

腐食材の静的強度とクリギング手法による板厚評価

環境・エネルギー研究領域 * 田中 義照、小林 佑規
海上安全研究領域 後藤 英信

1. はじめに

船舶は、経年とともに船体構造部材の腐食衰耗が進行し、構造強度の低下をもたらす。経年船において、腐食衰耗が構造強度に及ぼす影響を検討するためには、まず、腐食衰耗材の材料強度特性を知る必要がある。そこで、実船から採取した腐食衰耗材(片面腐食材)の引張試験片を製作し、静的引張強度特性を検討した。

また、経年劣化構造の強度変化を精度良く推定するためには、腐食衰耗材の板厚分布(表面凹凸)を把握しておく必要がある。そこで、地球統計学において用いられることの多い、空間予測手法であるクリギング(kriging)を用いて、上記腐食衰耗材を対象とした全面腐食材の板厚評価を試みた。

2. 実船腐食材の静的強度

2.1 供試材および試験片

供試材は、A船(船齢25年)およびB船(船齢21年)の船体から採取した軟鋼材である。両船とも原油タンカーであり、全長および載荷重量は、それぞれ、A船が177m、2万トン、B船が238m、8万トンである。A船の上甲板および船底板から採取した板材を、それぞれ、SD2およびSF1(板厚約16mm)、B船の上甲板から採取した板材をST4(板厚約7.5mm)とする。

これらの供試材から、板の片面を機械切削した片面腐食試験片を製作した。試験片の形状および

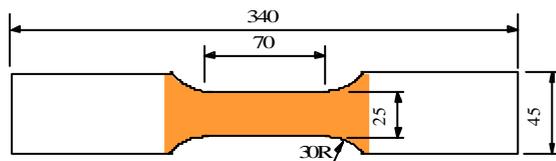


図 - 1 引張試験片

寸法を図-1に示す。なお、試験片の引張方向を船の長さ方向と一致させている。

2.2 試験方法

静的引張試験は、負荷速度を200 μ strain/secとする定ひずみ速度(平行部の標点間距離50mmに対する伸び変位による)で実施した。また、試験片平行部の切削面と側面にひずみゲージを貼付し、試験片の初期変形挙動を測定した。これらのひずみゲージ出力、伸びおよび荷重を波形記憶装置に記録した。

引張試験に先立ち、片面腐食試験片の板厚をレーザー測距方式により測定し、0.5mmピッチの格子上の板厚データを得た。

2.3 表面凹凸の状況と破断

片面腐食材の表面凹凸の状況と破断の様子を図-2に示す。また、板厚測定結果から得られた試

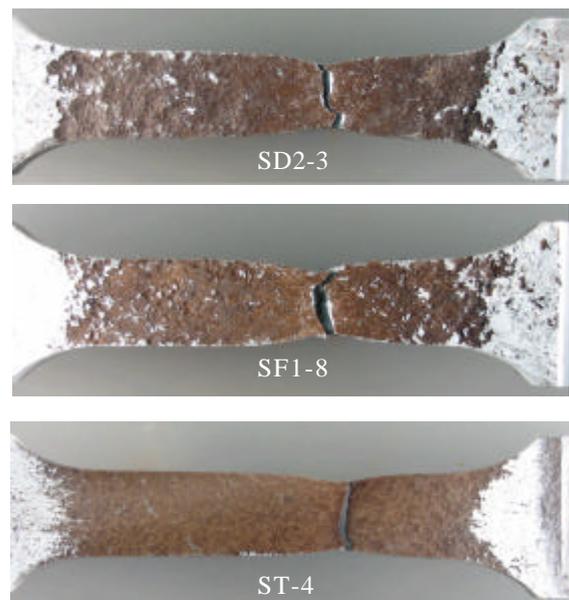
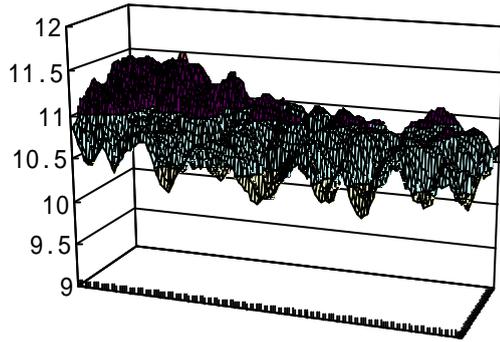


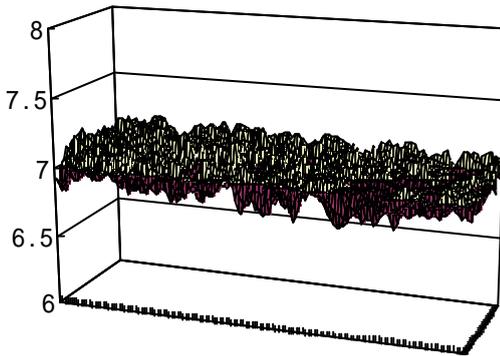
図 - 2 試験片破断位置とその様相

表 - 1 引張試験結果

試験片	種類	弾性係数 E	比例限界 Se	耐力 So.2	最大応力 Su	伸び u
		GPa	MPa			%
SD2-4	平滑	205	120	301	462	19.2
SD2-3	片面腐食	182	134	280	453	17.7
SF1-9	平滑	205	174	352	457	18.0
SF1-10		203	201	292	449	21.5
SF1-2	片面腐食	158	215	345	487	10.3
SF1-4		253	194	333	438	14.6
SF1-5		197	208	313	443	10.9
SF1-6		174	154	318	447	16.5
SF1-7		147	158	266	455	10.0
SF1-8		163	152	262	447	17.4
ST-3		平滑	209	295	264	445
ST-4	片面腐食	203	301	300	432	21.0



SD2-3



ST-4

図 - 3 試験片の表面形状の例

試験片の表面形状の一例を図 - 3 に示す。A 船から採取された SD2 および SF1 は、腐食表面の凹凸が激しいのに対し、B 船から採取された ST-4 は、腐食衰耗状態が均一であるが、引張破断はいずれの試験片とも平行部において、面積が最小となる横断面に生じた。

2.4 引張試験結果

各供試材の応力 - ひずみ関係から求めた静的引張特性値を表 - 1 に示す。ここで、応力は平行部の最小断面積から計算した。いずれの試験片においても、片面腐食材の弾性係数 E および伸び u が平滑材より小さい。

3. クリギング手法による板厚評価

クリギング手法^(1,2)を用いて、実船腐食材の表面凹凸の推定を限られた板厚測定データから行うことが可能かどうかを検証する。なお、空間デー

タモデリングは、以下の 3 段階の手順で実施する。

第一段階：探索的空間データ解析 (傾向変動の有無、はずれ値の検出)

第二段階：構造解析 (セミバリオグラムに対するモデル選択、パラメータ推定)

第三段階：空間予測 (任意の地点に対する実現値の予測、予測精度の評価)

3.1 探索的空間データ解析

(1) 供試データ

図 - 3 に示した片面腐食引張試験片 SD2-3 とする。板厚測定範囲は約 100 × 25mm である。

(2) サンプルデータの作成

試験片 SD2-3 に対して、幅および長さ方向とも 5mm 間隔の格子点を測定した約 120 点の板厚データを、測定点の座標と併せてデータセットとす

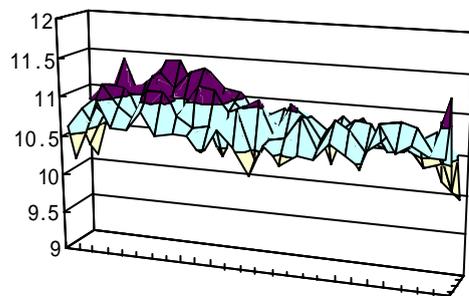


図 - 4 サンプルデータの鳥瞰図 (SD2-3)

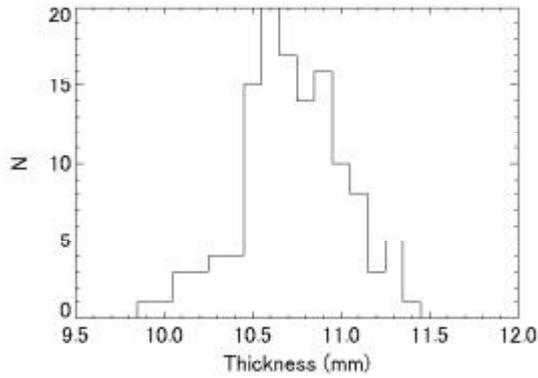


図 - 5 サンプルデータのヒストグラム(SD2-3)

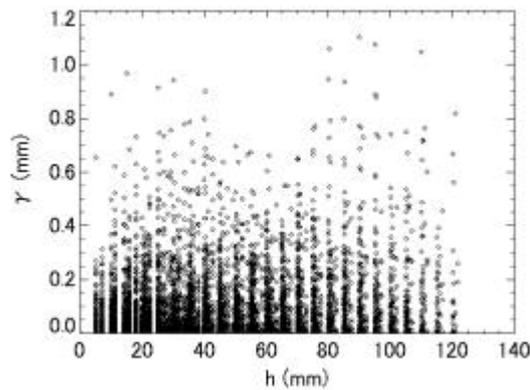


図 - 6 サンプルデータのバリオグラム雲(SD2-3)

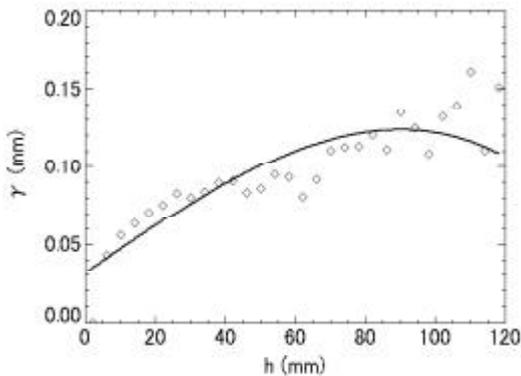


図 - 7 経験セミバリオグラム()へのセミバリオグラムモデル(実線)の当てはめ(SD2)

る。図 - 4 にサンプルデータの鳥瞰図を示す。

(3) 探索的空間データ解析

図 - 5 にサンプルデータのヒストグラムを示すが、この板厚データは正規分布に近いと思われ、

特に目立つはずれ値はない。また、図 - 6 はバリオグラム雲と呼ばれ、 $0 < h_{ij} < 120$ となる 2 点 (i, j) の組について (x : 試験片長さ方向の位置 y : 幅方向の位置、 z : 板厚)、

$$h_{ij} = \{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2\}^{1/2}, \quad \gamma_{ij} = (z_i - z_j)^2 / 2 \quad (1)$$

をプロットしたものである。同図から、2 点間の距離 h が小さい範囲では、 γ_{ij} は h に比例傾向がある。また、 h の増加とともに、 γ_{ij} のばらつきが増大しているように見えるが、2 点間の距離の大きい (i, j) の組数が減少する影響もある。図 - 6 からは、近接データの組で γ_{ij} が大きいものは少ないことがわかる。

3.2 モデル選択とパラメータ推定

サンプルデータについて、等方性を仮定してセミバリオグラムのモデル選択とパラメータ推定を行う。距離 $h_{ij} = 120\text{mm}$ (板厚測定点間の距離の最大値) を、30 等分した区間に分け、各区間の代表値 (γ_{ij} の平均値) を求めた結果を図 - 7 に示す (経験バリオグラム)。

図 - 7 に 印で示した経験バリオグラムを (2) 式の球型モデルを用いて、最小自乗法により当てはめを行うと、図中の実線のようになる。

$$\begin{aligned} \gamma(h; \theta) &= \theta_0 + (1/2) \theta_1 \{3|h|/\theta_2 - [h/\theta_2]^3\} \quad (2) \\ & \quad (0 < |h| < \theta_2) \\ &= \theta_0 + \theta_1 \quad (|h| > \theta_2) \\ &= 0 \quad (|h| = 0) \end{aligned}$$

このとき、サンプルデータに対するパラメータは、 $\theta_0 = 0.0321\text{mm}$ 、 $\theta_1 = 0.0915\text{mm}$ 、 $\theta_2 = 90.0\text{mm}$ となり、レンジ (セミバリオグラムの値が頭打ちとなる 2 点間の距離の最小値) が 90mm 程度であることがわかる。すなわち、90mm 以上離れた 2 点の板厚データ間の相関が小さいことを示す。

3.3 板厚の空間予測

図 - 4 のサンプルデータについて、板厚の空間予測を行った結果を図 - 8 に示す。この場合の空間予測とは、パラメータ推定の結果を用いて、任意の点の板厚値および標準誤差を予測することで

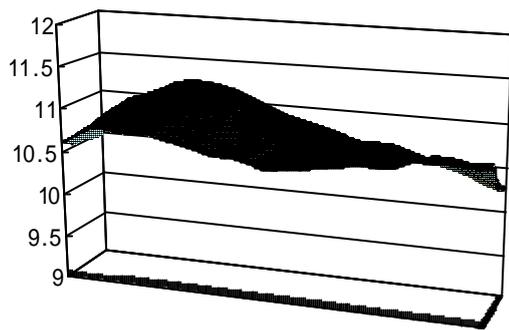


図 - 8 板厚予測結果 (SD2-3)

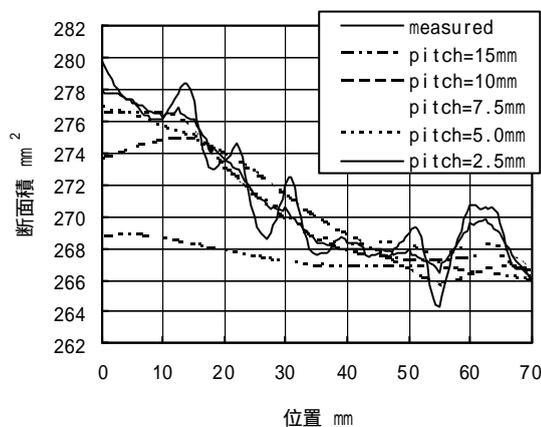


図 - 9 測定間隔と予測断面の関係

ある。図 - 8 の予測結果は、図 - 3 と比較して、なだらかな表面形状となっているが、断面の特徴をよく表している。

4 . 全面腐食材の板厚評価

3章では、約 100 × 25mm の範囲を 5mm 間隔で表面凹凸を測定した結果に基づいて空間予測した。ここでは、サンプリングの粗さ(測定間隔)と予測値の関係について考察する。片面腐食試験片 SD2 の板厚データのサンプリングを 2.5mm、5.0mm、7.5mm、10.0mm、15.0mm 間隔の格子上で行い、3章と同様にクリギング手法により板厚を予測する。予測値から試験片平行部における断面積を計算した結果を図 - 9 に示す。図中の実線が実測値であり、その他は予測値であるが、測定間隔 10mm の場合で、ほぼ実測値に近い断面積を

予測している(最小断面積の誤差 1% 程度)。片面腐食材の静的強度は、断面積の最小値で評価できることから、クリギング手法を用いれば、測定間隔 10mm 程度の板厚測定により、静的強度を十分な精度で推定できることが予想される。

5 . まとめ

経年船体から採取した腐食衰耗材について、平滑試験片および片面腐食試験片を製作し、引張試験により、静的強度特性を検討した結果、

- 1) 引張破断は、断面積が最小の断面に生じる。また、静的強度は、この最小断面積に対する負荷応力で評価できる。
- 2) 腐食衰耗材では、弾性係数および伸びが平滑材と比較して低下する。伸びの低下は材質が劣化したのではなく、腐食衰耗材の板厚が一様でないことによると考えられる。

の知見が得られた。また、片面腐食材の板厚評価をクリギング手法により行った結果、

- 1) 表面凹凸の形状予測にはクリギング手法が有効である。
- 2) 片面腐食試験片(平行部 100 × 25mm 程度)の板厚評価では、測定間隔 10mm(33 点)程度の板厚データサンプリングにより、十分な精度で板厚を予測可能である。

ことが明らかになった。

謝辞

本研究は、国土交通省海事局安全基準課からの受託研究「タンカーによる大規模油汚染の防止対策に関する研究」の一部として実施されたものであり、横浜国立大学角洋一教授をはじめ、委員会に参加して頂いた方々から、多大なご助言を賜りましたことに謝意を表します。

参考文献

- 1) 間瀬茂、武田純：空間データモデリング - 空間統計学の応用 (共立出版) pp.135-166、(2001)。
- 2) D. Dorsel, T. L. Breche : Environmental Sampling & Monitoring Primer (KRIGING), [http:// www.ce.vt.edu/program_areas/environmental/teach/smprimer/kriging/kriging.html#Se^2](http://www.ce.vt.edu/program_areas/environmental/teach/smprimer/kriging/kriging.html#Se^2)