531 超音波センサによる油の劣化判定

Estimation of Degraded Oil by Ultrasonic Sensor

○正 高橋 義雄 (秋田県立大学)

正 佐々木 芳宏 (秋田大学)

Yoshio TAKAHASHI, Akita Prefectural University, 84-4 Tuchiya, Honjo City, Akita
 Yoshihiro SASAKI, Akita University, 1-1 Tegata Gakuencho, Akita City, Akita

One of the most important problems in an oil hydraulic system is the contamination problem. The aim of this study is to evaluate numerically the contamination of an oil. The measurement is carried out to evaluate a degraded oil using the ultrasonic sensor. As the ultrasonic wave propagates through a degraded oil, the energy of the ultrasound is scattered by the contaminant particle, and hence the some attenuation is occurred. This indicated that the attenuation of ultrasonic wave is closely connected with the distribution of each contamination particles.

Key Words: Oil, Contamination, Degraded Estimation, Ultrasonic Sensor, Attenuation

超音波は電磁波に比べて伝搬速度が非常に遅く、かつ波長が短いため距離方向の分解能が高いため高精度の計測が期待できる。

本研究は、超音波センサを用いて油の劣化評価を実験的に試みたものである。供試油は、NAS 等級や使用箇所が異なる 8 種類の油で、その分析結果の一例を Table A1 に示す。

Fig. A1 に示す実験装置は、油の循環部、温度制御部および測定部から構成されている。超音波センサの周波数は 5 MHz で、方式は一探触子法である。超音波の速度は伝搬媒体中の温度に依存するため、油温分布を均一にするように十分に攪拌した。超音波トランスデューサから出力される超音波アナログ反射信号を、A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、その時の超音波エコーの振幅値を計測する。超音波の減衰を油の劣化評価基準とするため、次式を用いて減衰係数 α (dB/cm) を求めた。

$$\alpha = 20 \times \log_{10}(A_0 / A_x) \times 10^4 / (2 \times \Delta x) \quad \cdots \cdots (A1)$$

ただし、

Δx : 基準となる反射板位置からの伝搬距離

$$(\Delta x = L - l_0)$$

A_0 : 超音波の伝搬距離が $2l_0$ の時の振幅値

A_x : 超音波の伝搬距離が $2L$ の時の振幅値

Fig. A2 は油温を 32°C 一定とした場合の減衰係数と NAS 等級との関係を示した一例である。NAS 等級が大きくなるほど減衰係数は高い値を示している。従来から油の劣化判

定に用いられている NAS 等級の評価より、本結果は、より細かな等級分けが可能であることを示唆しているものと考えられる。すなわち、これまで一般に用いられてきた NAS 等級よりも、より定量的に、かつリアルタイムで油の劣化判定が可能であることを示した。

Table A1 Size distribution of contaminate particles in group B oils

	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
Diameter	Particle Number/100ml				
5~15 (μm)	2420	15600	56050	439990	512820
15~25 (μm)	490	1090	3560	35400	326650
25~50 (μm)	70	630	690	11390	466380
50~100 (μm)	20	170	190	680	58630
Over 100 (μm)	0	20	40	20	1470
NAS grade	4	7	8	11	12

Fig. A1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. A2 Relation between NAS grade and damping coefficient of group B

1. 緒言

超音波センサは、ロボットの動きに障害となる物体の検知センサとして用いられているほか、各種分野で数多く利用されている。超音波の速度は伝搬媒体中の温度に依存するため誤差を生じるが、電磁波など他の搬送波に比べて伝搬速度が非常に遅く、かつ波長が短いため距離方向の分解能が高く、高精度の計測が期待できる。一般に音波が伝搬しながら強度が減少する要因として次の3つが考えられている⁽¹⁾。

- (1) 音波が幾何学的に広がることによる拡散減衰
- (2) 音波のパワーが媒質に吸収されて熱に変換されることによる吸収減衰
- (3) 伝搬媒体中の不均質による散乱減衰がある。

伝搬する音波がx方向に伝搬する平面波ならば吸収と散乱による減衰が観測される。

一般の油圧制御システムの作動油中に混入する汚染物としては、金属粉、溶接のスケール、鉄錆び、ちりほこり、剥離した塗料、およびパッキン材の切片等があげられる。これらの汚染物は肉眼では見えない程度の大きさであるが、制御機器の潤滑、その動作に悪影響をおよぼす。したがって、作動油中の汚染物の混入状態をリアルタイムで把握することは、システムの保守管理面から、さらにはその信頼性を向上させなければならないことから是非必要であり、重要な研究課題であると考えられる。本研究では、今までのNAS等級のような主に目視判定に委ねられてきた作動油の劣化判定を、安価で入手しやすく、かつ各種制御のフィードバックセンサとして使用できる超音波センサを用いて、油の劣化判定の可能性を実験的に検討考察したので報告する。

2. 実験装置および測定方法

2・1 供試油

供試油のサンプルとして、A、B二つのグループを採用した。

Aグループには、一般鉱油の新油（以下No.1と記す）、1年程度使用した油（以下No.2と記す）、および2年程度使用した油（以下No.3と記す）の3種類が含まれる。新油の粘度はISO等級のVG-46である。この供試油の汚染粒子数を粒子カウンターで測定した結果をTable 1に示す。NAS等級は、Table 2⁽²⁾に示すように、一般に作動油の劣化を判定するために用いられている指標である。すなわち、等級には00～12のクラスが存在し、各粒子径別のカウント数をもってそのクラスが決定される。この場合、等級の数値が大きい程油の劣化が進行していると判断される。Aグループの供試油中に混入している汚染粒子は鉄系のものが多い。ここで、NAS等級が同一の2種類の油では、No.2にはサイズの小さいものが比較的多く、No.3には逆に大きいサイズの粒子が目立っている。

Bグループは、NAS等級や使用箇所が異なる5種類の油が含まれており、その分析結果をTable 3に示す。NAS等級の小さい値から、それぞれNo.4～8としている。その中でも、No.8の油は極端に汚れていることが分かる。

2・2 実験装置

Fig.1は本研究で用いた実験装置である。実験装置は、シリンダ、ポンプを含めた油の循環部、恒温槽、熱電対を含む温度制御部、および超音波探触子、超音波トランスデューサ、マイクロメータ、パーソナルコンピュータの測定部の主に3つの要素から構成されている。油循環部のシリンダは、内径30mm、高さ120mmとし、特に反射板の探触子

Table 1 Size distribution of contaminate particles in group A oils

	No.1	No.2	No.3
Diameter	Particle Number/100ml		
5～15 (μm)	74100	3127720	3030920
15～25 (μm)	6870	113100	250280
25～50 (μm)	1380	22000	52120
50～100 (μm)	140	2080	8370
Over 100 (μm)	0	190	640
NAS grade	9	12	12

Table 3 Size distribution of contaminate particles in group B oils

	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
Diameter	Particle Number/100ml				
5～15 (μm)	2420	15600	56050	439990	512820
15～25 (μm)	490	1090	3560	35400	326650
25～50 (μm)	70	630	690	11390	466380
50～100 (μm)	20	170	190	680	58630
Over 100 (μm)	0	20	40	20	1470
NAS grade	4	7	8	11	12

Table 2 NAS Grade

	Grade (Particle Number/100ml)													
Diameter	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5-15 (μm)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
15-25 (μm)	22	44	88	178	356	712	1425	2850	5700	11400	22800	45000	91000	182000
25-50 (μm)	4	8	16	32	63	126	253	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
50-100 (μm)	1	2	3	6	11	22	45	90	180	360	720	1440	2880	57600
Over 100 (μm)	0	0	1	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

側と底板との両面は超音波の反射損失を低く抑えるため十分にその表面を仕上げた。また、測定中の時間経過に伴う油の状態変化および油温変化をさけるためシリンダの外側の水槽を温水で満たし、それをポンプで循環させることによりシリンダ内の油温を制御している。さらに、油温分布を均一にするため、攪拌棒で攪拌した。シリンダ内の油温は、循環回路中に恒温槽を用いて制御し、クロメル・アルメル熱電対で測定した。超音波探触子および超音波トランスデューサは何れも帝通電子研究所製で、その仕様は次の通りである。

超音波探触子：広帯域形垂直探触子 4502

方式：一探触子法，直接探触子法

振動子材質：圧電磁器発振，周波数：5 MHz

振動子の公称寸法：直径 26mm

超音波トランスデューサ：超音波探触子 UFD-360

パルス繰り返し周波数：1000,500,250,125,62.5Hz

一般に物性に関する研究においては、測定によってその手法に相違はあるが、パルス法では数 MHz 域の発振周波数を持つ超音波探触子での測定が最も容易で、かつ高い精度の測定が得られるといわれている⁽⁹⁾。したがって、本研究では上記仕様の超音波探触子を選定した。

2・3 測定方法

超音波トランスデューサから出力される超音波アナログ反射信号を、A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、その時の超音波エコーの振幅値を計測する。超音波の減衰を油の劣化評価基準とするため、次式を用いて減衰係数 α (dB/cm) を求めた。

$$\alpha = 20 \times \log_{10}(A_0/A_x) \times 10^4 / (2 \times \Delta x) \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

Δx ：基準となる反射板位置からの伝搬距離

$$(\Delta x = L - l_0)$$

A_0 ：超音波の伝搬距離が $2l_0$ の時の振幅値

A_x ：超音波の伝搬距離が $2L$ の時の振幅値

測定における超音波波形のモデルを Fig.2 に示す。ここで、 Δx は 3,6,9,12,15mm の 5 段階としてそれぞれの場合の A_x と A_0 を測定し、上式に代入して減衰係数を算出した。また、油温 T は約 20~60℃の間に設定した。

また、油温 T における音速 v (m/s) は、次の実験式で与えられる。

Fig. 2 Model of ultrasonic wave

Fig. 3 Relation between oil temperature and damping coefficient of group A

$$v = 1534.8 - 4.0791 \times T + 5.0044 \times 10^{-3} \times T^2 \quad \dots\dots(2)$$

3. 結果および考察

Fig.3 は、一例として A グループの供試油（以後特に断らない限りこの供試油の測定結果を示す）を用いて測定した減衰係数におよぼす油温変化の影響を示したものである。全測定温度範囲にわたり長期間使用した No.3 の減衰係数の値は高いが、油温が高くなるにつれてその値が小さくなる傾向がある。また、油温が低いほど減衰係数の差は大きくなり、40℃以上の油温からはその差がほとんどなくなってくる。このように、減衰係数に差が生じた原因としては、汚染粒子の含有量の相違が考えられる。超音波が粒子に衝

Fig. 4 Damping coefficient of group A

Fig. 5 Relation between volume ratio and damping coefficient of group A

突して散乱するため、汚染粒子が最も多く含まれている No.3 の減衰がより大きくなり、減衰係数の値が大きくなると考えられる。一方、油温が高いほど減衰係数が小さくなるのは、減衰係数は油の粘性に比例するため⁽⁴⁾、油温上昇による油の粘性が低下することに起因していると考えられる。

Fig.4 は、3 種類の油を同一温度に設定して減衰係数を求めたものである。何れの油温においても油の使用年数が多いほど減衰係数は大きくなり、かつ油温が低いほどその値が大きくなる傾向がある。この結果は、Fig.3 で述べたと同様の理由であると考えられる。

A グループ、B グループの油に対して、シリンダ体積に占める汚染粒子の割合、すなわち体積比を変化させた場合の減衰係数の影響を示したのが Fig.5 および Fig.6 である。ただし、A グループにおける測定時の油温は 40°C、B グループのそれは 32°C である。油の種類および油温が異なっても、体積比の増加とともに減衰係数は増大する傾向を示している。これも前述したように、油中に含まれている汚染粒子の増加で吸収減衰、散乱減衰が大きくなったためと考えられる。

Fig.7 は、油温 40°C における攪拌後の第一反射波の振幅変化を示したものである。縦軸に攪拌直後の振幅を 1 とした場合の振幅比を、横軸に攪拌後の経過時間をとっている。

Fig. 6 Relation between volume ratio and damping coefficient of group A

Fig. 7 Amplitude ratio of first reflection wave after churning

新油の No.1 は時間が経過してもわずかな振幅の変化しか見られないが、使用後の両油 No.2、No.3 には大きな振幅の変化が生じ、油が劣化するほどその変化速度は急になることが分かる。この振幅の変化は、油中に含まれている汚染粒子の挙動に起因しているものと考えられる。換言すれば、汚染粒子が沈殿する速さの相違は、油の粘性の差が原因しているものと考えられる。なお、この結果は短時間で油の劣化の目安を簡単に得る一つの方法になるのではないかと考えられる。

Fig.8 および Fig.9 は、油温を 40°C および 32°C 一定とした場合の減衰係数と NAS 等級との関係を示したものである。油の種類が異なる何れの場合にも、NAS 等級が大きくなるほど減衰係数は高い値を示している。特に Fig.8 において、分析結果で得られた同一の NAS 等級の値でも、超音波で測

Fig. 8 Relation between NAS grade and damping coefficient of group A

Fig. 9 Relation between NAS grade and damping coefficient of group B

定された減衰係数に差が生じている。すなわち、Table 1 に示すように、No.2 と No.3 は同一の NAS 等級であるが、粒子の総数から算出した体積比は No.3 の方が大きいため、その差が出たものと考えられる。従来から油の劣化判定に用いられている NAS 等級では、Table 2 に示しているように、同一等級の場合でも各粒子数にある幅を持たせているため、若干の粒子数に差があっても同じ等級と見なされることになる。これに対して、本手法による超音波の減衰係数で油の劣化を評価することは、油中に混入している粒子の総数や体積比が特定でき、NAS 等級による評価より、より細かな等級分けが可能であることを示唆しているものと考えられる。以上の結果より、超音波の減衰係数の値は、油に混入している汚染粒子の総数に起因しているものと考えられる。

油圧制御システム等の作動油の保守管理を行う場合、例えば Fig.1 に示したような装置を油圧ユニットに並列に設置し、タンクの油を本装置を用いて循環させるように工夫すると、リアルタイムで油の劣化評価が可能になるものと考えられる。

4. 結言

5 MHz の超音波探触子を用いて、一探触子法により種々の油の劣化を評価することを試みた結果、次のような結論が得られた。

- (1) 超音波の減衰係数は、油中に混入している汚染粒子の体積比ならびに NAS 等級に良好な相関関係があることが認められた。
- (2) これまで一般に用いられてきた NAS 等級よりも、より定量的に、かつリアルタイムで油の劣化判定が可能であることを示した。

5. 参考文献

- (1) 超音波便覧編集委員会編、超音波便覧、(1999)、丸善
- (2) 市川、日比：油圧工学、(2000)、朝倉書店
- (3) 根岸、高木：超音波技術、149(1989)、東京大学出版会
- (4) 丹羽：超音波計測、(1982)、昭晃堂