HIP法による二層シリンダライナの開発*

田 山 経二郎** 河 波 静 男***
小 野 茂 視**** 後 藤 敬 造****

Development of Two Layer Cylinder Liner by HIP Method

By Keijiro Tayama, Shizuo Kawanami, Shigemi Ono, Keizo Gotoh

Increasing demand for higher output and better fuel efficiency forces maximum combustion pressure of the engine higher and higher, requesting the same or even more reliability to the engine.

At present mono block castiron cylinder liners are widely used for marine slow speed diesel engines simply because of their tribological superior characteristics.

This paper introduces a solution of double layer cylinder liner by HIP(Hot Isostatic Pressing) method. This liner consists of two different materials. Inside material is tribologically superior material, in this case castiron. On the other hand outside material is strong material. Inside and outside material are fixed together using HIP method. The successful test results using test engine and production engine were also explained here.

1. ま え が き

大形外航船に使用される船舶用主機関の約80%は、現在2ストローク低速クロスヘッド機関が採用されている。本機関に使用されているシリンダライナは古くから鋳鉄で一体に鋳造されている。しかしながら、時代の要求はより高出力、高信頼性の船用機関を求めており、従来の概念のシリンダライナでは対応が困難になりつつある。そこで、筆者らは最新の製造技術を用いて、今後開発を予測される新しい船用機関にも適用可能なライナの開発を試みた。

2. 高強度ライナの必要性

2.1 機関性能面からの必要性 機関の出

力は当然のことながら年々増大傾向にある。同じ大きさの機関でより高出力を出すことは、相対的に機関のコストを下げることになり、この傾向は今後も止むことはないであろう。一方、最近の省エネルギーに対するニーズは極めて強いものがあり、機関メーカーとしては馬力増大の努力と共に、合わせて燃料消費率も改善する努力を強いられている。

これらの要求を満たすためには、筒内最高圧力を増すことが最も有効であり、年々筒内最高圧力は増大傾向にある。図1に三菱UE機関の出力の推移、図2に筒内最高圧力の推移を示した。

筒内最高圧力の上昇は、当然機関の燃焼室構成部材の強度に直接関係してくることになる。特にシリンダライナの場合には、ピストンリングとの摺動特性に優れているが、強度的には弱い材料である鋳鉄材が使用されるのが通常であり、筒内最高圧力の上昇には限度がある。

従来、筒内圧力の上昇にはシリンダライナの肉厚の増大で対処していたが、これは機関全体の大形化につながり、薄肉の高強度ライナの出現が強く待た

*原稿受付 平成5年1月4日

**正会員 三菱重工業㈱神戸造船所
(神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)

***正会員 三菱重工業㈱長崎研究所

****正会員 三菱重工業㈱横浜製作所

図1 出力、熱効率の推移

図2 最高圧力の推移

れていた。

これらのニーズに応えるには、内面は摺動特性に優れている鋳鉄材もしくは潤滑性の良い他の部材、外周部は強度的に優れている強度部材と機能を分担させるのが望ましく、各種の二層ライナが試みられてきた。三菱においては過去に、内面は鋳鉄材、外周部は鋳鋼材の二層遠心鋳造ライナが開発され、その結果は既に発表されている。

2.2 機関信頼性面からの必要性 先に述べたごとく、現在シリンダライナ材としては摺動特性の優れている鋳鉄材が一般的に使用されている。しかしながら、船舶乗組員の数の減少や質の低下が進み、実質的に船舶乗組員の手によるピストンリングの交換工事等の重作業が困難になってきている。このことにより、船をある程度長期間停め、エンジンの保守作業が可能なドックまでの期間、確実に運転を継続出来る信頼性の優れた船用期間が望まれるようになってきた。通常ドック期間は2年ないしは4年であるので、現在の船用機関は運転時間にして約15,000～30,000hの間安定して運転を継続出来る信頼性を求められていると言える。

現在の鋳鉄材のシリンダライナでもほぼ上記の目的は達成されているものの、今後、機関の出力が更に増大したときに、より一層の信頼性を今迄よりも少ない注油率で達成するためには、新しいライナ材（摺動部材）の開発が不可欠であると言える。

前項で述べた如く、強度的に鋳鉄材の一体構造ではすでに限界に来ており、機能を分離した二層ライナの内層材として新たな材料を開発するのが技術的解決の近道と考えられた。

3. 基礎試験結果

HIP法による高強度二層ライナの開発に必要な基礎試験を行い以下の結果を得た。

3.1 高強度外層材の選定 高強度外層材の候補として、SCPH21及びSCPH22を選定し、HIP時の熱サイクルによる強度低下度を確認するため、軟化熱処理試験を行い、そのミクロ組織観察、硬さ計測及び引張強度試験を実施した。又、内層材のターカロイ鋳鉄（FC300相当材）についても同様の試験を行い、画像処理による組織の定量化などを行った。

熱サイクルによる組織変化の一例を図3に示す。800℃以上の加熱材は、素材の焼戻しマルテンサイト組織に対し、フェライト＋パーライトの混合組織となり、温度上昇につれて結晶粒の粗大化がみられ若干の強度低下が予測される。

次に、外層候補材の熱処理前後の引張試験結果を図4に示す。熱処理によって、強度は若干低下するものの、いずれの条件下でも引張強さは目標値の50 kgf/mm²以上であることが確認された。

なお、図4には参考までに内層材（ターカロイ鋳鉄）の引張試験結果を併記した。

以上の試験結果から、今回の実機ライナの外層材としてはSCPH21を選定した。しかし、引張強さ50 kgf/mm²以上であればSCPH材に限らず、SC材や炭素鋼管などの採用も十分考えられる。

3.2 HIP処理後の内層材の摺動特性 HIP処理時の熱サイクルの摺動特性に及ぼす影響について、組織変化の面から検討した。

内層材（ターカロイ鋳鉄）は基本的には図5に示すようにパーライト基地に片状黒鉛（グラファイト）とステダイト炭化物（Fe₃P+Fe₃C共晶炭化物）が分散した組織である。

図3 SCPH21の熱処理前後のミクロ組織

この組織を画像処理法により、各熱処理条件でのグラファイト量、ステダイト炭化物及びパーライト量の面積比率を求めた。その結果を表1に示す。実機シリンダライナの場合、グラファイトは、自己潤滑性を向上させ、ステダイト炭化物は耐摩耗性に寄与すると考えられる。受け入れ素材に対して各熱処理条件での処理材のグラファイト及びステダイト炭化物の面積比率は、やや異なるものの、大きな組織

図4 HIP処理前後の母材強度特性

図5 ターカロイ鋳鉄のミクロ組織

変化は認められない。

したがって、摩耗試験による最終確認は必要と思われるが、組織面から判断して、HIP処理後の内層材の耐摩耗性及び摺動性は現用ライナ材と大差ないものと思われる。

3.3 接合条件と接合強度 HIP処理による接合条件としては図6に示すように、①加圧力、②接合温度、③接合時間が最も重要である。このうち、加圧力を一定 (1000kgf/mm²) とし、②、③について最適条件を求めることとした。試験材の形状は図7に示すように、二重円筒状試験材の内層材側にキャニング容器を配し、シール溶接後、脱気処理して、図6に示す種々の条件下でHIP処理を行い引張試験片を採取し、継手引張試験を行った。その結果を図8に示す。図から明らかなように、接合強度は接合温度900°C近傍で最大値を示した。接合時間の影響は、実用ベースの1～3Hrの範囲では明らかな差は認められなかった。なお、破断位置は全てターカロイ鋳鉄母材であった。次に、900°C×1Hの条件でHIP接合した二重円筒継手 (図7参照)

表1 HIP処理後のターカロイ鋳鉄の組織分析結果

		実用条件				
		受入れ材	8 0 0 ℃×1 H→F.C.	9 0 0 ℃×1 H→F.C.	1 0 0 0 ℃×1 H→F.C.	
耐焼付性	→	グラファイト	6.6%	5.5%	5.3%	6.1%
耐摩耗性	→	ステナイト 炭化物	7.4%	6.7%	6.7%	6.0%
		パーライト	残	残	残	残

図6 HIP処理による接合条件

図7 HIP接合試験片の形状・寸法

図8 HIP処理による接合継手の引張試験結果

の断面マクロ、ミクロ組織の代表例を図9、図10に、各種接合温度における断面の硬さ分布の代表例を図11に示した。

接合温度1000℃では接合部近傍のSCPH側への拡散層の幅と最高硬さの増加が見られ、また、800℃では接合境界の拡散が不十分で、接合状況にバラツキが生じやすいことが明らかとなった。

したがって、接合温度としては900℃、接合時間1～2 Hrが最も良好と判断した。

図9 HIP処理による二重円筒継手の断面マクロ組織

図10 SCPH21/ターカロイ鋳鉄接合部の断面ミクロ組織の代表例
〔接合条件：900℃×1 Hr, 1000kgf/cm²〕

図11 継手断面の硬さ分布

4. 二層ライナの強度

当社のUE機関のうち、一例としてUEC37L型(ボア径：370mm) ライナについて(1)ガス圧応力、(2)熱

応力、(3)寿命評価について強度解析を行った。

4.1 二層ライナの強度概念 二層ライナの基本的考え方は以下の通りである。内層材は摺動性の点から従来通り鋳鉄を用い、摩耗しろだけの薄肉構造とし強度部材とは考えない。ライナに於けるガス圧は外層材にヤング率の大きい鋼材を用いて保持する構造とする。

今、ここでガス圧を P 、ライナ内径(ボア径)を D として従来の一体型ライナの厚さを t_1 、ヤング率を E_1 、内径応力を σ_{tg1} 、二層ライナの外層材の厚さを t_2 、ヤング率を E_2 、内径応力を σ_{tg2} 、ライナ内面のひずみ ε を同一とおくと、

$$\sigma_{tg1} = \varepsilon E_1 = (PD) / (2t_1) \quad (\text{鋳鉄一体型})$$

$$\sigma_{tg2} = \varepsilon E_2 = (PD) / (2t_2)$$

(二層ライナ外層)

内圧応力を等しいとおくと、 $\sigma_{tg1} = \sigma_{tg2}$

$$\varepsilon = [1 / (2t_1 E_1)] \approx [1 / (2t_2 E_2)]$$

図12 ガス圧応力解析結果

二層ライナの外層に鋼材を用いると、 $E_2=20000$ kgf/mm²（鋳鉄は $E_1=10000$ kgf/mm²）となり、

$$E_2 \doteq 2 E_1$$

以上から

$$2t, E_1 \triangleq 2t, (2E_1)$$

$$\therefore t_2 \doteq 1/2 t_1$$

すなわち、二層ライナの外層厚さ t_2 は、鑄鉄一体型の約半分で済む事となる。

4.2 ガス圧応力

UEC37Lのガス圧応力の解析結果は図12に示す。ライナ内面応力を3.6 kgf/mm²に合わせた時の厚さ比較結果は一体型鋳鉄75.5 mm→二層ライナ43mmとなり、二層ライナでは約半分で良い事となる。

4.3 熱応力 二層ライナの厚さ方向の温度差による熱応力の計算モデルと解析結果の概要を図13に示す。この解析結果から、最大温度差の接合部近傍の熱応力は圧縮応力となり、問題ない事がわかる。

る。二層ライナでは、薄肉化が図れるので、従来の厚肉に伴うボア・クール等の特殊な冷却を必要とせず、直接冷却も可能で、切欠穴を有さない点で、疲労強度上有効と言える。

熱応力 σ_{th} は以下の式で表され、基本的に内外面の温度差 ΔT に比例した形をとる。

$$\sigma_{th} = \{ [E \alpha \Delta T] / (2 (1 - \nu)) \} \dots \dots (6)$$

ここで, E ; ヤング率, ν ; ボア径, α ; 熱膨張係数

4.4 疲労寿命 ライナのガス圧応力を縦軸に、熱応力を横軸に取り、ガス圧応力と熱応力との重畳疲労を考慮した解析結果を図14に示す。

ディーゼル機関使用寿命は船齢を30年，毎日発停したとして総寿命は $N = 365 \text{ 日/年} \times 30 \text{ 年} = 10^4$ (cycle) 程度と考えられる。

UEC37L型用二層ライナの重畳疲労寿命解析結果は内・外層共に十分 10^4 cycle内にあり，問題ない

圖13 熱応力解析結果

図14 低サイクル疲労寿命解析結果

(1) 現用ライナー

(2) 2層ライナー

図15 NC45実験機関のライナー外観の比較

図16 ライナの形状比較

表 2 実機試験条件

(1) 機関仕様

項 目	仕 様	備 考
シリンダライナ	HIP 2層ライナ	電子油圧制御式
掃気ポート	Cポート (ポートピース型)	
FO系, EX系駆動	EFECS	
燃料弁	C51 (0.75×4)	
ピストン	NC45標準	
シリンダカバー	NC45標準	

(2) 運転条件

項 目	
負荷設定	LA相当
使用燃料	A 重油
シリンダ油	T204
冷却水温	T=80° (カバー出口)

(3) 負荷設定

LOAD	25	50	75	100
Ne (rpm)	99.5	125.4	143.6	158
Le (PS)	274	595	921	1249
Pme (kg/cm²)	5.55	9.58	12.96	15.97

5. 実機試験結果

5.1 NC45実験機関 HIP処理による接合条件は900℃×2 Hrとし、内径450mm、肉厚55mm、長さ1265mmの実機二層ライナを試作し、実機運転試験を行った。なお、接合部の品質については、超音波探傷検査ならびに、実機切出し材による切断調査及び引張試験を実施し、良好な品質であることを確認した。

現用ライナと二層ライナの外觀状況を図15に示す。現用ライナに比べ、ライナ厚さの薄肉化により軽量、コンパクトになっているのがわかる。現用ライナと二層ライナの形状比較を図16に示し、実機試験条件を表2に示す。実機運転中は①変動応力、②ライナ温度の計測を行った。100%負荷における応力は約4 kgf/mm²であり、強度的に問題ないことが確認された。一方、ライナ温度はライナ内外面の温度差で100℃と当初の計画値とほぼ合致した。

摺動面温度も適正値を維持しており、運転試験は順調に行われた。この二層ライナは、その後もNC45機関に取付けられたままで、燃焼試験など種々の実験に使用されているが問題なく稼動している。

5.2 UEC33LS II 形機関 単筒実験機での試験結果、ほぼ実用の見通しを得たので、引き続

き実用機を使った試験を実施した。試験は、最新型のUEC33LS II 形機関を用いて行った。

表3に同機関の要目、図17には試験に用いた分割形二層シリンダライナの断面図を示した。本試験においては本ライナの実用上の問題点となる製造コストを考慮して、HIP加工による二層部分は、強度、潤滑両面より本当に必要とするライナ上部のみとした。

本試験は現在温度、応力の計測が終了し、引き継ぎ連続耐久試験に入っている。温度、応力に関しては、ほぼ計測による予測どおりの結果を示している。

表3 UEC33LS II 形機関諸元

名 称	UEC33LS II
シ リ ン ダ 径	330mm
工 程	1,050mm
出 力 P1点	733PS/cyl (539kW/cyl)
機 関 回 転 数 P1点	210rpm
正味平均有効圧力	17.49kgf/cm ² (17.15bar)
平均ピストン速度	7.35m/s

図17 UEC33LS II 形機関HIPライナ

図18 HIPによるシリンダライナ温度推定結果 (FEM解析による)

現在試験結果の詳細を取りまとめ中で、ここではシミュレーション結果を図18に示すに止める。

6. む す び

筆者らは、HIP法による二層ライナの開発を試み、基礎試験に続く単筒試験機、さらにUEC33LS

Ⅱ形機関による試験を通じ、本ライナを実用レベルまで持ち込むことに成功した。本手法によるライナは、HIP装置の寸法上の制約や製作コストなどまだ今後の課題は多いが、将来機種の一つの可能性として、引き続き本格的な実用化をめざして努力したい。