

圧延界面における潤滑剤挙動の直接観察

大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻

教授 宇都宮 裕

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020015-B2)

キーワード：トライボロジー，その場観察，マイクロ塑性流体潤滑

1. 緒言

塑性加工プロセスにおいては、加工荷重や加工エネルギーの低減、加工工具の長寿命化、加工材の表面性状の改善、加工材の内部組織の均一化などのために、適切な潤滑剤を選定し、その供給方法、供給量の最適化を図ることが求められる。そのためには、実加工条件における工具と被加工材の界面状態を把握することが必要となる。例えば、工具と被加工材の接触形態や潤滑剤の膜厚や圧力の分布、工具に対する被加工材や潤滑剤の相対速度の分布などは有益な情報である。しかしながら、界面は硬質工具の表面にあり、高い圧力と摩擦せん断応力が作用し相対的に運動しているため、直接観察を行うことは極めて困難である。したがって、加工材の表面性状や変形・負荷特性から間接的に推定したり、理論解析や数値解析を用いて予測することがほとんどである。

加工界面を直接観察した先駆的な研究として、小豆島ら^{1,2)}の研究が挙げられる。被加工材表面に人工欠陥として圧痕を付与し、石英ガラス製のダイスを用いて引抜き中の加工界面のその場観察が行われた。そして、潤滑剤はいったん人工欠陥に捕捉された後に、加工中に再び接触界面に浸み出して摩擦係数の低減に寄与する再潤滑機構が実証された。Bechら^{3,4)}は、再潤滑機構を、①潤滑剤の静水圧上昇によって前方に浸み出す静的機構（Micro-Plasto-HydroStatic Lubrication; MPHSL）と、②工具との相対速度によって潤滑剤に発生するせん断応力によって後方に浸み出す動的機構（Micro-Plasto-HydroDynamic Lubrication; MPHDL）の2種に分類した。

しかしながら、これまでのその場観察は引抜き^{1,3)}や鍛造^{5,6)}、板材成形⁷⁾などに限られ、圧延についての観察は、ほとんどなされていないため再潤滑機構は未知である。圧延では、ロール周速と被加工材の相対速度の符号が中立点を境に入れ替わるため、潤滑機構も複雑であることが予想される。池ら^{8,9)}はロール表面に観察窓を設け、内部の反射鏡からの界面画像をネック部のビデオカメラで録画することを試みたが、ロールが高速で回転するために観察時間は極めて短く制限され有益な情報を得ることは困難であった模様である。

ところで著者らは、一本のロールを空間に固定した上で、他方のロールをその周囲を自転させながら公転させ、それらの中で圧延を行う天動説型圧延機の開発を行っている¹⁰⁾。その装置では1本のロールは回転ならびに移動することがない特徴を有しているため、ロールを透明材質とすることで内部より圧延界面のその場観察が容易に実現可能であると考

えた。そこで、本研究では表面に圧痕を付与したはんだ板の圧延界面のその場観察を行って、再潤滑機構を調査した。

2. 天動説型圧延法

この圧延法の原理を図1に示す。1本のロール（固定ロール）が回転せずに空間に静止していることを特徴とする。そして、もう1本のロール（移動ロール）は自転しながら固定ロールの周りを公転する。図1では、移動ロールは時計回りに自転しながら固定ロールの周りを時計回りに公転し、被加工材である板材は固定ロールと移動ロールの間のギャップで、幅方向を回転軸として時計回りに回転しながら圧延が行われる。図2は移動ロールの公転角 $\cdot\cdot$ によって変化する両ロールと板の幾何学的関係を示したものである。移動ロールは図(a)から(f)の間に1回転公転し($\cdot=360^\circ$)、その間に2回転自転する($\cdot=720^\circ$)ことがわかる。言い換えれば、移動ロールの自転速度を公転速度の2倍と設定することで板材とロールの相対的な幾何学的関係は通常の圧延と等しくなる。なお、固定ロールと移動ロールの幾何学的関係は、天動説における地球と天体の関係に類似している。

固定ロールが回転することなく空間に静止していることは天動説型圧延法の最大の特徴である。したがって、固定ロールに透明材料を用いたり観察窓を設けたり、あるいは放射線を透過させることで、圧延界面のその場観察が可能となる。その際に、カメラを圧延機外に設置することも可能であり、その場合には振動、いわゆる手ブレ、の影響を受けないため鮮明な画像を得ることができる利点もある。

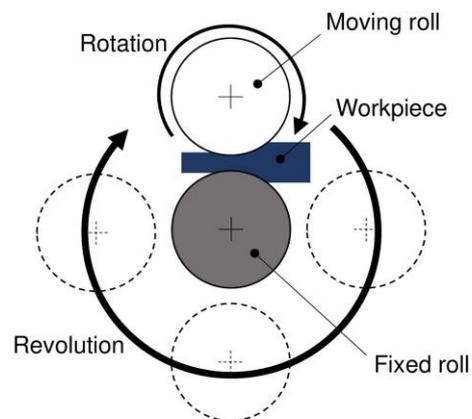


図1 天動説型圧延の原理。

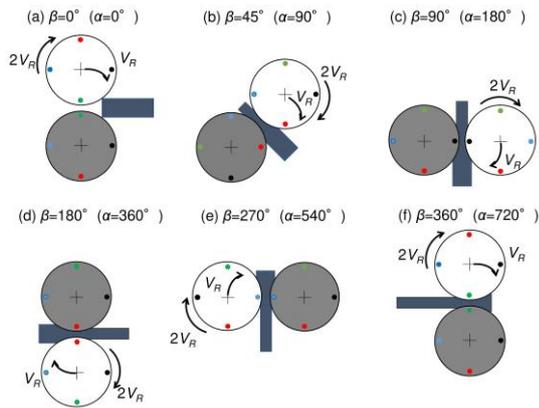


図2 天動説型圧延におけるロール配置の変化
(α :自転角, β :公転角)

3. 実験装置

上記の原理にも基づいて小型の実験装置を設計製作し、本研究では使用した。その実験装置の写真を図3に示す。圧延機は移動ロールの公転とともに回転する内フレームと固定された外フレームの二重構造となっている。駆動は装置上部の直流サーボモータによりオルダムカップリングを介して内フレームを回転させる。そうすると内フレームに支持された移動ロールが固定ロールの周りを公転しながら自転し、圧延が行われる。このとき、公転角は図中の7セグメントディスプレイによって表示される。移動ロールを自転させながら公転させるために、固定ロールと移動ロールは上部のリングギヤで連結されている。

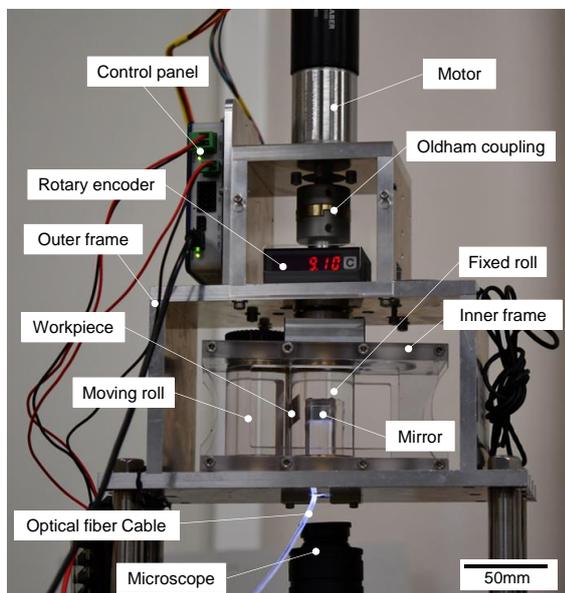


図3 実験に用いた天動説型圧延機の写真。

ロールはアクリル樹脂製でロール直径は 40mm, 胴長は 55.5mm である。固定ロールの内部は四角柱状の穴が設けられており、その穴は内外フレームを貫通している。穴の内部で 10mm×15mm の長方形の反射鏡を鉛直方向に対して 45° 傾けて設置することで、圧延中の圧延界面

のライブ画像を 90° 反射させて圧延機下部に投影することができる。そして圧延機の下部に設置された USB 光学顕微鏡で投影された界面画像を連続的に動画撮影した。その際、穴内に通した光ファイバーケーブルの他端を LED ハンディライトで照らすことで圧延界面の明るさを確保した。

なお、固定ロールの移動ロールの間隔、すなわちロールギャップを変更する場合には、両ロールを収める内フレームを交換する必要があるため、ロールギャップを任意の値に検便に変更することができない欠点をこの装置は有している。

4. 実験方法・観察方法

被加工材には、厚さ：0.6mm, 幅：8mm のはんだ板を使用し、潤滑剤の捕捉サイトとしてビッカース硬さの圧痕（対角線長：345 μ m, 深さ 70 μ m）を長手方向に 1.5mm 間隔で 10 個、板幅方向に 1mm 間隔で 7 個の計 70 個を圧延面に付与した。潤滑剤には視認性向上のため赤色の油性着色剤を添加した 3 種類の潤滑剤、潤滑剤 A（動粘度：7.7mm²/s）、潤滑剤 B（動粘度：31.9mm²/s）、潤滑剤 C（動粘度：4000mm²/s）を使用した。また比較のため無潤滑条件でも圧延を行った。ロール周速は 2.6mm/s, 15.3mm/s, 91.9mm/s の 3 条件で行い、圧延前後の板厚から求めた圧下率は 15~24% の範囲となった。動画撮影はフレームレート 60fps で行い、動画から切り出した静止面でロールバイト内の圧痕の座標を測定し、速度変化も求めた。

5. 実験結果

5.1 圧延中の観察結果

図4にロール周速 15.3mm/s の場合の被加工材のロールバイト中の速度変化を示す。図の横軸はロールバイト中の圧延方向の位置を入口（0%）から出口（100%）まで規格化して示してある。速度は、その場観察画像から測定された圧痕の座標変化をその間の時間で除することで求めた。被加工材の出口速度のロール周速に対する割合、すなわち先進率は無潤滑条件で $f_s=3.4\%$ 、潤滑剤 A で $f_s=3.4\%$ 、潤滑剤 B で $f_s=1.7\%$ 、潤滑剤 C で $f_s=-7.7\%$ であった。一般に先進率は摩擦係数が高いほど高い値となることが知られているが、本研究においても潤滑剤の動粘度が小さいほど高い値となった。無潤滑と潤滑剤 A では中立点が 50~60% の位置に存在し、先進率に大きな違いが見られなかったが、潤滑剤 B と潤滑剤 C と潤滑剤の動粘度が大きくなるにつれ中立点は下流に移動して先進率は低下し、潤滑剤 C の条件では負の先進率となった。

図5はロール周速 15.3mm/s の条件で、各潤滑剤を使用した場合の圧痕形状の変化を並べて示したものである。各画像中央部の四角形が圧痕であり、1つの圧痕をロールバイト入口から出口まで追跡して撮影した動画から静止面を切り出して並べてある。入口付近の左側と出口付近の右

側で赤色に観察される部分はロールバイト外に存在する多量の潤滑剤である。ロールバイト内、すなわち接触部、では潤滑剤の油膜厚さが小さいため、被加工材表面は銀白色に観察される。

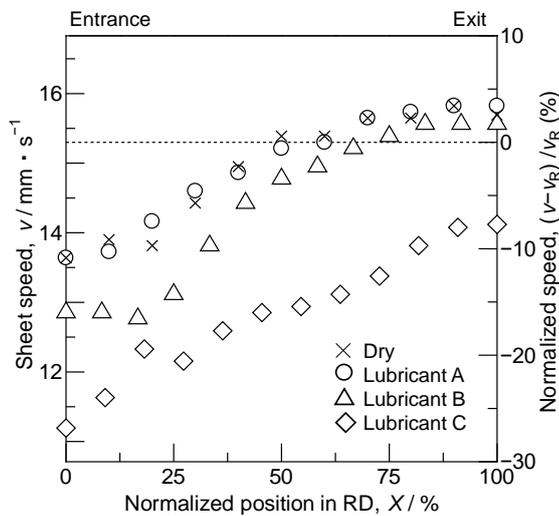


図4 ロールバイト中の被加工材の速度変化。

無潤滑圧延と潤滑圧延を比較すると、無潤滑圧延では圧延に伴い圧痕が顕著に小さくなるが、潤滑圧延では圧痕

形状は保たれ面積変化も小さい。このことは、潤滑圧延では圧痕内に潤滑剤が捕捉され、静水圧が発生し形状が保持されることを意味している。潤滑剤 A では 20%の位置までに圧痕内に捕捉された潤滑剤の界面への浸み出しは観察されなかったが、40%の位置では圧痕の後端から RD の反対方向（上流）に、すなわち圧痕の後方に放射状に潤滑剤が浸み出していることが観察された。潤滑剤 B では圧延全体を通して潤滑剤の浸み出しは観察されなかった。一方、潤滑剤 C では、20%の位置までに潤滑剤の界面への浸み出しは観察されなかったが、40%の位置から潤滑剤が圧痕の前端から RD 方向（下流）、すなわち前方へ細い線状に浸み出している様子が観察された。なお、これらの浸み出しはいずれも中立点より前、すなわち後進域で観察された現象である。

5.2 圧延板の観察結果

圧延後の被加工材表面を光学顕微鏡で観察すると、その場観察で潤滑剤の浸み出しが確認された条件においてのみ圧痕周辺に白く変色した領域が見られた。潤滑剤 A、ロール周速 15.3mm/s の場合を例にとると、白色の領域の算術平均粗さは $Ra = 3.0 \mu\text{m}$ であり、その他の領域の算術平均粗さは $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ であった。表面粗さが大きい領域は図5のその場観察結果で観察された潤滑剤の浸み出しと対応しており、潤滑剤の浸み出しにより油膜厚さが局所的

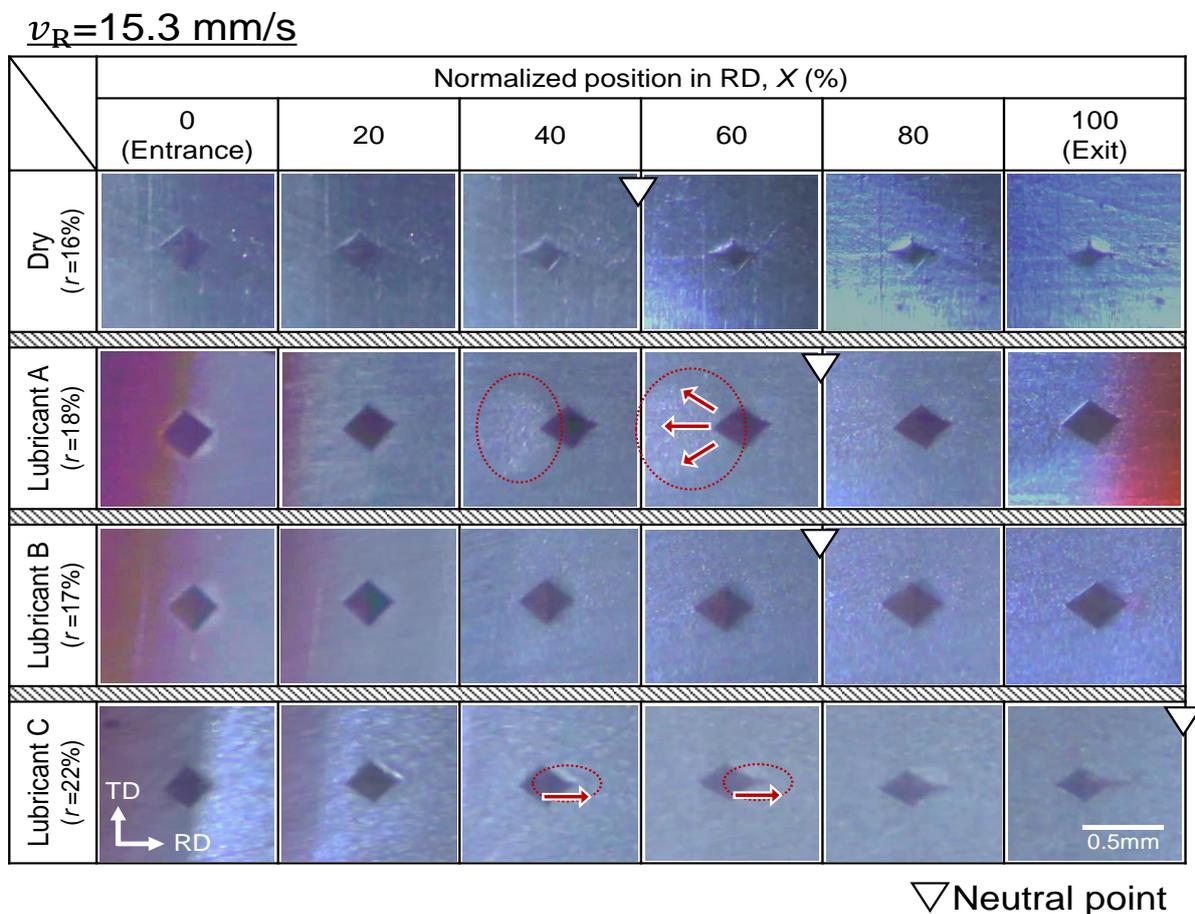


図5 ロールバイト中の圧痕のその場観察画像。

に増加したためと考えられる。

光学顕微鏡画像から表面が粗い領域すなわち、再潤滑領域の面積を見積もった。潤滑剤 A では圧痕の後方への放射状の浸み出しが観察され、その面積はロール周速 2.6mm/s のときは 1.31mm^2 、ロール周速 15.3mm/s のときは 0.47mm^2 、ロール周速 91.9mm/s のときは 0.15mm^2 とロール周速が速いほど面積は小さくなった。潤滑剤 B ではロール周速 2.6mm/s のときのみ後方への浸み出しが観察された。潤滑剤 C ではロール周速 2.6mm/s のときは浸み出しが観察されなかったが、ロール周速 15.3mm/s のときは前方へせん断変形を受けたような跡が観察された。浸み出した潤滑剤の面積が浸み出した潤滑剤の量と比例すると仮定すると、圧痕後方へ浸み出す潤滑剤の量はロール周速が遅いほど、潤滑剤粘度が低いほど増加し、前方への浸み出しはロール周速が速いほど、潤滑剤の粘度が高いほど増加することを意味している。

6. 考察

圧延の再潤滑機構を引抜き¹⁾⁴⁾と比較しつつ考察する。その模式図を図6に示す。引抜きでは低粘度・低速の条件では潤滑剤が圧痕の前方へ、高粘度・高速の条件では後方へ浸み出すことが観察されている。左図の塗りつぶされた部分は、潤滑剤が浸みだした領域を模式的に示している。引抜きでは一般的に面圧が出口に向かうにつれ小さくなることから、前方への浸み出しは潤滑剤の静水圧が上昇し、面圧の低い圧痕の前方側から潤滑剤が浸み出したためであると考察されている。一方、後方への浸み出しは、被加工材と工具の相対速度によるものであり、圧痕に補足された潤滑剤にせん断応力が作用した結果、後方へ浸み出したと考えられている。

本研究で、潤滑剤の動粘度とロール周速を変更したときに観察された浸み出し方向は、引抜きで観察されたものと逆方向であり、潤滑剤の浸み出しはいずれもロールバイト入口と中立点の間の後進域(被加工材の移動速度がロールより遅い領域)で観察された。後進域では面圧は中立点に向かって大きくなり、ロール周速の方が材料の速度よりも速く、引抜きと逆の相対速度関係になっている。このことから、圧延における後方への浸み出しは潤滑剤の静水圧によるもの(MPHSL)であり、前方への浸み出しは潤滑剤の粘性に依存する動的な効果によるもの(MPHDL)であると推測される。そして、定性的ではあるが、引抜きと圧延における再潤滑機構を統一的に理解することが可能となる。

7. 結言

圧延の再潤滑機構を解明するために、天動説型圧延機を用いて圧延界面のその場観察を行い、以下の知見を得た。

- 1) ロール周速 15.3mm/s のとき、低粘度の潤滑剤(潤滑剤 A)では 30%の位置で後方に潤滑剤が浸み出し、高粘度の潤滑剤(潤滑剤 C)では 27%の位置で前方に潤滑剤が浸み出すことが観察された。すなわち再潤滑はいずれの条件でも後進域で生じた。
- 2) 潤滑剤が後方に浸み出す場合、より低粘度であるほど、あるいは低速圧延であるほど浸み出しは顕著であった。
- 3) 高粘度の潤滑剤(潤滑剤 C)を用いたとき、ロール周速 15.3mm/s のときは潤滑剤の前方への浸み出しが観察されたが、低速のロール周速 2.6mm/s の場合には前方への浸み出しは観察されなかった。

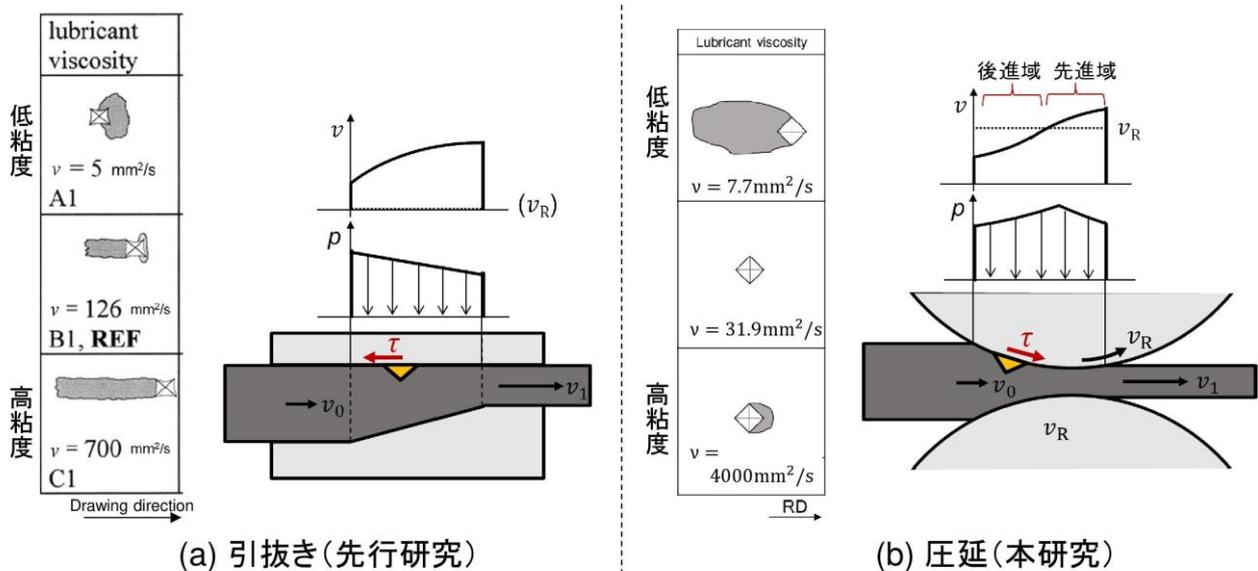


図6 (a)引抜き³⁾と(b)圧延における再潤滑機構の説明図。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2020 年度一般研究開発助成 AF-2020215-B2 によるものであり、同財団に深甚なる謝意を表す。実験装置の設計製作に当たっては大阪大学コアファシリティ機構工作支援部門の大野功司氏、実験にあたっては寺田喜満君、伊勢家雄次君の協力を得たことを付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲: 塑性と加工, **30**-347 (1989), 1631-1638.
- 2) A. Azushima: *Tribology in Sheet Rolling Technology*, (2016), Springer, p.47.
- 3) J. Bech, N. Bay and M. Eriksen: *Wear*, **232**-2 (1999), 134-139.
- 4) Y. Carretta, R. Boman, J. Bech, M. Legrand, M. Laugier, J.-P. Ponthot: *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, **112** (2017), 203-237.
- 5) 安部洋平・山下誉裕・森謙一郎: 2019 年度塑性加工春季講演会講演論文集,, (2019), 89-90.
- 6) 中村悠作・山西隆太・松本良・宇都宮裕: 2021 年度塑性加工春季講演会講演論文集,, (2021), 15-16.
- 7) T. Shimizu, H. Kobayashi, J. Vorholt and M. Yang: *Metals*, **9**-9 (2017), 917 (17 pages).
- 8) 池浩・辻邦夫・高瀬誠: 第 48 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), 315-316,
- 9) H. Ike, K. Tsuji and M. Takase: *Wear*, **252** (2002),48-62.
- 10) H. Utsunomiya, Y. Terada, K. Ohno, and R. Matsumoto: *CIRP Annals*, **71**-1 (2022), 245-248.