鋼球の音響寿命 (第2報)*

—音響寿命における鋼球組織の変化—

日 紫 喜 基 久** 堀 捷 樹** 川 辺 秀 昭***

Sound Life of the Steel Ball (2nd Report)
—Effect of the Metallographic Structure
of the Steel Ball on the Sound Life—

Motohisa HISHIKI, Toshiki HORI
and Hideaki KAWABE

In this report, the investigations are made to clarify the effects of the metallographic structure and the fatigue life on the sound life of the steel ball of 9.5 mm diameter. From these results, the estimation of the fatigue and sound lives are discussed. The results obtained are summarized as follows: (1) In the steel ball having larger half value width of martensite (211), the sound pressure level and the vibration acceleration do not increase during the sound life test. (2) The sound life and

the fatigue life are influenced by the metallographic structure of the steel ball. When the half value width of martensite (211) is larger, the sound life becomes longer, and as for the fatigue life, the smaller the variation of the half value width of martensite (211) at the depth of 200 μm from the surface of the steel ball is, the longer the fatigue life becomes. (3) From these facts, it can be concluded that the life of the steel ball is estimated from the sound life at light load or at the initial stage of the life, and from the measurement of the variation of the half value width of martensite (211) at the depth of 200 μm from the surface at heavy load or at the final stage of the life.

Key words: steel ball, sound life, sound pressure level, vibration.

1. 緒 言

前報¹⁾で玉軸受の音響寿命の過程における発生音や振動の変化の様相を求め、悪化の原因を転動体である鋼球の表面形状の変化から追求した。すなわち、二、三の負荷条件下で回転試験を行い、鋼球の音圧レベルと振動加速度が変動する過程で、鋼球の表面形状がどのように変わるかを、新規に開発した6バンド型ウェーブメータによって、1円周の山数帯に応じた出力値で求めた。その結果、音圧レベルや振動加速度の変動は、鋼球表面の凹凸のうち高次の山数帯におけるうねり成分の変動によるものであることがわかった。

そこで本報では、これら音圧レベルや振動加速度の悪化の原因を転動体である鋼球の組織変化から追求した。その組織変化はX線回折によってマルテンサイト(211)面の半値幅を測定して調べた。これらの結果から、転動による鋼球形状の変化を阻止するには、鋼球の組織のあり方をどのようにすべきかについて考察し、さらに音響寿命と疲労寿命を向上させる鋼球の組織のあり方について検討を加え、また総合的判断に立った玉軸受の寿命の

評価法についても考察した。

2. 実験方法

供試鋼球および音響寿命試験機は前報¹⁾と同一のものを使用した。また、本実験に用いたX線回折装置は45 kV, 80 mAのロータフレックスで完全自動鋼球測定装置²⁾を備えており、同一点での半値幅の測定精度は $\pm 3'$ 以内、鋼球のような三相合金で、その位置によるばらつきは $\pm 5'$ 以内である。また、半値幅の測定はX線回折強度曲線をフーリエ解析して電算機で求めているため、図形処理による誤差は生じないと考えられる。さらに、本実験の各測定点は $n=5$ の平均値である。

3. 実験結果および考察

3.1 音響寿命試験における鋼球のマルテンサイト(211)面の半値幅の変化

前報で、繰返し回転数に対する音圧レベル及び振動加速度の差の変化が、最も顕著に現れた負荷条件0.5Cの試料について、それぞれの時点での鋼球の表面の組織状態の変化を求めた。その組織状態の変化は、結晶のひずみ状態を表す一つの因子であるX線回折のマルテンサイト(211)面の半値幅で表した。そして油焼入材および水焼入材について、各回転数でのマルテンサイト(211)面の半値幅の測定結果を図1および図2に示す。

* 原稿受付 昭和54年9月28日。精機学会昭和53年度関西地方定期学術講演会(昭和53年7月21日)にて発表。

** 正 会 員 (株)天辻鋼球製作所(門真市上野口町1-1)

*** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市字山田上)

図1 油焼入材の繰返し回転数とマルテンサイト (211) 面の半値幅の関係

図2 水焼入材の繰返し回転数とマルテンサイト (211) 面の半値幅の関係

図1に示す油焼入材の場合、焼きもどし温度の高い170℃試料 (A-2およびA-4) は繰返し回転数の少ない領域で急激にマルテンサイト (211) 面の半値幅が減少し、回転数 10^6 回前後では処女材に比べて約1°減少した。一方、焼きもどし温度の低い150℃試料 (A-1およびA-3) では、繰返し回転数 10^6 回後においてもマルテンサイト (211) 面の半値幅は処女材に比べ約30°程度しか減少しなかった。また、図2の水焼入材 (A-5およびA-6) においては、マルテンサイト (211) 面の半値幅は繰返し回転数の増加と共に漸次減少し、回転数 10^7 回後両試料とも約1°減少した。

通常、鋼球を熱処理しその後加工した場合、その半値幅は6°00′～6°30′程度の値である。この数値から見れば鋼球における半値幅の1°の減少は非常に大きく、その減少の値を仮に焼きもどし温度で示すと、通常130～160℃で焼きもどした鋼球を240℃程度で再焼きもどしを行ったのと同じ状態であると考えられる。

また、半値幅はマルテンサイトの結晶格子のひずみの程度を表すパラメータであり、音響寿命での半値幅の減少は結晶のひずみが回復したことを表している。本報では述べるが、マルテンサイト (211) 面のピーク位置は

音響寿命で高角度側へ移動し、これは格子面間隔の減少を表している。また、マルテンサイト (211) 面の回折強度は音響寿命で増加し、これはマルテンサイト (211) 面のブラッグ反射を起こす条件の粒子数の増加、およびひずみの減少と考えられる。このような現象から、鋼球の音響寿命の過程は処女材の炭素を過飽和に固溶したマルテンサイトが、より安定なマルテンサイトに移行する現象であると考えられる。

3.2 音響寿命試験における音圧レベルおよび振動加速度の変化とマルテンサイト (211) 面の半値幅との関係

そこでこの鋼球の組織変化と前報に示した音響寿命試験による音圧レベルおよび振動加速度の差の関係を求めた。ここではマルテンサイト (211) 面の半値幅を音響寿命前後の変化率として次式を使った値で表した。

$$\text{変化率} = \frac{[(\text{処女材の値}) - (\text{疲労材の値})]}{(\text{処女材の値})} \times 100$$

このマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率を縦軸に、音響寿命試験における音圧レベルおよび振動加速度の差を横軸にとって、それぞれの相関を求めれば図3および図4になった。

これらの図から、音圧レベルの変化はマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率とは相関が認められない。一方、振動加速度の変化はその変化率との間にやや相関が認められるが回帰直線からのばらつきが大きい。従って、この結果からマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率が、振動加速度の劣化に直接関係する要因とは考えにくい。

そこでこの負荷条件0.5Cで繰返し回転数 10^7 回後における音圧レベルおよび振動加速度の差と、各試料の処女材のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値の関係を求めると図5および図6のようになった。

これらの図から、音圧レベルおよび振動加速度の差とも処女材のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値と相関関係があることがわかり、中でも音圧レベルの差より振動加速度の差の方が相関関係が大きいことがわかった。この事柄を換言すれば、鋼球の製作時 (処女材) の表層部のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値の大きい方が、音圧レベルおよび振動加速度の変化は少ないことがわかった。また、このことは音響値と振動値の転動による変化を防ぐためには、鋼球表層部のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値が製作時に大きくなる加工法をとればよいことがわかった。

そこで鋼球の製作時に表層部のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値を大きくする一例として、軟鋼線材 (JIS

図3 音圧レベルの差とマルテンサイト(211)面の半値幅の変化率の関係

図4 振動加速度の差とマルテンサイト(211)面の半値幅の変化率の関係

SWRM 8, C=0.1% 以下)の表面に浸炭処理を行い, 鋼球表面に炭素を過飽和に固溶させた表面組織を持つ炭素鋼球を製作した。この鋼球の処女材でのマルテンサイト(211)面の半値幅を測定すれば $7^{\circ}42'$ であり, 高炭素クロム軸受鋼球に比べてその値は $1^{\circ}\sim 1^{\circ}30'$ 大きかった。

この鋼球の音響寿命試験を行った。その繰返し回転数に対する音圧レベルおよび振動加速度の差を求めると図7および図8に示すようになった。これらの図の中では前報の供試鋼球の中で最も音響寿命の優れた試料番号A-1の鋼球(830°C油焼入れ, 155°C焼きもどし)の繰返し回転数における音圧レベルおよび振動加速度の差と比べた。

これらの結果から, 浸炭鋼球を使用した玉軸受は, 音

図5 処女材のマルテンサイト(211)面の半値幅と繰返し回転数 10^7 回後の音圧レベルの差の関係

図6 処女材のマルテンサイト(211)面の半値幅と繰返し回転数 10^7 回後の振動加速度の差の関係

圧レベルおよび振動加速度の差の変化が小さく, この試験に用いた試料の中で最も優れた音響寿命を持つことがわかった。従って, これらの結果から製作時の鋼球表面部のマルテンサイト(211)面の半値幅の値を大きくすれば音響寿命が向上することを証明することができた。

この現象の物理的な意味は, 音響寿命に対して処女材の半値幅が大きい方が優れていることは, 炭素を過飽和に固溶したマルテンサイトの方が音圧レベル及び振動加速度の変化の少ない, すなわち音響寿命において鋼球表面の凹凸が少ないことを表していると考えられる。

3.3 音響寿命と疲労寿命の関係

次に音響寿命と疲労寿命の関係を求めた。繰返し回転数 10^7 回後における音圧レベルおよび振動加速度の差と, 疲労寿命との関係を求め図9および図10に示す。なお, 疲労寿命は別報²⁾³⁾の結果を引用した。

図7 炭素鋼球の繰返し回転数と音圧レベルの差の関係

図8 炭素鋼球の繰返し回転数と振動加速度の差の関係

図9 疲労寿命値と音圧レベルの差の関係

図10 疲労寿命値と振動加速度の差の関係

これらの図から音響寿命と疲労寿命との間には、一義的な関係は存在しないと言える。この現象は、3.2節の

図11 炭素鋼球の疲労試験結果

浸炭鋼球に顕著に現れている。すなわち、音響寿命で非常に優れた性能を示した浸炭鋼球の疲労寿命は、図11に示すように寿命値 B_{10} が6 h で非常に短寿命である。

また、X線回折による組織変化の測定結果から、前述したごとく音響寿命においては、処女材のマルテンサイト(211)面の半値幅が大きいく程、転動による音と振動の変化は少ないことがわかった。一方、疲労寿命においては別報で疲労前後の鋼球表面から200 μm 程度の深さ、すなわち最大せん断応力の掛かる位置でのマルテンサイト(211)面の半値幅の疲労前後の変化率が少ない程、疲労寿命が優れていることがわかった。従って、音響寿命と疲労寿命とでは組織の面で要求される品質が異なっていることを示している。

これらは、音響寿命と疲労寿命とは寿命試験における使用および負荷条件が異なることに原因があると考えられる。すなわち、実用上玉軸受の音響寿命が問題にされる場合は比較的軽荷重の条件の下であり、疲労寿命では重荷重の条件の下である。また、音響寿命試験での最大荷重 $0.5C=625 \text{ kgf}$ (C は基本動定格荷重) の定格寿命(疲労寿命)を計算すれば $L_{10} \div 8 \times (10^6)$ 回転となり、音響寿命が問題となるのは前報のごとく変動領域であり、それは 10^6 回転までの現象である。従って、これら両試験は明らかに鋼球の使用条件の異なる領域を対象としていることを示している。

換言すれば、この両試験を組合わせることにより、鋼球の寿命評価が可能となり、軽荷重あるいは使用初期の下で鋼球が使用される場合は、音響寿命を対象とし、具体的には音圧レベルや振動加速度の変動域から定常域に移る総回転数または運転時間およびレベルの高さで寿命を評価できる。一方、重荷重あるいは使用後期の下で鋼球が使用される場合は、疲労寿命を対象とし疲労前後の鋼球表面から200 μm 程度の深さの位置でのマルテンサイト(211)面の半値幅の変化率で寿命を評価できる。

4. 結 言

まず, 音響寿命と鋼球の組織変化の関係を求め, 次に疲労寿命と音響寿命との関係を求め, その結果から鋼球の寿命の評価法を検討した. その結果次の事柄が得られた.

- (1) 音圧レベルや振動加速度の変化と鋼球の組織との関係は, 試験前後のマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率よりも, 処女材のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値そのものによって音圧レベルや振動加速度の増加の度合が異なり, 処女材のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値の大きな組織を持つ鋼球は, 両特性とも変化し難い傾向があることがわかった.
- (2) 音響寿命と疲労寿命とはいずれも鋼球の組織が関係する現象であるが, 負荷条件と繰返し回転数の条件から見て対象領域を異にする現象と考えられる. それは, 音響寿命に対しては鋼球の製作時の初期のマルテンサイト (211) 面の半値幅の値の大きい方が優れており, 疲労寿命に対しては疲労前後における鋼球表面から $200\ \mu\text{m}$ 程度の深さの位置でのマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率が小さい方が優れていることがわかった.

従来, 軽荷重あるいは使用の初期の領域の鋼球の寿命

評価はなされていなかったが, 音圧レベルおよび振動加速度が繰返し回転と共に増加し, 飽和状態になるまでの変動域に対応する時間または総回転数およびレベルの高さで表される音響寿命で, 寿命の評価ができることがわかった. また従来, 重荷重または長時間使用の領域の鋼球の寿命評価は, 耐久試験で耐久度を求める方法で行われてきたが, それには膨大な時間と費用が必要である. しかし, この領域では疲労前後における鋼球表面から $200\ \mu\text{m}$ の深さでのマルテンサイト (211) 面の半値幅の変化率で鋼球の寿命が評価できることがわかった. さらに, 鋼球の寿命, ひいては玉軸受の寿命を向上させるためには, マルテンサイト相の半値幅を大きくし, 同時に繰返し回転の前後における鋼球表面から $200\ \mu\text{m}$ の深さでのその半値幅の変化率が小さくなるような製造条件を選択すればよいことがわかった.

参 考 文 献

- 1) 日紫喜基久, 堀 捷樹, 川辺秀昭: 鋼球の音響寿命 (第1報)——音響寿命における鋼球表面形状の変化, 精密機械, **45**, 9 (1979) 1076.
- 2) 日紫喜基久, 堀 捷樹, 高野博史, 川辺秀昭, 上村政雄: 鋼球の全自動 X 線回折装置と寿命予知の基礎実験, 材料, **27**, 303 (1978) 1202.
- 3) 日紫喜基久, 堀 捷樹, 高野博史, 川辺秀昭, 上村政雄: 鋼球の疲労に及ぼす残留オーステナイトの影響, 精密機械, **44**, 11 (1978) 1321.