

鉄道車両内装モジュール締結部のリスクベース設計法の適用

横山 喬* 酒井 信介** 泉 聡志**
牧野 俊昭*** 川崎 健****

Application of Risk-Based Design Method to Fastening Systems in Interior Module of Railway Vehicle

by

Takashi YOKOYAMA*, Shinsuke SAKAI**, Satoshi IZUMI**,
Toshiaki MAKINO*** and Takeshi KAWASAKI****

In the design of railway vehicle, main interests have been placed on rigidity, lightweight and strength. Therefore, great improvement has been achieved in functional point of view. For further development, however, it is necessary to provide a procedure for the decision-making in design process. If design change such as geometry variation or material replacement occurs, it is required to evaluate the validity of the action. For this purpose, a rational procedure to assist the decision-making is needed.

From this point of view, we attached importance to the decision-making performance in risk assessment in the previous study. We verified the effectiveness of sleeve-caulking fastening method and examined the optimum arrangement of fasteners using risk arising from the scatter of material properties, geometry, and fastening force of ceiling module. In this paper, wider range of investigation is done in view of the load condition and the assessed object. As for the load condition on the luggage rack, besides the uniformly distributed load, one-side load and concentrated load are considered. As for the assessed object, besides the fastening bolt, mounting rail is newly considered to assess the fastening system synthetically and clarify the dominant factor of the failures.

Key words: Risk Assessment, Interior Module, Sleeve-Caulking Fastening Method, Decision-Making, Design Optimization, Mounting Rail, Finite Element Method

1 緒 言

鉄道車両の設計にあたり、これまで主に剛性、質量、強度などの因子を主要素として改善が重ねられてきた¹⁾。このため、機能的には大幅な改善が行われたものと考えられるが、今後、さらなる改善を図るためには、個別部品の構造変化や配置、材料変更などが派生して必要になると考えられる。その際、最終的な決断を行うにあたっての意思決定のための合理的な手段が不可欠となる。

一方、近年では、機械構造物の保守や検査において、リスク評価を意思決定手法として活用することが期待されている。鉄道業界においても、現在欧米を中心としてリスク評価による安全性評価が導入されつつある。英国では、インフラ管理者、車両製作者など、鉄道に関わるあらゆる事業者に対して、Safety Case と呼ばれるリスク評価による詳細な安全性評価が課されている²⁾。ここでは、過去の鉄道事故データベースに基づいて、様々な形態の事故の頻度とその被害の大きさが定量的に示され、鉄道を構成する個々の要素の性能向上が鉄道全体の安全性に及ぼす寄与の大きさを示す指標として用いられている。リスク評価の場合には、従来、評価対象としていた破損確率に加えて、破損時の影響度も併せて検討することにより、発生確率が高い因子だけでなく、影

響の大きな因子の抽出が可能となり、より本質的な安全性を向上できるものとする。

本研究においては、リスク評価の意思決定手段の機能を重視し、鉄道車両への適用を検討する。対象とする構造は内装モジュールの一つである側天井・荷棚モジュールであり、締結部を含めた箇所への適用を主題とする。側天井・荷棚モジュールは、製造工程の短縮のためにモジュール長の増大が望まれているものの、それに伴う挙動の変化への対応が必要である。また、従来のボルト・ナット締結に代わる新規締結方式(スリーブかしめ締結³⁾)を導入した場合に、構造物全体にどのような効果をもたらすか、などの評価も求められる。

著者らは既報⁴⁾において、側天井・荷棚モジュールの材料値や締結力のばらつきに起因する締結部リスクを指標として、スリーブかしめ締結の有効性の確認と締結部配置の検討を行った。本報では、リスク計算手法において、応答曲面法を用いた確率論的解析と、締結部負担荷重に基づいた影響度を導入すると共に、評価条件および評価対象について新たに設定する。評価条件に関しては、最も頻度が高く重要と考えられる荷棚の一樣荷重の他に複数の荷重形態を設定する。評価対象に関しては、これまで対象としていた締結ボルトに加え、近年アルミ

+ 原稿受理 2003年9月30日 Received Sep. 30, 2003

* 東京大学大学院 〒113-8656 東京都文京区本郷, Graduate Student, the Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

** 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷, Dept. of Mech., the Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

*** 佐世保工業高等専門学校電子制御工学科 〒857-1193 佐世保市沖新町, Dept. of Control Eng., Sasebo National College of Tech., Okishin-cho, Sasebo, 857-1193

**** (株)日立製作所笠戸事業所 〒744-8601 下松市大字東豊井, Hitachi, Ltd., Oaza Higashitoyoi, Kudamatsu, 744-8601

ニウム中空押出型材を用いた構体において導入が進められている艦装品取付け用レール⁵⁾(艦装レール)を含めた評価を行う。艦装品に作用する振動や自重は全て艦装レールで支持するため、既に行われた艦装レールの強度特性の検討⁶⁾に加え、締結部を構成するすべての要素を考慮したリスク評価により総合的な評価を行い、締結部破損の支配的な要因を解明することにした。

2 解析対象

2.1 側天井・荷棚モジュールおよび艦装レール

従来、部品単位で構体に取り付けられていた内装は、リサイクル、リユースの観点から部品点数削減、容易な着脱が求められるようになった。この要求に対して、内装の構造・機能・デザインの自立化を目的としたアルミ合金製の内装モジュールが開発された¹⁾。内装モジュールは側天井・荷棚モジュール、側面パネルなどからなり(Fig.1)、各々を組み立てた後、構体に形成された艦装レールに締結される。本研究では、側天井・荷棚モジュールを対象とし、その締結部のリスク評価を行う。

2.2 スリーブかしめ締結³⁾

従来、内装の固定には小ねじやボルト・ナットによる締結が用いられてきたが、内装モジュールの導入に伴い、新しい締結形式としてスリーブかしめ締結が採用されつつある¹⁾。この工法は、クリンプのあるボルトと雌ねじのないスリーブで構成され、ボルトを直接工具で引っ張り、その反力でスリーブをボルトにかしめ、雌ねじを成型して締結する。この工法ではボルトを一定荷重で破断させて締結するため、工具の出力制御が不要となり安定した締結力が得られる。また、ねじ山間に隙間がなく塑性加工による残留応力が作用しているため、高い軸力が得られる。しかし、この効果は必ずしも定量的には示されていない。そこで、ここでは側天井・荷棚モジュールに対して新たにリスクを指標とした評価を行う。

3 リスクに基づく内装モジュール設計

3.1 問題の設定

本研究では、側天井・荷棚モジュールの締結部に関してリスクを指標とした評価を行い、意思決定手段としての有効性を検証する。第一に、スリーブかしめ締結の有効性の評価である。スリーブかしめ締結とボルト・ナット締結の締結力分布の違いがリスクに及ぼす影響を検討する。第二に、評価対象を拡張して艦装レールを含めた評価を行い、締結部破損においてボルトと艦装レールのどちらの破損が支配的であるかを明らかにする。第三に、現行のモジュールについて算出したリスクを基準として、パネル長を現行の倍にした場合の締結部配置の検討を行う。ここでは複数の荷重形態での評価を行う。

3.2 リスク定義

通常、内装のような部品の締結部に関しては、締結部単体の機能改善の検討とともに、締結部の配置は強度の確保はもちろんのこと、作業性や見栄えなどを主要因として決定される。しかし、締結部配置やパネル長について意思決定が求められるとき、構造体における各締結部の役割を的確に評価することが求められる。その場合、締結力のばらつきなどの不確定性因子についても配慮する必要がある。それに対して、ここでは新たにリスク概念を導入し、各締結部のリスク値の評価により意思決定と結びつけることを提案する。このためには、まず目的に対して適切なリスクを定義する必要がある。

工学リスクは、機械やシステムの故障確率と故障による被害の大きさの積として表される⁷⁾。本研究では、モジュールの1箇所の締結部破損がモジュール全体の破損に至る可能性を評価する。そこで、締結部*i*の破損確率を P_i 、締結部*i*の破損がその他の締結部に及ぼす影響度を C_i として、締結部*i*のリスク R_i を次のように定義する。

$$R_i = P_i \times C_i \quad (1)$$

以下で、破損確率 P_i 及び影響度 C_i を求める手順を示す。

3.2.1 破損確率 破損確率 P_i を求めるために、側天井・荷棚モジュールにおける荷重条件や周囲の環境を考慮して、主要因として次の5つの破損モードを考える⁸⁾。

- (1) 過大荷重によるボルトの破壊(破損確率 P_1)
- (2) 繰返し荷重によるボルト疲労破壊(破損確率 P_2)
- (3) ボルトの回転ゆるみ(破損確率 P_3)
- (4) 過大荷重による艦装レールの破壊(破損確率 P_4)
- (5) 繰返し荷重による艦装レール疲労破壊(破損確率 P_5)

5つの破損モードは独立で、同時に発生することはないものと仮定する。すると、システムの信頼度は、それぞれの破損モードの直列系で表現されるため、

$$1 - P_i = \prod_{j=1}^5 (1 - P_j) \quad (2)$$

であるが、 $P_j (j=1 \sim 5)$ 1の場合、近似式として P_i は、

$$P_i \approx \sum_{j=1}^5 P_j \quad (3)$$

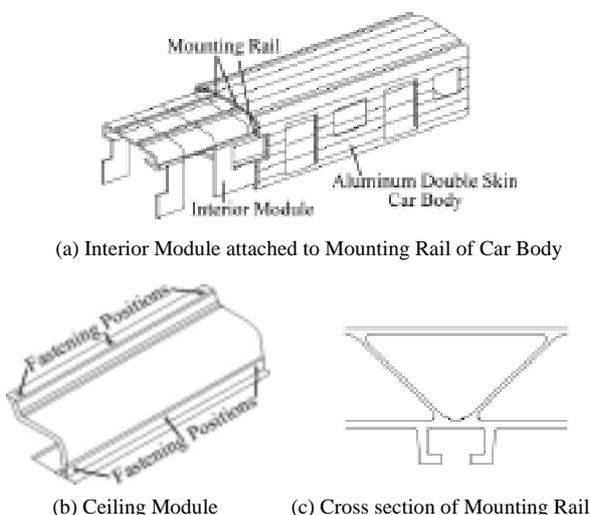


Fig.1. Interior Module attached to Mounting Rail of Car Body.

で与えられる。本研究では、締結部破損に影響を及ぼすと予想される、締結力などのばらつきを考慮して破損確率を求める。破損確率に関する出力値（応力等）の確率分布は、応答曲面法を用いた確率論的解析により求める。まず、締結力などの入力値に確率分布を与え、実験計画法を用いた有限要素解析とその結果に対する回帰分析を行い、入力値の陽関数として出力値の近似式を求める。続いて、得られた近似式についてモンテカルロシミュレーションを行い、出力値の確率分布を求める⁹⁾。最後に、出力値の確率密度関数 $f_S(x)$ と強度の確率密度関数 $f_R(x)$ とから、次式を用いて、出力値（応力）>強度となる確率、すなわち破損確率を求める¹⁰⁾。

$$P = \int_0^{\infty} \left\{ \int_0^x f_R(\xi) d\xi \right\} f_S(x) dx \quad (4)$$

入力値の確率分布を Table に示す。確率分布は測定データが得られていないためすべて正規分布とし、変動係数 C.O.V.は安全を見て大きめの値を設定した。ただし、2種類の初期締結力分布は実験値に基づいて設定した。

3・2・2 影響度 影響度 C_i は、締結部 i の破損により残された締結部が負担する荷重の変化に基づく。ある締結部が破損した場合には、その締結部の負担荷重は残された締結部に均等に分配されることが望ましい。しかし、実際には、均等な分配量を超える荷重を負担する締結部が存在し、連鎖的な破損に至る可能性がある。そこで、均等な荷重分配からのずれを考え、次のように定義する。

$$C_i = \frac{\text{締結部}i\text{破損時の荷重分担変化の最大値}}{\text{正常時の締結部}i\text{の分担荷重}(\text{締結数}-1)} \quad (5)$$

ここで、影響度 C_i は、最も頻度が高く重要と考えられる荷棚一様荷重の場合に対して計算した値とする。

3・3 リスクに基づく意思決定法

上記定義に基づいて、各締結部のリスク値を評価する。次に、リスク値の増減、リスクの適切配分などの観点から妥当性を検討し、意思決定を行う。

4 解析モデル

4・1 有限要素解析モデル

破損確率計算に用いる有限要素解析モデルを示す。本研究では、まずボルトの締結性能に着目した評価を行い、続いて締結部の支配的な破損モードを明らかにするために艀装レールを含めた評価を行う。そこで、まず破損モードとして3・2・1に示す(1)~(3)のみを考慮した艀装レールを含まないモデルとして、Fig.1(b)に相当する現行

Table . Scatter variable of Input Values (Normal Distribution).

Scatter Variables	mean	C.O.V.
Young's Modulus of Panels	71GPa	5%
Young's Modulus of Bolts	205GPa	5%
Initial Fastening Force : Bolt/Nut	2.7kN	13.0%
: Sleeve/Caulking	3.3kN	2.7%
Coefficient of Static Friction on the Contact Surfaces	0.15	5%

の側天井・荷棚モジュールの解析モデルを Fig.2 に示す。このモデルはシェル要素とビーム要素により構成した。

続いて、艀装レールを含めた解析モデルを示す。この解析には、局所構造を単純化した全体モデルと、局所構造のみをモデル化したサブモデルを併用したズーム解析手法¹¹⁾を用いる。まず、Fig.3(a)に示す構体の一部を含めてシェル要素を用いて作成した全体モデルの解析を行い、締結部周辺の変位および各締結部の負担荷重を求める。次に、締結部周辺のみを忠実に再現したソリッドモデルにその結果を与えて解析を行い、艀装レールおよびボルト軸部の応力を求める。ここで、長手方向に一様断面を持つ艀装レールの解析には、Fig.3(b)に示す2Dモデルを用いる。円筒断面を持つボルト軸部の解析には、Fig.3(c)に示す3Dモデルを用いることとする。2Dモデルを用いる理由は、モデルの規模を縮小して計算時間短縮を図り、幅広い観点から検討するためである。

荷重条件は、荷棚荷重およびボルト締結力を考慮する。荷棚荷重に関しては、実物評価試験時の条件に従い、荷棚先端に1.96kN/mの一様荷重を作用させる。3200mmのモデルに対しては、荷棚片側荷重と集中荷重も扱う。ボ

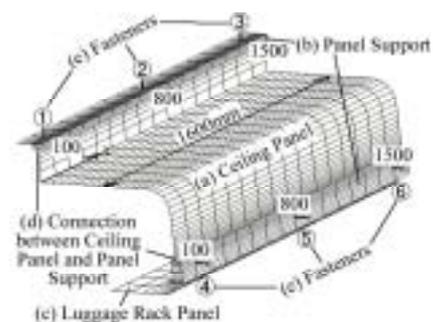
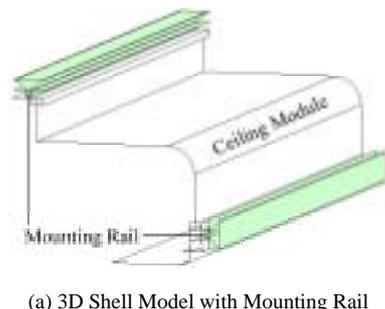


Fig. 2. An Analysis Model of Real Module (~ are Fastener Numbers, () are x-coordinate of Fastener).



(a) 3D Shell Model with Mounting Rail



(b) 2D Solid Model for the Analysis of Mounting Rail (8389 nodes, 2713 elements)



(c) 3D Solid Model for the Analysis of Bolt Axis (8924 nodes, 9708 elements)

Fig.3. Analysis Models including Mounting Rail.

ルト締結力に関しては、シェルモデルにおいてボルト軸部を表現したビーム要素およびソリッドモデルのボルト軸部に、締結力に相当する荷重を作用させる。

4.2 評価対象モデル

評価を行うモデルを Table 1 に示す。モデル 1 は Fig.2 に示す現行のモデルである。モデル 1 に関しては、艦装レールを含むものと含まないものを扱う。長さ 1600mm で上下 3 箇所ずつのスリーブかしめ締結部を持つ。モデル 2 は締結形式によるリスクの違いを調べるための比較モデルで、モデル 1 において締結部をボルト・ナット締結とした。モデル 3 は、新しいモジュールとして実用化が検討されている、Fig.4 に示す長さ 3200mm のモデルである。締結位置は 1600mm の場合の延長とし、スリーブかしめ締結部を上側 3 箇所、下側 6 箇所（等間隔）とした。モデル 4 は 3200mm のモデルにおいて締結位置最適化を行った結果得られたモデルである。

5 解析結果

5.1 実用化モジュールのリスク

Fig.2 に示す艦装レールを含まないシェルモデルによりモデル 1 について評価を行った結果を Table 1 に示す。これより、上側締結部（～）ではリスクはほぼ 0 となり、作用する荷重の大部分は下側締結部（～）が負担していることが分かった。特にモジュール両端の締結部のリスクが 6.33×10^{-8} 、モジュール中央の締結部のリスクが 1.98×10^{-3} となっており、下側中央締結部が大きなリスクを負っていることが分かった。

実物試験では、このモジュールを用いることにより十分な安全が得られることが実証されている。従って、以後、モデル 1 のリスクを基準として考えることにする。

5.2 スリーブかしめ締結の効果

ボルト・ナット締結を用いた場合と比較して、スリーブかしめ締結を用いることによりリスクをどの程度削

減することができたのかを調べるために、モデル 1 において締結部をボルト・ナット締結としたモデル 2 について評価を行った。Table 1 において、モデル 2 の結果をモデル 1 の結果と比較すると、上側締結部（～）のリスクはほぼ 0 に抑えられているが、下側締結部（～）に関しては、リスクは $10^{-1} \sim 10^0$ オーダーと非常に大きな値となっている。従って、スリーブかしめ締結を用いることによるリスク削減効果は大きいと考えられる。

5.3 モジュール長さ 3200mm のモジュール

Fig.4 に示すモデル 3 について評価を行った結果を Table 2 に示す。下側締結部に関して両端の締結部と中央の締結部の間でリスクに大きな差が見られる。また、下側締結間隔が 700mm であるモデル 1 の最大リスクが 1.98×10^{-3} である一方で、下側締結間隔 600mm であるモデル 3 の最大リスクが 3.77×10^{-3} であることから、モデル 3 はモデル 1 よりも締結間隔が小さいにもかかわらず最大リスクは大きい。従って、モデル 3 に関しては下側各締結部間でのリスク差を抑えるために、締結位置の改善が必要であると考えられる。

6 考察

6.1 スリーブかしめ締結の効果

5.2 よりスリーブかしめ締結を用いる効果をリスク評価により定量的に示し得ることを明らかにしたが、さらに、この効果が何に起因するのかを明らかにできれば、意思決定を補強するための有用な情報になると考える。ここでは、リスク削減効果に対する締結力の平均値とばらつきの違いによる影響を調べるために、Fig.2 のモデルの下側締結部について分散分析を行う¹²⁾。まず、因子 A を平均値、因子 B を変動係数として、Table 1 のように因子 A を 3 水準、因子 B を 5 水準設定し、各組み合わせについてリスク計算を行った。水準数は有意な結果が得られる程度の数を選び、水準値はできる限り等間隔になるように設定した。次に計算結果より、リスクに対する両因子の分散分析を行った。Table 2 に示す結果より、締結部と締結部とで、リスク削減に対する寄与の大きい因子が異なることが分かる。また、締結力の平均値と変動係数以外の値はすべて完全に固定されているため、残差 e は因子 A と因子 B の相互作用を示す。

6.2 艦装レールを含めた評価

Table 1. Models that are assessed in this study.
(S/C : Sleeve/Caulking Fastening, B/N : Bolt/Nut Fastening)

Model	Length [mm]	Fastening Type	Fastener Upper/Lower	Mounting Rail
1	1600	S/C	3 / 3	Modeled / Not Modeled
2	1600	B/N	3 / 3	Not Modeled
3	3200	S/C	3 / 6	Not Modeled
4	3200	S/C	3 / 6	Not Modeled

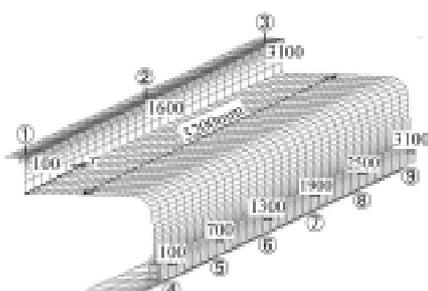


Fig.4. A 3200mm Model with 9 Fasteners (Model 3).

Table 2. Risks of 1600mm Models

Model	Length [mm]	Fastening Type	Risk of Fasteners		
			1	1600	S/C
2	B/N	~0	8.73E-01 1.19E+00		

Table 3. Risks of a 3200mm Model (Model 3).

Model	Length [mm]	Fastening Type	Risk of Fasteners		
			3	3200	S/C

Table . Two Levels of Two Factors.

Factor A Mean of Fastening Force		Factor B C.O.V. of Fastening Force	
Level	Value[kN]	Level	Value[%]
A1	2.7(B/N mean)	B1	13.0(B/N C.O.V.)
A2	3.0	B2	10.5
A3	3.3(S/C mean)	B3	8.1
		B4	5.4
		B5	2.7(S/C C.O.V.)

Table . Contribution Rate of Mean and C.O.V. of the Fastening Force to Risk.

(a) Fastener		(b) Fastener	
Factor	Contribution	Factor	Contribution
Factor A	25.7%	Factor A	62.8%
Factor B	54.7%	Factor B	9.8%
Residual e	19.6%	Residual e	27.4%

締結部破損において、艀装レールの破損とボルトの破損のどちらが支配的であるかを定量的に示すために、艀装レールを含むシェルモデルと、締結部を忠実に再現したソリッドモデルを用いて、モデル1について評価を行う。破損モードは3・2・1に示した5つすべてを考慮する。評価を行った結果を Table に示す。Table (a)に示すリスクは Table と同様、下側中央のリスクが大きな値となった。また、Table (b)はモデル1において締結部破損がない状態で、3・2・1に示した各破損モードの生起確率を示したものである。これより、最も生起確率の高い破損モードは(3)ボルトの回転ゆるみである。これは、負担荷重の大きい下側締結部において、荷重の作用方向はボルト軸に垂直な方向であるため、被締結物の並進力が大きくなるためであると考えられる。一方、艀装レールには過大な引張力が作用しないため、艀装レールの破損確率は小さく抑えられた。以上より、側天井・荷棚モジュ

Table . Risks of Model 1 including Mounting Rail.

Model	Length [mm]	Fastening Type	Risk of Fasteners		
			~0	2.55E-10	3.89E-05
1	1600	S/C			

(b) Failure Probabilities of Each Failure Mode

Failure Mode	Failure Probability		
	~0	~0	~0
(1)	~0	~0	~0
(2)	~0	~0	~0
(3)	~0	3.83E-11	1.66E-5
(4)	~0	~0	~0
(5)	~0	~0	~0

Table . Risks of Optimized 3200mm Model.

Model	Length [mm]	Fastening Type	Risk of Fasteners		
			~0	3.65E-05	1.13E-06 2.68E-06
4	3200	S/C			

ルにおいて、ボルトの破損が支配的であるといえる。

6・3 締結位置によるリスク変化

6・3・1 締結位置最適化 5・3の結果より、3200mmのモデルにおいて締結位置を等間隔に設定したのでは各締結部間でのリスク差が大きくなることが分かった。そこで、これまでの解析からリスクに大きな影響を及ぼすことが分かった被締結物並進力 W をパラメータとして最適な締結位置を設定する。本来、締結位置の設定を行うためには、リスクについて最適化を行うべきであると考えられるが、最適位置の探索段階でリスク評価を行うことは、膨大な計算時間を要し、実用的でない。ここでは、リスクと相関のある W に着目して、おおよそ最適化した後に、リスクによる詳細な検討を行うこととする。

そこで、3200mmのモデルの下側締結部に注目し、1回の解析により得られる被締結物並進力 W について、下側各締結部においてその最大値と最小値の差を最小化することを考える。Fig.4に示したものと同様の3200mmのモデルについて、両端の締結位置は固定し、締結位置の対称性を保った上でその他の締結位置を100mm単位で変化させて解析を行った。条件より、変化させる締結位置は、締結部 ($x=x_1$) と締結部 ($x=x_2$) の2箇所である。その結果、被締結物並進力 W の差が最小になるのは $x_1=1100\text{mm}$, $x_2=1200\text{mm}$ としたときであった。そこで、この締結位置を設定したモデル4について評価を行った。Table に示す結果をモデル3の結果 (Table)と比較すると、リスク均等化を達成できたことが分かる。

6・3・2 最適化の検証 6・3・1において、締結位置を100mm単位で変化させて解析を行い、リスク均等化を図った。ここで、最適位置として設定した $x_1=1100\text{mm}$, $x_2=1200\text{mm}$ の周辺における変化の傾向に関して、実験計画法を用いて調べる¹²⁾ 2箇所の締結部中点座標 $(x_1+x_2)/2$ を因子A、2箇所の締結部の間隔 x_2-x_1 を因子Bとして、リスクと相関のある被締結物並進力 W の下側締結部間での差に対する区間推定を行う。各因子の水準を Table のように設定した。Fig.5に示す区間推定結果より、締結部の x 座標の平均値が1100mm付近で締結間隔が小さいとき、下側締結部間での W の差が小さくなることが分かる。ここで、1100mmという値は両端の締結部間を3等分した位置である。従って、下側締結部を6箇所設定する場合、モジュール両端に1箇所ずつとその3等分点に2箇所ずつ設定するのが望ましいことが分かる。

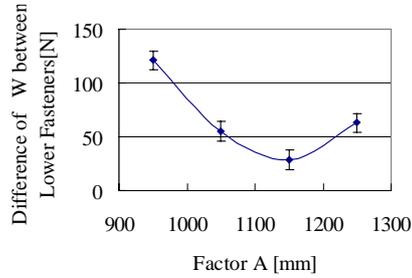
6・4 荷棚荷重による影響

3200mmのモデル3,4について、荷棚片側荷重と集中荷重を作用させて評価を行う。片側荷重は、一様荷重と同様の1.96kN/mの荷重を締結部側1600mmにわたって作用させる。集中荷重は、締結部側の荷棚端から荷棚中央の間に5点設定し、各点一点ずつ作用させる。荷重の大きさは、荷棚端の点には1kN、その他の4点には2kNとする。

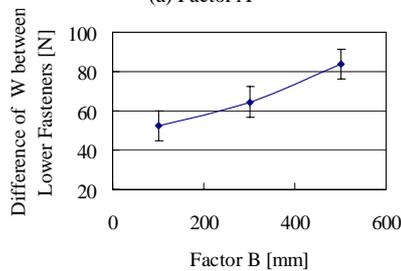
片側荷重を作用させた結果を Table に示す。一様荷重の場合とは異なり、モデル4の下側締結部のリスクは

Table . Settings of Level Values of Two Factors.

Factor A		Factor B	
Level	Value[mm]	Level	Value[mm]
A1	950	B1	200
A2	1050	B2	400
A3	1150	B3	600
A4	1250		



(a) Factor A



(b) Factor B

Fig. 5. Interval Estimation of W to Two Factors.

均等とはならない．しかし、モデル3と比較すると、依然として各締結部間のリスク差は小さく抑えられている．また、5点それぞれに集中荷重を作用させた場合の最大リスクを Table XIに示す．モデル4では、締結部の密度が高い位置 ($x=1200\text{mm}$ 周辺) に荷重が作用した場合には、モデル3と比較してリスクは非常に小さな値に抑えられている．以上より、偏った荷重が作用した場合に対しても、モデル4はより良い性能を示すといえる．

7 結 言

内装モジュール設計時にリスク評価を導入し、合理的

Table . The Results of Risk Analysis in the Case of One-Side Loads.

Model	Risk of Fasteners			
3	~0	8.50E-12	9.32E-03	7.65E-09
4	~0	1.22E-03	3.13E-06	4.17E-10

Table XI The Highest Risks in the Case of Concentrated Loads.

x coordinate	load [kN]	model 3	model 4
0	1	6.38E-01	9.55E-01
400	2	6.93E+00	7.03E+00
800	2	1.13E-01	5.57E-04
1200	2	3.25E+00	1.56E-04
1600	2	2.88E+00	2.83E-06

設計が達成できる見通しを得た．以下に結論を要約する．

(1) スリーブかしめ締結法は、従来のボルト・ナット締結法と比較してリスクを低減できることを定量的に明らかにした．リスク削減効果には、締結力の平均値と分散が影響するが、その効果は締結位置によって異なることを、分散分析により明らかにした．

(2) 等間隔のスリーブかしめ締結部を有する 1600mm のモデルについて、艀装レールを含めた評価を行い、側天井・荷棚モジュールにおける支配的な破損モードはボルトの回転ゆるみであることを明らかにした．

(3) 適切な締結位置の設定により、リスクを抑えることができる．3200mm のモデルについて、リスクと関連の強いことが分かった被締結物並進力について最適化を行い、実験計画法によりその検証を行った．その結果、下側6箇所の締結部を、モジュール両端に1箇所ずつとその3等分点に2箇所ずつ設定することにより、リスクの均等化を達成することができた．

(4) 3200mm のモデルについて、荷棚一様荷重の他に、片側荷重および集中荷重を作用させて評価を行った．その結果、一様荷重の下で締結位置の最適化を行ったモデルは、その他の荷重形態に対しても、等間隔の締結部を持つモデルより高い安全性を示すことが分かった．

以上のように、内装モジュールの設計段階にリスクベース設計を導入することにより、新工法の妥当性評価、形状変更による影響の見積もり、締結部の最適配置など、重要な意思決定に活用できることを示した．

参 考 文 献

- 1) 奥野澄生, 高井英夫, 戸取征二郎, 川崎 健, 機械の研究, **53**, 144 (2001).
- 2) R. I. Muttram, Proc Instn Mech Engrs, **216F**, 71(2002).
- 3) 小川達也, 谷川 脩, 加藤 亨, 自動車技術, **50(12)**, 49 (1996).
- 4) 酒井信介, 泉 聡志, 横山 喬, 牧野俊昭, 材料, **52**, 16 (2003).
- 5) 軽金属車両委員会, “軽金属車両委員会報告書 No.4 昭和53年 昭和58年”, p.196 (1984) 日本鉄道車輛工業会, 軽金属協会.
- 6) 川崎 健, 奥野澄生, 稲 佳彦, 機論A, **65**, 1839 (1999).
- 7) 小林英男, 材料科学, **37**, 171 (2000)
- 8) 吉本 勇, “JIS 使い方シリーズ ねじ締結体設計のポイント”, p.119 (1992) 日本規格協会.
- 9) ANSYS, Inc., “ANSYS, Inc. Theory Release 5.7”, p.21-19 (2001) ANSYS, Inc. .
- 10) 日本材料学会編, “機械・構造系技術者のための実用信頼性工学”, p.143 (1987) 養賢堂.
- 11) 泉 聡志, 酒井信介, 強化プラスチック, **47**, 297 (2001)
- 12) 田口玄一, “第3版 実験計画法 上”, p.1 (1976) 丸善.