法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

アンダーカットを有する十字すみ肉溶接継手の疲労強度

NISHIKAWA, Yasuhiro / 西川, 祥央

(発行年 / Year)
2010-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2010-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

アンダーカットを有する
十字すみ肉溶接継手の疲労強度

08R5110　西川　祥央

鋼橋には十字継手、T 字継手、突合わせ継手、ガセット継手などが不可欠である。このような溶接継手部には溶接割れ、溶け込み不足、スラグ巻き込み、ブローホール、アンダーカット、オーバーラップなどの溶接きずが生じやすく、きずは高い応力集中の原因となり、疲労強度を大きく低下させるとされている。アンダーカットは溶接止端部に発生する凹状のきずで、道路橋示方書にはアンダーカットの深さは、0.5mm 以下でなければならない。と記されている。さらに、疲労に関する事項については「鋼道路橋の疲労設計指針」が参考にできる、と述べられている。その指針では、十字すみ肉溶接継手の疲労強度等級をアンダーカットの深さが 0.3mm 以下の場合 E、0.3mm を超え 0.5mm 以下の場合 F 等級としている。しかし、アンダーカットは様々な形をしており、深さだけで疲労強度を整理することにはさらに検討が必要である。また、深さが疲労強度にどの程度影響するのかも明らかとはなっていない。アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響についてはこれまでにも多くの研究が行われている。しかし、アンダーカットは、疲労強度を大きく低下させる、あまり影響がないと極端に示されている結果が分かれている。

本研究では、アンダーカットの形状・寸法をレーザー変位計により測定し、アンダーカットの形状の特徴を明らかにした上で、アンダーカットを有する試験体とアンダーカットを含まない通常の試験体で疲労試験を行うことにより、アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を明らかにする。また、アンダーカットの実測結果に基づいてその形状を３次元でモデル化し、有限要素法を用いた応力解析を行うことでアンダーカットの形状・寸法が応力集中に及ぼす影響について検討する。

FATIGUE STRENGTH OF CRUCIFORM FILLET WELDED JOINTS WITH UNDERCUTS

08R5110 Yasuhiro NISHIKAWA

Cruciform welded joints, T type joints, butt joints, and gusset joints are indispensable to steel bridges. These welded joints sometimes include weld defects such as weld cracks, incomplete weld penetrations, slag inclusions, blowholes, undercuts, overlaps and so on. It is that the weld defects cause high stress concentration and decreases fatigue strength significantly. The undercut occurs at weld toe and its shape is concave. The Japanese specifications for highway bridges specify that “The depth of the undercut should be 0.5mm or less". In addition, the specifications describe that the items related to fatigue should refer to "Fatigue Design Recommendations for Steel Highway Bridge". In the Recommendations, the fatigue strength category for cruciform welded joints with undercuts less than 0.3mm and 0.5mm deep specified to E and F class. However, the undercut has various shapes, and therefore it may be problem that the fatigue strength of the joint with undercut is determined by only its depth. Furthermore, the influence of undercut depth on the fatigue strength has not been made clear sufficiently. In fact, a lot of researches have been done about the influence of undercut on fatigue strength, and their results indicate that the influence is remarkable and is not significant.

In this study, shape and size of undercuts including in cruciform welded joints are precisely measured with the laser displacement sensor, and the aspect of the undercut configuration is clarified. Afterwards, the influence of the undercut on fatigue strength is investigated by doing fatigue tests on cruciform welded joints with various undercuts and without undercuts. The influence of undercut shape and size on stress concentration is also discussed by three dimensional finite element stress analyses on joint models with actual shape and size of undercut.

目次

第 1 章 序論
1.1 背景・・1
1.2 既往の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.3 目的・・3

第 2 章 アンダーカットの形状と寸法の特徴
2.1 レーザー変位計による測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
2.2 測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
2.3 深さ・開口幅・曲率半径の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6

第 3 章 試験体
3.1　試験体の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
3.2　溶接部の形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23

第 4 章 疲労試験
4.1　試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
4.2　試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
4.2.1　疲労亀裂の発生・進展性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
4.2.2　ビーチマーク試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 52

第 5 章 応力解析
5.1 解析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・90
5.2 レーザー変位計を用いた再現モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・90
5.2.1　解析モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
5.2.2　解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
5.3 アンダーカット寸法を変化させたモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
5.3.1　解析モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91
5.3.2　解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91

第 6 章 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 132
参考文献
謝辞

第１章　序論

1.1　背景

近年、数多くの溶接橋梁において、疲労損傷事例が報告されているが、その多くはすみ肉溶接止端部から発生した疲労き裂によるものである。これは自動車、列車などの繰り返し荷重が原因で生じるものであるが､疲労は多くの因子の影響を受けるため、疲労亀裂の発生位置及びその時期を精度よく予知するのは難しい。

鋼橋には十字継手、T 字継手、突合わせ継手、ガセット継手などが不可欠である。このような溶接継手部には溶接われ､溶け込み不足､スラグ巻き込み､ブローホール、アンダーカット、オーバーラップなどの溶接きずが生じやすく [1)]、きずは高い応力集中の原因となり、疲労強度を大きく低下させるとされており、溶接完了後、肉眼または適切な他の非破壊検査方法によりビード形状及び外観を検査し、継手に必要とされる溶接品質を満足していることを確認しなければならない。

アンダーカットは溶接止端部に発生する凹状のきずで、アーク等によって掘られた溝に、溶接金属が供給されないことがその発生原因である。アンダーカットは疲労強度に著しい影響を及ぼすとされており、道路橋示方書 [2)] には「アンダーカットの深さは、0.5mm 以下でなければならない。」また欠陥部の補修方法については､「グラインダー仕上げ量が 0.5mm 以内に収まるものは仕上げて合格とする。」と記されおり、またその解説には「アンダーカットは応力集中の主因となり、腐食の促進にもつながるので、過去の実績等から、0.5mm 以下としたものである。なお、リブやスティフナー等のすみ肉溶接継手の場合には、応力集中の観点から本体構造物との止端部（すみ肉下足側）のアンダーカットが特に重要であり、下足側を確実に検査しなければならない。」と記されている。さらに、解説では､「所定の疲労強度等級を満足するうえで許容されるアンダーカットの要求については本条の規定より厳しい場合があり、疲労に関する事項については「鋼道路橋の疲労設計指針」[3)] が参考にできる。」と述べられている。その指針では、

横突合わせ継手の場合アンダーカット深さが 0.3mm 以下の場合 D 等級 0.3mm を超え 0.5mm 以下の場合 E 等級

荷重非伝達型十字溶接継手の場合アンダーカット深さが 0.3mm 以下の場合 E 等級 0.3mm を超え 0.5mm 以下の場合 F 等級

ガセット継手の場合アンダーカット深さが 0.3mm 以下の場合 F 等級 0.3mm を超え

0.5mm 以下の場合 G 等級

と、疲労強度等級を規定している。しかし、アンダーカットは様々な形をしており、深さだけで疲労強度を整理することにはさらに検討が必要であり、また、深さ自身が疲労強度にどの程度影響するのかも明らかとはなっていない。

1.2　既往の研究

アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響についてはこれまでにも多くの研究が行われている。しかし、疲労強度に対し最も大きな影響を持つと予測され、しかも製造検査で厳しくチェックされているアンダーカットについては、大きく強度を低下させる、あまり影響がないと極端に見解が分かれていて定説がない。規則で採否基準が設定されていても、溶接施工上の品質基準なのか強度確保の観点から必要な管理基準なのか必ずしも明確ではないというのが実状である。

岸本ら[4]は、アンダーカットの影響を実験的に検討する目的で健全材、幅の広い浅いアンダーカット、幅の狭い浅いアンダーカット、深いアンダーカット、深いアンダーカットにグラインダーをかけたものの５種類の突合せ溶接継手試験片を用いて引張疲労試験を行っている。その結果、浅いアンダーカットは幅の広さに関わらずその深さが 0.4mm 以下であればその疲労強度はアンダーカットのない通常の継手と同程度であるとしている。一方深いアンダーカットでは、明らかに疲労強度が低下しており、アンダーカットの影響を認めている。この場合き裂発生点のアンダーカット深さは 0.4mm~0.9mm であった。

多田ら[5]はアンダーカットを生じさせた突合わせ溶接継手および十字すみ肉溶接継手の試験片を作成し引張疲労試験を行い、深さと疲労強度の関係について検討した。それぞれの試験片におけるアンダーカット深さは、突合わせ溶接継手では 0.3mm、0.6mm、0.9mm の３種類、すみ肉溶接継手では 0.01mm~0.5mm の間となっている。結果として突合せ継手においてはアンダーカットが深くなるほど疲労強度は低下しており、疲労強度に及ぼす影響は著しいとしている。その値は深さが 0.9mm で疲労強度は約 51 パーセント低下している。しかし、すみ肉溶接継手においては 0.3mm 以上の深さでは深さを増しても疲労強度は下らないとしている。その原因としてすみ肉溶接継手のアンダーカットは切欠きが鋭くならないことと、十字すみ肉溶接止端ではすでに形状的に応力集中があり、その応力集中部に切欠きが存在しても切欠き効果が緩和されることと推察している。

小野塚ら[6][7]はビード止端の応力集中に着目し、アンダーカットを有する十字すみ

肉溶接継手の実験結果を紹介している。そこでは試験片の破断寿命はアンダーカット寸法の影響を強く受け、アンダーカットが深くなると寿命は極端に減少し、その値は深さが 1.0mm になると強度は 30 パーセント低下するとしている。

Bell ら [8] は、T 字すみ肉溶接継手の曲げ疲労試験を行い、深さが 0.5mm 程度以上のアンダーカットは疲労強度に著しい影響を与え、疲労強度は深さとともに低下するという結果を示している。

飯田ら [9] は、深さが 0.5mm~1.1mm のアンダーカットを有する十字すみ肉溶接継手試験体で両振り曲げ疲労試験を行っているが、アンダーカットは疲労強度を１０パーセントないし２５パーセント程度低下させるが、アンダーカット深さが 0.5mm 程度であっても 1.0mm 程度であっても疲労強度低下率に差はないとしている。

増原ら [10] はアンダーカットからのき裂発生・進展挙動について研究を行っておりアンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を調べている。そこではアンダーカットの有無は疲労強度に多少影響するが、200 万回疲労強度で約 8 パーセント低下する程度であり、深さは疲労強度に影響を及ぼさないという実験結果を示している。

このようにこれまでの研究ではアンダーカットの存在及び形状が疲労強度に及ぼす影響についてそれぞれ異なった結果を示している。また、これまでの研究 [11] の多くは、アンダーカットを有する継手の応力集中を検討する際、2 次元モデルで応力解析を行っている。2 次元モデルでの応力解析ではアンダーカットがトンネル状に存在しているとみなすことになる。実際にそのようなアンダーカットは存在しないため、2 次元モデルでは正確なアンダーカット部の応力集中を評価することができず、3 次元モデルにより詳細にアンダーカットの形状を表現する必要がある。すなわち、アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を定量的に評価するためには、局部的な応力集中を支配すると考えられるアンダーカットの形状を明らかにし、それに基づいた検討が有効であると考えられる。

1.3　目的

本研究では、アンダーカットの形状・寸法をレーザー変位計により測定し、アンダーカットの形状の特徴を明らかにした上で、アンダーカットを有する試験体と通常の試験体で疲労試験を行うことにより、アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を明らかにする。また、アンダーカットの実測結果に基づいてその形状を３次元でモデル化し、それに有限要素法を用いた応力解析を行うことでアンダーカット部の応力集中に

影響を及ぼす形状・寸法を調べ、アンダーカットの許容寸法について検討する。

第２章　アンダーカットの形状・寸法の特徴

2.1　レーザー変位計による測定

既往の研究ではアンダーカット有する試験体のアンダーカット寸法は深さのみを計測しているものが多く、アンダーカットの詳しい形状・寸法は明らかにはなっていない。アンダーカットの様々な形をしており、深さだけでアンダーカットの形状を決定することは検討が必要である。またアンダーカットの形状を３次元でモデル化し、応力解析を行うためには、アンダーカットの形状の特徴を明らかにし、その結果をもとにモデル化を行うことが必要である。

そこでアンダーカットの形状・寸法の特徴を明らかにするため、レーザー変位計を用いて、約 30 個のアンダーカットの形状を 0.1mm 間隔で格子状に測定した。測定項目は図 2.1 に示すように ρ:アンダーカット底の曲率半径、ｄ:深さ、W:開口幅、L:長さである。試験体は T 字すみ肉溶接継手試験体に連続して溶接し、ところどころにアンダーカットを設けた。アンダーカットの形状を計測後、切断し断面を切削した。試験体の全体を写真 2.1 に切削状況を写真 2.2 に示す。

用いたレーザー変位計は表 2.1 に示す特性を持つ LK-080 である。基準距離は変位計のレンズから対象物までの距離であり、測定範囲は基準距離から前後しても測定可能な範囲のことである。スポット径は小さい程、測定精度がよく細かい測定が可能である。測定は、試験体を台座に載せた状態で、多機能プログラマブルコントローラにより移動させ、台座の移動量とレーザー光の反射距離を記録することによって行った。レーザー変位計の制御には 3 次元形状プログラム EMS98AD-3D Ver.1.1 を用いた。多機能プログラマブルコントローラの主な特性を表 2.1 に示す。測定の状況を写真 2.3 に示す。なお、測定速度は 5.0mm/s としている。

2.2　測定結果

レーザー変位計によるアンダーカットの測定が、実際のアンダーカットの形状をどの程度再現できているかを確認するため､実際に計測したアンダーカットの断面を 0.5ｍｍ間隔で削り、断面を撮影した。その断面写真とレーザー変位計により測った同じアンダーカットの断面を比べた結果を図 2.2、 図 2.3 に示す。図 2.2 は比べたアンダーカットの深さ、開口幅、アンダーカット底の曲率半径の値を横軸に実測値、縦軸にレーザー変位計により計測した値をプロットしたものである。プロットが図中の実線

に近いほど精度が高いと言える。図 2.3 は実測値とレーザー変位計により計測した値を測定位置で比べたものである。図 2.4 にはそれぞれの断面写真とレーザー変位計により計測した断面を示している。この結果からレーザー変位計による測定は実際のアンダーカットの形状をよく再現しているといえる。

2.2　深さ・開口幅・曲率半径・長さの関係

レーザー変位計により測定した約 30 個のアンダーカットの測定結果を図 2.5（a）（b）（c）（d）に示す。（a）はアンダーカット深さ d と開口幅 W の関係を示したものである。図中の実線は d：W＝1：2 の関係を示している。アンダーカットは開口幅が広くなるにしたがって深さ d が大きくなる傾向が認められる。また、アンダーカットの深さは開口幅の半分以下となっている。（b）はアンダーカット底の曲率半径 ρ と開口幅 W の関係を示したものである。図中の実線は ρ：W＝1：2 の関係を示している。この場合も開口幅が広くなるにしたがってアンダーカット底の曲率半径が大きくなる傾向が確認された。また深さとアンダーカット底の曲率半径は開口幅の半分よりも小さくなっている。（c）はアンダーカット深さ d と曲率半径 ρ の関係を示したものである。図中の実線は ρ：d＝1：1 の関係を示している。先に深さと曲率半径は開口幅の半分程度以下になると示したが、両者に系統的な関係は認められない。（d）はアンダーカット長さ L と開口幅 W の関係を示している。長さと開口幅にも系統的な関係は認められない。

表 2.1　レーザー変位計の主な特性

形式	LK-080
基準距離	80mm
測定範囲	±15mm
スポット径	約φ70μm

多機能プログラマブルコントローラ	
制御軸数	2軸
座標表示範囲	999999999パルス
最大駆動速度	500kPPS
最小駆動速度	1PPS
加減速時間	0～1000ms

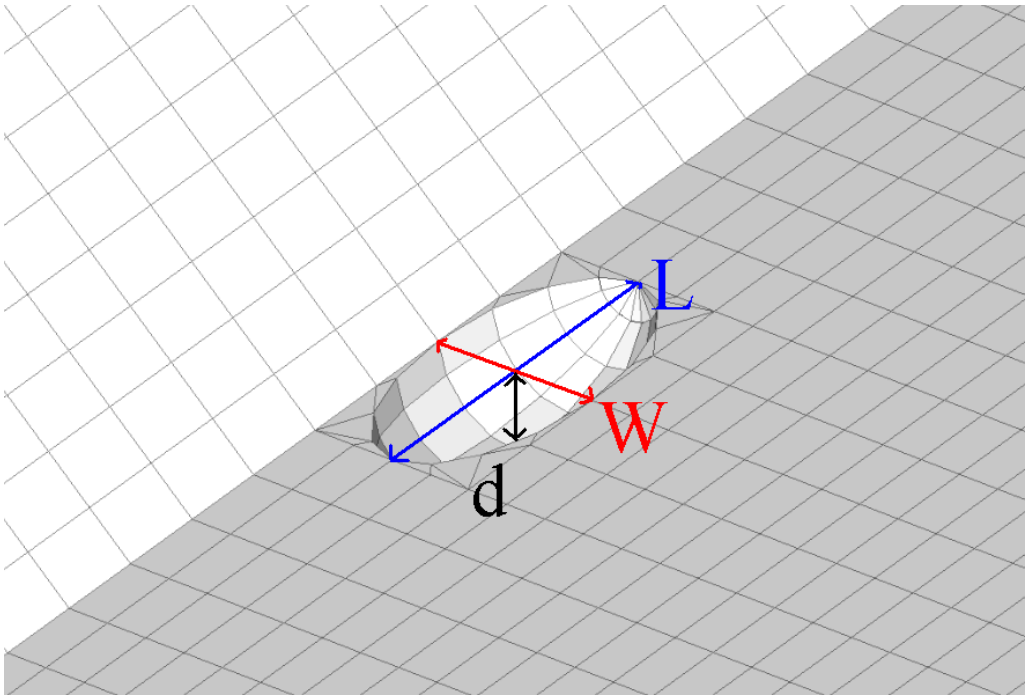


図 2.1（a）形状再現図

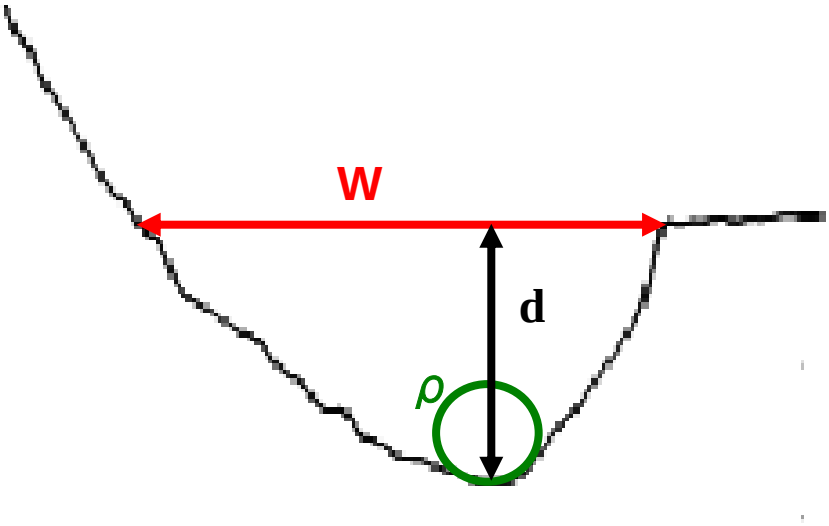


図 2.1（b）形状再現図

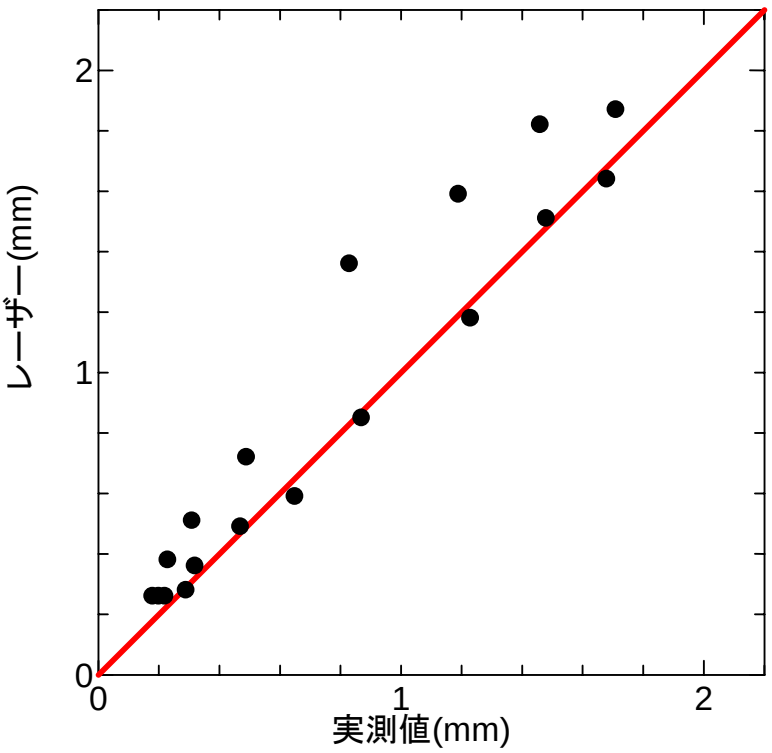


図 2.2（a）精度の確認（深さ）

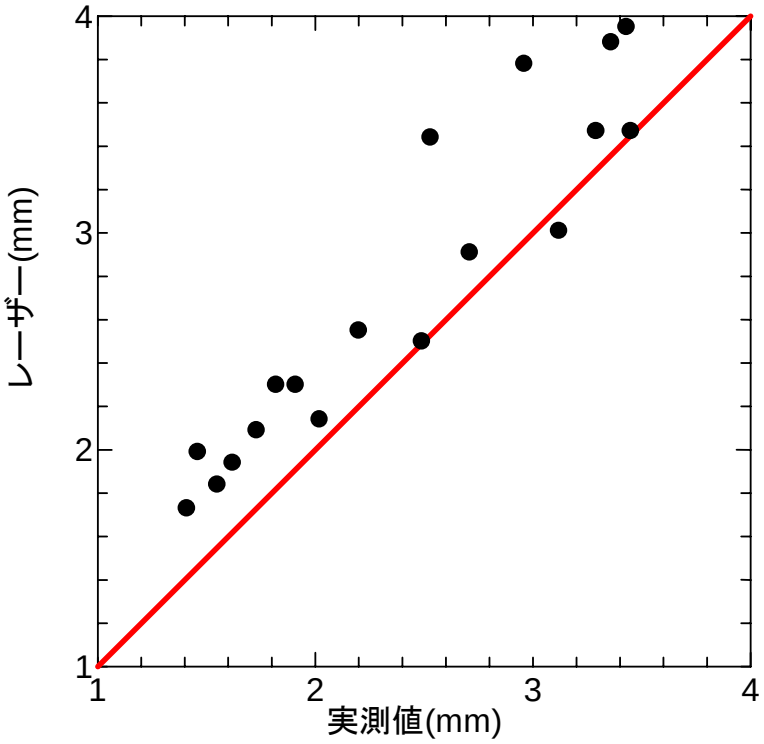


図 2.2（b）精度の確認（開口幅）

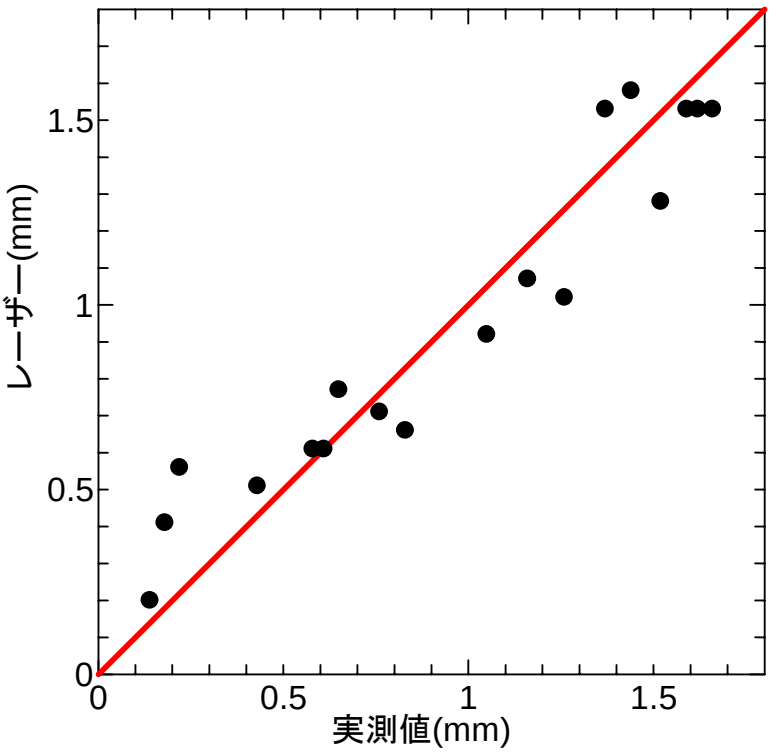


図 2.2（c）精度の確認（先端半径）

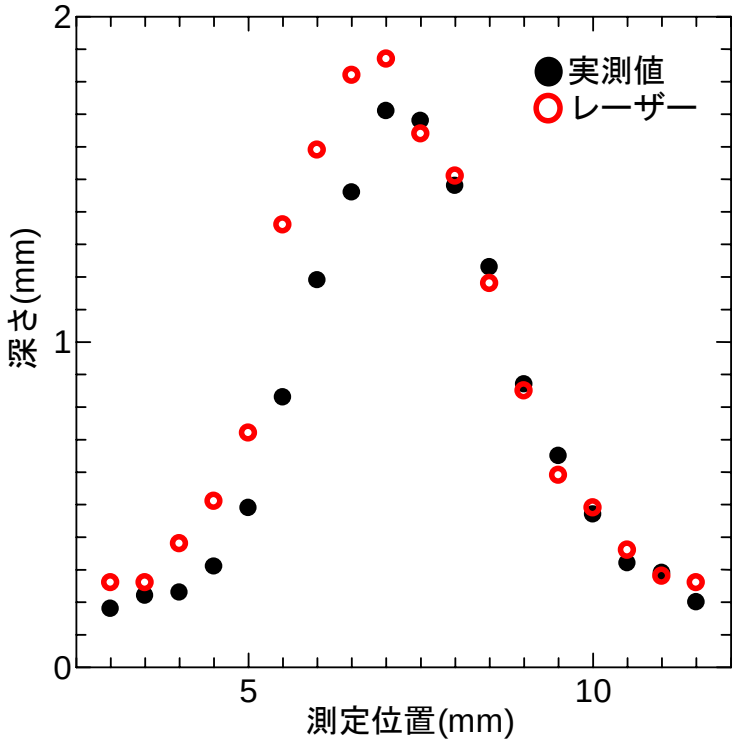


図 2.3（a）測定位置比較（深さ）

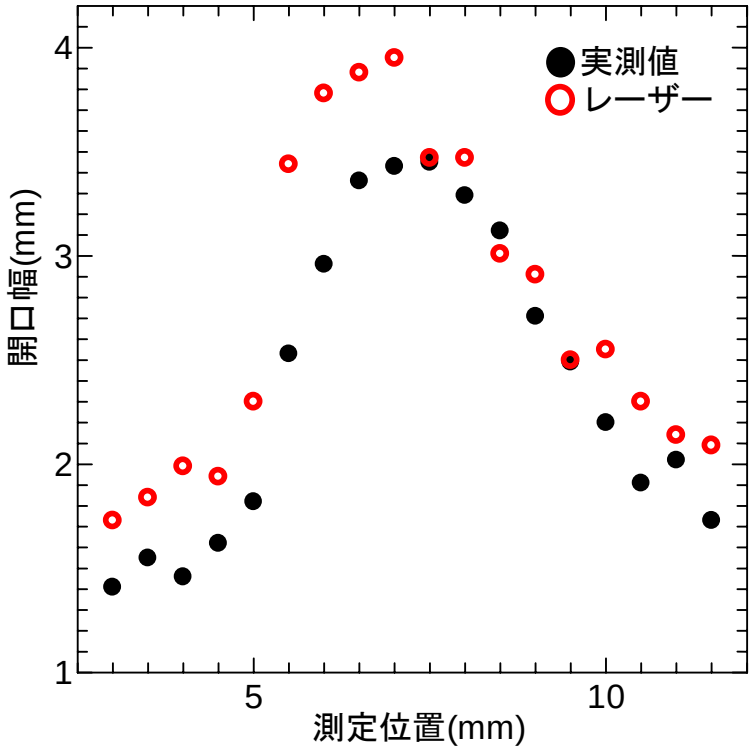


図 2.3（b）測定位置比較（開口幅）

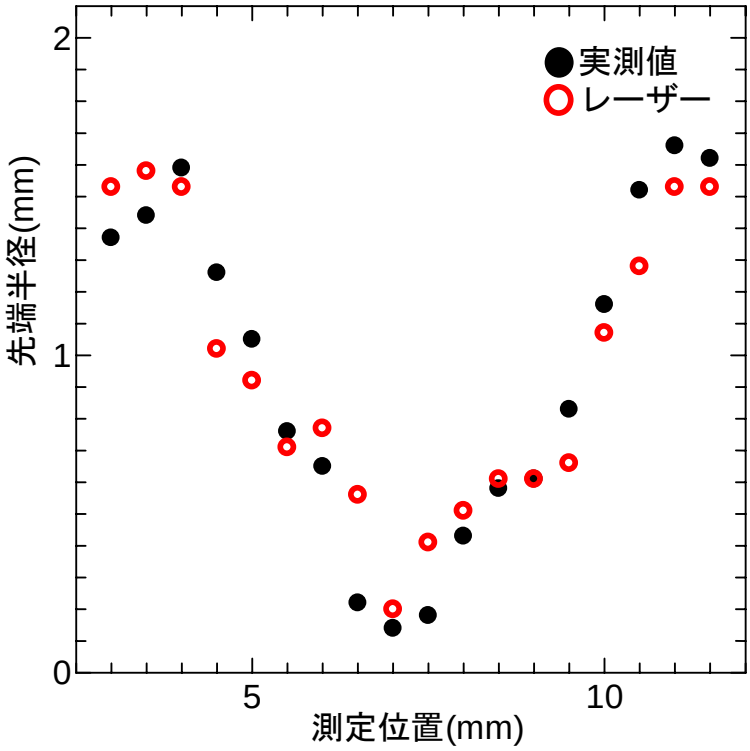


図 2.3（c）測定位置比較（先端半径）

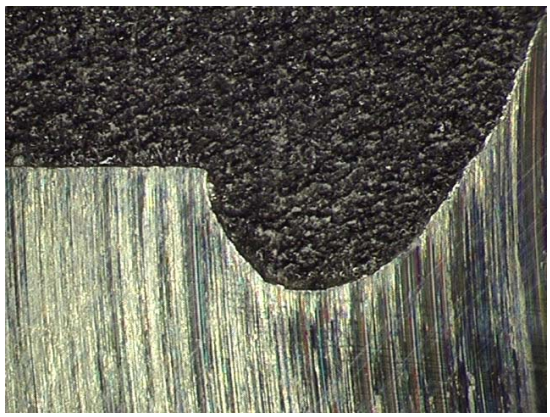
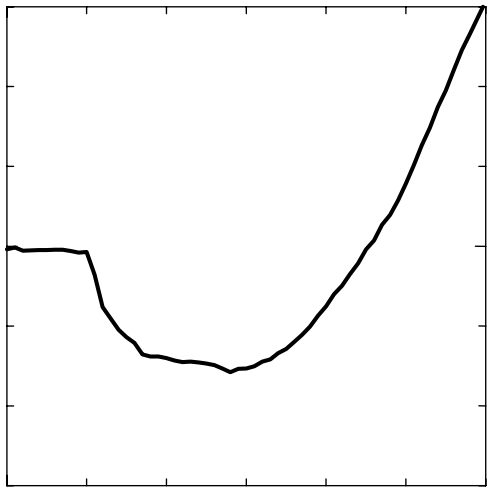
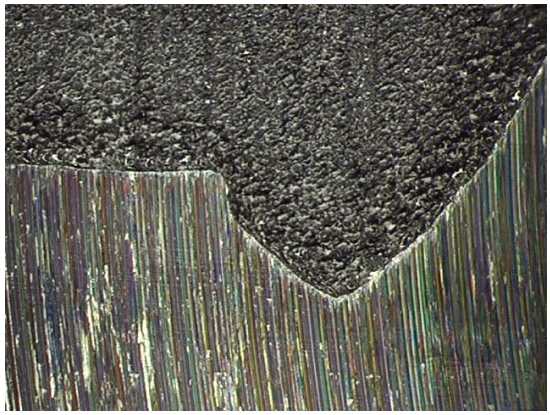
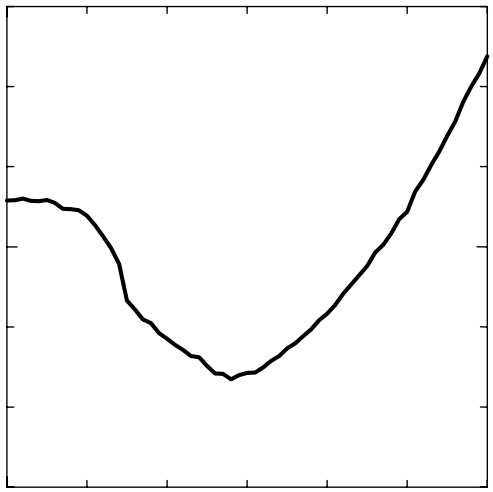
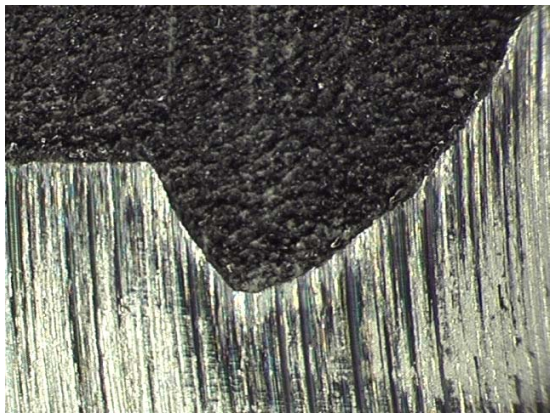
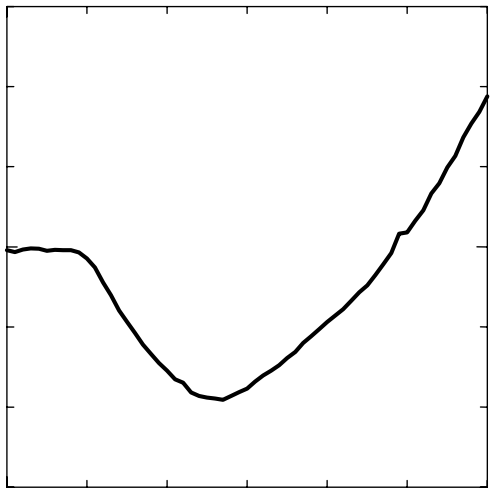
番号	断面写真	レーザー変位計断面
1		
2		
3		

図 2.4 アンダーカット断面図①

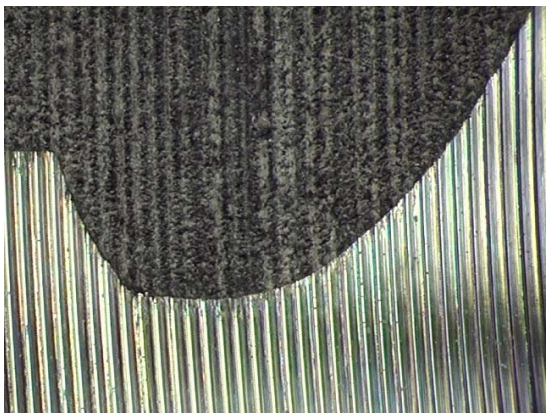
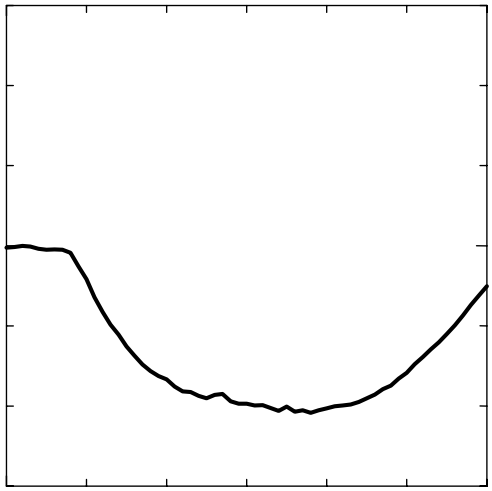
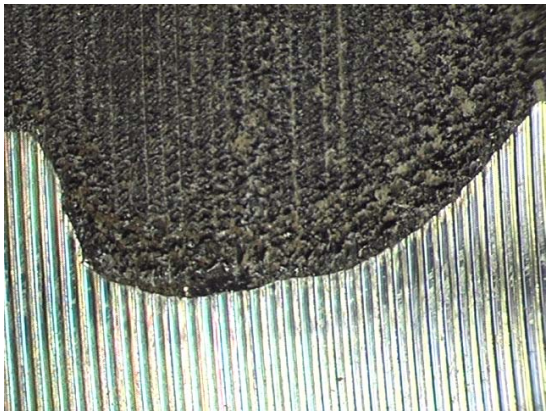
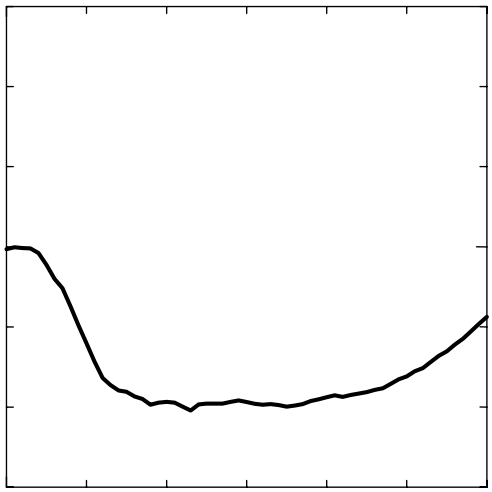
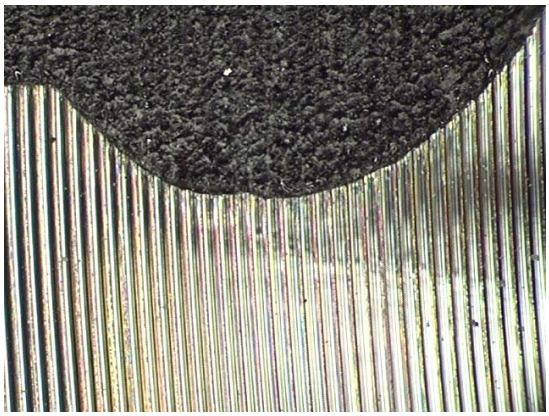
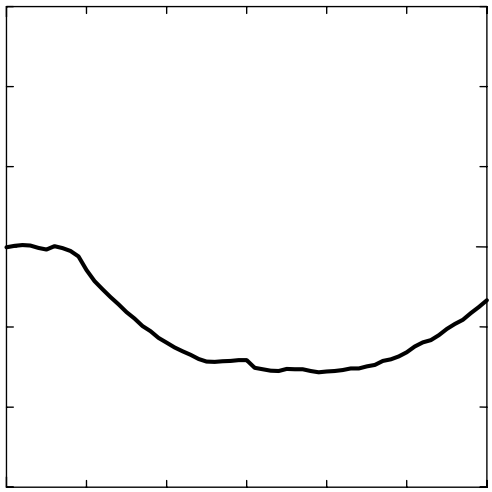
番号	断面写真	レーザー変位計断面
4		
5		
6		

図 2.4 アンダーカット断面図②

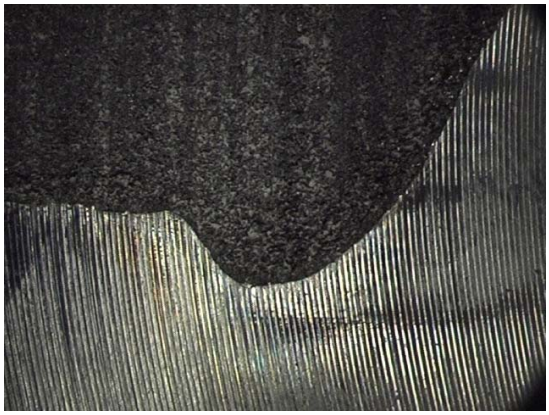
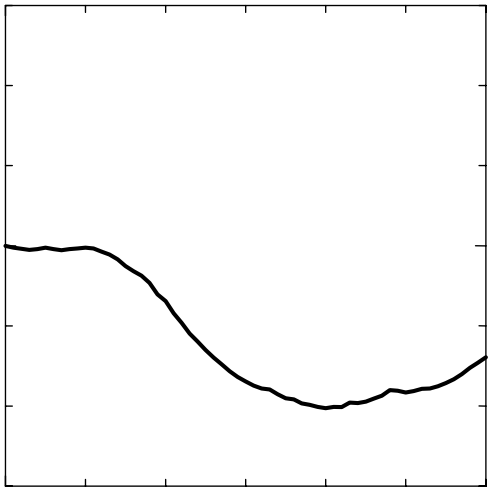
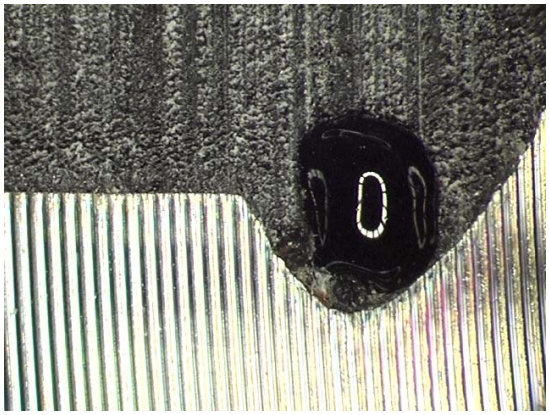
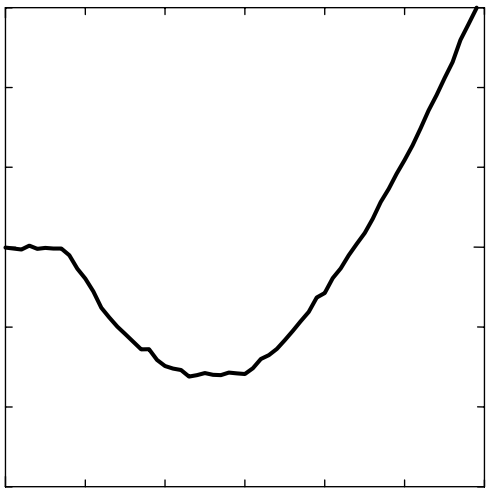
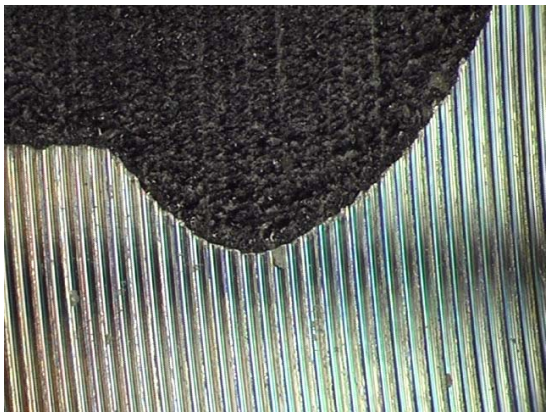
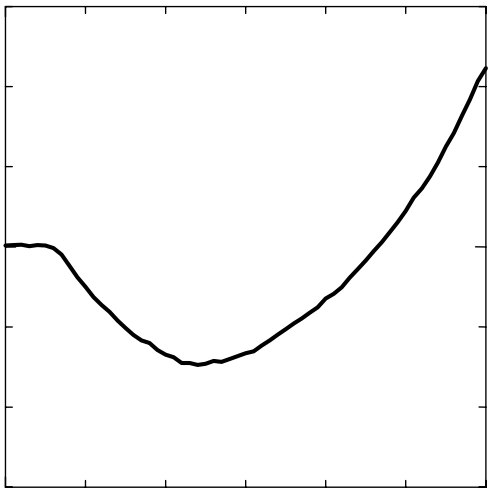
番号	断面写真	レーザー変位計断面
7		
8		
9		

図 2.4 アンダーカット断面図③

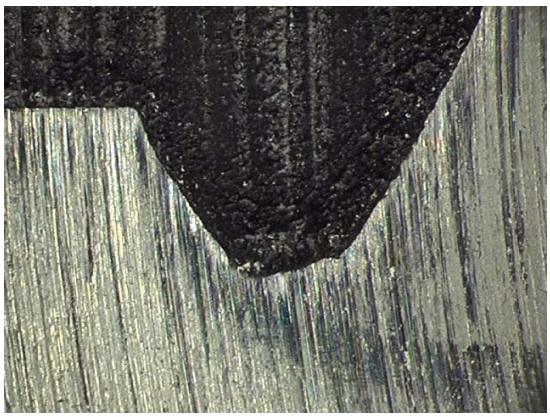
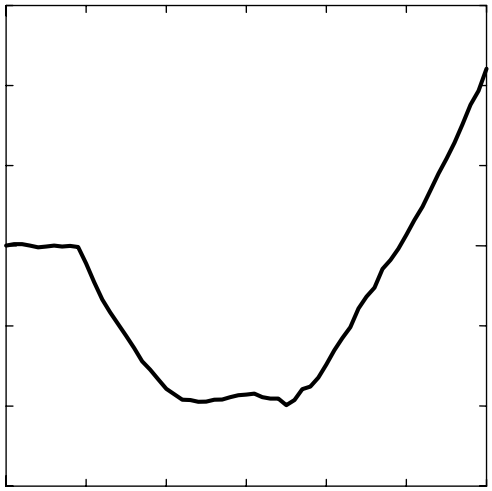
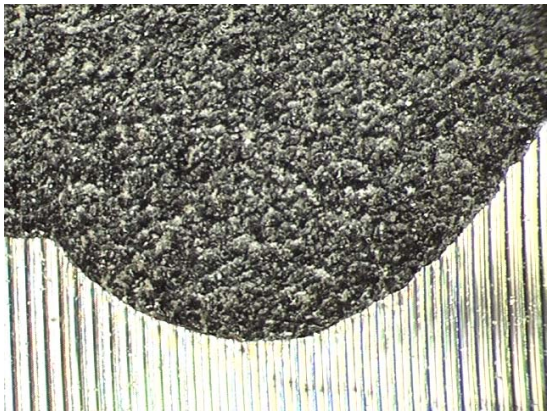
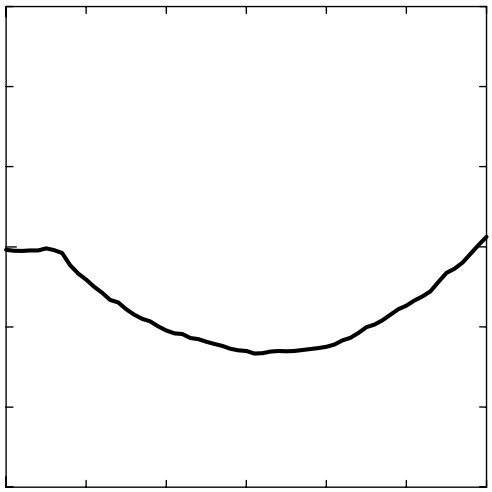
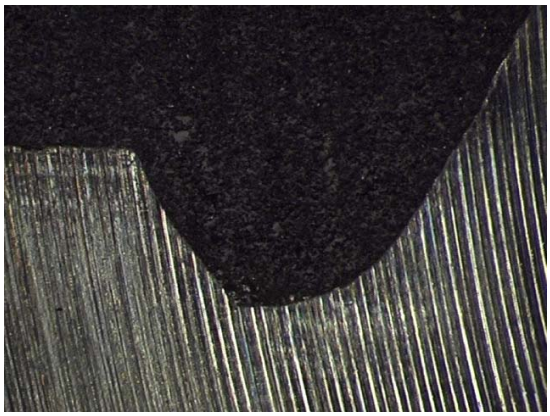
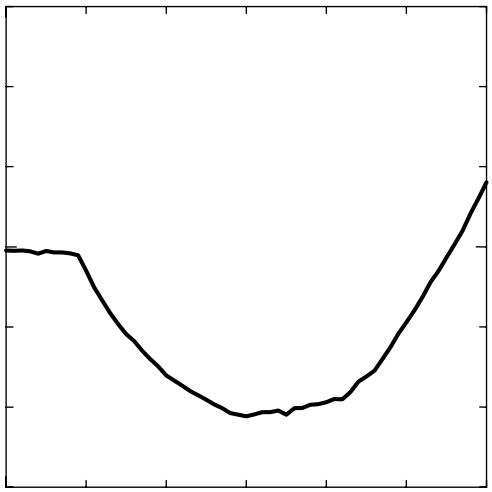
番号	断面写真	レーザー変位計断面
10		
11		
12		

図 2.4　アンダーカット断面図④

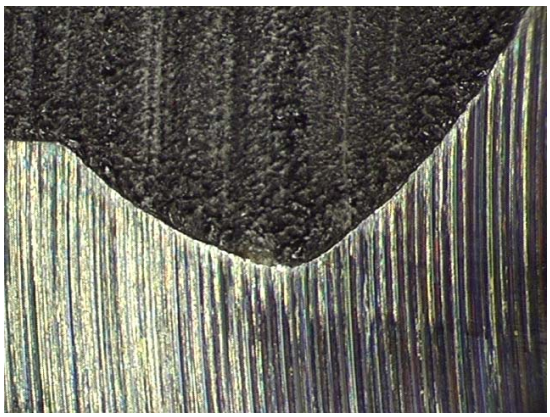
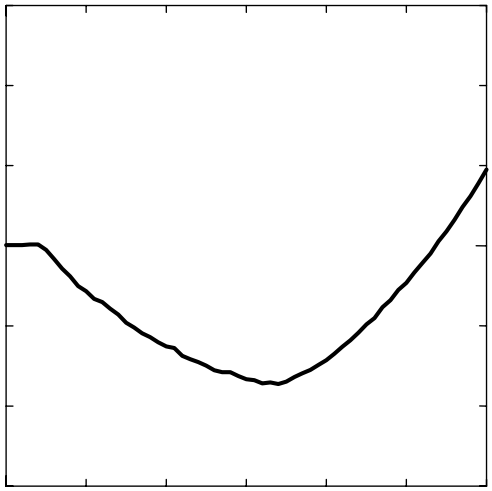
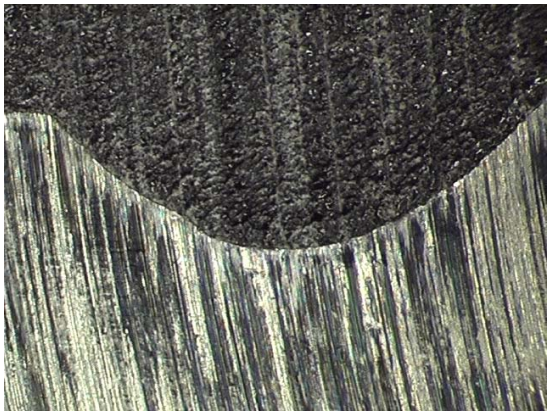
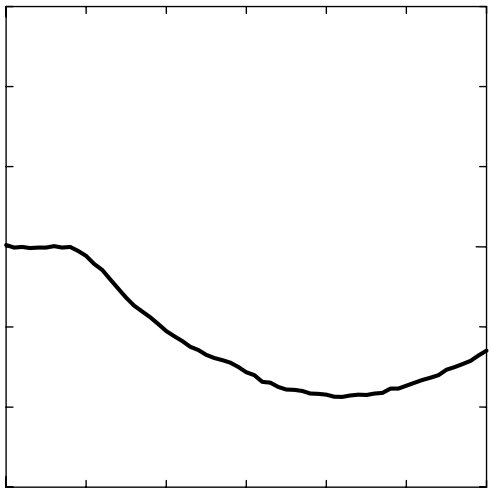
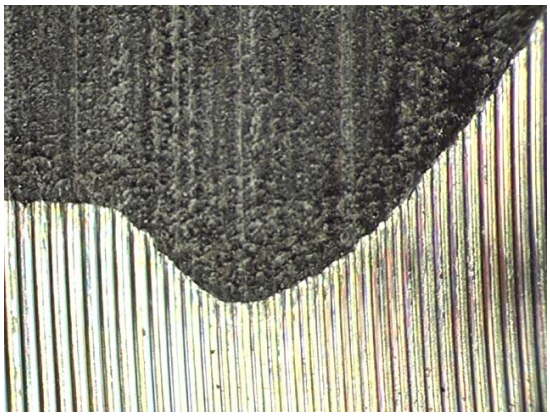
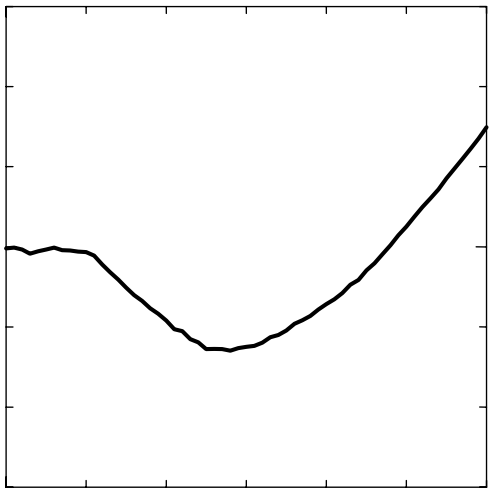
番号	断面写真	レーザー変位計断面
13		
14		
15		

図 2.4　アンダーカット断面図⑤

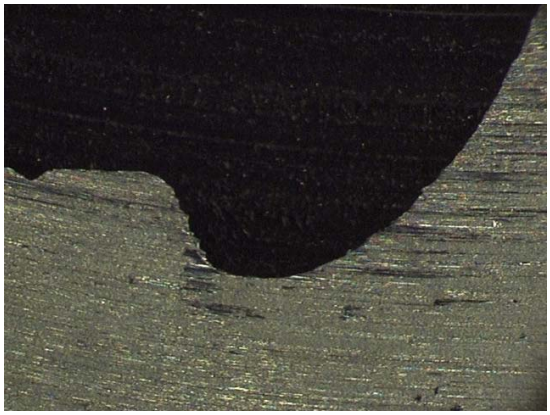
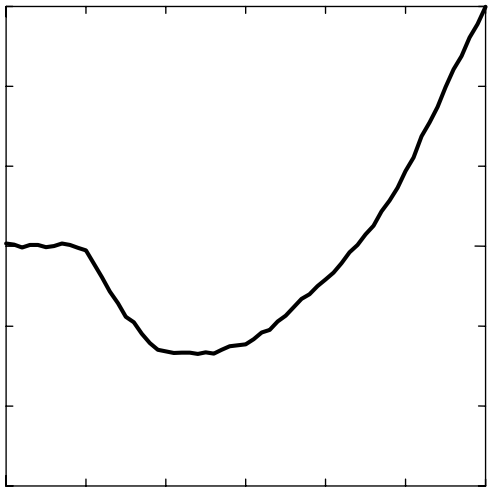
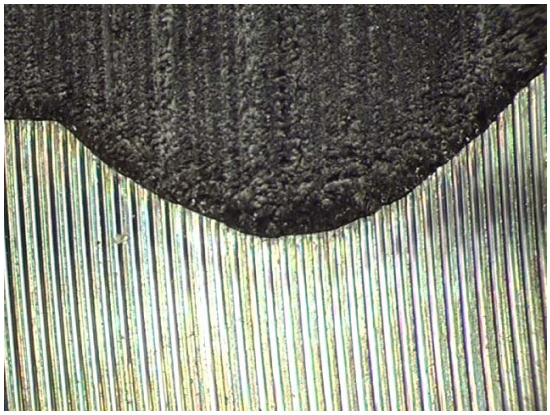
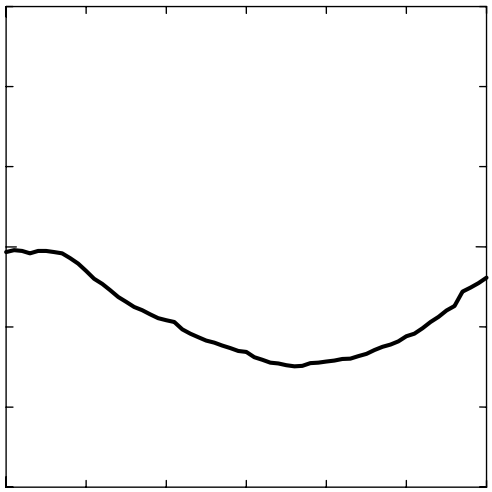
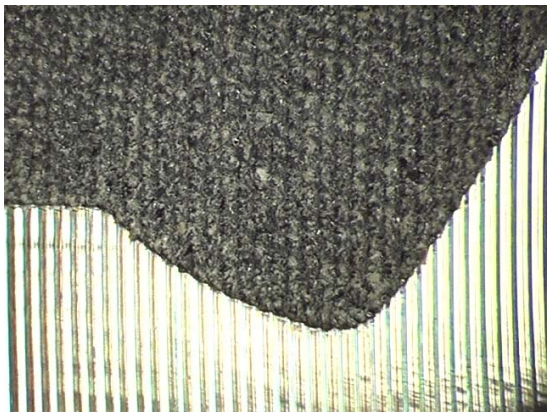
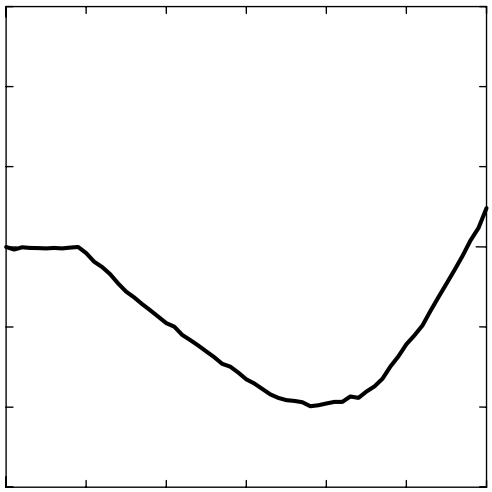
番号	断面写真	レーザー変位計断面
16		
17		
18		

図 2.4 アンダーカット断面図⑥

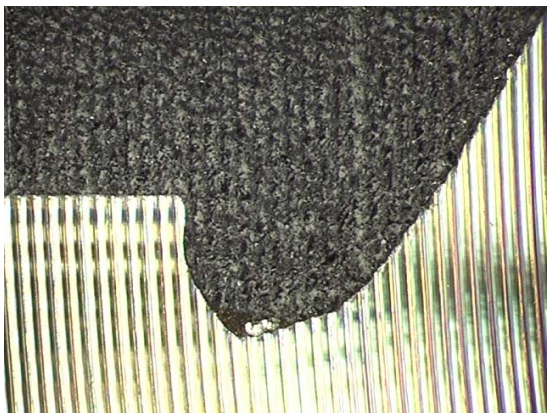
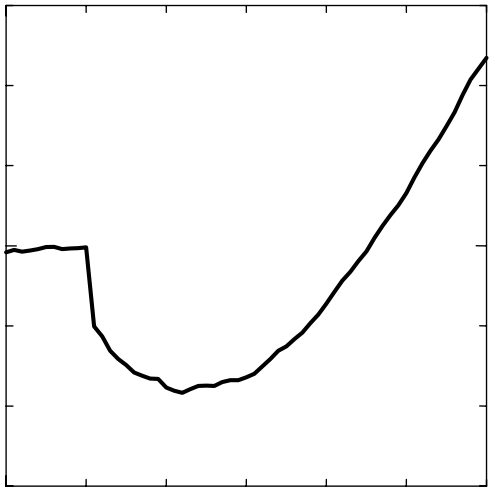
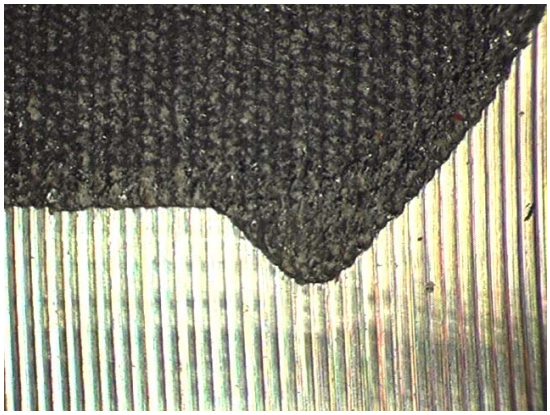
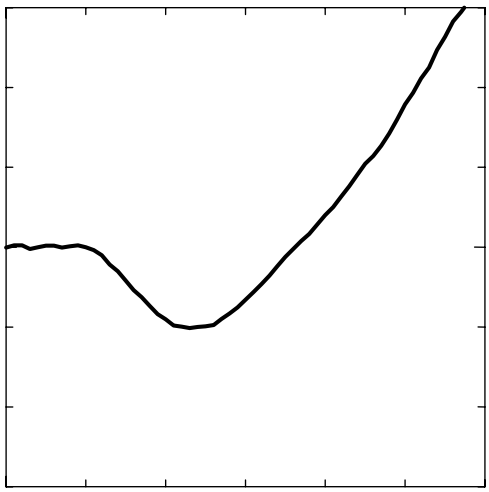
番号	断面写真	レーザー変位計断面
19		
20		

図 2.4 アンダーカット断面図⑦

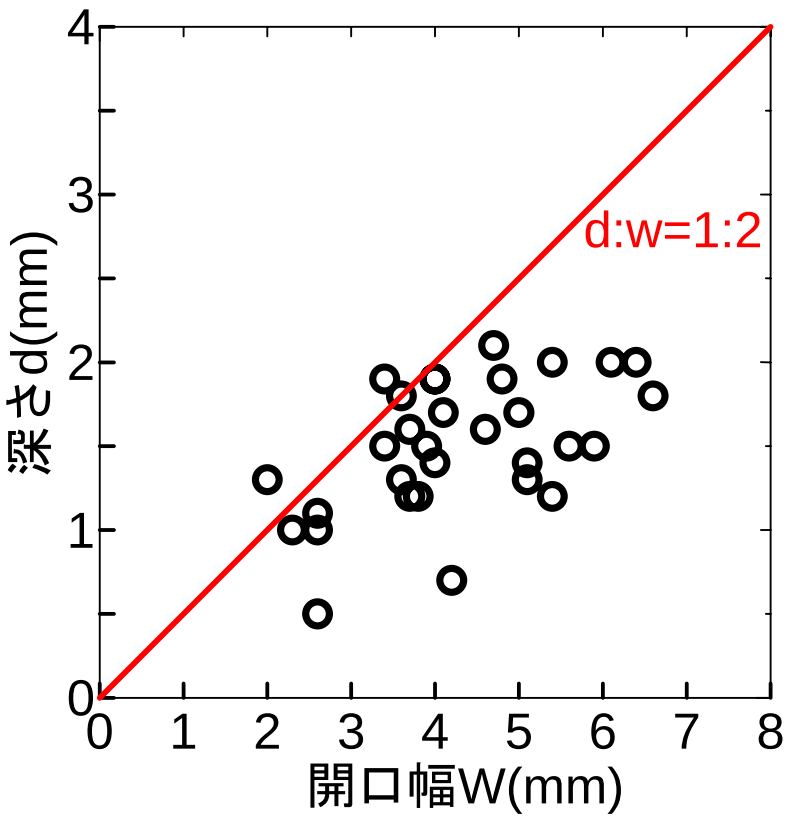


図 2.5（a）アンダーカット深さ d と開口幅 W の関係

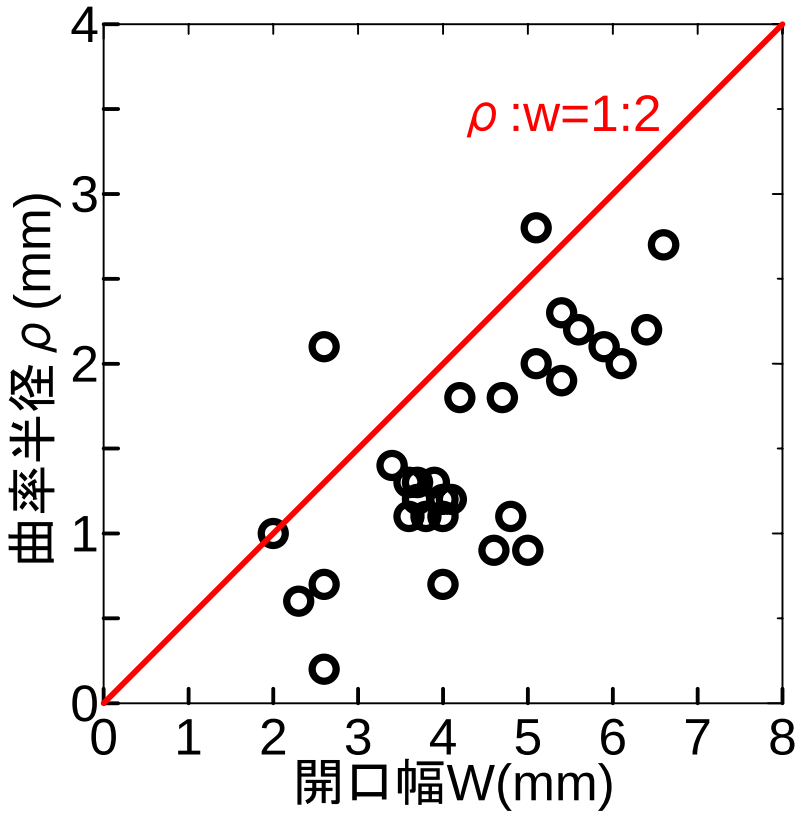


図 2.5（b）アンダーカット底の曲率半径 ρ と開口幅 W の関係

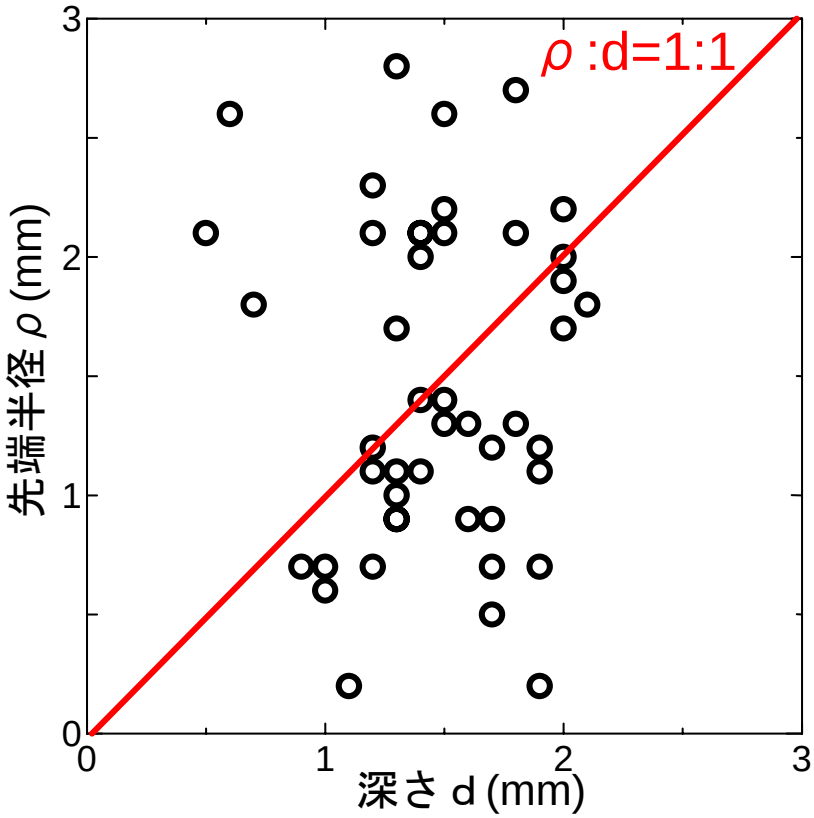


図 2.5（c）アンダーカット底の曲率半径 ρ と深さ d の関係

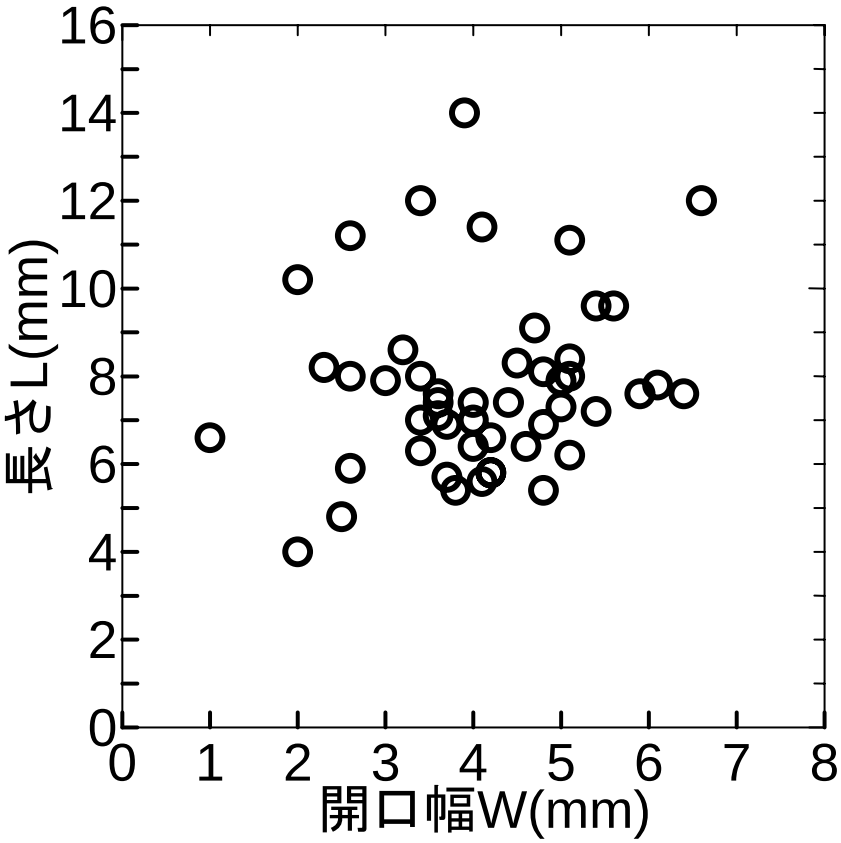


図 2.5（d）アンダーカット長さ L と開口幅 W の関係

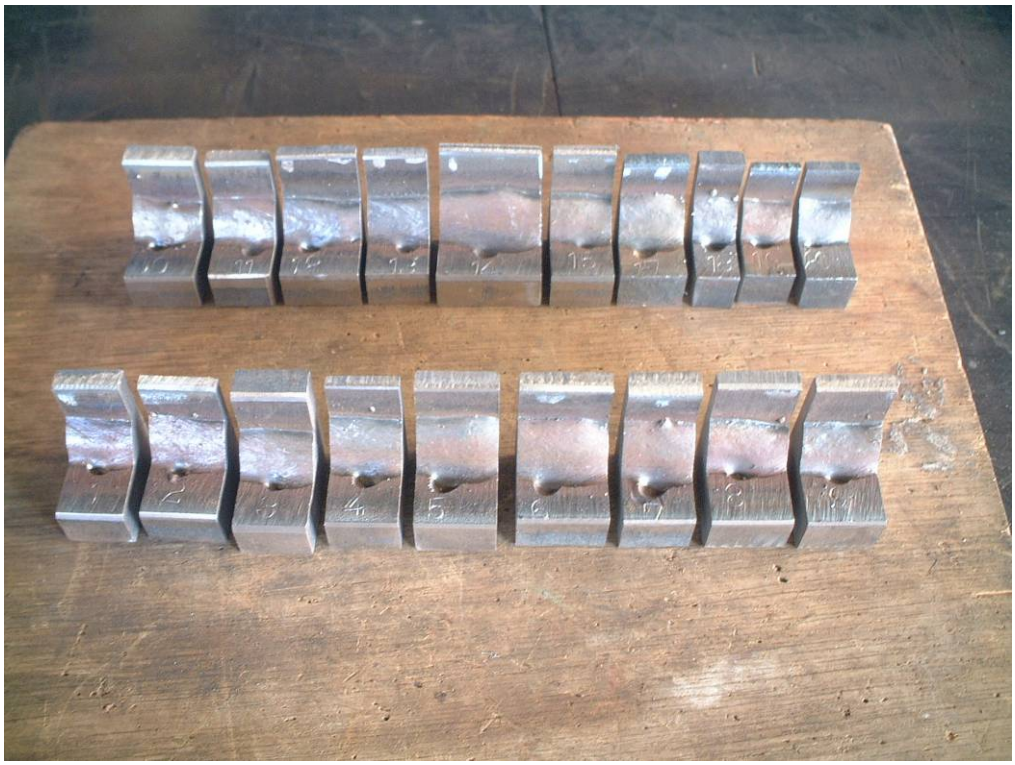


写真 2.1　計測用アンダーカット

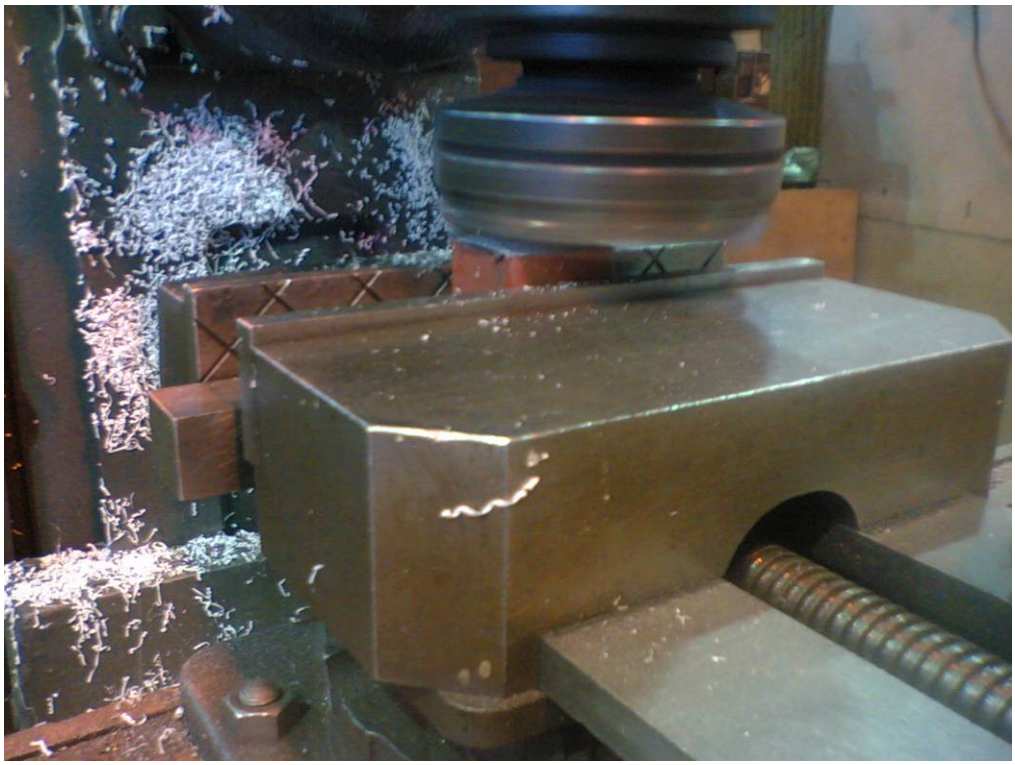


写真 2.2　アンダーカット切削状況

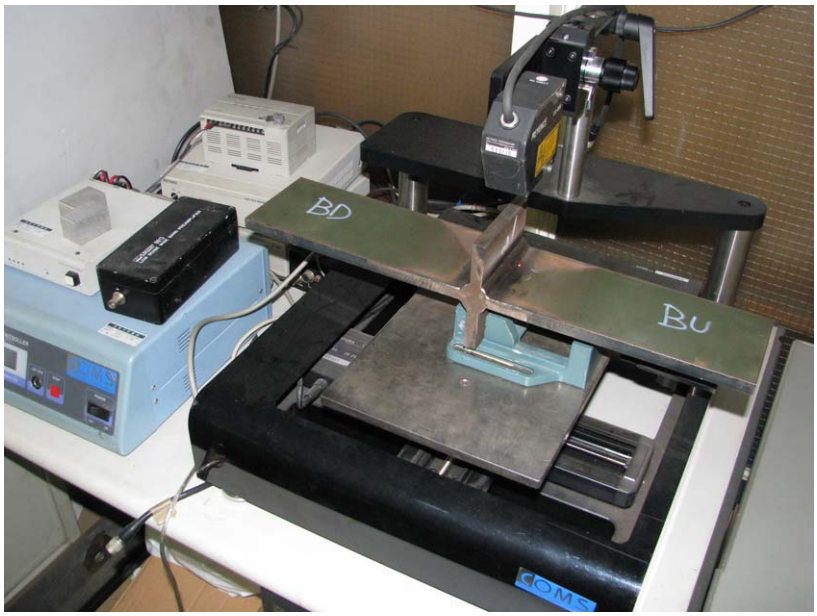


写真 2.3　アンダーカット測定状況

第3章　試験体

3.1　試験体の製作

供試鋼材は板厚 12ｍｍの溶接構造用鋼材　JIS SM490Y 材である。鋼材の機械的性質と化学成分を表 3.1 に示す。この鋼材を用いて製作した試験体は十字リブすみ肉溶接継手である。試験体はアンダーカットを含まない試験体と溶接止端部にアンダーカットを故意に設けた試験体の２種類からなっている。試験体の形状と寸法を図 3.1 に、試験体とアンダーカットの外観を写真 3.1 と 3.2 に示す。溶接箇所を示す記号は表:F、裏:B、上:U、下:D としている。

試験体の製作は 1 体ずつ個々に行い、溶接の始終端部にはエンドタブを使用した。溶接が終了した後、ガス切断でエンドタブを取り除き、その面をディスクグラインダーで仕上げた。溶接作業の状況を写真 3.3 に示す。溶接は、すべてフラックスコアワイヤ JIS　Z3313　YFW-C50DM を用いて CO_2 溶接により水平姿勢で行った。溶接時の電流は 250A、溶接電圧は 33V、溶接速度は 40cm/min、とした。溶接条件を表 3.2 に示す。溶接材料の機械的性質と化学成分を表 3.3 に示す。溶接脚長は 6mm を目標とし、溶接止端部にアンダーカットを設ける場合には、運棒方法を工夫している。

3.2　溶接部の形状

アンダーカットを含まない試験体溶接部の外観を写真 3.4 に示す。試験体の溶接脚長は、試験体全幅に渡ってほぼ一様であり、止端を示すラインはほぼ直線となっている。アンダーカットのない試験体、アンダーカットを有する試験体のすべてにおいて図 3.2 に示すように溶接部止端部の主板側と付加板側の溶接脚長、止端部の曲率半径（ρ）、フランク角（θ）を測定した。測定は、溶接部の錆や汚れを取り除いた後、歯科医用印象材（親水性ビニールシリコン印象材）で型取りを行い、採取した型をスライスし、それらを 20 倍の拡大投影機で観察することにより行った。型は各試験体 4 箇所の溶接部から採取し、溶接部全体から約 2.0mm 幅で 9 枚スライスし測定に用いた。

測定結果を表 3.4 に示す。アンダーカットのない試験体の主板側脚長の平均値は 6.75mm、標準偏差は 0.44mm、付加板側脚長の平均値は 8.52mm、標準偏差は 0.49mm、主板側曲率半径の平均値は 1.50mm、標準偏差は 0.23mm、付加板側曲率半径の平均値は 0.53mm、標準偏差は 0.14mm、 フランク角の平均値 114 度、標準偏差は 3.02 度、である。

アンダーカットを有する試験体の主板側脚長の平均値は 6.78mm、標準偏差は 0.50mm、付加板側脚長の平均値は 7.97mm、標準偏差は 0.72mm、主板側曲率半径の平均値は 1.50mm、標準偏差は 0.32mm、付加板側曲率半径の平均値は 0.55mm、標準偏差は 0.17mm、 フランク角の平均値 116 度、標準偏差は 3.31 度、である。このようにアンダーカットの有無による溶接形状の違いはほとんどない。

アンダーカットを有する試験体については、その試験体に存在するアンダーカットの形状・寸法（ρ:アンダーカット底の曲率半径、d:深さ、W:開口幅、L:長さ）を計測した。この場合、歯科医用印象材を使用するとアンダーカットの底まで入らず、詳細な形が計測できないため、前章に示したレーザー変位計を使用し 0.1mm 間隔で格子状に測定した。測定したアンダーカット寸法を表 3.5 に示す。アンダーカット深さは 0.5mm～2.0mm、開口幅は 2.0mm～6.0mm、底の曲率半径は 0.2mm～2.9mm、長さは 4.0mm～14.5mm となっていた。すべての試験体において深さ 1.0mm 以上のアンダーカットが 1 つは含まれており、最大で 2.0mm のものがあった。アンダーカット底の曲率半径は上記の範囲でばらつきが生じていた。

表 3.1 SM490Y の機械的性質と化学成分

機械的性質		
降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm2)	伸び(%)
410	550	26

化学成分(%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.16	0.22	1.46	0.014	0.004	0.01
Ni	Cr	Mo	V	Seq1	
0.01	0.02	0.01	0.05	0.42	

表 3.2　溶接条件

溶接姿勢		水平			
溶接ワイヤ		MX-Z200(JIS Z 3313 YFW-C50DM) 1.2mm			
ガス流量		CO2 100% 25l／min			
パス数	電流 (A)	電圧(V)	溶接時間 (sec)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)
1	250	33	15	40	12.4

表 3.3　溶接材料の機械的性質と化学成分

機械的性質		
降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm2)	伸び(%)
463	555	29

化学成分(%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.04	0.53	1.65	0.007	0.009	0.02

表 3.4　溶接形状測定結果

試験体	供試体数	主版側脚長（mm）		付加板側脚長（mm）	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
アンダーカットなし	324	6.75	0.44	8.52	0.49
アンダーカットあり	648	6.78	0.50	7.97	0.72

試験体	主版側曲率半径（mm）		付加板側曲率半径（mm）		フランク角（度）	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
アンダーカットなし	1.50	0.23	0.53	0.14	114.29	3.02
アンダーカットあり	1.50	0.32	0.55	0.17	115.90	3.31

表 3.5 アンダーカット寸法

試験体番号	溶接箇所	深さd（mm）	開口幅 W（mm）	曲率半径 ρ（mm）	長さ L（mm）
1	FU	1.9	3.4	0.2	12
	BD	1.3	2	1.0	10.2
2	FU	1.4	5.1	2.0	8.4
3	FU	1.1	2.6	0.2	8
	BD	1.0	2.3	0.6	8.2
4	FU	0.5	2.6	2.1	11.2
	FD	1.5	3.9	1.3	14
5	FU	1.7	4.1	1.2	11.4
	BD	1.2	5.4	2.3	7.2
6	FU	0.7	4.2	1.8	5.8
	BD	1.2	3.8	1.1	5.4
7	FU	1.3	2.5	0.9	4.8
	BD	1.2	3.0	0.7	7.9

表 3.5 アンダーカット寸法（つづき）

試験体番号	溶接箇所	深さd（mm）	開口幅 W（mm）	曲率半径 ρ（mm）	長さ L（mm）
8	FU	1.3	3.6	0.9	7.4
	BD	0.6	3.2	2.6	8.6
9	FU	1.4	4.4	1.4	7.4
	BD	1.2	4.2	2.1	6.6
10	FU	2	5.1	1.7	6.2
	FU	0.6	5.0	3.5	7.9
	BD	1.7	3.4	0.7	6.3
11	FD	1.4	4.8	2.1	6.9
	BU	1.5	5.1	2.6	8
	BD	1.8	4.5	2.1	8.3
12	FU	1.7	3.4	0.5	8
	FU	0.9	2.0	0.7	4
	BD	1.4	4.2	2.1	5.8
13	FD	1.3	4.1	1.7	5.6
	BU	0.7	4.8	4.3	5.4
	BD	1	4.7	4.1	6.6
14	FU	0.9	6.0	1.7	6
	BD	1.8	4.0	0.7	6.4
15	FU	1.3	4.4	1.8	6.5
	BU	0.8	3.6	1.4	13.9
	BD	0.6	5.8	1.5	13.5
16	FU	1.0	2.4	0.2	8.5
	BD	0.9	2.3	0.6	10.8
17	FU	1.3	4	1.0	5.4
	BD	1.4	3.9	0.6	5.2
18	FU	1.4	4.9	0.6	6.3
	BU	0.7	2.4	2.5	12
	BD	0.9	3.3	2.9	14.5

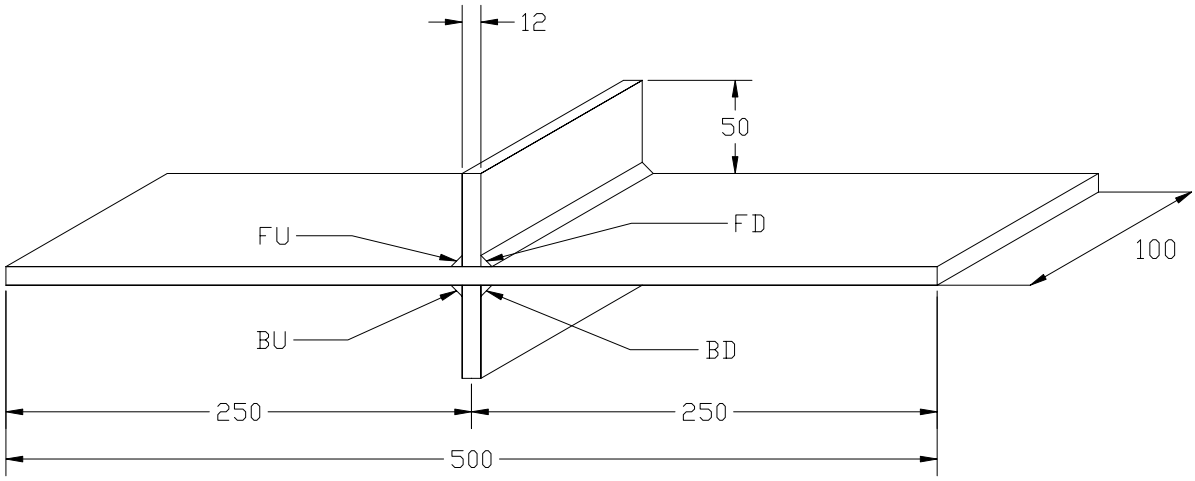


図 3.1　試験体の形状と寸法

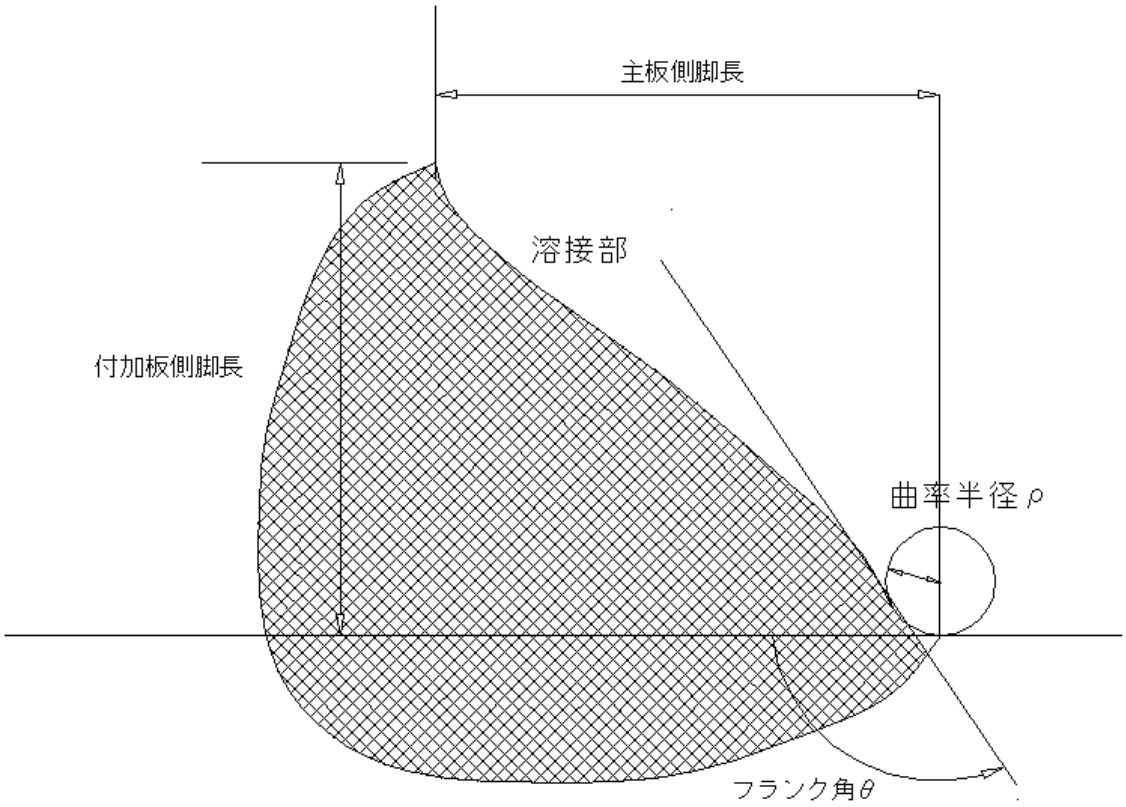
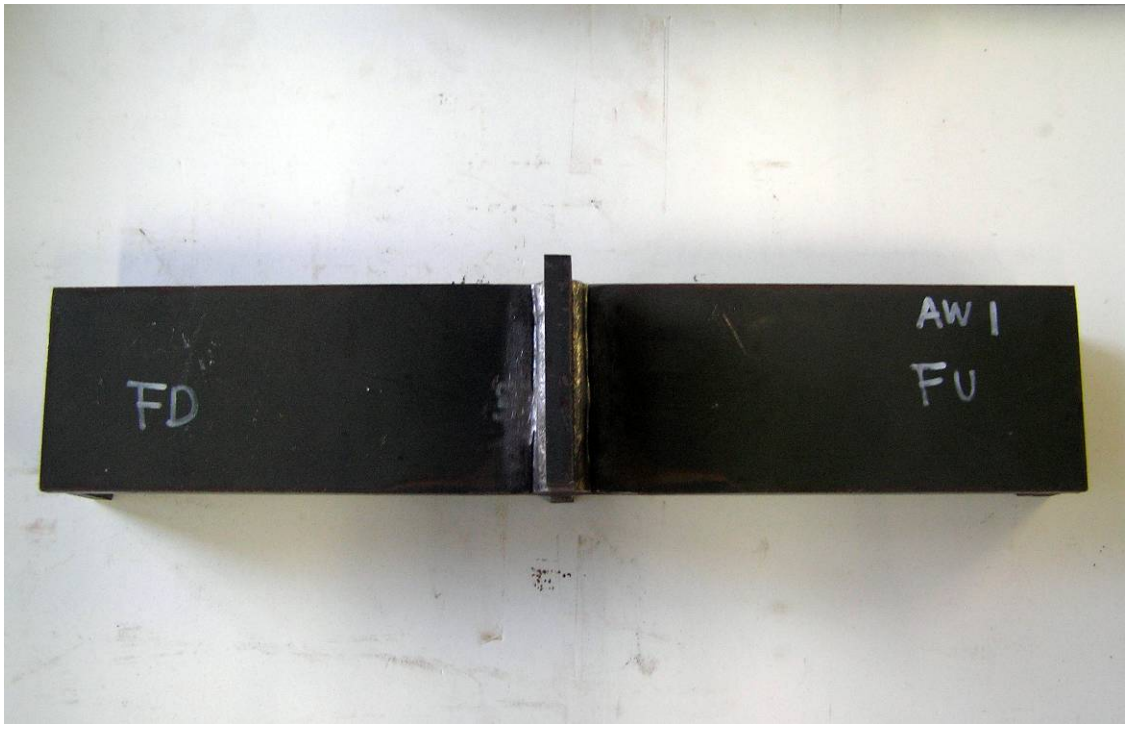


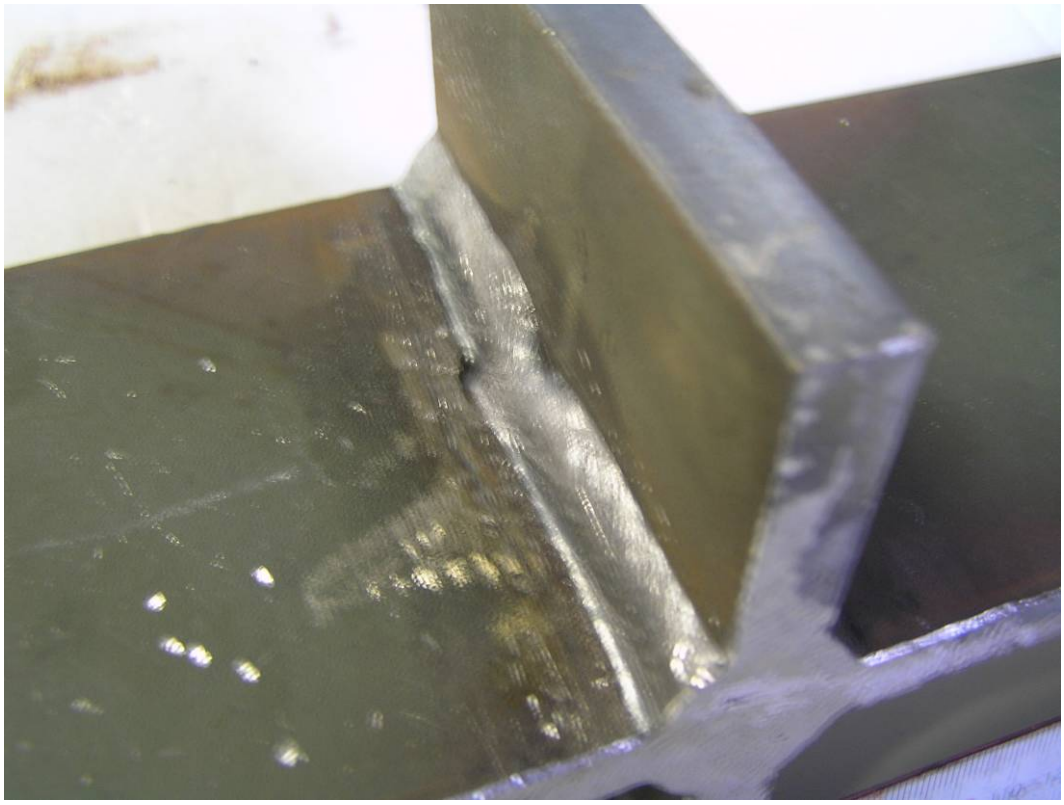
図 3.2　溶接部形状



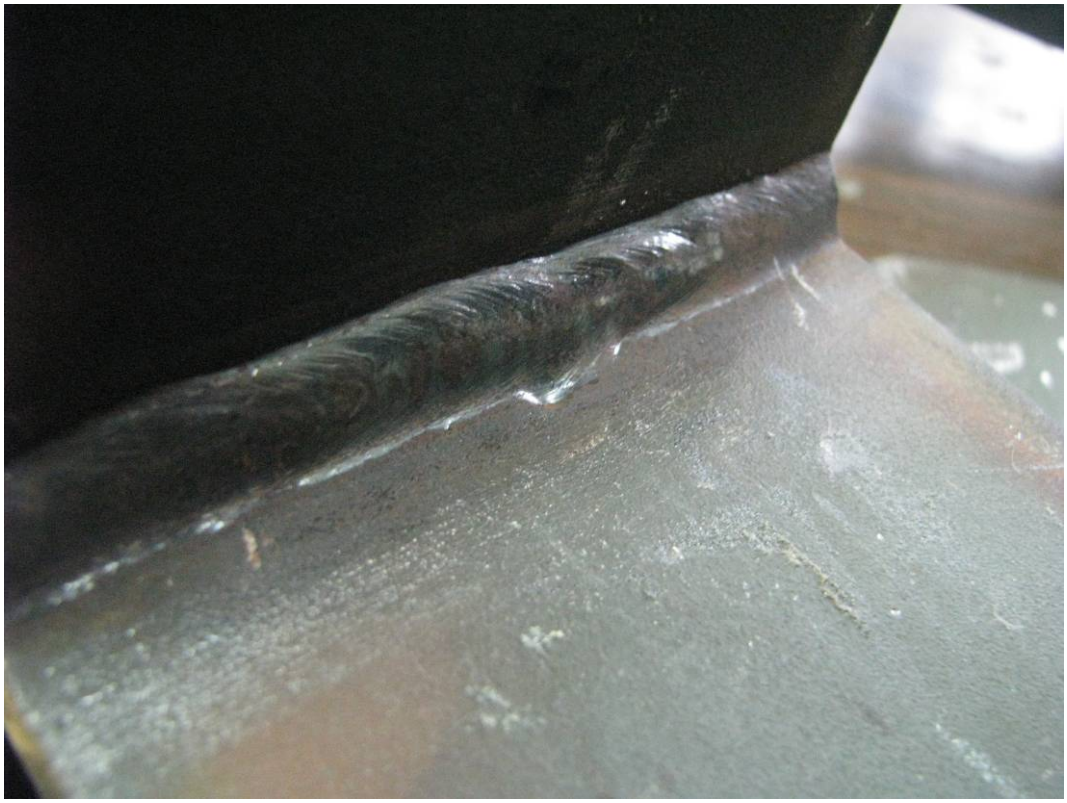
アンダーカットなし

アンダーカットあり

写真３.1　試験体写真

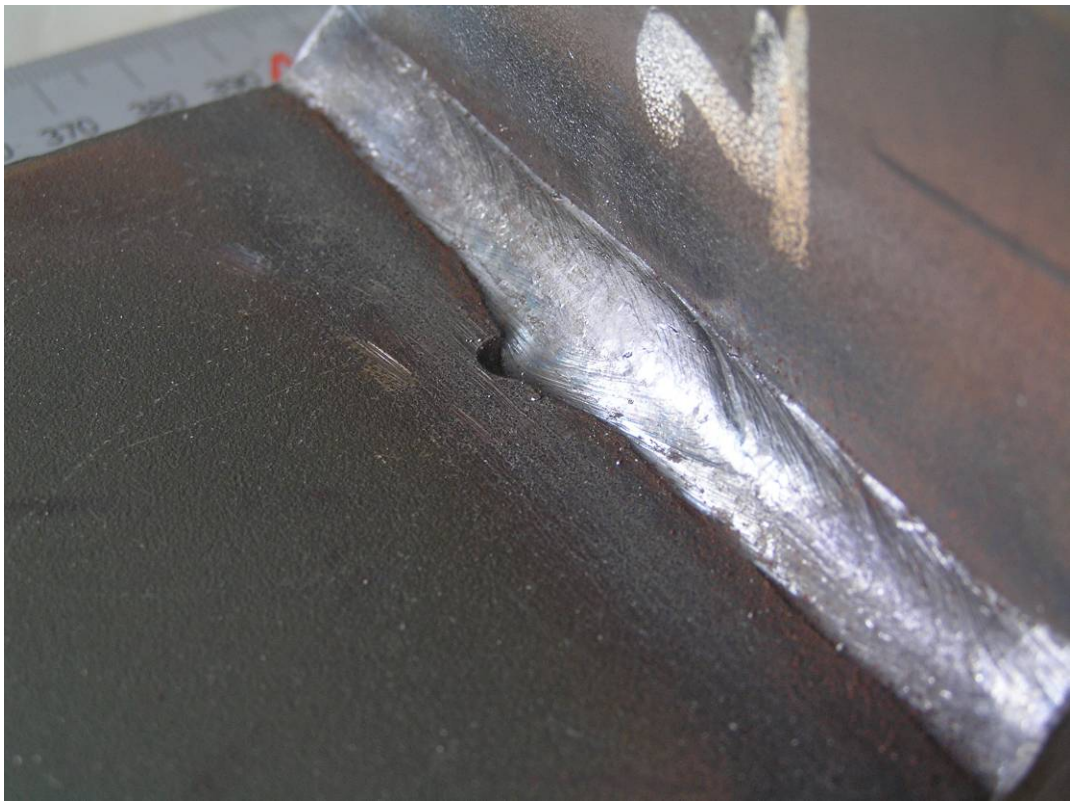


1 FU



1BD

写真 3.2　アンダーカット外観①



2FU

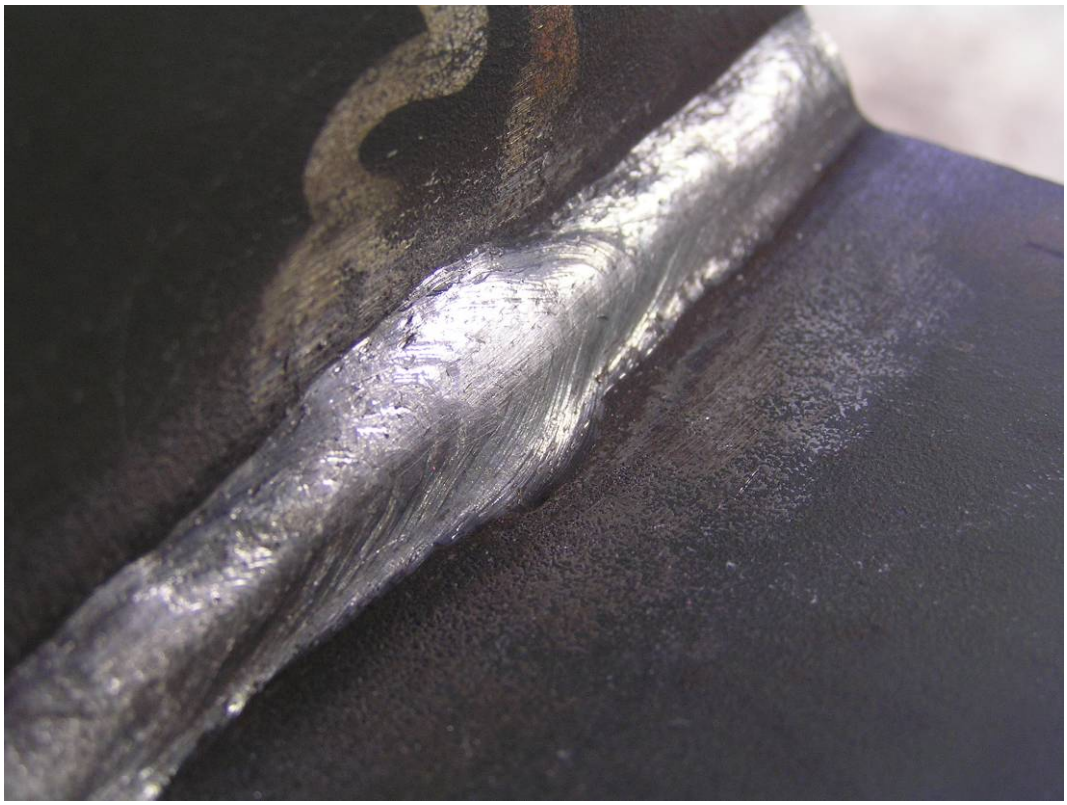
3FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真②

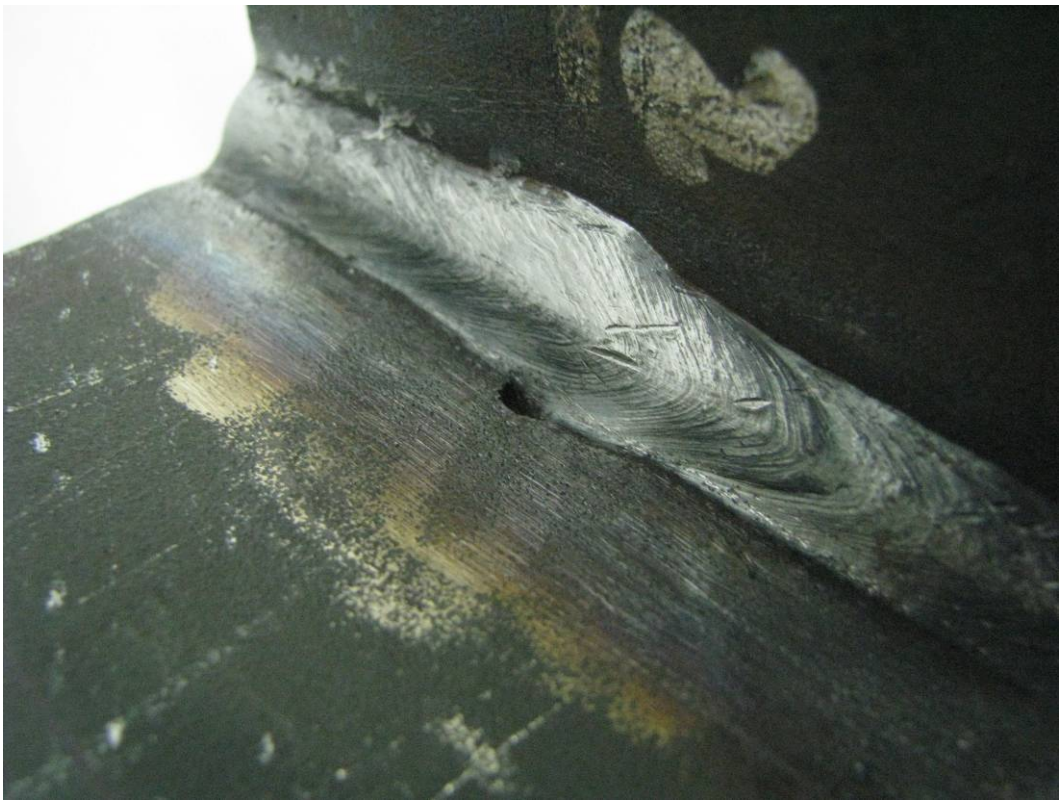
3BD

4FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真③



4FD



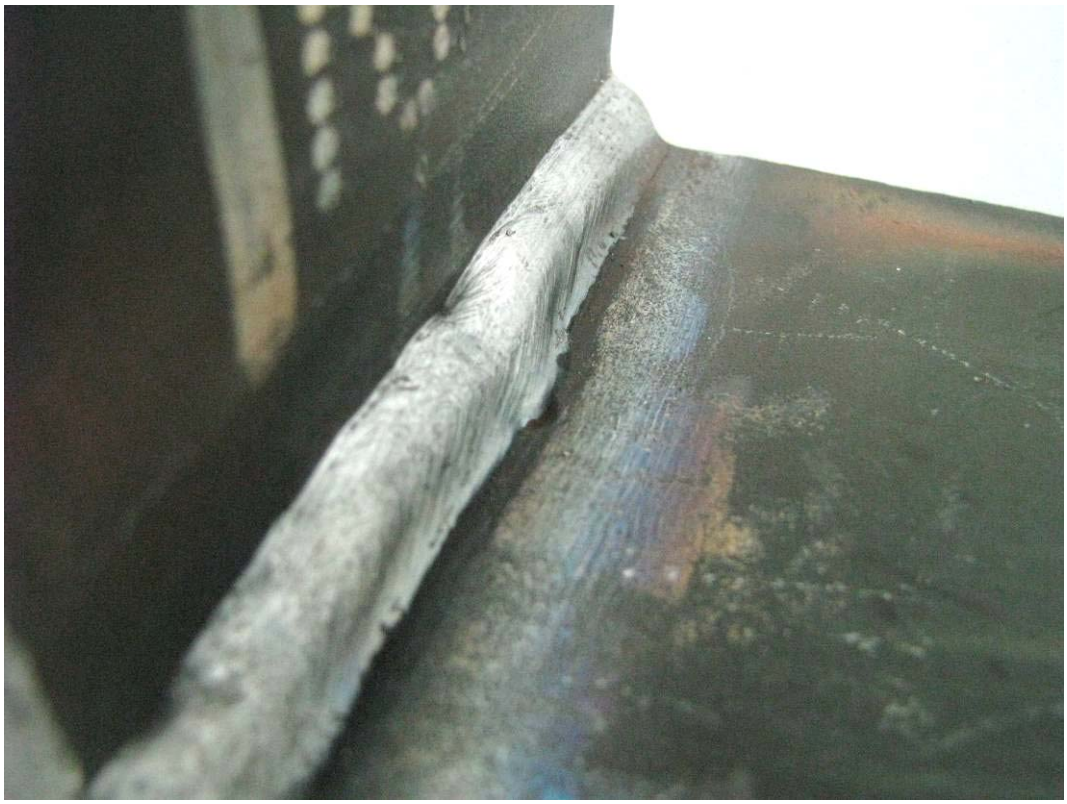
5FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真④

5BD

6FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑤

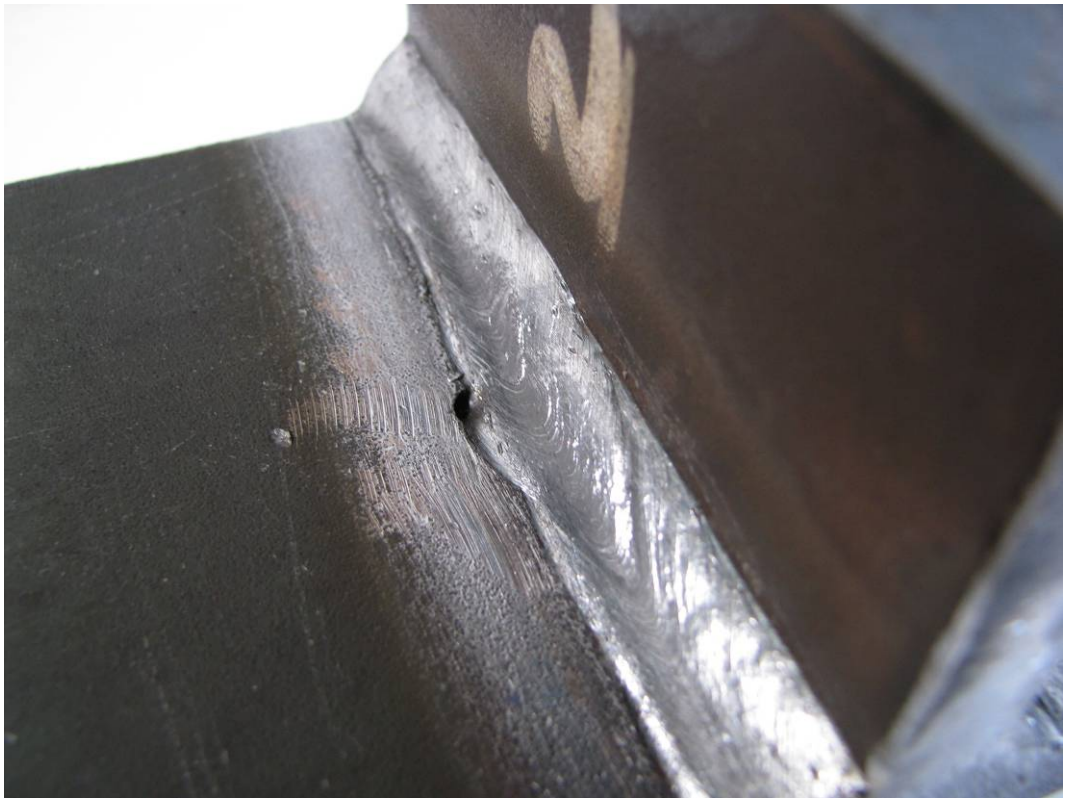


6BD

7FU

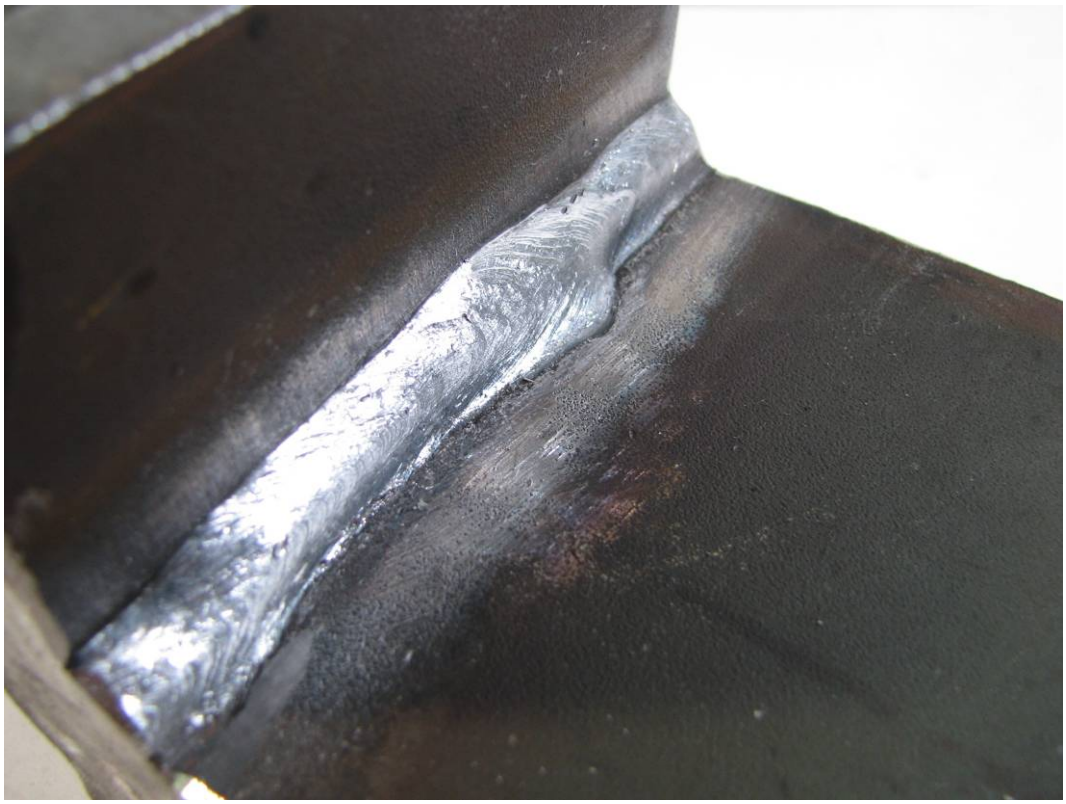
写真 3.2　アンダーカット外観写真⑥

7BD

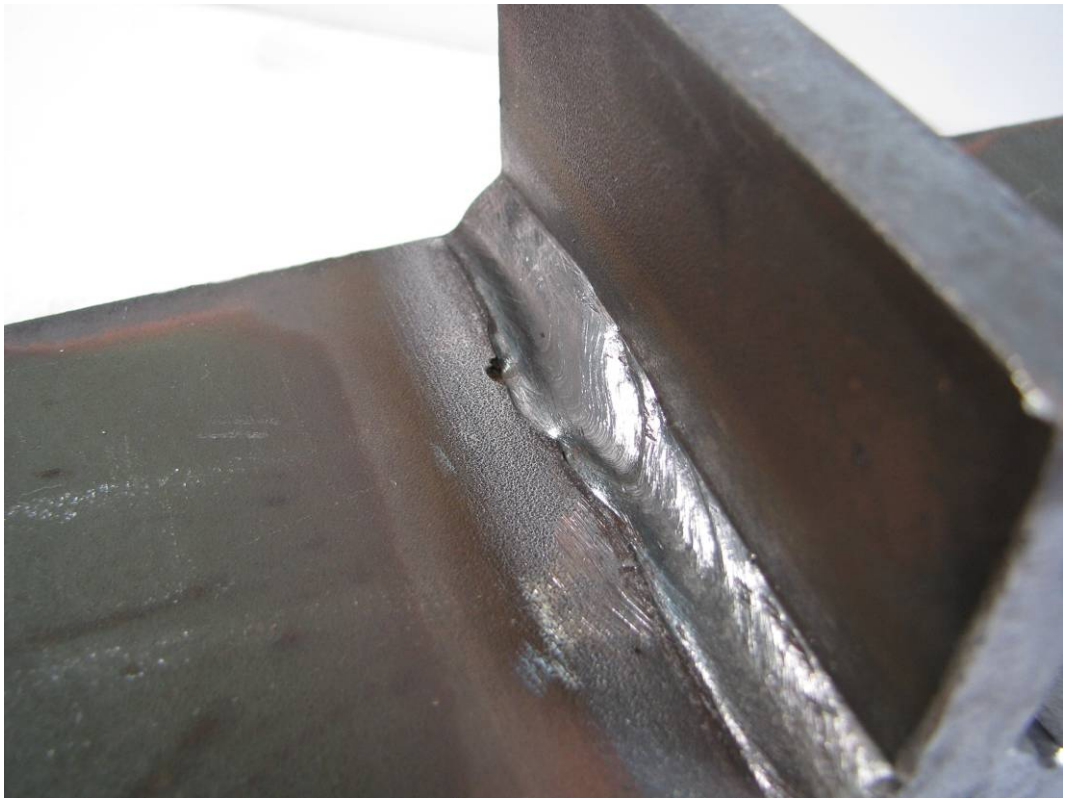


8FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑦

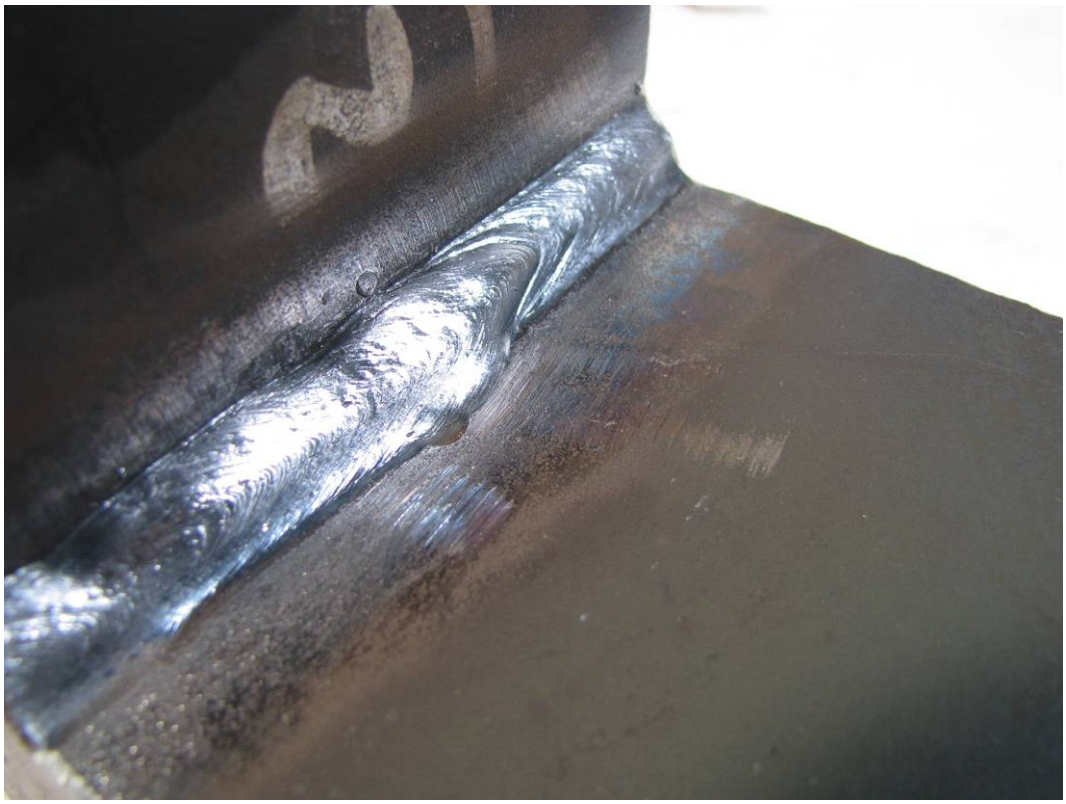


8BD

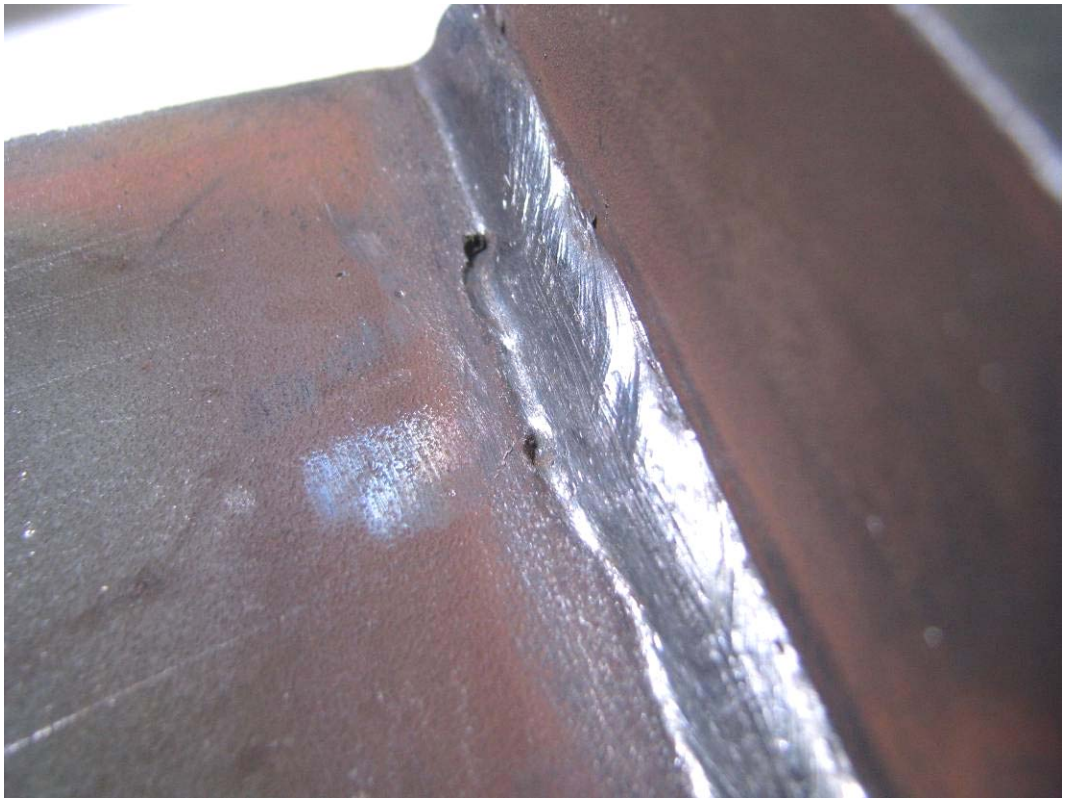


9FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑧



9BD



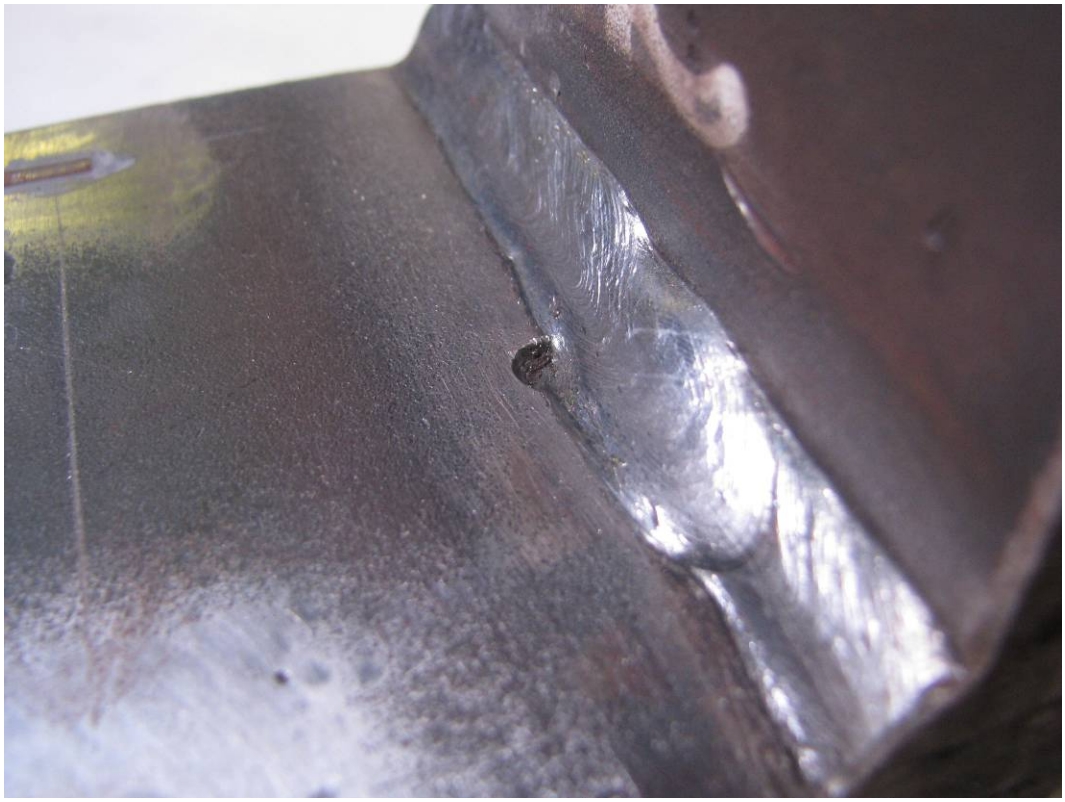
10FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑨

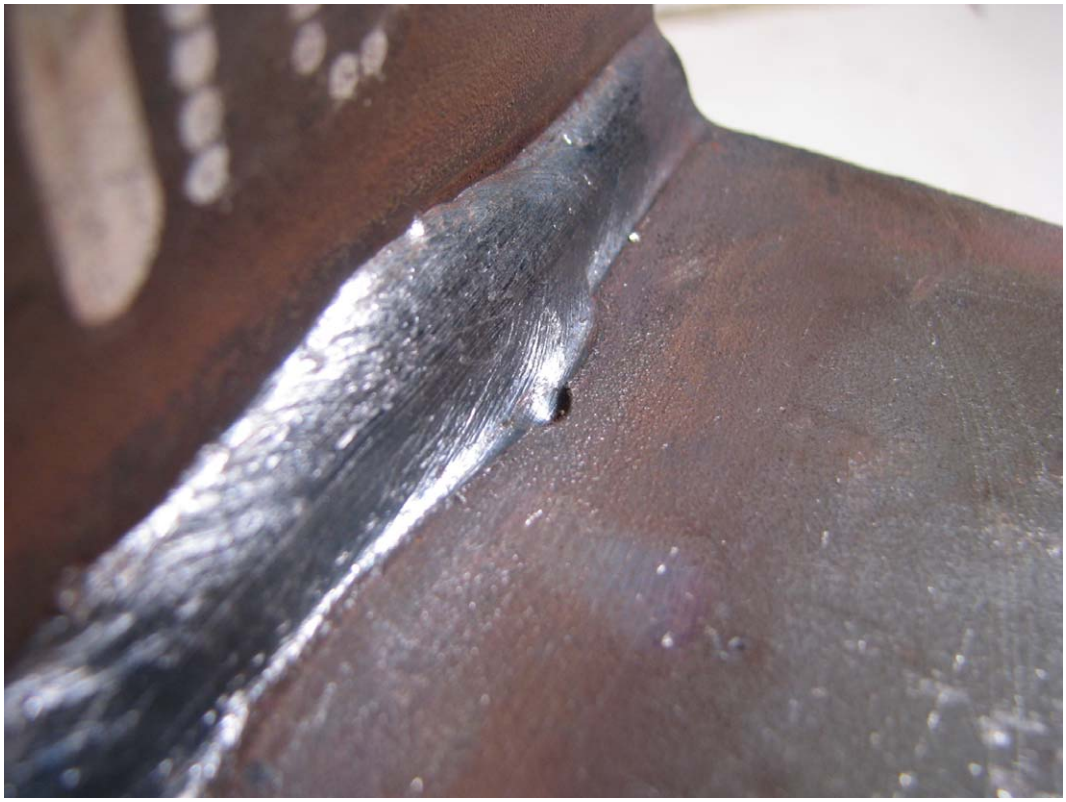
10BD

11FD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑩

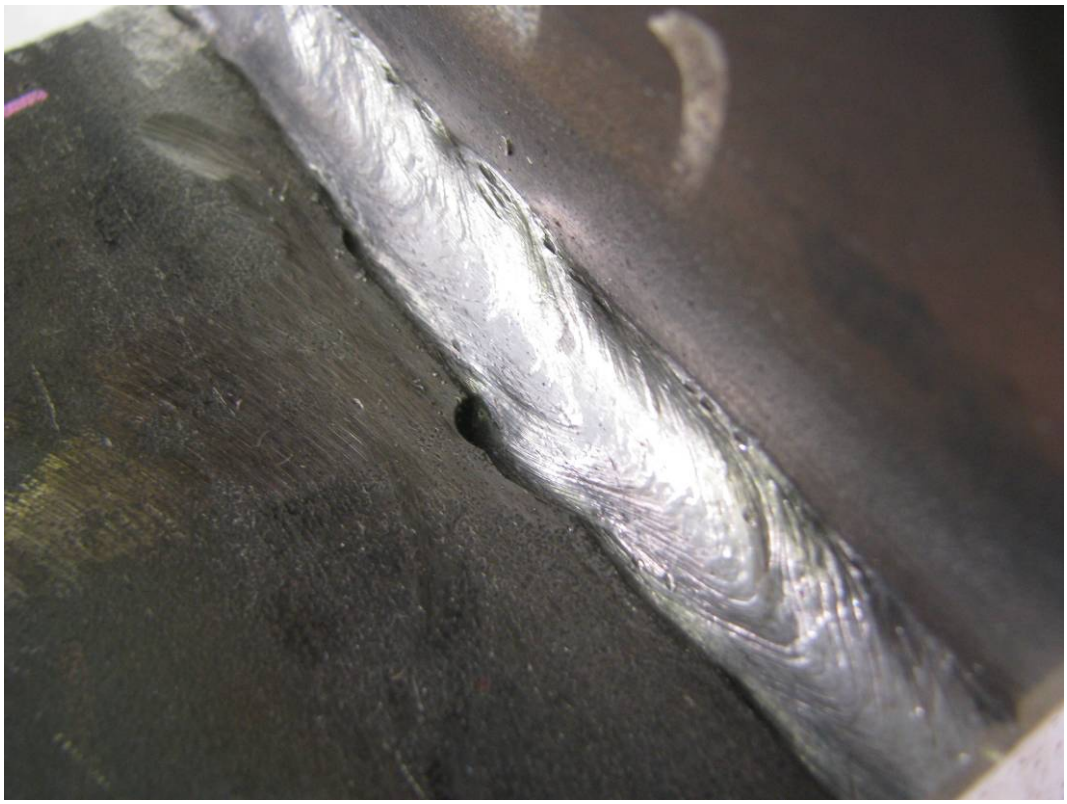


11BU

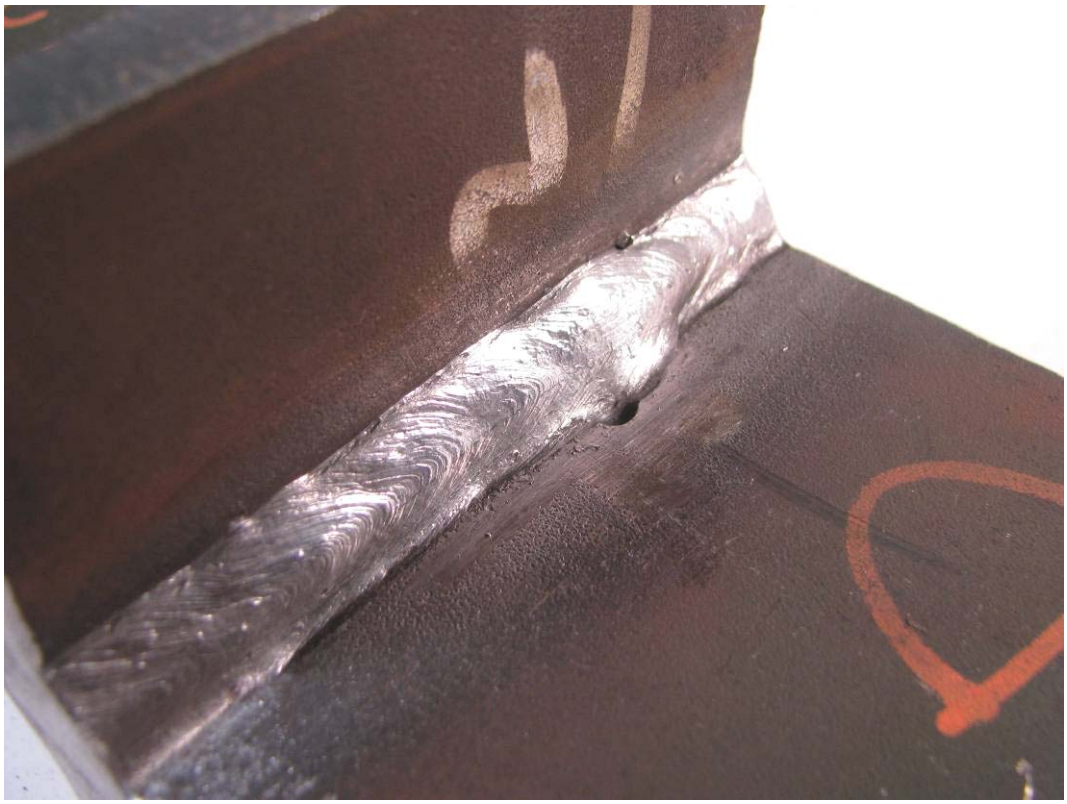


11BD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑪



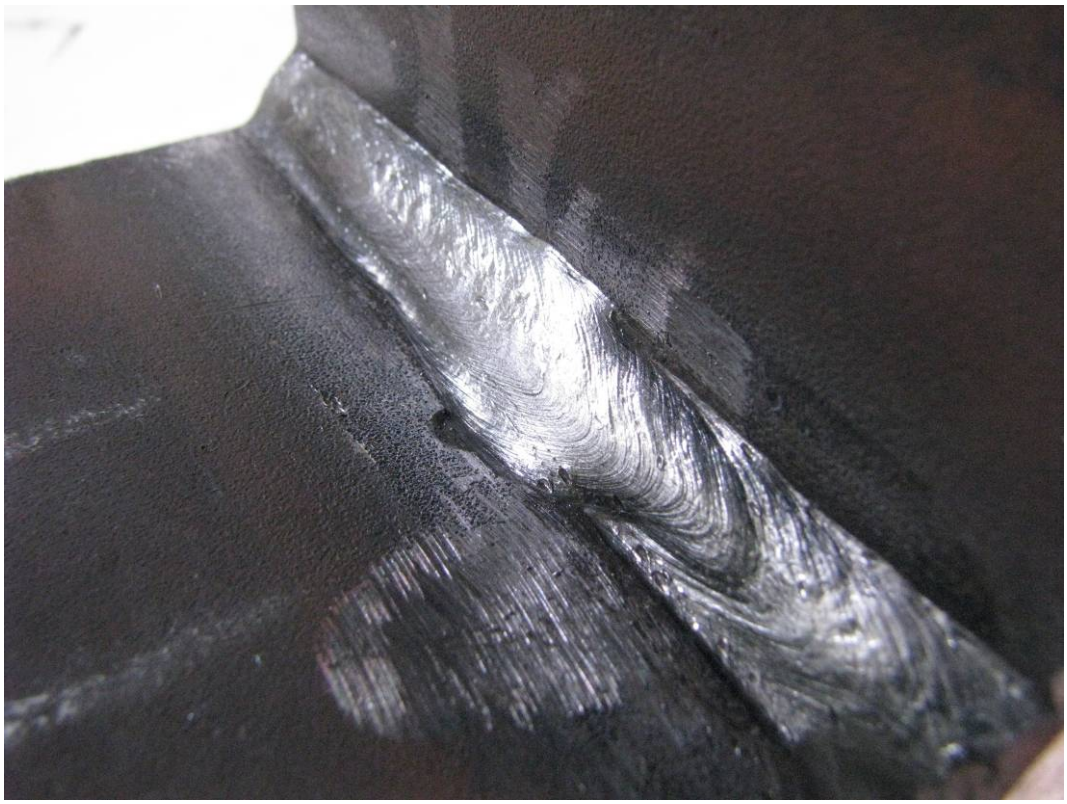
12FU



12BD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑫

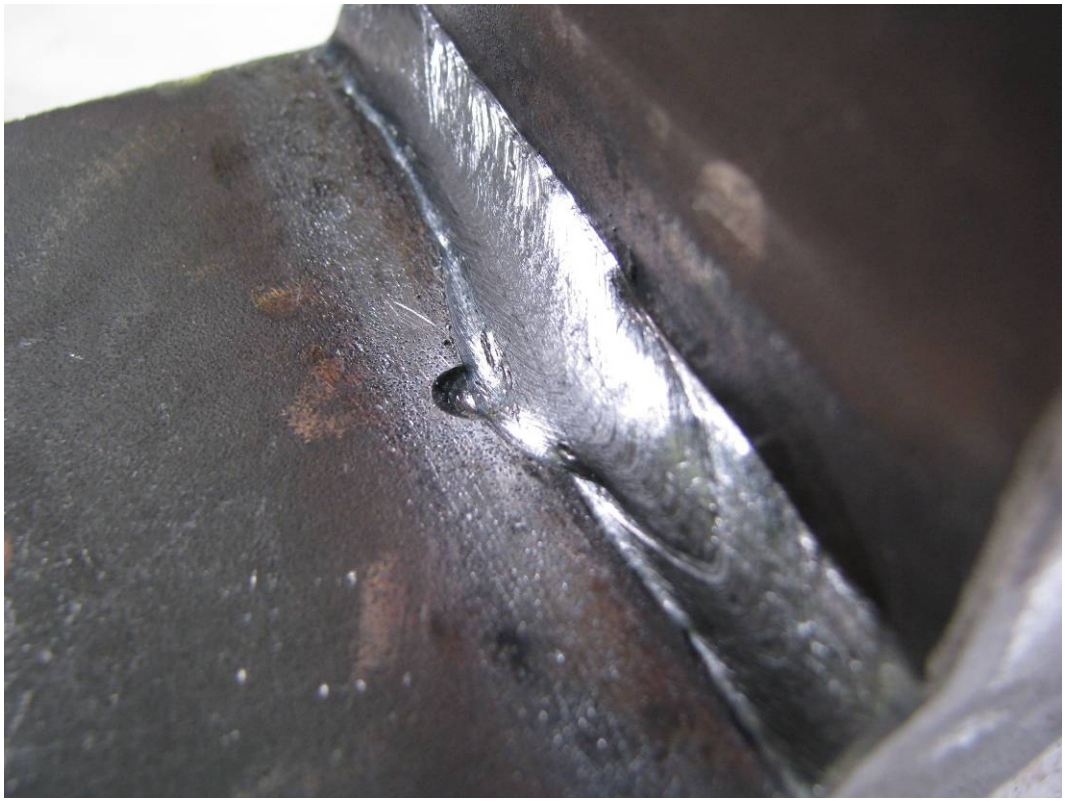
13FD



13BU

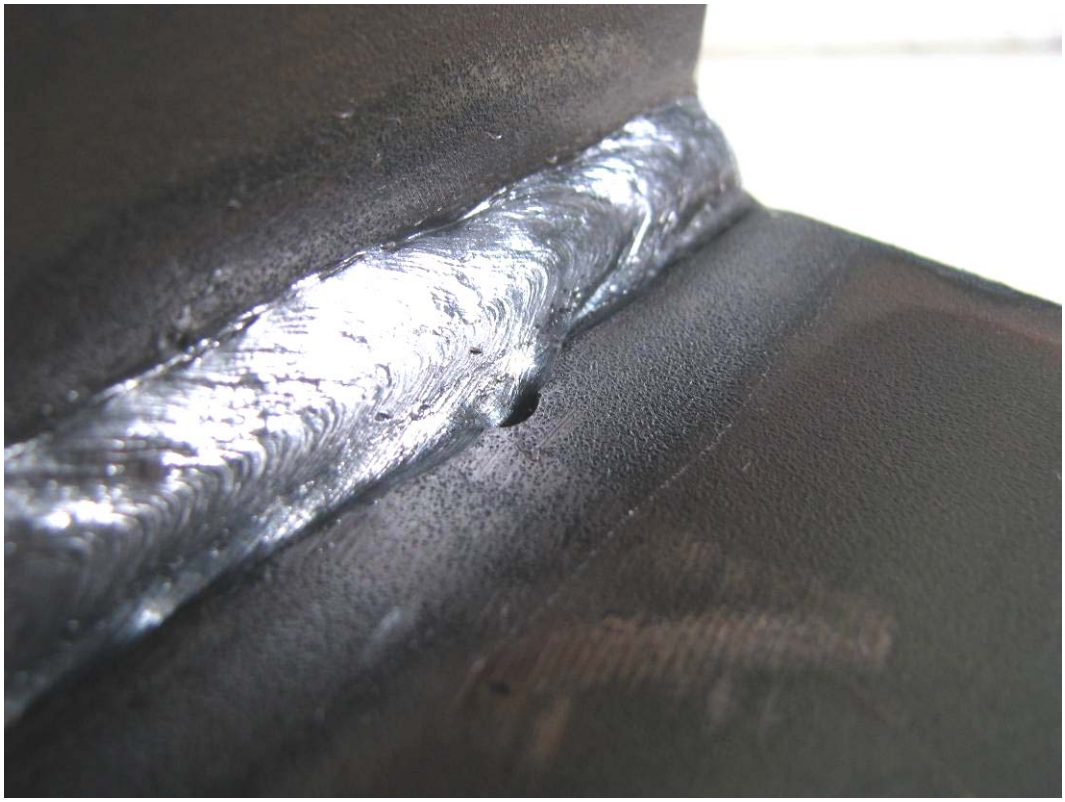
写真 3.2　アンダーカット外観写真⑬

13BD

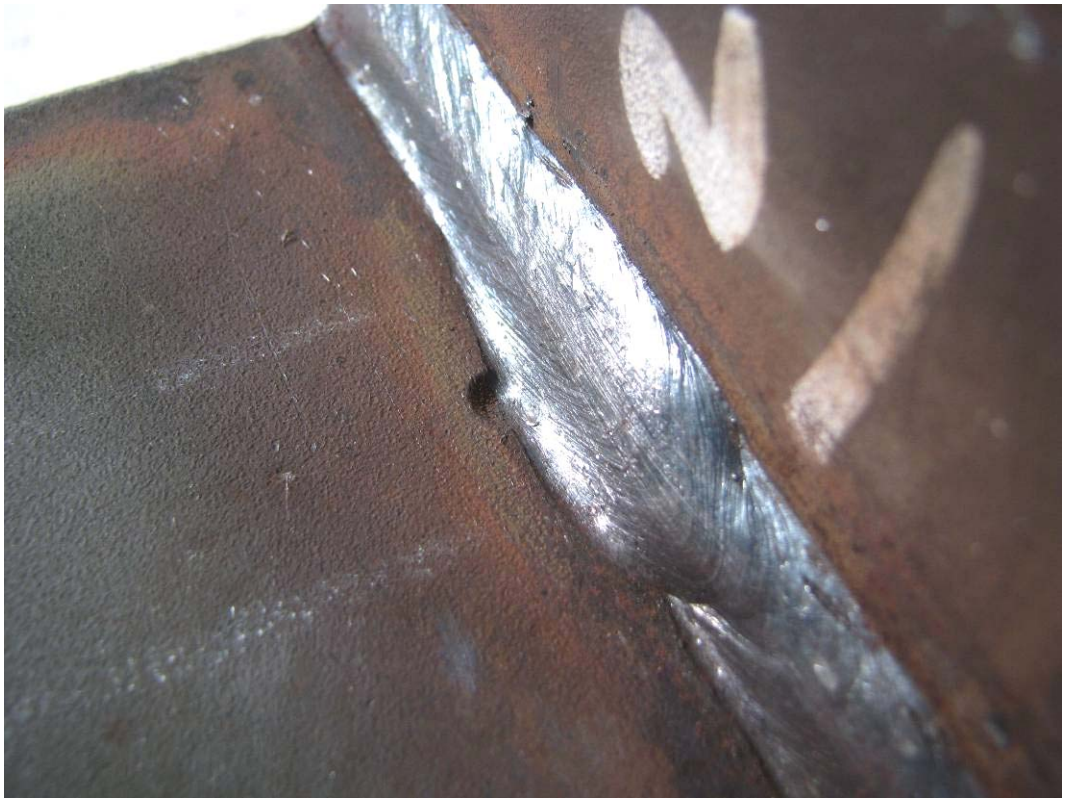


14FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑭

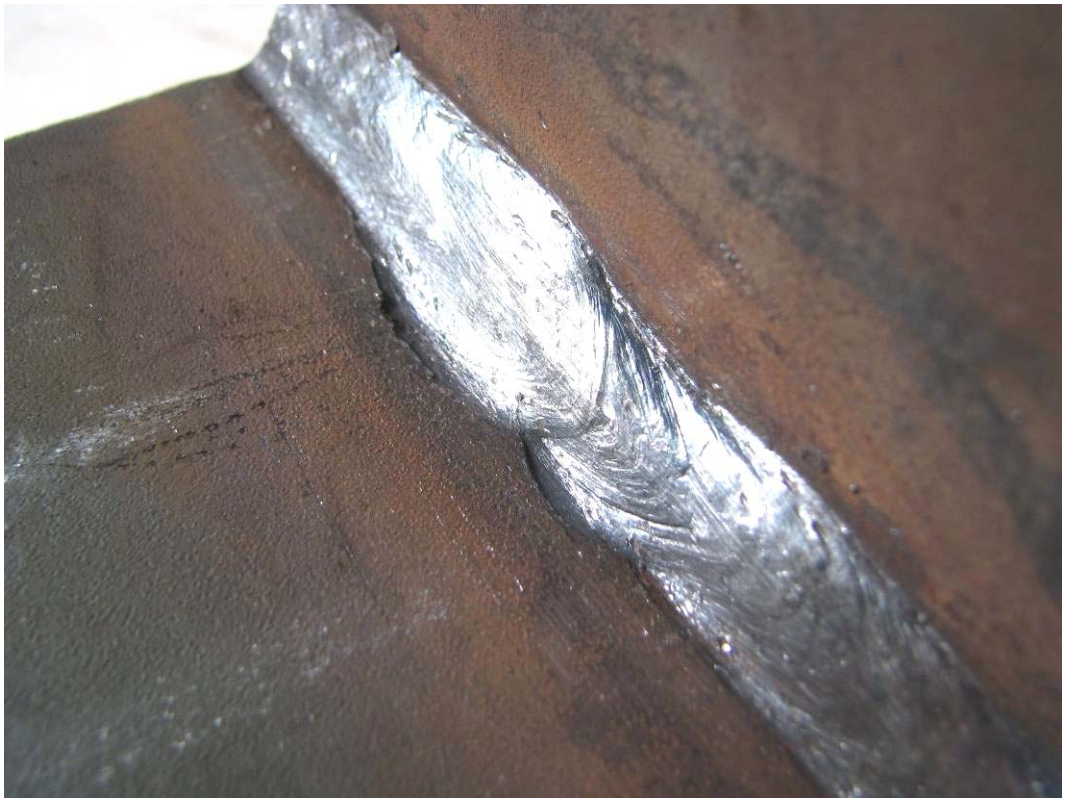


14BD

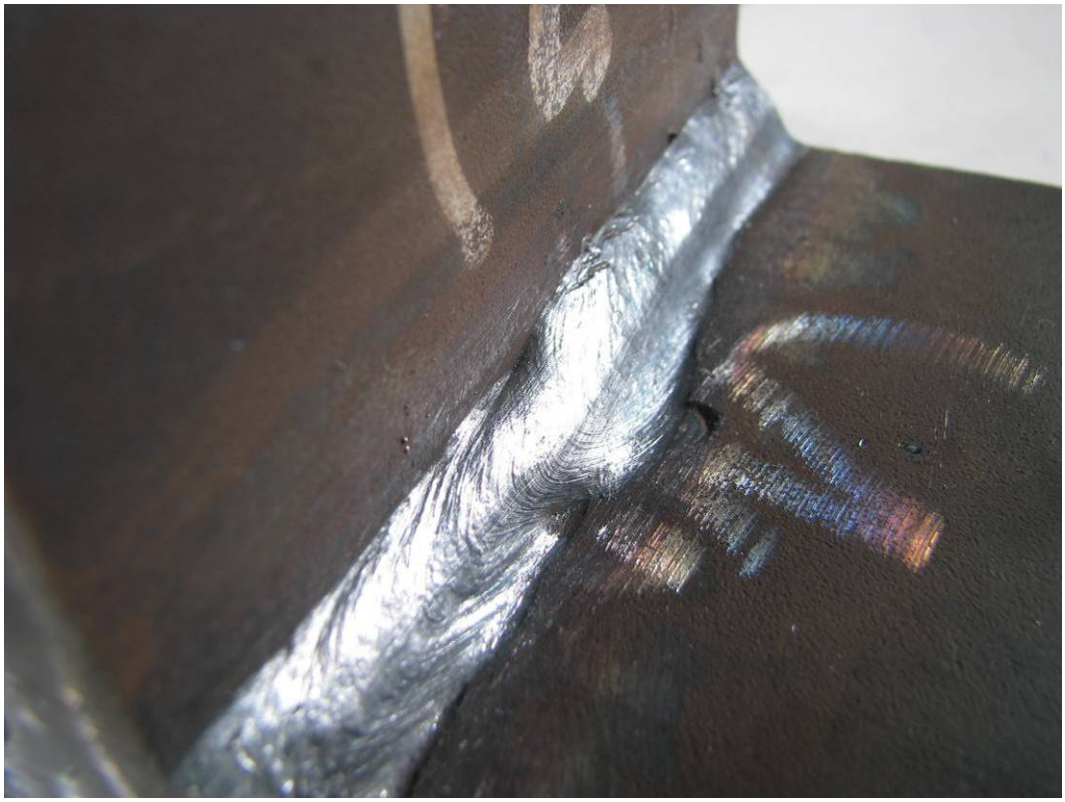


15FU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑮

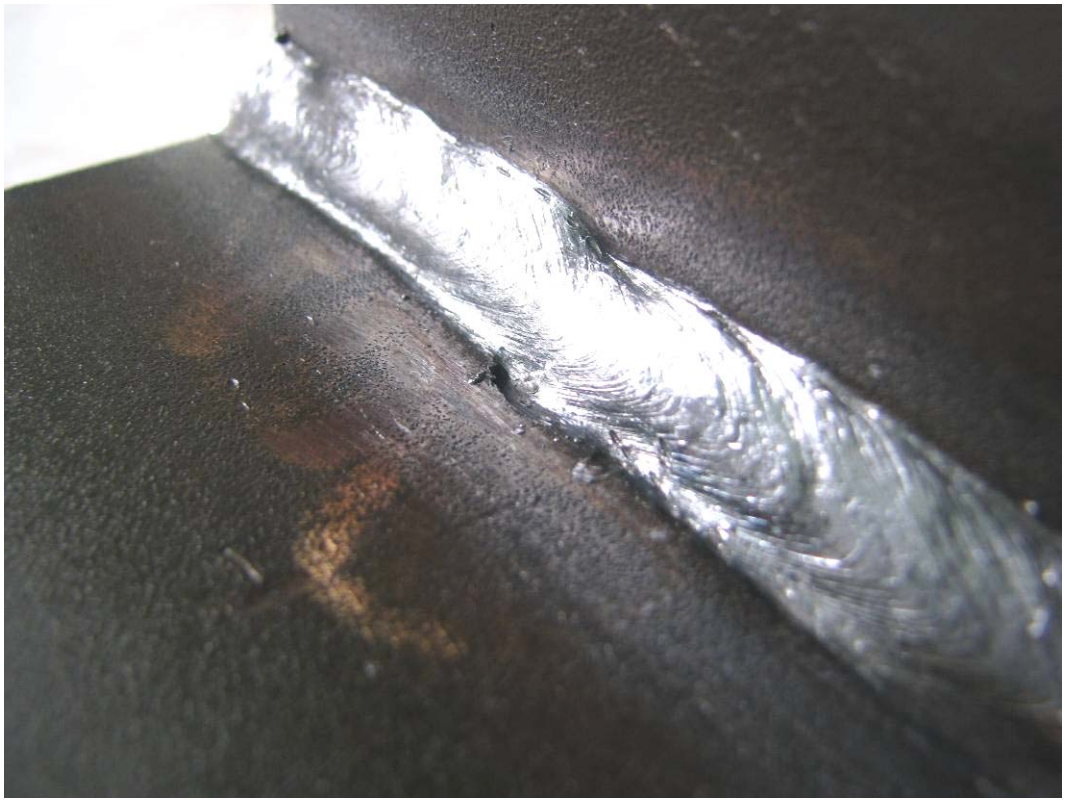


15BU

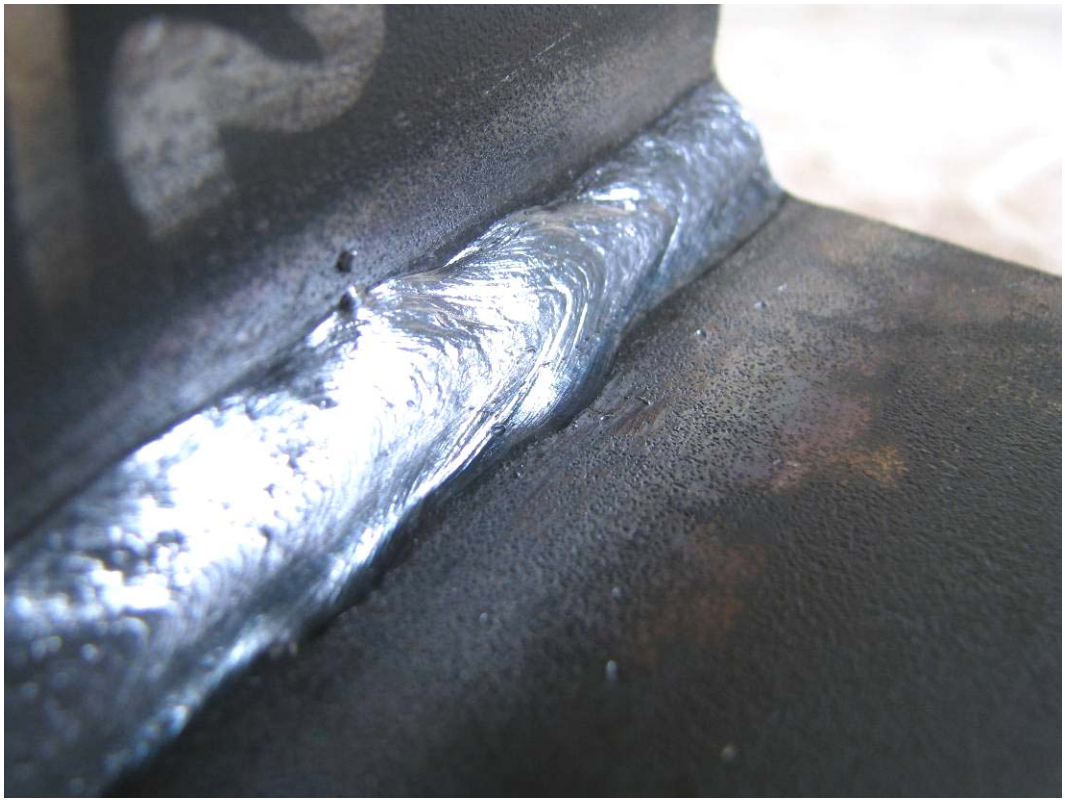


15BD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑯



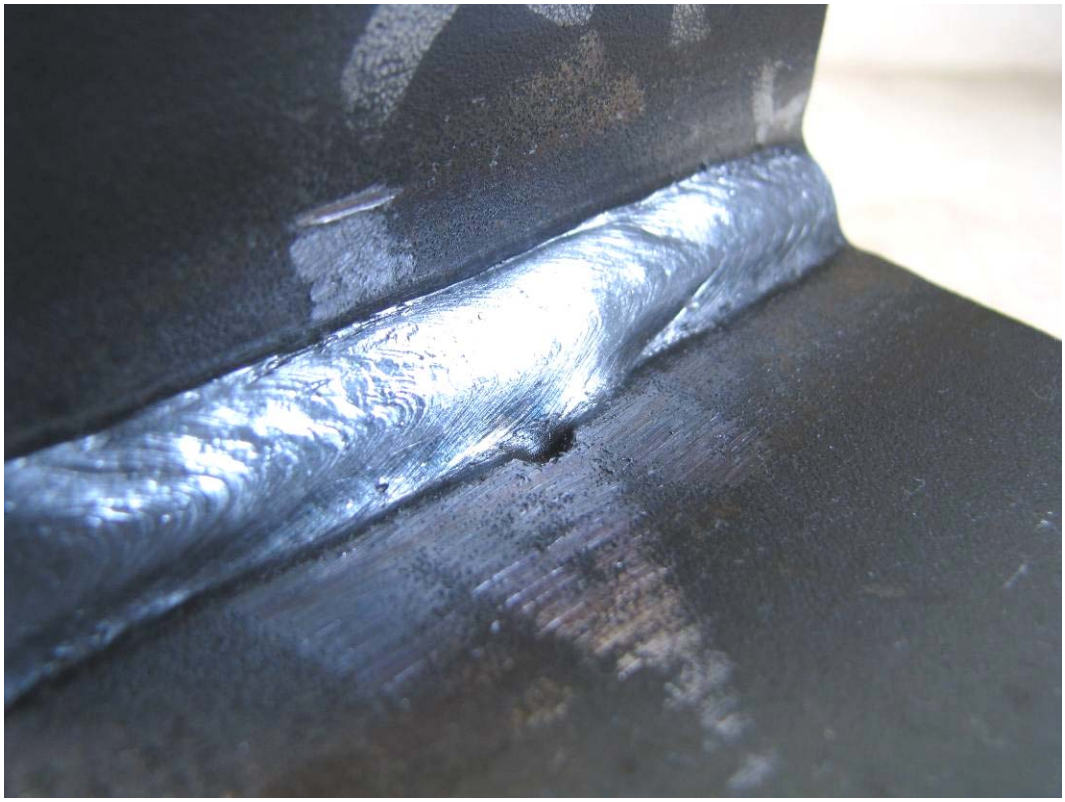
16FU



16BD

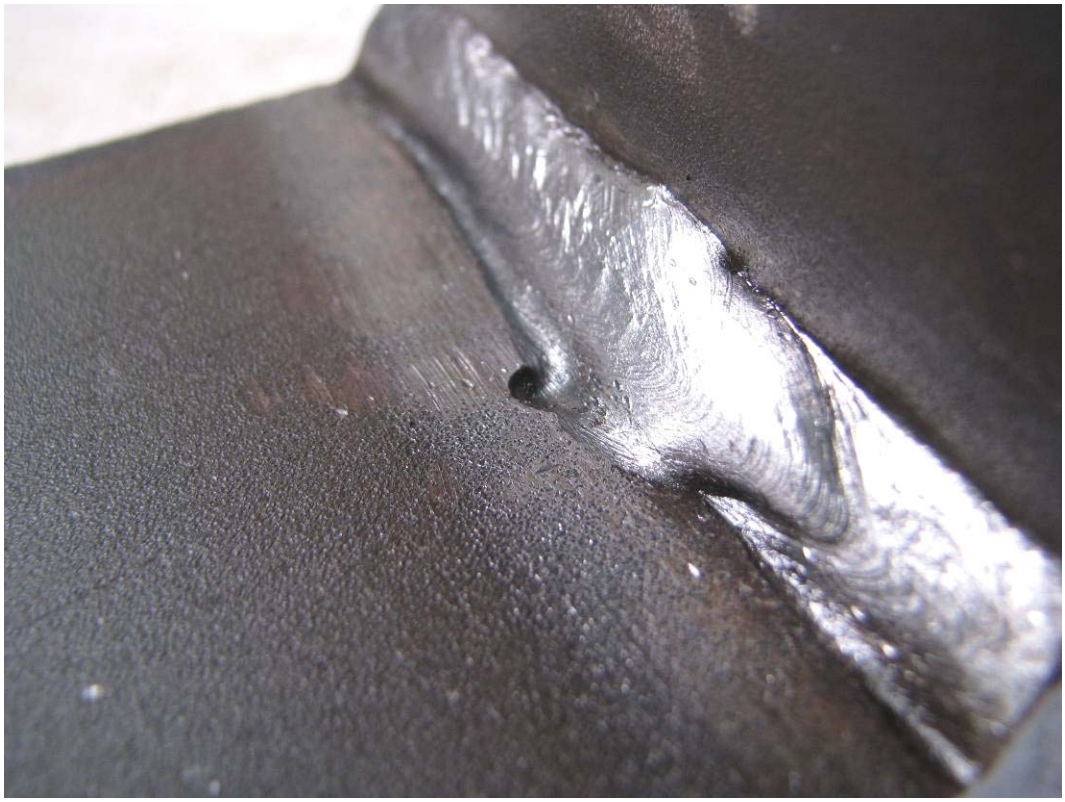
写真 3.2　アンダーカット外観写真⑰

17FU

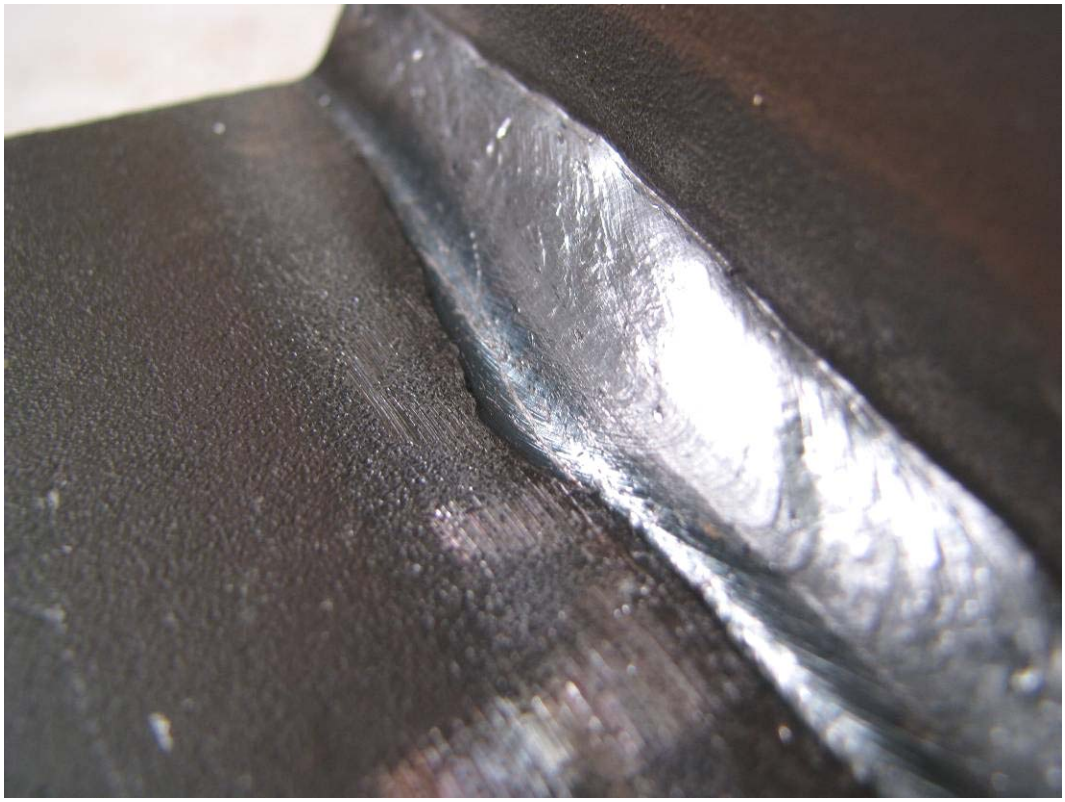


17BD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑱



18FU



18BU

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑲

18BD

写真 3.2　アンダーカット外観写真⑳

写真 3.3　溶接作業写真

写真 3.4　溶接部外観

第４章　疲労試験

4.1　試験方法

アンダーカットの有無が疲労強度に及ぼす影響を調べるために、アンダーカットを有する試験体とアンダーカットを含まない試験体の疲労試験を行った。疲労試験は、動的能力 500kNの電気油圧サーボ式多目的大型材料試験装置を用いて軸引張荷重下で行った。繰り返し荷重は、下限荷重を 10kN（8.3N/mm²）とした。上限荷重は応力範囲が 125N/mm²～250N/mm² となるように設定した。応力波形は正弦波、繰り返し速度は、8～15Hz とした。試験体が疲労破壊せずに繰り返し数が 1000 万回に達した場合には、そこで試験を終了した。各試験体の試験条件を表 4.1 に、試験装置に試験体を取り付けた状態を写真 4.1 に示す。

疲労試験を開始する前に所定の応力が生じるように荷重が載荷できているか、試験体の表裏面および左右にバランスよく荷重が載荷されているかを調べるためにひずみ測定を行った。4 枚のひずみゲージ（ゲージ長 5mm）を図 4.1 の示す位置に貼り付けた。ひずみ測定においては下限荷重（10kN）でひずみを 0 とし、平均荷重時と上限荷重時のひずみを測定した。試験体の左右で測定されたひずみに 10 パーセント以上の違いが生じた場合は試験体の試験機への取り付けを再度行い、バランスが良くなるまで試験体の取り付けを繰り返した。

疲労亀裂の発生と進展性状を調べる目的で、応力範囲を 200N/mm² としてビーチマーク試験を行った。試験体数はアンダーカットを含まない試験体が 2 体、アンダーカットを有する試験体が 4 体である。試験条件を表 4.2 に示す。ビーチマーク試験は上限荷重を一定としたままで、所定の繰り返し回数ごとに荷重範囲を半減させて行った。なお、荷重を変更する繰り返し回数は通常試験体とアンダーカットを有する試験体いずれも 10 万回とした。

4.2　試験結果

4.2.1　疲労亀裂の発生・進展性状

各試験体の疲労寿命と破断位置を表 4.3 に示す。ビーチマーク試験を行った試験体の疲労寿命には、応力範囲を半減した際の応力繰り返し数は含めていない。疲労試験より得られた各試験体の応力範囲 Δσ と疲労寿命 N の関係を図 4.2 に示す。図中には日本鋼構造協会（JSSC）の疲労設計指針（JSSC 指針）および、日本道路協会の「鋼

道路橋の疲労設計指針」に示されている疲労強度等級 C～F の設計 Δσ－N 関係も示している。なお、鋼道路橋の疲労設計指針では荷重非伝達型十字溶接継手に対して、アンダーカット深さが 0.3mm 以下の場合 E、アンダーカット深さが 0.3mm をこえ、0.5mm 以下とした場合は F 等級と規定している。アンダーカットの有無によらず、ここで得られたデータはすべて強度等級 E を十分に満たしている。

アンダーカットを有する試験体とアンダーカットを含まない試験体でデータ数に違いはあるものの、疲労試験の結果から、アンダーカットの有無により疲労強度に大きな差は認められない。これらのデータに最小二乗法を利用して疲労寿命 N に対する応力範囲 Δσ の回帰直線を求めると、以下の式が得られる。

$$y = -0.219\chi + 3.582$$
$$y = -0.338\chi + 4.285$$

これらの式から 200 万回疲労強度を求めると、アンダーカットを有する試験体で 159.5N/mm²、アンダーカットのない試験体で 144.0 N/mm² である。このように、10 パーセント程度ではあるがアンダーカットを有する試験体の方が疲労強度が高くなっている。このことからもアンダーカットの存在が疲労強度に及ぼす影響は小さいと言える。

図 4.3 は得られた疲労試験結果の内、アンダーカットを有する試験体について、その試験体に含まれる最も深いアンダーカットの深さ 1.0mm～1.4mm と 1.5mm～2.0mm によってマークを変えて Δσ－N 関係を示している。図中の実線は、アンダーカットのない試験体の疲労寿命 N に対する応力範囲 Δσ の回帰直線である。深いアンダーカットを含む試験体の方が浅いアンダーカットを含む試験体に比べ低い傾向も認められるが、その差は小さい。図 4.4 は疲労破壊起点となったアンダーカットの深さ 0.9mm～1.5mm と 1.6mm～2.0mm によって、マークを変えて疲労試験結果を示したものである。図中にアンダーカットのない試験体の結果は含まれていない。アンダーカットからき裂が発生しているものは、0.9mm～1.5mm の範囲で 4 体、1.6mm～2.0mm の範囲で 3 体であった。アンダーカットを有していても一般部から疲労き裂が生じた試験体は未破断を除き、8 体であった。この事からもアンダーカットの存在や深さが疲労強度に及ぼす影響は少ないと言える。また、疲労強度に対するアンダーカット深さの違いによる影響も認められない。アンダーカットからき裂が発生している試験体には、0.8mm 以下のアンダーカットが含まれているものも多いが浅い方のアンダーカットからき裂発生しているものは存在しなかった。表 4.4 は、アンダーカット試験体に含まれるすべてのアンダーカットの形状・寸法（d:深さ、W:開口幅、ρ:ア

ンダーカット底の曲率半径、L:長さ）と破壊起点を示したものである。図 4.4 ではアンダーカットからき裂が発生しているものを示しているが、それらには表 4.4 からわかるようにアンダーカット以外からき裂が発生しているものが 4 体存在している。

写真 4.2、4.3 に破断した試験体の疲労破面を示す。試験体の破断は、すべて溶接止端から発生した疲労亀裂の進展により生じた。アンダーカットがない試験体の場合には、試験体側面から数 mm 中に入った溶接止端から疲労き裂が生じていた。アンダーカットを有する試験体のうち、アンダーカットから亀裂が発生しているものは 3 体、アンダーカットとアンダーカットのない部分の両方から亀裂が発生しているものが 4 体、アンダーカットのない部分からのみ亀裂が発生しているものが 8 体であった。このことから、アンダーカットが存在しても、疲労亀裂の発生・進展性状はアンダーカットのない場合とさほど違わないことを示しているものと考えられる。疲労試験の結果から考察すると、1 つの試験体にアンダーカットが複数存在する場合には、アンダーカット深さが大きい方からき裂が発生する可能性が高いが、そのアンダーカットが破壊の起点となる場合は少なく、またアンダーカットの存在が継手の疲労強度を低下させる状況は少ないと言える。

4.2.2　ビーチマーク試験

ビーチマーク試験結果を表 4.5 に示す。試験体の破断回数は、上段で応力範囲を半減させた時の回数を含めない回数、下段で全回数を示している。写真 4.4、4.5 にビーチマーク試験を行った試験体の疲労破面を示す。これらの写真では荷重範囲を半減させた際に生じたビーチマークを赤く色付けしている。また図中の UC はアンダーカットの位置を示している。き裂発生位置はアンダーカットを有する試験体２と３では通常試験体同様にアンダーカットの存在しないところからき裂が発生している、また試験体４と５の場合にはアンダーカットと一般部からき裂が発生していることが分かる。き裂の進展速度はき裂が進むに連れて早くなっていることがわかる。

このようにアンダーカットを有していても一般部から疲労き裂が生じた試験体も多く、疲労亀裂の発生・進展性状に、アンダーカットの有無による違いはほとんど認められないことがわかった。

表 4.1　疲労試験の条件

試験体名		板幅（mm）	板厚（mm）	断面積（mm^2）	応力範囲（N/mm^2）	荷重（kN）	
						下限	上限
アンダーカットあり	1	100.4	12.12	1216.8	125	10	162.1
	2	100.5	12.09	1215.0	200		253.0
	3	100.5	12.03	1209.0	200		251.8
	4	100.4	12.06	1210.8	200		252.2
	5	100.3	12.05	1208.6	200		251.7
	6	100.5	12.03	1209.0	160		203.4
	7	100.3	12.05	1208.6	160		203.4
	8	100.4	12.03	1207.8	250		312.0
	9	100.3	12.04	1207.6	250		311.9
	10	99.7	12.01	1197.4	130		165.7
	11	100.1	12.25	1226.2	250		316.6
	12	99.3	12.56	1247.2	160		209.6
	13	100.3	12.07	1210.6	130		167.4
	14	100.4	12.02	1206.8	130		166.9
	15	100.5	12.03	1209.0	130		167.2
	16	100.3	12.03	1206.6	250		311.7
	17	100.2	12.04	1206.4	200		251.3
	18	100.2	12.02	1204.4	160		202.7

表 4.1　疲労試験の条件（つづき）

試験体名		板幅（mm）	板厚（mm）	断面積（mm^2）	応力範囲（N/mm^2）	荷重（kN）	
						下限	上限
アンダーカットなし	1	100.2	12.08	1210.4	250	10	312.6
	2	100.6	12.03	1210.2	250		312.6
	3	100.3	12.04	1207.6	200		251.5
	4	100.4	12.04	1208.8	200		251.8
	5	100.5	12.02	1208.0	160		203.3
	6	100.5	12.02	1208.0	160		203.3
	7	100.4	12.04	1208.8	130		167.1
	8	100.3	12.04	1207.6	130		167.0
	9	100.1	12.09	1210.2	160		203.6

表 4.2　ビーチマーク試験の条件

試験体名		板幅（mm）	板厚（mm）	断面積（mm^2）	荷重（kN）	
					下限	上限
アンダーカットあり	2	100.5	12.09	1215.0	10	253.0
					131.5	
	3	100.5	12.03	1209.0	10	251.8
					130.9	
	4	100.4	12.06	1210.8	10	252.2
					131.1	
	5	100.3	12.05	1208.6	10	251.7
					130.9	
アンダーカットなし	3	100.3	12.04	1207.6	10	251.5
					130.8	
	4	100.4	12.04	1208.8	10	251.8
					130.9	

表 4.3　疲労試験結果

試験体番号		応力範囲 (N/mm^2)	疲労寿命 (万回)	破断位置
アンダーカットあり	1	125	494.1	FU
	2	200	62.7	FD
	3	200	64.4	BD
	4	200	48.8	FD
	5	200	60.0	FU
	6	160	190.3	FU
	7	160	140.2	FU
	8	250	40.8	FU
	9	250	38.2	BD
	10	130	387.8	FU
	11	250	23.5	BD
	12	160	139.7	FU
	13	130	1000	未破断
	14	130	1000	未破断
	15	130	1000	未破断
	16	250	29.5	FD
	17	200	87.8	FD、BD
	18	160	472.5	FD、BD
アンダーカットなし	1	250	49.3	BD
	2	250	44.3	FU
	3	200	64.3	BU
	4	200	59.2	BU
	5	160	1000	未破断
	6	160	126.9	BD
	7	130	1000	未破断
	8	130	1000	未破断
	9	160	176.0	BU

表 4.4　アンダーカット有する試験体のアンダーカット形状・寸法と疲労破壊起点

試験体番号	応力範囲 (N/mm2)	疲労寿命 (万回)	溶接箇所	アンダーカット寸法 (d,W,ρ,L)	アンダーカット起点	一般部起点
1	125	494.1	FU	(1.9, 3.4, 0.2, 12)	FU	なし
			BD	(1.3, 2, 1.0, 10.2)		
2	200	62.7	FU	(1.4, 5.1, 2.0, 8.4)	なし	FD
3	200	64.4	FU	(1.1, 2.6, 0.2, 8)	なし	BD
			BD	(1.0, 2.3, 0.6, 8.2)		
4	200	48.8	FU	(0.5, 2.6, 2.1, 11.2)	FD	FD
			FD	(1.5, 3.9, 1.3, 14)		
5	200	60.0	FU	(1.7, 4.1, 1.2, 11.4)	FU	FU
			BD	(1.2, 5.4, 2.3, 7.2)		
6	160	190.3	FU	(0.7, 4.2, 1.8, 5.8)	なし	FU
			BD	(1.2, 3.8, 1.1, 5.4)		
7	160	140.2	FU	(1.3, 2.5, 0.9, 4.8)	FU	FU
			BD	(1.2, 2.5, 0.7, 7.9)		
8	250	40.8	FU	(1.3, 3.6, 0.9, 7.4)	なし	FU
			BD	(0.6, 3.2, 2.6, 8.6)		
9	250	38.2	FU	(1.4, 4.4, 1.4, 7.4)	なし	FD
			BD	(1.2, 4.2, 2.1, 6.6)		
10	130	387.8	FU	(2.0, 5.1, 1.7, 6.2)	FU	なし
			FU	(0.6, 5.0, 3.5, 7.9)		
			BD	(1.7, 3.4, 0.7, 6.3)		
11	250	23.5	FD	(1.4, 4.8, 2.1, 6.9)	なし	FD
			BU	(1.5, 5.1, 2.6, 8.0)		
			BD	(1.8, 4.5, 2.1, 8.3)		
12	160	139.7	FU	(1.7, 3.4, 0.5, 8.0)	FU	なし
			FU	(0.9, 2.0, 0.7, 4.0)		
			BD	(1.4, 4.2, 2.1, 5.8)		
13	130	1000	FD	(1.3, 4.1, 1.7, 5.6)	未破断	
			BU	(0.7, 4.8, 4.3, 5.4)		
			BD	(1.0, 4.7, 4.1, 6.6)		
14	130	1000	FU	(0.9, 6.0, 1.7, 6.0)	未破断	
			BD	(1.8, 4.0, 0.7, 6.4)		
15	130	1000	FU	(1.3, 4.4, 1.8, 6.5)	未破断	
			BU	(0.8, 3.6, 1.4, 13.9)		
			BD	(0.6, 5.8, 1.5, 13.5)		
16	250	29.5	FU	(1.0, 2.4, 0.2, 8.5)	なし	FD
			BD	(0.9, 2.3, 0.6, 10.8)		
17	200	87.8	FU	(1.3, 4.0, 1.0, 5.4)	BD	FD
			BD	(1.4, 3.9, 0.6, 5.2)		
18	160	472.5	FU	(1.4, 4.9, 0.6, 6.3)	なし	FD BD
			BU	(0.7, 2.4, 2.5, 12.0)		
			BD	(0.9, 3.3, 2.9, 14.5)		

表 4.5　ビーチマーク試験結果

試験体名		荷重（kN）		繰り返し回数（万回）	破断位置
		下限	上限		
アンダーカットあり	2	10	253.0	62.70	FD
		131.5		122.70	
	3	10	251.8	64.38	BD
		130.9		124.38	
	4	10	252.2	48.77	FD
		131.1		88.77	
	5	10	251.7	60.00	FU
		130.9		113.62	
アンダーカットなし	3	10	251.5	64.29	BU
		130.8		124.29	
	4	10	251.8	59.17	BU
		130.9		109.17	

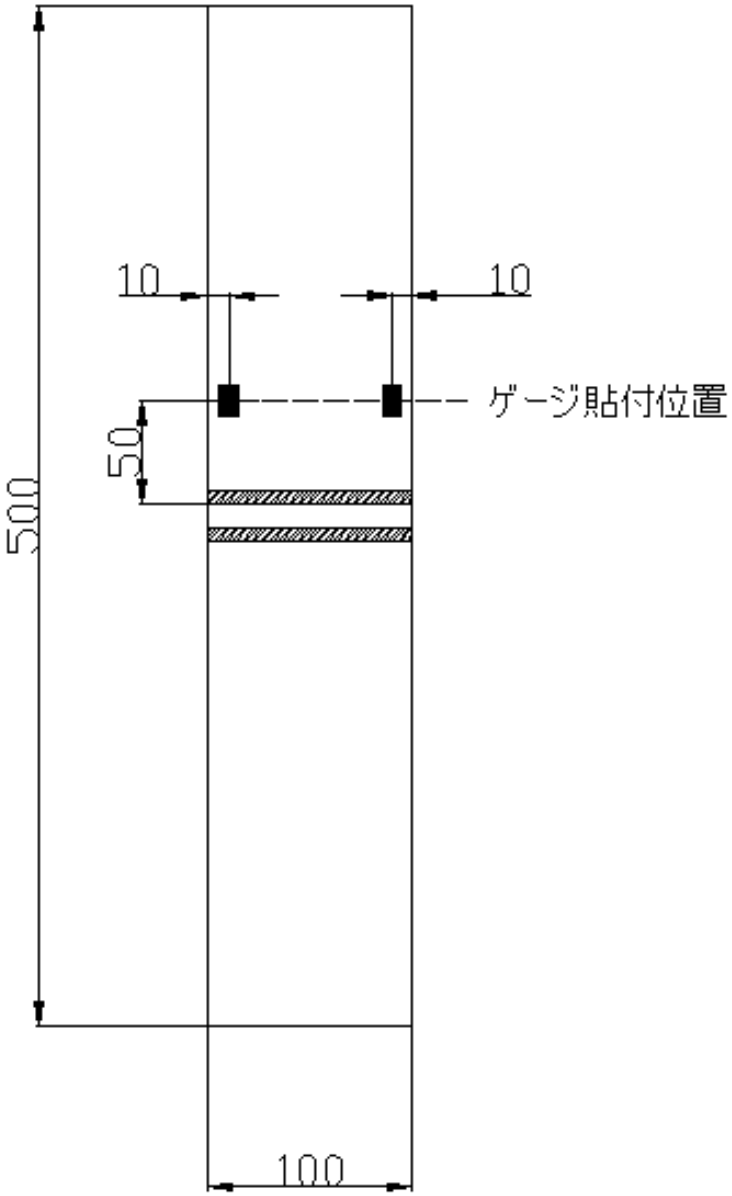


図 4.1　ゲージ貼付位置

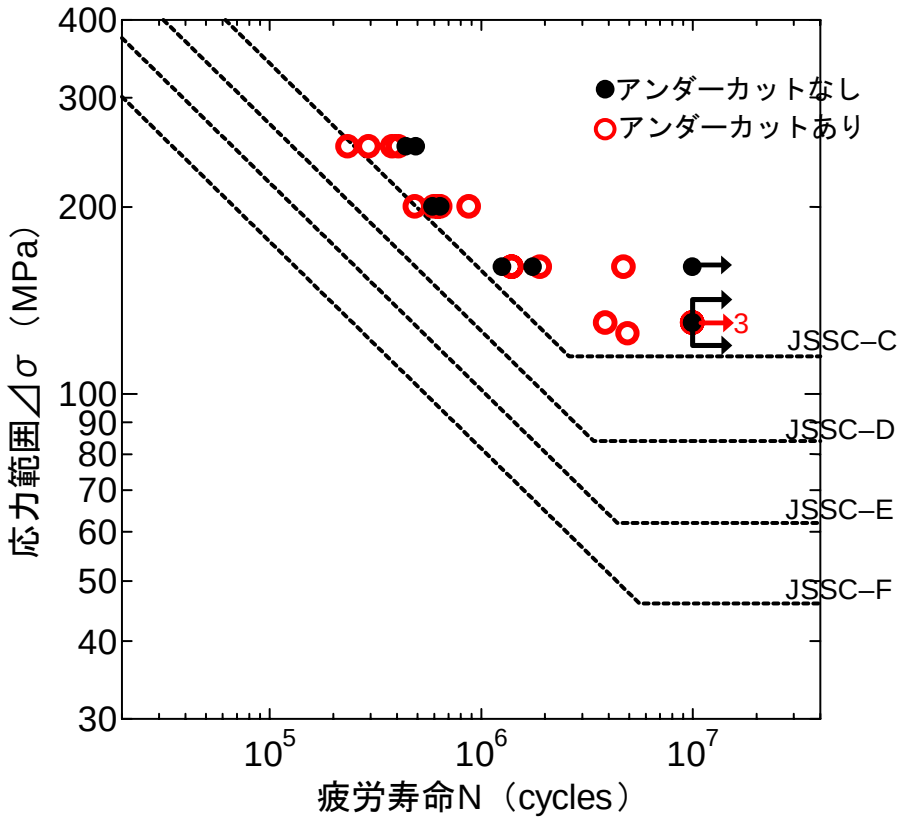


図 4.2　応力範囲と疲労寿命の関係（その１）

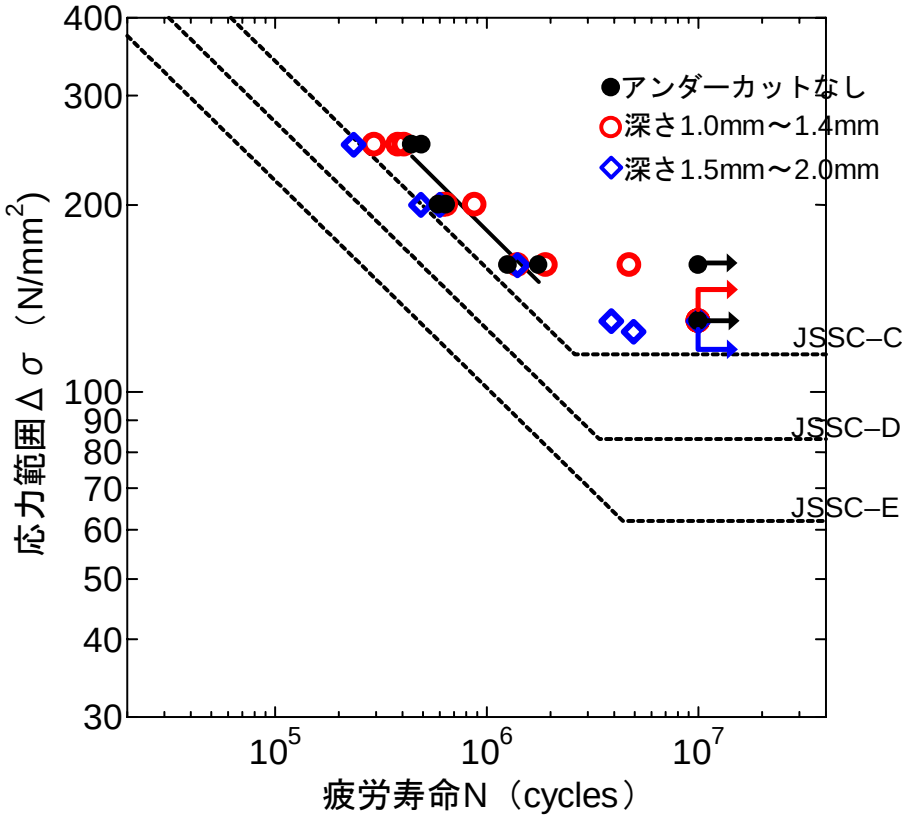


図 4.3　応力範囲と疲労寿命の関係（その２）

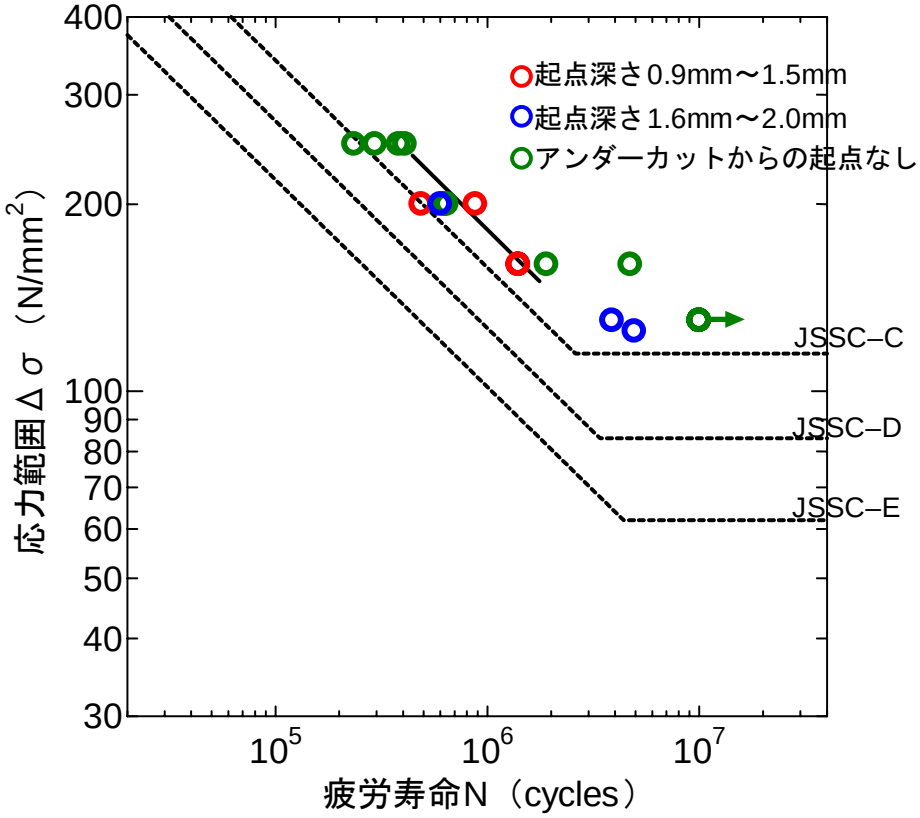
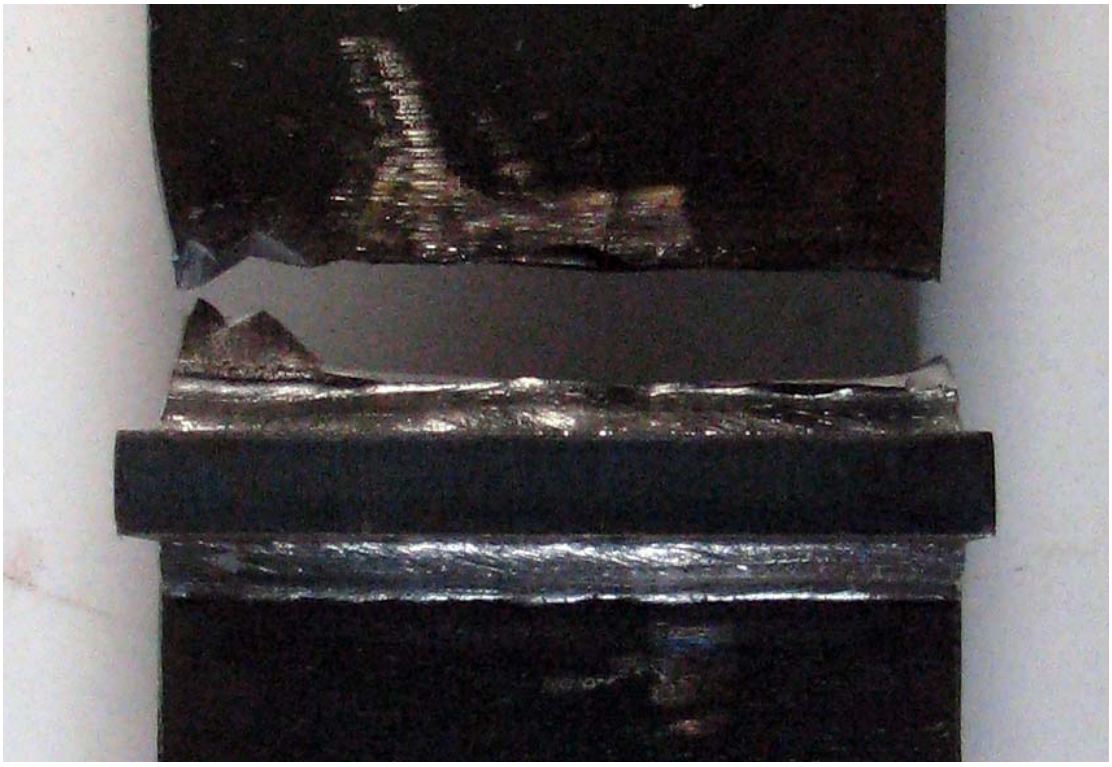


図 4.4　応力範囲と疲労寿命の関係（その３）

写真 4.1　疲労試験状況

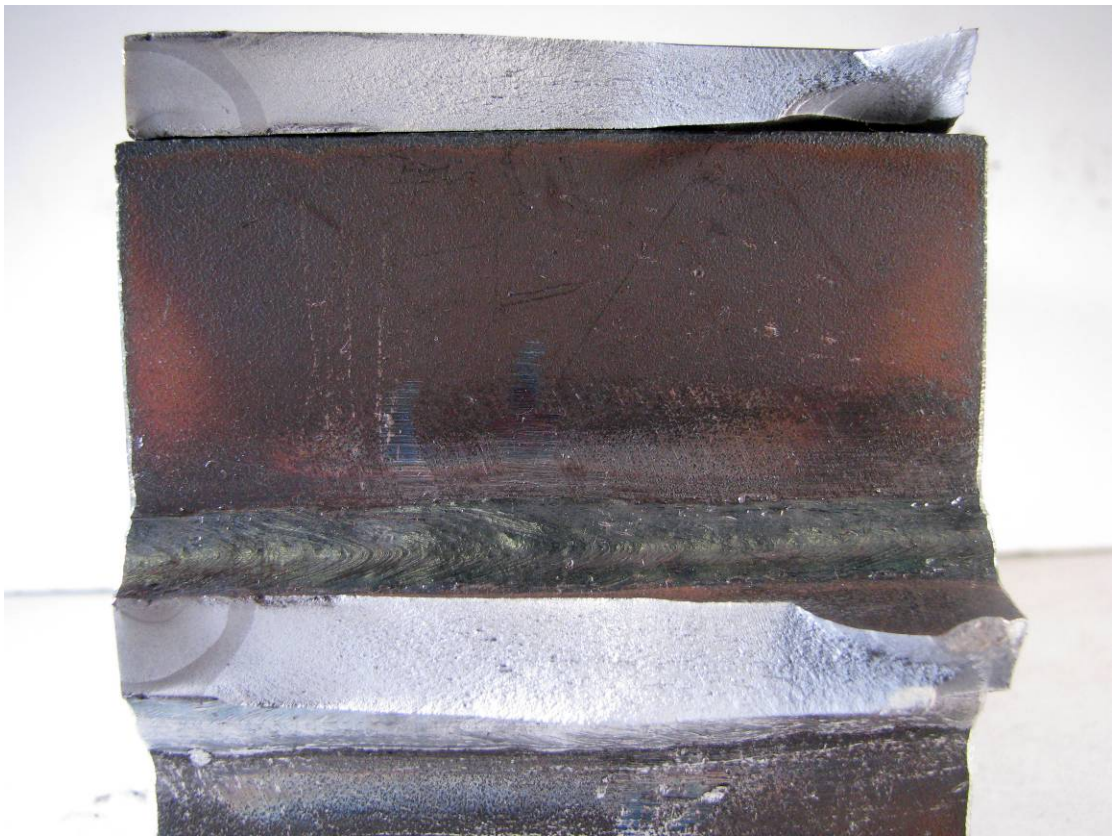


（a）試験体 1 上面

（b）試験体 1 正面

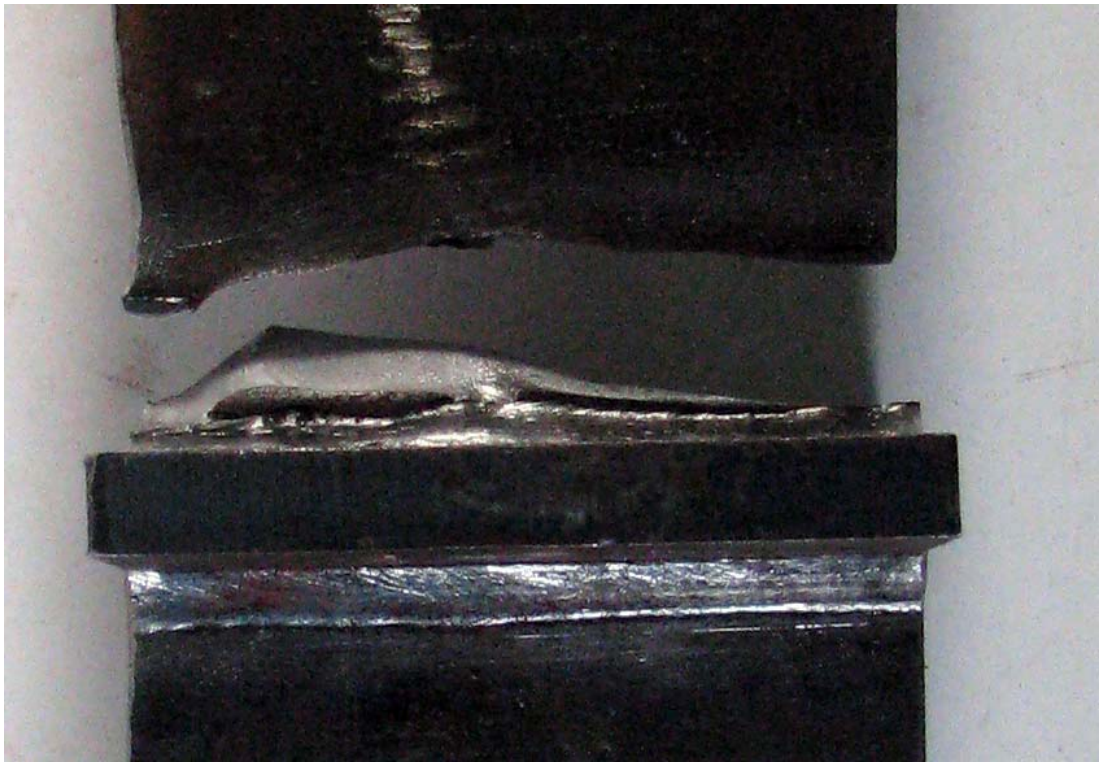
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）①

（a）試験体 2 上面

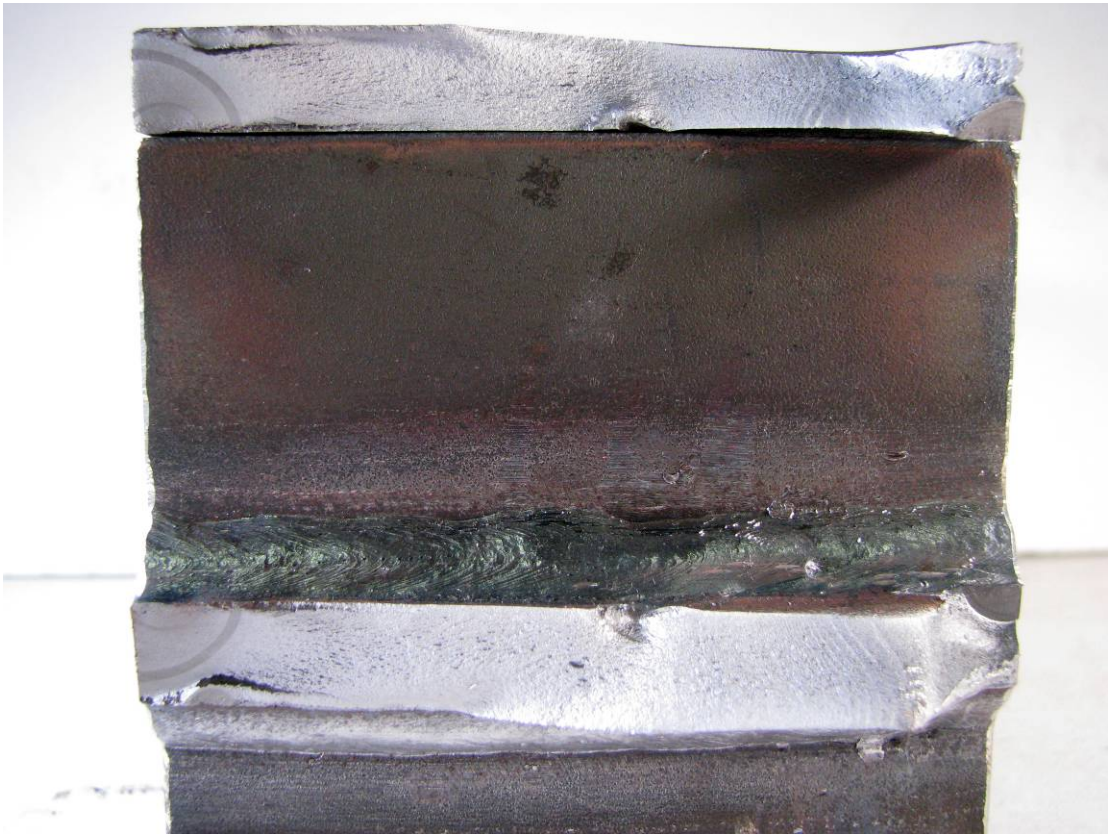


（b）試験体 2 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）②



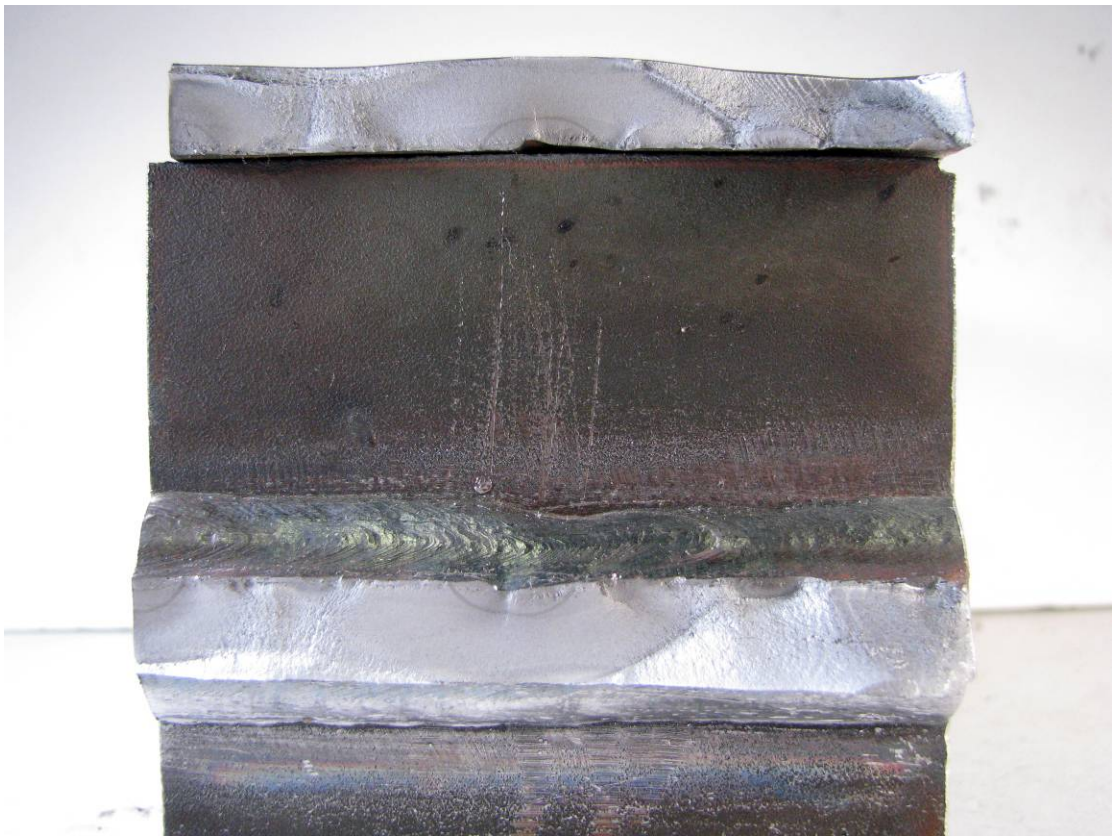
（a）試験体 3 上面



（b）試験体 3 正面

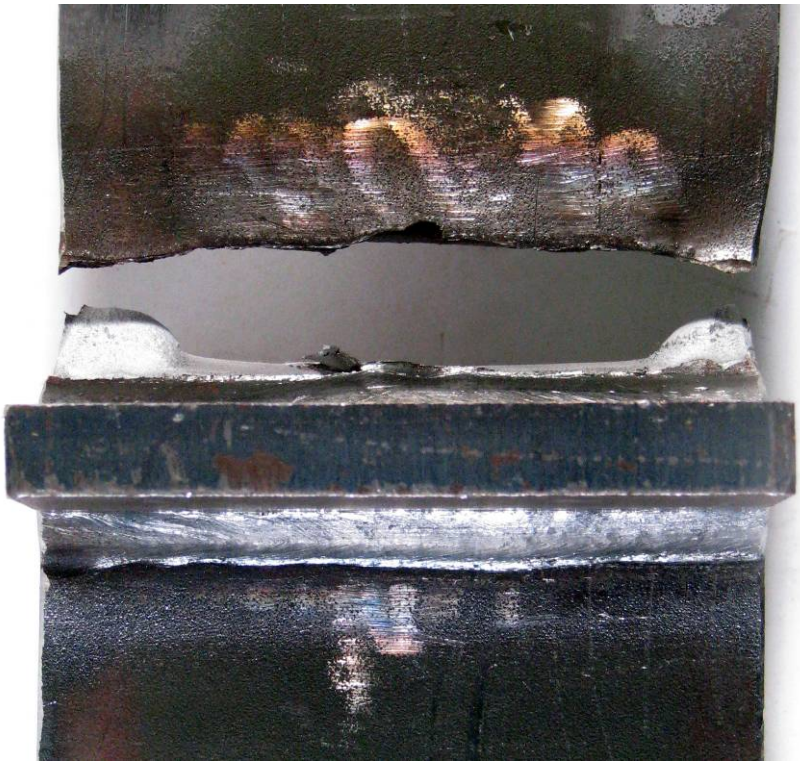
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）③

（a）試験体 4 上面



（b）試験体 4 正面

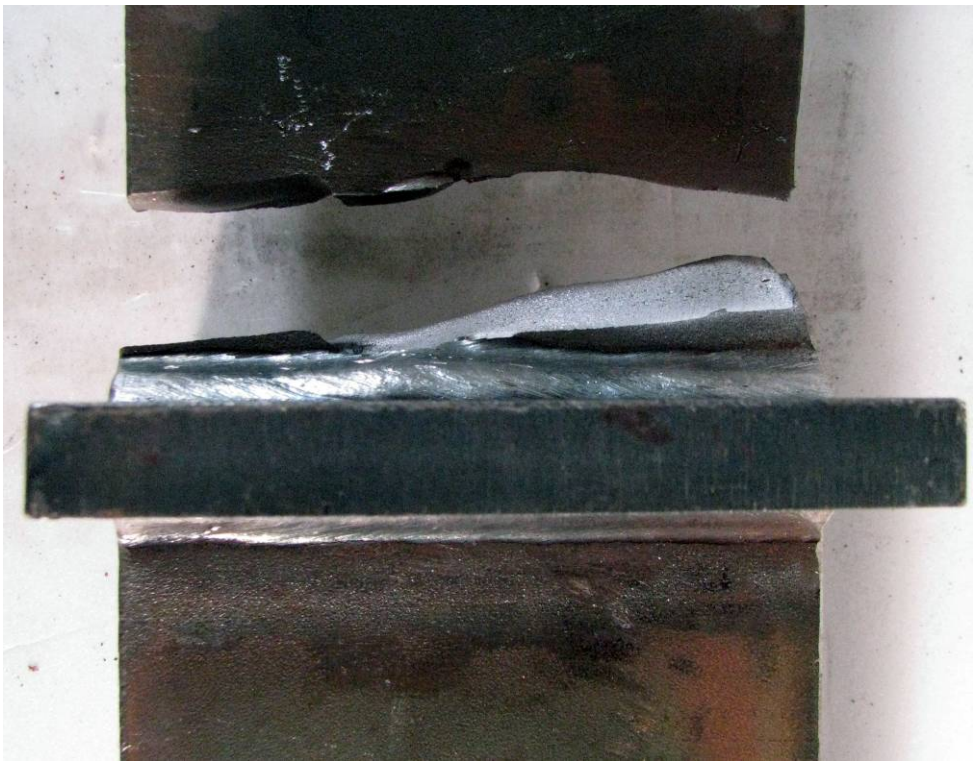
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）④



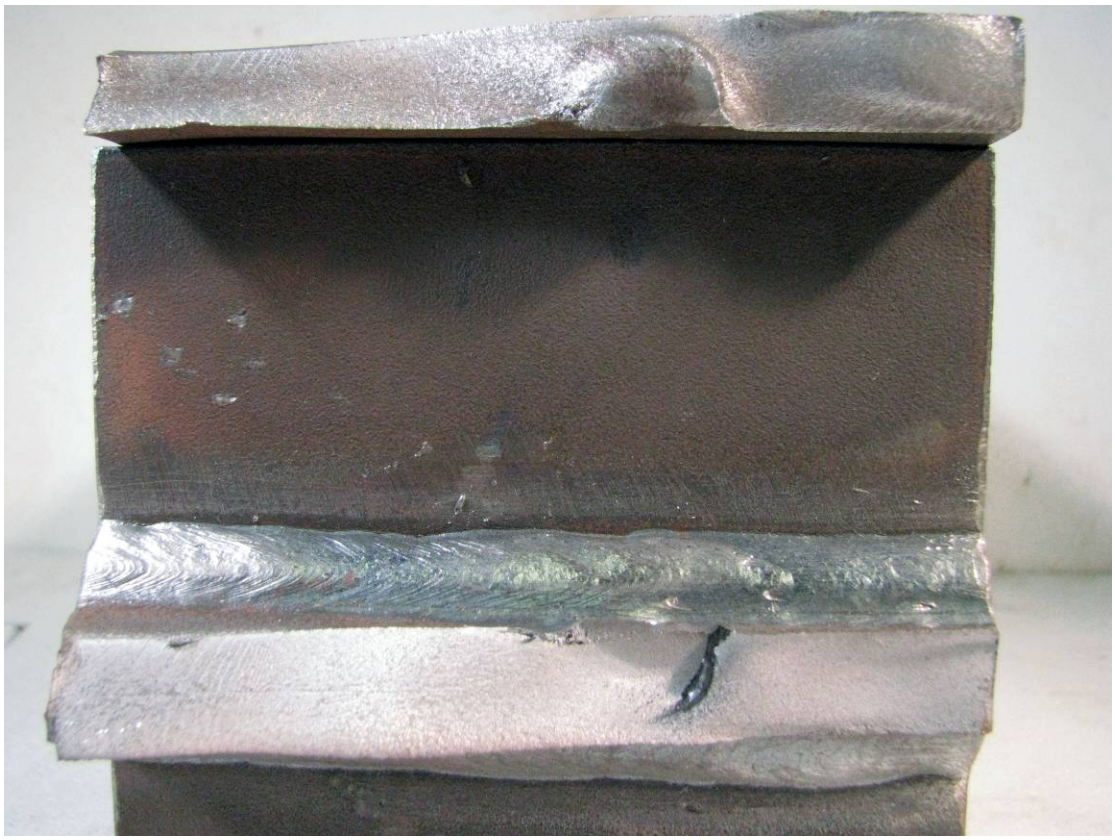
（a）試験体 5 上面

（b）試験体 5 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑤



（a）試験体 6 上面



（b）試験体 6 正面

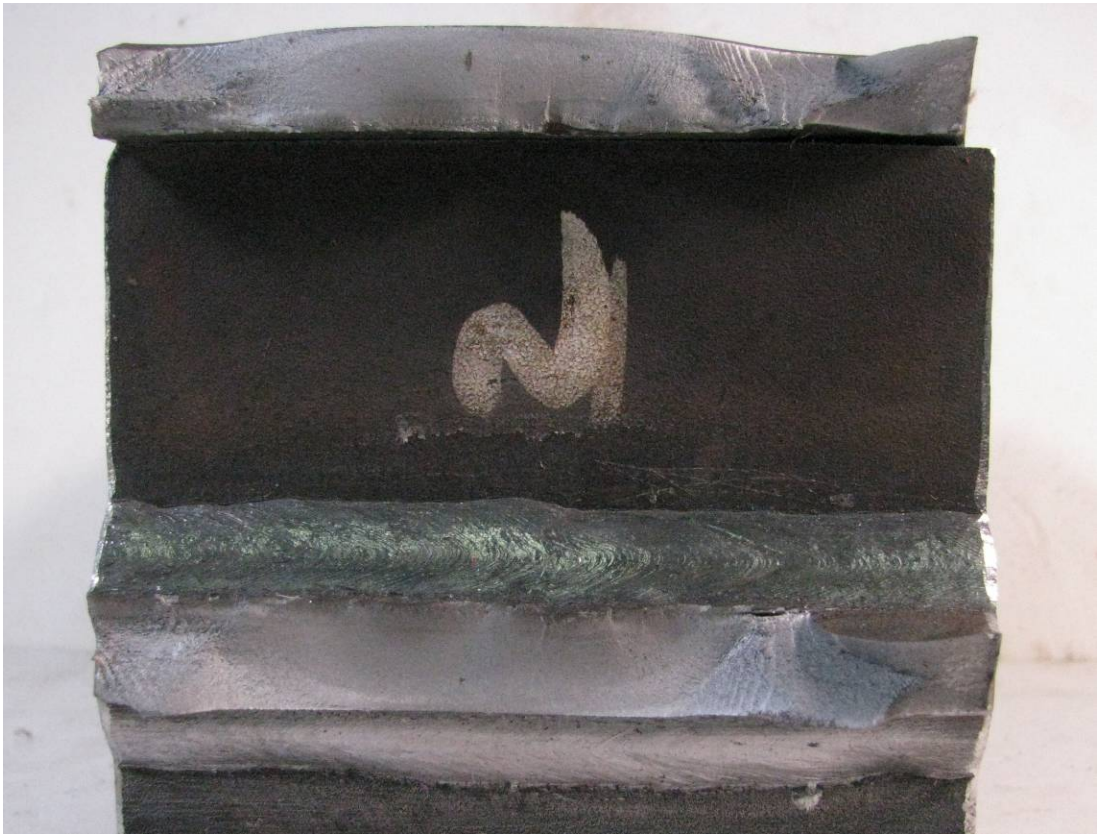
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑥

（a）試験体 7 上面

（b）試験体 7 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑦

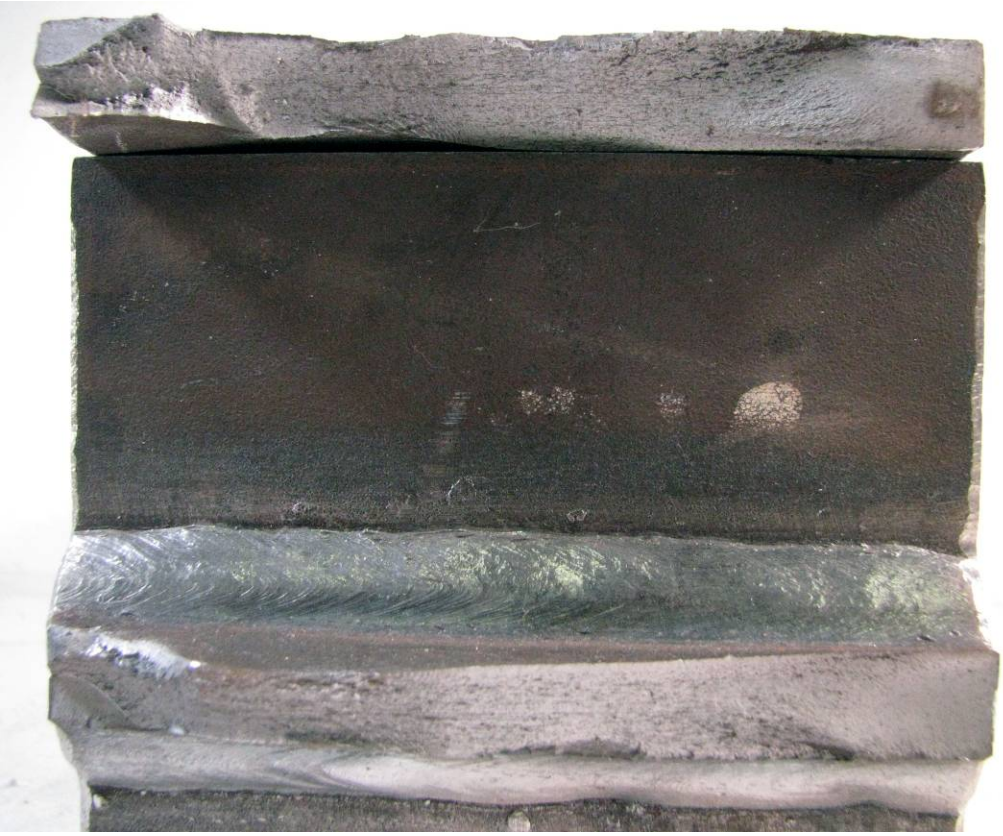
（a）試験体 8 上面



（b）試験体 8 正面

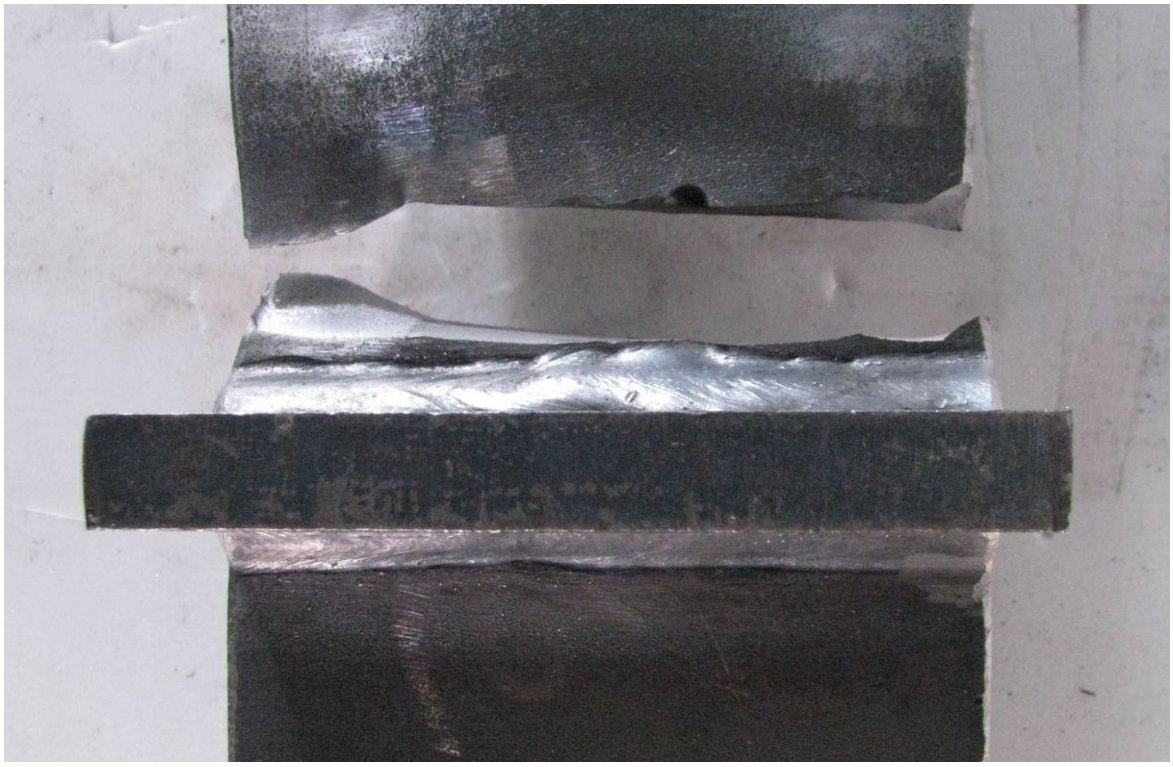
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑧

（a）試験体 9 上面



（b）試験体 9 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑨



（a）試験体 10 上面

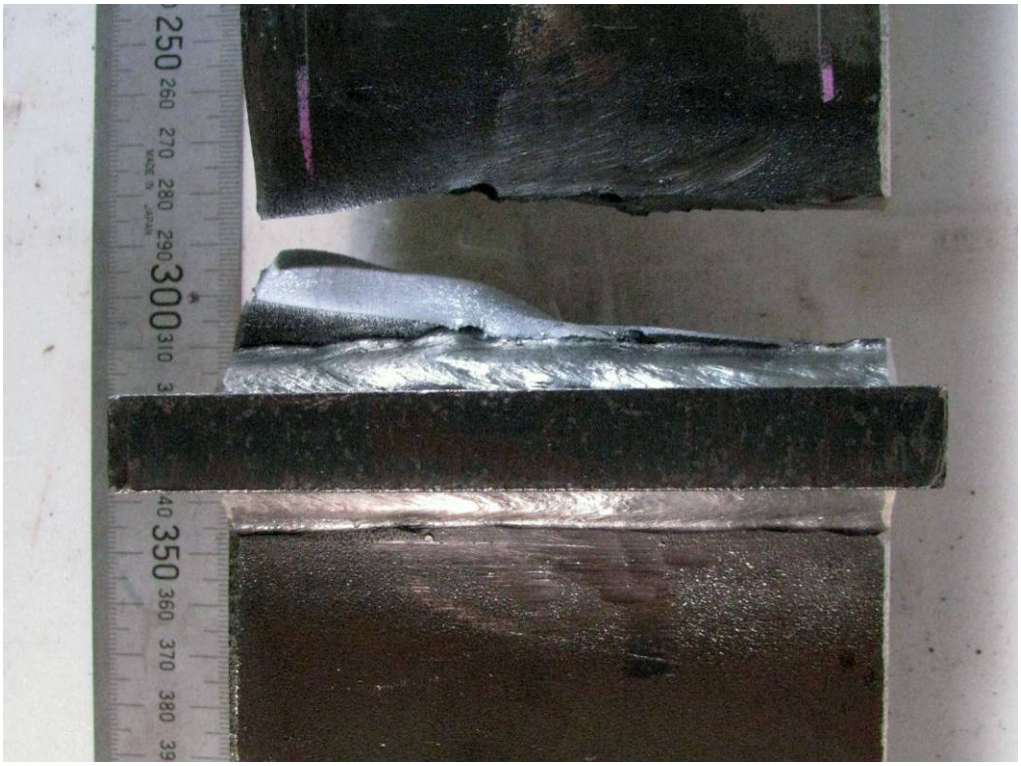
（b）試験体 10 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑩

（a）試験体 11 上面

（b）試験体 11 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑪

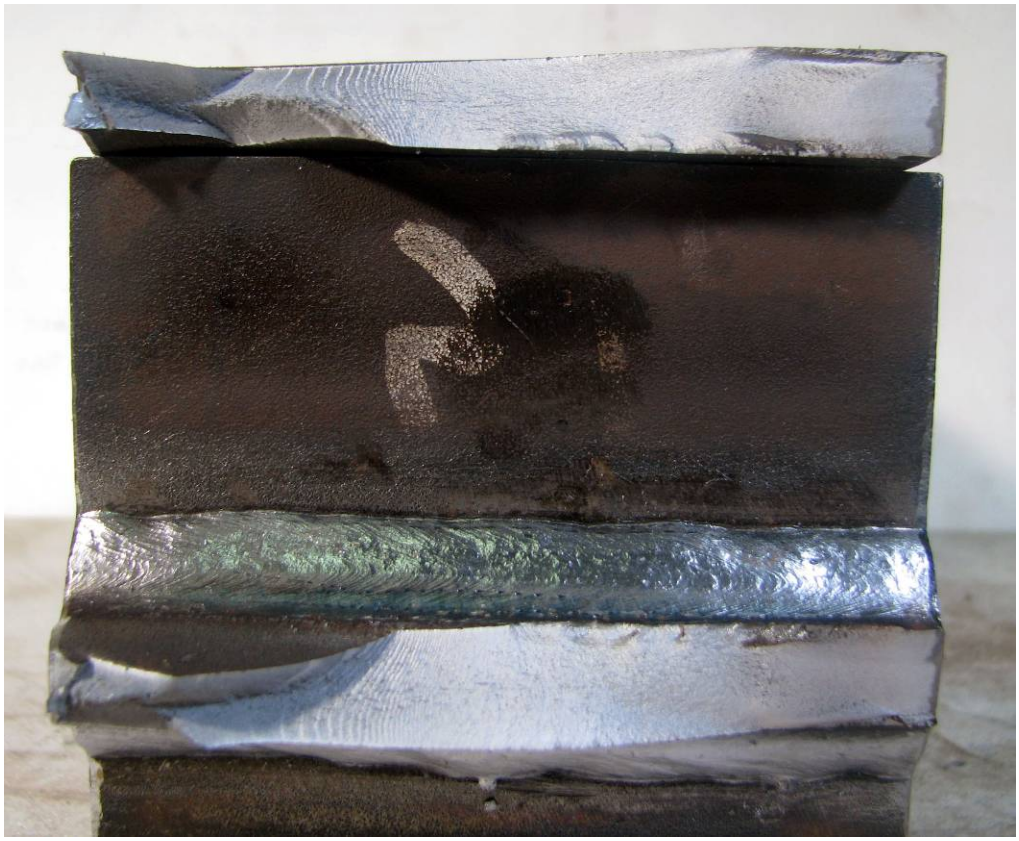


（a）試験体 12 上面

（b）試験体 12 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑫

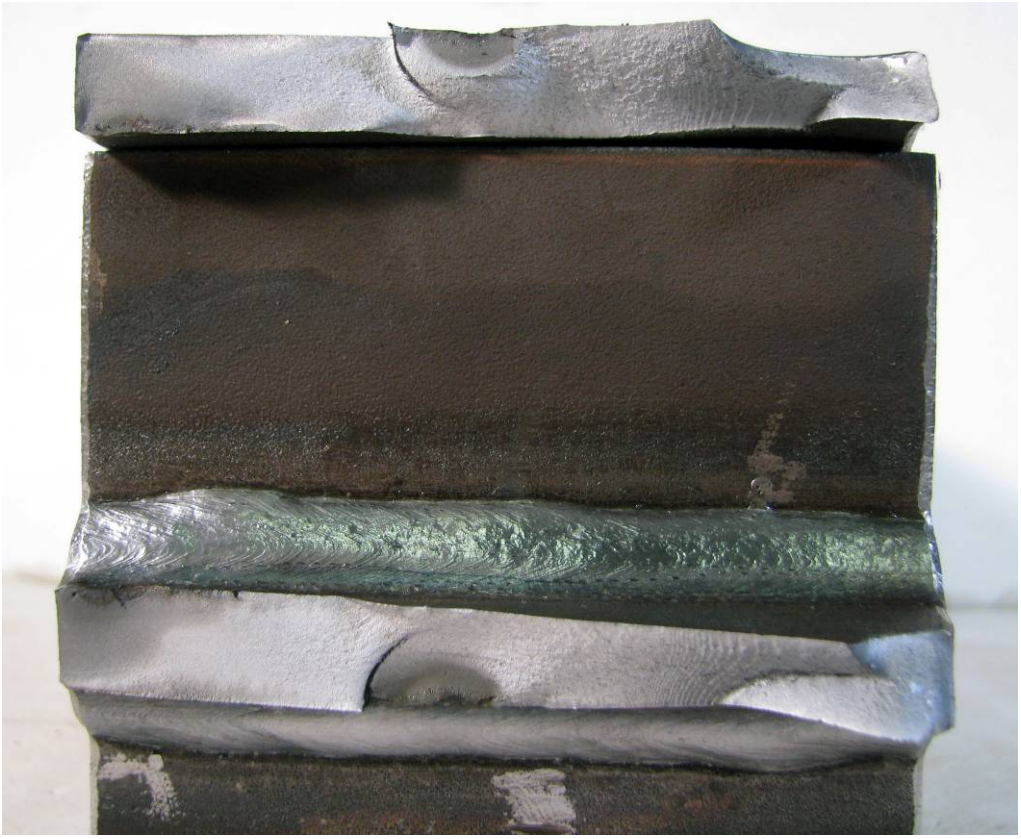
（a）試験体 16 上面



（b）試験体 16 正面

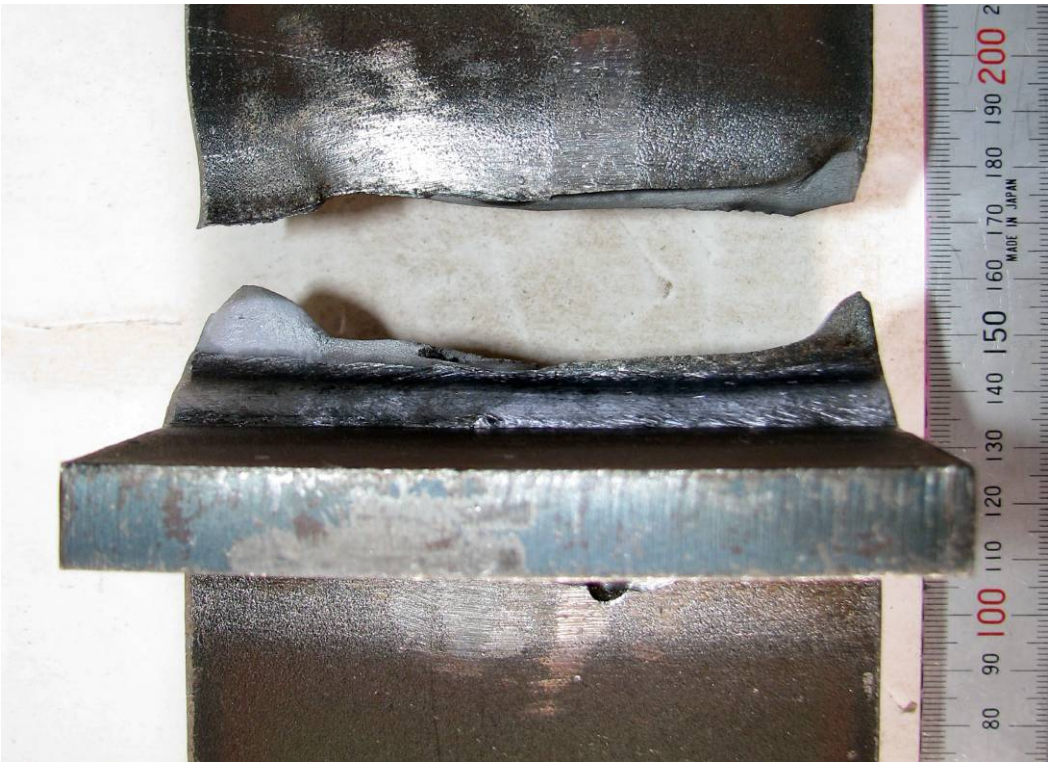
写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑬

（a）試験体 17 上面

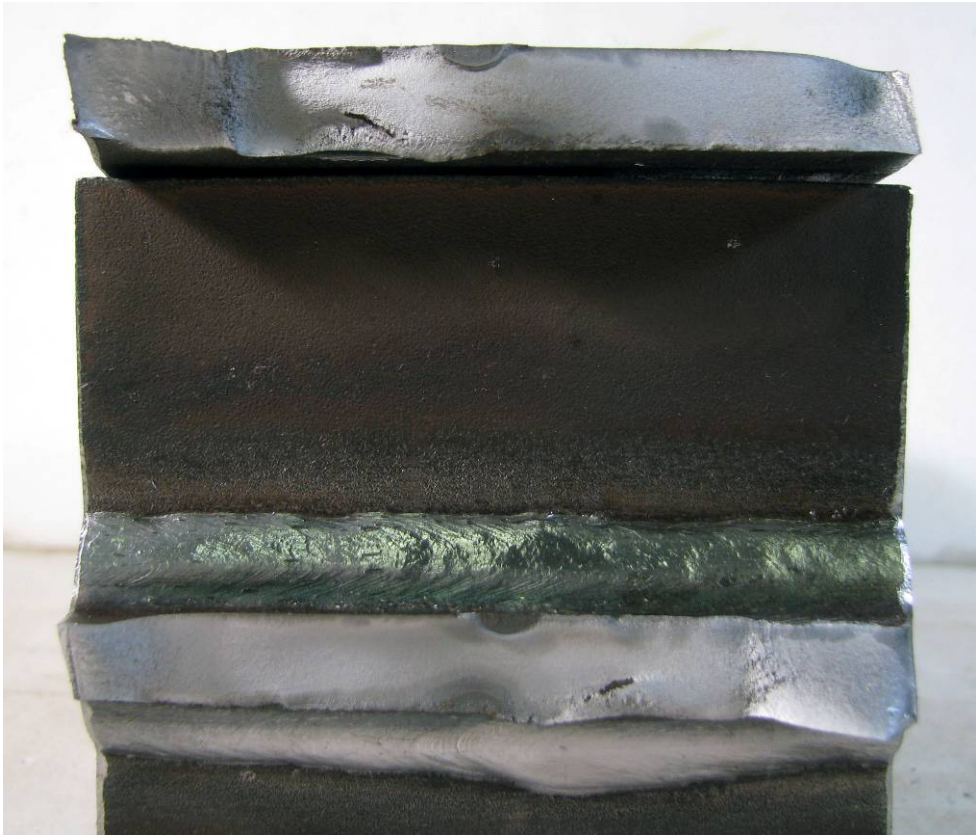


（b）試験体 17 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑭



（a）試験体 18 上面



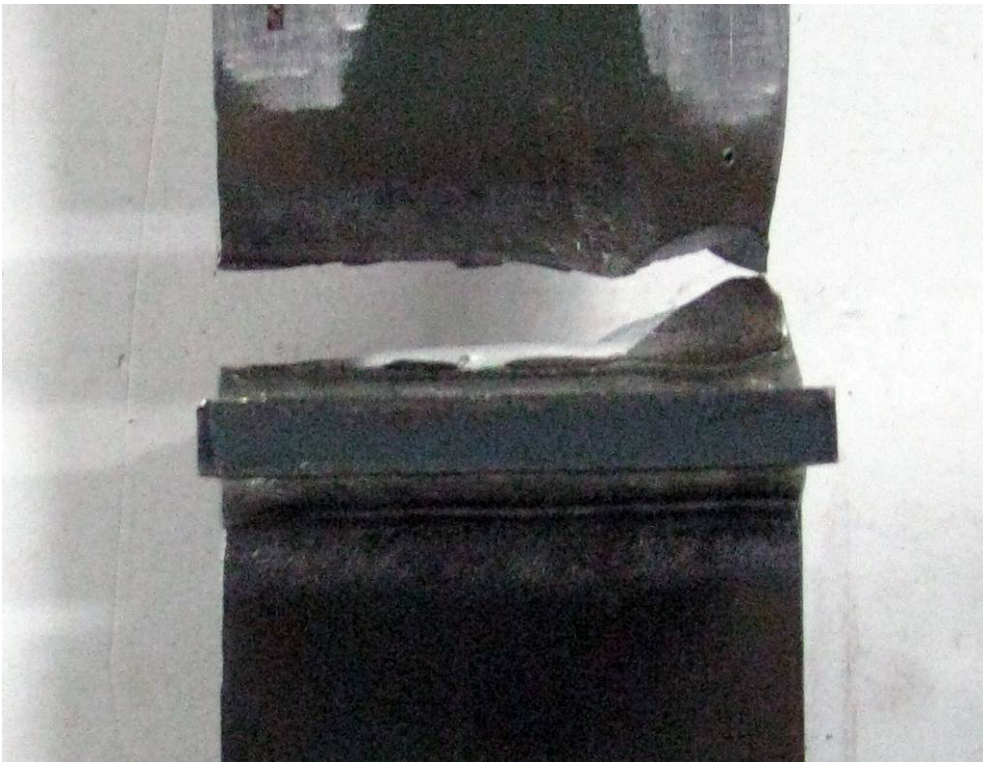
（b）試験体 18 正面

写真 4.2　試験体破断面（アンダーカットあり）⑮

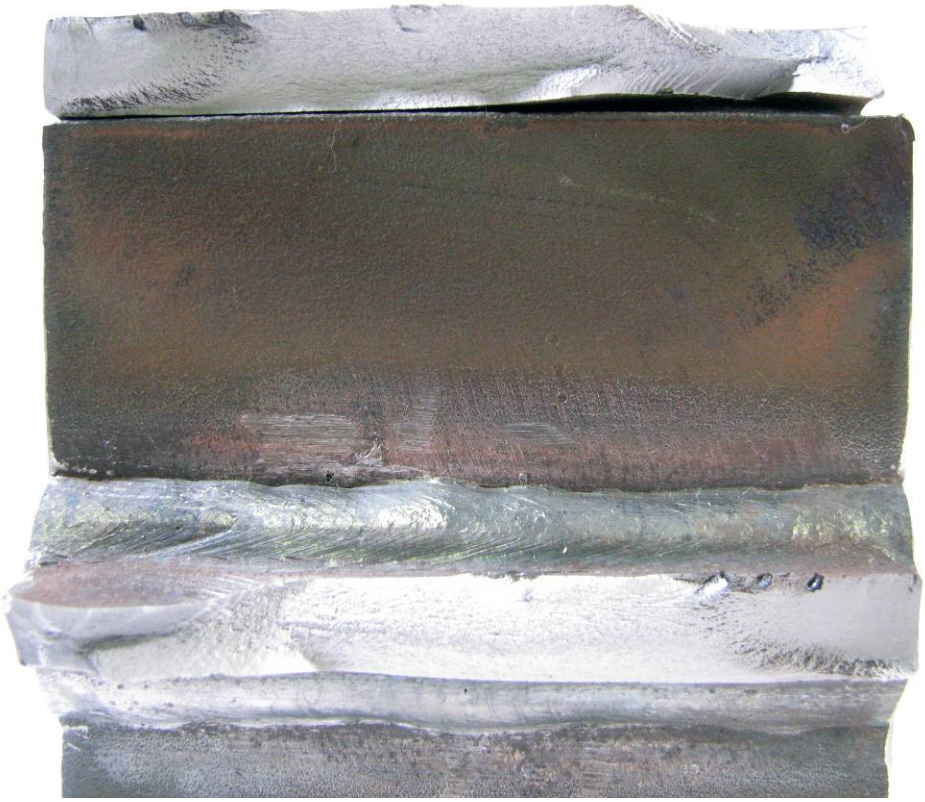
（a）試験体 1 上面

（b）試験体 1 正面

写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）①

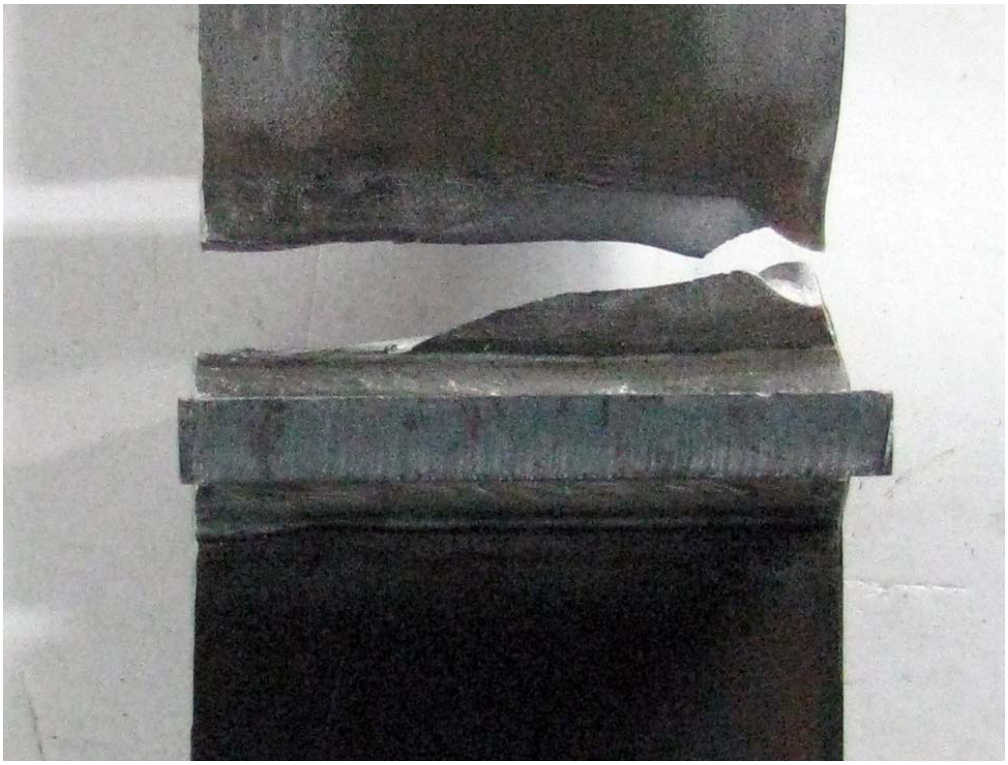


（a）試験体 2 上面

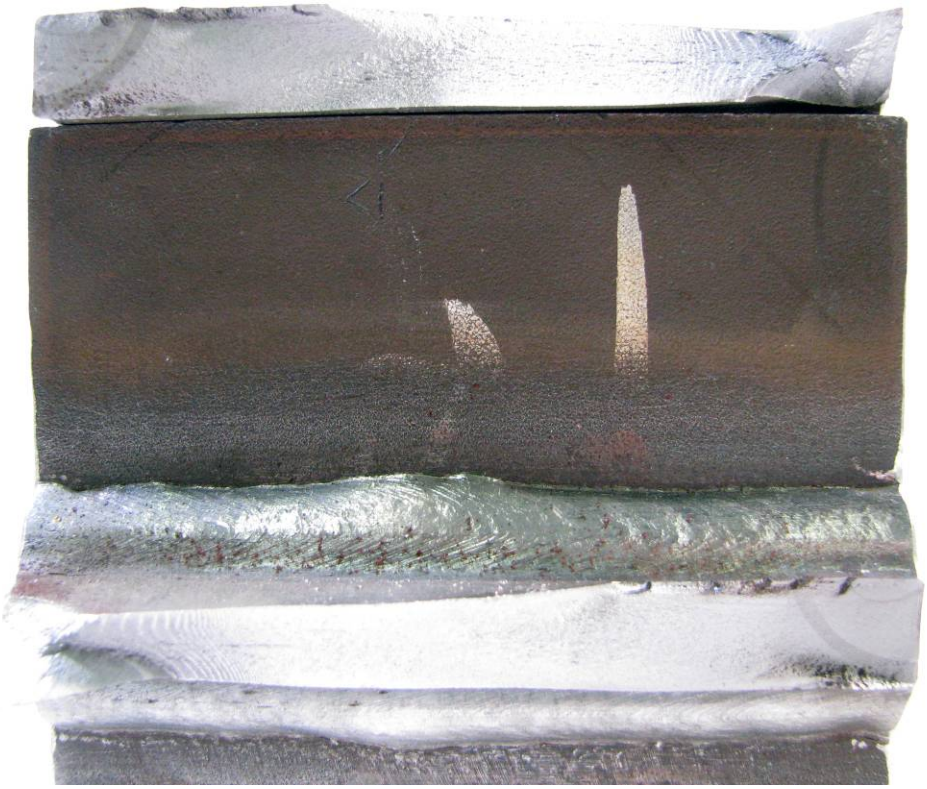


（b）試験体 2 正面

写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）②

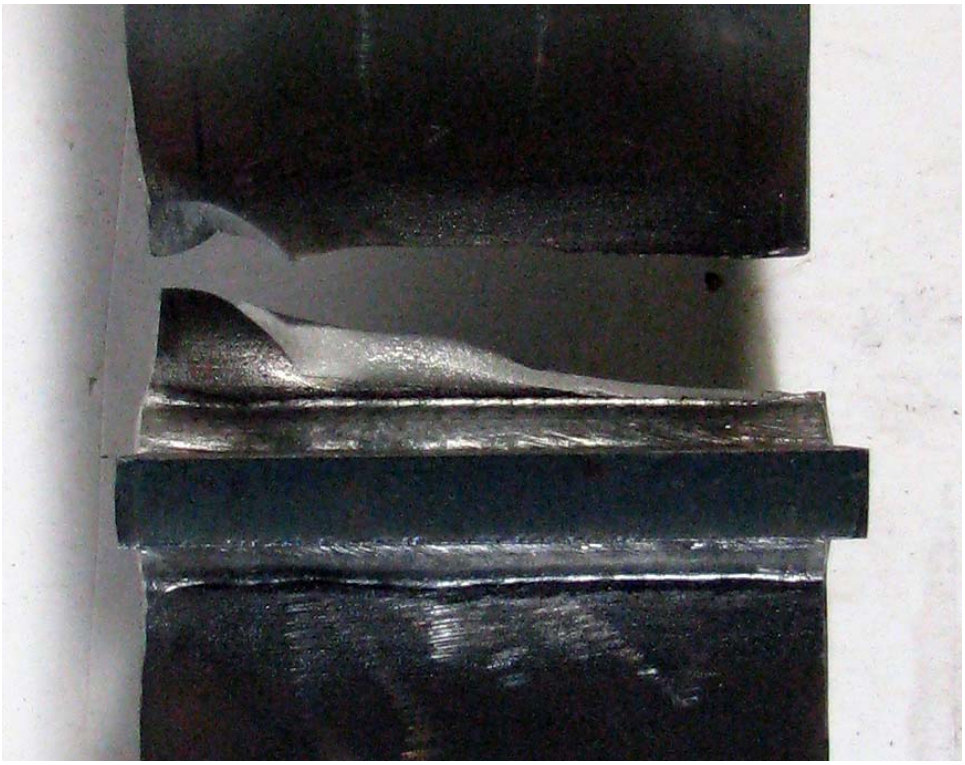


（a）試験体 3 上面



（b）試験体 3 正面

写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）③

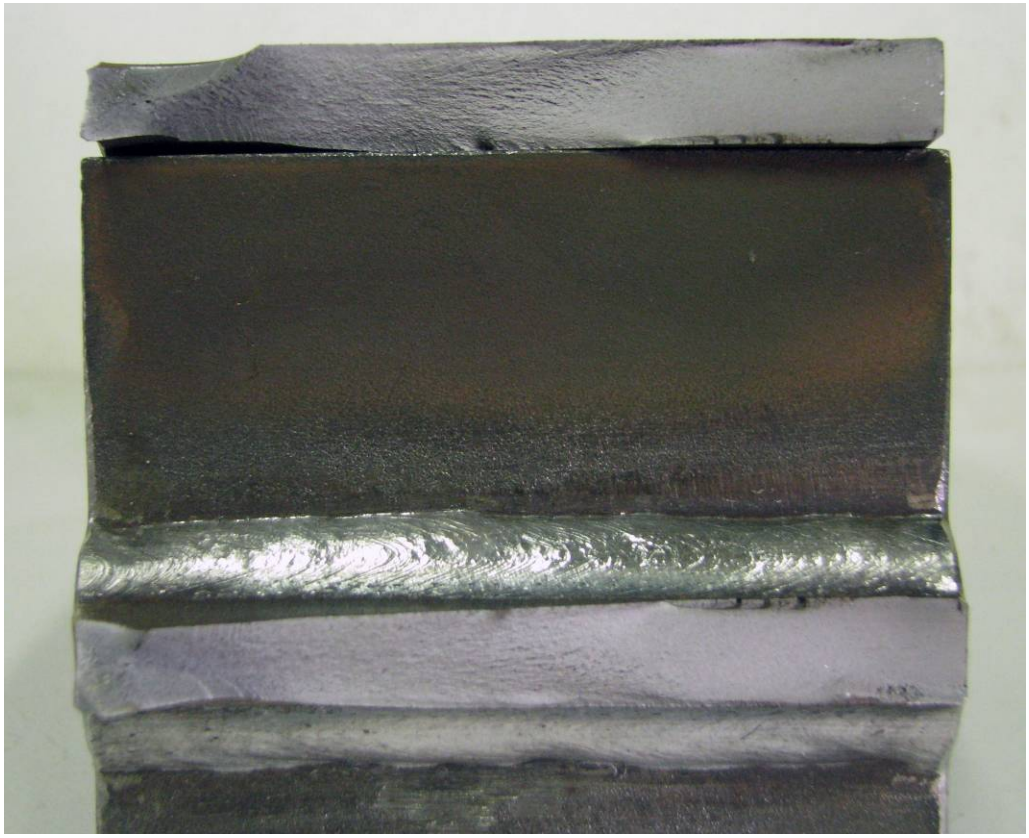


（a）試験体 4 上面

（b）試験体 4 正面

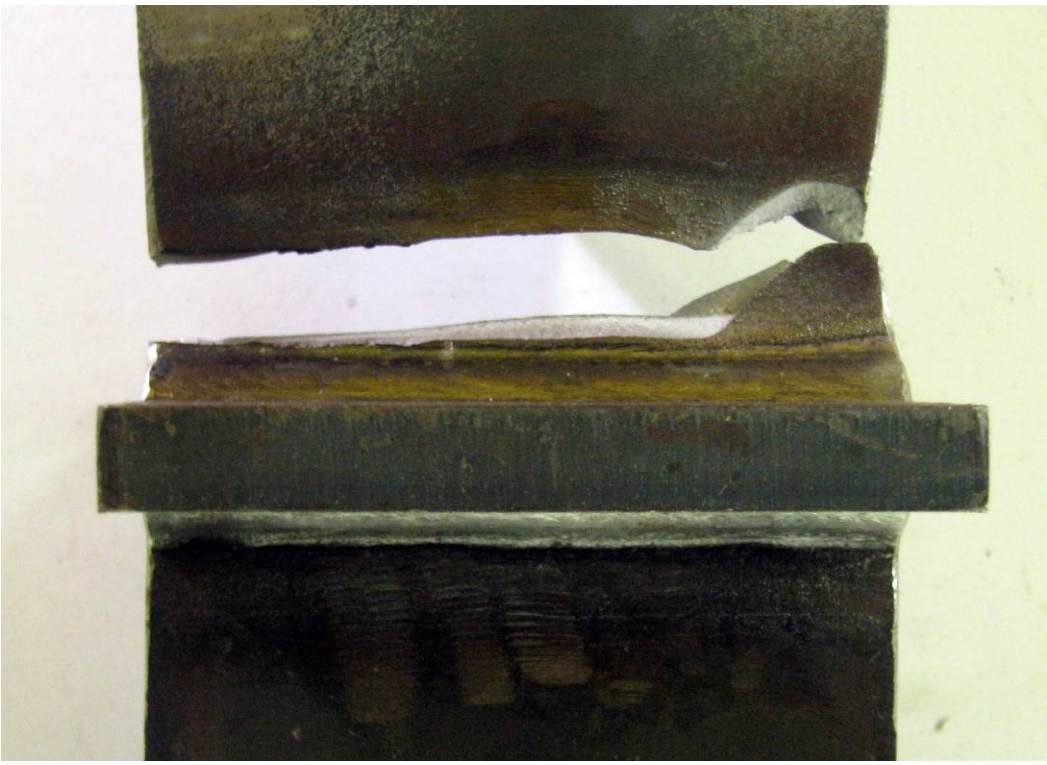
写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）④

（a）試験体 6 上面

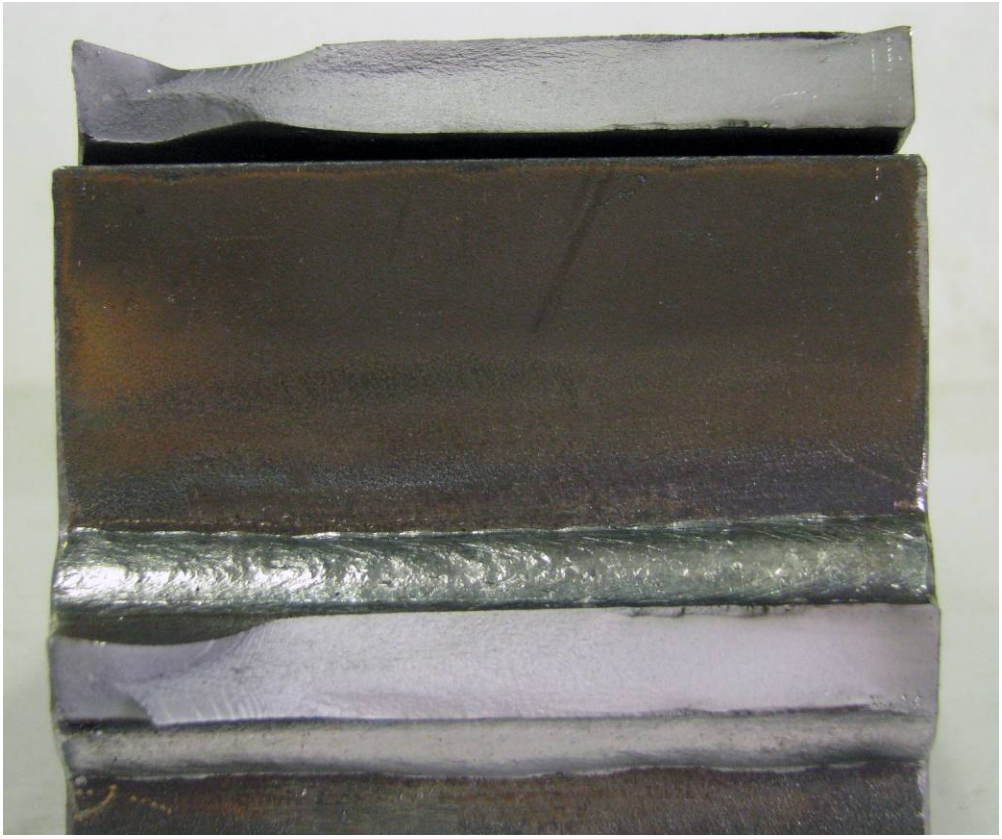


（b）試験体 6 正面

写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）⑤

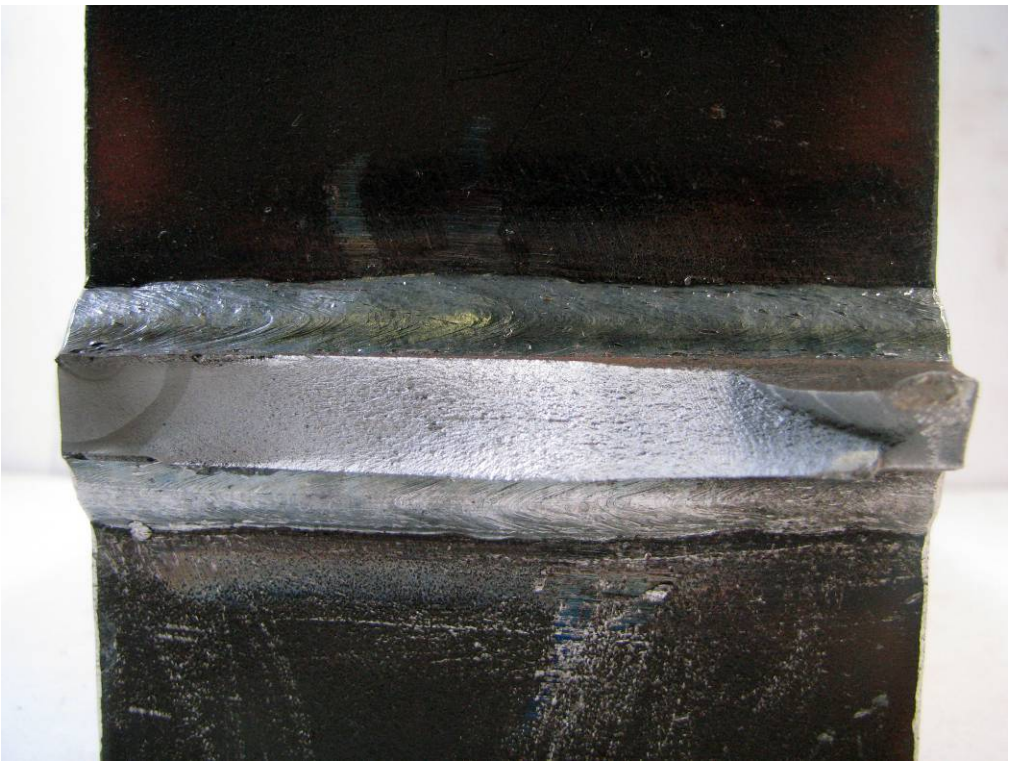


（a）試験体 9 上面

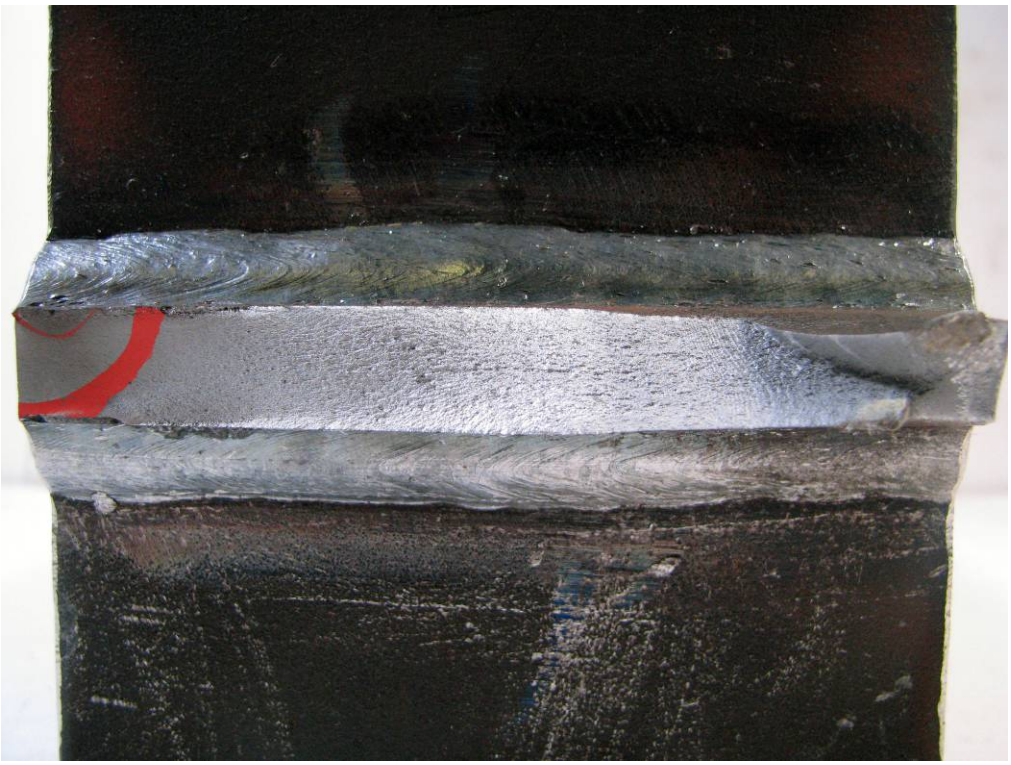


（b）試験体 9 正面

写真 4.3　試験体破断面（アンダーカットなし）⑥

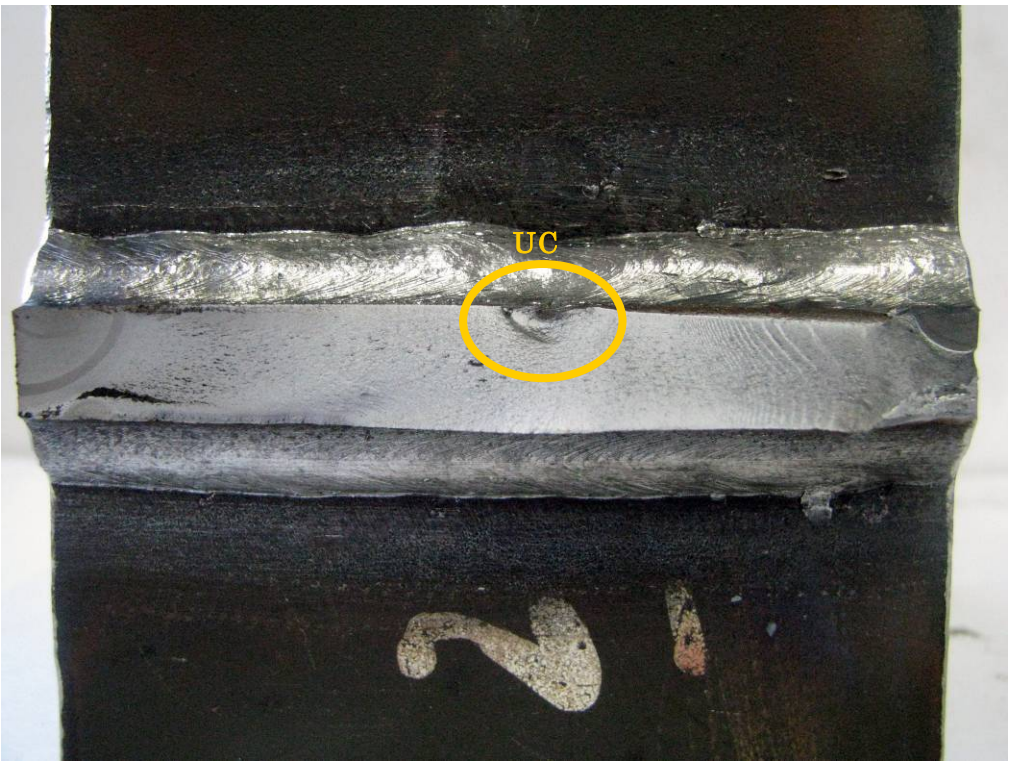


（a）試験体 2（着色前）

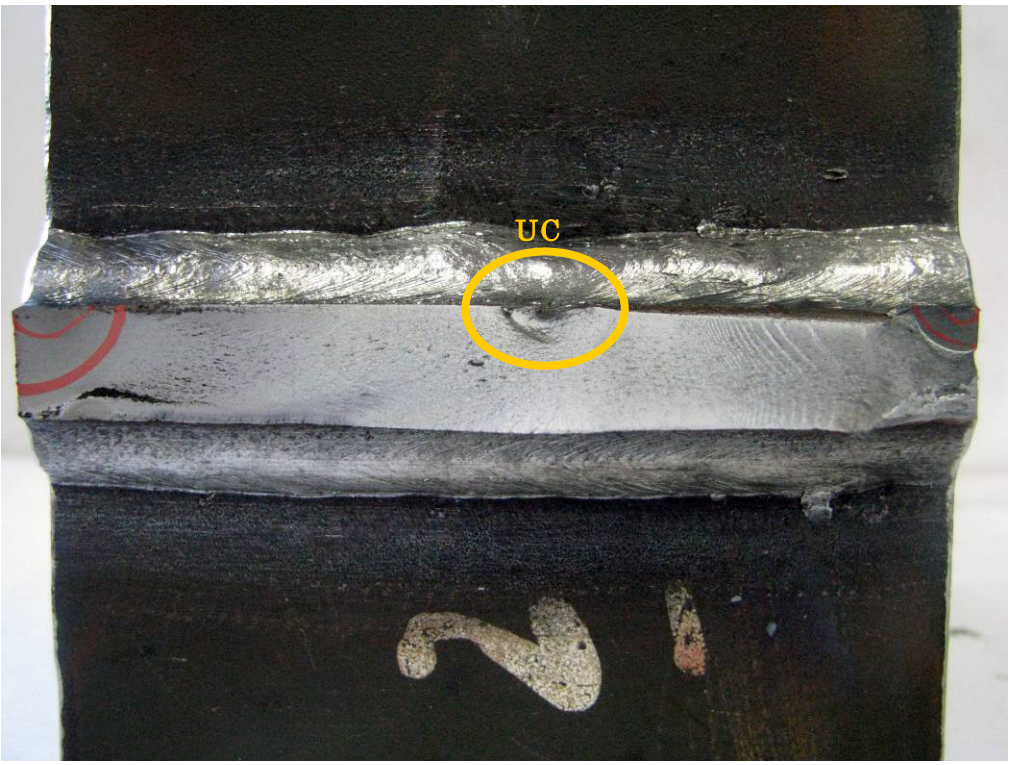


（b）試験体 2（着色後）

写真 4.4　ビーチマーク破面（アンダーカットあり）①

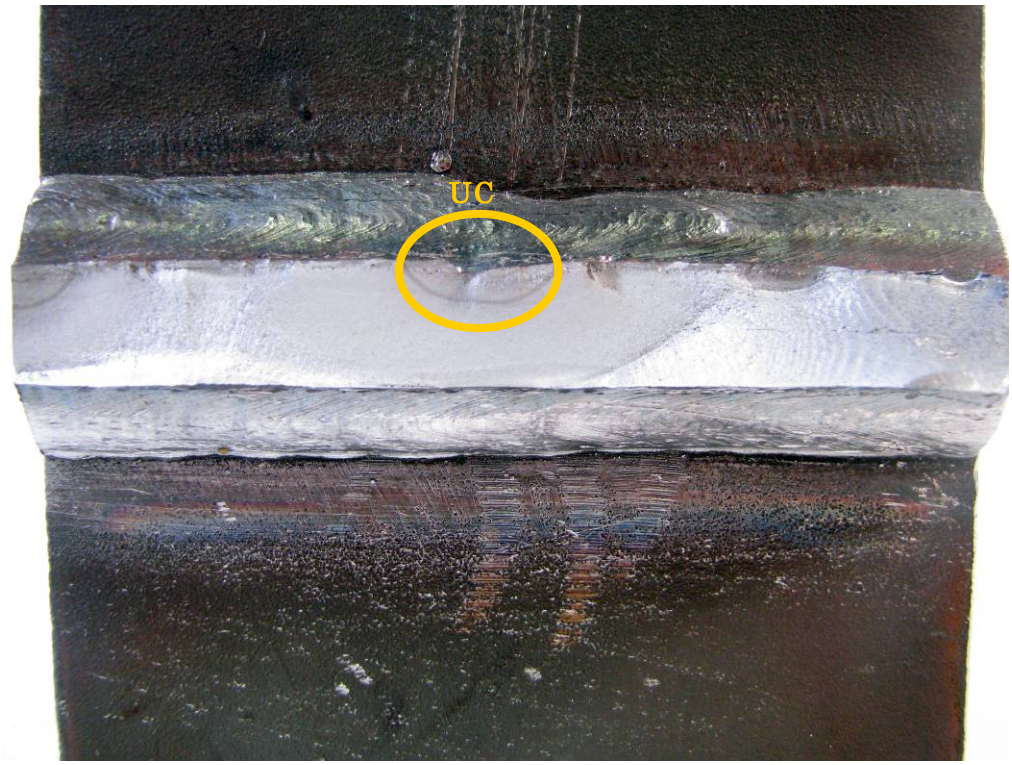


（a）試験体 3（着色前）

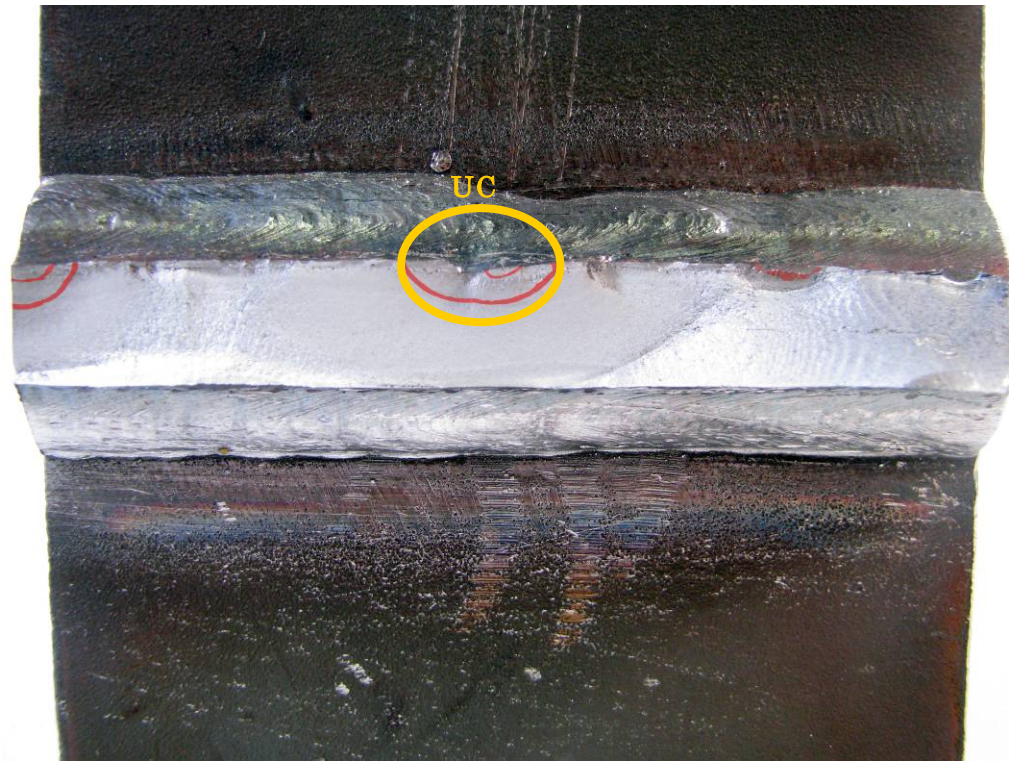


（b）試験体 3（着色後）

写真 4.4　ビーチマーク破面（アンダーカットあり）②

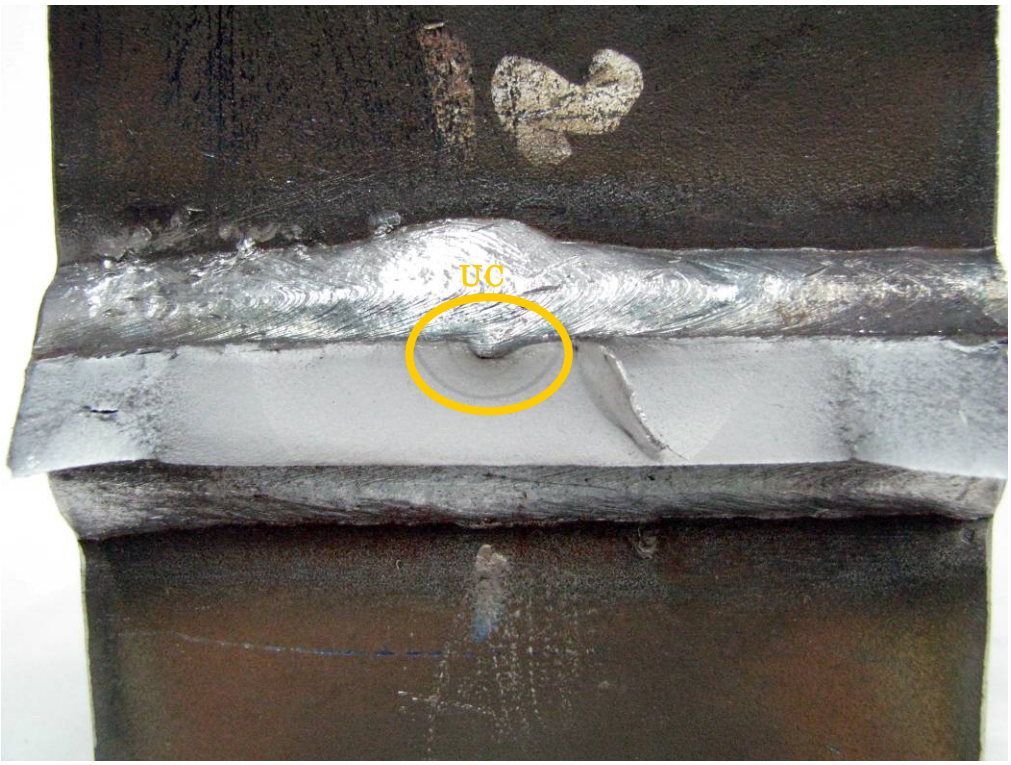


（a）試験体 4（着色前）

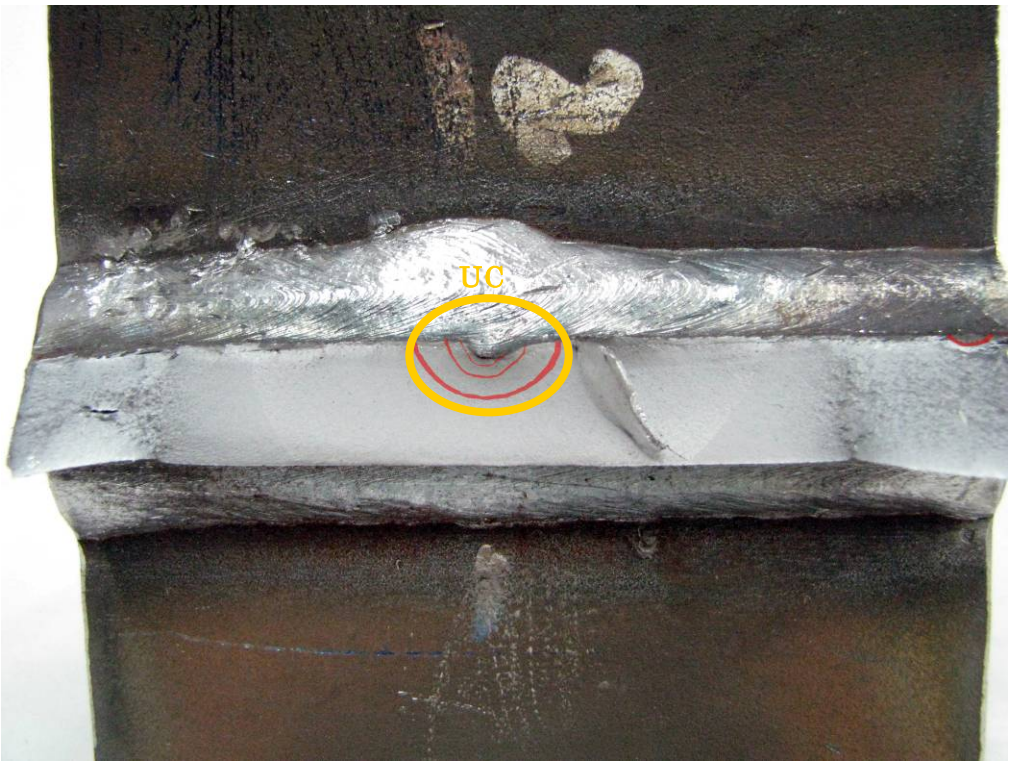


（b）試験体 4（着色後）

写真 4.4　ビーチマーク破面（アンダーカットあり）③

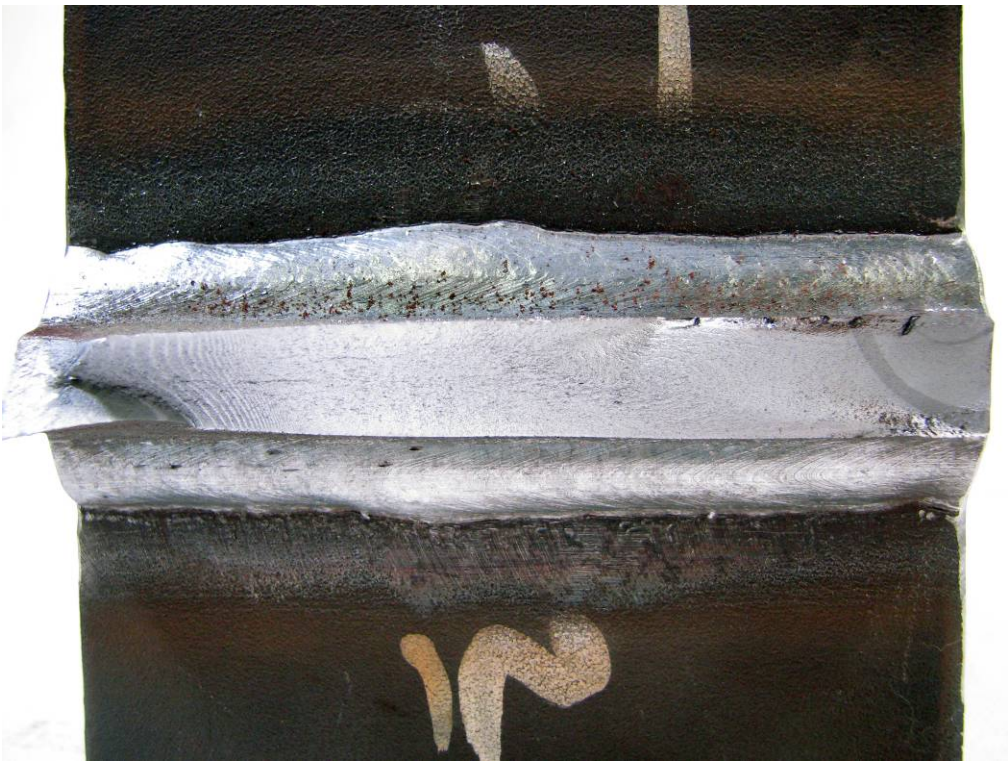


（a）試験体 5（着色前）

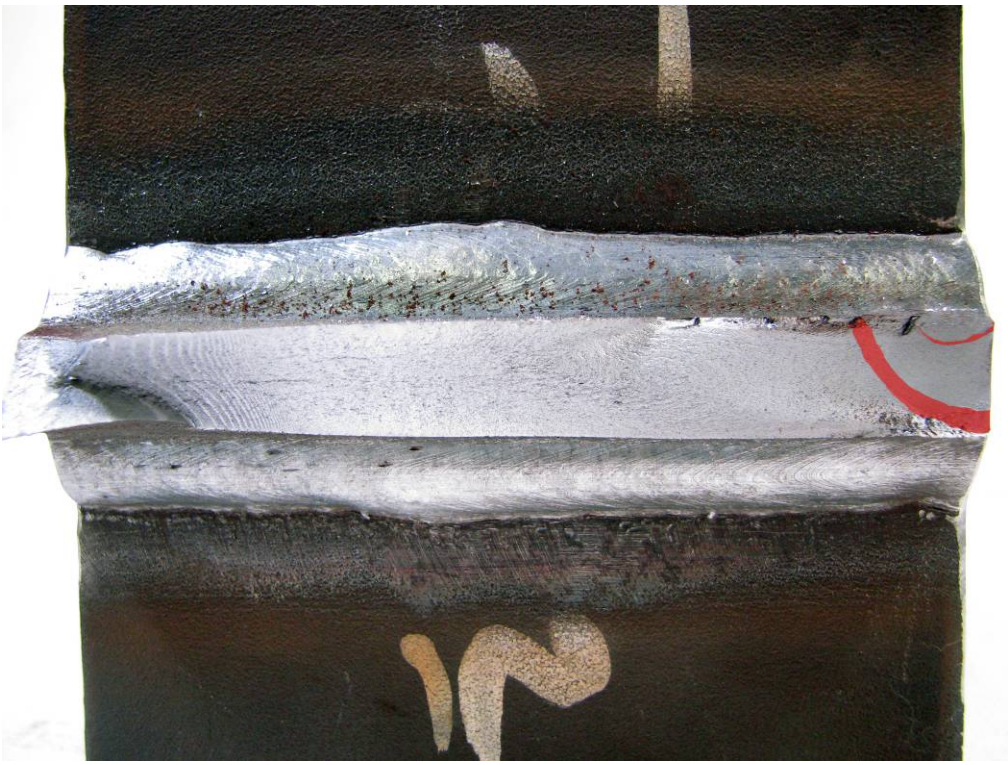


（b）試験体 5（着色後）

写真 4.4　ビーチマーク破面（アンダーカットあり）④

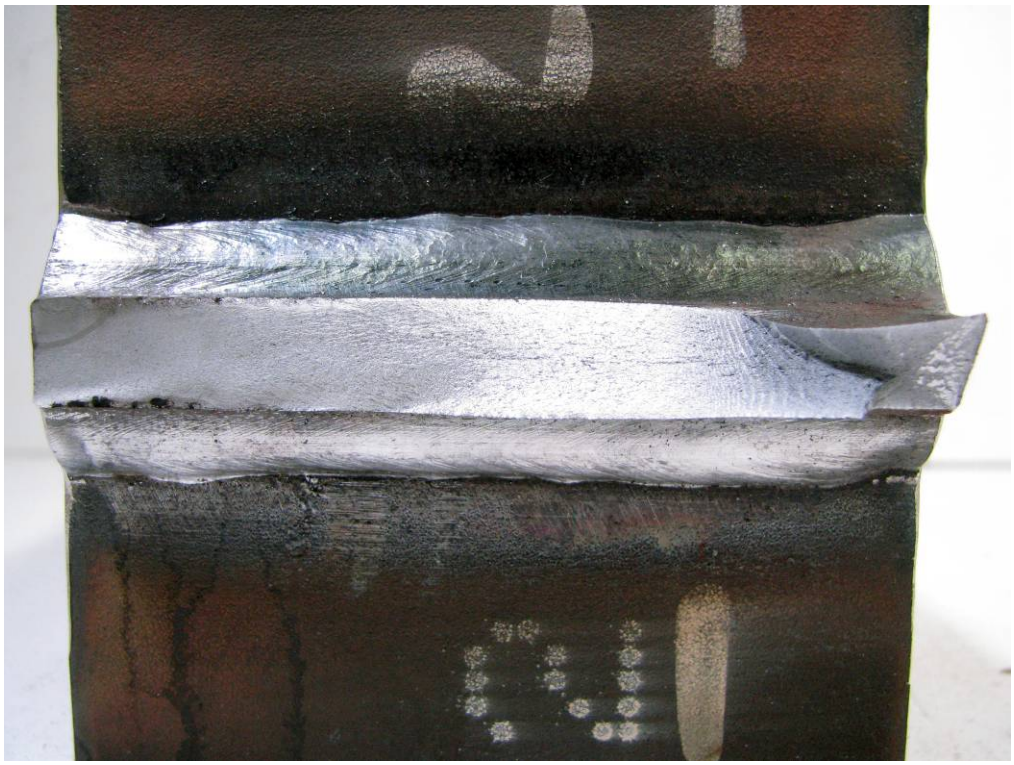


（a）試験体 3（着色前）

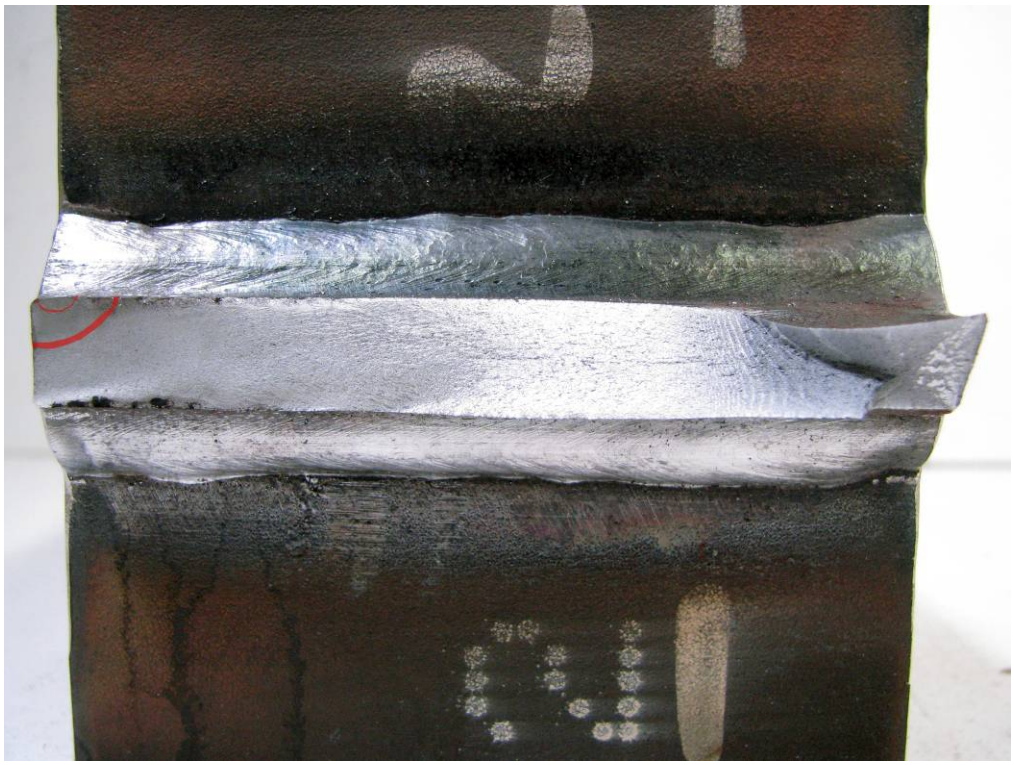


（b）試験体 3（着色後）

写真 4.5　ビーチマーク破面（アンダーカットなし）①



（a）試験体 4（着色前）



（b）試験体 4（着色後）

写真 4.5　ビーチマーク破面（アンダーカットあり）②

第５章　応力解析

5.1　　解析方法

これまでの研究ではアンダーカットを有する継手の応力集中を検討する際に２次元応力解析を行っていた。そのため３次元モデルで詳細にアンダーカット形状を再現する必要がある。そこでアンダーカット部近傍の応力性状を調べるために汎用有限要素法解析プログラム CAFEM を用いて 3 次元弾性有限要素法応力解析を行った要素分割や結果の整理には FEMAP を用いた。用いた要素は 8 節点固体要素、鋼材のヤング率は 2.0×10^5N/mm^2、ポアソン比は 0.3 とした。アンダーカット部近傍の要素寸法は 0.1mm としている。荷重はモデル端に等分布荷重の 100N/mm^2 の軸方向引張応力を作用させて行った。

5.2　レーザー変位計を用いた再現モデル

5.2.1　解析モデル

実際の試験体でアンダーカットの存在が応力集中にどのような影響を及ぼしているのかを明らかにする目的で 3 次元有限要素応力解析を行った。この解析ではレーザー変位計で試験体のアンダーカット部近傍の形状を測定した結果をそのまま節点データとしてモデルを作成し、3 次元有限要素応力解析を行った。解析対象は、実際に疲労試験を行った試験体から計測した４つのアンダーカット形状のデータを使用したモデルである。レーザー変位計を使用したアンダーカットモデルと比較をするために、アンダーカットを含まない試験体の溶接止端の形状をレーザー変位計で計測し、通常試験体の再現モデルも４つ作成し応力解析を行った。解析は、モデルの対称性を考慮し、1/8 モデルを対象として行った。モデルの作成には有限要素法解析プリホスト FEMAP を用いた。解析モデルの寸法は板厚 12mm、板幅 100mm、板長 300mm とした。要素寸法はアンダーカット部で 0.1mm、通常試験体では溶接止端部全体で 0.1mm とした。アンダーカット試験体モデルの要素分割図を図 5.1 に示す。通常試験体の要素分割図を、図 5.2 に示す。使用したアンダーカットの形状を表 5.1 に示す。

5.2,2　解析結果

レーザー変位計を用いた再現モデルの応力解析より得られた主応力コンター図を図 5.3、5.4 に示す。各試験体モデルの溶接止端に沿う応力分布図を図 5.5、5.6 に、最大の応力集中係数を表 5.2 に示す。それぞれの最大応力集中係数の平均値は、アン

ダーカットモデルで 3.33、アンダーカットないモデルで 2.94 でありその差は 13 パーセントであった。アンダーカットを有する試験体では、応力集中はアンダーカットの最深部ではないが、アンダーカットの部分で最大になっている。アンダーカットのない試験体では、すべてのモデルで違った箇所で最大になっている。原因としては、レーザー変位計による節点データの凹凸が影響していると考えられる。

5.3 アンダーカット寸法を変化させたモデル

5.3.1 解析モデル

アンダーカット形状が応力集中に及ぼす影響を明らかにする目的で、アンダーカットの深さ、開口幅、長さを変化させたモデルを対象とし 3 次元有限要素法応力解析を行った。アンダーカットの断面形状は、開口幅を長軸、深さを短軸する楕円形とした。解析対象は試験体寸法で、溶接止端部の板幅方向の中心にアンダーカットを設けた。解析は、対称性を考慮して 1/4 モデルで行った。アンダーカット部近傍での要素寸法は 0.1mm である。モデルの作成には有限要素法解析プリホスト FEMAP を用いた。応力解析はモデル端に等分布の軸方向引張応力（100N/mm^2）を作用させて行った。溶接形状は、第 3 章で示した測定値の平均値に基づいて主板側脚長を 6.8mm、付加板側脚長を 8.0mm、フランク角を 116 度、曲率半径を主版側 1.5mm とした。解析に使用したアンダーカット寸法を表 5.3 に、要素分割図の例を図 5.7 に示す。さらに、比較のためアンダーカットのないモデルの解析も行っている。

5.3.2 解析結果

主応力のコンター図を図 5.8 に示す。主応力分布の例を図 5.9 に示す。アンダーカットを有するモデルもアンダーカットのないモデルも溶接止端に沿って応力集中が生じている。アンダーカットのなし試験体では試験体側面から数 mm 中に入った溶接止端に最大の応力集中が確認された。これは疲労試験のき裂発生位置とも一致している。アンダーカットを有するモデルでは、試験体側面から数 mm 中に入った溶接止端にアンダーカットにないモデルと同じ大きさの応力集中が確認された。またアンダーカットの形状により様々ではあるがアンダーカットの底でも応力集中が確認された。アンダーカットのないモデルの最大応力集中係数とアンダーカットを有すモデルのアンダーカット部に生じた最大応力集中係数を表 5.4 に示す。表に示すように、アンダーカットを有していても一般部での応力集中の方が高くなるケースが確認された。さらにアンダーカット部の応力集中の方が高い場合でも、一般部との差が 10 パーセント以

下のものがほとんどであり、このことからもアンダーカットの存在は応力集中と疲労強度にさほど影響しないのではないかと考えられる。

アンダーカットの深さの影響を確認するため、モデル番号 3、4、6 では開口幅を 2mm とし、深さを 0.5mm、0.7mm、1mm と変化させ、モデル番号 5、7、11 では開口幅を 3mm とし、深さを 0.7mm、1mm、1.5mm と変化させた。解析結果から求めたアンダーカット底の応力集中係数とアンダーカット深さの関係を図 5.10 に示す。深さが大きくなるにつれて応力集中は高くなっているが、深さと開口幅によってはアンダーカットなしと大きな差はないといえる。

アンダーカットの開口幅の影響を確認するため、モデル番号 1、2、3 では深さを 0.5mm とし、開口幅を 1mm、1.5mm、2mm と変化させ、モデル番号 6、7、8 では深さを 1mm とし、開口幅を 2mm、3mm、4mm と変化させた。解析結果から求めたアンダーカット底の応力集中係数と開口幅の関係を図 5.11 に示す。開口幅が大きくなると応力集中は小さくなっている。深さが増しても開口幅が大きければアンダーカット底の応力集中は小さい。

アンダーカットの長さの影響を確認するため、モデル番号 7、9、10 では深さを 1mm、開口幅を 3mm とし、長さを 8mm、16mm、24mm と変化させた。解析結果から求めたアンダーカット底の応力集中係数を図 5.12 に示す。長さが大きくなるにしたがって応力集中係数は高くなる傾向が認められるものの、その差は小さい。

表 5.1　再現モデルアンダーカット寸法

モデル番号	アンダーカット寸法			
	深さ d（mm）	開口幅 W（mm）	曲率半径 ρ（mm）	長さ L（mm）
1	1.8	4.0	0.7	6.4
2	1.3	4.4	1.8	6.5
3	1.4	3.9	0.6	5.2
4	1.0	2.4	0.2	8.5

表 5.2　再現モデル応力集中係数

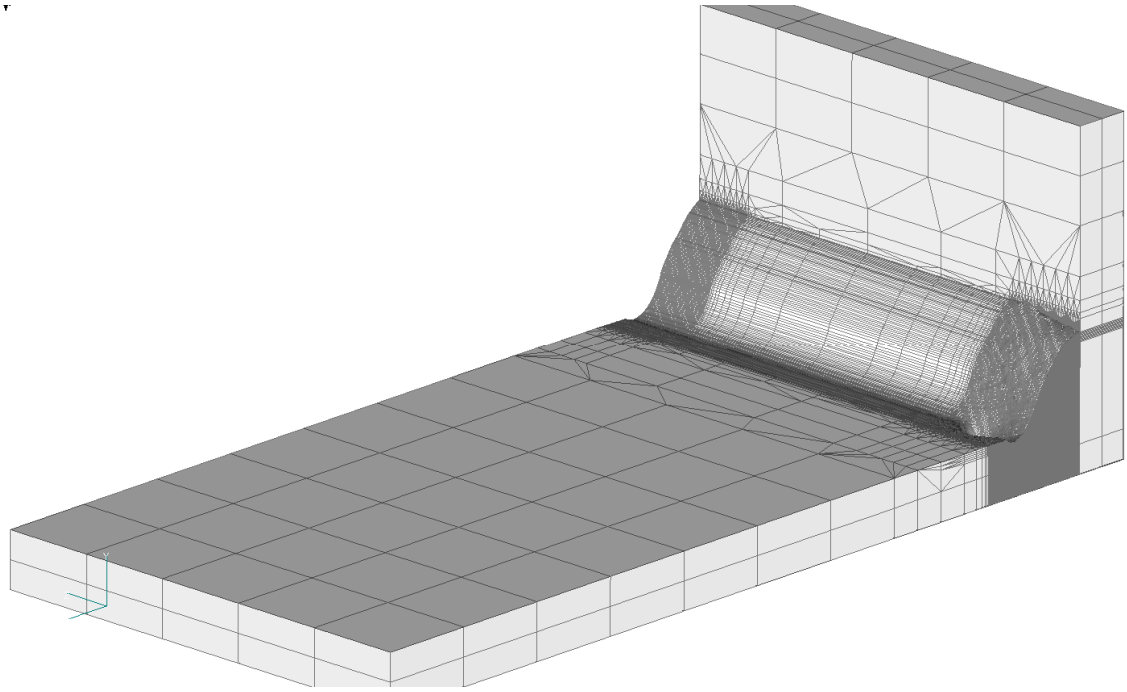
モデル番号	アンダーカットモデル	通常試験体
1	3.62	2.80
2	3.08	3.04
3	3.24	2.96
4	3.40	2.96
平均値	3.33	2.94

表 5.3　解析に使用したアンダーカット寸法

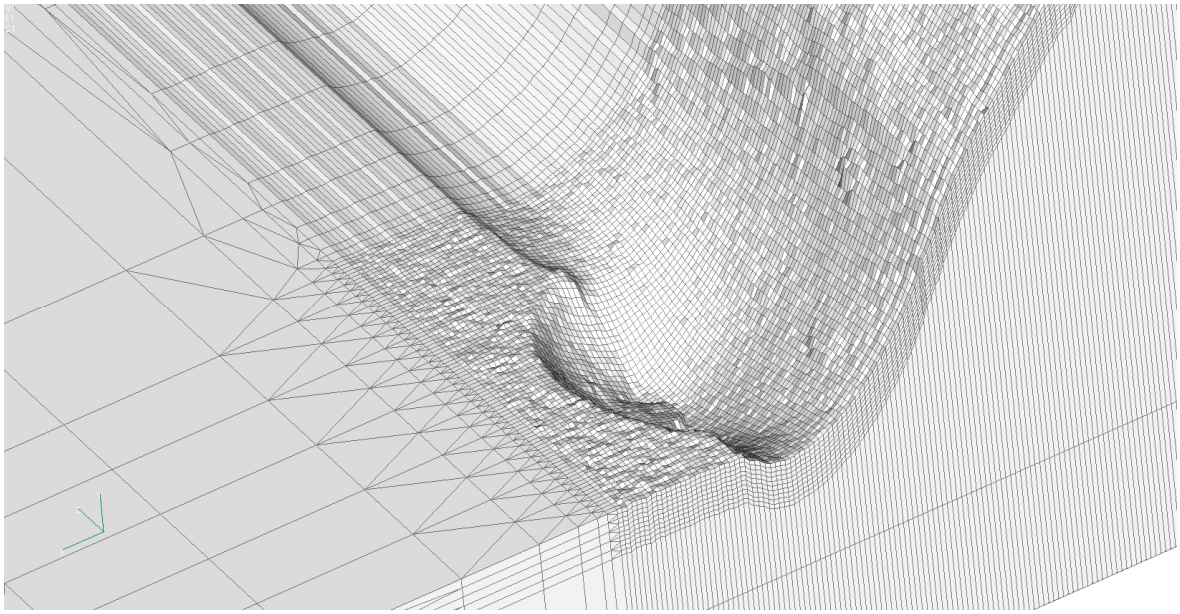
モデル番号	深さd(mm)	開口幅 W(mm)	長さ L(mm)
1	0.5	1	4
2	0.5	1.5	4
3	0.5	2	4
4	0.7	2	6
5	0.7	3	8
6	1	2	8
7	1	3	8
8	1	4	8
9	1	3	16
10	1	3	24
11	1.5	3	8
12	2	4	16
13	2	6	16

表 5.4　応力集中係数

モデル番号	応力集中係数
アンダーカットなし	2.26
1	3.06
2	2.55
3	2.19
4	2.46
5	1.95
6	2.91
7	2.34
8	2.01
9	2.34
10	2.47
11	2.39
12	2.72
13	2.14

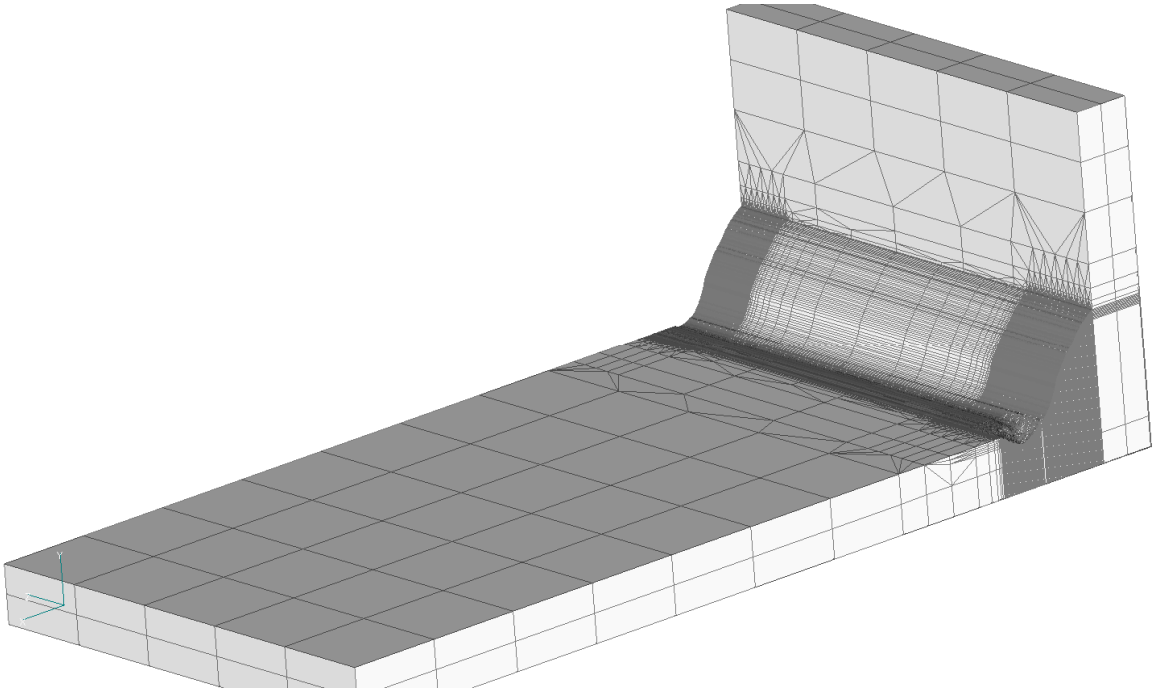


（ａ）モデル１全体

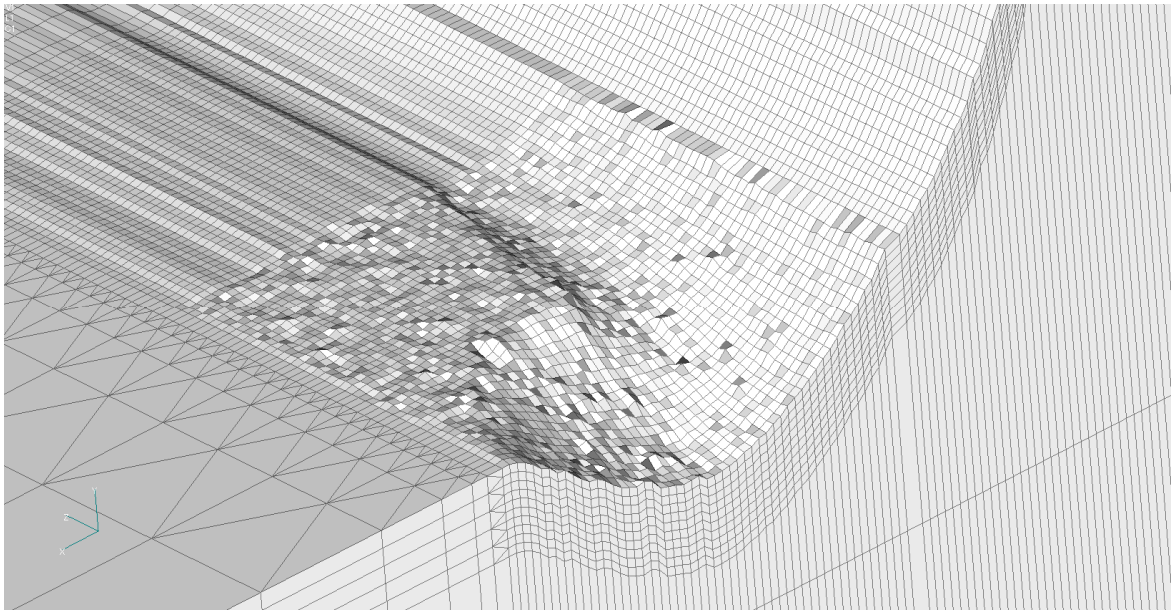


（b）モデル１アンダーカット部

図 5.1　アンダーカット再現モデル要素分割図①

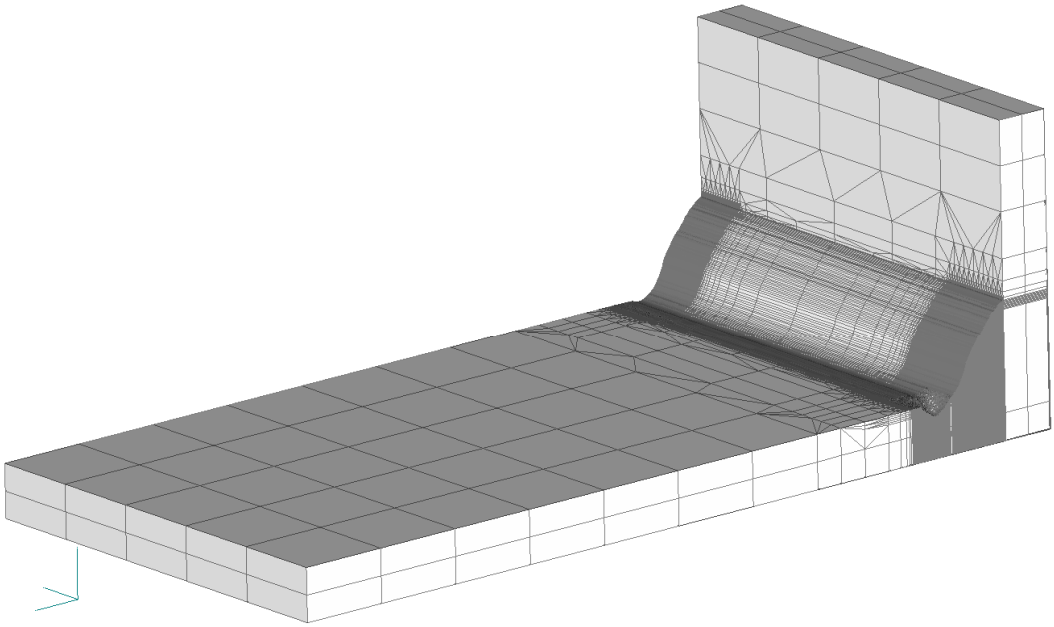


（ａ）モデル 2 全体

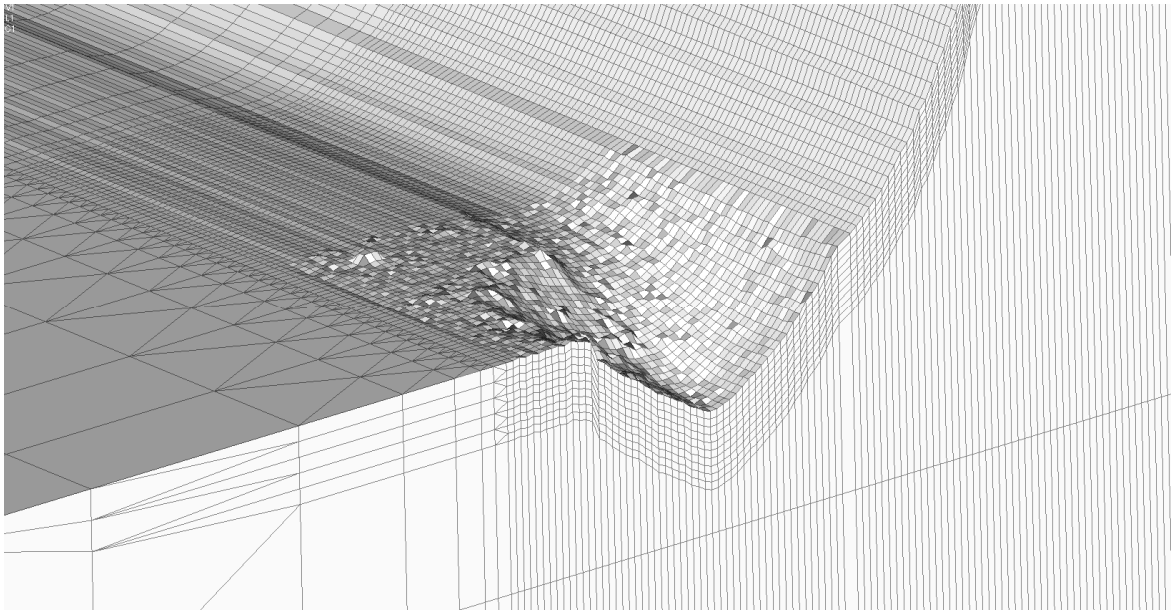


（b）モデル 2 アンダーカット部

図 5.1　アンダーカット再現モデル要素分割図②

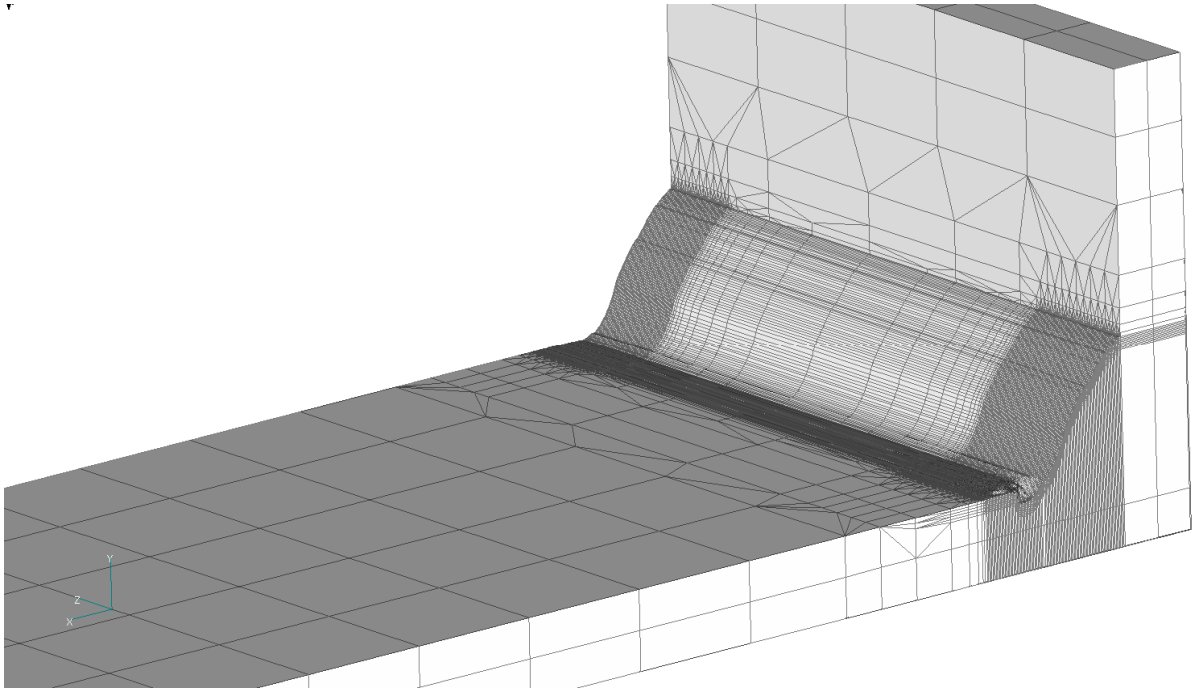


（ａ）モデル 3 全体

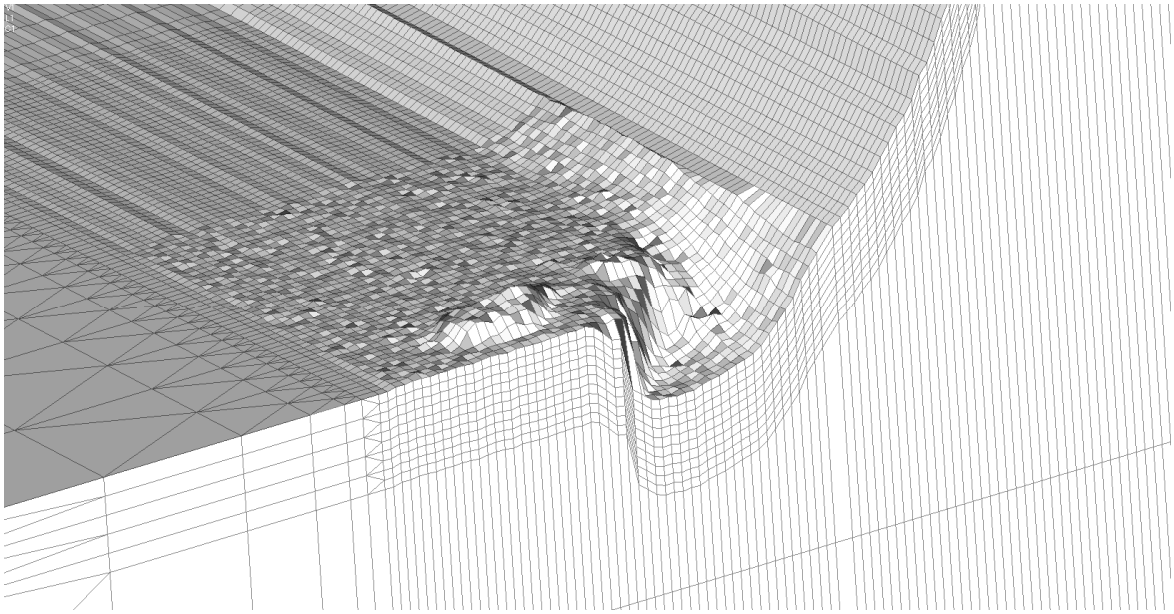


（b）モデル 3 アンダーカット部

図 5.1　アンダーカット再現モデル要素分割図③

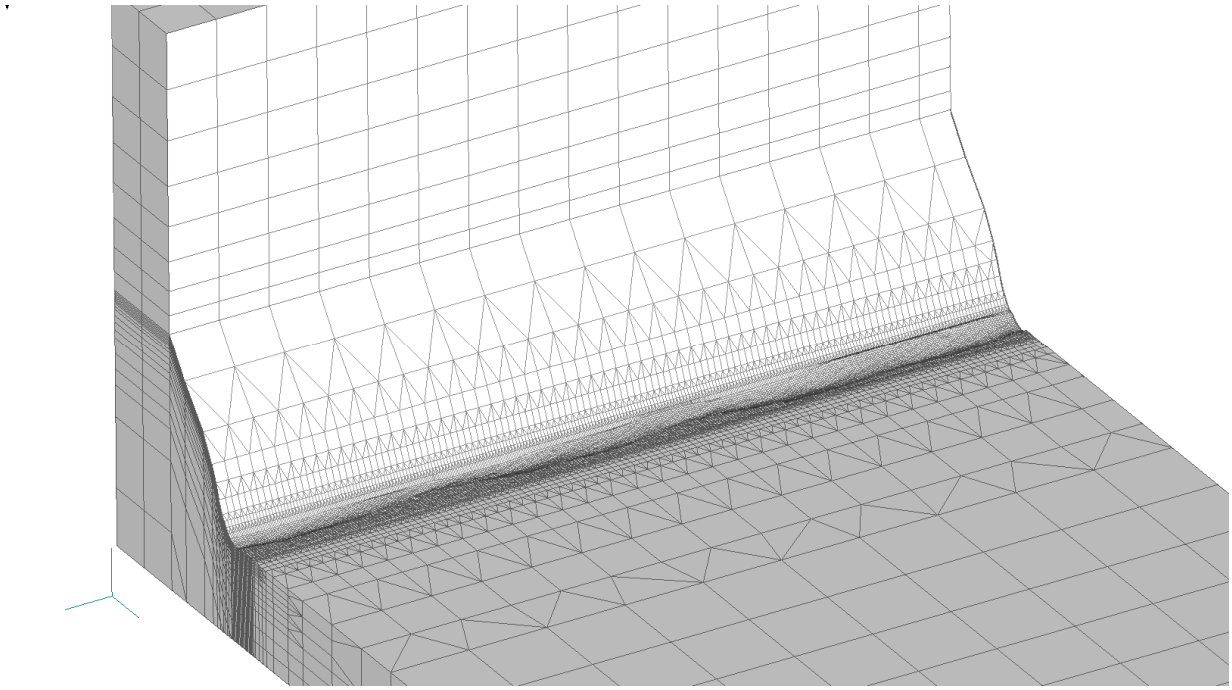


（ａ）モデル 4 全体

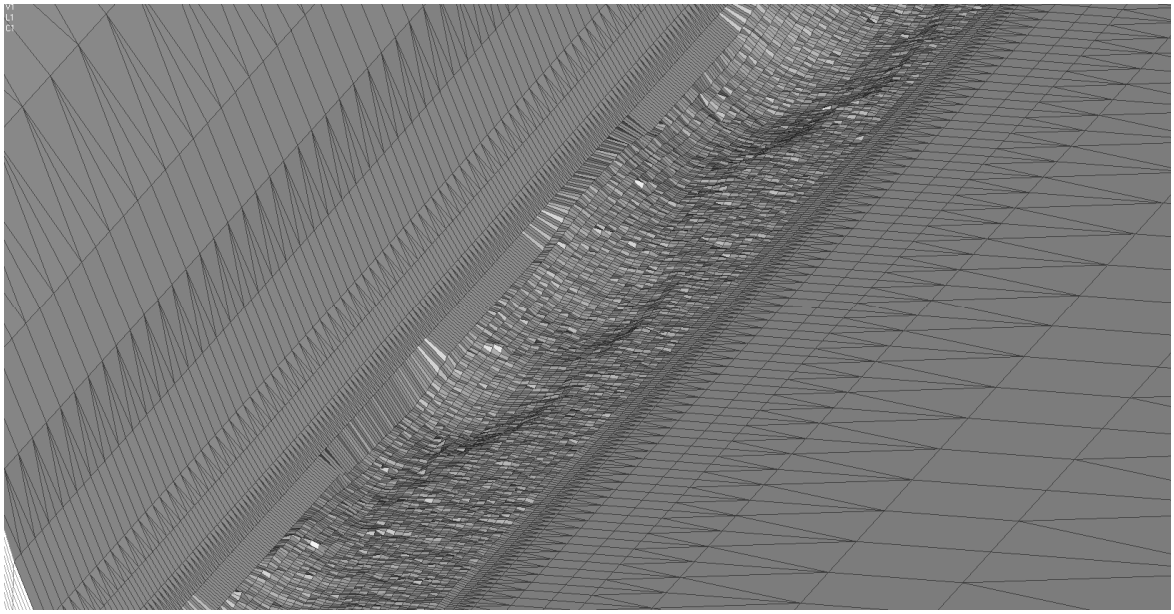


（b）モデル 4 アンダーカット部

図 5.1　アンダーカット再現モデル要素分割図④

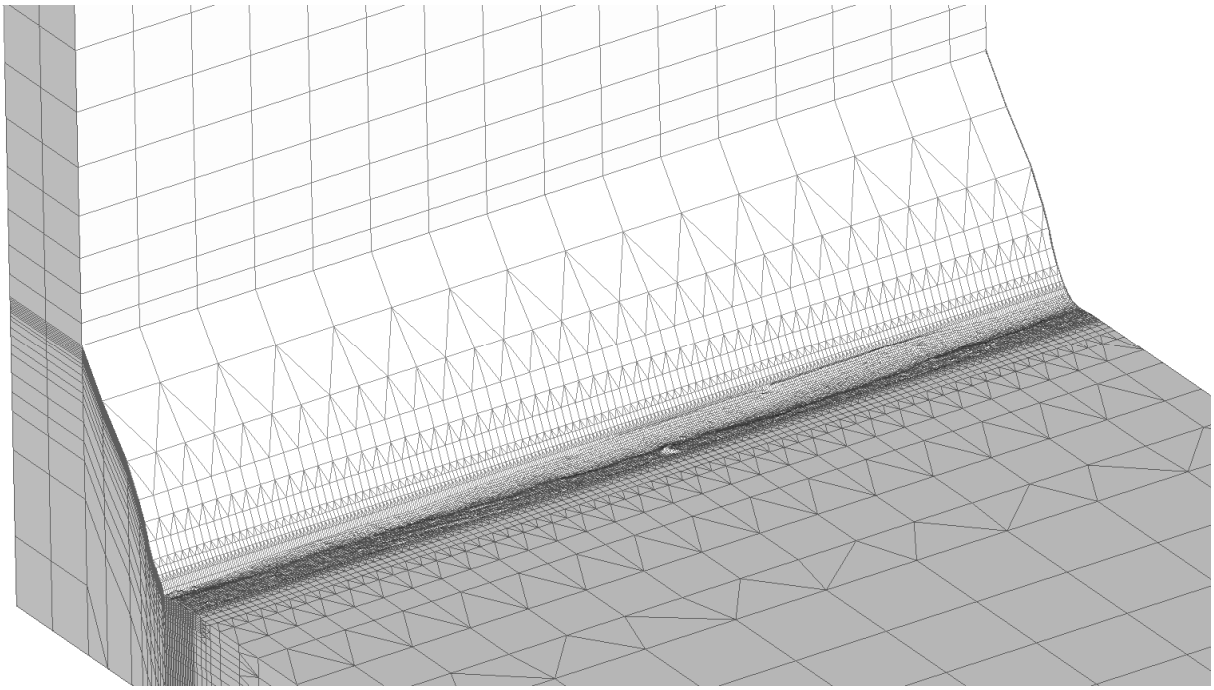


（ａ）モデル１全体

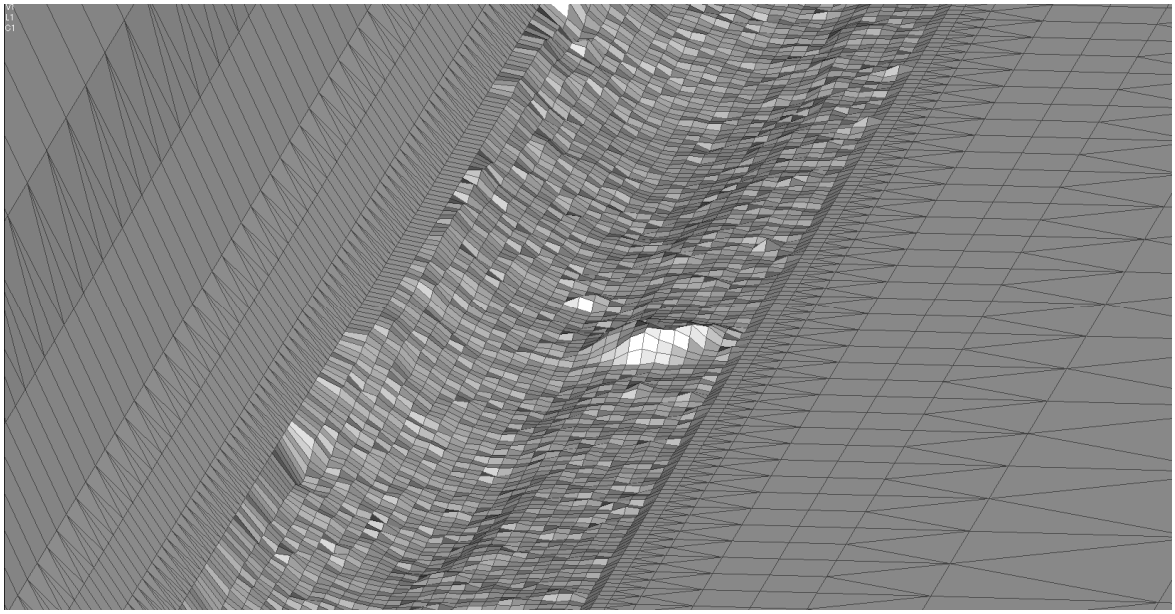


（b）モデル１溶接止端部

図 5.2　通常試験体再現モデル要素分割図①

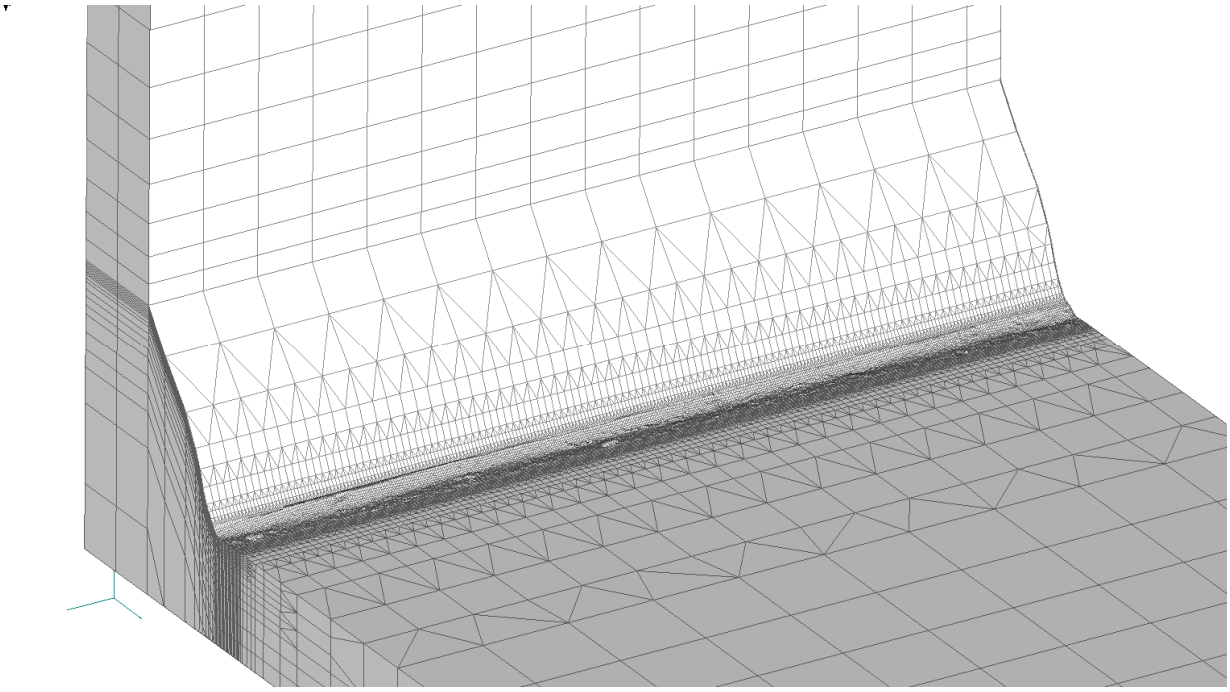


（ａ）モデル 2 全体

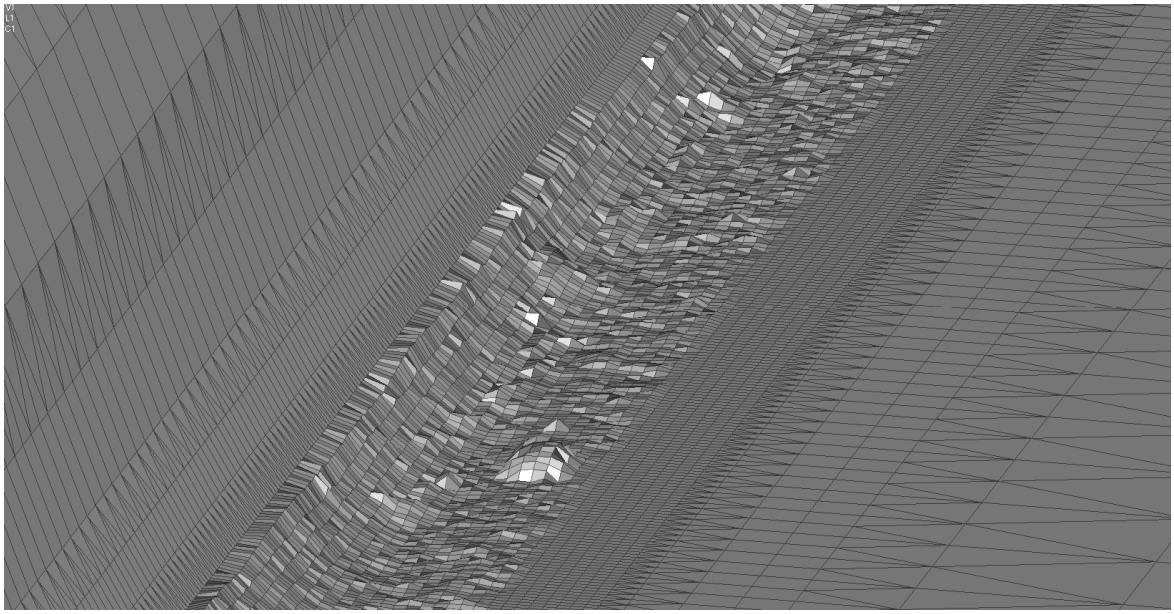


（b）モデル 2 溶接止端部

図 5.2　通常試験体再現モデル要素分割図②

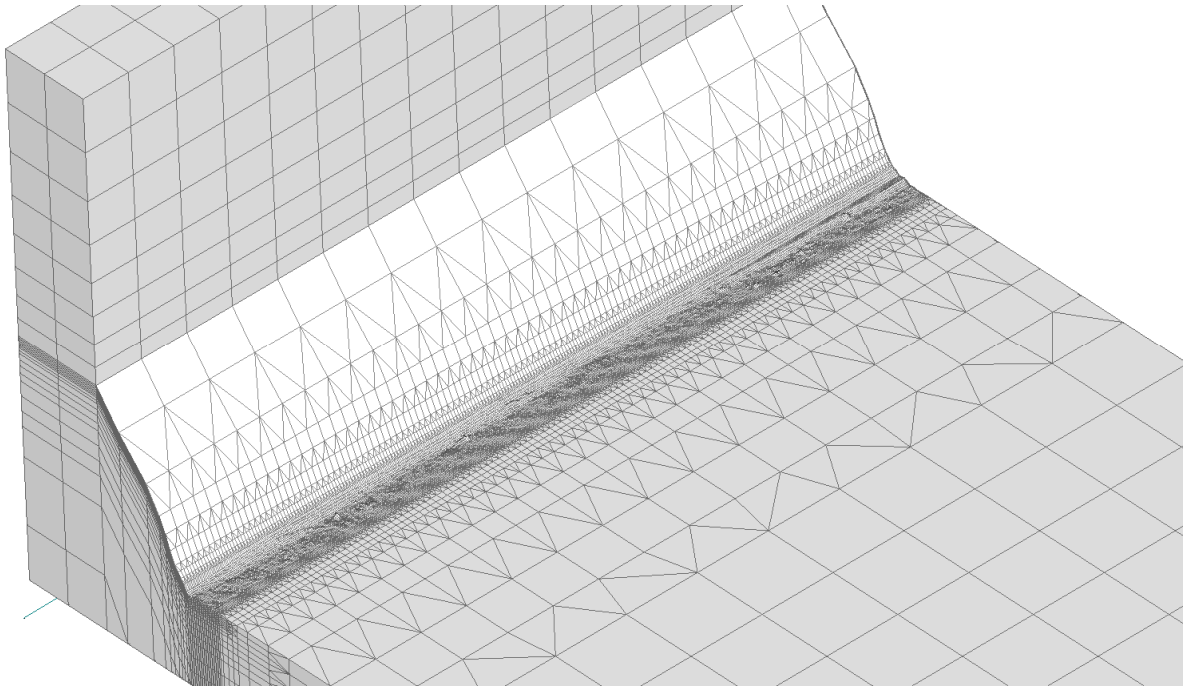


（ａ）モデル３全体

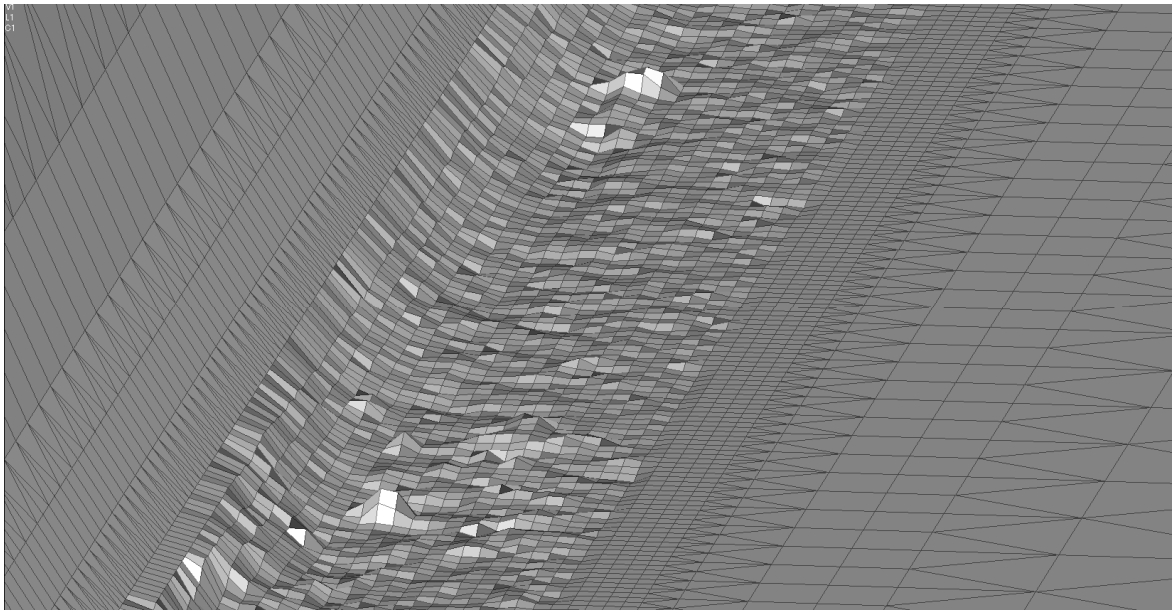


（b）モデル３溶接止端部

図 5.2　通常試験体再現モデル要素分割図③

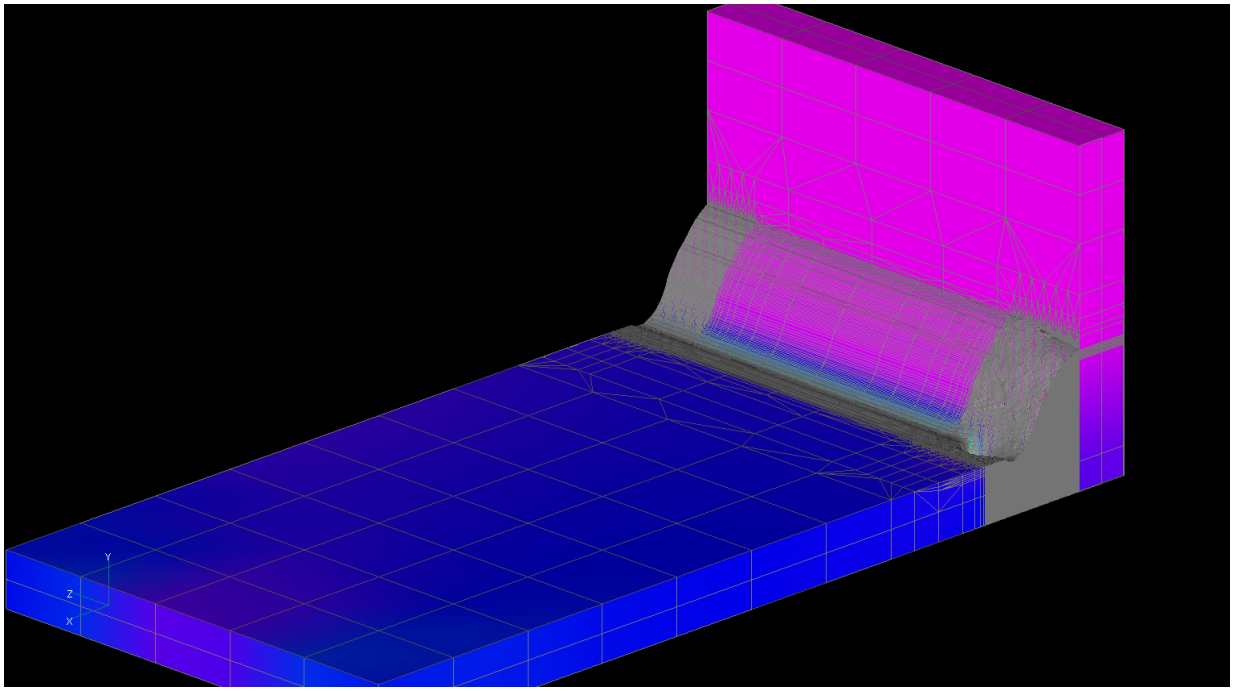


（ａ）モデル 4 全体

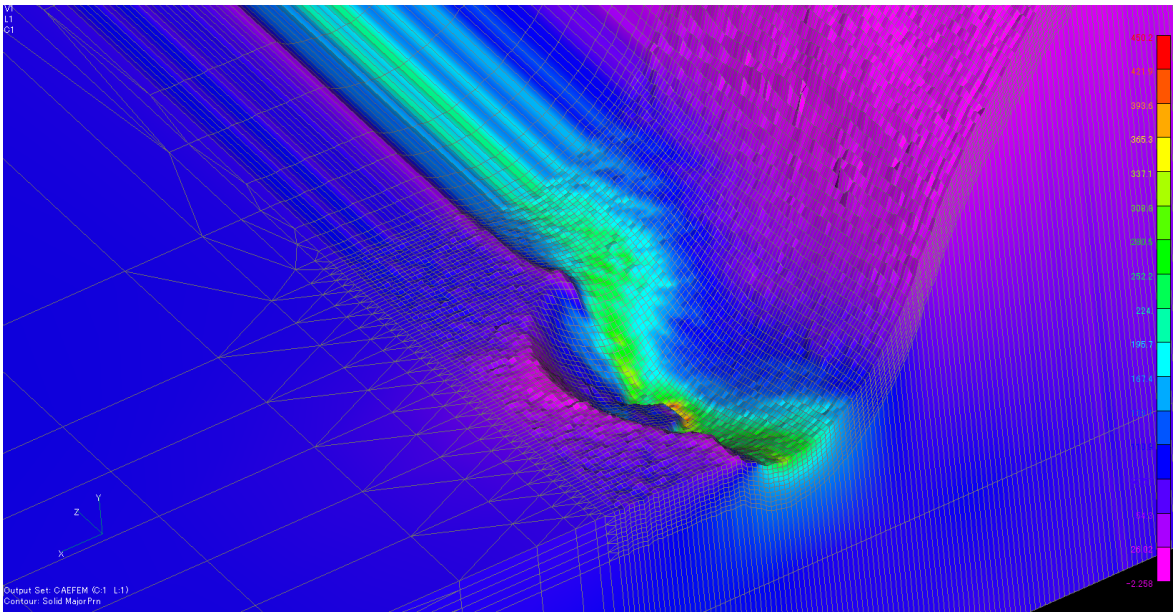


（b）モデル 4 溶接止端部

図 5.2　通常試験体再現モデル要素分割図④

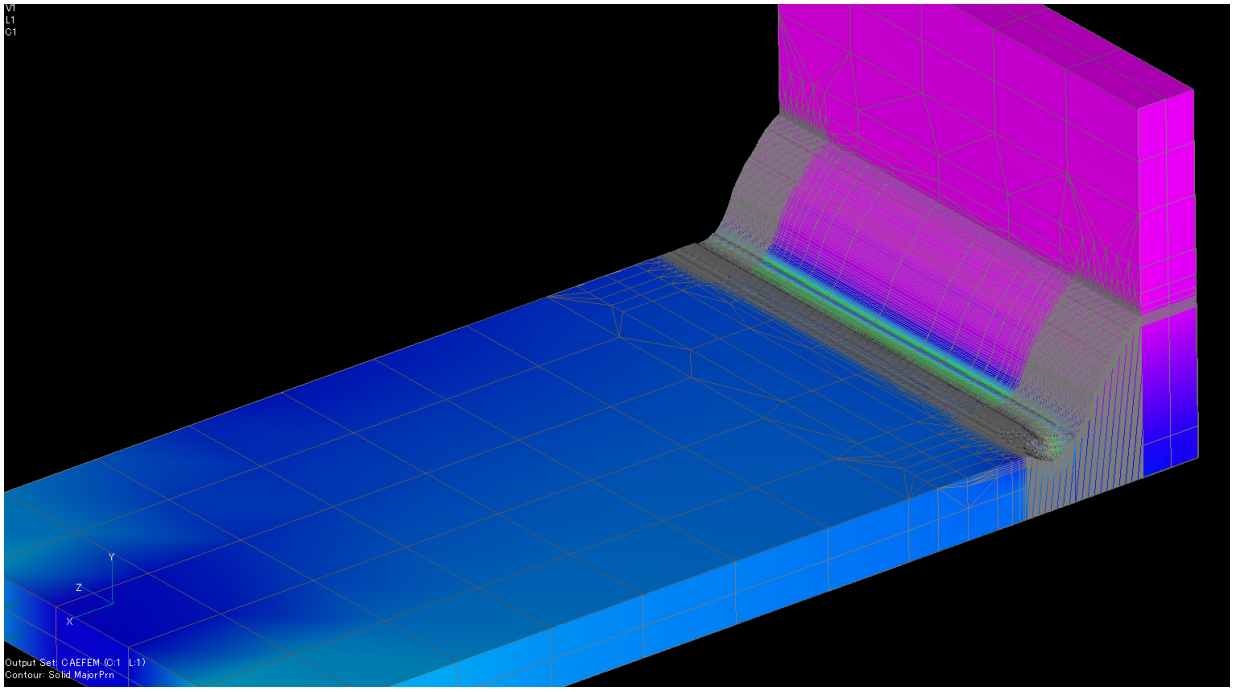


（ａ）モデル１全体

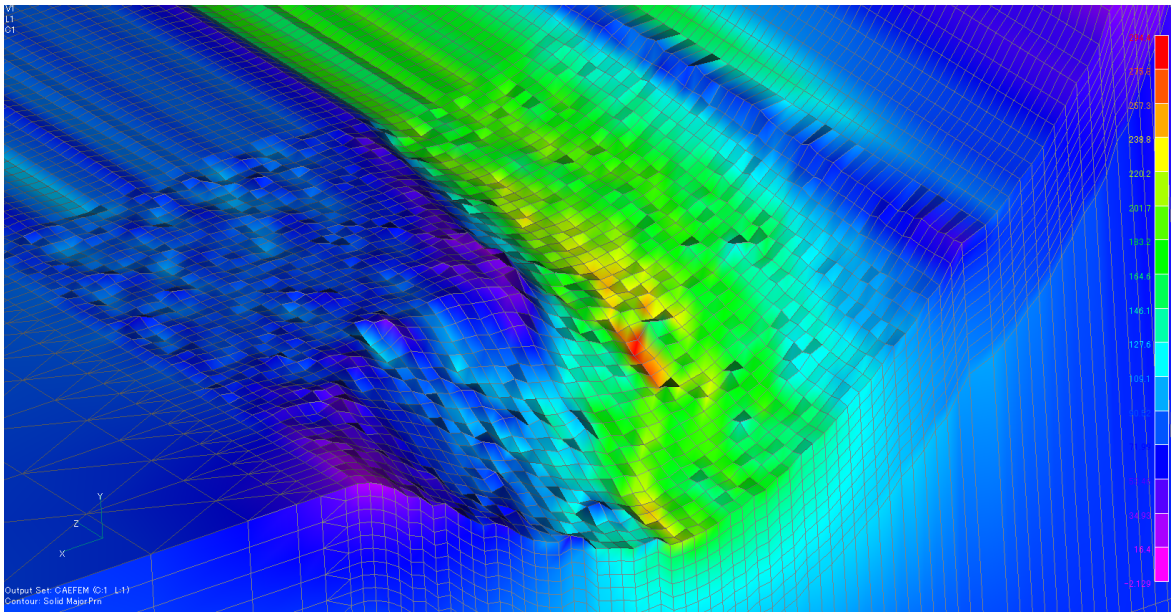


（b）モデル１アンダーカット部

図 5.3　アンダーカット再現モデル主応力コンター図①

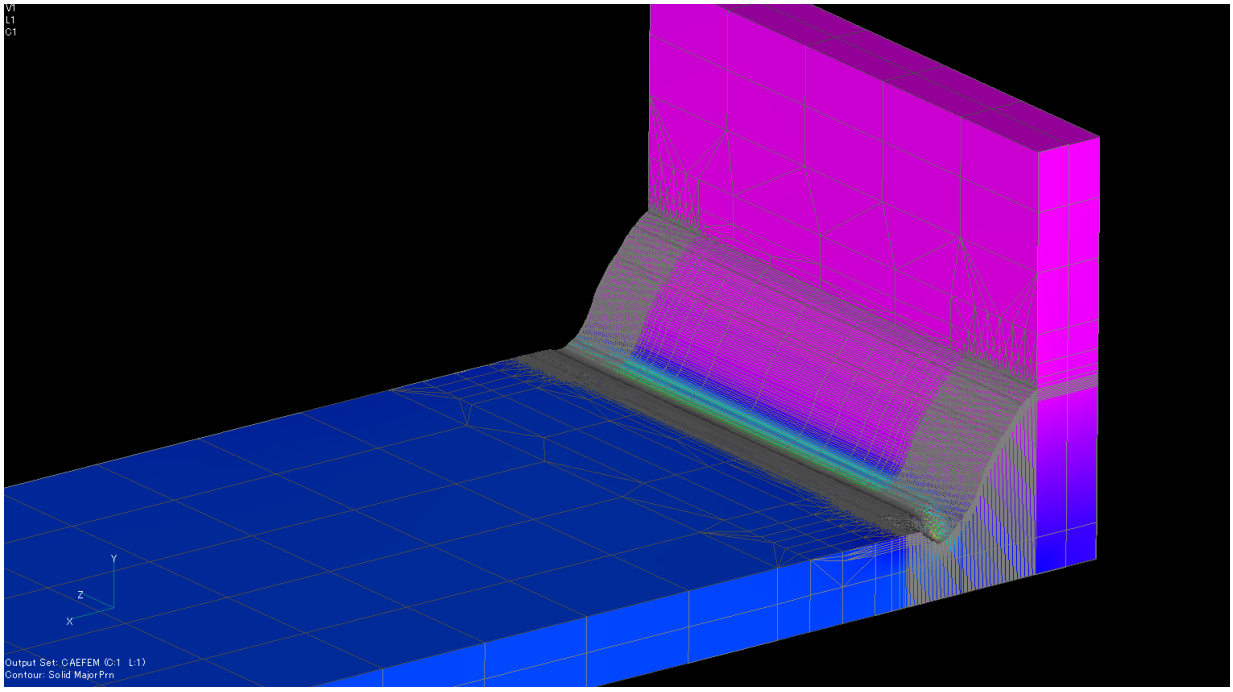


（ａ）モデル 2 全体

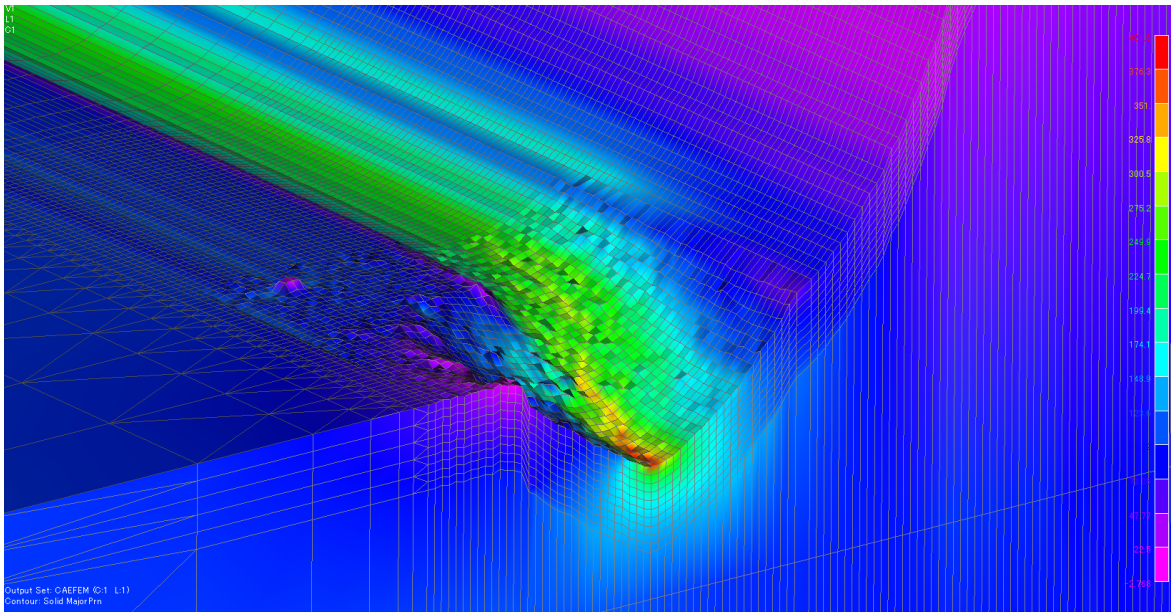


（b）モデル 2 アンダーカット部

図 5.3　アンダーカット再現モデル主応力コンター図②

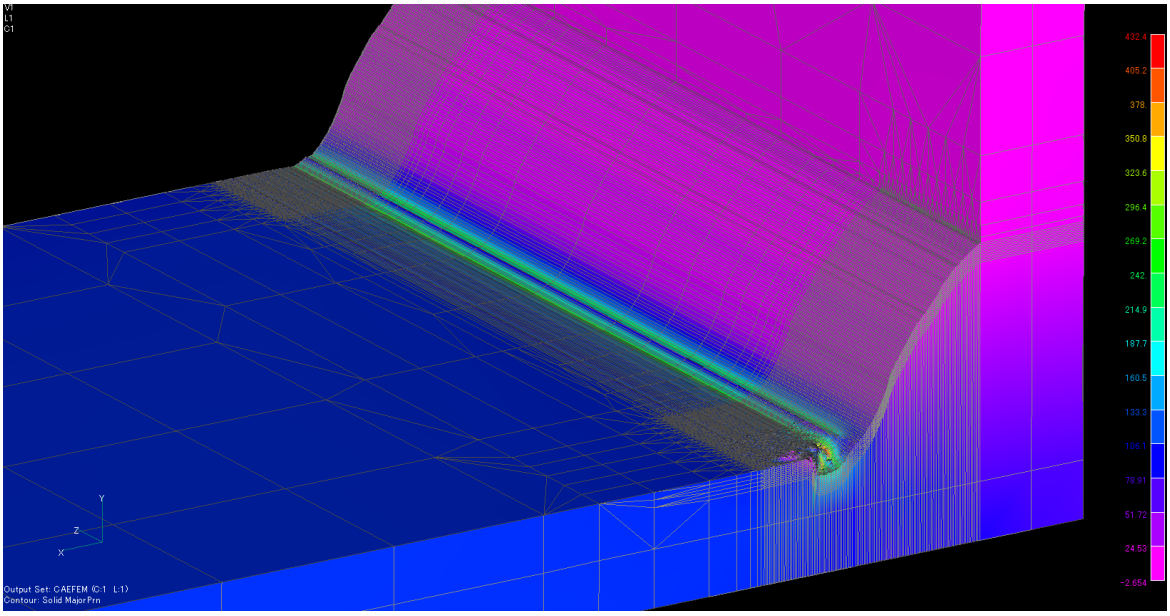


（ａ）モデル３全体

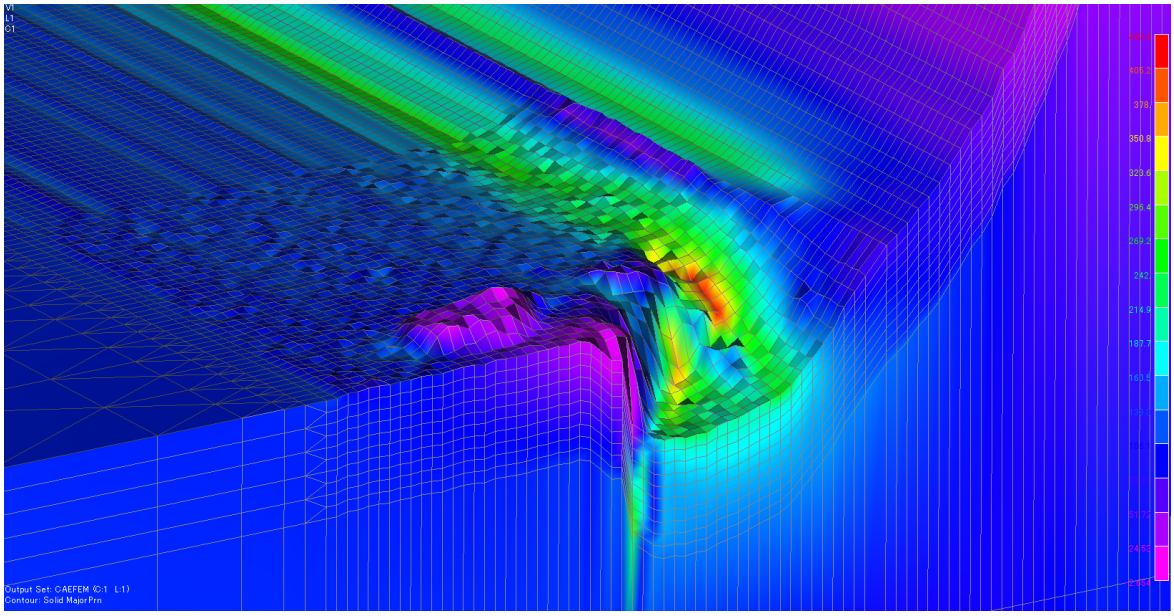


（b）モデル３アンダーカット部

図 5.3　アンダーカット再現モデル主応力コンター図③

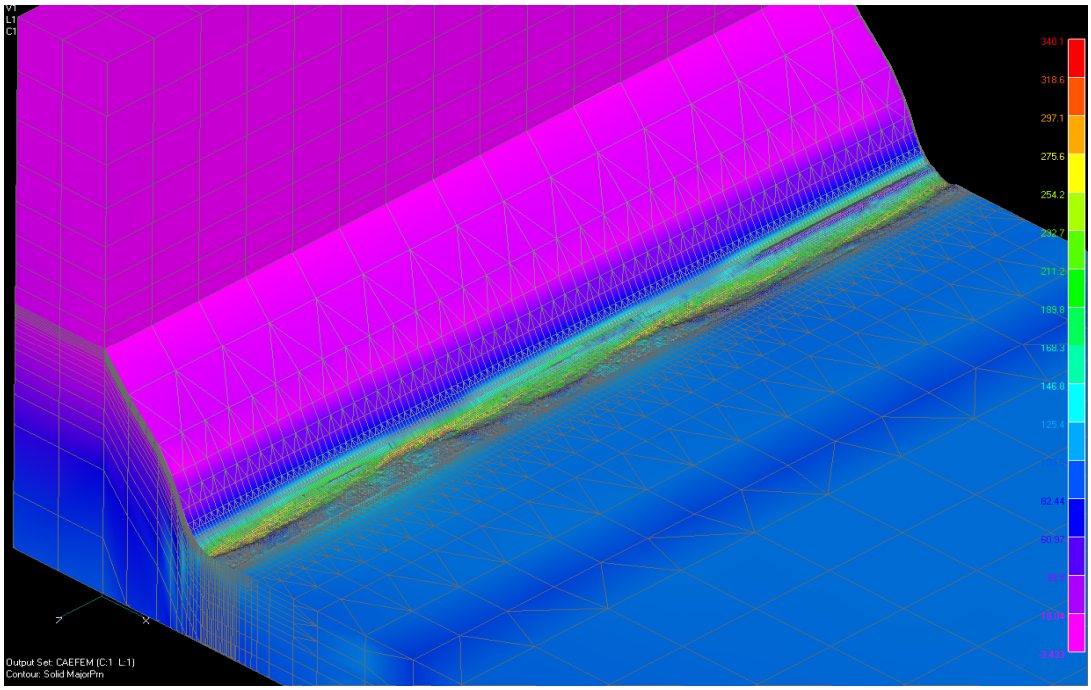


（ａ）モデル４全体

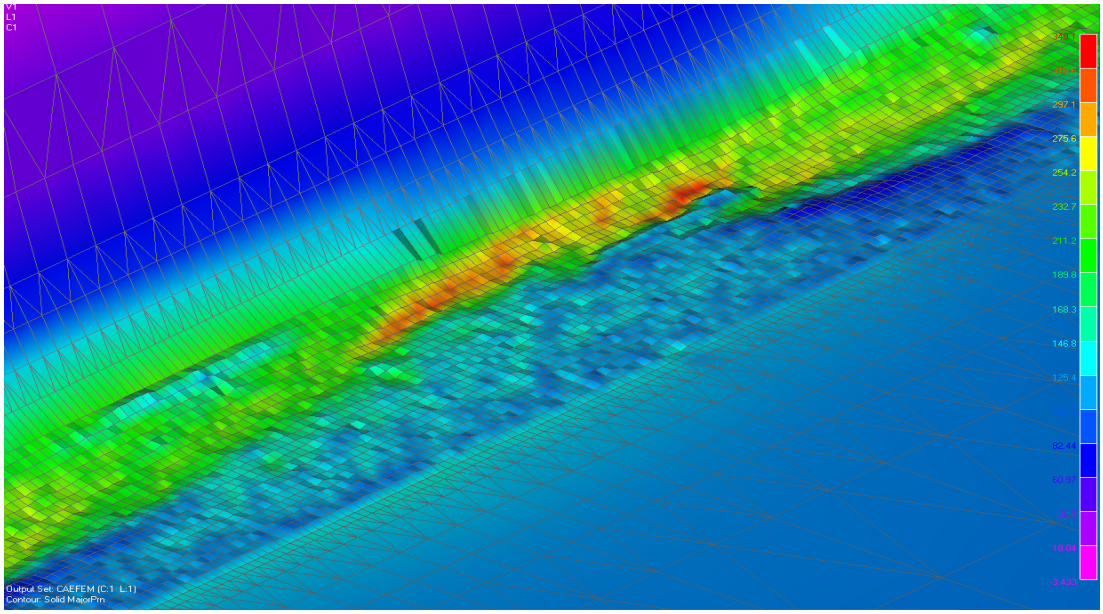


（b）モデル４アンダーカット部

図 5.3　アンダーカット再現モデル主応力コンター図④

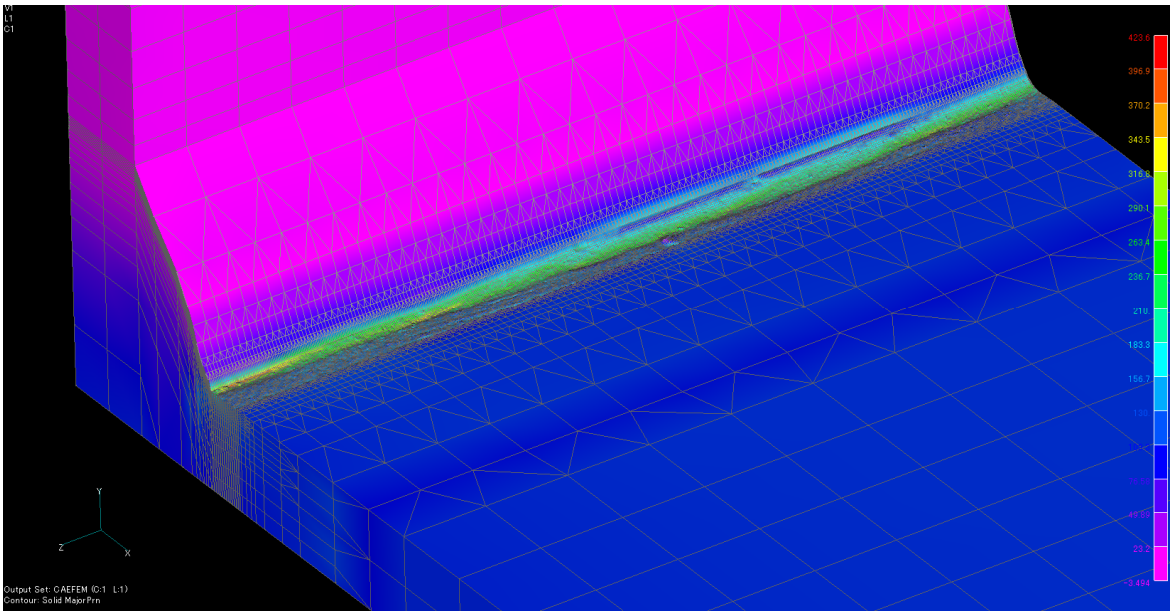


（ａ）モデル１全体

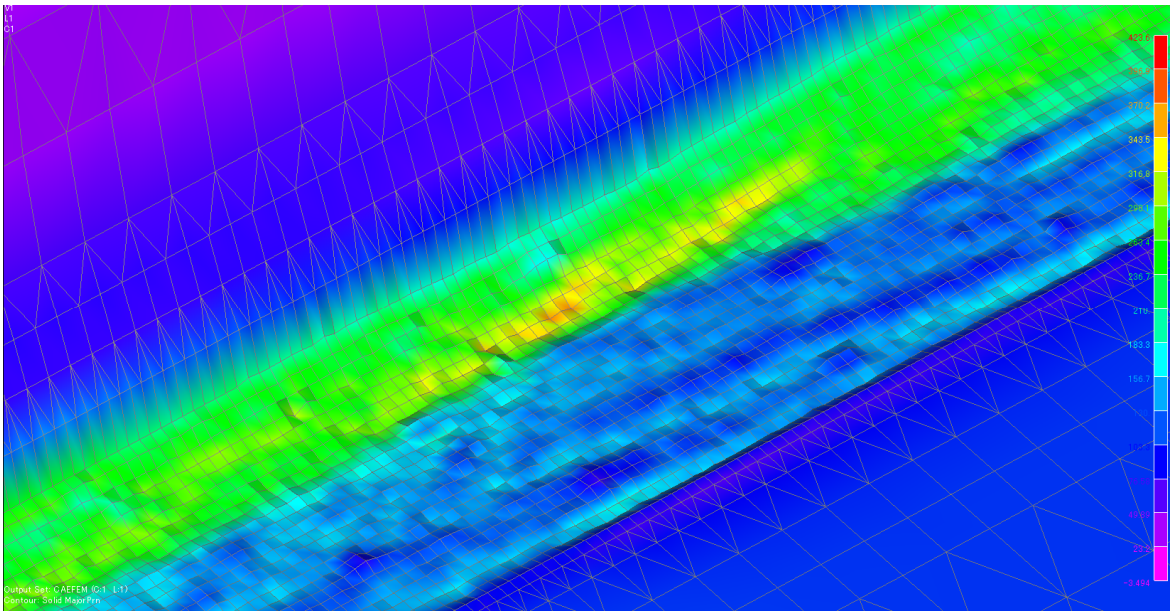


（b）モデル１溶接止端部

図 5.4　通常試験体再現モデル主応力コンター図①

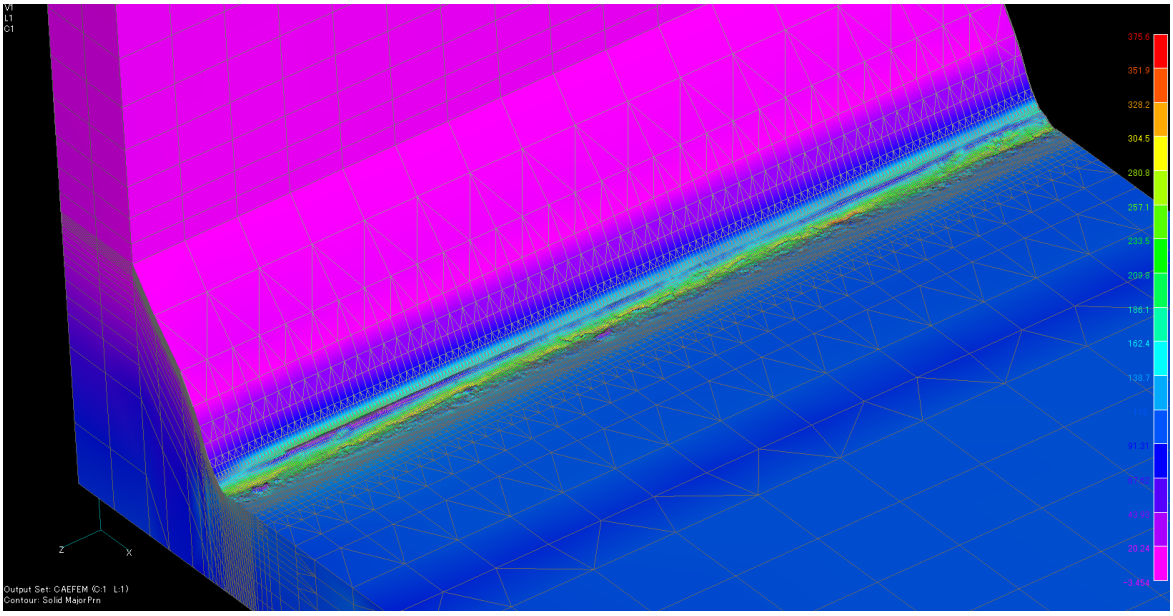


（ａ）モデル 2 全体

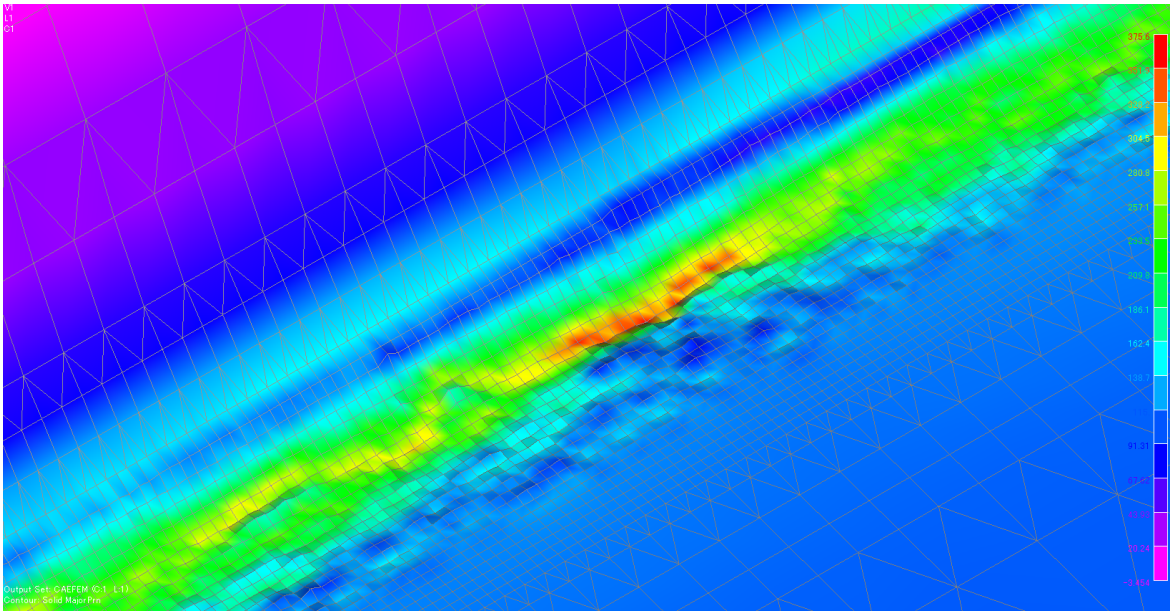


（b）モデル 2 溶接止端部

図 5.4　通常試験体再現モデル主応力コンター図②

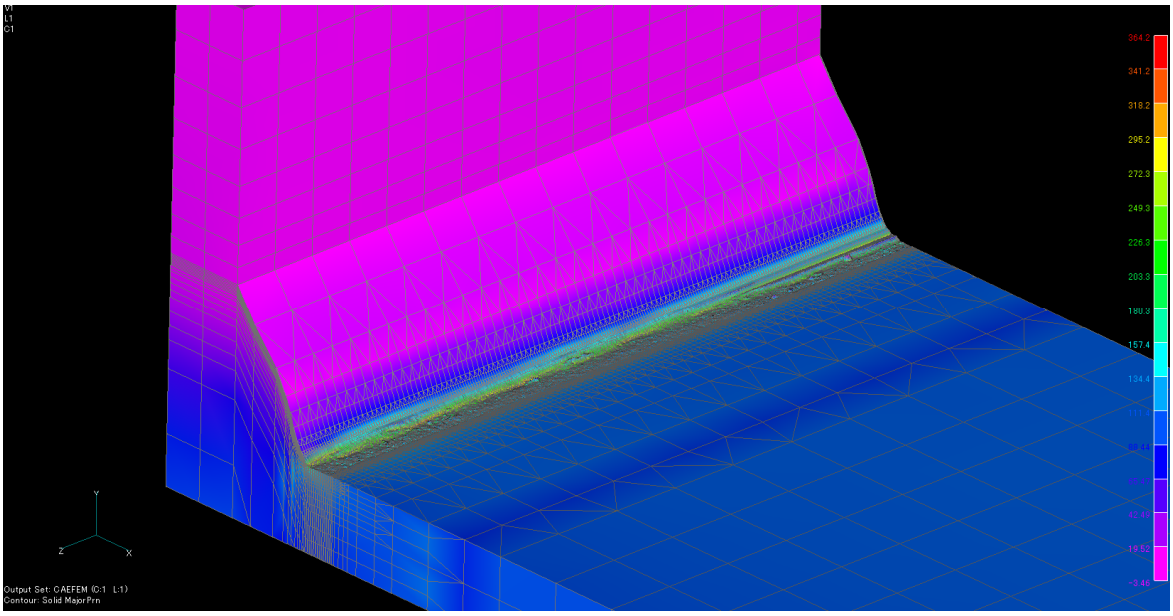


（ａ）モデル３全体

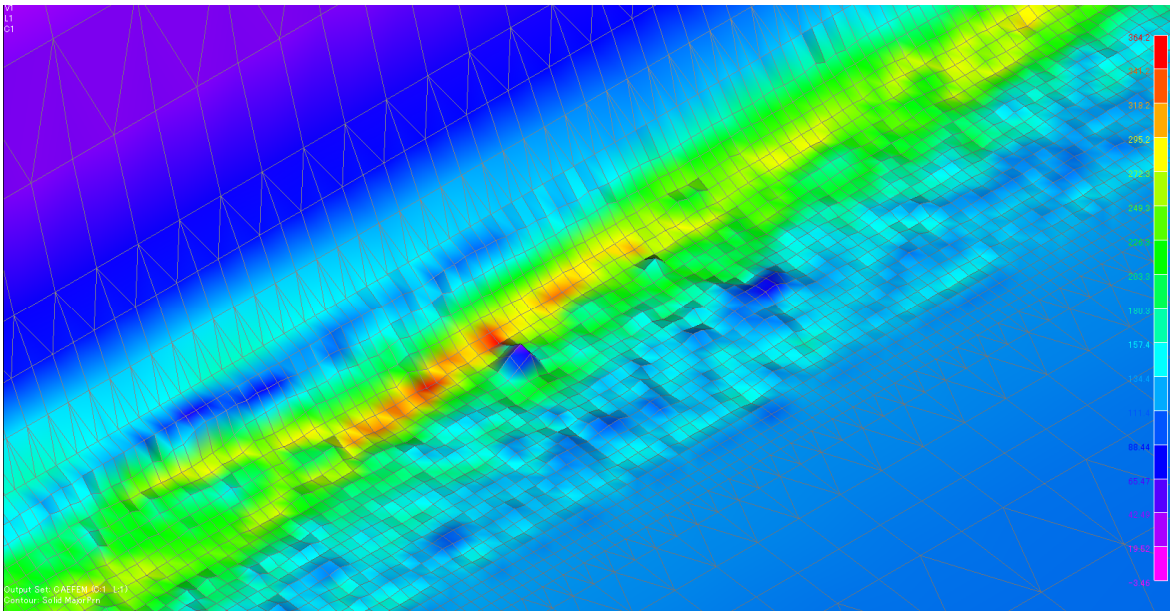


（b）モデル３溶接止端部

図 5.4　通常試験体再現モデル主応力コンター図③

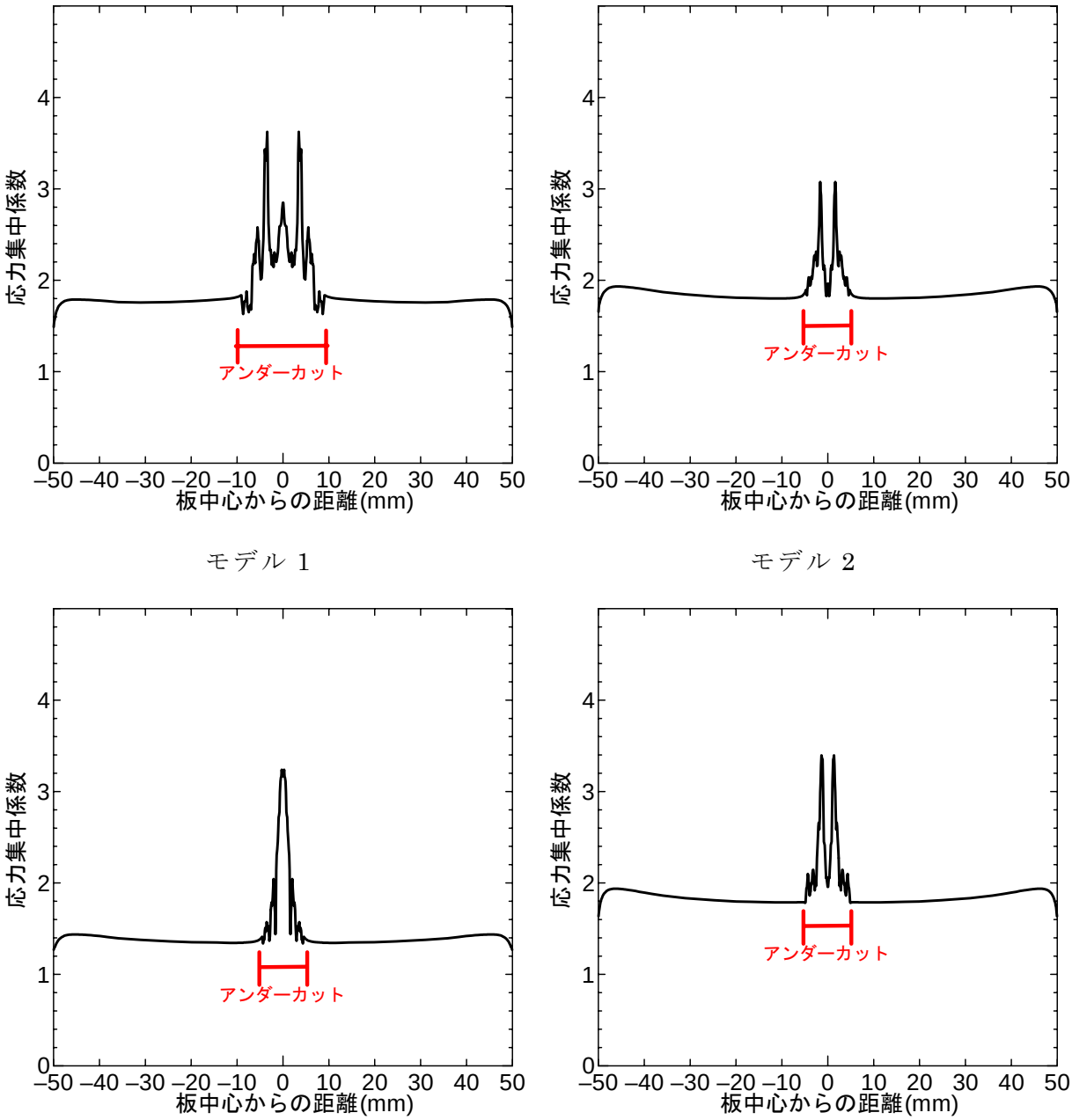


（ａ）モデル 4 全体



（b）モデル 4 溶接止端部

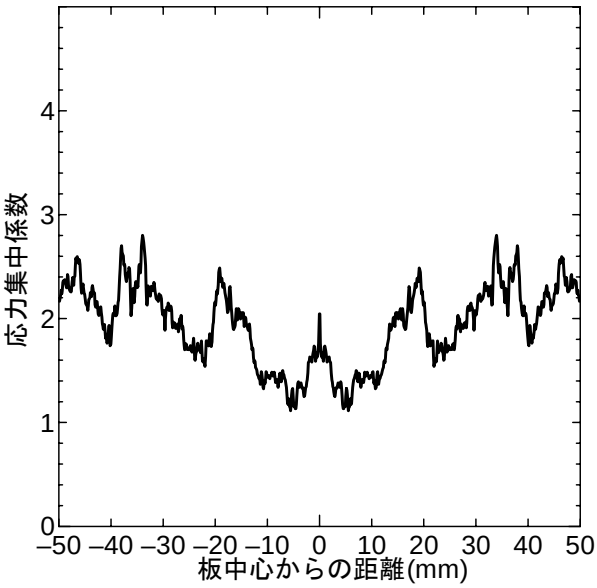
図 5.4　通常試験体再現モデル主応力コンター図④



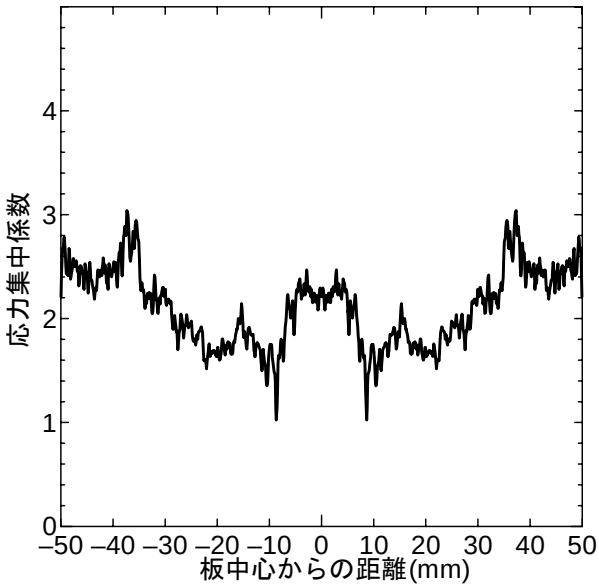
モデル 1　　モデル 2

モデル 3　　モデル 4

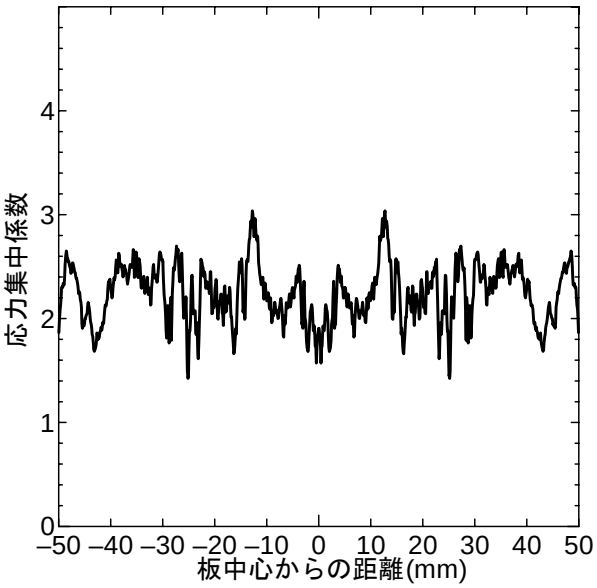
図 5.5　主応力分布図（アンダーカットあり）



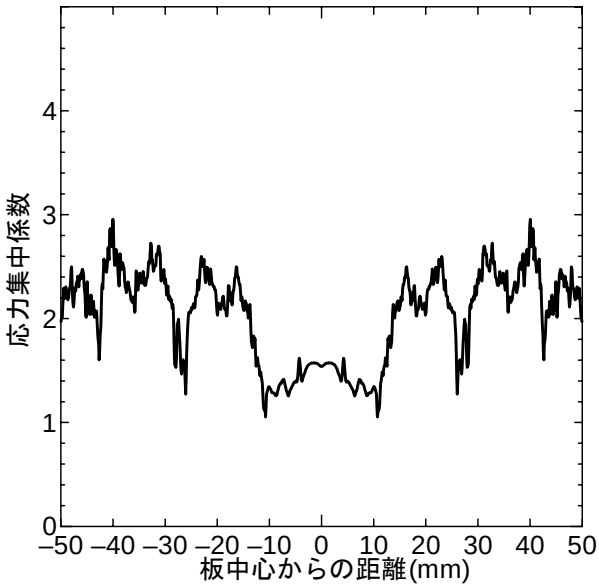
モデル 1



モデル 2



モデル 3



モデル 4

図 5.6　主応力分布図（アンダーカットなし）

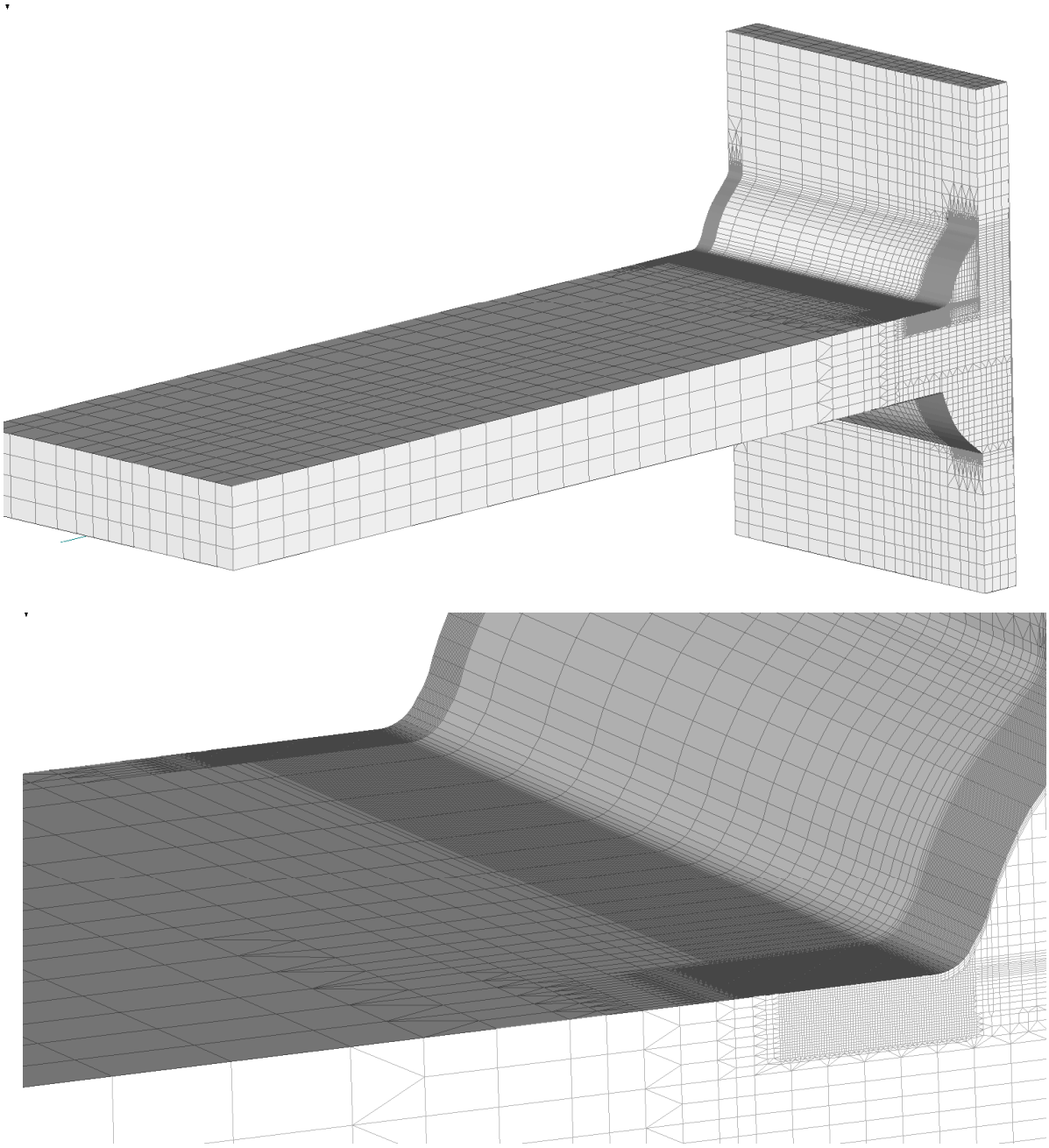


図 5.7　要素分割図（アンダーカットなし）

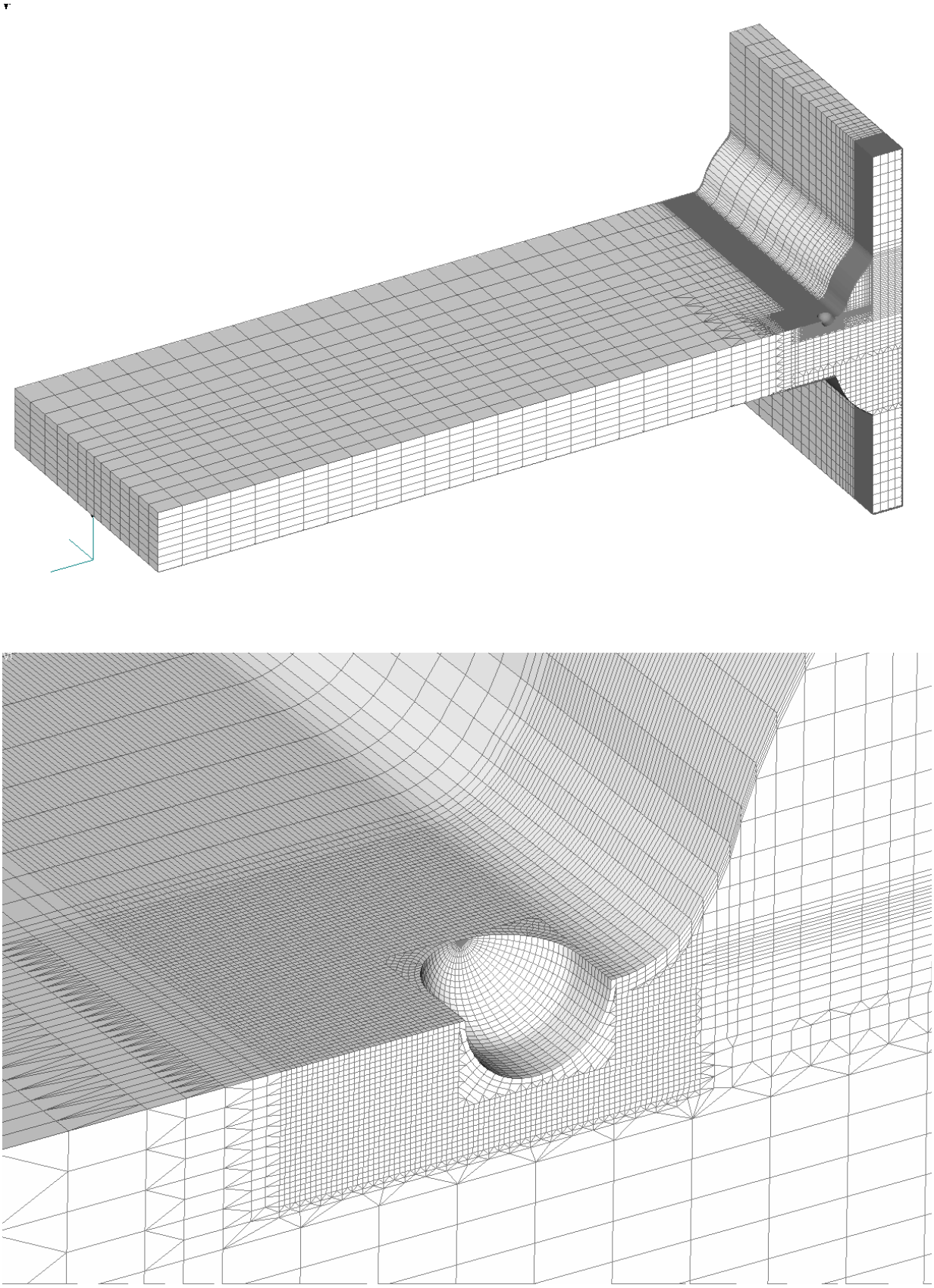


図 5.1　要素分割図（アンダーカットあり）

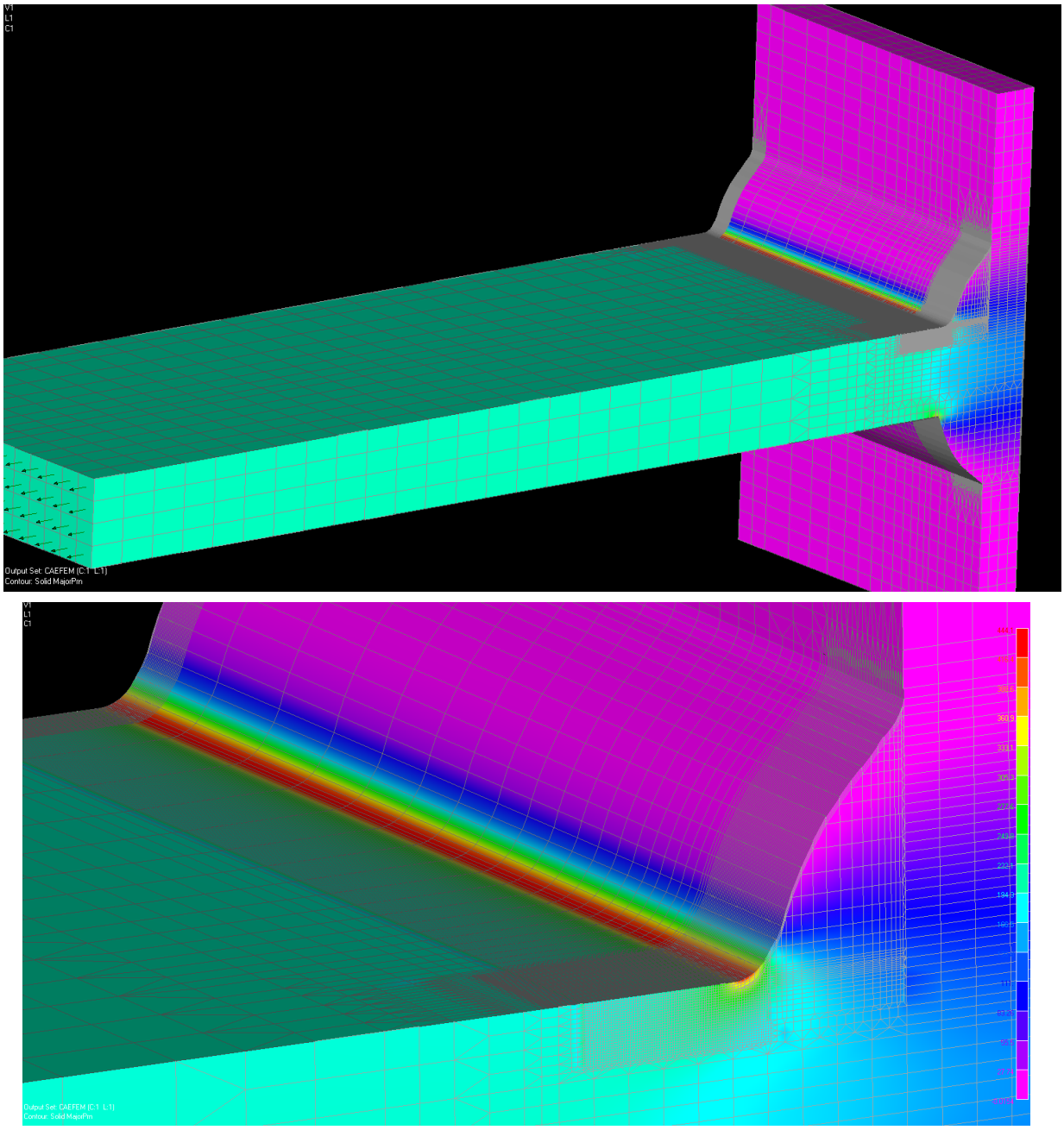
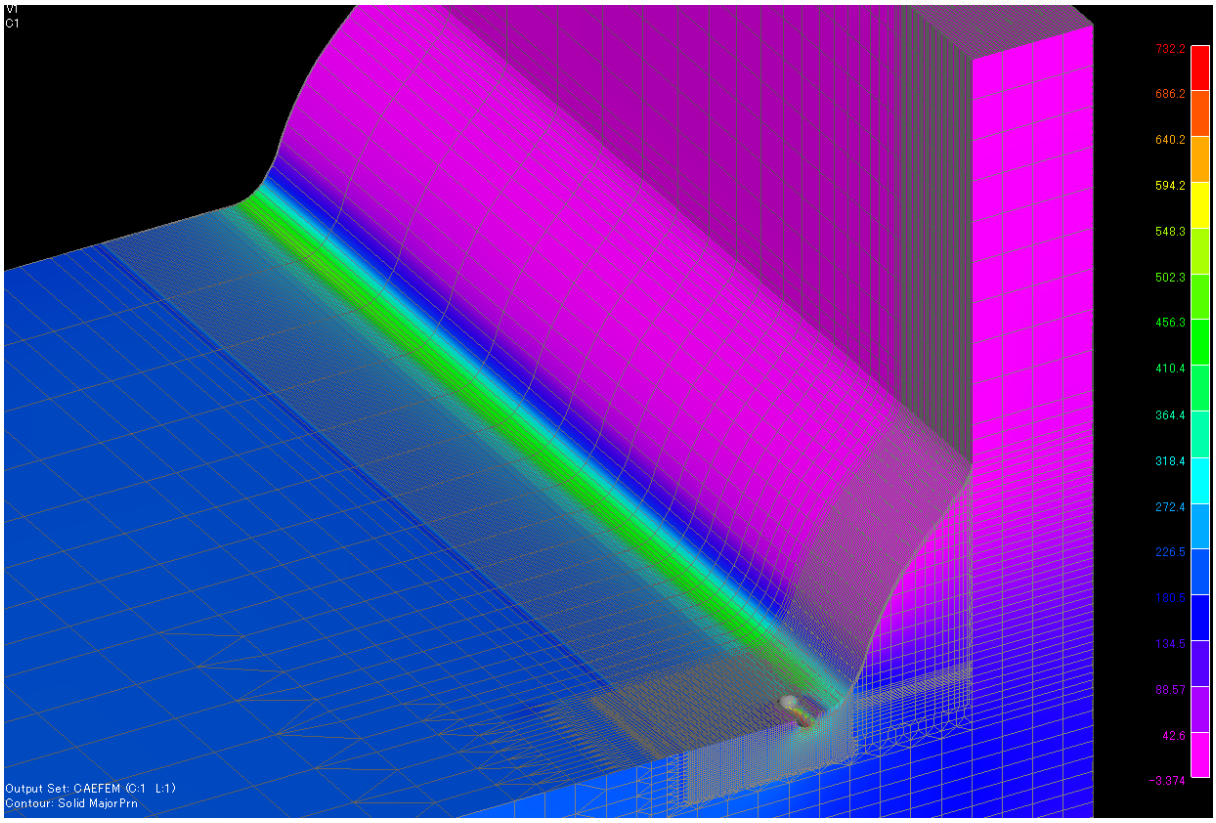
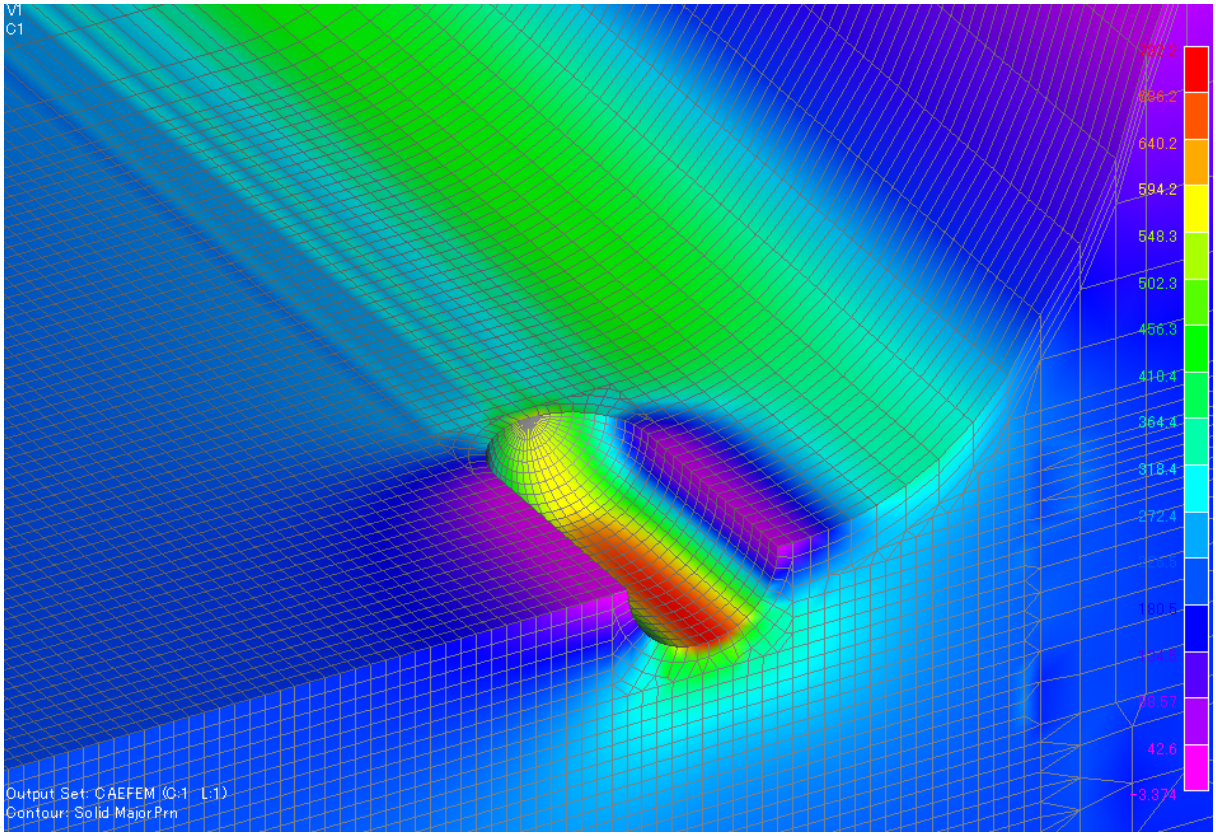


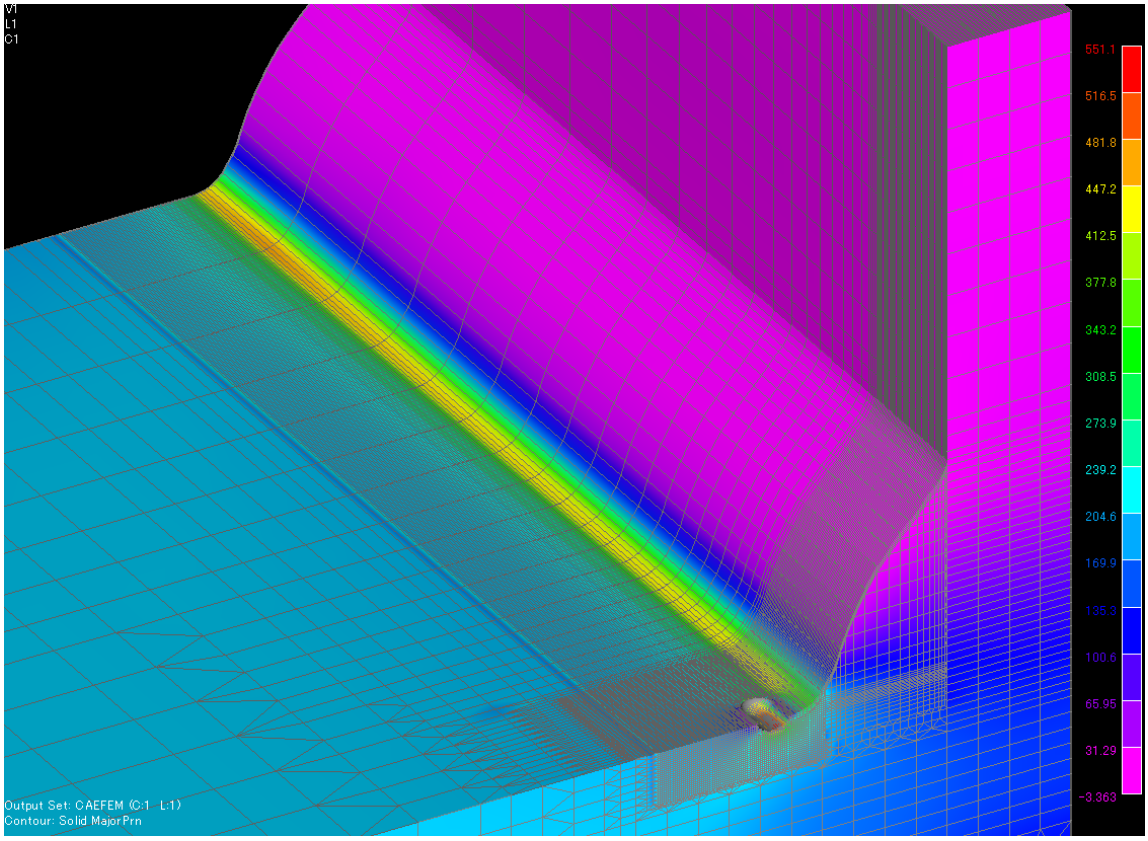
図 5.8　主応力コンター図（アンダーカットなし）

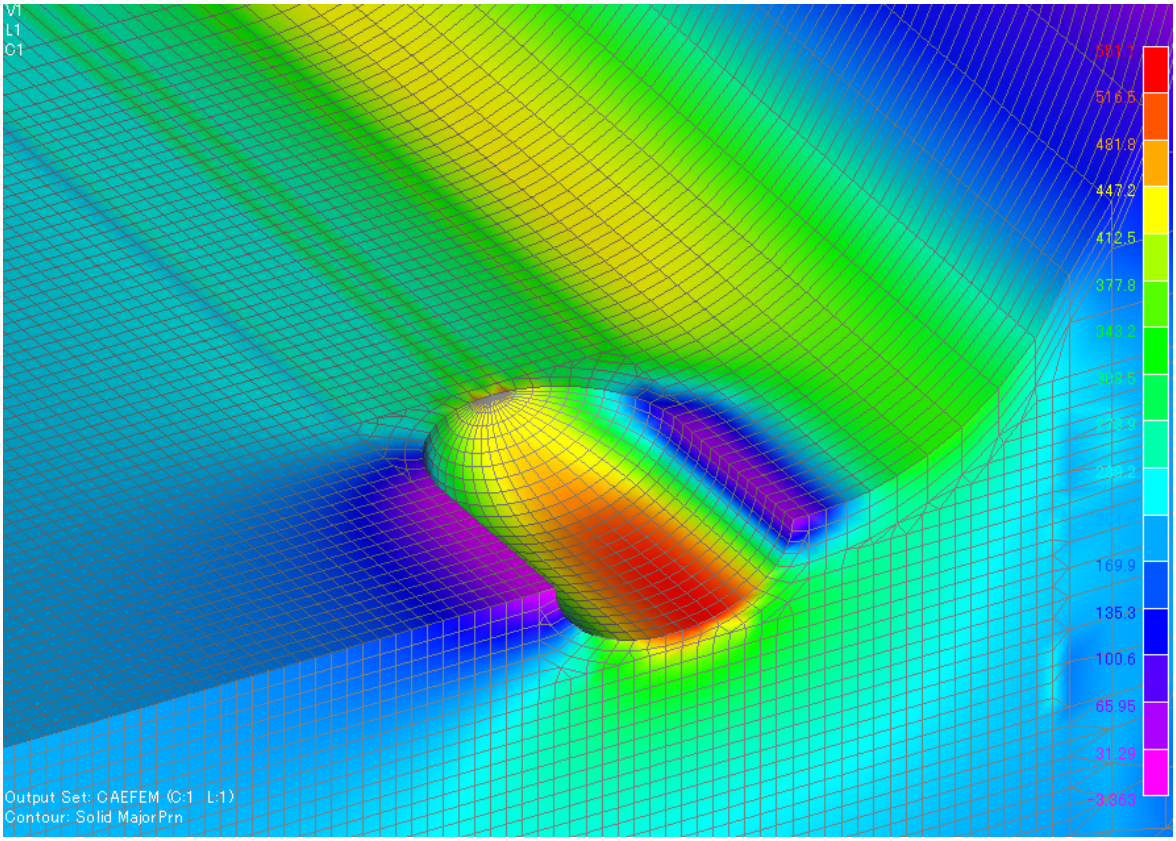




モデル番号 1

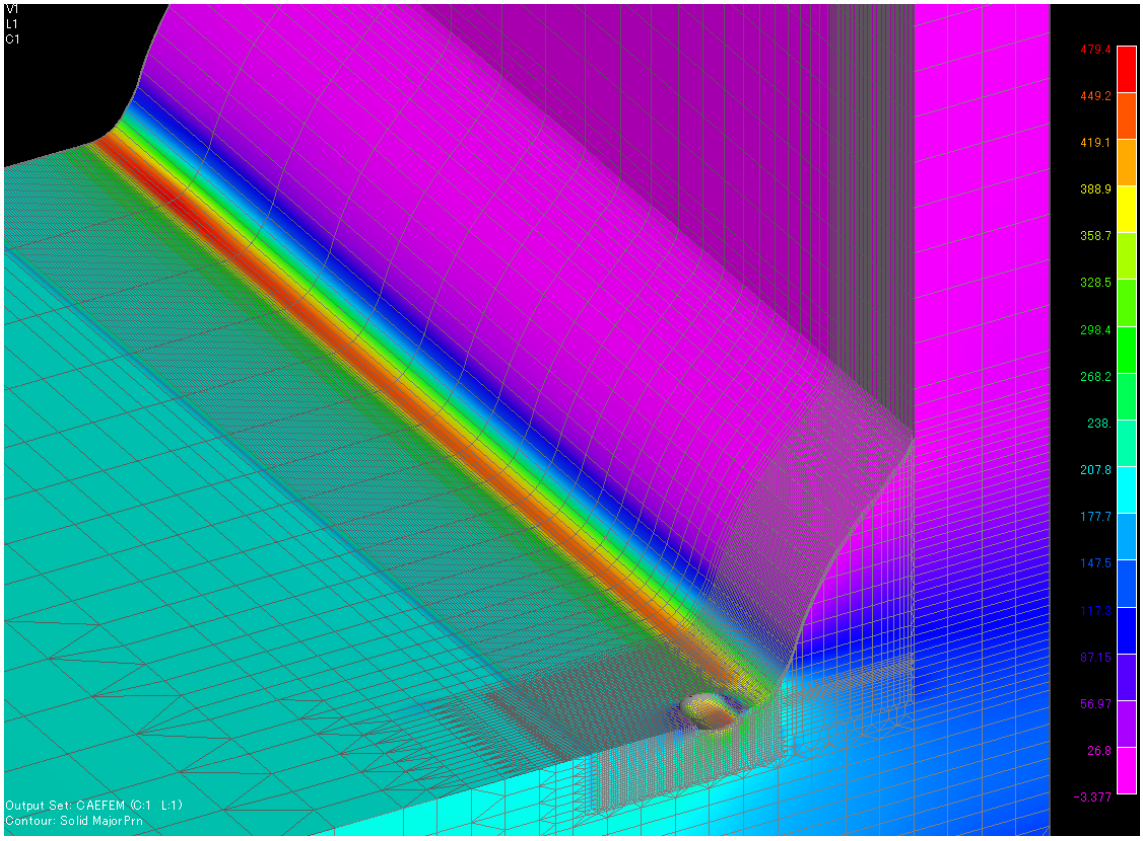
図 5.8　主応力コンター図①

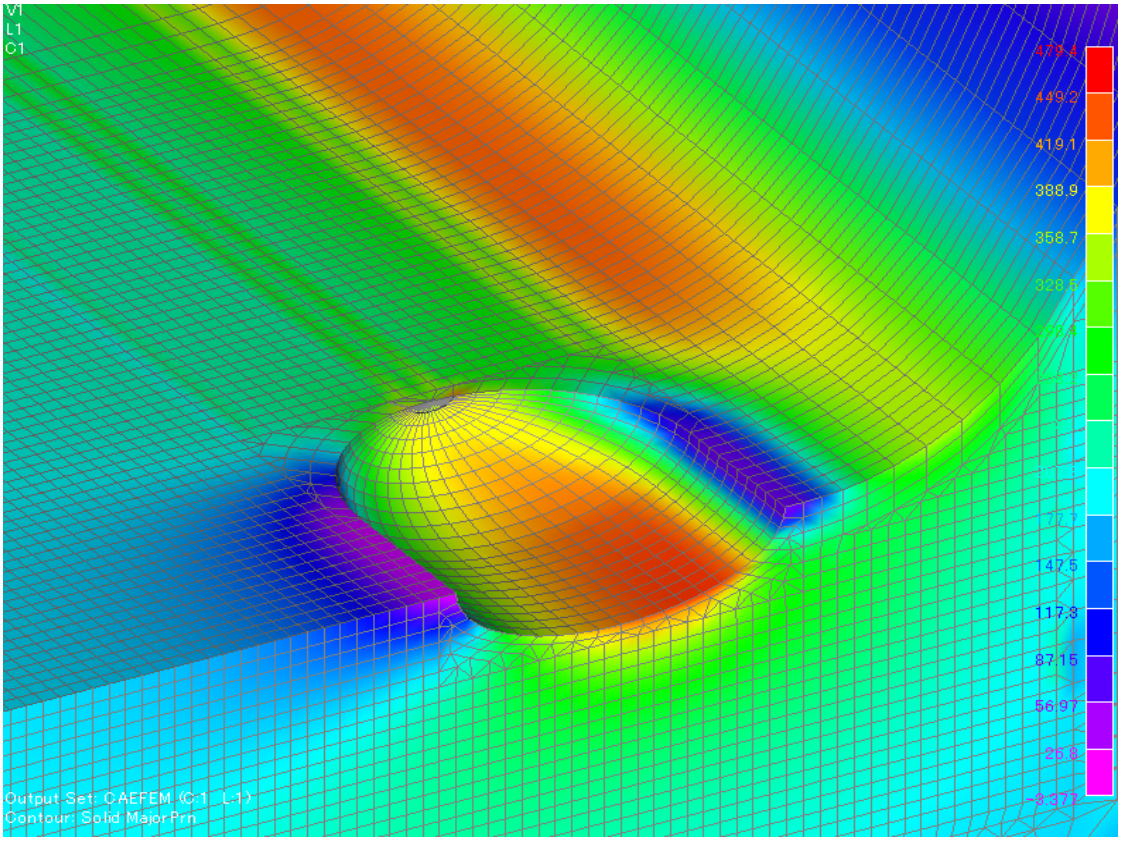




モデル番号 2

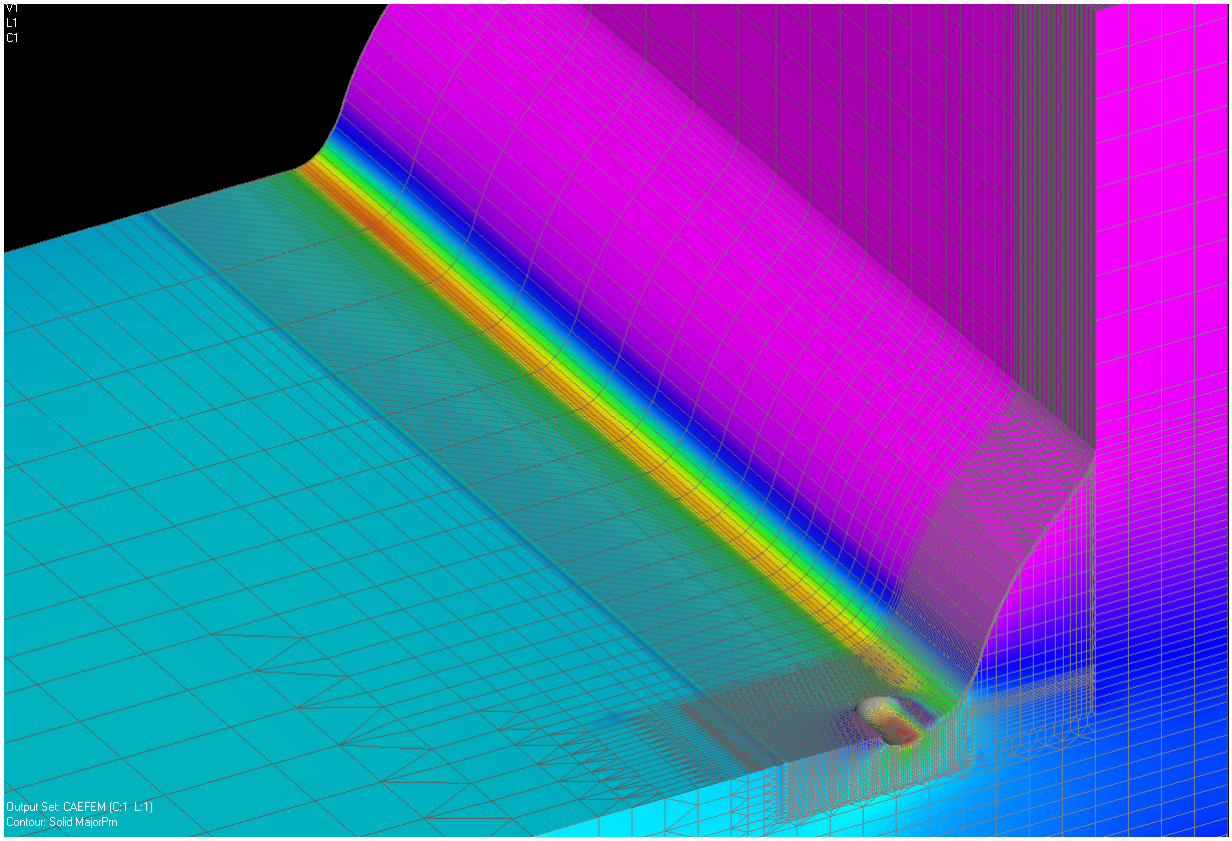
図 5.8　主応力コンター図②

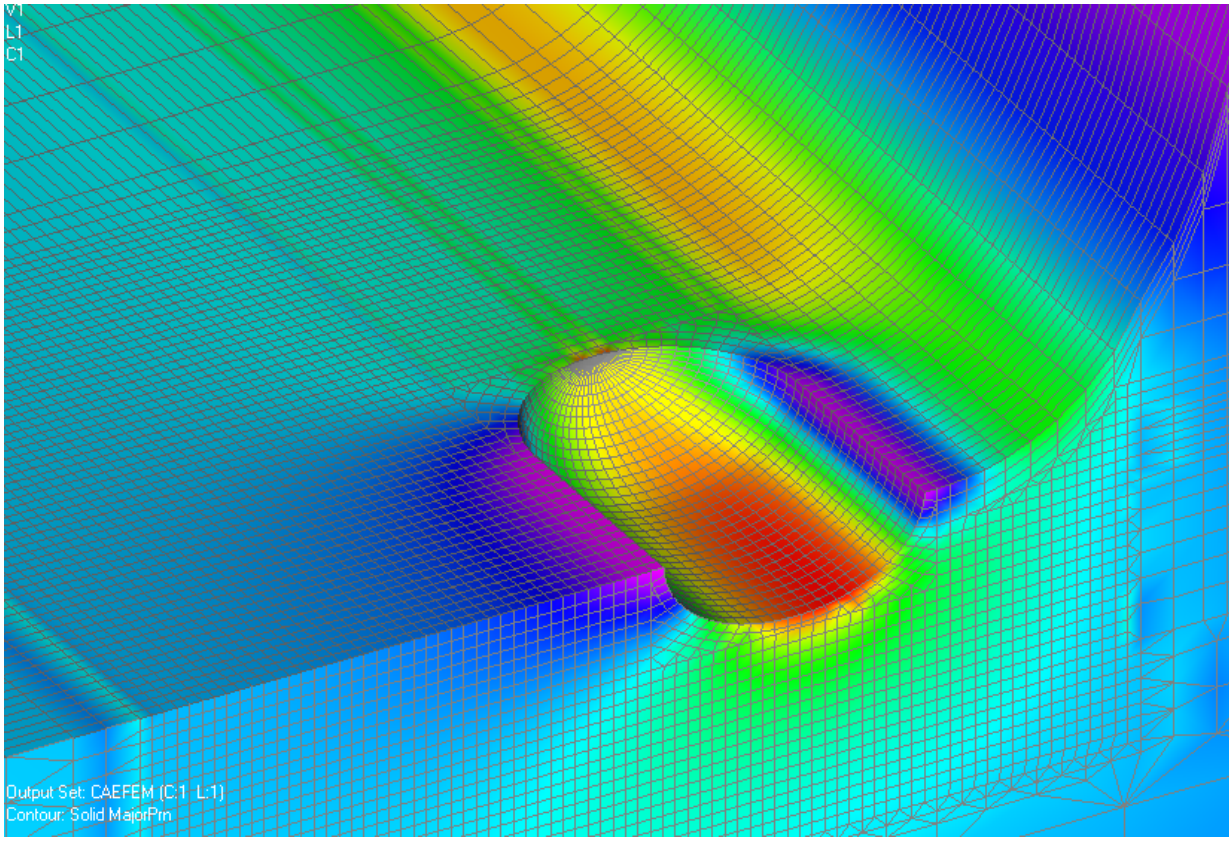




モデル番号 3

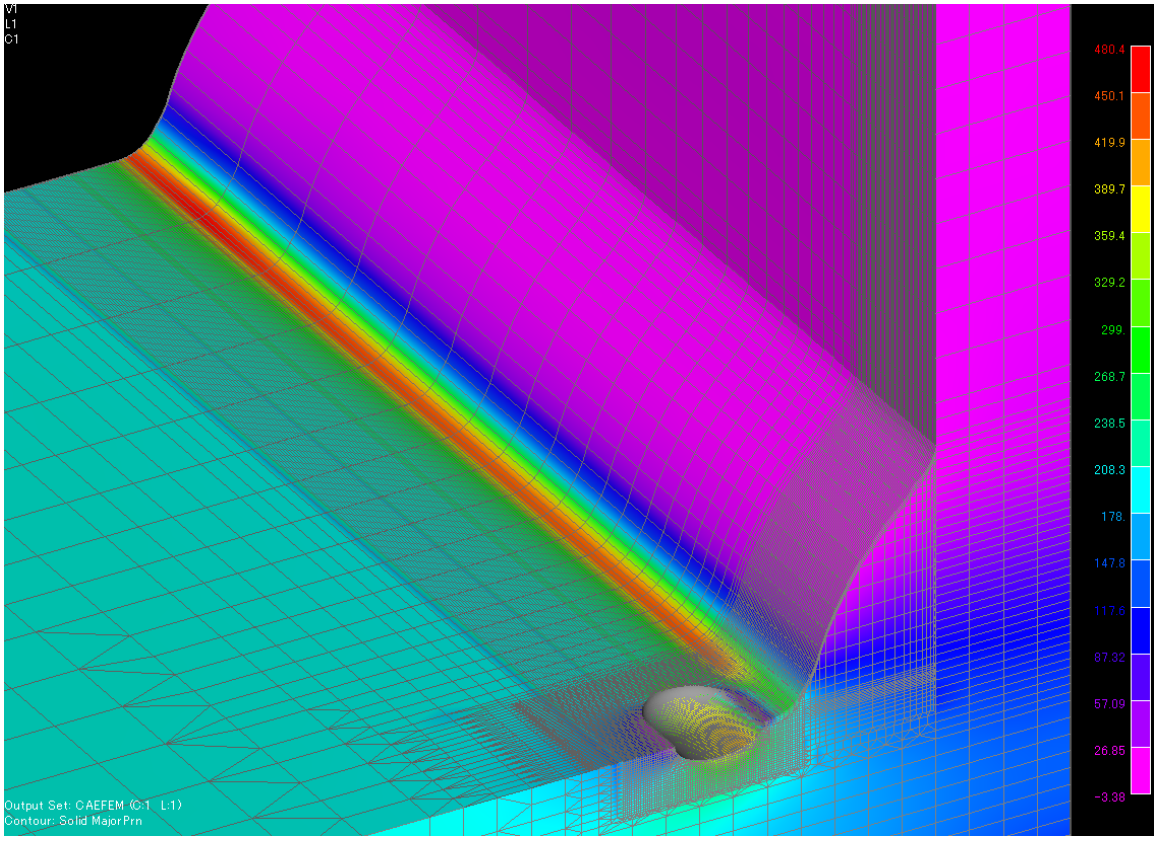
図 5.8　主応力コンター図③

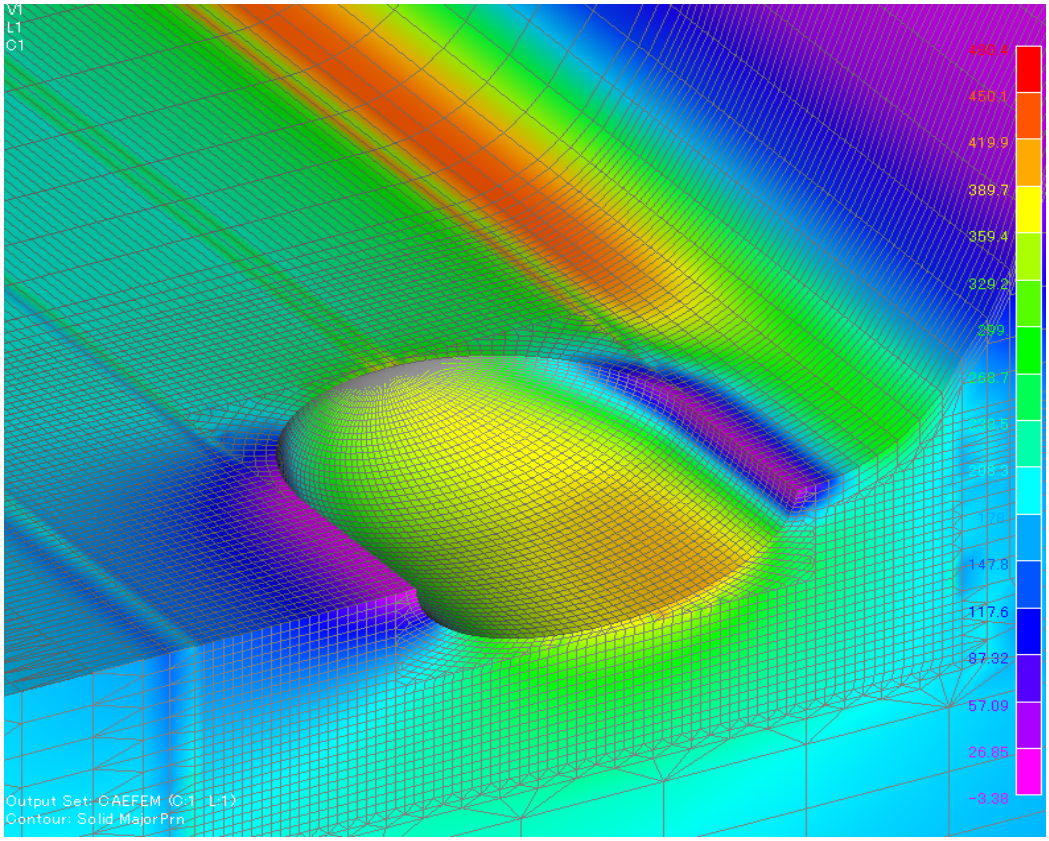




モデル番号 4

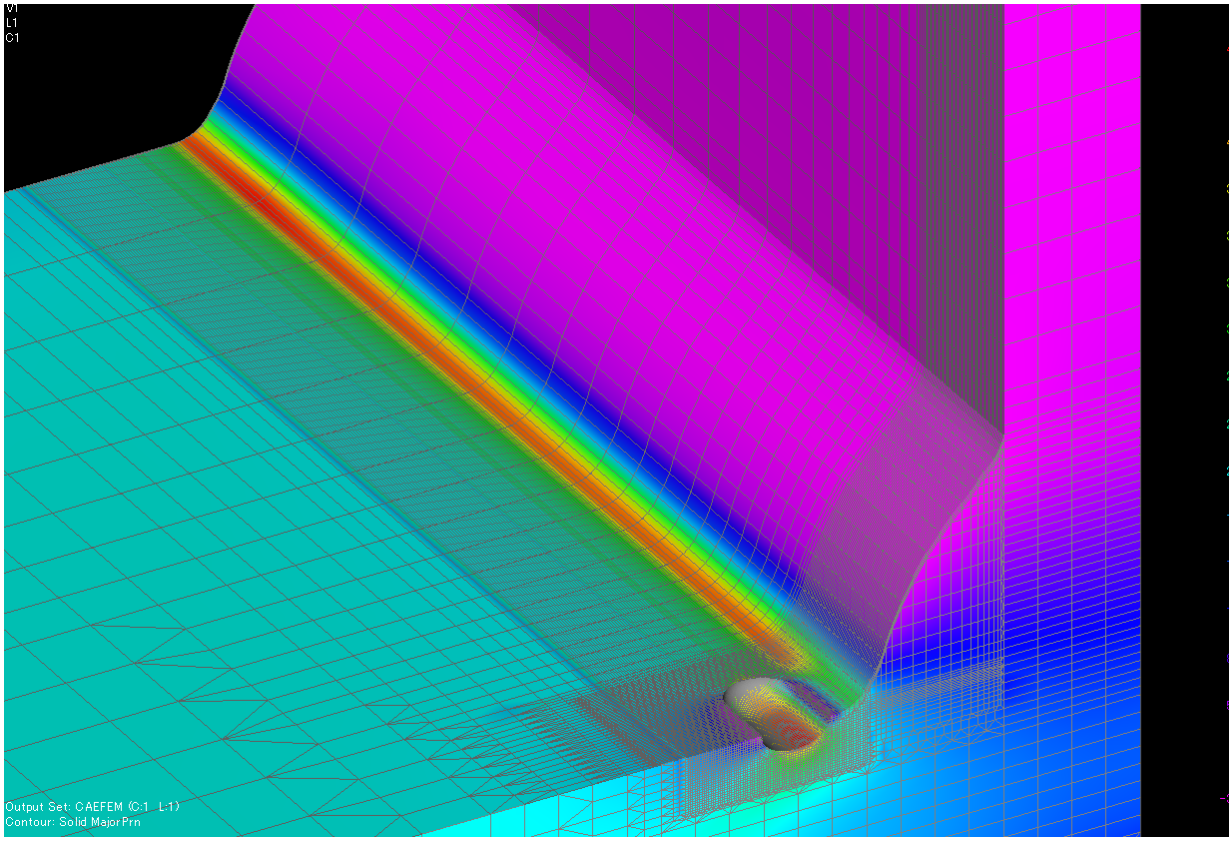
図 5.8　主応力コンター図④

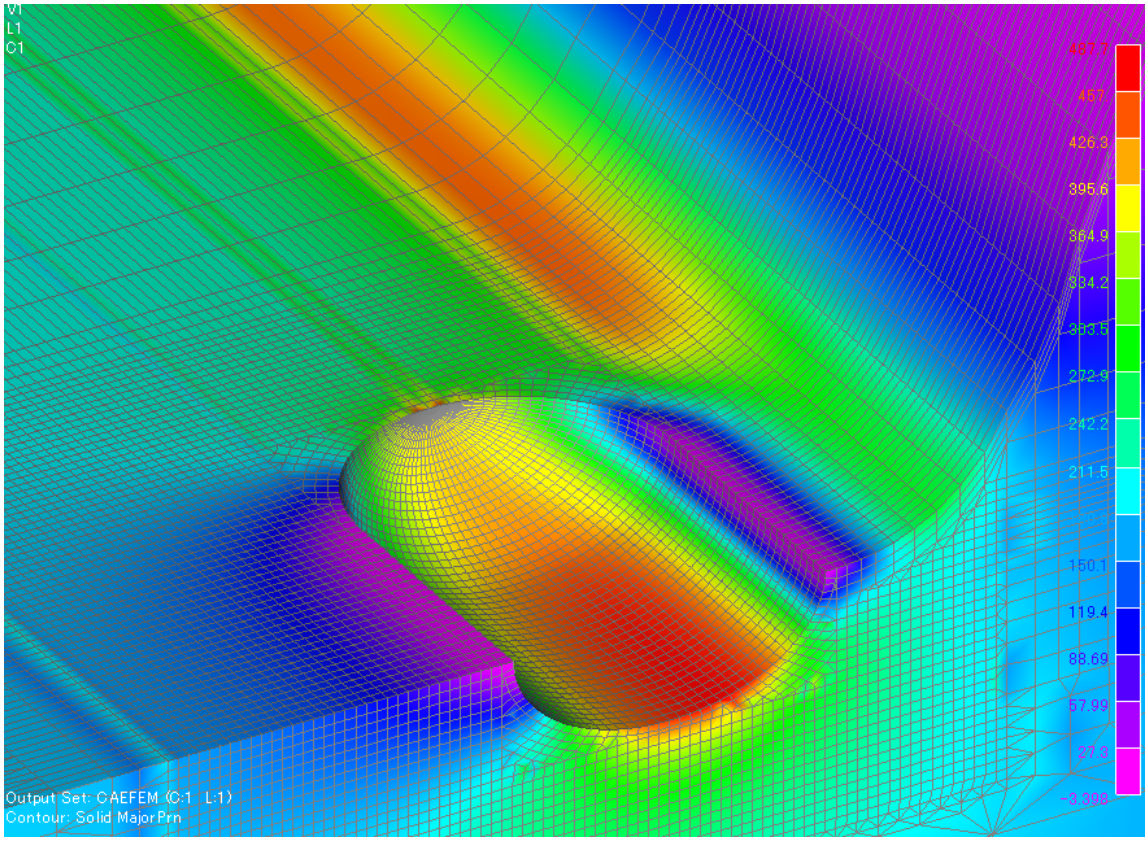




モデル番号 5

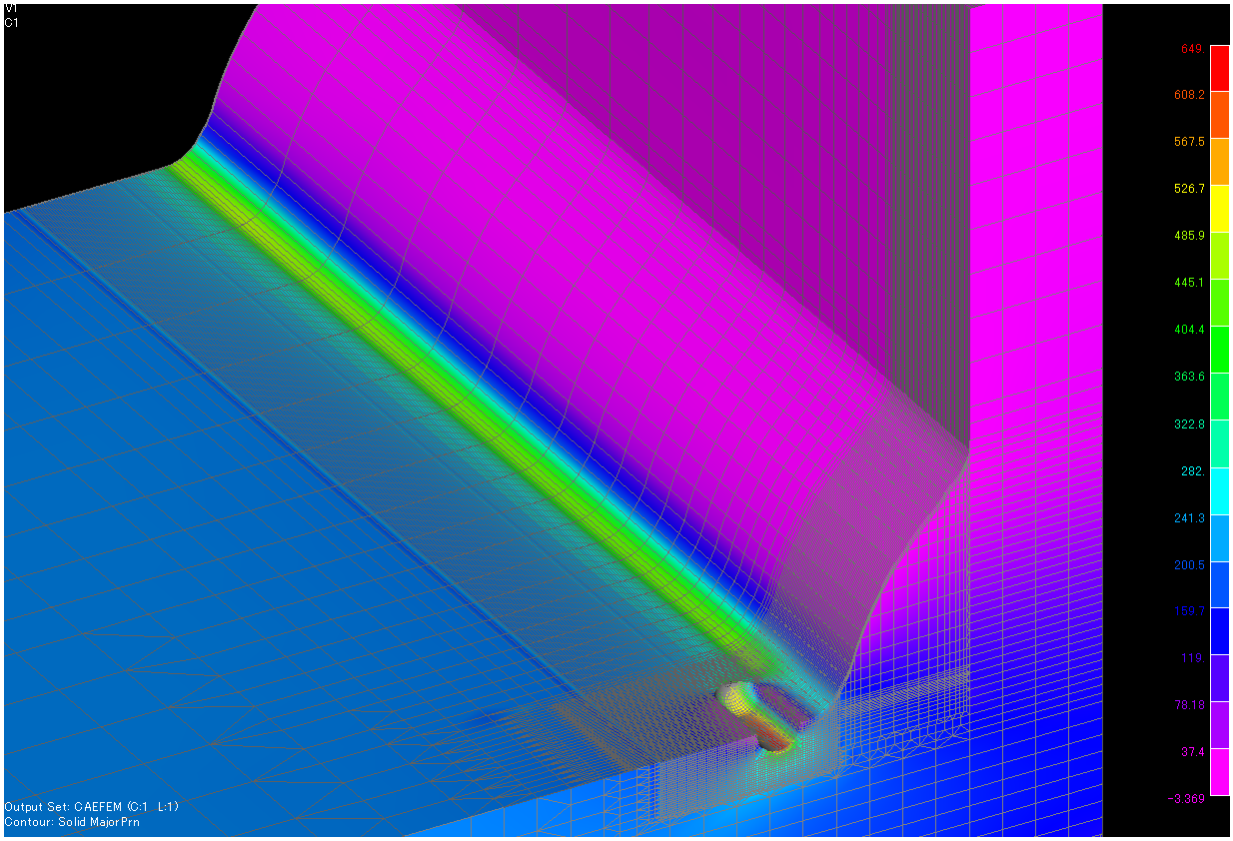
図 5.8　主応力コンター図⑤

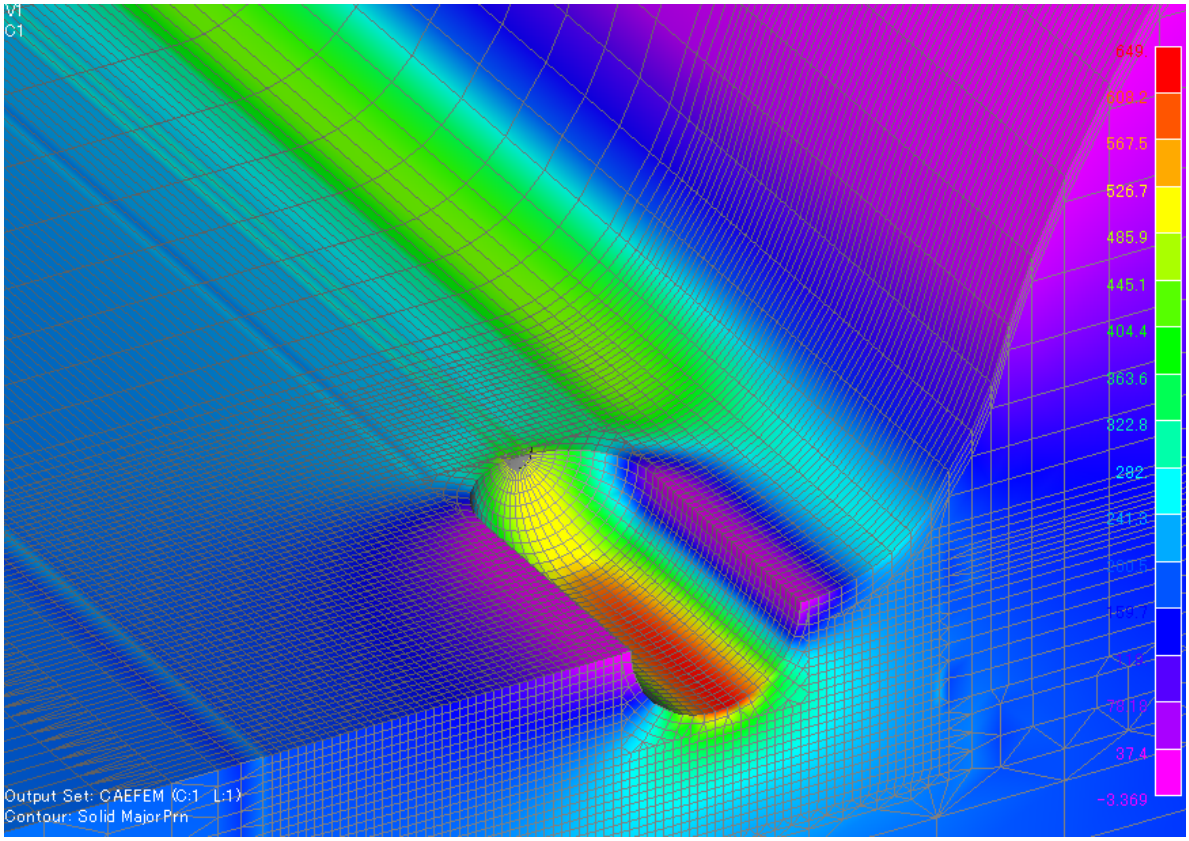




モデル番号 6

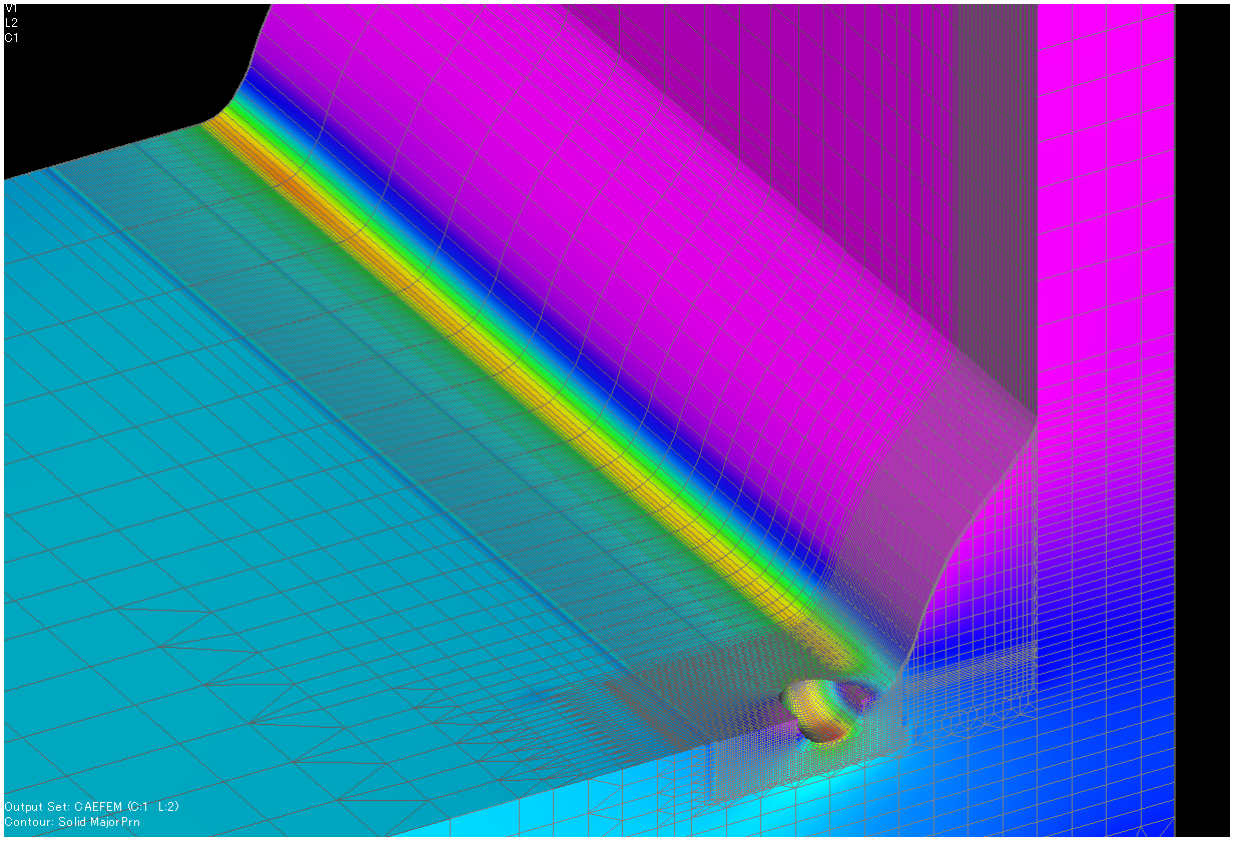
図 5.8　主応力コンター図⑥

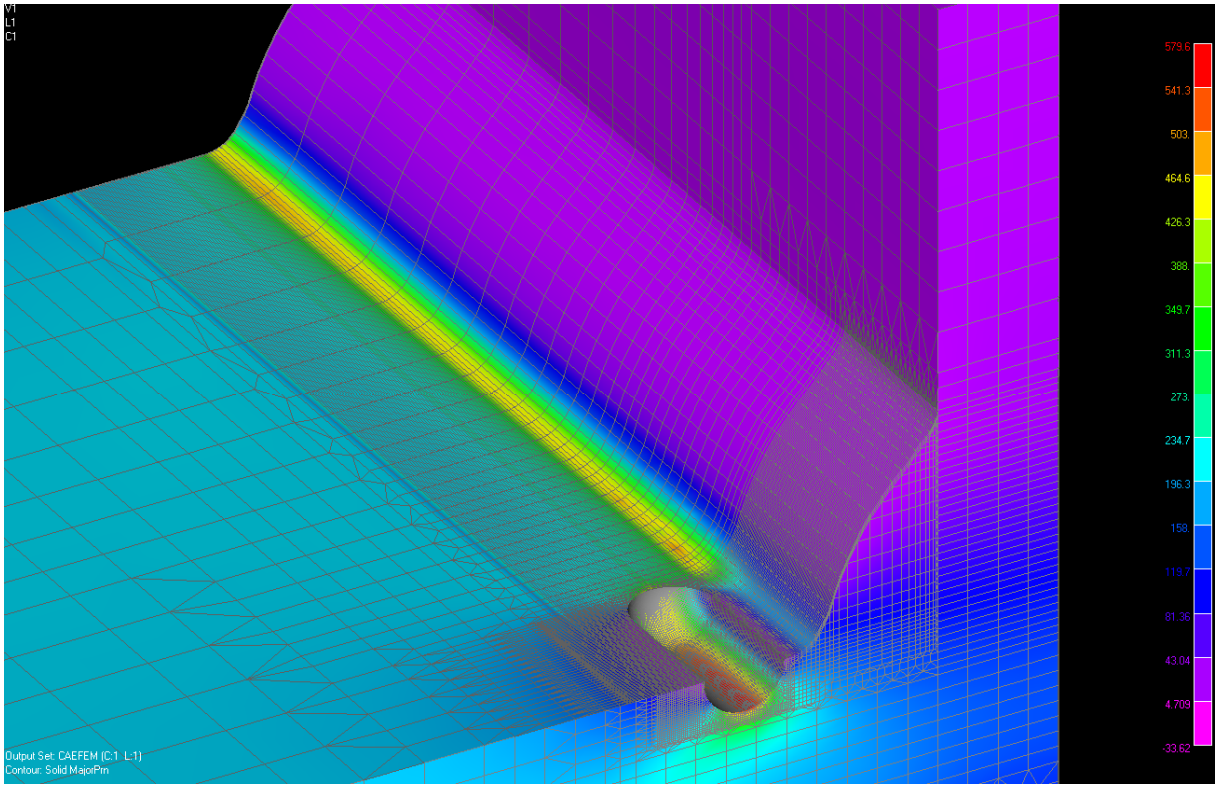




モデル番号 7

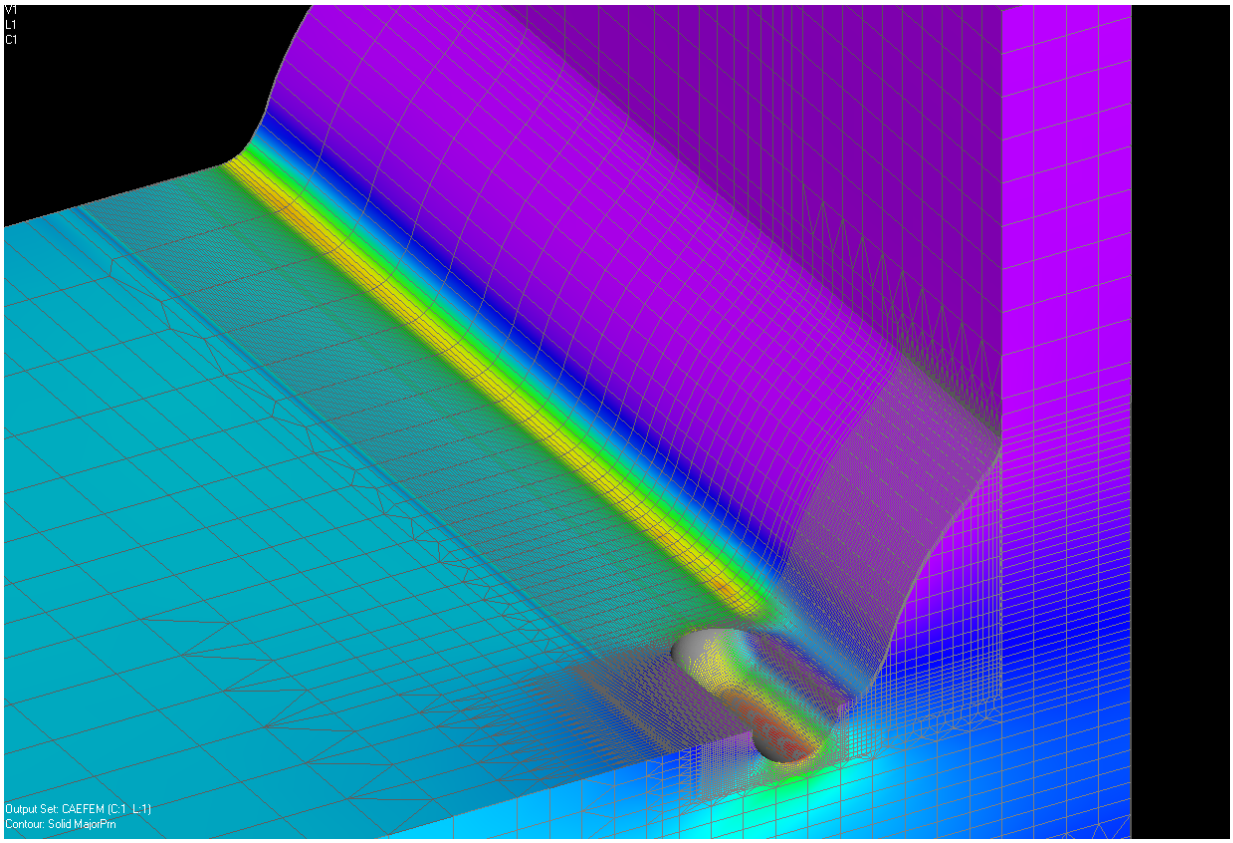
図 5.8　主応力コンター図⑦

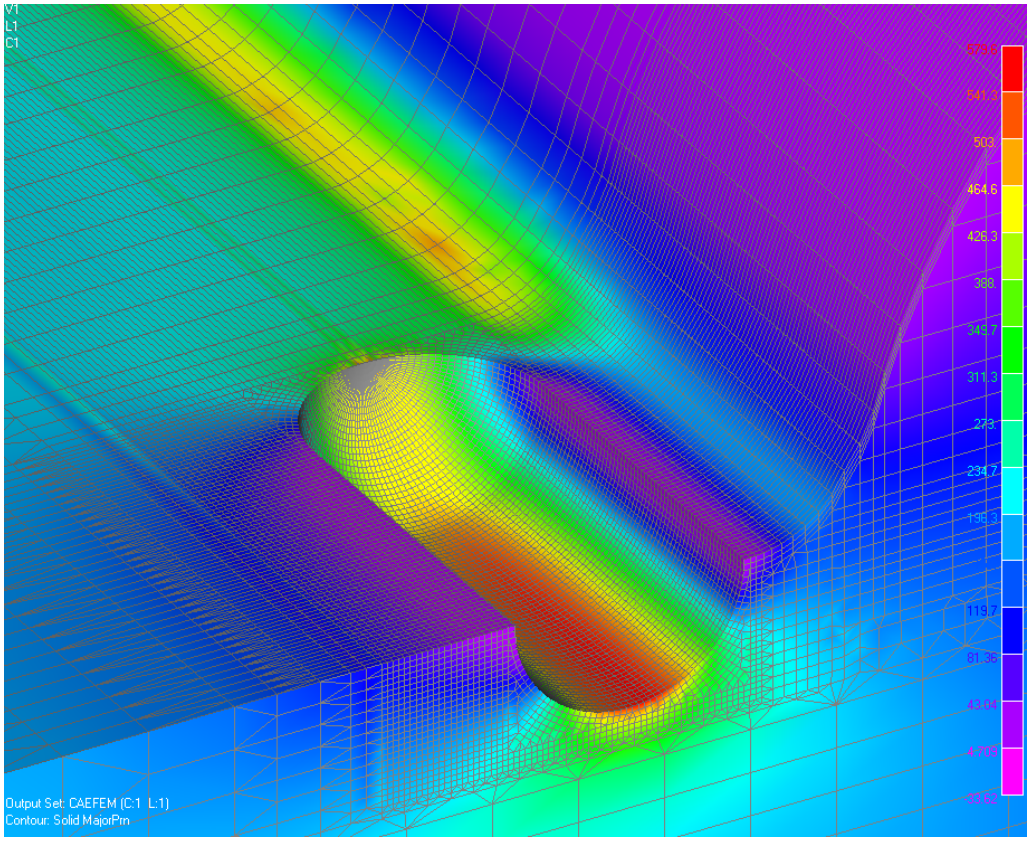




モデル番号 8

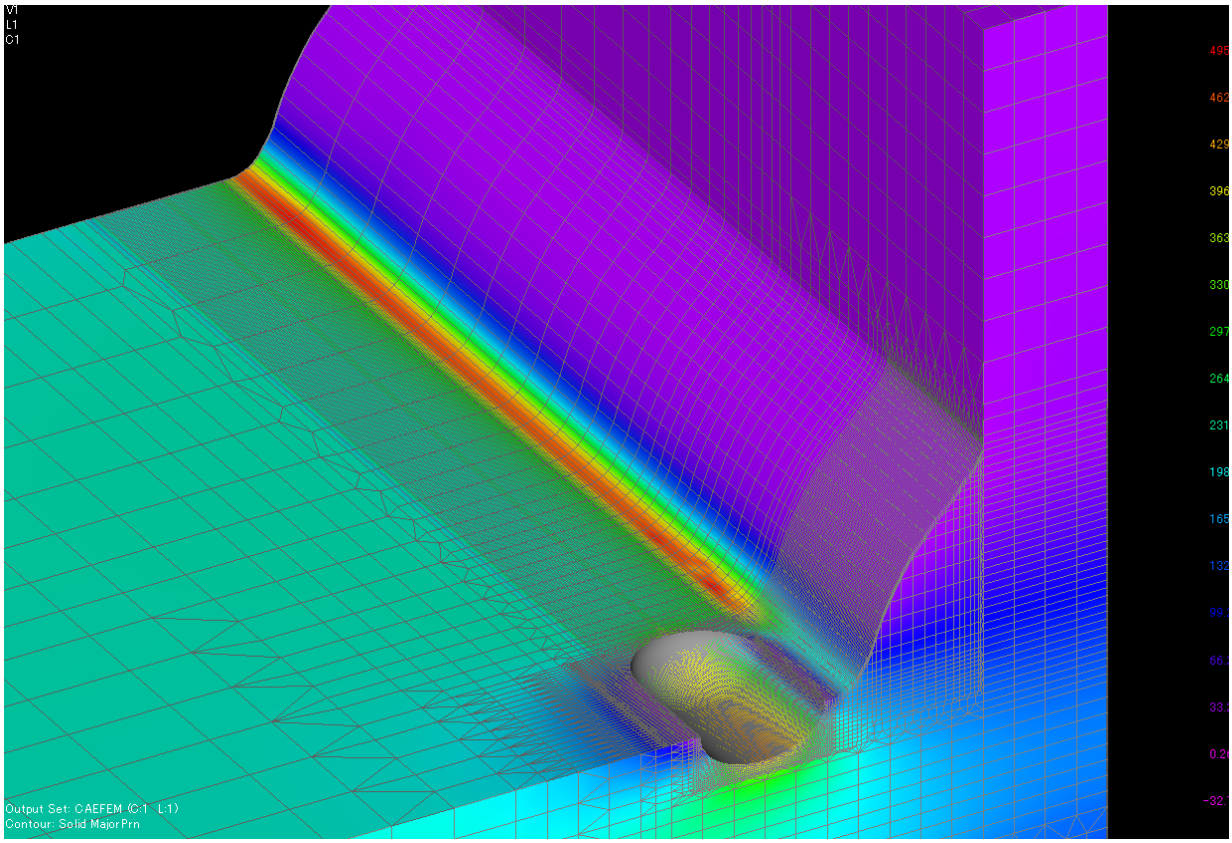
図 5.8　主応力コンター図⑧

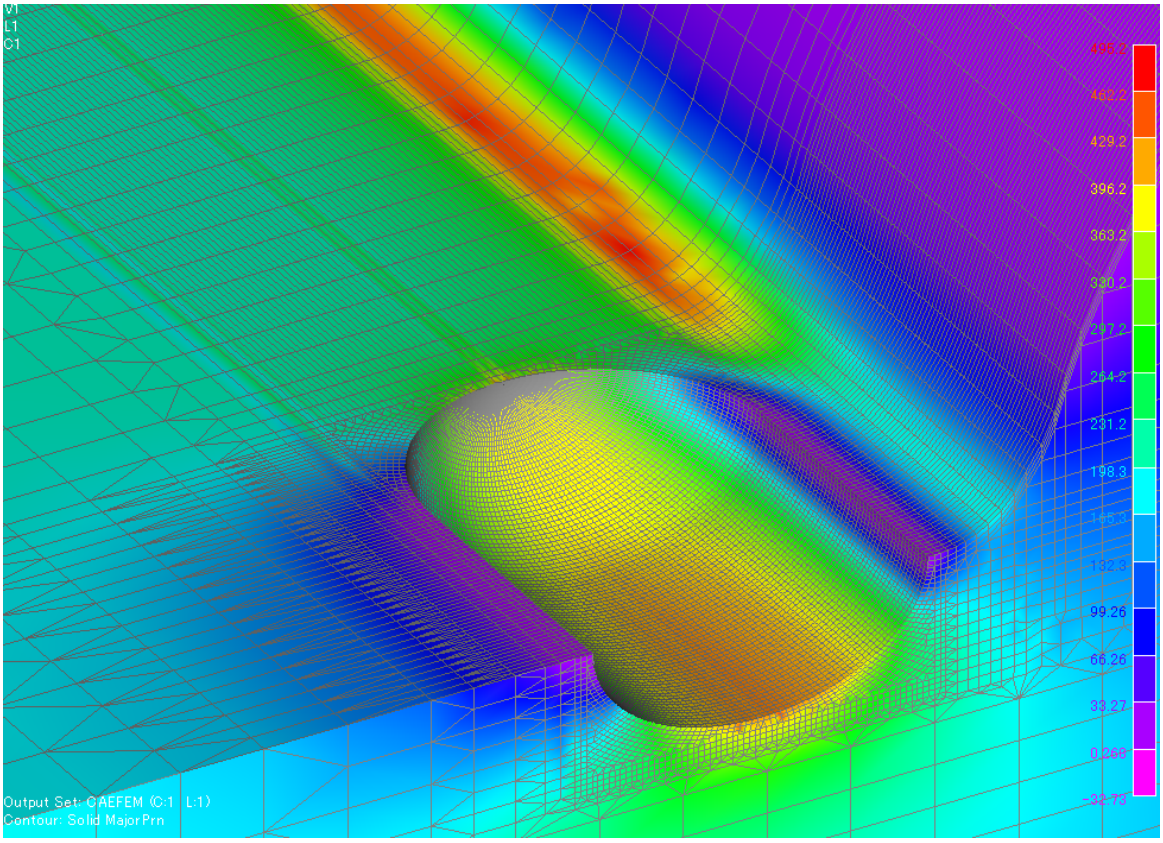




モデル番号 9

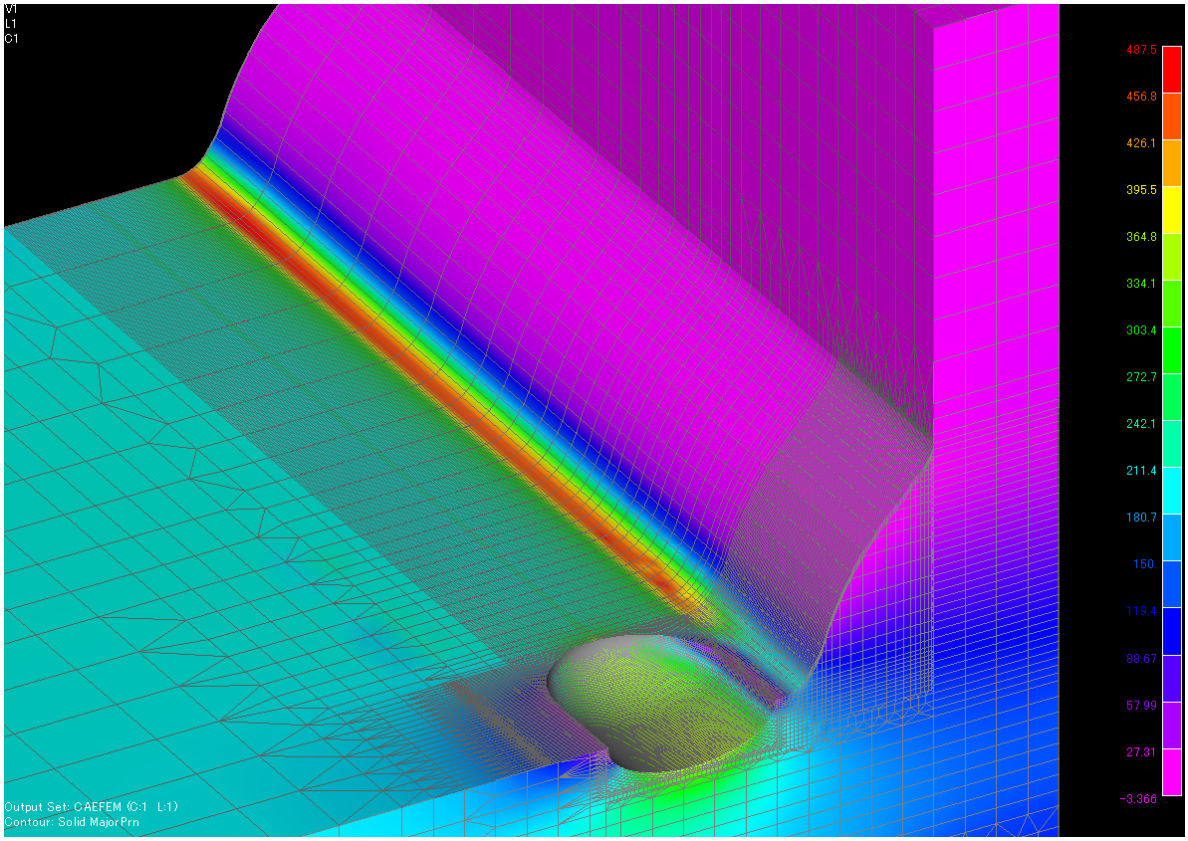
図 5.8　主応力コンター図⑨

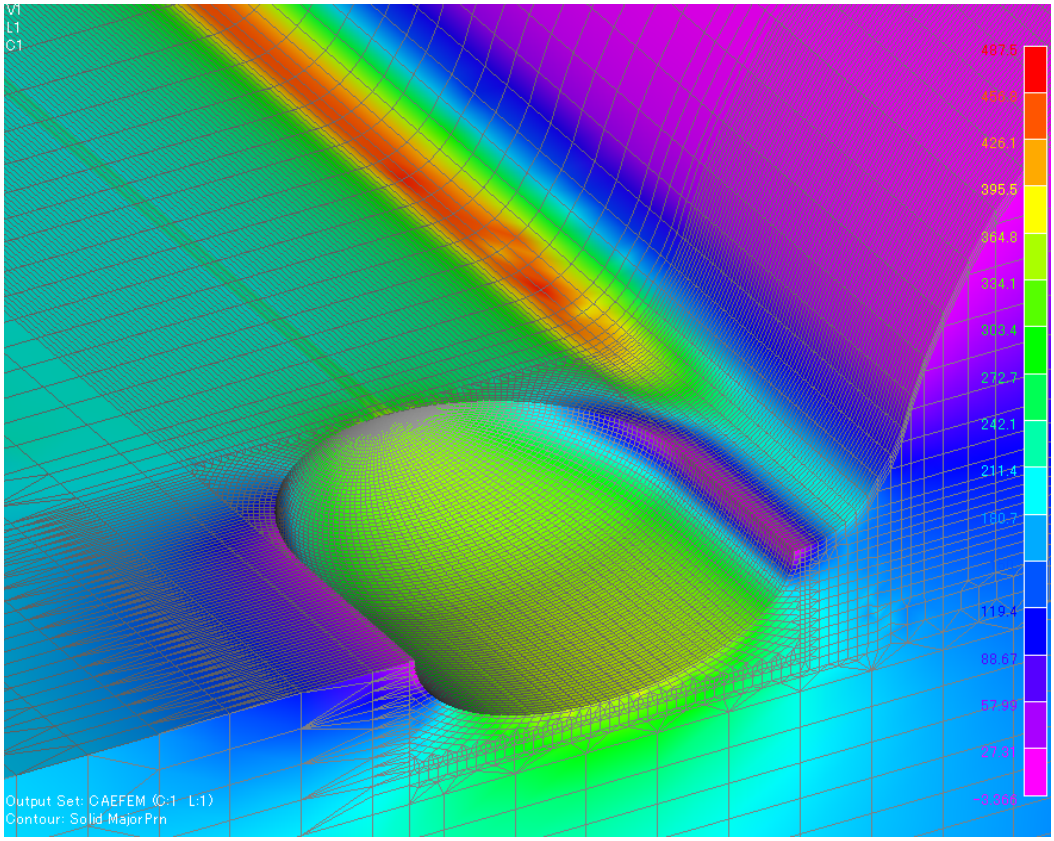




モデル番号 10

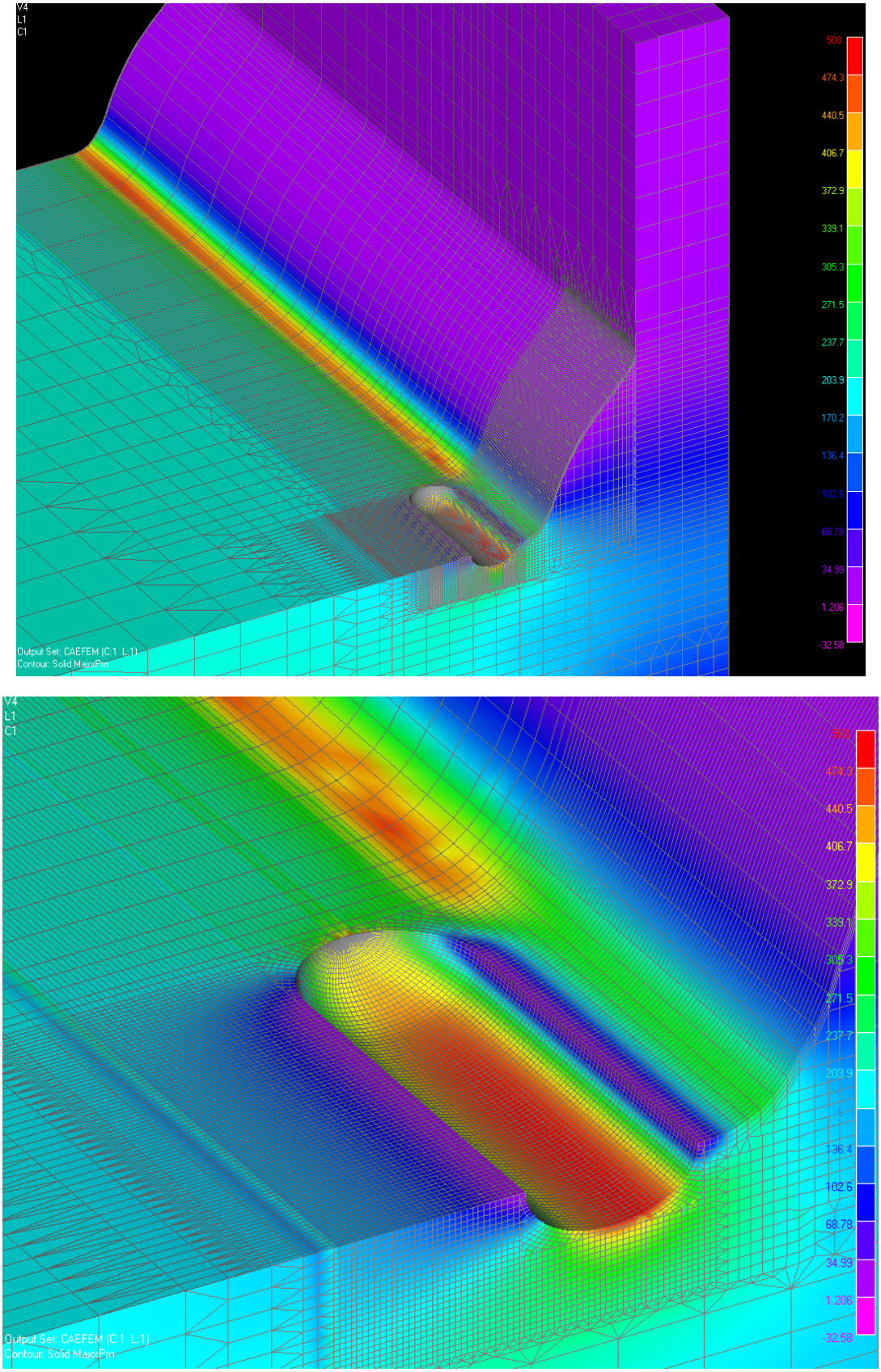
図 5.8　主応力コンター図⑩





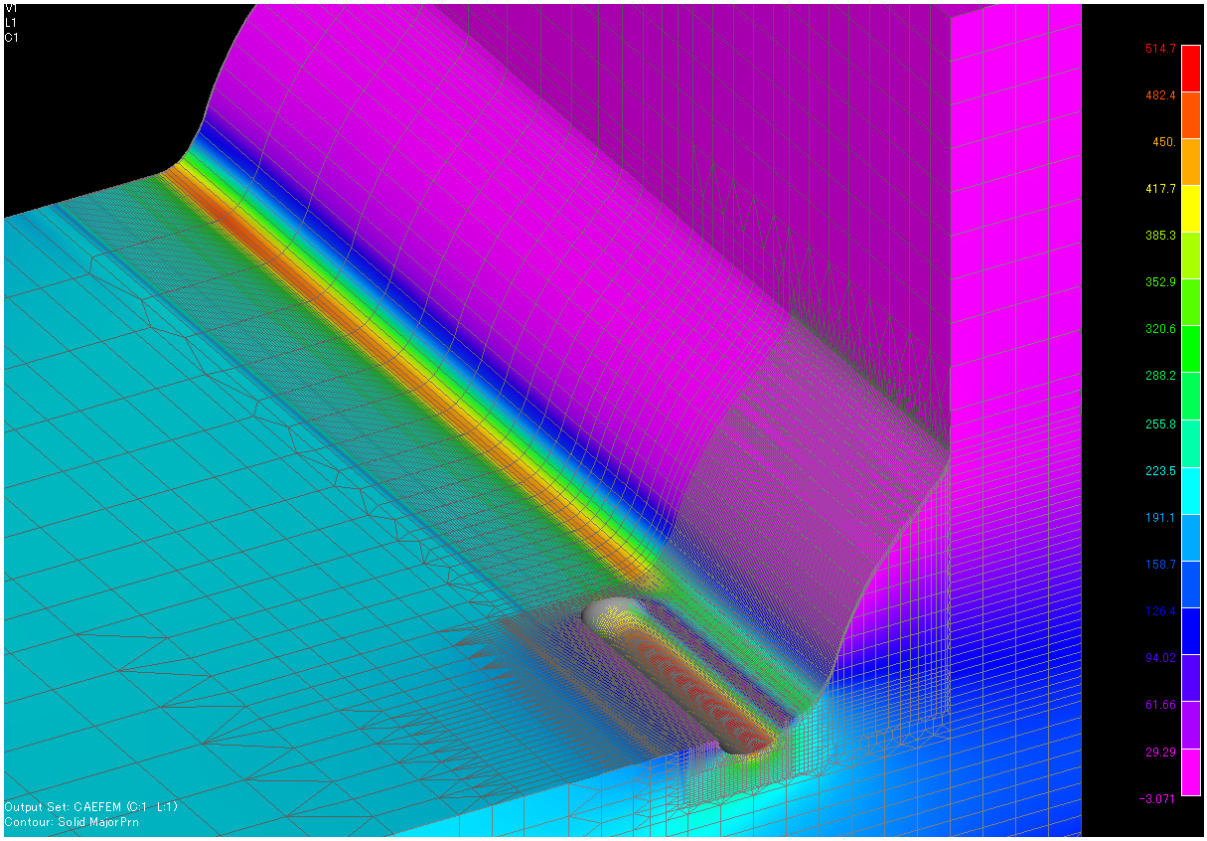
モデル番号 11

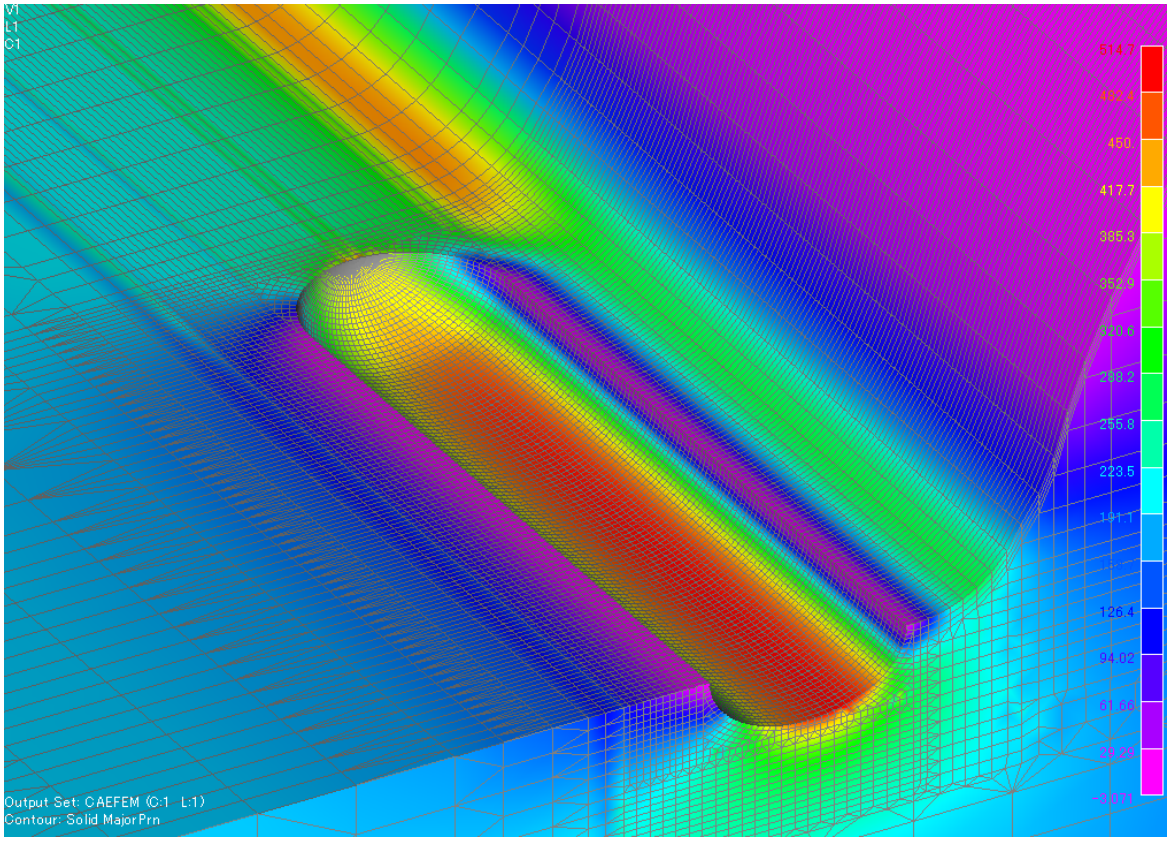
図 5.8　主応力コンター図⑪



モデル番号 12

図 5.8　主応力コンター図⑫





モデル番号 13

図 5.8　主応力コンター図⑬

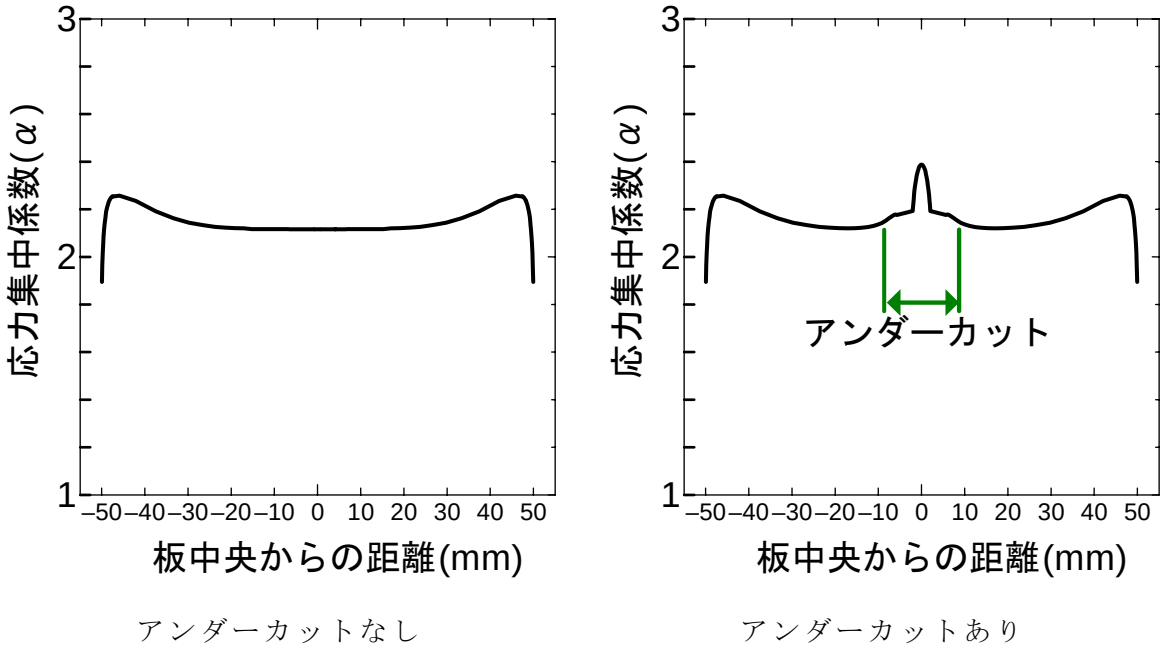


図 5.9　主応力分布図

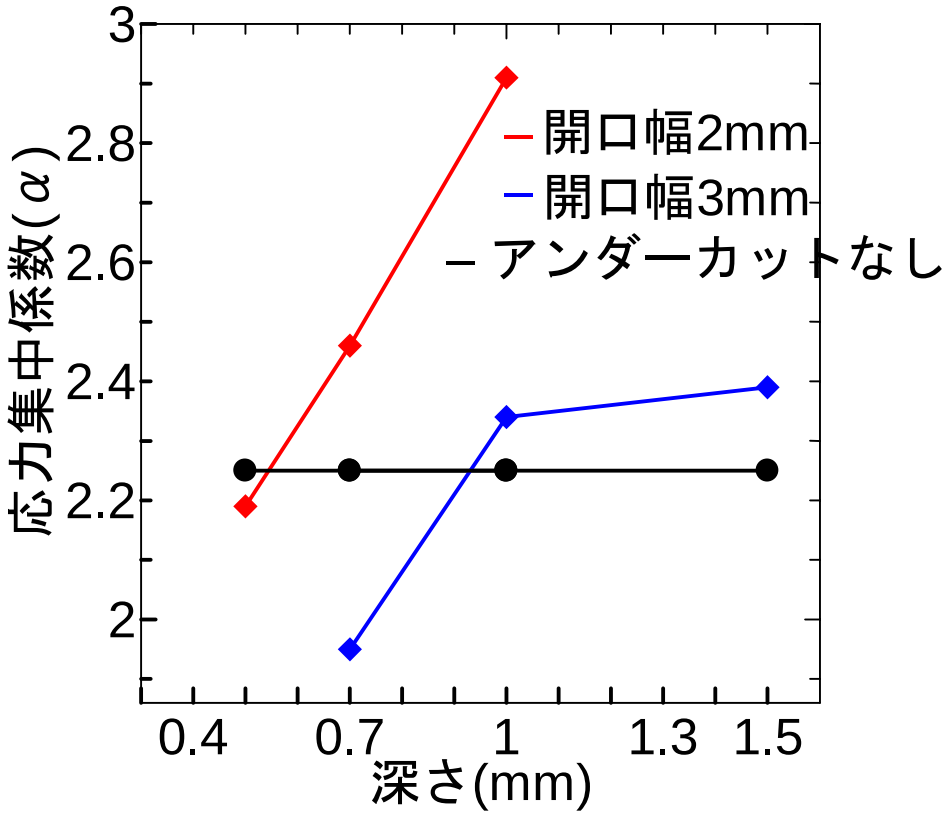


図 5.10　深さの影響

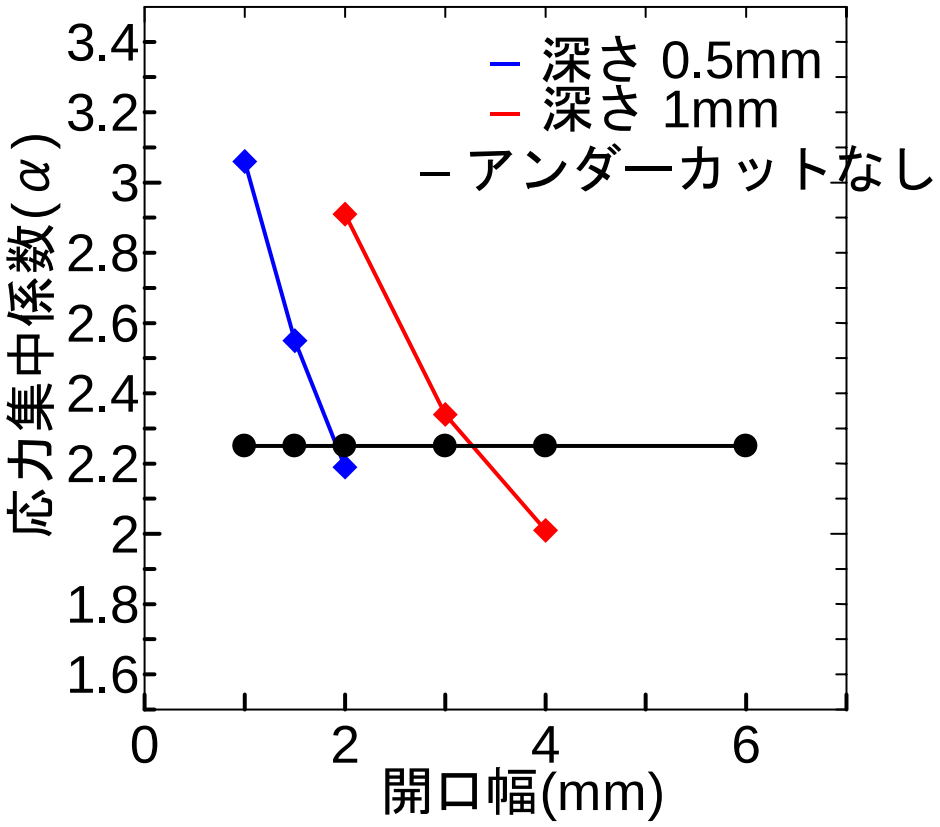


図 5.11　開口幅の影響

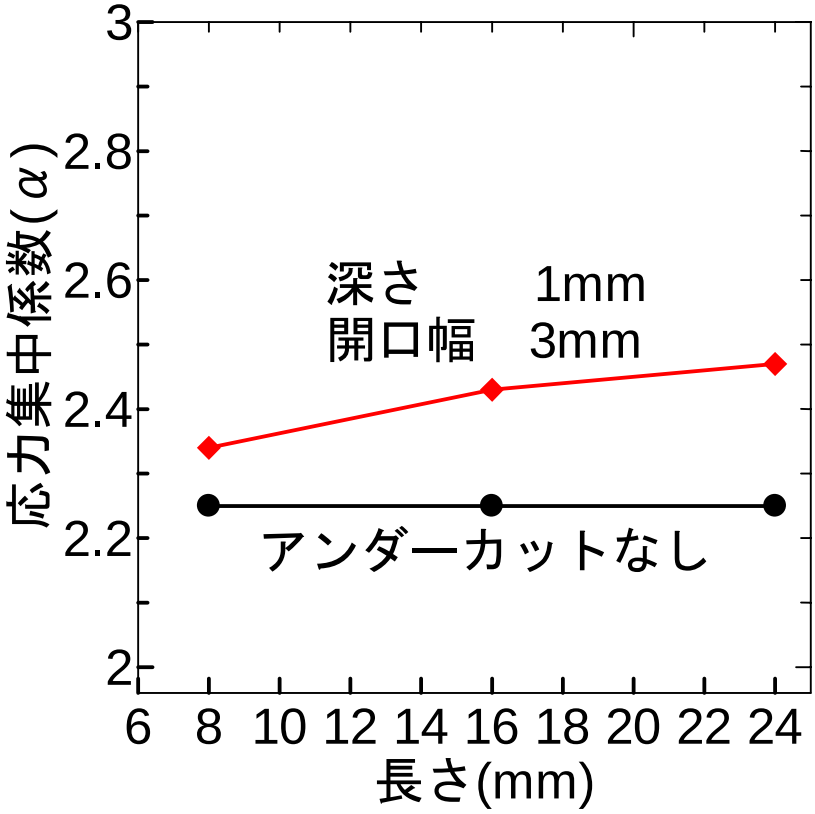


図 5.12　長さの影響

第 6 章　結論

アンダーカットが十字溶接継手の疲労強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、アンダーカットの形状・寸法をレーザー変位計で測定し、疲労試験と 3 次元有限要素法応力解析を行った。本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

(1)　アンダーカットの深さと曲率半径は開口幅の半分以下である。

(2)　深さと開口幅、長さと開口幅には系統的な関係は認められない。

(3)　アンダーカットが存在しても疲労強度の低下はほとんど認められない。アンダーカット深さ疲労強度に及ぼす影響は認められない。

(4)　深さが増し、開口幅が小さくなるにしたがって、アンダーカット底での応力集中は高くなるが、ある程度の寸法になるまでは、アンダーカットのない部分の応力集中の方が高い。

(5)　アンダーカット長さが応力集中に与える影響は小さい。

(6)　疲労強度上からは、アンダーカットの許容寸法を設定することはあまり意味がない。従来の規定から考えて、アンダーカットの深さの許容値を 0.5mm とし、十字継手に対する疲労強度等級を E とするのが望ましい。

1）三木千壽：鋼構造，共立出版株式会社，2000.7
2）日本道路協会：道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説，丸善，2002.3
3）日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.3
4）岸本宏次，印藤弘郷，神尾善二:アンダーカットを有する余盛付エレクトロスラグ溶接継手の疲労強度，溶接学会全国大会講演概要　Vol.21,182-183,1977.9
5）多田美朝，立花一郎，寺尾,貞一：溶接継手のアンダーカットの深さの疲労強度におよぼす影響，溶接学会誌　Vol.30(6),387-393,1961.6
6）小野塚正一，後川理，熊倉靖，辻勇：溶接止端部形状が疲労強度に及ぼす影響 (第１報) ビード止端の応力集中と疲労寿命，日本造船学会論文集　No.171, Page385-394,663,　1992.06
7）小野塚正一，後川理，熊倉靖，辻勇：溶接止端部形状が疲労強度に及ぼす影響 (第2報) アンダーカットの許容基準, 日本造船学会論文集, No.171 Page.385-394, 663 , 1992.06
8）BELL R, BAIN S A , VOSIKOVSKY O：The significance of weld toe undercuts in the fatigue of steel plate T-joints,　Int J Fatigue，Vol.11 No.1 Page.3-11，1989.01
9）飯田國廣,宮迫計典,仰木盛綱,岡野伊史：鋼隅肉溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼす隅肉形状等の影響，日本造船学会論文集　No143　pp.434-445
10）増原康布：電位差法による溶接部疲労き裂の測定，東京工業大学卒業論文，1990.3
11）河上剛，倉知洋行：全面すみ肉溶接継手の疲労強度に及ぼすアンダーカットの影響，法政大学卒業論文，1991.3
12）Spadea J R, Frank K H：Fatigue Strength of Fillet-Welded Transverse Stiffeners with Undercuts,　PB Rep JST ,Page82P，2004.10
13）MASHIRI F R　: Crack propagation analysis of welded thin-walled joints using boundary element method,　Comput Mech Vol.26, No.2, Page157-165，2000.08
14）NGUYEN N T, WAHAB M A : The effect of undercut, misalignment and residual stresses on the fatigue behaviour of butt welded joints.,　Fatigue Fract Eng Mater Struct Vol.19, No.6, Page769-778 ,1996
15）OTEGUI J L, KERR H W : Fatigue crack initiation from defects at weld toes in steel,　Int J Pressure Vessels Piping Vol.38, No.5, Page385-417,1989

謝辞

本研究を進めるに当たり、懇切丁寧なご指導をいていただきました法政大学工学部都市環境デザイン工学科森猛教授には心から深く御礼申し上げます。森教授には多くのことを丁寧に教えていただいたことで、非常に充実した時間を過ごさせていただきました。また法政大学都市環境デザイン工学科技術嘱託の小林佑規氏には試験機の使い方や一人では作業の難しいことなどに協力していただき深く御礼を申し上げます。三井造船株式会社の内田大介氏には論文の提供、東京鐵骨橋梁株式会社の山田浩二氏には試験体の製作や加工、測定など非常に重要な作業に協力していただきこの場を借りて御礼申し上げます。

同じ修士二年生の宇佐美龍一氏には、疲れたときなど話し相手になっていただき迷惑をかけてしまったかもしれません。甲弓子氏にはデータ整理など協力していただきました。徳力健氏には就職活動に関することなど、将来の進路に対する相談にのって頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

後輩である、同じ研究室の仲間たちには先輩でありながらも、迷惑をかけたことも多かったと思いますが、2 年間楽しく充実した生活を送れ、多くの思い出を残せたことに感謝申し上げます。また　最後に、大学に通わせてくれ生活を支えてくれた両親、姉、祖父母に心から感謝申し上げます。多くの人にお世話になり、この卒業研究を終えることができました。皆様にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。