

曲率線展開法によるぎょう鉄施工の理論的解釈とその実証実験

環境・エネルギー研究領域 *松尾 宏平, 田中 義照, 安藤 孝弘, 小林 佑規, 松岡 一祥

1. はじめに

ぎょう鉄（撓鉄）とは、平らな鋼板から、連続で滑らかな船体曲面外板を形成する作業全般を指す。ぎょう鉄の対象となる船体曲面外板は、主に、船の船首・船尾付近に存在し、鋼板の板厚や曲げの深さ・形状は、その箇所箇所によって全く任意である。このため、その形成手法にも唯一解というもの存在せず、各造船所の設計者とぎょう鉄職人が経験と感性を基に技術を維持・継承してきた。

本研究は、このようなぎょう鉄作業を幾何学的な観点から定量化することで、最適な曲面展開法とその逆操作である曲面形成法を構築することを目的としている。まず始めに、曲率線展開法について、曲率線とその展開理論について述べる。次に、この曲面展開の逆操作として、実際の鋼板に対し曲面形成（ぎょう鉄）を行う。実際の船体曲面外板を対象として実証実験を行い、曲率線展開法の有効性を確認する。

2. ぎょう鉄施工の曲率線展開法による理論的解釈

ぎょう鉄の対象となる船体曲面外板は、そのほとんどが非可展面と呼ばれるものである。非可展面は、例えば、球面のように伸び縮みなしに平面へ重ね合わせることができない（展開できない）。一般に、平面から非可展面への形成には、板の面内方向の伸縮が必要となるが、この面内方向の伸縮をどのように配していくのか、という点が非可展面の展開の特性を決める。曲率線展開法では、曲面上の曲率線を用いることで、理論的かつ合理的に曲面展開・曲面形成を定量化することが可能となる。曲率線とは、曲面上の最大曲率と最小曲率の方向（それぞれを主方向）を曲面上で連続して追っていったものである。

与えられた任意の曲面外板を $z(x, y)$ のように関数表現すれば、主方向は次のように表すことができる。

$$dy/dx = -\left\{B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}\right\}/2C$$

$$dx/dy = -\left\{B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}\right\}/2A$$

$$A = \left\{1 + (z_x)^2\right\}(z_{xy}) - (z_x)(z_y)(z_{xx})$$

$$B = \left\{1 + (z_x)^2\right\}(z_{yy}) - \left\{1 + (z_y)^2\right\}(z_{xx})$$

$$C = (z_x)(z_y)(z_{yy}) - \left\{1 + (z_y)^2\right\}(z_{xy})$$

ここで、 z_x は偏微分 $\partial z / \partial x$ を、 z_{xy} は $\partial^2 z / \partial x \partial y$ を意味する。各主方向をルンゲ・クッタ法などで逐次追っていけば、曲率線を描くことができる。また、曲率線を求めるときに、各点における法曲率 Kn と測地的曲率 Kg を算出する。

$$Kn = L(dx/ds)^2 + 2M(dx/ds)(dy/ds) + N(dy/ds)^2$$

$$Kg =$$

$$\pm \left[g^{1/2} \left\{ (dx/ds)(d^2y/ds^2) - (dy/ds)(d^2x/ds^2) \right\} \right]$$

$$+ g^{-1/2} \left\{ z_{,y} z_{,xx} (dx/ds)^3 + (2z_{,y} z_{,xy} - z_{,x} z_{,xx})(dx/ds)^2 (dy/ds) \right. \\ \left. + (z_{,y} z_{,yy} - 2z_{,x} z_{,xy})(dx/ds)(dy/ds)^2 - z_{,x} z_{,yy} (dy/ds)^3 \right\} \Big]$$

L, M, N は、曲面上における第2基本量であり、 s は各曲率線における曲線実長を表す。

曲率線の有する特性から展開に関して、次のことが言える。

「曲率線には測地的ねじれがないことから、測地的展開（曲線をそれが乗っている曲面に対し、測地的曲率を保ったまま実長展開すること。曲線の法曲率成分を除去すること）すると平面上に展開することができる。」

つまり、曲率線は、その法曲率分の曲げを取れば、平面へねじれなく全単射できる唯一の曲線であり、曲率線を基準にすれば必要な曲げ量を法曲率の量で定量的に管理することができる。

曲率線は、最大・最小曲率方向をそれぞれ表す2組の曲線群からなる。曲率の絶対値が大きい方の曲線群を第1曲率線、これに交叉する絶対値の小さい方の曲率線群を第2曲率線とすれば、

「第1曲率線群を測地的展開し、それらの展開曲線を第2曲率線で接続することで、曲面全体の展開を曲率線を用いて表現できる。」

このように、曲率線を基準に展開形状を決定することができるが、その逆操作である曲面形成施工に関して次のことが言える。

「曲率線が曲面上で直交を保つことから、他方の曲率線方向の変形がもう他方の曲率線方向の変形に影響を及ぼすことがない（それぞれの方向に独立して変形を与えることができる）。」

このように、曲率線展開法は、曲率線に測地的ねじれがないこと、及び最大・最小の2組の曲率線同士が互いに直交の関係にある、という2点の特性を基本に開発された展開法である。プレス線と加熱線を2組の曲率線に近似すると、プレスと線状加熱を行う限り、その両者の影響は互いに影響を与えないことになる。これより、次のように最適なぎょう鉄作業を表現できる。

「始めに、曲がりの強い曲率線方向（第1曲率線）の曲げ形成を冷間曲げによる粗曲げで行い、次に、非可展面の形成のための板収縮を他方の曲率線方向（第2曲率線）に沿ってガス加熱で行う。」

曲げ量や熱収缩量は、幾何学的な観点からすべて定量化されており、この幾何学的変形量と板の熱変形のデータベースを組み合わせることで、作業工程を詳細に指示することが可能となる。

3. ぎょう鉄実証実験

3. 1 対象船体曲面外板

2. で述べた、曲率線展開法による外板展開と最適なぎょう鉄作業の検証のため、実証実験を行った。

実験対象とした船体曲面外板は、実際の造船所で用いられたものである。この外板は、船首部のステムに隣接する外板であり、緩やかな曲がりと捻れを合わせ持つ。この種の曲がり形状は、ぎょう鉄で最も難しいとされているもので、熟練技能者が作業に当たる場合が多い。対象外板に曲率線を図示したものが図1である。この図では、各方向の長さの尺度がそろっていないが、実際は深さ(DEPTH)方向に細長い形状である。

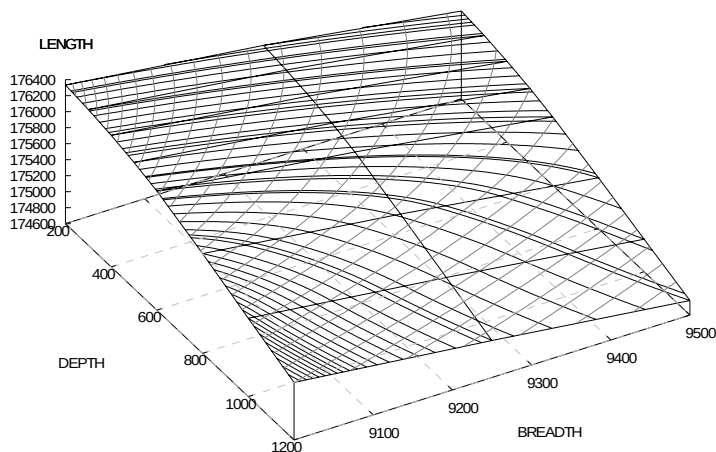


図1 対象曲面と曲率線

(実線：第1曲率線，破線：第2曲率線)

3. 2 展開図と曲げ方案

対象外板の曲率線を測地的展開し、それらを同一平面上に最適配置して、曲面としての展開図を得る。図2は、対象曲面外板について出図された展開一品図である。展開図には、対象外板の四周を表す切り取り線のほか、展開の基準となった曲率線、板の各種基準線が書き込まれており、これらを施工外板にマーキングする。

Expanded Plate (test piece: HL-02)

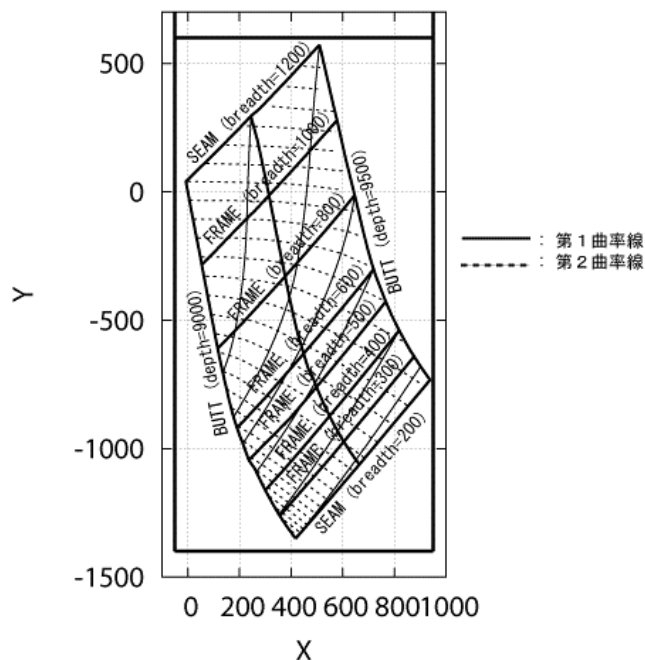


図2 投影面上での曲率線

また、2. で述べたとおり、曲率線展開法は曲面形成過程を定量化することができ、ここから曲面形成のための曲げ方案が出図される。表1は、展開プログラムの計算結果から出図した曲げ方案の一例である。これは、表2のガス入熱条件の基で、曲面形成に必要な面内方向収縮量を生じさせるための線状加熱の本数を示したものである。表1に示す加熱本数を指定の第1曲率線間に入れると所定の収縮を得ることができ、非可展面の形成が可能となる。

表1 第1曲率線間の必要線状加熱本数

L2ライン	各L1間の線状加熱本数(本)							
	L1ライン							
	L1-19	L19-24	L24-29	L29-34	L34-42	L42-48	L48-51	
28	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	1	0	0
26	0	0	0	0	0	2	0	0
25	0	0	0	0	1	1	0	0
24	0	0	0	0	1	1	0	0
23	0	0	0	0	2	1	0	0
22	0	0	0	1	1	0	0	0
21	0	0	0	2	1	0	0	0
20	0	0	2	2	0	0	0	0
19	0	1	3	1	0	0	0	0
18	0	3	3	1	0	0	0	0
17	0	3	3	1	0	0	0	0
16	0	2	2	1	0	1	0	0
15	0	1	2	1	1	2	0	0
14	0	0	1	1	3	3	0	0
13	0	0	1	2	5	5	0	0
12	0	0	0	2	7	1	0	0
11	0	1	0	2	3	0	0	0
10	1	1	1	2	0	0	0	0
9	1	1	1	0	0	0	0	0
8	1	1	2	0	0	0	0	0
7	2	1	2	0	0	0	0	0
6	1	1	2	0	0	0	0	0
5	0	1	2	0	0	0	0	0
4	0	1	2	0	0	0	0	0
3	0	1	2	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 ガス入熱条件

板厚	真流量	加熱速度	理論入熱	Q/T	加熱線1本に対する収縮量 (mm)
T(mm)	l/h	mm/min	Q kJ/m	(kJ/m)/mm	
14	1 500	150	14 385	1 028	0.457

3. 3 実証実験

(a) 第1曲率線方向の曲げ施工

最適なぎょう鉄の施工手順は、始めに、曲がりの強い曲率線方向（第1曲率線）の曲げ形成を冷間曲げで粗曲げする。具体的には、図2で示す第1曲率線に沿う曲がりをプレス機で形成する。つまり、プレスの歯を第2曲率線に合わせていき、第1曲率線の法曲率成分の曲げ形成を行う。

(b) 第2曲率線方向の熱絞り施工

次に、非可展面の形成のための板の面内収縮を第2曲率線に沿ってガス加熱で行う。熱収縮量の管理は、表1のように幾何学的な観点からすべて定量化・方案化されている。また、本実験では、ぎょう鉄自動簡易装置（加熱用自動台車装置）を用いて線状加熱を行った。本装置を用いることで、燃料ガス（LPG）および酸素ガスの流量、移動速度、トーチ高さを一定に保ち、線状加熱することが可能となる。

(c) 修正加工

(a)、(b)による施工によって、本来は曲面形成が終了するはずであるが、本実験では、目的形状に一致せず、最後に修正加工が必要であった。この段階では、板は目的形状にほぼ近づいており、ここから最終目的形状のイメージは容易につき易い。また、修正加工についても曲率線に沿って線状加熱・プレスを行えばよいことから作業自体はそれほど難しくはない。修正加工では、修正・追加すべき箇所やその量が意図的であるため、その効果をより大きく効かせるために、ジャッキを掛けたり、板にくさびを打って変形を強制的に起こさせる。本実験で行った修正加工としては、縦曲げ・ねじれの修正のために数本の追加の線状加熱を、横曲げの修正に数箇所のプレス加工を実施した。

(d) 実証実験の検証

以上のぎょう鉄加工により、目的形状の船体曲面

外板が完成した。図3、図4は、外板の縦曲げとねじれの形状具合を示しているものである。曲面形成後は、図3のように曲げ型の見透し棒が同一の方向を向くようになり、また、図4のように各フレームに置かれた見透し棒に一枚の平面が通るようになり、さらに、各フレームに設定された見透し棒上の見透し位置が一直線上に通るようになる。以上より、縦曲げ・ねじれは十分な精度内で加工された。また同様に、各フレームにおける横曲げも、十分な精度内で加工されている。



図3 曲げ型の見透し棒の向き



図4 曲げ型の見透し棒による平面と見透し線

4. まとめ

曲率線展開法を用いて、実際の造船所で用いられる曲面外板を展開し、そこから曲げ方案を基に曲面形成の実証実験を行った。

数枚の船体曲面外板を用いて、曲率線展開法と従来からの展開法との比較を行うと、両者の展開形状

はほとんど等しいものとなり、曲率線展開法の妥当性が確認されている。展開形状がほぼ同じであるため、現状の展開法に、曲面の曲率線情報を付加するだけでも、ぎょう鉄施工の見通しが良くなることが期待される。一方で、展開形状の大きさ（面積）に関しては、一部の外板で曲率線展開法が横方向へ少し延びていることが確認されている。曲率線展開法は、展開形状を最適化し、作業指示を定量化することが最大の狙いであるが、展開形状の最適化に関しては多少の追加アルゴリズムが必要である。

また施工面では、曲げ方案による施工のみで、目的形状を一気に完成させることは困難であった。直交する曲率線に沿う加工は互いを干渉しない、という原則はあくまで理論上のことであり、実際は、線状加熱の影響が僅かながらに他に影響を与えていると考える。現段階では、最終調整の修正加工を実施するなどの対応が必要であるが、展開法のアルゴリズムを改良し、熱を入れる量（つまり、面内方向の収縮量）を極力少なくすれば、その分、熱影響が少なくなり、改善され则认为る。

現在、曲率線展開法は、造船所を対象にプログラムのパッケージ化を進めており、プログラムのインターフェース機能や各造船所対応の生産情報の追加機能を開発している。

謝辞

本研究は、国土交通省海事局からの受託研究「造船業 IT 化の推進による「ものづくり基盤技術」の高度化に関する研究」および、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究「船体曲面外板の表現及び製造方法に関する基礎的研究」の一部として実施された。各関係機関に深く謝意を表す。