エンジンと潤滑油の半永久寿命, 廃油ゼロ, 各種潤滑油種統合と 適正な有効中和力 EBAS $\doteq 0$ の理論と技術*

東 忠 則** 橋 本 正 孝*** 住 本 守 央****

Theory & Technology for Semi-Permanent Use of Engines, No Waste Oil, Integration of Various Lubricating Oils and Optimum Efficient Neutralization BASicity EBAS $\doteq 0$

By Tadanori AZUMA**, Masataka HASHIMOTO***, Morio SUMIMOTO****

Verification test of the semi-permanent use of engines and no waste oil was conducted over a period of 8 years 33,000h, the results of which were presented in SAE 2011-01-2113 at SAE 2011 held at Kyoto, Japan. The test has reached 10 years 45,000h as of August 2013 and is still on-going. This technology which almost completely removes sludge and maintains lubricating oil cleanliness has been in practical use in many marine and power diesel engines for a long time. It is theoretically and technologically simple to integrate various oils only if the oil is clean without sludge. Clean lubricating oil even with a low alkalinity value can prevent engine corrosion due to acids. In this paper, EBAS (Efficient BASicity) is used instead of TBN as proposed by C. Amblard and S. Esson at CIMAC 2013 held at Shanghai, China.

1. まえがき

本報の目的は著者等が携わっている分野の省資源, 環境保全の技術で, 現在, 世界の主流になっている研究開発(R&D)がより科学的な方向へ大転換し, より有効なR&Dへ前進する簡潔な理論と技術のあり方を示し, この分野の世界の現状と, 著者等が目指し期待する方向の今後の見通しを示す. 我々のR&Dは, 潤滑油(LO)半永久使用・廃油ゼロ¹⁾, エンジン半永久使用予測²⁾, 実船8年33,000hで実証³⁾, LO統合理論⁴⁾と進み, 本報ではLOの有効中和力 $\doteq 0$ の理論と, この技術による実船実績を示す. MIT(Massachusetts Institute of Technology)にも似た様なR&D⁵⁾がある.

ディーゼル機関で重油(HFO)の硫黄分(S)で生ずる H_2SO_4 や, FOとLOの酸化で生ずる有機弱酸でエンジン部品に腐食が生ずる. LO中の CaCO_3 中心の添加剤でこれらの酸を中和して腐食を防止し, アルカリ総量TBN(Total Base Number)でLO寿命が判断され, FOのS分に応じてTBN40~70が広く用いられるが, 最近, 船用大形2サイクルエンジンでTBN80のシリンドラ油が, H_2SO_4 腐食とdepositを防止した⁶⁾. 他方, 近年の状況でTBNは不適当な指標であると, 陸上小

形⁷⁾及び船用大形2サイクル⁸⁾に関するLOメーカーの報告がある. さらに, CaCO_3 系は有機中和剤に比べて中和反応が遅く非効率的でありTBNでなくEBAS(Efficient BASicity)でLO寿命を判断すべきとのR&D⁹⁾が有る. LO性能はゴミ濃度と共に低下し廃油にされる. LOのゴミ(スラッジ)はスス, 低温スラッジ, 添加剤劣化物, FO, LOの酸化物, 摩耗粉等である. 摩耗速度 y とスス濃度 x には $y = ae^{ax}$ の指数関数的増大傾向が10年以上前に分かっている¹⁰⁾. 従来のR&Dはゴミを除く方向ではなく, その害を抑える化学薬品のR&Dに多大の資源が投入されている.

我々のR&Dは全て従来技術と逆方向に進んで実用化されて来たが, その根本は機械的に酸化物を含め, ゴミをほぼ完全に除去し, LOとFOを清浄にして, ゴミ $\doteq 0$ で, 摩耗 $\doteq 0$, 熱効率 $\eta_e \doteq \text{Const.}$, 廃油ゼロ, LOとエンジンの半永久使用を実証した. この技術は多くの船用や発電用ディーゼル機関等で実用されている.

よって本報は, (1)現在の主流R&Dを見直し, (2)理想モデルの簡潔な理論を実現する方法(技術)を追求し, 空理空論に陥らない. 海外のLOメーカーも, 今やLOはTBNで評価出来ないと指摘している⁷⁾.

2. 機械の大敵 - スラッジ

以下では, ゴミの代りにスラッジの用語を用いる. Fig.1~2にそれぞれFO, LOスラッジを示す. こ

*原稿受付 平成25年11月29日.

** 正会員 元 帝京大学.

*** 正会員 神戸大学 (神戸市東灘区築港5-1-1).

**** 正会員 住本科学研究所 (横須賀市夏島町15-8).

のスラッジが LO と機械の寿命を短くし, かつ LO 種の統合と, $EBAS \approx 0$ を妨げている。

Fig.1 FO Sludge ; black part in the vessel

Fig.2 LO Sludge ; black part in the photo

Fig.1 の FO スラッジはクリーン FO システムに蓄積されたもので, Fig.2 の LO スラッジは, Fig.3 の Nephron System の粗スラッジ固化器に蓄積されたものである。作動油にも多くのスラッジがある¹¹⁾。従来型 LO 清浄法ではクリーン LO にならず, 船用で LO の不溶解分指標とされる normal pentane(np)不溶分が約 2%で LO 交換され, 使用油は廃油にされる。注目すべきは, 廃油から np 不溶分 2%を除去すれば残り 98%は使用可能と考えられる事である。

3. クリーン LO/FO の原理, 構造, 性能, 実績

3.1 クリーン LO システム (Nephron System)

Fig.3 Comparison of LO System

Fig.3(a)が Nephron System であり, Nephron Filter では平行に配置されたフィルター紙の間を LO が流れ, スラッジが紙面に吸着除去されて, クリーンになるが, 従来型ではクリーンにならない。Nephron Filter 前の遠心分離器は, 大きなスラッジを予め除去し, Filter 寿命を延長する。以下に Nephron System の性能を示す。

(1) Nephron Filter の微小粒子除去能力。Fig.4 は

LO スラッジ粒子径分布である¹²⁾。Fig.4(a)は, 種々のエンジンの廃油を集めたガソリンスタンド廃油のスラッジ粒子径分布例で, $0.2 \sim 100 \mu\text{m}$ に分布し, 排ガス粒子に関する David B. Kittelson¹³⁾の nuclei, accumulation and coarse モデル分布に $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の large mode を加えた形になっている。Large mode は $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子が凝集したものであろう。Fig.4(b)は Nephron Filter を装着した乗用車の LO スラッジ粒子径分布であり, $1 \sim 100 \mu\text{m}$ の大粒子スラッジはほぼ完全に除去されている。

(2) LO 酸化物の除去能力¹⁾。標準的にはスラッジが LO の約 2%で交換される。この R&D の計測ではスラッジの約 10%、即ち LO の約 0.2%が酸化物である。

Fig.5 は LO 酸化物の除去能力を示す。酸化が進んだ LO に赤外線 (IR) を照射すると IR は吸収されるが, $1710/\text{cm}$ の波数で酸化物の強い吸収が知られている。

Fig.4 Distribution of LO sludge size

Fig.5 IR Analysis of Used LO

有害な重度酸化物はほとんど除去され, LO に溶解する有効初期酸化物¹⁴⁾によるわずかな吸収がある。

(3) 粘着性の強い FO・LO 酸化物が吸着して, フィルターはハエ取り紙の様¹⁵⁾になり, ゴミ取り性能向上。

(4) 実船試験による従来法との比較¹⁾。Fig.6 は同じ機種をそれぞれ 2 台搭載した 3 隻の同型船で (a) LO 清浄なし, (b) 従来 LO 清浄法, (c) Nephron System,

の比較である。Nephron System では np 不溶分が約 0.1% に維持されているが，従来法では 6,000h で np 不溶分が約 1.5% に達し，LO 交換している。LO 清浄なしでは 5,000h で np 不溶分が 2.4% になり交換された。Fig.6 は Nephron System が LO 清浄性を永久に維持できる性能を示している。他方，クリーン LO には主に作動油で実用されている静電浄油法¹⁶⁾もある。

Fig.6 Comparison of Three Types of LO Treatment

(5) 使用油の黒色化¹⁷⁾。クリーン LO の外観は黒いが問題なし。LO 分子が熱分解し，微小粒子が LO 中にあるため黒くなる。しかしスポットテストで両者の差はほとんどない。エンジンでも同様である。

(6) 耐焼付き性向上と粘度増加。新油よりも使用油の方が耐焼付き荷重 L が約 25% 大きい¹⁸⁾。クリーン LO の広がり性良好¹⁹⁾，褶動面凹み微小粒子の玉軸受作用，有効初期酸化物，熱に弱い小分子の蒸発と熱分解で強い大分子が相対的に多くなり境界膜が強くなる等で L が向上し，粘度上昇は小分子減少によると推定。

3.2 クリーン FO システム²⁰⁾と従来型の比較

Fig.7 Comparison of FO System

Fig.7(a)の従来型では FO がセッティングタンクを出て遠心分離機(C)で清浄され，サービスタンク(SV)に入り，SV の底部からエンジンに供給される。従来型の問題点は，(1) FCC 分解油精製で用いる触媒粒子の残留粒子等の固体粒子を非固体スラッジが包みこみ，浮き袋の役目をして比重の小さい大粒子になり，遠心分離機で除去できない。(2) FO がサービスタンクの下部からエンジンに供給されるが，スラッジがタンク下部に沈殿し，荒波で船の揺れ等でスラッジが浮上し，エンジンに供給されトラブルが生ずる等である。

Fig.7(b)にクリーン FO システムの特徴を示す。(1) 遠心分離機前の Sludge Breaker (G)で浮袋をつけた大きな粒子をつぶして固体と非固体を分離し，固体を遠心分離機で分離できるようにする。(2)サービスタンク上澄みクリーン FO をエンジンに供給する Floating High Suction (FHS)がある。FHS はタンク表面から FO が流入する穴つき円筒をフレキシブルで支え，フレキシブルからエンジンに FO を供給する。Fig.8 でタンク上部の FO は清浄だが底部 FO は汚れている。

Fig.9 に Sludge Breaker，遠心分離機/FHS，各々前後の FO を示し，Breaker で固体粒子が分離され FHS 後の FO がクリーンになる経過を示す。Fig.10 ではクリーン FO システムで，FO が浄化されている。

Fig.8 FO from Surface and Bottom of Service Tank

Fig.9 Cleaning Process with Sludge Breaker and Centrifugal Cleaner

Fig.10 FO before and after FO Cleaning System with Sludge Breaker and Cleaner

4. 代表的なクリーン化の成果

(1) クリーンエンジンで摩耗 ≈ 0 . これは安芸海運(株)の内航船, ひまわり 5 の 8 年 33,000h の実船試験で実証された³⁾. 試験用エンジンで得たススと摩耗の関係¹⁰⁾と同様に, 摩耗速度 y と LO スラッジ濃度 x の関係が, $y = ae^{ax}$ となる基礎実験があり, スラッジ濃度が大きくなれば, 摩耗速度は指数関数的に増加することを示している²¹⁾. これは見方をかえれば, スラッジ濃度が減少すれば, 摩耗は急速にゼロに近づく事を示し, ひまわり 5 の実績がこれを示している.

(2) 熱効率 η_e 向上後, 半永久的に $\eta_e \approx \text{Const.}$ ¹²⁾ これでは長期的には, かなりの FO 消費低減になる. この R&D とは別に, 自動車エンジンのフラッシングによるクリーンエンジンで, 10~13% の η_e 向上がある²²⁾. ゴミの多いエンジンでは摩擦損失が大きく摩耗が多い. クリーンエンジンの摩耗 ≈ 0 は摩擦が非常に小さいことが原因であり, これが機械効率 η_m と η_e の向上になっていると考えられる.

(3) クリーン FO で船用大形 2 サイクル機関を 4 年 26,000h 無解放²³⁾. 三菱 7UEC60/150HA, 2 サイクル主機関がクリーン FO システムによって, 4 年 26,000h 後のオーバーホール時のシリンダライナとピストンリングの摩耗が非常に少なく, ライナは機械加工の跡が残っている程であった. この結果は, ライナの機械的摩耗の主因が FO スラッジであろう事を示す.

(4) 作動油は使用油が新油よりきれいになる²⁴⁾. パワーショベルで, 出荷台数の約 10% に生じていたメーカー補償トラブルを, ほぼゼロにした.

(5) 従来型 LO 清浄法大形 4 サイクルディーゼル機関で, クランクピンメタルの裏面に不均一分布したスラッジの上で, メタルが繰り返し荷重を受けて疲労破壊した²⁵⁾. 別のエンジンで, メタル裏のスラッジ塊によって摺動面一部が突き破られた例もある. クリーンエンジンでは, これは生じないと考えられる.

(6) 肥料工場の油水混合廃液から LO 再生²⁶⁾. 再生油は新油の NAS 9 から NAS 8~1 等級良くなった. かくして LO 消費量が約 1/10 になった.

(7) スクラップ予定のエンジン寿命を大幅延長²⁷⁾.

5. この分野の現状と今後

現状は(1)清浄技術の進歩が乏しく, LO はエンジンの汚れを落とさず逆に汚し, 汚れて潤滑力低下, 摩耗促進, 冷却力低下, 過剰 TBN で堆積物発生, 廃油発生等があり, (2)スラッジ害を化学薬品で抑える R&D が主である. (3)本来の役目でない中和作用²⁸⁾を LO に課している. この壁を破れば CO_2 大幅低減になる.

半永久寿命のエンジンを実現する条件は, クリーンエンジンによって半永久的に (1)摩耗 ≈ 0 と (2)熱効率 $\eta_e \approx \text{Const.}$ にすることである. エンジンの半永久寿命とクリーン LO/FO に関する分野の理想を実現する観点から代表的と思われる R&D を示す. FO に $CaCO_3$ 系の中和剤を投入して LO から中和機能を分離する R&D がある²⁸⁾. また, 現在最も広く用いられている金属系中和剤 $CaCO_3$ には, (1) 固い堆積物が生じる, (2) 中和反応が遅い, (3) 中和に参加しない部分が多く, 効率が低い等の問題があるので, 堆積物を発生せず, 中和反応が早く, 効率の良い有機系 ash free 中和剤の R&D がある²⁹⁾. この様な R&D が今後も続き前進する事を期待する.

6. LO 種の統合と $TBN \approx 0$ の理論と実機モデル

6.1 LO 種統合の基礎理論

A と B の相対速度が u のとき, A と B を LO で離して接触させない様にした場合, LO に発生する圧力の式, すなわち流体潤滑の基礎式は

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial (\mu \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} \quad (6.1)$$

であり, LO の特性値は粘度 μ だけが含まれる. LO に不純物がなければ負荷 W が大きいほど μ の大きい LO にする. 従って LO の種類分けは理論上 μ だけに依存する. 現在, 無数の LO 種があるのは LO に浸入・発生するスラッジに対処するための無数の添加剤による. クリーン LO ではスラッジがないので, μ で LO 種を定め, 多くの LO を一種に統合できる. これで分類出来ない例外的なものもあろう.

エンジン熱効率向上の一方法に, 粘度 μ の低い LO で摩擦損失低下の R&D が特に小形エンジンで多い. 他方 μ が低下すると油膜形成が低下し焼き付きの危険が増える. ここでは船用大形低速 2 サイクルと, 中形中速 4 サイクル機関の LO 統合に関し, 機械効率 η_m と, エンジン寸法(代表寸法 D), 回転速度 n と LO 粘

度 μ の関係を, 次元解析と実験結果で把握する.

$$\text{エンジン図示出力 } N_f \propto D^3 \quad (1)$$

$$\text{出力の摩擦損失 } N_f \propto \mu D^2 f(n, x_1, x_2, \dots) \quad (2)$$

但し, $f(n, x_1, x_2, \dots)$ は n と他の要因の N_f への影響.

$D \times S = 105\text{mm} \times 120\text{mm}$ のエンジン実験では, 同じ負荷で $n = 1200 \sim 2400 \text{ rpm}$ の範囲で, N_f は n の増加と共にほぼ直線的に増加しているが N_f と n は比例関係ではない³⁰⁾. 機械効率 η_m は冷却損失等を無視した場合,

$$\eta_m \doteq (N_f - N_0)/N_f \doteq 1 - N_f f(n, x_1, x_2, \dots)/N_f \text{ であるが,}$$

$$f(n, x_1, x_2, \dots) = f$$

とすると $N_f/N_f \propto \mu f D^2/D^3 = \mu f/D$ であるから

$$\eta_m \doteq 1 - \mu f/D \quad \text{但し } \partial f/\partial n > 0 \quad (6.2)$$

となる. 上記実験において一定負荷で n が大きいほど N_f が大きくなるのは, 圧縮行程の TDC 付近で境界潤滑になり, 摩擦損失が大きいからである. n が 2 倍になれば TDC 付近の通過が 2 倍になり N_f が増加する. 大形低速ほど D が大きく, n が小さいので f が小さく, f/D が小さくなるので, μ の変化による η_m への影響が小さい. 小形高速エンジンは摩擦損失約 30%, 船用大形低速エンジンで約 10% であり式(6.2)と対応する.

6.2 $EBAS \approx 0$ の基礎理論

理論的には, dt 時間で酸 dA が発生し, これにアルカリ dB を投入して中和すれば, LO は常に中性に保たれ $EBAS = 0$ とするのが理想である. 従って理想を追求する R&D では, $EBAS \approx 0$ を実現する技術の追求となる. Nephron System はこれに近い実績がある.

Fig.11 は Nephron Filter に Overbased Detergent をしみ込ませ, 三菱重工相模原工場製のコジユネ用エンジンで, 長期間にわたり TBN=12~14 を維持した実績である. MIT では高 TBN にせず, long life LO システムを目的とした R&D で, TBN ≈ 3 の実験がある⁵⁾. しかし, MIT 法では廃油ゼロにならない.

Fig.11 TBN ≈ 10 in a Cogeneration Engine

6.3 LO 種統合と TBN ≈ 0 の実機モデル

Fig.12 は船舶で LO を一種に統合し TBN ≈ 0 にする模式図を示す. これは船舶で(1)2 サイクル主機にシリンダ油(MCL)とシステム油(SLO)が, (2)4 サイクル

補機に 4 サイクル用 SLO の 3 種あるのを一種に統合し, かつ TBN ≈ 0 にしているが, これは現有技術で可能である. 燃焼室で $SO_2 \approx 0$ するには FO 噴射前に FO 中に中和剤を投入する. 使用中の LO を(1)(2)(3)のラインで A の Nephron System で清浄した後に共通の LO タンクに戻し, (4)のラインでエンジンに戻す.

特許等の関係で FO へのアルカリ投入ができなければ, 2 サイクル主機の MCL drain は, (5)のラインで B の Nephron Filter で浄化の後, C の TBN 調整器を経て, シリンダへくり返し注入する予備試験を行う. その後(1)(2)(3)のラインでエンジンから LO タンク, (4)と(6)のラインでタンクからエンジンへ循環させて, 2 サイクル主機と 4 サイクル補機の LO が 1 種に統合され, TBN ≈ 0 となり, 大量の MCL 廃油がゼロとなり, 運航費低減になる.

Fig.12 のモデルでは MCL も半永久使用であるから, 注油率を気にせず充分な LO を供給出来る.

式(6.2)の考察で船用中大形ディーゼル機関の LO 統合では, 粘度の大きい MCL に統合しても, LO による摩擦損失は無視できるであろう. ひまわり 5 の船用 4 サイクル中形エンジンでも $\eta_e \doteq \text{Const.}$ は確認された. クリーンエンジンでは, 長期間の平均熱効率 η_{me} が向上する. 従って, Fig.12 の船用中大形ディーゼル機関の LO 統合で, μ の高い LO に統合して摩擦損失が若干増加しても, η_{me} の向上がこれを補う. LO の μ を小さくすれば焼付き危険が増大し, 摩耗増加は当然であり, 摩耗増加のエンジン試験¹⁰⁾がある. しかし, これは設計と運転条件にも支配される. 小形高速から船用中大形まで, μ を下げて η_e を約 1% 向上させている実績では, μ を下げても焼きつき等はない^{31)~33)}ので, LO 統合で μ を若干小さくしても問題ないであろう.

Fig.12 System of LO Integration and TBN ≈ 0 in a ship

6.4 LO 交換後の TBN 急低下に関する考察

この R&D で(1)エンジンに固着したスラッジは容易に除去できない, (2)通常フラッシングでは全スラッ

ジの 70%強が除去されず固着して残った²⁷⁾。新油は TBN が大きくクリーンであり, 洗浄力が強く溶解度も大きい。従って LO 交換後は, 長時間で固着した多量の重度酸化物の一部を新油が洗い落とし, 高 TBN が中和し TBN は急速に低下する。クリーン LO の正常運転では, 理論上 LO 補給で μ は低下し, TBN は上昇する。古い塗料除去直後に再塗装しないと, サビで効果低減の報告がある。食器や歯も使用直後の洗浄でないと汚れが固着する。汚れの固着は自然現象である。

7. あとがき

- (1) 中和作用を LO 本来の機能から分離²⁸⁾すべし。
- (2) EBS ≈ 0 でなく TBN ≈ 0 であるが, 本報タイトルの LO システムが近未来に実用化され得る有力な手段と考えられる。
- (3) この理論と技術は省資源と環境保全に寄与しエンジンの end-user に大きなコスト低減になる。具体的には FO と LO 消費低減, 部品交換減少, トラブル減少, 無解放期間延長による工事費低減, 稼働率向上等がある。LO 統合では船内構造物等の簡易化になる。
- (4) HFO 重質化による black sludge で, LO 粘度上昇, deposit 増大等への対応 R&D³⁴⁾がある。Nephron System の実績は, black sludge を除去している。
- (5) 排気系へのスラッジ流入が無いので, DPF 等の後処理装置の寿命が延びるのは確実である。
- (6) この技術はエンジン以外への実用がより容易。
- (7) 粘度上昇を LO 劣化と誤った判断がある等の注意事項に関しては, 講演予稿⁴⁾の 7 章を参照されたい。

参考文献

- 1) 東忠則, 住本守央, 木村功, 舶機誌 35-3(2000-3), pp.178~189.
- 2) Morio Sumimoto, Masataka Hashimoto and Tadanori Azuma, ISME 2009, BEXCO, Busan, Oct. 2009, No.62
- 3) Masataka Hashimoto, Tadanori Azuma, Morio Sumimoto and Kanji Mitsuda, SAE 2011-01-2113
- 4) 東忠則, 橋本正孝, 第 82 回(2012)マリンエンジニアリング学会学術講演会論文集, pp.125~131.
- 5) Simon A. G. Watson, et al., SAE 2009-01-1782
- 6) Paul Harrold et al., CIMAC 2013, Shanghai, No.82
- 7) W. van Dam, de Vries Feijens, J. A. van Leeuwen and K. Narasaki, SAE 2007-01-3999
- 8) Maarten Boons and Ronald Brand, CIMAC 2010, Bergen, Paper No.111
- 9) Catherine Amblard and Serge Esson, CIMAC 2013, Shanghai, Paper No.392
- 10) Wim van Dam, William W. Willis and Mark W. Cooper, SAE 1999-01-3575
- 11) Tadanori Azuma, Morio Sumimoto and Isao Kimura, ICME 2001, Busan, pp.193~196
- 12) 東忠則, 住本守央, 木村功, 自動車技術会学術講演会前刷集, 975, 9740118, 1997-10, pp.241~244
- 13) David B. Kittelson, J. Aerosol Sci. Vol.29, No.5/6, pp.575~588, 1998
- 14) 佐々木徹, 油空圧技術, 97.1, pp.42~46
- 15) 佐々木徹, 油空圧技術, 97.2, pp.39~42
- 16) Akira Sasaki and Shinji Uchiyama, NCFP 102-12/SAE OH 2002-01-1352
- 17) 橋本正孝, 猪口雄平, 東忠則, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 41-2(2006), pp.125~132
- 18) 東忠則 等日マリ誌, 36-4(2001-4), pp.46~54
- 19) Masataka Hashimoto, et al., ISME 2005, Tokyo, Paper No.34-3
- 20) 住本守央, 東忠則, 木村功, 岡見知光, 舶機誌 35-8(2000-8), pp.562~570.
- 21) 木村好次, 野呂瀬進監修, "トライボロジーの解析と対策(普及版)", (株)テクノシステム(2003, 5), p.565
- 22) 鷲野翔一, "市街地走行車の燃費改善", 自動車技術会学術講演会前刷集, No.79-05, 2005 5001
- 23) "Mitsubishi extends engine overhauls to four years", The Motor Ship, December 1989, pp.17~18.
- 24) 東忠則, 住本守央, 木村功, 須崎弘義, 日本油空圧学会論文集, 31-3(2000-5), pp.7~11.
- 25) Morio Sumimoto and Tadanori Azuma, ISME 2005, Tokyo, No.33-3
- 26) 住本守央, 東忠則, 木村功, 水環境学会誌, 23-1(2000), pp.55~58
- 27) 住本守央, 東忠則, 木村功, 大矢秀夫, 舶機誌, 34-1(1999-1), pp.33~40
- 28) Terry Garner, Lars Voss and Charlotte Roejgaard, CIMAC Congress 2007, Vienna, No.145
- 29) Denis Lancon, Valerie Doyen and Serge Esson, ISME, October 17~21, 2011, Kobe, Japan, D3-2.
- 30) Toshiro Hamatake, Yutaro Wakuri, Mitsuhiro Soejima and Tatsumi Kitahara, CIMAC Congress 2001, Hamburg, Proceedings pp.1426~1440
- 31) W. van Dam, et al., SAE 2011-01-2124
- 32) Catherine Amblard and Denis Lancon, ISME 2011, Kobe, Japan, D3-4
- 33) Shigeki Takeshima et al., ISME 2011, Kobe, Japan, D1-1
- 34) Jicheng Piao, et al., CIMAC 2013, Shanghai, No.322