電圧ピークホールド機能を有するCR並列式 静電気放電電荷量測定器の開発

長田 裕生*, 宮林 善也*, 鈴木 輝夫*, 崔 光石**,1

(2021年9月21日受付; 2021年11月29日受理)

Novel Coulomb Meter Using CR Parallel and Voltage Peak Holder Yuki OSADA*, Yoshiya MIYABAYASHI*, Teruo SUZUKI* and Kwangseok CHOI**,1

(Received September 21, 2021; Accepted November 29, 2021)

In this paper, a novel Coulomb meter that uses a CR parallel and voltage pick holder was experimentally introduced and its basic features were quantitatively investigated. The novel meter consists mainly of the discharge charge detection part (metal ball, capacitor (1000 nF), resistor (100 k Ω)), signal processing part (voltage measurement, voltage peak hold, voltage-charge conversion), and display part. In this study, we conducted two experiments, a calibration test, and a test for measuring the charge amounts of spark discharges, brush discharges, and propagating brush discharges, which are common in industrial sectors. As for the results, the values obtained using the novel meter were clearly proportional to those of obtained from the charged capacitance used in the calibration test. In all three kind of electrostatic discharges -spark discharges, brush and propagating brush discharges- the charge amount obtained by the novel meter agreed with the calculated values in each test. Through these results, the validity of the novel meter was confirmed.

1. はじめに

粉体プロセスでは、絶縁性フレコンバッグなどを使用し、粉体原料の充填や排出作業を行っている。このようなプロセスでは、フレコンバッグ表面の帯電電位が高くなり、そこから発生する着火性静電気放電による粉じん爆発・火災の事故が発生している 1.22. これらの事故を未然に防止するためには、帯電物体の静電気危険性を定量的に把握することが必要であり、フレコンバッグからの放電電荷量の測定が求められている 3.44. また、フレコンバッグ表面の帯電電位はばらつきが大きいため、電荷量測定箇所を増やして測定を行う必要がある.

電荷量測定に関する研究は、これまでに多く行われてきた、例えば、サイロに投入される粒子径 2-3 mm のポリプロピレンペレットの電荷量(比電荷)をサイロ内部

キーワード:放電電荷量測定器,電圧ピークホールド, 火花放電,ブラシ放電,沿面放電

* 春日電機株式会社

(〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 2-4)

Development group, Kasuga Denki, 2-4, Shin-kawasaki, Saiwai, Kawasaki, Kanagawa 212-0032, Japan

** 労働安全衛生総合研究所

(〒 204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

National Institute of Occupational Safety and Health, Japan, 1-4-6, Umezono, Kiyose-shi, Tokyo 204-0024, Japan

choiks@s.jniosh.johas.go.jp https://doi.org/10.34342/iesj.2022.46.1.20 の投入口の真下に装着した大型ファラデーケージで測定 し、約-12 μ C/kg であることが報告されている 5. また、 物体から発生する火花放電の電荷量測定方法には、シー ルド有無のプローブを使用した場合の電荷量及びその精 度について検討され、シールドされたプローブを使用し た場合、より正確に測定されたことが報告されている。. 一方、従来の一般的な電荷量測定器としては、クーロ ンメータ (電荷量測定器) がある. その測定原理は、放 電電荷量QをコンデンサCに溜めて、コンデンサの端 子間電圧 V を高入力インピーダンスの電位計で測定し、 Q = CVの関係から Q を知るものである. しかし, 放電 電荷量を測定しようとクーロンメータを帯電した物体に 接近させると、静電誘導により測定器の表示値が大きく 変動し、正確な放電電荷量の測定ができない。また、一 度放電電荷量を測定した後は、必ず帯電物体から十分離 した位置でクーロンメータの値を読み取り、コンデンサ に充電された電荷量を接地に逃がす必要がある. その上, 繰り返し測定を行うと、測定器の操作が煩雑となり、多 くの測定ポイントで放電電荷量を測定することが難しい 場合がある。また、静電気放電の電荷量測定には CR 並 列式クーロンメータ 79 がある.しかし,測定範囲は5 ~200 nC(絶対値)であり, 200 nC(絶対値)以上の放 電電荷量を持つ帯電物体の静電気危険性を定量的に測 定・判断することはできない. さらに、実際の現場で発 生する静電気放電は、単発のみならず、2発以上連続的 に発生することが多く、上記の CR 並列式クーロンメー

タは、最初の1発のみを測定するため、連続的な放電において、2発目以降に最大値が現れても対応できない。

本研究では、これらの問題を解決するために、CR 並列式クーロンメータに電圧ピークホールド機能を組み合わせ、連続的放電にも対応させた新型のクーロンメータ(以下、新型クーロンメータという)を開発した。本報では、新型クーロンメータの基礎特性について定量的に調べたので、報告する。

2. 新型クーロンメータ

新型クーロンメータの構造を図1に示す. 新型クーロ ンメータは、主に放電電荷量検出部(金属球、コンデン サ (1000 nF), 抵抗 (100 kΩ) を含む), 信号処理部 (電 圧測定部, 電圧ピークホールド部, 電圧 - 電荷量変換部 を含む). 表示部などから構成され. 最大約 10000 nC の 電荷量を測定することができる。このクーロンメータで 最大 10000 nC の電荷量を測定したときのコンデンサの 端子間電圧は10 V になる。また、放電電荷量検出部の 放電検出球電極は、その直径 $\phi=25~\mathrm{mm}$ とした、これは 放電検出球電極を帯電物体に接近させたときにコロナ放 電を発生させないこと、絶縁物からの放電電荷量は電極 直径 20 mm 以上で飽和する傾向にあることが報告され ているためである100.新型クーロンメータは、帯電物体 から発生する静電気放電の最大放電電荷量を容易に測定 するために開発したものである。新型クーロンメータの 動作原理は、放電電荷が一旦Cに充電され、Rを通じて 接地に流れる. その時, 電圧測定部では CR 両端の電圧 が測定され、そのうち最大値をピークホールド部で読み 取られる. 読み取られた最大電圧は電荷量に変換されて, 表示部でその値が表示される. なお. コンデンサ C に 充電された電荷は時定数 CR (計算値: 100 ms) で減衰 するので、コンデンサの端子間電圧のピーク値をピーク

ホールド回路で保持するようにした. サンプリング周期は 2 ms である. なお, 放電電荷量の値は, 測定中はこのサンプリングスピードで測定器に取り込まれ, 表示されている値よりも大きい場合は表示値が更新される特徴を持っている. 故に, 測定箇所を変えながら, 放電電荷量を測定した時に, 最後に表示されている値が全ての測定箇所の中での最大放電電荷量である. また, 新型クーロンメータには, 帯電物体に近づけた時に帯電物体から発生する静電気放電が測定者の手に電撃を与えないように絶縁性円板(直径:153 mm)を設けてある.

3. 実験装置及び方法

3.1 新型クーロンメータの較正

新型クーロンメータの較正実験は、市販用フィルムコンデンサ($C=5017 \, \mathrm{pF}$)と直流高電圧電源(AKTB-020K2PN/S1、(㈱東和計測)を用いて行った。

フィルムコンデンサに所定の電荷量を充電(充電電荷量 Q_1)し、放電検出球電極に接触させて放電を発生させた、その時、新型クーロンメータで測定した値(測定値 Q_m)と比較を行った、なお、校正実験で使用した電荷量は、 $-10000~\rm nC$ から $+10000~\rm nC$ まで $1000~\rm nC$ ずつ変化させて、その時に表示された Q_m を記録し、同様の操作を 10回行って、 Q_m の平均値を算出した。

3.2 各種静電気放電の放電電荷量測定

産業現場で発生しやすい静電気放電は火花放電とブラシ放電,沿面放電である。新型クーロンメータの特性を評価する目的で、これら3種類の静電気放電の電荷量測定(測定値 Qa) を試みた。この実験には、新型クーロンメータ、表面電位計(KSD-1000、春日電機㈱)、直流高電圧電源(AKTB-020K2PN/S1、㈱東和計測)、金属容器(直径 410 mm)、絶縁性シート(400 mm×400 mm×2 mm)、送風型除電器(KD-750B、春日電機㈱)、絶縁

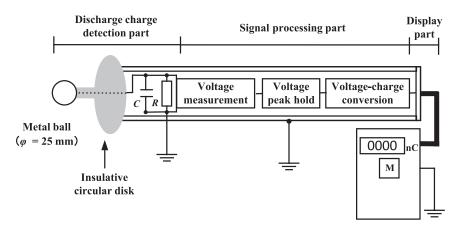


図 1 新型クーロンメータの構造 Fig.1 Structure of novel Coulomb meter.

性フィルム (310 mm×310 mm×0.1 mm),接地金属円板 (直径 300 mm), コロナ放電式帯電器 (JPK-3, $V_{\rm d}$ = $-17~{\rm kV}$,春日電機㈱)などの機器を用いて行った。今回の各種静電気放電の電荷量測定実験は、ノイズの影響を最小限に抑えるためにシールドルーム (4.8 m×3.8 m×2.2 m)内で行った。シールドルーム内の温度は 25 ± $2^{\rm C}$,湿度は 30 ± 5%である。以下に火花放電、ブラシ放電、沿面放電を発生させて、その電荷量を測定する実験の手順を述べる。

- a. 火花放電:火花放電は、主に金属間で発生するものであり、図2(a)に示した金属容器を使用した. 火花放電は静電気放電に起因した事故の7割以上を占めることが知られている¹¹⁾. 火花放電の電荷量の測定手順は以下の通りである.
- (1) 絶縁性シートの上に金属容器を乗せて接地不良になっていることを高抵抗測定器で確認する.
- (2) 直流高電圧電源から金属容器に-5.5 kV の高電圧を 与える.
- (3) 金属容器の放電前の表面電位 V₁ を表面電位計で測 定し、記録する.
- (4) 新型クーロンメータを約 10 mm/s で金属容器に接近させて、火花放電が発生したら、新型クーロンメータの O_4 の値を記録する.
- (5) 金属容器の放電後の表面電位 V2 を測定して記録する.
- (6) 金属容器を接地する.
- (7) (2)~(6)の操作を10回繰り返す.

b. ブラシ放電: ブラシ放電は, 主に金属と絶縁体との間で起こるものであるため, 図 2 (b) に示した絶縁性シートを使用した. ブラシ放電の電荷量の測定手順は以下の通りである.

- (1) 絶縁性シートを布(綿)で3回摩擦して帯電させる.
- (2) 帯電した絶縁性シートの中心部の帯電電位 V_1 を測定し、記録する.

- (3) 新型クーロンメータを約 10 mm/s の速さで絶縁性シートの中心部の表面に接近させてブラシ放電が発生したら、新型クーロンメータの Q_a の値を記録する.
- (4) 放電後の絶縁性シートの中心部の電位 V₂ を測定して記録する.
- (5) 実験に使用した絶縁性シートと布(綿)を除電器で除電する.
- (6) (1)~(5)の操作を10回繰り返す.
- c. 沿面放電:沿面放電は、接地金属上の帯電した薄い絶縁性フィルム表面に沿って発生するものであり、図2(c)に示した接地金属板と薄い絶縁性フィルムを使用した.沿面放電の電荷量の測定手順は以下の通りである.
- (1) 厚さ 0.1 mm の薄い絶縁性フィルムを接地金属円板 の上に設置する.
- (2) コロナ放電式帯電器で、このフィルム全面を 2分間 帯電させる.
- (3) 絶縁性フィルムの中心部の帯電電位 V₁ を測定し, 記録する.
- (4) 新型クーロンメータを約 10 mm/s の速さで帯電した 薄い絶縁性フィルムの中心部表面に接近させて沿面 放電が発生したら、新型クーロンメータの Q_a の値を記録する.
- (5) 放電後の絶縁性フィルムの中心部の電位 V₂ を測定し、記録する.
- (6) 実験に使用した薄い絶縁性フィルムを除電器で除電する.
- (7) (1) \sim (6) の操作を 10 回繰り返す.

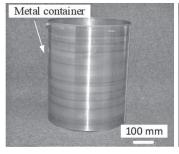
上記の測定で得られた Q_a , V_1 , V_2 の値について検討した.

4. 結果及び考察

4.1 新型クーロンメータの較正

Grounded metal

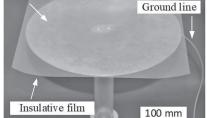
図3にフィルムコンデンサの Q と新型クーロンメー



(a) 火花放電 (a) Spark discharge

Insulative sheet

(b) ブラシ放電



(c) 沿面放電

(b) Brush discharge

(c) Propagating brush discharge

図2 各種静電気放電を発生させるための試料

Fig.2 Materials used in each test.

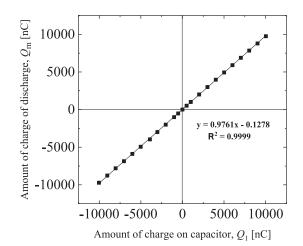


図 3 充電電荷量 Q_1 とクーロンメータでの表示値 Q_m との関係 Fig. 3 Relationship between Q_1 and Q_m .

タの Q_m の関係を示す。ただし、縦軸は Q_m 、横軸は Q_l である。この結果より、-10000~+10000 nC までの Q_m と Q_l との間には比例関係(決定係数、 R^2 =0.9999)が成り立っていることが確認された。すなわち、 Q_l と Q_m の値はほぼ同じになり、新型クーロンメータは、 Q_m に対する信頼性の高い測定ができることが確認された。

4.2 各種静電気放電の放電電荷量

表 1 に火花放電, ブラシ放電, 沿面放電の各実験から得られた Q_4 と V_1 , V_2 を 10 回測定したデータとそれらの平均値を示す.

a. 火花放電: Q_a が-418 nC(平均値)で非常に大きいことが分かる. V_i は-5.1 kV から-5.8 kV であり、 V_i は0 kV になっているので、1 回の火花放電で全ての放電電荷が金属容器から放出されたと考えられる. また、この時の放電検出球電極と金属容器との間に発生した火花

放電のギャップ長は約2~3 mm で、放電電荷は全て新型クーロンメータの球電極に流れ込み1000 nF のコンデンサに充電されていると考えられる.

表 1 の火花放電の Q_4 と V_1 の平均値は、-418 nC と -5.58 kV であり、(1)式から金属容器の静電容量を計算すると、C=75 pF であった.

$$Q_{\rm d} = CV_1 \tag{1}$$

この測定値についての信頼性を確認するために LCR メータ(U1733C, Keysight Technologies)で接地不良の 金属容器の静電容量 C を測定したところ、 $74\,\mathrm{pF}$ であり、 両者の値はほぼ一致した. 故に,今回の新型クーロンメータの火花放電の電荷量測定は信頼性が高いことが示唆 された.

さらに, 導体間で起こる火花放電の放電エネルギーW は以下の(2)式で求めることができる.

$$W = Q_{\rm d}(V_1 - V_2)/2 \tag{2}$$

ここで、 Q_a は放電電荷量、 V_1 と V_2 は放電前後の金属容器の電圧である。

この(2)式に実験で得られた火花放電の Q_a と V_1 の最大値と V_2 =0 V を代入すると,放電エネルギーは,W=1.29 mJ であった.この値はほとんどの可燃性ガス・蒸気および一部の可燃性粉じんの着火源となり得る放電エネルギーである.ただし,この時に新型クーロンメータのコンデンサに充電された放電電荷量の持つエネルギー W_a を差し引く必要があるが,このコンデンサの端子間電圧 V_a は V_a を き計算してみると V_a の V_a の V_a の V_a を V_a の V_a の V_a を V_a の V_a を V_a の V_a の V_a の V_a を V_a の V_a の V_a の V_a の V_a の V_a を V_a の V_a の

表 1 各種静電気放電から得られた電荷量と放電前後の表面電位 Table 1 Q_4, V_1, V_2 values obtained for spark, brush, propagating brush discharges.

Type of discharge	Spark discharge			Brush discharge			Propagating brush discharge		
Measurement	$Q_{\mathrm{d}}[\mathrm{nC}]$	V ₁ [kV]	V_2 [kV]	$Q_{ m d}$ [nC]	V_1 [kV]	V_2 [kV]	$Q_{ m d}$ [nC]	V_1 [kV]	V_2 [kV]
1	- 392	- 5.10	0	-40	-48.97	- 42.97	-4205	- 9.50	-8.60
2	-413	- 5.60	0	- 72	-49.99	-41.09	-2656	-8.60	-7.50
3	-428	- 5.80	0	-21	- 34.41	-30.82	- 2453	-8.60	-7.40
4	-413	- 5.50	0	- 80	-39.72	-33.04	- 1747	-9.00	-8.50
5	-428	-5.70	0	- 33	-45.54	-40.06	-2160	-8.10	-7.00
6	-412	-5.50	0	-61	- 44.17	-37.67	-2046	-8.00	-6.80
7	- 446	- 5.80	0	-21	-42.46	-37.15	-1635	-8.00	-7.10
8	-413	-5.50	0	- 54	-36.47	-31.50	-1881	-8.10	-6.90
9	-414	-5.70	0	- 35	-40.06	- 36.47	- 1490	-7.90	-6.30
10	-422	-5.60	0	- 39	-41.26	-34.76	- 1573	-8.00	-7.30
Average	-418	-5.58	0	-46	-42.31	-36.55	-2185	-8.38	-7.34

無視して放電エネルギーを求めることにした.

b. ブラシ放電: Q_a の平均値が-46 nC であり、火花放電より小さい. V_1 , V_2 は火花放電の場合よりはるかに高い値であり、 V_2 は大きく減少していないのが分かる. 例えば、 $V_1=-36.47$ kV の時、 $V_2=-31.50$ kV であった. これは絶縁物からの静電気放電の特徴で、放電電荷量として絶縁物から失われる電荷量は、全電荷量の一部であることを示唆している. ただし、ブラシ放電の表面電位は、測定距離が 20 cm であり、10 cm の時の値に校正したものである. ブラシ放電発生時の絶縁性シートと放電検出球との間のギャップ長は約 5~30 mm であった.

今回の実験で得られた Q_a の最大値は-80 nC であった. 一方、絶縁体からのブラシ放電のエネルギーを(2) 式から推定することは困難であるが、以下の(3)式で算出できることが知られている 12 .

$$W = 10 \times Q_{\rm d}^{1.2} \tag{3}$$

今回は、 Q_a の最大値 $-80\,n$ C(絶対値)を(3)式に代入すると、ブラシ放電の放電エネルギーは $W=0.48\,m$ J となる。また、式(2)において、表 $1\,$ の値を利用して算出すると $0.27\,m$ J であり、 $2\,$ つの評価法で大きな差はないと考えられる。

これらの値は、一部の可燃性ガス・蒸気および有機溶剤を含んだ粉体の着火源になる可能性が高い放電エネルギーである。

c. 沿面放電: Q_a の最大値は-4205 nC (平均値: -2185 nC) となり、火花放電やブラシ放電に比べると桁違いに大きいことが分かる。絶縁性フィルムと放電検出球電極とのギャップ長は約 $2\sim3 \text{ mm}$ とほぼ一定であった。

沿面放電の放電エネルギーWは、数式で表すのが難し いが、Szymon らによる沿面放電の電荷量と放電エネル ギーの関係 (3) によれば、今回得られた沿面放電の電荷 量の最大値における放電エネルギーW は約 18 mJ である ことが推定される。この値は可燃性ガス・蒸気はもちろ ん、多くの可燃性粉じんの着火源となり得るエネルギー である. しかし、ブラシ放電、沿面放電の Q_d の信頼性 を確認するために、絶縁物シートまたは絶縁性フィルム の静電容量を測定し、式(1)を用いて計算することは難 しい、そこで、帯電した絶縁物または絶縁性フィルムか ら発生する静電気放電の放電電流波形を観察し、放電電 荷量を算出することにした、実験は、放電検出球電極に 100 Ω抵抗(2個の200Ω無誘導抵抗の並列接続)を接 続し、その両端を電圧プローブ (SS-101R, IWATSU, 500 MHz, 600 Vpk) とオシロスコープ (DS-5632A, IWATSU Oscilloscope, 350 MHz, 2 GS/s) で抵抗を通る放電電流を

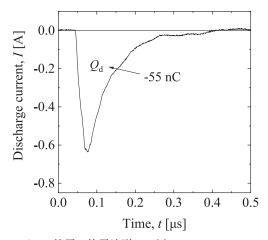


図 4 ブラシ放電の放電波形の一例 Fig.4 Typical waveform of brush discharge.

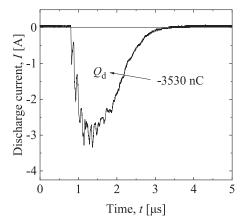


図 5 沿面放電の放電波形の一例 Fig.5 Typical waveform of propagating brush discharge.

観察した.ブラシ放電と沿面放電の放電波形の一例をそれぞれ図4と図5に示す.ただし、縦軸は放電電流、横軸は時間である.沿面放電の放電電流はブラシ放電よりピーク値が大きく持続時間が長いことが分かる.図4と図5で得られた放電波形から放電電荷量を求めるにあたり、以下の式を用いた.

$$Q_d = \sum_{k=1}^{N} i_k \Delta t \tag{4}$$

ここで、 i_k [A] は、電圧プローブで測定した電圧を抵抗 $100~\Omega$ で除した放電電流値で、 Δt は放電持続時間の微小区分時間である。その結果、ブラシ放電では-55 nC、沿面放電では-3530~nC であり、表 $1~o~Q_a$ と比較するとそれぞれほぼ同じレベルである。従って、今回の新型クーロンメータは、ブラシ放電、沿面放電の電荷量測定にも信頼性が高いことが示唆された。

5. まとめ

電圧ピークホールド機能を有する CR 並列式静電気放電電荷量測定器 (新型クーロンメータ) を開発した. ま

た、その基礎特性を把握するために、火花放電、ブラシ 放電、沿面放電の電荷量の測定を試みた。その結果、新 型クーロンメータは、帯電物体からの静電誘導の影響を 受けずに、いずれの静電気放電の電荷量をも容易かつ正 確に測定できることを確認できた。火花放電では、金属 容器の静電容量と表面電位により、得られた電荷量が新 型クーロンメータの測定値とほぼ一致した。また、ブラ シ、沿面放電では、オシロスコープの波形から得られる 電荷量が新型クーロンメータでの測定値とほぼ一致し た

今後の課題としては、産業現場で、静電気に起因した 災害が起こる可能性が高いと思われる絶縁性フレコン と、その近傍に接地不良金属から発生する静電気放電の 電荷量の測定を行い、新型クーロンメータの特性と測定 値の妥当性などをより深く検討する.

参考文献

- 1) 山隈瑞樹: フレキシブルコンテナに関連した労働災害と 規格の動向. 労働安全衛生総合研究, **7** [2] (2014) 67
- 児玉 勉, 山隈瑞樹: フレキシブルコンテナによる静電 気災害及びその防止対策. 静電気学会誌, 36 [3] (2012)
- 3) 山隈瑞樹, 児玉 勉:帯電防止型フレキシブルコンテナ と絶縁性内袋の併用時に起こりうる沿面放電の特徴とそ の対策. NIIS-RR-2000, (2001) 35
- 4) 崔 光石ら: 絶縁性フレキシブルコンテナの静電気帯電・放電特性. 労働安全衛生総合研究, 13 [1] (2020)57

- K. Choi, Y. Endo and T. Suzuki: Experimental study on electrostatic charges and discharges inside storage silo during loading of polypropylene powders. Powder Technol, 331 (2018) 68
- 6) J. N. Chubb: Measurement of charge transfer in electrostatic discharges. J. Electrostat, **64** (2006) 321
- T. Langer, D. Möckel and M. Beyer: Transferred charge of brush discharges in explosive gas atmospheres-A verification of the ignition threshold limits. J. Electrostat, 69 (2011) 200
- 8) T. Langer, G. Gramse, D. Möckel, U. von Pidoll and M. Beyer: MIE experiments and simultaneous measurement of the transferred charge-A verification of the ignition threshold limits. J. Electrostat, 70 (2012) 97
- K. Chowdhury and U. von Pidoll: Experimental investigation on the measurement deviations in recording brush discharges from insulation surfaces by Coulombmeters. J. Electrostatics, 70 (2012) 347
- 10) 田畠泰幸: 静電気放電に起因する可燃性ガス・蒸気の着 火防止に関する基礎的研究. 東京大学, 博士論文, (1993) 52
- 11) A. Ohsawa: Statistical analysis of fires and explosions attributed to static electricity over the last 50 years in Japanese Industry. Conf. Electrostat, J. Phys.: Conf. Ser, 301 (2011) 1
- 12) M. Glor: Ignition tests with discharges from bulked polymeric granules in silo. J. Electrostat., **30** (1993) 123
- 13) S. Ptak, A. Smalcerz and P. Ostrowski: Estimation of the energy released during propagating brush discharge. J. Electrostat, 103 (2020) 1