

超臨界二酸化炭素雰囲気中レーザー穴あけ加工における自然対流の効果に関する理論的考察

Theoretical Analysis of Free Convection in the Drilled Hole in Supercritical Carbon Dioxide

○ 吉木 啓介¹、伊藤 杏奈²、高御堂 美佑紀²、古田 裕正²、神谷 東志一²、井上 尚三¹

(1. 兵庫県大、2. パナソニック デバイス S U N X 株式会社)



○ Keisuke Yoshiki¹, Anna Ito², Miyuki Takamido², Hiromasa Furuta², Toshikazu Kamiya², Shozo Inoue¹ (1. Univ. of Hyogo, 2. Panasonic Industrial Devices SUNX Co., Ltd)

E-mail: yoshiki@eng.u-hyogo.ac.jp

我々は先行研究において超臨界二酸化炭素雰囲気中においてガラスの深穴加工を行い、アスペクト比（穴深さ／穴径）100 を超える深穴加工を実現した [1]。そのメカニズムは不明な点が多かったが、超臨界二酸化炭素がもつ気体並みの流動性、液体並みの分散力による加工くずの排出性、および気液界面が原理的に存在しないことから残留気泡による目詰りが生じない点が推測されたが、二酸化炭素の物性に基づいた定量的な考察が必要であった。そこで、本研究では熱・流体力学を用いた理論計算に基づいて加工プロセスにおける流動現象を計算し、超臨界二酸化炭素が空気、水などの一般的な流体に比べ、深穴内部において極めて対流を起こしやすい流体であることを見出した。そのため、狭い加工穴内部でも対流が発生し、それが加工屑の排出を助けると考えた。

レーザー深穴加工において自然対流による加工くず排出の報告は細孔加工においては未だない。これは細孔内では対流が非常に起こりにくいことに起因する。オープンサイフォンにおける対流現象は Lighthill[2] が定式化した¹が、対流の起こりやすさの指標となる無次元数が示され、 $t_1 = Ra(a/l) = \frac{\alpha(T_0 - T_1)ga^4}{\nu\kappa l}$ となる。この無次元数は穴内壁の温度を無次元化したパラメーターでもある。ここで、 a 、および l は加工穴の径、および長さ。Ra は a を代表長さとするレイリー数、 T_0 および T_1 は加工穴内壁の温度および雰囲気流体の温度、 α は体積膨張率、 g は重力加速度、 ν は粘度 μ と密度 ρ で表される動粘度である。そして、 $\kappa = k/\rho C_p$ は温度拡散率で、熱伝導率 k 、定圧比熱 C_p 、密度 ρ で表される。この t_1 の値が 1000 を下回ると対流が穴底まで到達しなくなる。この無次元数は穴径の 4 乗に比例するため、微細穴加工になると急激に対流の恩恵を受けにくくなることを示している。現に、穴径 100 μm 、穴深さ 1000 μm の穴の場合、空気では 1.29×10^{-2} 、水では 2.20×10^{-4} となり、この穴サイズではほとんど対流は起こらないことを示している。しかし、 α が高く、 ν と κ が低い超臨界流体であれば対流を促進することが出来る。そのため、温度、圧力の条件を適切に設定すれば、穴径 200 μm 、穴深さ 1 m の超高アスペクトの穴においても自然対流をが生じる。これに加えて、加工屑排出を阻害するバブルの発生、残留による加工の阻害もない。もし、このサイズの加工穴が実現すれば、機械加工を含めて過去に類を見ない微超深穴加工法となり得るため、タービンブレードの熱交換の効率化など、今までに無かった機能を付与できる。

参考文献

- [1] 吉木啓介, 生津資大, 井上尚三 "超臨界二酸化炭素雰囲気におけるレーザー深穴加工", 第 57 回応用物理学関係連合講演会予稿集, (2014): 8p-K-9.
- [2] Lighthill, M. J. "Theoretical considerations on free convection in tubes." The quarterly journal of mechanics and applied mathematics 6.4 (1953): 398-439.