

クランクの水平落下による衝撃試験のばらつき検証試験—第2報—

—2021年度 自転車等研究開発普及事業—

一般財団法人 自転車産業振興協会 技術研究所

1. はじめに

JIS 規格や(一社)自転車協会の自転車安全基準(BAA)等に基づき、技術研究所で受託として実施している試験は、ほとんどの場合供試品は1個のみであり、製品の生産時のばらつきを考慮したような試験内容にはなっていない。そのため、過去に試験を実施して数値基準の判定値以内であった同じ製品を再度試験した場合に、判定基準値以上の値が生じることがある。

数値基準のある JIS 規格の試験で比較的判定基準値以上の結果がでることが多い、クランクの水平落下による衝撃試験について、昨年度1製品でばらつきの検証を行った。今年度は他の3製品について追加で試験を実施したので、以下に報告する。

2. 供試品

今年度の試験に用いた供試品を表1、写真2~4に示す(No.1は昨年度の供試品)。

表1 供試品

No.	仕様			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
適用車種	シティ車	シティ車	シティ車	MTB 類型車 クロスバイク 等
クランク長(mm)	165	165	165	170
材質	鉄	鉄	鉄	アルミ合金
部位	左クランク	右クランク	左クランク	左クランク
試験数(本)	17	17	20	20
写真	写真1	写真2	写真3	写真4
備考	No. 2 の左クランク	No. 1 の右クランク	----	----



写真1 供試品 No.1



写真3 供試品 No.3



写真2 供試品 No.2



写真4 供試品 No.4

3. 試験方法

JIS D 9301:2019 一般用自転車 5.6.4.3、JIS D 9313-6:2019 自転車-第6部：駆動装置の試験方法 4.4 クランクの水平落下による衝撃強度に基づく試験を実施した。

図1に示すように、鉛直に設置した試験用クランク軸にクランクを水平に固定し、負荷点に質量10 kg（おもり台を含む）を150 mmの高さから10回落下させたとき、クランクの破損の有無及び永久変形量について確認した。JIS規格での判定基準値は、10回落下させたときの測定点における永久変形量が5 mm以下となっている。なお、試験用クランク軸にクランクを固定する際のクランク軸ボルトの締付けトルクは $40 \pm 1 \text{ N}\cdot\text{m}$ とした。

表2 試験条件

	試験条件
おもりの質量(kg)	10
落下高さ(mm)	150
落下回数(回)	10

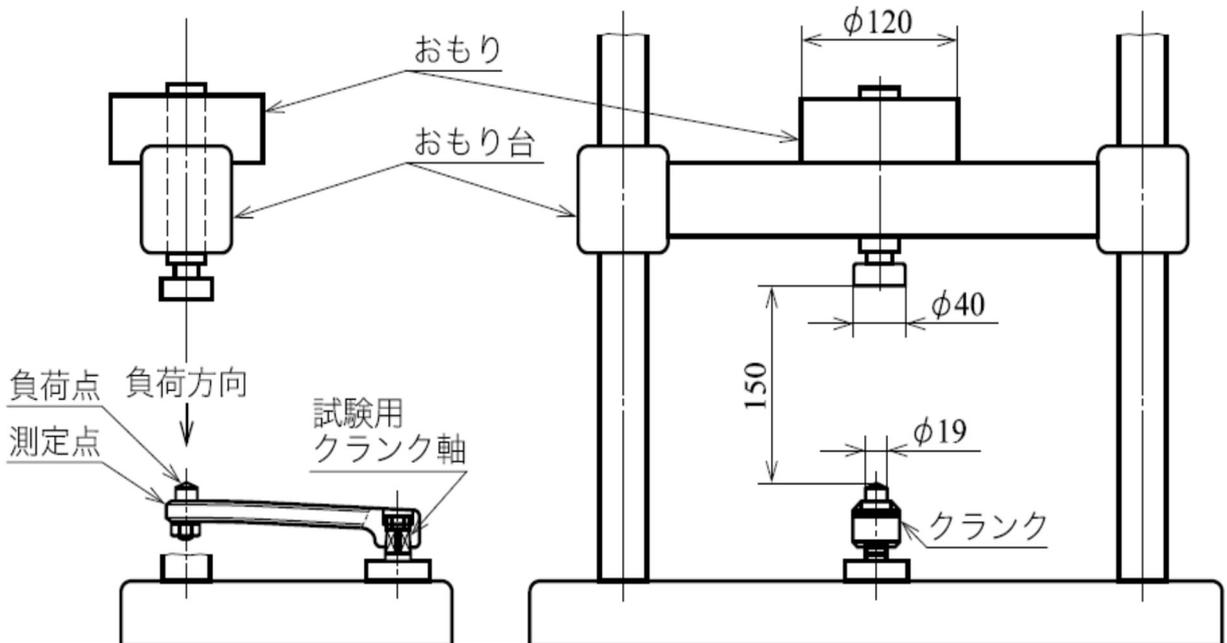


図1 試験方法

4. 試験結果

試験結果を表3、図2に示す（表3.1、図2.1は昨年度実施の供試品 No. 1 の結果）。

表 3.1 供試品 No. 1 試験結果

(単位 : mm)

試料 No. 落下回数(回)	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.66	2.25	2.05	2.21	1.56	2.50	2.30	2.10	2.24	2.28
2	1.82	2.91	2.68	2.90	2.10	3.28	2.89	2.88	2.91	3.14
3	1.99	3.43	2.84	3.38	2.53	3.55	3.28	3.23	3.41	3.80
4	2.03	3.80	3.21	3.70	2.71	3.72	3.48	3.62	3.69	4.20
5	2.09	3.93	3.41	3.98	2.94	3.97	3.70	3.85	3.86	4.46
6	2.14	4.19	3.53	4.20	3.10	4.04	3.83	3.98	4.02	4.67
7	2.18	4.22	3.68	4.48	3.50	4.19	3.89	4.09	4.10	4.80
8	2.26	4.39	3.87	4.58	3.53	4.34	3.97	4.27	4.22	4.88
9	2.28	4.43	4.09	4.78	3.65	4.62	4.16	4.43	4.37	5.08
10	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No. 落下回数(回)	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.91	2.63	1.16	2.12	1.96	1.89	1.87
2	3.64	3.43	1.28	2.76	2.75	2.58	2.76
3	4.15	3.88	1.48	3.32	3.19	3.07	3.30
4	4.47	4.19	1.61	3.59	3.53	3.26	3.60
5	4.69	4.40	1.69	3.79	3.78	3.48	3.86
6	4.83	4.57	1.73	3.93	3.90	3.66	4.10
7	5.06	4.69	1.79	4.13	4.11	3.77	4.30
8	5.17	4.79	1.83	4.25	4.21	3.89	4.41
9	5.26	4.94	1.91	4.40	4.35	4.01	4.50
10	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

最大値(mm)	5.43	最小値(mm)	1.94	平均値(mm)	4.29	標準偏差σ(mm)	0.91
---------	------	---------	------	---------	------	-----------	------

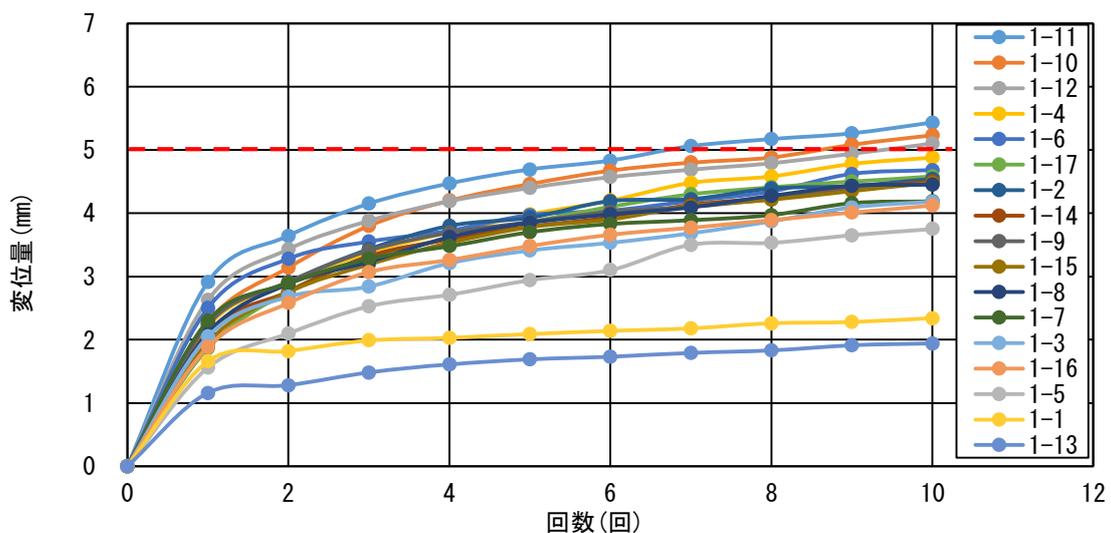


図 2.1 供試品 No. 1 試験結果

表 3.2 供試品 No. 2 試験結果

(単位 : mm)

試料 No. 落下回数(回)	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.09	1.44	1.26	2.00	2.26	1.28	1.19	1.95	1.34	1.91
2	2.83	1.94	1.65	2.81	3.16	1.60	1.48	2.55	1.80	2.56
3	3.26	2.17	1.92	3.25	3.70	1.76	1.69	2.81	2.11	2.96
4	3.55	2.40	2.10	3.68	4.00	1.89	1.83	3.16	2.20	3.19
5	3.81	2.56	2.20	3.76	4.28	1.97	1.93	3.48	2.39	3.39
6	3.98	2.76	2.23	3.90	4.45	2.06	1.95	3.61	2.44	3.59
7	4.12	2.79	2.35	4.06	4.69	2.14	1.98	3.88	2.51	3.72
8	4.20	2.88	2.45	4.15	4.75	2.17	2.05	4.01	2.57	3.76
9	4.34	2.92	2.51	4.22	4.86	2.23	2.13	4.07	2.64	3.84
10	4.40	3.00	2.56	4.32	4.98	2.26	2.20	4.12	2.69	3.86

試料 No. 落下回数(回)	2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.26	1.63	2.01	2.42	1.26	2.08	1.43
2	3.09	2.28	2.79	3.39	1.54	2.74	1.89
3	3.59	2.63	3.26	3.97	1.70	3.18	2.22
4	3.82	2.84	3.60	4.35	1.99	3.46	2.33
5	4.04	3.03	3.79	4.62	2.03	3.56	2.44
6	4.21	3.28	3.96	4.95	2.08	3.67	2.55
7	4.37	3.46	4.12	5.07	2.10	3.77	2.60
8	4.43	3.53	4.28	5.26	2.17	3.93	2.66
9	4.51	3.56	4.33	5.35	2.21	4.01	2.72
10	4.60	3.58	4.39	5.52	2.24	4.07	2.76

最大値(mm)	5.52	最小値(mm)	2.20	平均値(mm)	3.62	標準偏差σ(mm)	1.05
---------	------	---------	------	---------	------	-----------	------

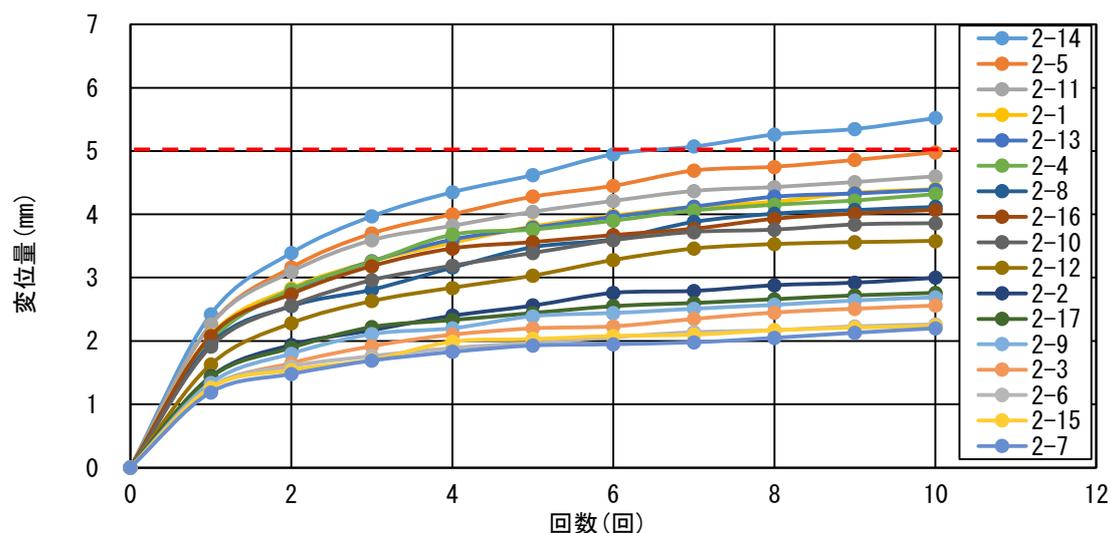


図 2.2 供試品 No. 2 試験結果

表 3.3 供試品 No. 3 試験結果

(単位 : mm)

試料 No. 落下回数(回)	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.02	2.05	2.07	1.91	2.56	1.91	2.09	2.50	2.82	2.78
2	2.81	2.85	2.69	2.68	3.56	2.68	2.87	3.39	3.80	3.74
3	3.24	3.12	2.95	3.13	4.20	3.03	3.34	3.95	4.34	4.46
4	3.51	3.39	3.24	3.53	4.54	3.38	3.70	4.33	4.99	4.72
5	3.77	3.59	3.46	3.78	4.85	3.53	4.00	4.69	5.18	4.99
6	3.91	3.72	3.54	3.90	5.20	3.63	4.14	4.96	5.53	5.37
7	4.05	3.86	3.69	4.07	5.42	3.78	4.33	5.21	5.87	5.51
8	4.16	4.04	3.80	4.19	4.65	3.93	4.50	5.48	6.10	5.62
9	4.22	4.09	3.93	4.33	5.80	4.13	4.64	5.75	6.26	5.88
10	4.38	4.16	4.09	4.52	5.98	4.28	4.88	6.00	6.57	6.01

試料 No. 落下回数(回)	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18	3-19	3-20
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2.55	2.15	2.33	2.34	2.22	2.44	2.43	2.88	3.14	2.19
2	3.57	2.70	3.20	3.20	2.79	3.23	3.23	3.71	4.11	2.92
3	4.09	3.04	3.78	3.65	3.26	3.80	3.75	4.29	4.74	3.44
4	4.62	3.33	4.05	4.04	3.47	4.12	4.07	4.50	5.13	3.77
5	4.98	3.52	4.34	4.38	3.73	4.42	4.41	4.84	5.39	4.10
6	5.48	3.71	4.59	4.44	3.92	4.61	4.77	5.06	5.66	4.30
7	5.53	3.78	4.66	4.64	4.11	4.88	4.81	5.39	5.93	4.42
8	5.78	3.84	4.84	4.79	4.24	4.98	5.00	5.53	6.29	4.67
9	5.95	3.98	4.88	4.95	4.32	5.13	5.10	5.68	6.42	4.86
10	6.22	4.15	5.06	5.12	4.43	5.32	5.40	5.90	6.71	4.92

最大値(mm)	6.71	最小値(mm)	4.09	平均値(mm)	5.21	標準偏差σ(mm)	0.85
---------	------	---------	------	---------	------	-----------	------

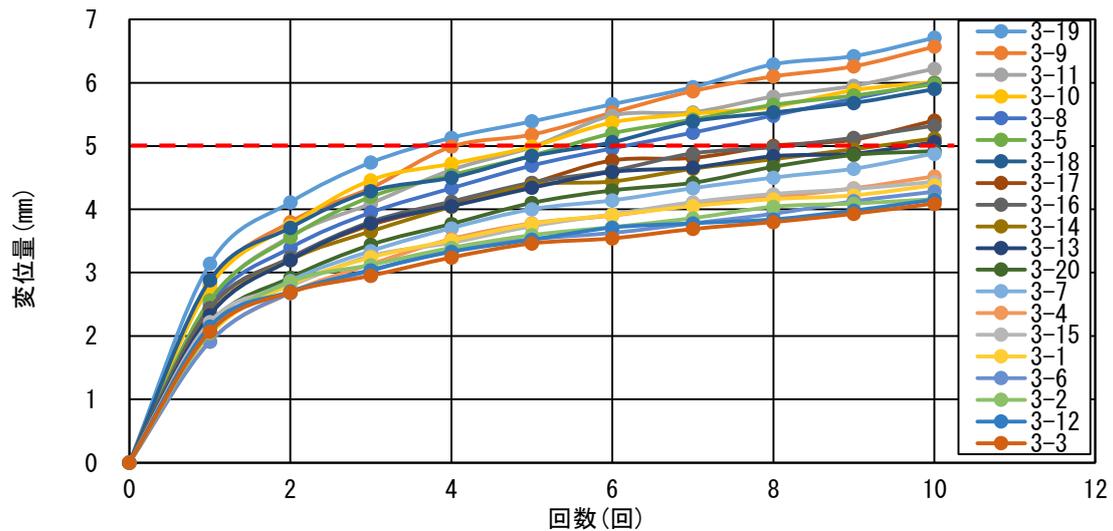


図 2.3 供試品 No. 3 試験結果

表 3.4 供試品 No. 4 試験結果

(単位 : mm)

試料 No. 落下回数(回)	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.93	0.82	0.92	0.85	1.04	1.15	1.04	1.20	1.26	1.68
2	1.08	0.98	1.02	0.97	1.19	1.31	1.14	1.40	1.31	1.94
3	1.21	1.05	1.14	1.11	1.24	1.38	1.20	1.44	1.33	2.00
4	1.25	1.06	1.15	1.11	1.28	1.43	1.20	1.46	1.34	2.07
5	1.27	1.07	1.18	1.13	1.34	1.43	1.21	1.48	1.36	2.09
6	1.28	1.08	1.20	1.13	1.38	1.45	1.23	1.50	1.40	2.11
7	1.28	1.09	1.20	1.15	1.42	1.47	1.27	1.52	1.41	2.12
8	1.28	1.10	1.22	1.15	1.43	1.49	1.29	1.52	1.42	2.14
9	1.29	1.10	1.22	1.17	1.44	1.51	1.31	1.53	1.44	2.15
10	1.29	1.11	1.22	1.18	1.44	1.53	1.33	1.53	1.46	2.17

試料 No. 落下回数(回)	4-11	4-12	4-13	4-14	4-15	4-16	4-17	4-18	4-19	4-20
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.94	1.18	1.03	1.07	0.99	1.26	1.44	1.10	0.91	1.10
2	1.75	1.28	1.22	1.15	1.20	1.44	1.66	1.27	0.99	1.18
3	1.82	1.36	1.25	1.18	1.22	1.50	1.66	1.29	1.02	1.19
4	1.85	1.46	1.29	1.20	1.22	1.55	1.71	1.31	1.02	1.21
5	1.86	1.47	1.29	1.22	1.22	1.63	1.77	1.34	1.03	1.23
6	1.87	1.47	1.29	1.24	1.23	1.63	1.77	1.34	1.06	1.25
7	1.89	1.48	1.30	1.28	1.24	1.63	1.78	1.35	1.06	1.31
8	1.90	1.50	1.30	1.31	1.25	1.63	1.81	1.35	1.07	1.32
9	1.90	1.52	1.32	1.31	1.26	1.64	1.81	1.36	1.08	1.32
10	1.93	1.55	1.32	1.32	1.26	1.66	1.81	1.36	1.09	1.32

最大値(mm)	2.17	最小値(mm)	1.09	平均値(mm)	1.44	標準偏差σ(mm)	0.28
---------	------	---------	------	---------	------	-----------	------

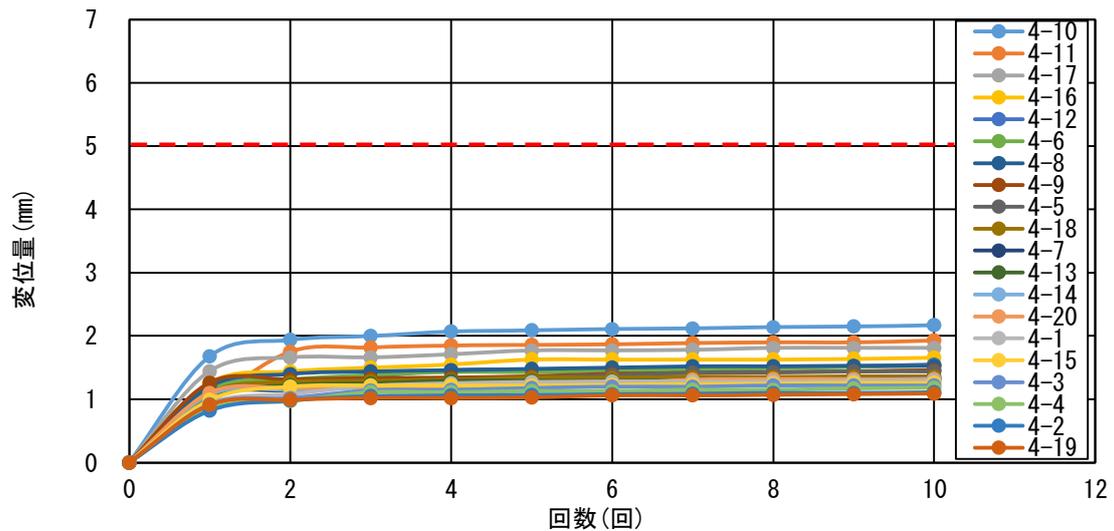


図 2.4 供試品 No. 4 試験結果

供試品 No. 1～No. 4 のそれぞれの試験結果から算出された各値は、表 4 に示す結果となった。

表 4 各クランクにおける試験結果について

	試験本数 (本)	破損本数 (本)	永久変形量 (mm)					5 mm 超え (本)
			最大値	最小値	差	平均値	標準偏差 σ	
No. 1	17	0	5.43	1.94	3.49	4.29	0.91	3
No. 2	17	0	5.52	2.20	3.32	3.62	1.05	1
No. 3	20	0	6.71	4.09	2.62	5.21	0.85	11
No. 4	20	0	2.17	1.09	1.08	1.44	0.28	0

- ・ No. 1～No. 4 の試験を実施したすべてのクランクで、破損は認められなかった。
- ・ JIS 規格の基準値である 5 mm を超えたものが、No. 1 で 3 本、No. 2 で 1 本、No. 3 で 11 本認められた。

5. 考察

5.1 クランクの水平落下による衝撃強度の永久変形量の工程能力について

今回の試験では永久変形量の平均値、標準偏差 σ は表 4 に示す結果であった。量産にて常にこのばらつきが発生していると仮定し、各供試品の状況について整理を行った。

クランクの水平落下による衝撃試験による永久変形量のばらつきが正規分布になると仮定すると、確率分布及び存在確率は、図 3、表 5 に示す形となる。

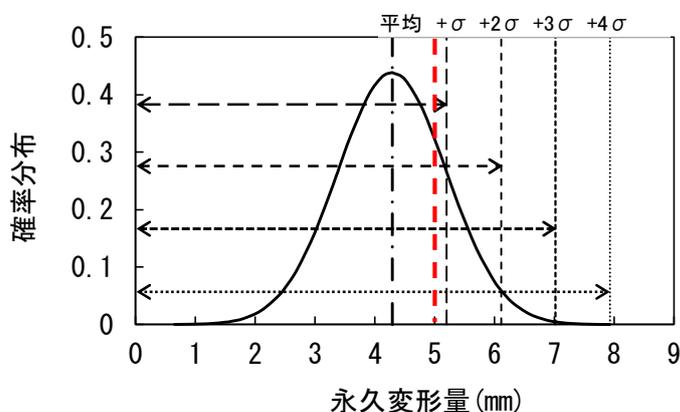


表 5 正規分布での存在確率

範囲	存在確率 (%)
平均値 + σ	84.2
平均値 + 2 σ	97.7
平均値 + 3 σ	99.85
平均値 + 4 σ	99.96

図 3 正規分布として仮定した場合の確率分布

図 3 の状況における工程能力指数 C_{pk} 及び不良率 P を求める。工程能力指数とは、品質管理の分野において、ある工程の持つ工程能力を標準偏差 σ の 3 倍を基準に定量的に評価する指標の一つである。

C_p 、 C_{pk} : 工程能力指数 (C_{pk} は片側規格や実測平均値に偏りがある場合に用いる)

$$C_p = (\text{規格上限} - \text{規格下限}) / (6 \times \sigma)$$

$$C_{pk} = (\text{規格上限} - \text{実測平均値}) / (3 \times \sigma) \quad \text{もしくは}$$

$$= (\text{実測平均値} - \text{規格下限}) / (3 \times \sigma)$$

製品の要求レベルによって、工程能力判断、対応処置に差はあるが、一般的には、表 6 のような考え方になっている。

表 6 工程能力指数について

工程能力指数 C_p, C_{pk}	工程能力判断	対応処置
$C_p, C_{pk} < 0.67$	工程能力は非常に不足	品質が満足できる状態ではなく、規格の再検討、精度向上できる加工工程への変更等、緊急の対策が必要
$0.67 < C_p, C_{pk} \leq 1.00$	工程能力は不足	不良品の発生確率が高く、全数選別検査や工程の管理・改善が必要
$1.00 < C_p, C_{pk} \leq 1.33$	工程能力は許容レベル	現状の管理方法や検査方法の維持が必要
$1.33 < C_p, C_{pk} \leq 1.67$	工程能力は十分	管理方法や検査方法の省力化が可能なレベル
$C_p, C_{pk} \geq 1.67$	工程能力は十分すぎる	安価な加工工程への変更等による原価低減が可能なレベル

不良率 P は、工程能力指数 C_p, C_{pk} を用いることで、以下の式にて計算できる。

$$\text{両側規格の場合} \quad P = (1 - \text{NORMSDIST}(3 \times C_p)) \times 2 \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{片側規格の場合} \quad P = (1 - \text{NORMSDIST}(3 \times C_{pk})) \times 100 \quad (\%)$$

NORMSDIST：表計算ソフトの関数

以上より、今回の各供試品の試験結果から算出される工程能力指数 C_{pk} 及び不良率 P は、表 7 に示す値になった。

表 7 各供試品の工程能力指数 C_{pk} と不良率 P

	永久変形量 (mm)		工程能力指数 C_{pk}	不良率 P
	平均値	標準偏差 σ		
No. 1	4.29	0.91	0.26	21.8
No. 2	3.62	1.05	0.44	9.44
No. 3	5.21	0.85	-0.08	59.8
No. 4	1.44	0.28	4.24	0.00

No. 1～No. 3 では工程能力が非常に不足するレベルであり、試験に合格しない製品がそれぞれ No. 1：21.8%、No. 2：9.44%、No. 3：59.8% 含まれるものと予測される。一方、No. 4 の工程能力は十分すぎるレベルであり、不良率は 0.00% (表計算ソフトでは算出できないレベル) であった。

そこで、今回のNo. 1～No. 4の試験結果の標準偏差 σ の値を変更することなく、 $Cpk \geq 0.33$ 、0.67、1.00、1.33を満足する状況について計算した結果を表8に示す。

表 8.1 供試品 No. 1 の工程能力と永久変形量の平均値の関係

工程能力 Cpk	不良率 (%)	永久変形量の平均値 (mm)	増減量 (mm)	工程能力のレベル
0.26 (現状)	21.8	4.29	0	非常に不足
0.33 (+ σ 相当)	15.8	4.09	-0.20	
0.67 (+2 σ 相当)	2.30	3.18	-1.11	不足
1.00 (+3 σ 相当)	0.15	2.27	-2.02	許容レベル
1.33 (+4 σ 相当)	0.04	1.36	-2.93	十分

表 8.2 供試品 No. 2 の工程能力と永久変形量の平均値の関係

工程能力 Cpk	不良率 (%)	永久変形量の平均値 (mm)	増減量 (mm)	工程能力のレベル
0.33 (+ σ 相当)	15.8	3.95	+0.33	非常に不足
0.44 (現状)	9.44	3.62	0	
0.67 (+2 σ 相当)	2.30	2.90	-0.72	不足
1.00 (+3 σ 相当)	0.15	1.85	-1.77	許容レベル
1.33 (+4 σ 相当)	0.04	0.80	-2.82	十分

表 8.3 供試品 No. 3 の工程能力と永久変形量の平均値の関係

工程能力 Cpk	不良率 (%)	永久変形量の平均値 (mm)	増減量 (mm)	工程能力のレベル
-0.08 (現状)	59.8	5.21	0	非常に不足
0.33 (+ σ 相当)	15.8	4.15	-1.06	
0.67 (+2 σ 相当)	2.30	3.30	-1.91	不足
1.00 (+3 σ 相当)	0.15	2.45	-2.76	許容レベル
1.33 (+4 σ 相当)	0.04	1.60	-3.61	十分

表 8.4 供試品 No. 4 の工程能力と永久変形量の平均値の関係

工程能力 Cpk	不良率 (%)	永久変形量の平均値 (mm)	増減量 (mm)	工程能力のレベル
0.33 (+ σ 相当)	15.8	4.72	+3.28	非常に不足
0.67 (+2 σ 相当)	2.30	4.44	+3.00	不足
1.00 (+3 σ 相当)	0.15	4.16	+2.72	許容レベル
1.33 (+4 σ 相当)	0.04	3.88	+2.44	十分
4.24 (現状)	0.00	1.44	0	十分すぎる

No. 1～No. 3 において量産での全体的な強度アップにて、表 8 に示すように永久変形量の平均値を低下させる必要があるが、 $Cpk > 1.00$ 、 1.33 では、削減量の絶対値が平均値と同等レベルもしくはそれ以上の状況になっており、現状のばらつきのままでは到達するのが非常にきびしいことが推定された。

一方、No. 4 においては現状のばらつきレベルであれば、クランクの肉厚低減等で、永久変形量の平均値を 2.44 mm 増加させるような大幅な強度ダウンを実施しても、 $Cpk > 1.33$ のレベルで JIS 規格の基準値を満足できる製品が量産可能であることが推定された。

5.2 質量と永久変形量の関係について

クランクの肉厚の差によって永久変形量の差が生じているのか検証するため、肉厚の代替え特性としての質量の測定を行った。各供試品の質量と永久変形量について表 9 に示す (No. 2 はギヤ板を含んだ質量)。

表 9.1 供試品 No. 1 の質量と永久変形量について

試料 No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
質量 (g)	415.3	413.1	413.7	416.7	413.8	414.9	417.3	413.5	415.3	415.1
永久変形量 (mm)	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No.	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17
質量 (g)	413.6	413.0	412.7	412.6	414.7	413.7	413.7
永久変形量 (mm)	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

質量の値

最大値 (g)	417.3
最小値 (g)	412.6
差 (g)	4.7
差 (%)	1.1

平均値 (g)	414.3
標準偏差 (g)	1.3

表 9.2 供試品 No. 2 の質量と永久変形量について

試料 No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
質量 (g)	576.3	579.0	583.0	576.0	574.6	578.4	571.0	587.2	570.9	573.7
永久変形量 (mm)	4.40	3.00	2.56	4.32	4.98	2.26	2.20	4.12	2.69	3.86

試料 No.	2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17
質量 (g)	577.3	592.0	576.9	577.3	580.6	576.1	572.0
永久変形量 (mm)	4.60	3.58	4.39	5.52	2.24	4.07	2.76

質量の値

最大値 (g)	592.0
最小値 (g)	570.9
差 (g)	21.1
差 (%)	3.7

平均値 (g)	577.8
標準偏差 (g)	5.5

表 9.3 供試品 No. 3 の質量と永久変形量について

試料 No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
質量 (g)	427.4	426.6	430.8	426.1	424.0	424.3	424.3	427.1	430.5	429.9
永久変形量 (mm)	4.38	4.16	4.09	4.52	5.98	4.28	4.88	6.00	6.57	6.01
試料 No.	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18	3-19	3-20
質量 (g)	424.3	423.0	428.6	428.8	426.7	427.1	431.9	429.8	430.4	426.6
永久変形量 (mm)	6.22	4.15	5.06	5.12	4.43	5.32	5.40	5.90	6.71	4.92

質量の値

最大値 (g)	431.9
最小値 (g)	423.0
差 (g)	8.9
差 (%)	2.1

平均値 (g)	427.4
標準偏差 (g)	2.6

表 9.4 供試品 No. 4 の質量と永久変形量について

試料 No.	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10
質量 (g)	237.6	237.6	237.5	237.9	235.9	237.8	237.0	237.0	236.9	236.6
永久変形量 (mm)	1.29	1.11	1.22	1.18	1.44	1.53	1.33	1.53	1.46	2.17
試料 No.	4-11	4-12	4-13	4-14	4-15	4-16	4-17	4-18	4-19	4-20
質量 (g)	237.0	237.1	238.7	237.0	235.9	236.6	236.8	237.1	237.4	237.4
永久変形量 (mm)	1.93	1.55	1.32	1.32	1.26	1.66	1.81	1.36	1.09	1.32

質量の値

最大値 (g)	238.7
最小値 (g)	235.9
差 (g)	2.8
差 (%)	1.2

平均値 (g)	237.1
標準偏差 (g)	0.7

クランクの水平落下による衝撃強度の試験は、材料力学の曲げ応力のモデルとしては、一点固定端、一点荷重の単純曲げ(図 4)と類似したものになる。このモデルでの曲げ応力 σ_t は式 (1) で表すことができる¹⁾。

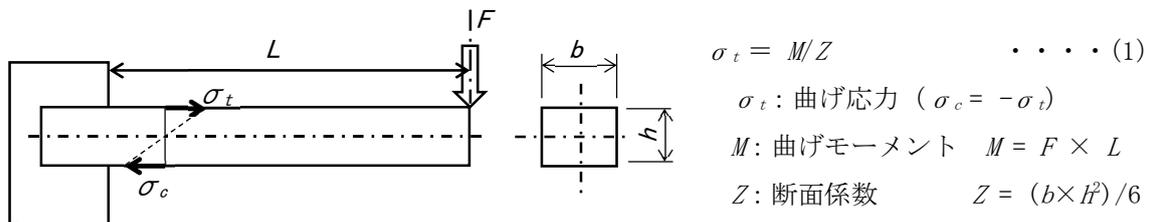


図 4 一点固定端、一点荷重の単純曲げの曲げ応力

式(1)において、供試品の肉厚が影響する因子は断面係数: Z であるが、1次元の指標である長さ 3 つをかけ合わせているため、増加・減少率については、3次元の体積及び質量と同様に扱うことが可能である。つまり、クランクの体積がクランク全体で均一に A % 増加していると仮定すると、質量の A % の増加で曲げ応力 σ_t は逆数分 $[100/A \times 100 (\%)]$ の減少と概算できる。

今回の試験の各供試品における質量及び永久変形量の最大値と最小値の比率について表 10 に示す。

表 10 各供試品における質量及び永久変形量の最大値と最小値の比率

	質量			永久変形量		
	最大値 (g)	最小値 (g)	最小値/最大値 (%)	最大値 (mm)	最小値 (mm)	最小値/最大値 (%)
No. 1	417.3	412.6	98.9	5.43	1.94	35.7
No. 2	592.0	570.9	96.4	5.52	2.20	39.9
No. 3	431.9	423.0	97.9	6.71	4.09	61.0
No. 4	238.7	235.9	98.8	2.17	1.09	50.2

表 10 に示すように質量の差から概算される曲げ応力 σ_t の減少量と永久変形量の比率のレベルが全く合致しない。以上より、永久変形量の差は供試品の肉厚の差によって生じている可能性は低いものと推定され、図 5 に示すとおり、すべての供試品で質量の増加と永久変形量の減少には相関はほとんど認められなかった。

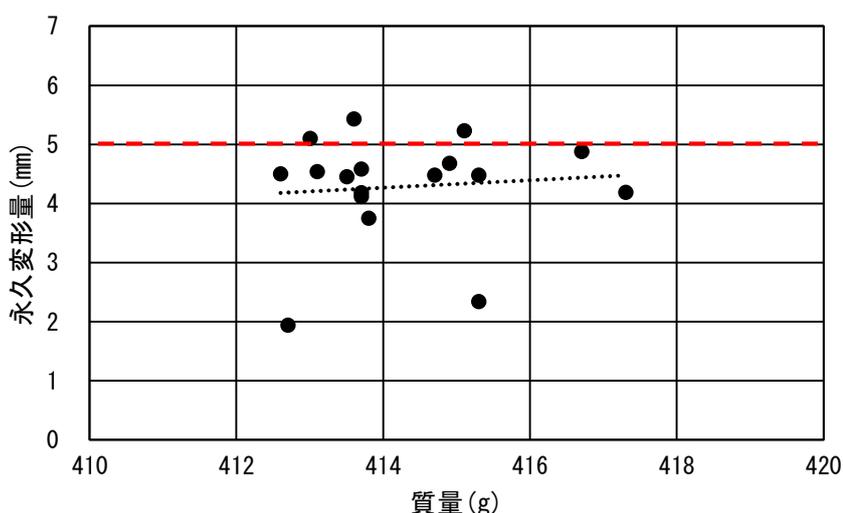


図 5.1 供試品 No. 1 の質量と永久変形量の関係

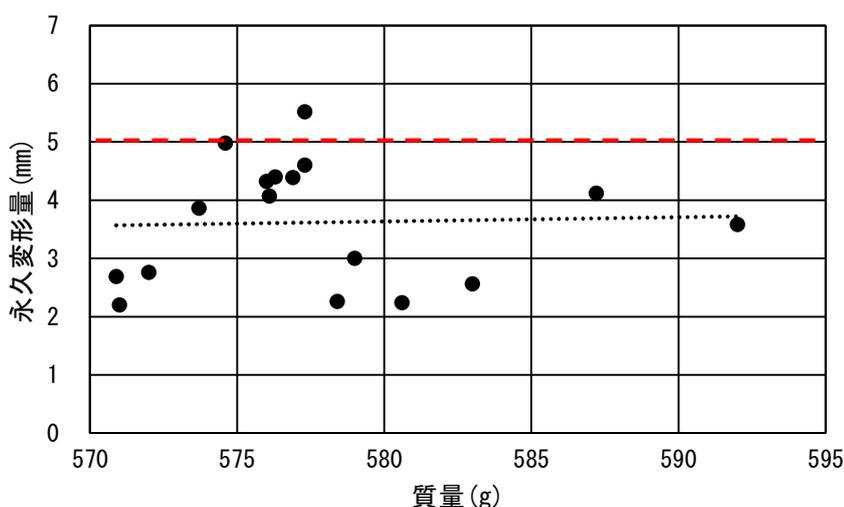


図 5.2 供試品 No. 2 の質量と永久変形量の関係

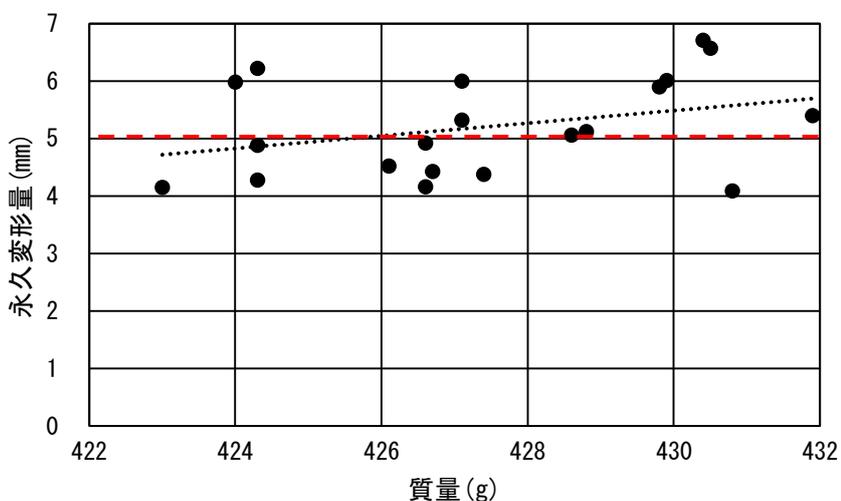


図 5.3 供試品 No. 3 の質量と永久変形量の関係

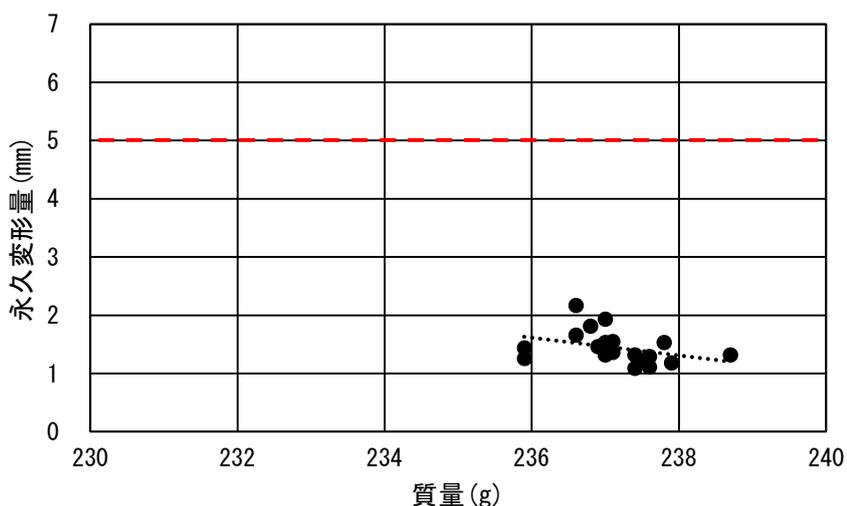


図 5.4 供試品 No. 4 の質量と永久変形量の関係

5.3 硬さと永久変形量の関係について

クランクの水平落下による衝撃試験の永久変形量は、クランクの塑性変形による曲がりによって生じるものである。塑性変形に対する抵抗力を表す指標である硬さについて、今回、試験を実施した各試料で測定した結果を表 11 に示す。硬さは、衝撃試験後の反りが硬さの値に対する影響が小さいクランク内側（試験時には下側）の中央部付近を、ロックウェル硬さの B スケール（HRB : 圧子 1.6 mm 鋼球、荷重 100 kgf）にて各試料 5 箇所測定した。

表 11.1 供試品 No.1 の硬さと永久変形量について

試料 No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
硬さ (HRB) 5 点測定	84.9	81.3	79.5	80.5	82.1	83.1	76.1	79.8	79.7	77.3
	85.1	82.8	79.5	80.6	78.6	81.6	73.6	80.3	78.1	77.4
	85.5	78.9	78.9	82.1	79.0	81.3	74.9	79.1	79.0	76.3
	84.9	79.0	76.9	79.6	77.9	80.8	73.5	79.3	78.4	77.5
	85.9	79.3	77.3	79.9	78.7	81.3	73.9	78.8	77.8	76.0
硬さ (HRB) 平均	85.3	80.3	78.4	80.5	79.3	81.6	74.4	79.5	78.6	76.9
永久変形量 (mm)	2.34	4.54	4.18	4.88	3.75	4.68	4.19	4.45	4.48	5.23

試料 No.	1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17
硬さ (HRB) 5 点測定	77.8	81.1	83.2	77.9	80.5	81.6	82.8
	78.6	81.3	83.6	78.1	82.0	81.7	80.4
	76.2	80.3	83.4	78.6	79.2	79.9	78.3
	77.8	79.6	85.3	79.1	81.2	80.2	76.7
	76.4	80.8	85.8	80.0	79.2	75.9	75.1
硬さ (HRB) 平均	77.4	80.6	84.3	78.7	80.4	79.9	78.7
永久変形量 (mm)	5.43	5.10	1.94	4.50	4.48	4.12	4.58

硬さの値

最大値 (HRB)	85.3
最小値 (HRB)	74.4
差 (HRB)	10.9
差 (%)	13.6

平均値 (HRB)	79.7
標準偏差 (HRB)	2.6

表 11.2 供試品 No.2 の硬さと永久変形量について

試料 No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
硬さ (HRB) 5 点測定	79.5	81.2	83.0	79.9	80.5	84.7	84.2	81.4	82.9	80.3
	78.9	82.1	82.0	78.9	80.1	85.5	87.4	81.3	83.5	81.4
	79.5	80.5	83.0	78.7	79.0	84.6	84.2	80.1	83.1	79.4
	79.9	80.0	85.7	78.6	79.1	86.1	85.0	80.5	84.1	81.5
	79.5	80.9	83.0	79.9	80.3	84.2	84.0	81.1	85.4	81.3
硬さ (HRB) 平均	79.5	80.9	83.3	79.2	79.8	85.0	85.0	80.9	83.8	80.8
永久変形量 (mm)	4.40	3.00	2.56	4.32	4.98	2.26	2.20	4.12	2.69	3.86

試料 No.	2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17
硬さ (HRB) 5 点測定	77.7	79.5	79.9	75.4	86.2	81.9	86.0
	79.3	79.5	80.0	73.5	84.3	81.0	86.3
	79.9	78.3	79.8	74.7	85.3	81.8	86.0
	77.9	79.0	79.0	75.1	85.3	80.8	85.5
	77.6	79.5	79.6	77.5	86.5	81.3	84.8
硬さ (HRB) 平均	78.5	79.2	79.7	75.2	85.5	81.4	85.7
永久変形量 (mm)	4.60	3.58	4.39	5.52	2.24	4.07	2.76

硬さの値

最大値 (HRB)	85.7
最小値 (HRB)	75.2
差 (HRB)	10.5
差 (%)	12.9

平均値 (HRB)	81.4
標準偏差 (HRB)	2.9

表 11.3 供試品 No. 3 の硬さと永久変形量について

試料 No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
硬さ (HRB) 5 点測定	67.6	67.8	66.2	67.7	63.2	67.9	66.9	65.8	64.3	66.7
	66.7	67.7	66.6	67.5	64.1	68.5	65.8	64.2	63.6	66.2
	66.8	65.9	66.8	66.8	63.3	69.7	65.9	65.2	64.8	67.3
	67.5	66.7	65.0	67.9	64.1	68.4	66.2	64.9	64.5	67.3
	66.6	66.9	67.5	66.7	65.2	67.4	66.9	64.3	64.7	67.6
硬さ (HRB) 平均	67.0	67.0	66.4	67.3	64.0	68.4	66.3	64.9	64.4	67.0
永久変形量 (mm)	4.38	4.16	4.09	4.52	5.98	4.28	4.88	6.00	6.57	6.01
試料 No.	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	3-16	3-17	3-18	3-19	3-20
硬さ (HRB) 5 点測定	65.1	71.5	66.1	62.4	71.9	65.1	65.5	64.7	63.6	68.2
	63.9	68.3	65.5	62.4	70.0	64.7	63.8	64.0	63.2	67.9
	63.8	70.4	65.3	62.4	70.8	64.7	64.5	63.3	63.1	67.3
	63.5	69.3	65.8	62.8	70.0	64.5	65.5	63.9	63.6	70.7
	64.6	71.7	66.2	62.0	71.4	65.2	65.9	63.2	63.9	70.2
硬さ (HRB) 平均	64.2	70.2	65.8	62.4	70.8	64.8	65.0	63.8	63.5	68.9
永久変形量 (mm)	6.22	4.15	5.06	5.12	4.43	5.32	5.40	5.90	6.71	4.92

硬さの値

最大値 (HRB)	70.8
最小値 (HRB)	62.4
差 (HRB)	8.4
差 (%)	12.7

平均値 (HRB)	66.1
標準偏差 (HRB)	2.3

表 11.4 供試品 No. 4 の硬さと永久変形量について

試料 No.	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10
硬さ (HRB) 5 点測定	60.3	61.4	59.8	58.1	58.3	58.9	50.1	59.5	58.6	61.3
	59.2	60.4	59.2	58.2	58.2	59.9	60.9	61.0	59.1	61.3
	61.0	61.8	58.1	59.6	58.7	61.5	60.0	59.9	60.4	61.9
	60.8	61.9	58.6	59.3	57.9	61.2	60.3	59.8	59.5	60.6
	58.7	61.0	59.3	58.6	58.6	59.5	61.0	61.1	60.3	61.7
硬さ (HRB) 平均	60.0	61.3	59.0	58.8	58.3	60.2	58.5	60.3	59.6	61.4
永久変形量 (mm)	1.29	1.11	1.22	1.18	1.44	1.53	1.33	1.53	1.46	2.17
試料 No.	4-11	4-12	4-13	4-14	4-15	4-16	4-17	4-18	4-19	4-20
硬さ (HRB) 5 点測定	58.3	60.7	61.3	58.2	61.7	58.1	58.0	58.3	58.1	59.0
	58.5	60.6	61.7	58.3	61.1	58.1	58.7	58.8	58.3	59.3
	57.8	60.9	62.4	58.9	61.5	58.4	58.8	59.7	57.5	59.6
	59.5	61.8	62.8	59.3	61.3	59.5	58.5	58.9	58.1	60.4
	58.5	61.1	62.5	60.1	59.8	58.4	57.1	60.2	57.8	60.5
硬さ (HRB) 平均	58.5	61.0	62.1	59.0	61.1	58.5	58.2	59.2	58.0	59.8
永久変形量 (mm)	1.93	1.55	1.32	1.32	1.26	1.66	1.81	1.36	1.09	1.32

硬さの値

最大値 (HRB)	62.1
最小値 (HRB)	58.0
差 (HRB)	4.2
差 (%)	7.0

平均値 (HRB)	59.6
標準偏差 (HRB)	1.2

今回の供試品の硬さは、表 12 に示す結果であった。

表 12 各供試品における硬さの値 (単位：HRB)

	材質	最大値	最小値	差	平均値	標準偏差
No. 1	鉄	85.3	74.4	10.9	79.7	2.6
No. 2	鉄	85.7	75.2	10.5	81.4	2.9
No. 3	鉄	70.8	62.4	8.4	66.1	2.3
No. 4	アルミ合金	62.1	58.0	4.2	59.6	1.2

材質が鉄である供試品 No. 1～No. 3 の値の範囲(62～85 HRB)を、一般的に使用される硬さの指標の一つであるビッカース硬さに換算すると 110～170 HV であり、一般的な炭素鋼の焼きなまし材レベルの硬さであった。以上より、今回の供試品では、硬さの値のレベルから、強度を向上させる熱処理(焼入れ焼戻し)は実施しておらず、また、硬さにばらつきがあるため、クランクの形状を形成後は、製品の性状を安定させる熱処理(焼ならし)は実施していないものと推定された。

各供試品における硬さの平均値と永久変形量の関係を図 6 に示す。

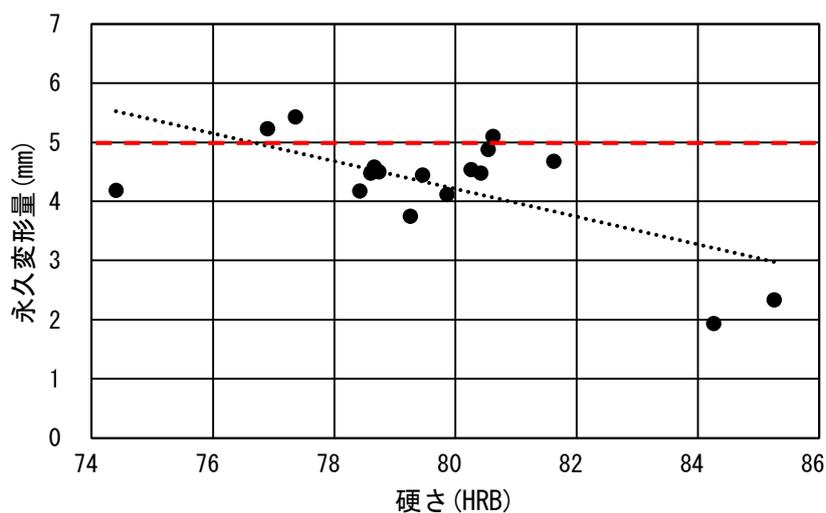


図 6.1 供試品 No.1 硬さと永久変形量の関係

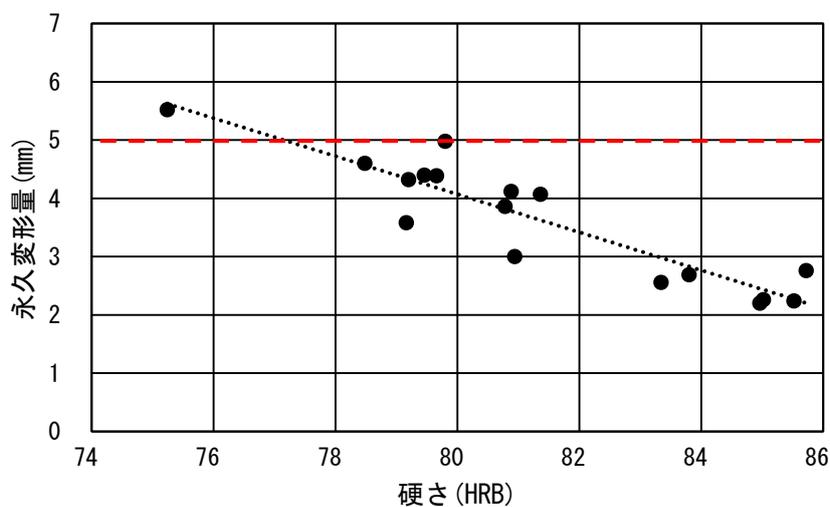


図 6.2 供試品 No.2 硬さと永久変形量の関係

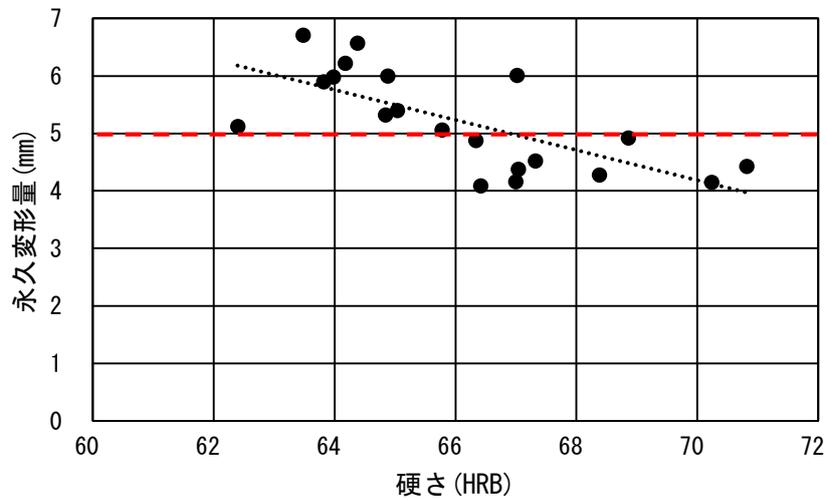


図 6.3 供試品 No.3 硬さと永久変形量の関係

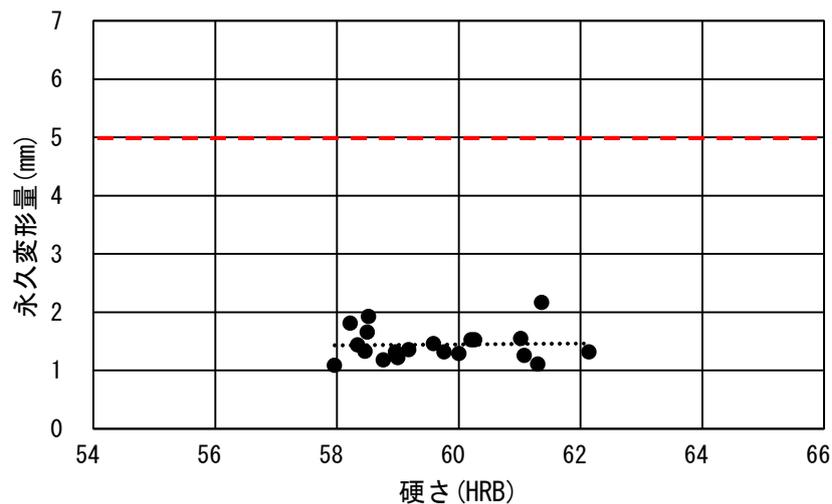


図 6.4 供試品 No.4 硬さと永久変形量の関係

図 6 より供試品 No. 1～No. 3 においては、硬さの増加が永久変形量の減少に大きく影響する傾向が認められた。今回の供試品 No. 1～No. 3 の形状・寸法・サイズにおいては、現状の硬さのレベルでは、永久変形量は硬さの影響を受けやすく、JIS 規格の数値基準である永久変形量 5 mm 以下に対し、合否の結果が分かれる領域になっているものと推定された。

供試品 No. 4 の材質はアルミ合金であるが、他の供試品と比較すると硬さのばらつきが小さいため、永久変形量のばらつきも小さくなっていた。

5.4 断面形状と永久変形量の関係について

供試品 No. 4 のアーム部の断面は、**図 7** に示すようなものであり、質量を増加させることなく、永久変形量を小さくできる形状になっているものと推定された。



図 7 供試品 No.4 のアーム部の断面形状

先に記述したようにクランクの水平落下による衝撃強度の試験は、材料力学の曲げ応力のモデルとしては、一点固定端、一点荷重の単純曲げ(**図 8**)と類似したものになる。このモデルにおいて、上側の曲げ応力 σ_t が引張降伏応力以上になったときに塑性変形し、それがクランクの永久変形量として影響してくる。供試品 No. 4 のような下側に口がある凹形状の場合、断面係数 Z_1 、 Z_2 は式(2)で計算される¹⁾。そこで、断面形状が長手方向で一律と仮定した場合の断面形状と、質量、断面係数 Z 、曲げ応力 σ_t の関係について整理した結果を**表 13** に示す。

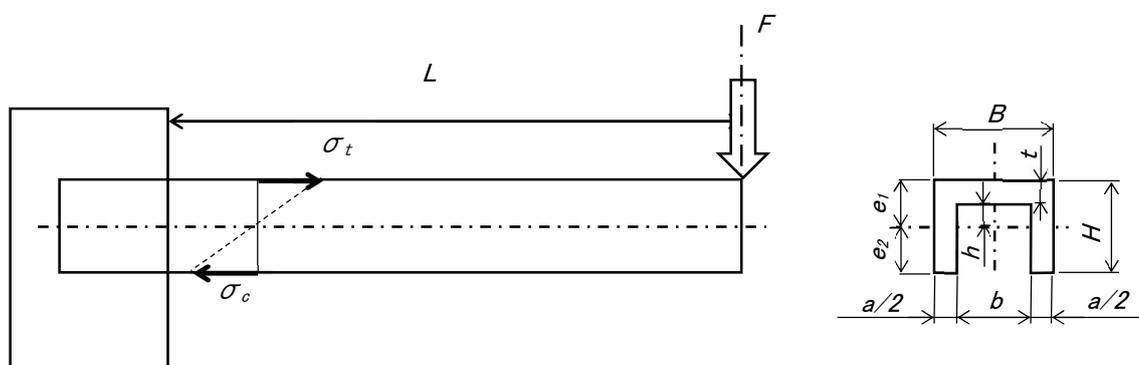


図 8 一点固定端、一点荷重の単純曲げの曲げ応力 (断面凹形状)

$$\sigma_t = M/Z \quad \sigma_t: \text{曲げ応力} \quad M: \text{曲げモーメント} \quad M = F \times L \quad \dots (2)$$

$$Z_1 = I/e_1: \text{重心より上の断面係数}$$

$$Z_2 = I/e_2: \text{重心より下の断面係数}$$

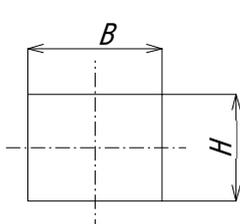
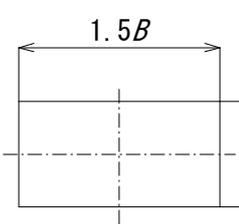
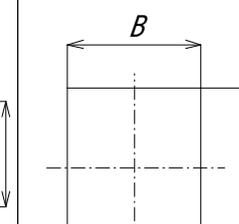
$$I: \text{慣性モーメント} \quad I = 1/3 \cdot (Be_1^3 - bh^3 + ae_2^3)$$

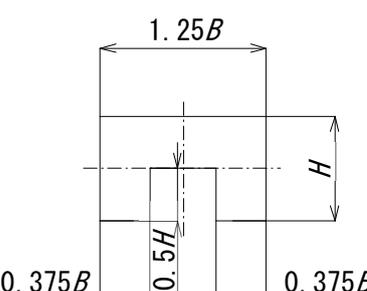
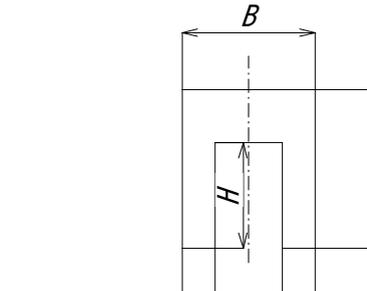
$$e_1, e_2: \text{上面・下面からの重心までの距離}$$

$$e_1 = 1/2 \cdot (ah^2 + bt^2) / (aH + bt)$$

$$e_2 = H - e_1$$

表 13 断面形状と質量、曲げ応力の関係

	I	II	III
断面形状			
質量	1	1.5	1.5
断面係数 Z	1	1.5	2.25
曲げ応力 σ_t	1	0.66	0.44

	IV	V
断面形状		
質量	1	1
断面係数 Z	1.09	1.85
曲げ応力 σ_t	0.92	0.54

質量、断面係数 Z 、曲げ応力 σ_t は、I の値を 1 とした場合の比率を示す。

表 13 に示すように、I に対し幅や厚さを 1.5 倍にした II、III は曲げ応力 σ_t を大幅に小さくすることができるが、質量が 1.5 倍になってしまう。一方、IV や V のように下側に口がある凹形状にすれば、同じ質量でも曲げ応力 σ_t を小さくすることができる。

今回の供試品 No. 1~No. 3 の材質が鉄のクランクは、形状や表面の性状より鍛造で製造されているものと推察された。鍛造であれば鍛造型の変更のみで、大幅に工程を増加することなく、クランクの断面形状の変更ができる。今回の試験結果から量産を考慮した場合、供試品 No. 1~No. 3 は永久変形量が JIS 規格の基準に対し大幅未達のため、量産品の全体的な強度アップとして、形状自体を見直すことも考慮すべきと考えられた。

6. まとめ

クランクの水平落下による衝撃試験のばらつき検証の試験を行った結果、今回の供試品では、以下のような結論が得られた。

- (1) 材質が鉄のクランク 3 製品は、永久変形量の平均値、ばらつきのレベルより、量産品において、JIS 規格の基準である永久変形量 5 mm 以下を満足しない製品が 9.44 %~59.8 %含まれている可能性が推定された。材質がアルミ合金のクランク 1 製品は、量産品で JIS 規格の基準が満足できないものが全く発生しないレベルと判断された。
- (2) 材質が鉄のクランク 3 製品は、質量のばらつきのレベル、質量と永久変形量の関係より、肉厚のばらつきが永久変形量に影響している可能性は低いものと推定された。
- (3) 材質が鉄のクランク 3 製品は、今回の供試品の形状・寸法・サイズにおいては、現状の硬さのレベルでは、硬さが永久変形量に大きく影響する傾向が確認された。
- (4) 今回試験を実施した製品において、材質が鉄のクランク 3 製品は、材質がアルミ合金のクランクの断面形状を参考に、量産品の全体的な強度アップとして、形状自体を見直すことも考慮すべきと考えられた。

—以 上—

参考文献

- 1) JIS にもとづく機械設計製図便覧 第 9 版 理工学社