

技術報告

手掛け穴付き段ボール箱における圧縮強度低下率の推定

白井 勝也^{*}、金井 俊介^{*}

Estimation of Rate of Decrease in Compressive Strength for Corrugated Box with Hand Holes

Katsuya SHIRAI^{*} and Shunsuke KANAI^{*}

手掛け穴付き段ボール箱は、荷役時に作業性を向上させることなどから多くの物流現場で採用されている。一般的にみかん箱と呼ばれる0201形式の段ボール箱であればKellicutt式にて圧縮強度を算出することができるが、手掛け穴付きに関してはKellicutt式が適用できない為、圧縮強度を算出することが難しい。その為、本研究では手掛け穴が圧縮強度に与える影響度に関して分析した上で、手掛け穴付き段ボール箱の任意の辺長さにおける圧縮強度の低下率の考察を行った。結果は、手掛け穴を短側面側に設置した条件下にて、長側面の辺長さ(L)が大きいほど圧縮強度への影響が小さく、反対に短側面の辺長さ(W)が大きいほど圧縮強度への影響が大きい傾向が見られた。また任意の辺長さから圧縮強度の低下率が算出可能となる為、手掛け穴付き段ボール箱の強度把握が容易となり、適正包装化による物流品質向上に期待できると考えられる。

Corrugated boxes with hand holes are used at many logistics sites because they improve work efficiency during cargo handling. Compressive strength can be calculated using the Kellicutt formula for 0201 format corrugated boxes, commonly called “Mikan Bako” in Japanese, but the Kellicutt formula cannot be applied to corrugated boxes with hand holes, making it difficult to calculate the compressive strength. Therefore, in this study, we analyzed the influence of hand holes on compressive strength and then considered the rate of decrease in compressive strength at any side length of a corrugated box with hand holes. The results show that when the hand hole is on the short side, the larger the side length of the long side, the smaller the effect on the compressive strength, and conversely, the longer the side length of the short side, the greater the influence on the compressive strength. Furthermore, since it is possible to calculate the rate of decrease in compressive strength from any side length, it becomes easier to understand the strength of a corrugated box with hand holes, and it is expected that the quality of logistics will improve through appropriate packaging.

キーワード：包装、段ボール箱、手掛け穴、圧縮強度

Keywords : Packaging, Corrugated box, Hand hole, Compressive strength

^{*}ロジスティード(株), LOGISTEED, Ltd.

^{*}連絡者(Corresponding author), ロジスティード(株)(〒104-8350 東京都中央区京橋二丁目9番2号),
LOGISTEED, Ltd. 2-9-2, Kyobashi, Cyuo-ku, Tokyo 104-8350, Japan
Email: ka.shirai.mh@logisteed.com, s-kanai@logisteed.com

1. 緒言

2024 年問題によって物流業界では、近年荷役時間の削減やトラックの積載効率の向上など、様々な取り組みが求められている。

包装の分野では、荷役時間削減に関して、集合包装化や荷役しやすい形状への仕様変更などの取り組みが実施されており、その一例として、手掛け穴付き段ボールがある。段ボール箱自体に持ち手を設置することによって、荷役作業性の向上と落下による破損発生リスクを抑制することができる。

そして、積載効率を向上させる取り組みとしては、段ボール箱の積み数増加や包装材の縮小化などが存在する。しかし、その際に包装材が上部の荷重に耐えられなければ内容物の破損が発生し、物流品質が大きく損なわれてしまう。その為、包装設計者はこれらを踏まえ使用する包装材の強度を把握し、物流品質が損なわれないよう適正な包装材を選定することが日々求められている。

この適正な包装材の選定は、使用する包装材によって強度の求め方は様々である。現在の物流環境で使用されている包装材の多くは段ボール箱であり、一般的に JIS Z 1507¹⁾ 規定の 0201 形式（以後 A 式と表記）と呼ばれる段ボール箱では Kellicutt 式²⁾ にて箱の周辺長と使用する材質から圧縮強度を求めることができる。

しかし、A 式の手掛け穴付きの段ボール箱への適用は不可能である。その為、A 式の手掛け穴付き段ボール箱に関して箱圧縮強度を求める際は、圧縮試験にて調査することが一般的となっているが、任意の箱サイズに対して複数のサンプルを用いて試験を実施する為、

調査が完了するまでに多くの時間を要してしまうことがある。その為、毎回試験を実施するのではなく、一定量の試験データから圧縮強度の推定結果を得ることができれば、効率的な包装材の選定が可能となる。

本研究では手掛け穴付き段ボール箱の圧縮強度に関して任意の周辺長から簡易的に推定できるようにすることにより、2024 年問題を踏まえ、圧縮強度検証の工数削減及び適正包装化による物流品質向上の一助とすることを目的とする。

また本研究に際して、関連する文献のうち、穴幅と応力に関する応力解析³⁾では、手掛け穴に一様分布の持上げ力が働く場合の弾性応力解析を有限要素法にて実施し、諸応力と穴幅の関係を明らかにした。結果から穴上部は強い曲げ及び引張り変形が生じ、穴側部に応力集中が生じることが分かった。その他、圧縮強度低下に及ぼす通気口と手掛け穴の影響に関する研究⁴⁾では特定の箱サイズにて手掛け穴の大きさ、形状、位置を変数とし通気口と合わせ圧縮強度低下を明らかにした。結果として、手掛け穴と通気口を設けた場合に両面段ボール箱だと約 20～50%の強度低下があることが分かった。本研究では、上記文献を踏まえ、手掛け穴付き段ボール箱の周辺長を任意に設定し、箱の圧縮強度に与える影響について着眼するものとする。

本論文の構成は次の通りである。2 章において各試験条件と試験試料、試験結果とその分析結果、3 章において分析方法と推定結果、4 章において手掛け穴作成による影響に関して考察し、最後に 5 章にてまとめとする。

2. 試験

2.1 試験条件

本研究では手掛け穴無し段ボール箱に対する手掛け穴付き段ボール箱の圧縮強度の低下率を推定する。その為、まず使用頻度の高い箱サイズの圧縮強度データを取得し、そのデータから任意の周辺長における圧縮強度の低下率を推定する。

試験条件は手掛け穴の無い A 式の段ボール箱と短側面側に手掛け穴を設けた A 式の段ボール箱の 2 種類に対して JIS Z 0212⁵⁾ に則り、前処置を 23℃/50%RH、24 h (JIS Z 0203⁶⁾) にて実施後、**Fig.1** の圧縮試験機を用いて、圧縮速度 10mm/分の条件で、段ボール箱が座屈した時点での圧縮強度の確認を実施した。

段ボールは、JIS P 3902⁷⁾ 規定の「LB180/MC120/LB180、両面段ボール(AF)」(以後 K5-AF と表記)を使用し、サンプルカッターにて 2 種類の A 式の段ボール箱(長さを L、幅を W、高さを H と表記)を製作した。そして継ぎ代部分はグルー接合、天底面の外フラップは I 字のテープ貼りにて固定を行った。また **Table 1** のように 100～



Fig.1 Compression tester

Table 1 Corrugated box list

No	L(mm)	W(mm)	H(mm)	Box size(cm)
1	500	200	300	100
2	400	300	300	100
3	300	200	500	100
4	600	240	360	120
5	480	360	360	120
6	360	240	600	120
7	700	280	420	140
8	560	420	420	140
9	420	280	700	140
10	800	480	320	160

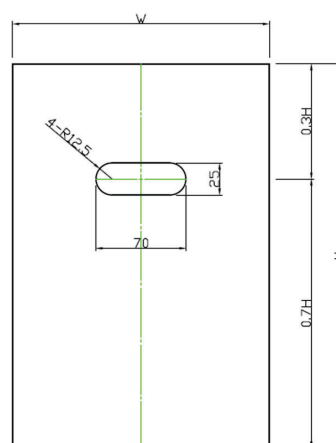


Fig.2 Position of hand hole (Short side)

160 サイズの計 10 種類に対して N=3 にて圧縮試験を実施した。加えて手掛け穴付き段ボール箱に関しては、**Fig.2** のように短側面における箱高さの下から 70%の中心位置に横 70mm×高さ 25mm の手掛け穴を両側面に設置した。

2.2 試験結果

試験風景を **Fig.3** 及び **Fig.4**、試験結果を **Table 2** 及び **Table 3** に示す。試験結果は、周辺長と材質で求められる Kellicutt 簡易式⁸⁾ (以後 Kellicutt 式²⁾ と表記)で得た結果と N=1～3 及びその平均値にて示す。

まず手掛け穴無しの段ボール箱に関してはいずれも Kellicutt 式²⁾ から算出される計算値より大きい結果となった。また手掛け穴付き段ボール箱は、いずれも前者の試験結果よりも小さい値となった。これは手掛け穴付による圧縮強度の低下が考えられ、**Table 4** に示すように平均し 307N、11% の割合で圧縮強度が低下する結果となった。



Fig.3 Test scene (No hole)



Fig.4 Test scene (Hand hole)

Table 2 Test results (No hole)

No	L(mm)	W(mm)	H(mm)	kellicutt(N)	N=1~3(N)			Average(N)
1	500	200	300	2,058	2,283	2,250	2,523	2,352
2	400	300	300	2,058	2,410	2,578	2,454	2,481
3	300	200	500	1,840	2,257	2,129	2,113	2,166
4	600	240	360	2,187	2,496	2,327	2,654	2,492
5	480	360	360	2,187	2,718	3,096	3,139	2,984
6	360	240	600	1,955	2,356	2,521	2,533	2,470
7	700	280	420	2,302	2,604	2,796	2,551	2,650
8	560	420	420	2,302	3,214	3,652	3,810	3,559
9	420	280	700	2,058	2,842	2,468	2,743	2,684
10	800	480	320	2,517	4,011	3,818	4,148	3,992

Table 3 Test results (Hand hole)

No	L(mm)	W(mm)	H(mm)	kellicutt(N)	N=1~3(N)			Average(N)
1	500	200	300	2,058	2,180	2,055	2,004	2,080
2	400	300	300	2,058	2,097	1,993	2,275	2,122
3	300	200	500	1,840	1,908	2,123	2,319	2,117
4	600	240	360	2,187	2,139	2,262	2,471	2,291
5	480	360	360	2,187	2,519	2,678	2,603	2,600
6	360	240	600	1,955	2,103	2,116	2,503	2,241
7	700	280	420	2,302	2,427	2,563	2,647	2,546
8	560	420	420	2,302	2,773	2,592	2,736	2,700
9	420	280	700	2,058	2,348	2,195	2,608	2,384
10	800	480	320	2,517	3,853	3,547	3,660	3,686

Table 4 Test results (Comparison)

No	No hole(N)	Hand hole(N)	Difference(N)	Rate of decrease(%)
1	2,352	2,080	272	12
2	2,481	2,122	359	14
3	2,166	2,117	50	2
4	2,492	2,291	201	8
5	2,984	2,600	384	13
6	2,470	2,241	229	9
7	2,650	2,546	104	4
8	3,559	2,700	859	24
9	2,684	2,384	300	11
10	3,992	3,686	306	8
No1-10 average			307	11

3. 分析

3.1 データ

まず Kellicutt 式²⁾ による理論値と手掛け穴無し、手掛け穴付き段ボール箱の圧縮強度の実測値の相関^{9) 10)} を **Table 5** に示す。データ数は **Table 2** 及び **Table 3** で用いた No1~10 に対する N=1~3 の合計 30 である。結果としては、それぞれ 0.8 以上と高い相関^{9) 10)} を示すことが分かる。

次に 2 章で実施した圧縮試験による箱の圧縮強度に対する L 及び W の相関^{9) 10)} に関して、手掛け穴無しの段ボール箱は **Table 6**、手掛け穴付きの段ボール箱は **Table 7** に示す。これも上記同様データ数は 30 である。結果から、両方とも Kellicutt 式²⁾ の変数に見られる通り、L と W で示す周辺長の影響を大きく受けることが再確認できる。

Table 5 Correlation of test results

	kellicutt	No hole	Hand hole
kellicutt	1.00		
No hole	0.83	1.00	
Hand hole	0.83	0.87	1.00

Table 6 Correlation (No hole)

	Compressive strength	L	W
Compressive strength	1.00		
L	0.67	1.00	
W	0.94	0.61	1.00

Table 7 Correlation (Hand hole)

	Compressive strength	L	W
Compressive strength	1.00		
L	0.74	1.00	
W	0.85	0.61	1.00

また Table 7 に示す手掛け穴付きの相関⁹⁾

¹⁰⁾ データに関しては、L よりも W の方が圧縮強度に対する相関係数^{9) 10)}が高いことから、L より W の方が圧縮強度への影響度が高く、W が大きくなるほど手掛け穴付与により段ボール箱の圧縮強度が低下すると推測できる。以上より、分析の対象とするデータを圧縮強度及び L、W の 3 データとし、手掛け穴を付与することによる圧縮強度の低下率は W が大きい程高くなると仮定し、次項より分析を実施する。

3.2 分析方法

手掛け穴無し及び手掛け穴付き段ボール箱の圧縮強度の比較において、本研究では重回帰分析¹¹⁾を使用する。形状の異なる段ボール箱に関して、被説明変数を圧縮強度 Cs、説明変数を L 及び W とし、圧縮強度の推定式を求める。今回、データ数はそれぞれ 2 章にて行った圧縮試験の実測値の合計 30 とし、

Table 8 VIF (Variance Inflation Factor)

	L	W
No hole	1.80	8.49
Hand hole	2.25	3.60

説明変数の適用範囲は圧縮試験を実施した $300 \leq L \leq 800, 200 \leq W \leq 480$ (mm) と規定する。

また重回帰分析を実施する際は多重共線性を考慮する必要がある。これは説明変数同士が強い相関関係にある場合、回帰係数の推定が不安定になるものだが、Table 6 及び Table 7 に示す L と W の相関係数が 0.61 であること、更には各説明変数に対する多重共線性の度合いに関する指標 VIF¹²⁾は Table 8 に示すように $VIF < 10^{12)}$ の為、多重共線性は無いと言える。

以上より、本研究では手掛け穴の有無による 2 種類の段ボール箱の推定式から、任意の L 及び W における圧縮強度 Cs 及びその低下率を求める。

3.3 結果

3.3.1 手掛け穴無し段ボール箱

重回帰分析¹¹⁾結果を Table 9 に示す。補正 R² は 0.888 と高く精度の高い回帰式となっている。また有意 F の値が小さいことから回帰式に有意性¹³⁾があることがわかる。P-値に関しては有意水準を 5%としており、L は $0.072 > 0.05$ の為、有意性¹³⁾があるとは言えないが Kellicutt 式²⁾にも採用されており、今後任意の L・W の値から低下率を求めることから、本研究においては回帰式に L を係数として採用するものとする。

この結果から得られる回帰式 Cs1 は以下となる。

$$Cs1 = 0.562 \times L + 5.403 \times W + 874.681 - ①$$

また①の回帰式より得られる圧縮強度の一覧は以下の **Table 10** に示す。

3.3.2 手掛け穴付き段ボール箱

重回帰分析¹¹⁾結果を **Table 11** に示す。補正 R² は **3.3.1** の手掛け穴無しよりは低い値となっている。また有意水準を 5% とし、有意 F 及び P-値<0.05 の為、回帰式及び係数は有意¹³⁾であると言える。この結果から得られる回帰式 Cs2 は以下となる。

$$Cs2 = 1.143 \times L + 3.343 \times W + 888.799 - ②$$

また②の回帰式より得られる圧縮強度の一覧は以下の **Table 12** に示す。

Table 9 Regression (No hole)

Regression Statistics					
Multiple R	0.946				
R Square	0.895				
Adjusted R Square	0.888				
Standard Error	192.010				
Observations	30				
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	8529164	4264582	116	5.737E-14
Residual	27	995428	36868		
Total	29	9524592			
		Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept		874.681	138.349	6.322	9.091E-07
L		0.562	0.300	1.875	0.072
W		5.403	0.500	10.801	2.648E-11

Table 10 Compressive strength (No hole)

No hole (N)		L (mm)					
		300	400	500	600	700	800
W (mm)	200	2,124	2,180	2,236	2,292	2,348	2,405
	300	2,664	2,720	2,776	2,833	2,889	2,945
	400	3,204	3,260	3,317	3,373	3,429	3,485
	480	3,637	3,693	3,749	3,805	3,861	3,917

Table 11 Regression (Hand hole)

Regression Statistics					
Multiple R	0.896				
R Square	0.802				
Adjusted R Square	0.788				
Standard Error	220.362				
Observations	30				
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	5317159.3	2658579.663	54.749	3.156E-10
Residual	27	1311099.2	48559.229		
Total	29	6628258.5			
		Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept		888.799	158.778	5.598	6.144E-06
L		1.143	0.344	3.323	0.003
W		3.343	0.574	5.823	3.379E-06

Table 12 Compressive strength (Hand hole)

Hand hole (N)		L (mm)					
		300	400	500	600	700	800
W (mm)	200	1,900	2,014	2,129	2,243	2,357	2,471
	300	2,234	2,349	2,463	2,577	2,691	2,806
	400	2,569	2,683	2,797	2,911	3,026	3,140
	480	2,836	2,950	3,065	3,179	3,293	3,407

3.3.3 圧縮強度の低下率

①式及び②式より、まずは手掛け穴を作成することによる圧縮強度の低減値を Cs3 として算出する。①式から②式の差を取ることで求められる為、以下に示す。

$$Cs3 = Cs1 - Cs2$$

$$= -0.581 \times L + 2.06 \times W - 14.118 - ③$$

また、③より手掛け穴無しの段ボール箱に対する低下率は以下の計算によって求めることができる。

$$\text{Rate of decrease} = \frac{Cs3}{Cs1} \times 100 \quad - (4)$$

④より得られる圧縮強度の低下率のグラフ及び一覧は **Fig.5** 及び **Table 13** に示す。また今回、④式の計算結果の値が負（手掛け穴の設置によって圧縮強度が増大）となるものに関しては値を 0 として算出している。

以上より、算出される値は手掛け穴を設置した場合の圧縮強度の低下率を示す為、この結果から W が大きいほど圧縮強度の低下を招き、L が大きいほど圧縮強度の低下率が小さくなると言える。

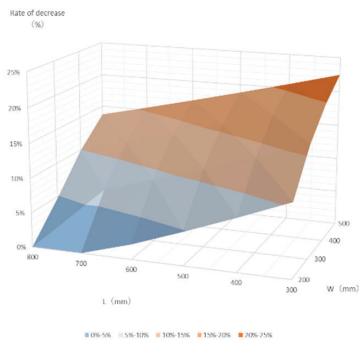


Fig.5 Rate of decrease (Graph)

Table 13 Rate of decrease (List)

Rate of decrease (%)		L (mm)					
		300	400	500	600	700	800
W (mm)	200	11%	8%	5%	2%	0%	0%
	300	16%	14%	11%	9%	7%	5%
	400	20%	18%	16%	14%	12%	10%
	480	22%	20%	18%	16%	15%	13%

3.3.4 妥当性の検証

本研究においては、圧縮強度低下率の実測値と理論値の誤差の閾値を **Table 13** に示す最大の低下率 22% (L=300,W=480) の 1/10 となる 2.2%と設定し、任意のデータにおける低下率の平均誤差が閾値以下であるかを検証する。

任意の L 及び W における圧縮強度低下率の実測値と理論値の誤差に関して **Table 14** に示す。データ数を 10 (サンプル数 N=3) とした場合、絶対誤差の平均値で表される MAE¹⁴⁾ は 3.9%となる。

また **Fig.6** では実測値と理論値の関係を散布図に示した。この時、圧縮強度低下率の実測値と理論値の誤差が生じない場合は y=x の

Table 14 Absolute error of actual values and theoretical values

No	L (mm)	W (mm)	Actual values (%)	Theoretical values (%)	Absolute error (%)
1	500	200	11.6	4.8	6.8
2	400	300	14.5	13.7	0.8
3	300	200	2.3	10.5	8.2
4	600	240	8.1	5.3	2.8
5	480	360	12.9	14.5	1.7
6	360	240	9.3	11.4	2.1
7	700	280	3.9	5.6	1.7
8	560	420	24.1	15.2	8.9
9	420	280	11.2	12.2	1.0
10	800	480	7.7	13.0	5.4
MAE (Mean Absolute Error)					3.9

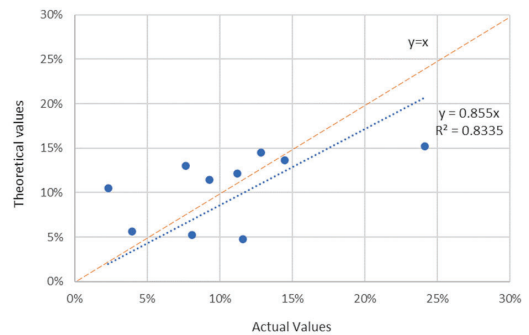


Fig.6 Scatter plot of Actual values and Theoretical values

直線を示すが、今回 2 変数の近似直線を作成した場合、 $y=0.855x$ となり圧縮強度低下率の実測値が大きくなるほど理論値は実測値から下振れし、その誤差が大きくなっていく傾向が見られた。

以上より $MAE^{14)}=3.9>2.2\%$ (閾値) となる為、本研究において妥当性があるとは言えない結果となった。これは **Table 14** に示す No.3 及び No.8 の絶対誤差の値が大きく、 $MAE^{14)}$ の結果に影響を与えたことが考えられる。

4. 考察

得られた推定結果より、短側面側に手掛け穴を設置した場合、L と W の長さ及びその比率によって圧縮強度の低下率に大きく影響を及ぼすことが分かった。その中で④式において一部負の値をとるものに関しては、今回線形の回帰式にて推定を行ったこと、そして箱サイズの大きいものに対して十分なサンプルデータを準備できていなかったことの 2 点が主な原因と考えられる。

また妥当性の検証に関しては、誤差の評価指標である $MAE^{14)}$ は閾値を超える結果となった。これも実測値の計測に使用したデータ数が 10 (N=3) と少ないことから回帰式から得られる理論値と実測値のデータの誤差が大きくなったと考えられる為、今後サンプルデータを増やすことで、より精度の高い回帰式が得られ、 $MAE^{14)}$ の向上にも期待ができると考える。

5. まとめ

本研究の目的である包装設計に関する工数削減と物流品質の向上に関しては、Kellicutt 式²⁾にて算出された圧縮強度から **Fig.5** 及び **Table 13** の低下率を乗ずることによって適用範囲においては簡易的に手掛け穴を加味した圧縮強度の算出が可能となる。

しかし、本研究にて使用したデータ数は手掛け穴無し/手掛け穴付きのそれぞれ 30 と少なく、誤差が閾値を超える平均 3.9% 発生する為、現状では妥当性があるとは言えず、あくまでも参考値としての結果とする。以上より、今後精度の高い推定結果を得るためにデータ数を増やすなど更なる検討が必要である。

また本研究では、段ボール箱の材質を K5-AF とし、手掛け穴のサイズおよび位置を指定して分析を行ったが、今後適用可能な範囲を広げることによって、本研究における効果が期待できると考える。

<参考文献>

- 1) JIS Z 1507(2013),段ボール箱の形式
- 2) K.Q. Kellicutt, E. F. Landt, Basic design data for the use of fiberboard in shipping containers, Fiber Containers, 36(12), p.62(1951)
- 3) 松島理,松島成夫,段ボール箱手掛け穴の応力解析-穴幅と応力との関係-,紙パルプ技術協会誌,57(9),p1350(2003)
- 4) Jay Singh, Eric Olsen, S. P. Singh, J. Manley, F. Wallace, The Effect of Ventilation and Hand Holes on Loss of Compression Strength in Corrugated Boxes,

Journal of Applied Packaging Research,
2(4), p.227(2008)

- 5) JIS Z 0212(1998),包装貨物及び容器－圧縮
試験方法
- 6) JIS Z 0203(2000), 包装貨物－試験の前処置
- 7) JIS P 3902(2011), 段ボール用ライナ
- 8) 川端洋一,包装技術関係機関合同会議,第二
回 研究発表会,p.8 (1969)
- 9) 清水邦夫,”統計スプレッドシート・シリーズ
4 相関係数”,近代科学社,p.9(2020)
- 10)熊本県、平成 29 年度市町村民経済計算
分析ツール（相関係数とは）(2020 年)、
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/13589.pdf> (2024 年 2 月 27 日)
- 11) 君山由良,”統計解説書シリーズ A-55 重回
帰分析の利用法”,データ分析研究
所,p.29(2004)
- 12) Staat、【例題で解説】多重共線性・VIF
(2023 年)、
<https://corvus-window.com> (2024 年 2 月
27 日)
- 13) DATA BIZ LABO、重回帰分析とは？
(2024 年)、
[https://data-viz-lab.com/multiple-
regression-analysis](https://data-viz-lab.com/multiple-regression-analysis) (2024 年 2 月 27 日)
- 14) スタビジ、MSE、RMSE、MAE につい
て解説!～定義と Python による実装～
(2024 年)、
https://toukei-lab.com/rmse_mae_mse
(2024 年 5 月 21 日)

(原稿受付 2024年1月10日)

(採録受理 2024年5月24日)