

造船業が目指す高度工作精度管理技術

日立造船(株)技術研究所 谷川 雅之

Challenge to High-grade Accuracy Control during Ship-hull Production

by Masayuki Tanigawa

1. 造船業における工作精度管理の現状と高度化の方向

我が国の造船業界はかつての石油ショックや円高ショックに対し大ブロック化、溶接ロボット化、造船 CIM 化など革新技術の導入により建造費競争の優位性を確保してきたが、近年の東アジア諸国の進出による船価の下落は造船業界をかつてないきびしい国際環境の中に追い込んでいる。このような危機を乗り切るためには基本に立ち返った大幅な建造費の低減と効率化が必要である。

建造費低減のための技術革新の一つとして工作精度管理の高度化がある。渠中のブロック搭載ではブロックの精度が 5mm 以内であれば修正作業が不要となり結合作業時間が大幅に短縮化される。ブロックの修正による作業ロスの排除は建造工費の 5%低減に相当し、さらにブロック継手の溶接作業自動化が実現されれば建造工費はさらに 5%低減すると云われている。

工作精度管理の現状をみると溶接変形対策としては Fig.1 に示すように変形の予測に基づく延べ尺(単位長さ当りの伸ばし量)よりも経験値ベースの端伸ばしを採用しているところが多い。また精度評価については巻尺や張り糸など旧来からの方法で計測が行われており、ブロック搭載時の位置決めも熟練技能者に依存している状態である。

以上のことから造船における工作精度管理高度化の方向は、溶接変形の予測・制御による高精度ブロックの製作、ブロック工作精度の計測・評価による渠中内搭載・結合作業の短縮・効率化の 2 点に集約される。

ここでは上記 2 点について、(社)日本造船研究協会の第 237 研究部会(部会長野本敏治東大教授、日本財団補助)¹⁾において平成 9 年度～11 年度に実施された研究内容を述べる。

2. 船殻ブロック工作精度予測技術の高度化

工作精度予測技術の目的はいかに精度の高いブロックを製作するかにある。そのためには船殻ブロックの工作精度を低下させる最も大きな要因である溶接変形を高精度で予測し、端伸ばし・延べ尺や逆ひずみ・変形拘束など有効な変形制御対策を

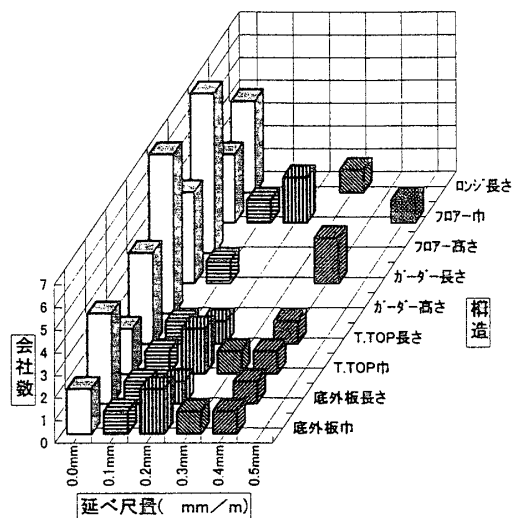


Fig.1 延べ尺の適用状況

講じることのできる技術を開発することが必要である。

2.1 工作精度予測技術高度化のフロー

予測技術高度化のフローを Fig.2 に示す。まず溶接変形の発生源である固有変形(横収縮変形・角変形・縦収縮力)を基礎継手実験などによりデータベース化する。次にこれらの固有変形を荷重条件として FEM 解析モデルに与える方法を検討し船首・船尾の曲り部ブロックを含めた任意形状ブロックの溶接変形が予測できる技術を開発する。さらに溶接変形の予測技術を伸ばし量の設定や逆ひずみ・面外変形拘束などの変形制御方法の検討に適用する。

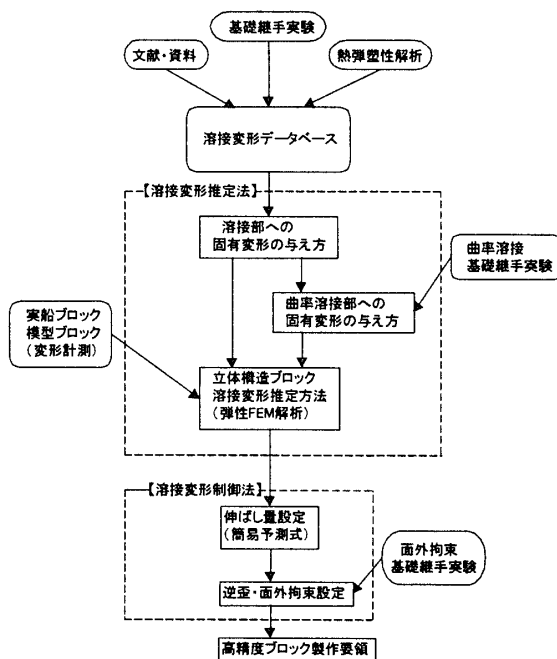


Fig.2 工作精度予測技術の高度化

2.2 溶接変形データベースの編集・補完

溶接変形データベースの作成ではまず

文献調査により公表されたデータの編集を行い、不足しているデータについて実験等によりデータを補完した。データベースでは溶接長 200mm の軟鋼のビード溶接を基礎継手とし、入熱量・熱効率・板厚と固有変形の関係を定式化した。

データベースの補完では、溶接方法として多電極片面サブマージアーク溶接及び多電極ロンジ溶接、各種影響因子として溶接長・降伏強度・変形拘束・すみ肉溶接・曲り板溶接などについて実験を行い、固有変形に及ぼす影響を定量化した。

2.3 FEM 解析による溶接変形解析手法の開発

溶接変形の発生源となる固有変形を FEM モデルに与えることにより任意の 3 次元形状ブロックの溶接変形推定が可能になる。FEM 解析の方法は、将来 3 次元 CAD と結合することを念頭において、シェル要素を用いた弾性 FEM 解析を用いることとした。固有変形を FEM モデルに与える方法はいくつか考えられるが汎用構造解析ソフトの多点拘束機能を活用した方法が実用的である。

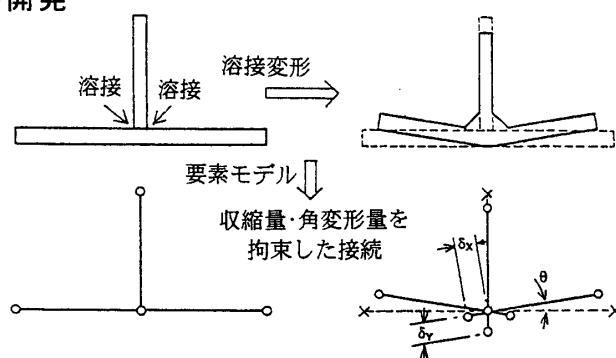


Fig.3 固有変形の与え方(すみ肉継手)

Fig.3 はすみ肉継手に横収縮変形と角変形を与える方法を模式的に示した図である。縦収縮力は溶接線に沿って配置した梁要素の熱収縮で与えることができる。

これらの解析手法を用いた FEM 解析による溶接変形の推定精度を確認するため曲り板、平行部ブロックモデル、曲り部ブロックモデルの溶接実験を行った。

曲り板(2m×1m, 板厚 18.5mm, アール=3m)にビード溶接を行い面外変形を計測した結果を Fig.4 に示す。中央断面における面外変形の FEM 解析による推定値と実

曲り部ブロックモデルの実験では Fig.7 に示すような 10,000DWT タンカーのエンジンルーム付近のブロックを製作した。変形を推定した例として甲板とフレームからなる内構材に曲り外板をかぶせ外板付ロンジを溶接するステージの結果を示す。Fig.8 はモデル全体の変形図、曲り外板辺縁部における面外変形の推定値と実験値の比較図であるが、良い精度で推定できていることがわかる。

2.4 溶接変形制御への適用

溶接変形を制御する方法としては溶接による面内収縮を予測した伸ばし、面外変形を予測した逆ひずみ、剛性を高めて面外変形を低減する変形拘束、溶接順序で変形の影響を少なくする方法などがあるが、溶接変形予測技術を用いれば伸ばし量や逆ひずみ量の設定、変形拘束部材の剛性や溶接順序の効果等の事前検討が可能となる。

予測による変形制御の一例として平行部二重底ブロック組立における船底外板の伸ばし量の簡易設定シートを Table1 に示す。外板、ロンジ、フロア、ガーダなどの部材のサイズと数、溶接条件等を入力することによって船底外板の長さ方向および幅方向収縮量を容易に計算することができる。

3. 船殻ブロック工作精度評価技術の高度化

工作精度評価技術の目的は出来上がったブロックを最小限の手直しでいかに効率良く搭載・結合するかにある。そのためにはブロックの3次元形状を短時間かつ高精度で計測できる手段を調査・導入するとともに、図面形状データ・形状計測データに基づいた渠中搭載時における最適位置決めなどの工作精度評価技術を開発することが必要と

Table1 伸ばし量の簡易設定シート

船底外板																																																																																																											
(a)大板工法 板番号: ①、②、③...																																																																																																											
板継ぎ溶接 ロンジ先付け溶接																																																																																																											
(b)単板工法																																																																																																											
ロンジ先付け溶接 板継ぎ溶接 ブロック組立溶接																																																																																																											
板番号	①	②	③	④	⑤	⑥																																																																																																					
板長さ(mm)	6800																																																																																																										
板幅(mm)	3135	3135																																																																																																									
板厚(mm)	21.5	21.5																																																																																																									
ロンジ数	3	3																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ロンジ</th> <th colspan="2">ガーダー</th> <th colspan="2">フロア</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>フランジ幅</td> <td>150</td> <td>枚数</td> <td>2</td> <td>枚数</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>フランジ厚</td> <td>30</td> <td>板長さ</td> <td></td> <td>板長さ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ウェブ高</td> <td>550</td> <td>板高さ</td> <td>2900</td> <td>板高さ</td> <td>2900</td> </tr> <tr> <td>ウェブ厚</td> <td>14</td> <td>板厚</td> <td>17.5</td> <td>板厚</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table>										ロンジ		ガーダー		フロア		フランジ幅	150	枚数	2	枚数	2	フランジ厚	30	板長さ		板長さ		ウェブ高	550	板高さ	2900	板高さ	2900	ウェブ厚	14	板厚	17.5	板厚	16																																																																				
ロンジ		ガーダー		フロア																																																																																																							
フランジ幅	150	枚数	2	枚数	2																																																																																																						
フランジ厚	30	板長さ		板長さ																																																																																																							
ウェブ高	550	板高さ	2900	板高さ	2900																																																																																																						
ウェブ厚	14	板厚	17.5	板厚	16																																																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">板継ぎ溶接条件</th> <th>①×②</th> <th>②×③</th> <th>③×④</th> <th>④×⑤</th> <th>⑤×⑥</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>継手番号</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>第1電極</td> <td>電流(A)</td> <td>1500</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>電圧(V)</td> <td>35</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>第2電極</td> <td>電流(A)</td> <td>1300</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>電圧(V)</td> <td>40</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>第3電極</td> <td>電流(A)</td> <td>900</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>電圧(V)</td> <td>45</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>第4電極</td> <td>電流(A)</td> <td>900</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>電圧(V)</td> <td>45</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">溶接速度(mm/s)</td> <td>13.333</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										板継ぎ溶接条件		①×②	②×③	③×④	④×⑤	⑤×⑥	継手番号							第1電極	電流(A)	1500						電圧(V)	35					第2電極	電流(A)	1300						電圧(V)	40					第3電極	電流(A)	900						電圧(V)	45					第4電極	電流(A)	900						電圧(V)	45					溶接速度(mm/s)		13.333																									
板継ぎ溶接条件		①×②	②×③	③×④	④×⑤	⑤×⑥																																																																																																					
継手番号																																																																																																											
第1電極	電流(A)	1500																																																																																																									
	電圧(V)	35																																																																																																									
第2電極	電流(A)	1300																																																																																																									
	電圧(V)	40																																																																																																									
第3電極	電流(A)	900																																																																																																									
	電圧(V)	45																																																																																																									
第4電極	電流(A)	900																																																																																																									
	電圧(V)	45																																																																																																									
溶接速度(mm/s)		13.333																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ロンジ溶接条件</th> <th>通常</th> <th>(タンデム後)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>タンデム溶接ですか</td> <td>n</td> <td>溶接条件</td> <td></td> </tr> <tr> <td>電圧はアーク電圧ですか</td> <td>y</td> <td>電流(A)</td> <td>331</td> </tr> <tr> <td>ケーブル長(m)</td> <td></td> <td>電圧(V)</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>断面積(mm²)</td> <td></td> <td>速度(mm/s)</td> <td>6.3333</td> </tr> <tr> <td>降下電圧(V)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										ロンジ溶接条件		通常	(タンデム後)	タンデム溶接ですか	n	溶接条件		電圧はアーク電圧ですか	y	電流(A)	331	ケーブル長(m)		電圧(V)	33	断面積(mm ²)		速度(mm/s)	6.3333	降下電圧(V)																																																																													
ロンジ溶接条件		通常	(タンデム後)																																																																																																								
タンデム溶接ですか	n	溶接条件																																																																																																									
電圧はアーク電圧ですか	y	電流(A)	331																																																																																																								
ケーブル長(m)		電圧(V)	33																																																																																																								
断面積(mm ²)		速度(mm/s)	6.3333																																																																																																								
降下電圧(V)																																																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ガーダー溶接条件</th> <th colspan="3">フロア溶接条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>電流</td> <td>電圧</td> <td>速度</td> <td>電流</td> <td>電圧</td> <td>速度</td> </tr> <tr> <td>330</td> <td>33</td> <td>5</td> <td>280</td> <td>31.5</td> <td>5.4667</td> </tr> <tr> <td>アーク電圧ですか?</td> <td>y</td> <td></td> <td>アーク電圧ですか?</td> <td>y</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ケーブル長</td> <td>断面積</td> <td>電圧降下</td> <td>ケーブル長</td> <td>断面積</td> <td>電圧降下</td> </tr> </tbody> </table>										ガーダー溶接条件			フロア溶接条件			電流	電圧	速度	電流	電圧	速度	330	33	5	280	31.5	5.4667	アーク電圧ですか?	y		アーク電圧ですか?	y		ケーブル長	断面積	電圧降下	ケーブル長	断面積	電圧降下																																																																				
ガーダー溶接条件			フロア溶接条件																																																																																																								
電流	電圧	速度	電流	電圧	速度																																																																																																						
330	33	5	280	31.5	5.4667																																																																																																						
アーク電圧ですか?	y		アーク電圧ですか?	y																																																																																																							
ケーブル長	断面積	電圧降下	ケーブル長	断面積	電圧降下																																																																																																						
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">計算してもよろしいですか? (ok?)</td> <td colspan="8">ok</td> </tr> </table>										計算してもよろしいですか? (ok?)		ok																																																																																															
計算してもよろしいですか? (ok?)		ok																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> <th>⑤</th> <th>⑥</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>板継ぎ溶接</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>縦収縮</td> <td></td> <td></td> <td>0.40</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>横収縮</td> <td>0.88</td> <td>0.88</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ロンジ溶接</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>縦収縮</td> <td></td> <td></td> <td>0.52</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>横収縮</td> <td>0.54</td> <td>0.54</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ブロック組立溶接</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>縦収縮</td> <td>0.40</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>横収縮</td> <td>0.51</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>各板縦収縮</td> <td>1.31</td> <td>1.31</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>各板横収縮</td> <td>1.67</td> <td>1.67</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>合計縦収縮</td> <td>1.31</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>合計横収縮</td> <td>3.33</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>											①	②	③	④	⑤	⑥	板継ぎ溶接							縦収縮			0.40				横収縮	0.88	0.88					ロンジ溶接							縦収縮			0.52				横収縮	0.54	0.54					ブロック組立溶接							縦収縮	0.40						横収縮	0.51						各板縦収縮	1.31	1.31					各板横収縮	1.67	1.67					合計縦収縮	1.31						合計横収縮	3.33					
	①	②	③	④	⑤	⑥																																																																																																					
板継ぎ溶接																																																																																																											
縦収縮			0.40																																																																																																								
横収縮	0.88	0.88																																																																																																									
ロンジ溶接																																																																																																											
縦収縮			0.52																																																																																																								
横収縮	0.54	0.54																																																																																																									
ブロック組立溶接																																																																																																											
縦収縮	0.40																																																																																																										
横収縮	0.51																																																																																																										
各板縦収縮	1.31	1.31																																																																																																									
各板横収縮	1.67	1.67																																																																																																									
合計縦収縮	1.31																																																																																																										
合計横収縮	3.33																																																																																																										

なる。

3. 1 新しい工作精度管理

ブロックの3次元形状計測技術に基づいた工作精度評価システムの開発により Fig.9 に示すような新しい工作精度管理が実現できる。計測された形状データは曲り・ねじれ、ギャップ・目違い等の精度情報に変換され、ブロック単体の出来上がり精度、複数ブロック間の取合い精度が数値化される。さらに精度情報と損失時間の関係を表す適切な評価関数が設定されれば工作精度を損失時間として表すことが可能となり、例えばブロック製作のどの段階で手直しすればコストが最小になるかが分かる。

3. 2 工作精度評価システムのフロー

工作精度評価システムのフローを Fig.10 に示す。まず各ブロックの3次元形状計測結果を図面形状(CAD データ)と比較し出来上がり精度(寸法、曲り、ねじれなど)を評価する。次に渠中搭載時の位置合わせシミュレーションを行いブロック間の取合い精度(ギャップ、目違いなど)を評価する。これらの結果をもとに修正作業の要否を判定し最適な搭載位置を決定する。

3. 3 3次元形状計測手法の調査

最新の3次元形状計測手法を調査した結果、大組立・渠中計測には赤外線パルスを利用し距離と角度から3次元座標を求めるセオドライト方式が、中・小組立の計測には多視点から撮影した画像をコンピュータ上で処理することによって3次元座標を求めるデジタルカメラ方式が有望であることがわかった。

3. 4 搭載位置決めシミュレータの開発

ブロックの単体精度、ブロック間の取合い精度を精度情報に変換できるソフトとして搭載位置決めシミュレータを試作した。Fig.11 に取合い精度の表示例を示す。図に示すように取合い点におけるギャップ G、目違い T 等が数値とともに表示される。

各工場の位置決め技能者の意見によると、位置決め判断基準は溶接変形の他に温度による変形や自重による変形(沈み込み、倒

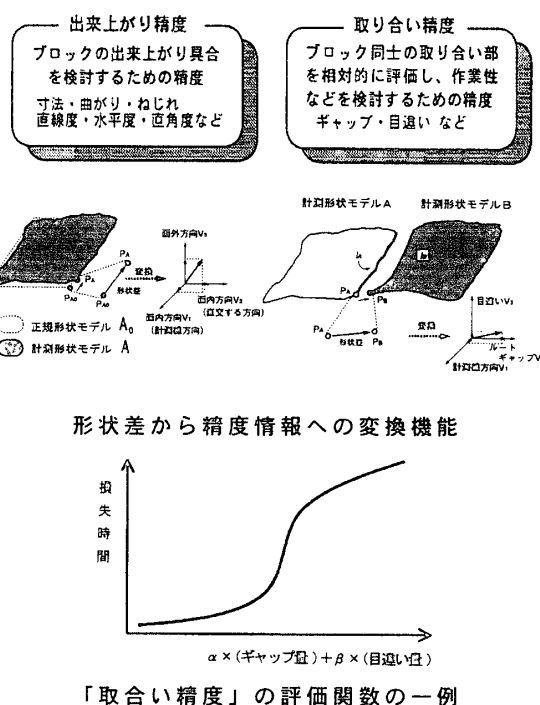


Fig.9 新しい工作精度管理の構想

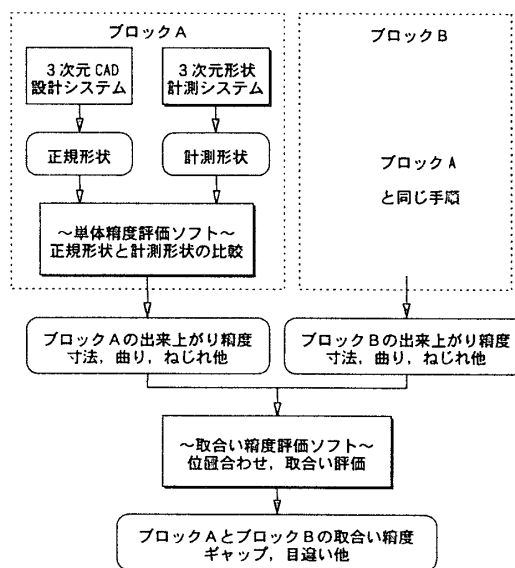


Fig.10 工作精度評価システム

れ込み)などがあり容易に明確化できるものではないが、ブロック精度が良ければ位置決めが容易になるのは事実であり、搭載シミュレータは位置決めを検討するうえで有効な手段になるとのことである。

最後に工作精度向上によるコスト低減のイメージを Fig.12 に示す。このイメージは各造船工場の意見を集約したものである。前工程の精度向上対策は後工程での修正作業コストを減じトータルコストが下がることが共通の認識となっている。

4. まとめと今後の課題

造船業で行われつつある工作精度の予測技術ならびに評価技術の高度化の現状とそれらに基づく新しい工作精度管理の構想について報告した。

これらの技術が実用化できれば、ブロック形状修正作業の極小化、渠中でのブロック搭載・結合作業の短縮化・効率化によって建造工費が大きく低減する。またブロックの高精度化によってブロック継手溶接の自動化・ロボット化が可能になる。

今後の課題は溶接変形予測(FEM 解析)および搭載シミュレータの3次元 CAD との結合・実用化、変形防止策や板曲げ加工など熟練工による経験ベースの手法・情報のデジタル化(数値情報システム化)である。このような数値情報処理技術を生産技術に導入することにより部材加工精度の向上、曲り部ブロック製作の高精度化が実現するものと期待される。

【参考文献】

- [1] (社)日本造船研究協会, 「SR237 高度工作精度管理技術に関する研究 成果報告書」, 研究資料 No.427, 平成 12 年 3 月

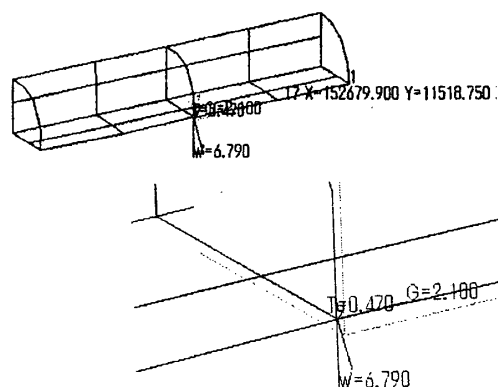


Fig.11 搭載位置決めシミュレータ

精度向上実施概念

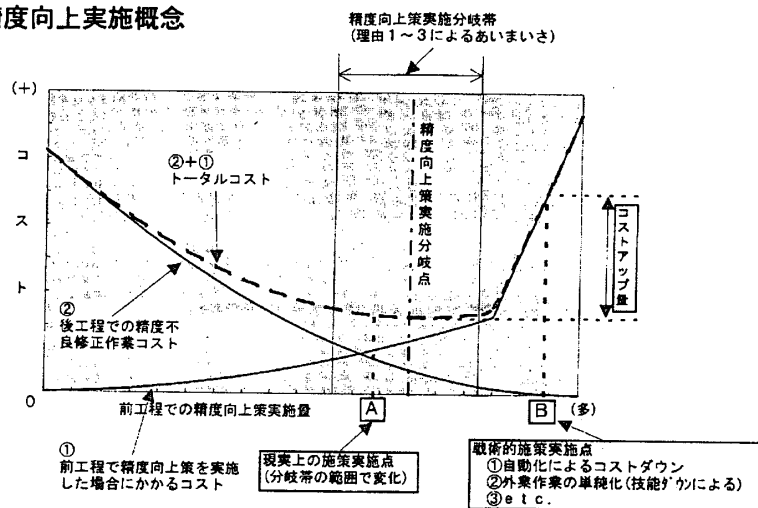


Fig.12 精度向上対策の実施によるコストダウン