蒸気タービン主機関の熱的挙動調査*

田 中 要** 小 林 正 則**
古 川 和 則** 本 田 幹 雄**
宮 井 修 二** 羽 根 田 誠**

Investigation of Thermal Behavior of Main Steam Turbine Engine

By Kaname Tanaka, Masanori Kobayashi, Kazunori Furukawa, Mikio Honda, Shuuji Miyai and Makoto Haneda

In June 1998, two of our vessels were increasing speed during the maneuvering speed range following departure from port, when an unusual vibration occurred in the high pressure turbine resulting in the deformation of the rotor. It is generally accepted that a sufficient warming-up period for the main steam turbine engine in the start and speed up phases will help to avoid any unusual vibrations. However, turbine manufacturers have not issued any specific guidelines for warming-up procedures or completion of the warming-up operation. The main turbine engines currently installed on board vessels put in service have no devices to monitor turbine casing temperature or expansion to help indicate when sufficient warm-up has taken place.

This investigation had the objective of establishing more precise guidelines for the warming-up of main steam turbine engines, in order to prevent vibration-induced damage when sailing out from ports. The results of this investigation are based on data gathered from simple thermometers and expansion measuring devices installed on turbine casings, which measured the thermal changes in high pressure turbines as propulsion engines were used in port departure.

1. はじめに

当社では1998年のほぼ同時期に2隻の当社関連タービン船で出港時マニウリング領域での増速の際、主機高圧タービンの振動事故が発生し、ローター曲損修理を行わざるを得ない運航阻害を経験した。蒸気タービン主機関の起動・増速に当たっては、このような振動発生を防ぐため十分な暖機が必要と一般に言われるが、この暖機の方法や完了判断はメーカー側から明確に示されていない。現在就航中のタービン主機で

は車室の温度や伸びのモニター装置もなく、起動前に主機を十分暖める設備もない状況で、暖機完了の判断は運用者の経験に委ねられており暖機の明確な指標は全くないと言え、振動発生の危険性が常に存在する状況にある。このような振動発生リスクを少しでも軽減するために本船上で可能な策として、ボイラ蒸気を主復水器にダンプさせボイラ負荷を上げる事により蒸気温度を高めるという不経済な方法か、或いは、苦肉の策としてリスクの大きい手動スピニングの実施しかなく、このような選択を強いられているのが実情である。

本調査では外航商船として一般的な主蒸気条件 5.7MPa～5.9MPa、510℃～520℃及び主機出力 17,140kW～29,420kWの蒸気タービン船4船の主機高

*原稿受付 平成13年11月1日

**正 会 員 株式会社商船三井(港区虎ノ門2-1-1)

圧タービンに簡易な車室温度計や伸び計を設置し、延べ80回の出港時の高压タービンの熱的挙動を把握することにより具体的な蒸気タービン主機関暖機運転指針を策定したのでその結果について報告する。

尚、本文での「暖機」とは、ターニングしながら暖機蒸気によって各部を暖めるという従来の意味だけでなく、出港前においては、主機に主蒸気を入れ、主軸を前後進側交互に3～5rpm相当で回転させながらタービン各部を暖めること（スピンギング）を言い、出港後においては、主機を使用しながらタービン各部を暖めることまでを含む。また、「冷機」とは主機を機関室温度まで下げる様なプラントダウン操作ではなく、蒸気弁閉鎖後、主復水器真空を維持したまま主機から放熱させるとともに、主軸ターニングを行いローターを均一に冷却させる作業を言う。

2. 計測装置

図1 L号計測装置概要

図1にL号が入渠中に追設した計測装置概要を示す。車室温度は温度センサーを第1段付近の車室上部と水平フランジ部に貼り付け、車室伸びは撓み脚の移動

量をギャップセンサーで計測した。尚、その他3船については就航中であつたため、L号と同じ計測装置は設置できなかったが、車室温度はL号の水平フランジ部温度とほぼ同様の第1段バルブ位置に相当する上部車室水平フランジ部表面にダイヤル式温度計などを設置して計測し、車室の伸びは撓み脚の移動量をダイヤルゲージで計測した。

3. 入港後の冷機

入港後主機蒸気元弁閉鎖時のターニング冷機開始から出港のための暖機開始（スピンギング開始）まで、主復水器の真空を維持しながらターニング中の主機高压タービン各部の温度及び車室伸縮量の低下を把握する目的で、I-36型（L号）、I-24型（N号）、I-40型（B号）及びP型（W丸）蒸気タービン主機関を搭載する4船で高压タービン各部の温度と車室伸縮量について複数回の冷機過程を計測しその実績平均値を算出した。その結果、次の事が判明した。

高压タービン車室表面温度は約19時間の停泊中に、主機蒸気元弁閉鎖時を起点として140～190℃低下し、暖機開始時にN号を除き、210℃程度になった。この時、高压タービン車室は2.6～3.7mm縮んでおり、縮み率はI-24型で0.14mm/h、I-36型、I-40型で0.18mm/hで略車室寸法比に依っていた。（車室長さ：I-24型—1,548mm、I-36型、I-40型—1,860mm）また、L号及びN号の計測結果では、暖機開始までの約19時間の間に車室表面温度の低下及び車室の収縮は一定値に止まることはなかった。尚、暖機弁（操縦弁をバイパスして少量（25A配管にφ3mmフィス挿入）の主蒸気をタービンに供給する弁）を使用したW丸の車室温度はL号と略同じ（210℃）であつたが、約19時間の温度下降率（7℃/h）は他船より小さかつた。この差は暖機弁使用の効果と考えられる。

4. 出港前の主機暖機過程

同上4船の出港前暖機開始（スピンギング開始）から主機使用開始迄の主機各部の温度及び高压タービン車室伸縮量の変化を把握するため、主機各部の温度と車室伸縮量を複数回の暖機過程で計測しその実績平均値を算出した。各船のスピンギング開始から主機使用開始迄の経過時間の平均、スピンギング開始

図2 L号・出港前暖機時計測例

時及び主機使用開始時の各部計測値とその差の平均値、更に、図2のL号出港前暖機時計測例に示すように、I型タービン主機においては、スピンギング開始後一旦車室温度が低下する現象が認められるので、車室温度が最低となる時の経過時間と各部計測値の平均値を表1～表4に示す。

4.1 L号(型式：I-36型，出力：23,540kW，主蒸気条件：5.7MPa 520℃) 表1にL号の出港前主機暖機過程の実績を示す。スピンギング開始後も車室温度は低下し、19分で先ず車室上部が最低温度(239→231℃)に至り、その20～30分後に水平フランジ部が最低温度(213→211℃)に至った。車室上部と水平フランジ部が最低温度を示す間、車室伸びも最低値(3.4mm)を示した。主蒸気温度はスピンギング開始後直ちに大きく上昇するが約20分後には上昇は緩やかになり、約45分後にはほぼ飽和した。車室上部と水平フランジ部では車室上部が早く暖まり、主機使用開始時にはスピンギング開始時より車室上部と水平フランジ部の温度差は大きく(26℃→49℃)なった。尚、本船の各計測結果において、車室の伸びがスピンギング開始時に3mm以上ある

場合(通常の出港時)、主機使用開始時にスピンギング開始時より僅かでも車室が伸びているのは430℃以上の主蒸気でスピンギングを行った場合であった。
スピンギング開始後、一旦車室温度が低下することは、I型タービンにおいては主機蒸気元弁と主機との間にある前進締切弁から高压タービン入口まで約8mの立上り配管があるが、この配管はスピンギング開始まで全く暖管できず室温程度まで冷えてしまっていることと、通常停泊状態ではこのL号の計測結果のようにスピンギング開始時、車室表面温度は大略200℃以上あることから、スピンギングする程度の蒸気量ではこの配管を暖管しつつ主機も加熱するには熱量不足で、この配管の暖管が終了するまではスピンギング蒸気は車室を加熱するに至らず、むしろ冷却に作用しているためと考えられる。

表1 L号出港前暖機過程実績

	経過時間	主蒸気温度	車室上部温度	水平フランジ部温度	車室温度差	車室伸び
スピンギング開始	0	322℃	239℃	213℃	26℃	3.4mm
車室上部温度最低	19min	390℃	231℃	214℃	17℃	3.4mm
水平フランジ部温度最低	43min	422℃	236℃	211℃	25℃	3.4mm
主機使用開始	92min	423℃	258℃	209℃	49℃	3.4mm
差	92min	102℃	19℃	-4℃	23℃	-0.02mm

表2 N号出港前暖機過程実績

		経過時間	主缶出口温度	主蒸気温度	車室温度	車室伸び
主缶バーナー操作変更前	スピンギング開始	0		283℃	153℃	
	車室温度最低	20～30min or abt.60min			146℃	-0.15mm
	主機使用開始	92min		428℃	158℃	
	差	92min		137℃	5℃	0.16mm
主缶バーナー操作変更後	スピンギング開始	0	467℃	317℃	224℃	
	車室温度最低	within 30min				-0.06mm
	主機使用開始	117min	476℃	457℃	310℃	
	差	117min	9℃	140℃	86℃	1.17mm

4.2 N号(I-24型, 17,140kW, 5.9MPa 510℃)

本船はデータ計測期間の途中主缶バーナ操作が変更され、その結果、タンク量が多くなり暖機効果に影響を及ぼす主蒸気温度が上昇した。従って、分析はバーナ操作変更以前／以降に分けて行った。表2にN号の出港前主機暖機過程の実績を示す。本船の各計測結果において、主蒸気温度430℃以下ではスピニングを行っても車室の昇温と伸びは殆どなかった。主缶バーナ操作変更以降は、タンク量が多くなり主缶負荷が上昇した結果、バーナ操作変更以前より主蒸気温度は30℃以上高く、且つ、長時間430℃以上の主蒸気を供給できた。これにより車室温度と伸びのスピニング開始後の落込みは少なくなり、且つ、短時間で回復し上昇に転じた。主缶バーナ操作変更以降の傾向として、主缶出口蒸気温度470～480℃でスピニング開始後30分程度で主蒸気温度は440℃以上に上昇し、最終的に主蒸気温度は450～460℃に上昇する。この間、車室は間断なく伸び続け、主機使用開始時にはスピニング開始時より約1mm伸ばすことができた。

4.3 B号(I-40型, 26,800kW, 5.7MPa 520℃)

表3にB号の出港前主機暖機過程の実績を示す。主蒸気温度430℃以下で車室の伸びは殆どなかった。

4.4 W丸(P型, 29,420kW, 5.9MPa 510℃)

表4にW丸の出港前主機暖機過程の実績を示す。スピニング(本船の場合、スピニングは手動ではなく自動)期間中の車室の昇温は殆どなかった(209→210℃)が、逆に下降もなく200℃以上を保った。また、本船の場合、出港前主缶準備の際のタンク量増加と暖機弁からの主蒸気供給によりスピニング開始時主蒸気温度が他船より高めで412℃あった。

4.5 出港前主機暖機過程のまとめ 通常停泊における主機蒸気元弁閉鎖後19時間前後からの主機暖機作業において、これら4船のような主蒸気条件、出力の蒸気タービンにおいては、400℃未満の主蒸気でスピニングを行っても車室の昇温、伸長は期待できず、むしろ冷却する場合もある。確実な昇温と伸長を期待するならば、430℃以上の主蒸気を長

表3 B号出港前暖機過程実績

	経過時間	主蒸気温度	車室伸び
スピニング開始	0min	327℃	
車室伸び最低	40min		-0.11mm
主機使用開始	100min	430℃	
差	100min	103℃	0.10mm

表4 W号出港前暖機過程実績

	経過時間	主蒸気温度	車室温度
スピニング開始	0	412℃	209℃
主機使用開始	39min	432℃	210℃
差	39min	20℃	2℃

時間供給する必要があると考えられる。暖機弁使用のW丸において、主機使用開始迄のオートスピニング(400℃以上の主蒸気供給)での40分前後の待機中、車室温度は低下することなく200℃以上に保たれた。L号の主機使用開始時の水平フランジ部温度が200℃以上であること、N号の主缶バーナ操作変更以降の主機使用開始時車室温度が約190℃であること、及び、W丸の状況を勘案し、更に各船の振動発生実績と5.に述べる主機使用開始後の車室温度上昇の仕方を勘案すると、主機使用開始前に水平フランジ部表面温度で200℃あることが望ましいと考えられ、これはスピニングでなくても暖機弁で到達可能である。

5. 主機使用開始後のマニパリング領域での過程

同上4船の主機使用開始後、マニパリング域での主機高圧タービン車室各部温度と伸びの変化状況を調査した。各船データにおいて、車室各部温度と伸びの変化は、先ず主機使用開始後の負荷上昇に伴い大きく変化し、その後、主蒸気温度が定常状態になると共に変化の仕方も緩やかになると想定されるので、車室温度上昇率と車室の伸び率の変化として、それぞれ次のように定義して整理した。

昇温率-1：3～5分毎計測値間の車室温度上昇率(°C/h)，昇温率-1'：略15分毎計測値間の車室温度上昇率(°C/h)，昇温率-2：主機使用開始を起点とした計測値までの車室平均温度上昇率(°C/h)，車室伸び量：主機使用開始時から計測値までの車室伸び量(mm)，伸び率-1：3～5分毎計測値間の車室伸び上昇率(mm/h)，伸び率-1'：略15分毎の計測値間の車室伸び上昇率(mm/h)，伸び率-2：主機使用開始を起点とした計測値までの車室平均伸び上昇率(mm/h)

計測グラフの一例を図3，4に示す。また，各船の車室各部の温度と車室伸びについて，上で定義したそれぞれの昇温率と伸び率が最大となる時の主機使用開始からの経過時間とその時の当該項目の値の分布及びその平均値を表5～10に示す。尚，N号については，出港前の主機暖機過程と同じく，本船主缶バーナ操作変更による蒸気ダンフ量の増加以前と以後に分けて解析した。

図3 N号計測グラフ例

図4 N号車室温度変化状況計測グラフ

5.1 L号(型式：I-36型，出力：23,540kW，主蒸気条件：5.7MPa 520°C) 表5にL号のマニハリング領域での計測結果を示す。車室上部温度の昇温率は水平フランジ部の昇温率に比べ大きかった。また，車室上部温度のそれぞれの昇温率は，主機使用開始後略40分以内に最大(昇温率-1,1',2=338,233,195°C/h)となるが，水平フランジ部温度の昇温率は，車室上部のそれぞれ10分～20分遅れて最大(1,1',2=118,87,63°C/h)となった。水平フランジ部温度の昇温率最大となる時の同部温度は，昇温率-1'最大時：246°C，昇温率-2最大時：260°Cであった。車室の温度差は主機使用開始後40分前後に最大となり，その温度差は119～146°C(平均126°C)であった。車室伸び率最大(伸び率-1,1',2=2.9,1.9,1.76mm/h)時の冷態時からの車室伸び値は約4mmであった。

5.2 N号(I-24型，17,140kW，5.9MPa 510°C) 表6，7にN号のマニハリング領域での計測結果を示す。車室昇温率及び車室伸び率は，主缶バーナ操作変更による蒸気ダンフ量増加以降，それぞれの最大値が変更以前に比べ小さく(昇温率-1,2=224,159→165,130°C/h，伸び率-1',2=2.79,2.30→1.64,1.50mm/h)なり，その発生時間も若干早くなった。

車室昇温率が最大を示す時の車室温度は，平均値では主缶バーナ操作変更による蒸気ダンフ量増加以前/以降で変化ない(昇温率-1,2最大時車室温度：246,284°C→248,284°C)が，温度の分布範囲は小さくなった。車室伸び率が最大を示す時の車室伸び量は，主缶バーナ操作変更による蒸気ダンフ量増加以降は増加以前に比べ小さく(伸び率-1',2最大時：1.05,0.97mm→0.56,0.64mm)なった。

表8に示す通り，データ計測期間中，マニハリング領域での増速過程で振動が発生した例があった。振動発生原因を特定することは困難であるが，この振動発生時には，振動発生時間を挟む15分間の昇温率-1'及び伸び率-1'がそれぞれ280°C/h，3.36mm/hと主缶バーナ操作変更による蒸気ダンフ量増加以前のデータの中でも相当大きく，タービン各部が均一に暖まる前に短時間に急激な温度上昇を来す増速を行ったため，車室及びローターに不同膨張を生じ，熱歪みによる不釣合い発生のため振動に至ったと推測される。

表5 L号主機使用開始後のマニパリング領域での計測結果

経過時間(平均)	車室上部温度(平均)	昇温率-1最大(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
12~33(21)min	278~358℃(320℃)	280~500(338)℃/h		
21~31(29)	335~363(348)		208~264(233)℃/h	
18~36(27)	322~361(342)			163~223(195)℃/h
経過時間(平均)	水平フランジ部温度(平均)	昇温率-1最大(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
21~45(31)min	194~250℃(233℃)	100~140(118)℃/h		
30~45(41)	211~264(246)		76~108(87)℃/h	
40~75(52)	229~276(260)			56~81(63)℃/h
経過時間(平均)	車室温度差(平均)	昇温率-1最大(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
33~60(42)min	119~146℃(126℃)	—	—	—
経過時間(平均)	車室伸び(平均)	伸び率-1最大(平均)	伸び率-1' 最大(平均)	伸び率-2最大(平均)
3~25(16)min	0.1~0.9mm(0.43mm)	2.0~4.0(2.9)mm/h		
15~45(27)	0.4~1.1(0.71)		1.6~2.4(1.9)mm/h	
3~87(30)	0.1~2.1(0.81)			1.45~2.14(1.76)mm/h

表6 N号主機使用開始後のマニパリング領域での計測結果(主缶バナー操作変更前)

経過時間(平均)	車室温度(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
11~54(32)min	200~320(246)℃	172~312(224)℃/h	
11~84(46)	210~365(284)℃		105~200(159)℃/h
経過時間(平均)	車室伸び(平均)	伸び率-1' 最大(平均)	伸び率-2最大(平均)
11~54(27)min	0.59~2.0(1.05)mm	1.91~3.60(2.79)mm/h	
2~54(24)	0.12~2.0(0.97)mm		1.37~3.60(2.30)mm/h

表7 N号主機使用開始後のマニパリング領域での計測結果(主缶バナー操作変更後)

経過時間(平均)	車室温度(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
17~32(27)	208~272(248)℃	104~214(165)℃/h	
17~61(42)	208~330(284)℃		85~168(130)℃/h
経過時間(平均)	車室伸び(平均)	伸び率-1' 最大(平均)	伸び率-2最大(平均)
6~31(17)	0.23~0.86(0.56)mm	0.92~2.04(1.64)mm/h	
4~45(22)	0.19~1.54(0.64)mm		1.10~2.25(1.50)mm/h

表8 N号出港時のマニパリング領域での振動発生時の計測結果(主缶バナー操作変更前)

経過時間	車室温度	昇温率-1'	昇温率-2	車室伸び	伸び率-1'	伸び率-2	運転オーダー
17min	190℃	160℃/h	47℃/h	0.55mm	2.20mm/h	0.80mm/h	Full AHEAD
22(Vibration)							50rpm
32	260℃	280℃/h	94℃/h	1.39mm	3.36mm/h	1.31mm/h	Half AHEAD
47	290℃	120℃/h	98℃/h	1.80mm	1.64mm/h	1.37mm/h	Full AHEAD
84	365℃	129℃/h	105℃/h	2.60mm	1.29mm/h	1.35mm/h	63rpm

表9 B号主機使用開始後のマニパリング領域での計測結果

経過時間(平均)	車室伸び(平均)	伸び率-1' 最大(平均)	伸び率-2最大(平均)
15~20(18)min	0.88~1.12(1.00)mm	3.34~3.52(3.43)mm/h	
14~15(15)	0.87~0.88(0.88)mm		3.52~3.76(3.64)mm/h

表10 W丸主機使用開始後のマニパリング領域での計測結果

経過時間(平均)	車室温度(平均)	昇温率-1' 最大(平均)	昇温率-2最大(平均)
26~31(29)min	285~305(295)°C	254~280(267)°C/h	
26~44(35)	305~330(318)°C		157~200(179)°C/h

5.3 B号(I-40型, 26,800kW, 5.7MPa 520°C)
表9にB号のマニパリング領域での計測結果を示す。車室伸び率の最大値(伸び率-1', 2=3.43, 3.64mm/h)は上の2船に比べ大きく、その発生時間も早かった。伸び率最大を示す時の車室伸び量平均値は1mm程度で、N号のボイラ操作変更以前の同伸び量平均値より僅かに小さかった。

5.4 W丸(P型, 29,420kW, 5.9MPa 510°C)
表10にW丸のマニパリング領域での計測結果を示す。車室昇温率の最大値は他船に比べ大きめ(昇温率-1', 2=267, 179°C/h)であった。

5.5 主機使用開始後のマニパリング領域での過程のまとめ
主機使用開始後水平フランジ部の温度変化が落ち着く(昇温率-2が最大となった以降)までの約50分間は、車室温度や伸びの変化が大きく、特に主機使用開始後約40分迄は車室上部と水平フランジ部の温度差は拡大の過程にあつて、この段階では車室は未だ各部が均一に暖まっていないと考えられる。この後、車室温度や伸びの平均上昇率(昇温率-2や伸び率-2)はある時点で最大となり、以降は負荷変動があつても平均上昇率は増加することなく緩やかに減少する。換言すれば、平均上昇率が最大になる時点以降は車室温度や伸びの上昇線の上昇勾配が緩やかになり、ほぼ出力の増加傾向に従って上昇するようになる。これら上昇率の中、最も遅く最大となる水平フランジ部昇温率-2の最大(これ以降、水平フランジ部温度の上昇線の上昇勾配も緩やかに、ほぼ出力の増加傾向に従って上昇するようになる。)

をもって各部がほぼ均一に暖まった、即ち、車室各部が一様に出力に見合った膨張傾向となったことを示し、暖機完了の目安と見做せると考えられる。

図5, 6はL号の水平フランジ部温度とN号の車室温度及びそれぞれの昇温率-2のデータをグラフにし、それぞれの昇温率-2最大の平均値と、その時の対応する温度と主機使用開始後の経過時間の平均値を示したものである。N号の計測結果で記した通り、N号の車室温度昇温率-2が最大となる時の車室温度は、主機使用開始時の車室温度に差があり車室温度昇温率-2が最大となる時間に差があつても平均的には284°Cと同じであった。これは、主機使用開始前の暖機状態に関わらず、ある一定の車室温度となれば暖機完了と見做せることを示す。また、N号の車室温度計測位置、計測装置とL号水平フランジ部温度計測位置、計測装置は全く同じではないが、相似車室形状の近い計測位置で蒸気条件や車室材質もほぼ同様であるので、傾向は同じと考えられ、且つ、計測温度の絶対値の差は誤差の範囲と考えられるので、今後既存就航船に車室温度計測装置を追設する場合のベース仕様となるL号水平フランジ部の同温度(260°C)を暖機完了の目安としても実用上問題ないと考えられる。

N号の缶缶バーナー操作変更による蒸気タンク量増加以前/以降のデータ比較でわかるように、主機使用開始前に車室温度(水平フランジ部)を約200°Cとし、出港前の暖機開始時より約1mm車室を伸ばすことができれば、主機使用開始後の車室温度や伸びの変化を小さく抑えることができ、且つ、暖機完了の目安時点で早く到達できる。

図5 L号主機水平フランジ部温度

図6 N号主機車室温度

振動発生時のデータが少ないため、見極めは困難であるが、N号の振動発生時の車室昇温率や伸び率は同船の平均レベルより高レベルにあり、車室昇温率や伸び率、あるいは車室温度差にはマニリング域において振動を発生し得るある制限値が存在すると思われる。

6. まとめ

現状における暖機はケラント蒸気の余熱を利用しているのみで充分ではなく、むしろ出港準備段階になっても車室は温度低下により収縮している。その結果、暖機は出港後の機関使用によりはじめてなされることになる。

ここに紹介したデータは、温度計測位置や計測装置が各船全く同一というわけではなく、振動発生時のデータ数も多くないので、制限すべき車室温度上昇率などの普遍化が今後の課題となるが、各船の熱的傾向には相関関係が見出され、この解析のまとめとして、今回計測対象とした主蒸気条件と主機出力レンジの蒸気タービン主機関に対し、以下の暖機指針を策定した。

- ①暖機弁を設置し使用する事で、主機使用開始前に1段付近車室水平フランジ部表面温度200℃及び主蒸気温度（前進締切弁入口蒸気温度）430℃を目標に昇温する。
- ②①の達成は蒸気タンクにより主缶負荷（蒸気温度）を上げ、暖機弁によるターニング中の車室温度維持と主機試運転後のウォarmingにより行う。
- ③出港後のマニパリング域での運転は、1段付近水平フランジ部表面温度260℃を暖機完了の目安とし、主機使用開始時の同部温度200℃を起点とした場合、約50分後に同温度260℃となる増速を標準とする。
- ④主機使用開始後40分間は特に注意を要し、③を超える昇温となる場合には、N号の振動発生時の実績から同部温度上昇率70℃/15分（280℃/h）とL号の実績から1段付近車室上部表面温度と同部の温度差146℃未満を増速制限の目安とし、振動値が上昇傾向にあったり、機側で振動が体感されるような場合は増速を止めるか、あるいは一時減速する。

7. 最後に

現状の蒸気タービン主機関は船用と言えど出港後の主機使用までは単に予熱に過ぎず、主機使用よりはじめて暖機状態におかれ、その際、主機負荷がマニパリング域内であっても熱的挙動の大きさによっては振動を誘起し主機を損傷させる可能性が潜在していることが今回の調査で明らかとなった。また、この調査によって当社運航船で発生したタービンローター曲損事故の原因を説明するに十分な根拠が得られ、ユーザーの視点から暖機の指標を提起することができたと考える。冒頭述べた通り暖機の方法や要領はメーカーにおいて確立されないまま、ユーザーのリスクと経験に基づく判断に委ねられ、出港後は船舶の輻輳する海域において主機の運用と本船の操船に多大な緊張を強いられている現状である。今回、本来メーカーから示されるべき暖機指針を、ユーザー自ら装置を追設し熱的挙動の解明を図ったが、蒸気タービン主機関を安全に運転するためにはL号に追設したような計測装置は必須であり、更に、入港後の主機蒸気元弁閉鎖後から暖機弁による暖機を行うことが妥当と判断しており、仕様を定め標準装備されるべきである。

終わりに、本調査に協力頂いた乗組員諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本造船協会誌, 「船用タービン主機の起動および冷機操作標準」, 第398号, (昭37-11).
- 2) 高尾ほか4名, 日立造船技報, 「蒸気タービン車室およびローターの非定常温度分布と熱応力の解析」第35巻・第3号, (昭49-9).