技術・研究ノート

熱線風速計用タングステン線の白金蒸着の方法

A Platinum Coating Method of a Tungsten Wire to Use for Hot-Wire Anemometry

堀 晃浩^{*1} 小野木 茂^{*2}

Akihiro HORI, Shigeru ONOGI

SUMMARY

This note describes a platinum coating method of a tungsten wire for hot-wire anemometry. The resistance deviation of the coated tungsten wire stayed within $\pm 2\%$ during a half year. Using sensors with the coated tungsten wire, we obtained expected results of turbulent intensities and spectra in the turbulent boundary layer. This platinum coating method makes the tungsten wire sensor stable.

Key words: Hot-Wire Anemometry, Platinum Coating, Tungsten Wire

1. まえがき

熱線風速計プローブの材料としてタングステン線は、機械的強度の高さ・市販品の豊富さから使用しやすい材料である。その一方で、タングステン線は 300°C 付近から急速に酸化が進行し、抵抗が増加するという問題がある¹⁻²⁾。この酸化による抵抗増加を抑え、長期間の安定性を確保するためにタングステン線に白金蒸着を施すことは有効である³⁾。白金蒸着によりタングステン線の加熱比を高く設定することが可能となり、風速に対して高い出力信号を得られることから、測定時のSN比の改善にも効果がある。

市販品の中にも、白金蒸着したタングステン線を用いたプローブがあり、白金蒸着していないものに対して、冷抵抗や風速計出力の安定性が優れていることを経験し

ている。またこれらのプローブにおける加熱比の使用推奨値は、蒸着していないタングステン線を使用したプローブでは、 $1.4\sim 1.5$ であるのに対して、白金蒸着したプローブでは、 1.8 とされており、相対的に高い加熱比での測定を推奨している(日本カノマックス社、Dantec 社)。

実験目的に適した形状のプローブを自作する場合や、プローブを補修するために必要なタングステン線であるが、白金蒸着した物の入手先は限られている。そこで、白金蒸着を施したタングステン線を製作する方法について検討を重ねた結果、このほど実用に耐えうるプローブが完成した。本稿では、タングステン線に白金蒸着を行う方法と、それを用いて製作したプローブの性能について紹介する。

*1 有限会社気象環境計測、技師
Engineer, Meteorological & Environmental Sensing Technology INC.

*2 気象研究所、物理気象研究部、主任研究官
Senior Researcher, Meteorological Research Institute
(原稿受理年月日：2009年3月11日、採用決定：2009年7月30日)

2. タングステン線の蒸着方法

プローブの製作に使用したタングステン線は、日本カノマックス社から補修用として市販されているもので、直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線の両端は、銅メッキにより太くなっている。この両端の銅メッキ部分は、自作することも可能である⁴⁾。

白金蒸着には、電子顕微鏡の前処理用として使用される蒸着装置（株式会社日立ハイテクノロジーズ、イオンスパッタ E105 型）を使用した。この蒸着装置は図 1 に示すように、矢印で示した円形の部分が試料を設置する部分で、内部に直径 80mm の試料台がある。蒸着時には、白金板（試料台の上部）から出た白金原子が直進するため、被蒸着物体の陰に入りにくい。そのため、均一に蒸着を行うためのタングステン線の支持方法、設置方法を検討する必要がある。

以下、白金蒸着の手順について述べる。

図 1 蒸着装置（日立イオンスパッタ、E105 型）

Fig.1 Coating equipment. (Hitachi High - Technologies Corporation, E105)

図 2 タングステン線と支持台

Fig.2 Tungsten wire and wire holder.

タングステン線への白金の付着性をよくするために、洗浄を行う。アセトンを入れた容器の中にタングステン線を入れ、その容器を超音波洗浄器に入れた水に浮かべ、10 分間洗浄する。

洗浄したタングステン線を図 2 に示すように支持台に取り付け、蒸着装置の試料設置部に置く。図 3 に、試料設置部に置いた支持台の写真を示す。

白金板が試料設置部の上部にあり、白金原子は、そこから試料台へ向かって飛来するので、設置したタングステン線の上面を中心に蒸着される。できるだけ均質に蒸着するために、この支持台の向きを変えながら蒸着する。すなわち、図 3 の上側の写真のように、試料台上に寝かせて表・裏の 2 方向と、下側の写真のように、試料台を取り去って、支持台を立てた方向の 3 方向から、蒸着を行う。この際、白金板からタングステン線までの距離が一定となるように支持台を設計してある。なお支持台側からの蒸着は、支持台自身がタングステン線に影を作るので行わない。このことによりタングステン線の支持台側の蒸着は薄くなることが考えられるが、後節で示す実験で実用上問題のないことを確認している。

使用した蒸着装置による蒸着厚さは、10 分間で $200\text{\AA}$ である。蒸着は 3 方向からそれぞれ 10 分間とし、それを 2 回繰り返す。

図 3 蒸着時の支持台の設置状況

Fig. 3 Wire holders in the coating equipment.

3. プローブの安定性

白金を蒸着したタングステン線を用いた、熱線風速計プローブ（以下、蒸着プローブと略す）の安定性について述べる。安定性は、プローブの冷抵抗の変化と、熱線

図4 冷抵抗の変化 (○：蒸着、■非蒸着プローブ)

Fig.4 Change of cold resistance.
(○：Pt coat, ■：No coat probe)

図5 熱線風速計出力の日変化幅 (○：蒸着、■非蒸着)

Fig.5 Drift on day of CTA output.
(○：Pt coat, ■：No coat probe)

図6 冷抵抗の変化

(X型プローブ、○：Wire-1、■：Wire-2)

Fig.6 Change of cold resistance.
(X probe, ○:Wire-1, ■:Wire-2)

風速計出力の日変化幅を検討することとした。

風洞において性能評価実験として、熱線風速計の調整と、風速 3m/s で 1 日約 8 時間の風速測定を行った。プローブは加熱比 1.8 で調整した。この過程で、調整時の冷抵抗と、実験の開始・終了時に風速 3m/s の風を測定した際の、熱線風速計の出力電圧を記録した。なお、比較のため、蒸着していないタングステン線を用いたプローブ（以下、非蒸着プローブと略す）も同一条件で実験を行った。実験は、延べ 11 日間行ったが、非蒸着プローブについては、単調に冷抵抗が増加し、性能劣化したと考えられたので、データを 4 日分記録した段階で測定を終了した。

冷抵抗を記録した結果を図 4 に示す。冷抵抗が単調に増加している非蒸着プローブに対して、蒸着プローブの冷抵抗は、多少のばらつきはあるものの、最大で試験開始時の 1%の変動である。11 日間の実験で、蒸着プローブの冷抵抗が単調に増加するような、劣化が進行する兆しは認められない。

熱線風速計の安定性を見るために、風速 3m/s の風を測定した時の出力電圧の日変化幅を図 5 に示す。非蒸着プローブは、1 日の実験の間に、3 ～ 6 %程度の変化を示している。一方蒸着プローブは、1 日の変化がおおよそ 1%以内であることがわかる。

次に、実際の乱流測定に近い状況での性能を見るために、白金蒸着したタングステン線を用いて、X 型熱線風速計プローブを製作し、半年間にわたり延べ 34 日の乱流測定実験を行った。そこで記録したプローブの冷抵抗の変化を図 6 に示す。なお、風洞内の気温は季節により 8 ～ 27℃の範囲で変化した。冷抵抗は、気流温度によっても影響を受けるので、この気温変化を伴った期間のデータを比較するために、冷抵抗の温度係数を $0.36\% / ^\circ\text{C}$ と仮定し、冷抵抗を気温 20℃相当に換算してある。この半年間の運用において、冷抵抗の変化は±2%の範囲内である。

4. 乱流測定の性能

前節でプローブの安定性を示すことができた。乱流計測において重要な周波数応答特性は、3 節の実験で風速計を調整する際に、1kHz の矩型波を用いて市販のプローブと同様の特性を示すことを確認している。本節では実際に蒸着プローブを用いて乱流計測を行い、蒸着による悪影響がないかを確認した。

そのため、非蒸着プローブをメーカー推奨の加熱比 1.5 で調整したものと、蒸着プローブ（加熱比 1.8）とを用い

て、乱流境界層の測定を行った。境界層は風洞中心風速10m/sとし、床面粗度として1.2mmの丸棒を並べて発達させた。

図7 乱流強度と平均風速の鉛直分布
(○：蒸着、■非蒸着プローブ)

Fig.7 Profiles of turbulent intensity (upper) and mean velocity (lower).
(○ : Pt coat, ■ : No coat probe)

図8 u' のパワースペクトル (高さ15mm)
(太線：蒸着、細線：非蒸着プローブ)

Fig.8 Power spectra of u' at $z=15$ mm.
Solid line shows the Pt coat probe, and thin line shows the no coat probe.

測定した平均風速と速度変動の標準偏差 (σ) を図7に示す。蒸着プローブの計測結果は、非蒸着プローブと2%の範囲内で一致しており、統計量への蒸着の影響は見られない。

乱れのスペクトルを図8に示す。スペクトルの測定は高さ15mmで行った。蒸着・非蒸着プローブで得たスペクトルは共に同じ形状をしており、ここにも蒸着の影響は見られない。

以上のことから、本稿で示した蒸着プローブは変動風速の計測に影響を与えず計測を行うことができることが確認できた。

5. まとめ

タングステン線に白金蒸着する方法を開発した。蒸着したタングステン線を用いて製作した熱線風速計プローブは、加熱比1.8で使用した結果、11日間の実験において、冷抵抗の変化・熱線風速計出力の日変化幅は、それぞれ約1%以内であることを確認した。また、約半年間使用したプローブの冷抵抗の変化は、 $\pm 2\%$ 以内であった。

蒸着プローブを用いて乱流境界層の計測を行い、平均風速、乱れ、スペクトルは一般的な非蒸着プローブと同じ結果であることが確認できた。

安定性および乱流測定結果の妥当性から、本稿で示した白金を蒸着したタングステン線を用いたプローブは乱流計測の実験において、充分使用に耐えられられる。

謝辞

熱線プローブ製作にあたり、鬼頭修己氏、牛島達夫氏、佐々浩司氏に、ご指導いただきました。タングステン線の蒸着の際には、岡田菊夫氏に、蒸着装置の使用法・特徴など詳細にご指導いただきました。

毛利英明氏には、ここで紹介した方法の提案をいただき、使えるようになるまで、終始励ましていただきました。記して、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本機械学会, “技術資料 流体計測法”, pp. 108 - 109, (1985)
- 2) 蒔田秀治, “熱線流速計使用上の問題点”, 流れの計測, pp. 3 - 17, Vol. 12, No. 16, (1995)
- 3) H. H. Bruun : “Hot-Wire Anemometry”, Oxford Univ. Press, pp. 33, (1995)
- 4) 鬼頭修己, “流れのなかの乱れをはかる”, 楽しい科学実験, 丸善, pp. 108 - 115, (1997)