

(論文)

光ファイバ線引装置と線引炉シミュレーション

Optical Fiber Drawing Machine and Simulation of Optical Fiber Drawing Furnace



若園武彦*

Takehiko WAKAZONO



福谷和久*(工博)

Dr. Kazuhisa FUKUTANI

Optical fiber enables long distance and high data rate signal transmission without electromagnetic interference. This optical fiber capability meets the rising demand for mobile phone and internet communication. Kobe Steel developed an optical fiber drawing machine in the 1980s and supplied machines to optical fiber makers. The drawing furnace is the heart of the optical fiber drawing machine and its behavior affects the quality of optical fiber. Simulation of the optical fiber drawing furnace provides the situation of furnace behavior. The results of the simulation analyses are utilized in furnace design.

まえがき^{1)~4)} = 光ファイバは屈折率の高い中心部(コア)を屈折率の低いクラッド部が同心円状に取巻く構造となっており、光をコア内で全反射させながら伝送させることができる。光は非常に周波数の高い電磁波であるため、電磁気の影響を受けることなく大量の情報を長距離伝送することができる。この光ファイバの能力は携帯電話・インターネットの普及に合致し、急速にその需要が拡大した。

当社は、80年代にNTTから線引技術を得て光ファイバ線引装置を開発して以来、装置開発および線引技術研究開発を継続し、最新鋭の光ファイバ線引装置をファイバメーカーに供給してきた。

本稿ではその装置概要と線引装置の心臓部である線引炉に対しシミュレーション手法を適用して炉構造解析を効果的に行った事例を紹介する。

1. 光ファイバ線引装置

1.1 装置の概要^{1)~4)}

図1に光ファイバ線引装置の全体図を、図2に光ファイバ線引工程の概念図を示す。光ファイバを線引するには、まず、あらかじめ所定の屈折率分布にした石英母材を用意する。石英母材は、送り装置によって線引速度に合せた速度で線引炉に送り込まれる。2,000以上に加熱された炉内で石英母材は加熱溶融され、自重によって鉛直方向に引伸ばされ、糸状になって炉外に送り出される。これを引取機によって所定の張力で連続的に引取る。このとき光ファイバのクラッド直径が125 μm になるよう線引速度を調整しながら引取られる。線引速度は現在おおむね1,200m/min以上である。引取る過程で、クラッド表面を傷つきから保護するための紫外線硬化樹脂被覆を行う。被覆後に外径245 μm 前後の光ファイバ素線となった後、巻取機で巻取られる。

上記の線引工程後、ファイバ素線の強度チェック工程(スクリーンテスト)、着色工程を経て、用途に応じて各種ケーブルに加工され、光ファイバケーブルとして出荷される。

1.2 光ファイバの品質

光ファイバ素線に要求される主な品質を表1に示す。特にファイバのクラッド外径精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下と高

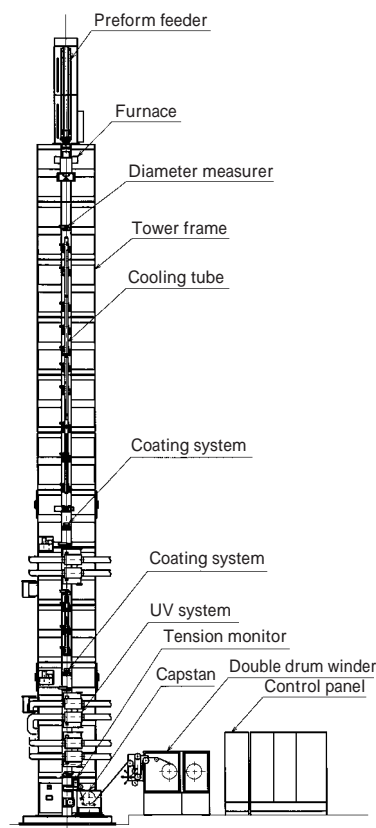


図1 光ファイバ線引装置全体図
Fig. 1 Layout of optical fiber drawing machine

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 産業機械技術部 **技術開発本部 機械研究所

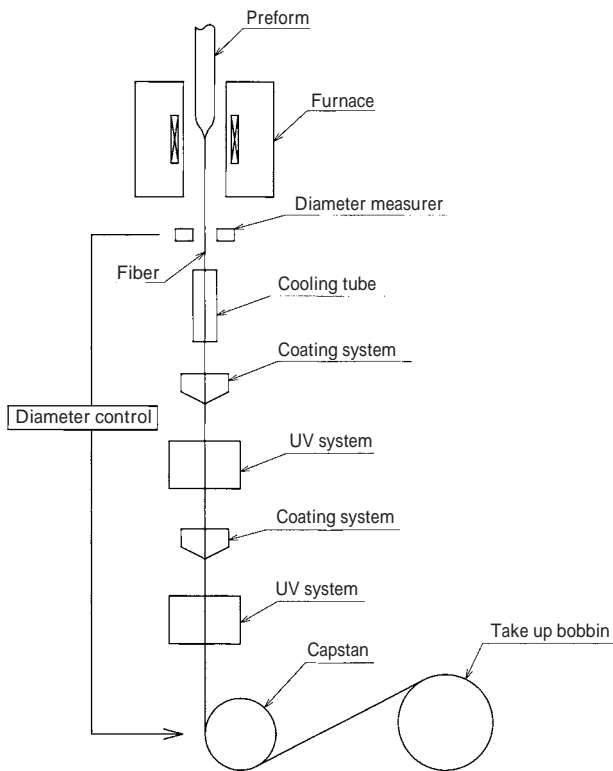


図2 光ファイバ線引工程概念図
Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber drawing process

表1 光ファイバ素線要求品質

Table 1 Required specification of optical fiber

Item	Specification
Clad Diameter	125 ± 0.5 μm
Screen Test Level	1%
Attenuation	0.36dB/km or less at 1,310nm 0.23dB/km or less at 1,550nm

い精度が要求される。また、光ファイバは全長にわたり一定以上の強度が必要であり、強度チェック工程で破断が多いと使用に耐えない。これら品質は、線引工程においては線引炉の構造とその運用に大きく依存することから、線引炉は線引装置における心臓部といえる。このため、その構造を適切に設計し、最適な条件で運転することが重要となる。

1.3 線引炉

図3に線引炉の構造を示す。炉外壁はステンレス製の水冷ジャケット構造となっており、内部で発生する熱を冷却する。この中に断熱材が入り、ヒータと炉芯管が配置され、炉芯管内に母材が挿入される。ヒータに電圧が印加され、ここで発生するジュール熱が炉芯管を介して母材に伝わり母材先端を熔融させる。炉内は2,000以上の高温になるため、炉内部の構造品はカーボン製とし、酸化消耗を防ぐためにアルゴンやヘリウムなどの不活性ガスが炉内に満たされる。

1.4 光ファイバ品質と線引炉設計・線引条件

表2に光ファイバの品質とその影響因子、また影響因子に関係する線引炉の構造、線引条件といったパラメータを示す。多くのパラメータが影響因子に関係し、それらが複合してファイバ品質を決定するため、すべてのパラメータを変更して最適な線引炉設計、線引条件を導く

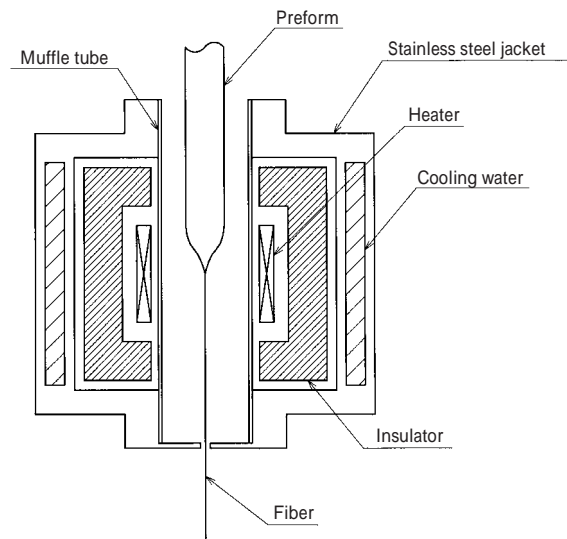


図3 線引炉構造
Fig. 3 Structure of optical fiber drawing furnace

表2 光ファイバ品質と線引パラメータ

Table 2 Relation between quality of optical fiber and furnace drawing parameter

Item	Factor	Furnace drawing parameter
Clad diameter stability	Gas flow situation in drawing furnace	Gas inlet position
	Neckdown shape	Kind of gas
	Temperature distribution in drawing furnace (both flow direction and diameter direction)	Gas flow rate
Fiber strength	Gas flow situation in drawing furnace	Muffle tube diameter
	Neckdown shape	Upper clearance
	Drawing Tension	Shutter diameter
		Drawing velocity
Optical characteristic	Gas flow situation in drawing furnace	Heater length and position
	Drawing tension	Heater temperature
	Temperature distribution in preform	Cooling water temperature
		Each dimension of drawing furnace

のは困難である。これまでは経験的に線引炉構造を決定し、試行錯誤で線引条件を決定していたが、これらのパラメータを定式化して解析モデルを作り、シミュレーションを行うことができれば線引炉の挙動を予測することができ、開発の効率化を図ることができる。次章ではそのシミュレーションの実例を紹介する。

2. 光ファイバ線引に関するシミュレーション

2.1 線引過程のシミュレーション

光ファイバ線引過程に関する初期の研究としては、Paek et al.⁵⁾が代表的である。これと関連して多くの研究が後に進められた。しかしながらこの研究の線引条件は、母材径が10mm程度、線引速度が60m/min程度と、現在の製造の条件に比べると母材径が小さく、線引速度も低かった。また、線引炉の設計に必要な線引条件と線引張力、あるいはネックダウン形状との関係に関する研究はVasilijev et al.⁶⁾の報告がある程度であり、きわめて少なかった。このようなことから、従来の研究から得られる実製造に対する技術的な示唆は多くなかった。

筆者らは現在の線引速度、母材径の条件に対応しつつ、パーソナルコンピュータによる実用的な計算時間で線引過程の母材変形と熱流動をシミュレーション可能な解析モデルを開発した⁷⁾。その特徴は、線引過程の変形における力の釣合いとエネルギーの収支の特徴を考慮して、力の釣合いは線引方向の一次元で、エネルギーの収

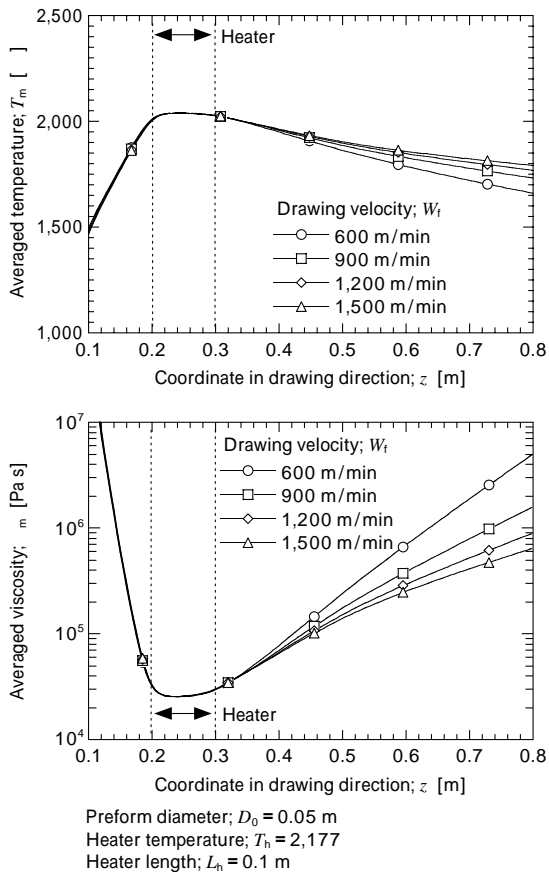


図4 線引速度による断面平均温度と粘性の分布の変化
Fig. 4 Effect of drawing velocity on cross sectional averaged temperature and viscosity

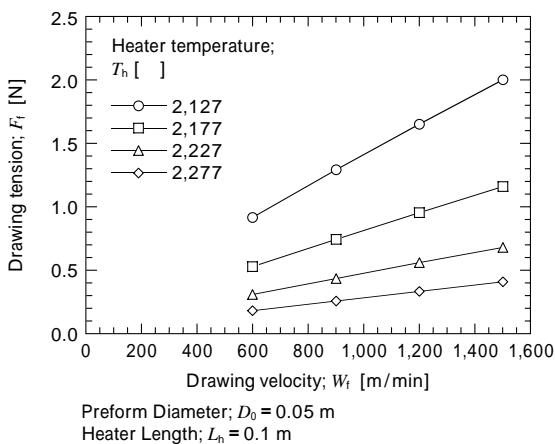


図5 線引速度と線引張力の関係
Fig. 5 Drawing velocity v.s. drawing tension

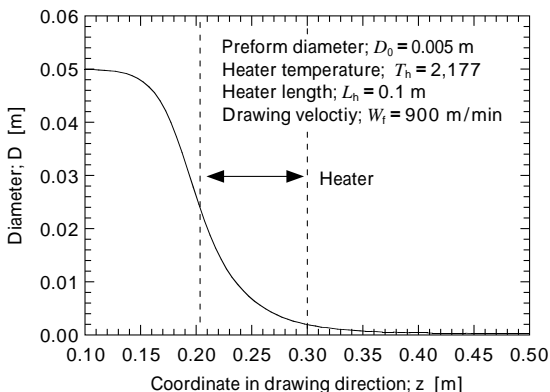


図6 ネックダウン形状の例
Fig. 6 Example of neck-down profile

支は軸対称の二次元で扱うことにある。この解析を用いて炉温度・炉構造・線引速度といった線引パラメータと、線引されるファイバの張力・ネックダウン形状との関係を明らかにした⁸⁾。

この解析モデルで実施したシミュレーション結果の例を図4から図6に示す。図4は線引速度による断面平均温度と粘性の分布であり、図5は線引速度と線引張力の関係である。図6は直径の線引方向の分布、すなわちネックダウン形状を表す。これらの図によれば

- a) 線引速度が高くなるにつれて、高温、低粘性の領域がヒータの下流側に広がる
- b) 線引張力は線引速度にほぼ比例する
- c) ヒータ長、炉温度、線引速度からネックダウン形状を予測することができる

などといった線引過程の変化を予測することができる。

2.2 ファイバ外径変動のシミュレーション

先に述べたように、線引過程におけるファイバの外径変動を小さくすることはその品質の確保上重要である。従来、線引炉内のガス流れの安定性がファイバの外径変動の大きさに影響していることは経験的に知られていたが⁹⁾、それがどのようなメカニズムによるのか、外径変動を抑えるためにどのような炉構造、ガス流量設定にすれば良いかは理論的には知られていなかった。このため実際には試行錯誤により、外径変動に影響を与える炉内構造、炉内ガスの流し方、ガスの流量を決めていた。筆者らは線引過程における力とエネルギーのバランスにおける変動の基礎式を一次元的に定式化し、ファイバ表面の熱伝達変動とその外径変動とを関係付ける解析モデルを開発した。これにより、ガス流れを安定させるべき領域は、線引過程において速度勾配が最大となるファイバ直径が200 μm程度の領域であることを特定した¹⁰⁾。この領域のガス流れを安定させるために、次節に説明するように炉内のガス流れを検討した。図7はこの解析モデルによるシミュレーション結果の例であり、熱伝達率の変動位置およびその周波数とファイバ外径変動率の関係を示す。この解析では、まずベースとする線引方向1次元の定常解を定常解析により求め、それに対してファイ

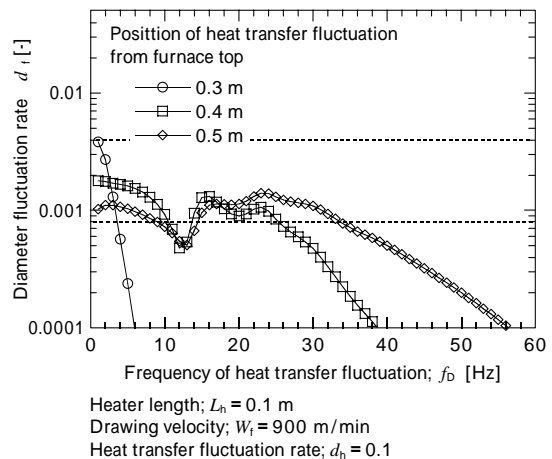


図7 熱伝達率変動位置とファイバ外径変動の関係
Fig. 7 Effect of heat transfer fluctuation on diameter fluctuation of fiber

バ表面の熱伝達率に周期的な変動を強制的に与えたときに生じるファイバの断面積、速度および温度の変動を摂動解法により求めている。この解法ではファイバの外径は熱伝達率の変動と同じ周波数で変動する。図7は、このようにして求めた計算領域の出口でのファイバ外径変動の大きさを示している。この図によれば、線引装置においてフィードバックによる外径制御の難しい10から30Hz程度の周波数の外径変動は、主に炉上端0.4から0.5mの範囲におけるファイバ表面の熱伝達率変動によって起こされることがわかる。この範囲は図6に示すようなネックダウン形状においては、直径が200 μ m前後となる範囲に対応していた。

2.3 線引炉内ガス流れのシミュレーション

近年では汎用の流動シミュレーションソフトが発達し、計算機も高速化しているため、線引炉内ガス流れのシミュレーションを設計に即して実用的に行えるようになった。図8は線引炉内ガス流れのシミュレーション結果として得られる流跡線の例である。シミュレーションには汎用の流動解析ソフトFLUENTを用いた。このようなシミュレーションを行えば炉内のガスがどのように流れるかを予測できる。すなわち、条件として線引炉構造・線引炉内壁面温度分布・ガスの供給位置・その流量などのパラメータを与えることにより、線引炉内の流跡線・温度分布・圧力分布をシミュレーションによって求めることができる。この計算結果において、前節で述べた炉内の特定の領域に着目し、ガス流れの状況が安定する線引炉パラメータを把握すれば、ファイバ外径変動が小さくなる設計条件を決めることができる。また、同じ手法で線引炉内ガスを有効に線引炉外に排出する検討も行っている。図9は、流動シミュレーションにより求め

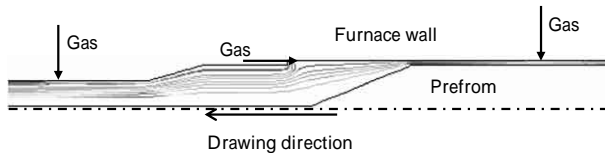


図8 炉内の流れの流跡線の例

Fig. 8 Example of streak line in drawing furnace

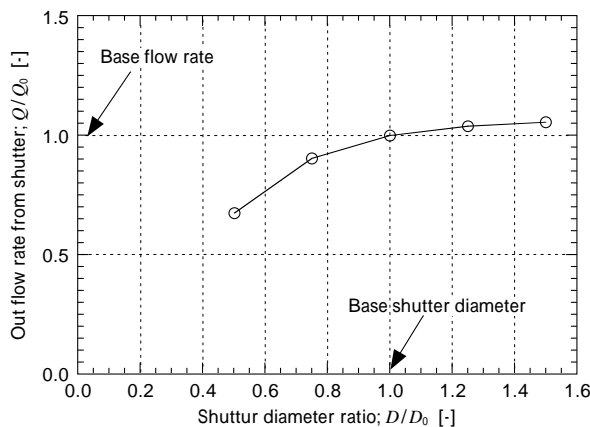


図9 炉下のシャッタ径と流出流量の関係

Fig. 9 Shutter diameter v.s. flow rate from shutter

た炉下の絞り径とそこから流出流量の関係である。この図より、現在の絞り径と流量を1として、絞り径を変更した場合の流量の倍率がわかることから、炉下からの流出流量を所定の値とする絞り径を決定することができる。

むすび=本稿では、光ファイバ線引装置とその心臓部である線引炉について報告した。また、炉構造についてはシミュレーション手法を適用することによって効果的に炉構造解析を行い、要求される光ファイバ品質を満たす装置設計と線引条件設定が可能となることを示した。ここで紹介した手法により、当社の線引炉は光ファイバの外径安定性に優れ、かつ、高強度で光学特性を満足した光ファイバを線引可能となっている。また線引炉運用面についてもサポートすることが可能な体制を整えている。

今後さらなる生産性向上のための母材大径化、線引速度高速化が要求されており、さらに高度な装置作りを通して顧客ニーズにこたえた製品を提供して行きたい。

参考文献

- 1) 稲田浩一：マルチメディアで夢を送る光ファイバの話、(1995)、葦華房。
- 2) 電気通信協会：実務に役立つ光ファイバ技術 200のポイント改訂2版、(2001)、オーム社。
- 3) 山下真司：光ファイバ通信のしくみがわかる本、(2002)、技術評論社。
- 4) 末松安晴ほか：光ファイバ通信入門改訂4版、(2006)、オーム社。
- 5) U. C. Paek et al. : J. Appl. Phys., Vol.49, No.8 (1978) pp.4417-4422.
- 6) V. N. Vasiliev et al. : Glass Technology, Vol.30, No.2 (1989) pp.83-90.
- 7) 福谷和久ほか：日本機械学会論文集C編, Vol.69, No.682 (2003) pp.1670-1677.
- 8) 福谷和久ほか：日本機械学会論文集C編, Vol.70, No.694 (2004) pp.1730-1736.
- 9) ニューガラスハンドブック編集委員会、ニューガラスハンドブック、(1991) pp.201-203、丸善。
- 10) 福谷和久ほか：日本機械学会論文集C編, Vol.69, No.685 (2003) pp.2403-2410。