振動付加鍛造中の加工界面のその場観察と機械学習分析による潤滑挙動の定量的評価

大阪大学　大学院工学研究科　マテリアル生産科学専攻
准教授　松本　良
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022006-B2）

キーワード：鍛造，振動付加，潤滑，その場観察，サーボプレス，機械学習

１．研究の目的と背景

2000 年代以降，サーボモータを駆動源としたサーボプレスの普及が拡大している[1]．サーボプレスはスライド動作に対する設定の自由度が高く，塑性加工プロセスのさらなる高度化や新たな塑性加工プロセスが実現されている[2),3)]．中でもスライドを前進・後退させながら断続的に塑性変形させる振動モーションは多くの効果が報告されており，特に逐次潤滑による摩擦や加工荷重の低減[4),5)]が精力的に報告されている．しかしながら，逐次潤滑現象は加工荷重，加工後の被加工材の形状や表面状態から間接的に調べられているが，金型－被加工材間の潤滑挙動が直接観察された例はない．

一方，塑性変形中の金型－被加工材間のその場観察について，金型の一部をガラス等の透明材料へ置換し，透明材料越しの観察が以前から取り組まれている．最近では，熱間しごき加工における白色系潤滑剤の挙動[6)]，冷間しごき加工における微粒子添加潤滑油の挙動[7)]や冷間引抜き加工における蛍光法による油膜の挙動[8)]が観察されている．しかしながら，その場観察の研究事例の多くは撮影画像に対する視認による定性的分析であり，撮影画像の画像処理による定量的分析は少ない．

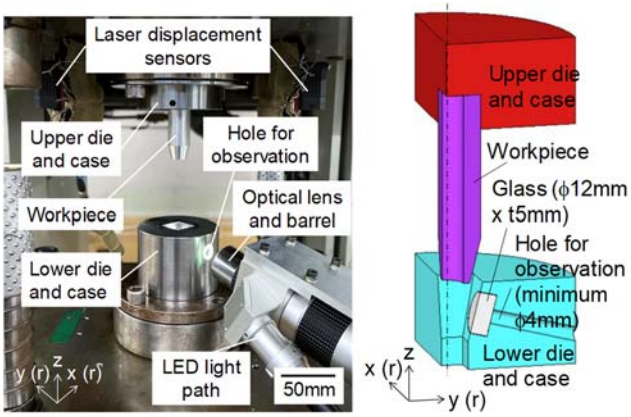
本研究では，振動付加鍛造中の金型－被加工材間のその場観察による潤滑挙動の可視化とその場撮影画像の機械学習による潤滑挙動の定量的評価を目的とする．本報告書では，その場撮影画像の機械学習による振動付加鍛造中の膜厚推定について報告する．

２．押出し鍛造におけるその場観察方法[9)]

2.1　金型形状およびその場観察条件

冷間押出し鍛造を対象とした金型－被加工材界面のその場観察装置の外観および金型構成を図 1 に示す．下側金型の中央部に入口（上面）側から出口（下面）側にむけてテーパ状の正方形穴部（断面減少率：0.65）を設け，テーパ面の 1 面の中央部に円盤状のセラミックス系ガラス（直径：12mm，厚さ：5mm）を填め込んだ．また下側金型の外周部からガラス填込み部中心に向けてテーパ面の法線方向に穴をあけ，観察穴（最小部直径：4mm）とした．

一方，その場観察は観察穴から鏡筒とズームレンズを介してガラス越しに高速度カメラにより行った．フレームレートは 200fps，撮影領域は約 3mm（z 方向）×約 4mm（x 方向），撮影解像度は 600px×800px（200px/mm）とした．また LED 光源は 2.4×10^4lx に設定した．



(a) 観察用装置　　(b) 金型構成（1/4 断面）

図 1　振動付加押出し鍛造を対象とした金型－被加工材界面のその場観察装置の外観および金型構成

2.2　押出し鍛造条件

押出し鍛造はリンク式サーボプレスにより行った．被加工材に A1070 アルミニウムの引抜き丸棒を使用し，円筒状に旋削加工した．押出し鍛造は 2 段階で行い，2 段目をその場観察の対象とした．1 段目鍛造は無潤滑で行い，ストロークを $s_1 = 12$mm とした．一方，2 段目鍛造は 1 段目鍛造後の被加工材の表面に潤滑油を塗布後，平均鍛造速度を 6.7mm/s，ストロークを $s_2 = 13$mm で行った．振動付加は $s_2 = 10$mm（$= s_{f0}$）から開始し，上側金型に固定した被加工材を図 2 に示すように後退（上昇）・前進（下降）させながら押出した．本研究では後退ストローク（s_r），前進ストローク（s_a），加工ストローク（$s_f = s_a - s_r$）を振動各段で一定とし，$s_r = 3$mm，$s_a = 4$mm，$s_f = 1$mm，振動回数 $n_{total} = 3$ を標準条件とした．$s_r = 3$mm の後退により金型－被加工材間に約 2mm 程度の隙間が生じた．

潤滑油にはポリブテン（動粘度：280mm^2/s（40°C））を使用し，黒色の油溶性着色剤を 5vol%の比率で混ぜて着色した後，被加工材表面に約 80μm の膜厚で塗布した．以下，着色済み潤滑油を潤滑油と記す．

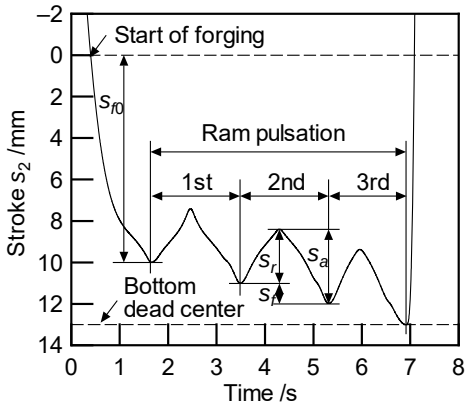


図 2　振動付加押出し鍛造におけるスライドモーション模式線図（s_{f0}：振動付加前ストローク，s_r：後退ストローク，s_a：前進ストローク，s_f：加工ストローク）

3．機械学習による画像解析方法 [10)]

3.1　教師画像の撮影方法

2 章で述べた押出し鍛造後の被加工材のテーパ部表面に潤滑油を所定の膜厚で塗布した後，下側金型に挿入し，その場観察と同一のカメラ設定で撮影した潤滑膜の静止画像を教師画像とした．教師画像は膜厚 0～80μm の範囲で膜厚 5μm あるいは 10μm の分類間隔で最大 11 水準，膜厚毎に最大 100 枚準備した. 解析対象領域での各画像内の輝度値の平均変動係数は 0.33 であり，各画像内で膜厚は均一ではなく，平均膜厚を既知とした．

3.2　教師画像の撮影方法

撮影された金型－被加工材界面のカラー画像について，各画素点の RGB 値を輝度値（0（黒）～255（白））へ変換した．各画素点（位置）での輝度値を説明変数とし，3.1 節で述べた平均膜厚が既知の撮影画像を教師画像として，膜厚が未知の鍛造中のその場撮影画像の膜厚をランダムフォレストにより推定した. また膜厚推定に対する各説明変数の重要度を算出した. ランダムフォレストでは教師画像のうち 70%の枚数を学習データ，30%の枚数を検証データとして用いて，交差検証により 1000 本の決定木，おおむね 10 層以下とした．

また撮影画像の解析対象領域は x 方向の両端 0.5mm を除外した約 3mm（z 方向）×約 3mm（x 方向）とし，画素数を 22,500px（150px×150px，50px/mm）としたものを標準条件とした．また教師画像は 11 分類水準の膜厚，膜厚毎に 50 枚を標準条件とした．

機械学習による画像解析にはオープンソースライブラリ scikit-learn ver.1.0.2 を利用した．画像の読み込み，各画素点での輝度値の算出や標準化，ライブラリの組込み，分析結果の出力のプログラムは Python ver.3.9.13 により作成した．

4．画像解析結果および考察

4.1　教師画像の膜厚分類精度 [10)]

教師画像例を図 3 に示す. 撮影画像内で潤滑膜厚は均一ではなく，潤滑膜厚が厚いほど撮影画像の明度は低下し，各画素点の輝度値（Y : 0（黒）～255（白））の平均値は低下した．

図 4 に教師画像における潤滑膜厚の分類精度に及ぼす膜厚毎の画像枚数の影響を示す. 膜厚毎の画像枚数が多いほど分類精度は高く，50，100 枚では分類精度は約 75%であった．分類精度を 90%以上に高めるには膜厚毎に数百枚以上の撮影画像あるいは膜厚毎の特徴が明瞭な撮影画像が必要と予想される．

次に教師画像における潤滑膜厚の分類精度に及ぼす潤滑膜厚の分類水準数の影響を図 5 に示す．ただし，各分類水準において膜厚 0μm と膜厚 80μm の撮影画像を必ず含め，分類水準数に応じて分類水準を等間隔で選択した．分類水準数が多いほど分類精度は低下傾向にあったが，分類水準数が 5 以上（膜厚の分類水準間隔 20μm 以下）では分類精度は約 75%と一定であった．膜厚 100μm 以下では 5μm の膜厚変化で平均輝度値は 5～10 変化したため，本研究での最大分類水準数（11，膜厚の平均分類水準間隔 5μm）では，5～10 の輝度値の差違を約 75%の精度で分類できることが示唆される．

図 6 に教師画像における潤滑膜厚の分類精度に及ぼす単位長さあたりの画素数の影響を示す. 2px/mm（6px×6px）以上では分類精度はいずれも 70～75%の間であった．単位長さあたりの画素数が多い方が分類精度は高いと一般的には考えられる一方，説明変数（画素数）が増え，分類分けが困難になるため，分類精度が約 75%に留まったと推察される．

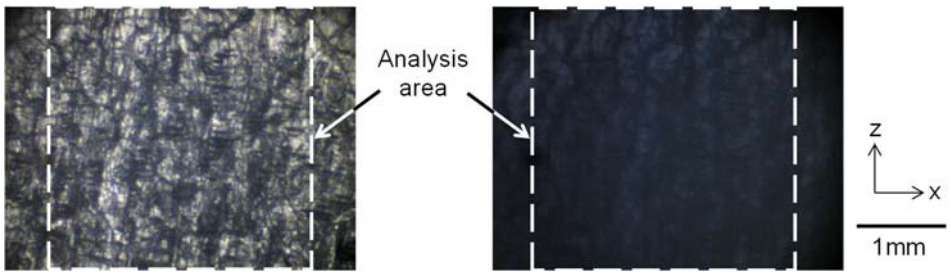


図 3　教師画像用の撮影画像例
(a) 平均膜厚：10μm（平均輝度値：101，変動係数：0.36）(b) 平均膜厚：80μm（平均輝度値：41，変動係数：0.19）

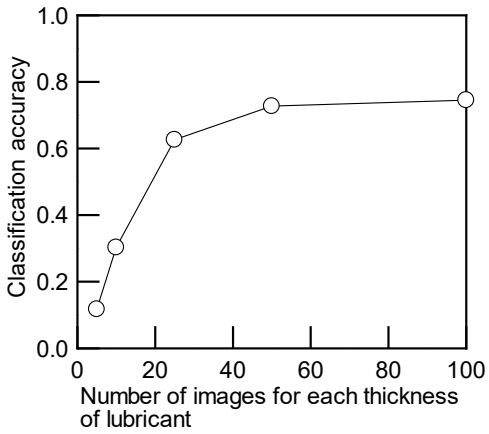


図 4　教師画像における潤滑膜厚の分類精度と膜厚毎の画像枚数の関係

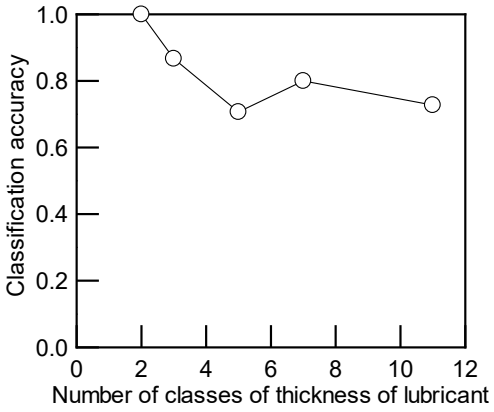


図 5　教師画像における潤滑膜厚の分類精度と膜厚の分類水準数の関係

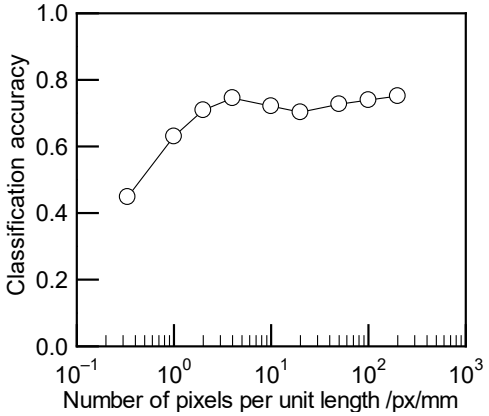


図 6　教師画像における潤滑膜厚の分類精度と単位長さあたりの画素数の関係

以上の結果より，本研究での撮影対象・条件では単位長さあたりの画素数 50px/mm，22,500px の撮影画像に対して，分類精度が約 75%（膜厚分類能 : 5～10μm）であることが示唆される．

4.2　振動付加なし押出し鍛造中のその場撮影画像の潤滑膜厚の推定 [10)]

図 7 に振動付加なし押出し鍛造中のその場撮影画像の潤滑膜厚の推定結果を示す．ただし，機械学習による推定膜厚では膜厚 10～40μm の範囲では膜厚 5μm 毎での分類である．また比較のため，各教師画像の平均輝度値と膜厚の関係を Beer–Lambert の法則 [11)]に則った輝度値－膜厚の関係式に近似し，鍛造中のその場撮影画像の平均輝度値を近似式から求めた膜厚推定値も図中に示す．機械学習による推定膜厚と平均輝度値による推定膜厚はおおむね一致した．各画素点での輝度値の膜厚分類に対する重要度を調べたところ，重要度が突出した画素点（場所）はほとんどなかった．したがって，撮影領域内の特定の場所での輝度値が膜厚分類の判断に影響を強くは及ぼさず，平均輝度値による推定膜厚とおおむね一致したと考えられる．

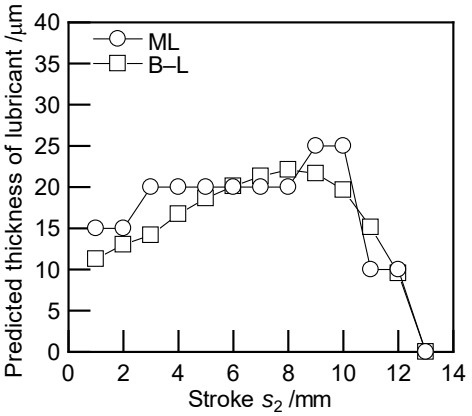


図 7　振動付加なし鍛造中のその場撮影画像の潤滑膜厚の推定結果（ML : 機械学習による推定，B–L : 平均輝度値－膜厚の関係近似式による推定）

4.3　振動付加押出し鍛造中のその場撮影画像の潤滑膜厚の推定結果 [12)] 4/4

s_2 = 10mm からの振動付加押出し鍛造中のその場撮影画像の例を図 8 に示す．潤滑油に油溶性黒色着色剤を混合したため，撮影画像の色合いが濃いほど潤滑膜厚が厚いものとみなす．被加工材の後退動作にともない，撮影画像に変化がみられ，後退開始時と押出し再開時を比較すると，押出し再開時の方が撮影画像の色合いがわずかながら濃く，振動付加中に金型－被加工材間に潤滑油が流入したことが示唆される．

図 9 に振動付加押出し鍛造中のその場撮影画像に対する機械学習による潤滑膜厚の推定結果を示す．ただし，膜厚 10～40μm の範囲での機械学習による膜厚推定は膜厚 5μm 毎での分類である．また図 7 と同様に機械学習による推定膜厚と平均輝度値による推定膜厚はおおむね一致し，各画素点での輝度値の膜厚分類に対する重要度も突出した画素点（場所）はほとんどなかった．図 7 に示した振動付加なし押出し鍛造では，$s_2 \geq 10$mm では膜厚は急激

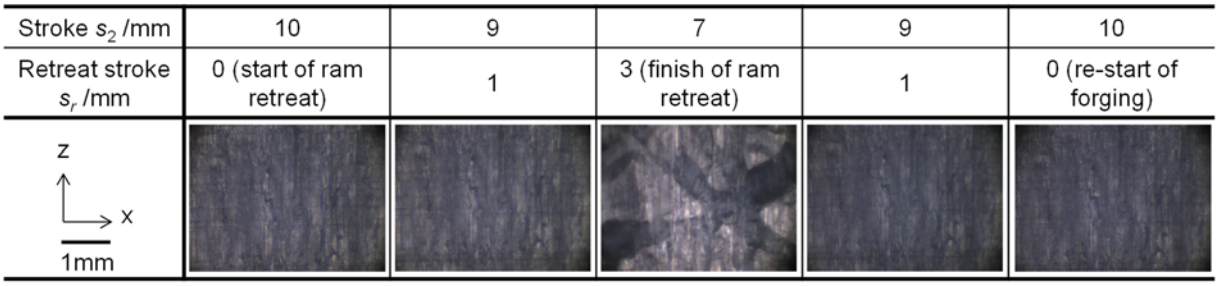


図 8　振動付加鍛造中のその場撮影画像の例

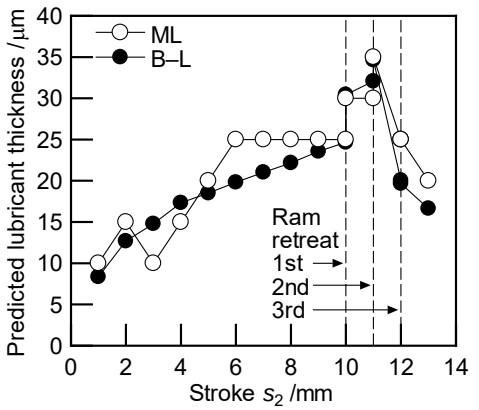


図 9　振動付加鍛造中のその場撮影画像の潤滑膜厚の推定結果

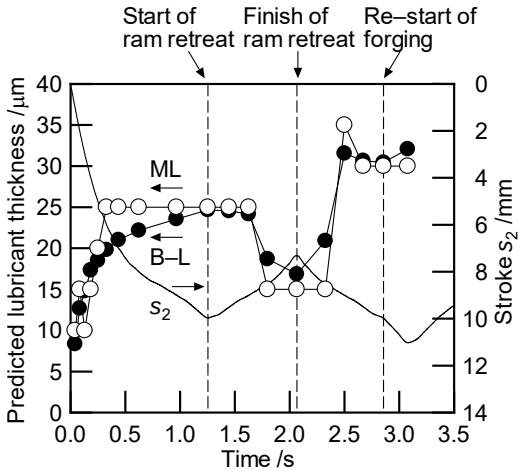


図 10　振動付加時の上側金型後退開始から鍛造再開までの潤滑膜厚の推定結果（s_2 = 10mm）

に薄くなった一方，図 9 では s_2 = 10，11mm での振動付加により膜厚がそれぞれ 5μm ずつ厚くなった．

次に s_2 = 10mm での振動中の上側金型後退開始から鍛造再開までの潤滑膜厚の推定結果を図 10 に示す．こちらも機械学習による推定膜厚と平均輝度値による推定膜厚はおおむね一致した．上側金型後退により被加工材が下側金型から引き離された際（s_r = 約 1mm）に潤滑油は被加工材側とガラス側に分離された．その場撮影画像にはガラス金型の表面に付着した潤滑油が撮影されたため，s_r ≥ 約 1mm（s_2 ≤ 約 9mm）で膜厚はみかけ上薄くなった．上側金型後退開始直前と鍛造再開時の膜厚を比較すると，5μm 厚くなり，振動付加による逐次潤滑が示唆される．

4. 4　潤滑挙動と振動付加中の潤滑機構 [12)]

図 7, 9, 10 の潤滑膜厚の変化から潤滑油の挙動は次のように推察される．鍛造開始時の金型－被加工材の接触により潤滑油の多くが撮影領域の外側へ押出（排出）され，s_2 = 0～10mm では接触面圧が高まり，撮影領域である下側金型－被加工材間の中心部（その場撮影領域）へ閉じ込められた潤滑油が集まり，その場撮影領域での膜厚が厚くなった．また s_2 = 10～13mm では潤滑油が引伸ばされ，振動付加なしでは膜厚が急激に薄くなったと推察される．一方，s_r = 3mm の振動付加では上側金型の後退により被加工材と下側金型が引き離された．鍛造再開時までに両者の表面で潤滑油の再配置や両者の隙間への潤滑油の流入が生じた結果，鍛造再開時の膜厚が上側金型後退開始直前と比較して 5μm 厚くなったと推察される．

図 11 に振動付加時の金型後退ストローク長さが潤滑膜厚に及ぼす影響を示す．s_r ≤ 0.3mm では鍛造再開時と上側金型後退開始直前で膜厚に変化は見られなかった．本研究での鍛造条件では s_r > 1mm で完全除荷され，下側金型－被加工材間に隙間が形成されたことから，振動付加による逐次潤滑は金型後退による下側金型－被加工材間に隙間の形成が必要である．

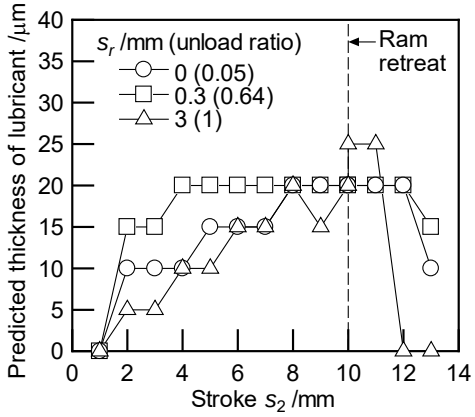


図 11　潤滑膜厚に及ぼす振動付加時の金型後退ストローク長さの影響（s_r = 0～3mm，s_f = 3mm，n_{total} = 1，金型後退後保持時間：2s）

５．まとめ

振動付加鍛造中の金型－被加工材間のその場観察による潤滑挙動の可視化の取り組みの内, 本報告書ではその場撮影画像の機械学習による振動付加鍛造中の膜厚推定について報告した．以下に得られた結果をまとめる．

1) 平均膜厚を既知とした潤滑膜の撮影画像を機械学習させ，膜厚の分類精度について調べたところ，画素数22,500px（50px/mm）の撮影画像に対して，分類精度が約 75%（膜厚分類能：5～10μm）であった．
2) これらの撮影画像を教師画像として, 振動付加なし押出し鍛造中の金型－被加工材界面での潤滑膜の撮影画像の膜厚を推定したところ, 平均輝度値による膜厚推定値とおおむね一致した．
3) 同様に振動付加押出し鍛造中の金型－被加工材界面での潤滑膜の撮影画像の膜厚を推定したところ, 完全除荷の振動付加により鍛造再開時の潤滑油について5μm の膜厚上昇となり, 振動付加による逐次潤滑が示唆された．
4) 本鍛造条件での逐次潤滑現象は, 振動付加中の金型－被加工材の分離・再接触にともない，潤滑油の粘性や吸着性による膜厚分布の変化や界面への流入が生じたことが主因と推察された．

謝　辞

本研究を進めるにあたり研究助成いただいた(公財)天田財団に深く感謝の意を表する．

参考文献

1) Kawamoto, K., Ando, H. and Yamamichi, K.: Procedia Manuf., **15** (2018), 31-38.
2) Osakada, K., Mori, K., Altan, T. and Groche, P.: CIRP Ann. Manuf. Technol., **60**-2 (2011), 651-672.
3) 安藤弘行: プレス技術, **55**-11 (2017), 18-25.
4) Matsumoto, R., Sawa, S., Utsunomiya, H. and Osakada, K.: CIRP Ann. Manuf. Technol., **60**-2 (2011), 315-318.
5) 前野智美, 森謙一郎, 小坂田宏造: 塑性と加工, **50**-585 (2009), 951-955.
6) 石川昭都, 土屋能成, 神谷美帆, 王志剛: 67 回塑加連講論, (2016), 103-104.
7) 安部洋平，市村昴己，森謙一郎: 71 回塑加連講論, (2020), 201-202.
8) 平出一真, 森綱泰一, 柳田明: 74 回塑加連講論, (2023), 59-60.
9) Matsumoto, R., Nakamura, Y. and Utsunomiya, H.: J. Manuf. Process., **101** (2023), 675-686.
10) Matsumoto, R., Kunisawa, S., Nakamura, Y. and Utsunomiya, H.: Defect Diffus. Forum, **441** (2025), 39-43.
11) Verhoeven, J.W.: Pure Appl. Chem., **68**-12 (1996), 2223.
12) 松本良, 國澤秀介, 中村悠作, 宇都宮裕: 2024 塑加春講論, (2024), 45-46.