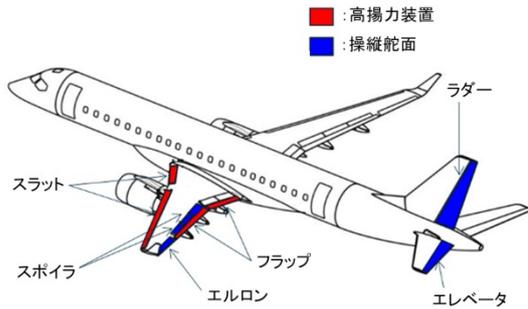


実大構造試験を合理化する 大規模構造・機構・制御連成解析技術

Multi Body Dynamics Analysis Technology Coupled Elasticity and Control
for Rationalizing Full Scale Test



森近 俊二*¹
Shunji Morichika

金澤 宏幸*²
Hiroyuki Kanazawa

小林 哲平*³
Tetsuhei Kobayashi

小野川 英*⁴
Ei Onogawa

松野 夏輝*⁵
Natsuki Matsuno

安本 弘昭*⁶
Hiroaki Yasumoto

航空機は運航中にさまざまな荷重が作用し、想定される最酷条件においても操縦性・冗長性を確保して安全に飛行しなければならない。一方で、飛行中に突風が作用している中で操縦舵を正常に作動できるか、故障が生じて安全に飛行できるかを飛行試験で検証するには多大な時間とリスクを要する。そこで、当社は、上記の状態を模擬できる大型地上試験装置を開発するとともに、本報で紹介する大規模解析技術を用いて試験条件を絞り込み、短期間で検証試験を完了させる見通しを得ることができた。本大規模構造・機構・制御連成解析技術を適用することにより、同様の開発に際し、機体性能を効率的に評価できるとともに、検証試験を合理化して開発を加速することが可能となる。

1. はじめに

航空機は急旋回や突風などさまざまな荷重が作用している中でも操縦性を確保し飛行しなければならない。すなわち、空力最大荷重が作用し、主翼などの機体に変形している中で舵面や操縦系統機器が周辺構造に干渉することなく正常に作動できるか、また、故障が生じた際に検知し、パイロットに知らせるとともに予備システムが作動し飛行安全を保てることを実機で検証する必要がある。これらを飛行試験で検証するには多大な飛行時間と労力を要する。

そこで、当社は、舵面作動性能を評価できる全機地上試験装置を開発し、更に、大規模解析技術を用いて試験を合理化することによって、短期間で実機検証を完了させる見通しを得ることができた。本報では、これらの事例を紹介する。

2. 全機舵面作動試験装置

飛行中のさまざまな運動・飛行条件を模擬するために、[図1](#)に示す操縦舵の舵角に応じて空力荷重を模擬し負荷する機構を開発した。その際、主翼曲げ変形に追従して舵面に荷重を負荷できるように、地上には固定せず主翼上に荷重負荷治具を設置する構成とした。特に、スラットとフラップは高揚力装置と称し、離着陸時に舵面が前後に大きく展開するため、荷重負荷点と位置に応じて空力荷重を模擬できるように、位置決めアクチュエータと荷重負荷アクチュエータを組み合わせた機構を開発した。機体運動制御に用いられるエルロン、スポイラ、ラダー、エレベータはヒンジ周りの1軸回転運動機構となっており、高い作動速度と応答性の要求があり、荷重負荷装置も軽量・高応答性を重視して設計した。

*1 総合研究所 主席プロジェクト統括

*2 総合研究所 機械研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*3 物流・冷熱・ドライブシステムドメイン ソリューション事業統括室 主席部員 技術士(機械部門)

*4 総合研究所 機械研究部

*5 総合研究所 強度・構造研究部

*6 三菱航空機株式会社 技術部 グループリーダー 技術士(総合技術監理部門, 機械部門)

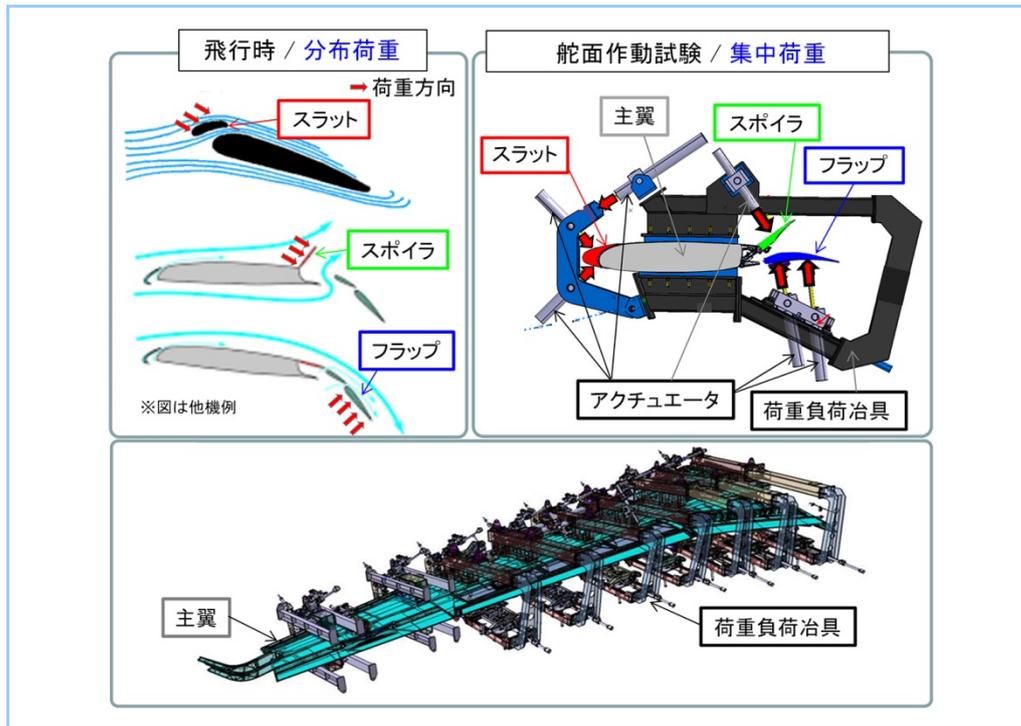


図1 実大構造試験装置概観

地上試験では飛行時の分布荷重をアクチュエータによる集中荷重で模擬するが、舵角や主翼変形時に適切に荷重を入力できるようにリンク機構を考慮して開発した試験装置概観を示す。

3. 大規模構造・機構・制御連成解析

構造・機構・制御の各シミュレーションを連成させるため、図2に示す機構解析ソフトAdamsをプラットフォームとし、Nastranによる構造変形解析、MATLABによるアクチュエータの動特性を模擬したシステムを構築して連成させ、Adamsにて機構の隙間や摩擦等の影響を考慮したシミュレーションを実施可能な手法を開発した。これにより、時々刻々変化する変形・運動・制御の連成挙動を表現可能としたとともに、計算環境と解析技術の発展に伴い、従来よりも短時間で計算、評価できるようになり、後述する試験ケース削減に向けたパラメータサーベイを実施可能とすることができた。

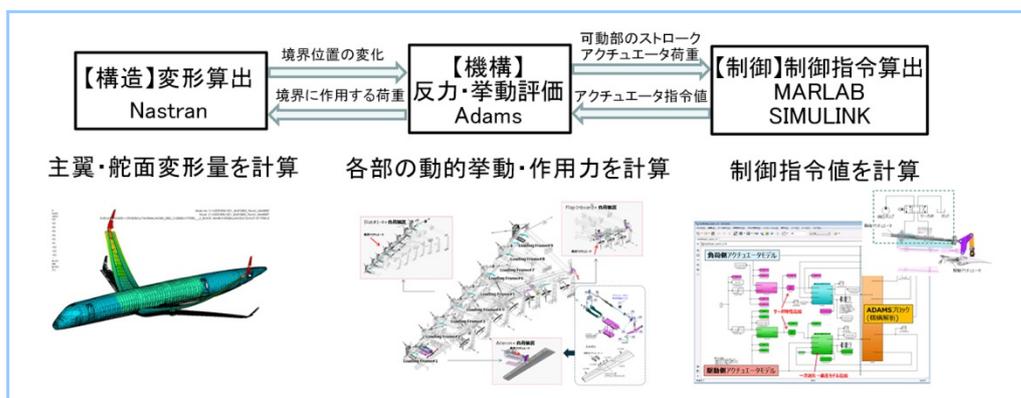


図2 大規模構造・機構・制御連成解析

全機地上装置を開発するにあたり、構造・機構・制御連成解析を活用した。

4. 舵面作動試験

舵面作動試験では、下記2種類の目的で実機性能を評価した。

(1) Operation test

飛行条件下(機体に変形した状態)において各舵面が正常に作動することを実証する。

(2) Failure mode test

飛行中に舵面作動部に故障が発生した場合に検知し安全に飛行できることを実証する。ここで、Operation test の試験結果の一例を紹介する。飛行中の揚力により主翼が上方に曲がる挙動を模擬するため、荷重負荷治具から集中荷重を主翼に与えた試験結果について変形量を図3に示す。また、図3には解析結果も併記しているが、誤差は5%以下と精度よく一致していることが分かる。

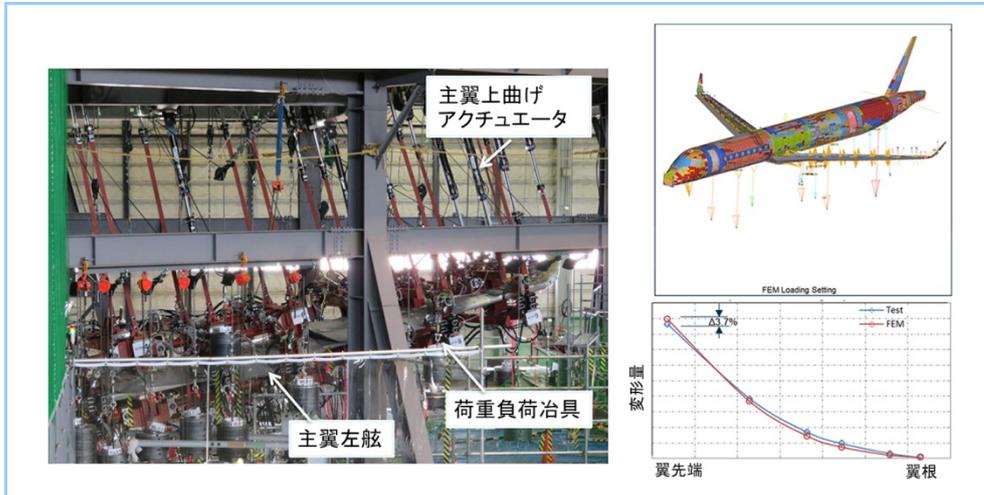


図3 主翼上曲げ変形時の試験と解析結果の比較

舵面作動試験装置を主翼に搭載した境界条件下にて主翼変形量が解析と5%以内で一致していることを確認した。

次に、エルロン舵面作動試験と機構解析結果について紹介する。図4に示すとおり、解析に関しては、エルロン舵面構造を弾性体でモデル化し、主翼との結合部、アクチュエータ作動部の軸受の反力や摩擦力をモデル化して、アクチュエータの動特性をモデルに考慮した。その結果、図5に示すとおり、舵面の変形およびアクチュエータ荷重を精度よく再現できることが確認できた。これらの比較結果より、開発した解析手法により、実機の挙動を高精度に再現可能であることを確認した。

また、舵面作動試験では、飛行条件下において主翼及び機体に変形している状況で舵面が正常に作動することも実証した。機体に荷重を負荷した際にどのように変形・姿勢変化するか、パイロットが操縦舵に指令を出してから何秒で目標舵角に到達するか、その際の油圧および電動機器の応答、各種軸受の摩擦、メカロスはどのように影響するか、アクチュエータ荷重と舵面の変形・応答はどう変化するかなど、これらのすべてを予測可能とするために、試験データと構造・機構・制御解析結果の一つ一つに対して、丁寧に比較、精度検証を実施することで解析精度向上に取り組んだ。

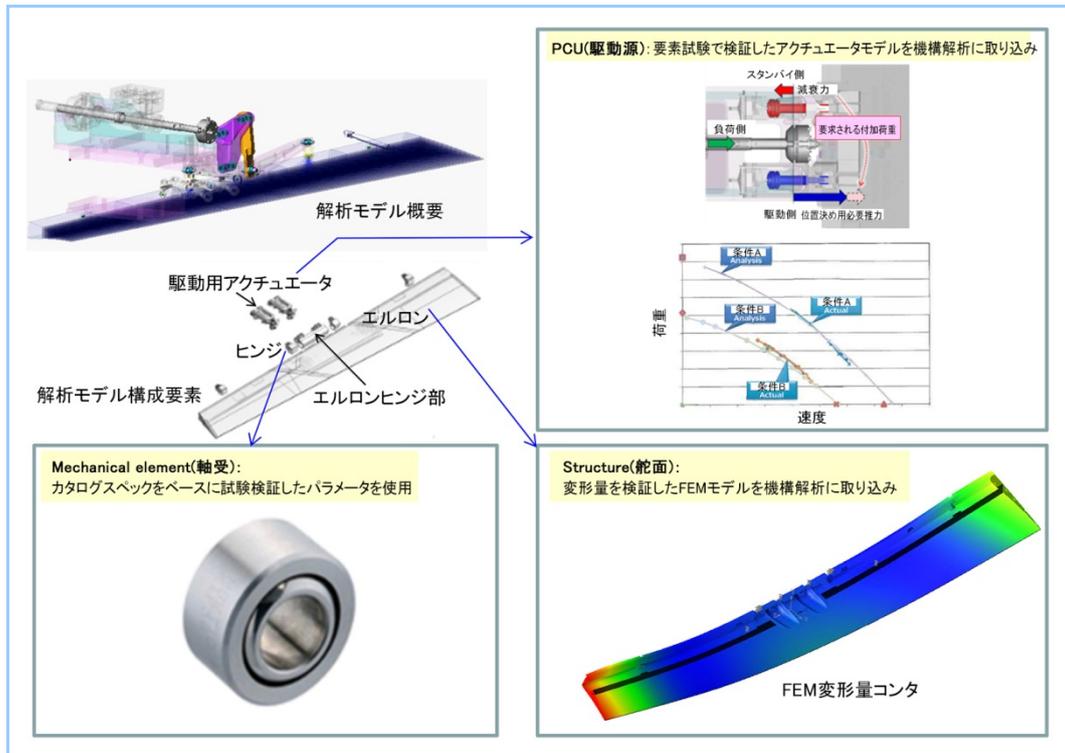


図4 機構解析モデル(例:エルロン)

エルロン機構解析モデルは舵面構造をFEMから弾性体として取り込み、油圧動特性はMATLABから単体の基礎データと数学モデルを取り込んだ。舵面回転機構に用いられる軸受の摩擦係数はカタログ値をベースとして試験検証を重ねた。

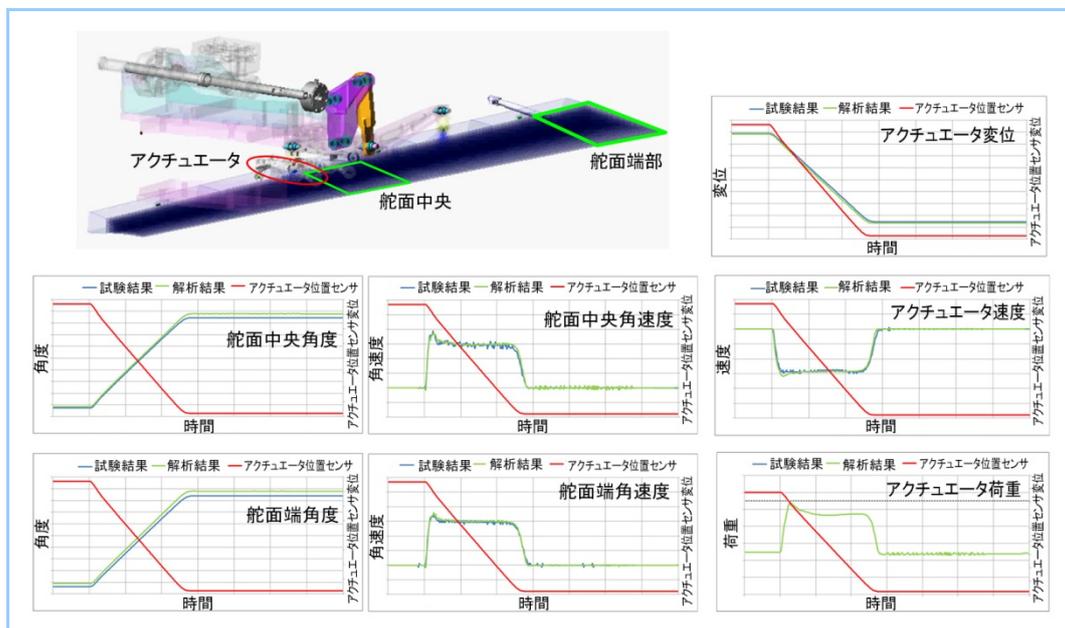


図5 舵面作動試験と解析結果の比較(例:エルロン)

エルロン舵面作動試験の時系列データを示す通り、解析と試験で変形・応答・荷重が高精度で一致していることを確認できる。

5. 大規模解析による試験ケース削減

スラットやフラップの故障は、作動機構のジャミングや支持機構の損傷・欠落などのさまざまな要因が考えられる。これらすべての偶発的な故障に対しても舵面の作動性能を評価するには膨大な組み合わせの検証が必要となってしまう。そこで開発した連成シミュレーション手法を用い、アクチュエータ荷重や舵面変形、故障検知性を評価した。例として、スラットスキュー解析結果について紹介する。スラットは主翼の前縁にあり、離着陸時に前方に展開し低速域で高い揚力を得

ることを目的とした舵面機構である。通常、複数のアクチュエータとレールにて舵面を作動させるが、一箇所が固着するなどの故障が生じると舵面がねじれて(スキュー)作動してしまう。その結果、左右非対称となり機体に作用する空気力がバランスしなくなり安定性が低下する。この状態で安定して飛行するために故障を検知し舵角を保持する必要がある。スラットの作動方法を図6に示すとおり、ロータリアクチュエータにピニオンギアを配し舵面に取り付けたレールに駆動力を与え、目標位置に作動させる。機構解析では、これら一つ一つの部品をモデル化し、ローラとレール間には図7に示すとおりクリアランスと接触条件を考慮した。スキューの検知方法については、図6に示すとおり隣接するスラット舵面間にスキューセンサが設置され、舵面間の相対距離が増加し閾値を超えると検知する仕組みとなっている。一箇所の作動機構が固着した状態でロータリアクチュエータが回転すると他のレールは展開するが、一箇所が固着しているため作動できなくなる。この状態が続いた場合、図8に示す舵面にねじれる挙動が生じ、スキューセンサが検知する。レールやローラの固着などさまざまな故障の要因が考えられ、これらすべてを解析にて予測し最酷条件を絞り込んだ。その結果、検証に要する期間を短縮できる見通しを得ることができた。

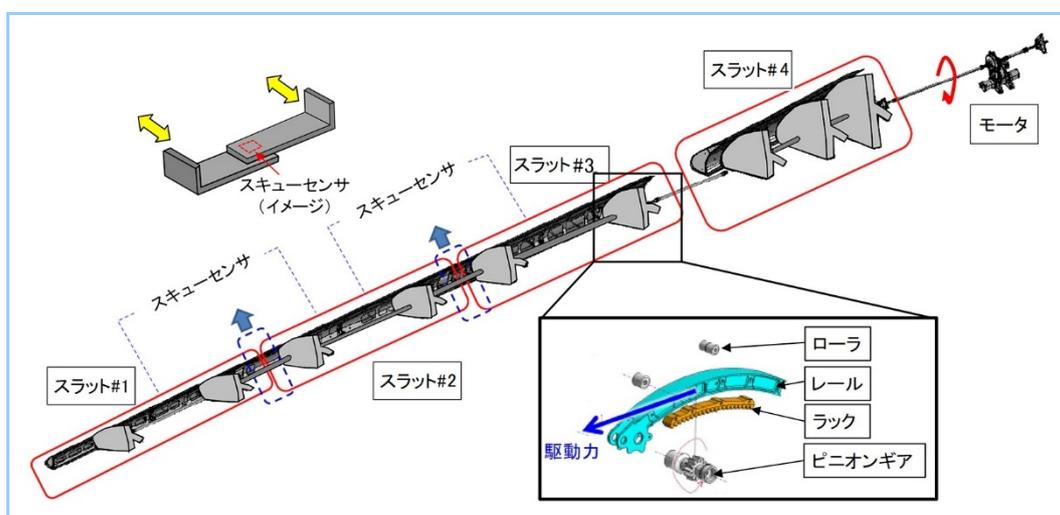


図6 スラット構造と作動方法

スラット舵面機構はロータリアクチュエータにピニオンギアを配し舵面に取り付けたレールに駆動力を伝え、舵面を展開する。

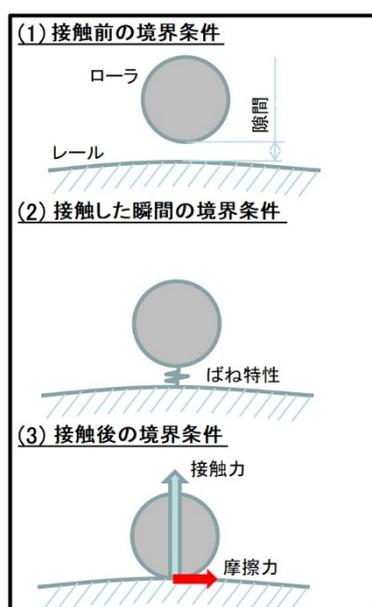


図7 スラットローラとレール間の接触境界条件

ローラとレール間にはクリアランスが設けられており、接触有無により拘束が変化する。機構解析では上記3種類の接触条件を考慮した。

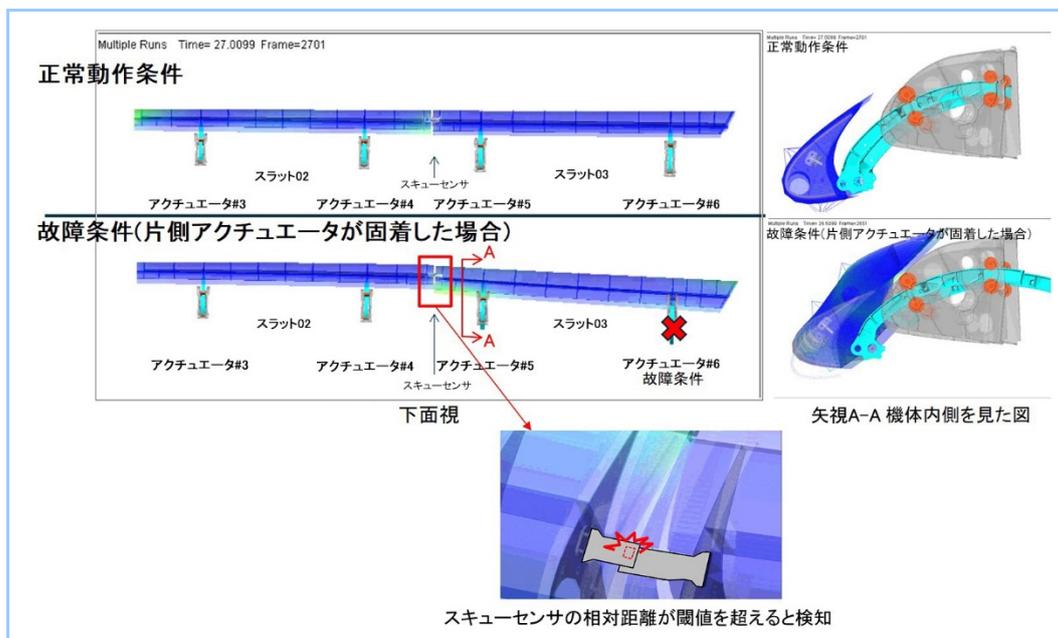


図8 スラット舵面の故障模擬解析結果

機構解析結果を通常作動時と故障時のスラット舵面の挙動を示す。故障時は舵面がねじれるように変形しスキューピンがセンサに接触し故障を検知していることがわかる。

6. まとめ

従来、大規模連成解析は膨大な計算機負荷や煩雑な解析作業が課題となっていたが、計算能力拡大と解析技術の発達により短期間かつ低コストで評価することが可能な状況となっている。こうした背景から、本報で紹介した機構解析技術を軸とし、構造、制御も連成させたシミュレーション手法は、作動させる機構の性能や機能性について短期間で予測、評価することが可能である。また、偶発的な故障に対する挙動なども評価でき、従来、実機での検証が必要であった作業を解析で事前に補うことが可能となる。今後も、本報で紹介した連成解析手法を適用して、さまざまな製品の開発スピードアップや手戻り未然防止に貢献していきたい。