

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討

中間報告書

(案)

平成25年3月

消防庁危険物保安室



はじめに

昭和49年に岡山県倉敷市において発生した屋外タンク貯蔵所の重油流出事故を契機に、一定期間ごとにタンクを開放し、タンク内部を検査する保安検査の制度が創設された。保安検査の時期については、タンクの技術基準に応じて定められた基本開放周期に加え、保安のための措置を講じたものに対して開放周期を延長することができる制度が設けられており、最近では、昭和52年以降に設置された特定屋外タンク貯蔵所を対象とし、連続板厚測定法を用いた新たな保安検査の時期を決定する方法について検討を行い、平成23年4月より制度化したところだが、昭和52年以前に設置された屋外タンク貯蔵所（以下「旧法タンク」という。）についても、保安検査の検査周期のあり方について総合的に検討することが求められている（規制・制度改革に係る対処方針（平成22年6月18日閣議決定））。こうした状況を踏まえ、消防庁危険物保安室では平成23年度に「旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会」を発足させ、旧法タンクの保安検査の検査周期のあり方について検討を開始した。

旧法タンクの保安検査の検査周期のあり方を検討するにあたっては、タンクの基礎地盤の堅固さ、タンク底板の溶接構造及び、タンク底板の板厚の影響をそれぞれ評価する必要があることが指摘されており、平成23年度は基礎地盤の堅固さに関する評価手法について調査検討を実施し、有限要素法を利用した基礎地盤の解析手法についての提案を行ったところである。

この検討結果を踏まえ、平成24年度は、基礎地盤の堅固さの評価手法の妥当性を検証し、提案した有限要素法による解析手法が地盤剛性をマクロ的に評価する手法として妥当であることが確認された。さらに、タンク底板に適用されている重ねすみ肉溶接に関する疲労強度に関する調査検討を実施し、すみ肉溶接部の構造的要因が疲労強度に及ぼす影響度について、いくつかの有益な知見と課題が得られたところである。

調査検討会の委員各位には、ご多忙中にも関わらず、熱心なご議論をいただいた。本報告書がとりまとめられたのは、委員各位の熱意とご協力によるところが大であり、深く感謝申し上げる次第である。

平成25年3月

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査の  
あり方に係る調査検討会

座長 亀井 浅道



## 中間報告書目次

第1章	本年度検討の概要	
1.1	検討の目的	1-1
1.2	検討体制（平成24年度）	1-2
1.3	検討経過	1-2
第2章	昨年度の検討結果及び最近の屋外貯蔵タンクから危険物流出事故	
2.1	平成23年度に実施した検討の概要	2-1
2.2	最近の屋外貯蔵タンクからの危険物流出事故	2-3
第3章	旧法タンクの水張検査時における沈下量計測および沈下シミュレーション	
3.1	目的	3-1
3.2	対象とした旧法タンクと基礎地盤の概要	3-1
3.3	側板外周部及びタンク内底板の沈下量計測	3-7
3.4	沈下量に関する検討	3-18
3.5	種々の屋外貯蔵タンクの沈下計測結果	3-21
3.6	有限要素法を用いた沈下シミュレーション	3-24
3.7	計測結果と解析結果との比較	3-37
第4章	旧法タンクの底板に適用される重ねすみ肉溶接部に係る疲労強度	
4.1	目的	4-1
4.2	重ねすみ肉溶接部に係る4点曲げ試験	4-1
4.3	有限要素法を利用したき裂進展解析について	4-7
4.4	4点曲げ試験結果とき裂進展解析結果との比較	4-20
第5章	まとめ	
5.1	基礎地盤の堅固さの評価に係るまとめと課題	5-1
5.2	重ねすみ肉溶接の疲労強度の評価に係るまとめと課題	5-1
5.3	その他の課題	5-2



## 第1章 本年度検討の概要

### 1.1 検討の目的

規制・制度改革に係る対処方針（平成22年度6月18日閣議決定）において、特定屋外貯蔵タンク全体について保安検査のあり方を総合的に検討することとされたことを踏まえ、消防庁では、平成23年度に「旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会」を発足させた。昭和52年以前に設置された特定屋外貯蔵タンク（以下「旧法タンク」という。）については、タンクの基礎地盤の堅固さ、底板の溶接部の信頼性及び比較的薄い底板の板厚がタンクの安全性に及ぼす影響について検討する必要性が指摘されており、平成23年度はこのうち「基礎地盤の堅固さ」について有限要素法を用いた解析による評価手法について検討し一定の成果を得たところである。これらを踏まえ、本年度は「基礎地盤の堅固さ」について、昨年度対象としたものと性状の異なる基礎地盤を対象とした沈下量計測と解析を実施し、提案した評価手法の妥当性について検証するとともに、過去に発生した底板の重ねすみ肉溶接部の破損に基づく危険物流出事故事例を踏まえ、旧法タンクの底板に適用されている重ねすみ肉溶接の信頼性について検討することを目的とする。

## 1.2 検討体制（平成 24 年度）

旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討会（五十音順）

座長	亀井 浅道	元横浜国立大学	安心・安全の研究教育センター	特任教授
委員	大谷 英雄	横浜国立大学大学院	環境情報研究院	教授
	車塚 和彦	仙台市消防局	予防部	危険物保安課長
	越谷 成一	川崎市消防局	予防部	危険物課長
	龍岡 文夫	東京理科大学	理工学部土木工学科	嘱託教授
	龍川 恒	石油化学工業協会		
	富樫 清英	石油連盟	設備管理専門委員会	タンク部会長
	野本 敏治	東京大学	名誉教授	
	八木 高志	危険物保安技術協会	土木審査部	上席調査役
	柳澤 大樹	危険物保安技術協会	タンク審査部	部長
	山内 芳彦	一般社団法人産業機械工業会	タンク部会	
	山田 實	消防庁消防大学校消防研究センター		研究統括官

事務局	鈴木 康幸	消防庁危険物保安室	室長
	永友 義夫	消防庁危険物保安室	課長補佐
	宮内 孝	消防庁危険物保安室	パイプライン係長
	和賀 研太	消防庁危険物保安室	総務事務官

## 1.3 検討経過

第 1 回検討会	平成 24 年 8 月 24 日
第 2 回検討会	平成 24 年 12 月 18 日
第 3 回検討会	平成 25 年 2 月 21 日
第 4 回検討会	平成 25 年 3 月 11 日

## 第2章 昨年度の検討結果及び最近の屋外貯蔵タンクからの危険物流出事故

### 2.1 平成23年度に実施した検討の概要

#### 2.1.1 検討の範囲

旧法屋外貯蔵タンクの保安検査のあり方を検討する上で、「基礎地盤の堅固さ」、「底板に適用される重ねすみ肉溶接」及び「底板の板厚」が安全性に対してどのような影響を与えるかについてそれぞれ検討する必要があるが、平成23年度はこのうち旧法タンクの基礎地盤の堅固さに係る有効な評価方法について検討するために、水張試験時におけるタンクの沈下量計測及び有限要素法による沈下量解析を実施した。

#### 2.1.2 水張試験時における沈下量計測結果（図2.1.1）

水張試験を利用したタンク外周部及びタンク内部底板の沈下量計測を実施し、次の知見を得た。

- ・水張水位と沈下量の関係は、注水時と排水時において非線形であることが確認された。
- ・同一の水張水位における沈下量は、タンク外周部に比べタンク内部のものが大きいことが確認された。
- ・タンク内部においては、沈下率（水位1mあたりの沈下量）が大きくなる部分があることが確認された。タンク底板と基礎表面との局所的な隙間（空隙）が沈下率に影響していることが考えられる。

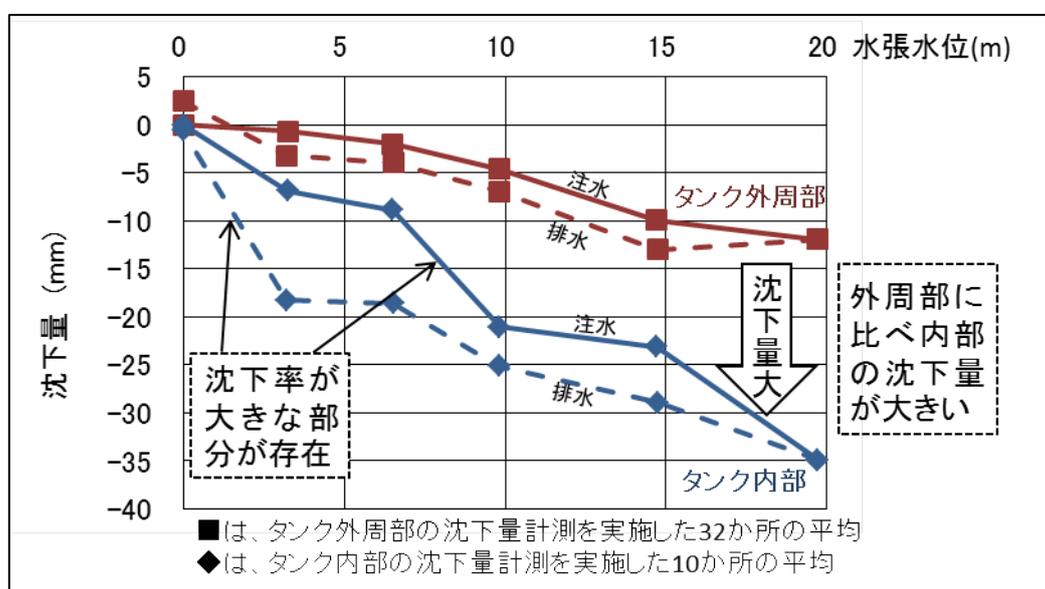


図 2.1.1 水張試験による旧法タンクの沈下量計測結果

### 2.1.3 有限要素法による沈下量解析結果

#### (1) 平板載荷試験の沈下量解析結果 (図 2.1.2)

有限要素法による解析手法等の妥当性を検証するために、既往の平板載荷試験の状況について沈下量解析を実施し、次の知見を得た。

- ・有限要素法解析により、荷重と沈下量の関係の非線形性を表現できた。
- ・地盤剛性の設定を詳細に行うことにより、解析結果が試験結果と定量的にも一致した。

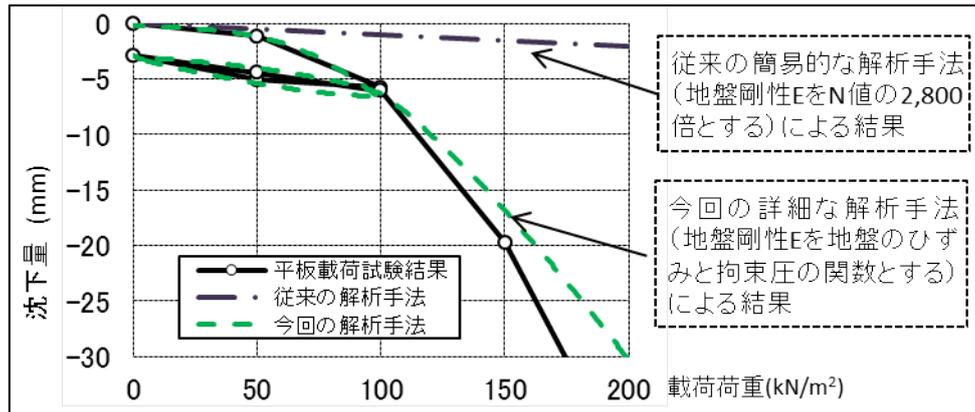


図 2.1.2 平板載荷試験の沈下量解析結果

#### (2) 水張試験のタンク沈下量解析結果 (図 2.1.3)

水張試験時の沈下量計測を実施したタンクを対象とした沈下量解析を行い、計測結果と解析結果の比較を実施した結果、次の知見を得た。

- ・タンク外周部の沈下量は、計測結果と解析結果の良好な一致を見た。
- ・タンク内部の沈下量は、計測結果に対し解析結果が過小評価する結果となった。

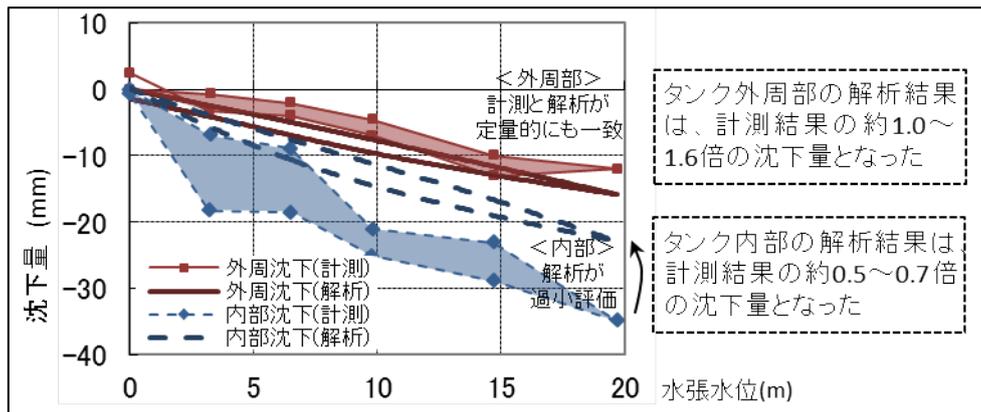


図 2.1.3 水張試験のタンク沈下量解析結果

#### 2.1.4 課題

検討結果を踏まえ、有限要素法による沈下量解析の信頼性を検証するために、検討の対象とした地盤と異なる性状の地盤における沈下量計測及び沈下量解析の実施が必要であるとされた。また、タンク底板と基礎表面との間の局所的な空隙が地盤剛性やタンク底板の強度に及ぼす影響について整理し、タンク底板の疲労強度に関する安全性について総合的に検討していく必要があるとされた。

### 2.2 最近の屋外貯蔵タンクからの危険物流出事故

昨年度の検討において、消防庁が全国の消防機関を通じて調査を行っている「危険物に係る事故事例」や消防庁消防大学校消防研究センターによる地震被害の調査報告書を基に、1974年（昭和49年）から2009年（平成21年）までの間に発生した屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故の分析を行ったところだが、2010年（平成22年）及び2011年（平成23年）の危険物流出事故（対象：12件）を追加し、事故の傾向について再度分析した。また、危険物流出事故の概要を表2.2.1（通常運転時）及び表2.2.2（地震時の事故）に列挙する。

通常時の屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故（対象：166件）について分析した結果を図2.2.1に示す。対象とした全タンクにおいて、底部からの危険物流出事故に着目して整理すると、底部の腐食によるものが51%、き裂によるものが10%を占める結果となった。内部開放検査や保安検査において底部の板厚及び溶接部の検査が義務付けられている特定屋外貯蔵タンクを対象を限定すると（対象：61件）、底部の腐食によるものが38%、き裂によるものが13%を占めている。底部の腐食による危険物流出事故は大きな割合を占めるものの、特定屋外貯蔵タンクでは開放時の板厚確認が一定の効果を果たしているものと考えられる。一方、特定屋外貯蔵タンクにおける底部のき裂による危険物流出事故の割合は昨年度の分析結果における11%から微増となっており、き裂に対する安全性については慎重に検討する必要がある。

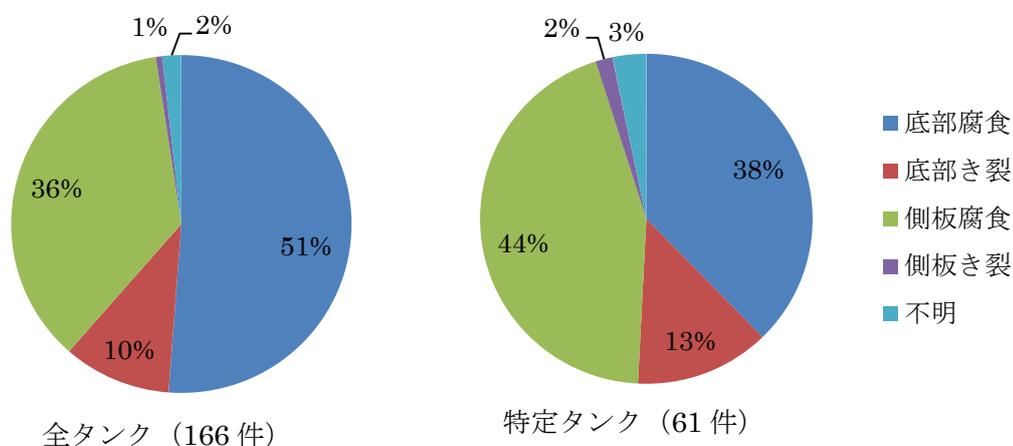


図 2.2.1 危険物流出事故の発生部位

通常時の屋外貯蔵タンクにおけるタンク底部及び側板からの危険物流出事故について、タンクの設置から事故発生までの経過年数別に整理したものを図 2.2.2 に示す。1974 年から 2011 年までに発生した危険物流出事故 166 件について分析した結果は、必ずしも経年が進んだタンクに危険物流出事故が多いわけではないが、2000 年以降に発生した危険物流出事故 62 件について分析した結果は、設置からの経年が 30 年を超えるタンクが 8 割を超えることが分かった。昨年度の分析結果に引き続き、経年劣化が危険物流出事故に及ぼす影響は顕著であるといえる。

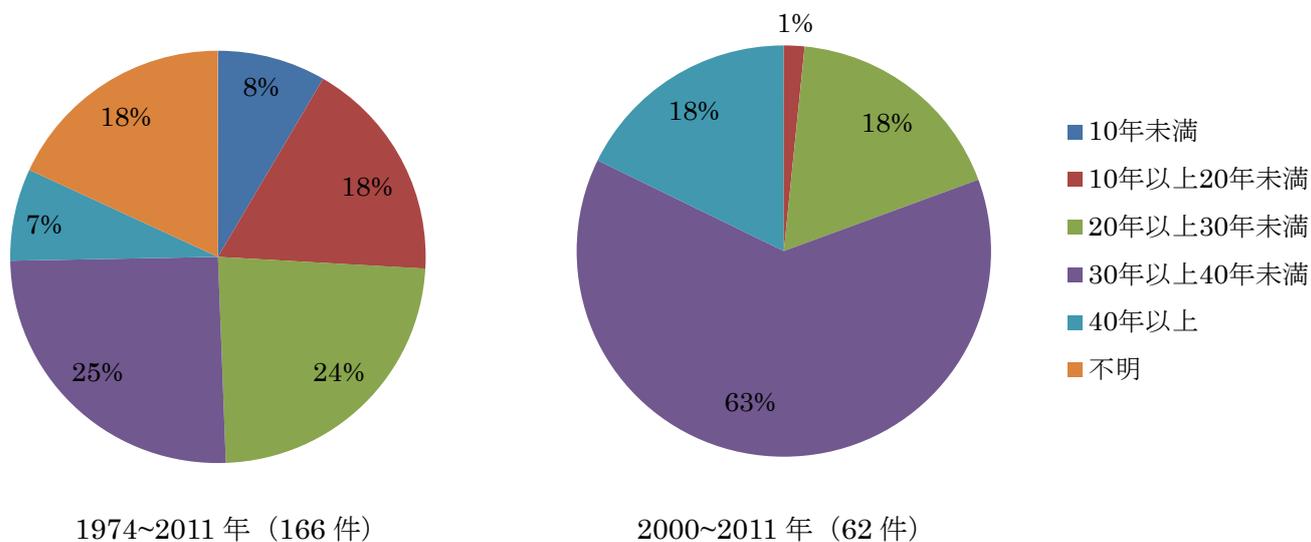


図 2.2.2 危険物流出事故発生時のタンク経年

表 2.2.1 通常時の危険物流出事故事例

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
1	1974/04/15	不明	重油	不明	不明	不明	不明	防油堤内	160
2	1974/06/12	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.1
3	1974/08/08	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	不明
4	1974/10/31	不明	硫酸	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.0001
5	1974/12/17	50,000	ミナス 重油	不明	不明	不明	不明	不明	0.5
6	1974/12/18	50,000	C 重油	底板 溶接部	き裂部	1973/12/15	1.0	海上	42,888
7	1974/12/28	1,000	A 重油	不明	不明	不明	不明	防油堤内	0.5
8	1975/02/20	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	不明
9	1975/04/01	3,350	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.1
10	1975/04/22	10	A 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1964/04/01	11.1	付近水田 ・ハス田	3.5
11	1975/05/30	不明	粗ター ル	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	192
12	1975/08/29	不明	クロールス ルホン酸	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.01
13	1975/09/12	不明	塩酸	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/06/25	2.2	敷地内	0.1
14	1975/09/20	1,084	A 重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	0.2
15	1976/05/14	30,000	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/07/31	6.8	防油堤内	0.2
16	1976/09/28	44	ミナス 重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1961/12/07	14.8	防油堤内	0.8
17	1976/10/8	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.1

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
18	1977/01/31	30,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/09/16	5.4	防油堤内	85
19	1977/02/07	不明	廃液、トルエン及び塩素化炭化水素の混合物	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/05/22	1.7	防油堤内	0.1
20	1977/03/17	241	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	公共下水管	9
21	1977/11/07	不明	JET A-1	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	海上	0.5
22	1977/12/08	4,700	軽油	底板 溶接部	き裂部	1958/04/28	19.6	防油堤内	不明
23	1978/02/27	988	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/03/27	9.9	ドレンボックス下部	0.0005
24	1978/05/15	4,740	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.04
25	1978/06/16	24,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/09/17	4.7	防油堤内	49.7
26	1978/07/29	3,000	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/02/02	10.5	敷地内	1.2
27	1979/01/08	300	B重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	構内排水溝	2.7
28	1979/02/04	50,000	原油	底板 溶接部	き裂部	1964/02/27	14.9	構内排水溝	50
29	1979/02/13	7,350	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/02/02	11.0	敷地内	1.2
30	1979/04/22	22,855	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.02
31	1979/08/08	160	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	22
32	1979/11/24	不明	第1石油類	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.2
33	1979/12/21	不明	マイナス重油	底板 母材部	き裂部	不明	不明	防油堤内	0.5

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
34	1980/02/06	99,000	原油	底板 溶接部	き裂部	1971/09/14	8.4	敷地内	0.07
35	1980/02/23	4,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1958/04/01	21.9	防油堤内	10.9
36	1980/05/12	30	酢酸エチル とジクロロ メタンの混 合液	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.003
37	1980/06/12	不明	ポリブ テン	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	不明
38	1980/06/16	390	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	3
39	1980/06/26	30,000	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1959/02/10	21.4	敷地内	16
40	1980/08/01	不明	ガソリ ン	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	不明
41	1980/08/09	不明	ミナス 重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	1.6
42	1980/09/28	不明	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	防油堤内	2
43	1980/12/06	3,180	ナフサ	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/01/17	8.9	敷地内	不明
44	1980/12/22	10,926	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	8.8	敷地内	不明
45	1981/03/20	不明	アセト ン	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.2
46	1981/06/22	不明	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	敷地内	0.0002
47	1981/08/06	28	A重油	側板 溶接部	腐食 開孔部	1978/03/18	3.4	敷地内	0.001
48	1981/09/01	4,655	C重油	側板 溶接部	腐食 開孔部	1972/02/21	9.5	敷地内	0.0195
49	1981/12/02	150	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	隣接田	5

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
50	1982/02/05	3	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/10/27	11.3	構外河川	0.1
51	1982/07/01	140	メタノール	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/07/22	12.0	敷地内	不明
52	1982/08/10	1,024	ガソリン	底板 母材部	腐食 開孔部	1964/01/24	18.6	構外畑地	46.1
53	1982/09/29	2,000	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/05/01	13.4	敷地内	0.8
54	1982/10/21	995	大豆油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/05/09	12.5	敷地内	不明
55	1982/12/09	500	重油	底板 溶接部	き裂部	1961/11/18	21.1	防油堤内	0.003
56	1982/12/22	31	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/10/19	11.2	防油堤内	0.2
57	1982/12/24	120	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1968/05/23	14.6	海上	60
58	1984/04/23	10	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	不明	不明	構外河川	0.1
59	1984/05/15	510	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1963/11/01	20.6	敷地内	17.8
60	1984/11/22	300	C重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/06/28	13.4	敷地内	0.3
61	1984/12/10	1,500	B重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1952/06/12	32.5	敷地内	0.6
62	1985/06/11	109,817	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/10/03	12.7	防油堤内	0.1
63	1985/08/23	2,000	クレオソート油	側板 母材部	腐食 開孔部	1980/05/07	5.3	防油堤内	1
64	1985/10/04	145	灯油	底板 溶接部	き裂部	1973/10/25	12.0	隣接水田	0.2
65	1985/10/29	106	濃硫酸	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/12/02	8.9	防油堤内	1.9
66	1985/11/29	500	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1966/04/04	19.7	防油堤内	5

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
67	1986/01/06	600	エピクロルヒドリン	底板母材部	腐食開孔部	1967/12/16	18.1	防油堤内	4.5
68	1986/08/30	15	B重油	底板母材部	腐食開孔部	1974/03/27	12.4	防油堤内	0.1
69	1986/11/07	107	灯油	底板母材部	腐食開孔部	1974/02/04	12.8	犬走り部	不明
70	1987/06/11	50	潤滑油	底板母材部	腐食開孔部	1973/03/28	14.2	防油堤内	不明
71	1987/09/08	20	脱硫C重油	側板母材部	腐食開孔部	1970/10/07	16.9	防油堤内	10.4
72	1987/09/09	145	A重油	底板母材部	き裂部	1971/06/29	16.2	海上	9.7
73	1988/07/05	82,641	原油	底板溶接部	き裂部	1975/03/06	13.3	敷地内	0.4
74	1988/08/26	2,000	重油	底板母材部	腐食開孔部	1968/07/18	20.1	防油堤内	0.2
75	1989/12/17	84,548	原油	底板母材部	腐食開孔部	1973/08/03	16.4	防油堤内	0.8
76	1991/02/24	15	重油	底板母材部	腐食開孔部	1969/03/03	22.0	敷地内	2
77	1991/09/06	4,000	溶融硫黄	側板母材部	腐食開孔部	1969/09/10	22.0	敷地内	0.3
78	1991/10/04	2,400	溶融硫黄	側板母材部	腐食開孔部	1976/11/18	14.9	防油堤内	43.7
79	1992/07/29	40	重油	側板母材部	腐食開孔部	1979/03/28	13.3	防油堤内	0.001
80	1992/08/21	995	重油	底板母材部	腐食開孔部	1961/03/23	31.4	防油堤内	5
81	1992/11/24	1,750	ガソリン	側板母材部	き裂部	1961/12/06	31.0	防油堤内	0.2
82	1994/07/01	50	軽油	側板母材部	腐食開孔部	1973/11/29	20.6	犬走り部	0.0005
83	1994/08/10	125	潤滑油	底板母材部	腐食開孔部	1964/10/05	29.9	犬走り部	0.9

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
84	1994/08/25	500	灯油	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/10/03	20.9	犬走り部	0.001
85	1995/01/07	420	A重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1967/12/22	27.1	被害なし	不明
86	1995/01/13	28,970	軽油	底板 溶接部	き裂部	1968/05/15	26.7	防油堤内	142.6
87	1995/03/27	192	A重油	底板 溶接部	き裂部	1966/06/05	28.8	海上	0.2
88	1995/05/18	10	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/07/06	21.9	構外河川	8.5
89	1996/02/29	30	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1969/04/23	26.9	海上	1.2
90	1997/04/13	110,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/09/28	24.6	防油堤内	1.3
91	1997/05/09	300	ガソリン	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/02	26.5	構外河川	不明
92	1997/05/28	200	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/06/02	26.0	海上	26
93	1997/07/10	670	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/11/16	20.7	防油堤内	0.1
94	1997/11/13	20	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/02/03	24.8	構外河川	0.2
95	1998/03/04	500	灯油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/11/19	26.3	海上	不明
96	1998/05/23	200	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/28	26.2	防油堤内	20
97	1998/07/04	30	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/08/30	26.9	構外河川	0.5
98	1999/01/09	12	重油	底板 母材部	き裂部	1970/07/30	28.5	防油堤内	0.7
99	1999/01/15	54	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/09/02	26.4	海上	1
100	1999/05/21	1,450	ガソリン	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/11/13	26.5	防油堤内	0.003

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
101	1999/06/11	4	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1976/12/08	22.5	犬走り部	不明
102	1999/08/12	481	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1963/10/24	35.8	防油堤内	0.02
103	1999/10/11	2,160	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/10/05	27.0	敷地内	0.5
104	1999/10/20	880	A重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1980/12/15	18.9	海上	6.3
105	2001/06/01	4,880	ガソリン	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/09/29	30.7	防油堤内	不明
106	2001/06/27	50,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/12/04	30.6	防油堤内	8
107	2001/08/15	15	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1966/02/23	35.5	防油堤内	0.3
108	2001/07/31	2,050	JET A-1	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/19	30.7	防油堤内	0.1
109	2001/12/29	35,000	原油	側板 母材部	腐食 開孔部	1969/04/10	32.7	防油堤内	0.002
110	2002/04/01	455	FCC ボトム油	底板 母材部	腐食 開孔部	1957/02/05	45.2	海上	不明
111	2002/06/07	1,255	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1975/12/09	26.5	敷地内	0.005
112	2002/07/02	40,000	原油	側板 母材部	腐食 開孔部	1971/05/26	31.1	敷地内	不明
113	2002/09/05	500	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/10/27	31.9	防油堤内	2
114	2003/01/25	9,800	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1967/12/26	35.1	敷地内	0.03
115	2003/02/07	995	軽油	底板 母材部	腐食 開孔部	1962/01/18	41.1	敷地内	0.1
116	2003/02/24	700	キシレン	底板 母材部	腐食 開孔部	1965/12/28	37.2	海上	不明
117	2003/03/15	50,000	原油	底板 母材部	腐食 開孔部	1970/03/15	33.0	敷地内	0.13

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
118	2003/03/20	57	重油	側板母材部	腐食開孔部	1976/04/15	26.9	敷地内	0.2
119	2003/03/27	8	重油	側板母材部	腐食開孔部	1992/09/04	10.6	敷地内	0.1
120	2003/06/11	100	重油	底板溶接部	き裂部	1971/06/11	32.0	構外河川	不明
121	2003/07/07	2,000	スチレン	底板母材部	腐食開孔部	1981/11/04	21.7	敷地内	0.2
122	2003/10/23	40	重油	底板母材部	腐食開孔部	1967/10/12	36.1	防油堤内	0.1
123	2003/12/15	2,330	重油	側板母材部	腐食開孔部	1968/09/18	35.3	防油堤内	0.04
124	2004/06/01	130	重油	底板母材部	腐食開孔部	1973/07/25	30.9	防油堤内	0.4
125	2004/07/22	7,830	重油	側板母材部	腐食開孔部	1980/10/21	23.8	防油堤内	0.045
126	2005/01/06	28	重油	側板母材部	腐食開孔部	1968/12/27	36.1	防油堤内	0.4
127	2005/05/26	10	重油	側板母材部	腐食開孔部	1976/11/02	28.6	防油堤内	0.001
128	2005/07/01	1,680	重油	側板溶接部	腐食開孔部	1969/03/27	36.3	防油堤内	0.1
129	2005/09/15	12,000	軽油	側板母材部	腐食開孔部	1972/12/27	32.7	防油堤内	0.2
130	2005/09/21	7,000	重油	側板母材部	腐食開孔部	1959/04/03	46.5	防油堤内	0.1
131	2005/11/14	620	メチルイソブチルケトン	側板母材部	腐食開孔部	1970/02/12	35.8	防油堤内	0.003
132	2005/11/22	620	酢酸ブチル	側板母材部	腐食開孔部	1970/01/27	35.8	防油堤内	不明
133	2005/12/07	3,400	ナフサ	底板母材部	腐食開孔部	1973/09/17	32.2	構外河川	80
134	2006/03/01	10	灯油	底板母材部	腐食開孔部	1974/11/09	31.3	水路	不明

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
135	2006/04/08	20	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/07/16	30.8	構内排水溝	不明
136	2006/06/08	234	硝酸	底板 溶接部	き裂部	1968/06/11	38.0	防油堤内	0.0002
137	2006/07/01	15	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1977/02/18	29.4	構外水田	1.2
138	2006/07/06	24,250	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1971/12/27	34.5	防油堤内	不明
139	2006/07/16	20	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1981/07/11	25.0	防油堤内	1
140	2006/08/01	9,950	重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	34.4	防油堤内	不明
141	2006/08/10	5,060	ガソリン	側板 母材部	腐食 開孔部	1972/03/04	34.5	敷地内	不明
142	2007/03/15	740	重油	底板 母材部	腐食 開孔部	1973/09/06	33.5	敷地内	50
143	2007/04/01	200	重油	底板 溶接部	腐食 開孔部	1978/06/19	28.8	防油堤内	0.002
144	2007/05/13	200	スラッジ	側板 母材部	腐食 開孔部	1973/12/17	33.4	防油堤内	不明
145	2007/11/26	53,620	ガソリン	側板 母材部	腐食 開孔部	1974/10/15	33.1	防油堤内	0.012
146	2008/08/20	6	エチレンジ クロライド	底板 母材部	腐食 開孔部	1971/12/11	36.7	防油堤内	0.04
147	2008/04/30	176	ポリエ ーテル	側板 母材部	腐食 開孔部	1970/11/20	37.5	防油堤内	1.02
148	2008/06/13	14	アタプロ ン乳剤	底板 母材部	腐食 開孔部	1975/11/14	32.6	防油堤内	0.002
149	2009/08/31	1,730	C重油	側板 母材部	腐食 開孔部	1960/05/20	49.3	防油堤内	0.006
150	2009/09/17	2	軽油	側板 母材部	腐食 開孔部	1974/07/10	35.2	防油堤内	若干
151	2009/01/16	520	メタクリル 酸メチル	底板 母材部	腐食 開孔部	1974/10/03	34.3	防油堤内	0.045

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	箇所詳細	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
152	2009/12/24	40	1,4-ブタンジオール	底板母材部	き裂部	1986/01/30	23.9	防油堤内	0.4
153	2009/12/22	900	再生油	底板母材部	腐食開孔部	1977/07/07	32.5	防油堤内	30
154	2010/01/24	51,252	ジェット燃料	底板溶接部	き裂部	1968/05/25	41.7	防油堤内	0.14
155	2010/04/02	100	A重油	側板母材部	腐食開孔部	1981/01/08	29.2	防油堤内	0.02
156	2010/04/05	4,900	潤滑油原料	底板母材部	腐食開孔部	1963/02/11	47.2	防油堤内	0.04
157	2010/05/31	495	重油	側板母材部	腐食開孔部	1979/12/12	30.5	防油堤内	0.4
158	2010/06/07	3,227	C重油	底板母材部	腐食開孔部	1969/09/29	40.7	防油堤内	0.01
159	2010/06/15	25	C重油	底板母材部	腐食開孔部	1973/09/15	36.8	防油堤内	0.02
160	2010/07/11	25,463	重油	側板母材部	腐食開孔部	1970/06/11	40.1	防油堤内	0.03
161	2010/09/07	50	重油	側板母材部	腐食開孔部	1984/08/29	26.0	防油堤内	0.2
162	2010/10/03	997	重油	側板母材部	腐食開孔部	1967/10/13	43.0	防油堤内	0.03
163	2011/01/05	20,171	ナフサ	底板溶接部	き裂部	1968/11/12	42.1	防油堤内	4
164	2011/04/14	500	灯油	側板母材部	腐食開孔部	1975/12/26	35.3	防油堤内	若干
165	2011/06/06	150	重油	底板母材部	腐食開孔部	1967/06/07	44.0	防油堤内	0.2
166	2011/10/12	2,785	軽油	側板母材部	腐食開孔部	1980/09/29	31.0	防油堤内	0.01

表 2.2.2 地震時の危険物流出事事故事例

No.	発生年月日	許可容量	貯蔵油種	発生箇所	設置年月日	経過年	被害範囲	流出量(kl)
1	1978/06/12	31,421	灯油	底部隅角部	1972/08/15	5.8	宮城県沖地震	滲み
2	1978/06/12	31,470	重油	底部き裂	1972/11/08	5.6	宮城県沖地震	26,798
3	1978/06/12	31,508	重油	底部き裂	1972/12/18	5.5	宮城県沖地震	23,705
4	1978/06/12	23,608	減圧軽油	底部き裂	1973/01/25	5.4	宮城県沖地震	45
5	1978/06/12	23,588	減圧軽油	底部き裂	1973/01/25	5.4	宮城県沖地震	17,644
6	1983/05/26	2,000	軽油	底部隅角部	不明	12.7	日本海中部地震	滲み
7	1983/05/26	1,000	軽油	底部ドレン部	不明	11.6	日本海中部地震	滲み
8	1993/01/15	1,035	アスファルト	側板座屈部	1972/07/29	20.5	釧路沖地震	900t
9	1993/01/15	5,000	重油	側板座屈部	不明	不明	釧路沖地震	不明
10	1995/01/17	420	A重油	側板	1967/12/22	27.1	兵庫県南部地震	滲み
11	1995/01/17	990	エチルアルコール	側板座屈部	1973/09/21	21.3	兵庫県南部地震	3
12	2011/03/11	4,920	A重油	底部溶接部	1973/07/16	37.7	東北地方太平洋沖地震	滲み





対象タンクが設置されている製油所は、図 3.2.2 に示す大阪府堺港の臨港工業地帯で堺港の西泊地に面した埋立地に位置しており、1968 年操業開始である。図 3.2.3 に示すように、対象タンクは西泊地の南東角より南 150m, 東 300m のところに位置している。

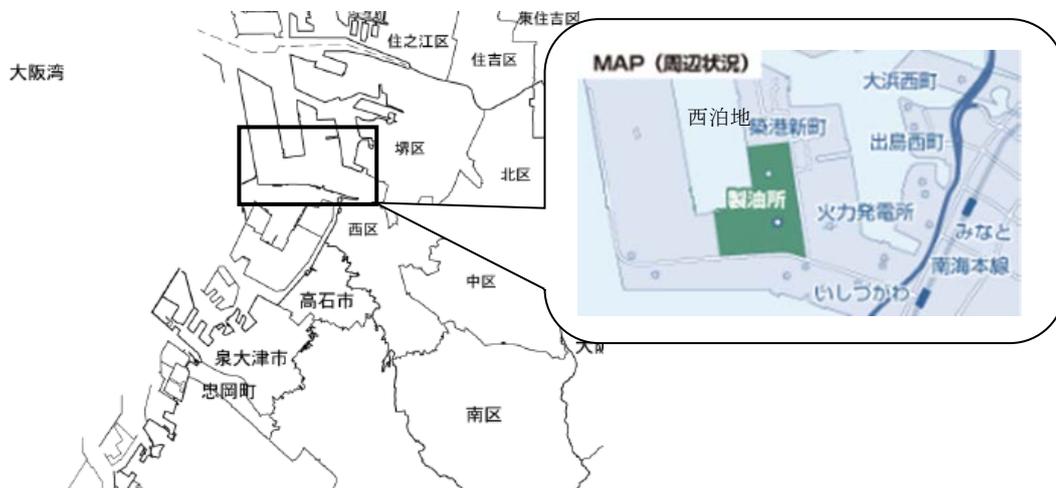


図 3.2.2 製油所の位置

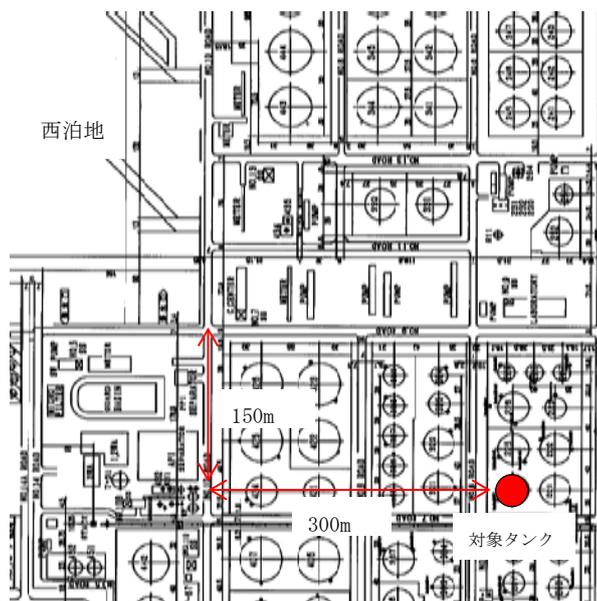


図 3.2.3 対象タンクの設置位置

製油所のタンク敷地の来历に関しては、文献「関西石油(株)堺製油所における油タンク基礎の地盤改良 土と基礎 1971年11月号」に概要が示されている。

文献によると、埋立ての時期が昭和 38 年末であり、敷地の地盤構成は地表 OP+4.5m から-5～6m が粘土、砂の混合体の埋立層、その下 OP-12m ままで粘土、砂の不規則な互層の沖積層、その下に砂礫の洪積層が存在している。これらの層は非常に軟弱なため、図 3.2.4 に示すようにサンドドレーン・ウエルポイント工法を施し、載荷盛土を行い圧密を促進させた。サンドドレーンは、杭

径 500mm、深さ 12m、対象タンク基礎に対して 417 本、载荷盛土量は 3900m<sup>3</sup> (=载荷高さ 3.5m) であった。タンク建設後水張り試験を実施し、さらに圧密を促進させている。

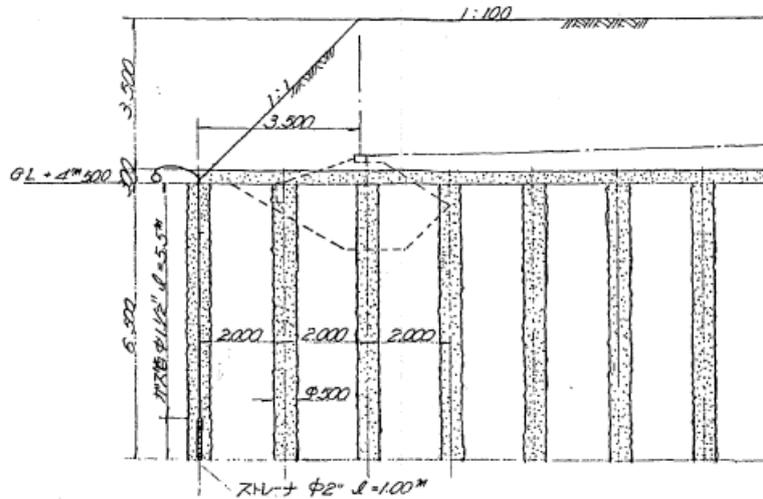
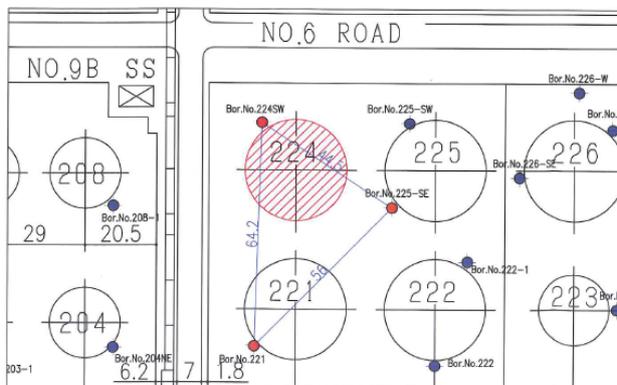
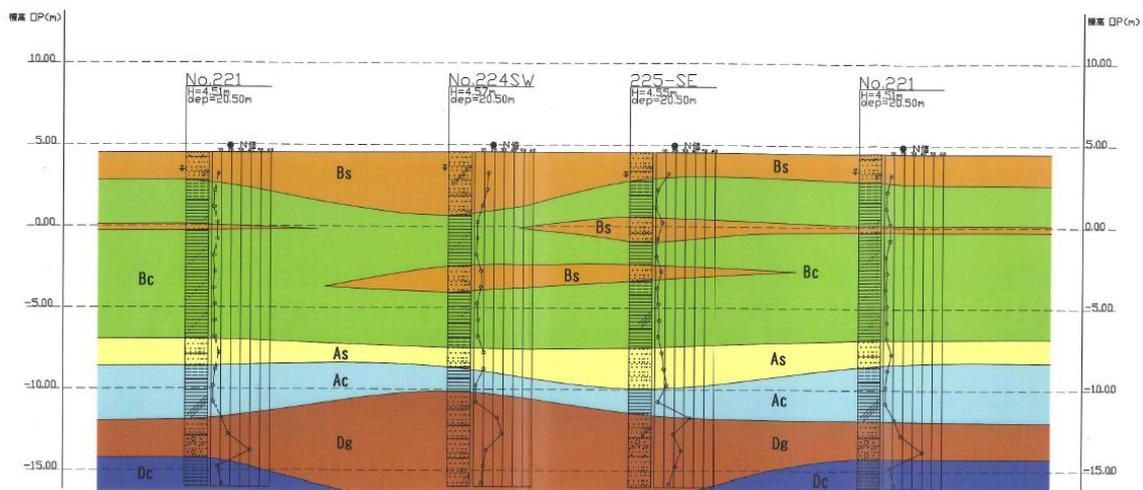


図 3.2.4 タンク建設時の地盤改良概要

対象タンク周辺のボーリング調査結果について、図 3.2.5～3.2.8 に示す。



地層構成		
地質時代	地層名	地層記号
現世	埋立砂質土層	Bs
	埋立粘性土層	Bc
新第四紀	沖積砂質土層	As
	沖積粘性土層	Ac
	洪積礫質土層	Dg
	洪積粘性土層	Dc

図 3.2.5 地層想定断面図等

# ボーリング柱状図

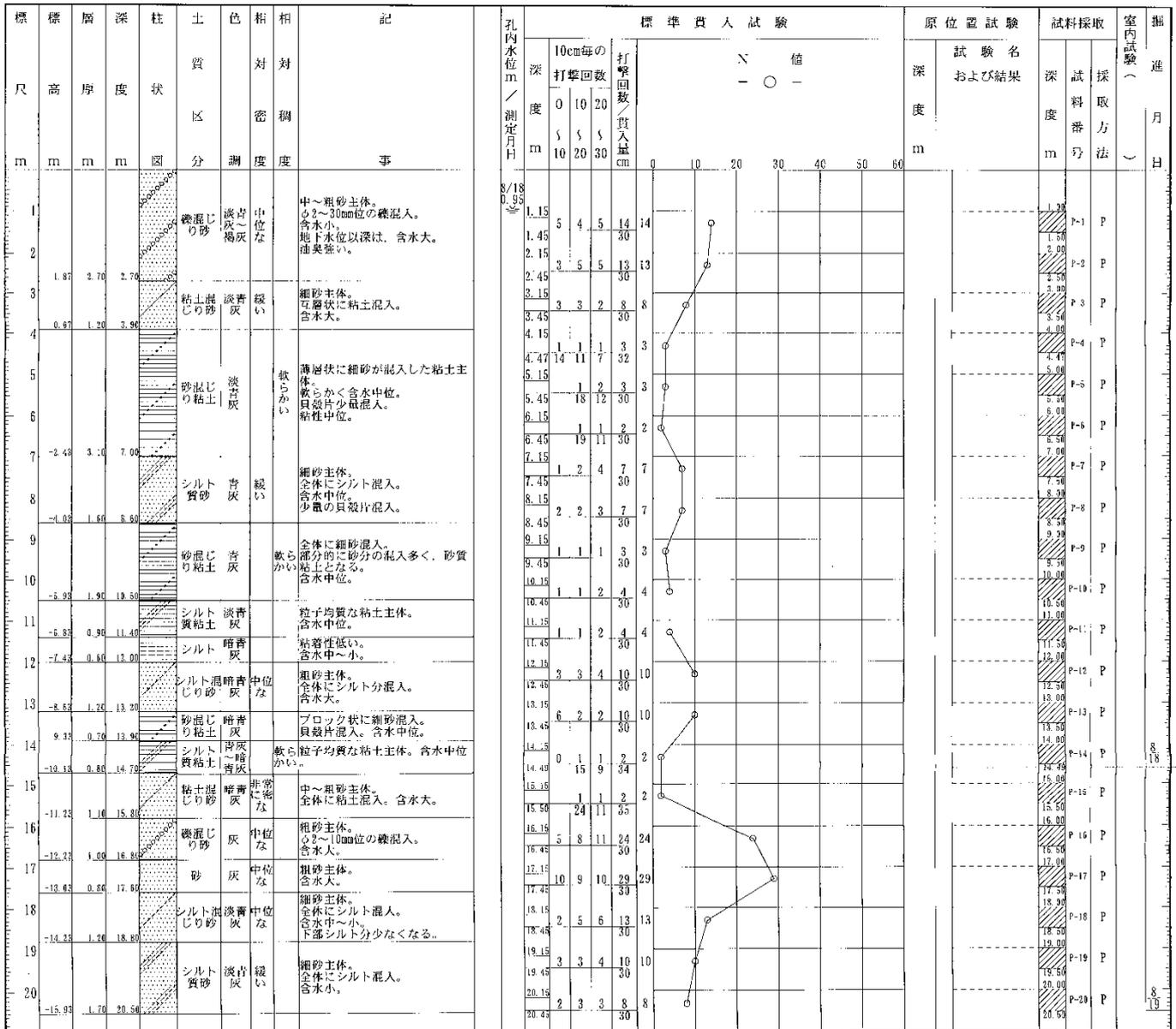
調査名

ボーリングNo. 224SW

事業・工事名

シートNo. 224SW

ボーリング名		No. 224SW		調査位置		大阪府堺市西区築港新町3-16 コスモ石油(株)製油所構内		北緯	
発注機関				調査期間		平成21年8月18日～21年8月19日		東経	
調査業者名				主任技師		現場代理人		コア鑑定者	
ボーリング責任者		ボーリング責任者		試験機		OK-II		ハンマー落下用具	
エンジン		NFD9-K		ポンプ		自動落下装置		SP-8	
孔口標高	OP +4.57m	角	180°上 90° 0° 180°下	方	北 0° 東 90° 南 180° 西 270°	地盤勾配	水平 0°	使用機種	
総掘進長	20.50m								



# ボーリング柱状図

調査名 タンク安全性評価工事

ボーリングNo. 2 2 1

事業・工事名

シートNo. 19002221

ボーリング名	No. 221		調査位置	大阪府堺市西区築港新町3丁コスモ石油株式会社堺製油所構内			北緯	34° 34' 10.9"	
発注機関	コスモエンジニアリング株式会社					調査期間	平成19年5月28日～19年5月29日		
調査業者名	中央開発株式会社関西支社 電話 (06-6386-3691)		主任技師	東原純		現場代理人	中村知夫	コア鑑定者	杉原善作
ボーリング責任者	藤木利男								
孔口標高	OP +4.51m	角			方			地盤勾配	水平 0°
総掘進長	20.50m	度			向			使用機種	試錐機 KR-SH エンジン NFAD-7L
							ハンマー落下用具	ポンプ	
							自動落下装置		
							V5-P		

標高	層厚	深	柱状	土質	色	相対	相対	相対	相対	標準貫入試験			原位置試験	試料採取	室内試験	掘進		
										深	10cm毎の打撃回数	打撃回数/貫入量					深	試験名
4.21	0.30	3.90	砂	淡褐色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	5/28	1.00	1.00	0	0	P-1	P		
2.81	1.40	1.70	砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	1.45	2	4	7	7	P-2	P		
1.56	1.25	3.95	砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	2.15	3	3	3	3	P-3	P		
0.11	1.45	4.40	シルト	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	2.51	12	12	12	36	P-4	P		
-2.59	0.40	4.80	砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	3.13	1	1	1	3	P-5	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	3.56	23	18	41	6	P-6	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	4.15	2	2	2	6	P-7	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	4.45	2	2	2	6	P-8	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	5.15	2	2	2	6	P-9	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	5.48	2	2	11	33	P-10	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	6.15	1	1	1	3	P-11	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	6.50	20	15	35	3	P-12	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	7.15	2	1	3	3	P-13	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	7.48	18	15	33	8	P-14	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	8.15	1	1	1	3	P-15	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	8.51	20	16	36	2	P-16	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	9.15	1	1	1	3	P-17	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	9.52	15	12	37	3	P-18	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	10.15	1	1	1	3	P-19	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	10.51	14	12	36	3	P-20	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	11.15	1	1	1	3	P-21	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	11.49	14	1	34	8	P-22	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	12.15	1	2	5	8	P-23	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	13.15	2	2	4	4	P-24	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	13.48	12	18	30	2	P-25	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	14.15	2	1	16	37	P-26	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	14.52	1	1	2	2	P-27	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	15.15	1	1	1	3	P-28	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	15.50	21	14	35	11	P-29	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	16.15	3	4	4	11	P-30	P		
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	16.45	7	5	6	18				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	17.15	18	12	10	40				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	18.15	2	2	3	7				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	18.48	2	2	7	11				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	19.15	2	2	7	11				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	19.48	2	2	7	11				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	20.15	2	2	7	11				
			砂	暗灰色	緩い	緩い	緩い	緩い	緩い	20.48	2	2	7	11				

# ボーリング柱状図

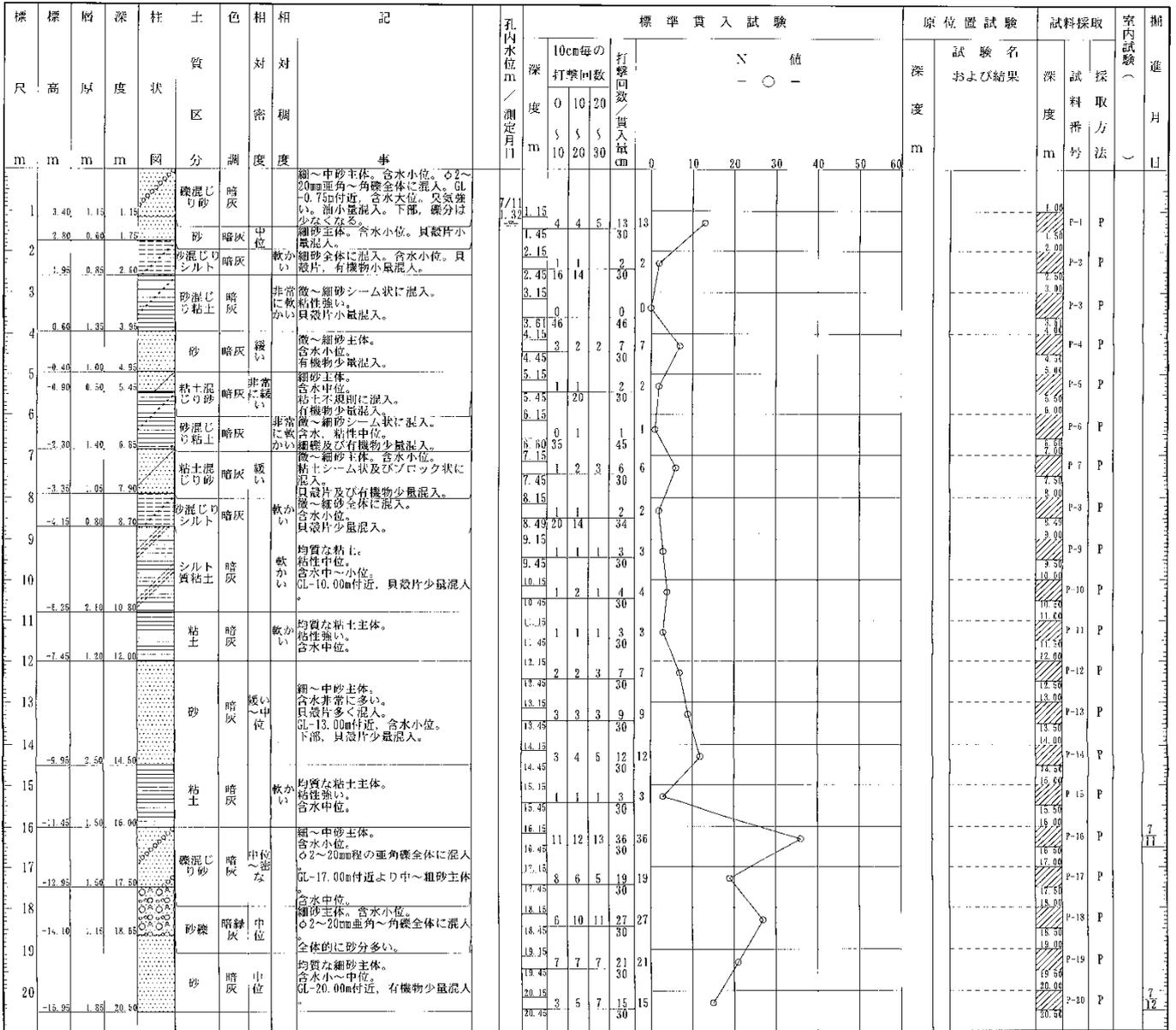
調査名

ボーリングNo. 225-SF

事業・工事名

シートNo. 18046

ボーリング名	225-SE		調査位置	大阪府堺市西区築港新町3-16コスモ石油事業所構内			北緯		
発注機関				調査期間	平成18年7月11日～18年7月12日			東経	
調査業者名				主任技師	現場代理人	コア鑑定者	ボーリング責任者		
孔口標高	OP	角	方	地盤勾配	使用機種	試験機	ハンマー落用器具	自動落下装置	
総掘進長	+4.55m	度	向	度	エンジン	D0-D	ポンプ	V6-B	



### 3.3 側板外周部およびタンク内底板の沈下量計測

水張試験時の側板外周部およびタンク内底板の沈下量計測を行った。

#### 3.3.1 計測方法

##### (1) 側板外周部の沈下量計測

側板外周部の沈下量測定は、危険物の規制に関する規則第 20 条の 10 第 1 項第 1 号の側板最下段の水平度の測定と同様に、屋外タンク側板最下段の沈下量を水準測量により実施した。

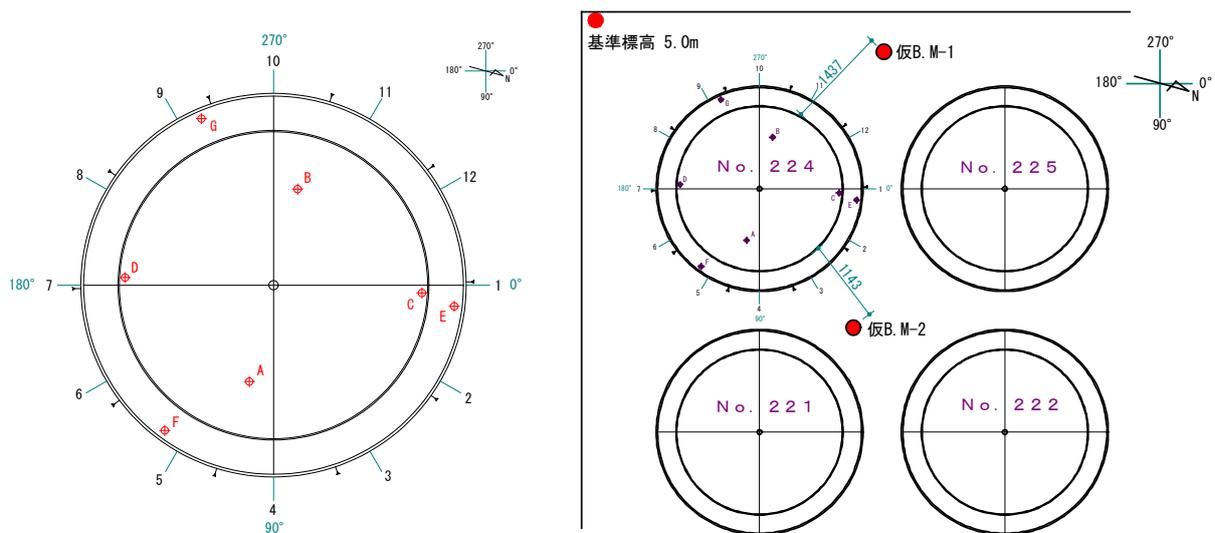
基準とする標高は、検査時に使用する仮 B.M とし、タンク外周部 12 箇所の測定を行った。

##### (2) タンク内底板の沈下量計測

タンク内に水張りを行った影響によるタンク内底板の変形(沈下)量を計測するため、浮き屋根上に存在する孔(デッキ貫通マンホール、排水口、リムベント) 7 箇所を利用した。なお、ルーフサポート孔に関しては、底板部に SUS 板が溶接されており、マグネットによる吸着力が低いことや、ルーフサポートを抜く事による構造上の安全性を考慮して利用しない。

測定は、水張り前 → 1/4 水位 → 1/2 水位 → 満水 → 1/2 水位 → 1/4 水位 → 水抜き後の 7 回とした。

図 3.3.1 に対象タンクの底板沈下量計測位置(7 箇所)と側板外周部の沈下測量位置(12 箇所)、標高の基準およびタンク外に設置した仮 B.M-1,2 の位置を示す。



No.	A, B	C, D	E, F, G	1~12
中心からの距離(m)	7.5	11.2	13.7	14.5

図 3.3.1 底板の沈下量計測位置と側板外周部の沈下測量位置

測定方法は基準標高からタンクの内壁に仮 B.M を設置し、3 項目の計測を実施した。

- ① レベル測量による仮 B.M の設置とタンク内底板の標高測定
- ② レーザーレベルによるタンク内底板の標高測定
- ③ タンクスケールによるタンク内底板の沈下量測定

タンク内底板部から浮き屋根上までの計測は、JIS1 級の鋼製巻尺を用いる。設置方法は、浮き屋根上の孔位置に設定した計測位置の直下にあたる底板部に吸着能力の高いマグネットホルダ台を取り付け、その上部に鋼製巻尺を固定する方法とした。写真 3.3.2 にタンク内底板部への鋼製巻尺設置状況を示す。



写真 3.3.2 タンク内底板部に設置した鋼製巻尺

- ① レベル測量による仮 B.M の設置とタンク内底板の標高測定

レベル測量による仮 B.M の設置とタンク内底板の標高測定のイメージを図 3.3.3 に示す。手順は次のとおりである。

- a. 基準となる標高からタンク天端部にあるプラットホームを利用し、仮 B.M を 2 箇所設置する。この時、タンク側板の外側および内側については、鋼製巻き尺による直接計測とする。
- b. タンク内壁に設けた仮 B.M を使用して、レベル測量を実施する。ただし、浮き屋根の仕様は、シングルデッキであり、デッキの変形影響を受けないポンツーン上等に器械を設置する方法とする。
- c. タンク内底板に設置した鋼巻尺の読み値から、底板部の標高を算出し、初期値からの変化量を沈下量とする。

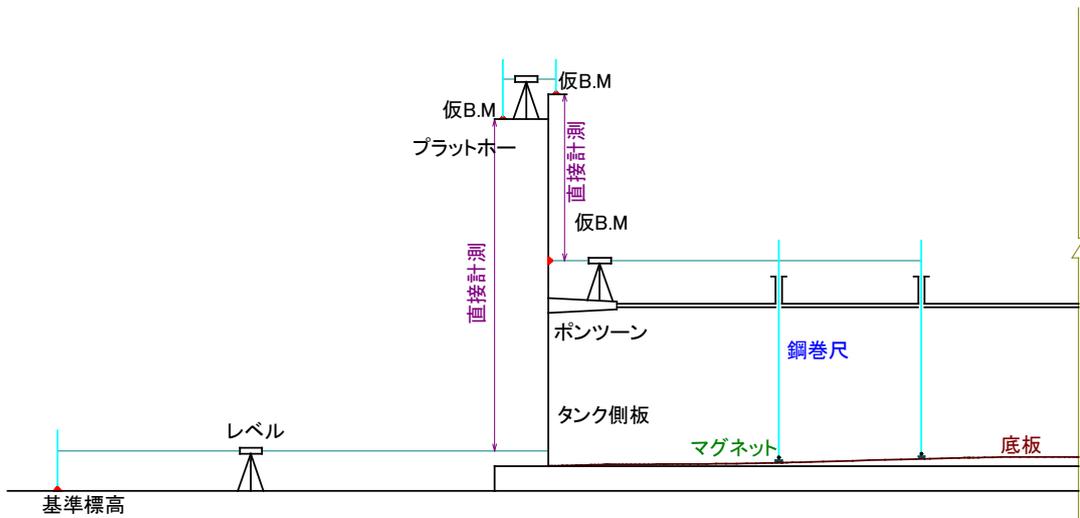


図 3.3.3 レベル測量による仮 B.M 設置とタンク内底板の標高測定

② レーザーレベルによるタンク内底板の標高測定

レーザーレベルを用いたタンク内底板の標高測定のイメージを図 3.3.4 に示す。

測定は、「①レベル測量」で設置したタンク内の仮 B.M. を利用し、レベル測量器械の代わりにレーザーレベル装置を設置して行う（装置はポンツーン上に設置）。

レーザーレベル装置では、レベル測量時に設定したタンク内壁 2 点の仮 B.M. の標高に差がないこと、自動水準器によるレーザー水平ライン上の測定結果が、レベル測量と相違ないことを確認する。

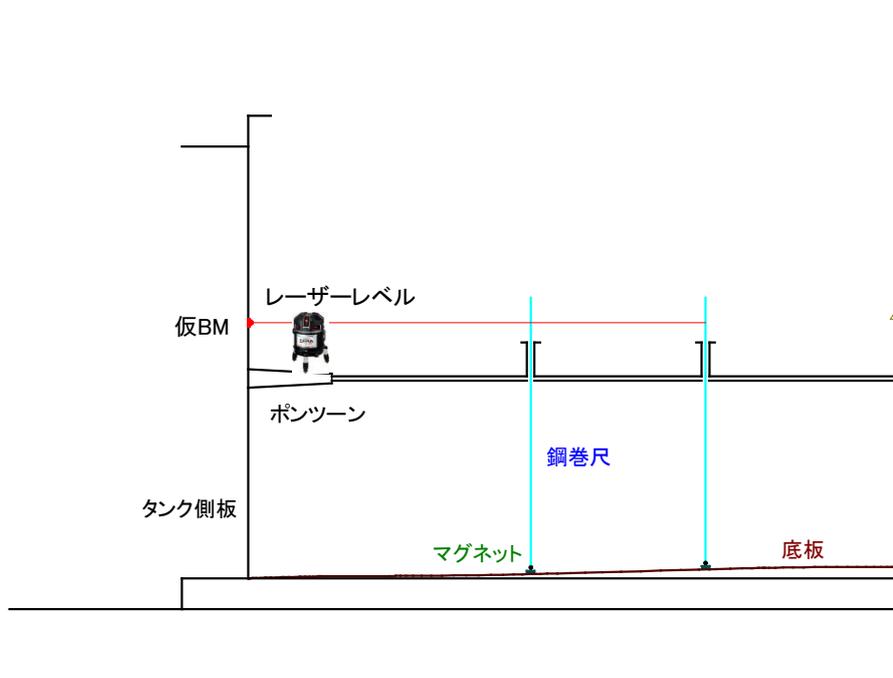


図 3.3.4 レーザーレベルを用いたタンク内底板の標高量測定

### ③ タンクスケールによるタンク内底板の沈下量測定

タンクスケールを用いたタンク内底板の沈下量測定のイメージを図 3.3.5 に示す。

測定は、タンク内底板に設置した鋼巻尺の読み値によりスケール直読位置の標高を算出し、ルーフサポート孔より底板へ降下させたタンクスケールの読み値からタンク内底板の標高を測定した。

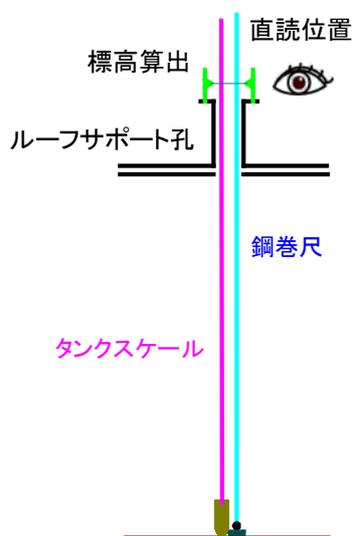


図 3.3.5 タンクスケールを用いたタンク内底板の沈下量測定方法

### (3) 沈下量計測のタイミング

対象タンク内への水張り水位と沈下量計測のタイミングを図 3.3.6 に示す。

試験時の沈下量計測は、水位を増加させる条件(①～④)と水位を減少させる条件(⑤～⑦)の計 7 回実施した。注水時と排水時に計測する水位は同レベルを目処とした。また、各計測は① : 12/19、② : 12/20、③ : 12/21、④ : 12/23、⑤ : 12/26、⑥ : 12/27、⑦ : 1/8、に実施した。

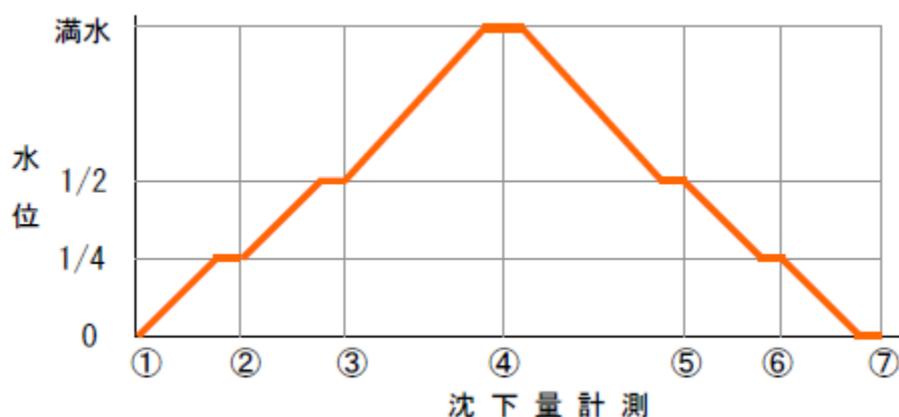


図 3.3.6 水張り試験水位と沈下量計測のタイミング

### 3.3.2 計測結果

#### (1) 側板外周部の沈下量

表 3.3.1 にタンク側板外周部の標高および沈下量、図 3.3.7 にタンク側板外周部の標高の変化、図 3.3.8～図 3.3.19 に水位とタンク側板外周部の沈下量の関係を示す。なお、水張試験前の空液時（第1回）における計測標高の最大値と最小値の差（不等沈下量）は 11mm であり、タンク内径に対する不等沈下量の割合（不等沈下率）は 1/2,642 である。

表 3.3.1 タンク側板外周部の標高および沈下量（単位は mm）

	種別 測点No.	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	BM-1	BM-2	液量(m)	測定年月日
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
第1回	標高	5189	5189	5191	5188	5181	5185	5187	5192	5189	5187	5185	5184	4568	4609		2012/12/19
	前回差	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	水張り前
	累計沈下量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
第2回	標高	5187	5186	5188	5186	5179	5182	5186	5185	5184	5183	5181	5181	4567	4608		2012/12/20
	前回差	-2	-3	-3	-2	-2	-3	-1	-7	-5	-4	-4	-3	-1	-1	3.3	水位1/4
	累計沈下量	-2	-3	-3	-2	-2	-3	-1	-7	-5	-4	-4	-3	-1	-1		
第3回	標高	5182	5182	5183	5180	5174	5177	5180	5180	5182	5180	5178	5177	4565	4608		2012/12/21
	前回差	-5	-4	-5	-6	-5	-5	-6	-5	-2	-3	-3	-4	-2	0	6.6	水位1/2
	累計沈下量	-7	-7	-8	-8	-7	-8	-7	-12	-7	-7	-7	-7	-3	-1		
第4回	標高	5174	5174	5175	5173	5167	5170	5174	5173	5174	5170	5168	5168	4564	4606		2012/12/23
	前回差	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-6	-7	-8	-10	-10	-9	-1	-2	13.5	満水
	累計沈下量	-15	-15	-16	-15	-14	-15	-13	-19	-15	-17	-17	-16	-4	-3		
第5回	標高	5178	5178	5179	5179	5172	5176	5180	5178	5178	5176	5173	5173	4566	4607		2012/12/26
	前回差	4	4	4	6	5	6	6	5	4	6	5	5	2	1	6.6	水位1/2
	累計沈下量	-11	-11	-12	-9	-9	-9	-7	-14	-11	-11	-12	-11	-2	-2		
第6回	標高	5182	5182	5183	5181	5174	5178	5182	5181	5182	5180	5178	5177	4567	4609		2012/12/27
	前回差	4	4	4	2	2	2	2	3	4	4	5	4	1	2	3.3	水位1/4
	累計沈下量	-7	-7	-8	-7	-7	-7	-5	-11	-7	-7	-7	-7	-1	0		
第7回	標高	5188	5189	5190	5188	5181	5184	5187	5187	5187	5185	5183	5182	4567	4610		2013/01/08
	前回差	6	7	7	7	7	6	5	6	5	5	5	5	0	1	0.0	水抜き後
	累計沈下量	-1	0	-1	0	0	-1	0	-5	-2	-2	-2	-2	-1	1		

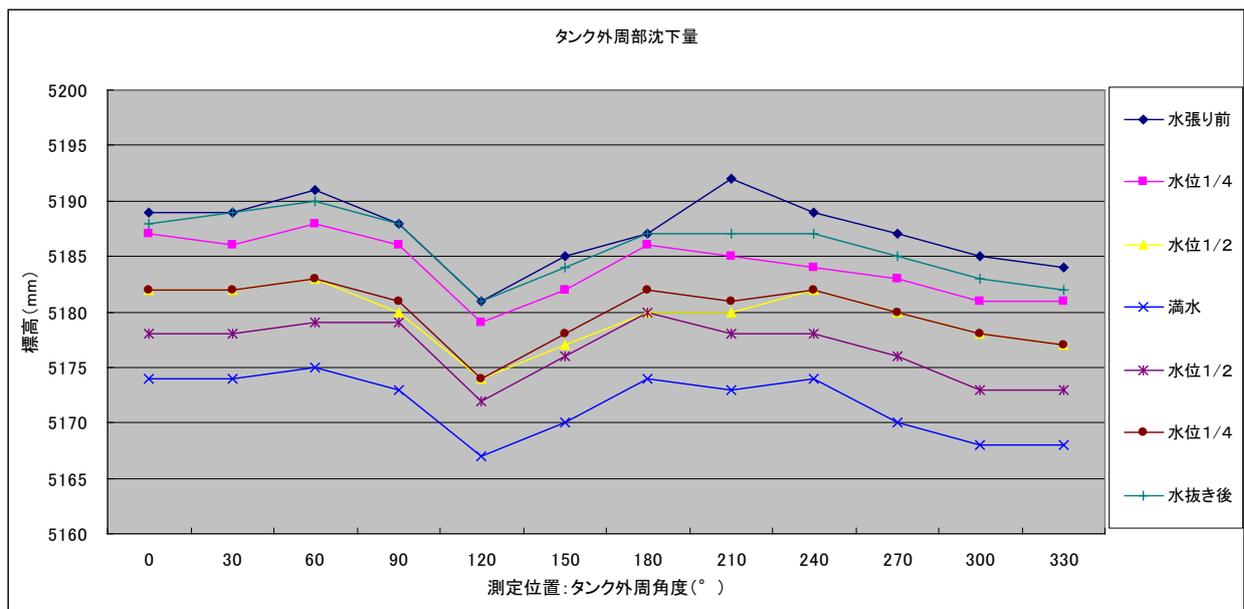


図 3.3.7 タンク側板外周部の標高の変化

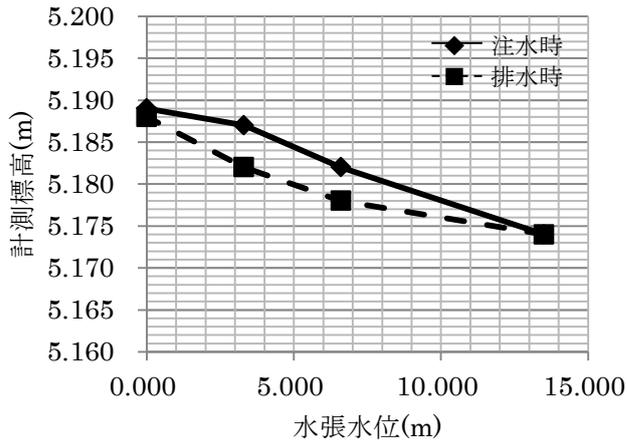


図 3.3.8 水位 - 標高の関係 (「1」)

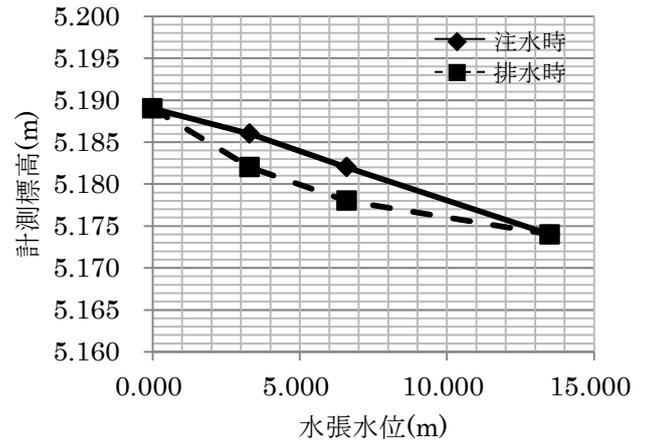


図 3.3.9 水位 - 標高の関係 (「2」)

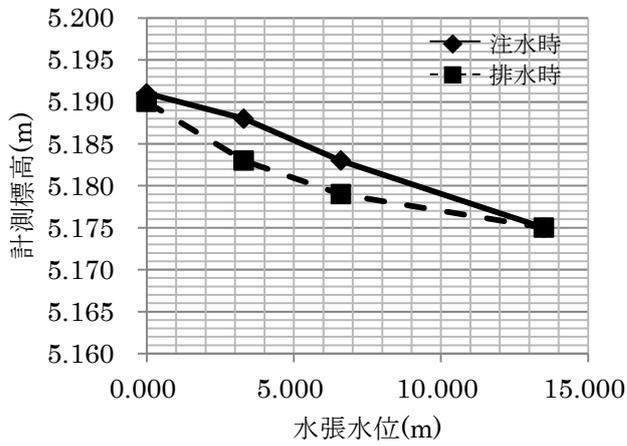


図 3.3.10 水位 - 標高の関係 (「3」)

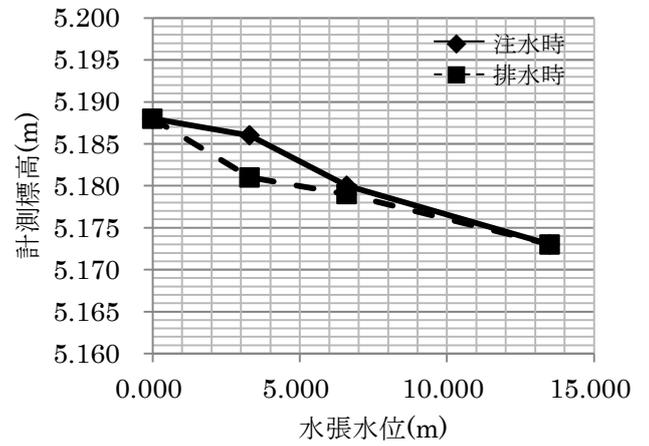


図 3.3.11 水位 - 標高の関係 (「4」)

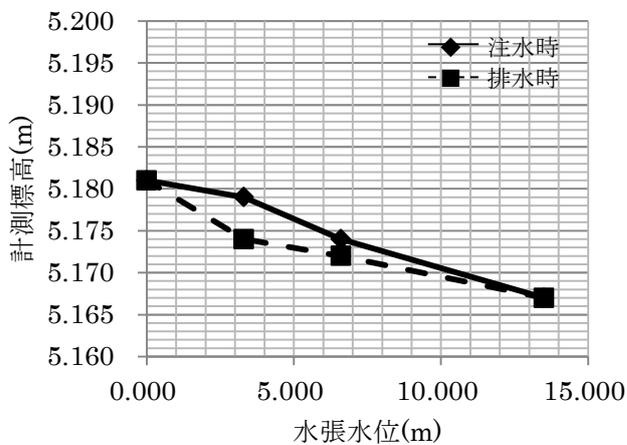


図 3.3.12 水位 - 標高の関係 (「5」)

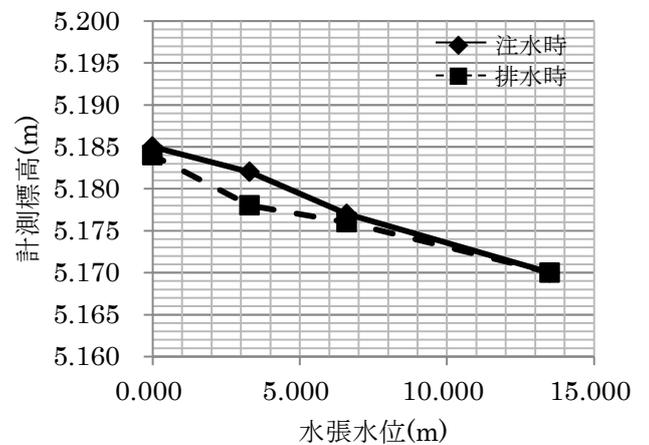


図 3.3.13 水位 - 標高の関係 (「6」)

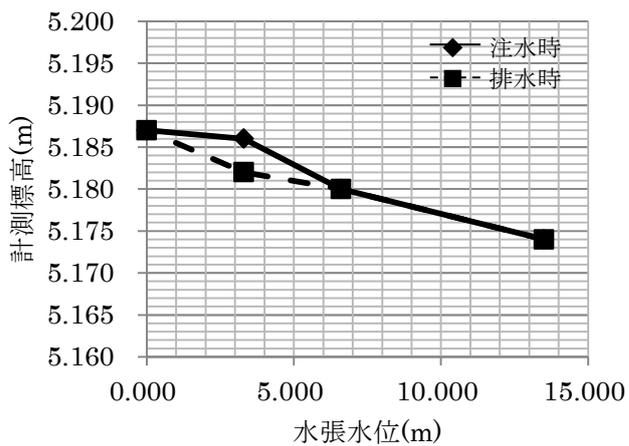


図 3.3.14 水位 - 標高の関係 (「7」)

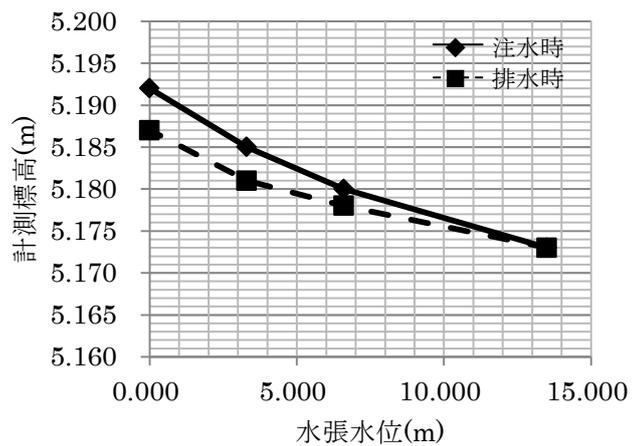


図 3.3.15 水位 - 標高の関係 (「8」)

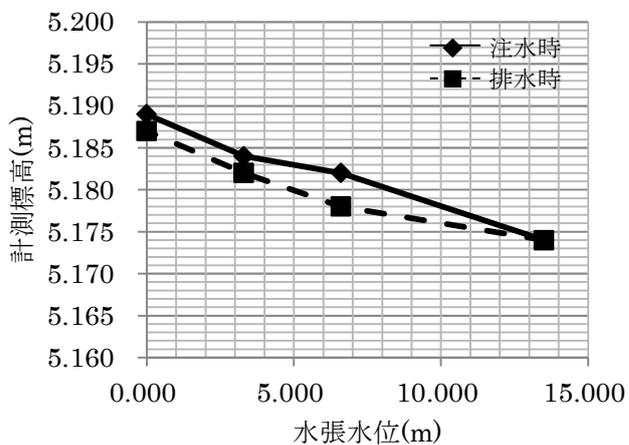


図 3.3.16 水位 - 標高の関係 (「9」)

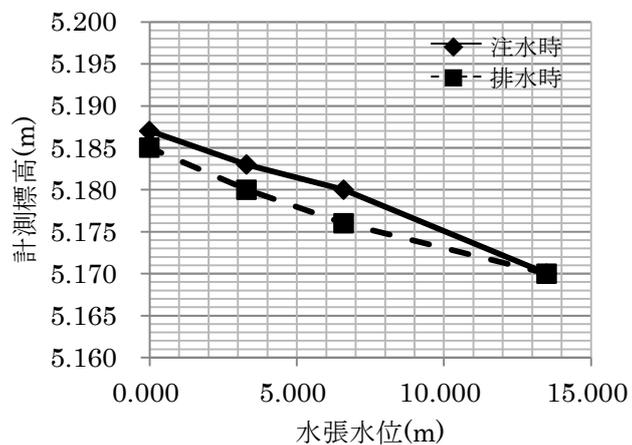


図 3.3.17 水位 - 標高の関係 (「10」)

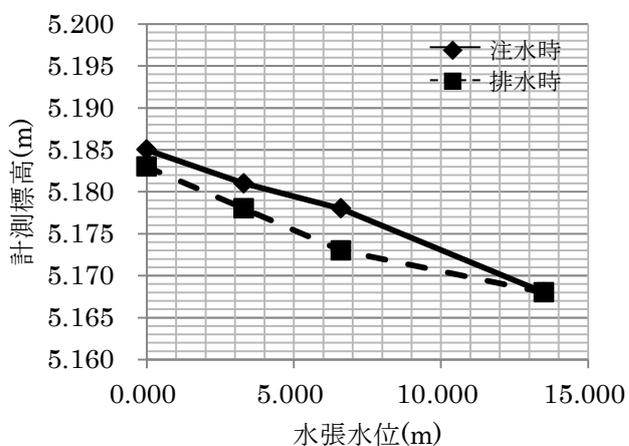


図 3.3.18 水位 - 標高の関係 (「11」)

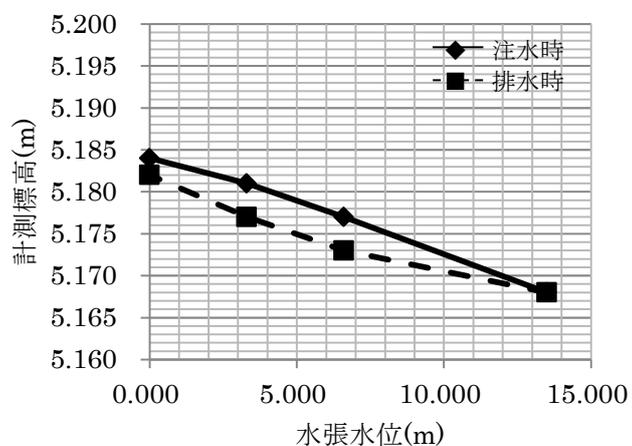


図 3.3.19 水位 - 標高の関係 (「12」)

(2) タンク内底板の沈下量

レベル測量による沈下量計測結果を表 3.3.2 に、各計測点の水位と沈下量の関係を図 3.3.20～3.3.26 に示す。

表 3.3.2 レベル測量による沈下量計測結果(mm)

	種別 測点No.	A	B	C	D	E	F	G	液量(m)	測定年月日
第1回	標高	5333.0	5331.0	5262.0	5258.0	5225.0	5221.0	5241.0		2012/12/19
	前回差	—	—	—	—	—	—	—	0.0	水張り前
	累計沈下量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
第2回	標高	5322.0	5324.0	5251.0	5245.0	5204.0	5206.0	5213.0		2012/12/20
	前回差	-11.0	-7.0	-11.0	-13.0	-21.0	-15.0	-28.0	3.3	水位1/4
	累計沈下量	-11.0	-7.0	-11.0	-13.0	-21.0	-15.0	-28.0		
第3回	標高	5312.0	5314.0	5242.0	5237.0	5194.0	5197.0	5205.0		2012/12/21
	前回差	-10.0	-10.0	-9.0	-8.0	-10.0	-9.0	-8.0	6.6	水位1/2
	累計沈下量	-21.0	-17.0	-20.0	-21.0	-31.0	-24.0	-36.0		
第4回	標高	5300.0	5303.0	5233.0	5228.0	5187.0	5189.0	5197.0		2012/12/23
	前回差	-12.0	-11.0	-9.0	-9.0	-7.0	-8.0	-8.0	13.5	満水
	累計沈下量	-33.0	-28.0	-29.0	-30.0	-38.0	-32.0	-44.0		
第5回	標高	5307.0	5310.0	5240.0	5233.0	5192.0	5194.0	5202.0		2012/12/26
	前回差	7.0	7.0	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	6.6	水位1/2
	累計沈下量	-26.0	-21.0	-22.0	-25.0	-33.0	-27.0	-39.0		
第6回	標高	5315.0	5318.0	5246.0	5240.0	5199.0	5200.0	5208.0		2012/12/27
	前回差	8.0	8.0	6.0	7.0	7.0	6.0	6.0	3.3	水位1/4
	累計沈下量	-18.0	-13.0	-16.0	-18.0	-26.0	-21.0	-33.0		
第7回	標高	5330.0	5329.0	5260.0	5255.0	5220.0	5216.0	5235.0		2013/01/08
	前回差	15.0	11.0	14.0	15.0	21.0	16.0	27.0	0.0	水抜き後
	累計沈下量	-3.0	-2.0	-2.0	-3.0	-5.0	-5.0	-6.0		

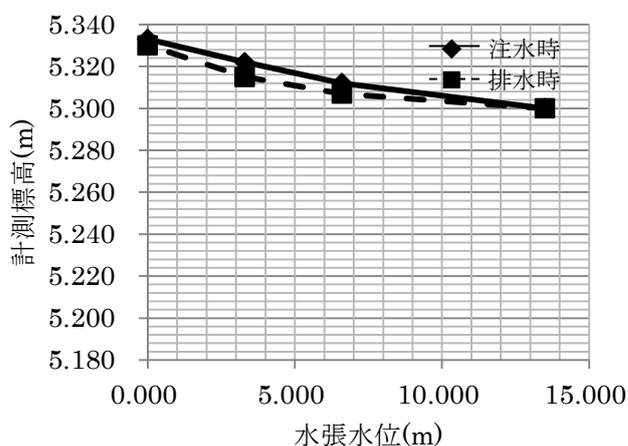


図 3.3.20 水位 - 標高の関係 (「A」)

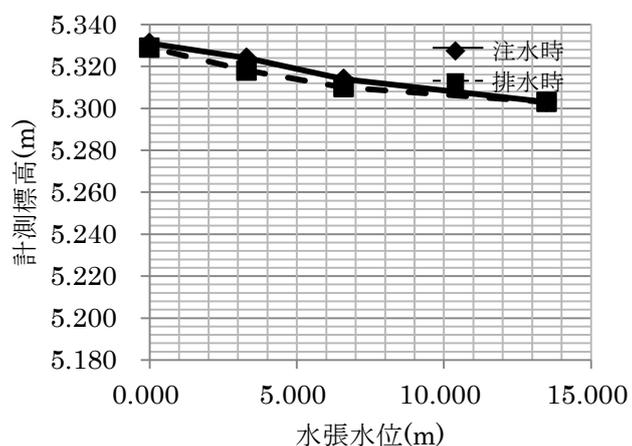


図 3.3.21 水位 - 標高の関係 (「B」)

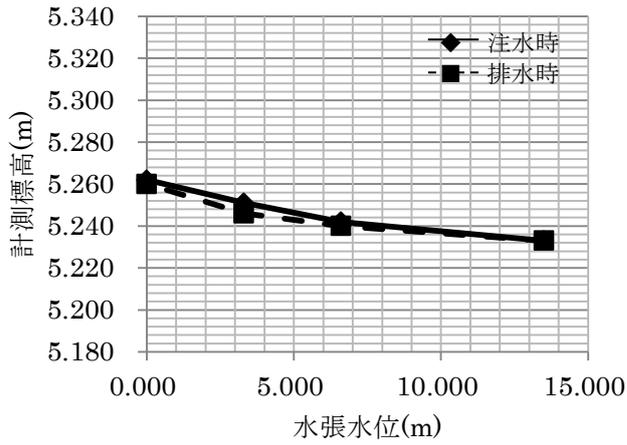


図 3.3.22 水位 - 標高の関係 (「C」)

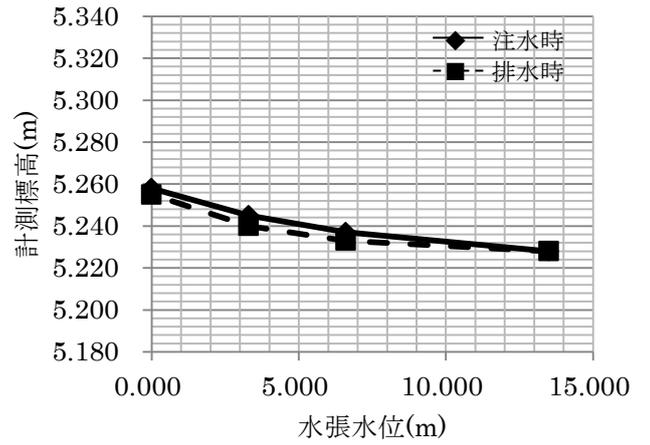


図 3.3.23 水位 - 標高の関係 (「D」)

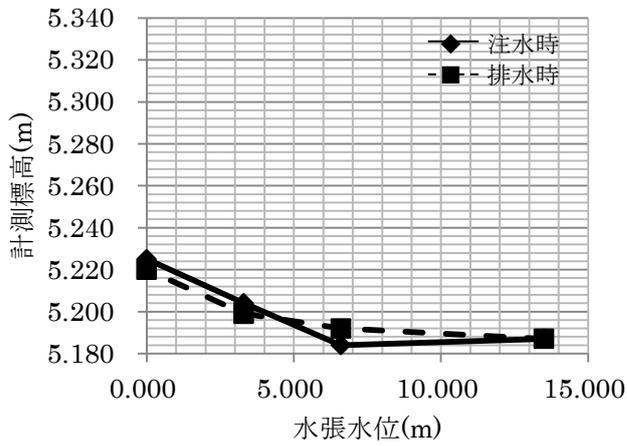


図 3.3.24 水位 - 標高の関係 (「E」)

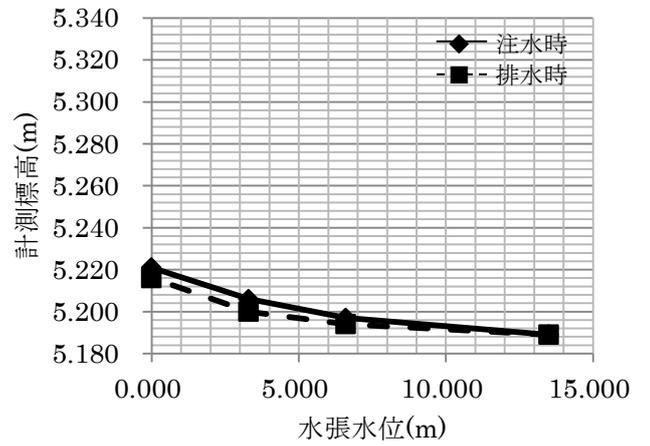


図 3.3.25 水位 - 標高の関係 (「F」)

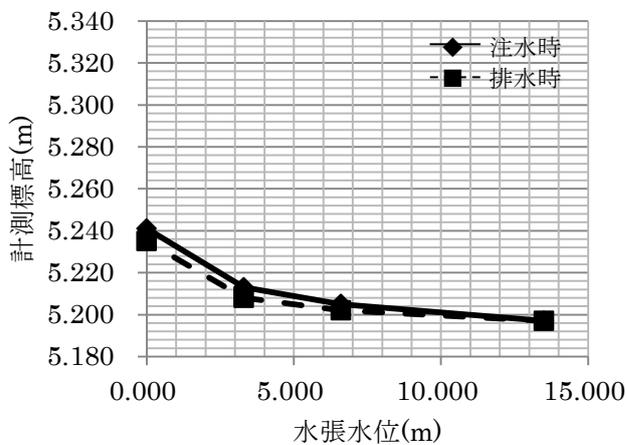


図 3.3.26 水位 - 標高の関係 (「G」)

(3) 測定方法による差

3種類の方法による沈下量の比較を表 3.3.3、標高の比較を表 3.3.4 に示す。

表 3.3.3 3種類の方法による沈下量の比較(mm)

	種別 測点No.	A	B	C	D	E	F	G	液量(m)	測定年月日
第1回	①レベル測量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		2012/12/19
	②レーザーレベル	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	水張り前
	③タンクスケール	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
第2回	①レベル測量	-11.0	-7.0	-11.0	-13.0	-21.0	-15.0	-28.0		2012/12/20
	②レーザーレベル	-9.0	-5.0	-11.0	-10.0	-22.0	-13.0	-28.0	3.3	水位1/4
	③タンクスケール	-10.0	-7.0	-10.0	-12.0	-23.0	-15.0	-31.0		
第3回	①レベル測量	-21.0	-17.0	-20.0	-21.0	-31.0	-24.0	-36.0		2012/12/21
	②レーザーレベル	-21.0	-16.0	-21.0	-20.0	-33.0	-23.0	-36.0	6.6	水位1/2
	③タンクスケール	-20.0	-17.0	-21.0	-20.0	-32.0	-24.0	-39.0		
第4回	①レベル測量	-33.0	-28.0	-29.0	-30.0	-38.0	-32.0	-44.0		2012/12/23
	②レーザーレベル	-32.0	-27.0	-29.0	-28.0	-38.0	-32.0	-44.0	13.5	満水
	③タンクスケール	-31.0	-26.0	-29.0	-27.0	-41.0	-33.0	-46.0		
第5回	①レベル測量	-26.0	-21.0	-22.0	-25.0	-33.0	-27.0	-39.0		2012/12/26
	②レーザーレベル	-26.0	-20.0	-24.0	-24.0	-34.0	-28.0	-41.0	6.6	水位1/2
	③タンクスケール	-25.0	-22.0	-23.0	-23.0	-36.0	-27.0	-42.0		
第6回	①レベル測量	-18.0	-13.0	-16.0	-18.0	-26.0	-21.0	-33.0		2012/12/27
	②レーザーレベル	-17.0	-12.0	-17.0	-16.0	-28.0	-20.0	-34.0	3.3	水位1/4
	③タンクスケール	-20.0	-13.0	-14.0	-15.0	-28.0	-21.0	-37.0		
第7回	①レベル測量	-3.0	-2.0	-2.0	-3.0	-5.0	-5.0	-6.0		2013/01/08
	②レーザーレベル	-2.0	-2.0	-3.0	-1.0	-5.0	-4.0	-6.0	0.0	水抜き後
	③タンクスケール	-3.0	-1.0	-2.0	-2.0	-5.0	-6.0	-9.0		

表 3.3.4 3種類の方法による標高の比較(mm)

	種別 測点No.	A	B	C	D	E	F	G	液量(m)	測定年月日
第1回	①レベル測量	5333.0	5331.0	5262.0	5258.0	5225.0	5221.0	5241.0		2012/12/19
	②レーザーレベル	5333.0	5331.0	5262.0	5258.0	5225.0	5221.0	5241.0	0.0	水張り前
	③タンクスケール	5333.0	5331.0	5262.0	5258.0	5225.0	5221.0	5241.0		
第2回	①レベル測量	5322.0	5324.0	5251.0	5245.0	5204.0	5206.0	5213.0		2012/12/20
	②レーザーレベル	5324.0	5326.0	5251.0	5248.0	5203.0	5208.0	5213.0	3.3	水位1/4
	③タンクスケール	5323.0	5324.0	5252.0	5246.0	5202.0	5206.0	5210.0		
第3回	①レベル測量	5312.0	5314.0	5242.0	5237.0	5194.0	5197.0	5205.0		2012/12/21
	②レーザーレベル	5312.0	5315.0	5241.0	5238.0	5192.0	5198.0	5205.0	6.6	水位1/2
	③タンクスケール	5313.0	5314.0	5241.0	5238.0	5193.0	5197.0	5202.0		
第4回	①レベル測量	5300.0	5303.0	5233.0	5228.0	5187.0	5189.0	5197.0		2012/12/23
	②レーザーレベル	5301.0	5304.0	5233.0	5230.0	5187.0	5189.0	5197.0	13.5	満水
	③タンクスケール	5302.0	5305.0	5233.0	5231.0	5184.0	5188.0	5195.0		
第5回	①レベル測量	5307.0	5310.0	5240.0	5233.0	5192.0	5194.0	5202.0		2012/12/26
	②レーザーレベル	5307.0	5311.0	5238.0	5234.0	5191.0	5193.0	5200.0	6.6	水位1/2
	③タンクスケール	5308.0	5309.0	5239.0	5235.0	5189.0	5194.0	5199.0		
第6回	①レベル測量	5315.0	5318.0	5246.0	5240.0	5199.0	5200.0	5208.0		2012/12/27
	②レーザーレベル	5316.0	5319.0	5245.0	5242.0	5197.0	5201.0	5207.0	3.3	水位1/4
	③タンクスケール	5313.0	5318.0	5248.0	5243.0	5197.0	5200.0	5204.0		
第7回	①レベル測量	5330.0	5329.0	5260.0	5255.0	5220.0	5216.0	5235.0		2013/01/08
	②レーザーレベル	5331.0	5329.0	5259.0	5257.0	5220.0	5217.0	5235.0	0.0	水抜き後
	③タンクスケール	5330.0	5330.0	5260.0	5256.0	5220.0	5215.0	5232.0		

水位と底板の A~G における沈下量の平均値の関係について、3種類の方法による計測結果を比較したものを図 3.3.27 に示す。いずれの沈下量計測でも結果に大きな差はないことから、水張試験時における沈下量計測結果として、レベル測量による計測結果を用いることとする。

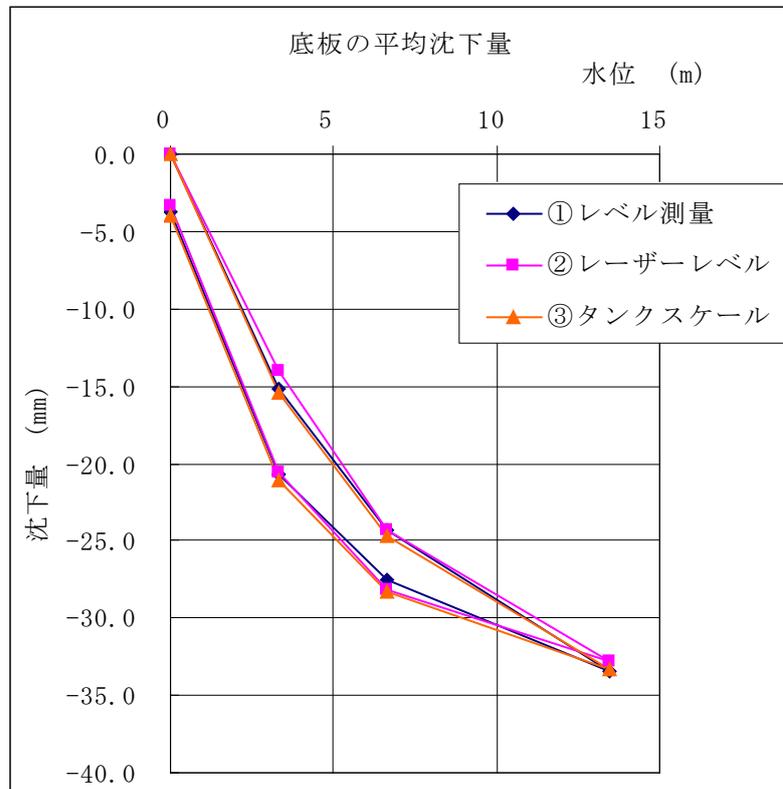


図 3.3.27 水位と底板の沈下量の平均値の関係

### 3.4 沈下量に関する検討

#### (1) 平均沈下量の比較

底板の沈下量、側板外周部の沈下量の平均値を比較し表 3.4.1 に、水位と底板の沈下量、側板外周部の沈下量の平均値の関係を図 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 平均沈下量等の比較(mm)

水位		底板	外周
注水時	水張り前	0 m	0.0
	水位 1/4	3.3m	-15.1
	水位 1/2	6.6m	-24.3
	満水	13.5m	-33.4
排水時	水位 1/2	6.6m	-27.6
	水位 1/4	3.3m	-20.7
	水抜き後	0 m	-3.7

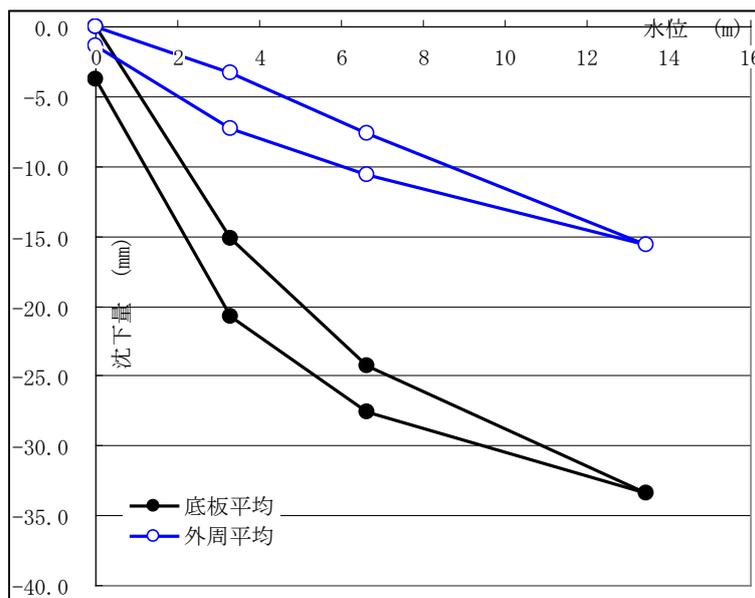


図 3.4.1 水位と底板の沈下量，側板外周部の沈下量の平均値の関係

底板の沈下量は側板外周部の沈下量より大きく、1/2 満水時で-24.3mm で側板外周部の沈下量の平均値の 3.2 倍、満水時で-33.4mm で側板外周部の沈下量の平均値の 2.2 倍となっている。

(2) タンク内部底板の沈下量分布

屋外貯蔵タンクは円筒形の軸対称であるため、タンク中心からの距離に応じた底板沈下量の分布を図 3.4.2 に示す。

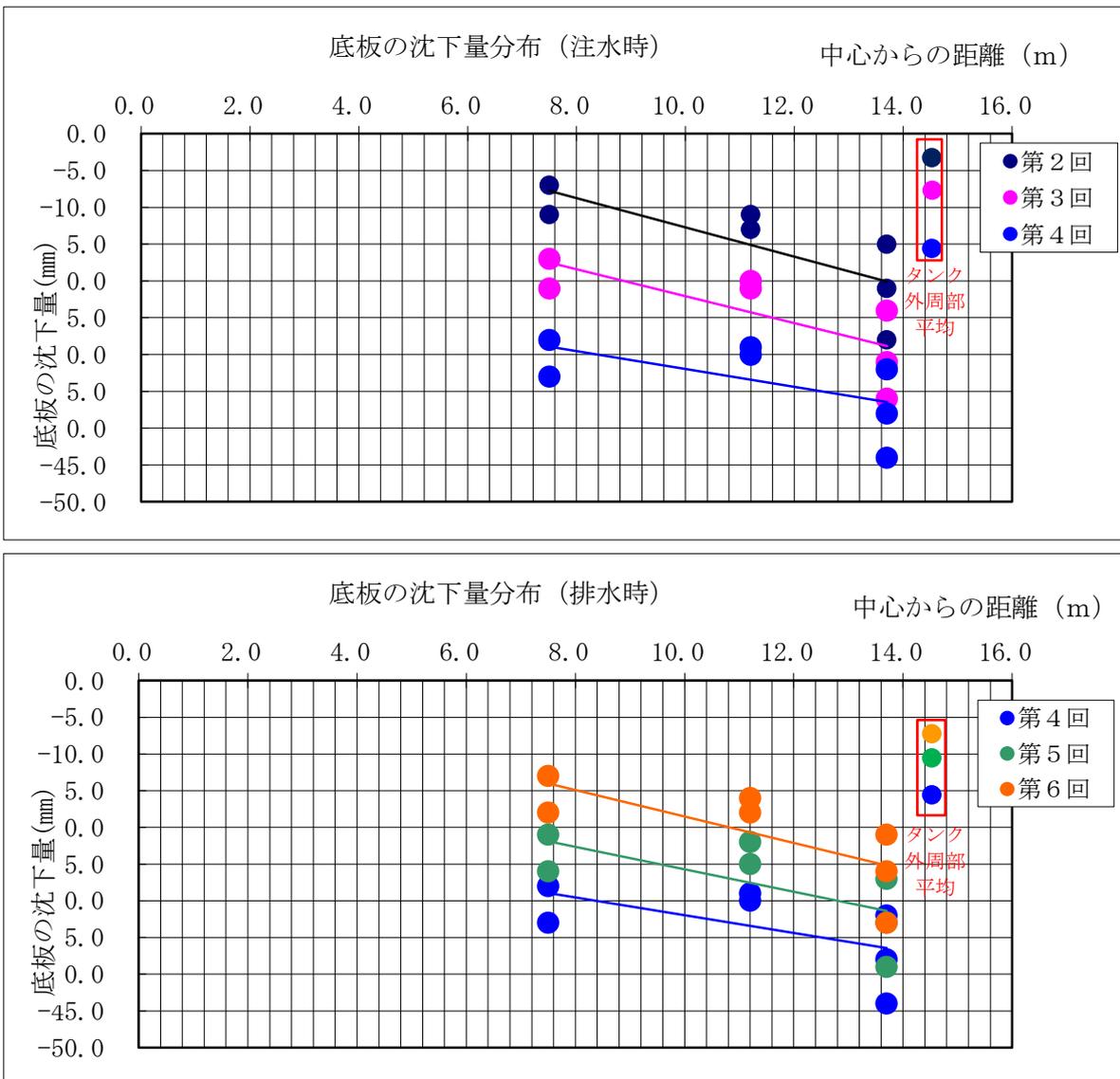


図 3.4.2 底板の沈下量の分布

(3) 地盤反力係数

地盤反力係数は、計測された地盤沈下量の平均値と側板外周部の沈下量の平均値と底板に加わる水圧より下式で算定する。

$$k_v = \frac{p}{\delta}$$

$p$  : 底板に加わる水圧 = 水の単位重量 ( $9.8 \text{ kN/m}^3$ )  $\times$  水位

$\delta$  : 平均沈下変形量 = (地盤沈下量の平均値 + 側板外周部の沈下量の平均値) / 2

地盤反力係数は同じ剛性を有する地盤に対しても載荷幅に大きく依存するため、屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準や JIS B 8501 (鋼製石油貯槽の構造) に示された  $K_{30}$  と比較するためには載荷幅の影響を補正する必要がある。ここでは、道路橋示方書・同解説IV下部構造編に従い、下式により載荷幅の影響を補正した。

$$K_{30} = \frac{k_v}{\left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{-0.75}}$$

$B_v$  : タンク内径 (m)

計算結果を表 3.4.2 に示す。

表 3.4.2 地盤反力係数

	1/2 満水時	満水時
$k_v \text{ (kN/m}^3\text{)}$	9,774	8,703
$K_{30} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$3.01 \times 10^5$	$2.68 \times 10^5$

比較のために屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準等々に示されている地盤反力係数の値を表 3.4.3 に示す。屋外タンク貯蔵所基礎の規制基準砂マウンドの  $K_{30}$  と比較し、約 3 倍であった。

表 3.4.3 新法タンクにおける鉛直地盤反力係数の基準値及び JIS における設定値

		地盤反力係数 $K_{30}$
屋外タンク貯蔵所基礎の 規制基準	砕石リング	$1.96 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 以上
	砂マウンド	$0.98 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 以上
JIS B 8501 (鋼製石油貯槽の構造) 設定値		$1.47 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 以上

### 3.5 種々の屋外貯蔵タンクの沈下計測結果

本検討会では、昨年度と本年度にわたり、旧法タンクを対象として2基の沈下計測を実施した。また、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の委託を受けて平成18年度から20年度にかけて危険物保安技術協会が行った「水張検査の合理化に関する検討業務」において、新法タンクを対象とした2基の沈下測定が実施されている。新法、旧法と基準の異なるタンクの水張荷重と沈下量の関係を比較する。

#### (1) 比較の方法

一様な半無限弾性地盤として、その表面に作用する荷重点の沈下量は、鉛直ひずみの深さ方向の積分より求められ、次式のように径および荷重度に比例する。(建築基礎構造設計指針 日本建築学会)

$$S_E = I_S \frac{1 - \nu^2}{E} pD$$

$S_E$  : 沈下量

$I_S$  : 沈下係数

$\nu$  : ポアソン比

$E$  : ヤング率

$p$  : 荷重度

$D$  : タンクの直径

また弾性地盤上の円形等分布鉛直荷重による表面変位(「土の応力伝播」(鹿島出版会))の分布を図3.5.1に示す。

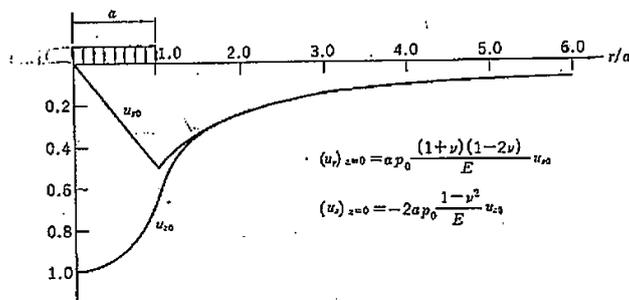


図 3.5.1 弾性地盤上の円形等分布鉛直荷重による表面変位

このように、径方向の地表面変位分布は中心からの距離と径の比で一義的に示される。各タンクの計測結果について、計測された沈下量と中心からの距離をそれぞれの石油タンクの内径で正規化して比較する。

(2) 比較する屋外貯蔵タンク

比較する屋外貯蔵タンクの概要を表 3.5.1 に示す。

表 3.5.1 沈下量計測を実施した屋外貯蔵タンクの概要

		タンク A	タンク B	タンク C	タンク D
住 所		大阪府堺市	神奈川県横浜市	青森県上北郡 六ヶ所村	鹿児島県肝属郡 東串良町
適用基準		旧法（新基準）	旧法（新基準）	新法	新法
計測期間		平成 24 年 12 月 ～平成 25 年 1 月	平成 23 年 12 月 ～平成 24 年 1 月	平成 20 年 9 月 ～10 月	平成 20 年 11 月 ～12 月
基本 寸法	内径 (mm)	29,060	36,830	81,500	83,300
	側高さ (mm)	16,455	21,945	24,000	23,000
	最高液高 (mm)	13,426	21,600	21,600	21,300
	底部勾配	1/120	1/120	1/120	1/200
	貯蔵容量 (kl)	8,830	19,000	110,000	116,000
底部 板 厚	底板 (mm)	9	8	12	12
	アニュラ板 (mm)	12	12	21	21

### (3) 計測結果の比較

水張試験による水圧 ( $p$ ) と平均沈下量 ( $\delta$ ) をタンク内径 ( $D$ ) で除した値 ( $\delta/D$ ) との関係について、タンク外周部に関するものを図 3.5.2 に、タンク内部底板に関するものを図 3.5.3 に示す。この比較はあくまで一例であり、空液→満液→空液という水張試験の経緯における計測頻度も異なるものの比較であるが、旧法タンクの地盤 (タンク A 及びタンク B) は新法タンク (タンク C 及びタンク D) に比べ沈下量が大きくなる状況が伺える。特に旧法タンクのタンク内部底板に係る沈下量は、新法タンク C の約 3～6 倍、タンク D の約 1.5～3 倍となっていることに留意する必要がある。

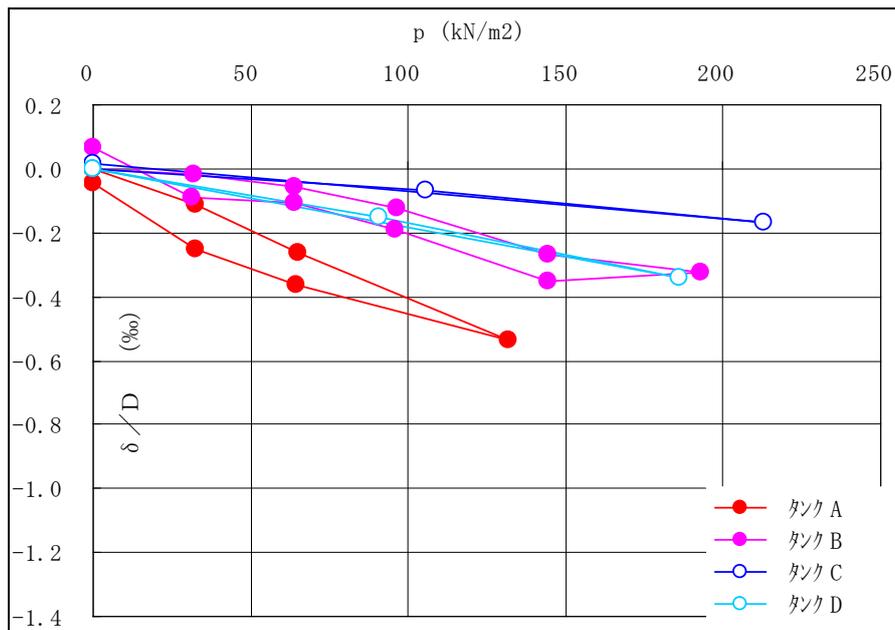


図 3.5.2 タンク内径で正規化された沈下量の比較 (タンク外周部平均)

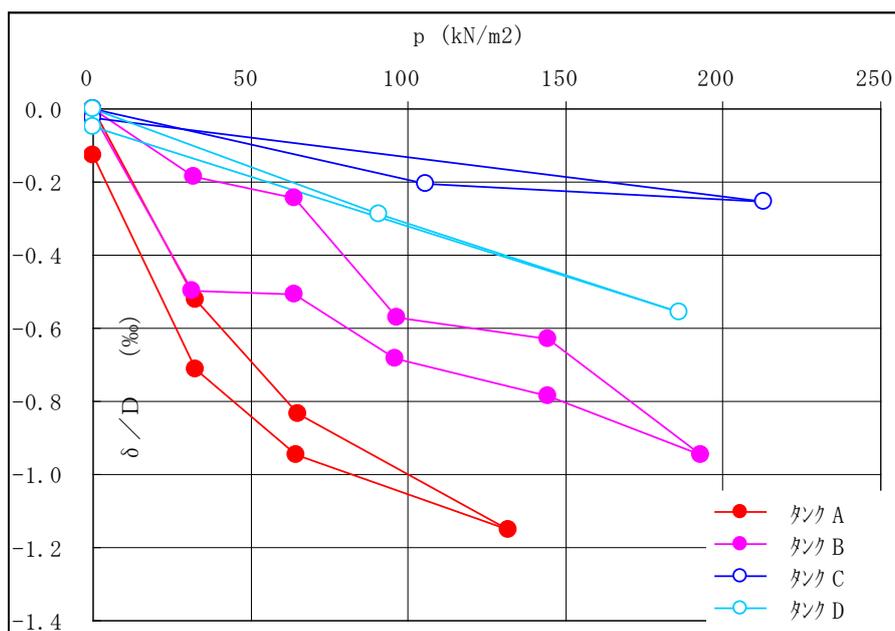


図 3.5.3 タンク内径で正規化された沈下量の比較 (タンク内部底板平均)

### 3.6 有限要素法を用いた沈下シミュレーション

#### 3.6.1 石油タンク水張り時の沈下に対する FEM 解析の方法

##### (1) 使用する解析コード

使用する解析コードは、弾塑性が表現でき、離間が表現できるものが望ましい。今回は汎用プログラム ABAQUS を利用し、解析 step を細かく刻み、前 step の結果により地盤剛性等を変化させその step の解析を実施させた。

##### (2) 構造モデル

構造モデルのイメージを図 3.6.1 に示す。解析範囲は石油タンクの径を  $D$  とすると、平面方向には  $6D$ 、深さ方向には  $3D$  とする。地盤の境界条件は、底面および外周面はピンローラーとし、底板と地盤の境界は接触要素で表現する。

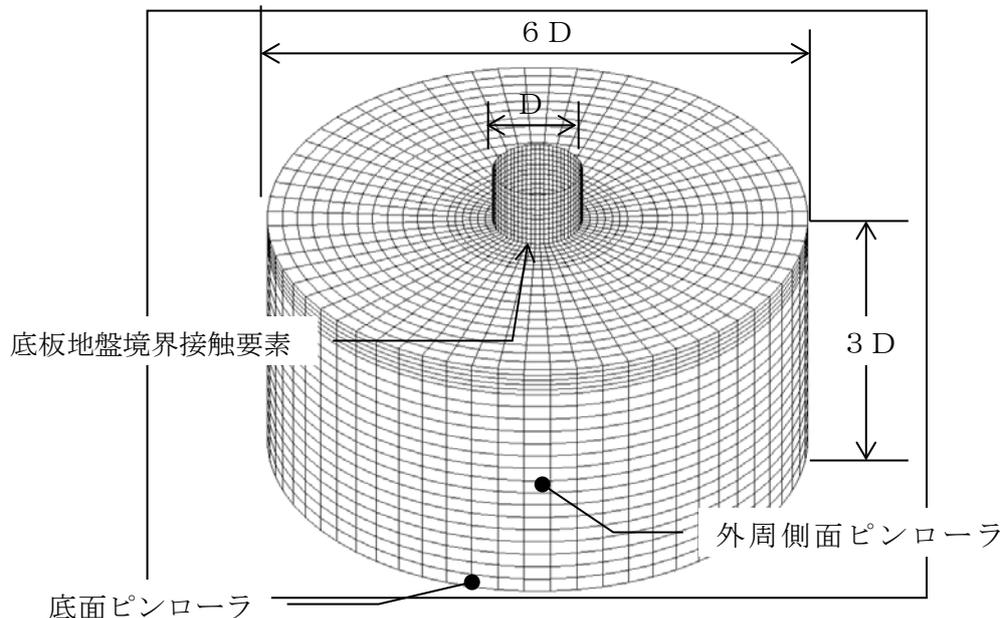


図 3.6.1 構造モデルのイメージ

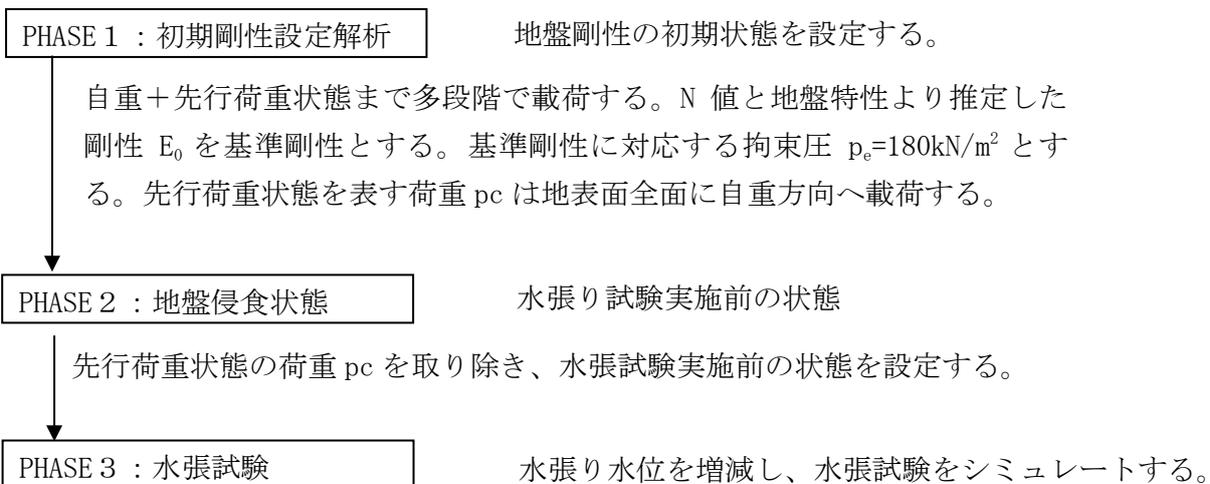
##### (3) 先行荷重状態の推定

昨年度実施した神奈川県横浜市のタンク地盤は、タンク底板直下の地盤の特性がブロックサンプリングした試料に対する三軸試験より求められていた。また、地中部の粘性土に対する圧密試験結果より、過去の地盤に与えられた荷重履歴が推定された。

今回の大阪府堺市のタンク地盤は、地盤のサンプリングによる三軸試験や圧密試験が行われていないため、タンク底板直下の地盤の特性は平成 21 年 9 月に実施された局部すべり判定で用いられたものに整合するよう設定した。また、地盤に与えられた先行荷重状態の荷重  $p_c$  は、対象タンクの最高液面高さに相当する水位 13.4m 相当 ( $p_c=132\text{kN/m}^2$ ) とした。

(4) FEM 解析のフロー

FEM 解析は 3 つの PHASE で実施する。その流れを図 3.6.2 に示す。



【水張り水位】(沈下モードや応力分布を求める水張り水位)

0m → 3.3m → 6.6m → 13.4m → 6.6m → 3.3m → 0m

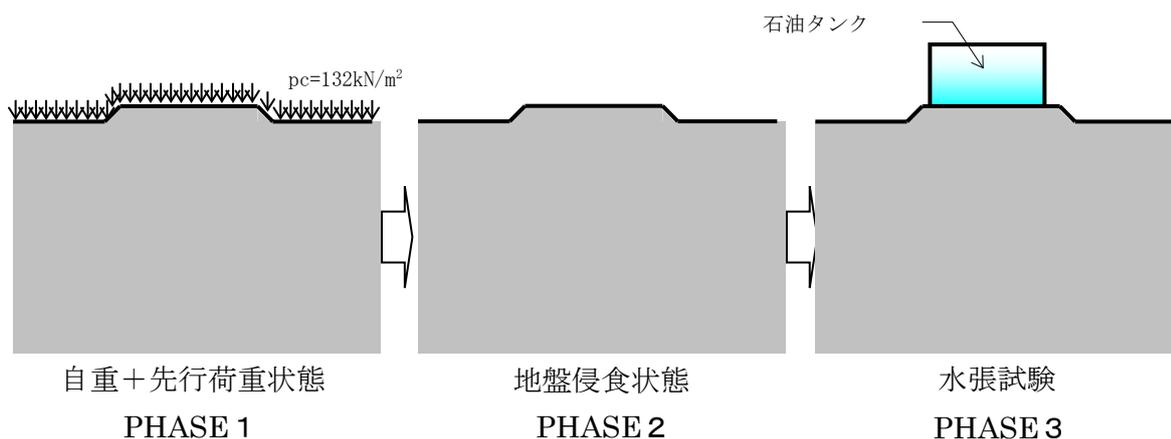


図 3.6.2 FEM 解析の流れ

(5) 地盤の要素特性の評価

ア 破壊基準

地盤の破壊曲面は Mohr-Coulomb で規定する。Mohr-Coulomb のパラメータである土の粘着力  $C$ 、土の内部摩擦角  $\phi$  は、当該地盤からサンプルされた試料に対する三軸試験から得られるものを用いるのが望ましいが、当該地盤の三軸試験結果がない場合ため  $N$  値等から推定する。

- ・破壊規準 : Mohr-Coulomb  $c$  : 土の粘着力  $\phi$  : 土の内部摩擦角  
破壊規準に載った場合は一次剛性の  $\alpha_{py}$  倍に剛性低下  
 $c = 10N$ 、 $\phi = \sqrt{15N} + 15$ とした。

- ・ポアソン比  $\nu$   $\nu = \frac{1 - \sin\phi}{2 - \sin\phi}$   $\phi$  : 土の内部摩擦角  
ただし  $\phi = 0$  の場合、破壊規準に達した時  $\nu = 0.495$

イ 地盤の基準剛性

地盤の基準剛性の定め方のフローを図 3.6.3 に示す。基準剛性とそれに対応する拘束圧は、当該地盤のサンプル試料に対する要素試験から得られるものを使用するのが望ましいが、当該地盤には要素試験結果がないので  $N$  値と  $V_s$  との関係より推定した剛性  $E_0$  を基準剛性とし、 $N$  値と  $V_s$  との関係より推定した基準剛性に対応する拘束圧  $p_e = 180 \text{ kN/m}^2$  とすることとした。

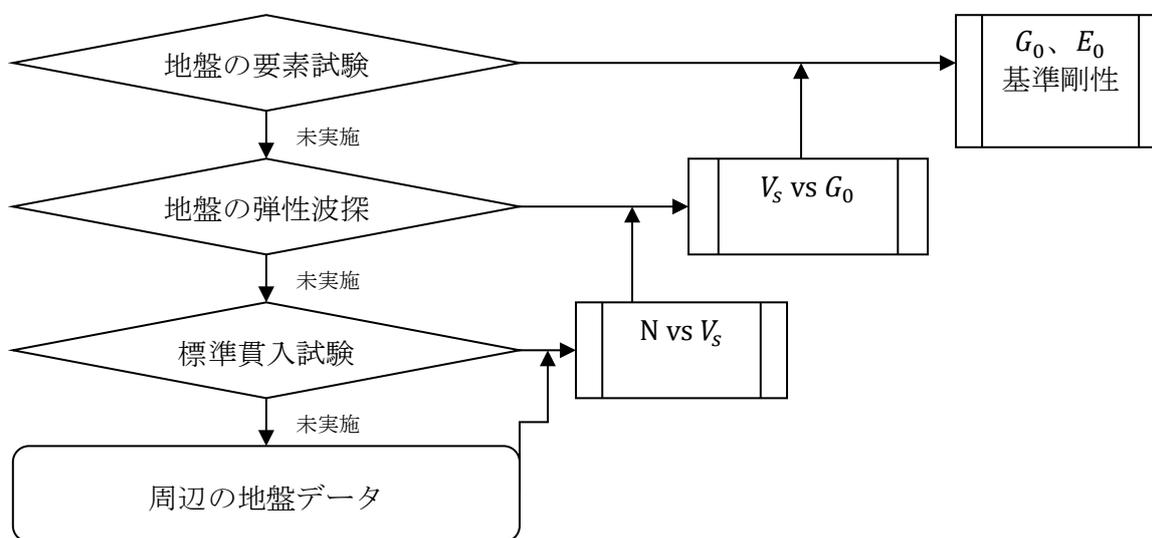


図 3.6.3 地盤の基準剛性の定め方

地盤のせん断弾性波速度から地盤の基準剛性は下式で求める。

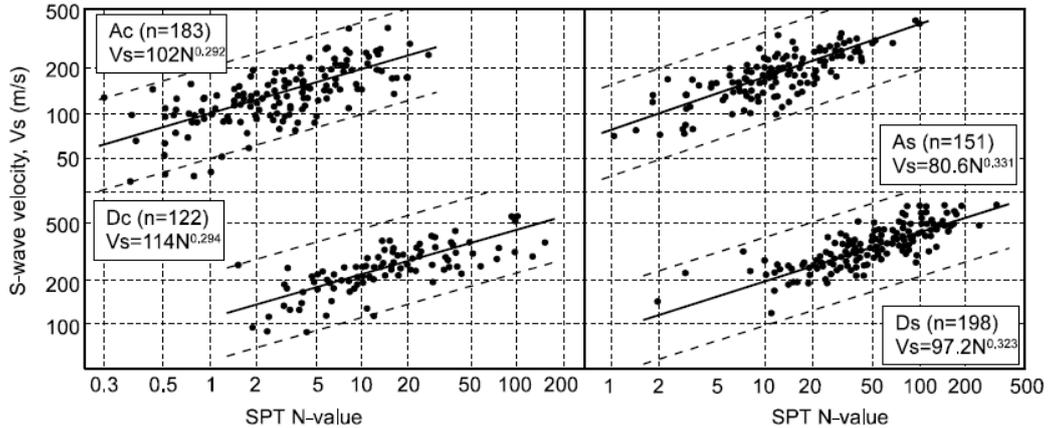
基準剛性  $E_0 = 2(1 + \nu)G_0$

せん断弾性係数  $G_0 = \rho V_s^2$

$\rho$  : 質量密度

$V_s$  : 地盤のせん断弾性波速度

標準貫入試験の N 値より地盤の基準剛性推定する場合は図 3.6.4 で求める。



沖積粘性土 (Ac)  $V_s = 102N^{0.292}$

沖積砂質土 (As)  $V_s = 80.6N^{0.311}$

洪積粘性土 (Dc)  $V_s = 114N^{0.292}$

洪積砂質土 (Ds)  $V_s = 97.2N^{0.323}$

基準拘束圧  $p_e = 180kN/m^2$

図 3.6.4 標準貫入試験の N 値と  $V_s$

ウ 地盤剛性の初期状態の設定

地盤の剛性はそれまで受けてきた荷重履歴を反映している。このため、図 3.6.5 に示すフローのように、基準剛性とそれに対応する拘束圧を元に、荷重履歴による拘束圧の変化に起因する剛性変化を評価して地盤剛性の初期状態を設定する。

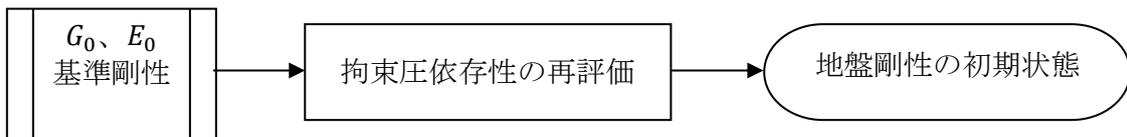


図 3.6.5 地盤剛性の初期状態の設定

剛性変化の程度は、(履歴最大最大主応力/基準拘束圧)の 0.5 乗に比例するとした。またせん断応力により剛性も変化するが、処女せん断応力状態時の塑性ひずみ成分変化による剛性変化は DUNCAN-CHANG 式で評価することとした。PHASE1、2 の除荷時には剛性変化はしないものとした。

・地盤の一次剛性  $E_{i+1}$  基準剛性  $E_0$

$(i+1)$ step 時の剛性  $E_{i+1}$  を、 $(i)$ step までの最大主応力  $\sigma_{1,1\sim i}$  より下式で修正する。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{1,L}/p_e)^{0.5} \quad \text{ここで、} p_e : \text{基準拘束圧}$$

$$\sigma_{1,L} = \max(\sigma_{1,1\sim i-1})$$

・降伏規準内剛性

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \geq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0\sim j-1}]$$

$$\text{接線剛性 } E_t = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2 \cdot c \cdot \cos\phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin\phi}\right)^2 E_j$$

$R_f$  : 破壊比

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_j \leq \max[(\sigma_1 - \sigma_3)_{0\sim j-1}] \quad \text{地盤一次剛性 } E_{i+1}$$

PHASE1 では、先行荷重状態 pc 相当の荷重履歴を反映させ、先行荷重状態 pc まで地表面に自重方向へ多 step で載荷することとした。簡単のため、自重に加え先行荷重状態 pc 相当の荷重を地表面に載荷することにより、それまで受けてきた荷重履歴を評価することとした。自重+先行荷重状態 pc まで地表面に自重方向へ多 step で載荷することにより、step 毎の剛性変化が評価できる。PHASE2 では、水張り試験実施前の状態を設定する。先行荷重 pc を取り除き、自重のみの水張り試験実施前の地盤の応力状態を求める。

エ 水張り試験時の地盤剛性変化

PHASE3 では、水張水位を増減し水張り試験をシミュレートする。この際には弾性成分の剛性の拘束圧依存性およびひずみ依存性を考慮することとした。PHASE1、2 で得られた剛性を初期剛性とし、 $(i+1)$ step の剛性変化の拘束圧依存性は ( $(i)$ step の最大主応力/自重時の最大主応力) の 0.5 乗に比例することとした。剛性変化のひずみ依存性は、除荷、再載荷の開始時からの最大主ひずみの増分に依存することとした。剛性変化のひずみ依存性の程度は、当該地盤のサンプル試料に対する三軸試験から得られるものを使用するのが望ましいが、当該地盤には三軸試験結果がないため、既往の研究資料 (木幡行宏、村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化 土木学会第 55 回年次学術講演会) を参考に定めることとした。

- 地盤の一次剛性  $E_{i+1}$  初期地盤剛性  $E_0$  PHASE2 終了時（水張り試験直前）の剛性  $(i+1)$ step 時の各要素の剛性  $E_{i+1}$  を  $(i)$ step の最大主応力  $\sigma_{1,i}$  より下式で修正する。

$$E_{i+1} = E_0 \times (\sigma_{1,i} / \sigma_{1,0})^{0.5} \quad \text{ただし } E_{i+1} \geq E_0$$

ここで  $\sigma_{1,0}$  は PHASE2 終了時（水張り試験直前）の最大主応力

- 降伏規準内剛性  $(j+1)$ step

$$\text{接線剛性 } E_{t,j+1} : E_{t,j+1} = E_j \times K$$

$$\text{ここで } K = \frac{B}{A}$$

$$A = 1 + \alpha \cdot (1 + \nu)^\beta \cdot (1 - \beta)(\Delta\varepsilon)^\beta$$

$$B = (1 + \alpha \cdot (1 + \nu)^\beta (\Delta\varepsilon)^\beta)^2$$

$\Delta\varepsilon$  : 除荷時 除荷開始点の  $\varepsilon_{1U}$  と  $(j)$ step の  $\varepsilon_1$  との差の絶対値

再載荷時 再載荷開始点の  $\varepsilon_{1R}$  と  $(j)$ step の  $\varepsilon_1$  との差の絶対値

ここで  $\varepsilon_1$  は最大主ひずみ（圧縮側）

なお、 $\alpha$ 、 $\beta$  は表 3.6.1 に示す。

表 3.6.1 ひずみ依存性の  $\alpha$ 、 $\beta$

地盤材料	$\alpha$	$\beta$
沖積粘性土	135.997	0.804
洪積粘性土	270.033	0.824
沖積砂質土	603.053	0.854
洪積砂質土	603.902	0.942

木幡行宏，村田修 せん断剛性比のひずみレベル依存性に関する定式化  
(土木学会第 55 回年次学術講演会)

### 3.6.2 構造モデルと要素特性

解析モデルは軸対称とし、屋外貯蔵タンク及び地盤について次のとおりモデル化した。

#### (1) 屋外貯蔵タンクのモデル化

屋外貯蔵タンクは、側板、底板、アニュラー板のみをモデル化した。側板の板厚、高さ、アニュラー板、底板は表 3.6.2 のとおりとする。

表 3.6.2 屋外貯蔵タンク諸元

タンク内径(mm)	タンク高さ(mm)	基礎高さ(mm)
29060	16445	700

アニュラー板			底板	
範囲	材質	板厚(mm)	材質	板厚(mm)
側から 2.0m	SM400C	12.0	SS400	9.0

	板幅(mm)	実板厚	材質
トップアングル	75 アングル	6	SS41
9 段目	1,820	8.10	SS41
8 段目	1,820	7.90	SS41
7 段目	1,820	7.60	SS41
6 段目	1,820	9.70	SS41
5 段目	1,820	11.60	SS41
4 段目	1,820	13.60	SS41
3 段目	1,820	15.70	SS41
2 段目	1,820	16.60	SS41
最下段	1,820	19.10	SS41

(2) 底板と地盤のモデル化

地表面付近の構造モデルのイメージは図 3.6.6、地層区分と地盤特性パラメータを図 3.6.7 に示す。

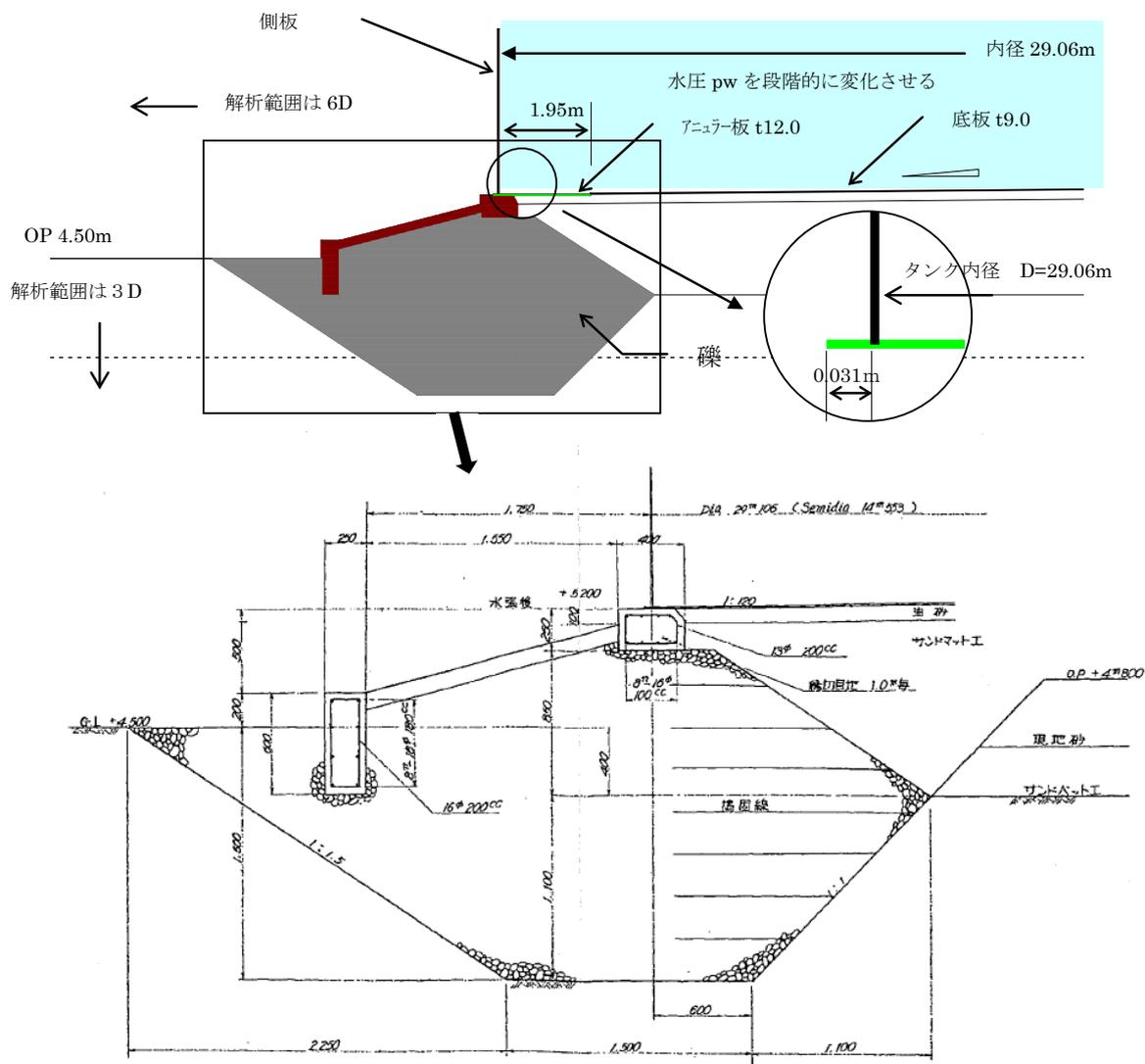
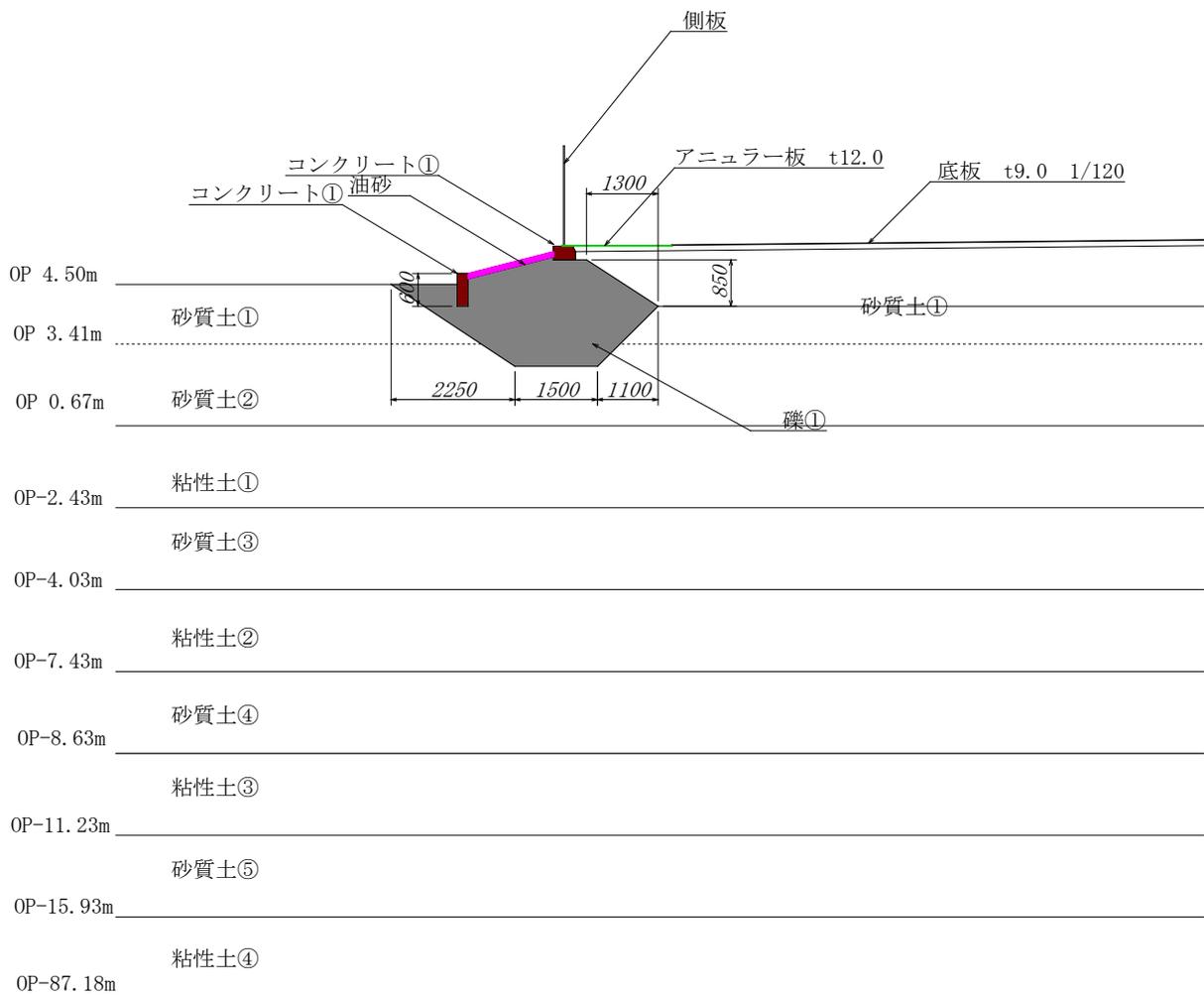


図 3.6.6 地表面付近の解析モデルのイメージ



地盤種	OP (m)		平均N値	$\phi$ (°)	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	E <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	Rf	$\alpha$	$\beta$
	上	下										
コンクリート①				0.0	10500.0	0.17	2398		23500000			
礫①			50	45.0	19.6	0.23	2000	272	363221	0.817	279.765	0.738
アスファルト				0.0	784.0	0.35	2398		6200000			
砂質土①	4.5	3.41	26.7	35.0	4.9	0.30	1745	224	226994	0.817	603.053	0.854
砂質土②	3.41	0.67	26.7	35.0	4.9	0.30	1949	224	253543	0.817	603.053	0.854
粘性土①	0.67	-2.43	2.7	21.3	26.7	0.39	1600	136	81994	0.9	135.997	0.804
砂質土③	-2.43	-4.03	7.0	25.2	70.0	0.36	1800	148	107050	0.817	603.053	0.854
粘性土②	-4.03	-7.43	3.7	22.4	36.7	0.38	1600	149	98278	0.9	135.997	0.804
砂質土④	-7.43	-8.63	10.0	27.2	100.0	0.35	1800	165	132376	0.817	603.053	0.854
粘性土③	-8.63	-11.23	2.0	20.5	20.0	0.39	1600	125	69569	0.9	135.997	0.804
砂質土⑤	-11.23	-15.93	16.8	30.9	168.0	0.33	1800	224	240590	0.817	603.902	0.942
粘性土④	-15.93	-87.18	8.0	26.0	80.0	0.36	1800	209	214306	0.9	270.033	0.824

図 3.6.7 地層区分と地盤特性パラメータ

### 3.6.3 解析結果

#### (1) 水張水位と沈下量の関係

解析エッジと沈下量を注目した節点位置を図 3.6.8 に、メッシュ図を図 3.6.9 に示す。

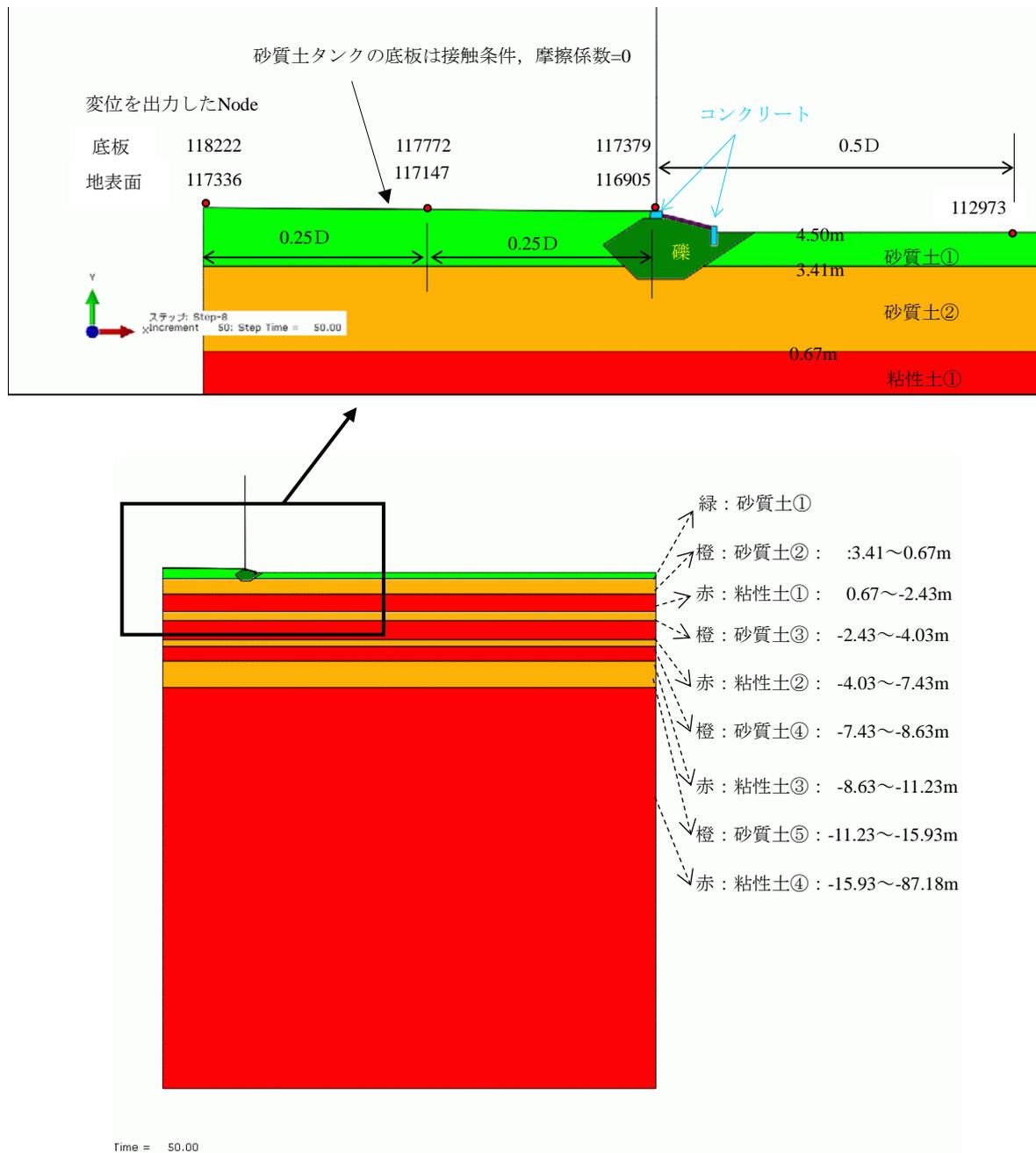


図 3.6.8 解析エッジと沈下量を注目した節点位置

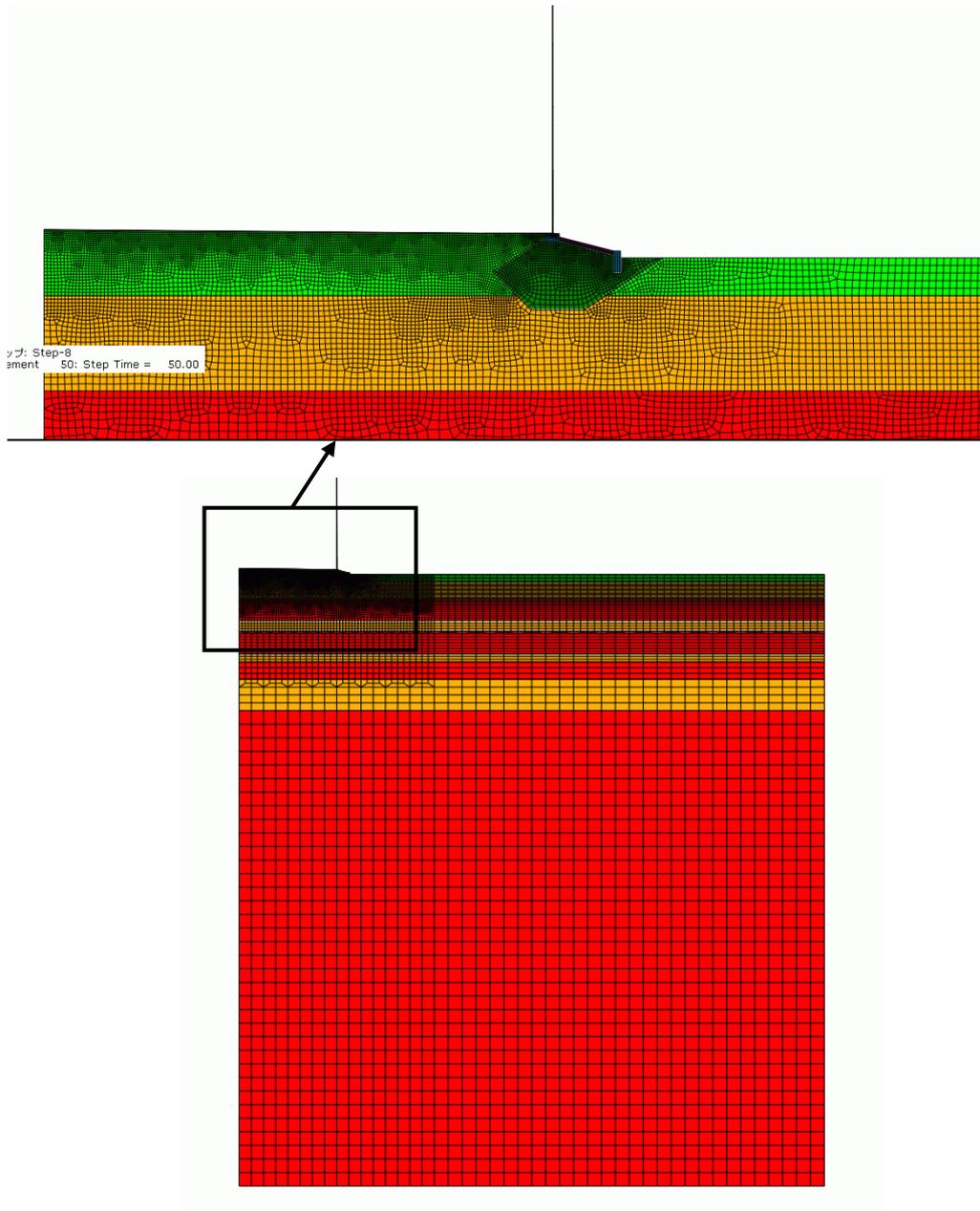


図 3.6.9 メッシュ図

水張水位と地表面の沈下量の関係を図 3.6.10 に、水張水位と底板の沈下量の関係を図 3.6.11 に示す。

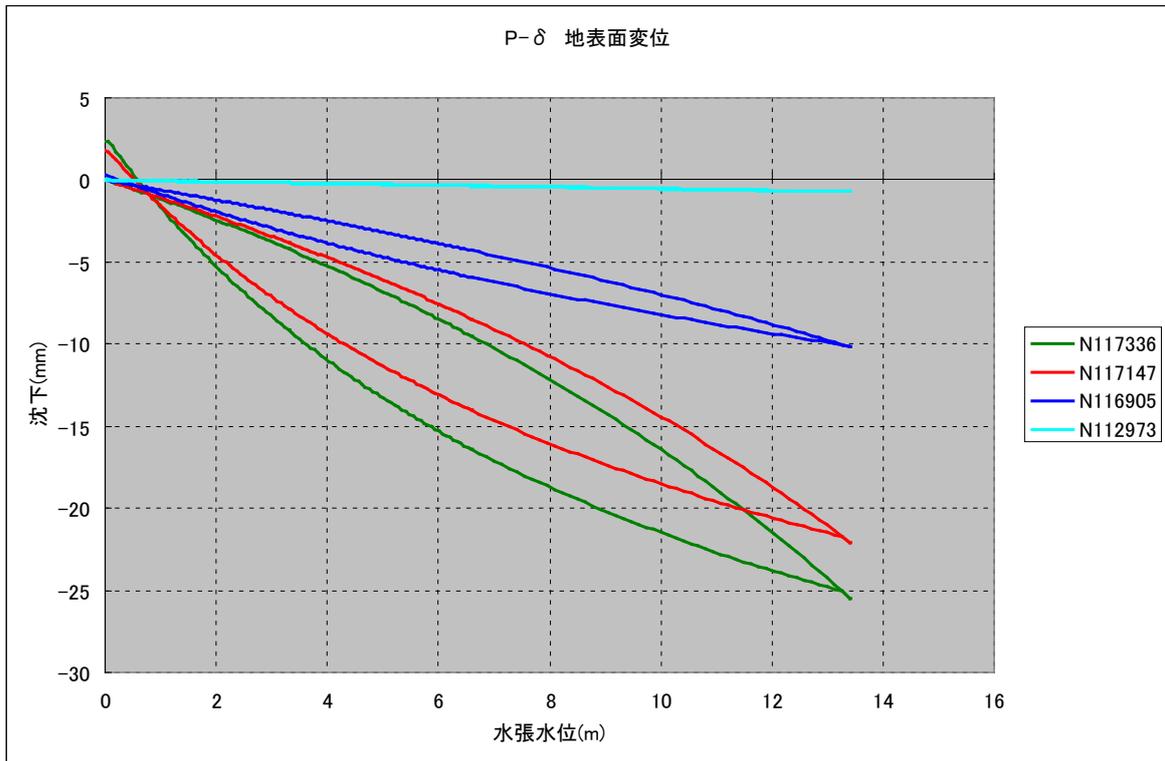


図 3.6.10 水張水位と地表面の沈下量の関係

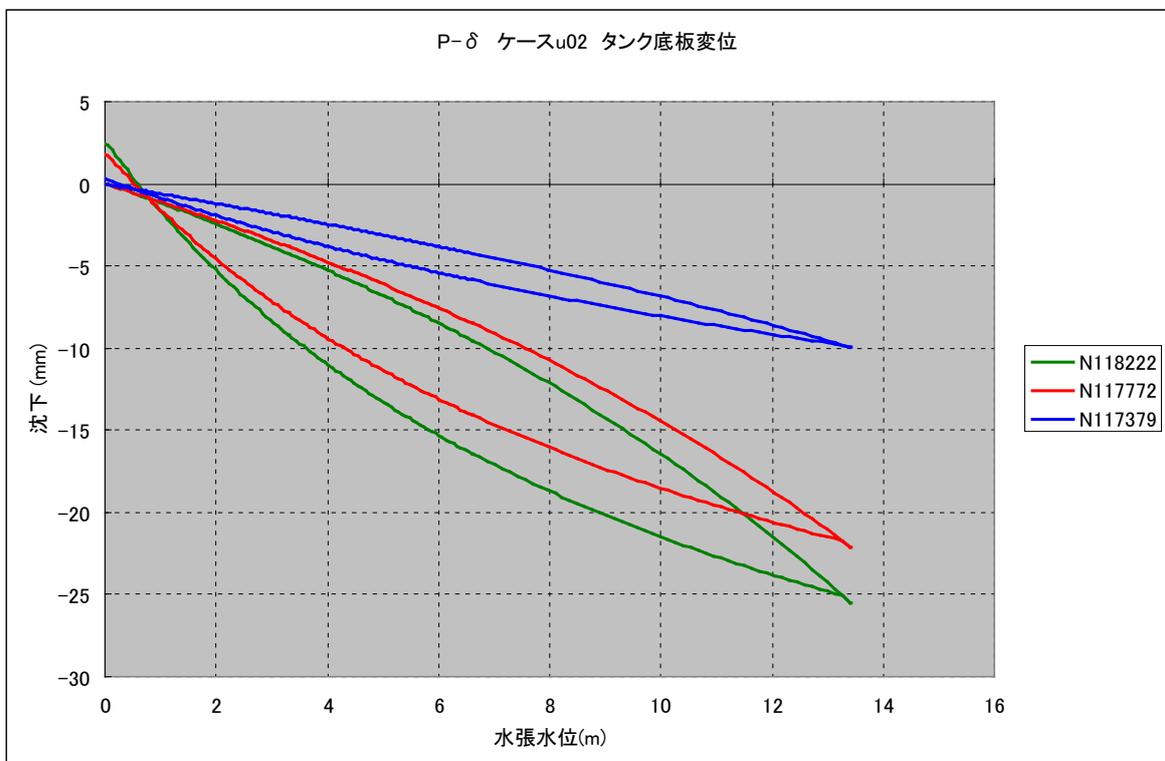


図 3.6.11 水張水位と底板の沈下量の関係

(2) 底板沈下量の分布

底板沈下量の径方向の分布を、図 3.6.12 (注水時) 及び図 3.6.13 (排水時) に示す。

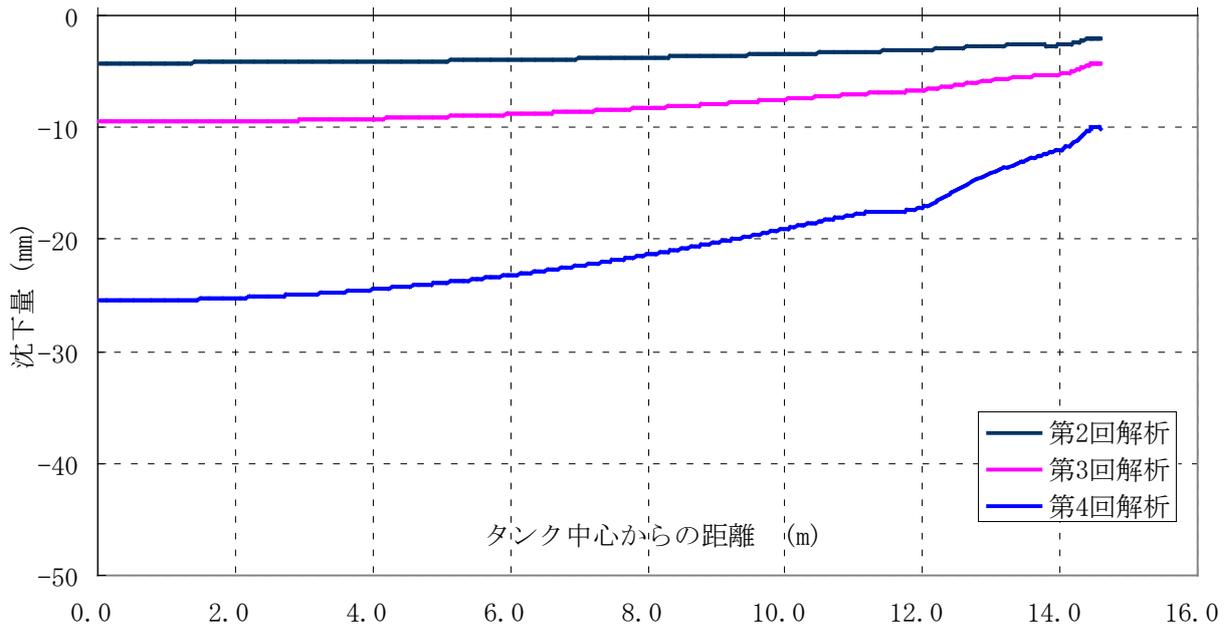


図 3.6.12 底板沈下量の分布 (注水時)

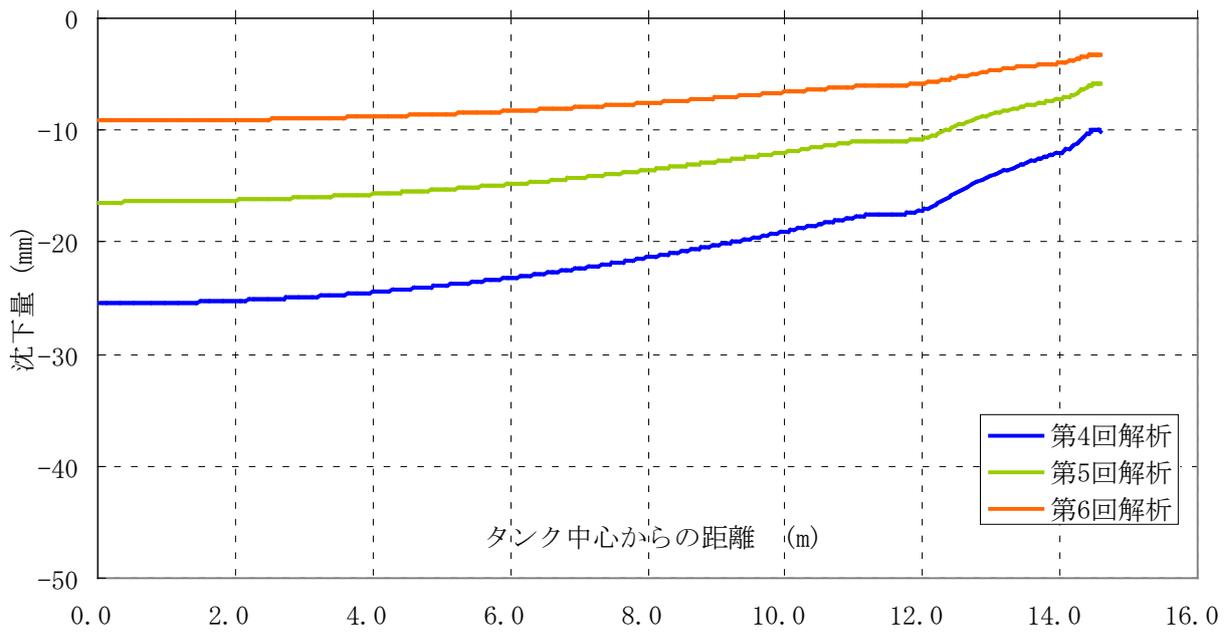


図 3.6.13 底板沈下量の分布 (排水時)

### 3.7 計測結果と解析結果との比較

#### 3.7.1 沈下計測結果との比較

FEM 解析結果と計測された底板沈下量、外周沈下量の平均値を比較し図 3.7.1 に示す。

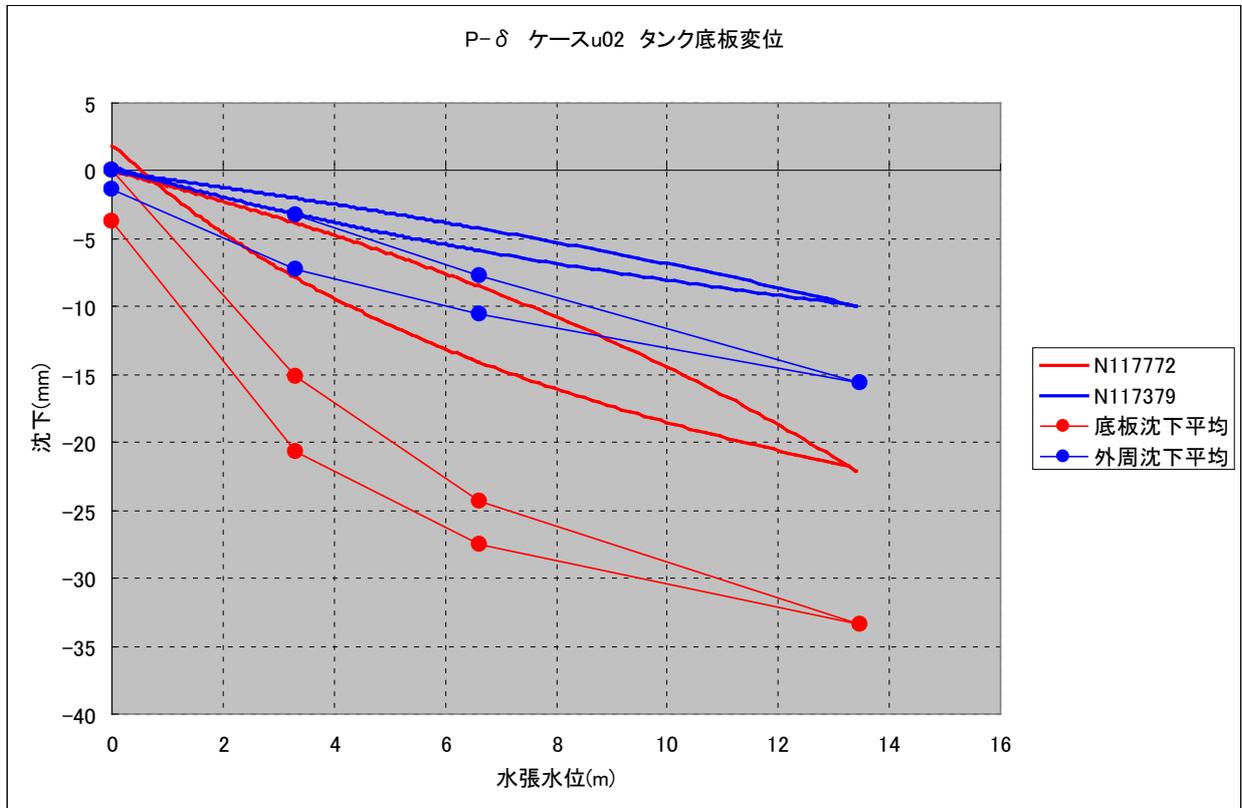


図 3.7.1 FEM 解析結果と底板沈下量、外周沈下量の比較

底板沈下量の径方向の分布を、FEM 解析結果と実測値を比較し図 3.7.2（注水時）及び図 3.7.3（排水時）に示す。

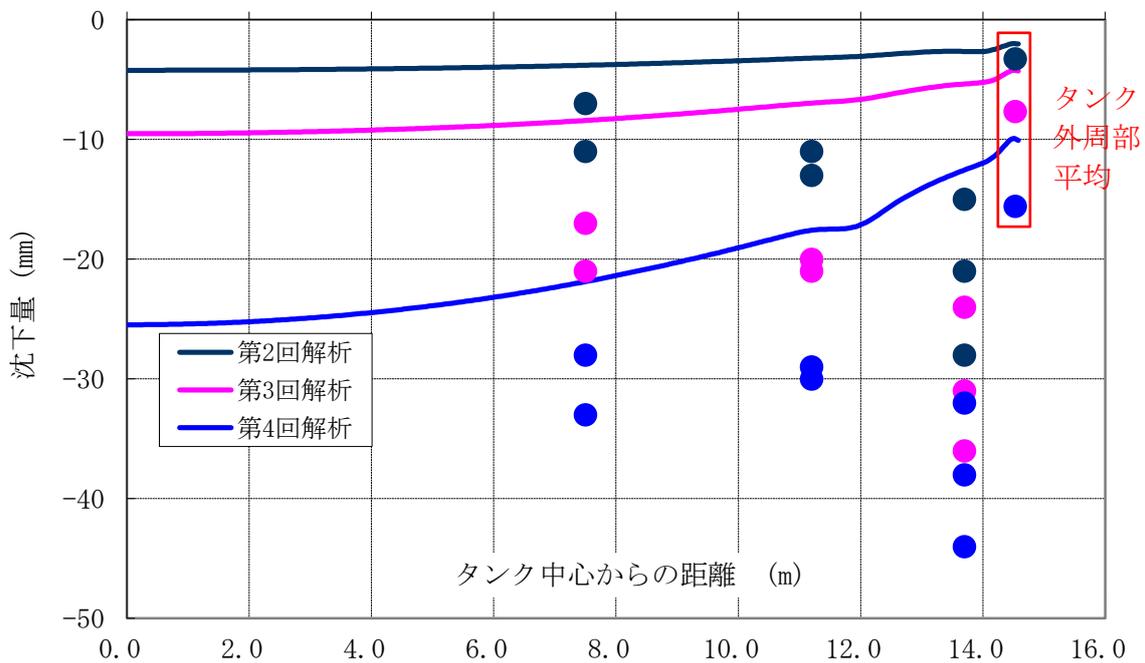


図 3.7.2 FEM 解析結果と底板沈下量分布の比較（注水時）

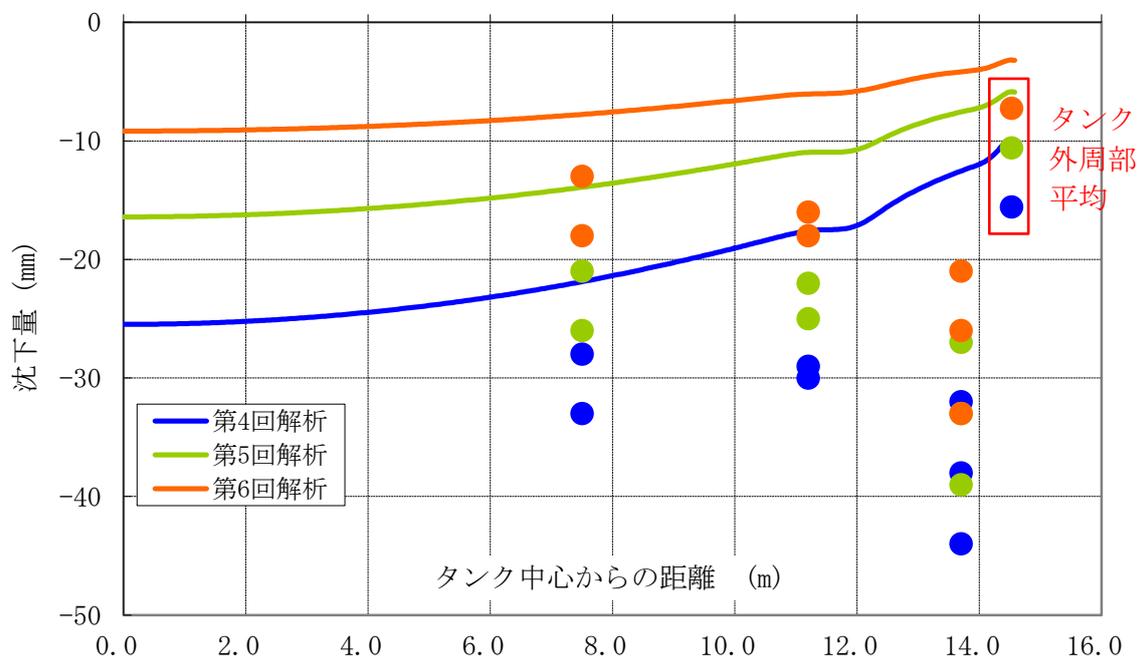


図 3.7.3 FEM 解析結果と底板沈下量分布の比較（排水時）

## 第4章旧法タンクの底板に適用される重ねすみ肉溶接部に係る疲労強度

### 4.1 目的

底板の重ね継手のすみ肉溶接部においては、のど厚の大きさ、初層部の欠陥の有無、板と板との隙間等の構造的要因により疲労強度が異なることが考えられることから、重ねすみ肉溶接のルート部を起点としたき裂が進展した場合を想定した4点曲げ試験及びき裂進展解析を実施し、上述した構造的要因と疲労強度との関係について整理することを目的とする。

### 4.2 重ねすみ肉溶接部に係る4点曲げ試験

#### 4.2.1 試験概要

図4.2.1に示すように、負荷は上スパン200mm、下スパン300mmの4点曲げで実施する。重ねすみ肉により発生する段差は治具で高さを調整することとする。設定した変位に対して繰り返し荷重を負荷させる変位制御試験を実施し、設定した変位に到達した初回負荷の25%になった時点までの繰り返し回数を計測する。

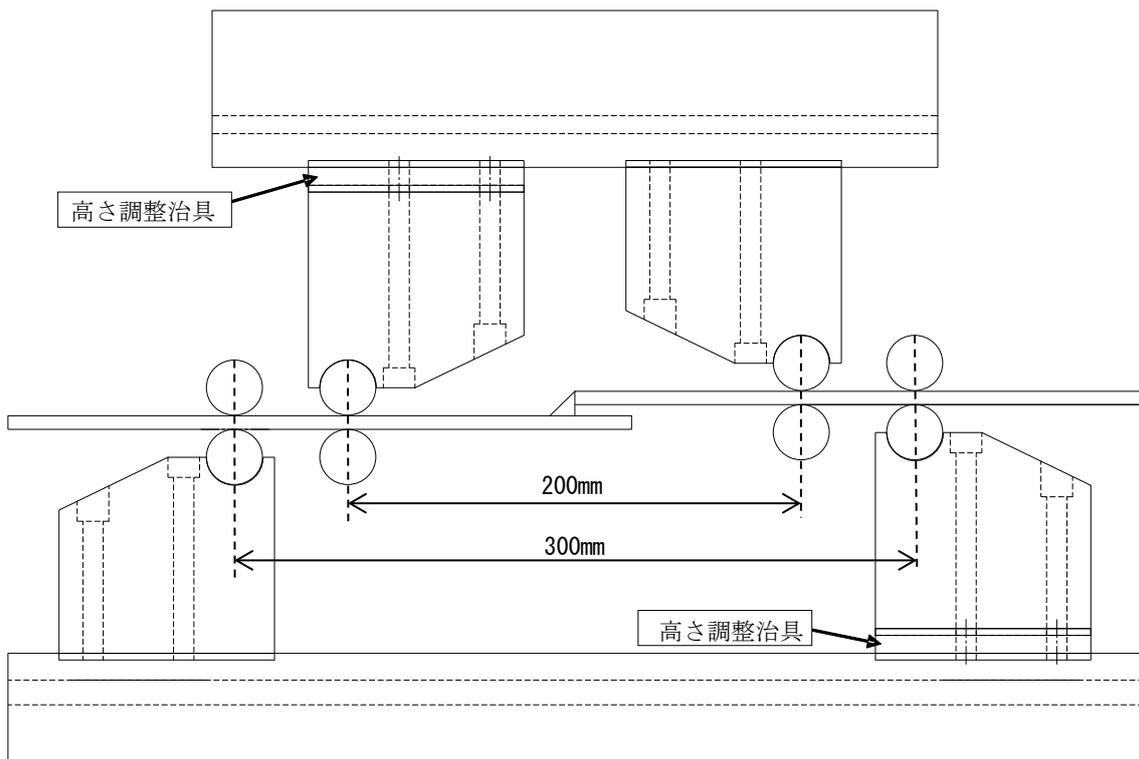


図 4.2.1 4点曲げ試験の概要

#### 4.2.2 試験片

##### (1) 試験片の種類

すみ肉溶接部の4点曲げ疲労試験の実施にあたり、のど厚の大きさ、初層部における欠陥の有無、板と板との隙間については、表4.2.1に示す組み合わせの試験を実施した。

表 4.2.1 疲労試験を実施する構造的要因の組み合わせ

ケース	のど厚	初層部	隙間	疲労試験
1	100%	無欠陥	1mm	設定変位：6種類
2	50%	無欠陥	1mm	
3	100%	無欠陥	5mm	
4	50%	無欠陥	5mm	
5	100%	ブローホールあり	1mm	設定変位：4種類
6	50%	ブローホールあり	1mm	
7	100%	ブローホールあり	5mm	試験実施せず
8	50%	ブローホールあり	5mm	

作成した試験片の断面写真について図 4.2.2～4.2.5 に示す。また、参考まで過去に発生した重ねすみ肉溶接の疲労破壊事例の写真を図 4.2.6 に示す。

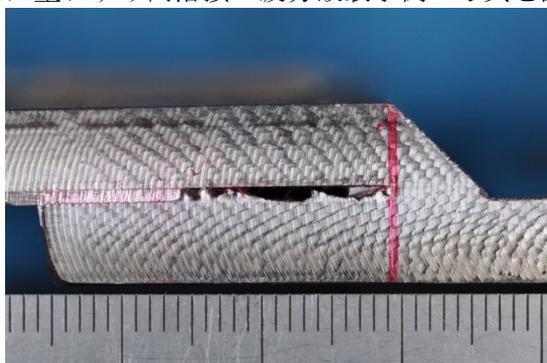


図 4.2.2 試験片(隙間 1mm、のど厚 100%)

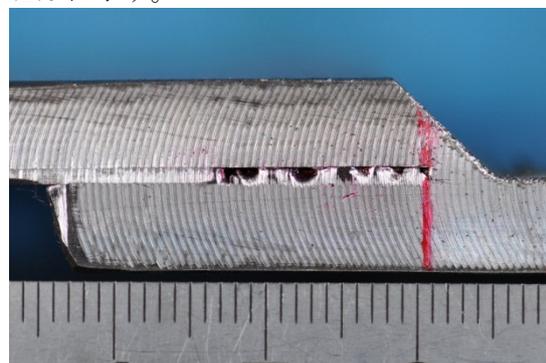


図 4.2.3 試験片(隙間 1mm、のど厚 50%)

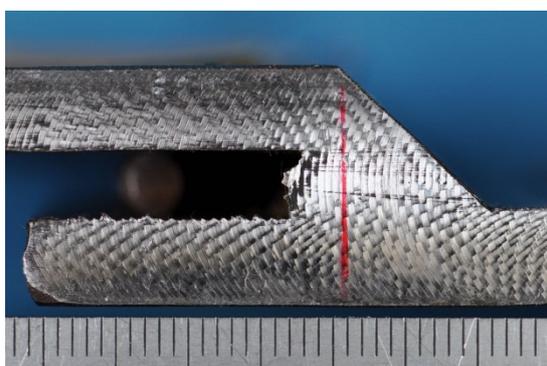


図 4.2.4 試験片(隙間 5mm、のど厚 100%)

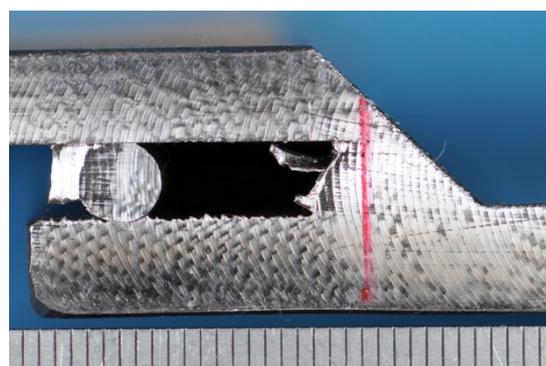


図 4.2.5 試験片(隙間 5mm、のど厚 50%)

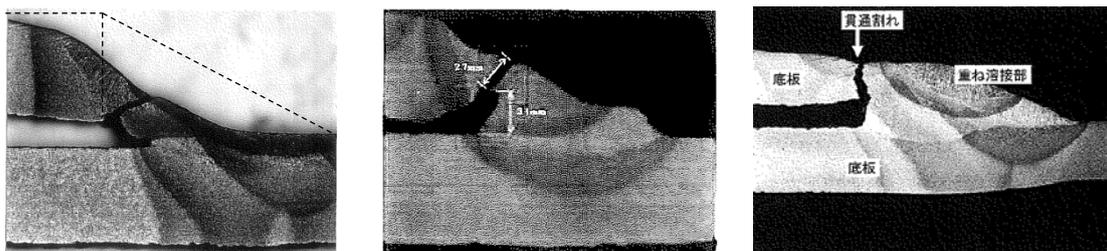


図 4.2.6 過去に発生した重ねすみ肉溶接の疲労破壊事例の写真

## (2) 溶接施工条件

試験片の溶接は表 4.2.2 に記載した条件に基づいて行われた。なお、初層部に意図的にブローホールを発生させた試験片を作成する必要があることから、炭酸ガスアーク溶接を採用した。

表 4.2.2 溶接条件

溶接材料	神戸製鋼所製 MG-50T
棒径	1.2mm φ
パス数	隙間 1mm : 3 隙間 5mm : 6
電流 (A)	190
電圧 (V)	24
速度 (cm/min)	約 30

なお、初層部に欠陥がない試験片とブローホールを発生させた試験片に対する放射線透過試験の結果を図 4.2.7 及び 4.2.8 に示す。

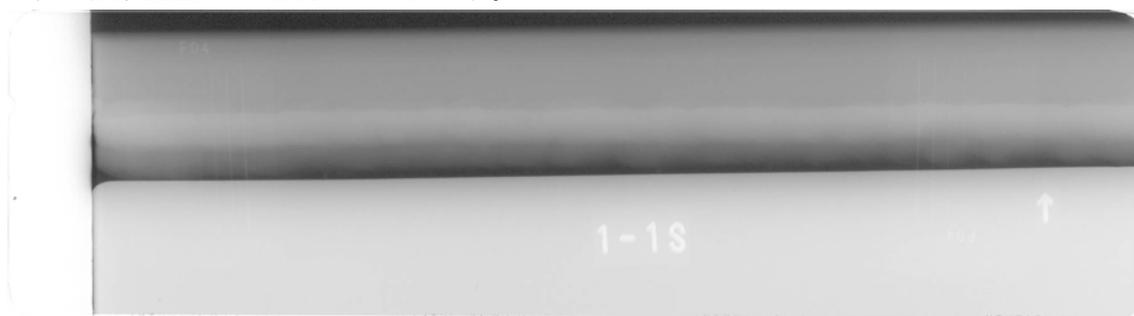


図 4.2.7 初層部無欠陥の試験片における放射線透過試験結果

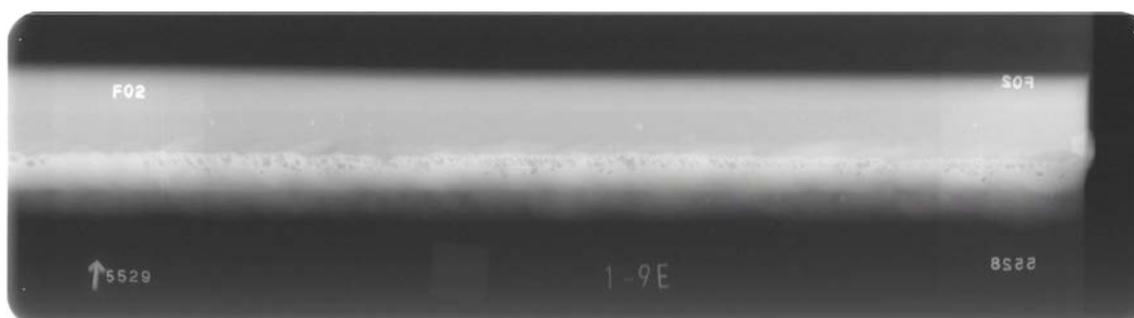


図 4.2.8 初層部にブローホールを発生させた試験片における放射線透過試験結果

### 4.2.3 試験結果

#### (1) のど厚の影響について

すみ肉溶接の構造的要因のうち、のど厚の影響について比較するために、表 4.2.1 に示すケース 1 と 2 の試験結果を比較したものを図 4.2.9 に、ケース 3 と 4 の試験結果を比較したものを図 4.2.10 に示す。のど厚の大小は疲労強度に大きな影響を与える結果が得られた。

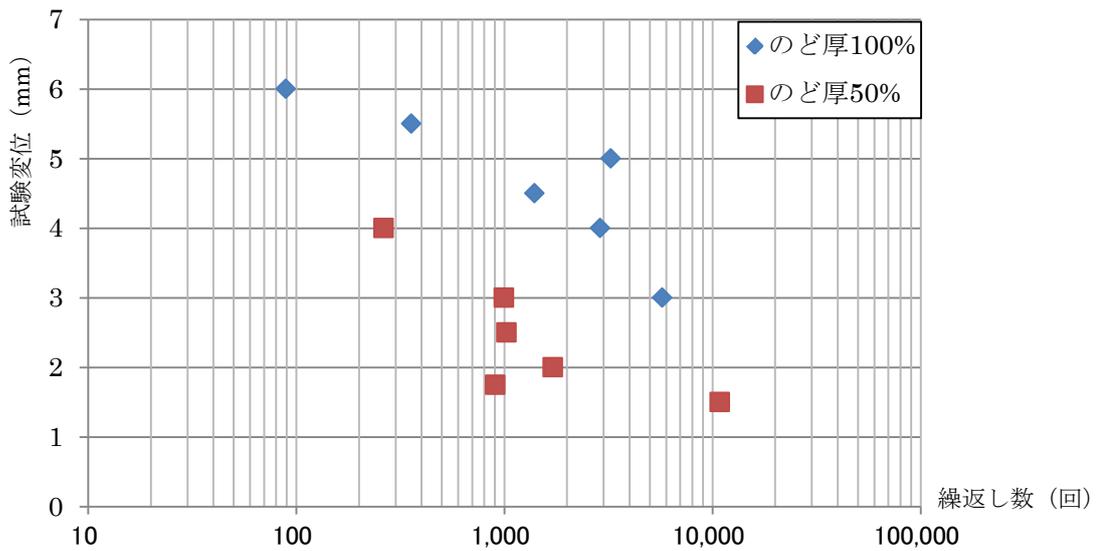


図 4.2.9 初層部無欠陥、隙間 1mm の場合の試験結果

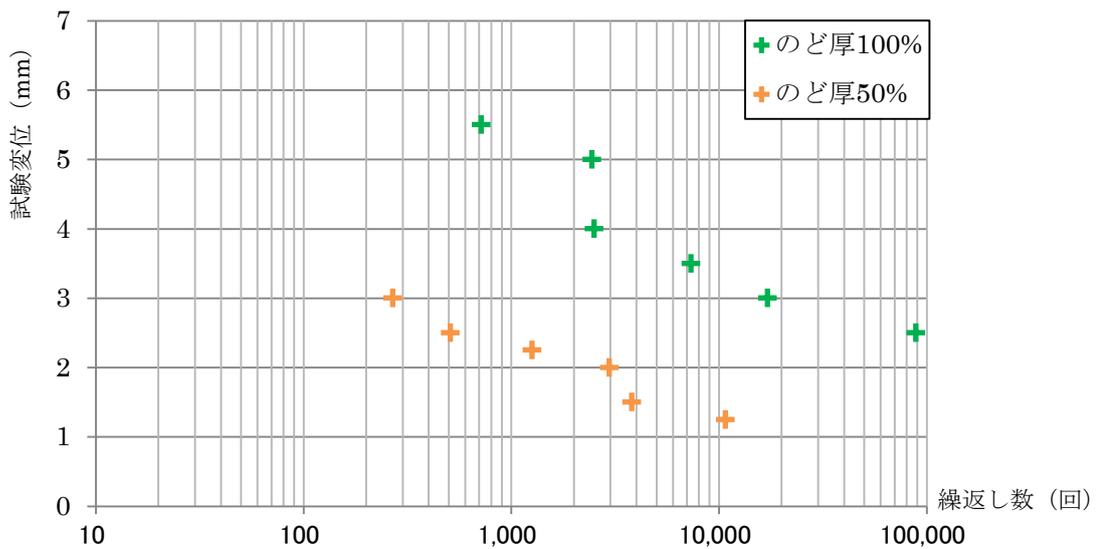


図 4.2.10 初層部無欠陥、隙間 5mm の場合の試験結果

(2) 初層部欠陥の有無の影響について

すみ肉溶接の構造的要因のうち、初層部欠陥の有無の影響について比較するために、表 4.2.1 に示すケース 1 と 5 の試験結果を比較したものを図 4.2.11 に、ケース 2 と 6 の試験結果を比較したものを図 4.2.12 に示す。試験片の作成にあたり初層部へ発生させたブローホールはあくまで出来たなりのものであり、ブローホールの大きさや発生位置等について制御を一切行っていないものであることに留意が必要であるが、初層部無欠陥の試験結果と比較し疲労強度に有意な差が認められる結果となった。

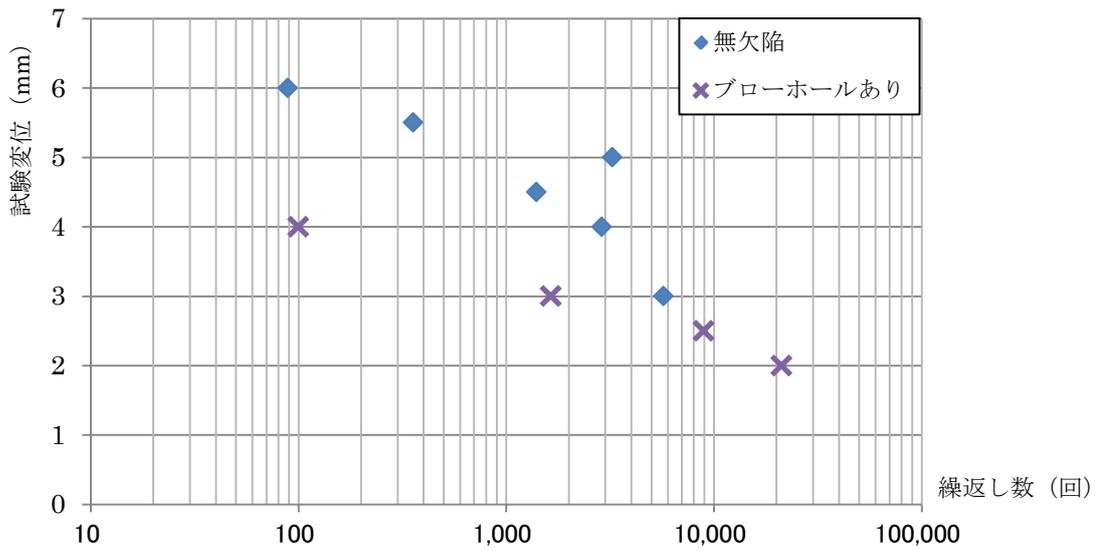


図 4.2.11 隙間 1mm、のど厚 100%の場合の疲労試験結果

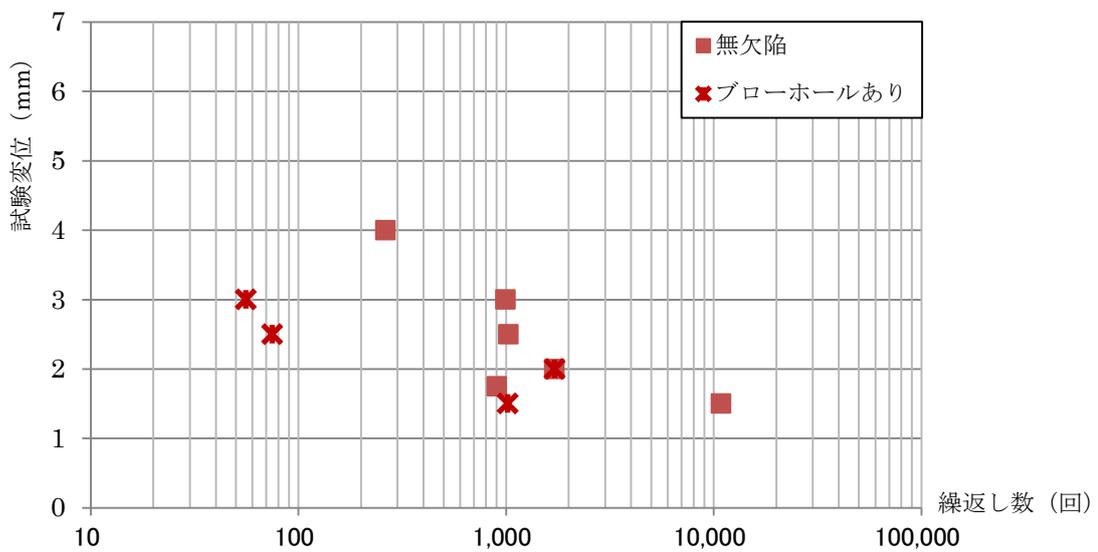


図 4.2.12 隙間 1mm、のど厚 50%の場合の試験結果

### (3) 隙間の影響について

すみ肉溶接の構造的要因のうち、隙間の影響について比較するために、表 2.2.1 に示すケース 1 と 3 の試験結果を比較したものを図 4.2.13 に、ケース 2 と 4 の試験結果を比較したものを図 4.2.14 に示す。隙間の大小が疲労強度に与える影響は他の構造的要因に比較して少ない結果が得られた。

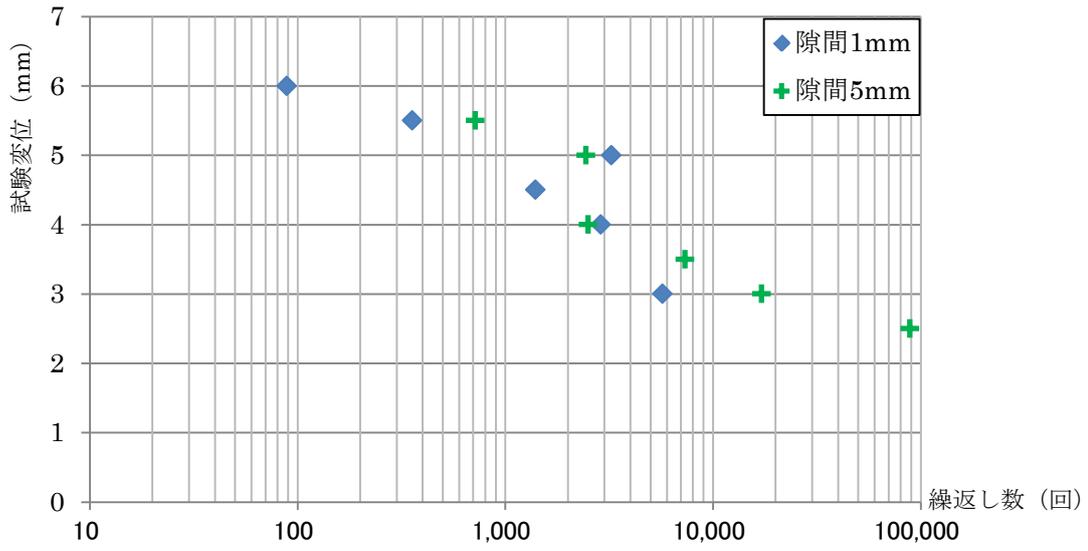


図 4.2.13 初層部無欠陥、のど厚 100%の場合の試験結果

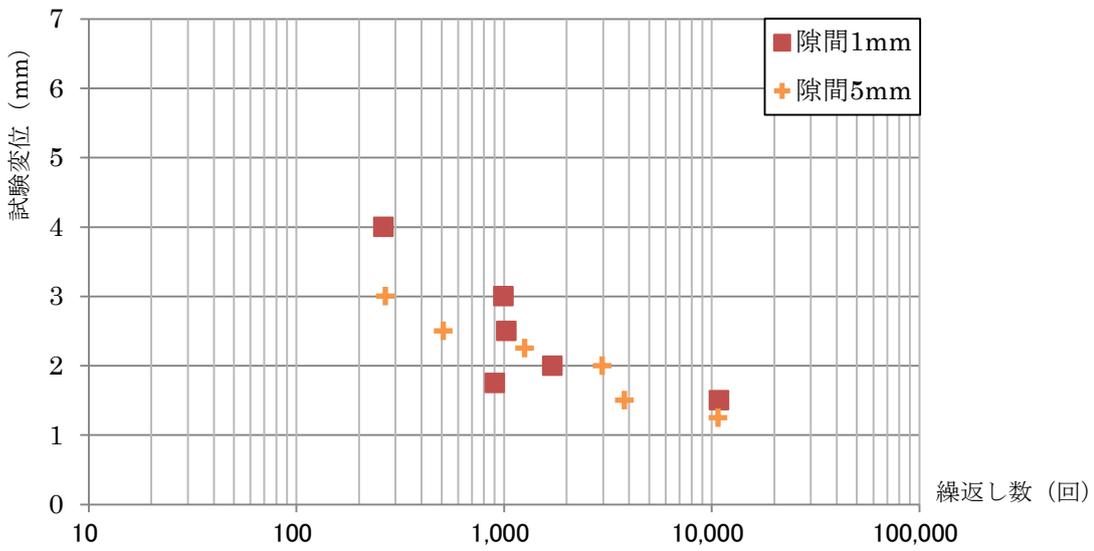


図 4.2.14 初層部無欠陥、のど厚 50%の場合の試験結果

### 4.3 有限要素法を利用したき裂進展解析について

#### 4.3.1 解析方法

以下に示すような N.E Dowling 他<sup>1)</sup>の塑性域におけるき裂進展評価提案式を用いて、所定のき裂進展性解析を行う。

$$\frac{dc}{dN} = C^*(\Delta J_c)^{m^*} \quad (4.3.1)$$

ここで、

- $c$  : き裂深さ (mm)
- $N$  : 繰返し回数(cycle)
- $\Delta J_c$  : き裂深さを変数とする J 積分範囲(N/mm)
- $C^*$  : き裂進展則の定数
- $m^*$  : き裂進展則の指数

本解析においてき裂進展則の定数  $C'$  と指数  $m'$  は、以下の値を用いる。

$$m' = 1.75, C' = 1.014 \times 10^{-5}$$

(このときの単位系は  $\Delta J$  が [N/mm],  $dc/dN$  が [mm/cycle]。)

同評価式で用いる、初期き裂寸法変化と J 積分範囲の関係は、2次元解析モデル（帯状き裂を有する重ね継手モデル）により、汎用有限要素法解析プログラム「ABAQUS」（バージョン 6.10）を用いた数値解析により求める。

#### 4.3.2 解析条件と解析モデル

##### (1) 解析条件

4点曲げ試験のモデルと同じ支持条件、負荷位置を考慮した解析モデルの概念図を図 4.3.1 に隙間及びのど厚不足の 2 種類の重ねすみ肉溶接部の解析モデルの概念図を図 4.3.2 に示す。

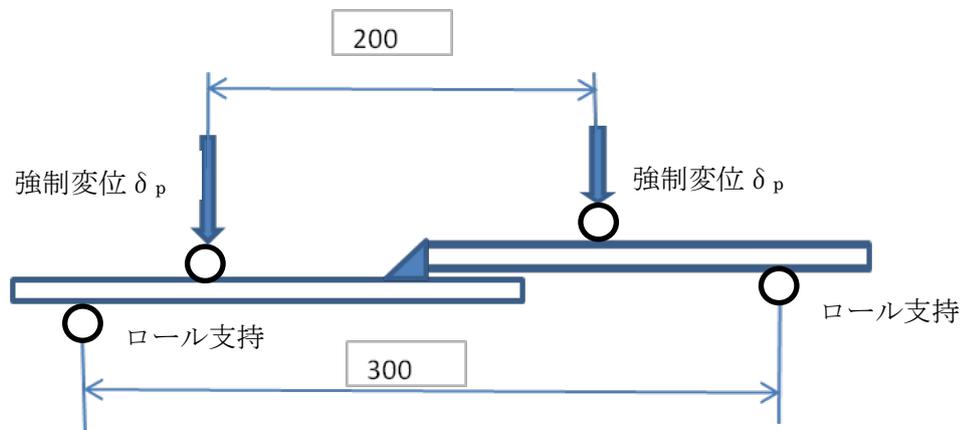


図 4.3.1 重ねすみ肉溶接部の負荷、支持概念図

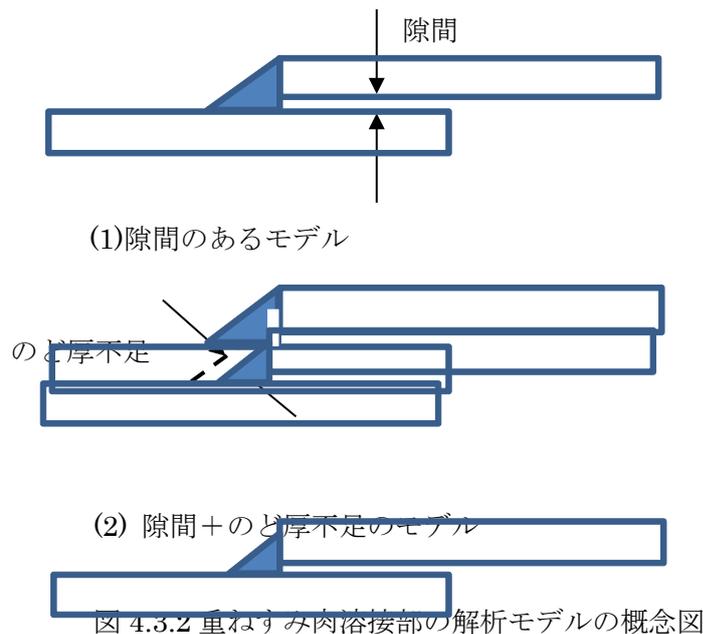


図 4.3.2 重ねすみ肉溶接部の解析モデルの概念図

(2) 材料特性

弾塑性特性を考慮にいたした 2 次元平面ひずみモデルによるき裂進展解析 (J 積分) を実施する。材料データは 2010ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 (ASME B&PV Code を略称する) に提供される炭素鋼の応力ひずみカーブを使用する。材料特性は表 4.3.1 に示す通りである。

表 4.3.1 材料特性 (JIS B 8257-2008 による)

材質	ヤング率 E(Gpa)	ポアソン比 $\nu (-)$	降伏応力 $\sigma_y(N/mm^2)$	引張強度 $\sigma_u(N/mm^2)$
SS400	200	0.3	245	415

(3) のど厚

のど厚が  $t/\sqrt{2}$  (のど厚 100%モデルと呼ぶ) 、  $t/2\sqrt{2}$  (のど厚 50%モデルと呼ぶ) の 2 種類とする(図 4.3.3 参照)。なお、溶接部の角度は  $45^\circ$  とする。

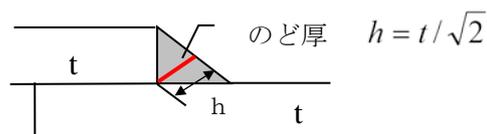


図 4.3.3 重ねすみ肉溶接ののど厚

(4) 解析パラメータ

解析パラメータとする重ね継手の沈下量（ルート部の鉛直変位）及びひずみの出力位置は図 4.3.4 に示すとおりである。

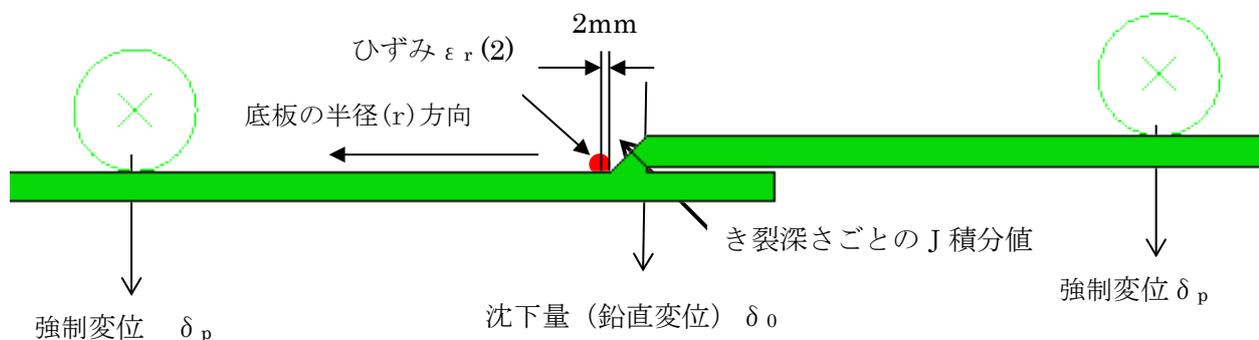


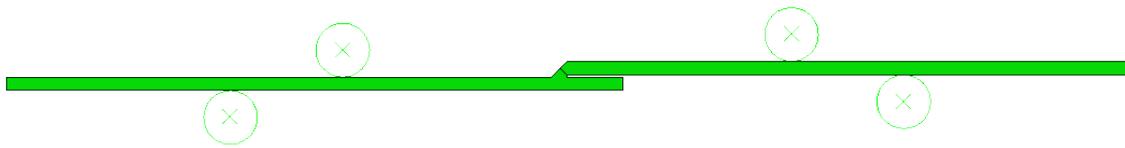
図 4.3.4 き裂進展解析時のパラメータ出力位置図

(5) 2次元解析モデル

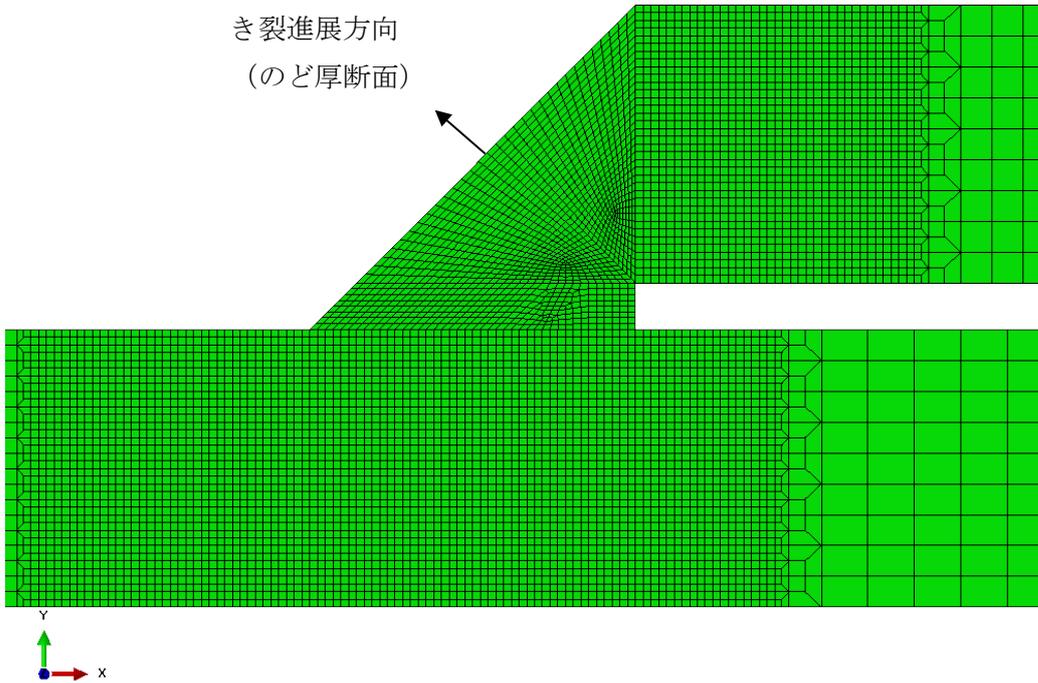
2次元解析モデルにおける使用要素は、CPE8 (8 節点、2 次、平面ひずみ)要素である。のど厚の種類により二つの解析モデルを作成した。

ア のど厚 100%モデル

のど厚 100%のモデルの全体図及び溶接部の拡大図は図 4.3.5(a)と(b) (板厚 6mm、隙間 1mm)に、この解析モデルによる解析ケースは表 4.3.2 に示すとおりである。



(a) モデル全体図



(b) 溶接部のメッシュ拡大図

図4.3.5 き裂進展解析モデル (のど厚100%モデル)

表4.3.2 重ねすみ肉溶接の2次元モデルによる破壊力学パラメータ (J積分値)  
FEM解析ケース(のど厚100%モデル)

解析番号	隙間 [mm]	のど厚 [mm]	初期き裂深さ c [mm]
1-1	1.0	4.24	0
1-2	1.0	4.24	0.5
1-3	1.0	4.24	1.0
1-4	1.0	4.24	1.5
1-5	1.0	4.24	2.0
1-6	1.0	4.24	2.5

イ のど厚 50%モデル

のど厚 50%のモデルの全体図及び溶接部の拡大図は図 4.3.6(a)と(b) (板厚 6mm、隙間 1mm)に、この解析モデルによる解析ケースは表 4.3.3 に示すとおりである。

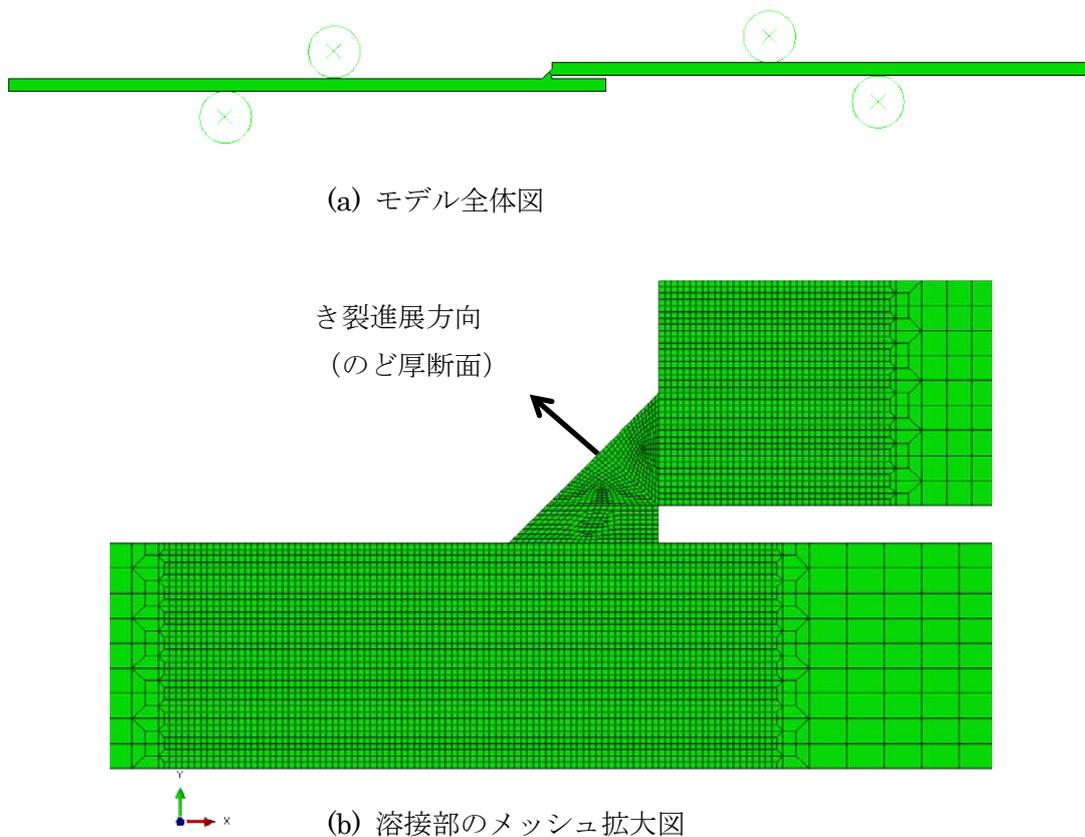


図4.3.6 き裂進展解析モデル (のど厚50%モデル)

表 4.3.3 重ね継手の2次元モデルによる破壊力学パラメータ (J 積分値)  
FEM解析ケース (のど厚50%モデル)

解析番号	隙間 [mm]	のど厚 [mm]	初期き裂深さ c [mm]
2-1	1.0	2.12	0
2-2	1.0	2.12	0.27
2-3	1.0	2.12	0.53
2-4	1.0	2.12	0.80
2-5	1.0	2.12	1.06
2-6	1.0	2.12	1.33
2-7	1.0	2.12	1.59

### 4.3.3 き裂進展解析手順

き裂進展解析は次の (a) ~ (c) の手順によって実施するものとする。

- (a) J 積分の解析結果を、設定したき裂寸法における基本解析制御パラメータとされる重ね継手の沈下量 (鉛直変位)  $\delta_0$  値 (き裂なし場合の値) との関係で整理する。
- (b) J 積分値がゼロの場合、すなわち鉛直変位がゼロの場合を基準状態とし、その基準状態からの変動量として、解析から得られた J 積分値を J 積分範囲  $\Delta J_c$  と見なす。各設定したき裂深さの最深点における  $\Delta J_c$  のみ注目するため、き裂深さ及び重ね継手の鉛直変位値  $\Delta\delta_0$  (き裂があるときの値) の変動による  $\Delta J_c$  の変化を、式(4.3.2)に示す関数  $M(c)$  と線形補正関数  $f(\Delta\delta_0)$  との積の形で表わす。ここで、関数  $M(c)$  は各設定したき裂深さにおける J 積分値を沈下量  $\Delta\delta_0$  で割った値の平均値 (全ステップ) を用いて、き裂深さとの関係 (式(4.3.3)に示す多項式) が求められる。重ね継手の沈下量と J 積分値の関係がほぼ線形であるため、式(4.3.4)に示す近似的な線形補正関数  $f(\Delta\delta_0)$  を用いて沈下量の変動分の補正を行う。

$$\Delta J_c = M(c) \times f(\Delta\delta_0) \quad (4.3.2)$$

ここには、

$$M(c) = x_1 c + x_2 c^2 + x_3 c^3 + x_4 c^4 \quad (4.3.3)$$

$$f(\Delta\delta_0) = \frac{p_1 \Delta\delta_0}{1 + p_2 / \Delta\delta_0^2} \quad (4.3.4)$$

- (c) 求めた  $\Delta J_c$  を式 (4.3.1) に示すき裂進展則に代入して、式 (4.3.5) に示すように初期き裂深さ  $c$  から、設定した限界き裂状態のき裂深さ  $c_f$  (のど厚の 80% に達したとき貫通とみなす) まで積分して、想定した繰返し負荷状態における繰返し回数 (貫通までの疲労破断回数)  $N_f$  を求める。

$$N_f(-) = \int dN = \int_c^{c_f} \frac{1}{C^*} \frac{1}{(\Delta J_c)^{m^*}} dc = \int_c^{c_f} \frac{1}{C^*} \frac{1}{(f(\Delta\delta_0)M(c))^{m^*}} dc \quad (4.3.5)$$

### 4.3.4 2次元解析モデルによるき裂進展解析結果

#### (1) のど厚 100%モデルの J 積分値解析結果

帯状初期き裂を有するのど厚 100%モデル (2次元解析モデル) による J 積分値解析結果を表 4.3.4 に示し、重ね継手の沈下量と J 積分値の関係および沈下量と溶接止端部に発生した底板の半径方向圧縮ひずみの関係をそれぞれ図 4.3.7 と図 4.3.8 に示す。代表的なき裂部の塑性ひずみ分布図の一例を図 4.3.9 に示す。

表 4.3.4 初期き裂を有する重ねすみ肉溶接のルート部のき裂進展解析から求めた J 積分値  
 (板厚 : 6 mm、隙間 : 1 mm、のど厚 100%)

STEP	$\delta_0$ [mm]	$\varepsilon_r$ (2) [%]	各き裂深さ $c$ ごとの J 積分値 [N/mm]					
			$c = 0.0$ [mm]	$c = 0.5$ [mm]	$c = 1.0$ [mm]	$c = 1.5$ [mm]	$c = 2.0$ [mm]	$c = 2.5$ [mm]
1	2.85	-0.07	0.58	1.41	2.84	6.57	11.06	12.95
2	6.10	-0.13	6.37	21.34	32.03	37.33	40.28	38.40
3	9.93	-0.15	20.16	57.69	71.04	75.15	74.75	68.20
4	13.70	-0.20	32.91	93.90	112.09	115.80	112.63	101.26
5	17.22	-0.23	42.83	126.44	154.35	158.95	153.10	137.11
6	20.61	-0.27	50.56	155.94	196.53	202.66	194.89	174.85
7	23.88	-0.31	56.65	179.63	235.08	245.25	238.18	214.41
8	26.75	-0.33	60.07	197.96	271.21	287.90	280.40	254.87
9	29.58	-0.35	62.95	209.07	306.51	328.90	322.11	295.17
10	32.56	-0.37	66.37	221.84	335.97	367.01	361.33	335.13

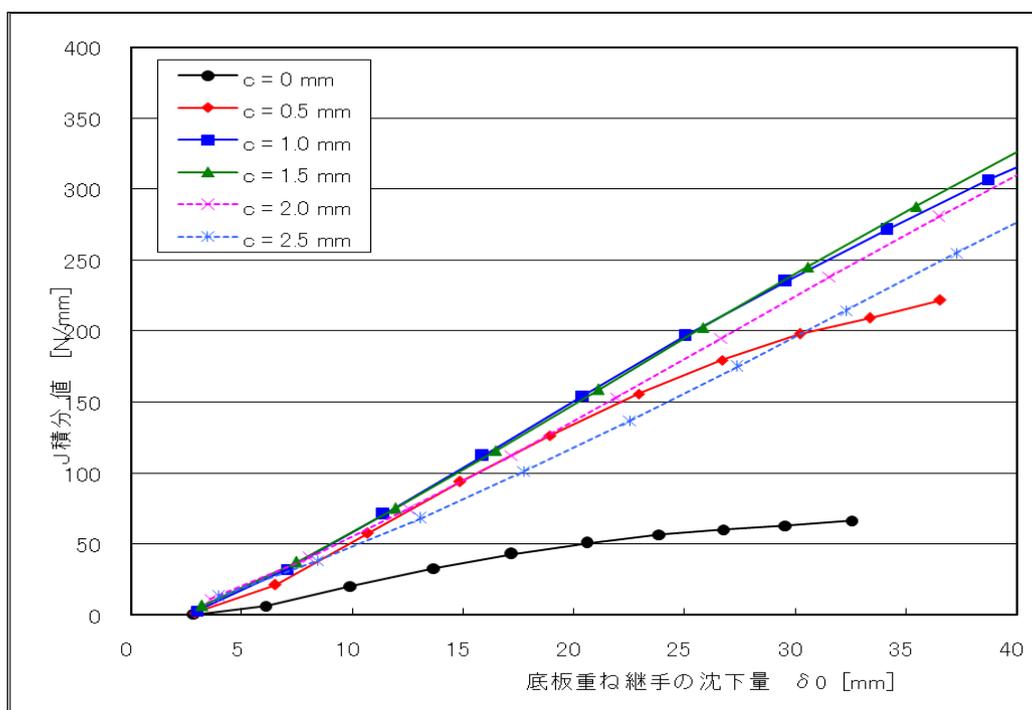


図 4.3.7 重ねすみ肉溶接部の沈下量と J 積分値の関係 (のど厚 100%モデル)

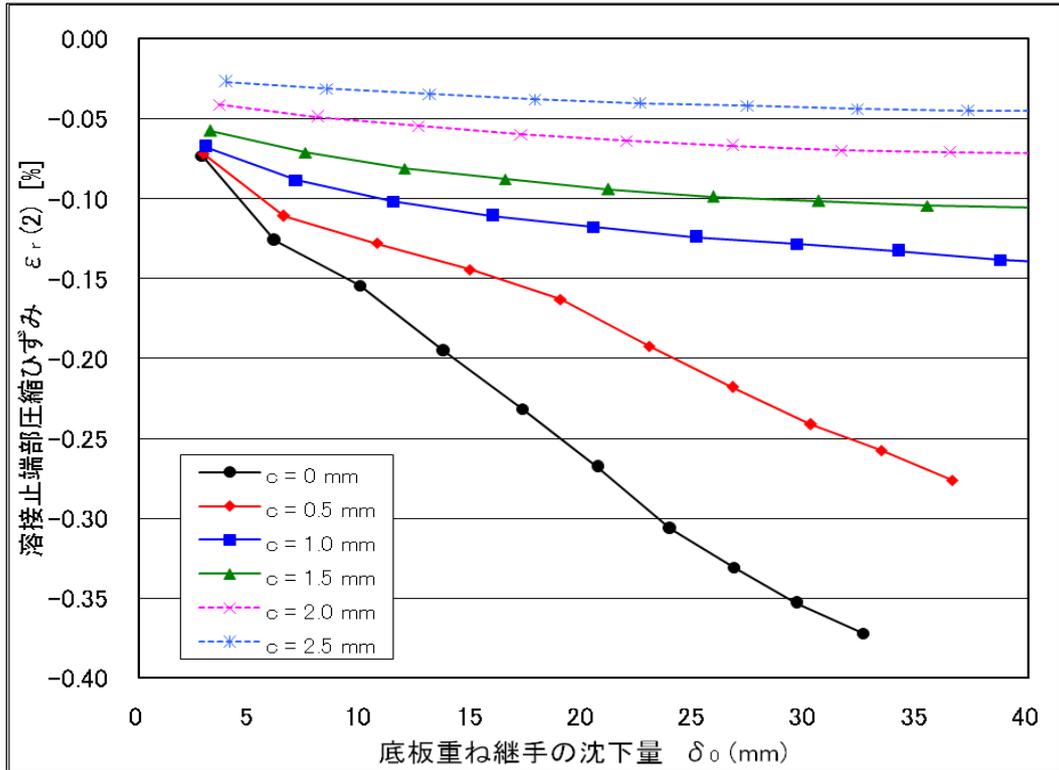


図 4.3.8 重ねすみ肉溶接部の沈下量と溶接止端部に発生した圧縮ひずみの関係 (のど厚 100%モデル)

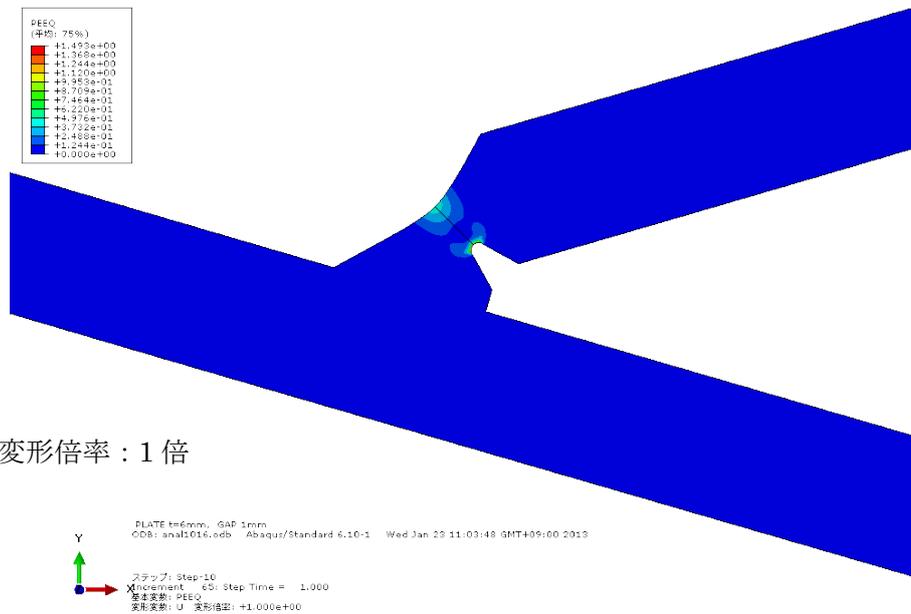


図4.3.9 き裂部の相当塑性ひずみの分布図の一例 (初期き裂深さ $c = 2.0$  mm)

なお、き裂進展解析の際に、以下の関数 $M(c)$  (図4.3.10参照) と線形補正関数 $f(\Delta\delta_0)$  (図4.3.11参照) を用いて、式(4.3.2)よりJ積分範囲 $\Delta J_c$ を求める。

$$M(c) = 1.943 + 10.590c - 8.693c^2 + 3.255c^3 - 0.489c^4$$

$$f(\Delta\delta_0) = \frac{1.203\Delta\delta_0}{1 + 30.299/\Delta\delta_0^2}$$

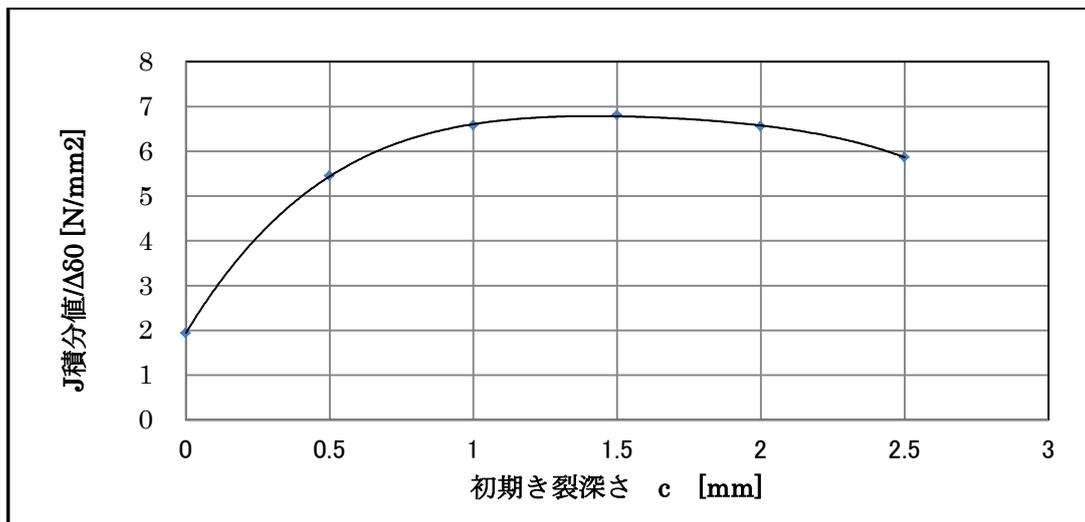


図 4.3.10 のど厚 100%モデルの  $M(c)$ 関数

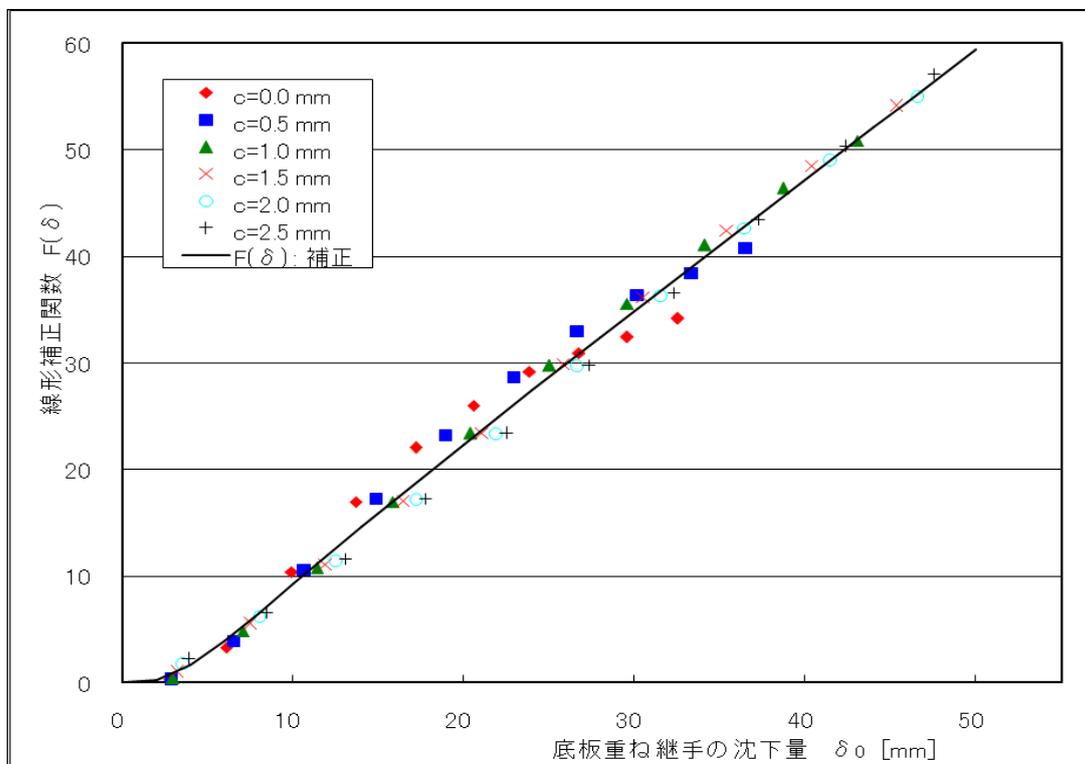


図 4.3.11 のど厚 100%モデルの線形補正関数 $f(\Delta\delta_0)$

(2) のど厚 50%モデルの J 積分値の解析結果

带状初期き裂を有するのど厚 50%モデル (2次元解析モデル) による J 積分値解析結果を表 4.3.5 に示し、重ね継手の沈下量と J 積分値の関係および沈下量と溶接止端部に発生した底板の半径方向圧縮ひずみの関係をそれぞれ図 4.3.12 と図 4.3.13 に示す。代表的なき裂部の塑性ひずみ分布図の一例を図 4.3.14 に示す。

表 4.3.5 初期き裂を有する重ねすみ肉溶接のルート部のき裂進展解析から求めた J 積分値 (板厚 : 6 mm、有害隙間 : 1 mm、のど厚 50%)

STEP	$\delta_0$ [mm]	$\varepsilon_r$ (2) [%]	各き裂深さ c ごとの J 積分値 [N/mm]					
			c = 0.00 [mm]	c = 0.27 [mm]	c = 0.53 [mm]	c = 0.80 [mm]	c = 1.06 [mm]	c = 1.33 [mm]
1	2.85	-0.033	3.82	7.64	8.76	8.81	8.11	6.62
2	6.38	-0.038	14.41	25.51	26.43	24.42	21.10	16.60
3	9.98	-0.042	26.66	46.08	46.57	42.26	36.04	28.17
4	13.64	-0.045	40.39	68.91	68.66	62.12	52.74	41.20
5	17.35	-0.047	55.44	93.49	92.33	83.48	70.95	55.61
6	21.12	-0.049	71.58	119.49	117.13	106.15	90.53	71.34
7	24.95	-0.051	88.65	146.69	143.16	129.97	111.24	88.21
8	28.80	-0.052	106.19	174.56	170.13	154.84	133.05	-
9	32.72	-0.053	124.27	203.16	197.86	180.57	-	-
10	36.71	-0.054	142.58	231.84	226.14	207.19	-	-

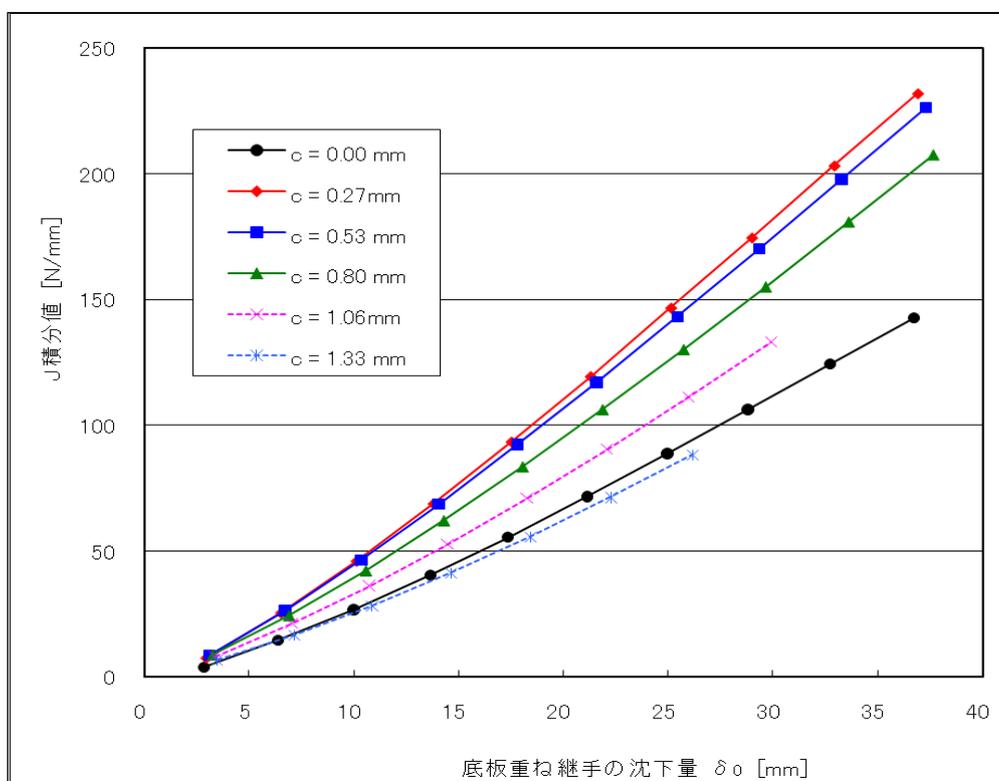


図 4.3.12 重ねすみ肉溶接部の沈下量と J 積分値の関係 (のど厚 50%モデル)

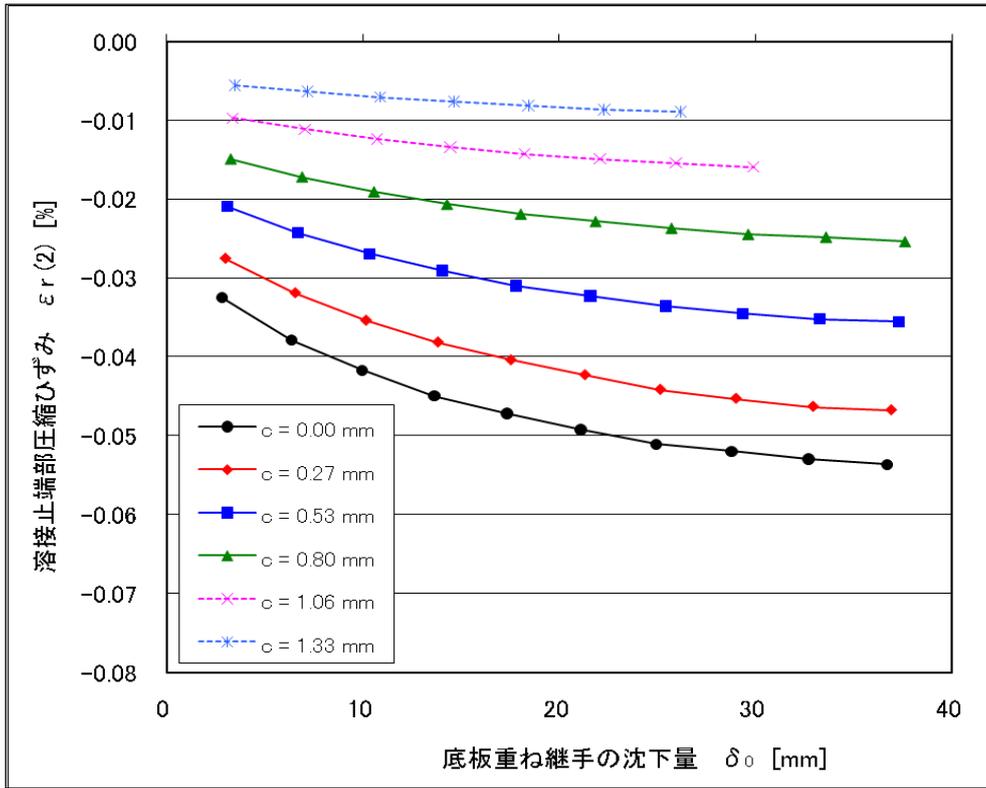


図 4.3.13 重ねすみ肉溶接部の沈下量と溶接止端部に発生した圧縮ひずみの関係 (のど厚 50%モデル)

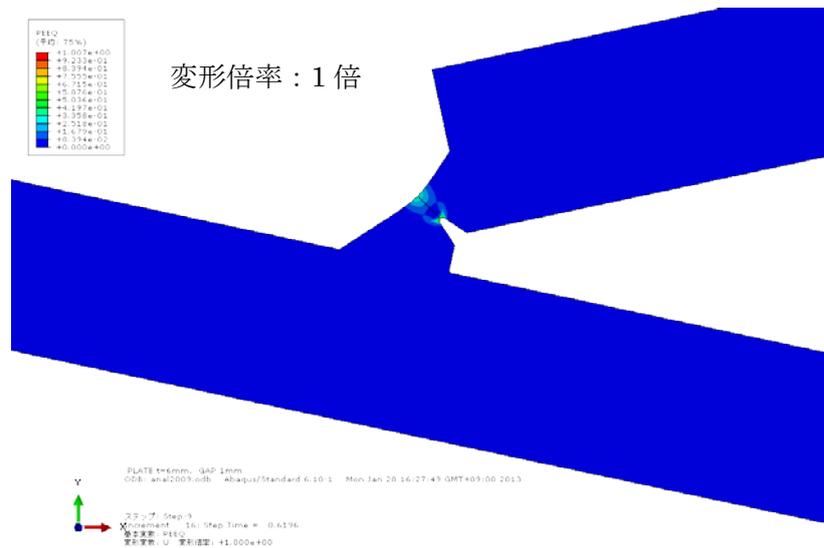


図4.3.14 き裂部の相当塑性ひずみの分布図の一例 (初期き裂深さ $c = 1.6$  mm)

なお、き裂進展解析の際に、以下の関数 $M(c)$  (図4.3.15参照) と線形補正関数 $f(\Delta\delta_0)$  (図4.3.16参照) を用いて、式(4.3.2)よりJ積分範囲 $\Delta J_c$ を求める。

$$M(c) = 3.091 + 12.521c - 23.397c^2 + 15.295c^3 - 3.696c^4$$

$$f(\Delta\delta_0) = \frac{1.244\Delta\delta_0}{1 + 42.967/\Delta\delta_0^2}$$

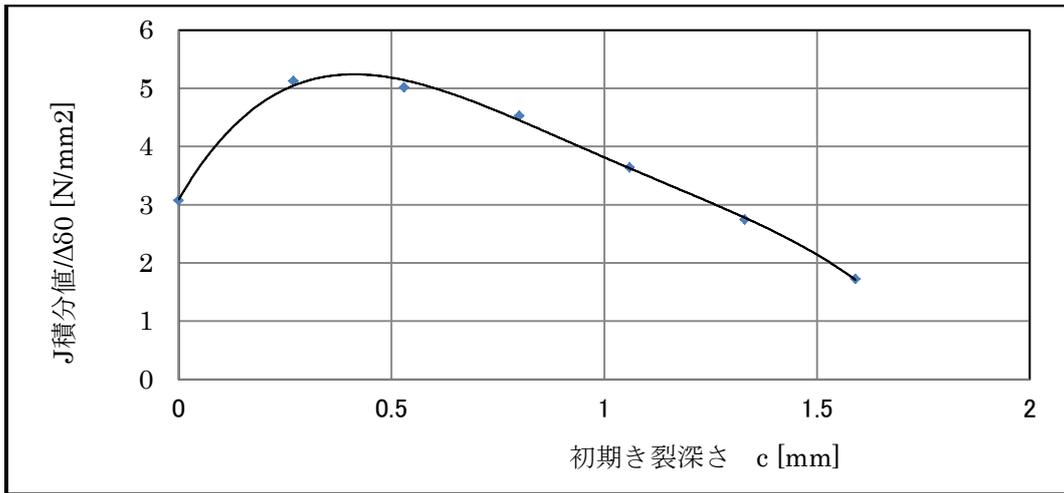


図 4.3.15 のど厚 50%モデルの  $M(c)$ 関数

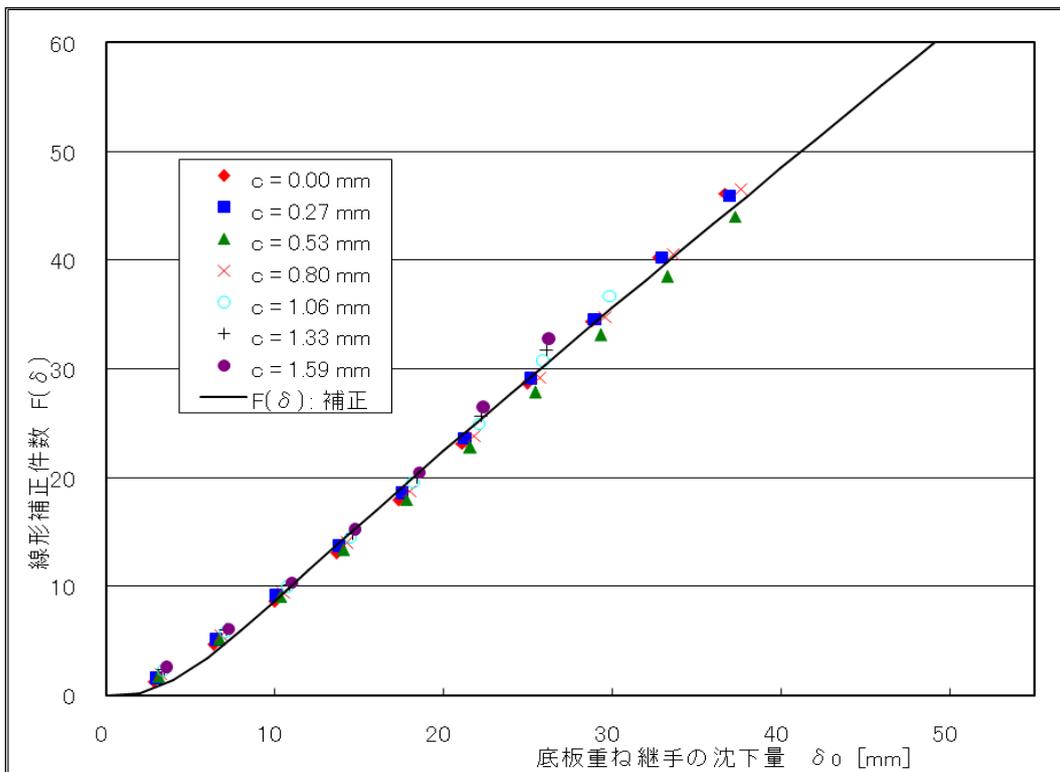


図 4.3.16 のど厚 50%モデルの線形補正関数  $f(\Delta\delta_0)$

#### 4.3.4 疲労寿命カーブ作成と沈下量に対応する許容き裂深さの推定

き裂成長評価式を用いて、2次元解析モデルのき裂進展解析結果を評価することにより、初期き裂深さを設定した重ね継手溶接部のルート部の最終限界き裂深さ(のど厚の80%と設定)までの到達回数を式(4.3.5)の数値積分より算定し、沈下量と疲労破断回数の関係を示す疲労寿命カーブを作成する。

##### (1) のど厚 100%モデルの疲労寿命カーブ

初期き裂深さを設定した重ね継手溶接部のルート部の最終限界き裂深さまでの到達回数と疲労寿命カーブを表 4.3.6 と図 4.3.17 に示す。

表4.3.6 のど厚100%モデルのき裂進展解析による最終限界き裂(のど厚の80%)への到達回数

解析 番号	初期き裂 c [mm]	最終き裂 cf [mm]	STEP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			$\delta_0$ [mm]	2	4	6	8	10	15	20	25	35
1-1	0.0	3.4	Nf [回]	501623	22283	4970	2033	1110	428	236	153	81
1-2	0.5	3.4	Nf [回]	451751.9	20068	4476	1831	999	386	212	137	73
1-3	1.0	3.4	Nf [回]	432633.3	19219	4287	1754	957	370	203	132	70
1-4	1.5	3.4	Nf [回]	416470	18500	4127	1688	921	356	196	127	68
1-5	2.0	3.4	Nf [回]	400163	17776	3965	1622	885	342	188	122	65
1-6	2.5	3.4	Nf [回]	381896.1	16965	3784	1548	845	326	180	116	62

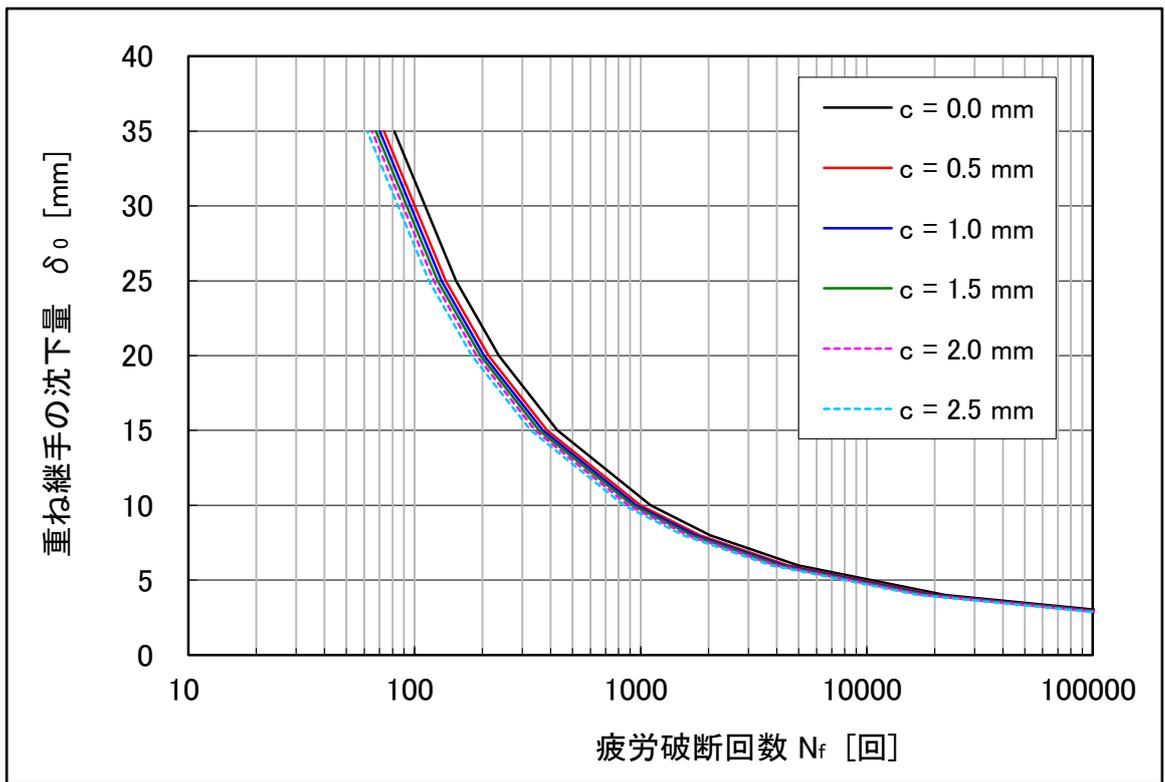


図4.3.17 のど厚100%モデルの疲労寿命カーブ

##### (2) のど厚 50%モデルの疲労寿命カーブ

初期き裂深さを設定した重ね継手溶接部のルート部の最終限界き裂深さまでの到達回数と疲労寿命カーブを表 4.3.7 と図 4.3.18 に示す。

表 4.3.7 のど厚 50%モデルのき裂進展解析による最終限界き裂(板厚の 80%)への到達回数

解析 番号	初期き裂 c [mm]	最終き裂 cf [mm]	STEP $\delta_0$ [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
				2	4	6	8	10	15	20	25	35
2-1	0.00	1.7	Nf [回]	356195	13938	2765	1039	535	191	102	65	34
2-2	0.27	1.7	Nf [回]	323126	12644	2508	942	485	173	92	59	31
2-3	0.53	1.7	Nf [回]	301413	11795	2340	879	452	162	86	55	29
2-4	0.80	1.7	Nf [回]	275717	10789	2140	804	414	148	79	50	26
2-5	1.06	1.7	Nf [回]	241730	9459	1876	705	363	130	69	44	23
2-6	1.33	1.7	Nf [回]	188544	7378	1464	550	283	101	54	34	18
2-7	1.59	1.7	Nf [回]	93029	3640	722	271	140	50	27	17	9

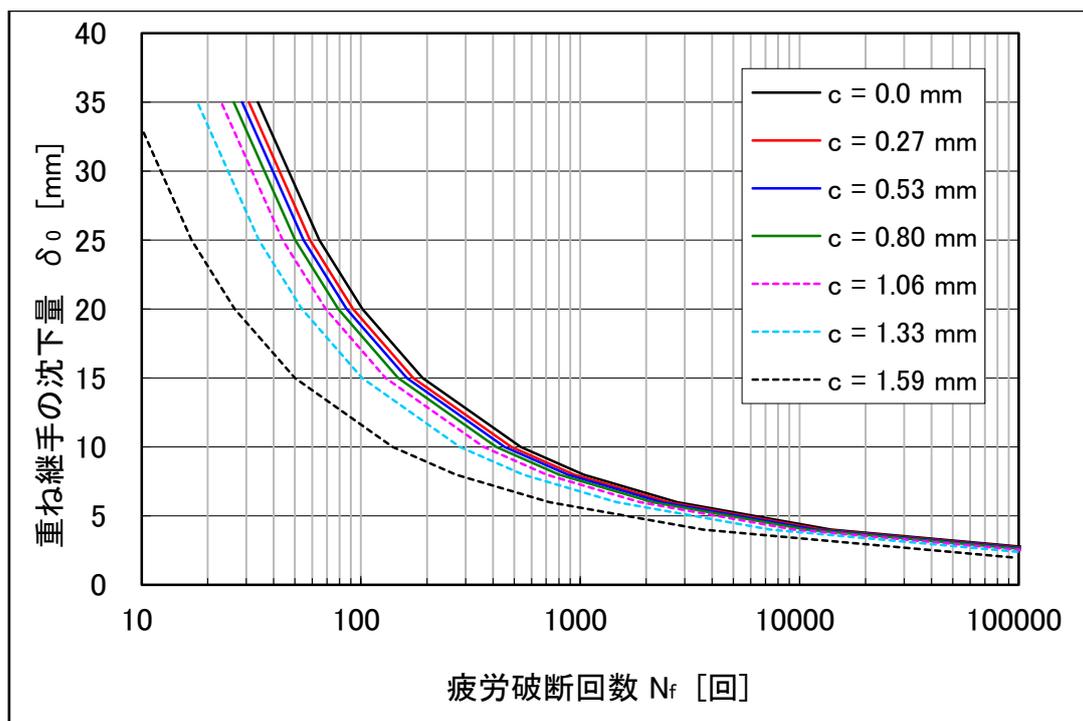


図 4.3.18 のど厚 50%モデルの疲労寿命カーブ

#### 4.4 4点曲げ試験結果とき裂進展解析結果との比較

##### 4.4.1 静荷重試験による計測ひずみと解析ひずみとの比較

4点曲げによる静的負荷試験を実施し、初層部無欠陥、のど厚 100%、隙間 1mm の試験片に対し図 4.4.1 に示す位置にひずみゲージを取り付けデータを採取した。溶接止端部の計測値 (ひずみ 1) と解析から得られたひずみとの比較を図 4.4.2、溶接表面 (ひずみ 2) の比較を図 4.4.3 に示す。

図 4.4.2 に示す止端部のひずみとの比較結果では、沈下量の 20mm 以下の範囲において両者にはそれほど大きな差はないものの、図 4.4.3 に示す溶接表面のひずみの比較結果では、両者の差が存在することがわかる。試験片によるひずみ計測結果について、溶接表面のひずみ 2 は止端部のひずみ 1 に比べひずみの値が 20 倍程度大きく、さらに同一条件の試験片におけるひずみ 2 の計測値はばらつきが大きい結果となっている。ひずみゲージで得られた値はゲージレンジス(2mm)の範囲における平均的な値であることや、解析に使用した物性値と実際の試験片の物性値に比べて柔らかい傾向にあること等が影響しているものと推察さ

れる。

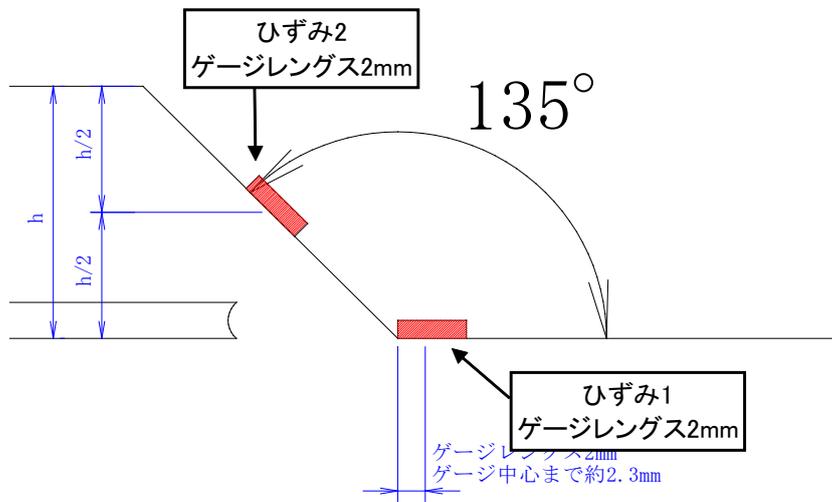


図 4.4.1 ひずみ計測位置

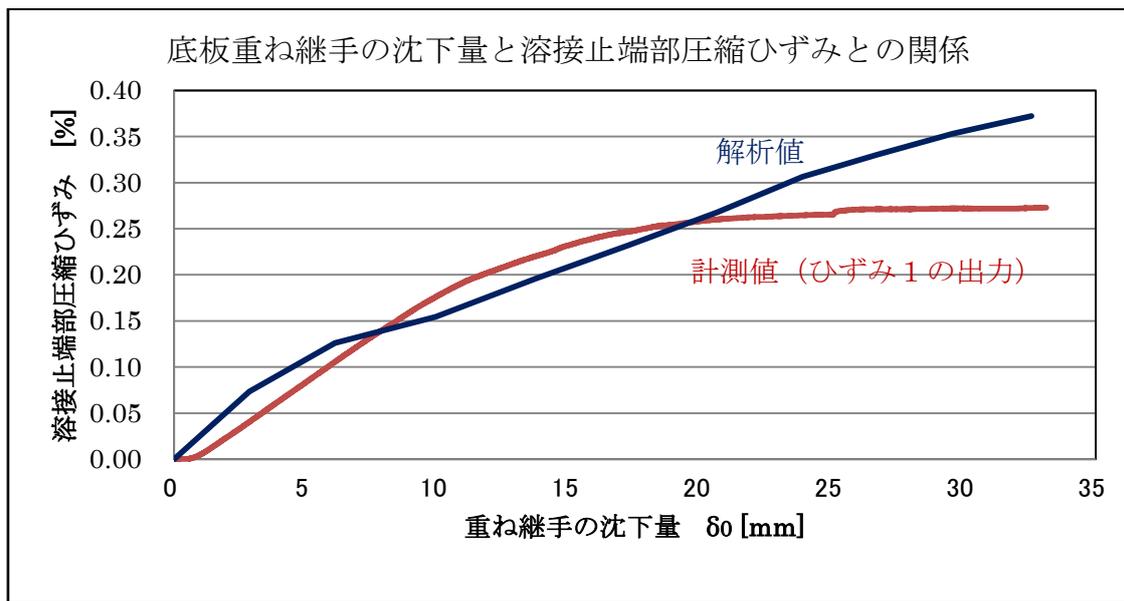


図 4.4.2 のど厚 100%モデルの溶接止端部に発生した圧縮ひずみと試験計測値との比較

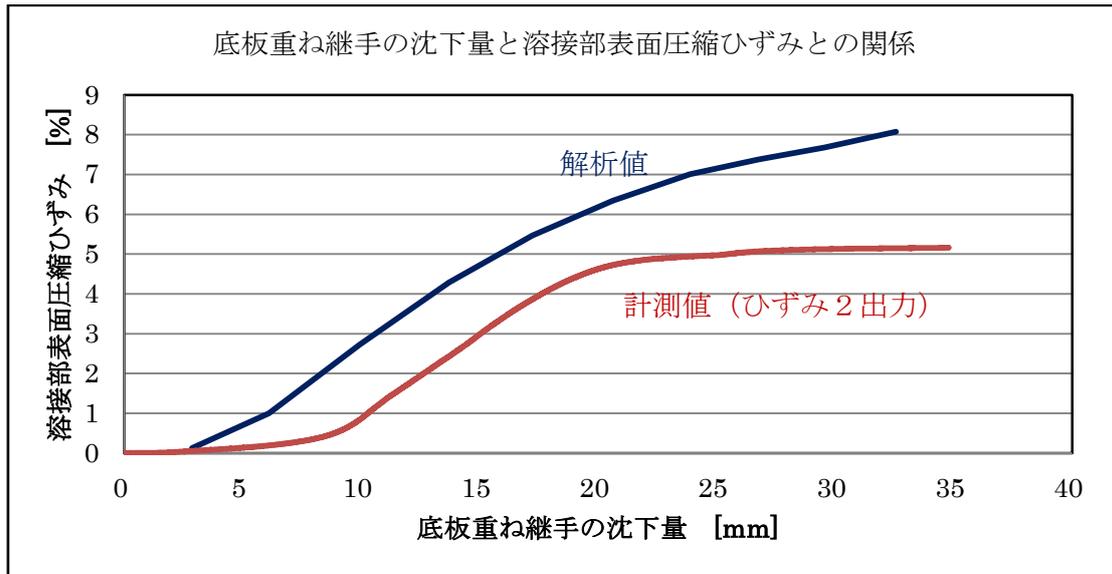


図 4.4.3 のど厚 100%モデルの溶接部表面に発生した圧縮ひずみと試験計測値との比較

4.4.2 曲げ疲労試験から得られた破断回数とき裂進展解析から得られた破断回数との比較  
 き裂進展解析から得られた溶接部の疲労破断回数及び曲げ疲労試験結果を比較するにあたり、曲げ疲労試験の結果としてすみ肉溶接部の変位  $\delta_0$  は得られていないことから、両者を直接比較することは出来ない。このため、図 4.4.4 に示す静的荷重を作用させた有限要素法解析によって得られた  $\delta_P$  と  $\delta_0$  との関係から 4 点曲げ試験における強制変位  $\delta_P$  を与えた試験片の  $\delta_0$  を求め、き裂進展解析から得られた疲労寿命カーブに試験結果をプロットしたものを図 4.4.5 及び図 4.4.6 に示す。

のど厚の大小や初期欠陥の有無等の構造的要因が疲労強度に及ぼす影響について、本検討結果から定量的な考察を行うことは困難であるが、どのような構造的要因が疲労強度に影響を及ぼすかについて定性的な評価を行うことはできたと考える。

試験片の荷重作用点において繰り返し  $\delta_P$  という強制変位を与えた場合、すみ肉溶接部の変位  $\delta_0$  は、応力集中箇所の塑性化やき裂の進展により次第に大きくなることが予想されることから、試験片の  $\delta_0$  を小さく見積もっているといえる。この点は、試験結果と解析結果との間に定量的な差が生じている一因と推察される。

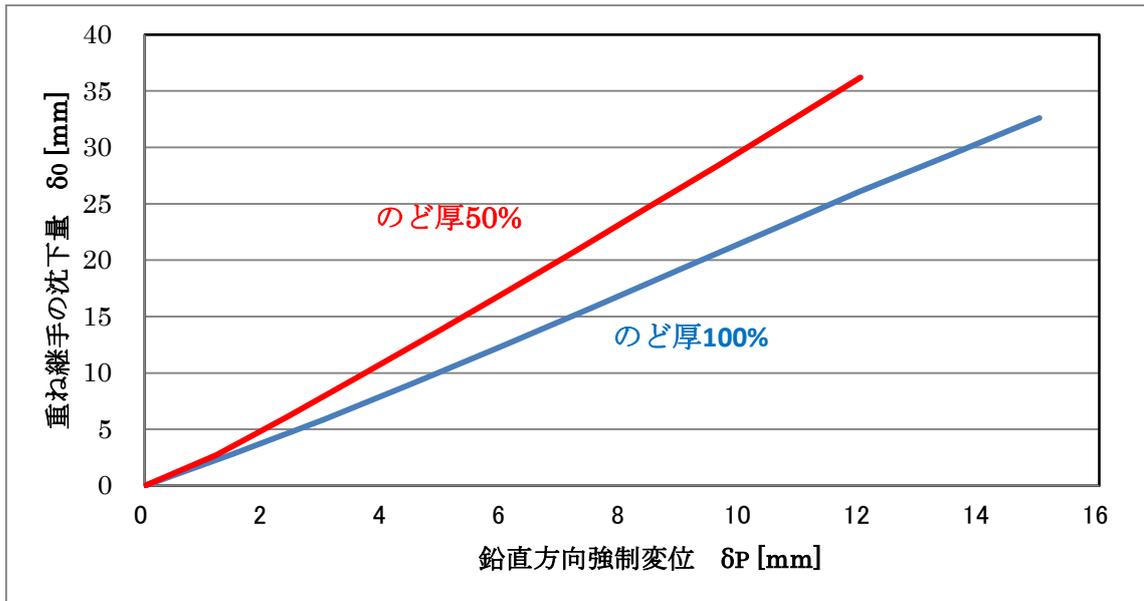


図 4.4.4 有限要素法解析によって得られた  $\delta_P$  と  $\delta_o$  との関係

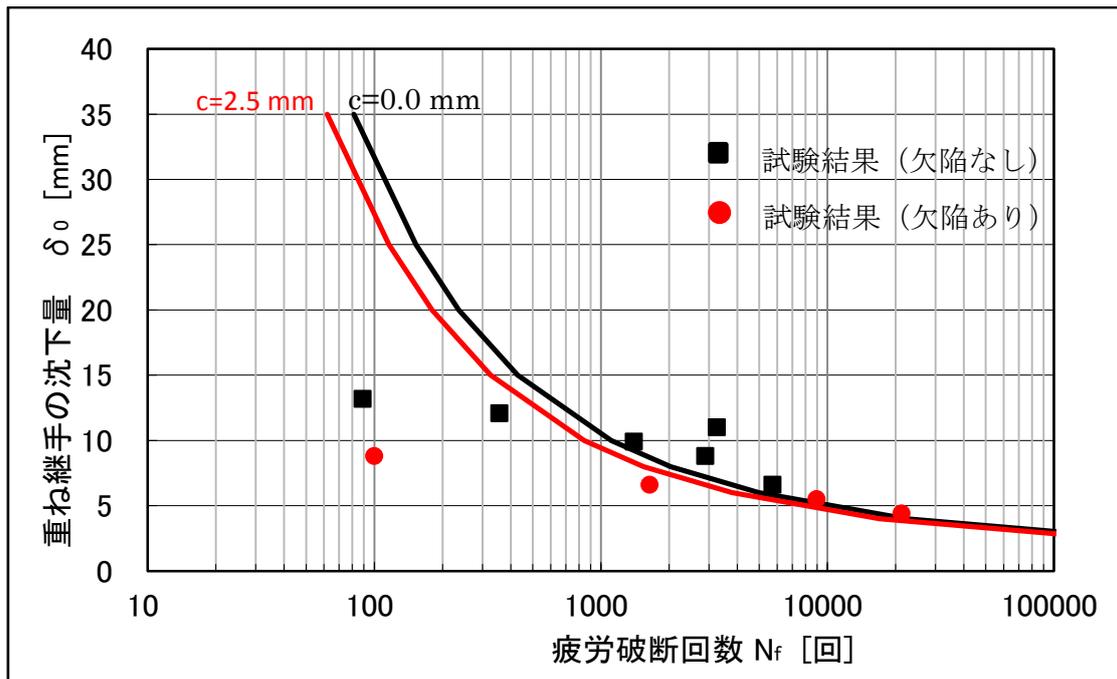


図 4.4.5 のど厚 100%モデルの解析結果と試験結果との比較

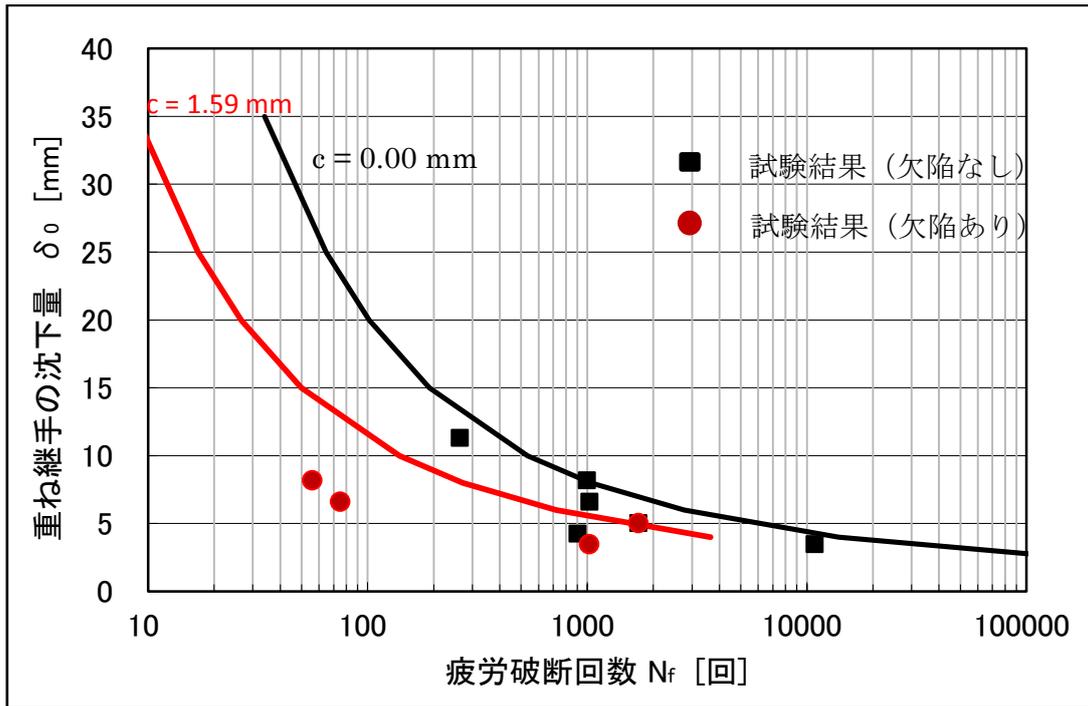


図 4.4.6 のど厚 50%モデルの解析結果と試験結果との比較

## 第5章 まとめ

### 5.1 基礎地盤の堅固さの評価に係るまとめと課題

昨年度に引き続き、旧法タンクの地盤の堅固さを評価するため、水張試験時における実タンクの沈下量計測及び有限要素法による沈下解析を実施した。昨年度提案した有限要素法による解析手法は、地盤性状の持つ非線形性を定性的に表現することが可能であり、かつ、タンク外周部における沈下量が計測結果と定量的な一致をみていることから、屋外タンク貯蔵所が設置されている範囲の地盤剛性をマクロ的に評価する方法として妥当であると考えられる。提案した地盤の有限要素法による解析手法を用いることにより、今後、基礎地盤上に設置された底板の疲労破壊を取り扱う場合において、地盤剛性、基礎表面と底板との局所的な空隙、底板のすみ肉溶接の状況等を総合的に解析することが可能であると考えられる。

今年度実施したタンク外周部の沈下解析結果が昨年度に実施した事例と比べやや誤差が大きい結果となった点については、地盤の性状について三軸試験や圧密試験のデータが存在しなかったことが大きな一因であると考えられる。

タンク内部の沈下量については、解析結果が計測結果を過小評価する結果となった。過小評価となる要因としては空液時に存在する基礎表面とタンク底板との局所的な空隙等の影響が考えられるが、空隙の範囲や深さについては中性子を用い非破壊的に確認する方法があるものの一般的ではないこと、個々のタンクにおいて異なること等から、地盤剛性に及ぼす空隙等の影響を評価することは現時点では困難である。今後は、基礎表面とタンク底板との空隙の測定手法の開発及び普及に期待するとともに、水張試験等を利用したタンク底板の沈下量計測と有限要素法を利用した沈下解析のデータを蓄積し、地盤剛性に空隙等が与える影響について統計的に評価することが望まれる。

### 5.2 重ねすみ肉溶接の疲労強度の評価に係るまとめと課題

旧法タンクの底板に適用されている重ねすみ肉溶接を対象とした4点曲げ試験及びき裂進展解析を実施した結果、重ねすみ肉溶接部の構造的要因（初層部欠陥の有無、隙間、のど厚）のうち、初層部欠陥の有無及びのど厚の大小が疲労強度に影響を及ぼすことが分かった。

また、有限要素法を用いたき裂進展解析から沈下量と疲労破断回数を示す疲労寿命カーブを得た。定量的な評価は困難であるものの、300mm程度の範囲において健全な重ねすみ肉溶接部が鉛直方向に10mm撓むことが考えられる場合は、繰り返し回数が1,000回程度でルート部からのき裂がのど厚の80%まで進展する結果となっている。定性的には当該溶接部ののど厚の減少や初層部の欠陥の存在により疲労強度が脆弱になることが確認されている。繰り返し回数の少ない範囲（概ね $N_f < 1,000$ ）においては、解析結果が4点曲げ疲労試験から得られた結果に対して非安全サイドとなっている点にも留意する必要がある。

る。

旧法タンクの地盤剛性は新法タンクに比べて軟弱であることや、旧法タンクの底板の板厚は新法タンクに比べて薄いことから、荷重による旧法タンクの底板の撓み量は大きくなることが予想される。さらに、旧法タンクは設置から概ね 40 年以上経過したものが大半であり、底板の重ねすみ肉溶接部には荷重履歴が重ねられていることを踏まえると、底板の重ねすみ肉溶接部の疲労強度について慎重な検討が必要である。

今後、旧法屋外タンク貯蔵所の底板の撓みによる重ねすみ肉溶接部の疲労強度を定量的に評価するためには、実際のタンクにおいて局所的に撓みが発生する範囲、その範囲における撓み量、すみ肉溶接初層部の欠陥の有無、すみ肉溶接ののど厚について把握することが重要になることから、すみ肉溶接初層部の欠陥の有無やすみ肉溶接ののど厚の評価が可能となる非破壊検査手法の検討が必要になると考える。

### 5.3 その他の課題

旧法タンクの保安検査の検査周期について検討するにあたっては、基礎地盤の堅固さ、底板に適用されるすみ肉溶接の信頼性に加え、比較的薄い板厚である底板の腐食減肉に対する安全性について検討する必要がある。平成 22 年 12 月に取りまとめられた「屋外タンク貯蔵所の保安検査の周期に係る調査検討会報告書」によれば、保安検査時に得られた新法タンクの底板の腐食データを収集、分析することにより、検査周期を延長した場合の影響評価を実施していることから、旧法タンクについても同様のデータ収集及び分析を実施する必要があると考える。

# 旧法屋外タンク貯蔵所の保安検査のあり方に係る調査検討中間報告書

## 参考資料

### 目次

参考資料 1	沈下計測の実施状況	.....	1
参考資料 2	4点曲げ試験	.....	5

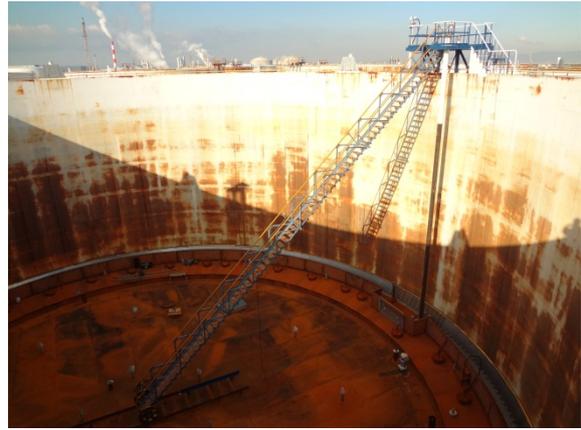


## 参考資料 1

### 沈下計測の実施状況



対象タンク外観（1）



対象タンク外観（2）



対象タンク内部



基準標高



仮ベンチマーク



タンク外周部のレベル測量



レベル測量機



レーザーレベル計



レーザーレシーバー



タンクスケール



鋼巻尺設置状況 (浮き屋根上)



鋼巻尺設置状況 (タンク底部)



タンク液面計



温度計



タンク内部のレベル測量



レーザーレベルによる測量



タンクスケールによる測量

## 参考資料 2

### 4点曲げ試験

## 1.溶接素材製作

4点曲げ試験片を採取するために、重ねすみ肉溶接を施した溶接素材を製作した。溶接素材の一部は、初層に意図的にブローホールを発生させて欠陥を導入した。溶接素材製作後には、ブローホールの有無を確認するためにX線透過試験を実施した。

溶接素材製作に関する項目を以下に示す。また、使用した鋼板と溶接棒のミルシートを添付する。

図 1-1 溶接素材概略

表 1-1 製作枚数と素材番号

図 1-2 溶接部隙間概略図

表 1-2 溶接条件

写真 1-1-1～1-1-14 X線透過試験結果

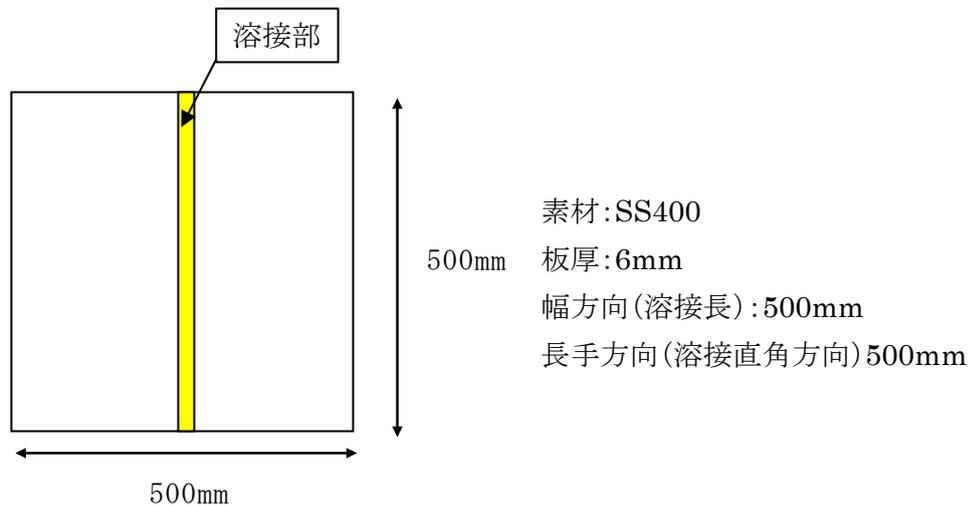


図 1-1 溶接素材の概略

表 1-1 製作枚数と素材番号

	無欠陥	ブローホールあり
隙間 1mm	6 枚 素材番号:1-1～1-6	2 枚 素材番号:1-9、1-11
隙間 5mm	6 枚 素材番号:5-1～5-6	—

隙間:1mm、5mm

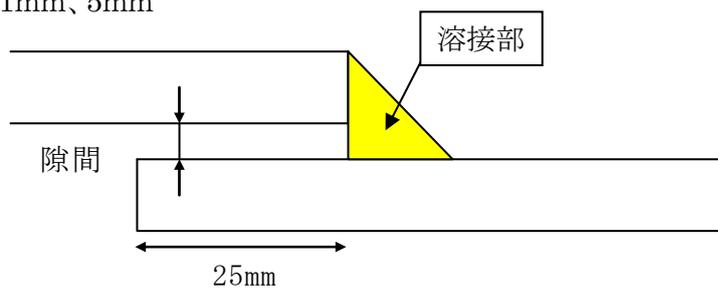


図 1-2 溶接部隙間概略図

表 1-2 溶接条件

溶接材料	神戸製鋼所製 MG-50T
シールドガス	100%CO <sub>2</sub> 25L/min
棒径	1.2mm φ
パス数	隙間1mm : 3 隙間5mm : 6
電流 (A)	190
電圧 (V)	24
速度 (cm/min)	約30

# 鋼材検査証明書 INSPECTION CERTIFICATE

証明番号 : K3 57619  
CERTIFICATE No. : 120E10  
契約番号 : KSL CONTRACT No.

需要者 : KOBE STEEL, LTD. (FUZISAWA)

顧客 : SYANAI  
注文者 : 000  
SHIPPER

品名 : STEEL PLATE

ORDER NO. : 75629312

注文者照合番号 :  
REFERENCE No. 格 : JIS G 3101 SS 400  
規格 SPECIFICATION

DATE 付 : 2012-11-24 E02



寸法 S I Z E	数量 QUAN- TITY	質量 M A S S T A B L E K G	製品番号 P L A T E N o.	製鋼番号 C A S T N o.	管理番号 C O N T R O L N o.	引張試験 T E N S I L E T E S T		衝撃試験 I M P A C T T E S T	化学成分 C H E M I C A L C O M P O S I T I O N							備考 R E M A R K S							
						降伏点 引張強さ 伸び (Y.P.) T.S.	延伸率 E.L.		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni		Cr	Mo	V	Nb	Al	N	Ceq
12.0 X 1524 X 3048	1 1 1	438 438 438	4254695 4254696 4254697 4254698	KA3990	C212651	A 314	440	30	AVE.	X100	X100	X100	X100	X100									
6.0 X 1524 X 3048	1 1 1	219 219 219	419445M1 419445M2 419445M2	KA3828	C184161	A 361	451	28															
TOTAL	7	2,409																					

VISUAL AND DIMENSIONAL INSPECTION: ACCEPTABLE.

上記の注文品は御指定の規格または仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN MADE TO  
THE APPLICABLE SPECIFICATION BY THE BASIC OXYGEN PROCESS AND TESTED IN  
ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE RULES WITH SATISFACTORY  
RESULTS.

JICQA APPROVED NO.  
: QA0507016

*J. Shiraiishi*  
品質保証室長  
MANAGER OF QUALITY SYSTEM SECTION

NOTES: G.L.: A=200 MM  
Y.R.=降伏比 YIELD RATIO; R.A.=絞り REDUCTION AREA, S.F.=延性破面 SHEAR FRACTURE, C.F.=脆性破面 CLEAVAGE FRACTURE, ※...BEND TEST...GOOD(G), CC=複合計算 COMPOSITE CALCULATION.

## INSPECTION CERTIFICATE (検査証明書)

CERTIFICATE No.  
証明書番号: 520123124  
DATE OF ISSUE  
発行日 : 2012. 12. 12

WELDING ROD OR WIRE  
溶加棒又はワイヤ

TRADE DESIGNATION 品名 (型番)	DIMENSION 寸法 (mm)	MFG. No. 製造番号	APPLICABLE SPECIFICATION AND CLASSIFICATION 適用規格及び種類
MG-50T	1. 2	GOC1752J	JIS Z3312 YGW12

CHEMICAL COMPOSITION 化学成分 (%)										
ELEMENTS 成分	C	SI	MN	P	S	CU				
ROD OR WIRE 棒又はワイヤ	0.06	0.74	1.30	0.008	0.017	0.24				
ELEMENTS 成分										

TENSILE TEST OF DEPOSITED METAL 溶着金属引張試験		IMPACT TEST OF DEPOSITED METAL 溶着金属衝撃試験		HARDNESS TEST 硬さ試験	
YIELD POINT 降伏点	YIELD STRENGTH 耐力	TENSILE STRENGTH 引張強さ	ELONGATION 伸び	TEST TEMP. 試験温度	AVG. 平均
-	N/mm <sup>2</sup> 431	N/mm <sup>2</sup> 532	% 29	°C 0	131 J
					135
					121
					137

WELDING CONDITIONS 溶接条件		POSTWELD HEAT TREATMENT 溶接後熱処理	
TYPE OF CURRENT 電流の種類	DCEP	SHIELDING GAS シールドガス	溶接後熱処理
AMPERAGE 溶接電流	260 A	CO2 100%	- °C x - h
ARC VOLTAGE アーク電圧	29 V		

WE HEREBY CERTIFY THAT THE ABOVE TEST RESULTS ARE AS DESCRIBED HEREIN AND SATISFY THE REQUIREMENTS OF THE APPLICABLE SPECIFICATION.  
上記試験結果は、記載の通りであり、適用規格の要求を満足していることを証明します。

◆KOBE STEEL, LTD.  
WELDING BUSINESS 溶接事業部門  
株式会社 神戸製鋼所 福知山工場

FUKUCHIYAMA PLANT  
APPROVED BY CHIEF INSPECTOR  
主任検査員 承認済

20121214331133121212914106R2118 (注)単位、適用規格・種別を略さ大文字を準用しております。REMARKS:CAPITAL LETTERS ARE USED EXCEPT FOR UNIT AND APPLICABLE SPECIFICATION / CLASSIFICATION.

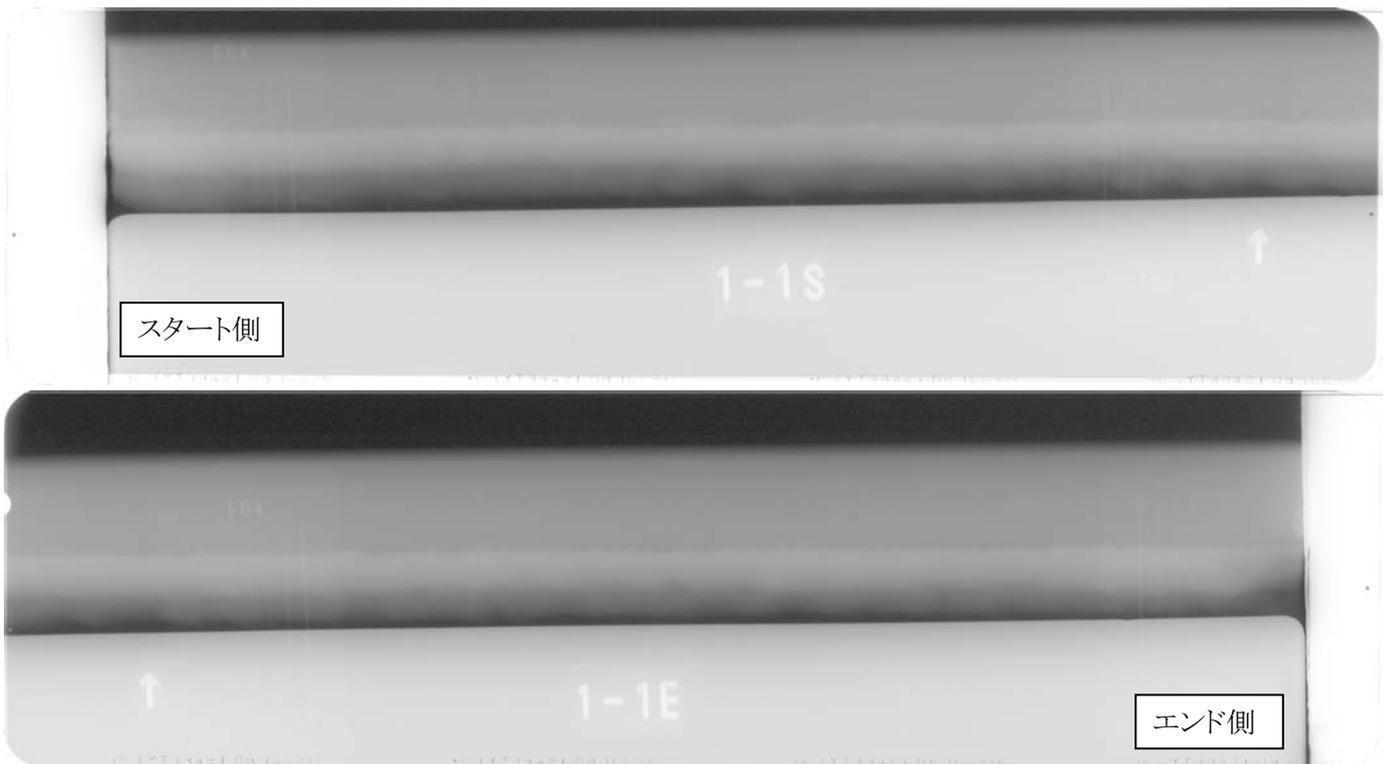


写真 1-1-1 X線透過試験結果(素材番号 1-1、隙間 1mm、ブローホール無し)

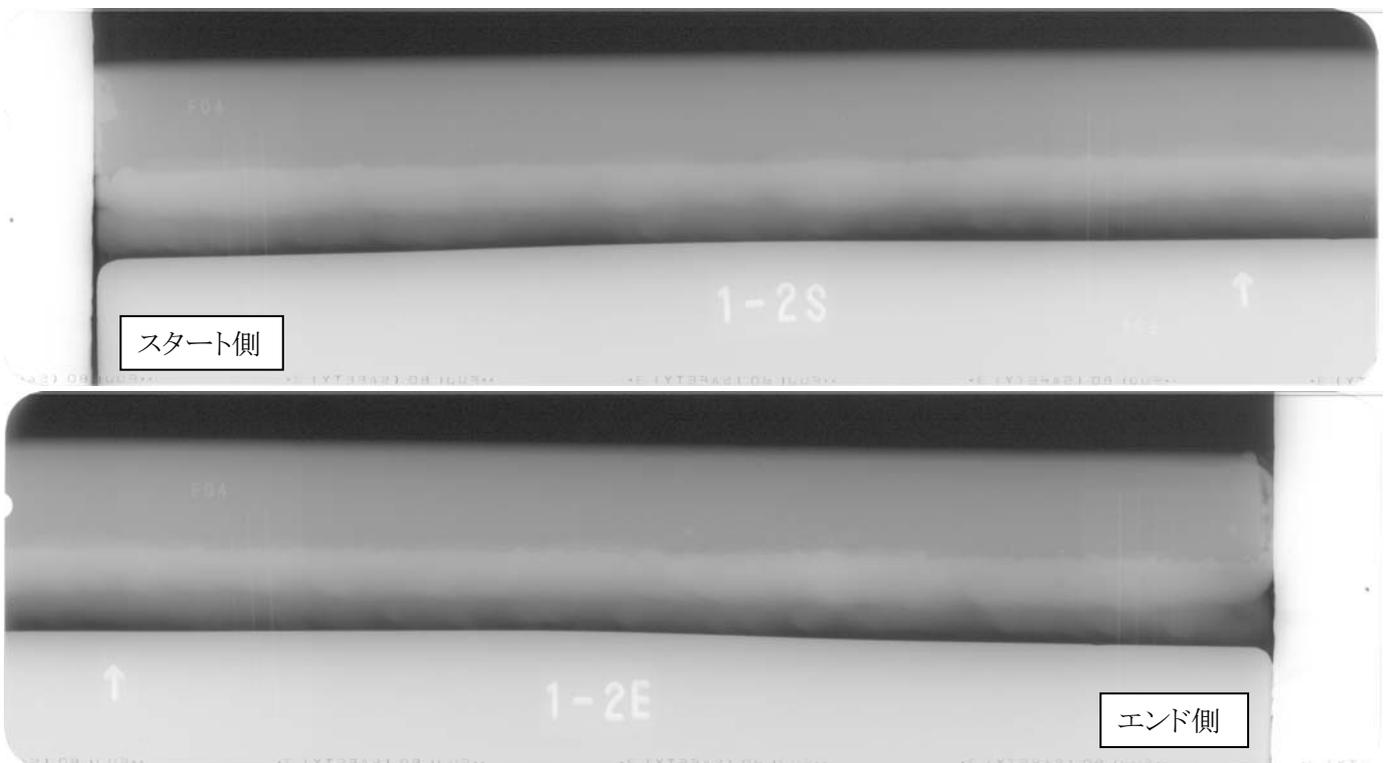


写真 1-1-2 X線透過試験結果(素材番号 1-2、隙間 1mm、ブローホール無し)

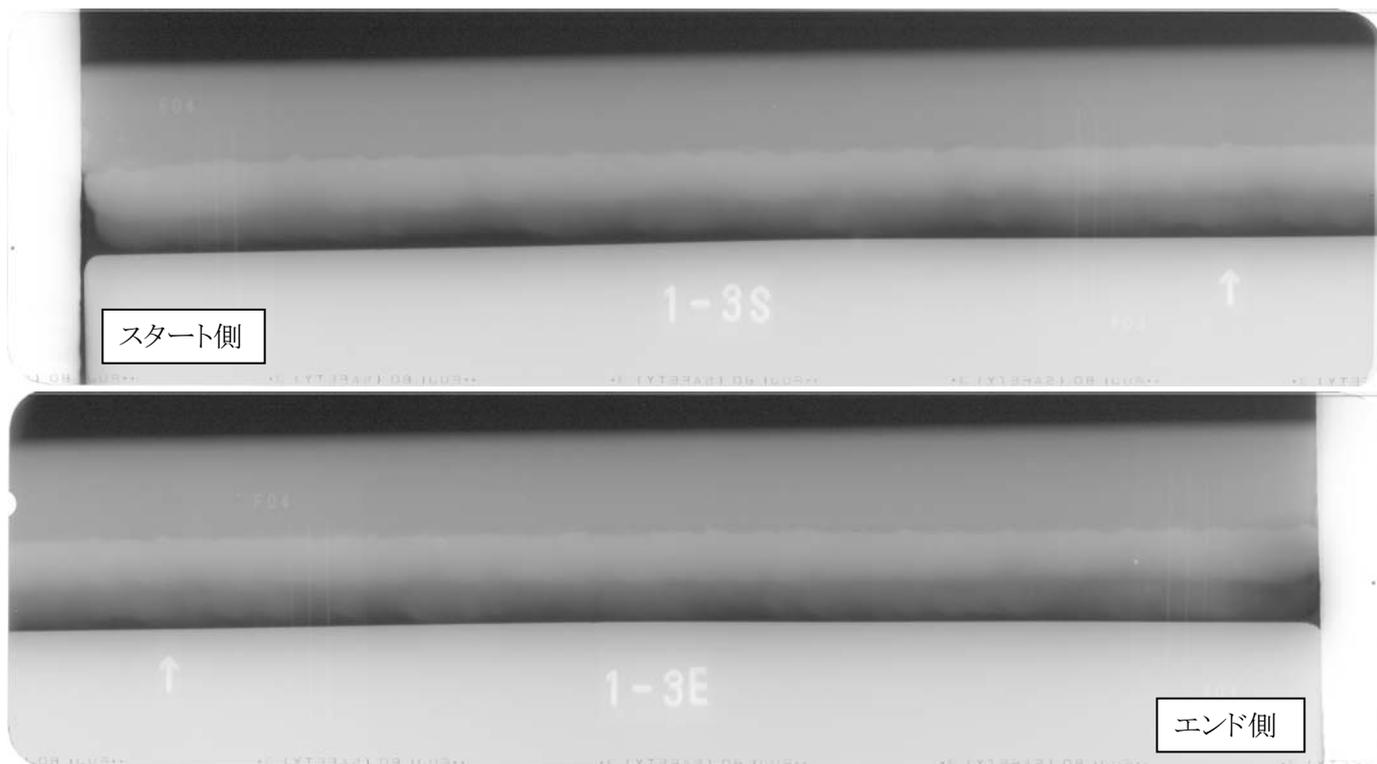


写真 1-1-3 X線透過試験結果(素材番号 1-3、隙間 1mm、ブローホール無し)

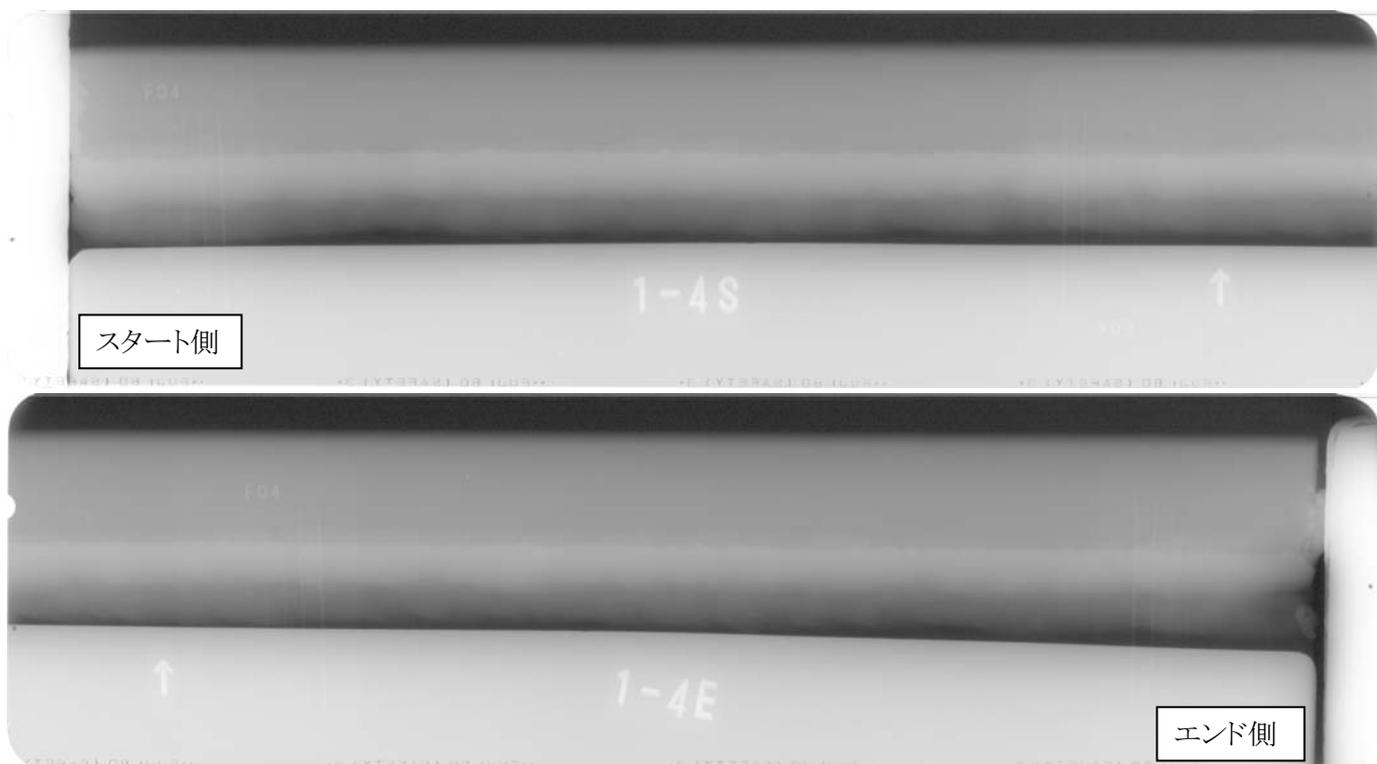


写真 1-1-4 X線透過試験結果(素材番号 1-4、隙間 1mm、ブローホール無し)

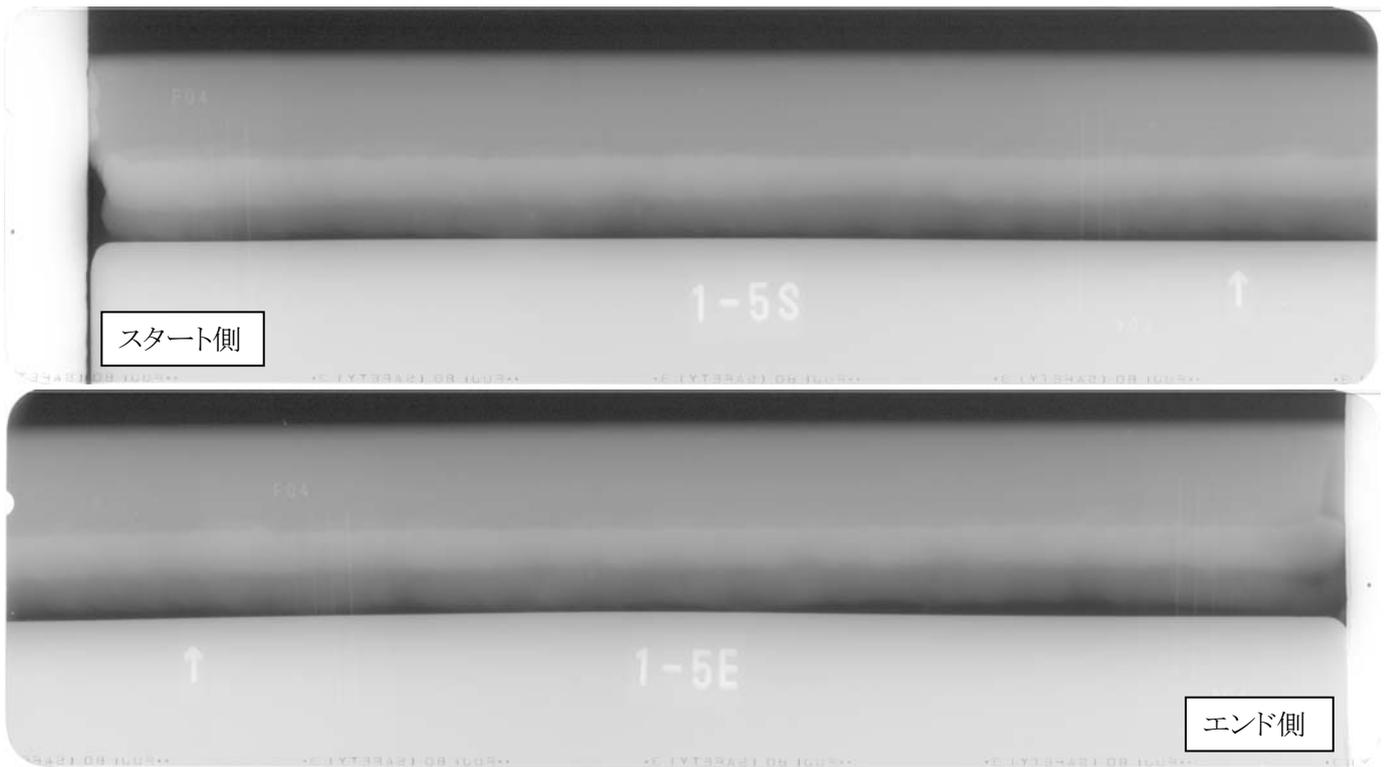


写真 1-1-5 X線透過試験結果(素材番号 1-5、隙間 1mm、ブローホール無し)

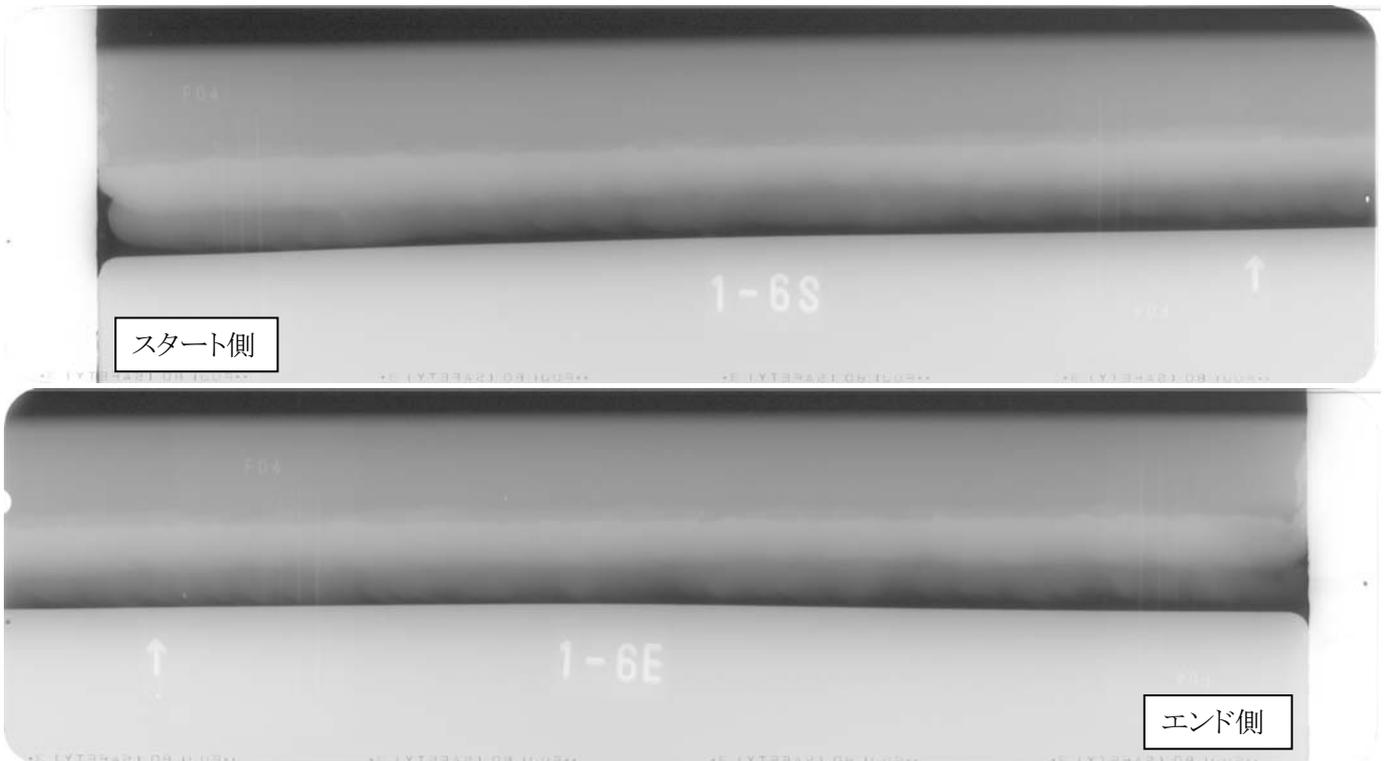


写真 1-1-6 X線透過試験結果(素材番号 1-6、隙間 1mm、ブローホール無し)

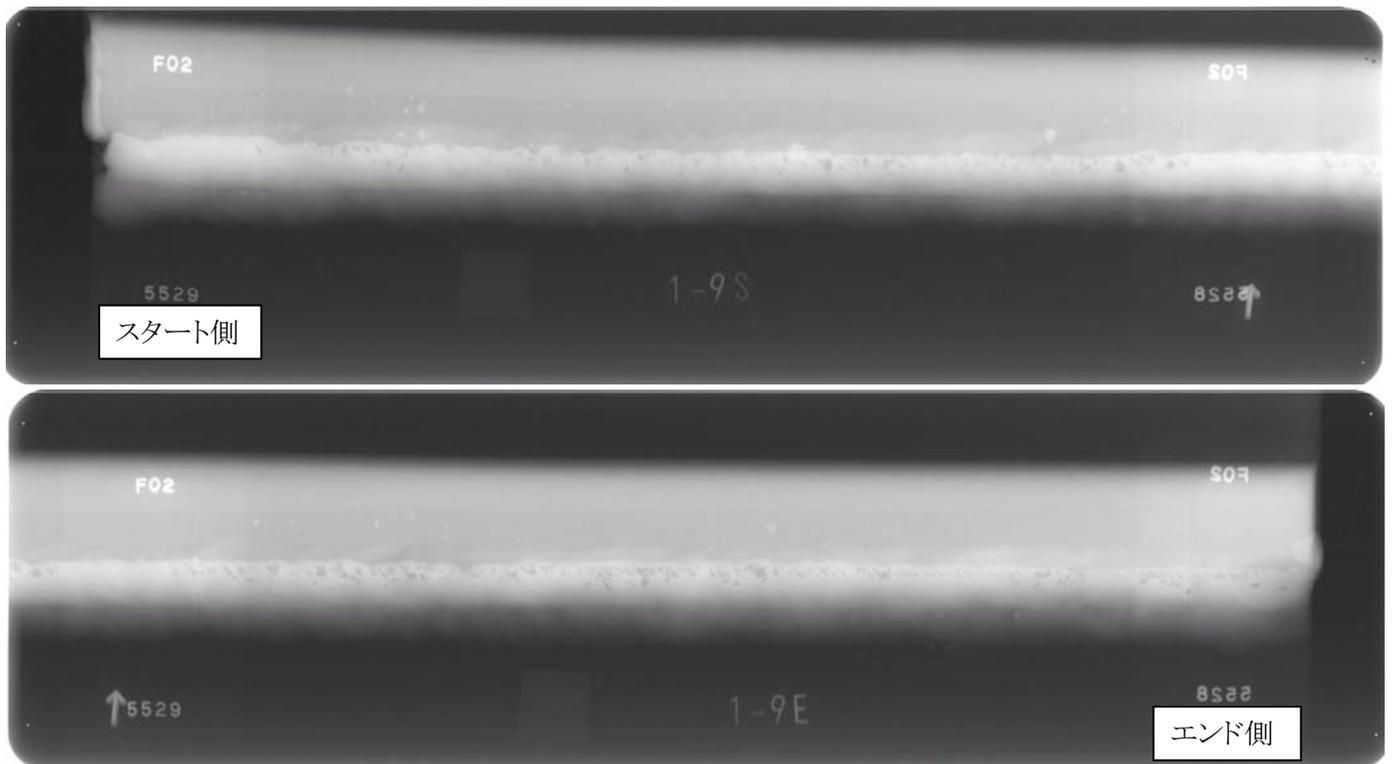


写真 1-1-7 X線透過試験結果(素材番号 1-9、隙間 1mm、ブローホール有り)

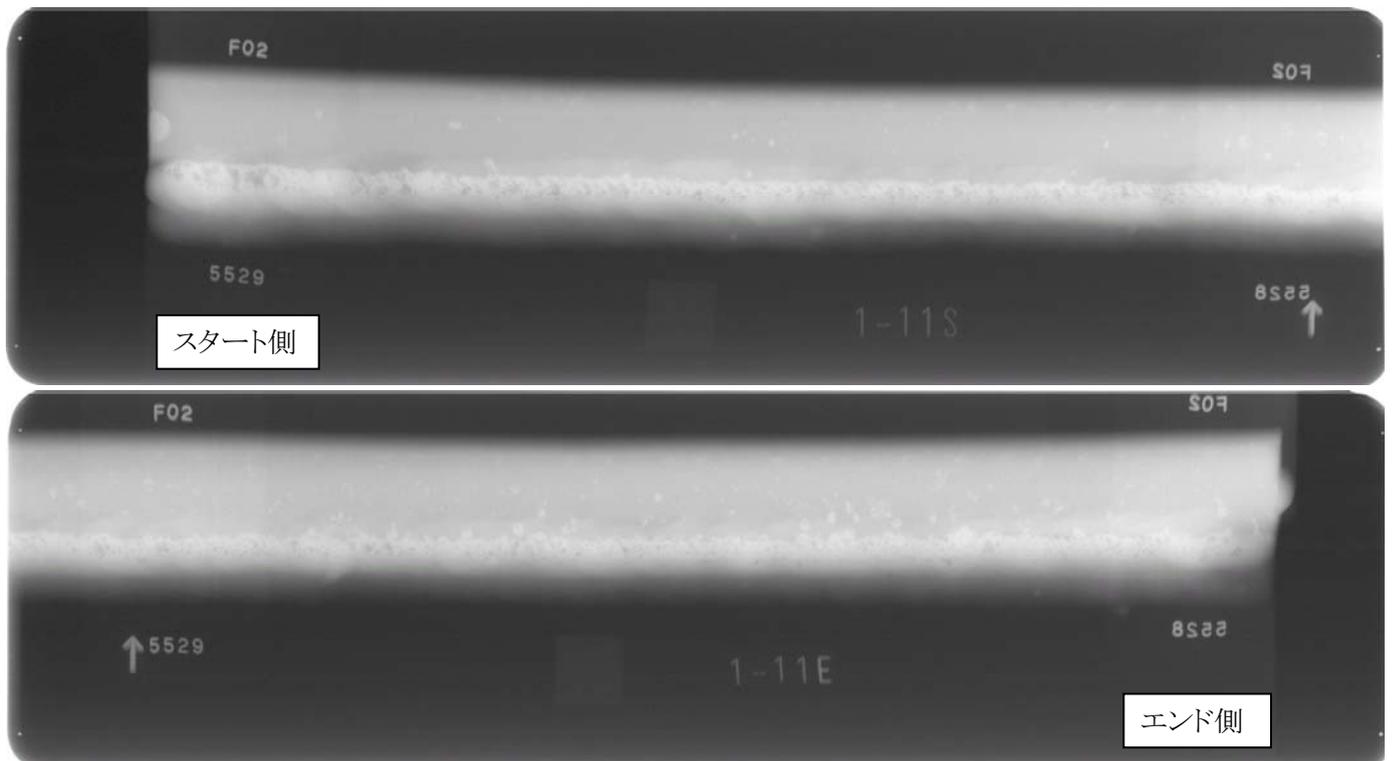


写真 1-1-8 X線透過試験結果(素材番号 1-11、隙間 1mm、ブローホール有り)

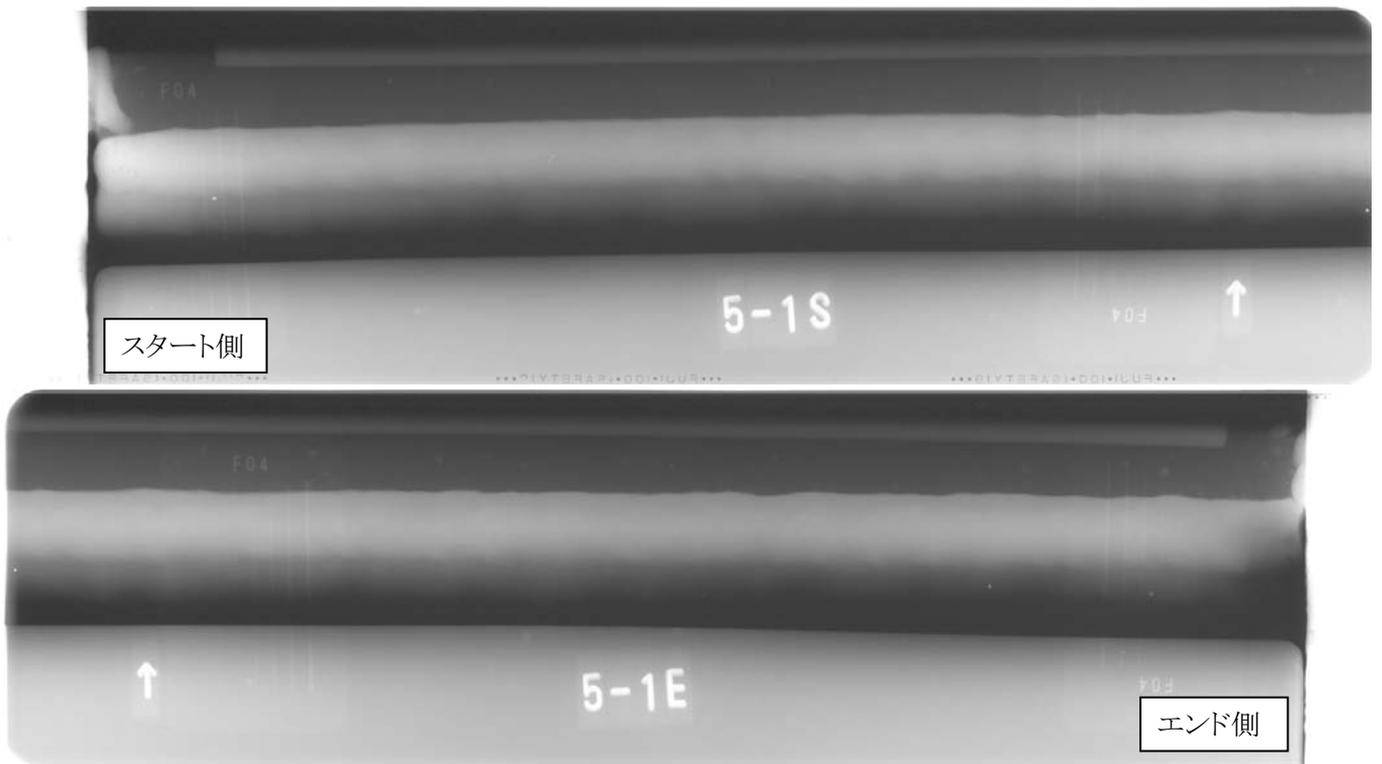


写真 1-1-9 X線透過試験結果(素材番号 5-1、隙間 5mm、ブローホール無し)

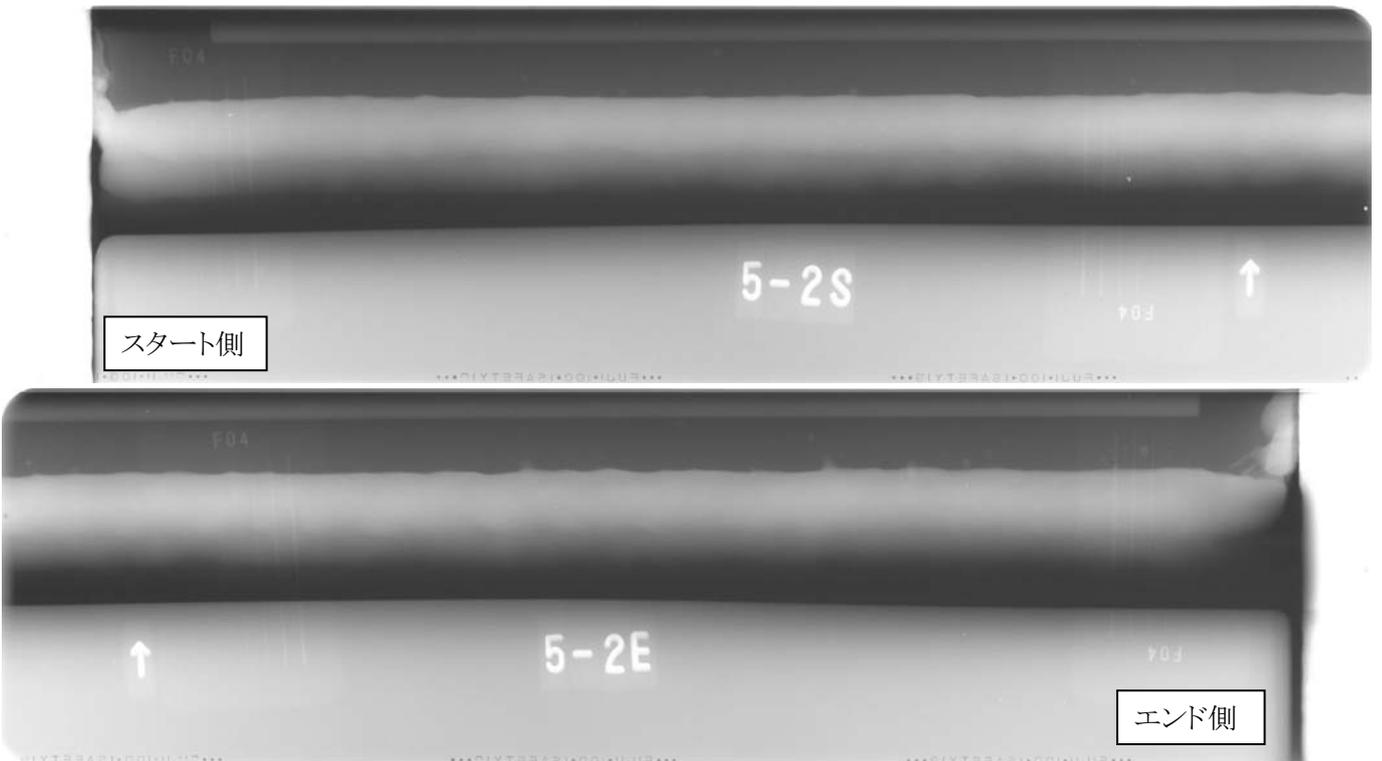


写真 1-1-10 X線透過試験結果(素材番号 5-2、隙間 5mm、ブローホール無し)

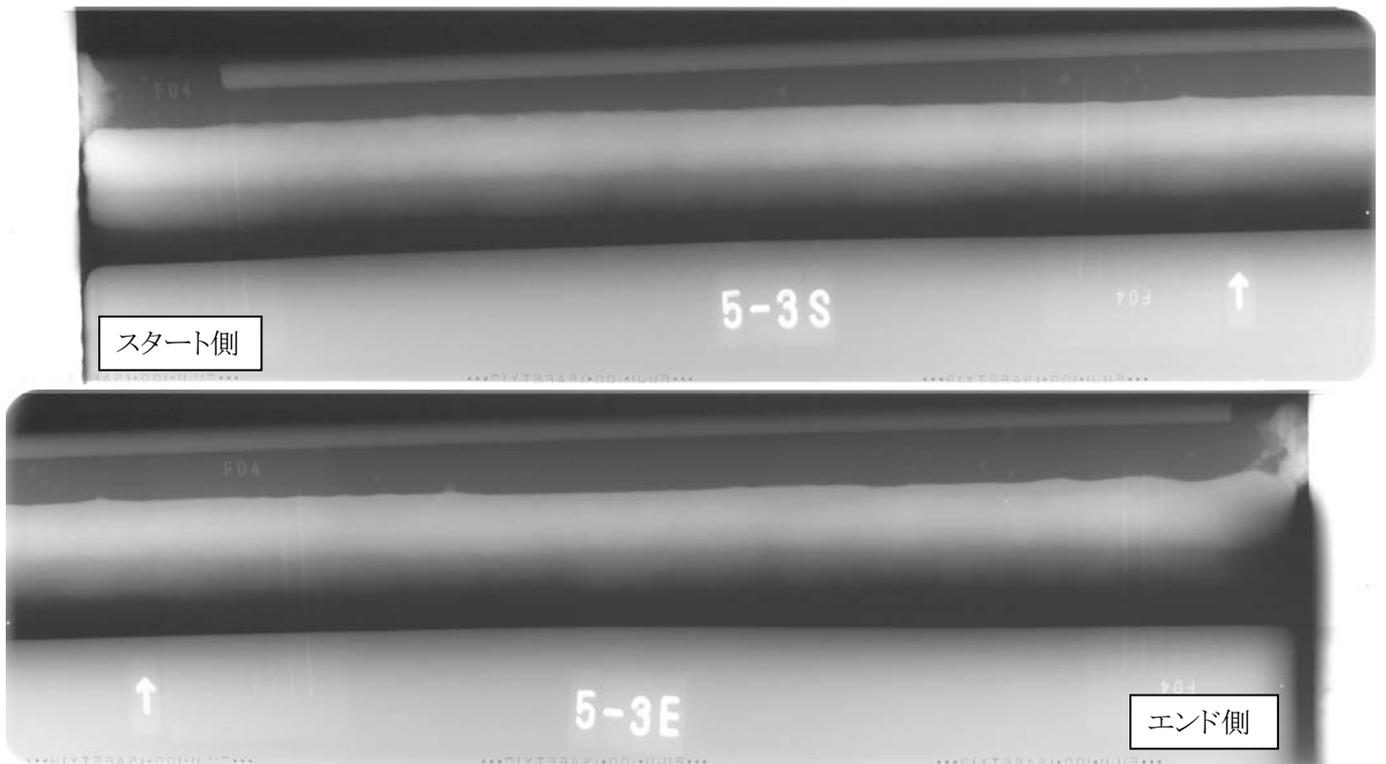


写真 1-1-11 X線透過試験結果(素材番号 5-3、隙間 5mm、ブローホール無し)

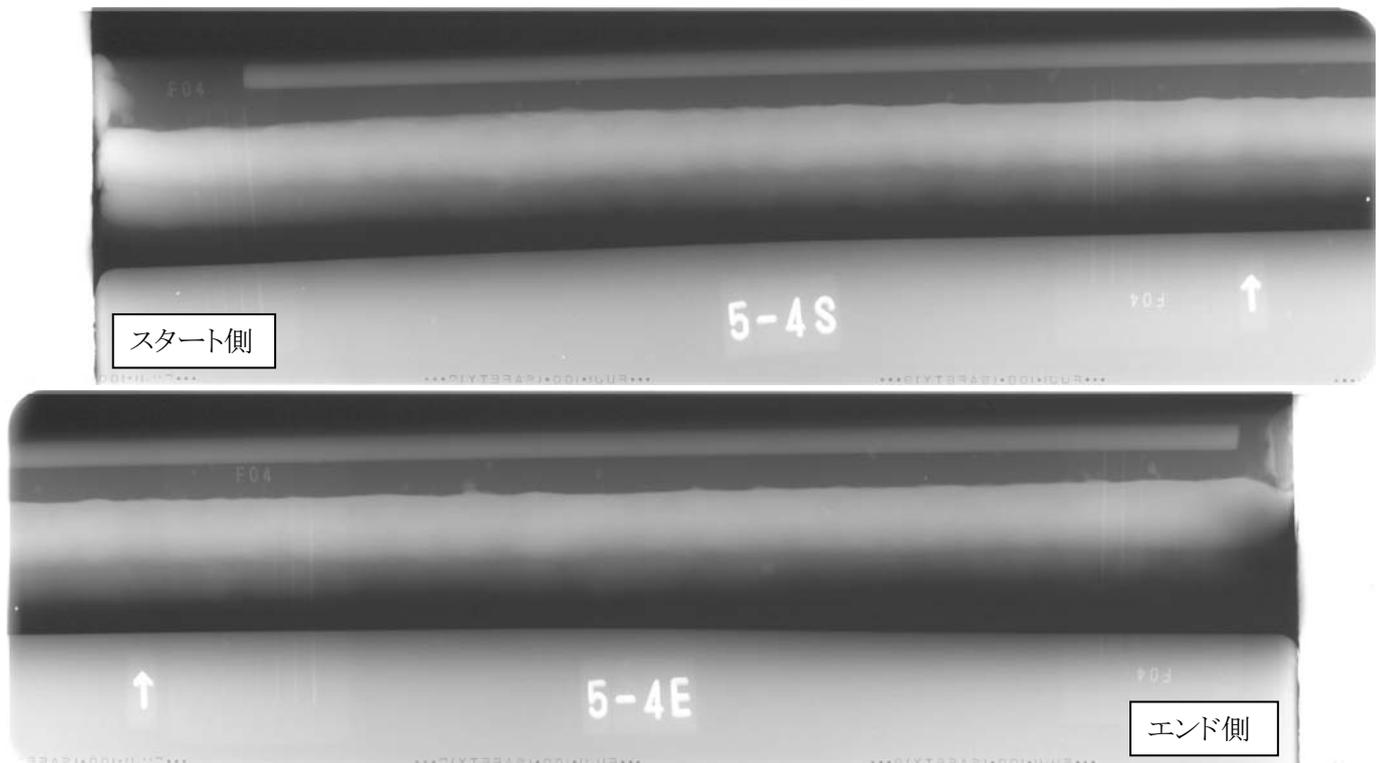


写真 1-1-12 X線透過試験結果(素材番号 5-4、隙間 5mm、ブローホール無し)

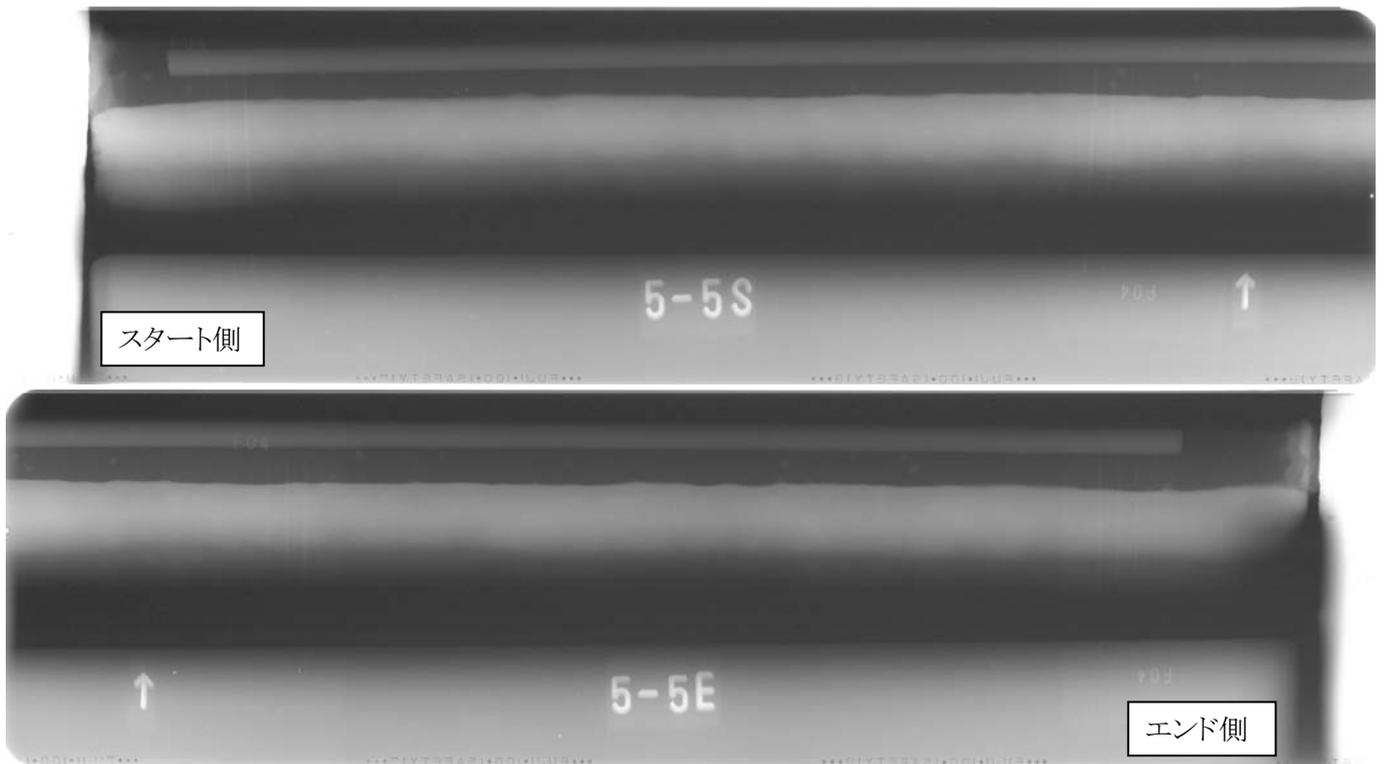


写真 1-1-13 X線透過試験結果(素材番号 5-5、隙間 5mm、ブローホール無し)

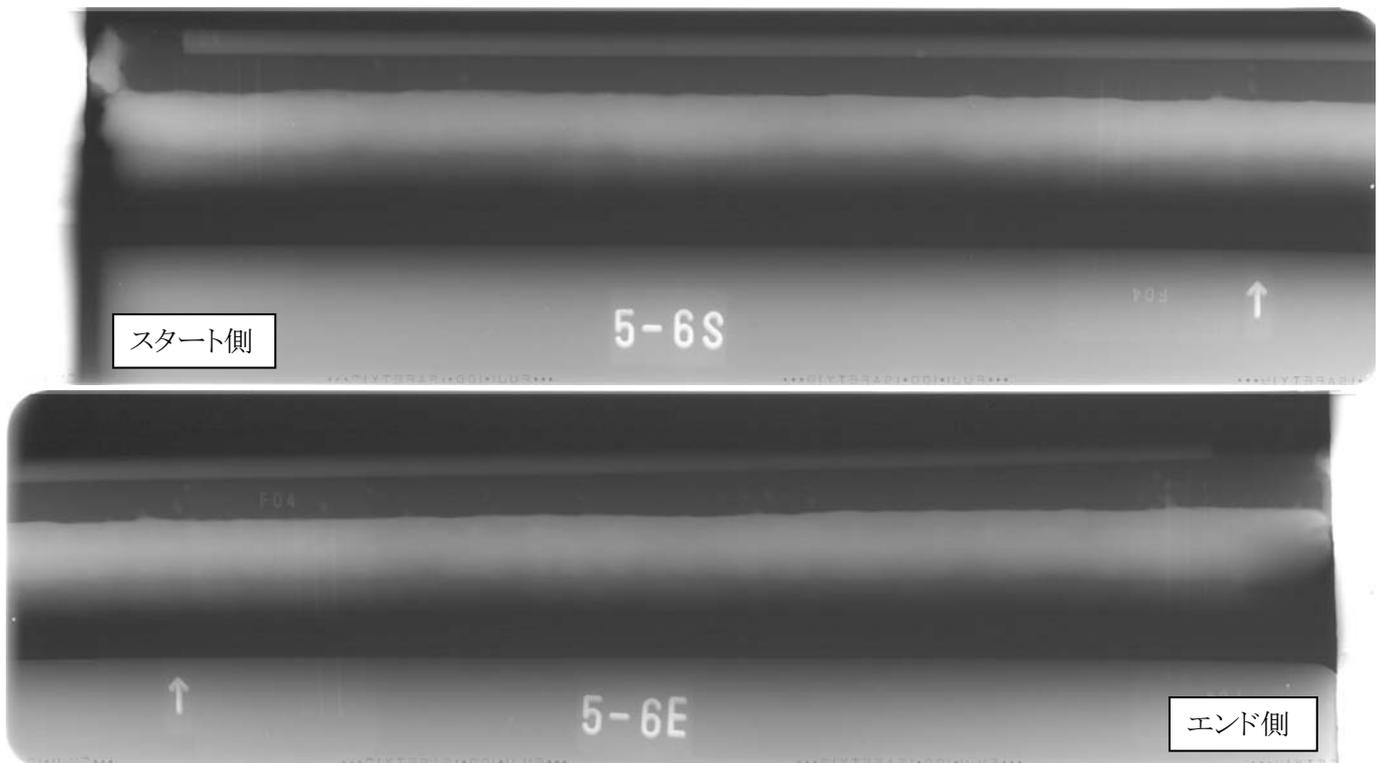


写真 1-1-14 X線透過試験結果(素材番号 5-6、隙間 5mm、ブローホール無し)

## 2.試験片加工

製作した溶接素材より、図 2-1 に示す曲げ試験片を 1 枚の溶接素材より 4 本加工した。加工内訳を表 2-1 に、のど厚概略図を図 2-2 に、加工後の試験片溶接部側面の写真を写真 2-1-1～2-1-40 示す。また、のど厚管理のため、のど厚 2 ケースはいずれも研削することとした。

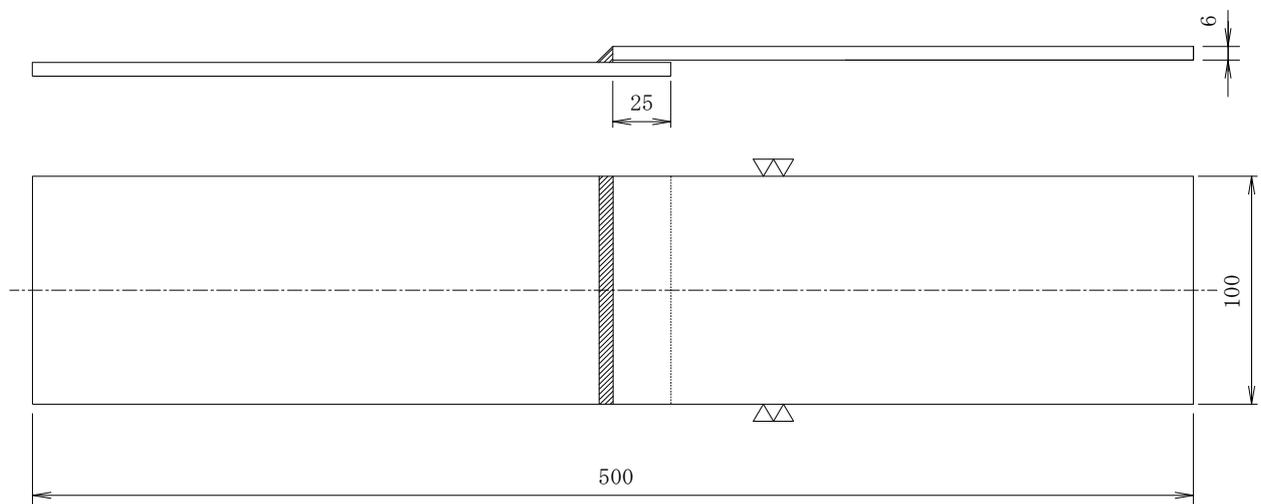
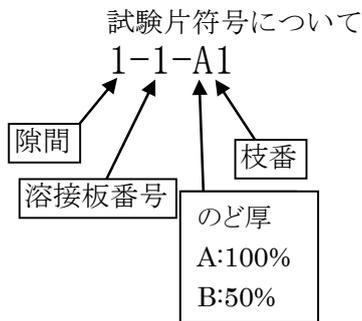


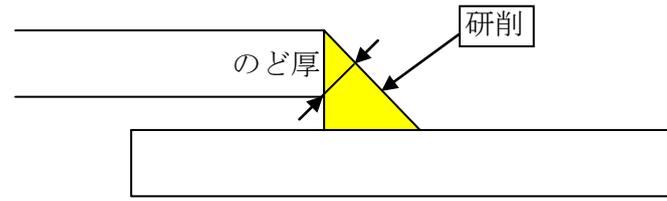
図 2-1 曲げ試験片形状

表 2-1 試験片加工内訳

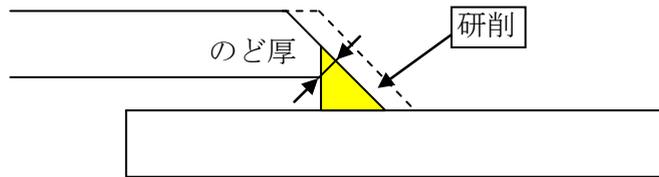
溶接素材製作条件	試験片符号	試験
隙間 1mm のど厚 100% ブローホールなし	1-1-A1	静的負荷試験
	1-1-A2	静的負荷試験
	1-2-A1	疲労試験
	1-2-A2	疲労試験
	1-3-A1	疲労試験
	1-3-A2	疲労試験
	1-4-A1	疲労試験
	1-4-A2	疲労試験
隙間 1mm のど厚 50% ブローホールなし	1-1-B1	静的負荷試験
	1-1-B2	静的負荷試験
	1-2-B1	疲労試験
	1-2-B2	疲労試験
	1-3-B1	疲労試験
	1-3-B2	疲労試験
	1-4-B1	疲労試験
	1-4-B2	疲労試験
隙間 1mm のど厚 100% ブローホールあり	1-9-A1	疲労試験
	1-9-A2	疲労試験
	1-11-A1	疲労試験
	1-11-A2	疲労試験
隙間 1mm のど厚 50% ブローホールあり	1-9-B1	疲労試験
	1-9-B2	疲労試験
	1-11-B1	疲労試験
	1-11-B2	疲労試験

溶接素材製作条件	試験片符号	試験
隙間 5mm のど厚 100% ブローホールなし	5-2-A1	静的負荷試験
	5-2-A2	静的負荷試験
	5-3-A1	疲労試験
	5-3-A2	疲労試験
	5-4-A1	疲労試験
	5-4-A2	疲労試験
	5-5-A1	疲労試験
	5-5-A2	疲労試験
隙間 5mm のど厚 50% ブローホールなし	5-2-B1	静的負荷試験
	5-2-B2	静的負荷試験
	5-3-B1	疲労試験
	5-3-B2	疲労試験
	5-4-B1	疲労試験
	5-4-B2	疲労試験
	5-5-B1	疲労試験
	5-5-B2	疲労試験





のど厚 $6/\sqrt{2}$ mm



のど厚 $3/\sqrt{2}$ mm (のど厚不足)

図 2-2 のど厚概略図

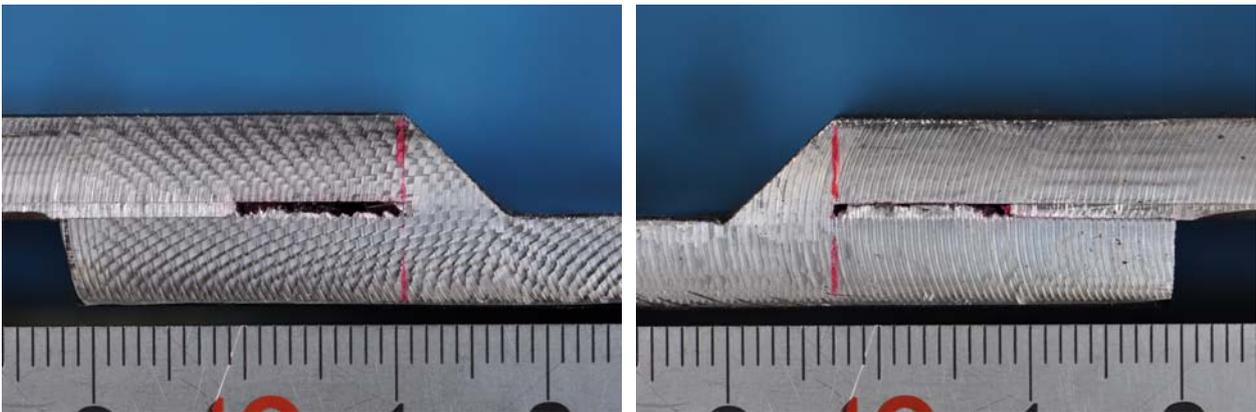


写真 2-1-1 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A1)

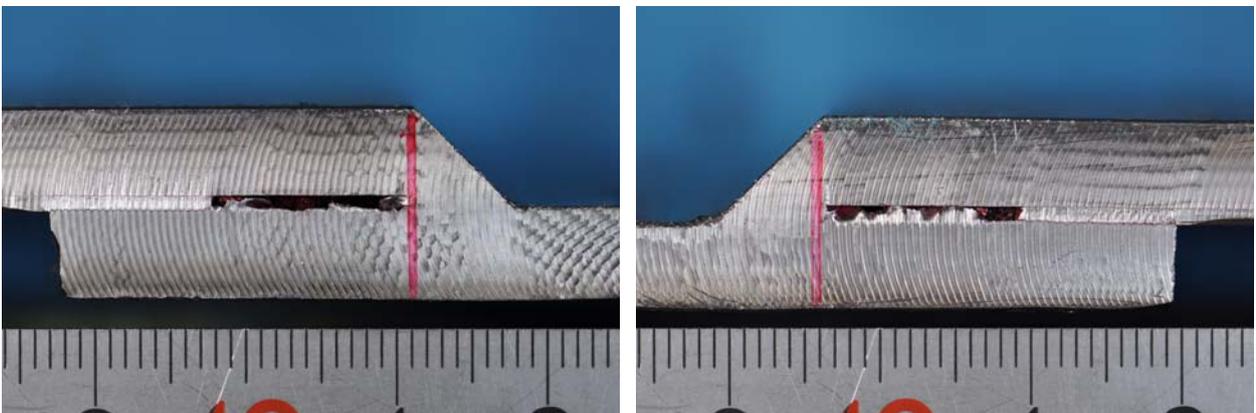


写真 2-1-2 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A2)

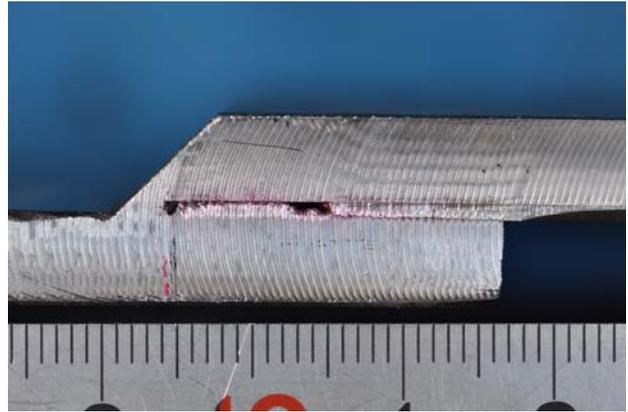
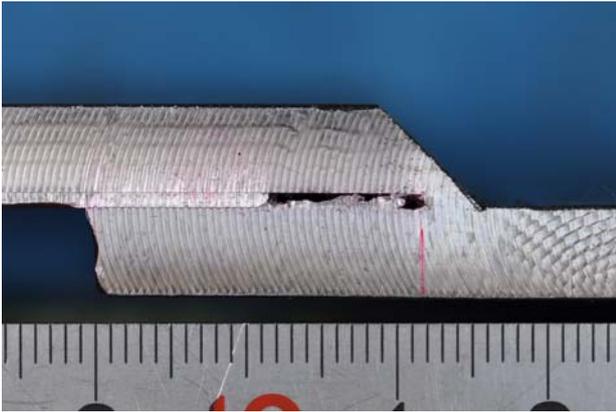


写真 2-1-3 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B1)

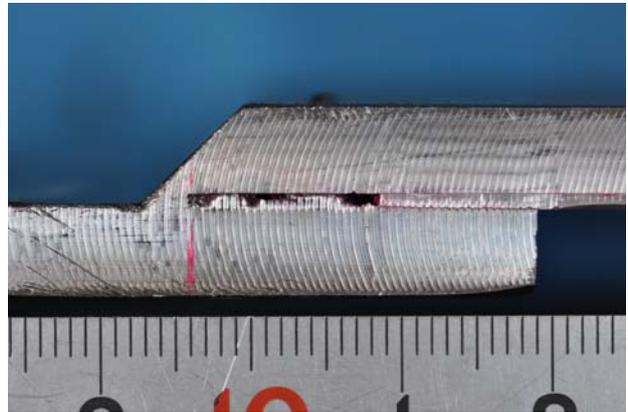
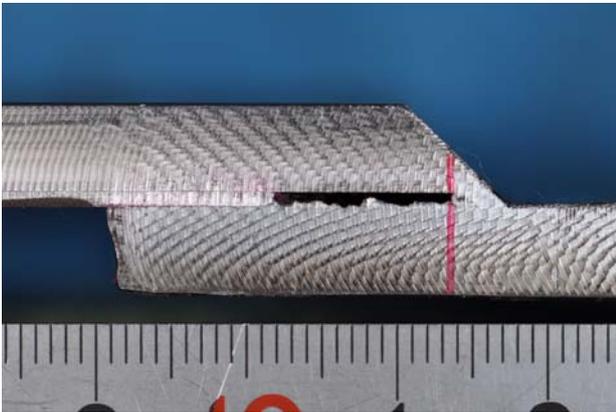


写真 2-1-4 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B2)

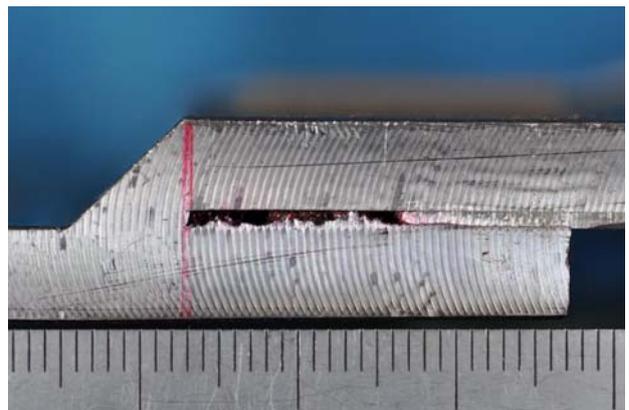
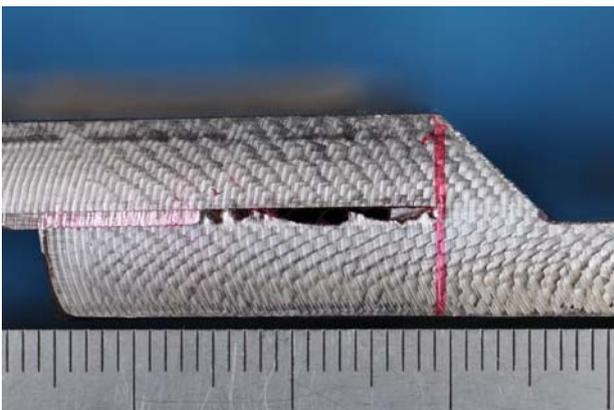


写真 2-1-5 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-2-A1)

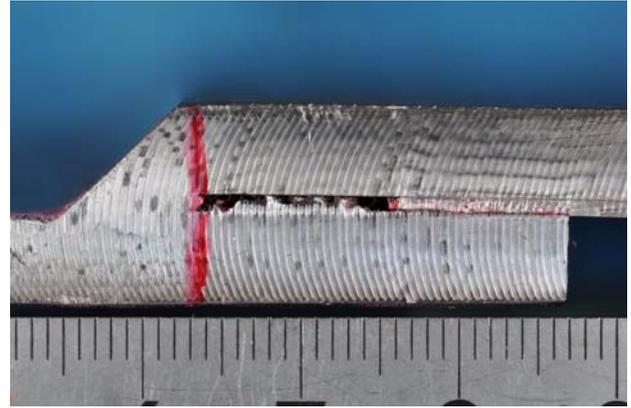
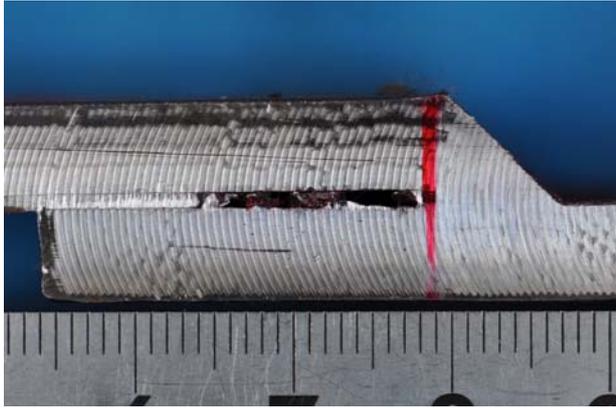


写真 2-1-6 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-2-A2)

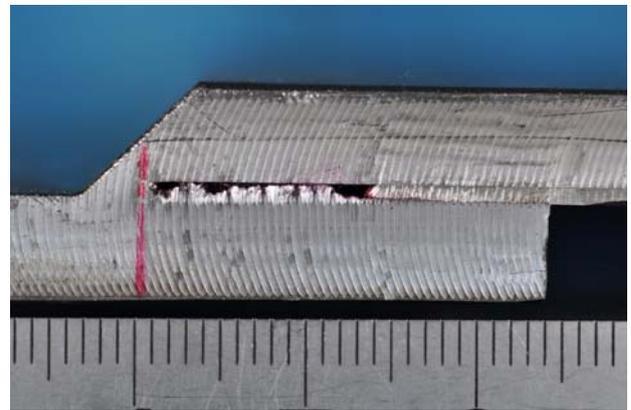
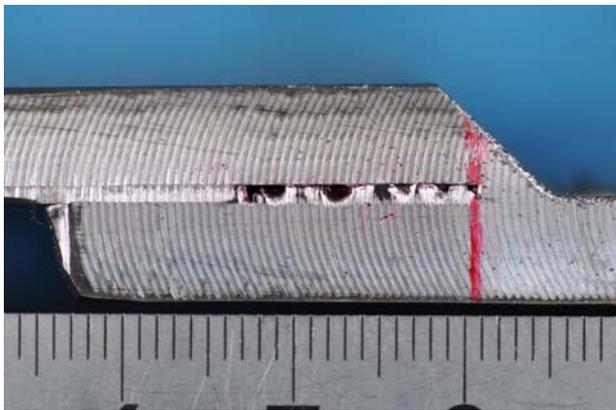


写真 2-1-7 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-2-B1)

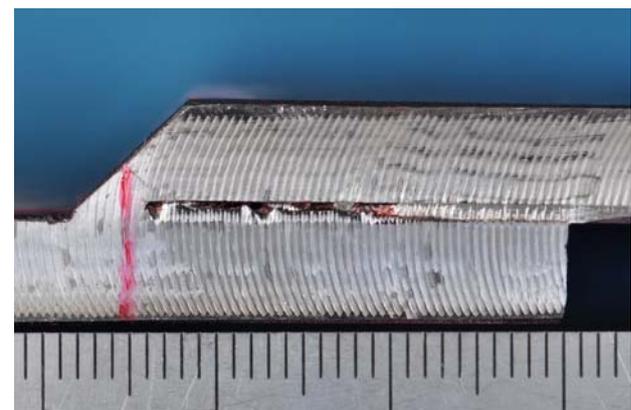
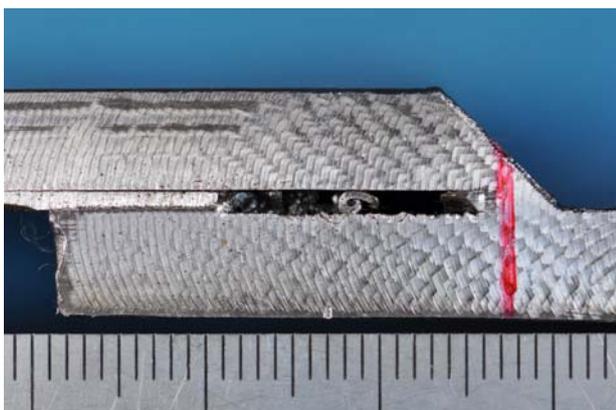


写真 2-1-8 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-2-B2)

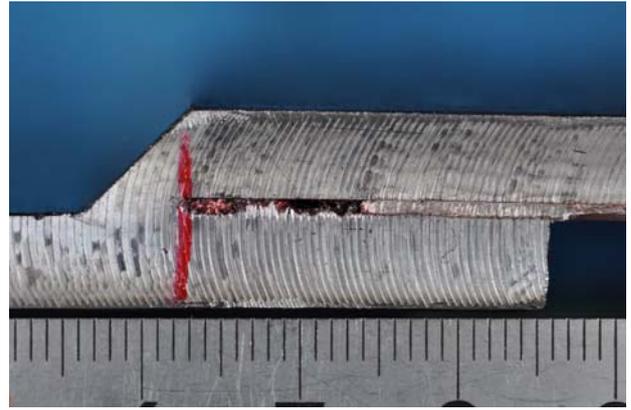
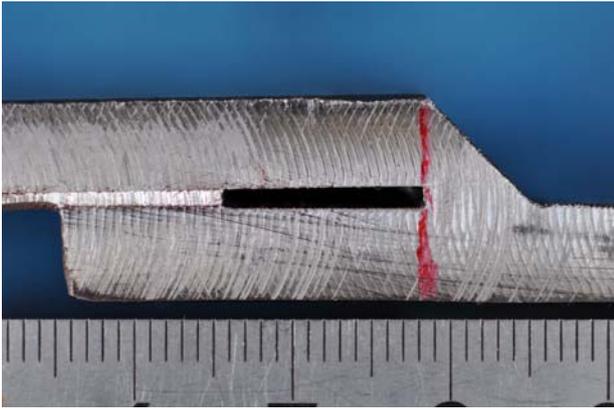


写真 2-1-9 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-3-A1)

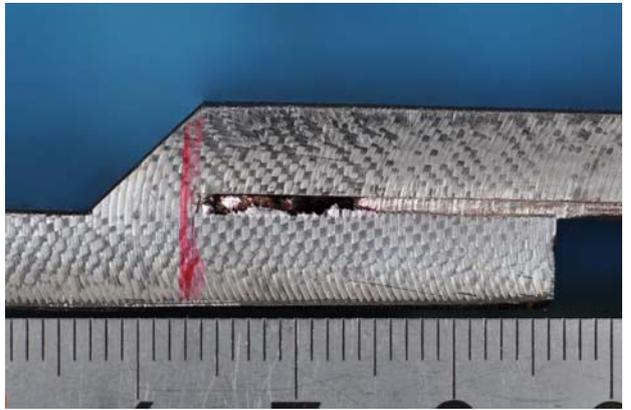
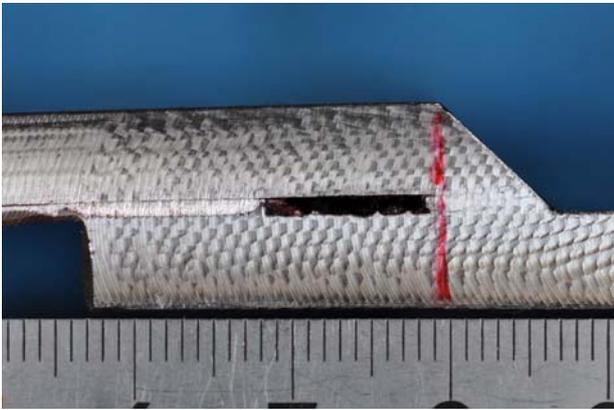


写真 2-1-10 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-3-A2)

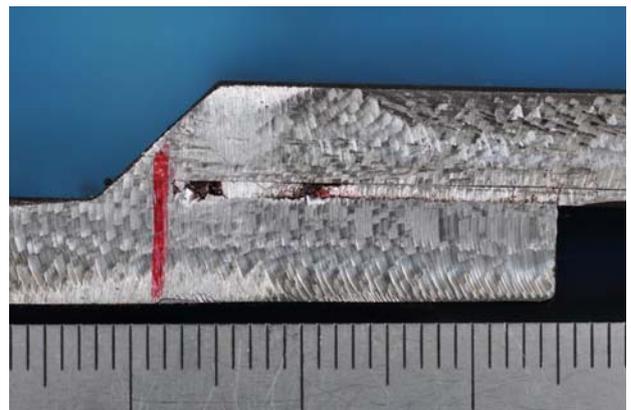
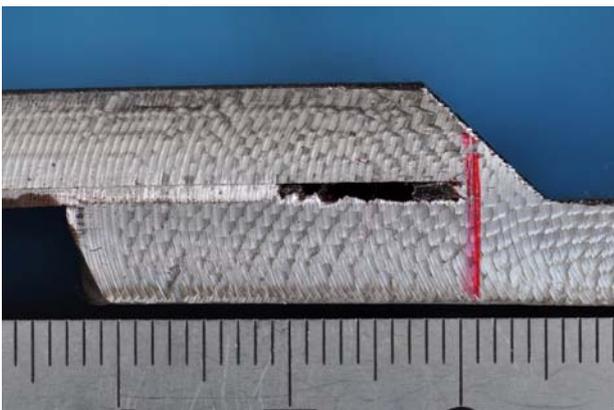


写真 2-1-11 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-3-B1)

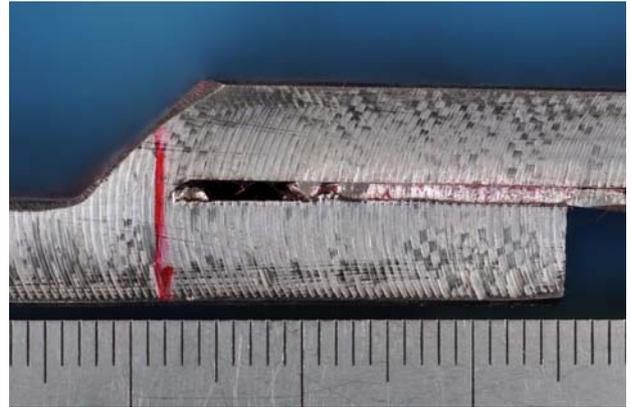
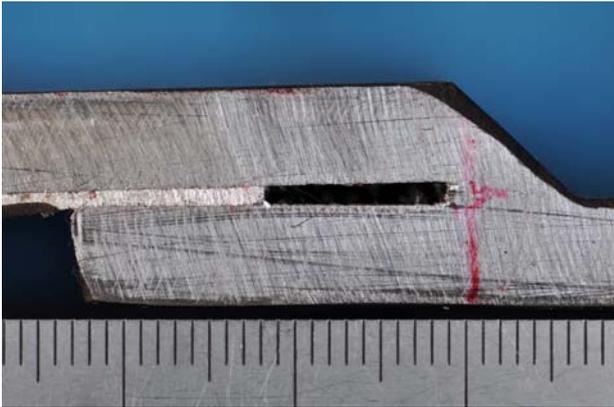


写真 2-1-12 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-3-B2)

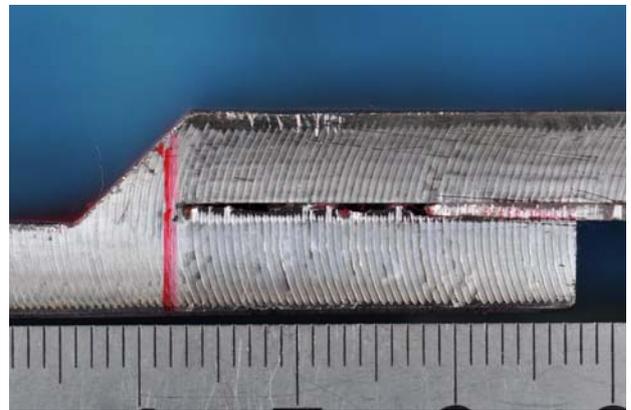
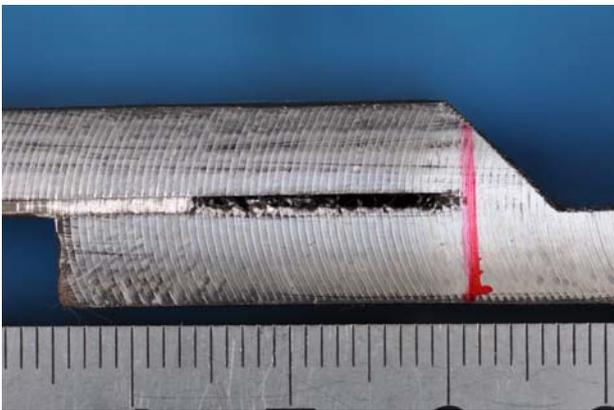


写真 2-1-13 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-4-A1)

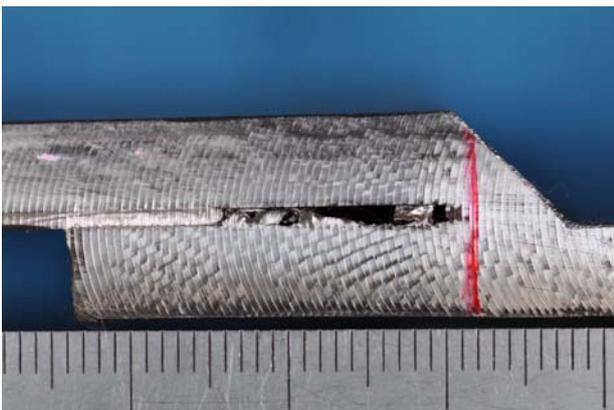


写真 2-1-14 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-4-A2)

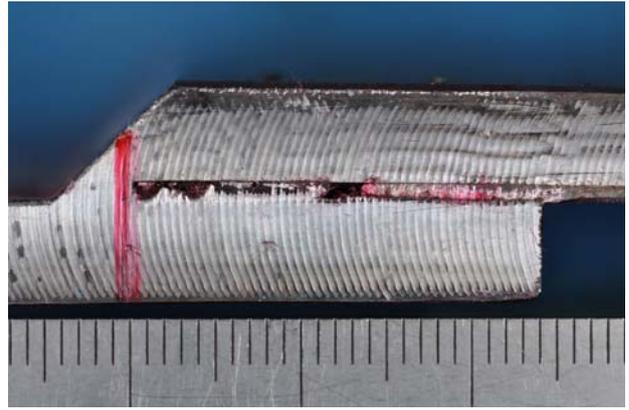
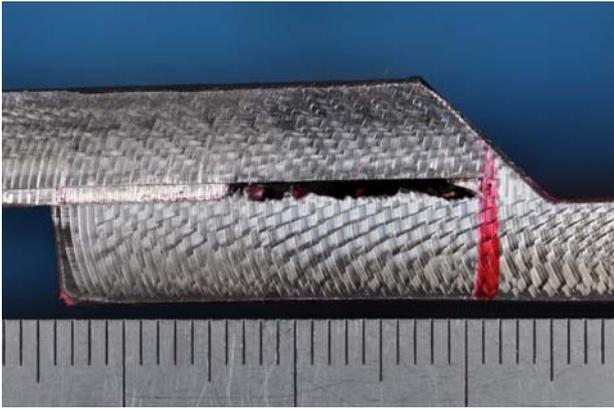


写真 2-1-15 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-4-B1)

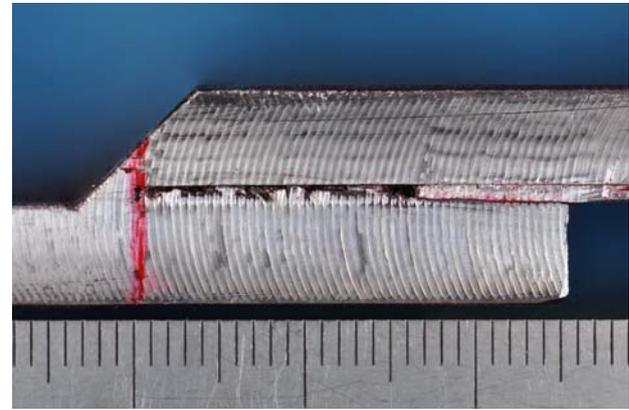
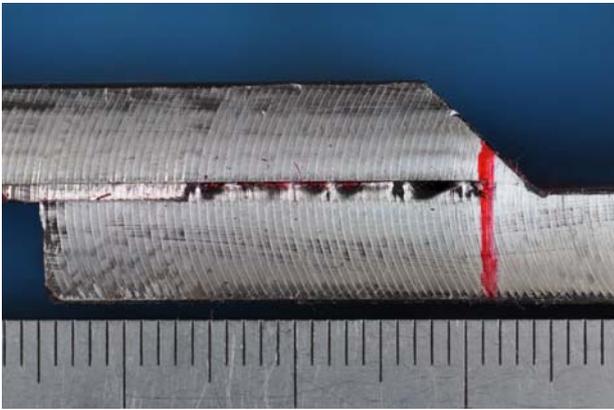


写真 2-1-16 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-4-B2)

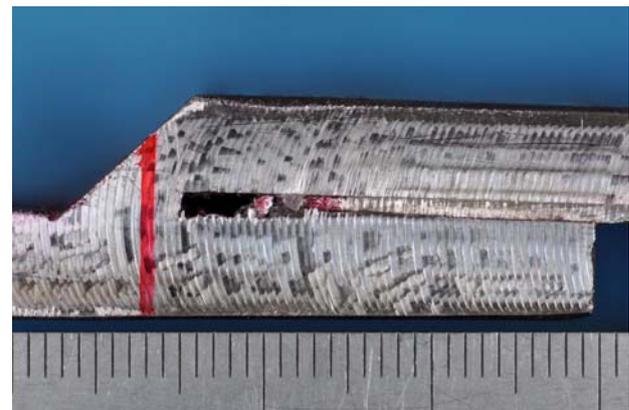
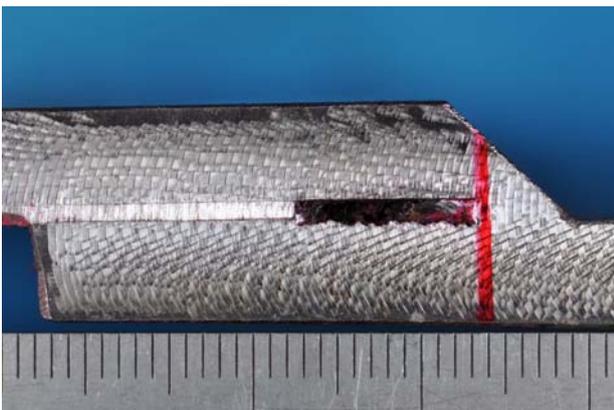


写真 2-1-17 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール有り、試験片符号:1-9-A1)

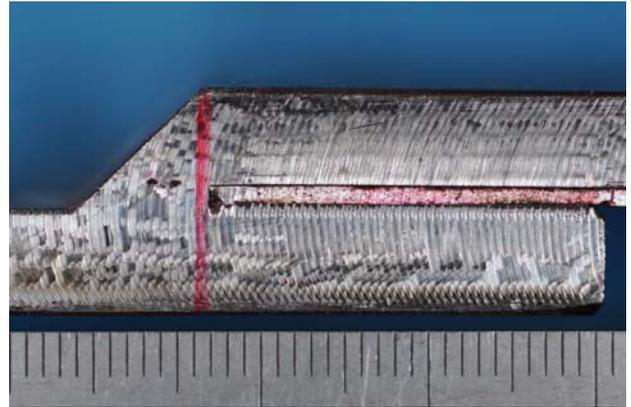
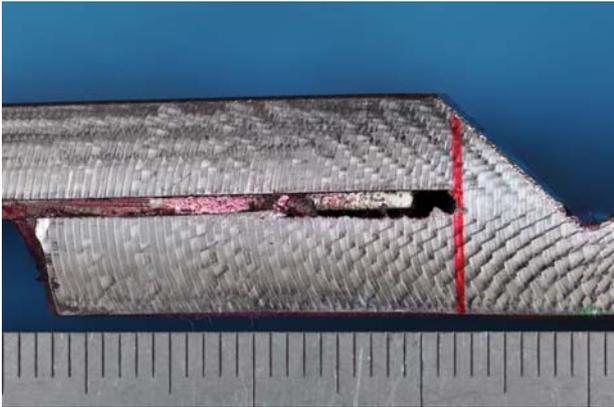


写真 2-1-18 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール有り、試験片符号:1-9-A2)

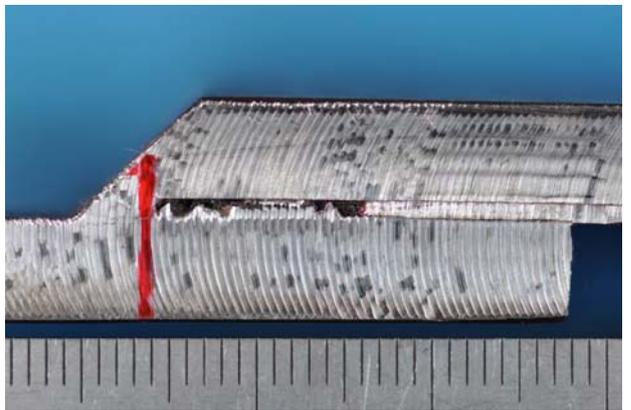
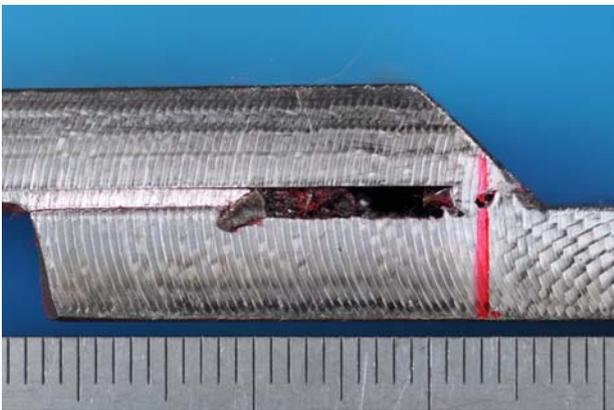


写真 2-1-19 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール有り、試験片符号:1-9-B1)

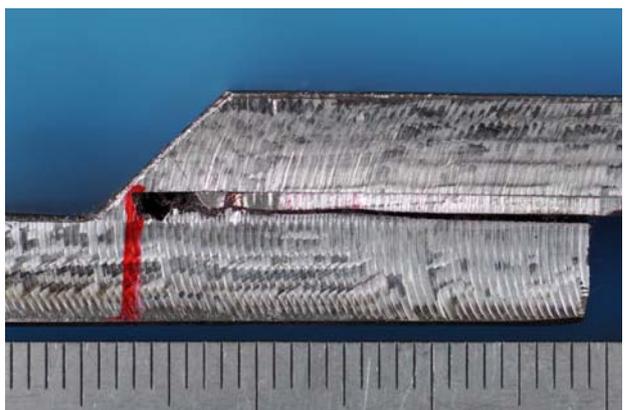
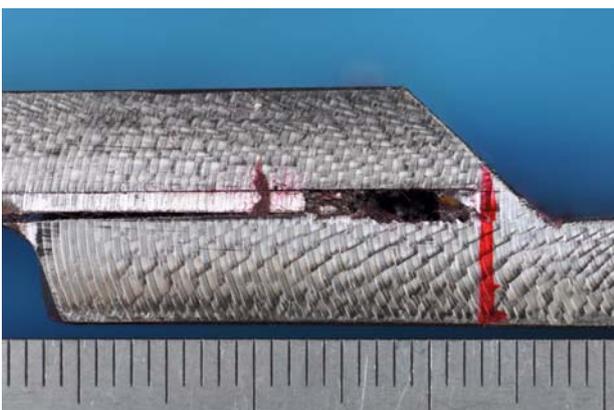


写真 2-1-20 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール有り、試験片符号:1-9-B2)

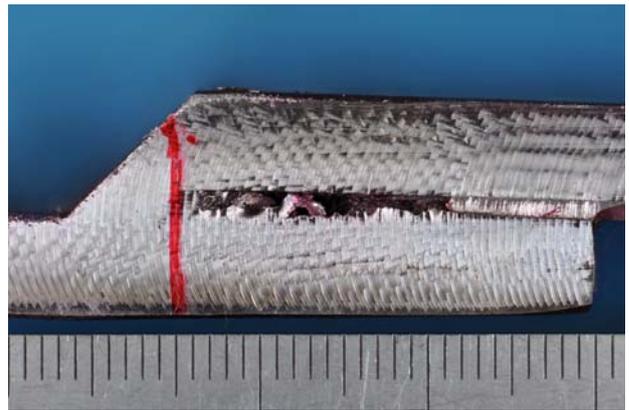
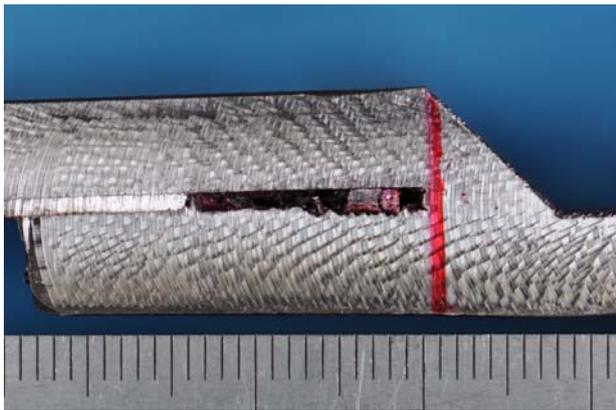


写真 2-1-21 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール有り、試験片符号:1-11-A1)

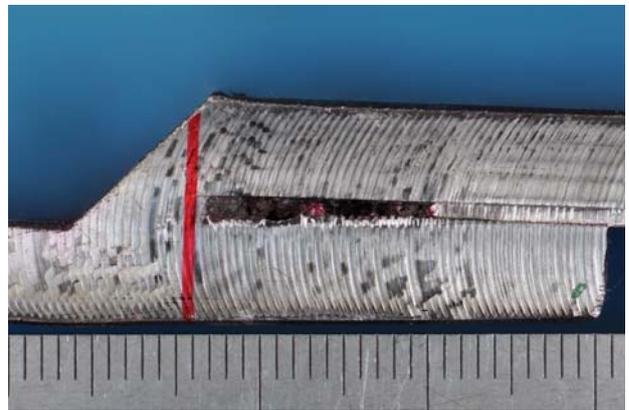
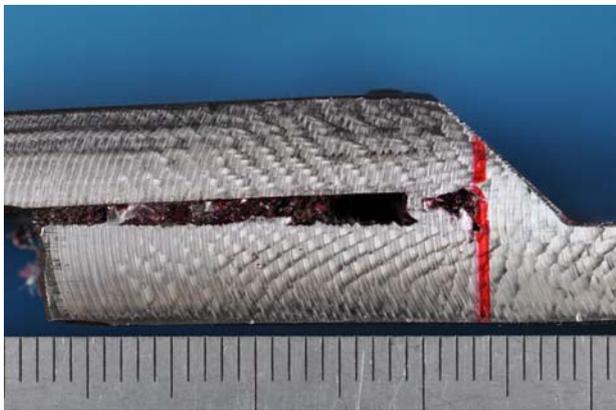


写真 2-1-22 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール有り、試験片符号:1-11-A2)

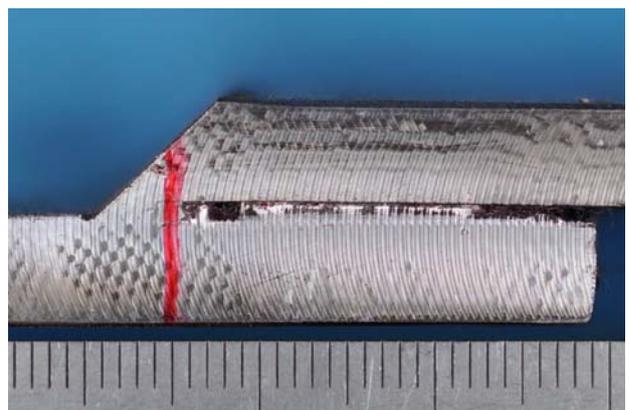
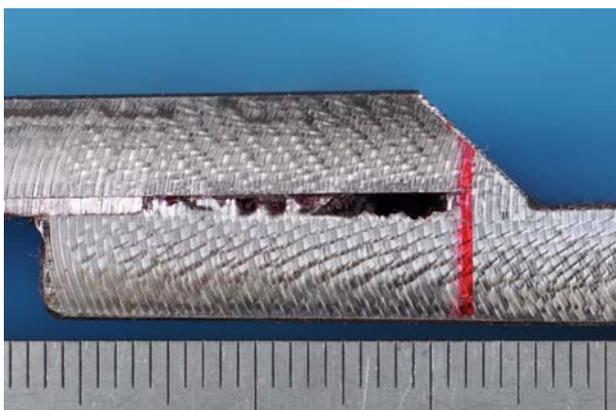


写真 2-1-23 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール有り、試験片符号:1-11-B1)

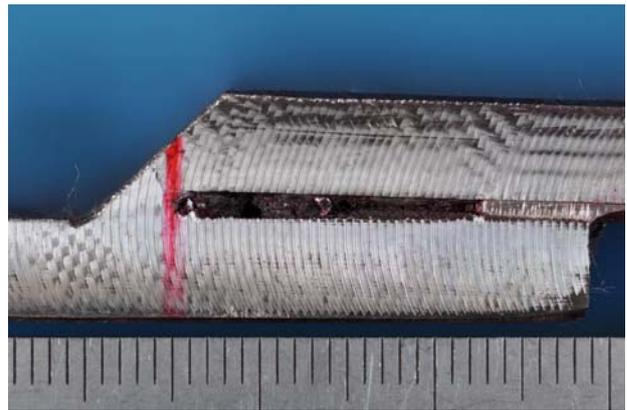
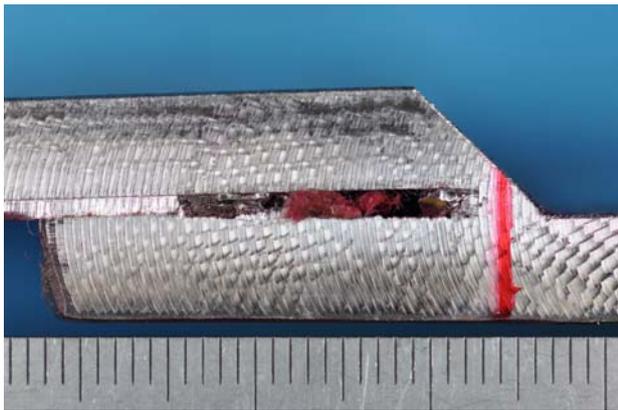


写真 2-1-24 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール有り、試験片符号:1-11-B2)

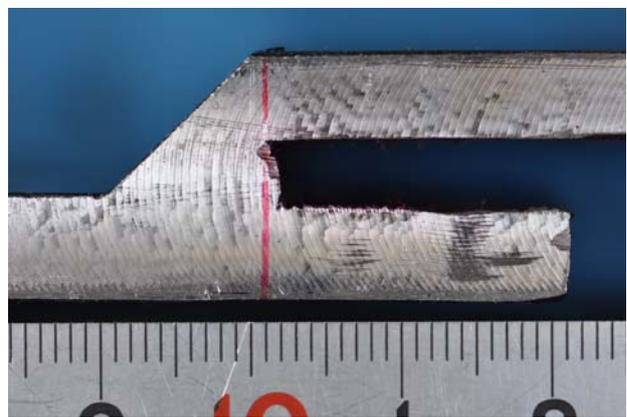
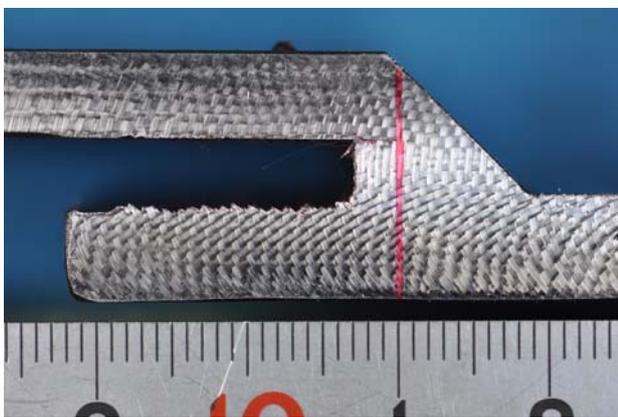


写真 2-1-25 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A1)

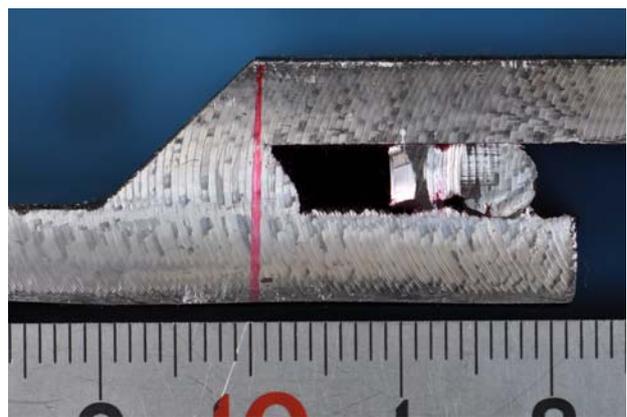
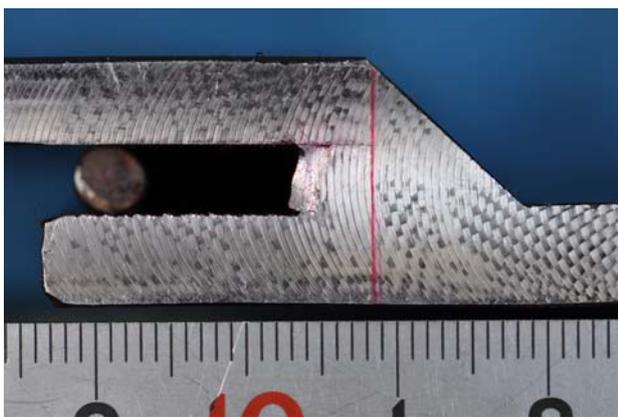


写真 2-1-26 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A2)

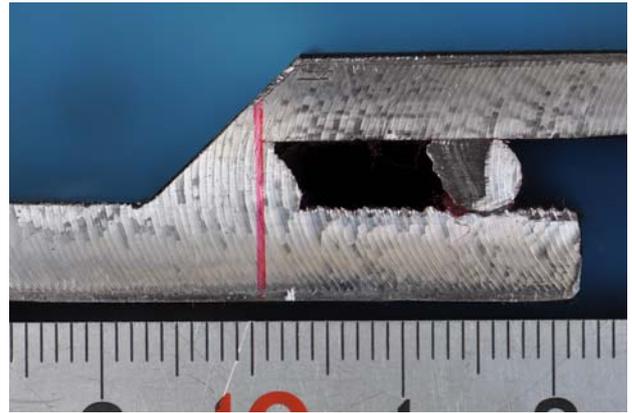
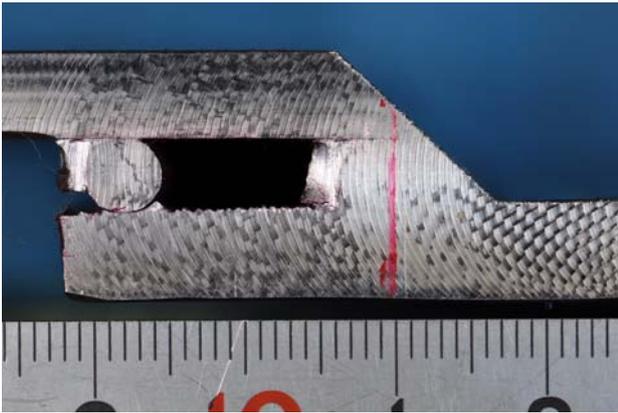


写真 2-1-27 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B1)

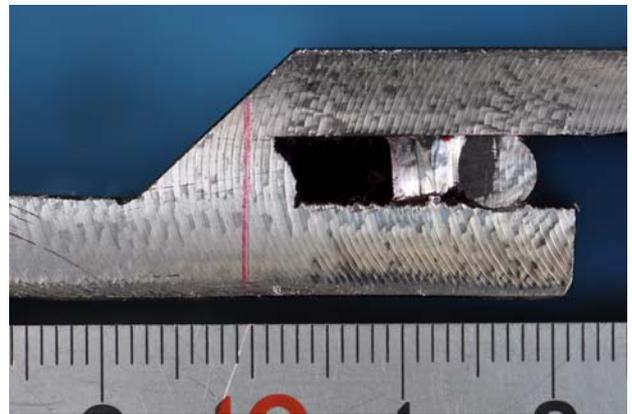
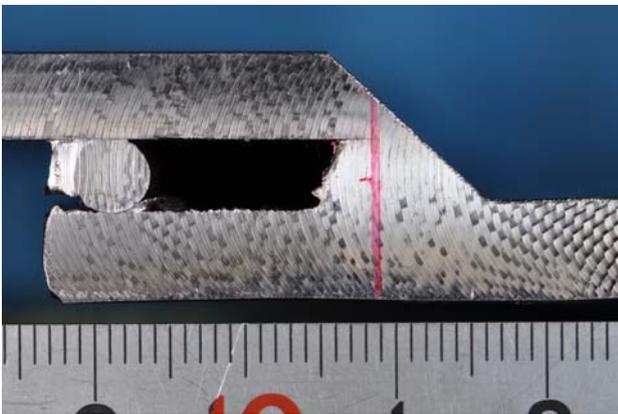


写真 2-1-28 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B2)

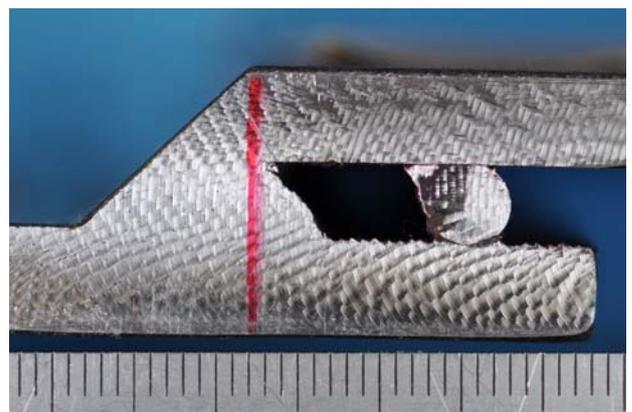
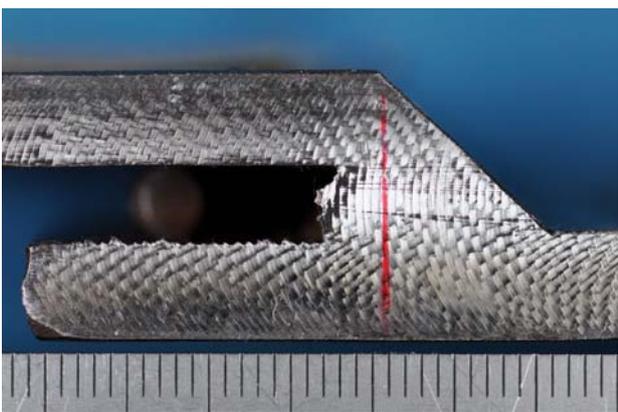


写真 2-1-29 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-3-A1)

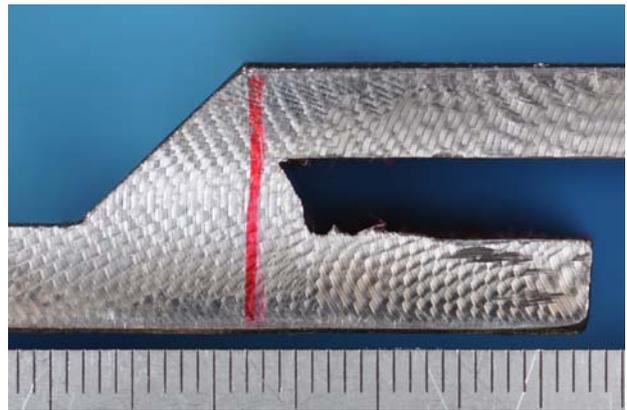
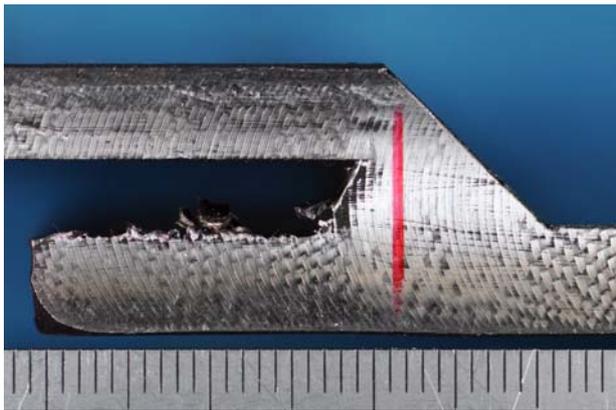


写真 2-1-30 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-3-A2)

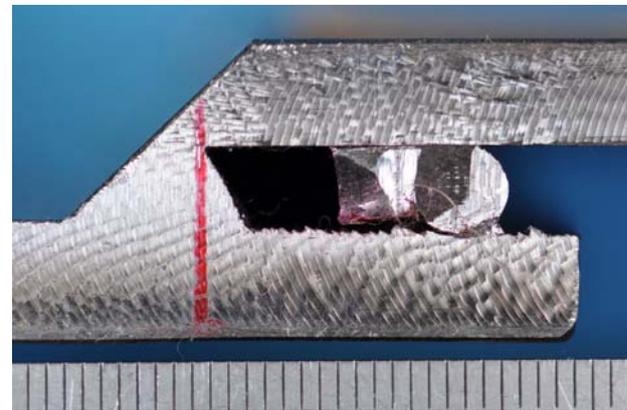
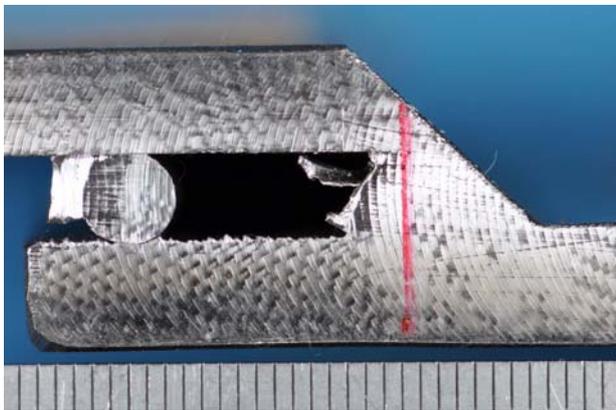


写真 2-1-31 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-3-B1)

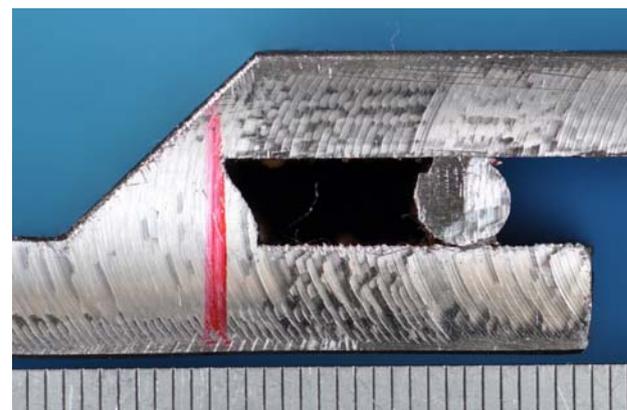


写真 2-1-32 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-3-B2)

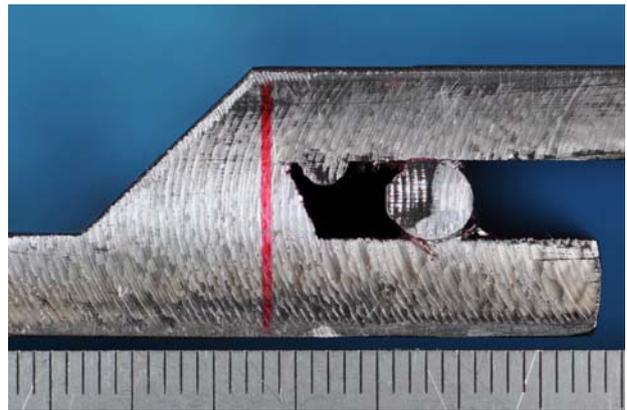
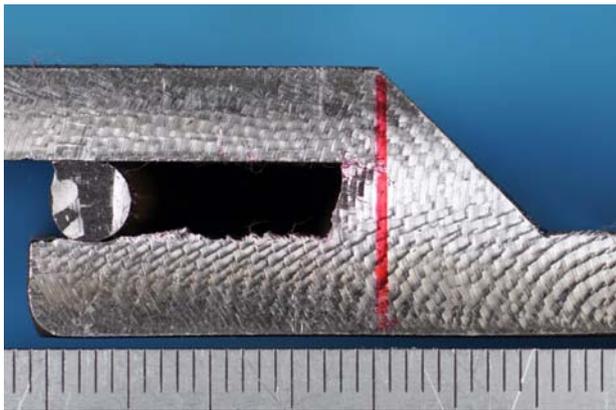


写真 2-1-33 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-4-A1)

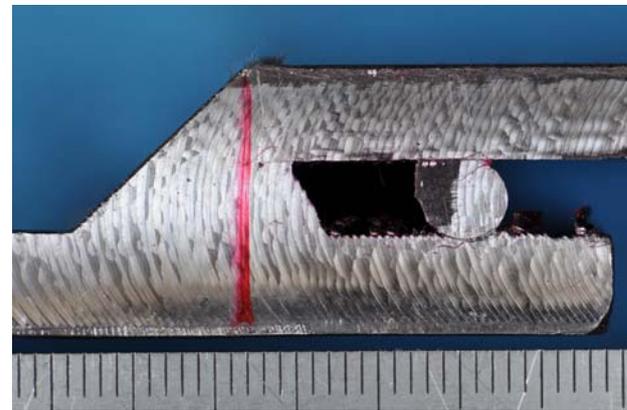
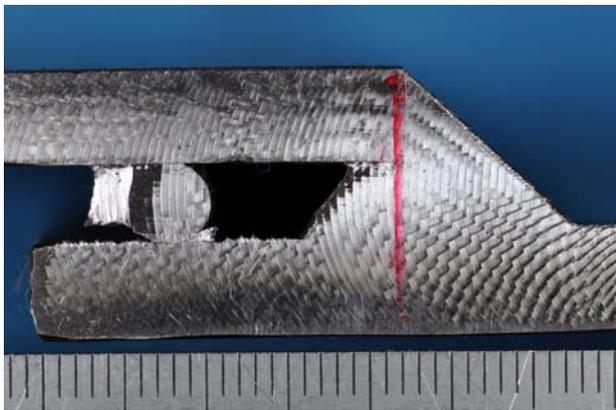


写真 2-1-34 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-4-A2)

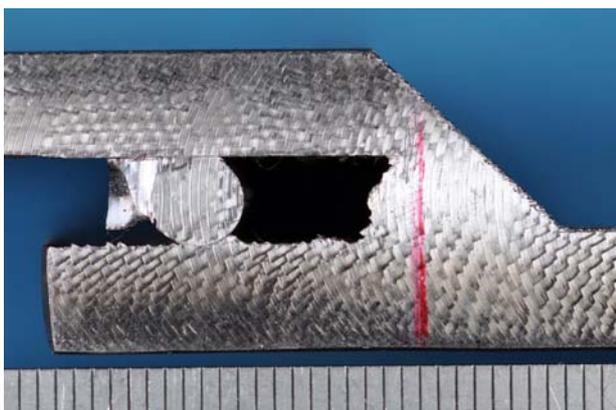


写真 2-1-35 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-4-B1)

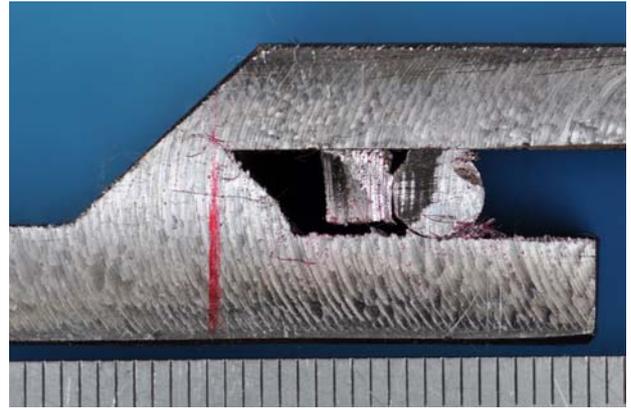
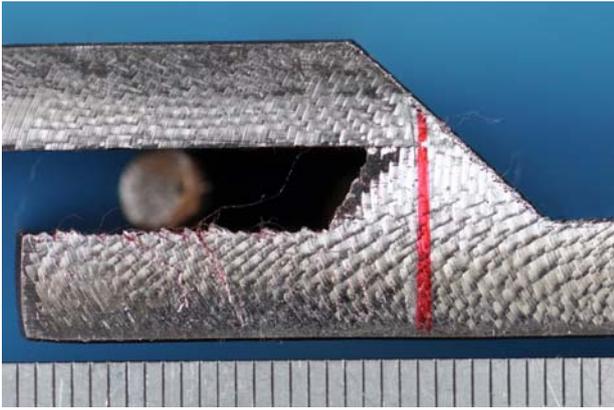


写真 2-1-36 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-4-B2)

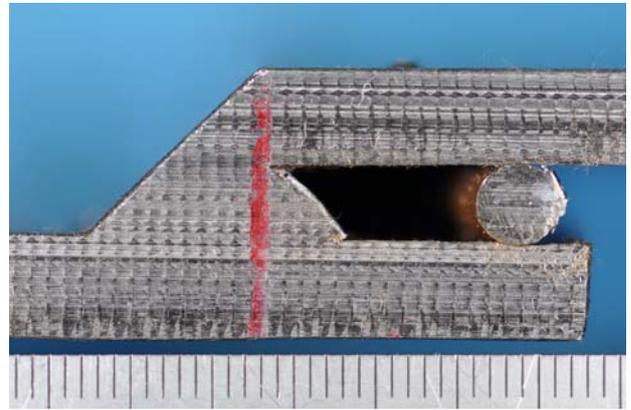
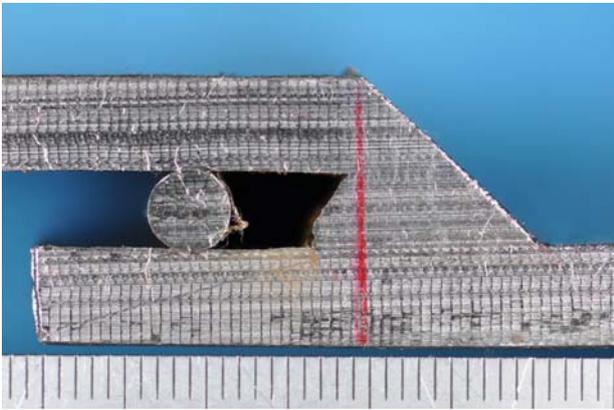


写真 2-1-37 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-5-A1)

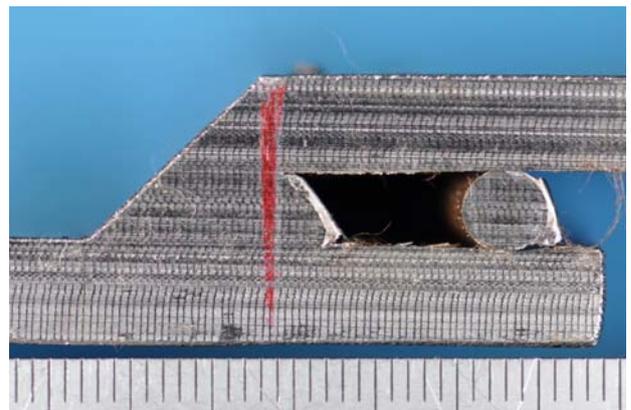
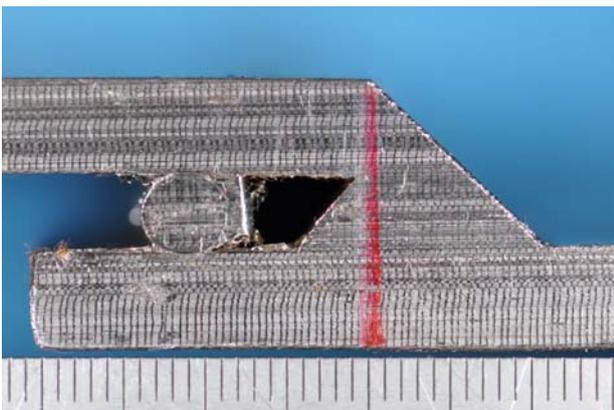


写真 2-1-38 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-5-A2)

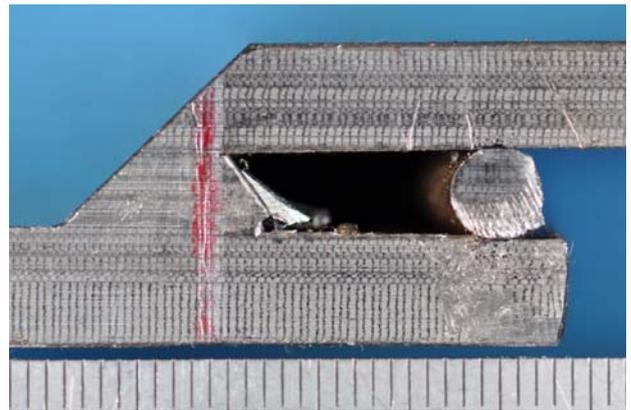
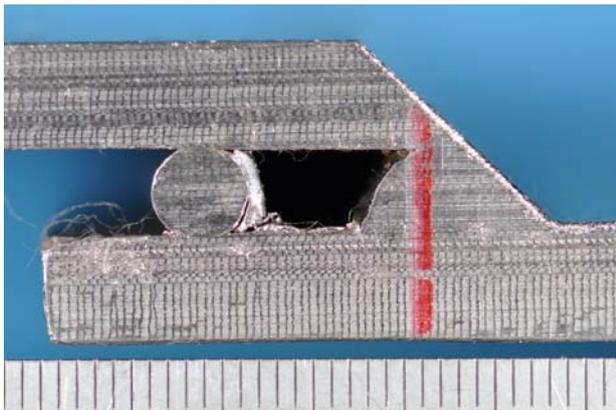


写真 2-1-39 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-5-B1)

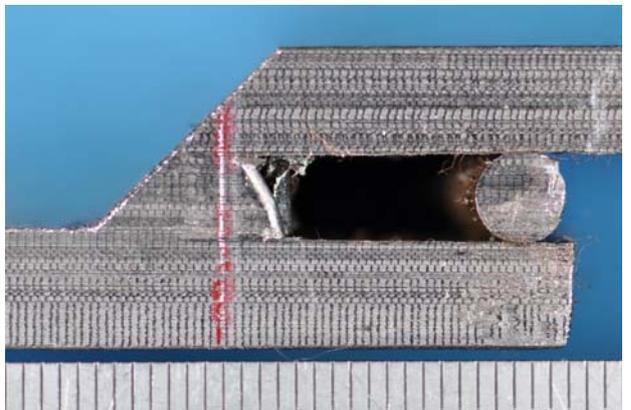
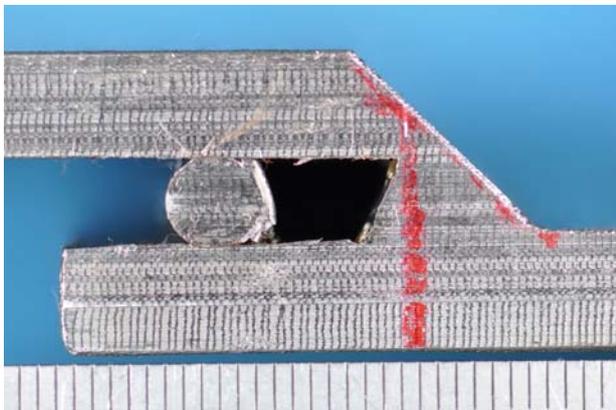


写真 2-1-40 試験片溶接部側面の写真  
(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-5-B2)

### 3.試験方法

#### 3.1 静的負荷試験

すみ肉溶接試験片の強度を把握するため、下スパン 300mm、上スパン 200mm の 4 点曲げ負荷にて静的負荷試験を実施した。負荷速度は 3mm/min とした。重ねすみ肉により発生する段差は治具で高さを調整し、試験片セット時にはルート部が中心に来るように設置することとした。負荷イメージを図 4-1 に示す。

静的負荷の際には、図 4-2 に示すように溶接止端部にできるだけ近づけた位置と傾斜部に弾塑性域ひずみゲージを貼り付けて試験を実施し、荷重、ひずみ及び試験機変位のデータを採取した。試験本数は 8 本(隙間 2 ケース×のど厚 2 ケース×各 2 本、ブローホール導入試験片は実施無し)とした。

使用試験機:島津製作所製 50kN 油圧サーボ疲労試験機

使用ひずみゲージ:東京測器研究所製:YEFLA-2-5LT

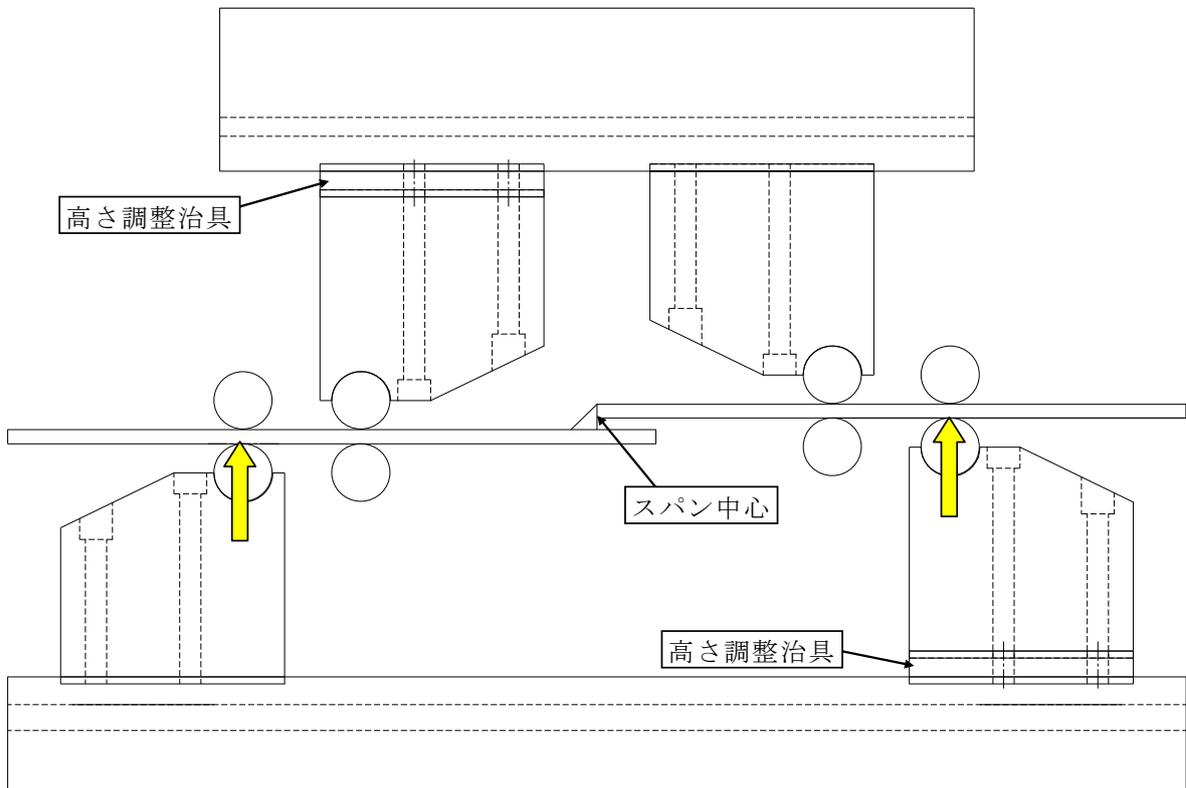
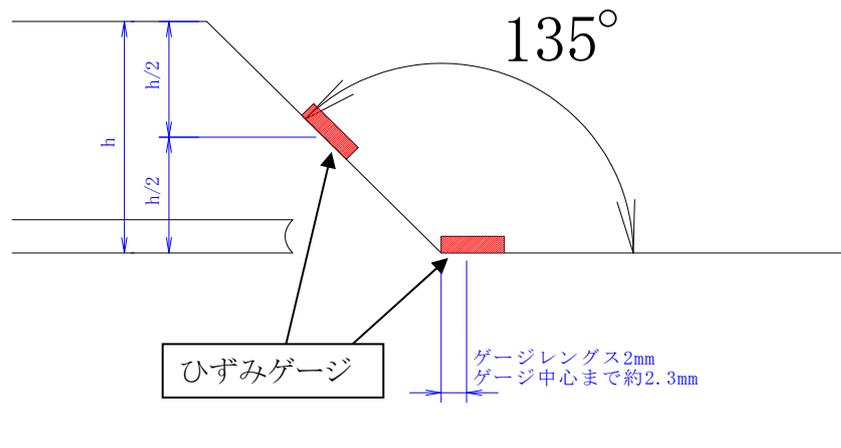
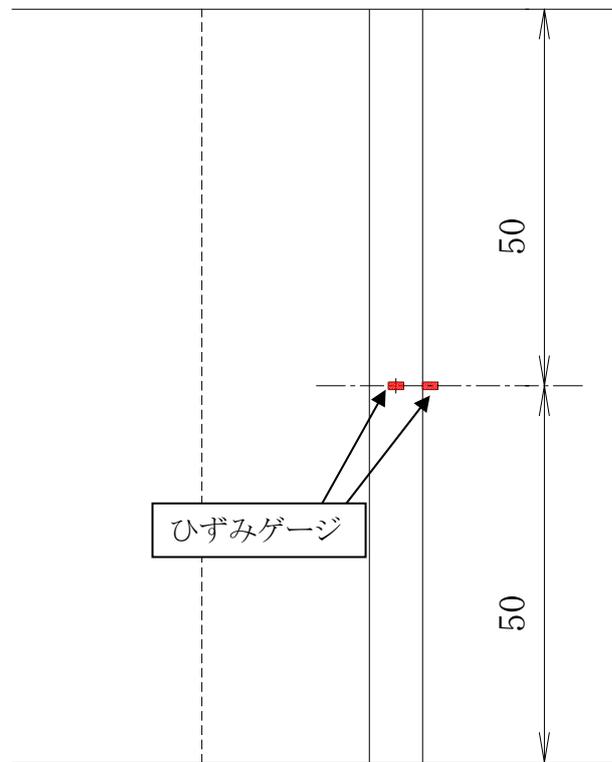


図 3-1 4 点曲げ負荷イメージ



$h$ の値は隙間などによって変わる

図 3-2 ひずみゲージ貼付位置

### 3.2 疲労試験

疲労試験は、静的負荷試験と同様に下スパン 300mm、上スパン 200mm の 4 点曲げ負荷にて実施した。制御は変位制御の片振りとし、試験ごとに試験変位を変え、試験変位一繰返し回数線図を求めた。

各ケース 1 本目の試験の際は、静的負荷試験の際と同じ位置に弾塑性域ひずみゲージを貼り付け、任意のサイクルで荷重、ひずみ及び試験機変位のデジタルデータを採取することとした。

き裂の発生に伴い最大荷重は下がってくるため、当初最大荷重の 25%まで最大荷重が落ちてきた時点で破損と判断して試験を終了することとした。

使用試験機：島津製作所製 20kN 油圧サーボ疲労試験機

使用ひずみゲージ：東京測器研究所製：YEFLA-2-5LT

## 4. 試験結果

### 4.1 静的負荷試験

静的負荷試験で得られた荷重－変位線図を図 4-1-1～4-1-8 に、荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)を図 4-2-1～4-2-8 に、荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)を図 4-3-1～4-3-8 に示す。

### 4.2 疲労試験

疲労試験結果一覧表を表 4-1 に、試験変位－繰返し数線図を図 4-4 に、デジタルデータ採取によって得られた各種ピークデータ一覧表を表 4-2-1～4-2-4 に、圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係を図 4-5-1～4-5-4 に示す。

試験片符号 1-3-A2(隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0～3mm)では、荷重減少リミッターが作動しなかったため、バックアップとして 100 波ごとに採取していた荷重データから破損回数を算出した。試験片符号 1-3-A2 の圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係を図 4-6 に示す。

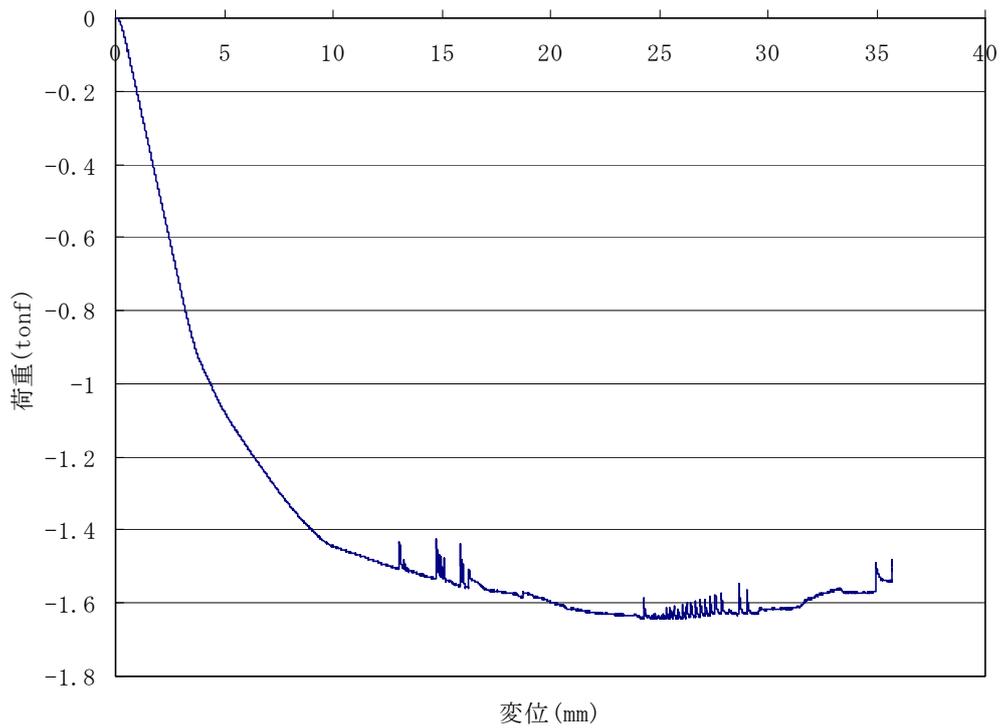


図 4-1-1 荷重－変位線図  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A1)

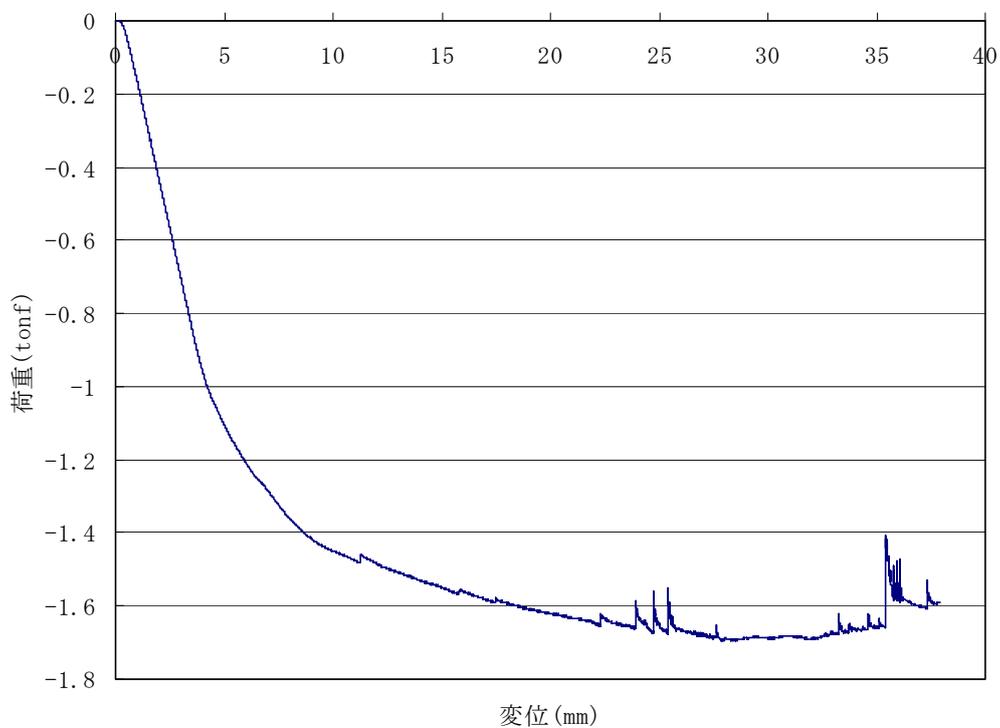


図 4-1-2 荷重－変位線図  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A2)

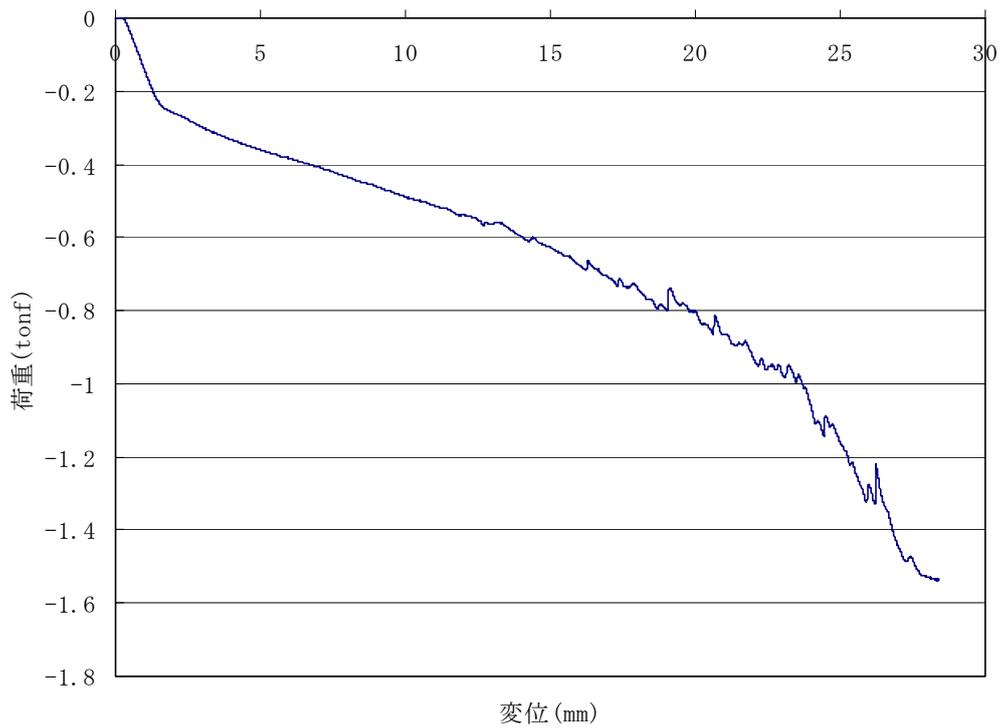


図 4-1-3 荷重-変位線図  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号: 1-1-B1)

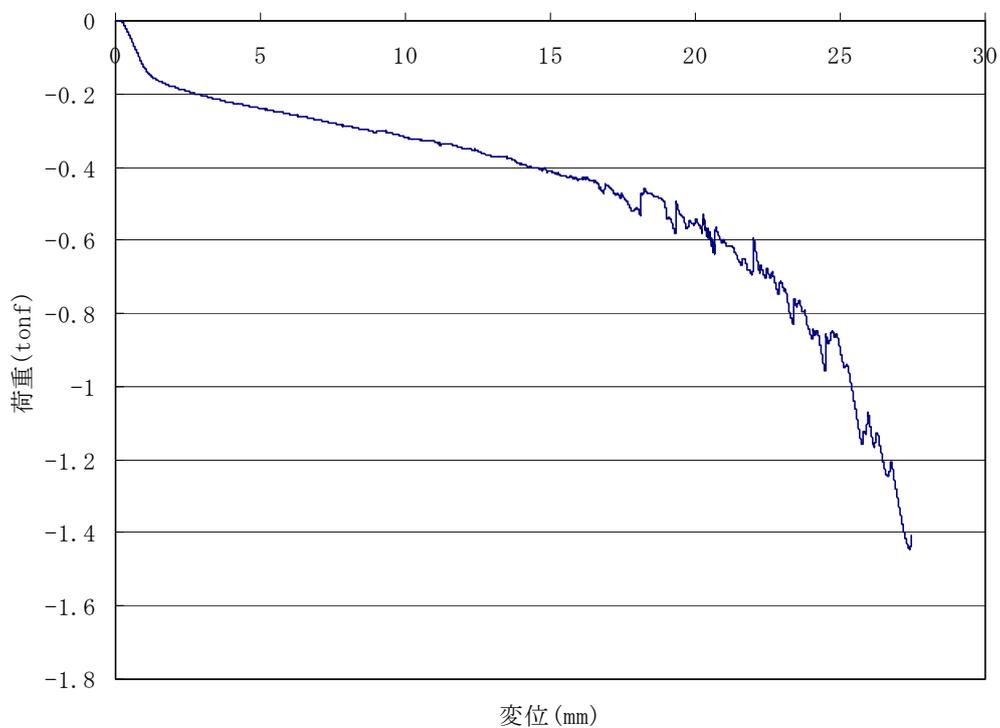


図 4-1-4 荷重-変位線図  
(隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号: 1-1-B2)

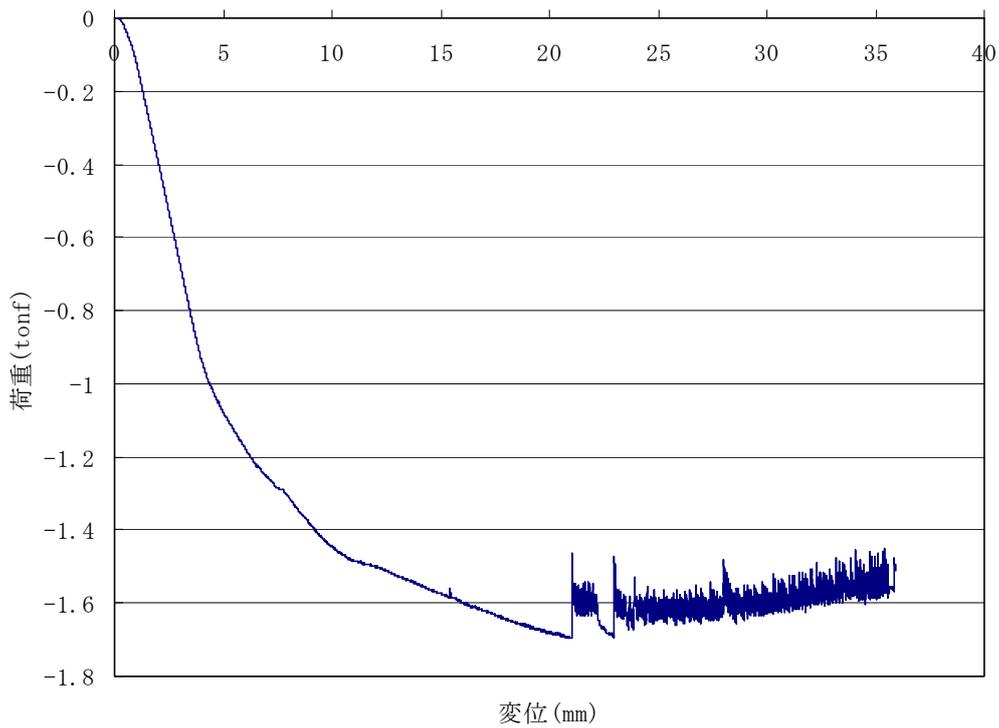


図 4-1-5 荷重-変位線図  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A1)

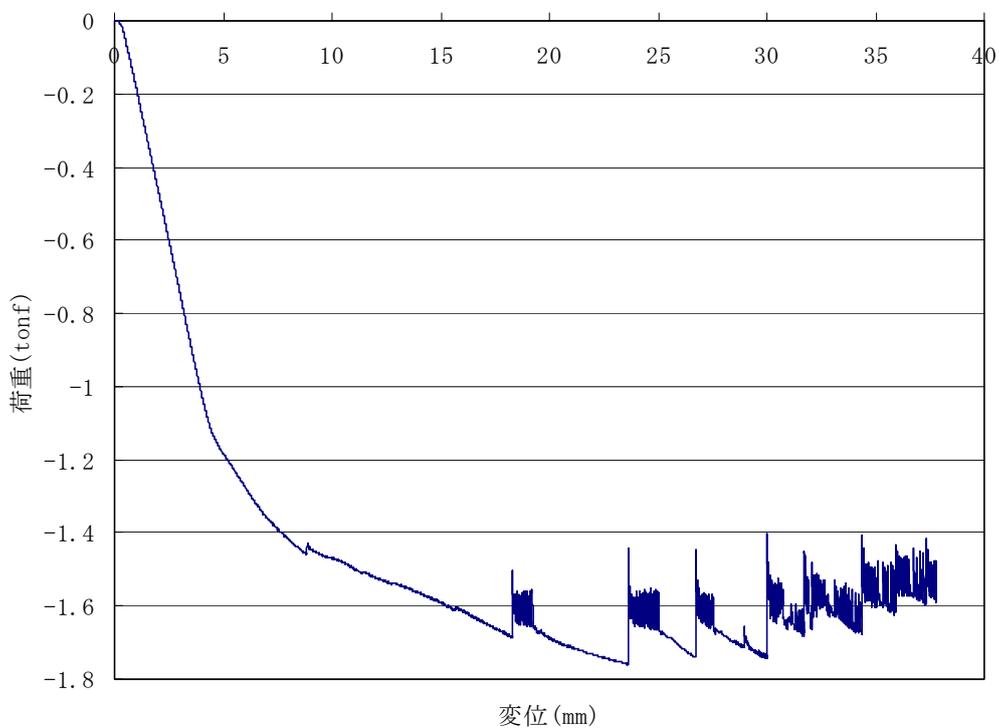


図 4-1-6 荷重-変位線図  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A2)

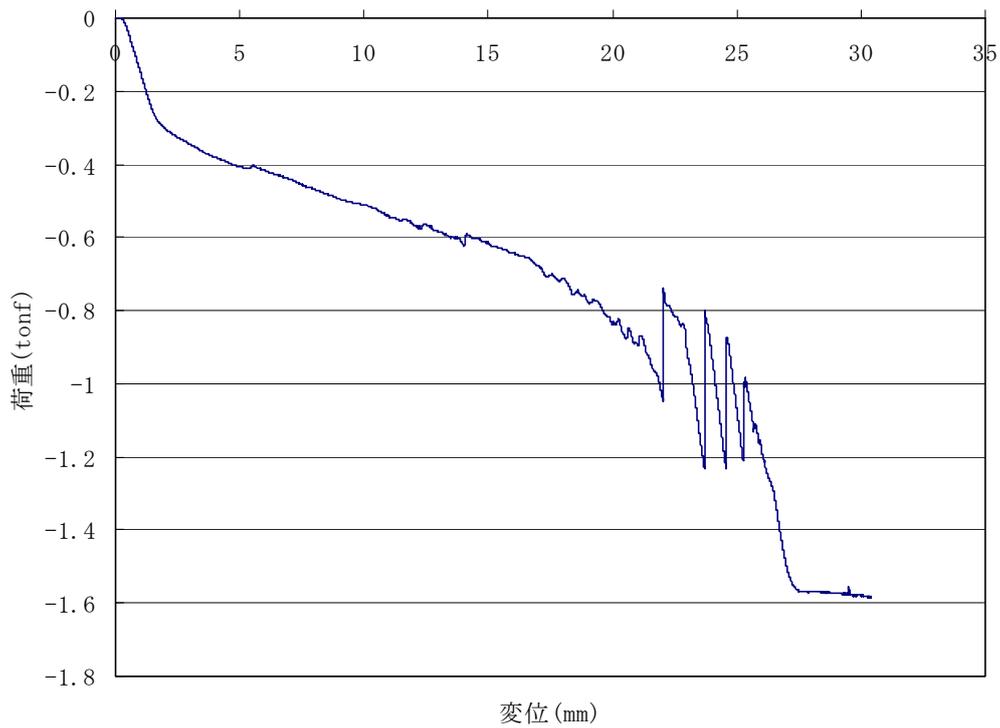


図 4-1-7 荷重－変位線図

(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B1)

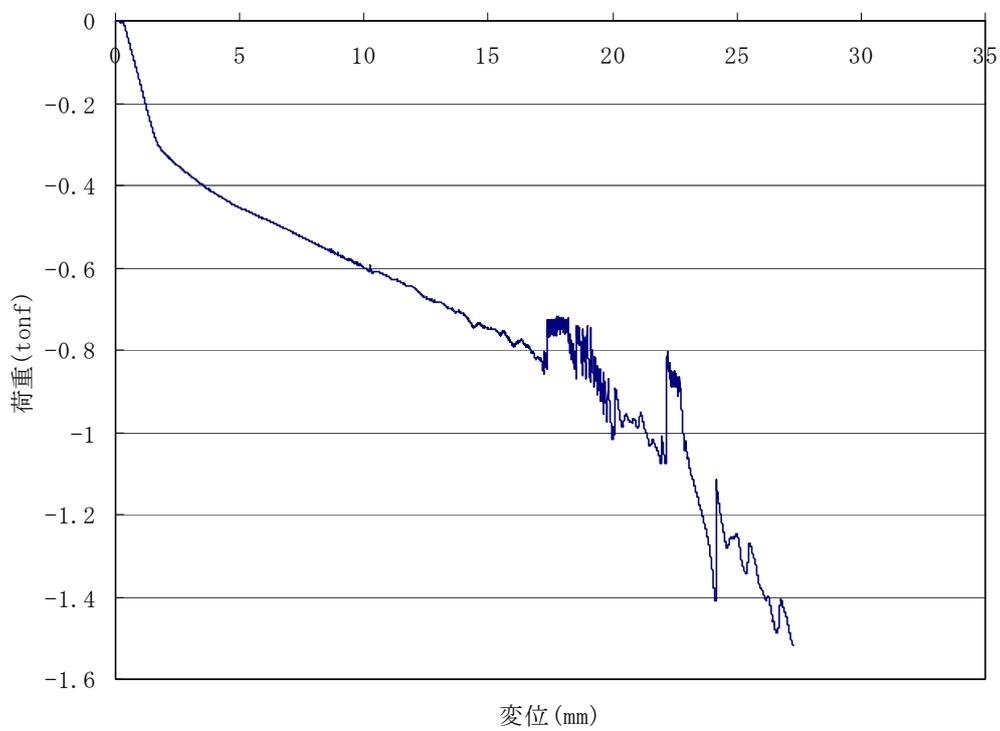


図 4-1-8 荷重－変位線図

(隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B2)

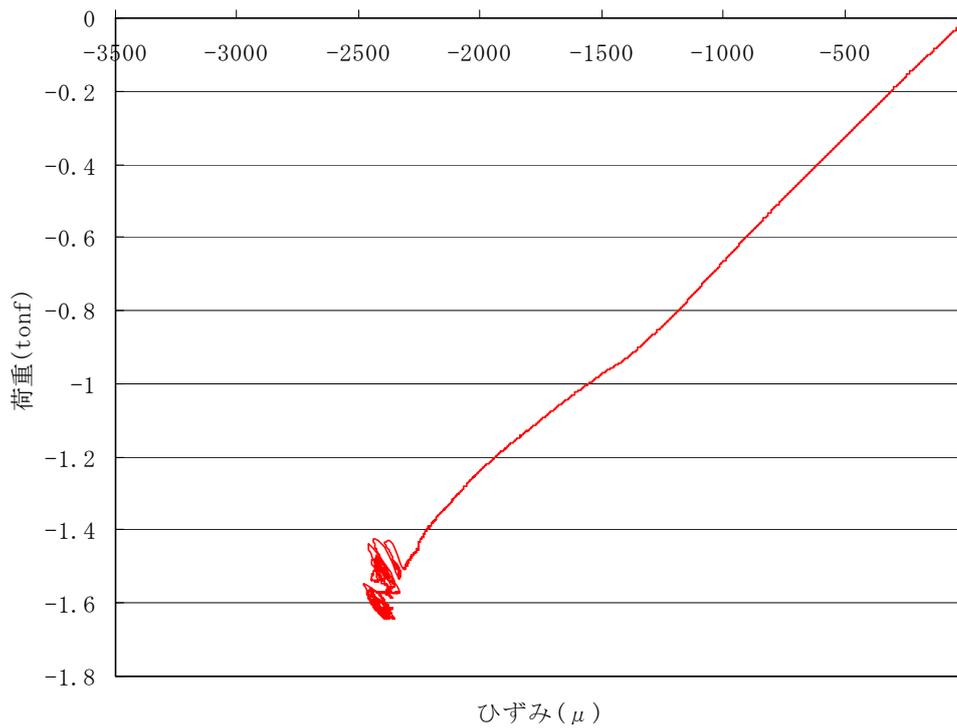


図 4-2-1 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A1)

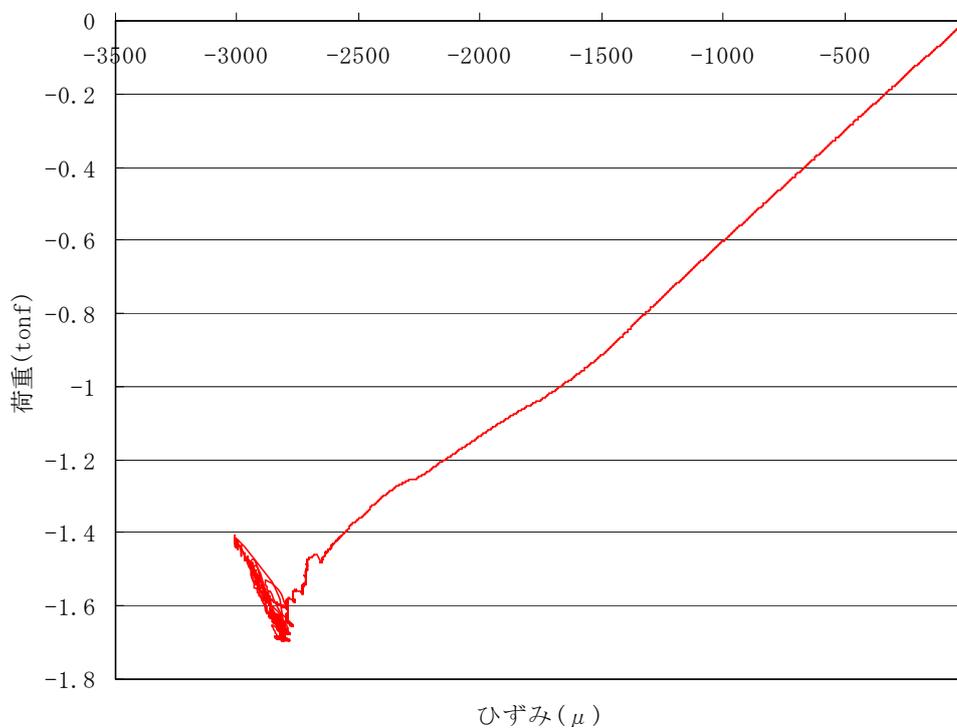


図 4-2-2 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A2)

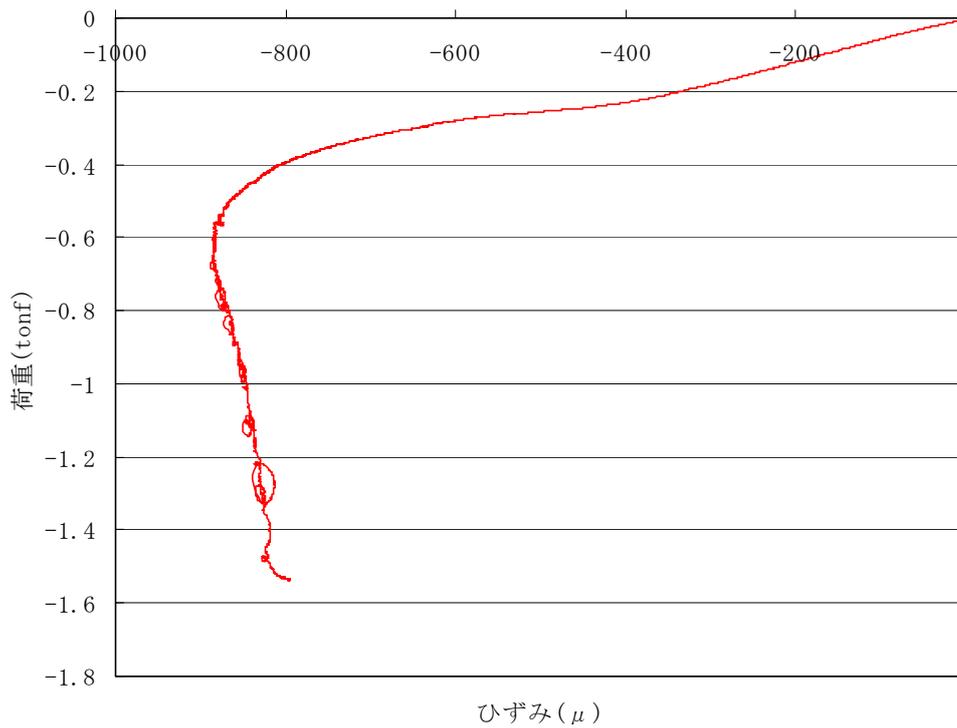


図 4-2-3 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B1)

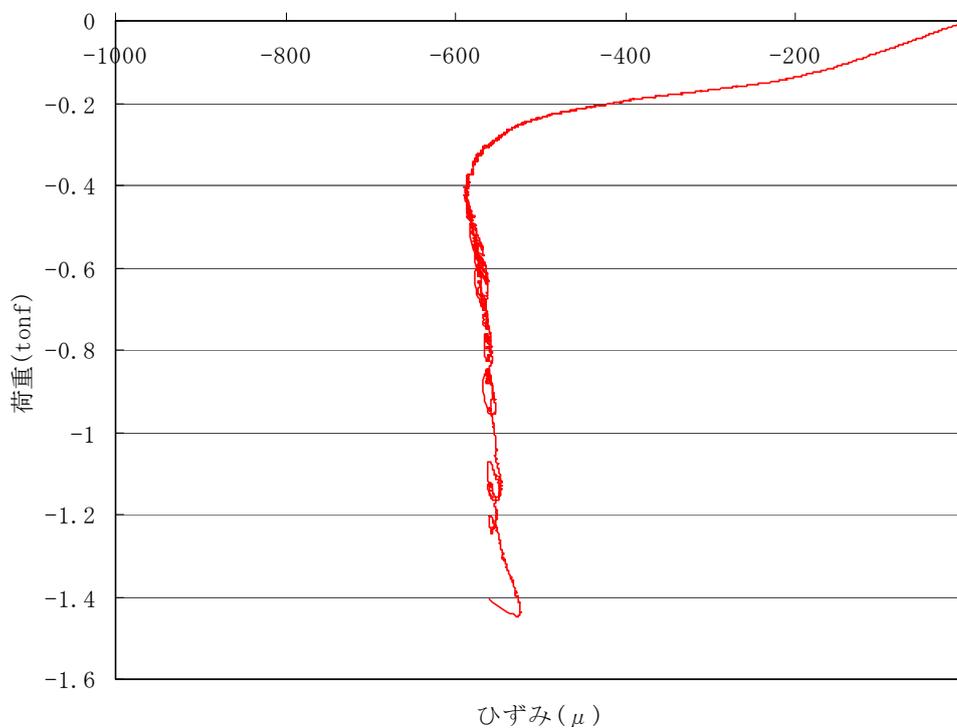


図 4-2-4 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B2)

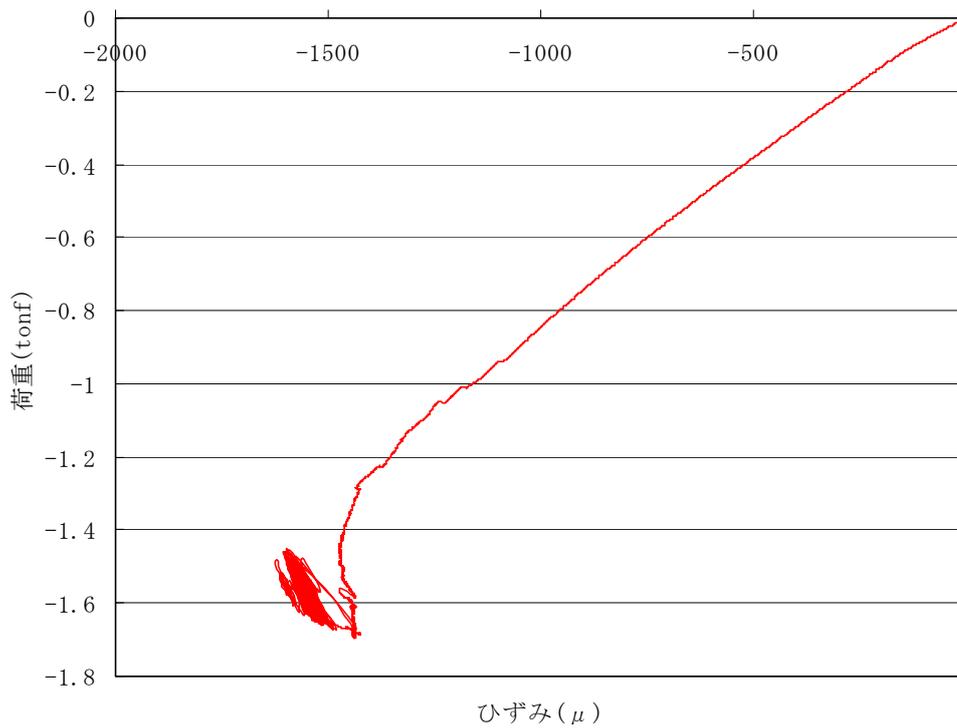


図 4-2-5 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A1)

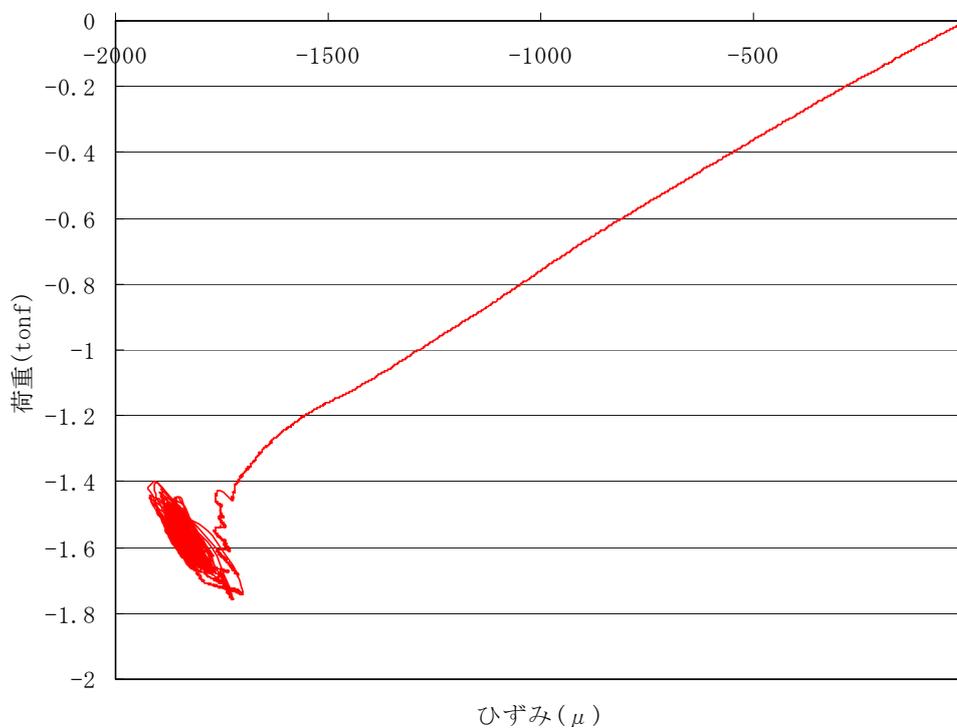


図 4-2-6 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A2)

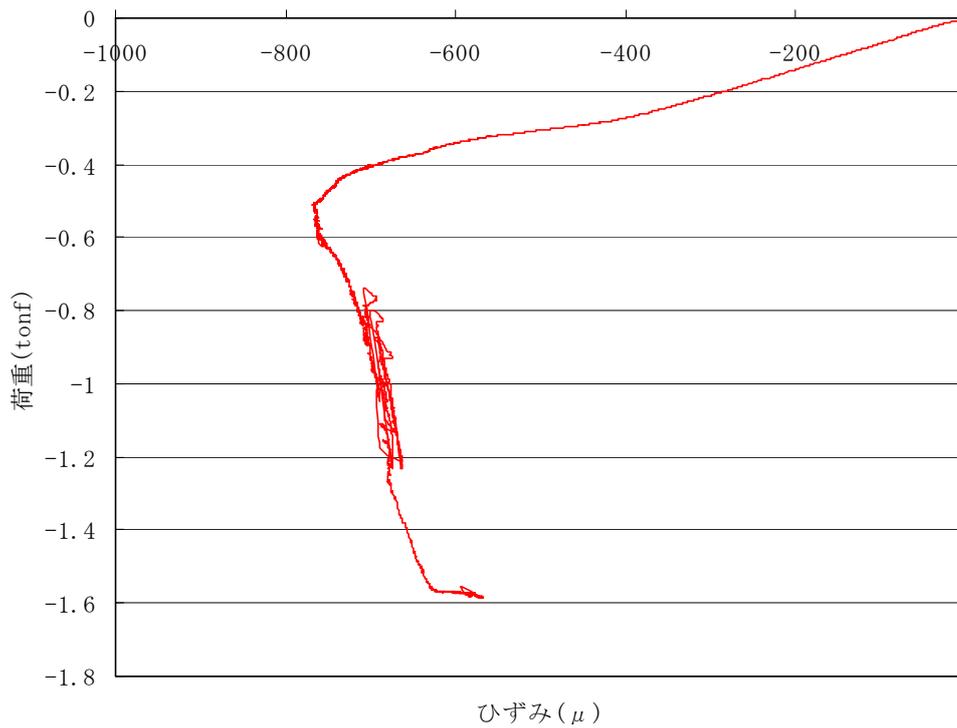


図 4-2-7 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B1)

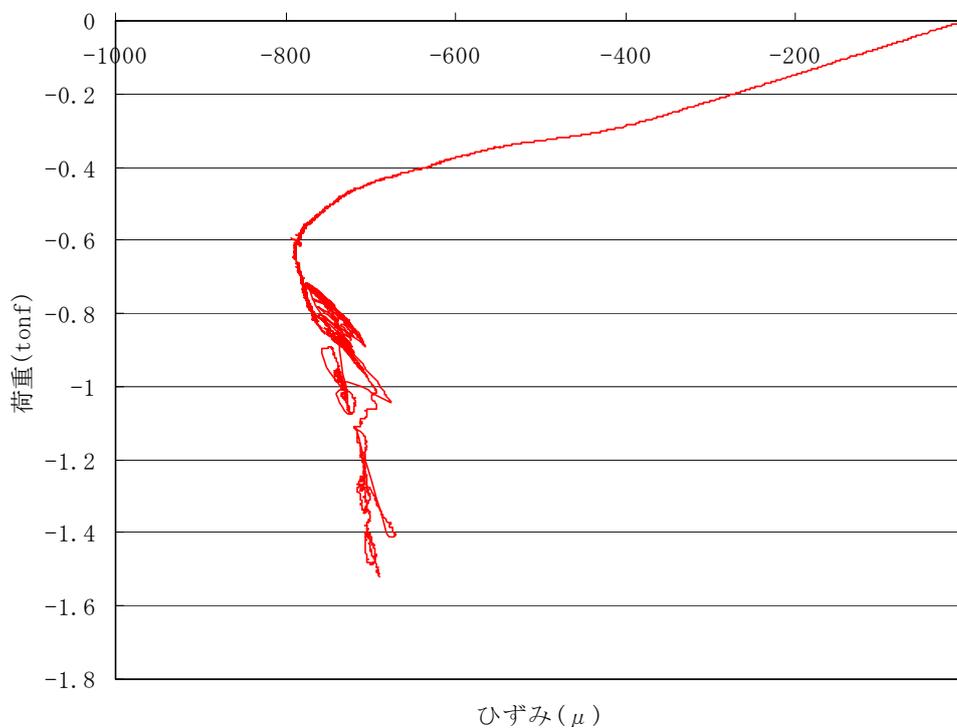


図 4-2-8 荷重－ひずみ線図(ひずみ 1)  
 (隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B2)

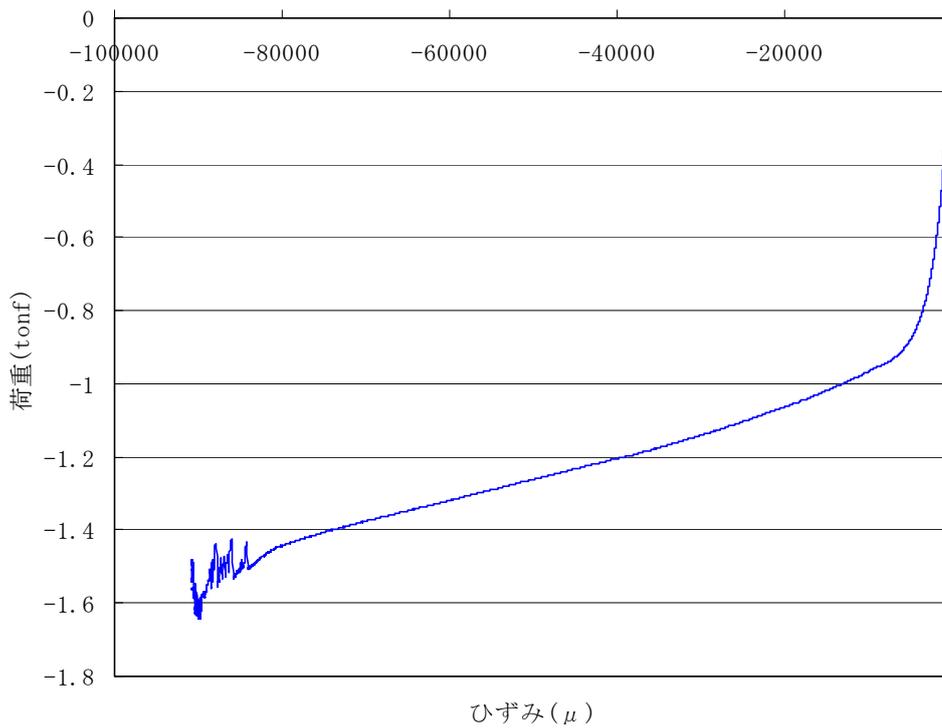


図 4-3-1 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A1)

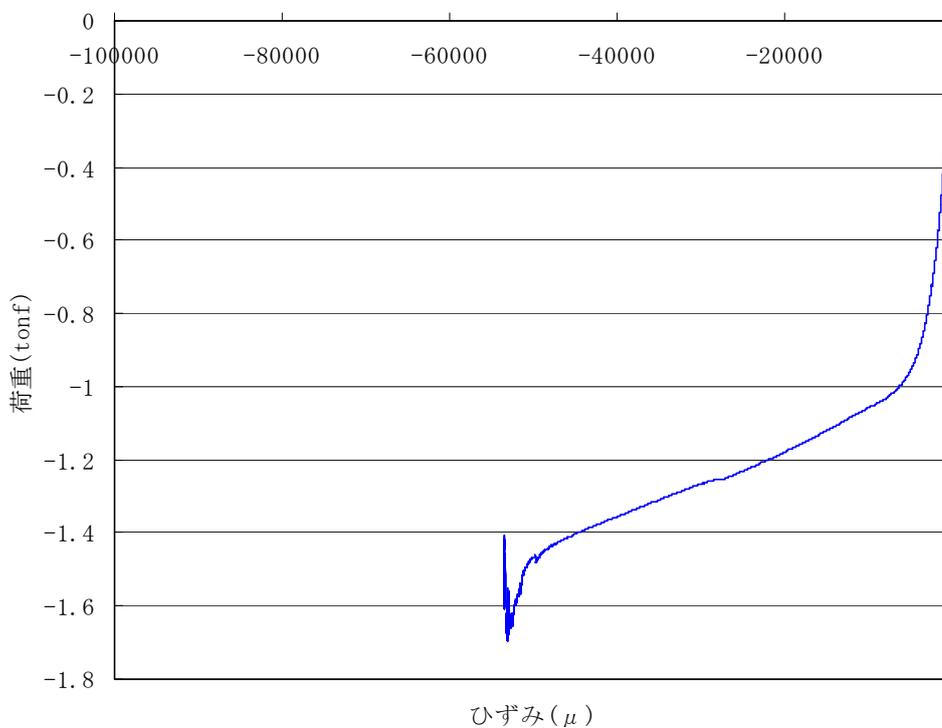


図 4-3-2 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-A2)

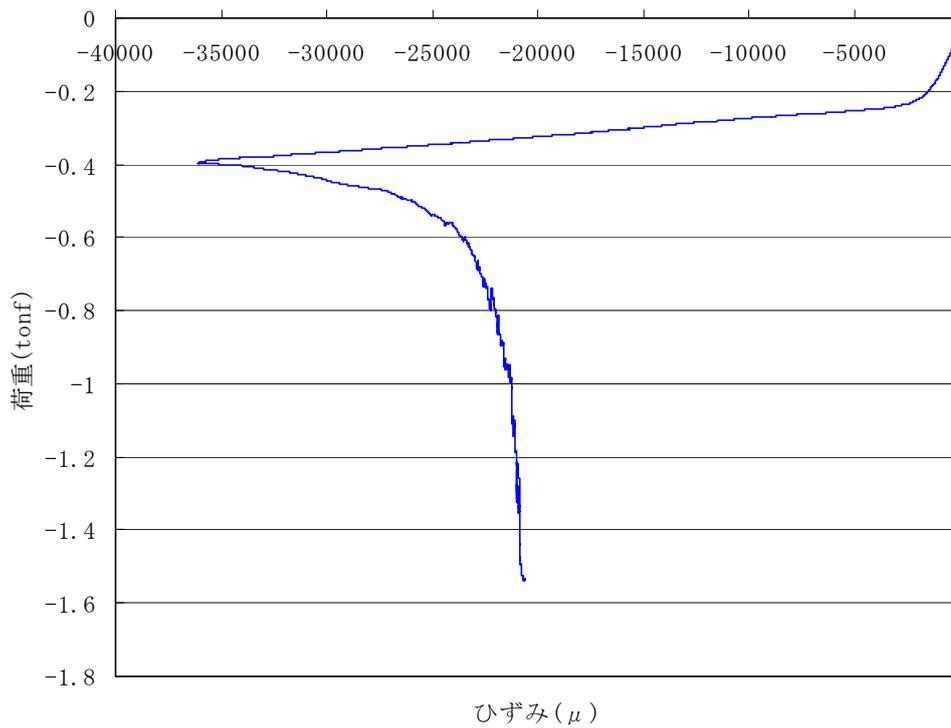


図 4-3-3 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B1)

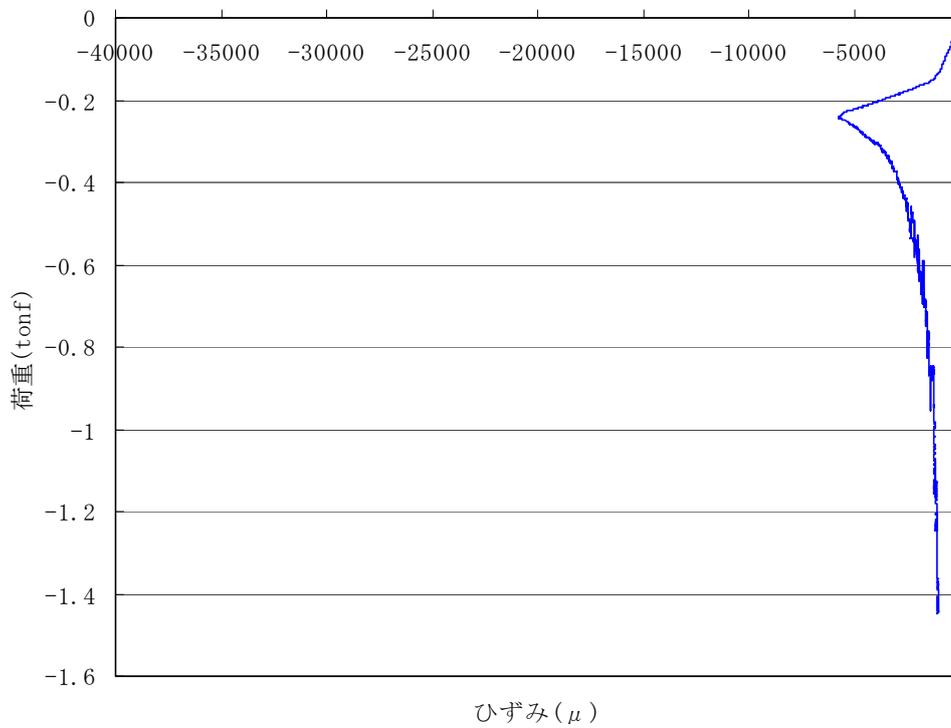


図 4-3-4 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:1-1-B2)

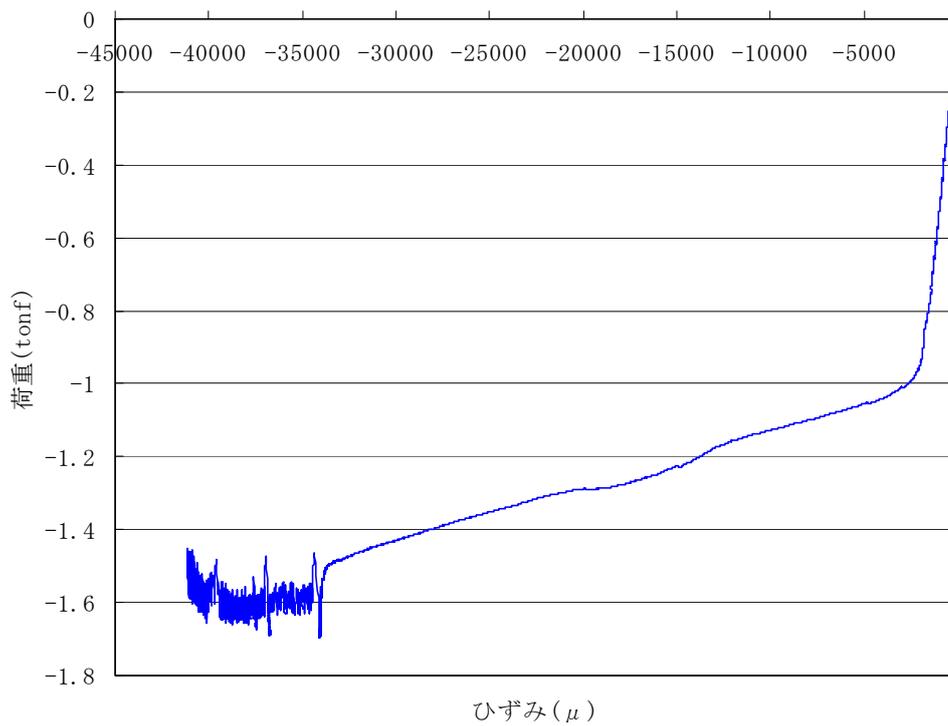


図 4-3-5 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A1)

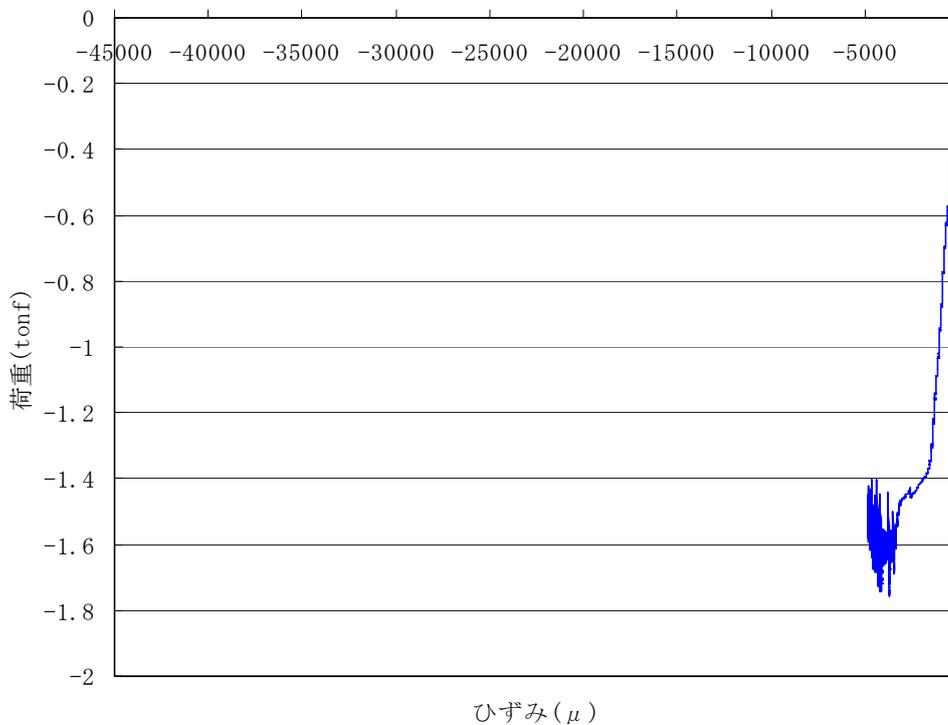


図 4-3-6 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-A2)

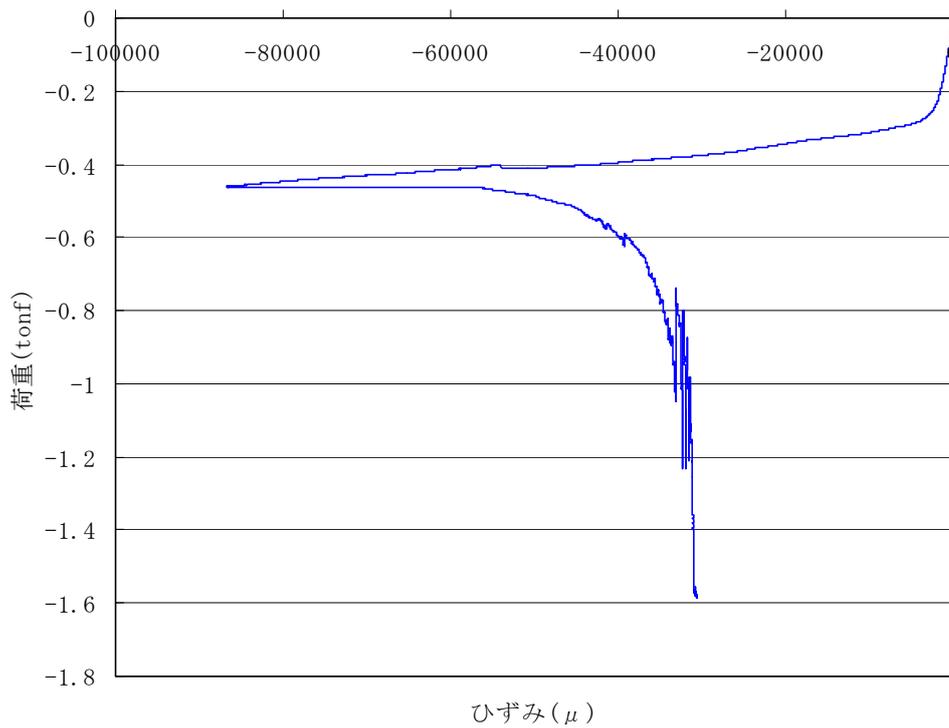


図 4-3-7 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B1)

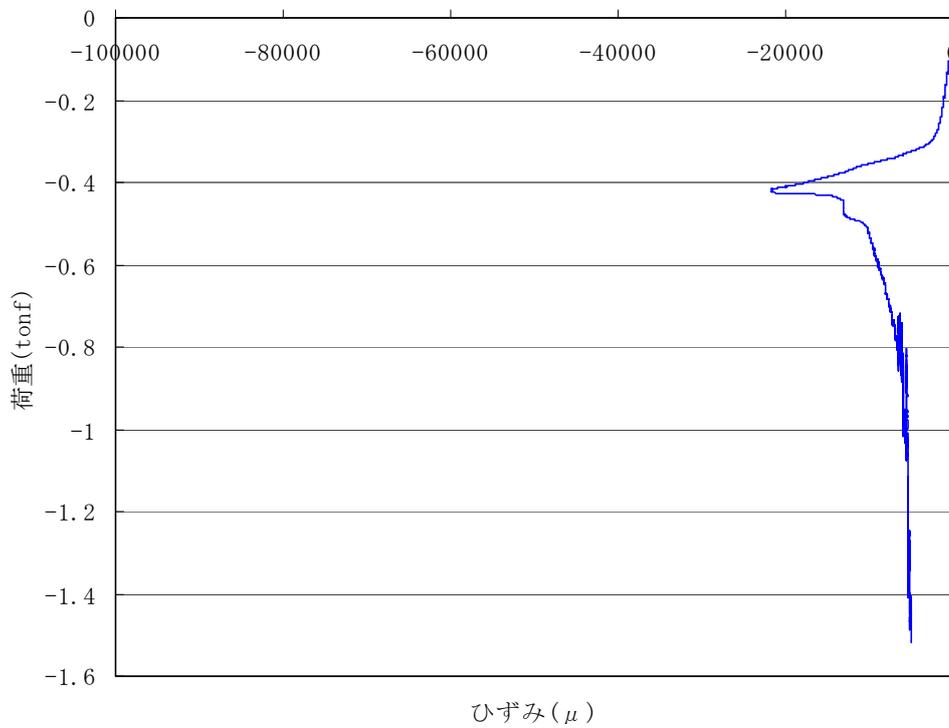


図 4-3-8 荷重－ひずみ線図(ひずみ 2)  
 (隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験片符号:5-2-B2)

表 4-1 疲労試験結果一覧表

試験片製作条件	試験片符号	繰返し数 (回)	試験変位 (mm)	備考
隙間 1mm のど厚 $3/\sqrt{2}$ ブローホール無し	1-2-B1	1,711	2	20~150サイクル程度まで約+0.3mm~-3.7mm
	1-2-B2	263	4	
	1-3-B1	10,863	1.5	
	1-3-B2	997	3	
	1-4-B1	1,026	2.5	
	1-4-B2	904	1.75	
隙間 1mm のど厚 $3/\sqrt{2}$ ブローホール有り	1-9-B1	1,715	2	
	1-9-B2	56	3	
	1-11-B1	1,022	1.5	
	1-11-B2	75	2.5	
隙間 1mm のど厚 $6/\sqrt{2}$ ブローホール無し	1-2-A1	2,889	4	荷重リミッターが作動しなかったため、採取データより算出
	1-2-A2	3,251	5	
	1-3-A1	89	6	
	1-3-A2	5,733	3	
	1-4-A1	357	5.5	
	1-4-A2	1,398	4.5	
隙間 1mm のど厚 $6/\sqrt{2}$ ブローホール有り	1-9-A1	100	4	
	1-9-A2	21,206	2	
	1-11-A1	1,643	3	
	1-11-A2	8,956	2.5	
隙間 5mm のど厚 $3/\sqrt{2}$ ブローホール無し	5-3-B1	269	3	
	5-3-B2	2,975	2	
	5-4-B1	510	2.5	
	5-4-B2	3,811	1.5	
	5-5-B1	1,260	2.25	
	5-5-B2	10,748	1.25	
隙間 5mm のど厚 $6/\sqrt{2}$ ブローホール無し	5-3-A1	2,514	4	未破断
	5-3-A2	17,179	3	
	5-4-A1	2,449	5	
	5-4-A2	89,040	2.5	
	5-5-A1	718	5.5	
	5-5-A2	7,339	3.5	

試験設定：0~試験変位

試験終了条件：荷重75%Down（当初荷重の25%まで低下した時点で終了）

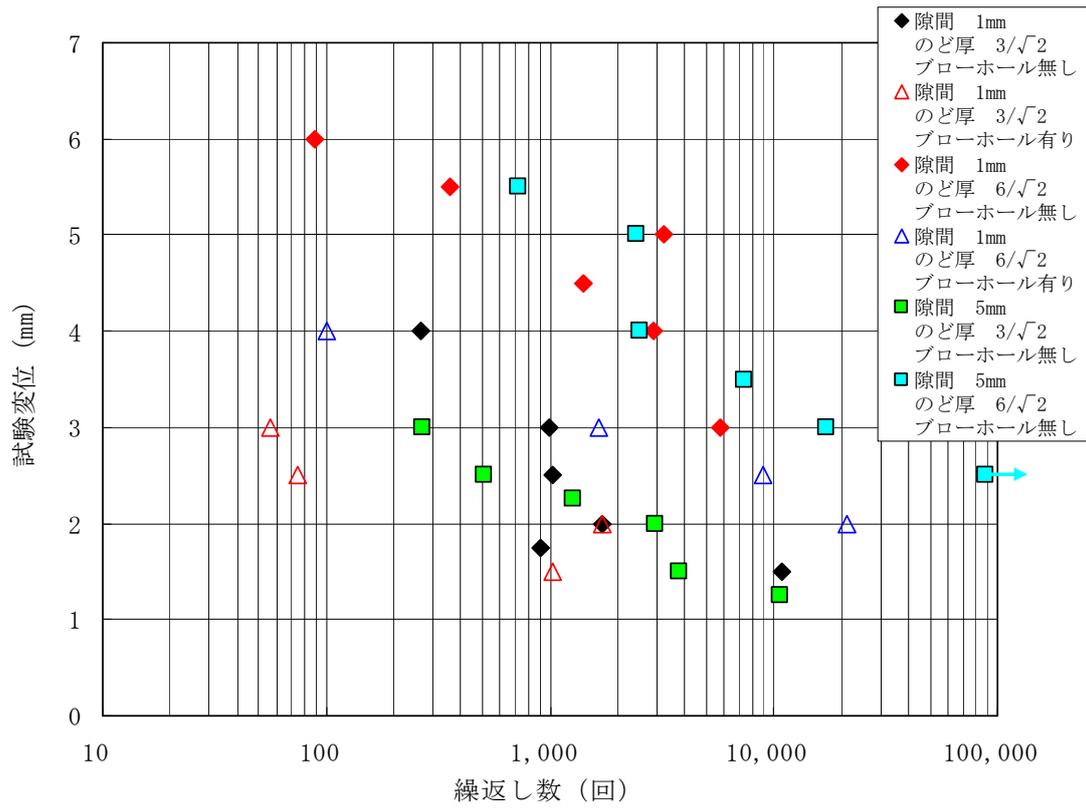


図 4-4 試験変位—繰返し数線図(全データ)

表 4-2-1 デジタルデータ採取によって得られた各種ピークデータ一覧表

(試験片符号 1-2-A1、隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)

繰返し数 (回)	荷重(tonf)		変位(mm)		ひずみ1( $\mu$ )		ひずみ2( $\mu$ )	
	max	min	max	min	max	min	max	min
1	0.014	-1.089	0.011	-3.942	-6	-1681	14	-4988
2	0.015	-1.071	-0.044	-3.947	-47	-1703	-2140	-5147
3	0.019	-1.066	-0.028	-3.947	-53	-1706	-2299	-5234
4	0.021	-1.069	-0.023	-3.963	-53	-1712	-2371	-5321
5	0.022	-1.067	-0.013	-3.967	-53	-1718	-2443	-5364
6	0.023	-1.070	-0.013	-3.975	-50	-1724	-2487	-5422
7	0.024	-1.068	-0.006	-3.977	-50	-1721	-2530	-5451
8	0.026	-1.070	-0.002	-3.988	-47	-1728	-2559	-5494
9	0.027	-1.069	0.003	-3.986	-50	-1728	-2588	-5523
10	0.030	-1.072	0.011	-3.997	-47	-1731	-2617	-5566
100	0.035	-1.069	0.006	-4.006	-51	-1713	-3392	-6563
200	0.037	-1.059	0.009	-4.006	-51	-1720	-3626	-6829
400	0.048	-1.049	0.009	-4.005	-38	-1695	-4235	-7532
600	0.065	-1.037	0.013	-4.011	-26	-1657	-5251	-8657
800	0.091	-1.002	0.013	-4.009	-20	-1657	-6798	-10313
1000	0.101	-0.977	0.014	-4.014	-10	-1623	-8313	-11938
2000	0.211	-0.804	0.013	-4.009	108	-1388	-15017	-19563
2800	0.384	-0.429	0.017	-4.017	262	-913	-12720	-18329

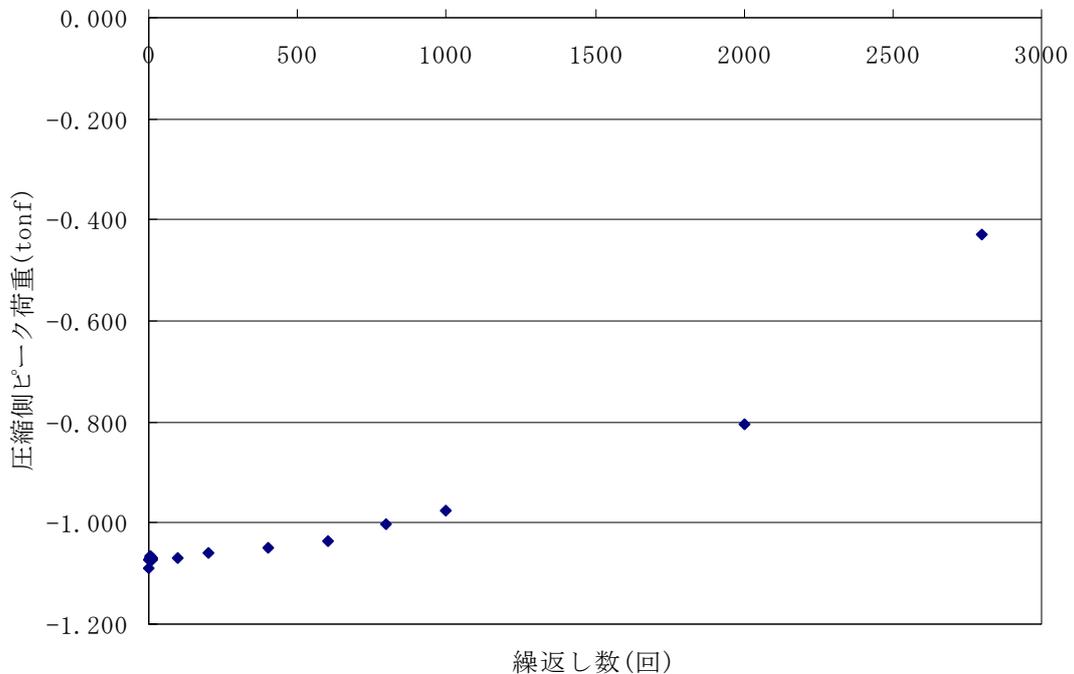


図 4-5-1 圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係

(試験片符号 1-2-A1、隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)

表 4-2-2 デジタルデータ採取によって得られた各種ピークデータ一覧表  
 (試験片符号 1-2-B2、隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)  
 (20~150 サイクル程度まで約+0.3mm~-3.7mm)

繰返し数 (回)	荷重 (tonf)		変位 (mm)		ひずみ1 ( $\mu$ )		ひずみ2 ( $\mu$ )	
	max	min	max	min	max	min	max	min
1	0.280	-0.458	0.011	-4.125	156	-978	-188	-34391
2	0.287	-0.442	-0.116	-4.122	166	-963	-25813	-34625
3	0.288	-0.432	-0.116	-4.108	166	-956	-26203	-34750
4	0.288	-0.424	-0.136	-4.097	163	-950	-26453	-34781
5	0.287	-0.416	-0.158	-4.061	156	-938	-26656	-34656
6	0.290	-0.411	-0.152	-4.045	156	-931	-26750	-34625
7	0.300	-0.405	-0.088	-4.019	169	-925	-26375	-34516
8	0.306	-0.392	-0.048	-3.944	175	-903	-26094	-34078
9	0.311	-0.387	-0.003	-3.911	181	-897	-25734	-33844
10	0.313	-0.382	0.027	-3.877	188	-891	-25422	-33563
20	0.326	-0.366	0.216	-3.717	203	-869	-23297	-31953
30	0.325	-0.363	0.267	-3.697	197	-866	-22094	-31359
40	0.322	-0.358	0.267	-3.697	188	-863	-21609	-31141
100	0.319	-0.322	0.269	-3.698	131	-838	-18656	-29828
200	0.240	-0.223	0.014	-4.028	-41	-747	-10125	-26031
201	0.240	-0.221	0.023	-4.016	-44	-744	-9891	-25813
202	0.240	-0.219	0.023	-4.013	-44	-741	-9766	-25656
203	0.240	-0.217	0.022	-4.013	-44	-738	-9641	-25531
204	0.240	-0.215	0.025	-4.011	-47	-738	-9438	-25406

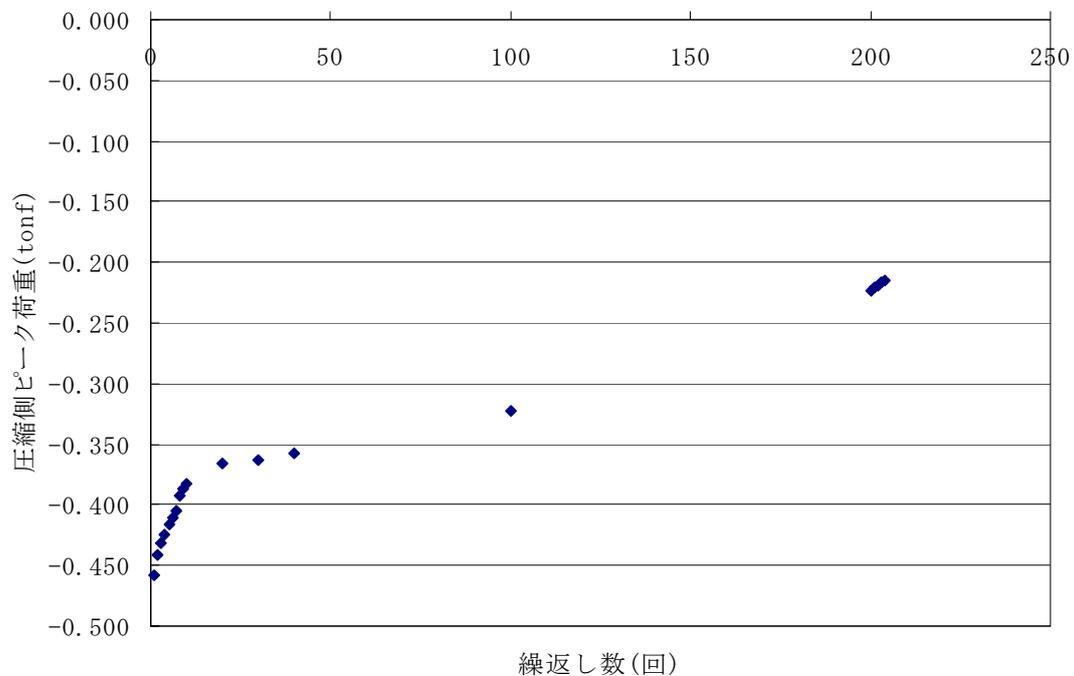


図 4-5-2 圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係  
 (試験片符号 1-2-B2、隙間 1mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)

表 4-2-3 デジタルデータ採取によって得られた各種ピークデータ一覧表

(試験片符号 5-3-A1、隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)

繰返し数 (回)	荷重(tonf)		変位(mm)		ひずみ1( $\mu$ )		ひずみ2( $\mu$ )	
	max	min	max	min	max	min	max	min
1	0.033	-1.051	0.004	-3.957	6	-1441	188	-1649
2	0.039	-1.035	-0.030	-3.955	-16	-1438	203	-1649
3	0.043	-1.028	-0.019	-3.954	-16	-1434	203	-1649
4	0.046	-1.028	-0.019	-3.974	-9	-1438	203	-1664
5	0.049	-1.028	-0.008	-3.979	-6	-1441	203	-1664
6	0.052	-1.026	-0.001	-3.982	-3	-1438	217	-1664
7	0.055	-1.027	0.001	-3.991	0	-1438	217	-1664
8	0.057	-1.026	0.006	-3.991	0	-1434	217	-1664
9	0.057	-1.025	0.006	-3.994	0	-1431	217	-1664
10	0.059	-1.028	-0.001	-4.005	0	-1434	203	-1678
100	0.084	-0.991	0.007	-4.019	25	-1403	203	-1722
200	0.100	-0.971	0.009	-4.022	41	-1381	203	-1780
400	0.132	-0.935	0.006	-4.024	69	-1313	275	-1823
600	0.155	-0.897	0.007	-4.016	100	-1259	362	-1808
800	0.179	-0.862	0.009	-4.019	122	-1216	448	-1780
1000	0.203	-0.828	0.006	-4.018	150	-1175	521	-1751
2000	0.347	-0.599	0.010	-4.016	306	-884	1071	-1432
2500	0.336	-0.284	0.013	-4.024	209	-613	1056	-492

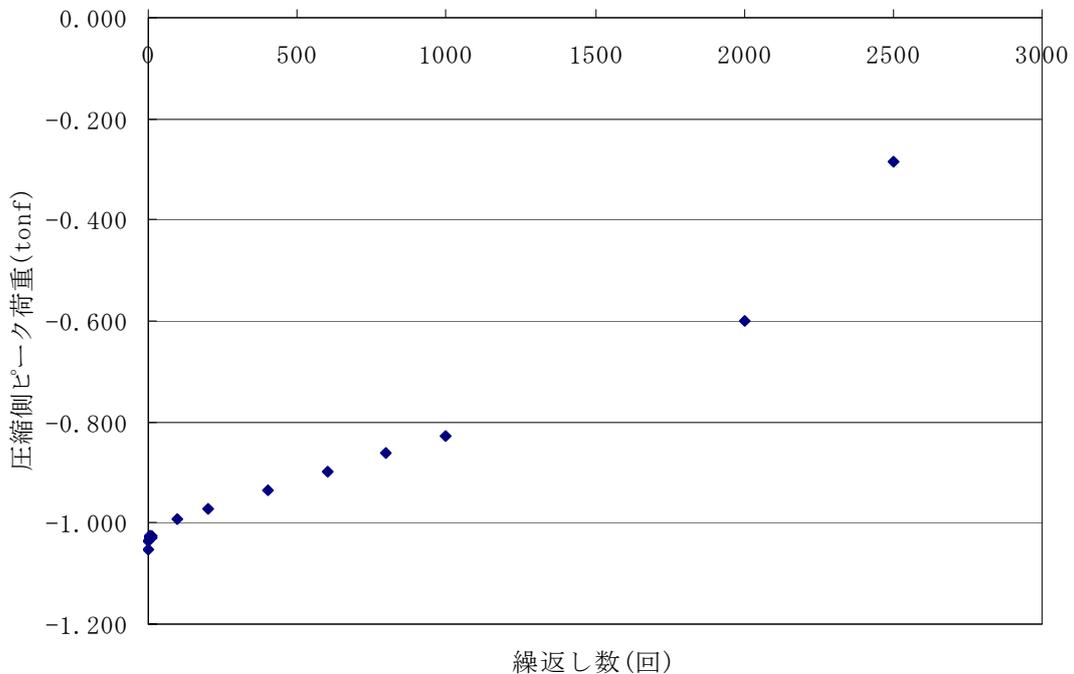


図 4-5-3 圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係

(試験片符号 5-3-A1、隙間 5mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0~4mm)

表 4-2-4 デジタルデータ採取によって得られた各種ピークデータ一覧表

(試験片符号 5-3-B1、隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験変位 0~3mm)

繰返し数 (回)	荷重(tonf)		変位(mm)		ひずみ1( $\mu$ )		ひずみ2( $\mu$ )	
	max	min	max	min	max	min	max	min
1	0.222	-0.321	0.101	-2.877	188	-597	0	-24406
2	0.227	-0.314	0.101	-2.876	191	-572	-14250	-24594
3	0.231	-0.307	0.110	-2.876	191	-572	-14531	-24766
4	0.232	-0.303	0.112	-2.885	194	-569	-14516	-25031
5	0.233	-0.299	0.114	-2.890	194	-566	-14516	-25172
6	0.234	-0.296	0.115	-2.889	194	-559	-14484	-25281
7	0.234	-0.292	0.115	-2.887	191	-559	-14422	-25391
8	0.235	-0.289	0.115	-2.888	194	-553	-14359	-25469
9	0.236	-0.286	0.120	-2.893	194	-553	-14266	-25594
10	0.236	-0.284	0.120	-2.891	191	-553	-14156	-25656
20	0.227	-0.275	0.032	-2.984	166	-547	-13984	-26719
40	0.226	-0.252	0.005	-3.003	144	-531	-11984	-26109
60	0.223	-0.234	0.007	-3.004	119	-522	-9328	-24813
80	0.218	-0.217	0.006	-3.004	97	-513	-6734	-23406
100	0.211	-0.202	0.005	-3.005	78	-503	-4156	-21953
150	0.197	-0.164	0.006	-3.004	34	-469	2625	-17719
200	0.174	-0.129	0.007	-3.006	-9	-425	11672	5906
250	0.142	-0.086	0.007	-3.006	-56	-372	16859	12297

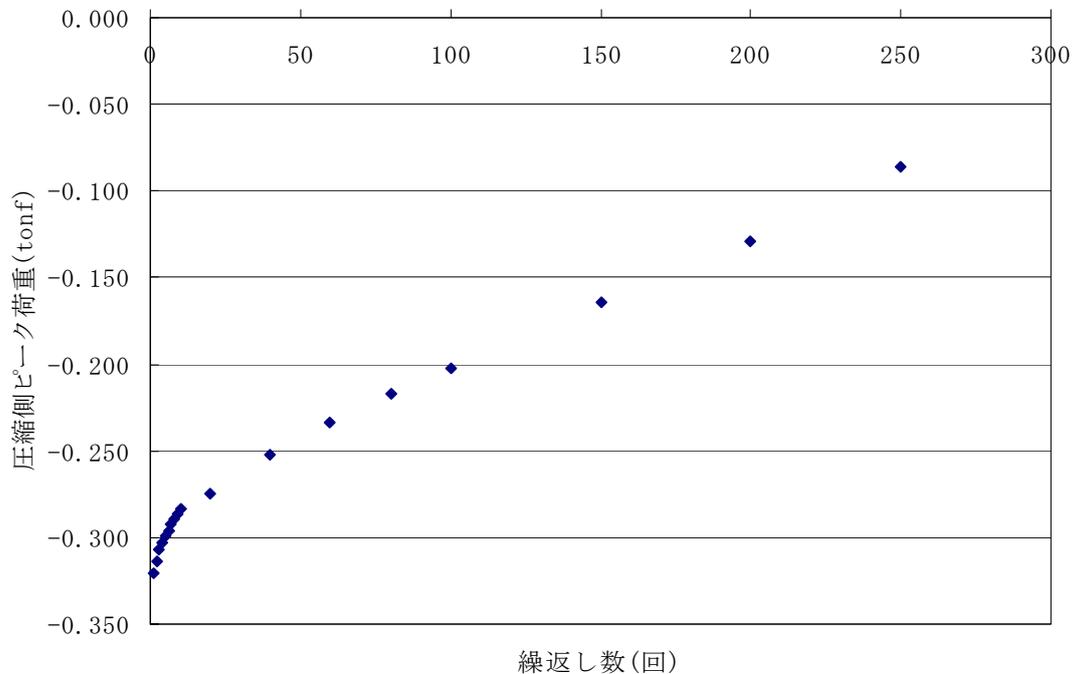


図 4-5-4 圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係

(試験片符号 5-3-B1、隙間 5mm、のど厚 50%、ブローホール無し、試験変位 0~3mm)

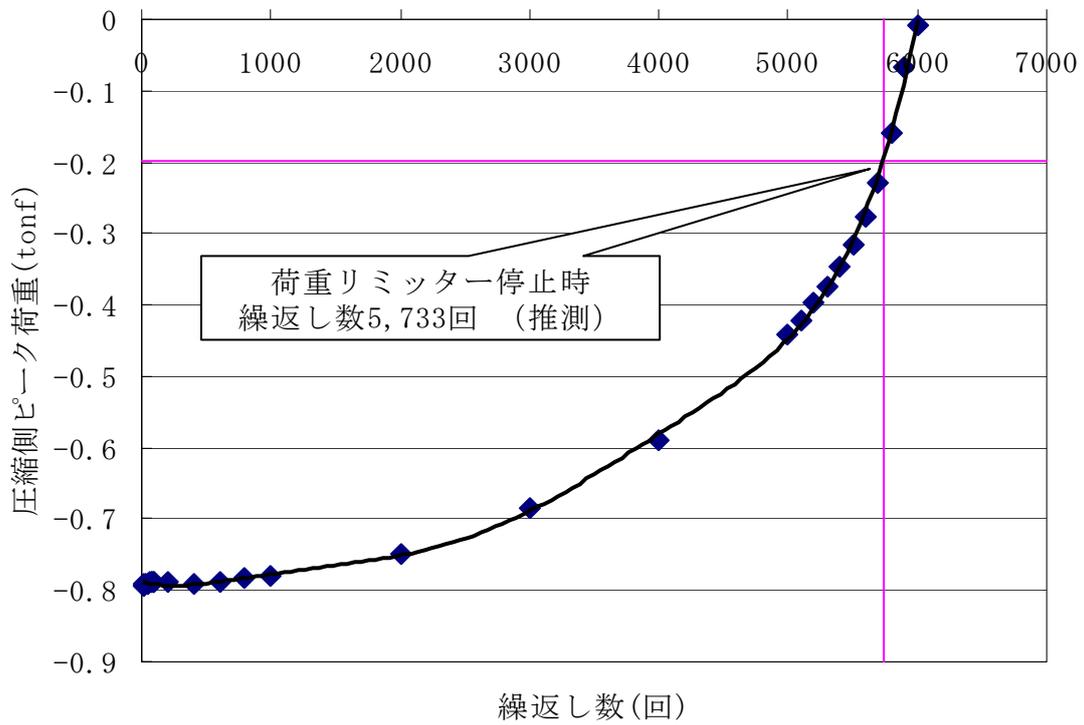


図 4-6 圧縮側ピーク荷重と繰返し数の関係  
 (試験片符号 1-3-A2、隙間 1mm、のど厚 100%、ブローホール無し、試験変位 0~3mm)