

～短期間大量生産を可能とした上部ジャケットの工程・品質管理について～

ジャケット製作工区 浅田倫弘・立花周作・瀧川浩之・吉田誠太郎・宮坂政司・今野貢・小粥太郎
キーワード：ジャケット，製作，工程，品質，輸送

1. まえがき

栈橋部上部ジャケットは、主要拠点である新日鉄エンジニアリング若松工場(福岡県)・JFE エンジニアリング津工場(三重県)・三菱重工横浜工場(神奈川県)で製作を行ってきたが、平成 21 年 10 月 15 日出荷・海上運搬をすべて完了した。

本稿では上部ジャケットの製作について工程、品質管理および上部ジャケットの輸送について報告する。なお、下部ジャケットの製作・一体化ジャケットについては次回報告する予定である。

2. ジャケットの製作概要

空港島全体約 150ha のうち約 50ha の栈橋部は、総数 198 基のジャケットで構成される。図-1 に栈橋部の標準的なジャケットを示す。上部ジャケット 1 基の大きさは、滑走路平行方向 63m、滑走路直角方向 45m で、6 本の鋼管レグを有する下部ジャケットと一体化される。上部ジャケットは、桁高 2.0m または 2.5m の格子桁構造であり、最大板厚は 75mm である。

上部ジャケットは、主要 3 拠点工場でBH桁製作、工場ブロック製作、塗装、大組立を行い、東京湾沿岸部の一体化ヤードに海上輸送した。製作は、平成 18 年 8 月から材料手配を開始し、同年 12 月の現場外着工指示を受けて加工着手、平成 19 年 9 月に 1 基目の出荷を行い、25 ヶ月後の平成 21 年 10 月に 198 基目の最終出荷を終えた。

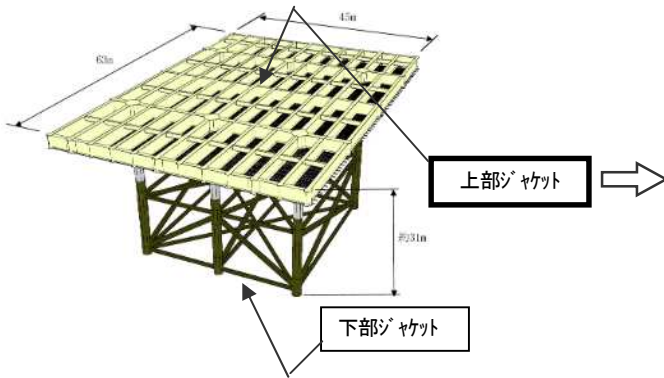


図-1 栈橋部ジャケット構造図

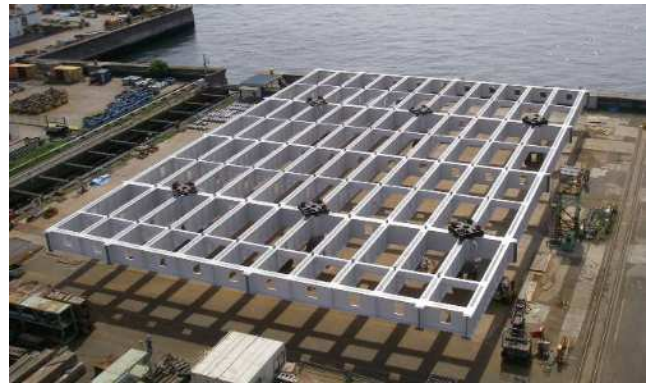


写真-1 上部ジャケット大組立状況

3. 上部ジャケットの製作工程管理

3-1 工程管理の要点

工程管理において、最も重要視したのが、材料手配からジャケット現地据付までの一連の部材供給フローとサイクル工程である。

(1) 材料の安定供給

上部ジャケットは、1 基あたり標準重量約 800 トンであり、総数 198 基で約 16 万トンの製作重量である。鋼材他の主な材料の手配数量は以下のとおりである。

鋼材：約 160,000 t (東京タワー40 基分)

溶材：約 3,100 t 【 1.2 溶接ワイヤー換算で 35 万 km】（地球 9 周分）

塗料：約 920t 【48,000 缶】（缶を積み重ねると富士山の 4.5 倍の高さ）

特に鋼材については、平成 19 年から 20 年に掛けて、世界的な供給不足に陥り、従来ベースの鋼材入手日程の確保が困難になり、材料手配の前倒しなど工程面での対策を講じた。

(2) 出荷日程に合わせた生産計画

出荷日程を確保するため、上部ジャケット(主要 3 拠点)⇒上下部一体化ジャケット(富津・千葉) 羽田への出荷⇒現地据付の全体フローの中で全体最適化を図った。特に、平成 20 年 6 月～平成 21 年 6 月の間の現地据付は、平均 3.4 日で 1 基、つまり平均 9 基/月のペースであり、これは上部ジャケットの平均生産能力 8 基/月を上回るため、上部ジャケット及び一体化ジャケットの保管が必要不可欠となった。そこで、ジャケット保管エリアの確保と輸送工程をリンクさせる管理を重点的に行った。

3-2 標準工程

計画段階での標準的な上部ジャケット 1 基の製作工程は、図-2 に示すように 1 基あたり 9.3 ヶ月間であった。しかし、一時期の鋼材供給の遅れや溶接物量に対する熟練溶接工の不足、超音波探傷試験による検査、溶接品質を満足するための再溶接等により、初期の平均的な実績工程は 13.2 ヶ月間であった。

材料調達については、製作中盤期においてミルメーカーの材料供給に遅れが生じ、1 基分の調達に 6 ヶ月間を超えるケースも生じた。この影響で、出荷工期を守るために実質的な製作期間が圧縮され、一時的な工程混乱を招いた。

さらに、「異形ジャケット」、「疲労ジャケット」は、組立や溶接など工数が標準的なジャケットよりも増加することは、あらかじめ認識していたが、製作初期では、予想を上回る製作期間を要した。

ただし、実際にはこの製作期間を見据えて材料手配を開始し、出荷工程を確保した。

製作後半期では、適切な工程管理と製作修練効果により、工程を 1 ヶ月半程度短縮した。

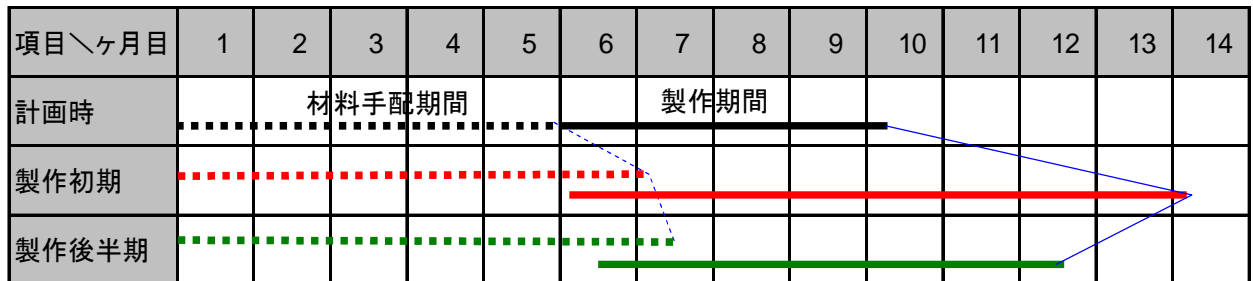


図-2 上部ジャケット製作工程

3-3 製作工程遅延

主要 3 拠点工場における上部ジャケットの製作分担は、図-3 に示すように、当初若松工場 99 基、津工場 50 基、横浜工場 49 基であった。各工場はそれぞれの特徴を活かすため、自動化や部材製作の外製により工程確保・品質確保を行った。

しかし、一部の工場においては厳しい溶接品質基準をクリアできる熟練溶接工の確保や、他受注物件と羽田ジャケット製作工事との重複により、製作工程が計画通りに進まず、平成 19 年 11 月に約 1 カ月半の工程遅延の恐れが予測された。ジャケットの供給が遅れることは他工区の現場工程に多大な影響を与えるため、直ちに関係先との協議に入り J V 全体として工程遅延回避に取り組んだ。以下に主要な対策を述べる。

基本方針	早期に当初計画生産能力を確保する	現地据付工程への影響を最小限にする
JV全体		・ジャケット製作状況を考慮した据付時期及び据付順番の変更
ジャケット製作工区	<ul style="list-style-type: none"> ・製作外製先の追加 ・溶接工及び非破壊検査員の増員 ・自動溶接機の増設（16台→35台） ・上部ジャケット大組立ヤードの増設（8面→13面）（図-4） 	<ul style="list-style-type: none"> ・工区内での製作担当基数の見直し（図-3） ・ピーク時の能力増強のため富津工場にストックヤード増設

表-1 上部ジャケットの工程遅延回復対策

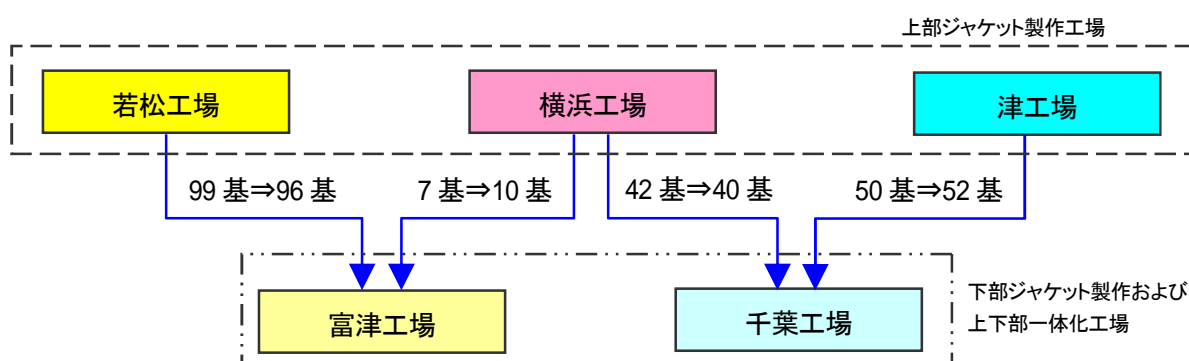


図-3 上部ジャケットの製作分担

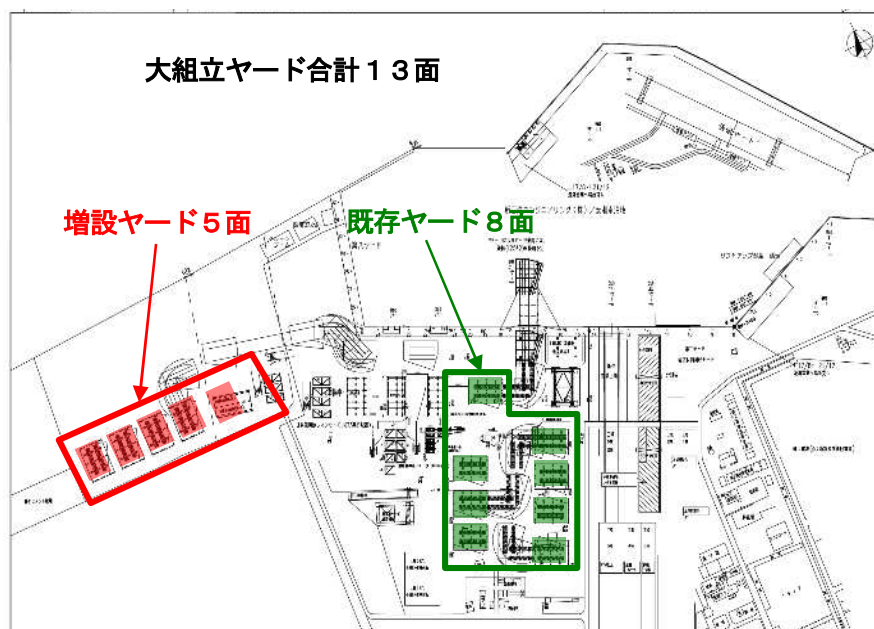


図-4 大組立ヤードの増設（若松工場）

平成20年3月時点において最大12基の工程遅れとなっていたが、上部ジャケットは平成21年3月に、また一体化ジャケットは平成21年5月に当初計画工程を回復した（図-5）。最終的には当初より1～2か月短縮した工程で製作を完了できた。

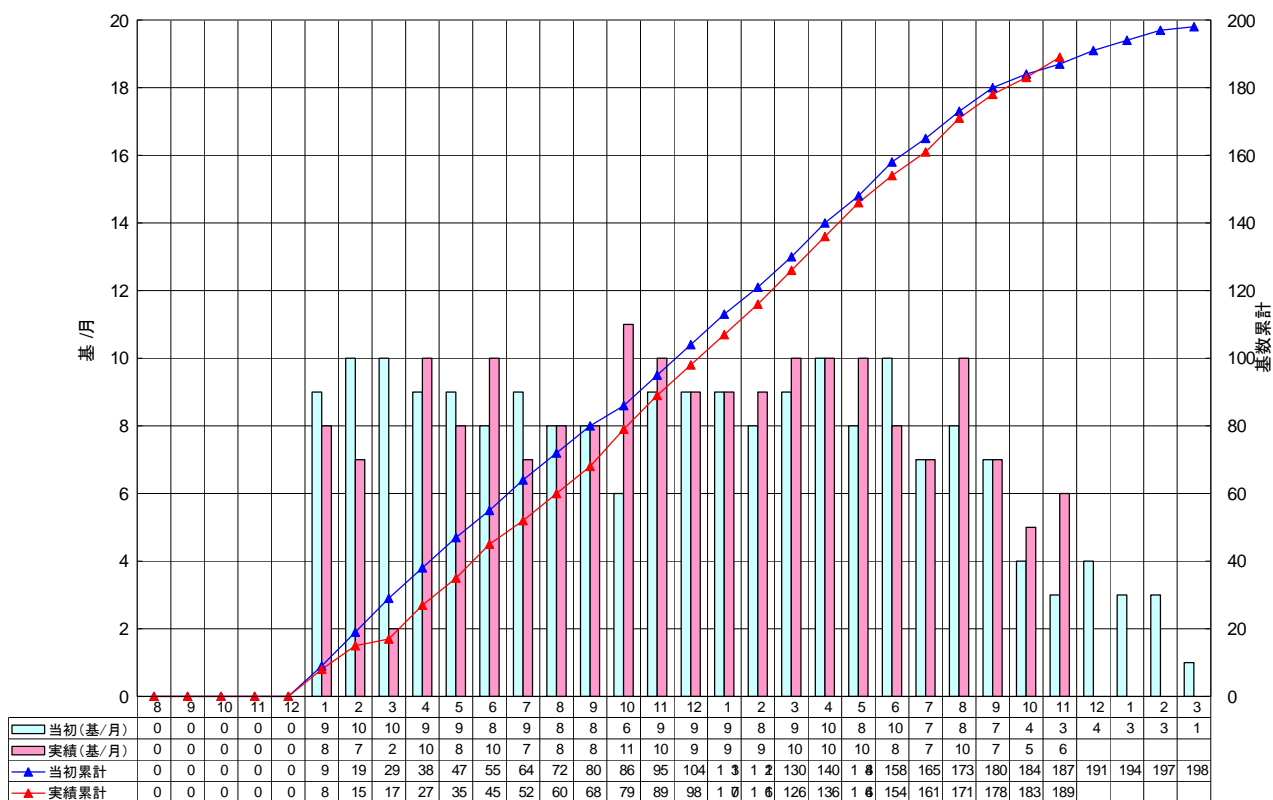


図-5 一体化ジャケットの積み込み・出荷の経緯

4. 溶接の品質管理

4-1 品質管理上のポイント

本構造は、図-6に示すとおり溶接構造物であり、その溶接部は、航空機の繰り返し荷重に耐えうる高い品質が要求される。

非破壊検査を必要とする完全溶け込み溶接の実長は、上部ジャケット全体で約324kmである。これは、東京一名古屋間に匹敵し、手動超音波探傷装置での実質探査時間に換算すると、16万時間（月換算：4,800h）に及ぶ。また、高度な判定が要求されるために、その技量を有する非破壊検査技師の確保も重要である。

このことからわかるように、本工事のポイントは溶接品質を短時間で確実に保証することである。そこで、以下の内容について取り組んだ。

- 1) 溶接施工の自動化
- 2) 非破壊検査の自動化・高速化

溶接の自動化については、首溶接部のタンデムサブマージアーク溶接（TSAW）を採用し、それ以外の部分では全自動炭酸ガスアーク溶接機（スイング石松）による施工とした。

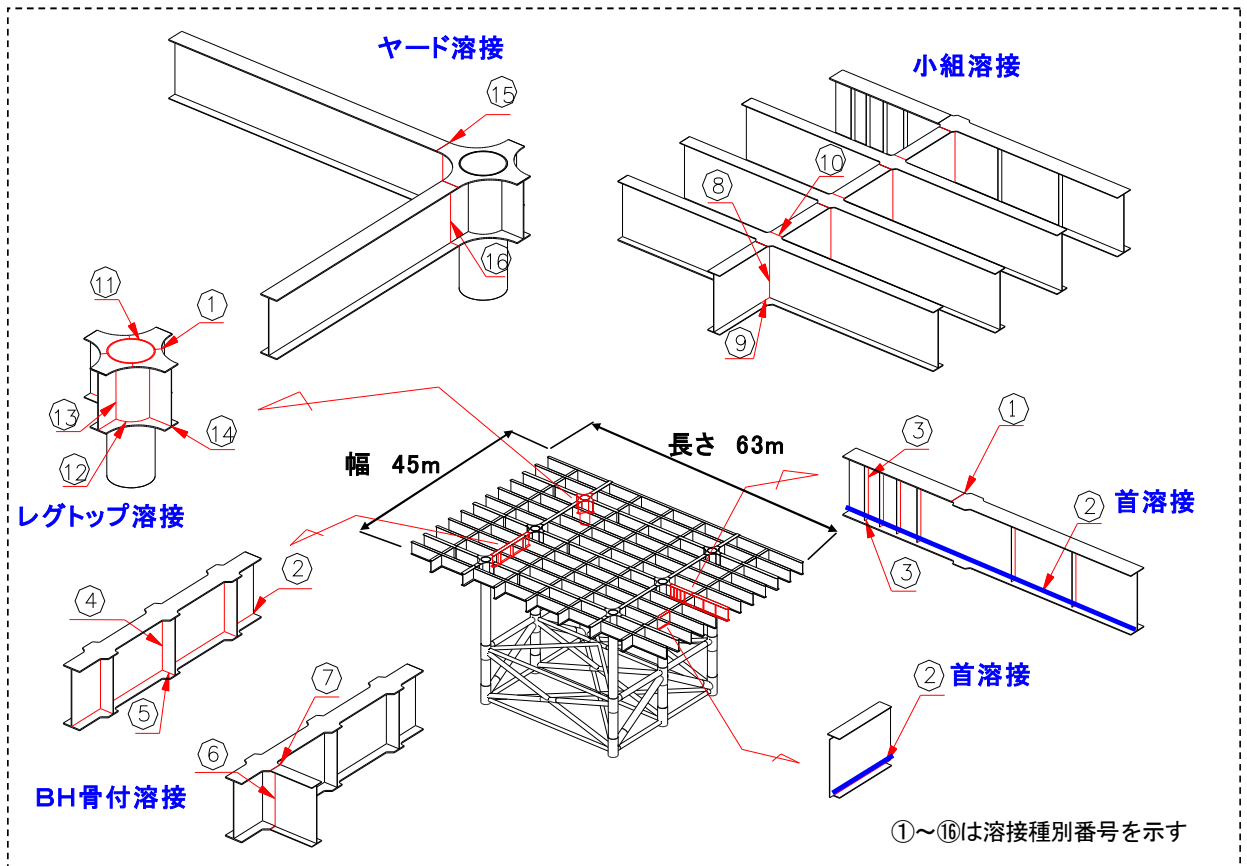


図-6 上部ジャケット溶接概要図

4-2 溶接施工の自動化

(1) 首溶接の溶接施工方法

本溶接部位は全体溶接の 46%を占めるため、事前に十分な施工方法の検証を行い、結果的に初回検査時の非破壊検査合格率は 99%を超える高い合格率を保持した。

非破壊検査合格率は、下記に示す算式による。

$$\text{合格率 (\%)} = \frac{(\text{検査長} - \text{きず指示長さ}) (\text{mm})}{\text{検査長 (mm)}} \times 100$$

※なお、本合格率は補修前の値であり、最終的には全て 100%である。

①開先形状及び溶接ポジションは下記に示すとおりとした。

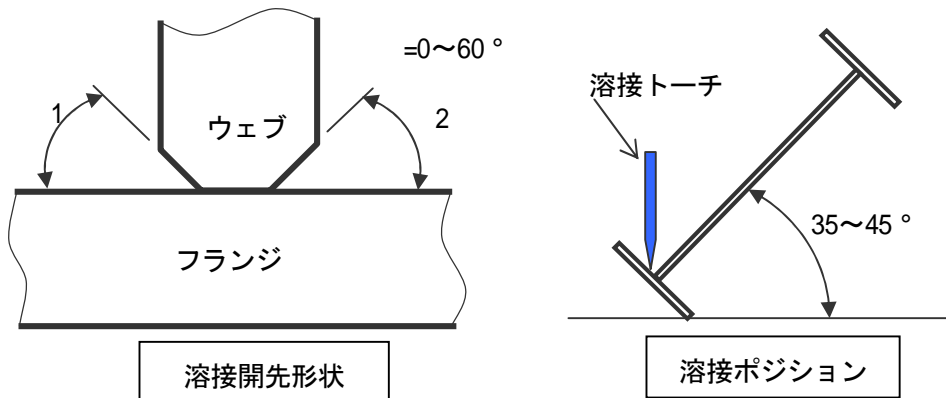
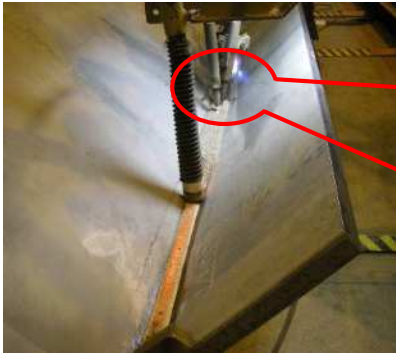
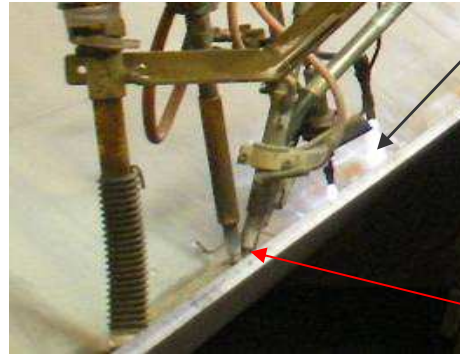


図-7 溶接開先形状と溶接ポジション

②タンデムサブマージドアーク溶接機



首溶接施工状況写真



予熱バーナー

2本のトーチ
(タンデムトーチ)

バーナー・トーチ部詳細

写真-2 首溶接施工状況写真

(2) ブロック溶接施工法

ブロック溶接については、技量レベルによる品質のバラツキを極力抑えるために、溶接施工の機械化を実施した。その一例を紹介する。

①スイング石松【長菱エンジニアリング(株)】

特徴

- 1) 開先形状、板厚、終始端の全自動センシングが可能。
- 2) テーパーギャップの変動に対応可能。
- 3) 溶接条件を適正に調整可能。



上フランジをスイング石松にて、溶接。



写真-3 首溶接施工状況写真

4-3 溶接施工の改善

溶接施工の自動化のほかに、工程確保と品質向上のために表－2に示す溶接施工の改善方法を継続的に実施した。

表－2 溶接施工の改善方法

改善項目	改善の詳細内容
溶接施工法の改善	(1) 自動溶接機の積極的な導入 (2) 溶接施工者の技量に左右されにくい溶接施工法を選定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 自動溶接機の適切な選定（小型化／自動溶接範囲の拡充） ・ 溶接姿勢の改善（下向き姿勢優先の計画／ターニングローラーの採用）
溶接施工要領の改善	(1) 溶接欠陥の分析に基づく施工条件の再設定 <ul style="list-style-type: none"> ・ 次層溶接時の細やかなケア（凹凸の処理） ・ ビード継ぎ箇所最小化，ターン溶接 (2) 溶接欠陥の種類，発生原因を分析 <ul style="list-style-type: none"> ・ 部位単位の適切な材料選定（ソリッドワイヤーの採用） (3) 溶接電流，狙い位置，ワイヤー径などの溶接パラメータの再設定 (4) 溶接条件に適した溶接材料の改良 <ul style="list-style-type: none"> ・ 溶接材料メーカーとの共同研究（フラックスの改良）
溶接施工者の技量向上	(1) 技量向上トレーニングの実施 <ul style="list-style-type: none"> ・ 実施工を反映した供試体による溶接施工試験 (2) 溶接施工者の技量に応じた適正配置 <ul style="list-style-type: none"> ・ 溶接技量の適正な評価・分析と表彰制度による意識の高揚 (3) 溶接施工者の習熟効果 <ul style="list-style-type: none"> ・ 熟練溶接工による技術指導
溶接施工技術の水平展開	(1) 各製作工場技術者による溶接事例の水平展開 <ul style="list-style-type: none"> ・ 溶接材料の品質状況共有と積極的な採用 (2) 製作工場間の技術交流（溶接技術者と作業者の視察）

溶接施工については、特に目視確認できない内部きずを減少させることに注力した。内部きずには、「スラグ巻き込み」「融合不良」「ブローホール」「溶接割れ」などがあるが、製作初期段階での内部きずの約半数が「融合不良」であると考えられる。

滑走路直下など航空機荷重载荷のある完全溶け込み溶接部については、内部きず判定基準の許容値は板厚の1/6以下となっており、それ以外の部分は同じく板厚の1/3以下である。製作初期の段階では、不合格きず全数のうち、板厚の1/6を越え1/3以下のきずの比率が約70%を占めていた。

表－2に示す溶接施工の自動化，溶接施工の改善により，製作工程後半期は初回検査時の非破壊検査合格率が98～99%の合格率となることに伴い，不合格きず絶対数も減少した。さらに，板厚の1/6を越え1/3以下のきずの比率も当初の約70%から30%～60%に減少し，的確な溶接施工と品質管理の継続により予定通りの工期で製作完了させることができた。

4-4 非破壊検査の自動化・高速化

上部ジャケット製作の溶接管理において，溶接部の検査方法は品質確保の観点から非常に重要な項目である。本工事では，前述のとおり，非破壊検査延長が膨大な長さとなるため，主要部の内部きず検査方法

は以下の理由から超音波自動探傷装置（AUT）を採用した。

- 1)検査レベルの向上と安定
- 2)検査処理速度の向上

本工事で使用する機種についてはAUT性能確認試験を行い、また従来手法との比較も行い、本工事に要求される品質確保が可能と評価した機種を選定した。表-3に各工場で採用したAUT機種を、図-8にAUTの標準仕様部位を示す。なお従来の超音波手動探傷装置（MUT）は、AUTの探傷が困難な曲線部や端部の検査長が短い区間に適用した。

表-3 AUT使用機種の一覧

工場\溶接箇所	突合せ溶接	T型継手		
		BH桁（首）	ヤード部	レグトップ
若松工場	U-Master	U-Master	U-Master	U-Master
	USI-	USI-	USI-	USI-
津工場	VOICE-	VOICE-	VOICE-	VOICE-
横浜工場	VOICE-	VOICE-	OmniScan	USI-

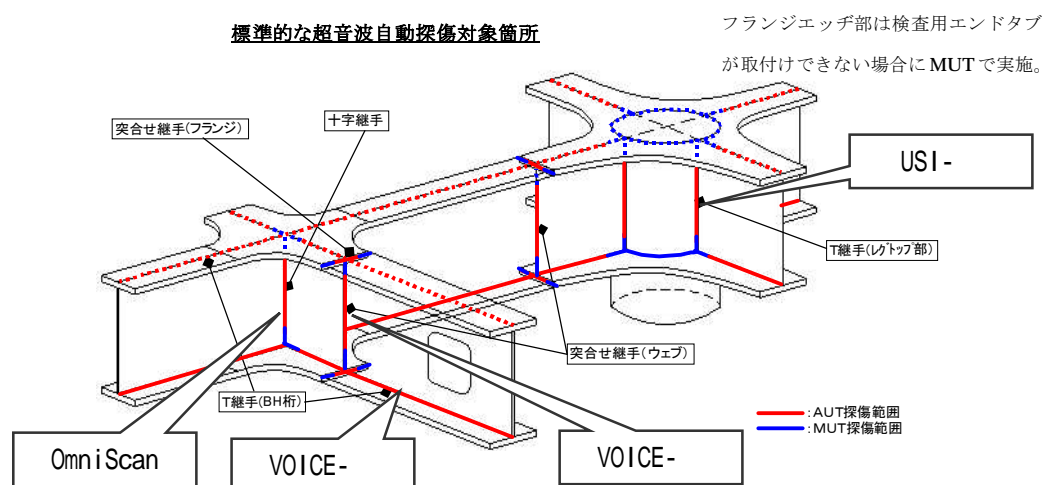


図-8 AUTの部位別使用機種（部位別に使用機種の異なる横浜工場の例を示す）

以上のような自動探傷装置の適用により工程内に確実に溶接品質を確認することができた。

しかしながら、従来に比べかなり高い検出感度（L/2 検出レベル）で探査しているため、不合格と判定した部位を補修する段階で、作業者の肉眼ではきずを確認できないケースがあった。この原因は、単純に作業者がきずを見失ったことも考えられるが、事前に行われたAUT性能確認試験でも発生した20%~30%の誤検出（きずではないが、きずと判定してしまうこと 1)）の可能性もある。以上の状況は、限られた条件の中で確実にきずを検出するために現状の方法が最善と判断した結果、生じた現象である。この問題については、今後の課題として捉えておく必要がある。

5. 上部ジャケットの拠点間輸送

5-1 上部ジャケット海上輸送の概要

拠点工場で製作した上部ジャケットは、図-9、10に示すルートで一体化を行う新日鉄エンジニアリング富津工場と JFE エンジニアリング千葉工場に海上輸送した。表-4に各ルートの距離、輸送回数等の輸送実績を示す。最長の海上輸送は若松工場から富津工場までの 550 マイル(1,019km)で、この区間を平均で 4.75 日、最長で 8 日をかけて輸送した。

上部ジャケットの海上輸送は、2007 年 9 月 16 日の横浜工場～千葉工場の輸送を皮切りに、2009 年 10 月 15 日の横浜工場～富津工場の輸送完了まで 25 か月間、83 航海に及んだ。

上部ジャケットを積載した航海距離は

18,832 マイル(34,877km)、帰りの空船回航を考慮すると地球 1.7 周分に相当する航海距離となった。また、上部ジャケット輸送の 83 航海すべてが曳航全長 200m を超える長大物件曳航（曳航全長：湾内約 240m、外洋：約 650m）であり、関係海上保安本部への事前の曳航制限の免除許可取得、各マーチス（東京湾海上交通センター、関門海峡海上交通センター、伊勢湾海上交通センター、大阪湾海上交通センター）への事前通報、および法定警戒船の配備等の対応を行い海上輸送を実施した。

外洋曳航を伴う若松、津および大阪からの輸送に使用した台船は 13,000t 積級台船 2 隻、東京湾内の輸送はこの 2 隻に 6,000t 積級台船を加えた 3 隻を使用した。13,000t 積級台船には 1～4 基の上部ジャケットを積載し、6,000t 積級台船については 1 基を積載して拠点間輸送を行った。



写真-4 上部ジャケット輸送状況（東京湾内）【長大物曳航状況】



図-9 上部ジャケット輸送ルート（東京湾外）

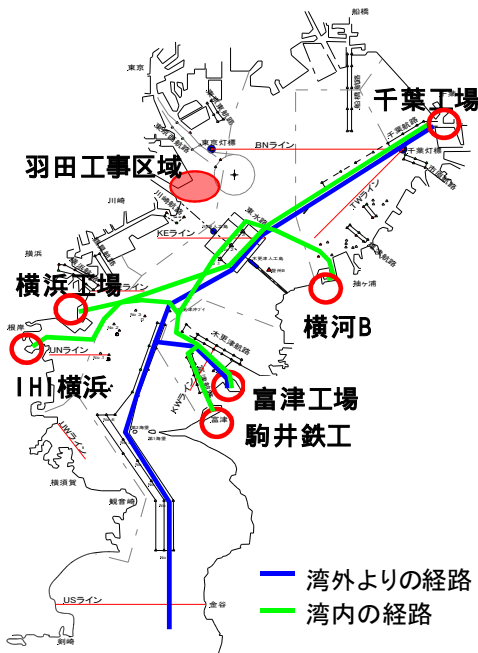


図-10 上部ジャケット輸送ルート（東京湾内）

表-4 上部ジャケット輸送実績

輸送区間	輸送回数	輸送距離	平均所要時間	最早実績
	輸送基数			最遅実績
若松工場 ～富津工場	25回	5.6マイル	4日18時間	4日1時間
	80基	10.9Km		8日0時間(*2)
津工場 ～千葉工場	19回	2.0マイル	1日19時間	1日8時間
	52基	3.7Km		2日1時間
大阪工場 ～富津工場	2回(*1)	3.8マイル	3日0時間	2日22時間
	2基	6.6Km		3日1時間
横浜工場(IHI含) ～富津工場	7回	11マイル	2.5時間	-
	12基	20Km		-
横浜工場 ～千葉工場	21回	23マイル	4.5時間	-
	40基	43Km		-
袖ヶ浦工場 ～富津工場	9回	17マイル	3時間	-
	9基	31Km		-
富津(駒井) ～富津工場	1回	7マイル	1.5時間	-
	1基	13Km		-
合計	83回	188.2マイル	空船回航を考慮すると総航海距離は69,754Km = 地球1.74周	
	10基	3,477Km		

(*1) 2回の内1回は、若松工場にて上部ジャケット3基積載後、大阪工場にて1基を積載し、以後4基積みで富津へ輸送した。

(*2) 田辺湾に台風避泊

5-2 安全航行と工程維持のための方策

上部ジャケットの約70%が東京湾外での製作であり、全83回の上部ジャケット輸送の内45回が外洋航行による海上輸送であった。海上輸送とりわけ外洋における海上輸送は、気象・海象の影響を大きく受ける。このため安全航行とジャケットの製作工程に支障を及ぼすことのない拠点間輸送実現ため以下の方策を実施し、航行安全と工程維持に対応した。

第三者機関による安全性の確認

輸送中のジャケットは台船の甲板上の配置された輸送架台上に積載され、荷崩れを防止するための固縛を行う。その固縛方法および輸送架台は、安全性を十分確保され、かつ過大すぎるものとならないよう適切な設計を行わなければならない。

上部ジャケットの固縛設計に使用する輸送中の動揺加速度等の条件は、第三者機関（(社)日本海事検定協会）が、台船の大きさ、喫水量、曳航ルート、曳航時期および曳航中止基準等を考慮に入れ算定した加速度式を使用した。また、固縛設計計算書および固縛図面もこの第三者機関の照査を受け安全性を確認した。

さらに固縛実施後の固縛検査、使用する曳船や曳航属具等についても曳航開始前にこの第三者機関の検査を受け、安全性の確認ができた後、海上輸送を実地した。

起重機船を使用しない水切工法

羽田空港新滑走路の建設期間中は大型起重機船の稼働が非常に多く、上部ジャケットの水切りを起重機船で行う場合、起重機船を安定的に確保し輸送工程を維持することが困難であった。このためユニットドリーを使用したロールオフ 2) による水切工法を採用し、大型起重機船の工程変更が上部ジャケット輸送工程に与える影響を小さくした。

輸送台船の互換性の確保

上部ジャケットの輸送は主に13,000t積級の2隻の台船「深洋」と「第二芳洋」を使用し、基本計画では、「深洋」は富津工場向け、「第二芳洋」は千葉工場向けとした。富津工場と千葉工場での水切りは共にロールオフ工法であったが、富津工場と千葉工場では岸壁前面の水深が異なるため、台船と岸壁をつなぐ渡り桁（ランプウェイ）の形状が違う。したがって、台船船尾のランプウェイ取付形状

が異なるため、本来ならば台船の仕向け先工場を入れ替えることは出来ない。しかし、荒天やトラブル対応時の工程維持のため、13,000t 積級台船 2 隻の入れ替えが可能となるよう台船船尾を事前に改造した。

結果的に、荒天等により 2 隻の台船がそれぞれ 2 回づつ基本計画と異なる工場に上部ジャケットを輸送し、輸送台船の互換性の確保がジャケットの製作工程を維持することに寄与した。

固縛・解縛時間の短縮 ～ユニブロックの利用～

固縛と解縛を繰り返す今回のジャケットの輸送に関しては、その固縛・解縛時間の短縮が重要な改善課題であった。一般にジャケットの固縛はジャケット本体と架台あるいは甲板を固縛材(鋼材)で溶接する。溶接で固縛を行った場合、固縛・解縛に時間がかかり、台船の出発日時や上部ジャケットの水切り開始時刻の自由度が小さくなる。また、油圧ジャッキを使用した場合はコストが非常に大きく、長期間海上で使用するため機械的なトラブルも危惧される。



写真-5 ユニブロックによる固縛状況

この問題を解決するために、山留工法で用いられる機械式のジャッキ(ユニブロック)を使用した固縛を案出した。ユニブ

ロックは油圧式ジャッキに比べ非常にシンプルな機械構造であるため、ストロークは小さいものの軽量な上に取扱いが簡単で、レンチ等で容易にストロークを調節することができる。

このユニブロックを使用することにより、固縛・解縛作業を大幅に簡略化、短時間化することができた。

固縛準備日数の短縮 ～異型ジャケット用輸送架台の工夫～

棧橋ジャケット 198 基の内 170 基は標準ジャケットと呼ばれるレグの位置が一定のジャケットである。残りの 28 基は異型ジャケットと呼ばれ、レグの位置が標準ジャケットと異なっている。ジャケットの海上輸送は、このレグを架台で支持するため、異型ジャケットの輸送に際しては、異型ジャケット用の架台を台船の甲板に設置しておかなければならない。一方、富津工場と千葉工場では、上部ジャケットの水切りをロールオフで行うため、異型ジャケット用架台がユニットドリーの走行帯にあると障害になる。したがって、異型ジャケット用架台の設置・撤去は、台船の航行と積込・水切りの合間を使って、短時間で行う必要がある。

異型ジャケット用の架台を短時間で設置撤去でき、かつ繰り返し使用を可能とするため、台船甲板の骨組を考慮した汎用的な異型ジャケット用架台を製作した。また、標準ジャケットとわずかにレグ位置が異なるジャケットへの対応として、標準ジャケット用の輸送架台は上下二段とし、下段は台船甲板に溶接固定、上段は下段の架台上を移動可能な構造とすることで対応した。



写真-6 上部ジャケット輸送用の架台 (左: 異型ジャケット用架台, 右: 標準架台)

気象・海象状況の把握

輸送台船の出港前および航行中は、複数の気象・海象予報を入手分析し、曳航可否の最終判断を行う主曳船船長に情報の提供と助言を行った。

輸送中の台船の避泊場所は図-9に示す5カ所を設定したが、若松工場からの台船輸送に関しては、伊勢湾までたどり着ける3日以上連続した曳航可能日が予想されることを出港の条件とした。一方、若松以外の拠点工場については、仕向け工場まで荒天に遭遇しないことを出港の条件とした。

ジャケット輸送時の避泊の実績は、若松工場からの輸送台船が天候急変により田辺湾に2回、伊勢湾内に1回である。他の拠点工場からの輸送台船は避泊を行わなかった。

輸送船団の動静把握と情報提供

航行中の輸送船団はGPSを利用した船舶航行監視システムを用い、船団の位置、速力等を24時間体制で監視した。また、主曳船から1日2回(8:00,16:00)定時連絡を受け、位置、速力のほか、気象・海象状況、視程、JASREP 3) 通報等の確認を行った。この船舶航行監視システムと主曳船からの定時連絡の情報は、東京湾航行安全情報センターのホームページにて関係者に情報を提供した。さらに、各工場への出入港の際には、関連海上保安部、港湾利用者協議会、ポータルラジオ等に連絡し、水路通報への記載や協議会を通じた周知等を行ってもらうことで、水域利用者への情報提供に努めた。

6. あとがき

本稿では、上部ジャケットの製作実施工程と品質管理の計画と実績および上部ジャケットの輸送について紹介した。

下部ジャケット・一体化ジャケットについても完了間近であるが、引き続き適切な溶接管理と品質管理、据付工程を踏まえた効率的な生産管理を実施しているところである。

参考文献

*1) 土木学会論文集No731 2003.4

鋼橋溶接部の非破壊検査のための超音波自動探傷システムの性能確認 三木千寿

*2) 第4回技術報告会資料 6-9,6-10 参照

*3) 日本の船位通報制度 (Japanese Ship Reporting System)の略で、船舶から現在位置や針路、速力などの通報を受けて管理し、その船舶に海難等が生じた場合、その位置の推測を可能とする制度。