

当論文は、日本プラントメンテナンス協会（JIPM）の2013年度TPM優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

#### 要旨

東日本大震災の復興支援として、ヤマハ発動機（以下、当社）では和船の大増産を展開したが、それと同時に増産した舟艇の輸送能力の強化が求められた。

そこで、3次元CADやCAE解析を活用し、新たに2段積みラックを3ヶ月という短期間で開発した。その結果、輸送能力は2倍になり、商品のタイムリーな供給が可能になっただけでなく輸送コストの50%削減も同時に実現した。

#### Abstract

As a form of support for the restoration of the regions stricken by the Great East Japan Earthquake and Tsunami, Yamaha Motor Co., Ltd. greatly increased production of utility boats in order to replace those lost or destroyed in the disaster. To accommodate this increase in production, there was a concurrent need to strengthen boat transport capabilities.

In response to this need, we employed 3D CAD and CAE analysis to develop a new transport rack for transporting two boats stacked one upon the other, within a short period of three months. As a result, transport capacity was doubled, and the method not only enabled timely supply of the products but also reduced transport cost by 50% at the same time.

## 1 はじめに

東日本大震災の後、船舶需要が急増し、当社では復興支援として通常の生産規模の10倍前後の「空前の大増産」を行うこととなった。

それに伴う生産工場の再編で、生産工場を北海道から西日本に移管した製品もあり、輸送量の増大・長距離化・高コスト化に対応した輸送能力の強化が求められた。



ヤマキ生産時に比べ、輸送費が2倍になった

図1 生産工場の変更と輸送の長距離化

その中で大型和船は、生産数の大幅な増加に加え、輸送距離も2倍になった(図1)。その一方で、輸送には特殊なト

レーラーを使用するために、機材確保などに課題があった。

輸送効率を向上させるためには、大型和船を2隻同時に運ぶことが有効であるが、従来のプロセスでこのようなシステムを開発するには多くの時間を必要とする。そこで今回、3ヶ月という短い開発期間で機材を開発するために、3次元CADやCAE解析を活用するとともに、工場担当者・輸送担当者へ早い段階で設計レビューを徹底することで、新たな2段積みラックの開発を目指した。

## 2 輸送方法の検討

### 2-1. 大型和船W35の緒元と輸送機器

今回輸送する和船は、W35と呼ばれる重量1.6トン、長さ10.5mの大型舟艇(図2)で、輸送は大型のトレーラーを使っている。

### 2-2. インフラの状況と荷扱いの制約

大型和船の積み下ろしには、フォークリフトかクレーンが必要であるが、現地の港湾は津波で破壊され、クレーンが使用できない。また、大型のフォークリフトも使えないために、3トン

Development of a two-boat stacked transport method to support the restoration of tsunami-affected areas with utility boats

クラスのフォークリフトの適用が前提となる。

さらに、現地で荷扱いの担当者が不在の場合を想定し、トレーラーの運転手がひとりでオペレーションできる方法を考える必要がある。

構造が異なる複数のトレーラーを活用できる輸送方法を考える必要がある(図3)。

2-4. 輸送方法選択

これまで、船の輸送能力を向上する方法として、段積輸送が採用されてきた。

主な方法は以下2種類がある。

① 専用ラック方式

段積み用の専用ラックに船を入れる方法(図4 左・中)

② 門柱方式

トラックに門型の柱を立てて2段に積む方法(図4 右)

大型和船を段積みする上で、①の専用ラック方式は、船を高く吊るし、上側からラックに入れる必要があるため、クレーンや大型のフォークリフトが使用できない今回のケースでは、採用できない。一方、②の方法は、荷台の柱用の穴を使うことができ、トレーラーの荷台の構造の違いに影響されないことからこの方法を採用した(図5)。



図2 大型和船 W35 の主要諸元

2-3. 輸送機材

四国からは、復興和船W35以外の舟艇も出荷されており、その一部はトレーラーによって輸送される。そのため、荷台の

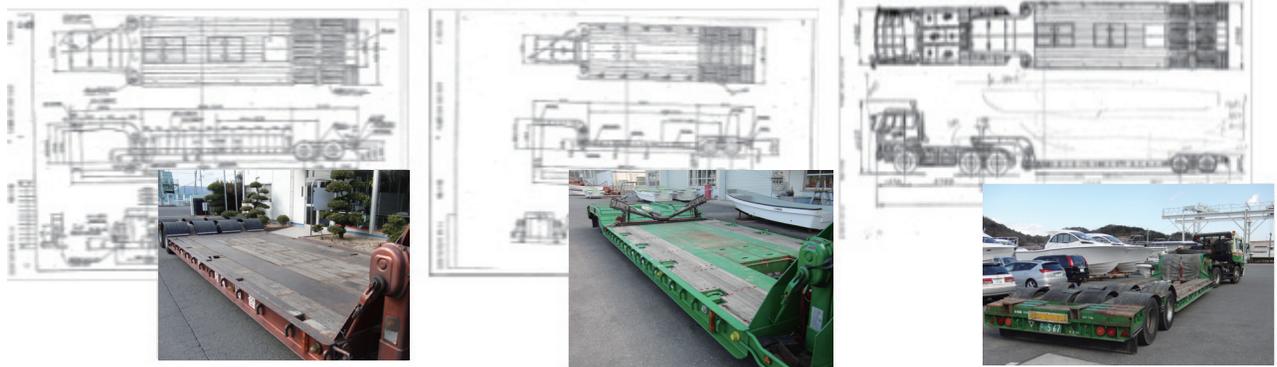


図3 使用予定のトレーラー3種



図4 段積み方法

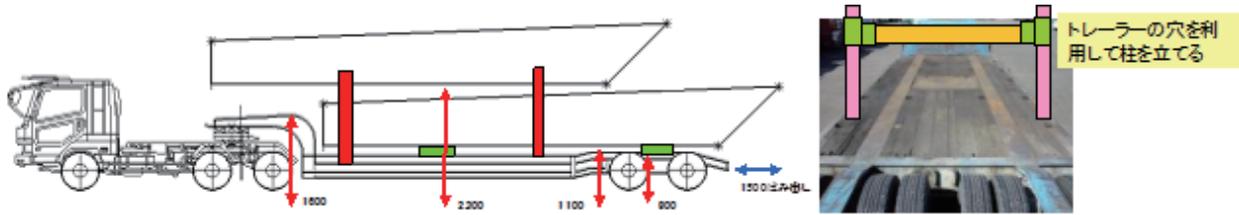


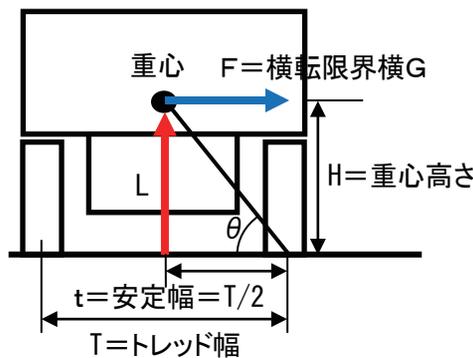
図5 門柱方式

【トレーラー輸送実験のコンテナ床面での発生加速度基本統計値】

	上下方向	前後方向	左右方向
最大値	11.24	3.73	3.74
最低値	1.06	0.15	0.26
平均値	2.29	0.36	0.54

単位 G：重力加速度

表1 トレーラーにかかる加速度



重心高さ(全体):モーメント法

$$H = \frac{\text{トラクター重心} \times \text{トラクター重量} + \text{トレーラー重心} \times \text{トレーラー重量} + \text{積載物重心} \times \text{積載物重量}}{\text{トラクター重量} + \text{トレーラー重量} + \text{積載物重量}}$$

転倒限界横G

$$\text{横G}(V^2/R) = \frac{\text{重量加速度}}{\tan \theta} = \text{重力加速度}g \times \frac{\text{安定幅(トレッド幅)/2}}{\text{重心高さ}}$$

図6 転倒限界横G

### 3 開発目標

#### 3-1. 強度基準

輸送機材を設計する上で、機材の耐荷重値・耐衝撃値を決める必要がある。

今回は、設計の条件として、国土交通省が行ったトレーラーの輸送試験<sup>11)</sup>のデータを元に耐衝撃値を設定した(表1)。

#### 3-2. 輸送の安全性

大型の和船を段積みするために、重量の増大に加え、重心も高くなることで、横転事故の危険性が高まることが考えられる。一般的に、横転のしにくさは、「転倒限界横G」(図6)で評価されており、これを基準に走行安定性の評価を行った。比較対象としては空の40ft HC(フィート ハイキューブ)のコンテナを積んだトレーラーを設定し、トレーラーの「転倒限界横G」を上回ることを目指した。

### 3-3. 輸送コスト削減

対象となる和船の生産拠点工場は、北海道から西日本に移管されたため、輸送コストが2倍となることから、輸送コストの半減を目指した。

## 4 開発のポイント

### 4-1. 強度の作りこみ

#### 4-1-1. 機材の構造と諸条件

門型の構造で、道路交通法の車両の寸法規定をクリアするには、図7のような積載が必要である。船体幅が広いと、積載時のクリアランスを考慮すると、柱の幅方向の厚みは50mmしか確保できず、柱は細くなり、剛性面で不安がある。

また、機材には和船重量の静的な荷重に加え、加減速の加速度や、コーナーリング時の横方向の加速度による動的な荷重、さらに、路面の荒れなどによる衝撃がかかる。そこで、必要な機材の強度を知るために、設計の初期段階から構造解析を行った。

#### 4-1-2. 構造解析を使った設計検討

設計の第一段階として、一般的に入手できる鋼材を使用し、門型を作った場合の静的荷重と動的荷重を評価した。柱の断面は、トレーラーの取り付け穴の断面サイズをもとに、L100mm×W50mmとした。

構造解析の結果、角柱の厚みを最大の6mmにすれば、安全率を見込んだ静的荷重は満たすが、動的荷重は確保でき

ないことがわかった(図8)。

そこで、前後方向の加減速に関しては、輸送車両の進行方向にワイヤーを張る張力構造にすることで、耐荷重を向上させた。

左右方向の加速度に関しては柱側面に厚いパネルを貼って、剛性を上げることで必要な強度を確保した(図9)。

上下方向には、左右方向に比べ大きな加速度が発生することで(表1)、柱が中央に向かってたわむ力がかかるため、そのための強度が必要であるが、先ほど行った柱側面へのパネルの追加によって、必要な強度が確保されていることが確認できた。

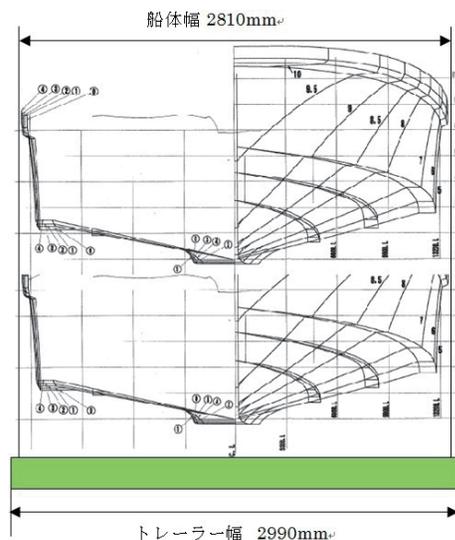


図7 柱の寸法制限

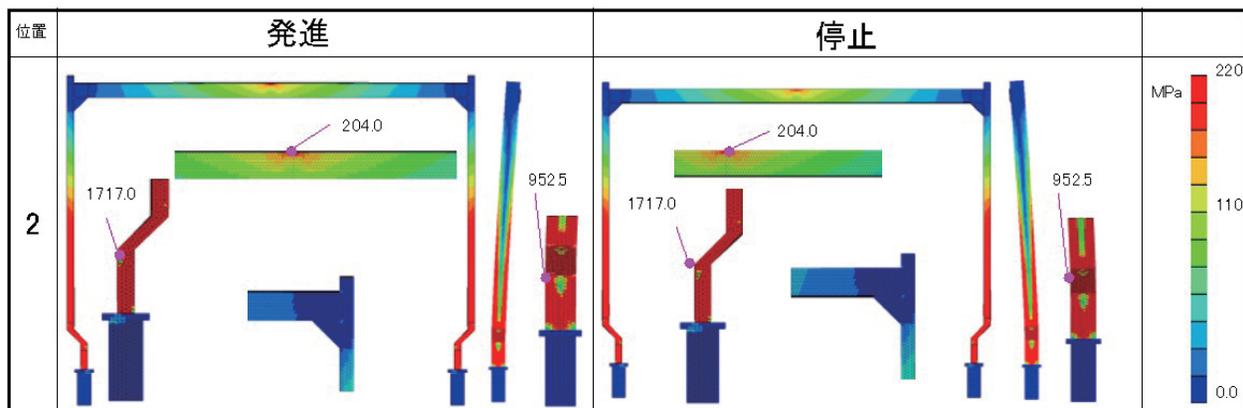


図8 初期の検討結果 水平方向の加速時の応力

Development of a two-boat stacked transport method to support the restoration of tsunami-afflicted areas with utility boats

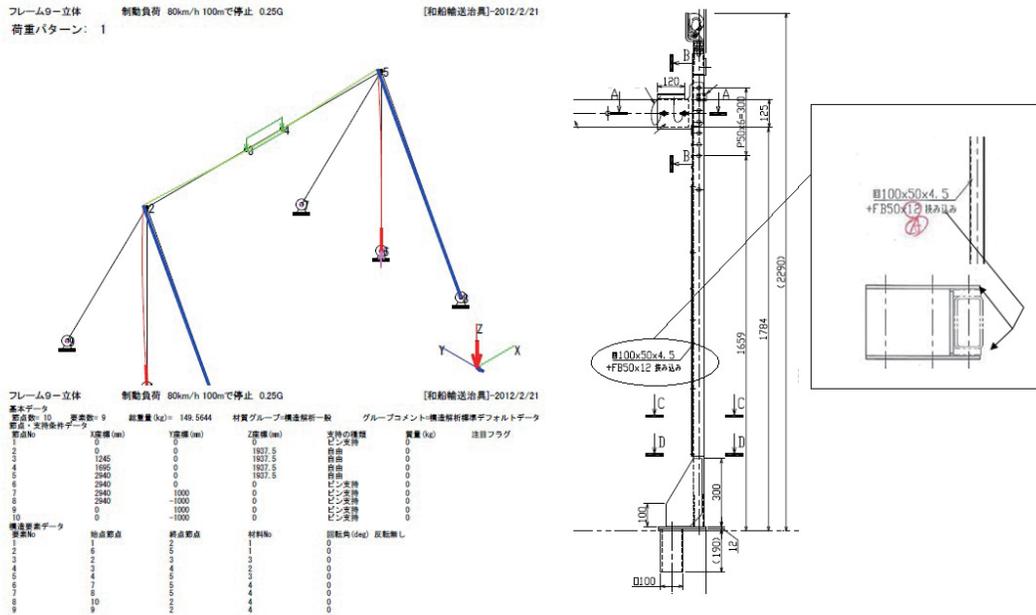


図9 最終の設計検討結果

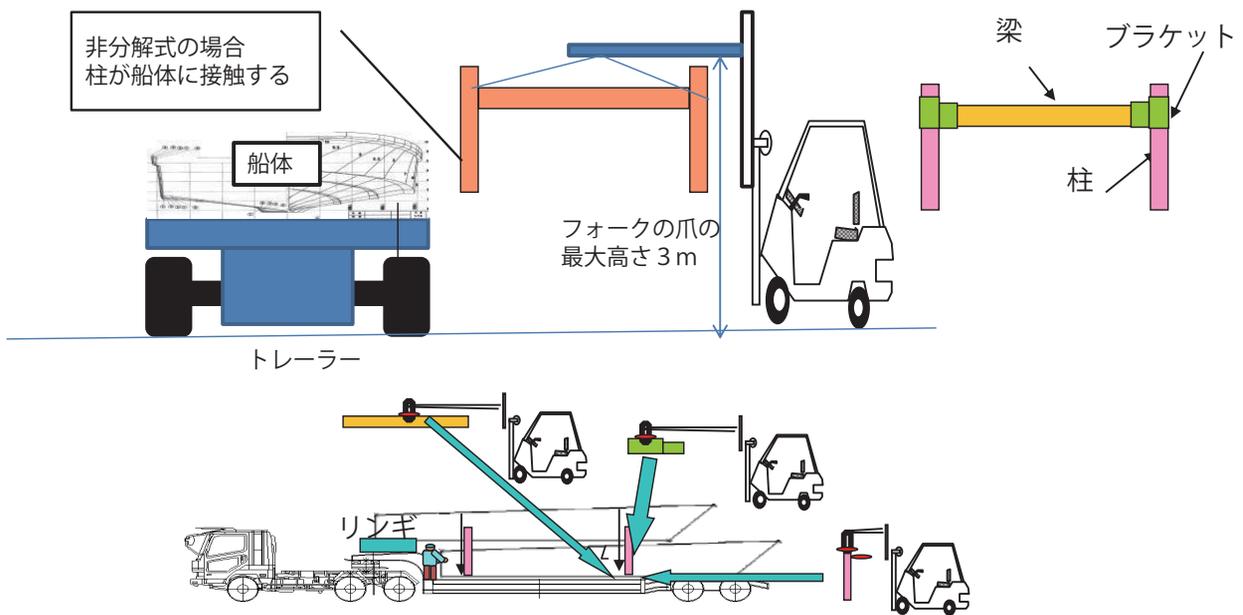


図10 分解可能な構造にする必要性

4-1-3. 分解構造

作業性の検討の中で、荷扱作業で3トンのフォークリフトでオペレーションを行う必要があることが分かった。

しかし、3トンのフォークリフトは、爪の最大高さが3m程度であり、船をまたいで門柱を取り付けられないので、分解可能な構造にする必要がある(図10)。

分解可能な構造の問題は、柱と梁にガタが生じ、剛性を確保するのが難しくなることである。そこで今回は、柱と梁の取り付けを強化するために、柱と梁の間にチェーンブロックで張力をかけて柱と梁の固定強度を増すことで必要な剛性が確保できた(図11)。

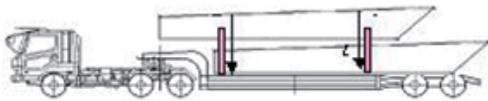
Development of a two-boat stacked transport method to support the restoration of tsunami-afflicted areas with utility boats



図 11 梁と柱の固定



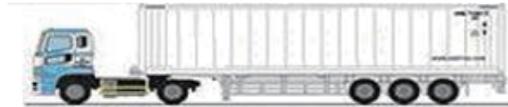
図 12 一人作業用吊治具



$$H = \frac{0.87m \times 6860kg + 0.8m \times 1200kg + (1.1 + 1.375)m \times 3200kg}{6860kg + 1200kg + 3200kg} = 1.30m$$

横転を起こす横G

$$\text{横}G = \frac{1.25}{1.3}G = 0.96G$$



$$H = \frac{0.87m \times 6860kg + 0.8m \times 1200kg + (1.1 + 1.448)m \times 3920kg}{6860kg + 1200kg + 3920kg} = 1.41m$$

$$\text{横}G = \frac{1.25}{1.41}G = 0.84G$$

図 13 横転の起こしやすさの比較

#### 4-2. 作業性向上

被災地で和船を積み下ろしする場合、工場のようにサポートがない場合があり、ドライバー 1 名で柱や梁の取り付けを行う場合がある。

その際の作業性を向上させるために、一人作業で、吊り下げ、位置決めが可能な吊治具を作成した(図12)。

#### 4-3. 安全性の評価

3-2. 輸送の安全性の章で述べたとおり、「転倒限界横G」を基準に、空の40ftハイキューブのコンテナを積んだトレーラーを比較対象に評価を行った。評価の結果、大型和船を2段積みしたトレーラーの「転倒限界横G」は、40ftハイキューブのトレーラーを上回ることがわかった(図13)。

## 5 効果測定

3月23日に四国 志度において第1回輸送試験(100キロ)、4月11日~14日にかけて北海道から四国(1400キロ)への第2回輸送試験を行った。輸送試験は、実際に製作した柵で大型和船を運搬し、問題点を洗い出すことを目的としている。

#### 5-1. 第1回輸送試験(四国 志度)

第一回試験では、船体の積み下ろしの作業性、走行中の柵の強度や船体の固定(ズレの有無)などを確認し、問題ないことを確認した。加えて、輸送環境記録計による衝撃の計測を行い、トレーラーに加わる衝撃が、基準値を下回っていることが確認できた(図14)。

この結果から、長距離の試験に進んで問題ないと判断した。

Development of a two-boat stacked transport method to support the restoration of tsunami-afflicted areas with utility boats

5-2. 第 2 回輸送試験(長距離 北海道-四国区間)

試験中は、運送会社とヤマハ発動機の物流関係者が、車両と船体を観察しながらトレーラーを追尾し、気付いた点があればトレーラーを停止し、対策を行った。

実輸送試験では、以下の3つの問題が発生したが、適切な対策を実施し、その効果が確認された(図15)。

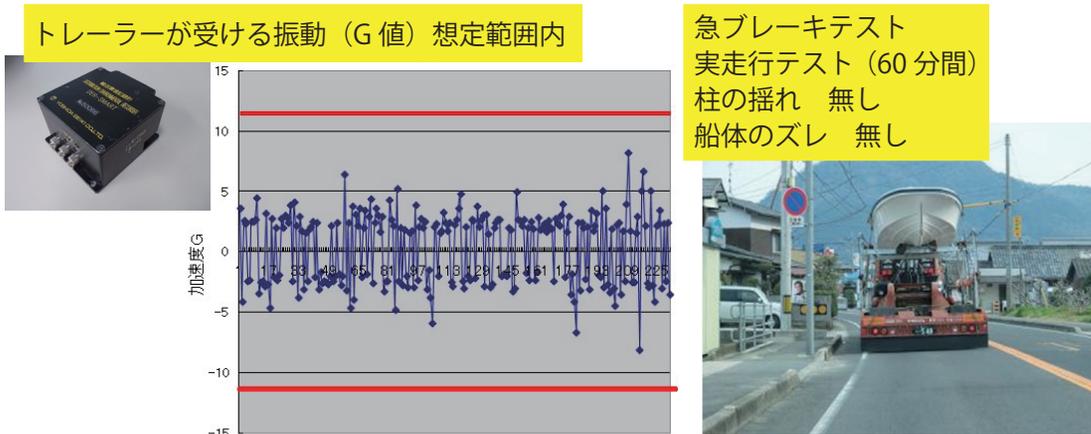


図 14 第一回輸送試験

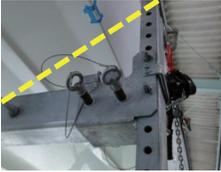
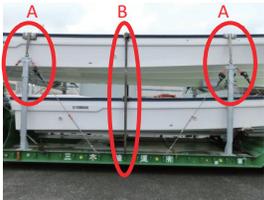
	問題	対策
1	<p>船体の移動</p> <p>車体前側 後方向 20mm 左方向 50mm</p> 	<p>船体を固定する ロープを増やす。</p> 
2	<p>船体と機材の接触</p> <p>1の船体のズレの発生により、車体前側の柱のビーム固定用レバーブロック(破線位置)と船体が干渉し、傷がつく。</p> 	<p>問題のレバーブロックを廃止し、別のレバーブロックでビームを固定する。</p>
3	<p>船体固定ベルトとガンネルの接触</p> <p>ガンネルとベルトが接触し、接触部が白化する。</p> 	<p>A. 平ベルト+レバーブロックをラックの柱に張る。(2箇所) B. 平ベルト+レバーブロックを車体のフックに張る。(1箇所)</p> 

図 15 長距離輸送試験で判明した問題と対策

## 6 導入効果

今回開発した2段積のラックにより、輸送能力は2倍になり、商品のタイムリーな供給が可能になった。加えて、1台当たりの輸送費が50%削減できた。

## 7 おわりに

3次元CADとCAE解析を用いて初期に設計を熟成させ、工場・輸送担当者に設計レビューを行い、早期に設計成熟性を高めることで、3ヶ月という短時間でコストを含めたすべての開発目標値をクリアした輸送システムを開発することができた。

当社では、普段はモーターサイクルやATVの梱包設計を手がけているが、今回のような大型の商品の運搬について経験が少ない。しかし、3D-CADや構造解析を積極的に使用し、デザインレビューを繰り返すことにより、やり直しが少なく、短期間で効果的な成果をあげることができた。

当社の商品は多岐に渡っており、今回のプロジェクトで得たノウハウを、様々な商品の安全かつ効率的な運送方法の開発に生かしていきたい。

### ■参考文献

[1]国土交通省 東北地方整備局:環日本海沿岸地域におけるロシア及び北東アジアとの経済交流連携を通じた地域活性化方策の検討調査(東北) ,p63-180,2008.3

### ■著者



**野村 佳孝**

Yoshitaka Nomura

生産本部

生産戦略統括部

物流・安全貿易部