

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560831

研究課題名（和文） こわさない技術としての船用機関におけるボルト・ナットの締結管理に関する研究

研究課題名（英文） Sturdy for the Bolt Tightening Management in Ship Machinery Maintenance as Preservation Technologies

研究代表者

井川 博雅（IKAWA HIROMASA）

神戸大学大学院・海事科学研究科・准教授

研究者番号：20184377

研究成果の概要（和文）：各種原動機・補機の分解整備作業におけるボルト締付時の状況や意識について船舶運航各社に対してアンケート調査を行い、使用する潤滑剤の種類や塗布およびボルトの締結法に対して複数の考え方あることがわかった。次にアンケート調査に基づいて締結条件がトルクと軸力に及ぼす影響を実験的に明らかにするために、潤滑剤の種類やボルト締付時の作業姿勢が締結力に与える影響および合マークの有効性に関する実証実験を行った。

研究成果の概要（英文）：We sent out a questionnaire to marine engineers in the shipping lines about the bolt tightening management. As a result, it was appeared that there were plural views to lubricant, for example the kind and the way of sweating, for bolts at the same part of the main engine, and to the ways of bolt tightening. Then, to answer the difference between the uncertainty and the idea in the content of the description of the questionnaire, we verified them by the experiment demonstrated about influence of the lubricant and the posture in bolt tightening, and the effectiveness of match mark.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学・船舶海洋工学

キーワード：機関損傷・締結管理・アンケート調査潤滑油・ボルト締結法

## 1. 研究開始当初の背景

船舶の主機関が故障した場合、船舶は運航自由が奪われ海難事故の発生につながる。これらにはボルトの締めすぎによる折損やボルト緩みにより機器が破壊されて海難に至る場合もあり、平成、10～20年度に裁決された海難事故のうち機関損傷による海難について調査したところ約7%がボルト締付けに起因するものであった。

船用機関の機器におけるボルトの締結管理についてトルク法に注目すると、締付トルクとボルト軸力の関係は使用する潤滑剤や締結方法に代表される締付け条件によって大きく異なってくるということがわかっているが、習慣的あるいは狭隘な環境故に推奨されるような締結がなされていない可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究においては、各種原動機・補機の分

解整備作業におけるボルトの締付状況や意識を明らかにするために船舶運航各社にアンケート調査を実施するとともに、アンケート結果に基づいて、使用する潤滑剤の種類や船舶機関室のような狭隘な環境下での作業性の低下がボルトの締結力に及ぼす影響を実験的に調べることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず各種原動機・補機の分解整備作業におけるボルト締付時の状況や意識について船舶運航各社に対してアンケート調査を行い、次にアンケート調査に基づいて締結条件がトルクと軸力に及ぼす影響を実験的に明らかにするための実証実験を行った。実証実験は、上記のアンケート調査の結果を考察し、船舶機関士が必要としていると考えられる内容とした。

### 4. 研究成果

#### (1) アンケート調査

本研究では、ボルト締付け作業における潤滑剤の使用の有無やその種類、トルクレンチの取扱い方法、トルクレンチ締付け作業に関する経験などが機関整備において不具合事象にどのように関与しているかを明らかにするために、国内の外航船社 12 社の機関士 85 名の協力を得てディーゼル機関を中心に各部のボルト締付けに対するアンケート調査を行った。アンケートは、多忙で時間のとれない機関士に答えて貰うことを優先して選択式とし、更に詳しい内容が記入できるようにコメント欄を設けた。アンケートの項目は 17 項目とした。代表的な調査結果を以下に示す。

#### ① 事故の経験に関するデータ

ボルトの緩みに起因する事故の経験の有無を調査した結果、全体で 37% が事故を起こした、49% が事故を見聞きしたと回答している。このことから、ボルトの緩みに起因する事故が稀なものではないことがわかる。図 1 に示すように、経験年数別に見ると 10~15 年のグループに事故を起こしたと回答したものがやや多く、5 年未満のグループでは事故の経験・見聞のないものが多くなる。

次にアンケート結果から経験した事故件数を項目別に分類した結果を図 2 に示す。クランクピンボルトやスタッドボルト等のエ

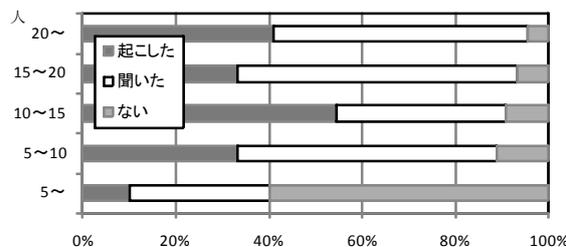


図 1 ボルトの緩みに起因する事故の経験の有無

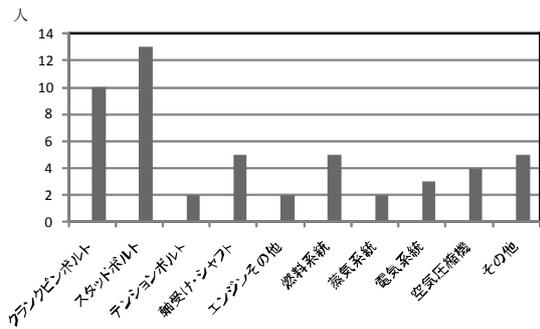


図 2 ボルトの緩みに起因する事故件数

ンジンの重要部を締結するボルトから燃料系統、蒸気系統、電気系統の締結ボルトまで多岐にわたっていることが判る。これらの緩みから発生する事故が、エンジンの破壊や火災、停電等の重大事故に至った事例がコメントとして記されていた。その中でもとりわけ多いのが、クランクピンボルトとスタッドボルトであり、これらは燃焼により多大な張力がかかるボルトである。従って、これらのボルトの張力管理は非常に重要となる。

#### ② ディーゼル機関各部の潤滑剤使用状況

ボルト締結時に考慮する事項に関する回答結果を図 3 に示す。全体の回答数が 223 であり、回答者数 85 を上回っているのは複数回答を認めているからである。使用温度 (74)、使用箇所 (60) など使用環境を挙げた回答が非常に多かった一方で、次回の作業性を考慮するという回答、締付時の摩擦や締付トルクの指定の有無等締付トルクを意識した回答も多かった。また、メーカ指定に関するコメントが多く見られた。

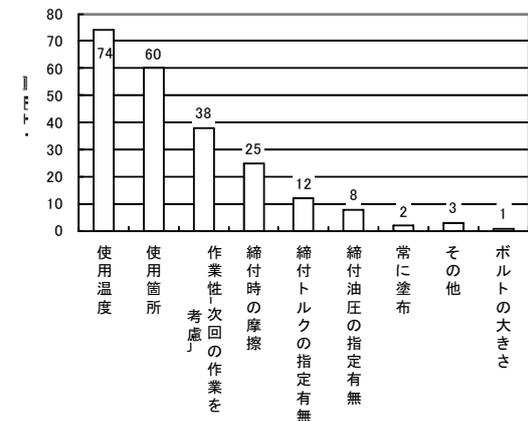
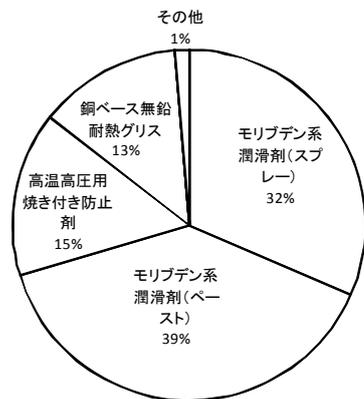


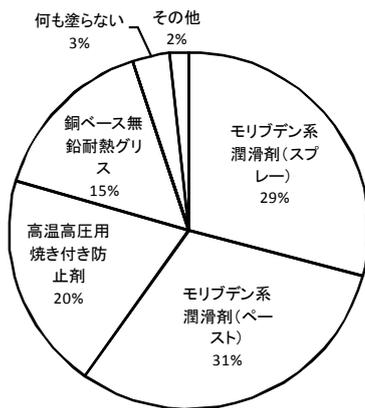
図 3 潤滑剤使用時の考慮事項

アンケート項目で記述した 3 種類の温度の異なるボルトに対する締付け時の潤滑剤の使用状況を図 4 に示す。(a) 図の排気管接続ボルトを見てみると、使用する潤滑剤は二硫化モリブデン系潤滑剤がスプレータイプとペーストタイプを合わせて 71% を占めており、多くの場合でこの種の潤滑剤が用いられる傾向にある。さらに残りの 28% も高温高圧用焼付き防止剤と銅ベース無鉛耐熱グリスが

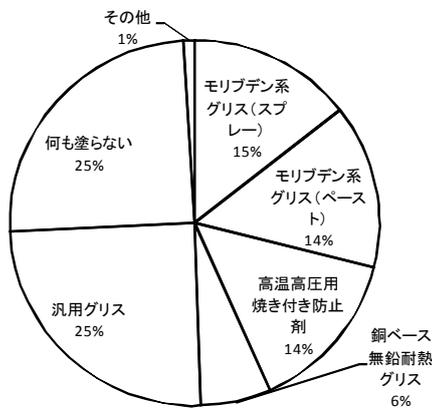
用いられており、何らかの耐熱潤滑剤が使用されていることがわかる。なお、その他の1%はシステム油であった。排気管接続ボルトに使用する潤滑剤では、焼き付き防止を強く意識しているコメントが多く、ボルトサイズや温度によって使い分けしているというコメントもあった。(b)図に示すように、燃料噴射弁取付けボルトでは二硫化モリブデン系潤滑剤の回答があわせて60%、高温高压用焼き付き防止剤が20%、銅ベース無鉛耐熱グリスが



(a) 排気管接続ボルト



(b) 燃料噴射弁取付けボルト



(c) カムケースカバー取付けボルト

図4 高温部ボルト締結時の潤滑剤使用状況

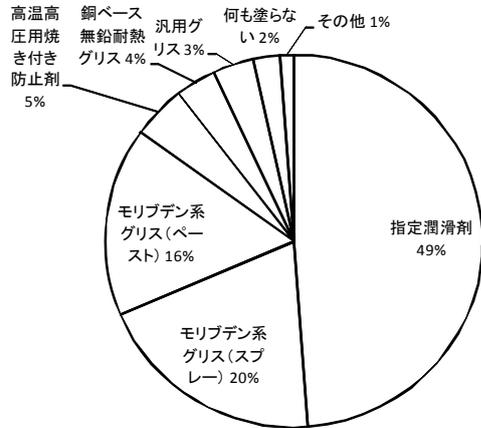
15%を占めている。その他の2%はシステム油、また何も塗らないと回答した者が3%見られた。燃料噴射弁は排気管に比べると100℃前後で使用温度はそれほど高くないが、高い応力がかかる部分である。コメント欄をみると、メーカーによる潤滑剤の指定がある場合は指示に従い、そうでない場合はメーカーに問い合わせるなどトルク締めを強く意識する意見と、次回に緩める場合や焼き付き防止などの保守作業時の作業性を強く意識した意見が複数見られ、トルク締めにおいても全員が潤滑剤の種類と締付け方法を読み取って実行しているわけではないことがわかる。

次に、エンジン外部で常温のカムケースカバー取り付けボルトの調査結果を(c)図に示す。モリブデン系潤滑剤の回答をあわせて29%、高温高压用焼き付き防止剤と銅ベース無鉛耐熱グリスをあわせて20%と耐熱潤滑剤の使用割合が減少しているのに対し、汎用グリスが25%、何も塗らない者が25%へと増えている。コメント欄には、温度が高くないので、システム油やグリスを塗るだけで充分、もしくは同じ理由で何も塗らないという意見が多く、これらがこの両者が増えた大きな理由であることがわかる。

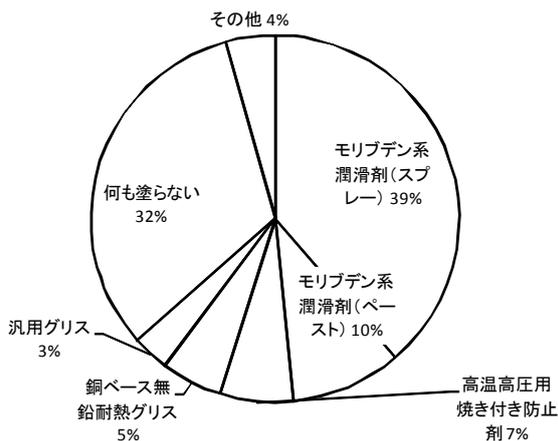
以上の点から、高温環境下で使用されるボルトには焼き付きによる固着防止を目的とした潤滑剤を使用することが多いとともに、燃料噴射弁の場合には温度だけではなく、トルク締めも強く意識して潤滑剤を使用しているということがわかる。

クランクピンボルトに関する締付け時の潤滑剤の使用状況を図5に示す。(a)図はトルク締めでメーカーが使用する潤滑剤を指定している場合で、メーカー指定の潤滑剤が49%と約半数を占めている。次に二硫化モリブデン系潤滑剤(スプレー)が20%、同ペーストが16%を占めた。燃料噴射弁のコメント欄と同様にメーカー指定がある場合にはその指示に従うという意見が多かったが、モリブデン系潤滑剤を中心に指定外のものも多く使われていた。その理由として「指定潤滑剤はめったに在庫が無いことが多い」という意見が挙げられていた点は注目すべきであろう。(b)図はトルク締めでメーカーが使用する潤滑剤を指定していない場合の回答結果であるが、二硫化モリブデン系潤滑剤(スプレー)が39%と潤滑剤の中で突出しており、同ペーストは10%とやや少なくなっている。しかし、一方では「何も塗らない」が36%と同程度を占め、このボルトに潤滑剤を塗布するかしないか大きく対応の異なるところである。この点についてはコメント欄の「クランクピンボルトは潤滑剤を塗布した場合、システム油へ混入することが避けられず、ボルトへの潤滑剤塗布は不要である」というコメントや「細目ネジは締付け時の摩擦を軽減する目的で潤滑剤を塗布する」というコメント、さらに過去においては二硫化モリブデン系

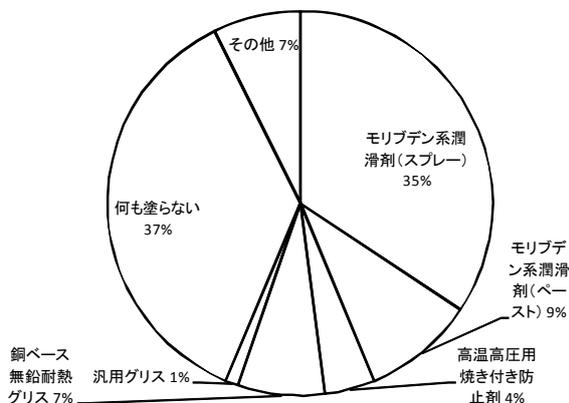
潤滑剤の塗布が一般的であったが、近年は締付け過多を避けるため『何も塗らない』に変わってきている」と、締結力への影響を考慮したコメントも記されていた。(c)図は油圧締めの場合の回答結果であり、モリブデン系潤滑剤のスプレータイプが35%、ペーストタイプが9%であっ



(a) トルク締めでメーカー指定のある場合



(b) トルク締めでメーカー指定のない場合



(c) 油圧締めの場合

図5 クランクピンボルト締結時の潤滑剤使用状況

た。また、何も塗らないと答えたものは37%とトルク締め(b)の場合とほぼ同様の結果となっている。なお、高温部に比べてモリブデン系ペースト潤滑剤の比率が少ないのは、上記の異物混入に加え、「ペースト状焼き付き防止剤は、保管中に異物が混入する恐れがあり使用しない」との意見があり、エンジン内部への異物混入に対する気遣いが見られたことを付記しておく。

以上、アンケート結果からボルトの材質や形状、ボルトの使用環境や潤滑剤による締結力への影響を考慮するなど、現場作業者がそれぞれの見解により、潤滑剤の使用基準を定めていることがわかる。以上の観点から潤滑剤の使用の有無や種類によるボルト締結力への影響を明らかにする必要がある。

### ③ボルト締付け時の作業状況

まず、トルク締めで締付け完了時に解放前につけた合マークが一致しないという経験があるかどうかとの質問に対して、経験ありと回答した者の割合は73%と非常に高かった。目安となる合マークの不一致に関し、その原因として「トルクレンチの精度に問題」、「ねじ部や座面の損傷や汚れ」、「ボルトの伸び」が原因であるとするコメントが見られ、その対策として掃除、ボルト交換等の合マークを重視したものが挙げられていた一方で、「規定トルクで締付け、合いマークは気にしない」という相対する意見も見られた。また合マークの不一致に対し、締付けが足りない場合は増締めを行い、締付け過ぎている場合はそのままにするという回答が多く見られた。

次に、狭い箇所ではトルクレンチが思うように戻らず締付け途中でトルクレンチをかけなおしたことがあるかどうかとの間に対して、69%が経験ありと回答している。トルク締めを課しているボルト・ナットはエンジンの重要部に限られるが、クランクピンボルトのように限られた開口部内にボルト・ナットがある場合や燃料噴射弁のようにまわりに多くの障害物があるため締付け操作が極端に制限される場合に当てはまるようである。

また、トルクレンチ使用時にソケットにエクステンションバーを取り付けて作業したことがあるかどうかの間に対しては、67%が経験ありと回答している。特にクランクピンボルトでは、エクステンションバーを使用する必要性が高いようである。

最後にトルクレンチ使用時にトルクレンチの持ち手をパイプ等で延長したことがあるかどうかとの質問では、15%が経験ありと回答している。トルクレンチの構造上、このような締付け方法は禁じられているにも拘わらず、無視できない割合で存在することは注目すべきである。

### (2) 実証実験

アンケート結果から保全作業を実施する際に多様な手法が見受けられることがわか

った。そこでこれらの手法が結果として締結力の差異を生じるかどうか、あるいは事故に繋がる可能性があるかどうかについて実証実験を行った。以下に代表的な結果を示す。

### ①実験装置および方法

実証実験は、4 サイクル中速ディーゼル機関に使用されている接続棒大端部のクランクピンボルトをシグナル式トルクレンチにより上述の各種手法にて締付け、締付トルクとボルトの締結力を計測することにより行った。シグナル式トルクレンチは船舶や造船所の整備作業に通常使われているもので、今回はレンチのヘッド部に歪みゲージを貼り付けることにより、締付トルクの時間変化を計測・記録できるようにした。対応するボルトの締結力すなわち軸力の時間変化はクランクピンボルト軸心部に取り付けられた歪みゲージにて計測・記録し、両者の関連を比較できるようにした。実験では、アンケート結果に基づいて以下に示すように潤滑剤の種類や作業条件等を変化させて、締付トルクと締結力の関係を調査した。

### ②潤滑剤の種類の違いが締結力に及ぼす影響

舶用機関で一般的に使用されているシステム油、アンケート結果で使用頻度の高かったグリスやモリブデン系焼付き防止剤などの各種潤滑剤を用いて締付けた場合のトルクと軸力の関係を図6に示す。横軸は締付トルク、縦軸はボルト軸力である。締付トルクと軸力の関係はほぼ直線的であるが、同じトルクに対してモリブデン系潤滑剤の軸力

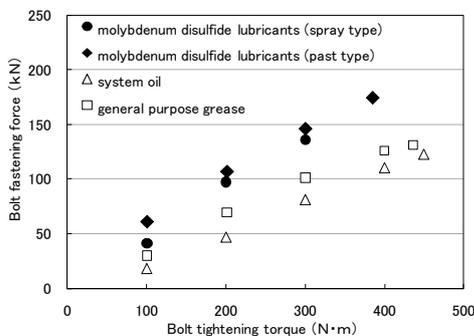


図6 種々の潤滑剤を用いた場合のトルクと軸力の関係

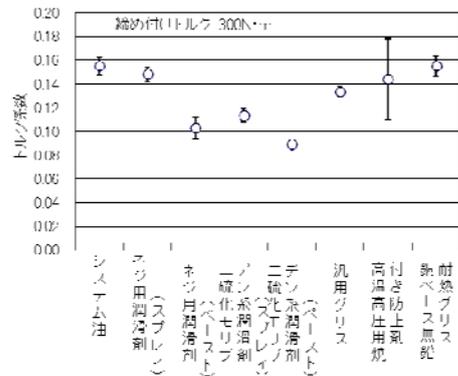


図7 潤滑剤の種類によるトルク係数の変化

が高くなっていることがわかる。

潤滑剤の種類によるトルク係数の変化を図7に示す。締付トルクは300 N・mである。各点は10回実験を行った結果の平均値であり、誤差バーは標準偏差を表す。トルク係数とは締付トルクを軸力と呼び径で除したもので、図6の傾きに関係する。これが高い場合は締付け不良を起こす可能性があり、逆にモリブデン系焼付き防止剤のように低い潤滑剤を特に指定がない場合に使用することは軸力が高くなりすぎるので注意が必要である。高温高圧用焼付き防止剤はばらつきが大きくトルク管理には向いていない。

### ③作業姿勢が締結力に及ぼす影響

アンケート結果からも判るように、船舶の機関室のような狭隘な環境下では、理想的な作業姿勢で締結作業を行えることはきわめて少ない。同じ設定トルクでボルトを締付けた場合に、作業姿勢が締結力に及ぼす影響を調べた。作業姿勢とは、図8に示すように水平位置にて引上げ方向に締付ける場合を0°、押下げ方向に締付ける位置を180°とし、これを6分割した30°毎の(a)~(f)の範囲で締付けを行う姿勢とし、同じ設定トルクで締付けて、軸力を測定した。実験の結果、作業姿勢に関わらず締付け開始直後にシグナル音が発生する場合には締結力が低くなる傾向にあり、締め直す必要があることがわかった。作業範囲が狭いほど、締付けの繰返し回数が多くなり、上記の可能性が高くなることが予想される。

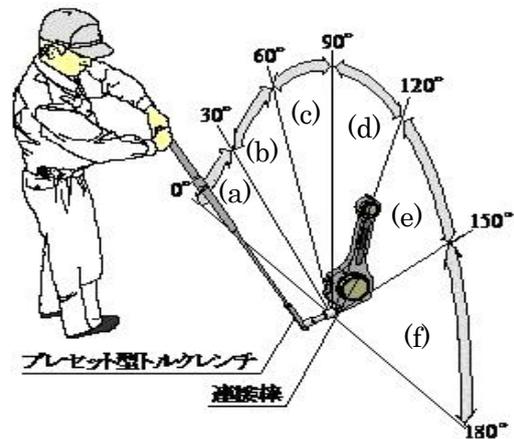


図8 作業姿勢と締付け範囲

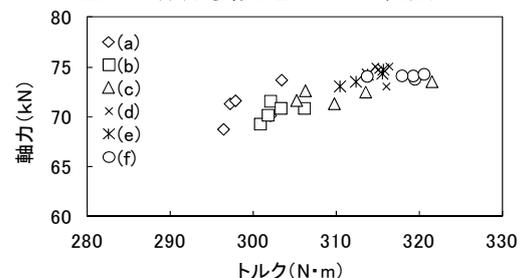


図9 作業姿勢が締め付けトルクに及ぼす影響

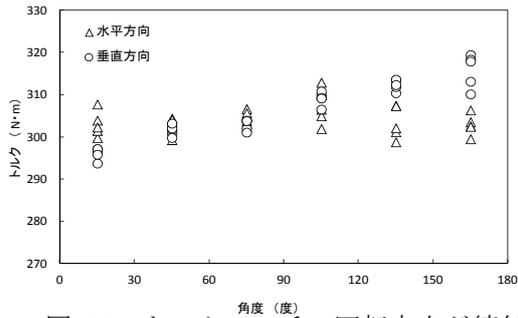


図 10 トルクレンチの回転方向が締付けトルクに及ぼす影響

図 9 に実験結果の一例を示す。作業姿勢が締付けトルクおよび締結力に及ぼす影響は非常に小さいことがわかる。締付けトルクは設定トルク比-1.2%から 7.2%の範囲にあり、トルクレンチの精度とほぼ同程度ではあるが、僅かに作業姿勢の影響を受けているようである。この原因を調べてみたところ、図 8 のようにトルクレンチを垂直方向に回転して締付けた場合は、シグナル式トルクレンチの構造上、シグナル発生時のトルクが重力の影響を受けて(a)~(f)で変化することが明らかになった。図 10 は実験装置の配置を変更して、トルクレンチを水平方向に回転して締付けた結果を上記と比較したものである。水平方向に締付けた場合には締結力が角度の影響を受けていないことがわかる。ただし、この重力の影響は極めて小さいものである。

#### ④合マークの有効性

合マークの有効性を検証した結果を図 11 に示す。基準とするトルクで締付けて合マークを施し、締付け不足の状態から合マークまで締付けた場合と締付け過多の状態から合マークまで緩めた場合の軸力を計測した。ボルトを合いマークに合わせた場合、角度は基準点に対して $\pm 2^\circ$ 、軸力は基準点の $\pm 4\%$ 以内にほぼ収まっており、ばらつきは充分小さい。締付けた場合と緩めた場合で、軸力に僅かに差が生じているが、この原因については現在調査中である。本実証実験の結果から、現場で行われているボルトの合マークを確認する作業は、ボルトの異常を発見する方法として極めて有効であると考えられる。

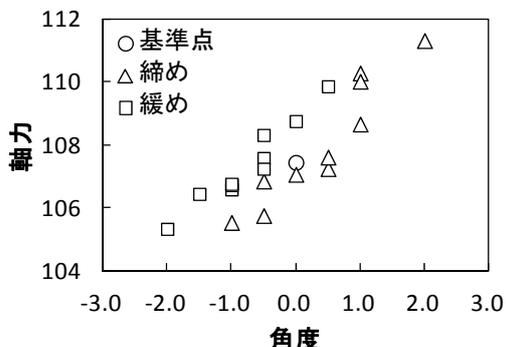


図 11 合マークを用いた場合の締結力

### (3) むすび

本研究では、船舶運航各社に対して分解整備作業におけるボルト締付け時の状況や意識についてアンケート調査を行い、さらにアンケート調査に基づいて各種締付け条件がトルクと軸力に及ぼす影響を実験的に明らかにするために、潤滑剤の種類やボルト締付け時の作業姿勢が締結力に与える影響および合マークの有効性に関する実証実験を行った。

アンケートの結果を見ると、潤滑剤の選定では燃料噴射弁やクランクピンボルトのようにトルク締めが指定されている場合でも締付けトルクを強く意識して選定するという意見と開放時の焼付防止を重視して焼付防止剤を選定するという意見にわかれた。また、作業性に関しても開放・点検後の締付け作業も合マークがずれていた場合に、合マークを重視して締め直すという意見とトルクレンチのトルクを正として合マークのずれは気にしないという意見に大きく別れた。このように、同じ対象・事象であるにもかかわらず機関士の見解や対応が大きく異なる点は注目すべきである。

実証実験では、潤滑剤の種類により締結力が大きく左右され、潤滑剤の指定がある場合はそれを守ることの重要性が改めて確認された。また、作業姿勢が締結力に及ぼす影響が極めて小さいながらもみられること、合マークがずれた場合にはこれを一致させることで軸力のばらつきを小さくできること等がわかった。

上述の機関士の見解や対応の違いは、結果としてボルトの締めすぎによる損傷や、逆にボルトの締結不足から緩みを招くことになるので、さらに実証実験を拡張継続してその結果に基づく統一したガイダンスを作成していきたい。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

① 井川博雅, 三輪誠, 木村隆一, The Questionnaire Survey about the Bolt Tightening Management in Ship Machinery Maintenance, ISME KOBE 2011, 2011 年 10 月 19 日, 神戸

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

井川博雅 (IKAWA Hiromasa)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号: 20184377

#### (2) 研究分担者

木村隆一 (KIMURA Ryuichi)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号: 20093544