第2章 定点載荷疲労試験

2.1 概要

国土技術政策総合研究所では、自動車荷重の移動によって特に応力状態が複雑に変化す ることが想定される横リブの交差部のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対 象として、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせとデッキプレート貫通き裂に 対する疲労耐久性の関係について定点疲労試験と数値解析による検討を行った。

2.2 試験方法

2.2.1 試験機

定点載荷試験機は、国土技術政策総合研究所内の試験機を使用した。試験機の概要は、 図-2.2.1 のとおりである。

疲労試験機(60t/90t)

▲形式 电风油注入		形	式	電気油圧式
-----------	--	---	---	-------

- ⊿性 能
 - 荷 重 静的±90t、動的±60t
 - ストローク ±50mm (全100mm)
 - 繰返し速度 0~12Hz
 - 制 御 方 式 荷重、変位
 - 波 形 正弦波、台形波、ランプ波 ブログラム波

☑ 供試体寸法

引張試験 丸材 1,800h×10~60¢mm 平材 1,800h×5~50t×200wmm 圧縮試験 1,800h×500*l*×500wmm



図-2.2.1 疲労試験機

2.2.2 供試体

試験は表-2.2.1 に示すように、デッキプレート板厚を 12, 14, 16, 19mm、トラフリブの 板厚を 6, 8mm としてこれらを組み合わせた横リブ交差部の鋼床版部分供試体への定点一 定荷重振幅の疲労試験である。供試体の詳細は図-2.2.2 に示す。デッキプレートとトラフリ ブの縦方向溶接継手は、実橋の条件に近くなるようにパネルライン(自動溶接機)により 溶接した。供試体形状については別途、連行載荷を受ける鋼床版パネルの FEM 解析を実施 し、着目部直上に載荷された場合の応力状態が本供試体とほぼ同じであること、移動荷重 による主応力方向の変動は小さいことを確認した。なお供試体はき裂の検出とゲージの添 付のために無塗装である。

計測位置を図-2.2.3 に示す。ひずみゲージは、デッキプレート貫通き裂の起点となる可能 性の高い横リブ交差部で横リブ中心から 5mm 離れた位置のデッキプレートおよびトラフリ ブに設置した。このとき既往の同種の実験と同様にデッキプレートとトラフリブの縦方向 溶接のビード止端からの離れは 5mm と 40mm の 2 カ所を基本とした。

供試体名	デッキ厚	リリブ厚
	(mm)	(mm)
D12U6	12	6
D12U8	12	8
D14U6	14	6
D14U8	14	8
D16U6	16	6
D16U8	16	8
D19U8	19	6
D19U8	19	8

表-2.2.1 供試体の種類・条件



図-2.2.2 供試体寸法

\$29



図-2.2.3 計測位置

2.2.3 載荷方法

供試体の設置状況を図-2.2.4,写真-2.2.1及び2に示す。載荷は、デッキプレート上面側から2本のトラフリブそれぞれの中心位置に大型車のシングルタイヤを想定した200×200mmの設置面を設定し、2箇所同時に載荷した。なお、供試体はデッキプレート上面に舗装がないため鋼製の載荷板と供試体の間には写真-2.2.3及び4に示す硬質ゴム(板厚 15mm)を設置した。

この試験方法では載荷重がゼロとなると載荷板と供試体に離間を生じた段階でひずみゲ ージの値が安定しなくなることが想定されることから,離間を生じないように最小載荷重を 10kNとし、最大載荷重は110kNとして正弦波に従う100kNの荷重変化を与えた。載荷速度 は試験監視体制とひずみゲージの応答の状況に応じて1~9Hzの間で同じ供試体に対する一 連の疲労試験の間も適宜変化させている。載荷条件の詳細を表-2.2.2に示す。

なお、D12U6~D16U6 については、試験期間の都合上 50 万回で試験を一旦中断し、期間 をおいて再開した際、試験再開後のひずみゲージの値が試験中断前とずれを生じたため、載 荷状態を確認した上で値のずれを補正(試験再開時オフセット)して整理した。







図-2.2.4 設置方法



写真-2.2.1 供試体設置状況



写真-2.2.2 治具との設置方法



写真-2.2.3 クロロプレンゴム仕様



写真-2.2.4 クロロプレンゴム全景 (ゴム購入時 500mm×15mm×500mm)

供試体名	定	点繰返し載荷	Ī	試験再開時
	繰り返し荷重 (kN)	基準周波数 (Hz)	夜間周波数 (H z)	オフセット 有無
D12U6	10~110	4.0~4.3	0.9~1.1	有り
D12U8		5.3 ~ 6.2	1.5~2.0	有り
D14U6		6.5 ~ 6.6	2	有り
D14U8		7	1.0~1.2	有り
D16U6		7.5	1	有り
D16U8		5.0 ~ 8.0	1.0~2.0	無し
D19U6		9	1.0~1.5	無し
D19U8		9	1.5	無し

表-2.2.2 試験条件

* オフセットとは試験中断期間の経時変化によるひずみゲージの値の変化 を試験中断前のイニシャル値と整合するよう再開時点でのイニシャル値を補 正した値を計測値とした。

2.2.4 き裂の確認方法

(1) 概要

本試験は、デッキプレート貫通き裂の発生を意図したものとなっており疲労試験中に目視 や磁粉などの外観からの観察ではき裂の発生・進展を確認することが困難である。そのため 載荷試験の実施中は、ひずみゲージの値の変化に注意することに加えて、超音波探傷試験を 行ってき裂の発生と進展を推定した。また載荷試験終了後には、超音波探傷試験を行ったの ち供試体を破壊して直接内部のき裂の状況を確認した。

(2) 超音波探傷試験

超音波探傷試験は、き裂の発生と進展の程度の推定を目的に、試験前の初期探傷、50万回、100万回、200万回時に行った。

片側からの部分溶け込み溶接となっているトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継 手ではルート形状や位置が必ずしも一定でなく,超音波探傷試験はデッキプレート内部を上 方に向かうき裂の有無の検出を最優先に 90°縦波斜角探傷,SH(表面)波による探傷を行 った。デッキプレート内部に向かう傷からのエコーが確認された後は,その範囲を特定でき るように 70°の斜角による探傷を実施した。図-2.2.5 に探傷方法の概念図,写真-2.2.5 に探 傷機の名称を示す。

■90°縦波斜角-----初期探傷、き裂の有無の確認



■SH(表面)波-----初期探傷、き裂の有無の確認



■斜角探傷(斜角70°の集束型探触子)-----き裂発見後、深さ、範囲の確認



図-2.2.5 探傷方法と評価の概念図



写真-2.2.5 超音波探傷機

(3) 破壊試験

供試体毎のき裂の進展状況の確認と超音波探傷によるき裂進展状態の推定精度の確認を 目的に,所定の200万回の定点載荷試験後に,供試体を切断し液体窒素を用いて冷却してハ ンマーで低温脆性破壊させ,き裂の状況を確認した。切断状況を写真-2.2.6~10に示す。



写真-2.2.6 切断状況①(エンジンカッター作業) 写真-2.2.7 切断状況②



写真-2.2.8 切断状況③(切断終了試験片) 写真-2.2.9 切断状況④(液体窒素による冷却)



写真-2.2.10 切断状況⑤(低温脆性破壊)

(4) 静的載荷時のひずみの計測

き裂の発生・進展に伴って供試体の耐荷力機構に変化が生じることから同じ載荷状態に対 するひずみゲージの値には変化が生じることが想定される。そのためき裂の発生と進展状況 の推定のために、10万回までは5千回ごと、以降は10万回ごとに200万回まで疲労試験 の途中で静的載荷を行って各ひずみゲージの値を記録した。

2.3 試験結果

2.3.1 き裂範囲の推定方法

超音波探傷試験は、き裂の発生と進展の程度の推定を目的に、試験前の初期探傷、50万回、100万回、200万回時に実施することを基本とした。推定き裂の範囲は、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接線方向(トラフリブ軸方向)長さをx、トラフリブ軸に直交しデッキプレート面に平行な方向でトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接の推定ルート位置からき裂先端までの距離をy、デッキプレート面直交方向にデッキプレート下面からき裂先端位置までの距離(高さ)をz、と定義して比較した。推定き裂範囲の定義を図-2.3.1に示す。



図-2.3.1 き裂の方向の定義

デッキプレート貫通き裂は,起点位置と進展方向,き裂範囲の形状が必ずしも同じ傾向とならないため,定義したき裂推定範囲から「き裂面積 A」を式(2.3.1)また「き裂の道のり L」を式(2.3.2)のように定義して比較に用いる。

$$A^{(き裂の面積) = \frac{(き裂の範囲 x) \times \sqrt{(き裂の範囲 y)^2 + (き裂の範囲 z)^2}}{2}$$
(2.3.1)

$$L(き裂の道のり) = \sqrt{y^2 + z^2}$$
 (2.3.2)

き裂範囲の推定では図-2.3.2 に示すように供試体のトラフリブのウエブ位置に対応する a ~dの4測線で超音波探傷試験を実施した。なお、初期状態での溶け込み深さを推定するために各供試体の a~dの各測線で横リブ位置から 20mm, 100mm 離れた位置(図-2.3.2 中の1, 2, 3) でデッキプレート側及びUリブ側の脚長を測定し,図-2.3.3 に示す方法で溶接状態を 推定した。



図-2.3.2 超音波探傷試験の対象位置



図-2.3.3 溶接状態の推定方法と記号の定義

2.3.2 初期状態の推定

疲労試験に先立って行った供試体の溶接部のスケールによる形状計測と超音波探傷試験の結果から推定した初期の溶接状態を表-2.3.1及び表-2.3.2に示す。

測 定位 置	D12U6	D12U8	D14U6	D14U8	D16U6	D16U8	D19U6	D19U8
a-1	7.3	6.7	7.8	7.7	8.2	6.2	7.4	7.4
a-2	7.1	6.5	6.9	7	9	6.2	6.9	6.7
a-3	7.4	6.1	7.3	7.6	9.2	6.3	6.8	7.5
b-1	7.6	8	5.9	9	9.1	9.1	8.8	7.6
b-2	8	8.1	6	8.8	8.5	7.4	9	7.5
b-3	8.1	8.6	7	8.7	8.5	8.3	9.3	7.8
c-1	8	9	8.2	7.7	9	7.8	7.8	8.3
c-2	7.9	7.8	8.3	7.5	8.2	7.5	7.1	6.2
c-3	8	8.7	8.3	8.2	8.3	7.4	7.1	6.2
d-1	7.4	8.2	6	8.2	7.7	6.7	8.1	8.1
d-2	8.1	7.2	5.9	7.2	8.2	6.9	7.6	7.4
d-3	9.3	7.4	5.4	8.4	8	8.3	9	7.3

表-2.3.1 初期状態の計測によるデッキプレート側の脚長(A:mm)

表-2.3.2 初期状態の計測によるトラフ側の脚長(C:mm)

測 定位 置	D12U6	D12U8	D14U6	D14U8	D16U6	D16U8	D19U6	D19U8
a-1	8.1	9.3	9.7	8.9	9	10.1	7.1	10.0
a-2	7.9	9.1	6.9	7.8	9.6	9.3	9.4	12.8
a-3	7.8	8.9	7.8	7.9	9.2	11.4	10.8	10.6
b-1	8.1	8.3	8	9.8	8.2	12.1	9.6	10.5
b-2	8.2	8.2	9.5	8.4	8.9	9.1	10.1	11.8
b-3	7.9	8.1	8	8	9.5	9.1	9.4	11.5
c-1	8.3	10.4	8.2	10.6	8.9	9.5	11.5	11.8
c-2	7.8	7.6	7.6	8.2	9.4	10.3	9.7	10.4
c-3	7.2	9.8	7.8	7.4	8.9	10	10.8	12.3
d-1	8.5	9	7.9	8.5	10	10.2	9.9	10.9
d-2	8.8	8.5	9.5	10.2	9	10.4	9.6	9.8
d-3	8.8	8.5	8.3	9.6	9.8	12.3	10.3	9.2

各初期状態の概要を図-2.3.4 に示す。





図-2.3.4 初期状態の概要

2.3.3 UTによるき裂の発生と進展の推定

繰り返し数 50 万回, 100 万回, 200 万回の各時点での超音波探傷試験結果から推定された き裂の位置,範囲等について整理した。UT 結果からのき裂範囲等の推定結果を以下に整理 する。

① き裂範囲 x

き裂範囲 x の推定結果を表-2.3.3~5, 図-2.3.5~7 に示す。各図の(a)は 4 本の対象溶接継手 毎, (b)は応力条件が近似すると考えられる a, d と b, c の結果をそれぞれ平均したもの及び a~d の全結果を平均したものを示す。

	き裂範囲x(mm)								
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均		
D12U6	90.0	85.0	79.0	89.0	89.5	82.0	85.8		
D12U8	99.0	80.0	74.0	69.0	84.0	77.0	80.5		
D14U6	81.0	89.0	81.0	96.0	88.5	85.0	86.8		
D14U8	56.0	70.0	64.0	75.0	65.5	67.0	66.3		
D16U6	76.0	61.0	21.0	53.0	64.5	41.0	52.8		
D16U8	73.0	68.0	24.0	72.0	72.5	46.0	59.3		
D19U6	43.0	42.0	37.0	51.0	47.0	39.5	43.3		
D19U8	62.0	43.0	87.0	53.0	57.5	65.0	61.3		

表-2.3.3 き裂範囲 x の UT 推定結果(50 万回載荷時点)

表-2.3.4	き裂範囲 x の UT 推定結果	(100 万回載荷時点)

	き裂範囲x(mm)								
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均		
D12U6	90.0	85.0	87.0	89.0	89.5	86.0	87.8		
D12U8	110.0	90.0	96.0	85.0	97.5	93.0	95.3		
D14U6	85.0	92.0	85.0	119.0	102.0	88.5	95.3		
D14U8	109.0	98.0	97.0	87.0	98.0	97.5	97.8		
D16U6	88.0	81.0	70.0	78.0	83.0	75.5	79.3		
D16U8	84.0	87.0	76.0	90.0	87.0	81.5	84.3		
D19U6	74.0	59.0	52.0	71.0	72.5	55.5	64.0		
D19U8	77.0	45.0	87.0	68.0	72.5	66.0	69.3		

表-2.3.5 き裂範囲 x の UT 推定結果(200 万回載荷時点)

	き裂範囲x(mm)										
検査箇所		h		d	aとdの	bとcの	a∼dの				
	a	d	C	u	平均	平均	平均				
D12U6	97.0	92.0	92.0	96.0	96.5	92.0	94.3				
D12U8	110.0	101.0	123.0	96.0	103.0	112.0	107.5				
D14U6	94.0	105.0	99.0	120.0	107.0	102.0	104.5				
D14U8	123.0	107.0	97.0	100.0	111.5	102.0	106.8				
D16U6	99.0	83.0	76.0	84.0	91.5	79.5	85.5				
D16U8	99.0	97.0	96.0	109.0	104.0	96.5	100.3				
D19U6	99.0	68.0	73.0	88.0	93.5	70.5	82.0				
D19U8	80.0	59.0	103.0	82.0	81.0	81.0	81.0				



2-14

また,図-2.3.5~7 に示したき裂範囲 x の推定結果を,載荷回数毎に整理して推移を比較 したものを図-2.3.8 に示す。



図-2.3.8(1) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 x の値の変化



図-2.3.8(2) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 x の値の変化

以上,各ケースの溶接線毎にややばらつきがみられるものの,載荷回数に従ってき裂範囲 x は確実に大きくなっている。

デッキプレート厚が薄いケースほど,載荷回数 100 万回前後で,き裂範囲 x の拡大速度が やや鈍化している傾向がみられ,載荷回数 50 万回までに急速にき裂が進展していた可能性 があり,逆にデッキプレート板厚の大きい D19 や D16 では,試験を終了した 200 万回載荷 後も載荷を継続することで,引き続きき裂範囲 x が拡大した可能性があったものと考えられ る。

② き裂範囲 y

き裂範囲 y の推定結果を表-2.3.6~8, 図-2.3.9~11 に示す。各図の(a)は 4 本の対象溶接継 手毎,(b)は応力条件が近似すると考えられる a, d と b, c の結果をそれぞれ平均したもの 及び a~d の全結果を平均したものを示す。

		さ殺範囲y(mm)									
検査箇所	a	a b	c	d	aとdの	bとcの	a∼dの				
	J		0	ų	平均	平均	平均				
D12U6	3.3	3.0	1.5	2.5	2.9	2.3	2.6				
D12U8	5.3	5.5	4.0	4.1	4.7	4.8	4.7				
D14U6	6.0	6.0	8.0	5.5	5.8	7.0	6.4				
D14U8	7.9	6.0	5.6	8.0	8.0	5.8	6.9				
D16U6	7.0	7.0	4.4	6.5	6.8	5.7	6.2				
D16U8	2.7	5.4	3.9	0.5	1.6	4.7	3.1				
D19U6	5.6	7.3	5.4	4.8	5.2	6.4	5.8				
D19U8	5.6	5.7	5.0	4.7	5.2	5.4	5.3				

表-2.3.6 き裂範囲 y の UT 推定結果(50 万回載荷時点)

表-2.3.7 き裂範囲 y の UT 推定結果(100 万回載荷時点)

	き裂範囲y(mm)								
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均		
D12U6	7.4	9.5	8.0	7.0	7.2	8.8	8.0		
D12U8	7.0	7.0	6.0	5.0	6.0	6.5	6.3		
D14U6	8.0	7.9	8.8	8.7	8.4	8.4	8.4		
D14U8	8.9	9.1	9.2	8.6	8.8	9.2	9.0		
D16U6	7.2	7.1	12.2	11.2	9.2	9.7	9.4		
D16U8	10.4	11.0	9.5	11.3	10.9	10.3	10.6		
D19U6	6.8	7.3	7.1	6.6	6.7	7.2	7.0		
D19U8	8.1	7.8	7.1	7.3	7.7	7.5	7.6		

表-2.3.8 き裂範囲 y の UT 推定結果(200 万回載荷時点)

		き裂範囲y(mm)									
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均				
D12U6	7.4	9.5	8.0	7.5	7.5	8.8	8.1				
D12U8	8.4	8.6	7.8	7.4	7.9	8.2	8.1				
D14U6	9.5	10.0	12.6	9.9	9.7	11.3	10.5				
D14U8	11.7	11.8	11.0	11.9	11.8	11.4	11.6				
D16U6	13.7	17.0	16.3	16.5	15.1	16.7	15.9				
D16U8	12.1	12.7	12.5	12.0	12.1	12.6	12.3				
D19U6	10.3	9.7	9.0	10.2	10.3	9.4	9.8				
D19U8	9.2	8.1	9.3	9.1	9.2	8.7	8.9				





また,図-2.3.9~11 に示したき裂範囲 yの推定結果を,載荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.12 に示す。

図-2.3.12(1) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 y の値の変化



図-2.3.12(2) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 y の値の変化

各載荷段階においてデッキプレート板厚やトラフリブ板厚に対する傾向は明確でない。載 荷回数 200 万回時点で D16U6 のケースが突出して大きなき裂範囲 y を示したことは他のケ ースと異なる特異な現象であった可能性も否定できないが, 200 万回載荷時点で D16U6 の a ~d の全ての溶接線で同様の値となっており応力状態や変形特性などとの関係により再現 性のある現象である可能性もある。200 万回載荷時点でのき裂範囲 y の大きさは、D16→D14 →D19→D12 の順に大きくなっており板厚の組み合わせとの相関関係については明確にで きていない。

載荷回数毎のき裂範囲 y の進展状況からは、デッキプレート板厚が小さいものほど、載荷回数 100 万回前後での進展速度の鈍化が顕著なものがやや多くみられる。

③ き裂範囲 z

き裂範囲 z の推定結果を表-2.3.9~11,図-2.3.13~15 に示す。

なお,UTではき裂までの距離を測定して推定しており、「き裂範囲 z」はデッキプレート 板厚からき裂までの推定距離を引いて算出したものである。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎,(b)は応力条件が近似すると考えられるa,dとb,cの結果をそれぞれ平均したものおよびa~dの全結果を平均したものを示す。

表-2.3.9	き裂範囲 z 0)UT 推定結果	(50 万回載荷時点)
~ ~			

	き裂範囲z(mm)							き裂までの距離(UT実測)(mm)							
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	min
D12U6	9.1	9.1	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9
D12U8	8.2	7.2	7.7	7.0	7.6	7.5	7.5	3.8	4.8	4.3	5.0	4.4	4.6	4.5	3.8
D14U6	8.9	9.2	8.9	9.7	9.3	9.1	9.2	5.1	4.8	5.1	4.3	4.7	5.0	4.8	4.3
D14U8	7.8	8.0	7.4	6.0	6.9	7.7	7.3	6.2	6.0	6.6	8.0	7.1	6.3	6.7	6.0
D16U6	7.0	8.0	7.0	6.3	6.7	7.5	7.1	9.0	8.0	9.0	9.7	9.4	8.5	8.9	8.0
D16U8	10.0	10.9	5.7	10.8	10.4	8.3	9.4	6.0	5.1	10.3	5.2	5.6	7.7	6.7	5.1
D19U6	3.5	3.2	2.4	3.4	3.5	2.8	3.1	15.5	15.8	16.6	15.6	15.6	16.2	15.9	15.5
D19U8	2.7	1.8	2.1	2.6	2.7	2.0	2.3	16.3	17.2	16.9	16.4	16.4	17.1	16.7	16.3

表-2.3.10 き裂範囲 z の UT 推定結果(100 万回載荷時点)

		き裂範囲z(mm)						き裂までの距離(UT実測)(mm)							
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	min
D12U6	9.6	9.6	9.5	9.7	9.7	9.6	9.6	2.4	2.4	2.5	2.3	2.4	2.5	2.4	2.3
D12U8	9.6	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3
D14U6	11.1	11.1	11.0	11.2	11.2	11.1	11.1	2.9	2.9	3	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8
D14U8	10.4	10.3	10.3	10.5	10.5	10.3	10.4	3.6	3.7	3.7	3.5	3.6	3.7	3.6	3.5
D16U6	12.4	12.5	12.5	12.6	12.5	12.5	12.5	3.6	3.5	3.5	3.4	3.5	3.5	3.5	3.4
D16U8	11.5	11.6	9.6	11.8	11.7	10.6	11.1	4.5	4.4	6.4	4.2	4.4	5.4	4.9	4.2
D19U6	6.7	4.4	4.7	6.4	6.6	4.6	5.6	12.3	14.6	14.3	12.6	12.5	14.5	13.5	12.3
D19U8	4.4	3.7	4.0	6.0	5.2	3.9	4.5	14.6	15.3	15	13	13.8	15.2	14.5	13.0

表-2.3.11 き裂範囲 z の UT 推定結果(200 万回載荷時点)

	き裂範囲z(mm)							き裂までの距離(UT実測)(mm)							
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均	min
D12U6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
D12U8	10.6	10.5	10.1	10.2	10.4	10.3	10.4	1.4	1.5	1.9	1.8	1.6	1.7	1.7	1.4
D14U6	11.6	11.4	11.5	11.4	11.5	11.5	11.5	2.4	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.5	2.4
D14U8	11.2	11.2	11.1	11.1	11.2	11.2	11.2	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8
D16U6	13.5	13.5	13.4	13.4	13.5	13.5	13.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5
D16U8	12.4	12.8	11.8	12.7	12.6	12.3	12.4	3.6	3.2	4.2	3.3	3.5	3.7	3.6	3.2
D19U6	11.5	8.0	10.0	8.8	10.2	9.0	9.6	7.5	11	9	10.2	8.9	10.0	9.4	7.5
D19U8	8.2	5.5	8.5	9.4	8.8	7.0	7.9	10.8	13.5	10.5	9.6	10.2	12.0	11.1	9.6





また,図-2.3.13~15 に示したき裂範囲 z の推定結果を,載荷回数毎に整理して推移を比較 したものを図-2.3.16 に示す。

図-2.3.16(1) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 z の値の変化



(g) 継手部 a, b, c, dの値の平均図-2.3.16(2) UT 推定による載荷回数とき裂範囲 z の値の変化

D19のケースを除き載荷回数が増えるにつれて溶接線毎の差は小さくなり載荷回数 200 万回時点ではほぼ一致する。

デッキプレート板厚 16mm 以下では,載荷回数 50 万回時点で 5mm 以上デッキ貫通方向 にき裂が進展しており,100 万回以降はそれ以前よりき裂進展速度が鈍化する傾向がみられ る。一方,D19 では 50 万回時点ではき裂は概ね 3mm 以下と推定され,100 万回までは他ケ ースに比べてき裂範囲に大きな差がみられる。また100 万回以降もき裂範囲 z は顕著に拡大 しており,200 万回以降も載荷を継続した場合にはさらに拡大が進んだものと推定される。

載荷回数 200 万回時点で D12 を除き同じデッキプレート厚ではトラフリブ板厚が大きい 方がき裂範囲は若干小さくなっており,き裂進展速度の抑制にトラフリブ板厚増が寄与する 可能性が示唆される。ただし、デッキプレート板厚との関係は 200 万回時点では D16 が最 も値が大きいなどき裂範囲zの絶対値との傾向は明確でない。

④ 板厚欠損率

板厚欠損率の推定結果を表-2.3.12~14,図-2.3.17~19に示す。

板厚欠損率は,UT計測結果とデッキプレート板厚から求めた「き裂範囲 z」の値とデッ キプレート板厚の比であり,当該位置においてき裂によるデッキプレート板厚の欠損比率を 推定したものである。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎,(b)は応力条件が近似すると考えられるa,dとb,cの結果をそれぞれ平均したものおよびa~dの全結果を平均したものを示す。

		板厚欠損率(%)										
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均					
D12U6	75.8	75.8	75.0	75.8	75.8	75.4	75.6					
D12U8	68.3	60.0	64.2	58.3	63.3	62.1	62.7					
D14U6	63.6	65.7	63.6	69.3	66.4	64.6	65.5					
D14U8	55.7	57.1	52.9	42.9	49.3	55.0	52.1					
D16U6	43.8	50.0	43.8	39.4	41.6	46.9	44.2					
D16U8	62.5	68.1	35.6	67.5	65.0	51.9	58.4					
D19U6	18.4	16.8	12.6	17.9	18.2	14.7	16.4					
D19U8	14.2	9.5	11.1	13.7	13.9	10.3	12.1					

表-2.3.12 UT 推定結果から算出した板厚欠損率(50 万回載荷時点)

表-2.3.13	UT 推定結果から算出した板厚欠損率	(100 万回載荷時点)

		板厚欠損率(%)											
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均						
D12U6	80.0	80.0	79.2	80.8	80.4	79.6	80.0						
D12U8	80.0	80.0	80.8	80.8	80.4	80.4	80.4						
D14U6	79.3	79.3	78.6	80.0	79.6	78.9	79.3						
D14U8	74.3	73.6	73.6	75.0	74.6	73.6	74.1						
D16U6	77.5	78.1	78.1	78.8	78.1	78.1	78.1						
D16U8	71.9	72.5	60.0	73.8	72.8	66.3	69.5						
D19U6	35.3	23.2	24.7	33.7	34.5	23.9	29.2						
D19U8	23.2	19.5	21.1	31.6	27.4	20.3	23.8						

表-2.3.14 UT 推定結果から算出した板厚欠損率(200 万回載荷時点)

		板厚欠損率(%)											
検査箇所		h		4	aとdの	bとcの	a∼dの						
	a	a	C	a	平均	平均	平均						
D12U6	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8						
D12U8	88.3	87.5	84.2	85.0	86.7	85.8	86.3						
D14U6	82.9	81.4	82.1	81.4	82.1	81.8	82.0						
D14U8	80.0	80.0	79.3	79.3	79.6	79.6	79.6						
D16U6	84.4	84.4	83.8	83.8	84.1	84.1	84.1						
D16U8	77.5	80.0	73.8	79.4	78.4	76.9	77.7						
D19U6	60.5	42.1	52.6	46.3	53.4	47.4	50.4						
D19U8	43.2	28.9	44.7	49.5	46.3	36.8	41.6						



\$

Д

D19U6 D19U8

30

20

10

0

D12U6 D12U8 D14U8

(a)

D14U6

図-2.3.18

D16U6 D16U8 30

20

10

0

UT 推定結果から算出した板厚欠損率(100 万回載荷時点)

D12U6 D12U8

○aとdの平均

∆bとcの平均

~d の平均

D14U6 D14U8 D16U6 D16U8 D19U6 D19U8

(b)



図-2.3.19 UT 推定結果から算出した板厚欠損率(200 万回載荷時点)

また,図-2.3.17~19に示した板厚の欠損率の推計結果を,載荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.20に示す。



図-2.3.20(1) UT 推定による載荷回数と板厚欠損率の変化



(g) 継手部 a, b, c, dの値の平均 図-2.3.20(2) UT 推定による載荷回数と板厚欠損率の変化

き裂範囲 z をデッキプレート板厚で無次元化した板厚欠損率は, 載荷回数に依らず総じて デッキプレート板厚が大きいほど小さくなる傾向がみられ, デッキプレートの板厚増による デッキプレート貫通きれつの進展抑制効果が認められる。特に D19 では他のケースに比べ て板厚欠損率は著しく小さい。

D19以外のケースでは載荷回数 100 万回時点ですでに板厚の欠損率が 70%程度以上に達 しており、デッキプレート貫通に至る直前の段階といえる。また載荷回数 100 万回以降はそ れ以前と比較して板厚欠損率の増加は小さく、デッキプレート貫通に至る前段階で載荷回数 に対するき裂進展速度が鈍化する傾向が認められる。

⑤ き裂の道のりL

き裂の道のりLの推定結果を表-2.3.15~17, 図-2.3.21~23 に示す。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎,(b)は応力条件が近似すると考えられるa,dとb,cの結果をそれぞれ平均したものおよびa~dの全結果を平均したものを示す。

长大学家		き裂の道のりL(mm)										
検査箇所	а	b	С	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均					
D12U6	9.7	9.6	9.1	9.4	9.6	9.4	9.5					
D12U8	9.8	9.1	8.7	8.1	8.9	8.9	8.9					
D14U6	10.7	11.0	12.0	11.2	10.9	11.5	11.2					
D14U8	11.1	10.0	9.3	10.0	10.6	9.6	10.1					
D16U6	9.9	10.6	8.3	9.1	9.5	9.4	9.5					
D16U8	10.4	12.2	6.9	10.8	10.6	9.5	10.1					
D19U6	6.6	8.0	5.9	5.9	6.2	6.9	6.6					
D19U8	6.2	6.0	5.4	5.4	5.8	5.7	5.7					

表-2.3.15 UT 推定結果から算出したき裂の道のりL(50 万回載荷時点)

表-2.3.16 UT 推定結果から算出したき裂の道のりL(100 万回載荷時点)

		き裂の道のりL(mm)										
検査箇所	а	b	с	d	aとdの	bとcの 亚物	a∼dの ₩₩					
					千均	十均	十均					
D12U6	12.1	13.5	12.4	12.0	12.0	13.0	12.5					
D12U8	11.9	11.9	11.4	10.9	11.4	11.6	11.5					
D14U6	13.7	13.6	14.1	14.2	13.9	13.9	13.9					
D14U8	13.7	13.7	13.8	13.6	13.6	13.8	13.7					
D16U6	14.3	14.4	17.5	16.9	15.6	15.9	15.8					
D16U8	15.5	16.0	13.5	16.3	15.9	14.7	15.3					
D19U6	9.5	8.5	8.5	9.2	9.4	8.5	8.9					
D19U8	9.2	8.6	8.1	9.4	9.3	8.4	8.9					

表-2.3.17 UT 推定結果から算出したき裂の道のりL(200万回載荷時点)

		き裂の道のりL(mm)											
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均						
D12U6	12.2	13.6	12.6	12.3	12.2	13.1	12.7						
D12U8	13.5	13.6	12.8	12.6	13.1	13.2	13.1						
D14U6	15.0	15.2	17.1	15.1	15.0	16.1	15.6						
D14U8	16.2	16.3	15.6	16.3	16.2	15.9	16.1						
D16U6	19.2	21.7	21.1	21.3	20.2	21.4	20.8						
D16U8	17.3	18.0	17.2	17.5	17.4	17.6	17.5						
D19U6	15.4	12.6	13.5	13.5	14.5	13.0	13.7						
D19U8	12.3	9.8	12.6	13.1	12.7	11.2	11.9						



図-2.3.23 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (200 万回載荷時点)

また、図-2.3.21~23 に示したき裂の道のりLの推計結果を、載荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.24 に示す。



図-2.3.24(1) UT 推定による載荷回数とき裂の道のりLの変化



(g) 継手部 a, b, c, dの値の平均図 2.3.24(2) UT 推定による載荷回数とき裂の道のりLの変化

き裂の道のりLは,基本的に溶接ルート付近からデッキプレート上方に向かって斜めに 進展するき裂の進展長さを代表させるために定義した値である。そのためき裂範囲y,き裂 範囲zと進展の傾向やデッキプレート板厚,トラフリブ板厚との関係は概ね同様な傾向とな っている。

⑥ き裂の面積 A

き裂の面積 A の推定結果を表-2.3.18~20,図-2.3.25~27 に示す。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎、(b)は応力条件が近似すると考えられるa, dとb, cの結果をそれぞれ平均したものおよびa~dの全結果を平均したものを示す。

	き裂の面積A(mm ²)										
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均				
D12U6	435.6	407.2	360.4	420.0	427.8	383.8	405.8				
D12U8	483.3	362.4	321.0	279.9	381.6	341.7	361.7				
D14U6	434.7	488.8	484.7	535.2	485.0	486.7	485.8				
D14U8	310.9	350.0	297.0	375.0	342.9	323.5	333.2				
D16U6	376.2	324.2	86.8	239.9	308.0	205.5	256.8				
D16U8	378.1	413.6	82.9	389.2	383.6	248.2	315.9				
D19U6	142.0	167.4	109.3	150.0	146.0	138.4	142.2				
D19U8	192.7	128.5	235.9	142.3	167.5	182.2	174.9				

表-2.3.18 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (50 万回載荷時点)

表-2.3.19 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A(100 万回載荷時点)

	き裂の面積A(mm ²)								
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均		
D12U6	545.4	574.0	540.3	532.3	538.9	557.1	548.0		
D12U8	653.5	534.6	547.5	463.8	558.6	541.1	549.8		
D14U6	581.5	626.7	598.7	843.8	712.7	612.7	662.7		
D14U8	746.0	673.5	669.8	590.4	668.2	671.6	669.9		
D16U6	630.9	582.2	611.3	657.5	644.2	596.8	620.5		
D16U8	651.2	695.4	513.2	735.2	693.2	604.3	648.8		
D19U6	353.2	251.4	221.4	326.4	339.8	236.4	288.1		
D19U8	354.9	194.2	354.5	321.3	338.1	274.4	306.2		

表-2.3.20 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (200 万回載荷時点)

	き裂の面積A(mm ²)								
検査箇所	а	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均		
D12U6	591.7	624.6	578.4	588.5	590.1	601.5	595.8		
D12U8	743.9	685.4	784.8	604.9	674.4	735.1	704.7		
D14U6	704.7	796.1	844.4	905.9	805.3	820.3	812.8		
D14U8	996.1	870.4	757.9	813.7	904.9	814.2	859.5		
D16U6	952.1	900.9	801.8	892.7	922.4	851.4	886.9		
D16U8	857.6	874.5	825.1	952.3	904.9	849.8	877.4		
D19U6	764.2	427.5	491.1	592.7	678.5	459.3	568.9		
D19U8	493.0	288.8	648.9	536.4	514.7	468.8	491.8		





また,図-2.3.25~27 に示したき裂の面積 A の推計結果を,載荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.28 に示す。

図-2.3.28(1) UT 推定による載荷回数とき裂の面積 A の変化



(g) 継手部 a, b, c, dの値の平均図-2.3.28(2) UT 推定による載荷回数とき裂の面積 A の変化

載荷回数によらず各ケースともやや溶接線毎のばらつきがみられる。載荷回数 200 万回時 点では、D16 以下のケースではデッキプレート板厚が大きいほどき裂面積も大きくなってお り、D19 は他のケースに比べて顕著にき裂面積は小さい。き裂範囲 x と z の拡大傾向より D19 では載荷回数 200 万回以降の載荷継続によってき裂範囲はさらに拡大するものと考え られる。
以上より,一定荷重振幅の繰り返しによって,デッキプレート貫通方向に拡大するき裂は, はじめは比較的急速に拡大したのち,ある程度板厚欠損が進んだ段階からやや進展速度が鈍 化するような進展の特徴を有するものと考えられる。

そして, D16以下に比べて D19は, き裂の進展が顕著に抑制されており, 載荷回数 200 万回時点では板厚欠損率も他のケースに比べて小さく, 板厚欠損が進んだ段階以降に見られ るき裂速度の鈍化段階に至る前に実験を終了したものと考えられた。 UT 結果から推定されたき裂進展の状態を図化したものを図-2.3.29~36 に示す。なおき裂の範囲はき裂面積の推定方法と同様にき裂の道のり最大位置とき裂の範囲 x の両端を直線で結ぶ三角形状として図化した。



(c) 200 万回終了時

図-2.3.29 き裂の発生と進展の推定結果(D12U6)



(a) 50 万回終了時





















y-y' 矢視



(b) 100 万回終了時



(c) 200 万回終了時 図-2.3.30 き裂の発生と進展の推定結果(D12U8)



a部詳細

a部詳細











d部詳細





b部詳細



c部詳細

c部詳細















(c) 200 万回終了時 図-2.3.31 き裂の発生と進展の推定結果(D14U6)



c部詳細

64

3.0

x-x'矢視

126

d部詳細

75

x-x' 矢視

113



a部詳細

x-x'矢視

131



b部詳細

x-x'矢視

119

(b) 100 万回終了時



(c) 200 万回終了時図-2.3.32 き裂の発生と進展の推定結果(D14U8)



a部詳細

b部詳細









c部詳細











(b) 100 万回終了時



図-2.3.33 き裂の発生と進展の推定結果(D16U6)





x-x'矢視

130



*2

x-x'矢視









a部詳細



x-x'矢視

104

x-x'矢視

115

c部詳細

76









87

(b) 100 万回終了時



2.6

c部詳細





a部詳細

x-x'矢視

103

d部詳細

109

x-x'矢視







b部詳細





(c) 200 万回終了時

図-2.3.34 き裂の発生と進展の推定結果(D16U8)





b部詳細





x-x'矢視























c部詳細







b部詳細

68

5*



c部詳細

73





x-x'矢視

116

x-x'矢視

116

d部詳細

88

x-x'矢視

110











(c) 200 万回終了時 図-2.3.35 き裂の発生と進展の推定結果(D19U6)













b部詳細







10.5

15.0







a部詳細

******3

إير

14.6

x-x'矢視

y-y'矢視

10.8

105

a部詳細



7.8



15.3



7

c部詳細

9.3

4.6

c部詳細







y-y'矢視



(b) 100 万回終了時



y-y'矢視



13.0

9.6





d部詳細



a部詳細

x-x'矢視



















d部詳細

b部詳細

x-x'矢視

126

c部詳細

2.3.4 破面調查

疲労試験の途中段階での超音波探傷試験結果からのき裂進展状況の推定の妥当性の確認 とき裂の起点や進展の状況を確認するために,定点繰返し載荷を200万回終了後に,低温脆 性破壊させ破面の調査を行った。

破面調査は、図-2.3.37 に示すように供試体を切断したのち、き裂面が境界となるよう低 温で脆性破壊させた。

なお、本実験では載荷試験完了段階で全てのケースでき裂がデッキプレートとトラフリブ の縦方向溶接ルート付近からデッキプレート内部を上方に向かって進展していることが超 音波探傷試験で確認されていたが、き裂はデッキプレート上面までは進展していないことを 確認している。



図-2.3.37 供試体切り出し加工図

写真-2.3.1 及び2に実験後の破面の例とき裂面の位置のイメージを示す。本実験ではビー チマーク試験を行っていないため破面には載荷回数との関係を明確に示す特徴は現れてい ないが,き裂範囲の形状や表面の性状からは横リブ位置付近を起点として放射状にき裂範囲 が拡大したものと考えられる。



写真-2.3.1 破壊後の破面の例



写真-2.3.2 実験終了後の破面

写真-2.3.3 及び4に、D19U8の破面の例を示す。この例では複数のき裂が同時に発生拡大 していたことが疑われる。このように供試体によってはき裂の起点が必ずしも1箇所でない ケースが一部みられたが,き裂が一体化していない場合にはより大きいものを代表として整 理した。



写真-2.3.4 き裂の断面図

破壊後に暴露されたき裂面の観察とき裂範囲の寸法等の計測を行った。図-2.3.38 及び 39 にき裂範囲の計測方法の概要を示す。

デッキプレート下面位置から上方へのき裂高さ(Z),トラフリブ方向のき裂範囲寸法(X), デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接のルート位置からデッキプレート面方向にトラ フリブ軸と直交方向の進展長さ(Y)として各供試体の計測を行った。



図-2.3.38 き裂範囲の計測要領



図-2.3.39 計測要領 (D12U6a)

各供試体の a~d の 4 つの対象溶接線の全てについて破面観察結果から算出したき裂の範囲等について表-2.3.21~26 及び図-2.3.40~45 に示す。

	き裂範囲x(mm)										
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均				
D12U6	111.0	116.5	100.5	109.5	110.3	108.5	109.4				
D12U8	111.0	88.0	98.3	109.5	110.3	93.2	101.7				
D14U6	94.0	104.0	100.0	122.0	108.0	102.0	105.0				
D14U8	87.0	92.5	80.0	86.0	86.5	86.3	86.4				
D16U6	87.5	87.0	84.0	77.5	82.5	85.5	84.0				
D16U8	115.0	99.0	92.0	104.5	109.8	95.5	102.6				
D19U6	73.5	60.0	60.5	69.0	71.3	60.3	65.8				
D19U8	55.0	26.0	63.0	74.0	64.5	44.5	54.5				

表-2.3.21 破壊試験で特定したき裂範囲 x

表-2.3.22 破壊試験で特定したき裂範囲 y

	き裂範囲y(mm)									
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均			
D12U6	7.0	8.0	7.5	8.5	7.8	7.8	7.8			
D12U8	6.5	7.0	8.0	6.5	6.5	7.5	7.0			
D14U6	9.5	9.5	11.0	11.0	10.3	10.3	10.3			
D14U8	9.9	9.5	10.5	10.0	10.0	10.0	10.0			
D16U6	10.0	10.0	7.5	9.0	9.5	8.8	9.1			
D16U8	10.0	12.0	11.8	11.0	10.5	11.9	11.2			
D19U6	9.0	9.5	10.0	9.5	9.3	9.8	9.5			
D19U8	9.0	5.5	8.0	9.5	9.3	6.8	8.0			

表-2.3.23 破壊試験で特定したき裂範囲:	Z	
-------------------------	---	--

	き裂範囲z(mm)									
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均			
D12U6	10.0	10.3	10.0	10.3	10.2	10.2	10.2			
D12U8	10.3	9.5	10.0	9.8	10.1	9.8	9.9			
D14U6	11.1	11.1	11.1	11.2	11.2	11.1	11.1			
D14U8	11.0	11.0	11.0	11.3	11.2	11.0	11.1			
D16U6	12.1	11.8	10.8	11.2	11.7	11.3	11.5			
D16U8	12.6	12.5	12.0	13.0	12.8	12.3	12.5			
D19U6	10.8	8.7	9.5	11.0	10.9	9.1	10.0			
D19U8	8.0	5.5	9.0	10.0	9.0	7.3	8.1			

	板厚欠損率(%)										
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均				
D12U6	83.3	85.8	83.3	85.8	84.6	84.6	84.6				
D12U8	85.8	79.2	83.3	81.7	83.8	81.3	82.5				
D14U6	79.3	79.3	79.3	80.0	79.6	79.3	79.5				
D14U8	78.6	78.6	78.6	80.7	79.6	78.6	79.1				
D16U6	75.6	73.8	67.5	70.0	72.8	70.6	71.7				
D16U8	78.8	78.1	75.0	81.3	80.0	76.6	78.3				
D19U6	56.8	45.8	50.0	57.9	57.4	47.9	52.6				
D19U8	42.1	28.9	47.4	52.6	47.4	38.2	42.8				

表-2.3.24 破壊試験で特定したき裂範囲から算出した板厚欠損率

表-2.3.25 破壊試験で特定したき裂範囲から算出したき裂の道のりL

	き裂の道のりL(mm)									
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均			
D12U6	12.2	13.0	12.5	13.4	12.8	12.8	12.8			
D12U8	12.2	11.8	12.8	11.8	12.0	12.3	12.1			
D14U6	14.6	14.6	15.6	15.7	15.2	15.1	15.1			
D14U8	14.8	14.5	15.2	15.1	14.9	14.9	14.9			
D16U6	15.7	15.5	13.1	14.4	15.0	14.3	14.7			
D16U8	16.1	17.3	16.8	17.0	16.6	17.1	16.8			
D19U6	14.1	12.9	13.8	14.5	14.3	13.3	13.8			
D19U8	12.0	7.8	12.0	13.8	12.9	9.9	11.4			

表-2.3.26 破壊試験で特定したき裂範囲から求めたき裂の面積 A

	き裂の面積A(mm ²)									
検査箇所	а	b	с	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a~dの 平均			
D12U6	677.5	759.7	628.1	731.2	704.3	693.9	699.1			
D12U8	676.0	519.2	629.4	643.8	659.9	574.3	617.1			
D14U6	686.7	759.7	781.4	957.6	822.1	770.5	796.3			
D14U8	643.8	672.2	608.3	648.8	646.3	640.2	643.3			
D16U6	686.8	672.8	552.2	556.8	621.8	612.5	617.2			
D16U8	924.9	857.7	774.2	889.8	907.4	815.9	861.7			
D19U6	516.6	386.5	417.2	501.4	509.0	401.8	455.4			
D19U8	331.1	101.1	379.3	510.3	420.7	240.2	330.5			







2-52

2.3.5 破面観察結果と超音波探傷試験による推定結果の比較

200 万回の繰り返し載荷試験の終了直後に実施した超音波探傷試験からの推定き裂範囲 と試験後の破面観察で特定したき裂範囲の比較を行った。

その結果,超音波探傷試験からの推定結果と破面観察結果はほとんどのケースでよい一致 を示した。特にデッキプレート内部へのき裂進展深さ(z)については両者の結果はほぼ一 致しており,超音波探傷試験によってデッキプレート貫通き裂の板厚内部への高さ方向の進 展深さは精度よく推定できる可能性が高いことが示された。

表-2.3.27 及び 28 に a~d の対象継手の全平均結果でのき裂状態の UT 推定結果と破壊試験 結果の比較を示す。

図-2.3.46~51にこれらをグラフ化したものを示す。

ケース	UTからの推定 (200万回時点) く (a,b,c,dの平均)						破壊試験結果 (a,b,c,dの平均)				
	き裂範囲x	き裂範囲y	き裂範囲z	き裂の道の	き裂の面積	き裂範囲x	き裂範囲y	き裂範囲z	き裂の道の	き裂の面積	
	(mm)	(mm)	(mm)	りL(mm)	A(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm)	りL(mm)	A(mm ²)	
D12U6	94.3	8.1	9.7	12.7	595.8	109.4	7.8	10.1	12.8	698.0	
D12U8	107.5	8.1	10.4	13.1	704.7	101.7	7.0	9.9	12.1	615.9	
D14U6	104.5	10.5	11.5	15.6	812.8	105.0	10.3	11.1	15.1	796.3	
D14U8	106.8	11.6	11.2	16.1	859.5	86.4	10.0	11.1	14.9	642.9	
D16U6	85.5	15.9	13.5	20.8	886.9	84.0	9.1	11.5	14.7	617.2	
D16U8	100.3	12.3	12.4	17.5	877.4	102.6	11.2	12.5	16.8	861.7	
D19U6	82.0	9.8	9.6	13.7	568.9	65.8	9.5	10.0	13.8	455.4	
D19U8	81.0	8.9	7.9	11.9	491.8	54.5	8.0	8.1	11.4	330.5	

表-2.3.27 き裂状態の UT 推定結果と破壊試験結果の比較(1)

ケース	UT結果/破壊試験結果 (a,b,c,dの平均)									
	き裂範囲	き裂範囲	き裂範囲	き裂の道のり	き裂の面積					
	X	У	2	L	A					
D12U6	0.86	1.04	0.96	0.99	0.85					
D12U8	1.06	1.15	1.05	1.08	1.14					
D14U6	1.00	1.02	1.03	1.03	1.02					
D14U8	1.24	1.16	1.00	1.08	1.34					
D16U6	1.02	1.74	1.17	1.42	1.44					
D16U8	0.98	1.10	0.99	1.04	1.02					
D19U6	1.25	1.03	0.96	1.00	1.25					
D19U8	1.49	1.12	0.98	1.05	1.49					

表-2.3.28 き裂状態の UT 結果と破壊試験結果の比較(2)







図-2.3.47 UT 推定結果と破壊試験結果の比較(き裂範囲 y)









図-2.3.50 UT 推定結果と破壊試験結果の比較(き裂の面積 A)



図-2.3.51 UT 推定結果と破壊試験結果の比較

2.3.6 ひずみの計測結果

疲労試験の各途中段階で,き裂の発生・進展の検出とその影響による耐荷力機構など構造 系の変化を把握するために,静的載荷を行って各部のひずみを計測している。

図-2.3.52 にひずみゲージの貼付位置を示す。ひずみゲージは全て1軸ゲージで橋軸直角 方向の計測である。

ひずみ計測時の静的載荷では、一定荷重載荷に対する応答を把握するために、10kN、110kN の2ケースの載荷を行いそれぞれに対応するひずみを計測し、同じ載荷回数での10kN載荷 時と110kN載荷時のひずみの差(以下「ひずみ振幅」という。)を算出した。

なお,各ケース計測対象となるトラフリブとデッキプレートの縦溶接継手部が4箇所(a~d)あり,特記のない場合はa~dの平均値である。それぞれの継手に対応した位置の計測 結果の場合には図中等に記号で区別した。計測点①の場合の記号の例を図-2.3.53に示す。



図-2.3.54~57 に、各ケースで計測された代表的な位置のひずみ振幅の変化を示す。右側 のグラフは左側のグラフで線が混んでいるところを縦軸のレンジを変えて拡大したもので ある。



(a) D12U6



(b) D12U8図-2.3.54 ひずみ振幅の平均値の推移(D12)



(c) D14U6



(d) D14U8

図-2.3.55 ひずみ振幅の平均値の推移(D14)



(f) D16U8

図-2.3.56 ひずみ振幅の平均値の推移(D16)



(h) D19U8

図-2.3.57 ひずみ振幅の平均値の推移(D19)

いずれのゲージ位置の計測値も,デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせが異なっても変化の傾向は近似している。

特に②,⑤,⑨の位置のひずみゲージで計測されるひずみの値は、各ケース毎にほぼ同じ 時期に変化が現れることから、き裂の発生により載荷荷重に対する耐荷力機構に変化を生じ、 その結果として各部のひずみ応答が変化したことが反映されたものと考えられる。

また詳細には、②、⑤、⑨のひずみ変化が先行して、それが継続している中で少し遅れて ③のひずみゲージの変化がやや顕著になる傾向がみられる。

そのため③のひずみの変化傾向が変わる前後でき裂の進展方向や速度などの性状が変化 している可能性が疑われる。

トラフリブ板厚とデッキプレート厚さが異なる組み合わせとなっているにもかかわらず, 載荷開始から実験終了までの各計測位置のひずみゲージの変動の特徴は類似した傾向にあ る。

それらをまとめると概ね以下の通りである。

計測点①

ひずみ振幅の値は一貫して減少傾向である。

計測点②

ひずみ振幅は①と同様の変化傾向を示すが、絶対値が大きい。

計測点③

ひずみ振幅が一旦大きくなった後、減少する傾向を示す。

計測点⑤

途中まで③と類似の傾向を示し、D19を除いてひずみ振幅は0に漸近して安定する。

・計測点⑦

ひずみ振幅が一貫して減少する傾向を示す。ただしひずみ振幅の変化は相対的に値は小 さい。

計測点⑨

ひずみ振幅は徐々に減少するが、途中より変化速度が小さくなり安定する。

これらの各ゲージでのひずみ応答の変化とき裂の進展程度の関係をより明確にするために、各位置のゲージについて、ひずみ振幅と超音波探傷試験で推定した板厚の欠損率の関係を整理した。結果のグラフを図-2.3.58~67に示す。







2-64















2 - 71


以上の各ゲージ位置での結果でみられた主な特徴は次の通り

・ゲージ2

いずれのケースでも、ひずみの値の変化傾向は、UTによる推定板厚欠損率の変化傾向と 同様の傾向を示しており、デッキ板厚 19mm のケース (D19U6,D19U8)では、ひずみの値が 変化し始めた時期と、UTによって板厚欠損がほぼ確実と認識できる板厚欠損率 10%程度 となる時期はほぼ一致している。

また,デッキ板厚 12mm のケース (D12U6, D12U8)のケースでは,途中急激に変化して いたひずみが試験最終段階ではその変化が徐々に小さくなっているが,UTによる推定板厚 欠損率の変化の傾向の傾向もこれと一致している。

このように②のゲージで計測されるひずみの変化傾向は UT による推定板厚欠損率の変化と同調した傾向を示しており、き裂の進展程度と直接的な関係にあるものと考えられる。

また,デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせに依らず,き裂進展の傾向とそ れに対するひずみの変化傾向は同じとなることがわかる。

・ゲージ③

各ケースの変化から,き裂の進展に伴い,ひずみの値の変化傾向は一旦ひずみ振幅が拡大 したのち,急速に小さくなるが最終段階でもある程度のひずみ振幅が保持される。

このときひずみ振幅が最大となるのは D19, D16, D14 の結果から板厚欠損率が 30~50% 程度となった段階に対応しているものと推定される。

板厚が小さいケースほど,ひずみ振幅が一旦拡大する現象がより顕著に表れる傾向にある ものの,③のゲージで計測されるひずみの変化傾向もゲージ②の場合と同様に,ひずみの変 化とUTによる推定板厚欠損率の変化はデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせ に依らず同様の変化傾向を示すものと考えられ,き裂の進展程度を反映しているものと考え られる。

・ゲージ5

各ケースの変化から、き裂の進展に伴い、ひずみの値の変化傾向は一旦ひずみ振幅が拡大 したのち、急速に小さくなり最終的にはひずみ振幅は0に近づいていくものと推定される。

このときひずみ振幅が最大となるのは D19, D16, D14 の結果から板厚欠損率が 30~50% 程度となった段階に対応しているものと推定され,変化傾向が変わる時期はゲージ③でのひ ずみと一致しているものと考えられる。

なおゲージ③と異なり,板厚欠損率が大きくなるにつれてひずみ振幅はケースによらずゼロに近づく特徴があり,概ね板厚欠損率が80%程度にまで至るとひずみ振幅はほぼゼロとなるものと考えられる。

板厚が小さいケースほど,ひずみ振幅が一旦拡大する現象がより顕著に表れる傾向にある

ものの,③のゲージで計測されるひずみの変化傾向もゲージ②の場合と同様に,ひずみの変 化とUTによる推定板厚欠損率の変化はデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせ に依らず同様の変化傾向を示すものと考えられ,き裂の進展程度を反映しているものと考え られる。

・ゲージ9

各ケースでひずみ振幅の値は徐々に減少し、ゲージ②のひずみと丁度正負が反転したよう な変化の挙動を示す。

ゲージ②と同様に、デッキ板厚 19mm のケース (D19U6,D19U8)では、ひずみの値が変化 し始めた時期と、UT によって板厚欠損がほぼ確実と認識できる板厚欠損率 10%程度となる 時期がほぼ一致している。

また,デッキ板厚 12mm のケース (D12U6, D12U8)のケースでは,途中急激に変化して いたひずみが試験最終段階ではその変化が徐々に小さくなっているが,UT による推定板厚 欠損率の変化の傾向の傾向もこれと一致しており,この特徴もゲージ②と同様である。

このように⑨のゲージで計測されるひずみの変化傾向はゲージ②と同様にUTによる推 定板厚欠損率の変化と同調した傾向を示しており,き裂の進展程度と直接的な関係にあるも のと考えられる。

また、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせに依らず、き裂進展の傾向とそ れに対するひずみの変化傾向は同じとなることがわかる。

・ゲージ10

ゲージ⑩では、ひずみ振幅が他のゲージと比較して極めて小さいものの、デッキプレート 板厚 19mm 以外のいずれのケースでもひずみの値の変化傾向は、UTによる推定板厚欠損 率の変化傾向と同様の傾向を示しておりひずみが大きくなるほど板厚欠損率も大きくなる 傾向があることがわかる。一方デッキプレート板厚 19mm の場合では断面欠損 50%でも当 初と同じようなひずみ振幅を示すことがあり、他のケースとは若干異なっている。

以上のように、デッキプレートの板厚とトラフリブの板厚の組み合わせによらず、各ゲージ位置でのひずみ振幅の変化傾向と UT による板厚欠損率の変化傾向は一定の対応関係にあることがわかる。

そのためいずれのケースにおいても本疲労試験によるき裂の進展過程は同様であり, 亀裂 発生時期(載荷回数)と進展速度のみがデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに 応じて異なっていたものと推定される。

図-2.3.68 に, 全てのゲージについて UT による推定板厚欠損率とそのときのひずみ振幅の 関係を示す。





図-2.3.68(2) ひずみ振幅と板厚欠損率の関係(2)

ゲージ①,②,⑤,⑥,⑦,⑨ではそれぞれのケースについて比較的,板厚欠損率に応じて ひずみ振幅に変化が生じる関係が現れている。

そのうち、ゲージ①、②、⑥、⑦、⑨ではデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わ せによって、板厚欠損率に対応したひずみ振幅の値に差があり、デッキプレートとトラフリ ブいずれも板厚が大きいほどひずみ振幅が大きく、板厚欠損率が大きくなるにつれてその差 は小さくなるため欠損率の変化に対するひずみ振幅の値の変化は板厚が小さいものほど大 きくなる傾向が見られる。

一方,ゲージ⑤ではデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに依らず,板厚欠損率に対応するひずみ振幅の絶対値が近似する結果となっている。そして板厚欠損率が80% 程度までき裂が進展するとケースによらずひずみ振幅が現れなくなるものと推測され,ゲージ⑤の位置ではき裂の進展に伴う耐荷力機構の変化によって応力負担されなくなるものと 考えられる。 以上のように、デッキプレートの板厚とトラフリブの板厚の組み合わせによらず、同じ位 置で計測されるひずみ振幅の変化傾向は推定されたき裂の進展に程度に対応して概ね一致 したものとなる。このことから、各ケースともき裂進展過程は現象的にほぼ一致しているも のと考えられる。

次に, デッキプレートとトラフリブの板厚の異なる組み合わせに対して, ひずみ振幅の変 化の程度によって, 予測されるき裂進展のどの段階に至っているのかが推定可能かどうかと いう観点から, 繰り返し載荷による初期状態からのひずみ振幅の変化率と超音波探傷検査に よって推定した板厚欠損率の推移の対応関係を整理した。

結果を図-2.3.69~77 に示す。また板厚欠損率とひずみ振幅の初期状態からの変化率の対応関係を図-2.3.78 に示す。















2-83













(i) ゲージ⑨

図-2.3.78(2) ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の関係(2)

以上より、ゲージ①、②、⑤、⑥、⑦、⑨では、板厚欠損率と各ゲージの初期状態からの ひずみの変化率には強い相関が見られる。

特に、ゲージ①、②、⑤、⑨では、板厚欠損率が比較的小さい領域でも、板厚欠損率に応 じて初期状態からのひずみ変化率が明確に変化することから、デッキプレート貫通型き裂が 発生した後、比較的早い段階でき裂発生前との明確な差が確認できる可能性がある。

またゲージ①,②,③では初期状態では安定したある程度の規模のひずみ振幅が計測され、 かつ板厚欠損率が 50%を越える段階では、ひずみ振幅が初期状態の 50%程度に顕著に減少 することからき裂の進展状態の推定に有効な情報を与えうるものと考えられる。

一方,ゲージ⑤,⑥は,初期段階よりひずみ振幅の値が小さく,その値の低減程度から板 厚欠損の進展程度を特定することは困難が予想される。しかしゲージ⑤はひずみ振幅が板厚 欠損率が大きくなるとその値がゼロに近似したり初期と正負が逆転することから,これによ り鋼床版としての耐荷力機構に致命的な板厚欠損を生じているか否かの推定に有効と考え られる。 2.3.7 疲労試験結果のまとめ

デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせを変えて行った,鋼床版横リブ交差部 の部分供試体による定点疲労載荷試験により得られた主な結果は以下のとおり。

・デッキプレート板厚(12, 14, 16, 19mm)とトラフリブ板厚(6, 8mm)の範囲では, 板厚の組み合わせによらず本試験方法によって,デッキプレートとトラフリブの縦溶接継手 のルート部付近を起点として、デッキプレート内部をデッキプレート貫通方向に進展するき 裂が発生し,載荷回数とともに拡大した。

・載荷回数毎のUTによるき裂進展状況からは、載荷回数 50 万回において、デッキプレート板厚が小さい供試体では既にき裂が相当に進行した段階となっており、デッキプレート板厚が厚いケースではより初期段階となっている。また載荷を終了した 200 万回時点でデッキ プレート板厚が小さい供試体ではデッキプレート貫通直前段階までき裂が進行している一 方、デッキプレート板厚 19mm のケースではき裂拡大速度の鈍化前であり引き続き載荷を 継続することでさらにき裂の進展が生じたものと推定される。

・き裂範囲の拡大傾向は、板厚の組み合わせに依らず近似しており、総じて板厚が大きい組 み合わせほど同じ載荷回数段階におけるき裂進展程度が小さく、板厚増によるき裂進展抑制 効果(疲労耐久性向上効果)があるものと考えられる。なおデッキプレート板厚に比べてト ラフリブ板厚のき裂進展抑制効果は明確でなく、認められた場合もその程度は小さい。

・各ケースから,本試験で発生したデッキプレート貫通方向に進展するき裂では共通的に次のような特徴を有するものと考えられる。

- ・デッキプレート貫通に至るまで、き裂進展速度は一様ではなく、ある段階からそれ以前よりも鈍化する。
- ・鋼床版断面内のき裂進展方向は一様でなく、初期段階では傾きが小さく(き裂進展の比較的初期段階が計測されたと考えられる D19 からの推定),き裂範囲の拡大とともにやや上向きに進展方向が変わり,デッキプレートの板厚の80%程度が欠損した時点では、 起終点を結ぶ線が概ね40~60°程度の傾きとなる。

・デッキプレート表面からの超音波探傷試験によるき裂範囲の推定結果は破面観察結果とよい一致を示し、特にデッキプレート内部へのき裂進展深さ(z)の結果はほぼ一致した。
このことから、条件によっては超音波探傷試験によりデッキプレート貫通き裂による板厚
欠損の程度は精度よく推定できる可能性が高いと考えられる。

2.4 FEM 解析

2.4.1 解析条件

解析モデルは図-2.4.1に示すように、対称性を考慮した1/4モデルとし、8節点又は6節点 SOLID要素を用いてモデル化した。材料定数は使用材料の一般的な値を採用し、鋼材の弾性 係数を2.06×10⁵N/mm²、ポアソン比を0.3とし、載荷ゴムは弾性係数20×10⁵N/mm²、ポアソ ン比0.49の弾性体とした。なお、溶接部について詳細にモデル化するために、溶接脚長を6mm、 溶接ルート部の溶接溶け込み量をUリブ板厚の75%とした。拘束条件は、架台と下フランジ 接触部を鉛直方向に固定とした。荷重条件は、載荷ゴム表面(200×200mm)に圧力荷重 1.25N/mm²を載荷(一箇所当たり50kN)した。



図-2.4.1 デッキプレート-Uリブ溶接部近傍のメッシュ分割と着目要素

なお、本解析にはNX NASTRAN Ver5.0を用いた。

2.4.2 疲労試験開始前のひずみ計測結果と解析結果の比較

図-2.4.2 にデッキプレート下面 U リブ内の橋直方向ひずみ,表-2.4.1 に U リブ内中央のデ ッキプレート下面の鉛直変位(端部に対する中央部の相対変位)の実測値と解析結果の比 較を表す。解析では実際の溶接形状や初期不正等をモデル化していないことを考慮すれば, 実測値と解析結果は,ひずみ,変位ともに良く一致しており,解析モデルは妥当であると 考えられる。





図-2.4.2 デッキプレート下面 U リブ内の橋直方向ひずみ

表-2.4.1 Uリブ内中央のデッキプレート下面の鉛直変位

	解析	f結果	実験結果						
	鉛直変位	対D12U6		左側リブ		右側リブ			
	(mm)		変位	対D12U6	対解析結果	変位	対D12U6	対解析	
D12U6	-1.05	1.00	-1.20	1.00	1.14	-1.20	1.00	1.1	
D12U8	-1.02	0.97	-1.14	0.95	1.11	-1.15	0.96	1.1	
D14U6	-0.71	0.68	-0.75	0.62	1.05	-0.76	0.63	1.0	
D14U8	-0.70	0.67	-0.77	0.64	1.10	-0.76	0.64	1.0	
D16U6	-0.52	0.49	-0.53	0.44	1.03	-0.59	0.49	1.1	
D16U8	-0.51	0.48	-0.61	0.51	1.20	-0.58	0.48	1.1	
D19U6	-0.35	0.33	-0.40	0.34	1.16	-0.41	0.34	1.1	
D19U8	-0.34	0.33	-0.39	0.33	1.15	-0.36	0.30	1.0	



2.4.3 解析結果

表-2.4.2 に溶接ルート部の局部の橋軸直角方向応力と最小主応力,デッキプレート下面の Uリブ内部のUリブ板コバ部から 5mm 位置と 40mm 位置の橋軸直角方向ひずみの一覧を示 す。表中には D12U6 に対する値も示している。また,図-2.4.3 は縦軸に上記の 5mm 位置の ひずみ,横軸にルート部の最小主応力をとりグラフ化したものである。

表 2.4.2 解析結果一覧

r			0							
		t _{deck} (mm)	ルート部局部応力(N/mm ²)				5mm位置ひずみ(µ)		40mm位置ひずみ(μ)	
			橋直方向応力	D12U6基準	最小主応力	D12U6基準	橋直方向ひずみ	D12U6基準	橋直方向ひずみ	D12U6基準
左 (中央側)	D12U6	12	-1053.3	1.00	-1252.0	1.00	-1264.2	1.00	-348.1	1.00
	D14U6	14	-845.7	0.80	-1012.8	0.81	-927.7	0.73	-241.5	0.69
	D16U6	16	-696.7	0.66	-841.9	0.67	-698.7	0.55	-174.0	0.50
	D19U6	19	-541.6	0.51	-661.5	0.53	-485.8	0.38	-111.3	0.32
	D12U8	12	-893.0	0.85	-1099.2	0.88	-1247.4	0.99	-331.5	0.95
	D14U8	14	-726.4	0.69	-900.4	0.72	-906.3	0.72	-229.8	0.66
	D16U8	16	-601.3	0.57	-751.3	0.60	-696.6	0.55	-165.3	0.47
	D19U8	19	-470.5	0.45	-593.9	0.47	-487.5	0.39	-105.6	0.30
右 (外側)	D12U6	12	-1034.9	1.00	-1230.3	1.00	-1244.9	1.00	-344.0	0.99
	D14U6	14	-826.9	0.80	-990.3	0.80	-909.4	0.73	-236.9	0.68
	D16U6	16	-677.2	0.65	-818.4	0.67	-681.2	0.55	-168.8	0.48
	D19U6	19	-521.1	0.50	-636.4	0.52	-468.7	0.38	-105.5	0.30
	D12U8	12	-877.4	0.85	-1080.3	0.88	-1228.4	0.99	-326.8	0.94
	D14U8	14	-710.1	0.69	-880.4	0.72	-888.3	0.71	-224.8	0.65
	D16U8	16	-584.3	0.56	-730.2	0.59	-679.1	0.55	-160.0	0.46
	D19U8	19	-452.3	0.44	-571.1	0.46	-470.3	0.38	-99.8	0.29





図-2.4.3 内側 5mm 位置のひずみとルート部局部応力

以上より以下のことがいえる。

- ・左(中央側)の溶接部のほうが2%~4%程度、右(外側)よりも発生応力が高い。
- ・ルート部の局部応力は、デッキプレート厚・U リブ板厚ともに大きくなると発生応力が緩 和される。
- ・D12U6 モデルを基準とした値を比較すると、ルート部の橋直方向応力と最小主応力の比率はほぼ同じである。5mm 位置と 40mm 位置の橋直方向ひずみはルート部と比較してデッキプレート厚の変化に対してはやや感度が高く、U リブ板厚の変化に対しては鈍感である。

2.5 第2章のまとめ

第2章では、道路橋に一般的に用いられるU型のトラフリブ(U320-240)を用いた鋼床版で報告のあるデッキプレート貫通き裂に着目して、デッキプレートとトラフリブそれぞれの板厚拡大による疲労耐久性向上策について検討した。検討ではデッキプレート12mm~ 19mm、トラフリブ6mmと8mmについてそれらを組み合わせた条件に対して横リブ交差部を対象とした定点載荷疲労試験を実施した。

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 第2章で対象とした横リブ交差部の部分模型による定点載荷疲労試験では、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせにかかわらず、いずれもデッキプレート貫通に 至るものと考えられるき裂がトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手より発生し、 き裂進展の特徴は共通しているものと考えられる。
- (2) デッキプレートとトラフリブそれぞれの板厚の増加に伴い,き裂発生時期や進展速度 に違いがみられ,疲労耐久性は向上する傾向があるといえる。
- (3) このとき、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚ではデッキプレート板厚の方が疲労 耐久性に及ぼす影響はより支配的と考えられる。
- (4) (2)と(3)の FEM 解析による発生応力の傾向は実験と概ね整合する。