台車のき裂進展を数値計算で予測する



高垣　昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室
エキスパートマネージャー



山本　勝太
Masataka Yamamoto
車両技術研究部
車両強度研究室
エキスパートマネージャー



小笠原　柚
Yu Ogasawara
車両技術研究部
車両強度研究室
研究員



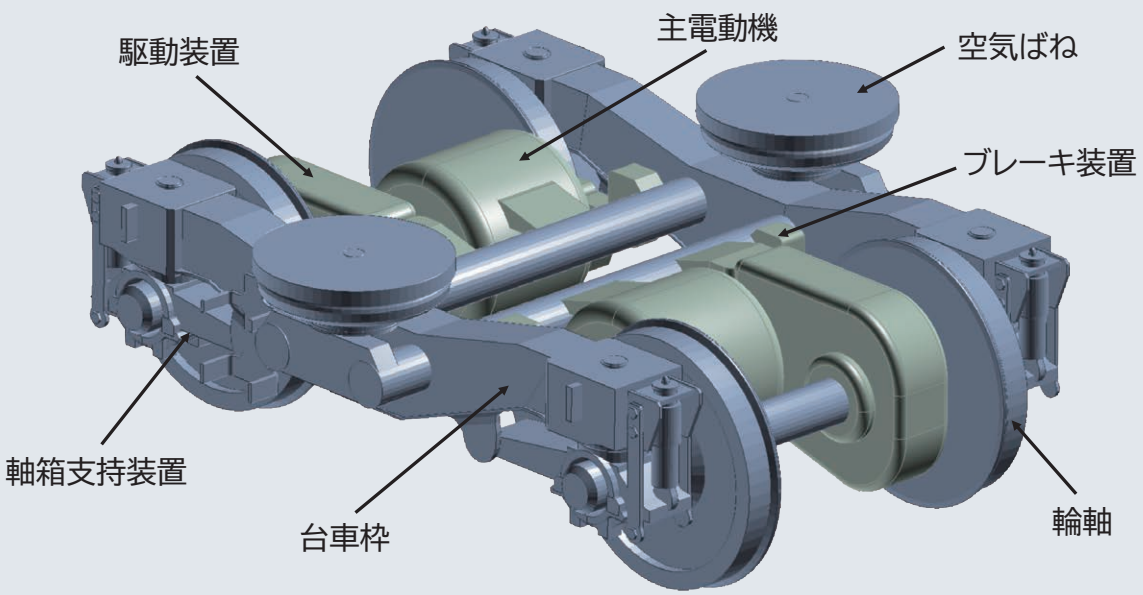
三浦　友裕
Yusuke Miura
車両技術研究部
車両強度研究室
研究員

はじめに

日本の鉄道は，世界でもトップクラスの安全性を誇っています。私たちが毎日安心して電車や新幹線に乗ることができるのは，車両や線路，信号設備などが定期的に点検され，適切に整備されているからです。

鉄道車両には，輪軸，主電動機，ブレーキなどで構成される「台車」と呼ばれる装置があります。図1には近年の新幹線や通勤型電車などで使用される台車の概要を示します。台車は車体を支えながらレールの上を走る重要な装置となります。その台車のフレームとなる部材を「台車枠」といいます（図2）。台車枠は長い期間使用されるうちに，側はり，軸はり支持装置受，主電動機受などの溶接部付近からごくまれに小さな欠陥などを起点とした「き裂」が発生することがあります。多くの場合，最初はとても小さく，材料の内部から成長するため，目視で見つけることが困難です。もしき裂が大きくなりすぎると部材が破損し，車両の安全性に影響を与えるおそれがあります。そのため鉄道会社では定期的な検査を行い，異常の早期発見に努め

図1　鉄道台車の構造



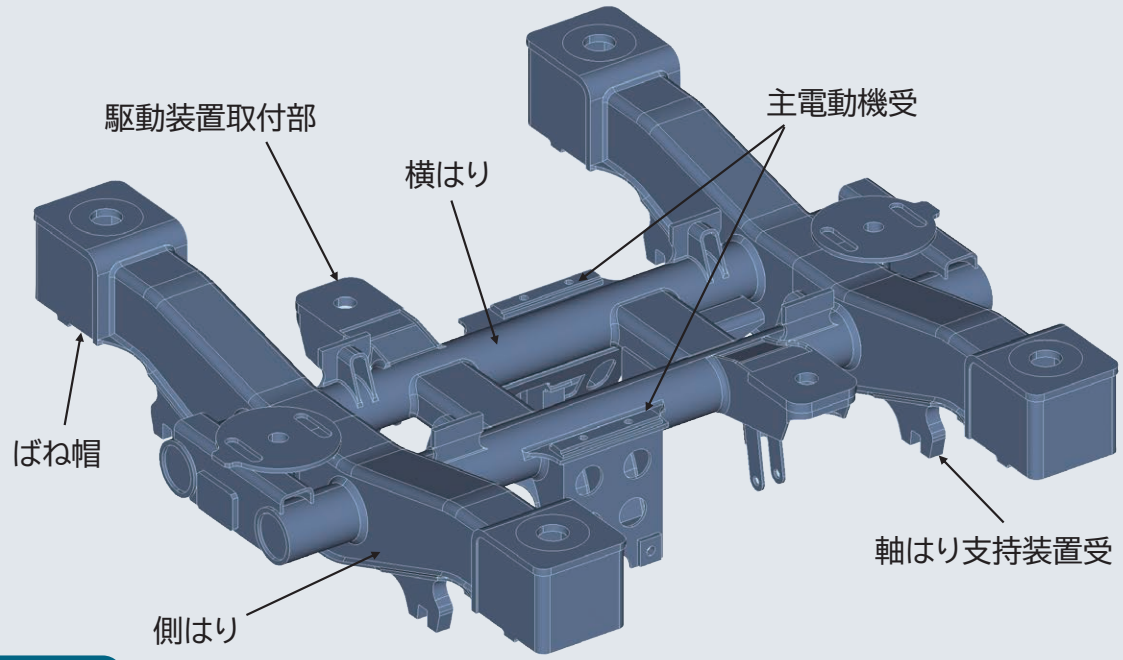


図2　台車枠の構造

ています。しかし，どんなに丁寧に検査しても，非常に小さなき裂を完全に見つけることは簡単ではありません。

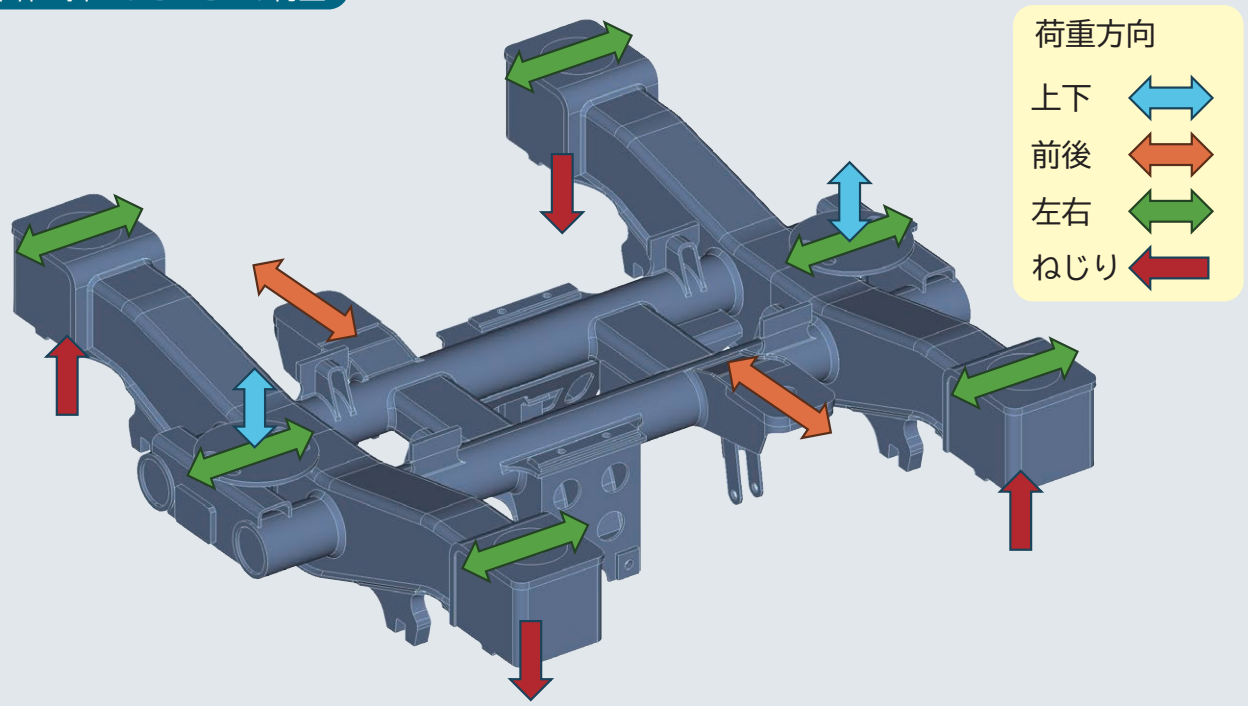
そこで，「もしき裂が見つかったら，その後どのように成長するのかを事前に予測できないだろうか」と考え，その答えのひとつが，「き裂進展シミュレーション」という技術です。この技術によって，き裂の現在の状態だけでなく，その未来の姿まで予測できるようになります。今回は，このき裂進展シミュレーションについて紹介します。

運用時の台車枠にかかる負荷

一般的には，物体に力が加わると変形したり壊れたりします。台車枠には，車体や台車を構成する機器の支持力や走行中は常にさまざまな力が加わっています（図3）。

最も大きな力は，車体や乗客の重さによるも

図3　台車枠に掛かるさまざまな荷重



のです。通勤型電車では非常に多くの乗客が乗るため，その重さを支えなければなりません。また，レールにはわずかな凹凸や継ぎ目があり，列車が通過するたびに振動や衝撃が発生します。さらに，カーブでは遠心力によって車両が外側へ押し出されます。加速すると後ろ向きの力が，ブレーキをかけると前向きの力が生じます。特に非常ブレーキをかけたりすると，車体にまで強い衝撃が伝わることがあります。

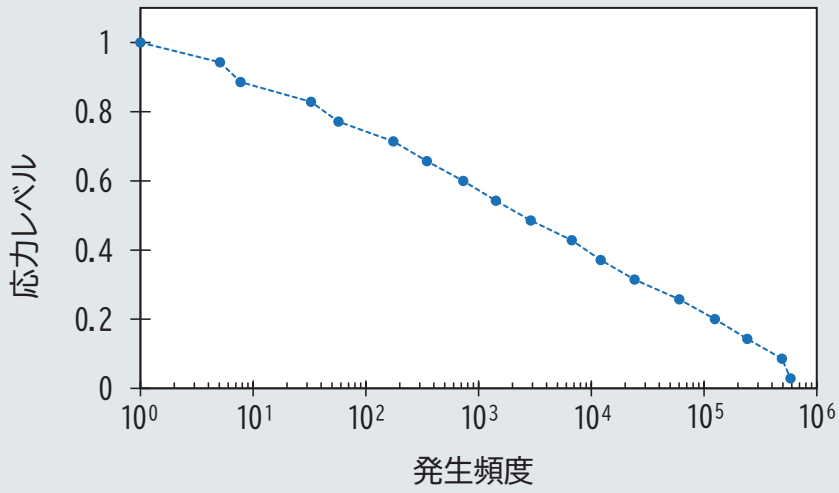
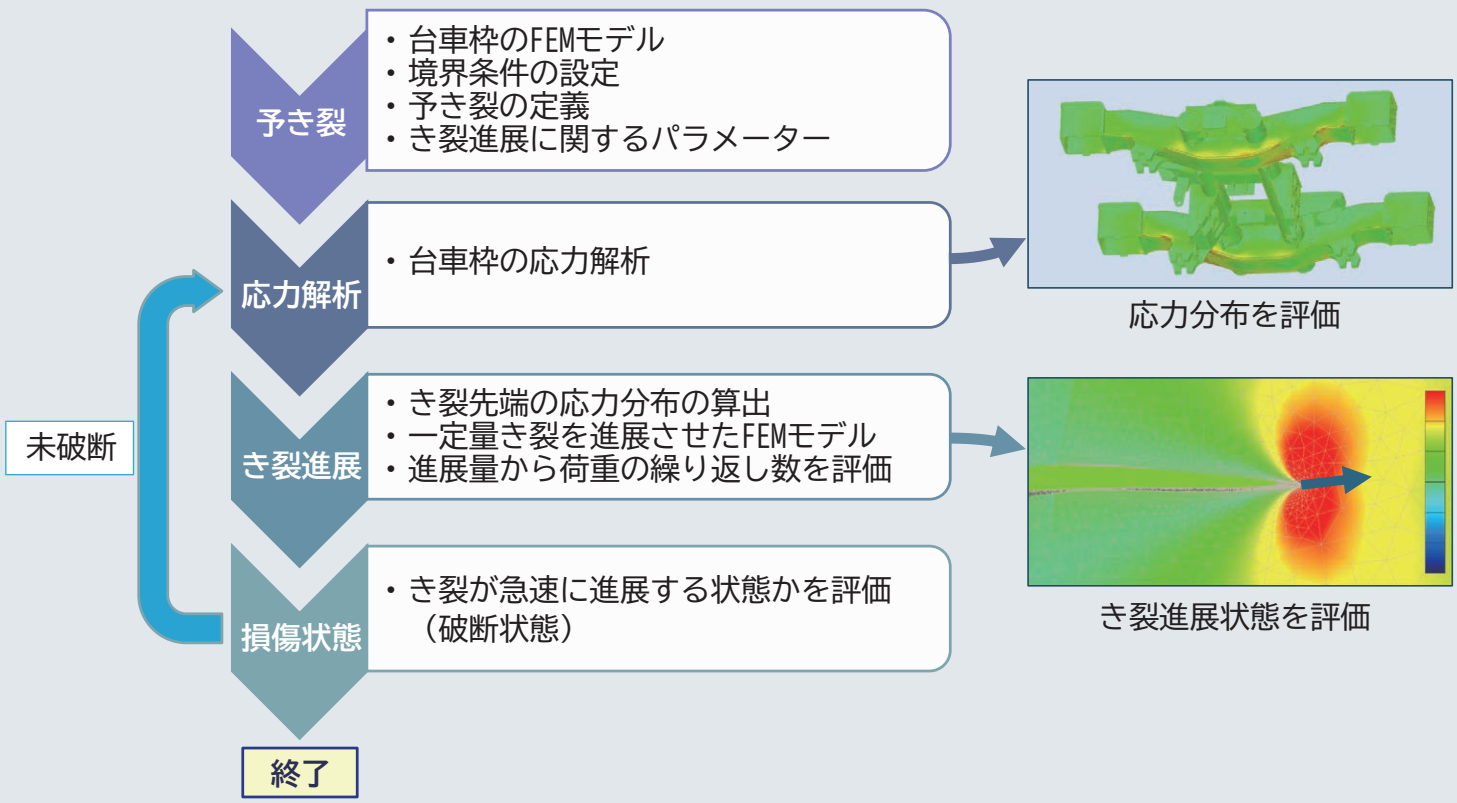


図4　実路線走行時の応力レベルごとの発生頻度

これらの力は一度だけでなく，走行するたびに大小さまざまな力が繰り返し加わります。金属は一見すると頑丈ですが，繰り返し力を受け続けると少しずつ傷みます。これを「金属疲労」といいます。この金属疲労にともなって生じる き裂を「疲労き裂」といいます。台車枠にも同じような現象が起こり，溶接部分や小さな欠陥がある場所から疲労き裂が発生することがあります。

き裂の成長を正しく予測するためには，実際の車両が走行中にどのような力が加わり，部材の内部に生じる応力を知る必要があります。

図5　き裂進展シミュレーションの流れ



そこで，これまで行ってきた研究では，試験車両を使って走行中の台車枠に発生する応力を測定しました。応力とは，「部材の内部にどれだけ力が発生しているか」を表す量です。例えば棒状の物体の両端を引っ張ると物体は伸びて，引張応力が生じます。逆に圧縮すると物体は縮まり，圧縮応力が生じます。より強い力で引っ張ったり圧縮したりすると応力は大きくなります。

走行試験では，列車がさまざまな区間を走るときに生じる応力を測定し，

- どのくらい大きな応力が発生するのか
- その応力がどれくらいの回数発生するのか

を調べました（図4）[1]。こうして得られたデータを整理することで，実際の運転条件を反映したき裂進展シミュレーションが可能になります。

き裂進展シミュレーション

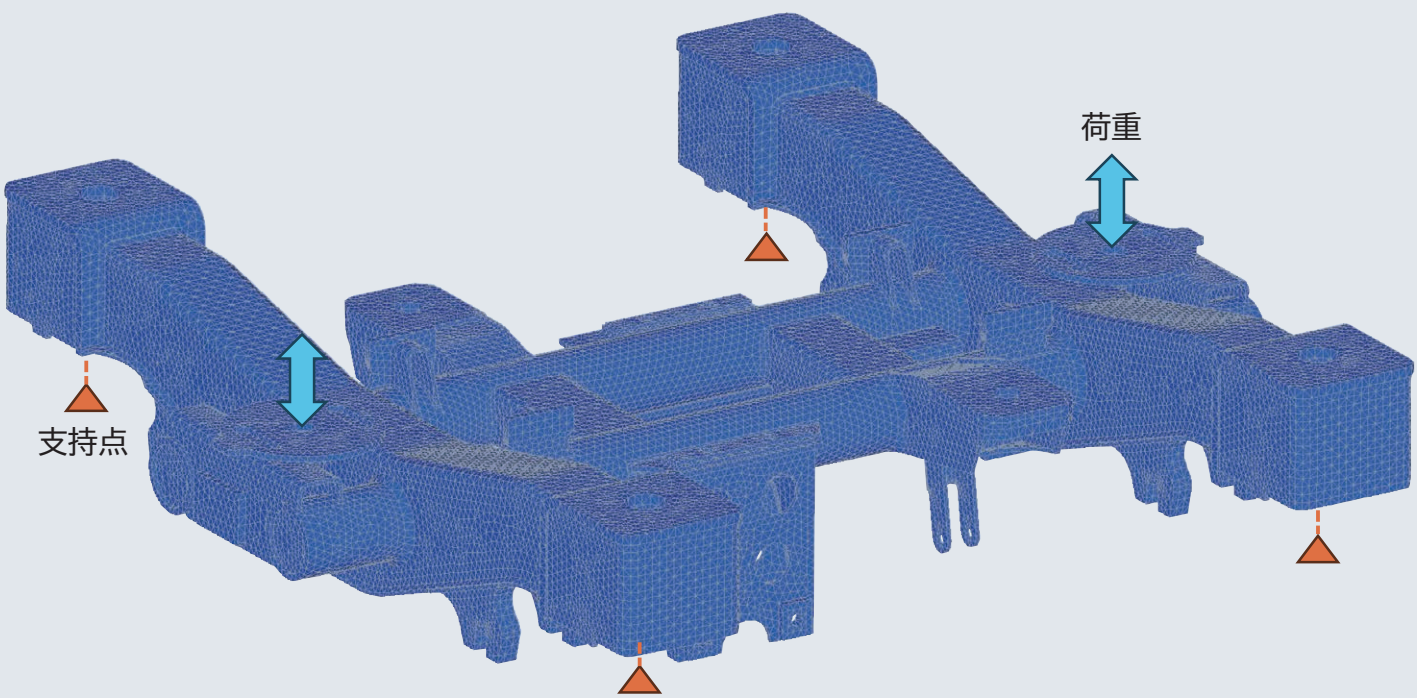
き裂進展シミュレーションとは，コンピューターの中に台車枠を再現し，き裂がどのように成長するかを計算する技術です（図5）。

まず，有限要素法（FEM）☞という手法を用いて台車枠に生じる応力を求めます。はじめに台車枠の形や大きさを三次元FEMモデルとしてコンピューター上に作成します（図6）。そして，き裂が発生しそうな場所に小さな初期き裂を設定します。次に，実際の走行試験で得られた力のデータをモデルに与えます。するとコンピューターにより，き裂の先端周りにどれだけ大きな応力が発生するかが計算できます。紙に小さな切れ込みを入れて引っ張ると切れ込みの先から破れやすくなります。これは切れ込みの先端に大きな応力が集中するからです。

☞ 有限要素法

機械部品などの複雑な形をした構造物を小さな要素に分け，それぞれにかかる力や変形をコンピューターで計算する技術です。細かな計算結果を組み合わせることで，どこに大きな力が集中するか，どのように変形するか，どこから壊れる可能性があるかを予測できます。安全で信頼性の高い製品や構造物の設計に欠かせない解析手法です。

図6　台車枠の有限要素法解析モデル



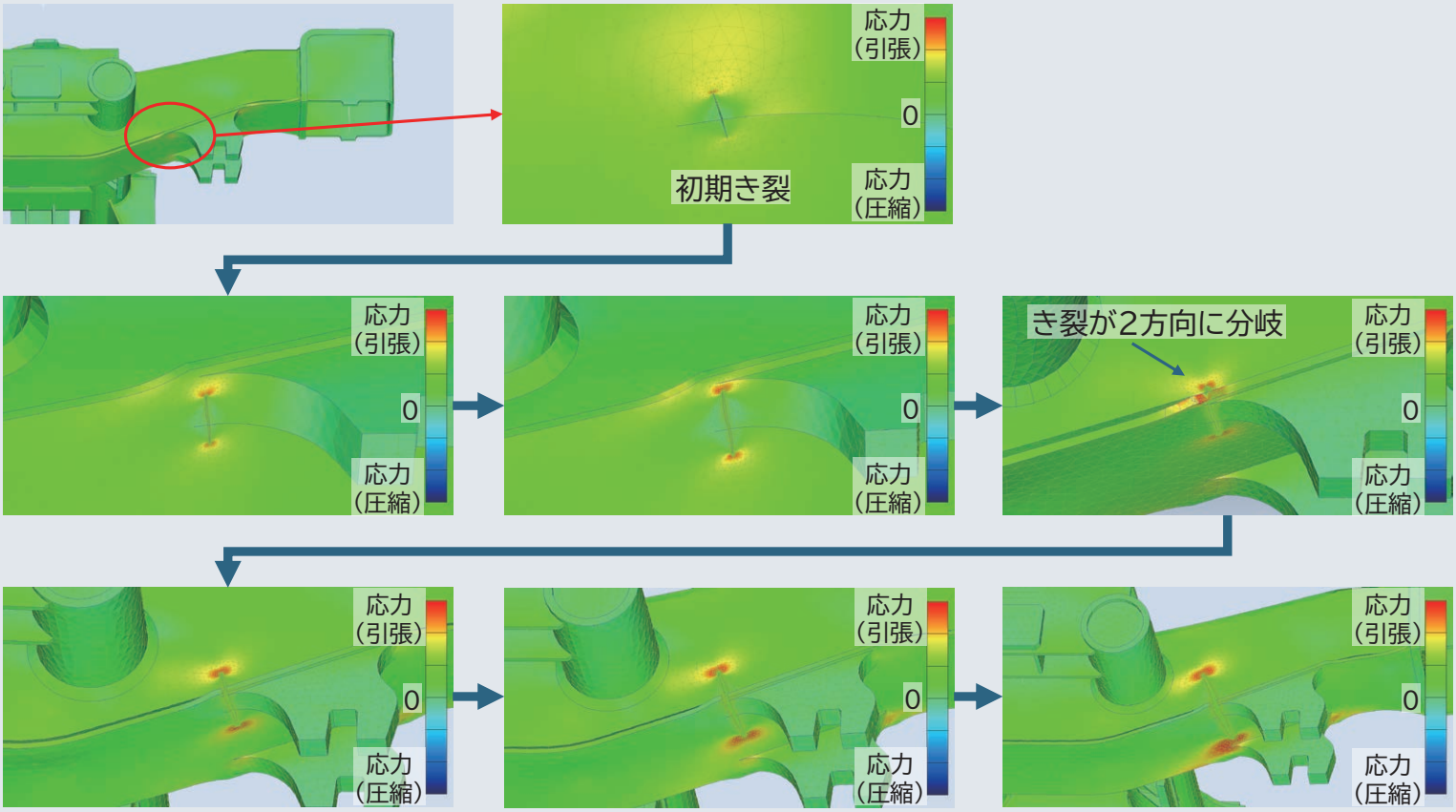


図7　シミュレーションによるき裂進展の再現

台車枠のき裂も同じで，き裂の先端には特に大きな応力が生じます。その応力の大きさを評価しながら，き裂がどちらの方向へどれだけ成長するかを計算します。計算が終わると，き裂を少しだけ伸ばした新しいモデルを作ります。そして再び同じ計算を行います。

この作業を何度も繰り返すことで，

- き裂がどの方向へ進むか
- どのくらいの速さで成長するか
- 将来どの程度の大きさになるか

を予測することができます（図7）。

台車枠に生じるき裂

シミュレーションを行った結果，き裂の成長は非常に複雑であることが分かりました。き裂は周囲の形状や力のかかり方の影響を受けながら，途中で向きを変えたり，枝分かれしたりします。さらに，もともと一つだったき裂が複数のき裂に分かれることもあります。台車枠には溶接された部分が数多くありますが，そうした部分を通過するときに進み方が変わる場合もあります。図8にき裂先端の軌跡を示します。この図よりき裂の破面がどのように進展していったかがわかります。このようなき裂進展の状態は実物だけを観察してもなかなか把握できません。しかしシミュレーションを利用すれば，内部で何が起きているかを詳しく調べることができます。

また，き裂の長さと走行距離の関係も知ることができます。図9にはき裂進展曲線の例を示します。このき裂進展曲線を用いれば，「現在5ミリメートルのき裂がある場合，10万キロメートル走行したらどのくらいになるだろうか」といった予測が可能になります。

現在行われている検査は,「今の状態」を調べることが主な目的です。これは非常に重要ですが，それだけでは将来の変化までは分かりません。一方，き裂進展シミュレーションを使えば,「未来の状態」を予測できます。

例えば，ある台車枠に小さなき裂が見つかったとします。そのとき，

- すぐに補修するべきなのか
- 半年後まで使えるのか
- 次の検査まで安全なのか

を科学的な根拠に基づいて判断できます。

これにより，安全性を確保しながら必要なタイミングで補修や交換を行うことができます。また，まだ問題のない部品を早すぎる時期に交換する必要もなくなるため，保守作業の効率化にもつながります。

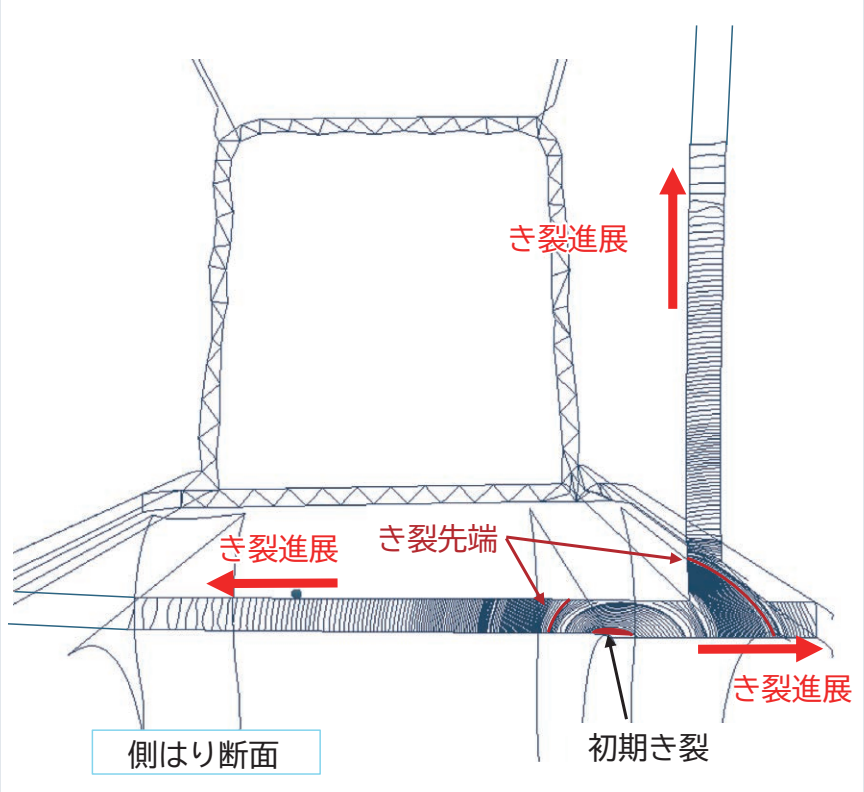


図8　き裂破面におけるき裂先端の軌跡

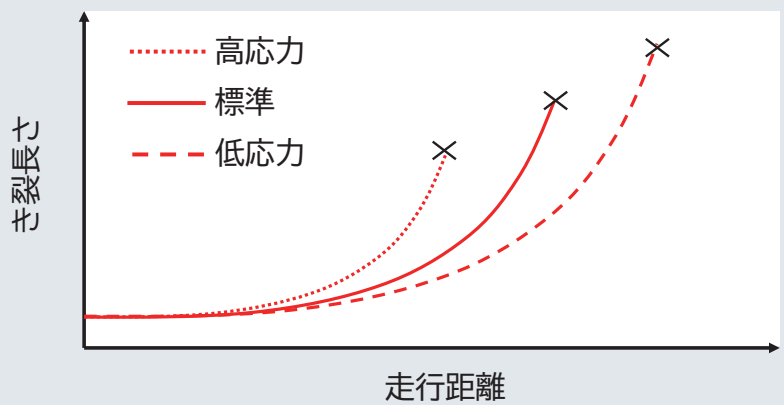


図9　き裂進展曲線の例

おわりに

鉄道の安全は，日々の点検や整備によって支えられています。しかし，将来さらに安全な鉄道を実現するためには,「今を見る技術」だけでなく,「未来を予測する技術」も重要になります。

き裂進展シミュレーションは，コンピューターの能力を利用してき裂の成長を予測し，部材が将来どのような状態になるのかを調べる技術です。この技術によって，早めの対策や効率的な保守が可能になります。今後，実際の走行データがさらに蓄積されることにより，予測の精度はますます高くなるでしょう。そして，車両の寿命をより正確に評価できるようになれば，鉄道の安全性向上に大きく貢献できると期待されています。RRR

文　献

1）山本勝太，加藤祐貴，小笠原柚：鉄道車両用台車枠に発生する実働応力頻度分布の統計的評価，日本機械学会論文集，Vol.92，No.955，p.25-00206，2026