

フレーム疲労試験の検証

(一財) 自転車産業振興協会技術研究所

1. 目的

J I S 改正作業部会では、平成 2 5 年度より J I S D 9 3 0 1 と I S O 4 2 1 0 : 2 0 1 4 との整合化作業を実施してきた。この中で、現行 J I S におけるフレーム疲労試験の一つである耐振性試験は、振動周波数により結果が異なるという問題点があり、耐振性試験を廃止し、I S O 4 2 1 0 に規定された疲労試験(ペダル力による疲労試験、水平力による疲労試験、鉛直力による疲労試験)にてフレームの耐久性を評価する方向で検討してきた。

そこで、現状の自転車の適合性を把握するため、シティ車、折り畳み車などの異なるフレームを用いて、実走行、疲労試験、耐振性試験により検証したので、以下に報告する。

2. 供試品

供試品は、表 1 に示す異なるタイプのフレーム 4 種類で、市販品から任意に選択した。疲労試験及び耐振性試験時の応力測定については、J I S 改正作業部会の委員の協力を得て分担し実施した。

表 1 供試品

	フレームの形状	パイプ	ラグ		材質
			前ホーク	フレーム体	
A	U 形	1 本	有り	無し	鉄系合金
B	折り畳み車 H 形	1 本			鉄系合金
C	ダブルループ形	2 本			鉄系合金
D	ダイヤモンド形	2 本	無し		鉄系合金

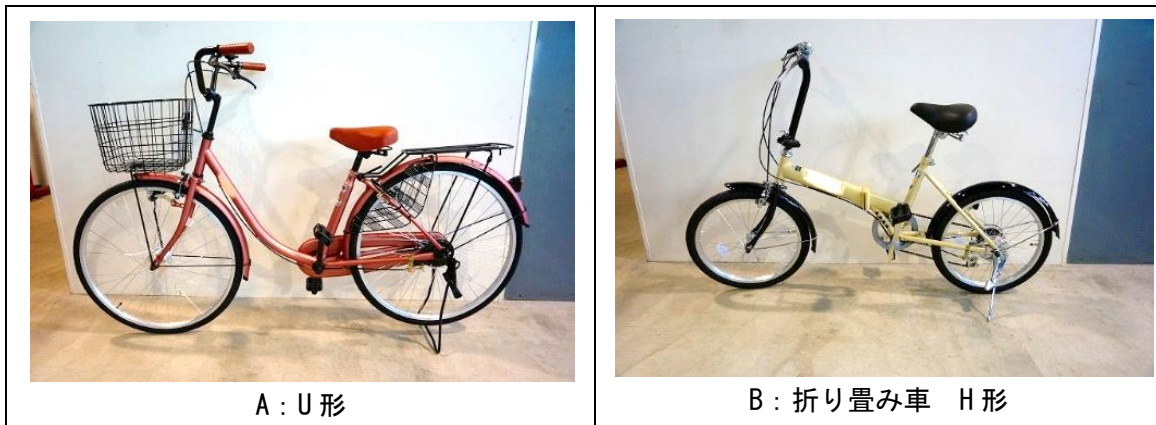
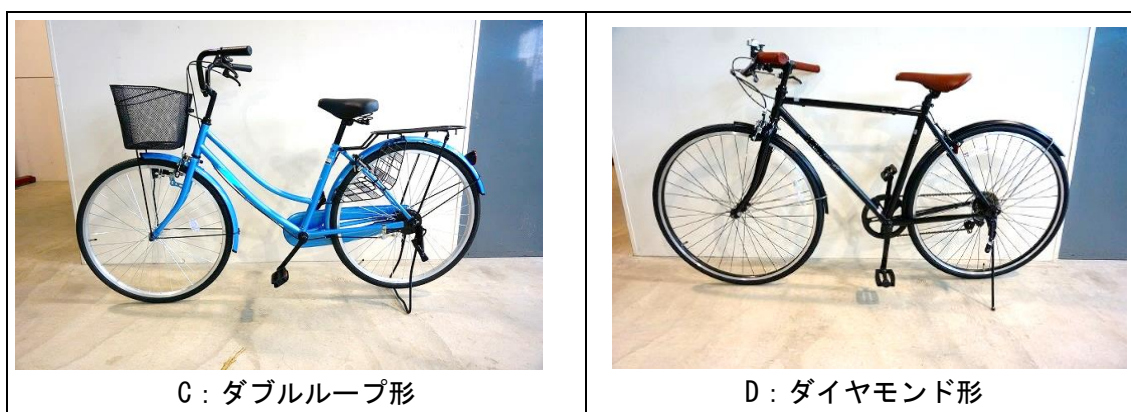


写真 1 供試品



C : ダブルループ形

D : ダイヤモンド形

写真 1 供試品 (続き)

表 2 供試品の仕様

	A	B	C	D
フレーム形状	U形	折り畳み車H形	ダブルループ形	ダイヤモンド形
製造国	中国	中国	中国	中国
価格(税込み)	14,800	17,800	11,664	19,980
質量(kg)	19.0	15.7	18.4	14.0
全長(mm)	1,774	1,520	1,800	1,706
幅(mm)	560	526	570	588
フレームサイズ(mm)	380	350	410	500
ホイールベース(mm)	1,070	1,000	1,080	1,020
パイプ外径(mm) 上パイプ又はメインパイプ	38.4	65、35.5 (楕円形)	25.4	25.4
下パイプ	-	-	32.4	28.6
立パイプ	38.3	34.2	34.2	32
肉厚(mm) 上パイプ又はメインパイプ	1.97	1.98	1.38	1.33
立パイプ	1.98	1.98	2.04	1.36
GD(最小、最大)(m)	3.9	2.4~4.75	4.7	3.5~7.0
タイヤの呼び	26-13/8	20×1.75	26-13/8	700×28C
タイヤ空気圧(推奨、最大)(kPa)	300	300	400-460	350-600
サドル高さ(最小、最大)(mm)	710~890	740~870	780~880	860~1010
立パイプ上端~サドル取付位置 までの距離(mm)	145	200	160	200
ブレーキ(前、後)	キャリパ、バンド	キャリパ、バンド	キャリパ、バンド	キャリパ、キャリパ
リヤキャリヤ 最大積載質量 (kg)	25※	-	27	-
前かご 最大積載質量(kg)	5	-	5	-

※ 実走行では27kg積載。

3. 試験順序

実走行及び各疲労試験、耐振性試験における応力測定を行った後、疲労試験を実施した。

4. 応力測定

応力は、フレームにひずみゲージを貼り付けて測定した。実走行時にフレームに発生する応力と ISO のペダル力による疲労試験（以下ペダル疲労という）、ISO の水平力による疲労試験（以下水平疲労という）、ISO の鉛直力による疲労試験（以下鉛直疲労という）及び耐振性試験時にフレームに発生する応力を比較した。

4. 1 応力測定位置

フレームの応力測定位置（ひずみゲージの貼り付け位置）を表 3 に示す。

表 3 応力測定位置

CH	A: U形	B: 折り畳み車H形	C: ダブルループ形	D: ダイヤモンド形
1	前ホーク足裏面			
2	メインパイプヘッド側上面		上パイプヘッド側上面	
3	メインパイプヘッド側下面		下パイプヘッド側下面	
4	立パイプハンガ側面			
5	立パイプのメインパイプとの接合部前面		立パイプの上パイプとの接合部前面	—
6	下パイプヘッド側ねじり	折り畳み部下面	立パイプハンガ後面	
7	立パイプシート側前面	折り畳み部側面	立パイプシート側前面	
8	前車輪軸上下加速度（実走行のみ）→ 応力データ整理の基準点の参考にするため使用（図 1 参照）			



写真 2 応力測定位置

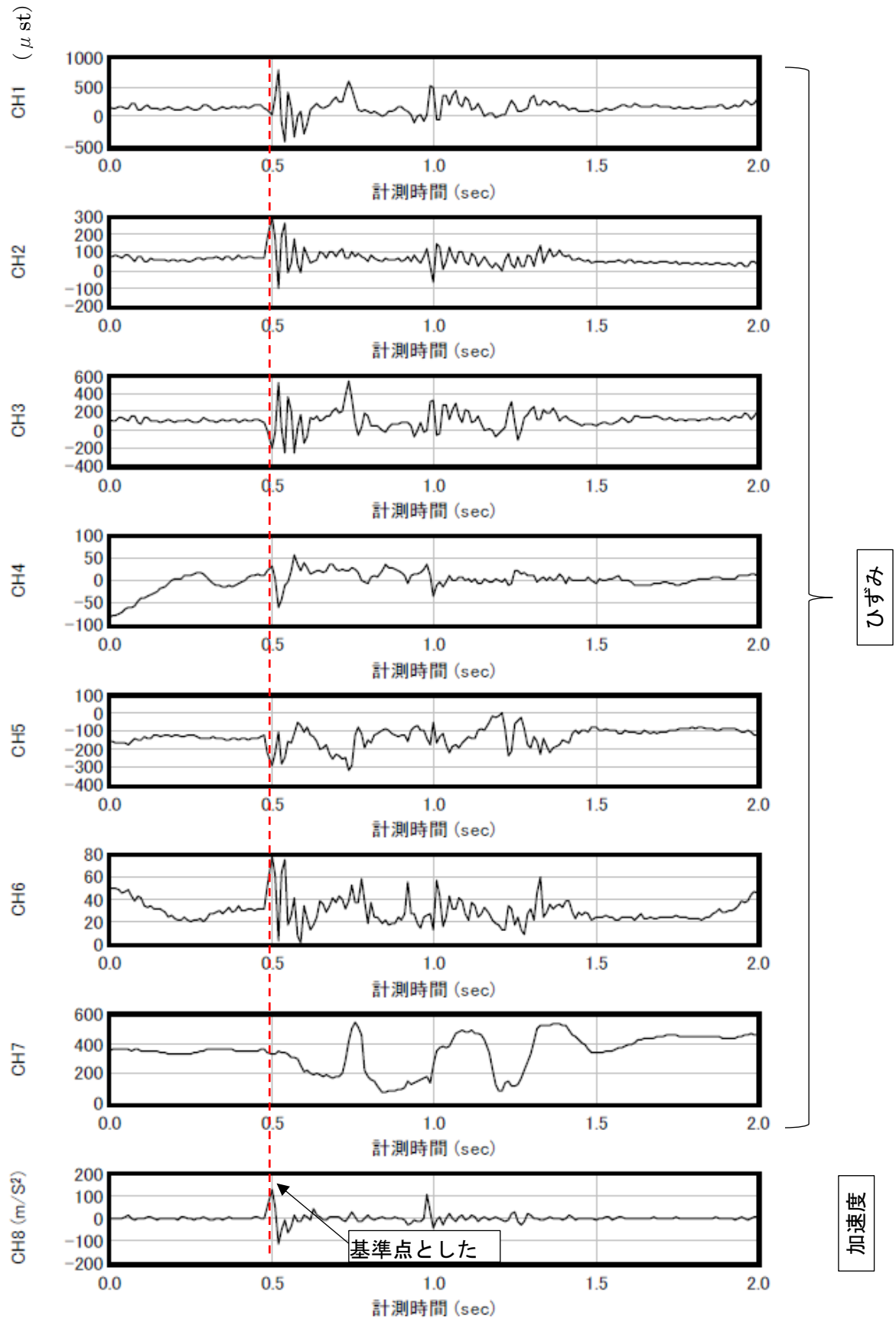





図1 時間-ひずみ線図例 (段差乗り上げ)

4. 2 実走行時の応力測定

表4に示す走行条件、積載条件、乗員条件により実走行時の応力を測定した。応力測定は、(株)東京測器研究所製データロガー（TMR-211）を使用し、乗員が乗車していない状態でひずみのゼロバランスを取った。

表4 実走行時の応力測定条件

●走行条件		写真3
段差乗り上げ	段差（高さ：40mmの板）を速度16km/hで走行。	
坂道登坂	傾斜路（傾斜角度：13°）を初速0km/hから立ちこぎで走行。	
急制動	傾斜路から下りてきて、速度16km/hで急制動する。	
棧	棧（幅：50mm、高さ：25mmの木片）を速度16km/hで走行。	
段差下り	歩道と車道の段差（高さ：100mm）を速度16km/hで走行。	
街中走行	堺市内を走行（走行距離：11.5km、平均速度：15km/h）。	
●積載条件	ダブルループ形、U形については、前かご（5kg）+リヤキャリア（27kg）におもりを積載した条件でも測定。	
●乗員条件	2名（乗員A：体重66kg、乗員B：88.5kg）	

4. 3 疲労試験時の応力測定

表5-1にフレーム疲労試験方法を、表5-2に応力測定条件を示す。応力測定は、a→b→c→dの順に実施した。疲労試験は試験力2条件、耐振性試験は油圧加振機で周波数を数段階測定（共振周波数を除く）した。全試験で通常の前ホークを使用し、繰返し数100回分の応力を測定した。

表5-1 フレーム疲労試験方法

<p>a) ペダル疲労 クランク下げ角が45°で固定し、左右のペダル軸に交互に繰り返し力を負荷する。</p>	
<p>b) 水平疲労 後つめを後ハブ軸に固定し、前ホークつめに対し、前後方向に動的な水平力を負荷する。</p>	
<p>c) 鉛直疲労 後つめを後ハブ軸に固定し、ローラを前ハブ軸に取り付ける。シートポスト形ジグの交点から後方70mmの位置に、垂直下向きの動的な力を負荷する。</p>	
<p>d) 耐振性試験 ダイヤモンド形はヘッド部5kg、シート部50kg、ハンガ部20kgのおもりを取り付け、加振部の加速度19.6m/s^2（ダイヤモンド形以外はヘッド部5kg、シート部45kg、ハンガ部15kg、加振部の加速度17.6m/s^2）で前車軸部を上下方向に加振する。</p>	

表 5 - 2 疲労試験時の応力測定条件

	試験方法	試験力 (N)		周波数 (Hz)
a	ペダル疲労	1,000 (ISO のシティ車条件)	850 (現行 JIS 条件)	2.0 以下 ※
b	水平疲労	±450 (ISO のシティ車条件)	±600 (ISO のレーシング車条件)	2.0 以下 ※
c	鉛直疲労	1,000 (ISO のシティ車条件)	1,200 (ISO のレーシング車条件)	2.0 以下 ※
d	耐振性試験	—		5、6.6、7.5、 9、10.5、12

※ 技研では、周波数 1.25Hz で測定した。

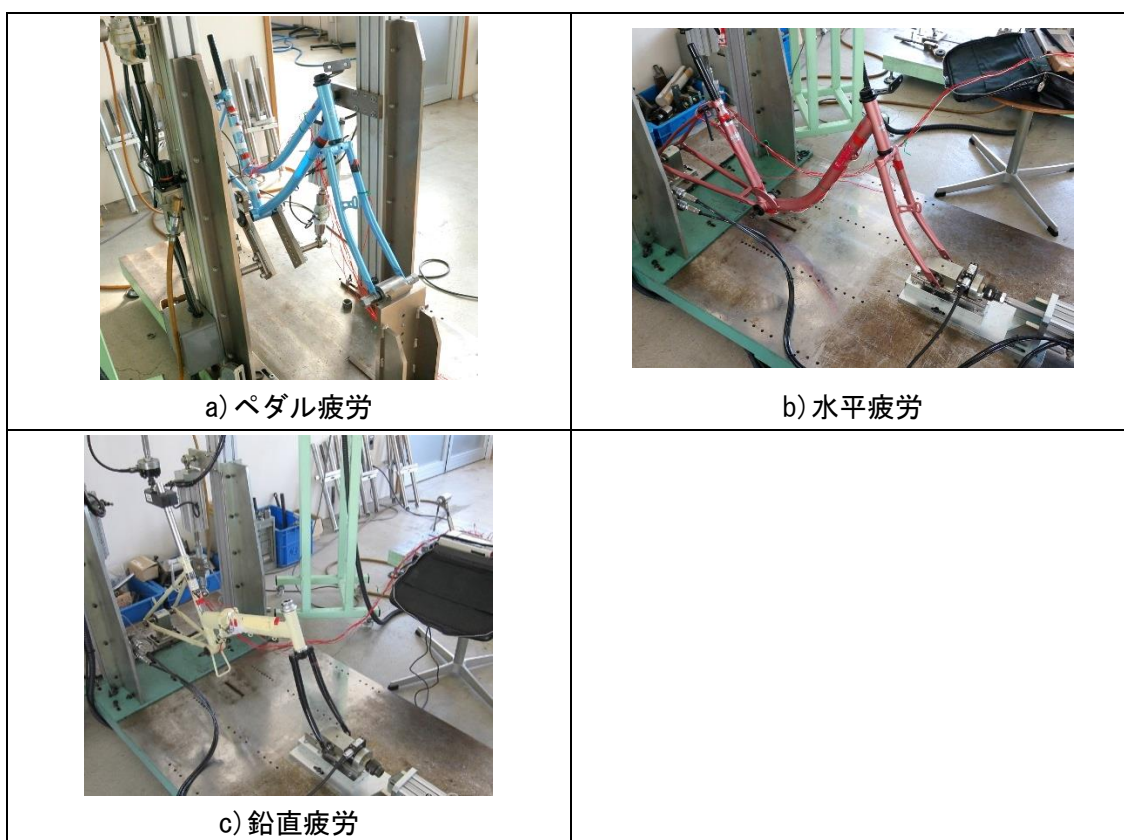
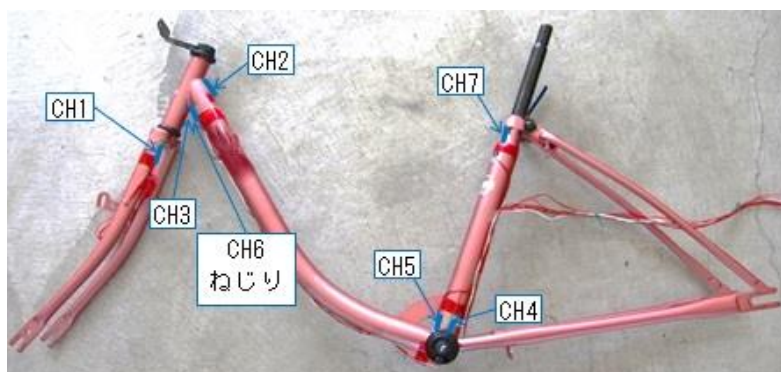


写真 4 応力測定状況

5. 応力測定結果

フレームに発生する応力値は、レインフロー法による最大応力振幅で表す。応力値は、縦弾性係数：206,000N/mm²で計算した。表 6～9 に結果を示す。最大応力が 10N/mm² 以下のものについては最大応力振幅を計算せず、『≤10N/mm²』と記述した。また、ISO の疲労試験の条件を青色で、共振周波数に近い最大応力の数値が大きいと判断したものを赤色で示した。

表6 A:U形 最大応力振幅(レインフロー法)



		最大応力振幅 (N/mm ²)						
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
段差 乗り上げ	乗員A	85.5	35.0	64.9	≤10	11.3	13.4	56.7
	乗員B	95.8	44.3	81.4	≤10	16.5	16.5	48.4
	乗員A+おもり	79.3	28.8	59.7	≤10	21.6	≤10	50.5
	乗員B+おもり	127.7	46.4	85.5	21.6	18.5	12.4	61.8
坂道 登板	乗員A	37.1	18.5	28.8	13.4	20.6	29.9	36.1
	乗員B	49.4	18.5	36.1	18.5	27.8	37.1	58.7
	乗員A+おもり	41.2	20.6	36.1	17.5	15.5	30.9	≤10
	乗員B+おもり	58.7	26.8	51.5	26.8	20.6	40.2	13.4
急制動	乗員A	67.0	25.8	44.3	≤10	≤10	≤10	24.7
	乗員B	55.6	24.7	40.2	≤10	≤10	≤10	73.1
	乗員A+おもり	51.5	16.5	29.9	≤10	≤10	≤10	15.5
	乗員B+おもり	46.4	20.6	36.1	15.5	≤10	13.4	56.7
棧	乗員A	84.5	27.8	50.5	17.5	13.4	29.9	29.9
	乗員B	89.6	31.9	54.6	20.6	17.5	33.0	89.6
	乗員A+おもり	89.6	29.9	57.7	21.6	21.6	20.6	35.0
	乗員B+おもり	84.5	30.9	54.6	28.8	18.5	15.5	46.4
段差 下り	乗員A	83.4	39.1	69.0	≤10	17.5	15.5	47.4
	乗員B	107.1	44.3	79.3	≤10	17.5	24.7	52.5
	乗員A+おもり	60.8	26.8	49.4	12.4	28.8	12.4	34.0
	乗員B+おもり	76.2	20.6	49.4	20.6	22.7	11.3	43.3
街中 走行 11.5km	乗員A	95.8	44.3	85.5	24.7	22.7	26.8	91.7
	乗員B	116.4	50.5	93.7	31.9	22.7	19.6	107.1
ペダル 疲労	850N	88.6	22.7	42.2	11.3	21.6	36.1	11.3
	1000N	105.1	28.8	57.7	12.4	24.7	41.2	13.4
水平 疲労	450N	128.8	44.3	80.3	≤10	≤10	≤10	≤10
	600N	172.0	59.7	106.1	≤10	≤10	14.4	≤10
鉛直 疲労	1000N	19.6	≤10	13.4	≤10	≤10	≤10	43.3
	1200N	22.7	≤10	16.5	≤10	≤10	≤10	61.8
耐振性 試験	5.0Hz	62.8	23.7	43.3	≤10	20.6	≤10	17.5
	6.6Hz	86.5	30.9	58.7	≤10	26.8	≤10	18.5
	7.5Hz	116.4	42.2	78.3	≤10	42.2	16.5	50.5
	9.0Hz	※	※	※	※	※	※	※
	10.5Hz	158.6	62.8	118.5	16.5	58.7	17.5	77.3
	12.0Hz	74.2	29.9	54.6	≤10	25.8	≤10	19.6

※: 共振のため測定不能

表6 A:U形 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

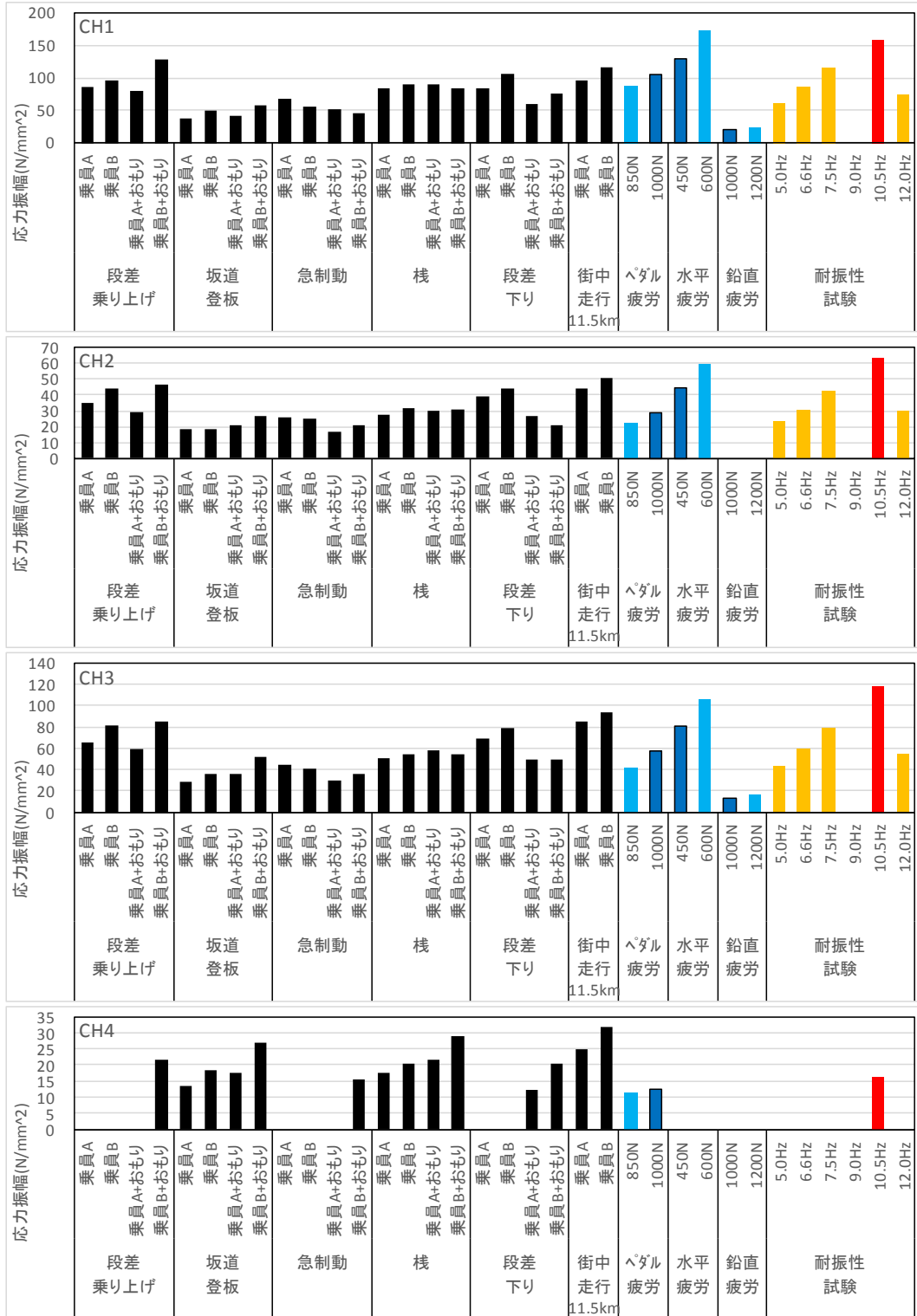


表6 A:U形 最大応力振幅(レインフロー法)(続き)

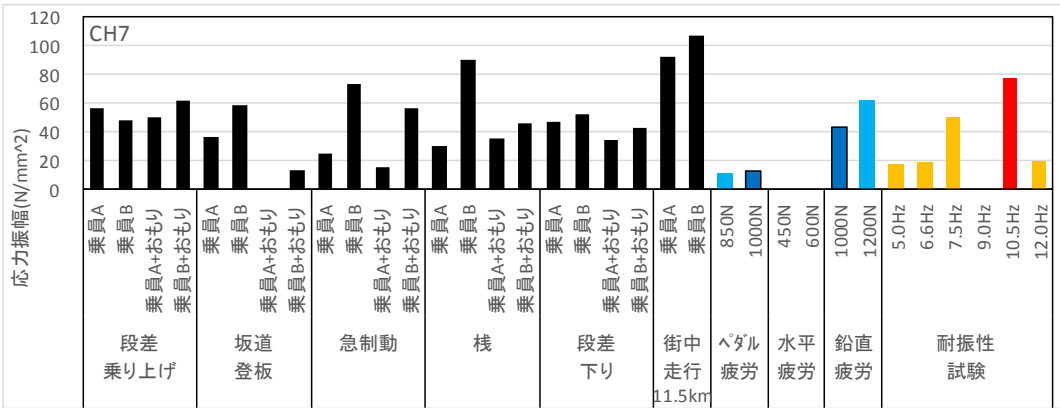
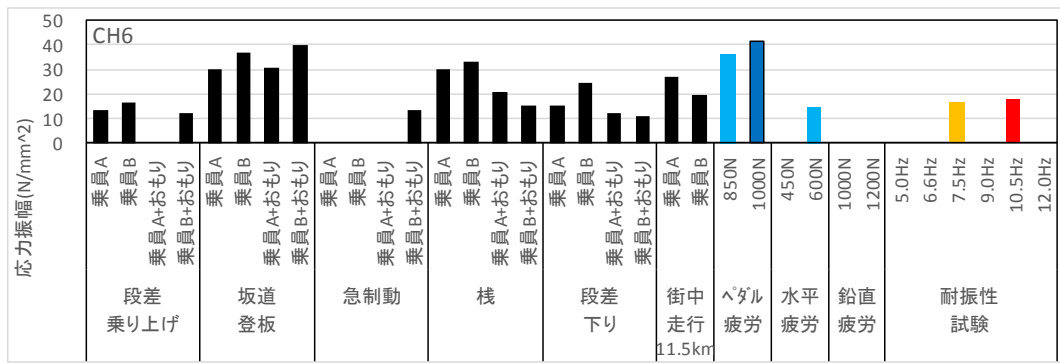
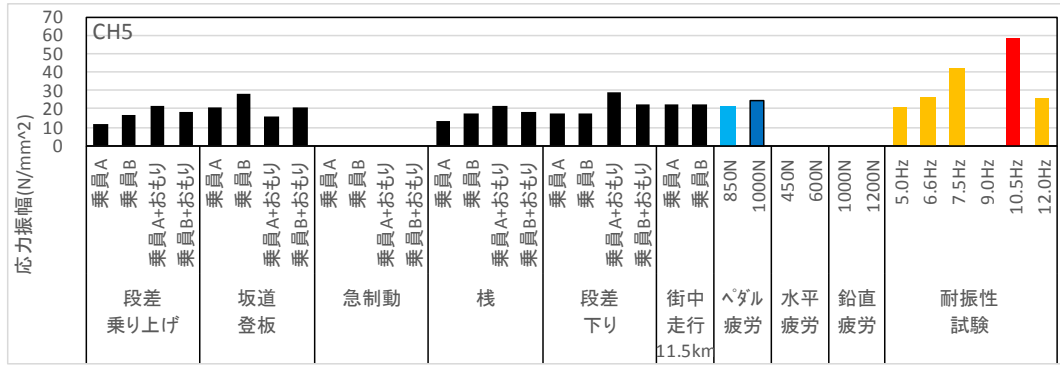
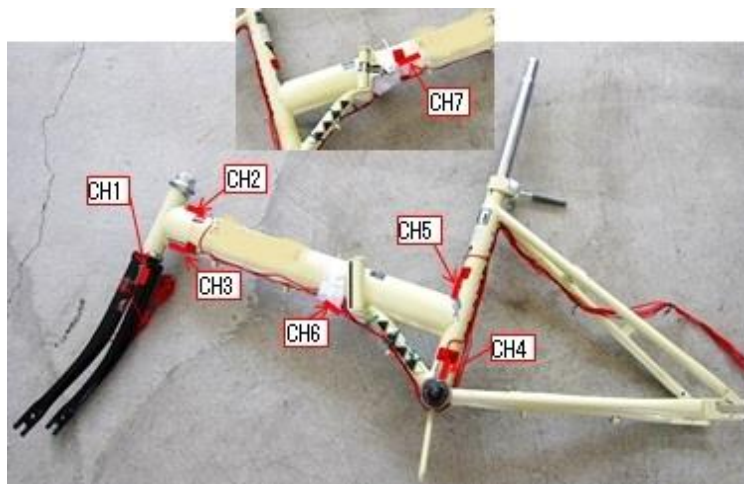


表7 B:折り畳み車 最大応力振幅(レインフロー法)



最大応力振幅 (N/mm²)

		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
段差 乗り上げ	乗員A	77.3	20.6	22.7	≤10	38.1	17.5	≤10
	乗員B	78.3	20.6	22.7	≤10	47.4	14.4	12.4
坂道 登板	乗員A	23.7	12.4	≤10	51.5	28.8	≤10	28.8
	乗員B	39.1	14.4	18.5	51.5	71.1	18.5	19.6
急制動	乗員A	62.8	19.6	21.6	≤10	16.5	12.4	≤10
	乗員B	50.5	20.6	22.7	≤10	22.7	≤10	≤10
棧	乗員A	71.1	20.6	21.6	28.8	48.4	15.5	≤10
	乗員B	90.6	19.6	21.6	34.0	51.5	16.5	12.4
段差 下り	乗員A	52.5	23.7	25.8	≤10	38.1	15.5	11.3
	乗員B	54.6	34.0	36.1	22.7	63.9	21.6	14.4
街中 走行 11.5km	乗員A	70.0	29.9	34.0	39.1	69.0	24.7	19.6
	乗員B	71.1	26.8	28.8	44.3	72.1	23.7	17.5
ペダル 疲労	850N	80.3	16.5	19.6	48.4	51.5	18.5	18.5
	1000N	106.1	21.6	24.7	56.7	60.8	22.7	21.6
水平 疲労	450N	100.9	23.7	29.9	≤10	≤10	15.5	≤10
	600N	133.9	30.9	39.1	≤10	≤10	20.6	≤10
垂直 疲労	1000N	≤10	≤10	≤10	≤10	14.4	≤10	≤10
	1200N	≤10	≤10	≤10	≤10	17.5	≤10	≤10
耐振性 試験	5.0Hz	52.5	13.4	16.5	≤10	59.7	17.5	≤10
	6.6Hz	52.5	13.4	16.5	≤10	57.7	18.5	≤10
	7.5Hz	58.7	14.4	17.5	≤10	65.9	18.5	11.3
	9.0Hz	65.9	16.5	20.6	≤10	77.3	22.7	13.4
	10.5Hz	94.8	23.7	28.8	≤10	97.9	30.9	14.4
	12.0Hz	※	※	※	※	※	※	※

表7 B: 折り畳み車 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

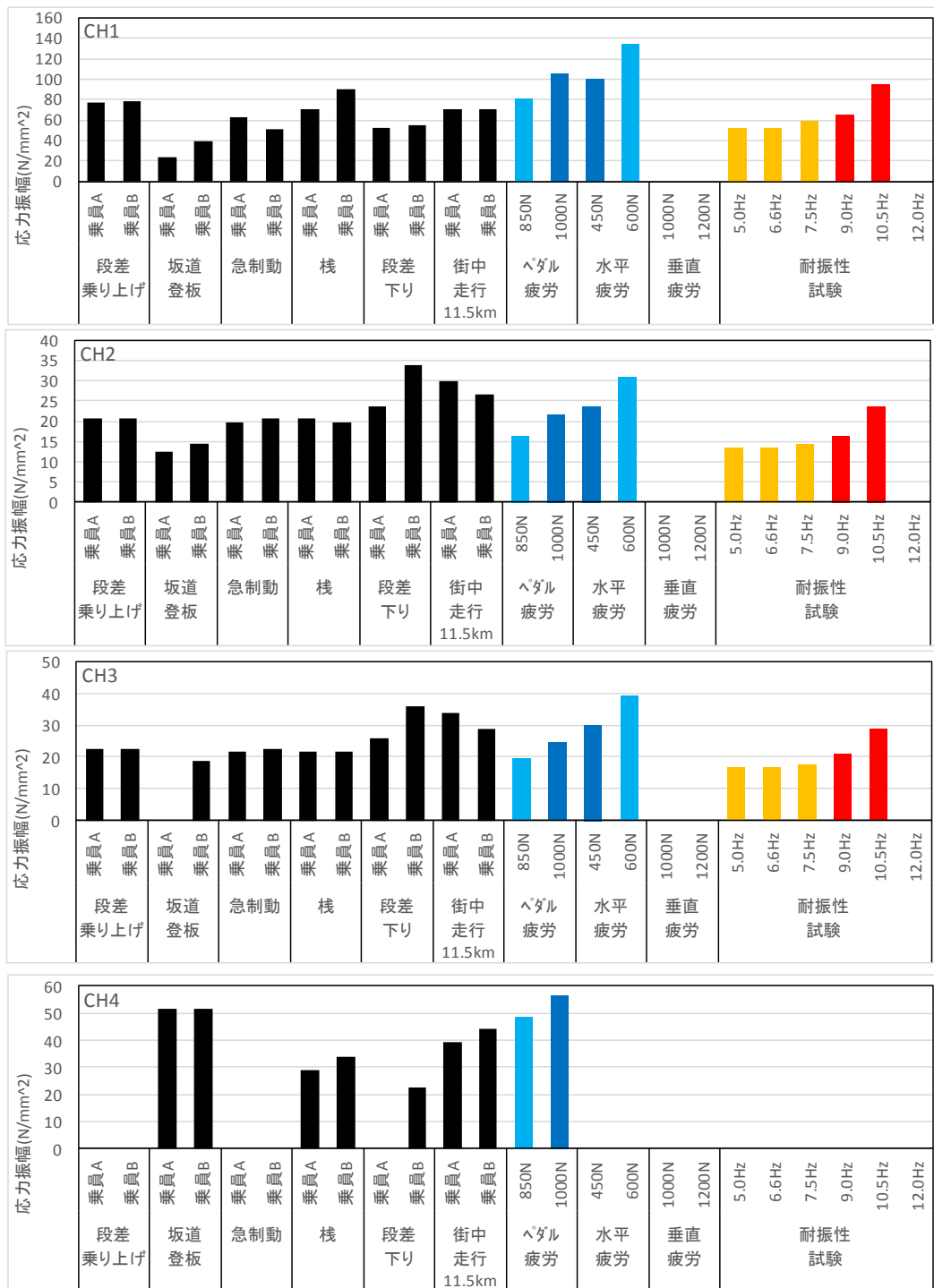


表7 B: 折り畳み車 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

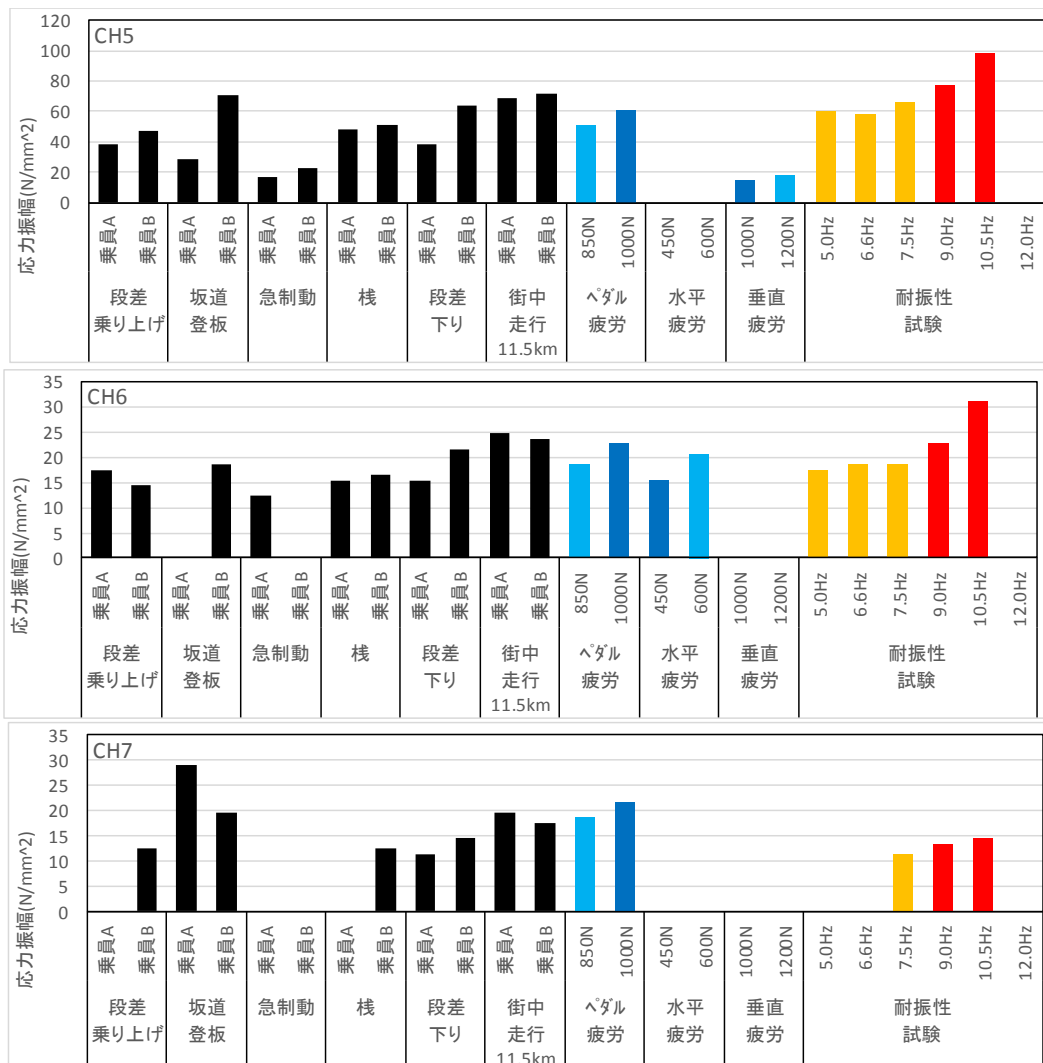


表8 C:ダブルループ形 最大応力振幅(レインフロー法)



		最大応力振幅 (N/mm ²)						
		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
段差 乗り上げ	乗員A	105.1	38.1	83.4	≤10	28.8	≤10	48.4
	乗員B	106.1	33.0	88.6	12.4	29.9	≤10	51.5
	乗員A+おもり	94.8	34.0	74.2	28.8	36.1	≤10	40.2
	乗員B+おもり	114.3	56.7	95.8	47.4	52.5	17.5	65.9
坂道 登板	乗員A	33.0	43.3	40.2	37.1	47.4	17.5	44.3
	乗員B	41.2	18.5	26.8	25.8	26.8	17.5	17.5
	乗員A+おもり	93.7	20.6	54.6	17.5	17.5	≤10	≤10
	乗員B+おもり	39.1	24.7	36.1	55.6	39.1	17.5	25.8
急制動	乗員A	30.9	12.4	24.7	≤10	≤10	≤10	33.0
	乗員B	38.1	20.6	36.1	22.7	20.6	11.3	64.9
	乗員A+おもり	56.7	29.9	44.3	12.4	26.8	12.4	41.2
	乗員B+おもり	31.9	16.5	33.0	26.8	26.8	12.4	42.2
栈	乗員A	88.6	28.8	70.0	35.0	36.1	12.4	41.2
	乗員B	133.9	55.6	108.2	47.4	57.7	18.5	62.8
	乗員A+おもり	86.5	38.1	77.3	60.8	47.4	17.5	47.4
	乗員B+おもり	116.4	38.1	91.7	49.4	49.4	19.6	54.6
段差 下り	乗員A	84.5	25.8	74.2	≤10	37.1	≤10	42.2
	乗員B	120.5	29.9	91.7	22.7	36.1	≤10	65.9
	乗員A+おもり	89.6	38.1	56.7	18.5	53.6	13.4	47.4
	乗員B+おもり	103.0	36.1	60.8	23.7	58.7	13.4	65.9
街中 走行 11.5km	乗員A	117.4	43.3	86.5	39.1	53.6	18.5	61.8
	乗員B	120.5	42.2	115.4	57.7	65.9	26.8	118.5
ペダル 疲労	850N	83.4	25.8	53.6	37.1	43.3	21.6	11.3
	1000N	104.0	33.0	67.0	45.3	53.6	27.8	15.5
水平 疲労	450N	123.6	46.4	100.9	≤10	18.5	11.3	≤10
	600N	162.7	59.7	131.8	≤10	23.7	13.4	≤10
鉛直 疲労	1000N	≤10	12.4	≤10	≤10	≤10	≤10	103.0
	1200N	≤10	13.4	≤10	≤10	23.7	≤10	113.3
耐振性 試験	5.0Hz	55.6	≤10	41.2	≤10	36.1	≤10	14.4
	6.6Hz	71.1	11.3	49.4	≤10	42.2	≤10	16.5
	7.5Hz	72.1	21.6	54.6	≤10	50.5	≤10	18.5
	9.0Hz	84.5	12.4	61.8	≤10	52.5	≤10	21.6
	10.5Hz	150.4	42.2	111.2	16.5	94.8	11.3	50.5
	12.0Hz	634.5	43.3	267.8	48.4	199.8	21.6	154.5

表8 C:ダブルループ形 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

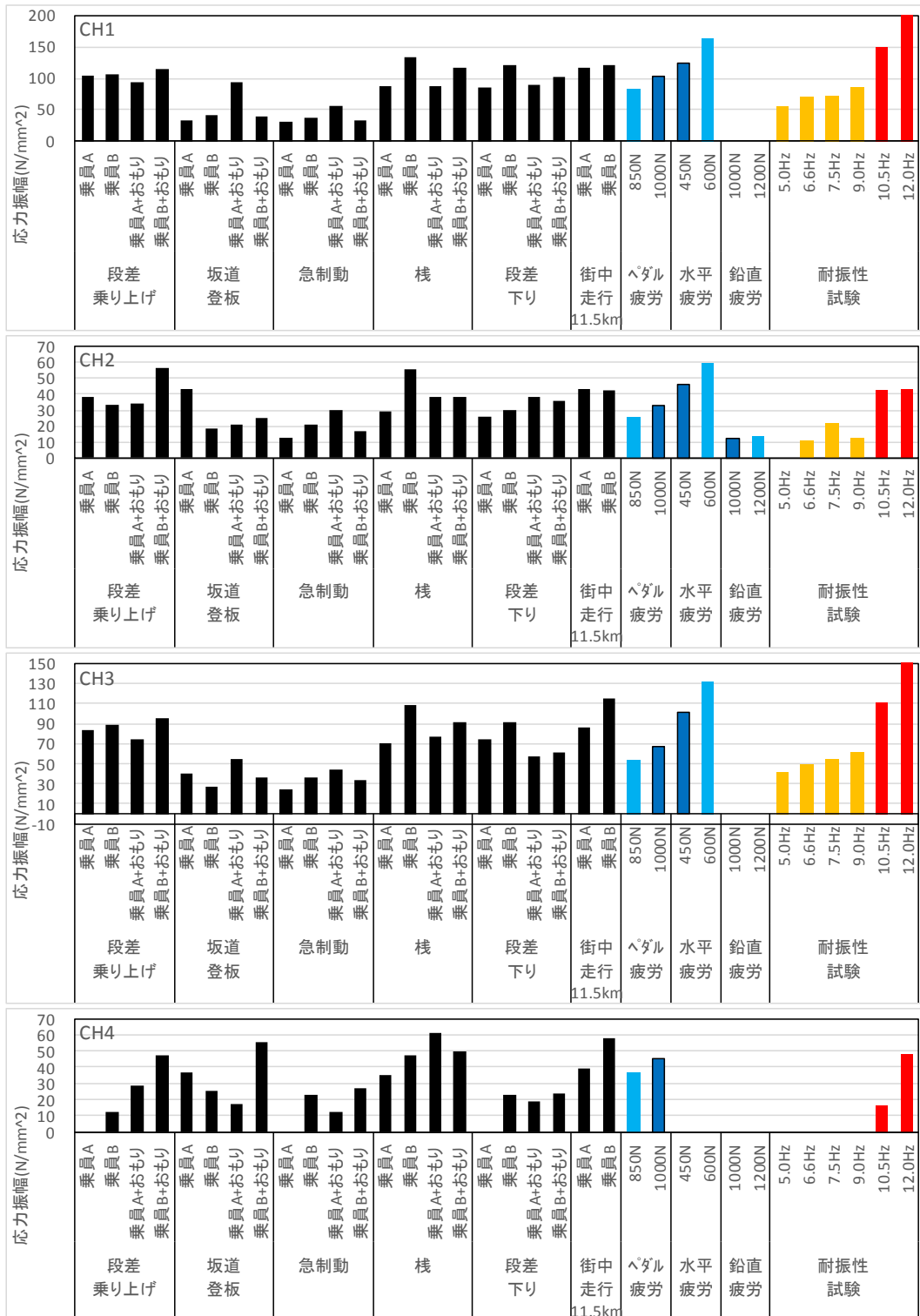


表8 C:ダブルループ形 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

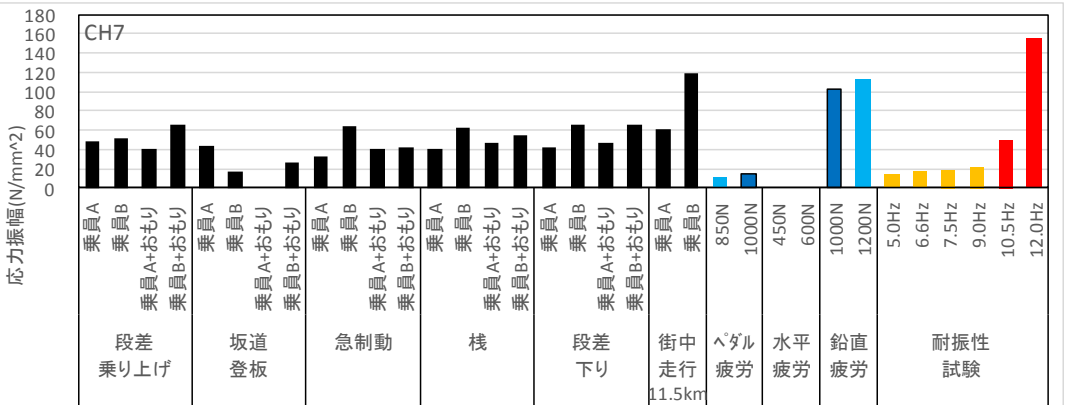
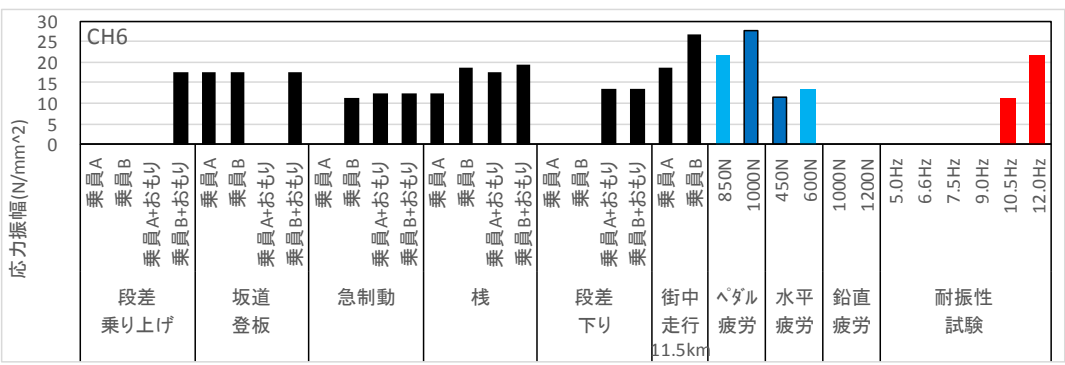
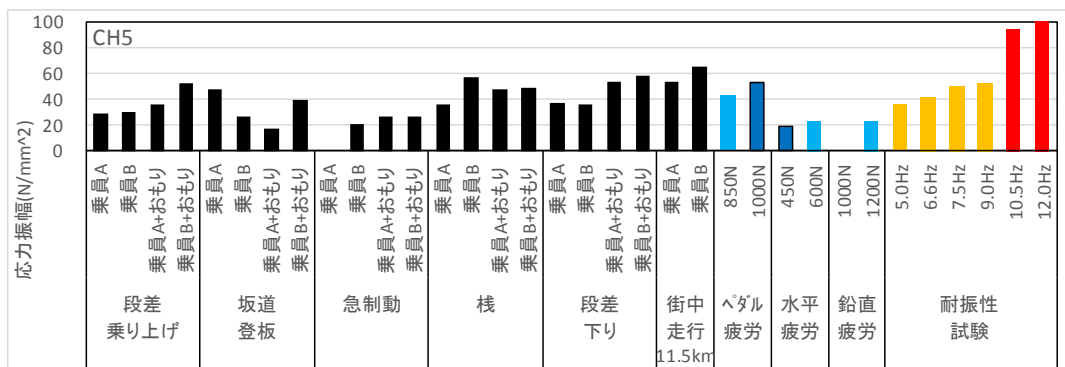


表9 D:ダイヤモンド形 最大応力振幅(レインフロー法)



最大応力振幅 (N/mm²)

		CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
段差 乗り上げ	乗員A	86.5	57.7	68.0	11.3	—	11.3	25.8
	乗員B	105.1	71.1	83.4	20.6	—	11.3	26.8
坂道 登板	乗員A	42.2	22.7	26.8	53.6	—	19.6	≤10
	乗員B	51.5	30.9	33.0	72.1	—	23.7	13.4
急制動	乗員A	43.3	33.0	29.9	14.4	—	≤10	≤10
	乗員B	25.8	24.7	29.9	27.8	—	≤10	15.5
栈	乗員A	75.2	50.5	62.8	41.2	—	11.3	28.8
	乗員B	93.7	53.6	64.9	56.7	—	16.5	34.0
段差 下り	乗員A	84.5	61.8	77.3	27.8	—	12.4	37.1
	乗員B	99.9	59.7	71.1	25.8	—	11.3	24.7
街中 走行 11.5km	乗員A	111.2	77.3	92.7	55.6	—	19.6	45.3
	乗員B	142.1	87.6	106.1	64.9	—	20.6	57.7
ペダル 疲労	850N	98.9	49.4	69.0	81.4	—	30.9	13.4
	1000N	112.3	53.6	74.2	94.8	—	35.0	14.4
水平 疲労	450N	170.0	98.9	132.9	21.6	—	31.9	20.6
	600N	228.7	129.8	175.1	25.8	—	40.2	25.8
鉛直 疲労	1000N	13.4	17.5	18.5	≤10	—	19.6	60.8
	1200N	13.4	18.5	19.6	11.3	—	21.6	68.0
耐振性 試験	5.0Hz	76.2	46.4	58.7	≤10	—	13.4	24.7
	6.6Hz	93.7	54.6	71.1	≤10	—	17.5	25.8
	7.5Hz	100.9	60.8	80.3	11.3	—	17.5	25.8
	9.0Hz	136.0	80.3	106.1	14.4	—	22.7	31.9
	10.5Hz	265.7	151.4	195.7	28.8	—	39.1	44.3
	12.0Hz	572.7	230.7	292.5	45.3	—	58.7	61.8

表9 D:ダイヤモンド形 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)

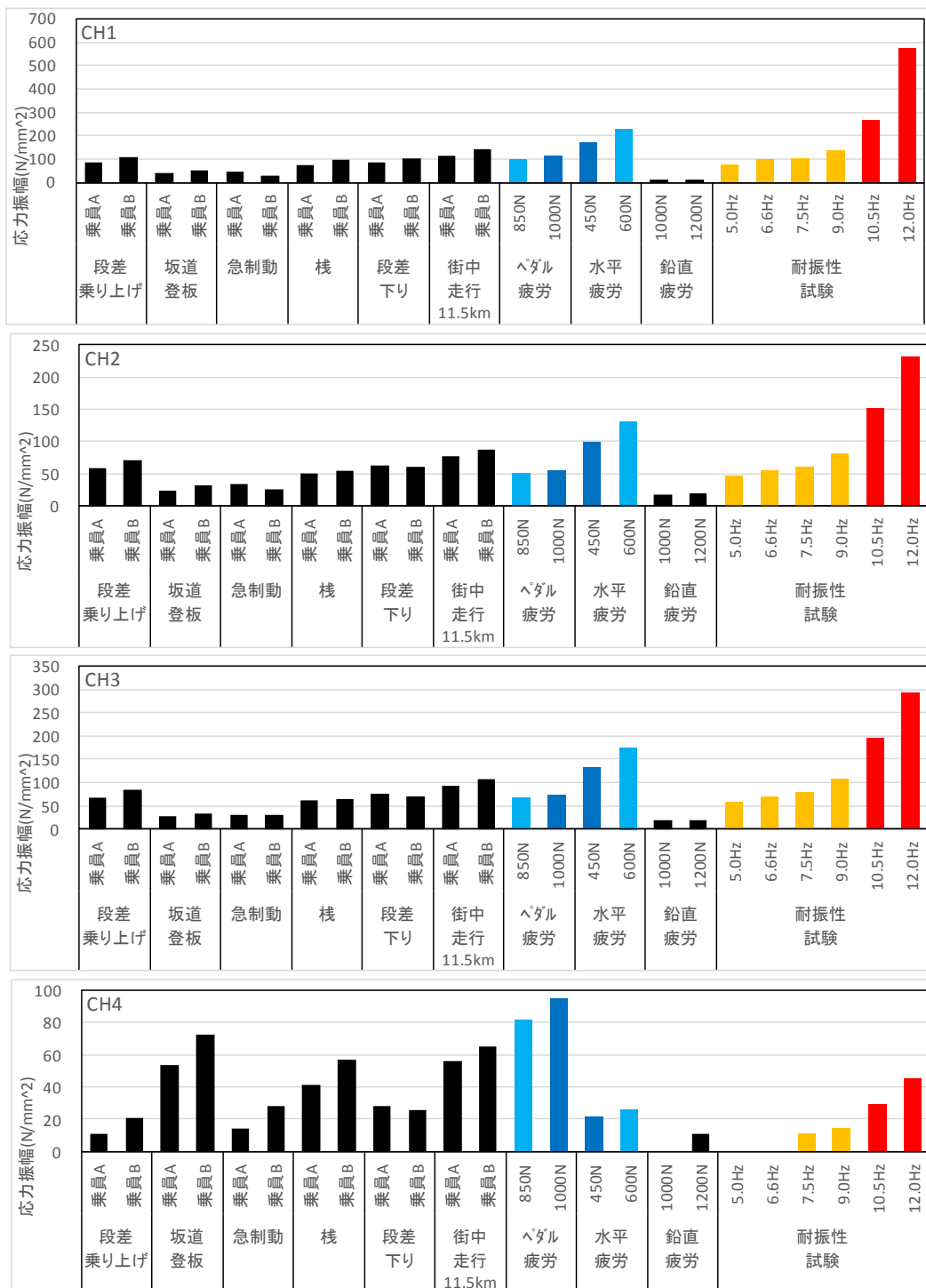
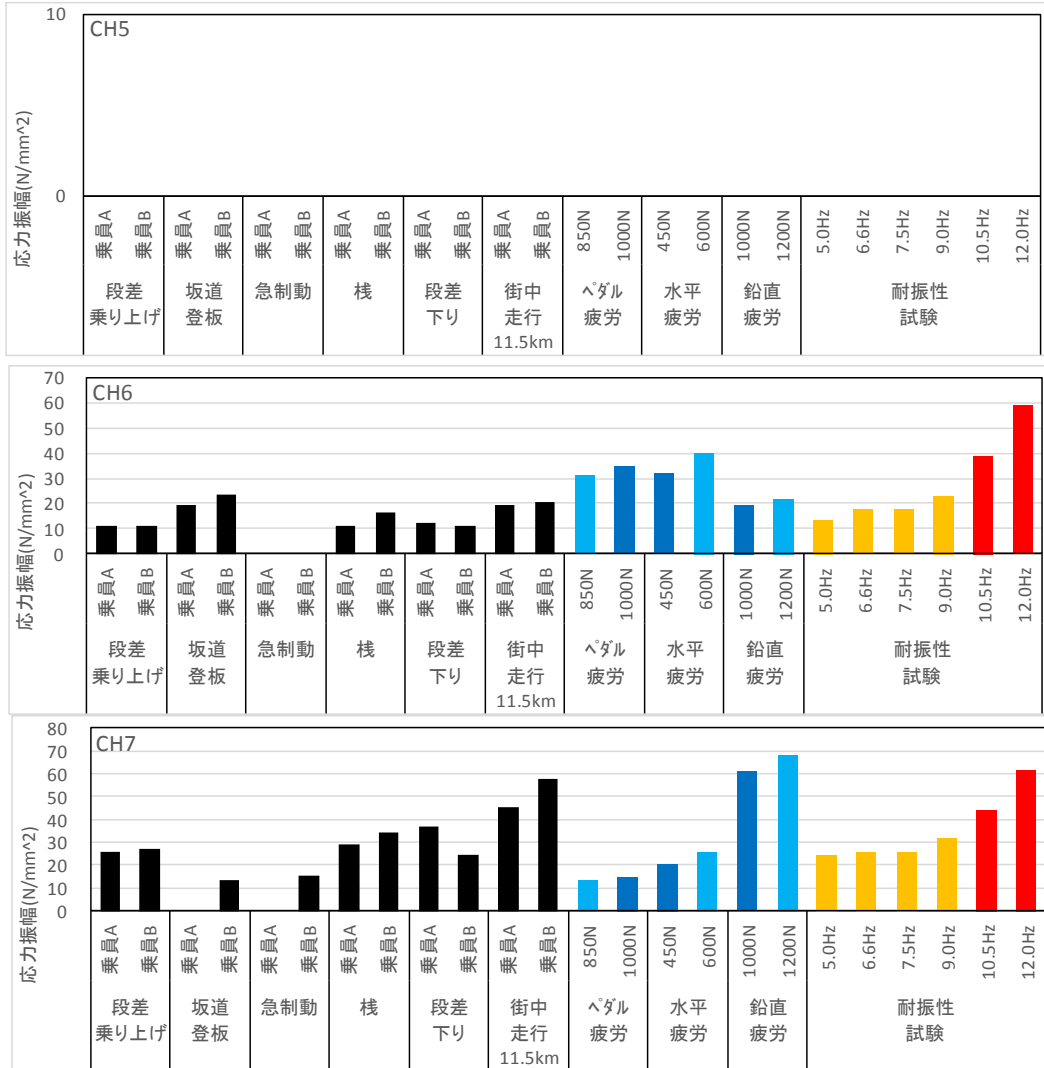


表9 D:ダイヤモンド形 最大応力振幅(レインフロー法) (続き)



実走行、疲労試験、耐振性試験では、表3の応力測定位置の中でCH1：前ホーク足裏面に最大応力が発生した。フレーム体で最大応力が発生した位置を表10に示す。

表10 フレーム体の最大応力が発生した位置

	A：U形	B：折り畳み車	C：ダブルループ形	D：ダイヤモンド形
実走行	CH3（メインパイプヘッド側下面）	CH5（立パイプのメインパイプとの接合部）	CH3（下パイプヘッド側下面）	CH3（下パイプヘッド側下面）
ペダル疲労	CH3	CH5	CH3	CH3
水平疲労	CH3	CH3（メインパイプヘッド側下面）	CH3	CH3
鉛直疲労	CH7（立パイプのシート側）	CH5	CH7（立パイプのシート側）	CH7（立パイプのシート側）
耐振性試験	CH3	CH5	CH3	CH3

（1）実走行時の応力

- ・実走行では、段差乗り上げ、段差下り、栈走行時に、U形、ダブルループ形、ダイヤモンド形ではCH3：下パイプ又はメインパイプヘッド側下面の応力値が大きく、折り畳み車ではCH5：立パイプのメインパイプとの接合部の応力値が大きかった。
- ・乗員体重が重いほうが、全体的には発生する応力が大きくなる傾向であった。
- ・おもり積載の有無については、おもり積載時のほうが発生する応力が小さくなっている条件もあったが、これは、速度が下がったことが影響したと考えられる。

（2）疲労試験時の応力

- ・水平疲労では、CH3：下パイプ又はメインパイプヘッド側下面の応力値が大きい、
- ・ペダル疲労では、水平疲労に比べCH3：下パイプ又はメインパイプヘッド側下面の応力値が小さくなるが、CH5：立パイプの接合部、CH4：ハンガ側面に応力が発生する。折り畳み車ではCH5：立パイプの接合部の応力値が大きい。
- ・鉛直疲労では、折り畳み車を除いてCH7：立パイプのシート側に応力が発生した。

（3）耐振性試験の応力

- ・耐振性試験では、周波数により応力値が変わり、共振周波数に近い程大きくなった。（また、共振周波数は、フレーム形状により異なり、U形が9Hz付近、ダブルループ形、折り畳み車H形、ダイヤモンド形は12Hz以上であった。）

6. 考察

応力測定結果より、3つの疲労試験にてフレームの耐久性が評価できるか考察する。

6. 1 疲労試験と耐振性試験の最大応力比較

疲労試験、耐振性試験は、代表例として図2、3に示すように試験の繰り返しに連動して、応力のピークが繰り返し発生する時間-応力波形となっている。

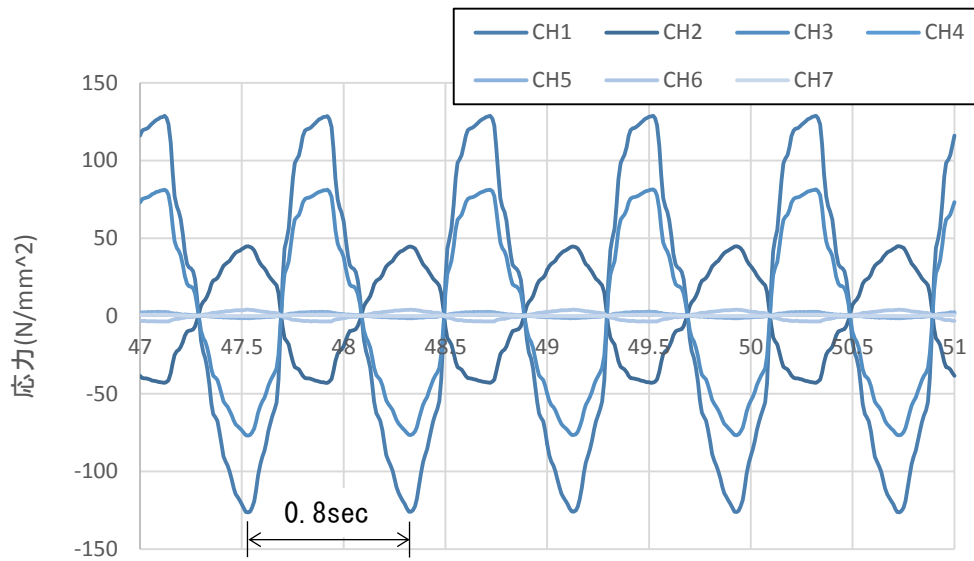


図2 疲労試験 時間-応力波形 (A : U型 水平疲労 450N 周波数 1.25Hz)

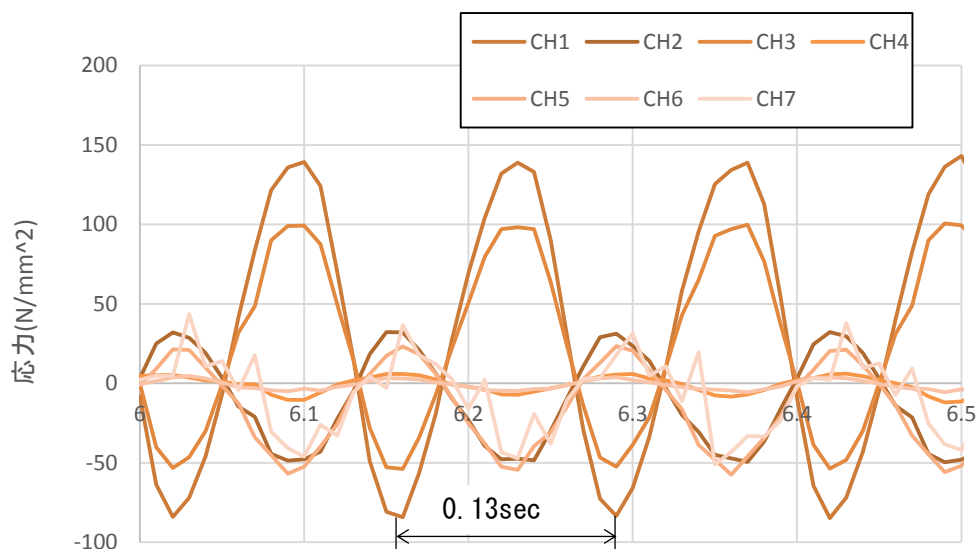


図3 耐振性試験 時間-応力波形 (A : U型 7.5Hz)

試験繰り返し数はそれぞれ、ペダル疲労、水平疲労(10万回)、鉛直疲労(5万回)、耐振性試験(7万回)と差はあるが、最大応力を比較することが、試験の厳しさを判断する一つの指標として考えられる。

そこで、3つの疲労試験 (ISO の試験条件) と耐振性試験 (ダイヤモンド形、ダブルループ形では 5~9Hz の範囲、折り畳み車では 5~7Hz の範囲、U形では 5~7.5、12Hz の共振周波数から離れた周波数) の最大応力について比較した結果を図4、表11に示す。

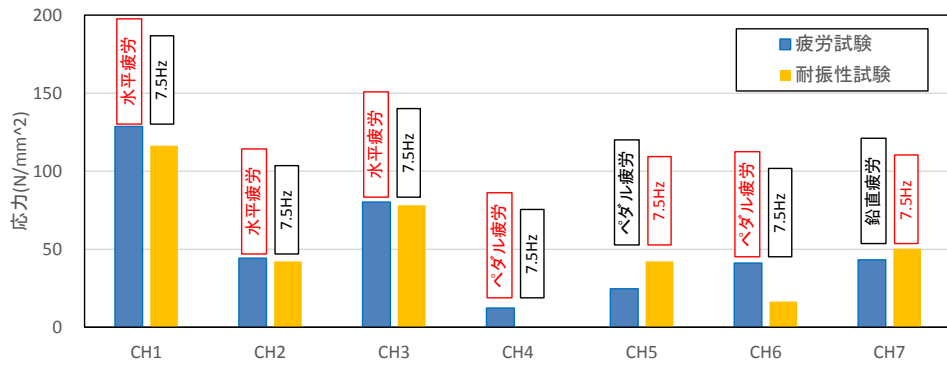


図 4.1 A (U 形) 疲労試験と耐振性試験の最大応力比較

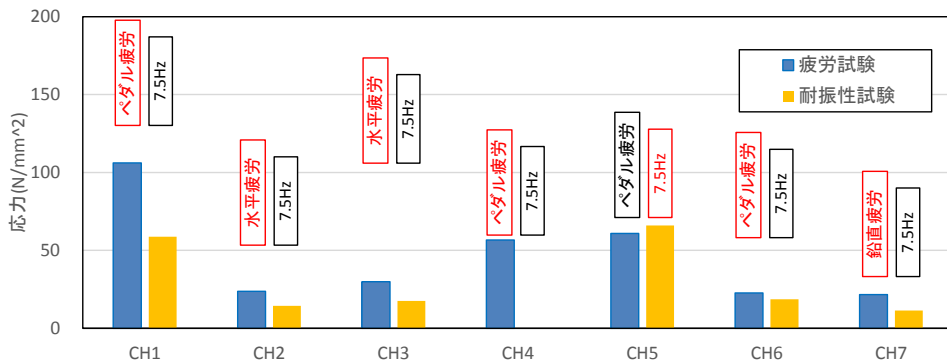


図 4.2 B (折り畳み車 H 形) 疲労試験と耐振性試験の最大応力比較

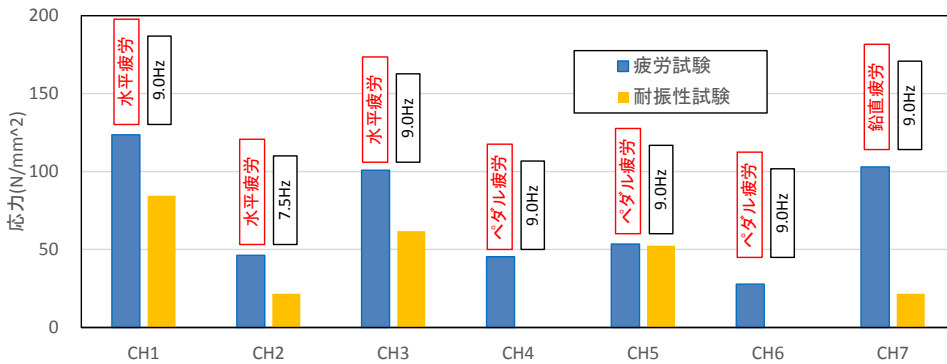


図 4.3 C (ダブルループ形) 疲労試験と耐振性試験の最大応力比較

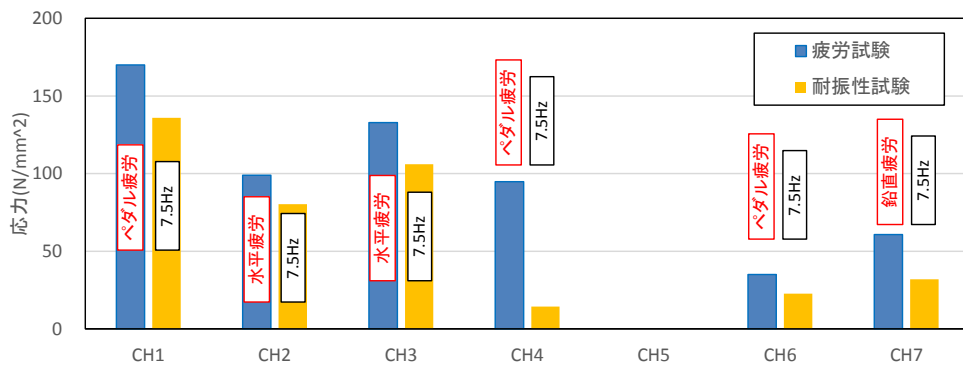


図 4.4 D (ダイヤモンド形) 疲労試験と耐振性試験の最大応力比較

表 1 1 疲労試験（ISO の試験条件）と耐振性試験の比較

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
A	○	○	○	○	×	○	×
	水平疲労	水平疲労	水平疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	鉛直疲労
B	○	○	○	○	×	○	○
	ペダル疲労	水平疲労	水平疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	鉛直疲労
C	○	○	○	○	○	○	○
	水平疲労	水平疲労	水平疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	ペダル疲労	鉛直疲労
D	○	○	○	○	—	○	○
	ペダル疲労	水平疲労	水平疲労	ペダル疲労		ペダル疲労	鉛直疲労

○：疲労試験の方が大きい。 ×：耐振性試験の方が大きい

- ・表 11 に各 CH にて応力が最大となった試験方法を示したが、ひずみゲージの貼り付け位置により最大となる試験方法が異なり、7Ch の中に 3 種類の試験全てが含まれているため、3 種類の規格全ての疲労試験を実施することは、フレームの耐久性を評価する上で有効であると判断された。
- ・CH2、3：メインパイプ又は上下パイプのヘッド側では、耐振性試験より水平疲労（試験力 450N）の応力値が大きくなった。
- ・CH4：ハンガ側面、折り畳み部は、ペダル疲労（試験力 1,000N）が大きくなった。
- ・CH5：立パイプの接合部は、U 形と折り畳み車では耐振性試験がやや大きい。
- ・CH7：立パイプのシート側は、U 形を除いて鉛直疲労（試験力 1,000N）が大きくなった。
- ・ペダル疲労、水平疲労（10 万回）にて、耐振性試験（7 万回）より応力が大きい、各フレームの CH1～4、CH6 は、疲労試験のほうが耐振性試験よりも、厳しい試験になっていると推定された。
- ・但し、一部、振動周波数によっては耐振性試験にて発生する最大応力のほうが大きい箇所もあるため、最大応力の比較のみでは、耐振性試験に対し、疲労試験のほうが厳しい試験になっているかは判断できなかった。

6. 2 実走行と疲労試験との応力比較

今回実施した実走行は、フレームへの負荷が大きいと思われる条件（段差乗り上げ、坂道登坂、急制動、栈、段差下り）も含んでいる。これらの条件で発生する最大応力は、実使用では、定常的には発生しないレベルのものであり、そのレベルの応力にて疲労試験が実施できていれば、耐久性を確認する試験としては、十分厳しいものと考えられる。

そこで、実走行と 3 つの疲労試験（ISO の試験条件）について最大応力を比較した結果を図 5、表 1 2 に示す。

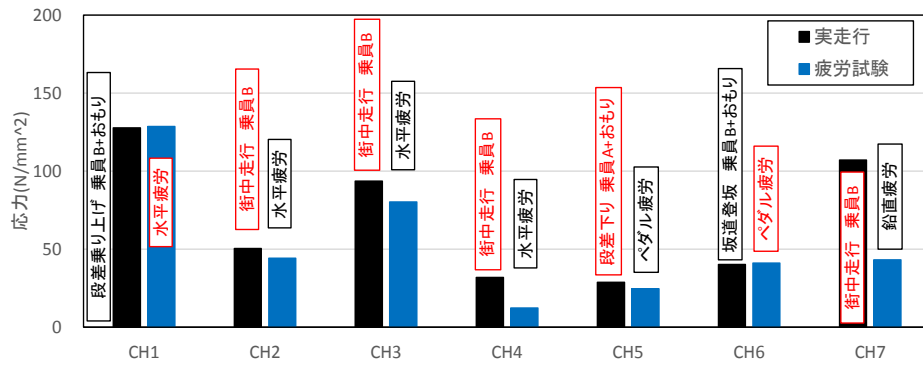


図 5.1 A (U形) 実走行と疲労試験の最大応力比較

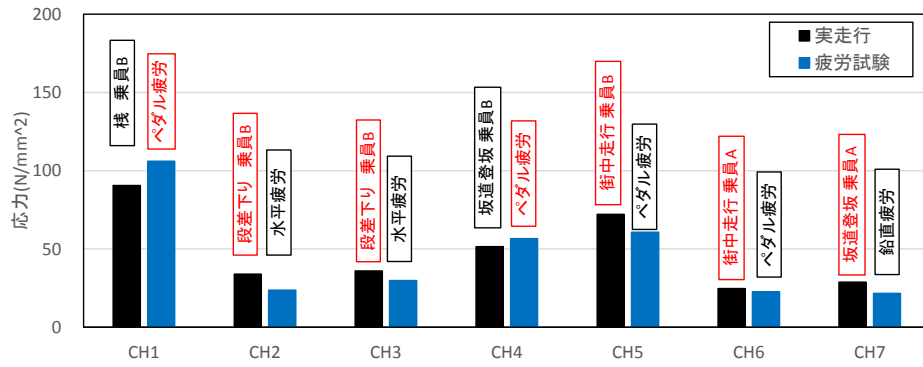


図 5.2 B (折り畳み車 H形) 実走行と疲労試験の最大応力比較

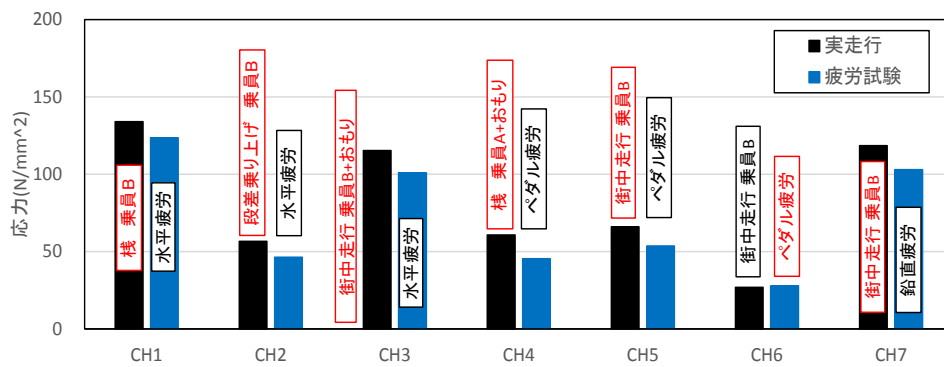


図 5.3 C (ダブルループ形) 実走行と疲労試験の最大応力比較

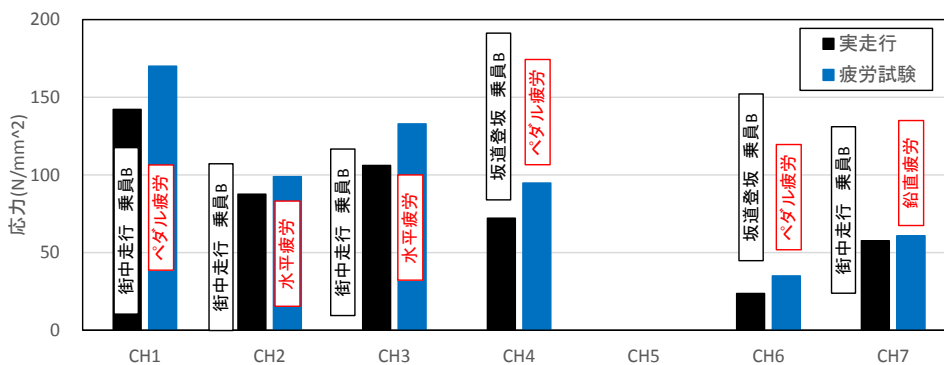


図 5.4 D (ダイヤモンド形) 実走行と疲労試験の最大応力比較

表 1 2 疲労試験（ISO の試験条件）と実走行の比較

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
A	○	×	×	×	×	○	×
B	○	×	×	○	×	×	×
C	×	×	×	×	×	○	×
D	○	○	○	○	—	○	○

○：疲労試験の方が大きい。 ×：実走行の方が大きい。

- ・ダイヤモンド形は、全て実走行より疲労試験の方が大きくなったが、U形、折り畳み車、ダブルループ形では、CH2、CH3、CH5、CH7 で実走行が大きくなった。
- ・CH2、3：メインパイプ又は上下パイプは、水平疲労（試験力 450N）でダイヤモンド形が大きくなったが、U形、折り畳み車、ダブルループ形ではやや小さかった。試験力 600N では大きくなった。
- ・CH5：立パイプの接合部、CH4：ハンガ側面、折り畳み部は、ペダル疲労（試験力 1,000N）では、ダイヤモンド形が大きいが、U形、折り畳み車、ダブルループ形ではやや小さかった。
- ・CH7：立パイプのシート側は、鉛直疲労（試験力 1,000N）では、ダイヤモンド形がほぼ同じで、U形、ダブルループ形では小さかった。
- ・上記より、フレーム形状、実走行の走行条件、乗員条件により、ほとんどの場合、疲労試験よりも実走行の応力の方が大きくなるが、最大応力値のみではなく応力頻度が問題となるため、実走行の耐久性を評価することに対して、疲労試験が有効であるかは判断できなかった。

6. 3 被害度による検証

6. 1 及び 6. 2 にて、最大応力値という視点から、耐振性試験、実走行との比較を行ったが、疲労試験がフレームの耐久性を評価するために有効的かは判断できなかった。そこで、被害度という視点にて検証を行った。

レインフロー法にて計算した応力振幅値と鋼製の TIG 溶接試験片の S-N 線図¹⁾を用いた修正マイナー則 ($\geq 10\text{N/mm}^2$) にて被害度を算出し、以下について計算した。

- 1) 街中走行 (11.5km) で発生する応力状況と S-N 線図との比較から街中走行の被害度 (%) を計算し、被害度 (の逆数) から走行可能距離を求めた。
- 2) 疲労試験 (規定の試験回数) の応力頻度と S-N 線図との比較から疲労試験の被害度 (%) を計算し、その被害度と 1) で求めた走行可能距離から走行距離を計算した。
- 3) 走行距離 20,000km を 1 とした場合の被害度比を求めた。
(自転車通勤 平均時間 20 分²⁾、平均時速 15km/h³⁾、年間 300 日使用から計算すると、20,000km は、使用期間 6.7 に年相当)

図 6 に街中走行及び疲労試験の応力頻度と S-N 線図との比較、表 1 3 ~ 1 6 に走行可能距離及び被害度比を示す。(被害度比が 10 の時には、200,000km の走行距離に相当する。)

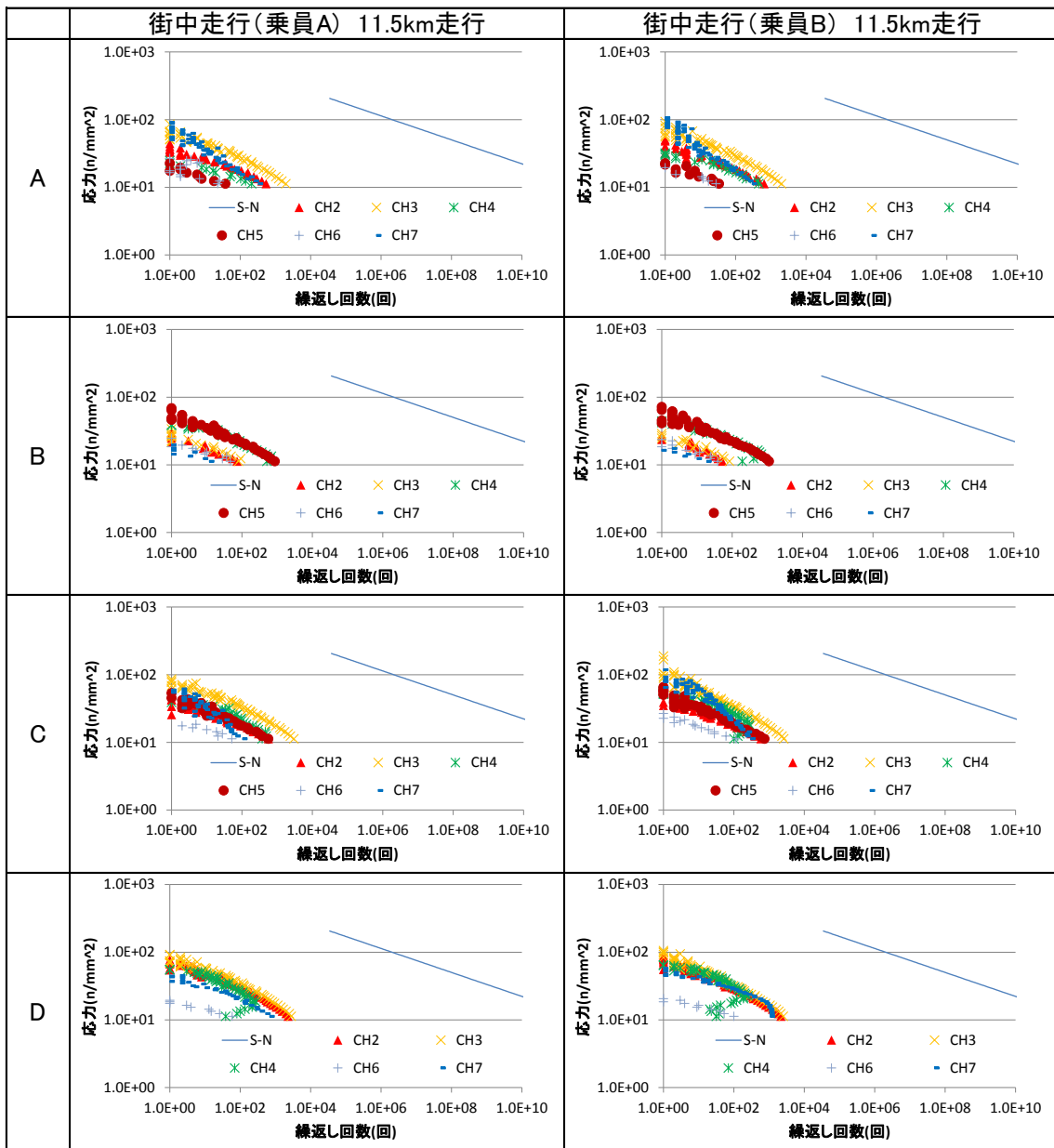


図6 S-N線図比較

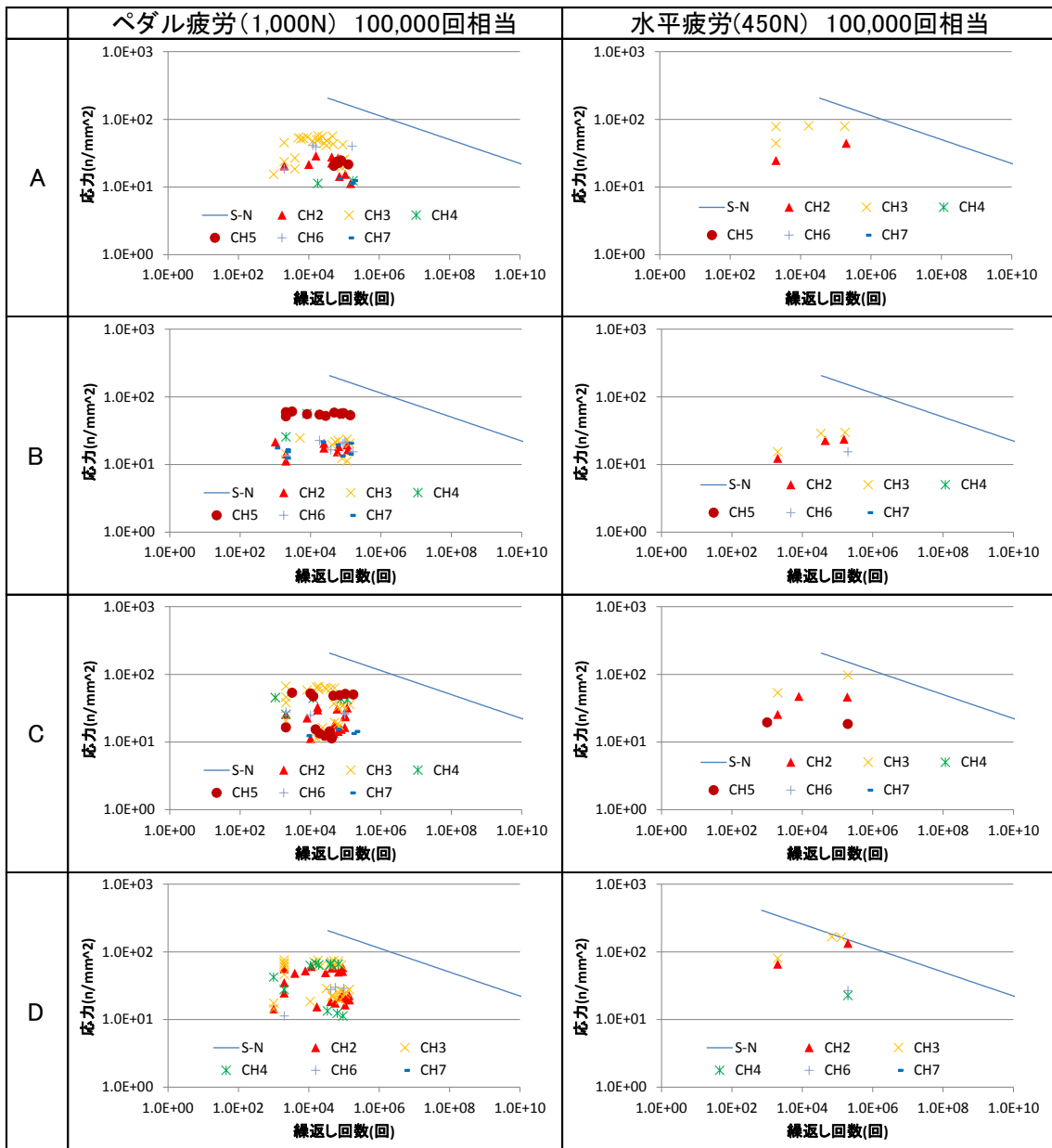


図6 S-N線図比較(続き)

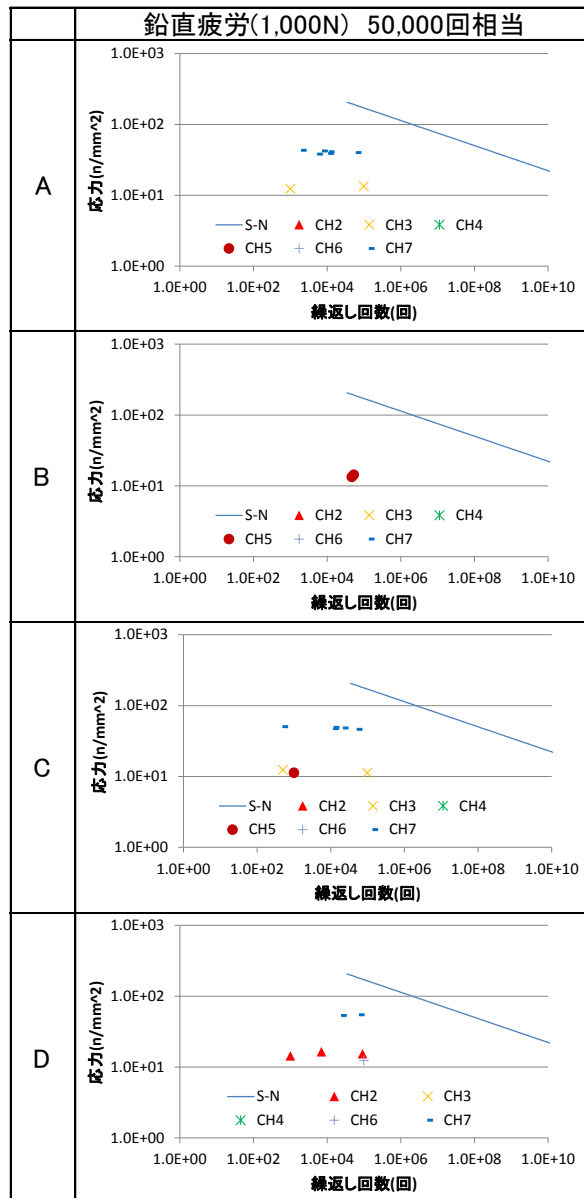
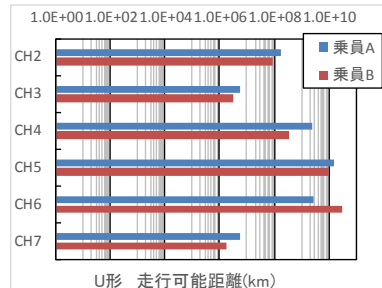
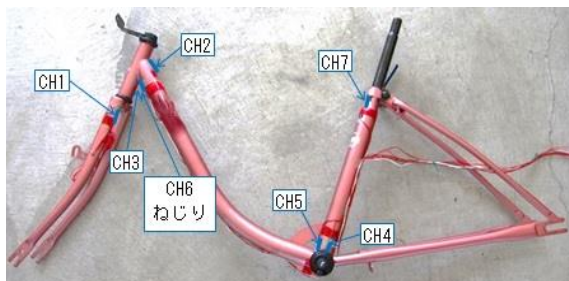


図6 S-N線図比較(続き)

表 13 A: U形

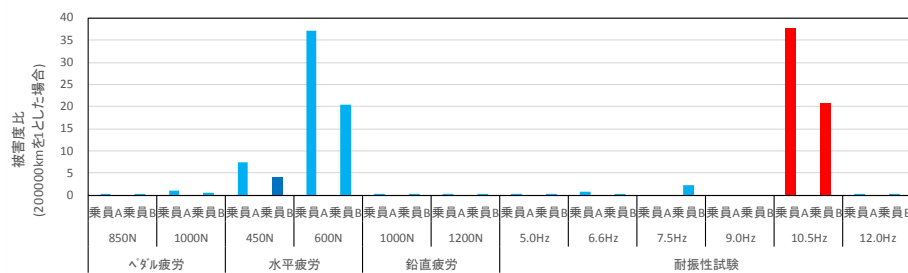
		走行可能距離 (km)					
		CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
U形	乗員A	1.7E+08	5.6E+06	2.4E+09	1.7E+10	2.8E+09	5.5E+06
	乗員B	9.4E+07	3.1E+06	3.4E+08	9.8E+09	3.2E+10	1.7E+06



被害度比(20,000kmを1とした場合)

		被害度比(20,000kmを1とした場合)						
		CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	
ペダル疲労	850N	乗員A	0.23	0.25	0.03	16.64	36.51	0.00
		乗員B	0.12	0.14	0.00	9.87	417.79	0.00
	1000N	乗員A	0.79	1.03	0.08	38.38	77.26	0.00
		乗員B	0.44	0.57	0.01	22.75	884.08	0.00
水平疲労	450N	乗員A	8.19	7.35	0.00	0.00	0.00	0.00
		乗員B	4.53	4.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	600N	乗員A	40.60	37.18	0.00	0.00	0.00	0.00
		乗員B	22.46	20.51	0.00	0.00	0.00	0.00
鉛直疲労	1000N	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	1200N	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
耐振性試験	5.0Hz	乗員A	0.11	0.13	0.00	5.75	0.00	0.00
		乗員B	0.06	0.07	0.00	3.41	0.00	0.00
	6.6Hz	乗員A	0.65	0.74	0.00	25.29	0.00	0.00
		乗員B	0.36	0.41	0.00	14.99	0.00	0.00
	7.5Hz	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		乗員B	1.97	2.26	0.00	169.92	0.00	0.03
	9.0Hz	乗員A						
		乗員B						
	10.5Hz	乗員A	31.08	37.58	0.12	1983.91	0.00	2.14
		乗員B	17.20	20.74	0.02	1176.11	0.00	0.66
	12.0Hz	乗員A	0.36	0.40	0.00	18.65	0.00	0.00
		乗員B	0.20	0.22	0.00	11.06	0.00	0.00

CH3



CH7

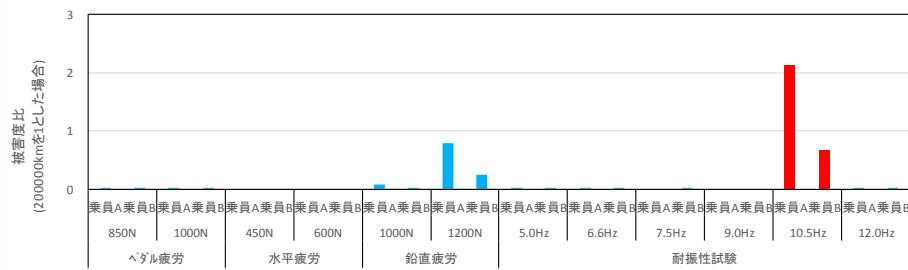
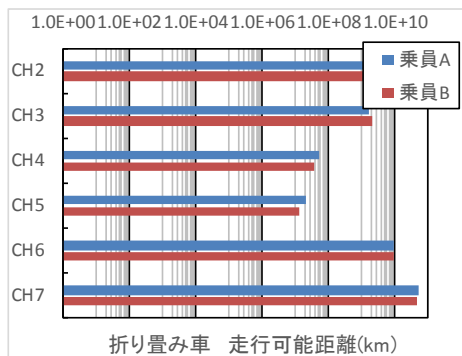
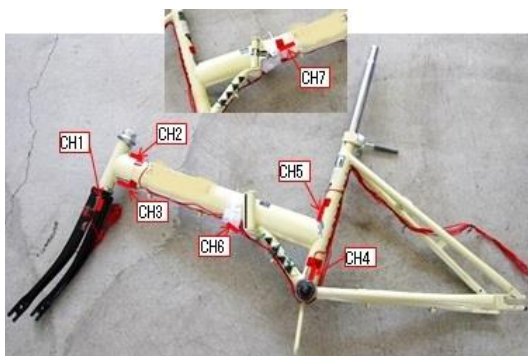


表 1 4 B : 折り畳み車

		走行可能距離 (km)						
			CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
折りたたみ車	乗員A		3.0E+09	1.8E+09	5.5E+07	2.1E+07	1.0E+10	5.1E+10
	乗員B		3.4E+09	2.1E+09	3.8E+07	1.4E+07	9.6E+09	4.8E+10



被害度比(20,000kmを1とした場合)

			CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
ペダル疲労	850N	乗員A	0.62	1.21	4.16	3.16	3.81	15.09
		乗員B	0.71	1.41	2.88	2.04	3.63	14.15
	1000N	乗員A	1.92	3.41	9.25	7.80	9.37	35.58
		乗員B	2.20	3.99	6.41	5.03	8.93	33.37
水平疲労	450N	乗員A	4.04	8.96	0.00	0.00	1.29	0.00
		乗員B	4.63	10.46	0.00	0.00	1.22	0.00
	600N	乗員A	19.08	41.99	0.00	0.00	6.55	0.00
		乗員B	21.84	49.03	0.00	0.00	6.24	0.00
鉛直疲労	1000N	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	1200N	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
耐振性試験	5.0Hz	乗員A	0.09	0.17	0.00	3.08	1.55	0.00
		乗員B	0.11	0.20	0.00	1.99	1.47	0.00
	6.6Hz	乗員A	0.08	0.16	0.00	2.68	1.75	0.00
		乗員B	0.09	0.18	0.00	1.73	1.67	0.00
	7.5Hz	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		乗員B	0.15	0.29	0.00	3.39	1.79	0.14
	9.0Hz	乗員A	0.33	0.59	0.00	12.08	5.81	1.42
		乗員B	0.37	0.69	0.00	7.80	5.53	1.34
	10.5Hz	乗員A	2.10	3.93	0.00	45.75	36.86	1.96
		乗員B	2.41	4.59	0.00	29.53	35.11	1.84
	12.0Hz	乗員A						
		乗員B						

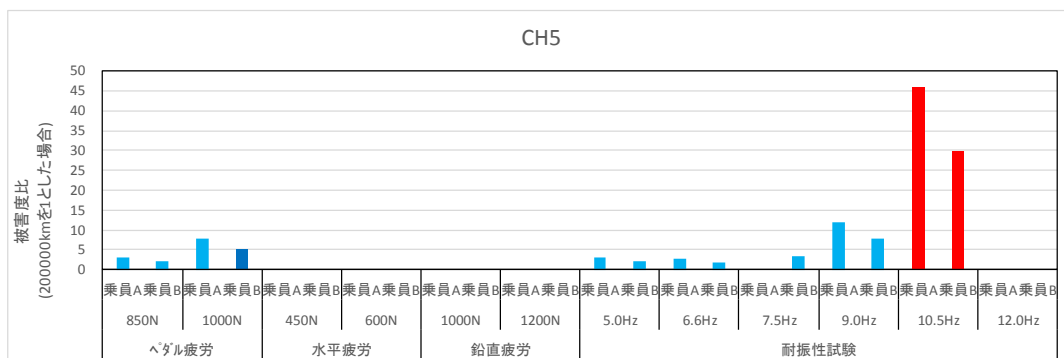
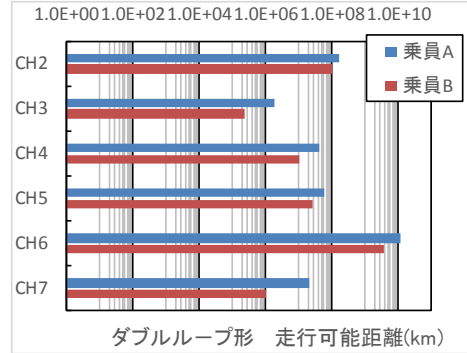


表 15 C: ダブルループ形

		走行可能距離 (km)						
		CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	
ダブルループ形	乗員A	1.8E+08	1.9E+06	4.2E+07	6.1E+07	1.2E+10	2.0E+07	
	乗員B	1.1E+08	2.5E+05	1.1E+07	2.6E+07	3.7E+09	1.1E+06	



被害度比(20,000kmを1とした場合)

		CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	
ペダル疲労	850N	乗員A	0.50	0.23	0.63	4.02	8.66	0.00
		乗員B	0.33	0.03	0.17	1.75	2.64	0.00
	1000N	乗員A	1.61	0.69	1.69	12.23	30.60	0.00
		乗員B	1.04	0.09	0.44	5.31	9.32	0.00
水平疲労	450N	乗員A	10.60	9.06	0.00	0.02	0.04	0.00
		乗員B	6.86	1.21	0.00	0.01	0.01	0.00
	600N	乗員A	45.13	41.84	0.00	0.07	0.59	0.00
		乗員B	29.22	5.58	0.00	0.03	0.18	0.00
鉛直疲労	1000N	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.84
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.18
	1200N	乗員A	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	181.20
		乗員B	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	9.39
耐振性試験	5.0Hz	乗員A	0.09	0.17	0.00	3.08	1.55	0.00
		乗員B	0.11	0.20	0.00	1.99	1.47	0.00
	6.6Hz	乗員A	0.08	0.16	0.00	2.68	1.75	0.00
		乗員B	0.09	0.18	0.00	1.73	1.67	0.00
	7.5Hz	乗員A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		乗員B	0.15	0.29	0.00	3.39	1.79	0.14
	9.0Hz	乗員A	0.33	0.59	0.00	12.08	5.81	1.42
		乗員B	0.37	0.69	0.00	7.80	5.53	1.34
	10.5Hz	乗員A	2.10	3.93	0.00	45.75	36.86	1.96
		乗員B	2.41	4.59	0.00	29.53	35.11	1.84
	12.0Hz	乗員A						
		乗員B						

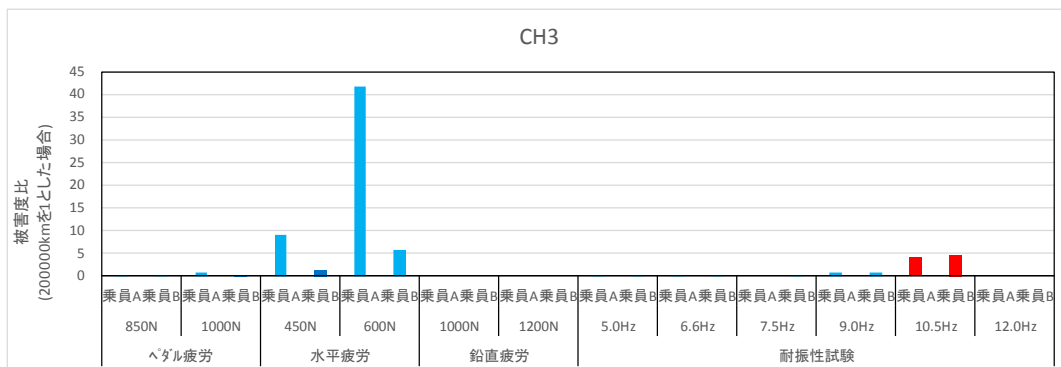
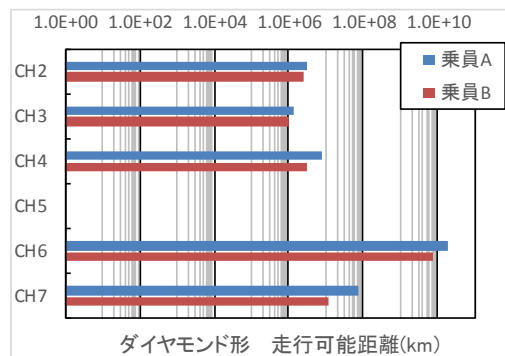


表 16 D: ダイヤモンド形

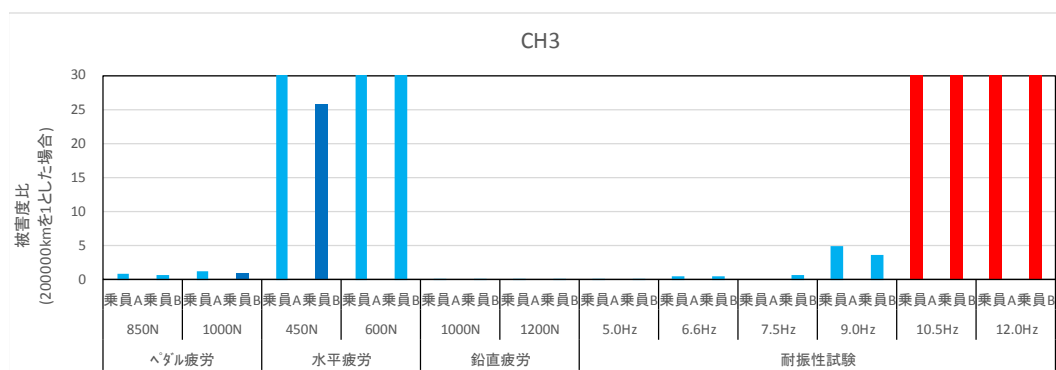
走行可能距離 (km)

		CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
ダイヤモンド形	乗員A	3.2E+06	1.4E+06	7.8E+06	0.0E+00	1.8E+10	7.7E+07
	乗員B	2.4E+06	9.8E+05	3.2E+06	0.0E+00	7.7E+09	1.2E+07



被害度比(20,000kmを1とした場合)

			CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
ペダル疲労	850N	乗員A	0.30	0.78	10.94		91.23	0.00
		乗員B	0.23	0.56	4.51		39.02	0.00
	1000N	乗員A	0.46	1.20	24.42		185.95	0.00
		乗員B	0.34	0.87	10.07		79.54	0.00
水平疲労	450N	乗員A	13.31	35.48	0.00		118.74	0.05
		乗員B	10.04	25.69	0.00		50.79	0.01
	600N	乗員A	61.06	151.23	0.01		406.97	0.15
		乗員B	46.06	109.50	0.01		174.08	0.02
鉛直疲労	1000N	乗員A	0.00	0.00	0.00		3.51	8.48
		乗員B	0.00	0.00	0.00		1.50	1.33
	1200N	乗員A	0.00	0.00	0.00		5.46	15.72
		乗員B	0.00	0.00	0.00		2.34	2.46
耐振性試験	5.0Hz	乗員A	0.10	0.17	0.00		0.45	0.07
		乗員B	0.08	0.13	0.00		0.19	0.01
	6.6Hz	乗員A	0.26	0.52	0.00		1.88	0.07
		乗員B	0.20	0.38	0.00		0.80	0.01
	7.5Hz	乗員A	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
		乗員B	0.36	0.68	0.00		1.04	0.01
	9.0Hz	乗員A	2.46	4.86	0.00		10.00	0.26
		乗員B	1.86	3.52	0.00		4.28	0.04
	10.5Hz	乗員A	77.70	140.77	0.01		218.70	1.57
		乗員B	58.61	101.93	0.01		93.55	0.25
	12.0Hz	乗員A	892.74	1427.81	0.21		2303.75	12.35
		乗員B	673.41	1033.82	0.08		985.43	1.93



なお、フレーム体の耐久性を評価するために、CH1 の前ホーク足裏面の応力は解析から除外した。

- U 形、ダブルループ形、ダイヤモンド形が CH3：メインパイプ又は下パイプのヘッド側、折り畳み車が CH5：立パイプ接合部で走行可能距離が最も短くなった。
- 水平疲労（試験力 450N）では、乗員 B の場合、実走行での最弱部位 CH3：メインパイプ又は下パイプのヘッド側では、U 形の被害度比が 4.06（走行距離 8.12 万 km）、ダブルループ形が 1.21（走行距離 2.42 万 km）、ダイヤモンド形が 25.69（51.38 万 km）となり、2 万 km 以上の距離を走行したのと同じ被害度を与える試験に相当した。
- ペダル疲労（試験力 1,000N）では、折り畳み車の実走行での最弱部位 CH5：立パイプ接合部、2 番目に弱い CH4：立パイプのハンガ側面の被害度比が 5.03～6.41（走行距離 10.06 万～12.82 万 km）、また、ダイヤモンド形が CH4：ハンガ側面が 10.07（20.14 万 km）となり、2 万 km 以上走行する試験に相当した。
- 垂直疲労（試験力 1,000N）は、最大応力となる CH7：立パイプのシート側では、ダブルループ形の被害度比が 5.18（10.36 万 km）、ダイヤモンド形が 1.33（2.66 万 km）となり、2 万 km 以上を走行する試験に相当した。ダイヤモンド形のような形状に対しては、有効な試験方法といえる。
- ISO の試験条件で、ほぼ各フレームの最弱部位が、実走行 2 万 km 以上の試験となるため、耐久性を評価する試験としては問題ないレベルは保証できているものと判断された。
- ダイヤモンドフレームについては、水平疲労にて最弱部位が 50 万 km 相当と他のフレームと比較しても大きい値を示すため、耐久性試験としては厳しすぎる可能性も考えられた。
- 耐振性試験についても同様に上記 1)～3) の計算を行い、最弱部位について疲労試験と比較した結果、共振付近を除くと表 17 のような状況であり、全てのフレームにて疲労試験のほうが、耐振性試験よりも厳しい状況であった。

表 17 疲労試験と耐振性試験の最弱部位の被害度比（20,000km を 1 とした）の比較

		最弱部位	被害度比（走行距離）、疲労試験方法又は振動周波数			
			疲労試験		耐振性試験	
A	U 形	CH3	4.06 (8.12 万 km)	水平疲労	2.26 (4.52 万 km)	7.5Hz
B	折り畳み車 H 形	CH5	5.03 (10.06 万 km)	ペダル疲労	3.39 (6.78 万 km)	7.5Hz
C	ダブルループ形	CH3	1.21 (2.42 万 km)	水平疲労	0.59 (1.18 万 km)	9.0Hz
D	ダイヤモンド形	CH3	25.69 (51.38 万 km)	水平疲労	3.52 (7.04 万 km)	9.0Hz

7. 疲労強度（検証）

7. 1 検証方法

ISO の疲労試験（ペダル疲労、水平疲労、鉛直疲労）は、実走行の最弱部位で予想した通

りに破損するのかが検証した。各フレームの試験方法は応力試験結果から最弱部位の被害度比が一番大きくなった試験を選択した。

7. 2 疲労試験結果

表10の応力測定結果から、U形、ダブルループ形、ダイヤモンド形では水平疲労、折り畳み車はペダル疲労を行なった。試験回数100万回まで行った結果を表18に示す。なお、疲労試験時は、剛性ホークを使用した。

表18 疲労試験結果

	フレームの形状	試験方法	試験力	周波数 (Hz)	結果
A	U形	水平疲労	±450N	1.25	1,000,000回でメインパイプとヘッド部の接合部にクラックが発生した。(写真5A)
B	折り畳み車 H形	ペダル疲労	1,000N	1.25	227,509回で折り畳み部を固定するレバーピンが破断した。(写真5B)
C	ダブルループ形	水平疲労	±450N	1.25	888,841回で下パイプとヘッド部の接合部にクラックが発生した。(写真5C)
D	ダイヤモンド形	水平疲労	±450N	1.25	64,798回で下パイプとヘッド部の接合部にクラックが発生した。(写真5D)

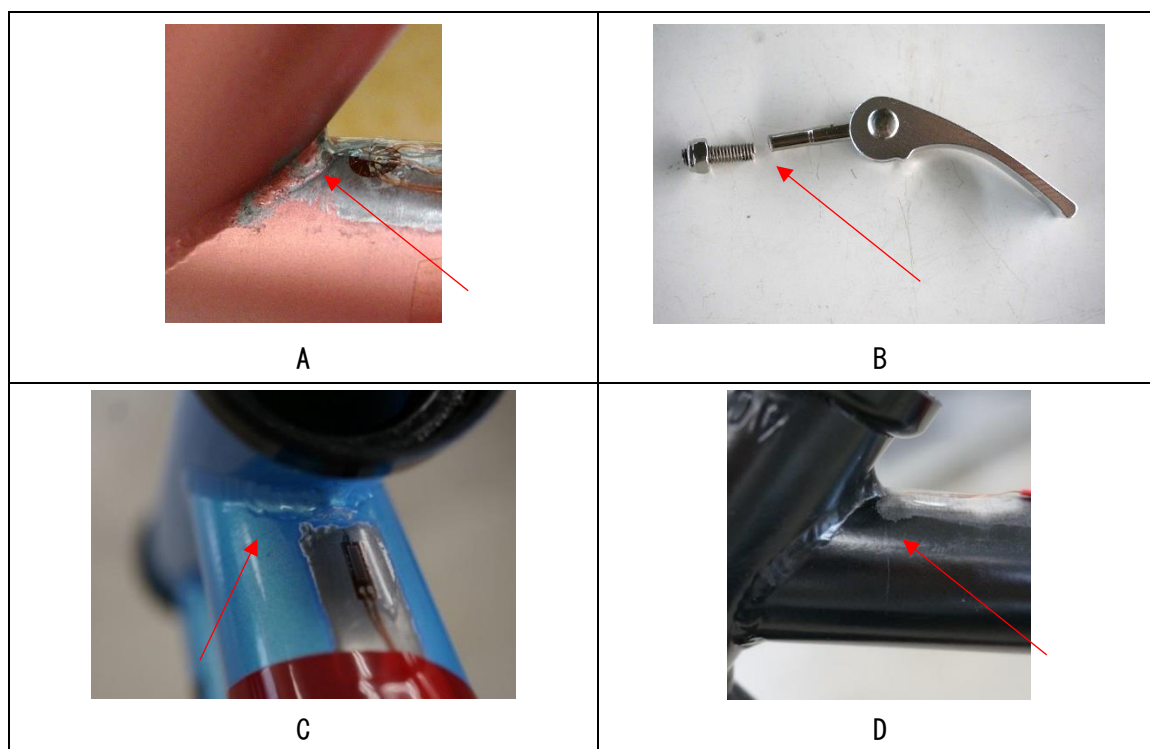


写真5 破損状況

- ・U形、ダブルループ形、ダイヤモンド形では水平疲労にて応力測定結果から予想されたとおりの部位（U形 メインパイプ下側、ダブルループ形、ダイヤモンド形 下パイプ下側）が破損した。但し、ダイヤモンド形については、ISO で規定された試験回数の10万回前に破損した。
- ・折り畳み車 H形については、今回、応力測定にて検証していないレバーピン部にて破損したため、応力測定した箇所での最弱部位が破損する状況の検証はできなかった。レバーピンの破損は、ペダル疲労の試験回数10万回に対し2倍以上であった。

8. まとめ

実走行、疲労試験、耐振性試験を検証した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 疲労試験においては、各フレームの各部位にて応力が最大となる試験にペダル疲労、水平疲労、鉛直疲労の全ての試験が含まれているため、3種類の疲労試験を実施することは、フレームの耐久性を評価する上で有効的であるものと判断された。
また、ペダル疲労は、試験力が現行850NからISOの条件の1,000Nに変更されるが、厳しすぎることはないと判断された。
- (2) 下記2点より、疲労試験はフレームの耐久性を評価する試験として問題ないレベルを保証できているものと判断された。
 - ・最大応力値にて比較した結果、ほとんどの部位で疲労試験のほうが耐振性試験よりも大きな値を示した。
 - ・各フレームの最弱部位の被害度にて検証した結果、全てのフレームにて疲労試験のほうが耐振性試験よりも被害度が高く、実走行2万km以上に相当する結果であった。
- (3) ダイヤモンド形フレームについては、下記の2点より、水平疲労は耐久性試験としては厳しすぎる可能性も考えられた。
 - ・被害度にて実走行50万km相当と他のフレームと比較して大きい値を示した。
 - ・検証にて実施した水平疲労試験にて、目標回数10万回に未達であり、他のフレームと比較しても大幅に低い繰返し回数で破損した。

これらの結果をJIS改正作業部会へ提出し、フレームの疲労試験は、ISOに整合化した疲労試験（ペダル疲労、水平疲労、鉛直疲労）とし、耐振性試験を廃止することの技術データとして活用された。

検証試験に協力をいただいた製造業者にはここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 平成13年度 事故原因究明手法開発調査報告書（独立行政法人 製品評価技術基盤機構）
- 2) 通勤に関するアンケート調査結果（環境省）
- 3) 日本の自転車交通の現状と改善への取り組み（一般財団法人国土技術研究センター）
- 4) 平成22年度自転車の安全使用指針の検討【自転車の利用実態調査より】報告書（一般財団法人自転車産業振興協会）