

船舶用低速 2 サイクル型ディーゼルエンジンの 就航条件及び潤滑油内元素とシリンダー部摩耗量の関係

In a low-speed 2 cycle diesel engine,
Relationship between the service conditions, elements in lubricating oil and cylinder part wear

横浜国立大学
横浜国立大学
横浜国立大学
横浜国立大学

相原 涼馬
ファマキンワ アヨ
坂本 淳司
澁谷 忠弘

Ryoma Aihara
Ayo FAMAkinWA
Junji Sakamoto
Tadahiro Shibutani

Abstract

The prediction of wear rate is important to estimate useful life of the equipment. This paper focuses on lubricating oil analysis to predict wear out effects caused. Condition based maintenance using lubricating oil analysis can reveal failures before it actually occurs. However, in lubricating oil analysis, attention is often paid to the transition of iron. In my opinion it is difficult to make an abnormality judgment focusing on iron component only. In this research, the oil used in the cylinder is analyzed with different engine service conditions. The relationship between the service conditions and the elements in the lubricating oil are established. In addition, the relationship between different element in the oil are established. Firstly, Fluorescent X-ray analysis is adopted to reveal substances contained in lubricating oil. Secondly, the relationship between multivariable by applying a Gaussian graphical model to the analysis result is examined. From the study, it was found that the iron in the lubricating oil is strongly related to sulphur and vanadium caused by fuel and copper by wear.

Keywords: Condition-based maintenance, Anomaly detection, Fluorescent X-ray analysis,
Marine engine, Lubricating oil, Gaussian graphical model, Graphical lasso

1. 緒言

船舶用低速 2 サイクルディーゼルエンジンの検査・保守手法として、規定された一定期間において保守点検を行う時間基準保全(TBM: Time-based maintenance)や、機関全体を継続的に、かつ合理的な方法により一部分を開放検査し、全体の状態を類推する機関継続検査(CMS: Continuous machinery survey)が一般的に採用されている。

しかし、コンテナ船のような大型外航船の場合、運航条件が多岐にわたり、エンジン負荷が各船舶に応じて異なるため、TBM における保全方法では検査に過不足が生じる可能性がある。そこで、近年、安全性・経済性が確保でき、さらに効率の良いメンテナンス手法の一つとして、機器の定常運行状態から故障徴候を早期に検知する状態監視保全(CBM: Condition-based maintenance)の研究・開発が進められている。

船舶用エンジンの CBM 手法の一つとしては、エンジンに使用される潤滑油中の無機成分の定量分析が行われている。潤滑油分析には従来、定量精度の良さから、誘

導結合プラズマ (ICP) 発光分析法が用いられている。しかし、前処理が必要となるため、時間と労力を要するため、ICP 発光分析法に代わる分析時間の短縮が可能な分析手法として蛍光 X 線分析法が期待されている。

蛍光 X 線分析法は、元素固有の波長を持った蛍光 X 線エネルギーを観測することにより、分析対象試料の含有元素を特定する分析方法である。また、元素の濃度、すなわち試料中に含まれる原子数に比例して蛍光 X 線の光子数が変わる。これが蛍光 X 線強度として現れる。

分析においては、潤滑部の摩耗によって生じる Fe 成分に着目されることが多い。潤滑油中の Fe 濃度の急上昇は、主に燃焼室のピストンリングおよびシリンダライナがスカuffing 等の異常摩耗を生じている可能性があるからである。しかし、船舶の運航条件が多岐にわたる場合、Fe 成分のみに着目して異常判断を行うことは難しいと考える。そこで、船舶の就航条件および潤滑油中のその他成分との関係を明らかにすることにより正確な異常判断が可能になると考える。

本研究では、就航条件の異なる船舶用低速 2 サイクルディーゼルエンジンのシリンダー油を分析し、就航条件

や潤滑油内元素とシリンダー部の摩耗量の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 船舶における潤滑油

低速2サイクルディーゼルエンジンの潤滑油にはシステム油とシリンダー油の2種類があり、それぞれ潤滑を担う対象が異なる。前者はクランク室内のクロスヘッド摺動面やクランク軸受けなどの潤滑を担い、繰り返し用いられる。後者は、エンジンのシリンダー部に使用される潤滑油である。シリンダー部は噴射された燃料が爆発し、その熱エネルギーが運動エネルギーに変換される部分である。使用環境は非常に苛酷であるため、繰り返し使用されるシステム油と異なり、一度だけの使い捨てで、使用後は排出孔から排出される。本研究では、後者の排出されたシリンダー油を分析し、摩耗との関係を調査した。

3. 実験

3.1 分析試料

アメリカ航路の船舶(AV: American vessel)とオセアニア航路の船舶(OV: Oceania vessel)を各2隻、合計4隻から入手した合計23のシリンダー油サンプルに関して、それぞれ十分に攪拌した後、シリンジを用いて2ml採取し分析試料とした。

各船舶のエンジンに関して、アメリカ航路の船舶とオセアニア航路の船舶では保有シリンダー数が異なるもののエンジンモデルが同一のため、同一のエンジンとして扱い、分析及び、解析を行っている。

3.2 蛍光X線分析法

蛍光X線分析はJOEL（日本電子株式会社）製蛍光X線分析装置JSX-3100R IIを使用した。分析条件は、X線発生器の管電圧を30.000kV、コリメータ値7.000mmφ、測定時間100.00秒で大気測定を行った。

4. ガウス型グラフィカルモデル

本研究では、ガウス型グラフィカルモデルを用いて、多変量正規分布を想定し、変数間の関係を示す。変数同士の関係をグラフで表現する方法であり、条件付確立と同様に、ほかの変数を与えたときに条件付独立であるという考え方でグラフと確率分布を結びつけるモデルを一般に対マルコフモデルと呼ぶ。また、多変量正規分布を想定したマルコフモデルをガウス型グラフィカルモデルと

呼び、ガウス型グラフィカルモデルを使用することにより、多変数間での主要な直接相関を浮かび上がらせることを目的とする。

ここで、データ D の標本を想定する。 D の標本は必ずしも多変量正規分布に従う必要はない。はじめに、標本 D に対し、標準化変換を行う。

$$x_i^{(m)} \leftarrow \frac{x_i^{(m)} - \hat{\mu}_i}{\sqrt{\hat{\Sigma}_{i,j}}} \quad (1)$$

上記の式に関して、標準化変換を行うことで、一般性を失わずに D の標本平均を0、各次元の分散を1と仮定できる。 $x_i^{(m)}$ は各標本の第 i 成分 ($i=1,2,\dots,M$)、 $\hat{\mu}_i$ は標本平均、 $\hat{\Sigma}_{i,j}$ は標本共分散をあらわす。

ここで、共分散行列ではなく精度行列で多変量正規分布を表したほうが表現が簡潔になるため、以下の式でマルコフモデルを構成することを考える。

$$\mathcal{N}(x|0, A^{-1}) \equiv \frac{|A|^{\frac{1}{2}}}{(2\pi)^{\frac{M}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} x^T A x\right) \quad (2)$$

ここで、 A が精度行列である。ガウス型グラフィカルモデルでは、対マルコフモデルの考え方を、 A を使って極めて明瞭に表すことができる。

ここで、 x_1 と x_2 の依存関係を示したい時、 x_1 及び、 x_2 に対する周辺分布は以下の式で表すことができ、

$$p(x_1, x_2) = \int dx_3 \dots dx_M p(x) \quad (3)$$

条件付分布は以下の式で表せると定義される。

$$p(x_1, x_2 | x_3, \dots, x_M) = \frac{p(x)}{p(x_3, \dots, x_M)} \quad (4)$$

ここで、 $p(x)$ はデータ D の確率分布である。また、式(4)から $p(x_1, x_2 | x_3, \dots, x_M)$ は $p(x)$ 、すなわち $\mathcal{N}(x|0, A^{-1})$ に比例していることがわかる。したがって、 $\mathcal{N}(x|0, A^{-1})$ の中で、 x_1 と x_2 に関係する部分を拾うと、

$$p(x_1, x_2 | x_3, \dots, x_M) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} (A_{1,1}x_1^2 + 2A_{1,2}x_1x_2 + A_{2,2}x_2^2) \right\} \quad (5)$$

と導くことができる。ここで、 x_i と x_j 統計的に独立であるためには、精度行列 A の (ij) 成分が 0 である必要がある。0 でない場合、「 x_i と x_j の間に直接関係がある」と表現され、偏相関数 r を用いてその量が表される。

$$r^{i,j} \equiv \frac{A_{i,j}}{\sqrt{A_{i,i}A_{j,j}}} \quad (6)$$

ガウス型グラフィカルモデルにおいては直接相関が 0 であるにも関わらず共分散行列 Σ の (ij) 成分が 0 でない場合、その相関を間接相関と呼ぶ。周辺分布は、直接相関と間接相関を合わせた効果を表現しており、ガウス型グラフィカルモデルの場合、この周辺分布は解析に計算でき、式(3)は以下ようになる。

$$p(x_1, x_2) = \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{1,1} & \Sigma_{1,2} \\ \Sigma_{2,1} & \Sigma_{2,2} \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

本研究では疎なガウス型グラフィカルモデルの学習を可能にする標準的な手法であるグラフィカルラッソ (graphical lasso) と呼ばれる手法により潤滑油内の摩耗起因元素の Fe と船舶条件及び潤滑油内元素との関係を明らかにする。

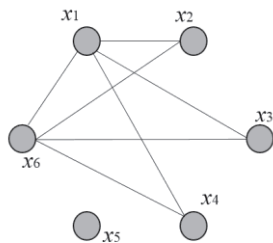


Fig.1 Graph structure of Gaussian graphical model of $M = 6$

5. 実験結果及び解析

5.1 就航条件と Fe 蛍光 X 線強度

5.1.1 総エンジン時間と Fe 蛍光 X 線強度

シリンダーの主な構成元素である Fe の蛍光 X 線強度と総エンジン時間の関係について Fig.2 と Fig.3 に示す。

ただし、AV と OV で総エンジン時間は大きく差が生じていたため、それぞれの航路によって結果を示した。

定常状態の摩耗によるシリンダー油中の Fe 濃度は許容される範囲内で推移し、異常摩耗が生じると急上昇することが知られている。よって、今回それぞれの分析結果のベースラインとして各航路で平均値を求めた。ここで得られた値から AV と OV 間でベースラインに大きく差が生じていること、さらに、全て定常運転状態で生じた摩耗にも関わらずベースラインから大きく外れている値があることがわかる。この結果からも Fe のみに着目して異常判断を行う難しさがわかる。

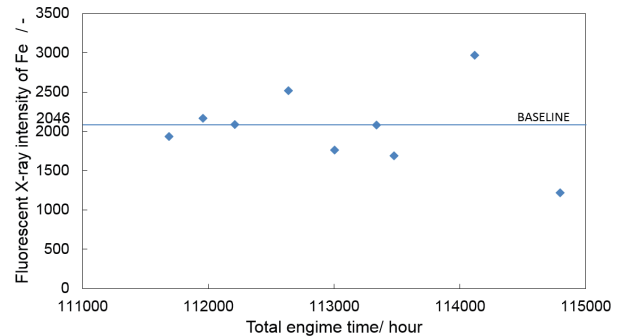


Fig.2 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and total engine time of AV

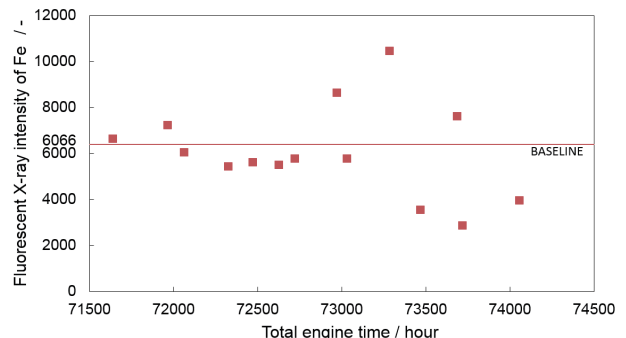


Fig.3 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and total engine time of OV

5.1.2 船舶就航条件と Fe 蛍光 X 線強度

シリンダー単位出力と Fe の蛍光 X 線強度の関係を Fig.4 に示す。ここで、シリンダー単位出力は船舶エンジンの出力をエンジンの保有シリンダー本数で割ったものである。シリンダー単位出力と Fe の蛍光 X 線強度の関係から、船舶の航路別に見ると、いずれもシリンダー単位出力とともに検出された Fe の蛍光 X 線強度は大きくなる傾向が認められる。OV の方がシリンダー単位出力に対する増加量は大きい。また、AV と OV との間で蛍光 X 線強度の推移に差異が生じていることもわかる。このことより、総エンジン時間と蛍光 X 線強度の関係でも

示したような、航路別で摩耗量に差異が生じたことがわかる。

一般に、対象としている船舶用エンジンでは、回転数 (RPM: Rotations per minute) を可能な限り一定に維持しようとする機能がある。このため、RPM と Fe の蛍光 X 線強度の関係を示すことは難しい可能性がある。

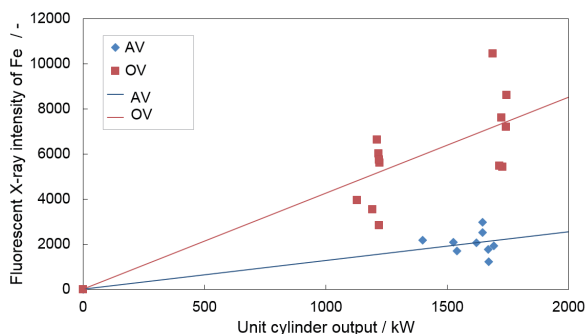


Fig.4 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and unit cylinder output

5.2 シリンダー油中元素と Fe 蛍光 X 線強度

各元素の蛍光 X 線強度と Fe の蛍光 X 線強度との相関係数を以下の Table1 に示す。相関係数は 1 に近いほど対象データ間で正の相関性が高く、-1 に近いほど負の相関性が高いといえる。その反面、データ間の直線性のみしか判断できないため、相関係数及び散布図からシリンダー油中の各元素との関係を明らかにする。

S、V、Ni、及び Cu の蛍光 X 線強度は比較的相関が高く、それぞれの推移を Fig.5 から Fig.8 で示す。S、V、Ni ではそれぞれの含有量が許容範囲を超えると急増するような推移の特徴が認められる。一方、Cu では比例関係に近い推移の特徴があることがわかる。なお、相関係数より Ca、Zn、Ag は Fe との相関は低い。

Cu はシリンダーとともにシリンダー部を構成するピストンの部材の主要元素の一つである。このため、Cu の検出はピストンリングの摩耗によるものと推定される。

Table1 Correlation coefficient of each element with Fe

element	S	Ca	V	Ni	Cu	Zn	Ag
Correlation coefficient	0.826	-0.387	0.811	0.668	0.786	0.401	-0.234

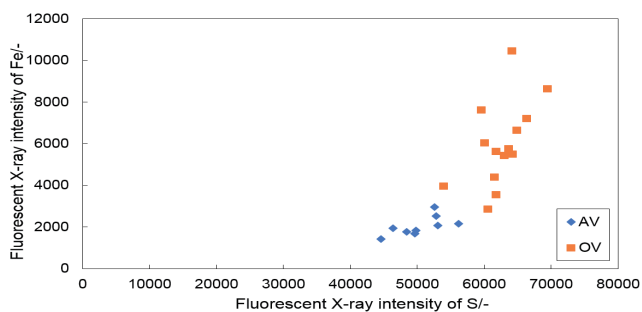


Fig.5 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and S

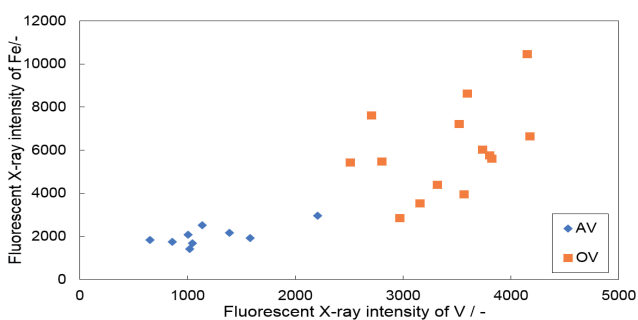


Fig.6 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and V

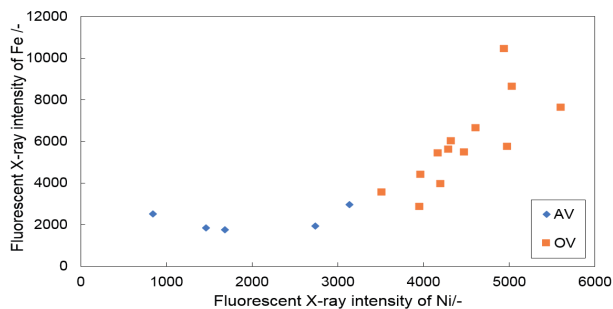


Fig.7 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and Ni

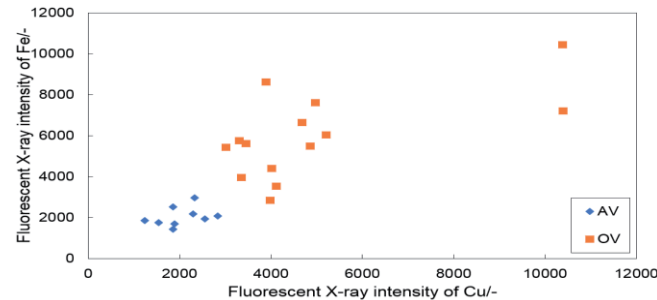


Fig.8 Relationship between fluorescent X-ray intensity of Fe and Cu

シリンダーとピストンリングで生じるアブレッシブ摩耗により、互いに削りあったため比例関係に近い推移を取った可能性がある。

S、V、Niはシリンダー内で爆発させられる燃料に含まれている元素である。なお、Sはシリンダー油にも含まれており、腐食の要因元素の一つである。バナジウムは、燃料の触媒として用いられており、燃焼ガスに接する部分に融点の低いV化合物が灰分として付着、溶解して酸化皮膜の保護性を失うことでバナジウム腐食が起こる可能性がある。その結果、燃料起因である物質が多く混入したシリンダー油では摩耗量の増加につながったのではないかと考える。

5.3 グラフィカルラッソを用いた多変量解析

本実験で得られたシリンダー油内元素のデータ及び、船舶の就航条件との関係について統計解析ソフトRを用いて、グラフィカルラッソ解析（以下、Glasso解析と呼ぶ）を行った。

ここで、分析において欠損値を生じていなかったシリンダー油中元素（S、Ca、V、Fe、Cu）を抽出し、就航条件であるシリンダー単位出力及び、RPMを対象としてGlasso解析をした結果をFig.9に示した。 $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ は相関関係に対する縛りの強さを表しており、今回の解析では $\rho=0.7$ を用いて解析を行った。

この結果より、サンプル全体で関係を見ると、Feは、SとV、Cuと関係が強いことがわかる。さらに、SとVの間でも強い関係性があることを示しており、両元素が同一の要因によってシリンダー油に含まれたことの裏づけとなっている。Cuはそれとは異なり、Feのみと関係性が強いことから、S、Vとは異なる要因でシリンダー油に混入したことが推測できる。

ここで、AVとOVで分けてGlasso解析を行った結果

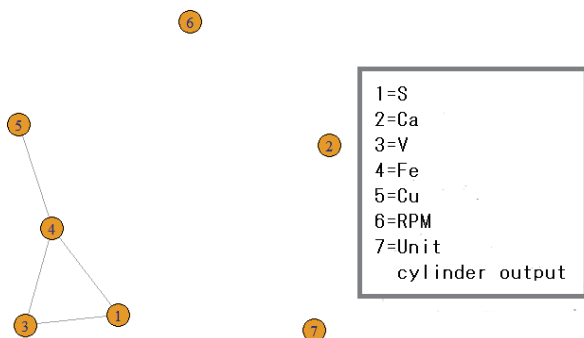


Fig.9 Graph structure of Gaussian graphical model($\rho=0.7$)

をFig.10及びFig.11として以下に示す。それぞれに分けることでデータ数が減少するため、縛りの強さを $\rho=0.6$ として解析を行った。この結果より、AVにおいてFeの量はS及びVと相関関係があり、OVにおいてはCu及びシリンダー単位出力と関係があることがわかる。これは、それぞれ摩耗機構が異なる可能性を示している。AVに関しては燃料起因のバナジウム腐食の影響による腐食摩耗が主要因であるのに対し、OVはシリンダーとピストンによるアブレッシブ摩耗が主要因である可能性がある。

この結果から、定常運航している船の間にも摩耗機構に差異が生じており、これがシリンダーの劣化度合いに起因している場合、状態監視における指標のひとつになる可能性がある。

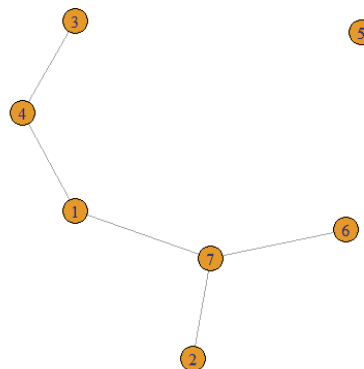


Fig.10 Graph structure of Gaussian graphical model of AV ($\rho=0.6$)

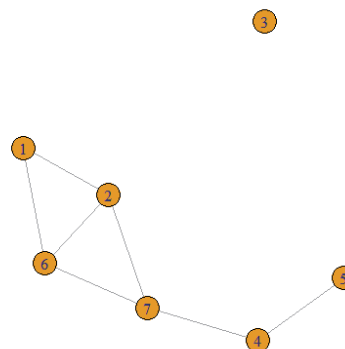


Fig.11 Graph structure of Gaussian graphical model of OV ($\rho=0.6$)

6. 結言

本研究では、就航条件の異なる船舶用低速2サイクルディーゼルエンジンのシリンダー油を分析し、就航条件やシリンダー油内元素とシリンダー部の摩耗量の関係を明らかにすることを目的として、蛍光X線解析による元素分析と多変量解析を行った。シリンダー油中の摩耗起因物質であるFeは、就航条件により蛍光X線強度が異なっており、単位シリンダー出力やRPMだけで整理することは難しい。元素分析の結果、シリンダー油中のVやSなどの燃料起因物質や摩耗により生じると推測されるCuとの関係が確認された。

また、多変量解析の一つであるグラフィカルラッソ解析を用いて、検出された微量元素とFeの関係性を解析した。Feの検出量の異なる就航条件別に解析した結果、Fe検出量が少ない航路では、燃料起因物質との相関が強く、Fe検出量が多い航路では部材の摩耗に起因した元素との相関が認められる結果となった。これは、定常運行する船舶でも摩耗機構が異なる可能性を示している。Feの摩耗量は、シリンダーの劣化度に大きく関与しており、状態監視の新たな指標の一つとして可能性を示唆することができた。

今後の課題及び進展としては以下の2点が挙げられる。

- 1) 潤滑油サンプルをさらに増やし、定常運航船舶における摩耗量及び、その他物質の関係に関して、分析及び解析をさらに進めることが必要である。グラフィカルラッソ解析をより多くのデータに対し行うこ

とにより、本研究における提言の確実性をさらに高める必要がある。

- 2) 定常運航による摩耗量と様々なファクターとの関係を明らかにすることで、シリンダー油の異常摩耗の判断を容易にすることを最終目的とする。そのために、摩耗量に影響するファクターを用いて、正常値判断のための閾値及びプロセスを導くことが今後の目標である。

参考文献

- [1]松本望 杉本賢一、“蛍光X線分析法による潤滑油中無機成分の定量法に関する研究”、あいち産業科学総合センター 研究報告 2015、pp.14
- [2]日本海事協会、“3. 船舶用ディーゼル主機関のシステム油分析調査”、2014 ClassNK 春季技術セミナー、pp.45
- [3]日本マリンエンジニアリング学会誌 第49巻 第3号、“入門コーナー 「シリンダ油」・「システム油」・「トランクピストン油」”、2014、pp.127
- [4]井手剛 杉山将、“機械学習プロフェッショナルシリーズ 異常検知と変化検知”、株式会社講談社、2016、pp.128-135
- [5]石塚悟 木村重利、“油分析技術について”、株式会社IHI 検査計測、2011、pp.43
- [6]高圧ガス保安協会、“中級 高圧ガス保安技術 第12次改訂版”、2014、pp.180-181
- [7]Jerome Friedman, Trevor Hastie and Rob Tibshirani、“Package ‘glasso’”、2014