

エンジンオイル劣化モニタシステムにおける 塩基価推定手法の研究

Study of Base Number Estimation Method for Engine Oil Deterioration Monitoring System

相 川 孔一郎*

Koichiro AIKAWA

丸 山 雅 司*

Masashi MARUYAMA

要 旨

本研究ではオイル劣化の判断基準に用いられる塩基価、Base Number(BN)の劣化推定技術を構築した。BNの減少をNOxバブリング装置で調べた結果、主に熱とNOxに強く影響されることが認められた。さらに詳細な解析をおこなった結果、BN減少速度を劣化速度式により表すことが可能であることがわかった。このBN劣化速度式を利用して実際のエンジン内におけるBNの減少を算出した結果、BNモニタリングシステムとして適用可能な値を得た。この推定手法を用いて、ECU(エンジンコントロールユニット)にBNの減少を計算させることによりオンボードでBN劣化推定ができることを示した。

ABSTRACT

In this research project, technology for estimating the base number (BN) deterioration, used as an index for judging engine oil deterioration, was developed. A detailed investigation using an NOx bubbling unit was carried out, and as a result it was found that the speed at which the BN falls is determined mainly by heat and NOx. In addition, a detailed analysis was carried out, and it was found that the reduction speed can be expressed using the differential rate law. A study of the possibility of estimating reduction of the BN in an actual engine was carried out using a BN deterioration equation. The results of this study showed that it was possible to adequately estimate the BN. This indicated that it is possible to estimate the reduction of the BN on-board by the engine control unit (ECU).

1. まえがき

エンジンオイルの働きにはエンジン部品の潤滑のほかに清浄、冷却、防錆、腐食防止、また燃焼ガスの密封などの働きがある。どの機能も大切であるが特に清浄性の低下はエンジン内にスラッジやデポジットを引き起こし、油回路の閉塞など重大な問題を引き起こす可能性がある。エンジンオイル添加剤の中で清浄性に深く関係する物の一つにサリチレート金属塩に代表される金属系の清浄剤があげられる。これらは耐熱性に優れピストン周りやターボチャージャ潤滑部などの高温部デポジットを抑えるためには必要不可欠なものであるといわれている^{(1), (3)}。また、これらは燃料の燃焼などにより生じる有機酸やブローバイガス中に含まれるNOxガスより生じる硝酸などを中和しエンジンを保護する役割も担っている⁽²⁾。BNはオイルに含まれる塩基価のことで塩基性の金属系清浄剤の残量を示す代表的な指標である。また、オイルの酸中和能力の指標として用いられ

オイルの劣化度合を示す重要な指標のひとつである。しかしBNをオイル使用限度の指標に用いてもBNを定量するには特殊な設備が必要となる。そのために乗用車のユーザがBNを指標にオイルの交換をすることは事実上不可能である。本研究の目的はBNを実際に測定しなくともエンジン水温等のエンジンセンサから得られる情報を利用しBNの劣化度合いを推定する手法を見出すことである。またそれらを利用し、オンボード型のBN劣化検知の可能性を検討することである。

2. BNとオイル劣化の関係

2.1. BNと高温デポジットの関係

BNはオイル劣化の指標としてよく使われるが、BNがデポジットを抑制する効果について検証をおこなった。実験はホットチューブ試験(JPI-5S-55-99)およびエンジン試験をおこなった。ホットチューブ試験は熱したガラス管に空気

*四輪開発センター

を混合したオイルを通過させ、その時ガラス管内に生じるデポジットを評価するものである。Fig. 1にホットチューブ試験の概略図を示す。デポジット抑制効果は、デポジットの生成開始温度とBNの関係性を調べることで評価した。ホットチューブ試験においてデポジット生成開始温度を次のように定義した。まず、評価オイルをさまざまな温度で試験をし、次に各温度で生成したデポジットの量を計測する。温度に対しデポジット量をプロットし、検量線を用いてデポジットの生成開始温度を推定し生成開始温度と定義した。実機エンジン試験では新油からエンジンの運転を始め、テスト途中エンジンを分解し、ピストンに付着するデポジットを目視で確認した。その時のBNを測定しデポジットとピストン温度の関係性を調べた。ピストンの温度はあらかじめ測定していたものを用いた。使用したオイルをTable 1に示す。

Fig. 2 に示すように BN とデポジット生成開始温度には強い相関関係が見られた。オイルに配合されている金属系

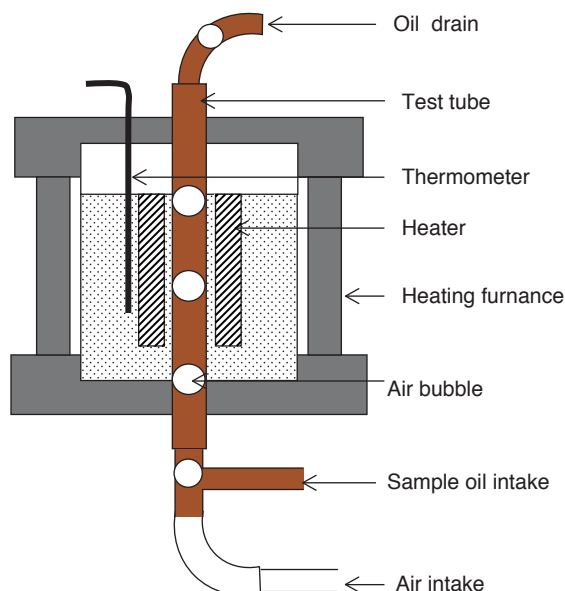


Fig. 1 Hot tube test device

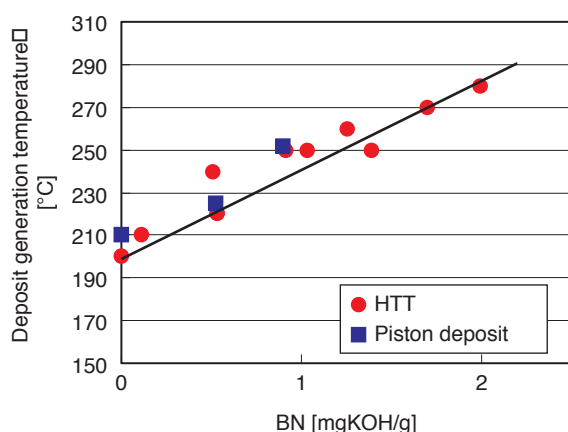


Fig. 2 Relationship between BN and deposit generation temperature

Table 1 Sample lists for deposit temperature preparation

Sample no.	Mileage [km]	BN [mgKOH/g]	Oil	Test
1	4337	2	Honda genuine	Hot tube test
2	4470	1.39	↑	↑
3	5000	1.70	↑	↑
4	6892	0.53	↑	↑
5	7985	0.11	↑	↑
6	9156	2.3	↑	↑
7	10301	3.2	↑	↑
8	12274	3.4	↑	↑
9	13585	1.7	↑	↑
10	16175	1.7	↑	↑
11	18616	1.5	↑	↑
12	25032	0	↑	↑
13	-	0	↑	Engine
14	-	0.52	↑	↑
15	-	0.9	↑	↑

清浄剤は基本的にアルカリ石けんと同様の構造を有している。アルカリ石けんはアルカリ濃度が減少するとその効力が弱くなる性質がある。エンジンオイルにおいてもBNの減少により清浄性が弱くなると考えられる。BNの減少によりデポジット生成開始温度が低くなるのはこのためであると考えられる。このようにBNと高温デポジットには明らかな相関関係があることがわかる。一般的にエンジンオイルの性能にも左右されるがBNの使用限界値は0.5-1.0mgKOH/gとされることが多い。本研究より得られた結果では、BN使用限界値におけるデポジット生成開始温度は230℃-250℃程度である。これはエンジンオイルが潤滑する部品の最高温度とほぼ一致しており、限界値として妥当であるといえる。

2.2. BN と金属磨耗の関係

Fig. 3 に BN とオイル中金属成分量の関係性を示す。分析に用いたオイルはすべてユーザから回収したもので走行距離、走行時間など使用状態が異なったものである。分析に使

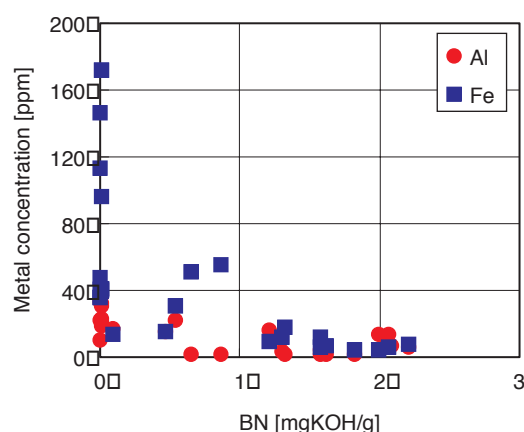


Fig. 3 Relationship between BN and metal concentration

Table 2 Sample lists for metal concentration research

Sample no.□	Mileage [km]□	BN [mgKOH/g]□
1	1931□	1.58□
2	2000□	1.58□
3	2000□	2.06□
4	2982□	1.82□
5	3000□	1.99□
6	4000□	1.21□
7	4280□	2.21□
8	4532□	1.30□
9	5000□	0.54□
10	5038□	1.62□
11	6001□	1.32□
12	6371□	2.08□
13	7833□	0.00□
14	7895□	0.09□
15	8983□	0.65□
16	9182□	0.00□
17	9200□	0.47□
18	10552□	0.01□
19	10901□	0.01□
20	13937□	0.01□
21	15000□	0.00□
22	15648□	0.01□
23	15825□	0.86□
24	20000□	0.00□
25	24630□	0.01□

用したオイルを Table 2 に示す。BN が減少するとオイル中の金属濃度が高くなる傾向がわかる。これは BN の減少で酸中和能力が小さくなり、それに伴いオイルが強酸化し金属がオイル中に溶け出すことが原因と考えられる。このように BN は金属腐食磨耗の観点からも重要なオイル劣化の指標であるといえる。

3. 実験による BN 劣化速度式の算出

3.1. BN の劣化要因

BN を減少させるものとして、第一にエンジンオイル自体の酸化で生成される酸性物質による中和反応があげられる。第二にエンジンの運転下で燃焼時に生じる NO_x, SO_x, 有機酸などの外的要因があげられる。これらの酸性物質はオイル中に混入し^{(4), (5)}清浄剤などの塩基性物質と反応し BN を減少させると考えられる。第三にピストンなど高温部では熱分解等が起こり BN を減少させると考えられる。これらの影響を個々に解析するためにエンジンオイルの単体劣化試験を NO_x バブリング試験にておこなった。Fig. 4 に NO_x バブリング試験装置の概略を示す。外的劣化要因は NO_x ガス、燃料成分、水分を用いた。テスト条件を Table 3 に示す。NO_x ガスは NO ガスを用いた。これはエンジンのクランクケース内 NO_x の成分を調べた結果そのほとんどが NO であったためである。NO ガスは空気と混合されオイルに吹き込まれる。空気は一度水に吹き込み、十分水分を含んだ後に NO ガスと混合される。燃料成分にはホワイトガソリンを 150℃で蒸留しその残さを用いた。これは実際の未燃燃料を想定し比較的大きな分子量成分だけを集め

Table 3 NO_x bubbling test conditions

	Test condition□
NO _x (ppm)□	0 to 2776□
Water□	Steam with air□
White gas (wt%)□	5□
Oil temp (°C)□	25, 80, 150□
Oil 1□	Honda genuine-1□
Oil 2□	Honda genuine-2□
Oil 3□	Special□

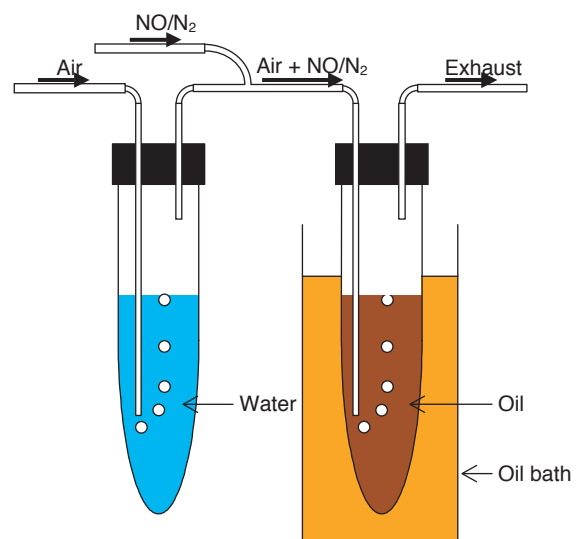
るとともに、ある程度酸化させ未燃燃料の状態に近づける効果も担っている。SO_x成分は燃料によるところが大きく、今回はサルファーフリーの燃料を対象としたため考慮に入れていない。BN の測定法は JIS および ASTM で定められており、本報告ではすべて JIS K 2501 法に基づく塩酸法にて測定した BN を使用している。

3.2. 熱による BN の劣化

エンジンオイルに熱のみ与えた時、BN が減少する原因として、

- (1) 塩基性添加剤自体の変性や熱分解。
 - (2) エンジンオイル自体の酸化で生成されたカルボン酸との中和反応。
 - (3) その他エンジンオイル添加剤の酸化による酸の生成。
たとえば硫黄などを含んだ添加剤の酸化による硫酸の生成。
- などが考えられる。

NO_x バブリング装置を用いてエンジンオイルに NO_x などの劣化要因は除き熱と空気の吹き込みのみをエンジンオイルに与えたときの BN の劣化速度を調べた。BN 劣化速度の解析をおこない、BN 劣化速度式として表すことを試みた。解析手法は微分法⁽⁶⁾を用いた。Fig. 5 に示すとおり BN に関する反応次数を解析した結果約 2 であると推定された。ここで BN に対する反応次数を 2 と仮定して劣化速度式を立てると式(1)となる。

Fig. 4 NO_x bubbling device

$$-\frac{d[BN]_{Heat}}{dt} = k_1[BN]^2 \quad (1)$$

BN の劣化速度の温度依存性を計測し劣化速度係数 k_1 をアレニウスプロットすると、Fig. 6に示すように直線関係があり BN の劣化速度はアレニウス型であると考えられる。

3.3. NOx による BN の劣化

Fig. 7 に示すように NOx を吹き込むと BN の劣化速度は大きくなる。BN の劣化は NOx を吹き込まない状態でも起こるので、式(1)に対し NOx による劣化速度項は独立項として設けるのが自然の考えである。ここで、NOx による劣化速度項を A_{nox} とおくと

$$-\frac{d[BN]_{Heat,NOx}}{dt} = k_1[BN]^2 + A_{nox} \quad (2)$$

と仮定できる。式(2)の第二項は NOx 有無の実験をおこない、それぞれの BN 劣化速度の差分を取ることによって実験的に求めることができる。Fig. 8 に A_{nox} と BN の関係を示す。 A_{nox} は BN に比例し大きくなる結果を得た。この時 NOx 濃度によって A_{nox} の傾きが大きくなっていることがわかる。Fig. 9 に傾きの大きさを NOx 濃度に関して

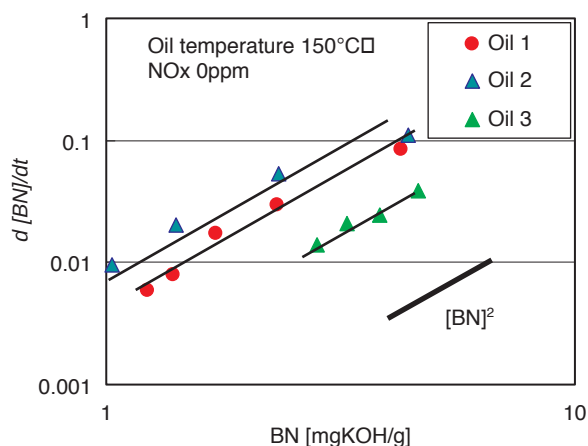


Fig. 5 BN dependence of BN deterioration velocity

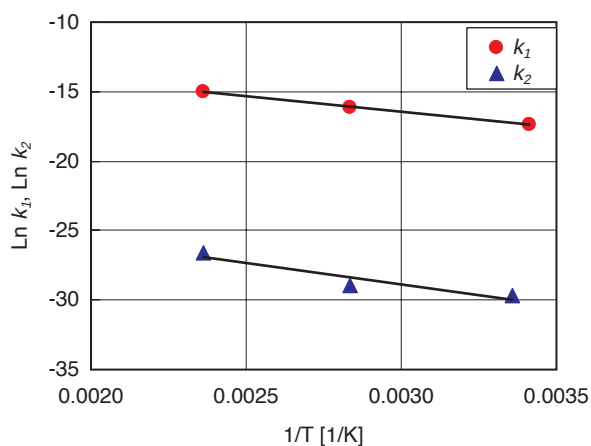


Fig. 6 Arrhenius plot for reaction rate constant k_1 , k_2

まとめたものを示す。 A_{nox} の傾きは NOx の二乗に比例している結果を得た。すなわち A_{nox} は BN に比例し、また NOx の二乗にも比例しているといえる。以上の関係より A_{nox} は比例定数を k_2 とすると式(3)の関係が成り立つと考えられる。

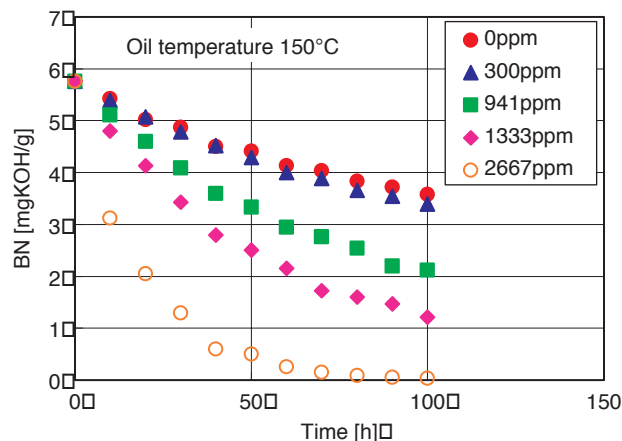


Fig. 7 NOx-dependence of BN degradation rate

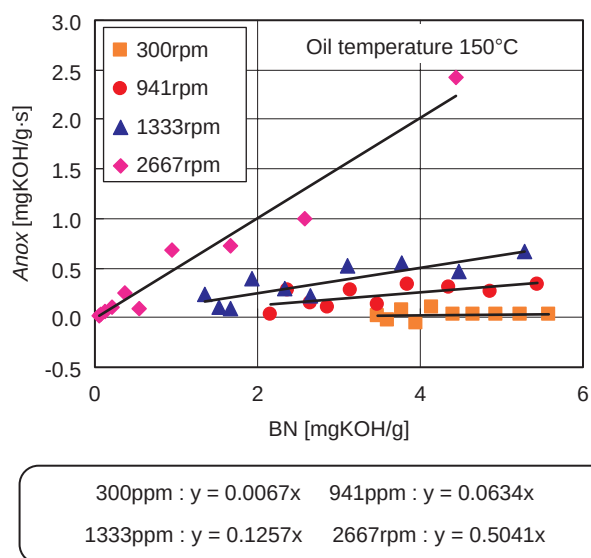


Fig. 8 BN dependence of A_{nox}

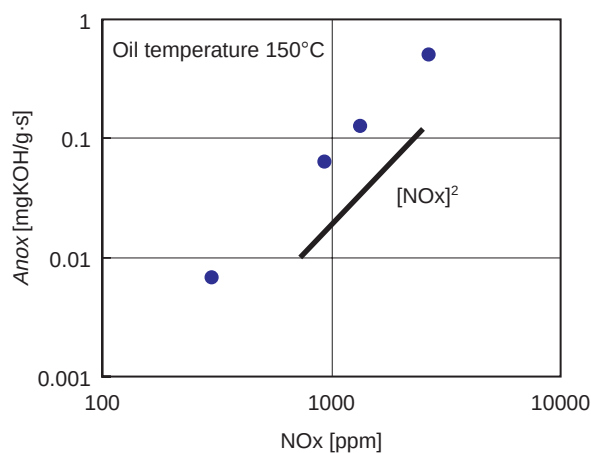


Fig. 9 NOx dependence of A_{nox}

$$A_{nox} = k_2[BN][NOx]^2 \quad (3)$$

さらに A_{nox} は温度にも依存している結果を得た。すなわち比例定数 k_2 が温度に依存しており、Fig. 5 に示すように k_2 も k_1 と同様にアレニウスプロットにて直線関係が得られた。

3.4. 燃料成分、水分による BN の劣化

一般的にオイル劣化には未燃燃料の影響や水分の影響が大きいとされている。水分の存在で NOx イオンの溶け込みが促進される^{(4), (5)}ことが知られており、BNの減少にも十分影響があると考えられる。燃料においては低油温時に未燃燃料がオイルに混入しやすい⁽⁷⁾。そのため未燃燃料由来の有機酸を生じやすく BN の減少に影響を与えられられる。これらを検証するため本研究でも水分、燃料の影響について検討した。その結果 Fig. 10 に示すように水分の影響および燃料の影響は無い、もしくは無視できるほど小さかった。燃料は酸化され有機酸になると考えられる。有機酸はオイル中の塩基成分と反応して有機酸塩を作り中和される。一般的に有機酸は塩酸などと比べると弱酸で塩酸法での BN 測定では有機酸塩自体が滴定されてしまう。そのためにほとんどBNの劣化には寄与しないと考えられる。以前に水分の影響に関しては Mg 系清浄剤が水分混入により針状結晶物が析出し、BN が極端に低下する問題があったが、現在では添加剤技術の進歩により解決されている。また、水分の増加によりオイルへの NOx 混入量が多くなり BN を低下させることが考えられたが、本実験では影響が確認されなかった。油中に溶け込む NOx 量は、ある程度水分があれば NOx の量自体が律速になる⁽⁴⁾という報告があり、この影響が考えられる。

これらの実験結果より BN の劣化速度を一般式化すると

$$-\frac{d[BN]}{dt} = k_1[BN]^2 + k_2[BN][NOx]^2 \quad (4)$$

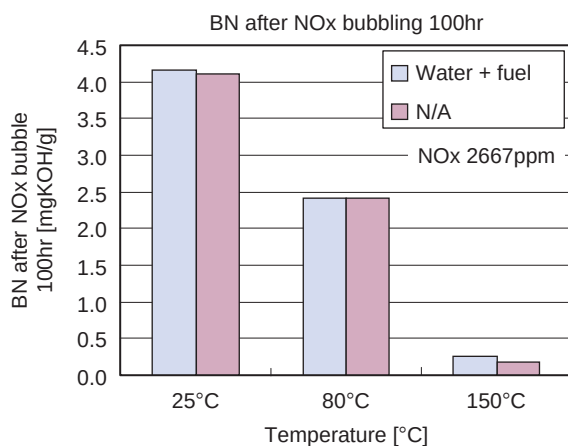


Fig. 10 Water and fuel influence on BN degradation

と表すことができる(ただし、 k_1 , k_2 はアレニウス型の劣化速度係数)。

4. 実車における BN 劣化検証

4.1. 実車検証時の劣化速度式

オイル単体での実験結果より得られた BN の劣化速度式(4)で、エンジン運転による BN 劣化も表すことができるか検証をおこなった。車両で検証をおこなう上で必要な情報である油温、 NOx について以下の方法で計測、または推定をおこなった。

(1) 油温

油温はオイルドレーンボルト部で熱電対を用いて測定した。

(2) NOx

NOx はオイルと最も接する頻度が高いと考えられるクランクケース内の NOx 濃度を基準とした。実車オンボードでのクランクケース内 NOx 測定は困難であるために NOx 濃度は運転条件からの推定値を用いた。

式(4)を実際のエンジンに適用する場合空気や NOx とオイルの接触効率がオイル単体試験とエンジン試験では違いがあり、オイル単体試験で得られた劣化速度係数がそのまま適用できるとは考えにくい。そこで実際のエンジンでオイルを劣化させ、そのとき得られた BN のデータに一致するように接触効率係数 η を式(4)に適用した。

$$\frac{d[BN]}{dt} = \eta \times (k_1[BN]^2 + k_2[BN][NOx]^2) \quad (5)$$

4.2. 実車検証結果と推定精度

車両検証にはHonda純正油を用いた。BNの計算は式(5)を用いて計算をおこない各係数はHonda純正油用に設定したものをを用いた。Fig. 11 に各モードにおける BN の分析値と計算で求めたBN値の相関関係を示す。実測値とシミュレーション値はよく一致しており、実用上問題の無いBN推定が可能であることが証明された。

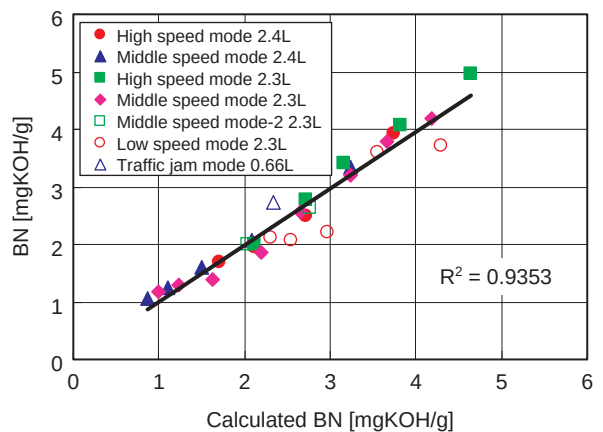


Fig. 11 Correlation between calculation results and actual BN measurement values

5. 考察

本研究で提案された BN 劣化速度式は、数種類のエンジンオイルから得られた実験結果より導き出された物である。それゆえ市場で存在するさまざまなオイルへ適用した場合の懸念はあるが現在までに我々が確認したオイルにはすべて適用できており汎用性は高いものであると考えられる。それは BN を示す添加剤の種類や化学構造が変化しても劣化メカニズムの基本事象は変わらないためであると考えられる。エンジンオイルの種類により大きく異なるのは劣化速度係数やエンジンオイルに含まれる BN 濃度で、オイルの寿命を左右することがわかっている。劣化速度式を用い、オンボードで BN 劣化検知をおこなう場合、エンジンオイルごとの成分などをセンシングしその結果を劣化速度係数に反映することや、BN の使用限界値を使用オイルごとに設定するのが望ましい。BN の劣化速度係数や使用限界値の設定手法として注入したオイルの種類をユーザに入力して貰う方法や、オイル種自動判別センサの開発などが考えられる。また、最近ヨーロッパ自動車メーカなどでよく見受けられる使用油の指定をおこなうことも有望な手段である。これらを組み合わせることで BN 推定精度が向上し、オイル交換インターバルの延長が可能となり、ユーザにとってより有効性の高いシステムが構築できる。

6. まとめ

本研究ではエンジンオイルの劣化指標として用いられる BN の劣化推定の有効性を示した。オイルの単体テストをおこない詳細に分析することで BN の劣化にある法則性を見出し、BN 劣化速度の一般式を提案した。BN の劣化速度式を用いて実車での BN 劣化を計算した結果、十分推定が可能であることがわかった。これらの法則を使ってオンボード型の BN 劣化推定システム構築が実現可能であることを示した。

謝 辞

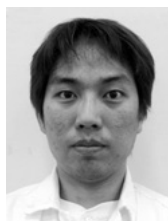
本研究にあたり、御協力を頂いた昭和シェル石油株式会社および Shell Global Solutions の皆様に紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 桜井俊男編：石油製品添加剤，幸書房，p.287(1973)
- (2) 小西誠一，上田亨：潤滑油の基礎と応用，コロナ社，p.144(1992)
- (3) Inoue,K., Yamanaka,Y.: Change in Performance of Engine Oils with Degradation, SAE Paper 902122

- (4) 村上靖宏，相原久元，国谷譲治：エンジンオイルへの燃焼生成物混入メカニズム解析，日本機械学会論文集（B 編），53 巻，496 号，p.3814-3821(1987)
- (5) Murakami,Y., Aihara,H.: Effects of NOx and Unburned Gasoline on Low Temperature Sludge Formation in Engine Oil, SAE Paper 910747
- (6) 川口信一，西本吉助：物理化学序説，化学同人，p.97-98(1985)
- (7) 村上靖宏，相原久元：エンジンオイルへの燃焼生成物混入メカニズム解析(続報)，日本機械学会論文集（B 編），55 巻，519 号，p.3571-3580(1988)

■ 著 者 ■



相川孔一郎



丸山雅司