

パレットラックシステムの進行性崩壊防止 に関する数値解析的研究

Numerical Study on the Progressive Collapse Prevention of Pallet Rack Systems

謝 氷清¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Bingqing Xie and Daigoro Isobe

1)筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1丁目, E-mail: s2220893@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1丁目, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Pallet racking systems are most commonly used in logistics warehouses to store goods on pallets. This racking system is often likely to collapse when hit by a forklift. Reinforcing the rack system with plan braces has been considered as a mean to resist the collapse of the racking system. However, previous studies have not investigated the number of levels of plan braces needed, and most analyses have focused on single-level racks or two-row racks. As the existing rack system in the warehouse is assembled across aisles and connected to adjacent racks by components, it is essential to develop collapse control methods for multiple rows of shelves installed across aisles. This study uses numerical analysis to verify the resistance to collapse of the rack system with plan braces when the forklift impacts at 0° and 45° angles. The simulation code employed is the ASI-Gauss code.

Key Words : Pallet rack system, Plan brace, Progressive collapse, Forklift, ASI-Gauss code

1. 緒言

パレットラックシステムは、倉庫で商品を保管するために最もよく使われる収納棚の一種である。このラックシステムは、軽量で薄く、熱間圧延された鋼材で作られているため、軽くて簡単に設置することができ、柔軟なデザインが可能である。また、軽量でありながら、自重を大幅に上回る荷重に耐えることができる。

一方、荷物の入出庫の際に、フォークリフトがラックに

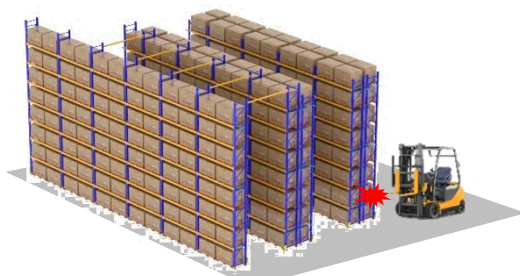


図-1 ラックに衝突するフォークリフト



図-2 ラック崩壊事故後の被害の様子[1]

衝突する(図-1)ことでラックが崩壊し、倉庫内の他のラックにも連鎖的に崩壊が広がる現象、つまりラックシステムの進行的崩壊現象が問題となっている[1]。崩壊が起これば、図-2に示すようにラックシステムに保管されている荷物が落下して破損し、ラックシステム本体の価格以上に大きな経済的損失となる。さらには、人命が危険にさらされる可能性もある。そこで、ラックシステムの崩壊を抑制する方法として、ラックを平面ブレースで補強することが検討されている。先行研究[2]によれば、ラックに平面ブレースを設置すると、ラックの変形を効果的に抑制することができる。ただし、平面ブレースがラックの崩壊を抑制する効果については検討されていない。

本研究では、3列のラックおよびフォークリフトをモデル化し、平面ブレースの有無および設置する段を変化させて数値解析を実施する。そして、平面ブレースの崩壊抑制効果の検証を行う。

2. 解析手法

本研究で用いた有限要素解析手法は ASI-Gauss 法[3]である。進行性崩壊現象を再現するために部材の破断アルゴリズムを導入したコードを用いた。本節では、破断アルゴリズムについて説明する。

塑性ヒンジが生じている要素について、次の条件を満たした場合に破断が発生すると判定する。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad (1)$$

$$\left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1$$

ここで、 κ_x , κ_y , γ_{xz} , γ_{yz} , ε_z はそれぞれx軸, y軸回りの曲率, x軸, y軸方向のせん断ひずみ, 引張軸ひずみであり, 添字0は破断臨界値を示す. 本研究では, 上記5種類の破断臨界値を各種実験や材料定数から与える. 部材破断が判定された場合, その要素に生じている断面力が瞬時に解放される. すなわち, 当該要素に生じている断面力の全成分を0にする.

3. サイクル試験結果の再現

解析モデルの精緻化を図るため, Godrej社[4]が1列のラックシステムに対し実施した応力サイクル試験の再現を試みた. 応力サイクル試験とは, 材料や部品, 製品の信頼性や耐久性を評価するための試験方法である. 試験中に一定の振幅と周波数を持つ応力が周期的に加えられ, 構造体の変形状態を評価する.

3.1 接合部のモデル化

ラックシステムの支柱とビームは, 図-3に示すようにビーム両端のフックにビームピンと呼ばれるZ型のピンを挿入することで固定されている. ビームと支柱の接合部の剛性は, ビームピンおよびビームピンで接続されたビームと支柱の一部を含んだ箇所の剛性とし, 10 mmの微小要素にビームピンの1.5倍の剛性を与えることで模擬した.

3.2 サイクル試験用のモデルと荷重条件

試験対象としたパレットラックは, 欧州規格EN15512を満たすものである. また, 各部材の材質はインド規格IS5986とIS2062に従うGodrej社のものとした. なお, 対象とするラックの一棚当たりの積載荷重は, 最大積載荷重の2000 kgである. パレットラック1列の寸法は, 図-4に示すように高さ6300 mm, 奥行き1000 mm, ビーム長さは2800 mmであり, 高さ1500 mm毎にビームが設置されている. ラックの奥行方向をCA (Cross Aisle) 方向とし, ビーム方向をDA (Down Aisle) 方向とする. 図-5に示すようにCase 1ではDA方向に1.5 kNの往復サイクル力を加え, Case 2ではCA方向に1.5 kNの往復サイクル力を加えた.

3.3 サイクル試験結果と解析結果の比較

試験結果および解析結果の荷重変位曲線を図-6 (Case 1) および図-7 (Case 2) に示す. Case 1の試験結果と解析結

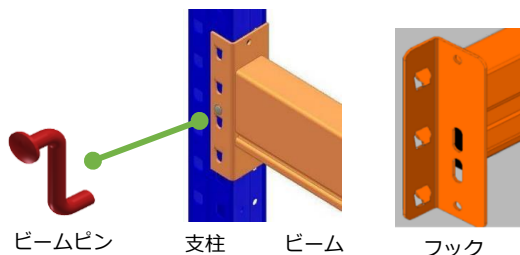


図-3 支柱とビームの接合部

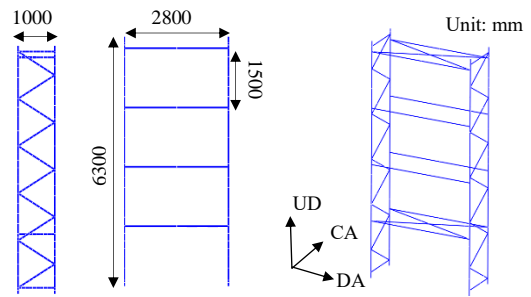


図-4 試験用ラックの寸法と全体モデル

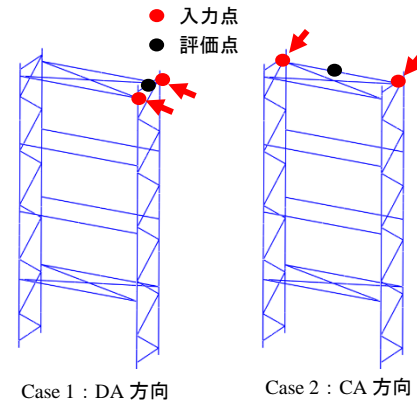


図-5 解析条件

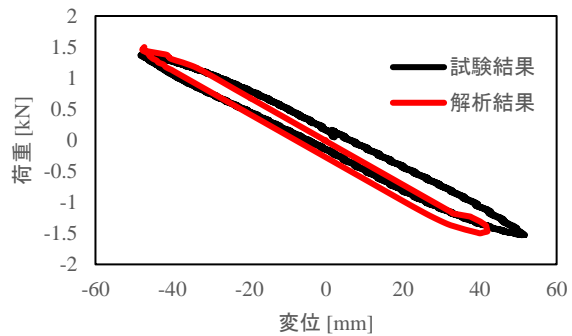


図-6 荷重変位関係 (Case 1)

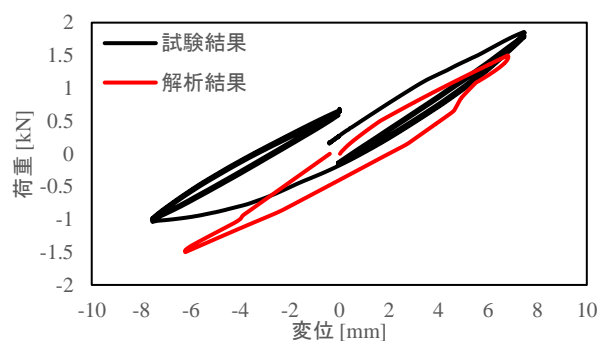


図-7 荷重変位関係 (Case 2)

果はループの大きさも含め良好に一致している. 解析結果によると, 支柱とビームの接合部に塑性化が生じていた. また, Case 2の場合はループの大きさに多少の差異があるが, 両者は定性的にほぼ一致している. 解析結果によると, 支柱と鉛直ブレースの接合部に塑性化が生じていた.

4. フォークリフトとパレットラックの解析モデ

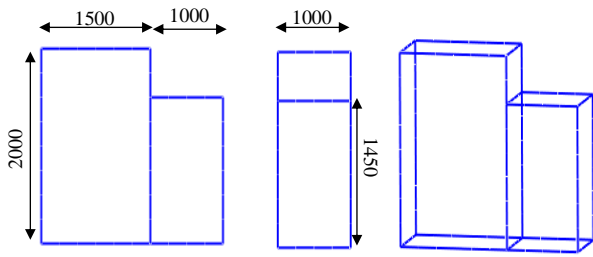


図-8 フォークリフトの解析モデル

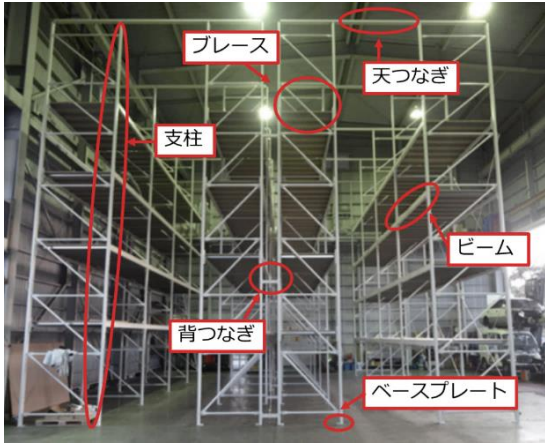


図-9 パレットラックシステム[5]

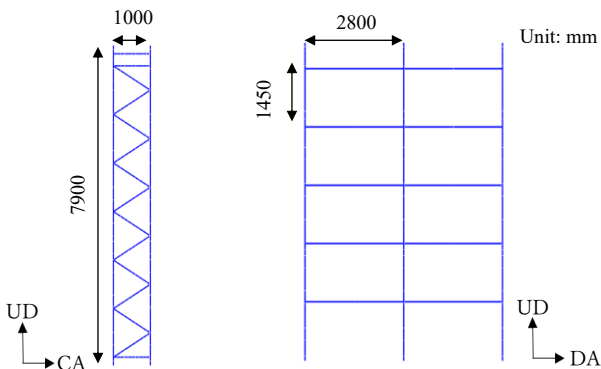


図-10 ラックの寸法

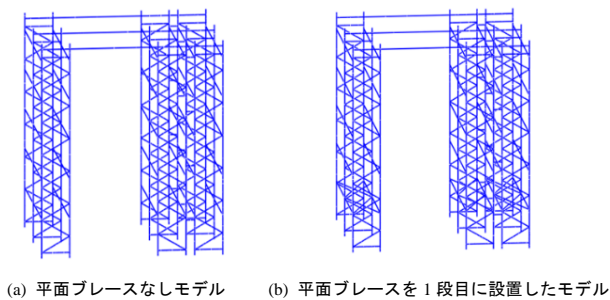


図-11 ラックシステムの全体モデル

ル

4.1 フォークリフトの解析モデル

本研究でモデル化したフォークリフトは、図-8に示すように長さ1500 mm、幅1000 mm、高さ2000 mmである。フォークリフトの前に置かれた荷物の寸法は、長さ1000 mm、

幅1000 mm、高さ1450 mmある。フォークリフトと荷物の合計重量は3600 kgである。

4.2 パレットラックの解析モデル

本節で解析対象とするパレットラックは、前節と同様に欧州規格EN15512に従い、また、部材の材質はインド規格IS5986とIS2062に従うGodrej社のものとした。なお、対象とするラックの一棚当たりの最大積載荷重は2000 kgとした。パレットラックの写真を図-9[5]に示す。支柱、ビーム、鉛直ブレース、天つなぎ、背つなぎ、ベースプレート、平面ブレースを全て線形Timoshenkoはり要素でモデル化した。弾性係数、降伏応力、ポアソン比、密度はそれぞれ、205 GPa, 235 MPa, 0.3, $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ である。パレットラック1列の寸法は、図-10に示すように高さ7900 mm、奥行き1000 mm、ビーム長さは2800 mmであり、高さ1450 mm毎にビームが設置してある。前節と同様に、ラックの奥行き方向をCA (Cross Aisle)方向とし、ビーム方向をDA(Down Aisle)方向とする。

本研究では、ビーム段数が5段で2つの間口を持つラックを1列とし、3列のラックを組み合わせたモデルを作成した。図-11にパレットラックモデルの概要を示す。2列のラックが背つなぎによって接続され、もう一方の1列のラックと天つなぎによって接続されている。平面ブレースを設置しないモデル、1~5段にそれぞれ平面ブレースを設置したモデル、1段と5段の両方に平面ブレースを設置したモデルの計7つを作成した。本研究では、荷物とパレットの重量をビーム要素に密度として加えることで考慮した。

4.3 破断条件

ラックの構成部材を接続している六角ボルトおよび支

表-1 破断条件

項目	接続される部材	破断条件
六角ボルト (M10)	支柱-鉛直ブレース (1本)	引張軸力 $\geq 23.2 \text{ kN}$ (/ボルト1本) or せん断力 $\geq 13.9 \text{ kN}$ (/ボルト1本)
	支柱-ベースプレート (2本)	
	支柱-背つなぎ (2本)	
	支柱-天つなぎ (4本)	
六角ボルト (M12)	ベースプレート-地面 (2本)	引張軸力 $\geq 33.7 \text{ kN}$ (/ボルト1本) or せん断力 $\geq 20.2 \text{ kN}$ (/ボルト1本)
ビームピン	支柱-ビーム	せん断力 $\geq 6.04 \text{ kN}$
フック	支柱-ビーム	せん断力 $\geq 26.5 \text{ kN}$ or 曲げモーメント $\geq 1.5 \text{ kNm}$

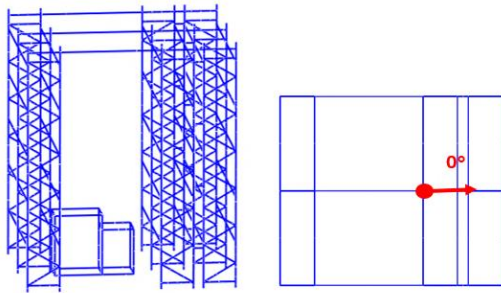


図-12 0度方向の衝突

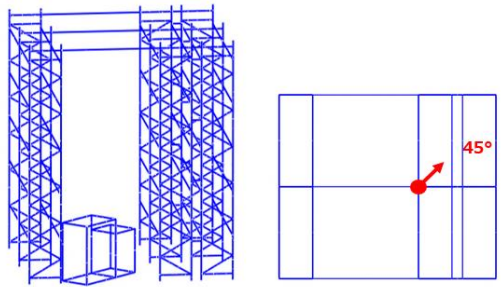


図-13 45度方向の衝突

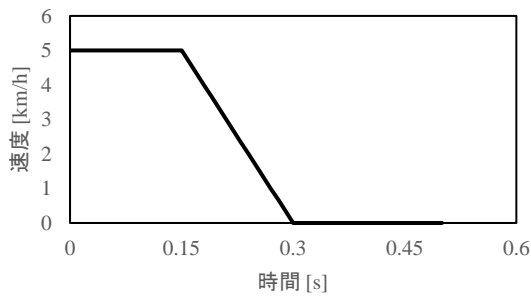


図-14 フォークリフトの衝突時間

柱とビームの接続部の破断条件を表-1 に示す。基本的には 2 節で述べた部材の破断アルゴリズムと同様の処理を行うが、六角ボルトおよび支柱とビームの接続部に対しては、表に示すように荷重条件も設定した。六角ボルトについては、材質は SS400 とした。SS400 の引張強さ 400 N/mm² とボルトの有効断面積から六角ボルトの破断条件を設定した。支柱とビームは 3.1 節で述べたように、ビームが両端についたフックで支柱に接続された上で、ビームピンと呼ばれる Z 型のピンで固定されている。この接続部の破断条件については、Godrej 社[4]の情報提供に基づいて決定した。

5. フォークリフトの衝突解析結果

荷物を積んだフォークリフトが、0度(図-12)と45度の方向(図-13)から図に示す点に5 km/hで衝突することを仮定した。フォークリフトがラックに衝突した後、0.15 s は等速で走行し、その後の0.15 sで線形的に減速して完全に停止(0 km/h)することとした(図-14)。

図-15および図-16に示すように、フォークリフトが0度方向および45度方向から衝突した場合のいずれも、平面

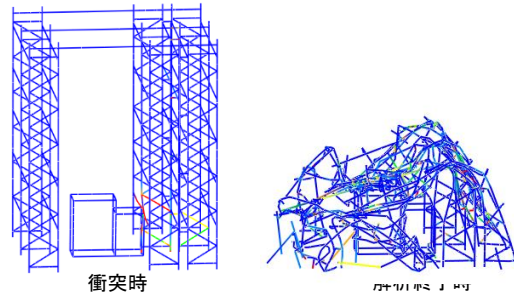


図-15 ラックシステムの挙動(平面ブレースなし、0度方向衝突)

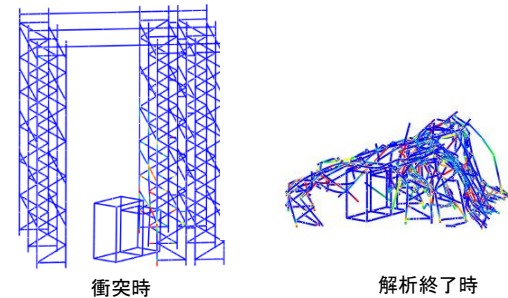


図-16 ラックシステムの挙動(平面ブレースなし、45度方向衝突)

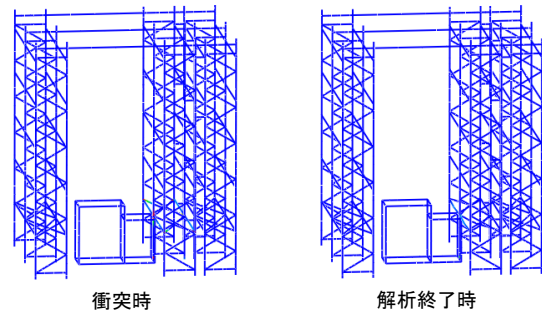


図-17 ラックシステムの挙動(平面ブレースを1段目に設置、0度方向衝突)

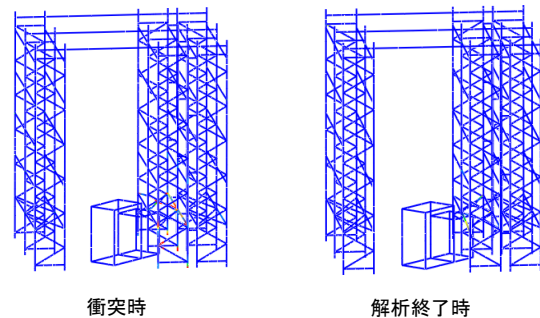


図-18 ラックシステムの挙動(平面ブレースを1段目に設置、45度方向衝突)

ブレースがないラックシステムは全体的に崩壊した。しかし、1段目に平面ブレースを設置した場合には、崩壊は発生しなかった(図-17、図-18)。また、5段目に平面ブレースを設置した場合には、0度方向で崩壊は発生しなかったが(図-19)、45度方向では崩壊が発生した(図-20)。表2と表3より、平面ブレースを2段目、3段目と4段目に設置した場合は、どの方向でも崩壊が発生した。1段目と5段

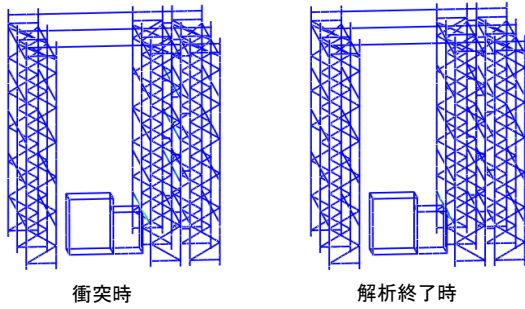


図-19 ラックシステムの挙動（平面ブレースを5段目に設置，0度方向衝突）

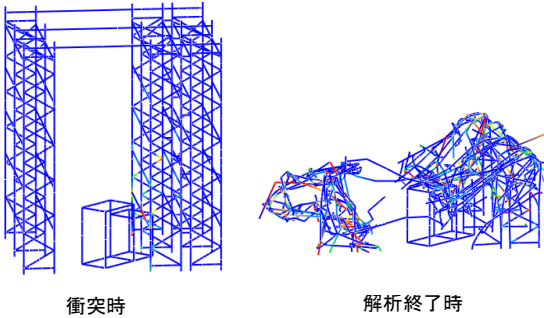


図-20 ラックシステムの挙動（平面ブレースを5段目に設置，45度方向衝突）

目両方に平面ブレースを設置した場合には，崩壊は発生しなかった．1段目のみに平面ブレースを設置した場合には，衝突点付近の平面ブレースが座屈して衝突エネルギーを吸収し，それ以外の部材の変形が抑制されたと考えられる．また，5段目のみに平面ブレースを設置した場合には，最上段が補強されたためにその懸垂効果によりラックの崩壊が抑制されたと考えられるが，衝突方向によっては崩壊を防げないことが分かった．

6. 結言

本研究では，骨組構造の崩壊挙動を高精度に解析できるASI-Gauss法を用い，ビームと支柱の接合部に微小要素を追加することでGodrej社のサイクル試験結果を再現した．また，通路を挟んで連結される3列のラックシステムをモデル化し，フォークリフトの衝突解析を実施し，平面ブレースがラックシステムの崩壊を抑制する効果について検証した．その結果，平板ブレースを1段目に設置すると，衝突時の水平方向への変形が抑制され，全体崩壊を防ぐことができた．また，平板ブレースを最上段に設置すると，その懸垂効果により，ある程度進行性崩壊を抑制する効果が見られた．

今後は，ラックシステムに積載する荷物をモデル化し，システム全体の進行性崩壊現象の再現および防止策の検討を行う予定である．

謝辞

本研究の遂行にあたり，Godrej社のNagendiran氏，Unnikrishnan氏，Pradeep氏には，ラックシステムの試験デ

表-2 0度方向衝突

Case	平面ブレースの設置段	ラックシステムの挙動
1	無し	崩壊
2	1	崩壊せず
3	2	崩壊
4	3	崩壊
5	4	崩壊
6	5	崩壊せず
7	1と5	崩壊せず

表-3 45度方向衝突

Case	平面ブレースの設置段	ラックシステムの挙動
1	無し	崩壊
2	1	崩壊せず
3	2	崩壊
4	3	崩壊
5	4	崩壊
6	5	崩壊
7	1と5	崩壊せず

ータの提供など多大なる貢献を受けた．ここに謝意を表する．

参考文献

- [1] Dubina D, Marginean I, Dinu F. Impact modelling for progressive collapse assessment of selective rack systems, *Thin Wall Struct* 2019; 143: 106201.
- [2] Ng AY, Beale RG, Godley MH. Methods of restraining progressive collapse in rack structures, *Eng Struct* 2009; 31: 1460-1468.
- [3] Isobe D. *Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications*, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- [4] Godrej (<https://www.godrej.com/>).
- [5] 株式会社 STEEL LABO (<https://www.steel-labo-shopping.com/jirei/p-004.html>).