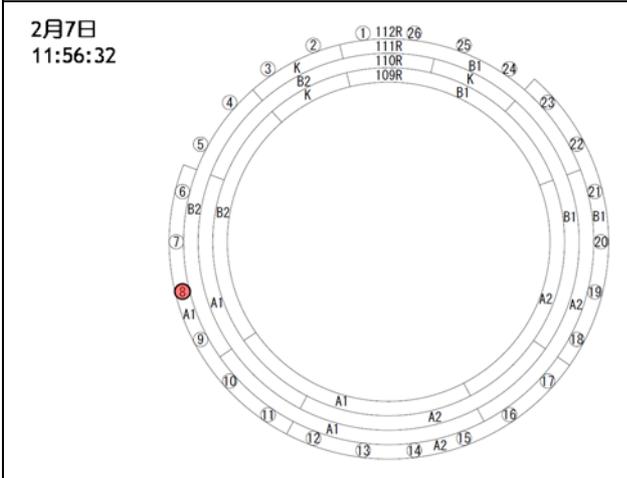
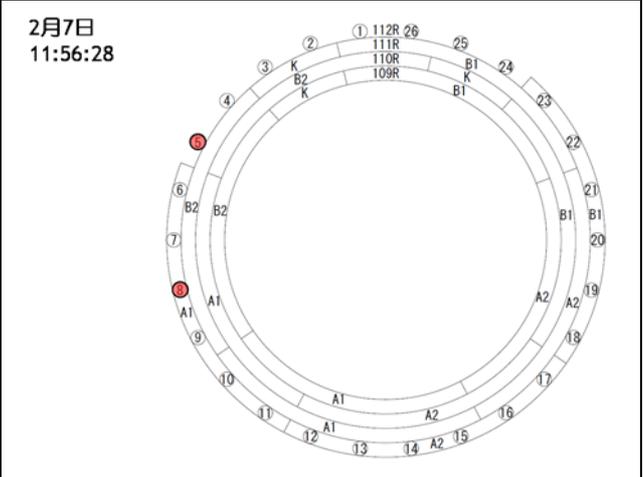
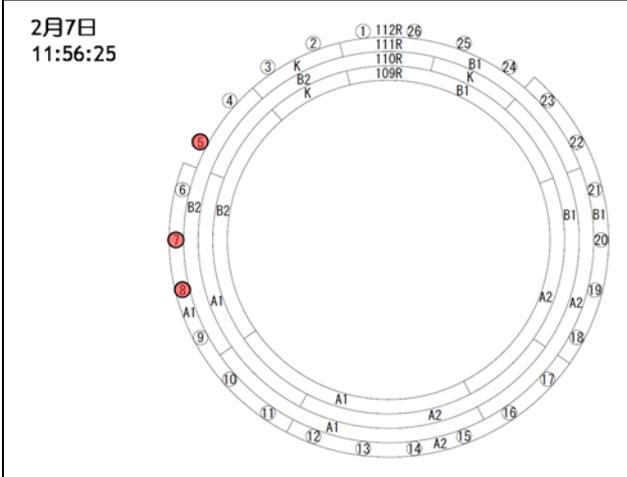
その後、12：06：00～12：06：02 に 112 リングの B2 セグメントを入れるため、ジャッキ 25、26、1、2、3、4 を抜いていることがわかる。それ以降のデータは 12：07：13 で途切れている。

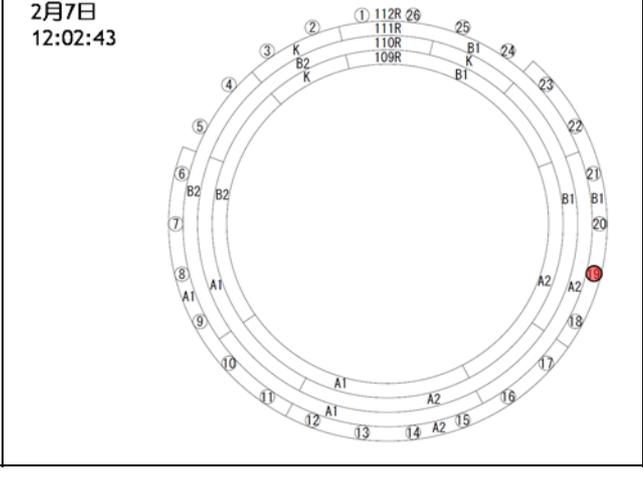
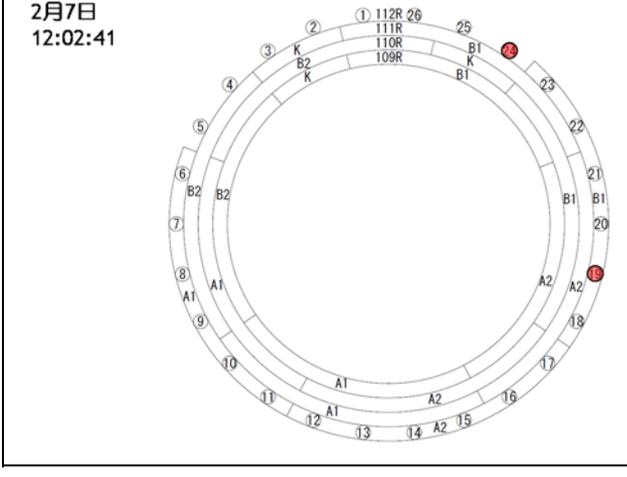
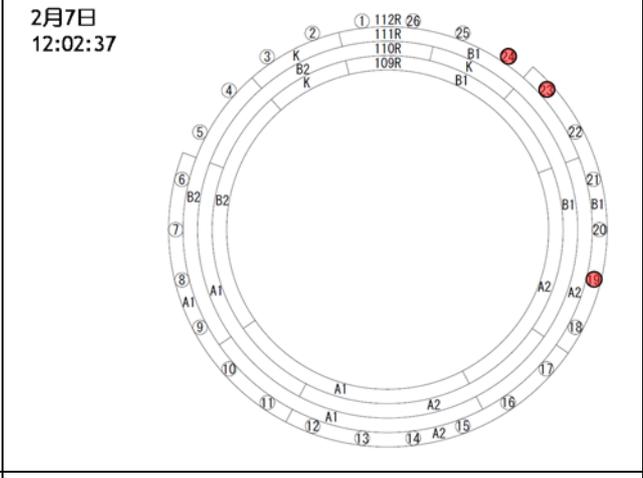
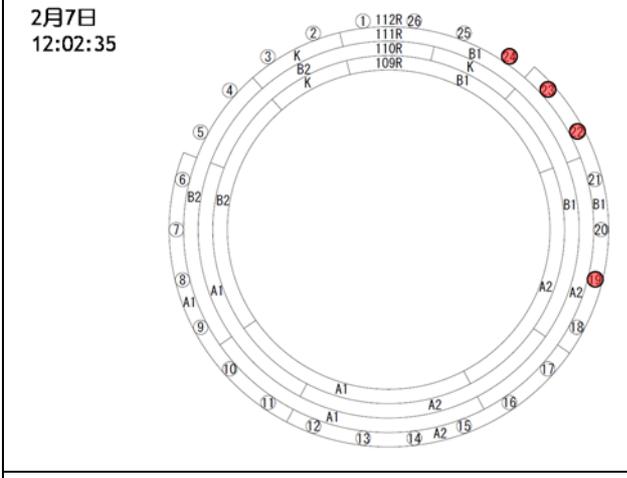
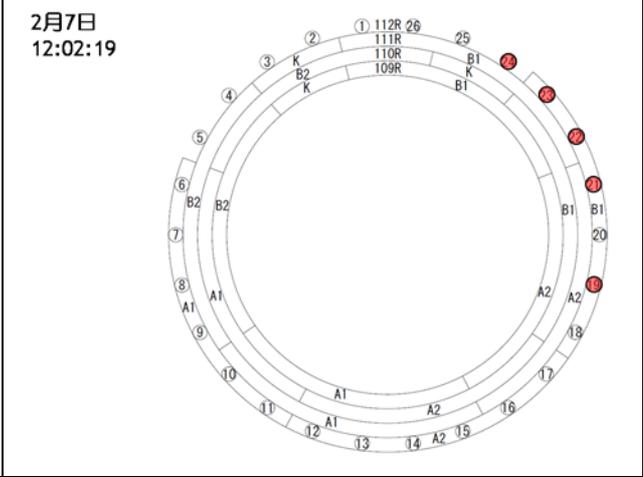
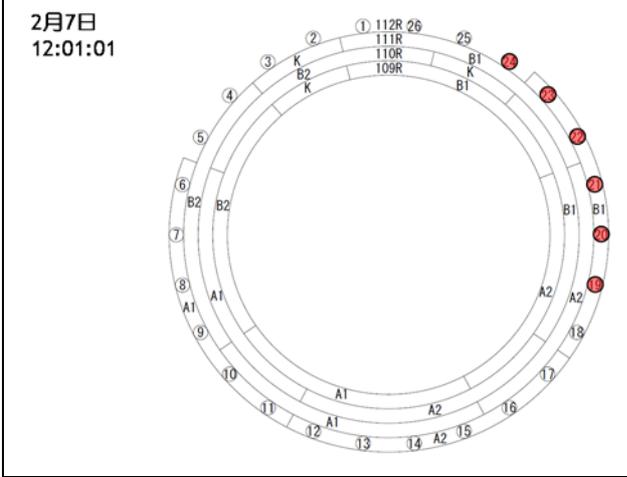
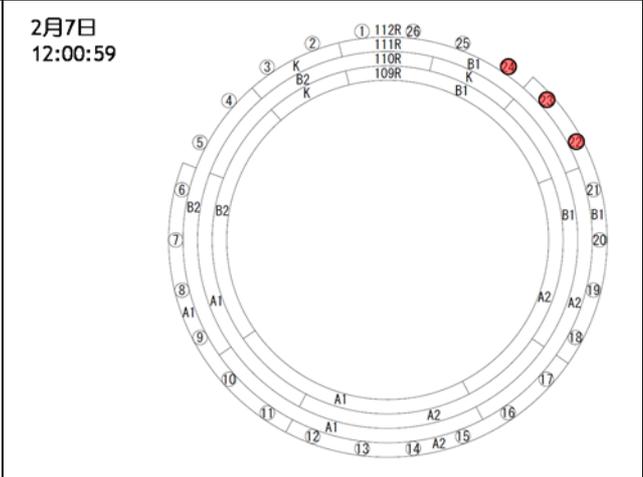
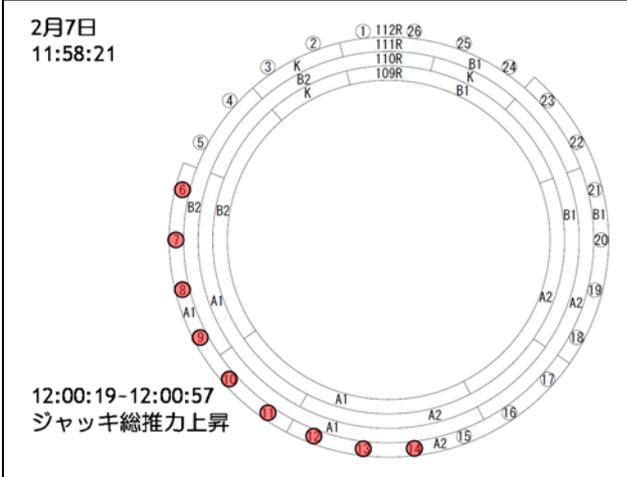
全体を通してみると、ジャッキ 1、2、3、4、5、23、24、25、26 の計 9 本のジャッキが抜かれていることがわかる。











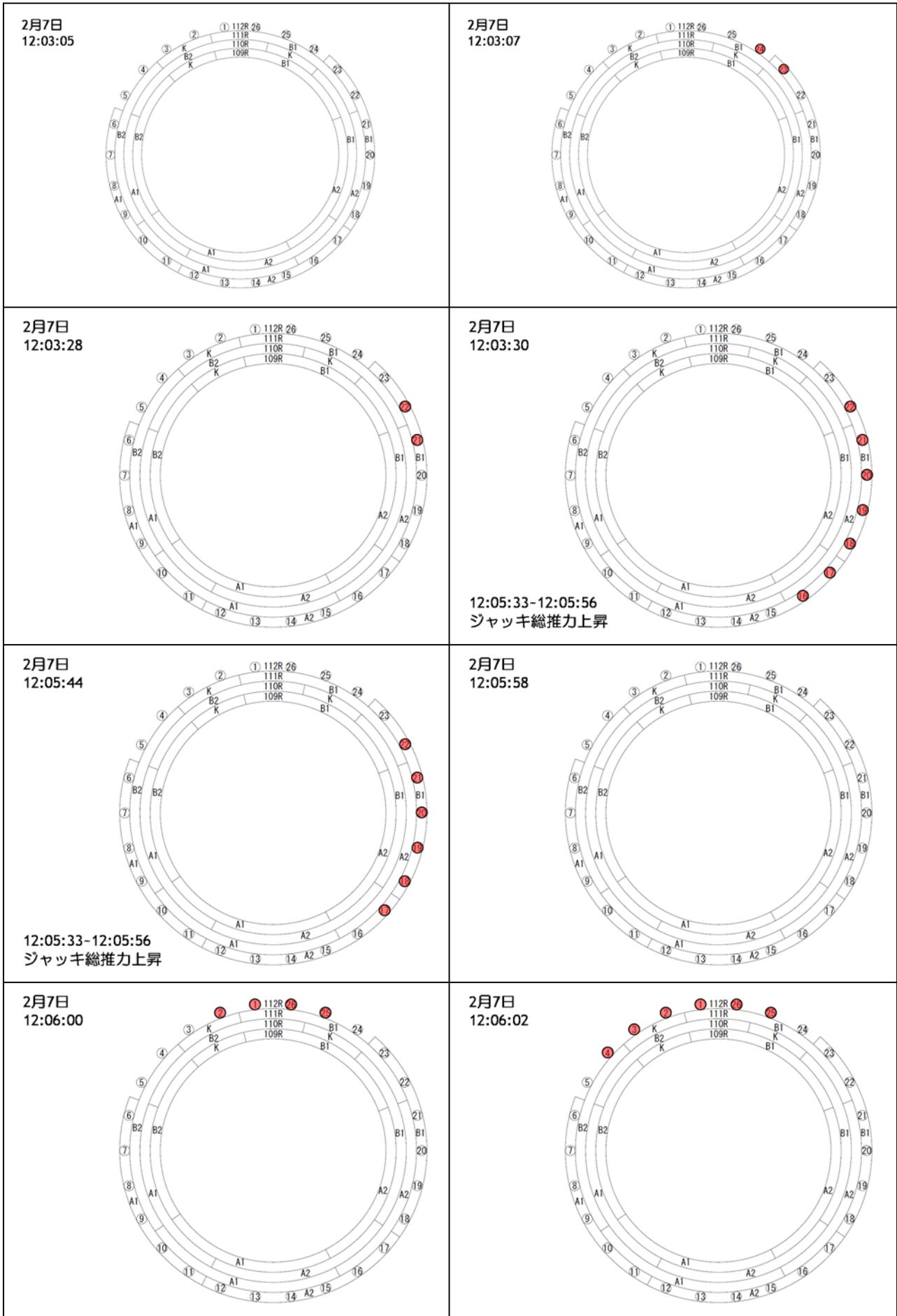


図 7.3.1 ジャッキ操作

7. 3. 2 切羽圧の変化

掘進管理システムのデータから切羽土圧及び総推力の変化を図 7.3.2 に示す。土圧計はシールドマシン前面のチャンバー内にあり（図 7.1.2 参照）、切羽土圧は土圧計により計測される。切羽土圧を見ると、ジャッキを抜いた 12:06:02 以降、急激に切羽土圧が低下し、232 kPa から 150 kPa と 82 kPa も低下していることがわかる。

第 10 章で述べるが、シールドマシンの掘削外径（4970mm）とシールドマシンの外径（4950mm）には片側 10mm の余堀りがあり、掘削外径とセグメント外径（4820mm）では 75mm の余堀りがあるため、111 リングの K セグメントが抜け出そうとすると、そこから土砂水が流入し、すぐに水の流れ、水圧の低下等により切羽のチャンバー内にまで到達し、切羽圧が低下すると考えられる。

同図において、総推力を見ると 112 リング A1 セグメントを挿入する際、比較的大きな総推力（1000kN 以上）をかけていることがわかる。また、112 リングの B1 セグメントを挿入するため総推力をかけた後、上側のジャッキを抜いた直後に災害が発生していることがわかる。

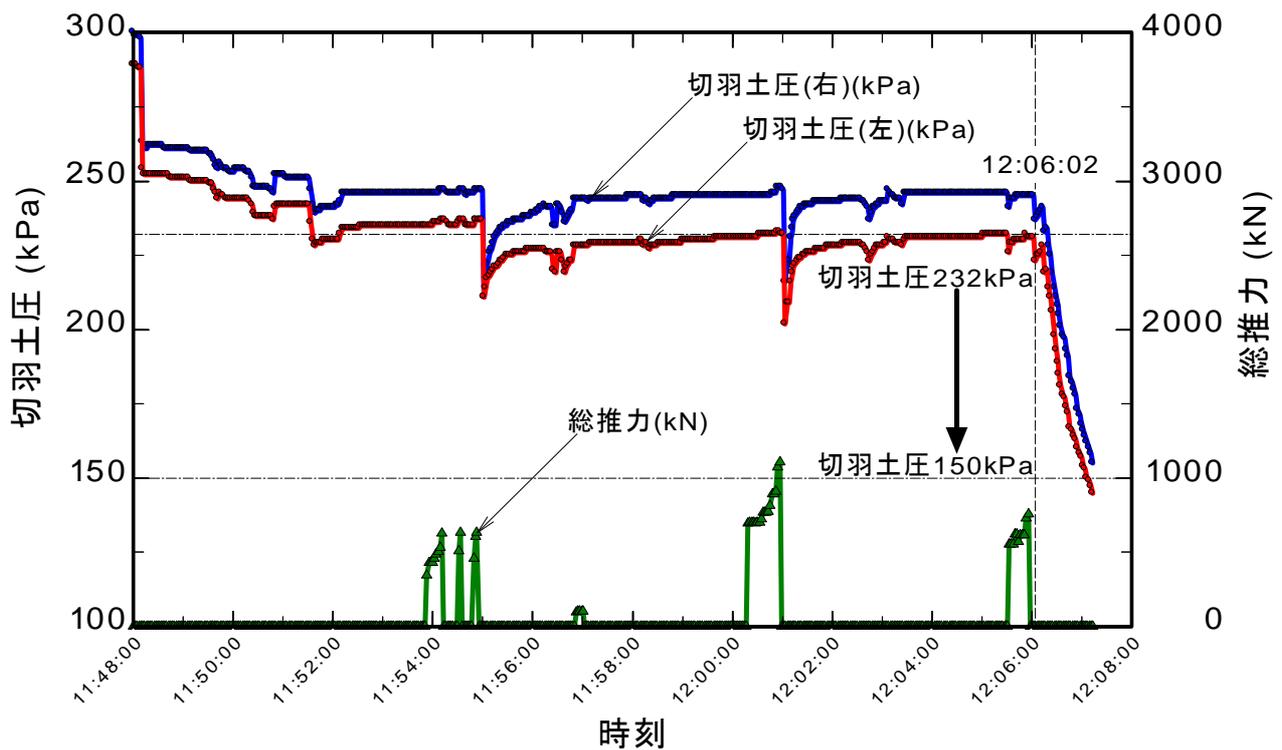


図 7.3.2 切羽圧及び総推力と時刻の関係

7. 3. 3 ジャイロ及びピッチングの変化

図 7.3.3 は掘進管理システムのデータからジャイロ方位角（左右方向）及び総推力と時刻の関係を示している。計画方位角（左右方向）が 268.019 度であるから、掘進終了後ですでに 268.4 度付近とシールドマシンが切羽に向かって右方向に向いていることがわかる。その後、112 リング A2 セグメント、A1 セグメントを入れるに従い、ジャイロ方位角（左右方向）は徐々に増加し（さらに右に）12:06:02 には 268.49 度を示している。計画方位角（左右方向）との差は+0.471 度である。

図 7.3.4 は掘進管理システムのデータからジャイロピッチング（上下方向）及び総推力と時刻の関係を示している。計画方位角（上下方向）が 0.044 度であるから、掘進終了後に 0.08 度付近であり、わずかにシールドマシンが上向きになっている。その後、112 リングの A1 セグメントを挿入する際、ジャイロピッチング（上下方向）の値がわずかに増加していることから、さらに上向きになり、シールドマシンのテール部がセグメントを押し下げようとするものと推察される。12:06:02 にはジャイロ方位角（上下方向）が 0.13 度となっており、計画方位角（上下方向）との差は+0.086 度である。

図 7.3.5 は掘進管理システムのデータから鉛直偏差及び総推力と時刻の関係を示したものである。12:06:02 以降、鉛直偏差が 8mm ほど下がっており、シールドマシンが下方に 8mm 下がったことを示している。テールブラシが固着している場合は、111 リングの B1 セグメント及び K セグメントに対して、より下方に押し下げる力を与えることとなる。

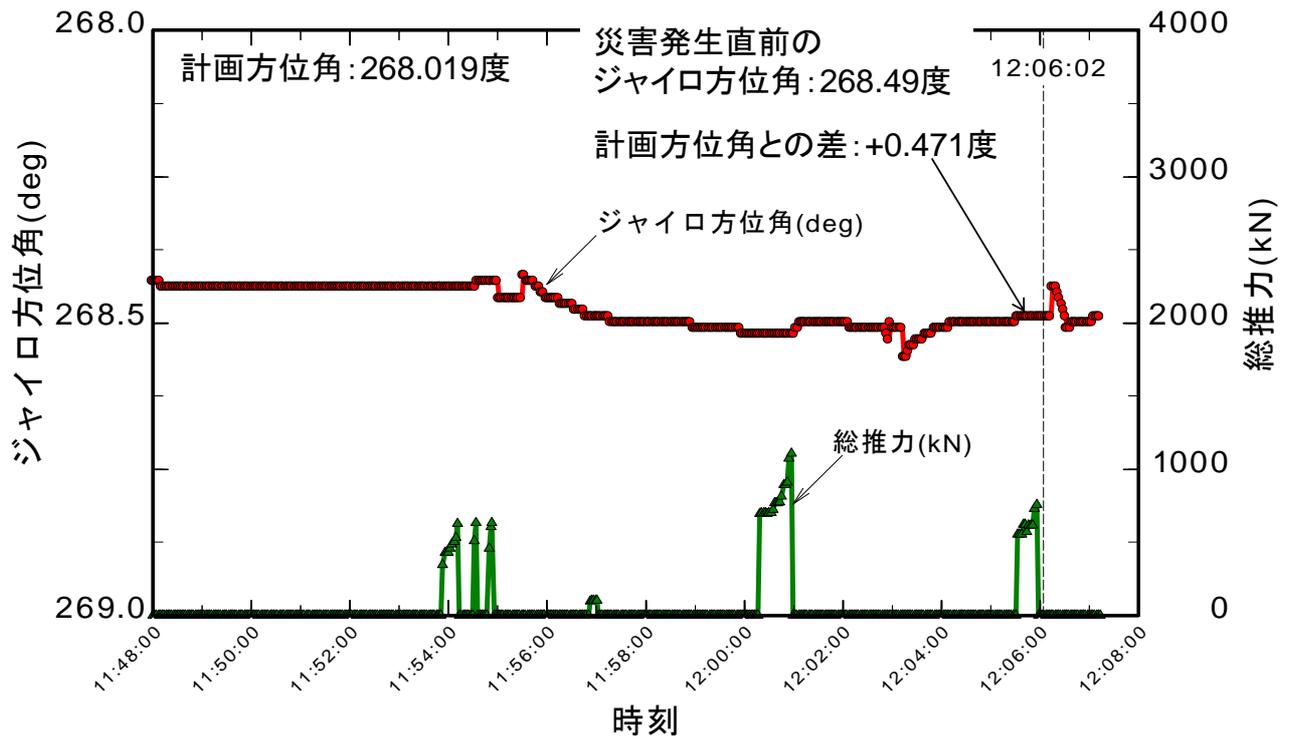


図 7.3.3 ジャイロ方位角（左右方向）及び総推力と時刻の関係

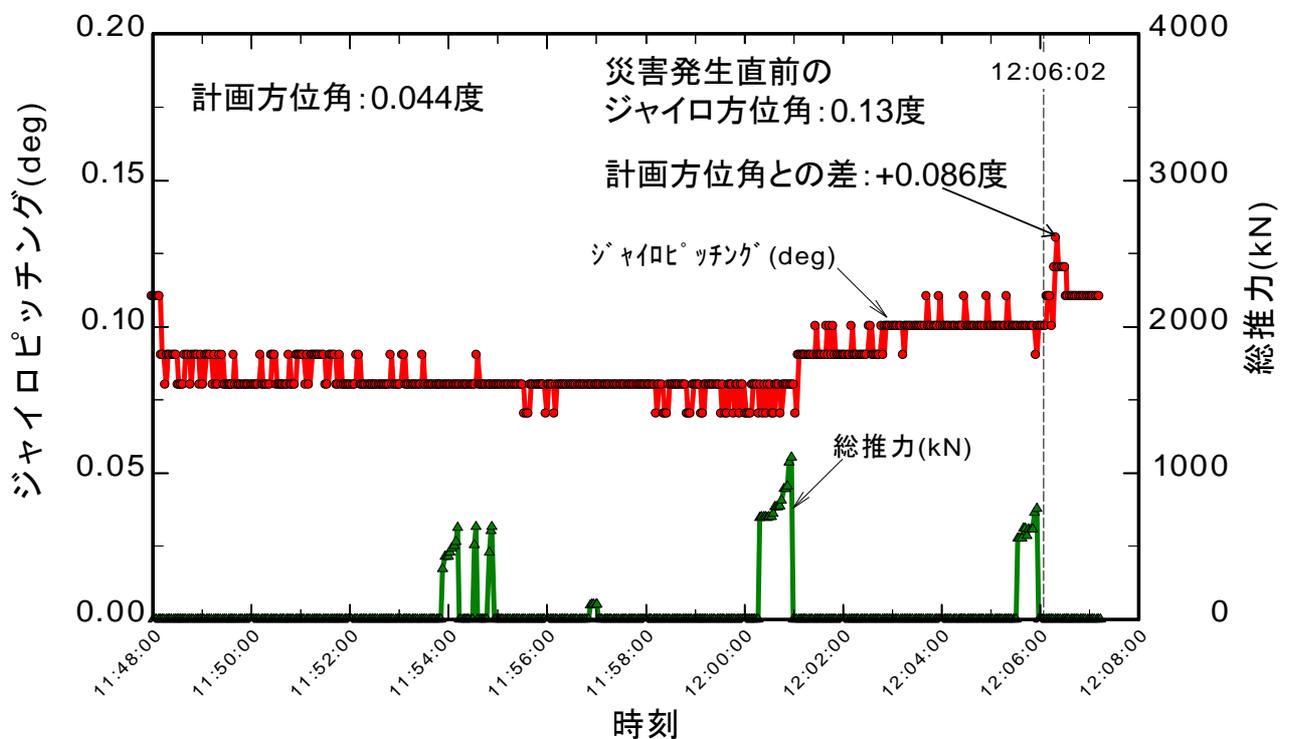


図 7.3.4 ジャイロピッチング（上下方向）及び総推力と時刻の関係

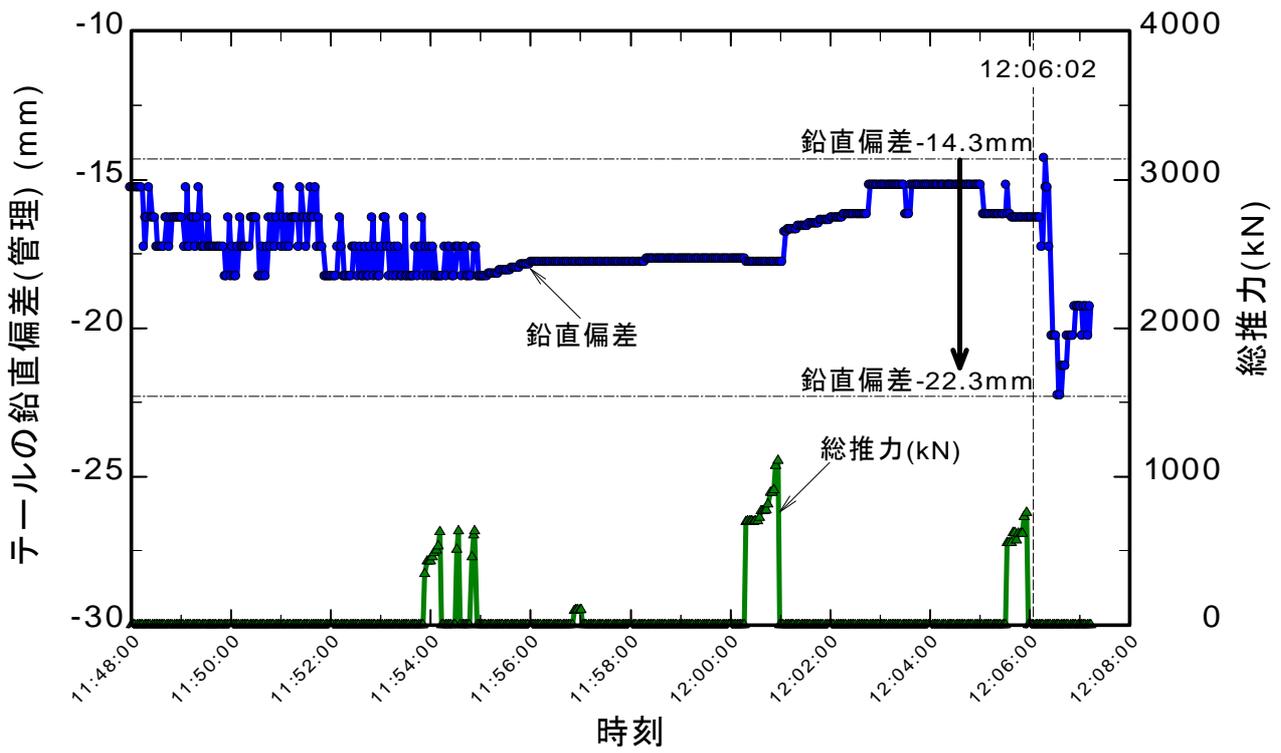


図 7.3.5 鉛直偏差及び総推力と時刻の関係

7. 3. 4 シールドマシンとセグメントの位置関係

図 7.2.3 からセグメントと計画方位角となす角度が -0.035 度（切羽に向かって左向き）であること、図 7.3.3 からはシールドマシンと計画方位角となす角度が $+0.471$ 度（切羽に向かって右向き）であることがわかる。つまり、セグメントに対してシールドマシンは、 $+0.471 - (-0.035) = 0.506$ 度ほど切羽に向かって右に傾いていることになる。これを CAD で図示すると、図 7.3.6 のとおりである。テールブラシがセグメントにより接近し、テールクリアランスは 5.4mm 程度となる。テールブラシが固着していれば、セグメントに対して切羽に向かって右から左方向の荷重が作用する。

同様に鉛直方向についても考察する。図 7.2.5 からセグメントと計画方位角のなす角度が -0.044 度（鉛直下向き）であること、図 7.3.4 からはシールドマシンと計画方位角となす角度が $+0.086$ 度（鉛直上向き）であることから、セグメントに対してシールドマシンは、 $+0.086 - (-0.044) = 0.13$ 度ほど鉛直上向きとなる。これを CAD で図示すると、図 7.3.7 のとおりである。テールクリアランスは 23mm 程度となり、左右方向に比べクリアランスに余裕があるが、左右方向と同様、テールブラシが固着していれば、セグメントに対して鉛直下向きの荷重が作用する。

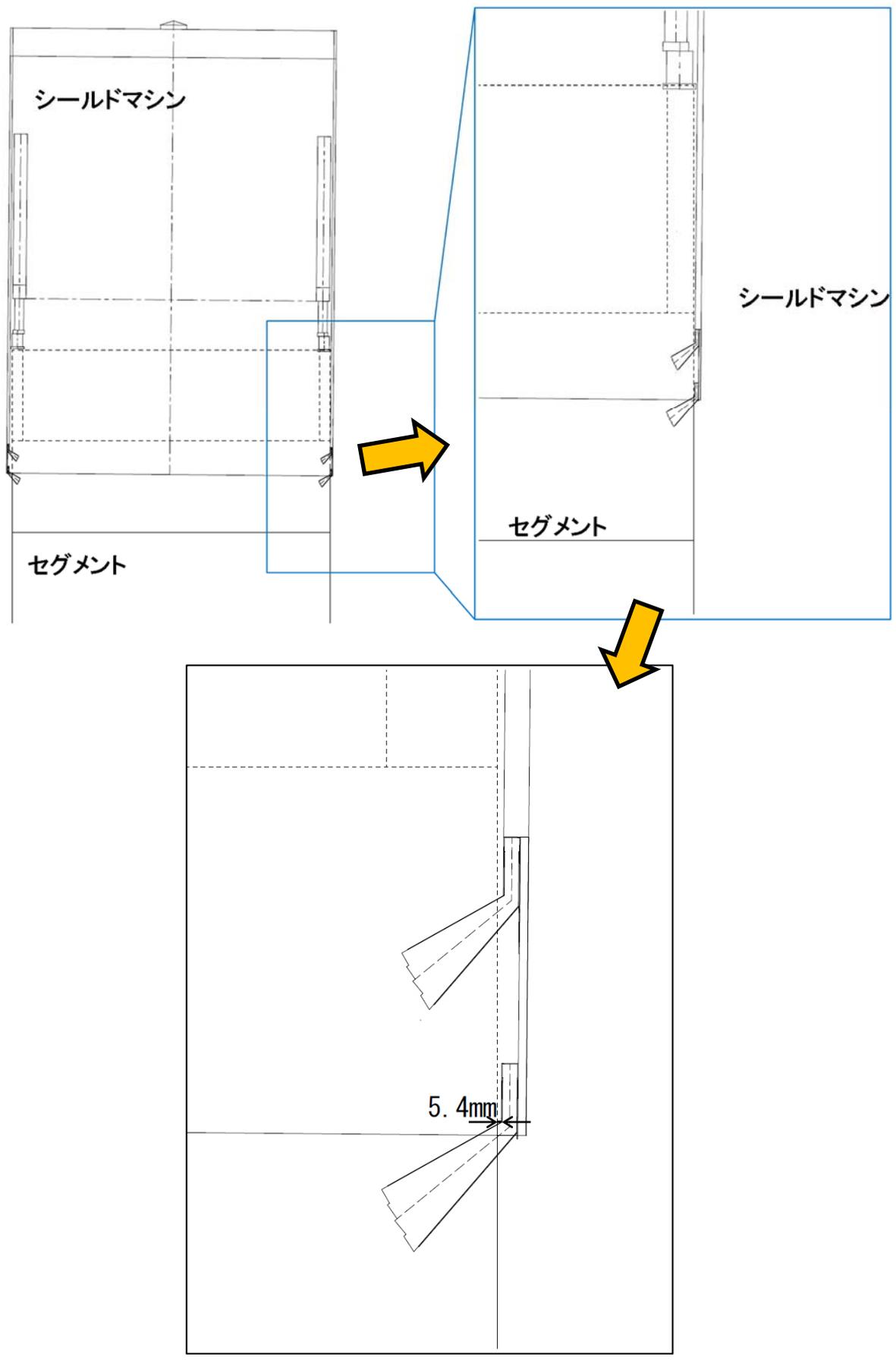


図 7.3.6 シールドマシンとセグメントの位置関係（上方から見た場合）

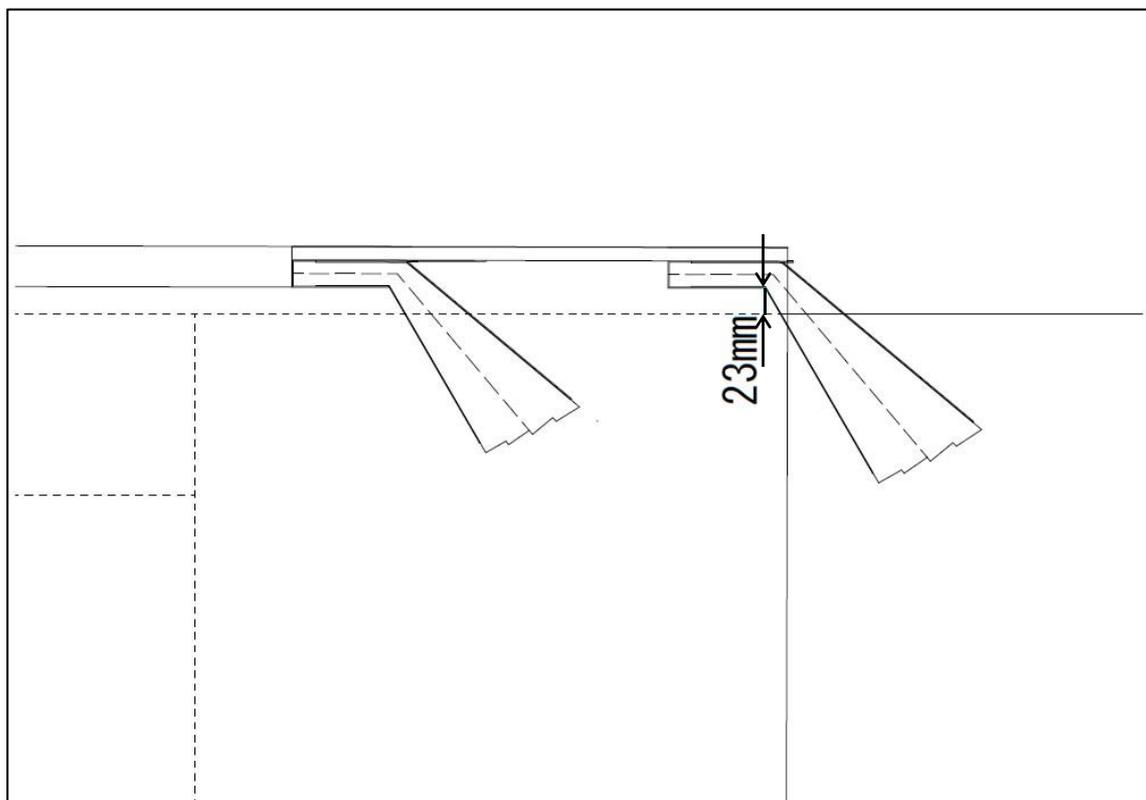
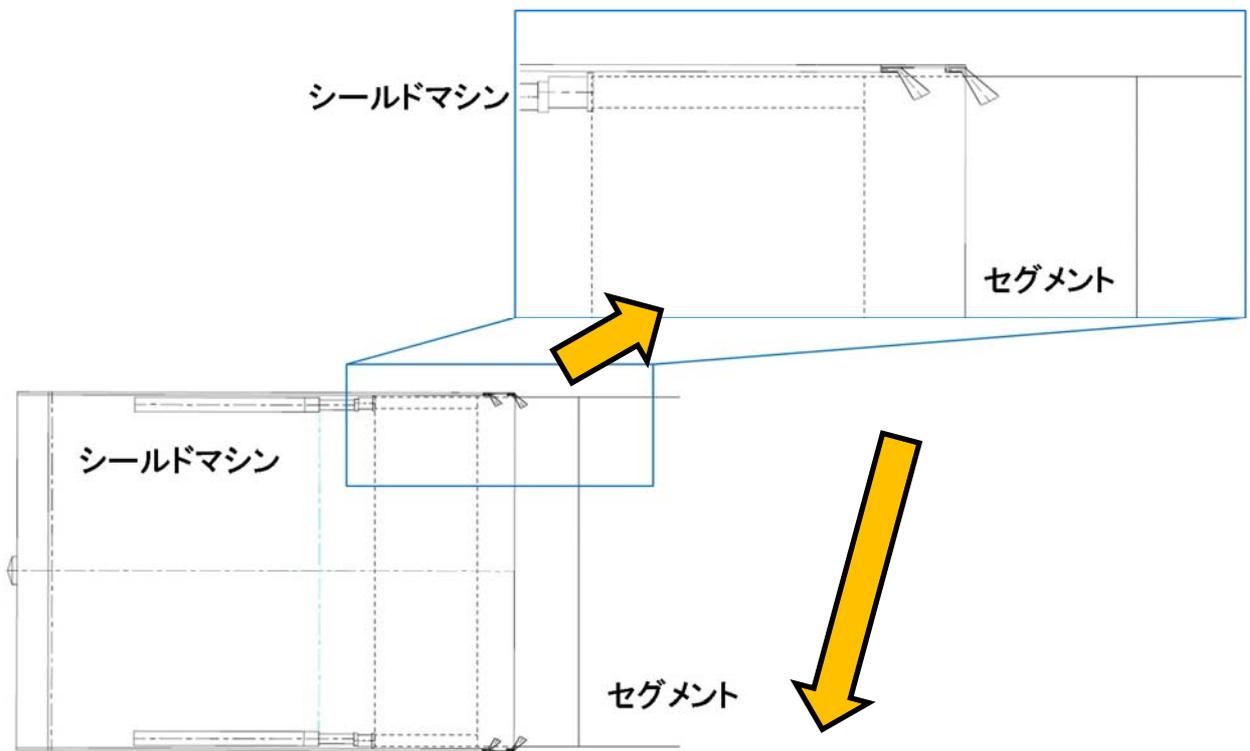


図 7.3.7 シールドマシンとセグメントの位置関係（側方から見た場合）

7. 4 本章のまとめ

(1) 掘進日報によると、85 リングにおいて、シールドマシンのテール部から裏込め注入材が漏出していた。

(2) テールクリアランスの値は、85 リング以降、設計テールクリアランス 29mm に近い値にほぼ収束しており、裏込め注入材がテール部で固着していた可能性がある。

(3) 線形管理上の重要なデータである測量データ（セグメント位置）とシールドマシンの位置偏差（掘進管理システムデータ）の値が異なる傾向を示していた。つまり、シールドマシンは右に向かっていたが、セグメントが左に向かっていたため、設計計画線に戻そうとよりシールドマシンを切羽に向かって右に向けていた。また、セグメントはシールドマシンを抜けてから上方向に動いていたが、シールドマシンを上に向けようとしたため、結果としてシールドマシンテール部がセグメント上部と競った。

(4) 当該工事では 5、 6、 24、 32、 39、 53、 54、 62 リングにテーパリングを使用しており、20 リング中 8 リング（40%）を使用していた。総数 557 リング中、災害発生時には 111 リングまで組み上がっており、20%程度の進捗状況であった。進捗状況（20%程度）に対して、テーパリングの使用割合（40%）が多くなっており、62 リング以降テーパリングの使用を控えていた可能性が示唆される。

(5) 112 リングの B2 セグメントを挿入するため、上部のジャッキ 9 本（26 本中）を引き抜いた時に、シールドマシンがテール部を下げるように変位した。このため、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメントとの競りが発生した可能性がある。