



球体のはなし



柴田順二（芝浦工業大学名誉教授）

● **球体と回転機素** 生活の中で直接関わる球体技術と言えば、多自由度の転動性を生かした球対偶、すなわち転がり玉軸受、ボールスクリュウ、リニアボールガイドなどを筆頭に、ボールジョイント、ボールバルブ、さらには球面超音波モーターを始めとする各種球体アクチュエータが挙げられる。これらは「ものづくり」に不可欠な機構要素として機械工学の基盤をなしているものだが、製品内部に隠れているため、その存在意義が兎角、見逃され勝ちである。

ボールペンもまた球体の転がり運動を主機能に据えた製品である。わが国筆記具総生産額の約 2/3 を占め、年間 4~5 億本も製造されているにもかかわらず、余りにも身近過ぎる存在ゆえに、購入時にスペックを意識し、ましてや性能・品質などを選択肢にする発想など毛頭浮かばないコモディティ商品である。本話では、転動機能を利用した球体技術の奥深さの一端を、ボールペン先を通して垣間見ることにしたい。

● **ボールペンの構造と筆記機構** ボールペンの中核となるモジュールがレフィル(替え芯)である。レフィル先端がボールペンの筆記機構部であり、チップと呼ばれている。チップはボールとホルダーから構成される。ホルダーの構造はインキ導入孔・導入溝、受皿から成る。ボールの過半はホルダー出口に包み込まれ(30%程が露呈)、ボール落ちが阻止されている。インキは“ボール / ホルダー”間のクリアランスから滲出する。そ

れ故、クリアランスはボールの円滑な転動およびインキ滲出量の調整にとっての命であり、適正な値(0.2 mm 前後)を確保しなければならない。その調整を行うのが、ボールをホルダーに挿入後施されるカシメの工程である。

チップボールが紙面に押付けられると同時にその滑り摩擦力により自由転動させられ、表面に付着したインキ膜が紙面に転写されるというボールペンの筆記原理は、正にマイクロオフセット輪転機である(図 1)。ボールの径に対する描線幅の比率を転写率と呼ぶ。転写率はボール径と筆圧(紙面の凹み深さ)によって決まり、普通、ボール径の 25%~70%程度と見積もられる。

● **チップの寸法と材質** 使用されるチップボール径は、描線幅に応じて大凡、太字用 $\phi 1\text{mm}$ ~極細字用 $\phi 0.3\text{mm}$ の範囲である。極細ボールペンのボール径はインキ膜厚との絡みもあり、技術的には $\phi 0.3\text{mm}$ 辺りが下限界とされていた。ところが近年、ゲルインキなどの開発により超極細ボールペンが実現し、最小ボール径のチャンピオン数値は $\phi 0.18\text{mm}$ に達している。

円滑な転動がボールペンの機能品質となる。そのためチップボールには高い真球度($0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下)と表面粗さ($R_a\text{ }20\text{ nm}$ 程度)が JIS S 6039 によって規定され、またチップボール径の寸法ばらつきは $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以下に管理される。

ボール素材には高硬度、耐摩耗性、インキと

の濡れ性、防錆などの材料特性が望まれる。従来、超硬合金が主体であったが、水性インキに対してその防錆効果が十分とはいえないため、セラミックス製ボールが登用されるようになった。

ボールの転動にとって受皿は軸受に相当する。そのため、高硬度のボール素材に馴染み易いように、ホルダー材質には比較的軟らかい真鍮、洋白、ステンレスなどが用いられる。インキは潤滑材の役割も兼ねており、一般的には油性インキの方が水性インキに比べ筆記の円滑性に優っているが、細字用には水性インキが好ましく、ゲルインキが発案されるきっかけとなった。

● チップボールの転動と摩耗 ボールペンの摩耗は、“ボール/ 受皿”における回転摺動によって引き起される。ここで、チップボール直径 $\phi 0.3\text{mm}$ による平均筆記速度 $v: 1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ を想定すると、ボールの回転数は約 $1,500 \text{ min}^{-1}$ となる。 $v: 4.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ならば、約 $4,500 \text{ min}^{-1}$ である。一方、筆圧: $1\text{N} \sim 2.5\text{N}$ は“ボール/ 受皿”間の微小接触面で支えられる。 $\phi 0.3 \text{ mm}$ のボールに対して、実接触面積は 0.01 mm^2 のオーダーに過ぎないであろう。したがって、数 $\text{ton} \cdot \text{cm}^{-2}$ の接触応力を受け、かつ電動モーターの回転数を越える高速下で摺動する“ボール/ 受皿”の間には、インキという潤滑剤が介在するとは言え、激しい摩擦・摩耗が生じても何ら不思議はない。具体的には、“ボール / 受皿”間の滑り摩擦係数は 0.15 前後、受皿の摩耗量: $100 \sim 700 \mu\text{m}$ / 筆記距離 500m などのデータが得られている。この摩耗によって誘発されるボール沈みやボール落ちなどのトラブルから推定しても、ボールペン機能の持続性には物理的な限界(筆記距離に換算して数千m オーダー)の存在することがわかる。但し、現実の

ボールペン寿命は、インキ容量によって支配される(筆記距離: 1300m、400 字詰め原稿用紙 100 枚程度)。なお、インキを消耗し尽くすまでにチップボールは累計約 60 万回も転動する計算になる。

● 描線の品質 描線の濃度、かすれ、線切れにはクリアランスやボールの転動挙動に加え、インキの濡れ性や潤滑性なども重要な影響因子となる。そもそも、ボールペンの筆記機構自体がチップボールの押込みによる紙面の凹みに基づいている以上、描線幅方向のインキ厚み斑は避けられず、中央部に“割れ・かすれ”が生じやすいのは致し方ない。JIS では、かすれおよび濃度のばらつきのない筆記距離が 300m 以上であること、描き始めから 20cm 以内で円滑な筆記作用が始まること(初筆性)などを謳っている。なお、ボールペン描線機構の固有欠陥として、ボタ落ち(ボテ)がある。ボールの非転写帯にインキの溜まり(泣き出し)ができ、これがボタリと紙面に落ちる現象であり、解決の妙手は見当たらない。

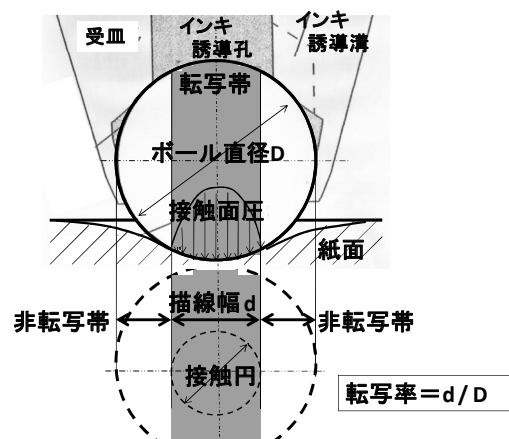


図1 ボールペンの筆記機構と転写率