

論文の要旨

題目 三次元計測器を用いた船体構造の計測精度と精度管理への適用に関する研究
(A study on the accuracy control and measurement of hull structure using 3D Measurement Technique)

氏名 阿部 亮吾

船舶の製造プロセスにおいて三次元変形の正確な量を把握することは極めて重要である。それは、形状寸法の品質向上によって、後続作業や修正作業が軽減され効率化がはかれるとともに、設計で計算された強度に限りなく近くなるためである。近年は、三次元計測機器を用いた変形・変位の計測が提案されている。地形・建築測量と工業計測を比較すると、工業計測は計測対象が工程ごとに移動するため、不動点を部材の外に設けることができない。また、工場内は計測条件が厳しく、測量機器の設置面が不安定であったり、他の機材や壁により十分な距離や角度が不十分な場合がある。また、工程間の時間が短いため全計測点を同一条件で観測できないことがある。しかし、要求精度は1mm以下～数mm程度と高精度である。

従来の造船分野における溶接変形の把握は、熟練作業者の技能に依存しており、溶接変形の定性的な傾向の把握と、各溶接工程における変形量の定量的な評価は極めて困難であった。そのため、造船分野では品質管理の要求精度を満たす計測手法について研究が進められている。しかし、これらの既往研究では、1つの溶接工程前後の変形を比較しており、複数ある工程ごとの変形を実際の溶接工程ごとに計測した例は少ない。また、実際の造船工場における計測精度や、計測精度に影響を与える因子について言及しているものは少ない。以上の議論に基づき、本研究では造船工場における実際の工場環境内における計測精度を調査するとともに、計測精度への影響因子と精度への定量的な影響を考察した。さらに、ハッチカバーの建造工程に着目し、溶接工程の進展に伴うハッチカバーの変形を追跡的に調査した。

本論文は次の6章から構成されている。

第1章では、研究の背景と目的について述べた。

第2章では、造船分野における三次元計測器の概要と精度管理への利用の既往研究を整理したうえで、本研究の位置づけを説明した。

第3章では、計測対象であるハッチカバーについて建造工程と計測可能なタイミングについて整理した。対象となるハッチカバーの大きさは、縦18m、横8m、高さ0.8mである。初期工程では、完成時と上下反転の状態が設置されており、途中で部材が反転されて完成時と同じ方向になる。また、工場内の環境として、工場内は狭く両側に壁があり、周辺に他の部材が配置されていた。計測機材の設置位置と観測時間は厳しく制限されており、計測可能時間は溶接工程の間となり1計測で1.5時間～2.0時間程度であった。計測対象の工程は仮溶接から歪取り溶接までの5工程とした。計測作業は2014年と2015年に同じ部材を対象として実施した。

第4章では、TSを用いたハッチカバー計測として、まず工場内におけるTSの計測誤差を検討した。そのうえで、変形量の解析方法を提案するとともに実際の工場内において計測を実施し、変形量について考察した。本計測にはソキアトプコン社製NET1200（一級TS）を使用した。TSの計測誤差として、機械的誤差、計測機の設置に起因する誤差、視準に起因する誤差、計測ターゲットの設置に起因する誤差を定義し予備実験により定量化した。その結果、造船工場における計測において支配的な誤差は、計測ターゲットの設置に起因する誤差であった。次に問題となるのが計測機器の設置に起因する誤差であった。

計測対象が各工程で移動するため、変形量を工程ごとに比較するためには、ハッチカバー内に基準座標を求める必要がある。今回はハッチカバー内で変形が少ないと想定される四隅を基準とし、計測データに座標変換を実施して変形を比較した。比較結果は、水平と垂直方向を同じ図面に表現してわかりやすい表現方法を提案した。

上記を踏まえて実際の工場内においてハッチカバー計測を実施した。今回はTSと計測ターゲット等を用いることで、狭い工場内にある大規模工業製品の変形を把握した。特に、計測精度を維持したまま計測速度を向上させたため、これまで実施されることが少なかった各工程の変形を明らかにすることができた。また、ハッチカバー内の端部測定点を座標変換の基準点とすることは、工程ごとの変形傾向の比較に有効であった。特に、座標変換をブロックごとに実施することで、変換用基準点が大きく変形したときでも、基準点から離れた計測点の変形量を正しく表現することができた。変形量の可視化については、高さ方向と水平方向の変動を同じ図面の中で表現することで、空間的な変形を把握することができた。

定性的には複数の観測点で測定されたTSデータを、それぞれ異なる独立した座標系で管理することで、工程ごとの変形傾向を把握できた。定量的にはmmオーダーの変形が測定可能であることを確認した。同一のハッチカバーを追跡的に計測し、工程間の計測結果の差分を取ることで、計測ターゲットの設置に起因する誤差を除外することが可能となり、溶接変形量の抽出精度を向上させる手法を提案した。さらに、この手法を用いることにより、工程毎の変形の様子を定量的に把握することができた。

第5章では、TLSを用いたハッチカバー計測として、まず工場内におけるTLSの計測誤差を検討した。そのうえで、実際の工場内において計測を実施し、変形量について考察した。本計測には、フェイズシフト方式のFaro社製Focus3Dを使用した。計測パラメータは分解能と品質で設定が可能である。TLSの誤差として、機械的誤差、計測パラメータ、合成、計測対象までの距離と入射角度、点間隔・点密度と定義し、予備実験により定量化を行なった。

その結果、奥行方向の精度はパラメータを変化させても大きく変化しなかったが、水平方向はパラメータと入射角により変化した。計測精度と計測時間より最適なパラメータを決定した。TLSの配置と合成の精度確認の結果、TLSは対角配置だと片側の点密度が少なくなってしまうため、全体を囲うようにTLSを配置することとした。また、合成作業は計測ターゲットを対象物の外、その中と外に設置した場合でも精度を確認することができなかった。そのため、異なる面における合成作業は行わずにCADモデルと面ごとに直接比較することで合成の誤差を除外した。

さらに、今回の計測条件において精度が確保される計測範囲を導きだした。計測結果の方向として計測面に対して3方向（水平、垂直、奥行）があげられるが、奥行方向はメーカースペックと同等レベルの高い精度が確保されることを確認できたが、水平と垂直方向については点密度の影響を受けて

精度が低下した。そのため、今回のような近距離で入射角度が悪化するような環境では、TLS の計測結果は奥行方向のみ使うことが望ましく、水平方向・垂直方向や端部については点密度とノイズの影響を受けるため高い計測精度が望めない。さらに、奥行方向の精度についても入射角度が 10 度以下となる場合は、精度の低下が確認された。メーカーからの推奨入射角度は 60 度以上となっているため、それと比べればかなり広い範囲で利用することができるが、10 度以下とならないように TLS を設置するなどの対応が必要となる。

上記を踏まえて実際の工場内においてハッチカバー計測を実施した。その結果、計測面全てにおいて自動溶接前に面外変形は発生した。その変形量が各工程で変化しながら歪取溶接後まで残存した。各工程における特徴のある変形としては、手動溶接 1 後と手動溶接 2 後に Fore,Aft,Side で変形拡大した。手動溶接 1 では全体の外枠を溶接しており、手動溶接 2 では外枠に対して部分的な溶接が実施されたためと考えられる。すなわち、外枠の熱収縮とその内部の熱収縮の違いにより発生した。これは、TS で明示されていない傾向であった。

第 6 章では、5 章までの結果を総括し、今後の課題とそれを解決するための方針を述べた。

本論では造船分野における溶接工程の品質管理を目的として、三次元計測機器を用いた品質管理手法を検討し、以下の事項が明らかとなった。

TS は、造船工場において計測ターゲットの設置と計測機器の設置の影響が大きいことを示した。計測手法としては、計測ターゲットや L 字ターゲット等を用いることで、計測精度を維持したまま計測速度を向上させることが可能となった。また、変形量の表現方法として CAD モデルと比較するのではなくハッチカバー内の端部測定点を座標変換の基準点とすることで、工程ごとの変形傾向を表現することが可能となった。その結果、mm オーダーの変形が測定可能であることを確認した。同一のハッチカバーを追跡的に計測し、工程間の計測結果の差分を取ることで、計測ターゲットの設置に起因する誤差を除外することが可能となり、溶接変形量の抽出精度を向上させる手法を提案した。さらに、この手法を用いることにより、工程毎の変形の様子を定量的に把握することができた。

TLS の計測精度は、奥行方向について高い精度が維持され、さらに十分な計測精度が得られ範囲として、計測距離が 0.6m 以上となる場合かつ入射角度が 10 度以上と示した。一方で、計測面に対する方向ごとの誤差を調査したところ、奥行方向はメーカースペックと同等の精度であったが、水平方向・垂直方向については要求精度に満たない結果となった。実際の工場内で上記の精度を考慮して TLS による船体部品の計測を行ない、レーザデータと CAD モデルを比較して各溶接工程における面外変形を明らかにした。全体的には TS と同様の傾向を示すとともに、TS の結果では言及されていない面外変形が大きくなる工程を明らかにすることができた。上記の結果を踏まえて、TS と TLS の結果を比較してそれぞれの計測精度と計測可能な変形についてまとめた。