

RC床版の輪荷重走行試験再現解析と損傷評価に関する一考察

(株)コムスエンジニアリング 正会員 ○土屋 智史
 首都高速道路(株) 正会員 岸田 政彦
 首都高技術(株) 正会員 津野 和宏
 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中澤 治郎

1. 検討の目的

既設道路橋のコンクリート床版の移動繰り返し荷重による疲労損傷(環境作用による影響と複合した損傷を含む)が顕在化し、新設および維持管理において、適切な対策が必要となっている。この問題に対しては、古くから輪荷重走行試験による検討¹⁾が行われており、多くの成果が報告されてきた。近年では、非線形有限要素解析²⁾によって高い精度で応答を評価できるようになっており、任意の境界・荷重条件に適用でき、環境作用の影響を直接考慮できる拡張性も有していることから、その重要性が高まっている。しかし、建設年度の異なる様々な形状・配筋のRC床版の繰り返し載荷に対して統括的に非線形有限要素解析を適用し、解析的に損傷評価を試みた事例は少ない^{3),4)}など。本検討では、今後の非線形解析の一層の活用を念頭に、一連のRC床版の輪荷重走行試験の再現解析⁵⁾を実施し、損傷評価に関する考察を行う。

2. 解析対象とモデル化の概要

コンクリート床版の輪荷重走行試験の結果が包括的にまとめられている文献⁶⁾のデータのうち、RC39-3～RC39-9, RC47-2, RC8n-1床版を対象として、非線形有限要素解析を実施する。解析ツールには、RC床版や合成床版の繰り返し載荷に対して適用実績を有し、コンクリートの高サイクル疲労損傷が、圧縮、引張、ひび割れ面せん断伝達の各基本構成則レベルで考慮されているCOM3^{2),3)}(研究版)を用いる。

解析要素モデルの概要図を図-1に示す。モデル化に際しては、載荷方法や境界条件は実験時を再現し、対称性を考慮した1/2モデルとする。長辺は単純支持とし、短辺は弾性支持として、支持版を床版に剛結する。載荷装置の鋼棒や鋼板、浮き上がり防止装置等はモデル化しない。20節点ソリッド要素にてモデル化し、鉄筋配置に応じた要素分割を行う。鉄筋配置部にはRC要素を、そうでない領域には無筋コンクリート要素を配置して、Tension Stiffening/Softeningを考慮する。引張軟化係数として、前者には0.4、後者には要素長と破壊エネルギーに応じた値を用いる²⁾。ただし、支点版と弾性支承は、弾性要素としてモデル化する。

材料特性は既往の報告⁶⁾より、試験値を参照して、入力値を設定する。ただし、コンクリート引張強度は乾燥等の影響を勘案して、材料試験値を一律に低減した値を入力する。例えば、RC8n-1床版では、コンクリートの圧縮強度33.1 N/mm²、引張強度1.584 N/mm²、弾性係数27.9 kN/mm²、ポアソン比0.150とし、鉄筋の降伏強度は334 N/mm²(主鉄筋)、358 N/mm²(配力筋)とした。

荷重条件は、一定荷重載荷または土研方式の階段状荷重漸増載荷試験方法を模擬する。後者では、157 kNを初期荷重として、走行回数4万回(2万往復)ごとに19.6 kNずつ荷重を増加させ、床版が破壊に至るか、または392 kN(走行回数52万回)まで繰り返し走行を行う。ここでは、自重を考慮せず、移動荷重による荷重制御にて疲労繰り返し載荷を行う。なお、対数積分法⁴⁾を導入して計算時間の軽減を図るとともに、載荷速度が実験とおおよそ一致するように時間間隔を設定する。

3. たわみの進展

はじめに、一定載荷を行ったRC39-3～RC39-9床版の代表的な解析結果(たわみの進展)を図-2に示す。RC39-4床版はこの中では最も少ない881回目の載荷(載荷荷重105 kN)で、RC39-8床版はこの中では最も多い2,750,073回目の載荷(載荷荷重118 kN)でたわみが急増し、破壊に至ったと報告されている⁶⁾。変形が大

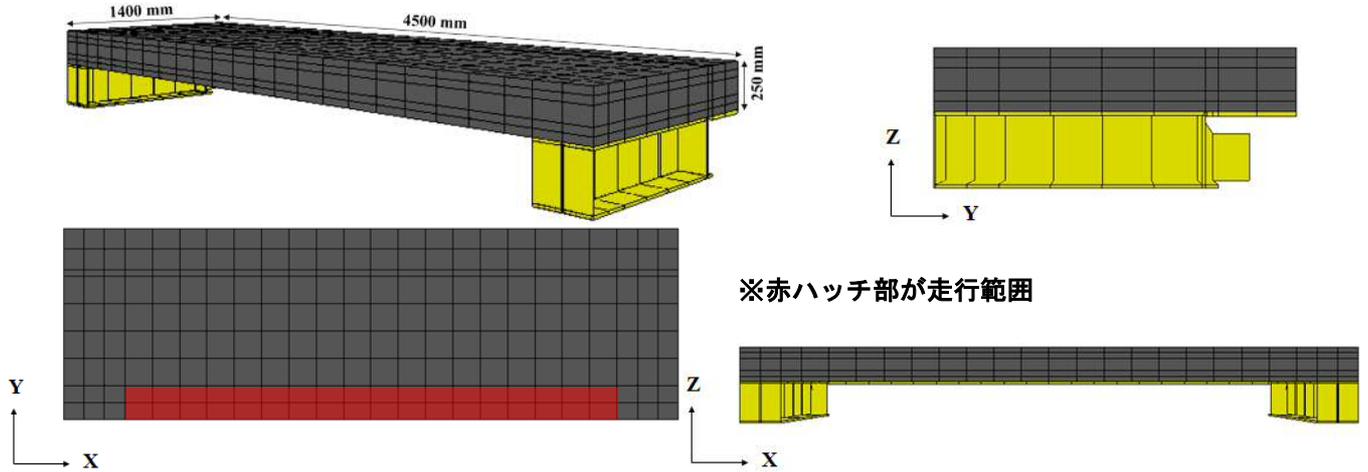
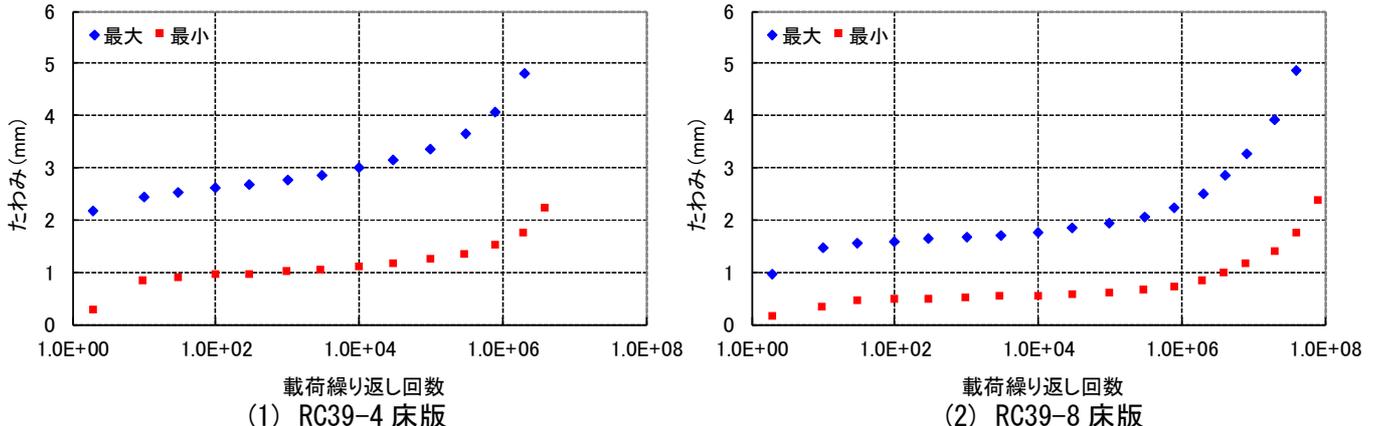
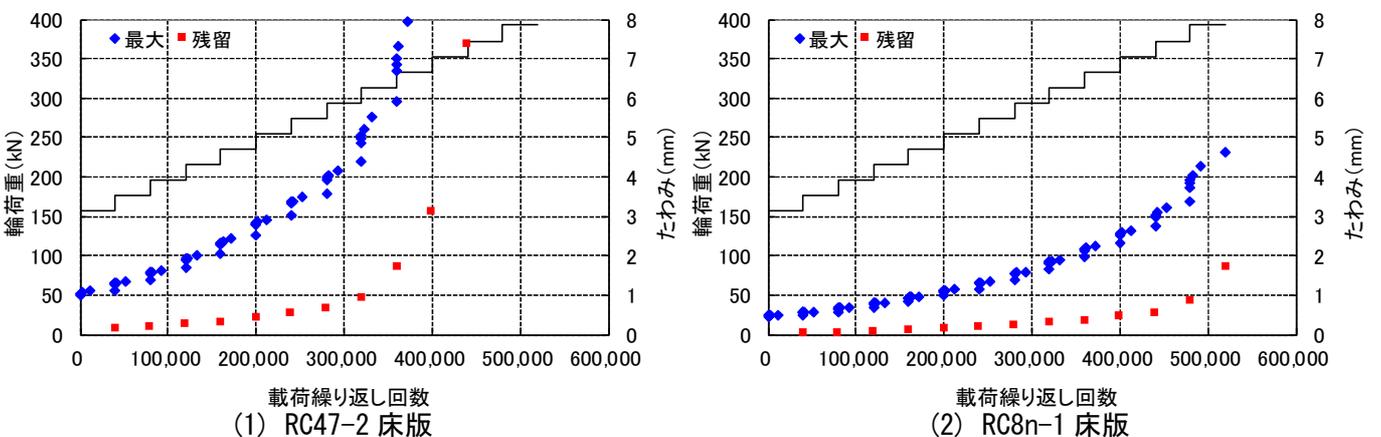


図-1 三次元有限要素モデル (RC8n-1 床版の例)



(1) RC39-4 床版 (2) RC39-8 床版

図-2 一定載荷の解析結果グラフ例 (たわみの進展)



(1) RC47-2 床版 (2) RC8n-1 床版

図-3 階段状載荷の解析結果グラフ (たわみの進展)

きくなって以降、実験ほどにはたわみが急増しないものの、載荷荷重の違いにより、たわみの進展にも差異が生じていることが分かる。いずれも、実験と同様に、鉄筋は降伏していない。

次に、階段状載荷を行った RC47-2, RC8n-1 床版の解析結果 (たわみの進展) を図-3 に示す。RC47-2 床版は輪荷重 314 kN 時の 327,725 回目の載荷で、RC8n-1 床版は輪荷重 392 kN 時の 489,555 回目の載荷でたわみが急増し、破壊に至ったと報告されている⁶⁾。解析においても、実験時とほぼ同様の荷重時にたわみが徐々に増大し始めていることが分かる。いずれも、実験と同様に、たわみが増大するまでに鉄筋は降伏していない。

4. 損傷評価に関する考察

いずれの解析においても鉄筋は降伏していないことから、繰返し載荷および荷重の漸増に伴うたわみの増大はひび割れ損傷の蓄積によるものと考えるのが妥当である。実際、コンクリートのひび割れ損傷を表す、偏差ひずみの第二不変量⁷⁾ $\sqrt{J_2}$ (局所値) の最大値の推移を確認したところ、図-2, 3 と図-4 の青印の比較より、

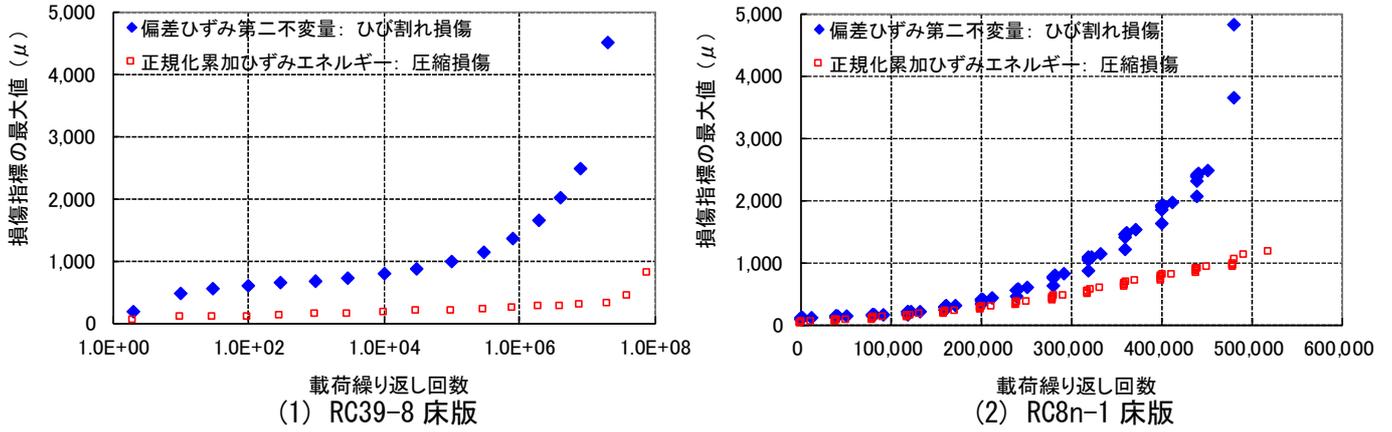


図-4 損傷指標(局所値)の最大値の推移

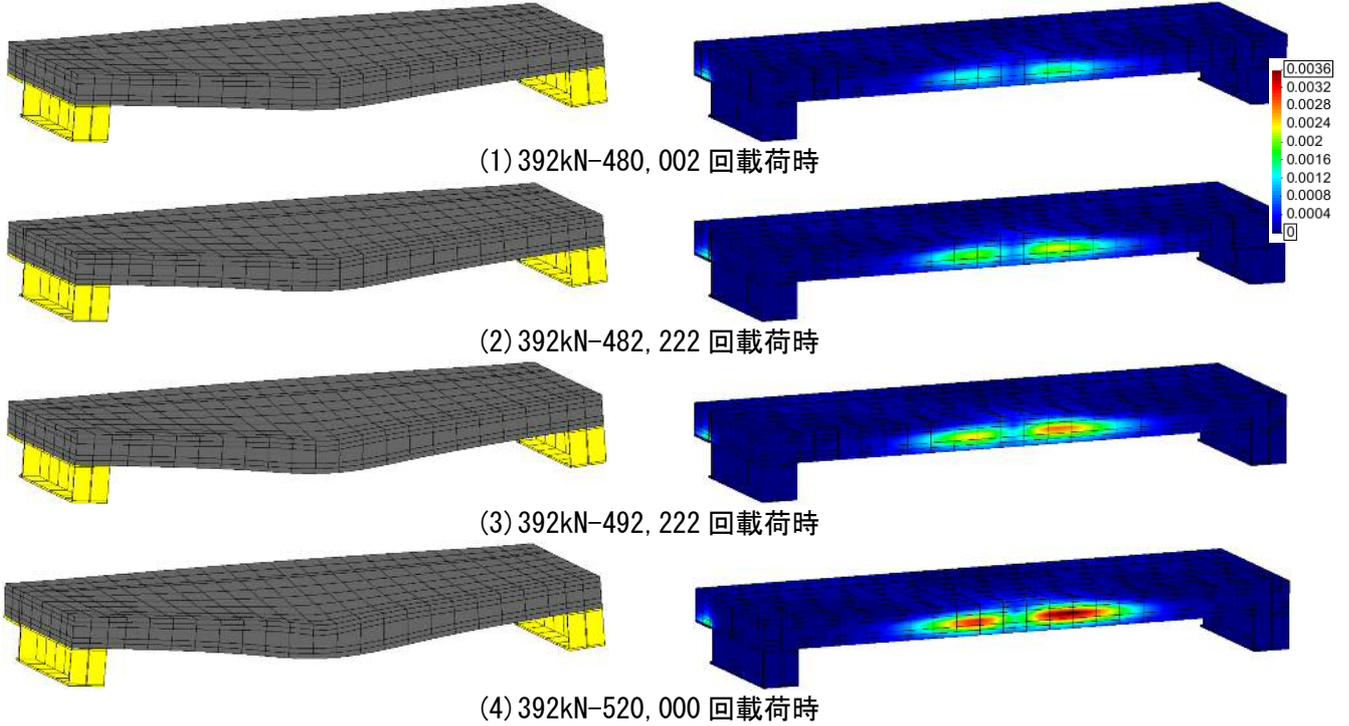


図-5 変形図(左, 変形 50 倍で表示) および偏差ひずみ第二不変量(非局所値)のコンター図(右)

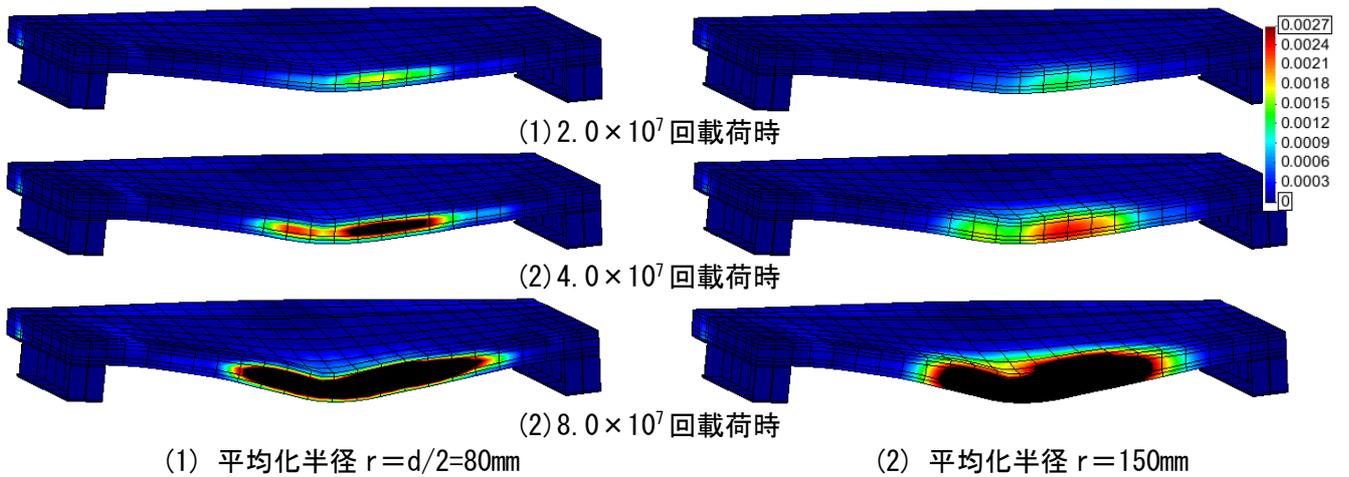


図-6 平均化半径の比較: RC39-8 床版の例(変形 50 倍で表示)

たわみの最大値と強い相関があることが分かる。荷重制御の解析において、何らかの判断基準なしに破壊回数を直接出力あるいは同定することは困難であるが、この指標を用いて、解析では損傷と破壊の判定を行うのがよいと考えられる。例えば、たわみを指標とする場合には構造形状や配筋、荷重・境界条件ごとに限界値を設定する必要があるが、材料の損傷と関連付けられた指標であれば、一意に限界値を設定できる可能性がある⁸⁾。

ただし、要素分割等の影響を受けるため、平均化処理した非局所値を用いることが望ましい。

RC8n-1 床版について、代表的な解析 STEP における変形図（変形量を 50 倍に拡大）と $\sqrt{J_2}$ （非局所値）のコンターを図-5 に示す。 $\sqrt{J_2}$ の重み付け平均を算出するに当たっては、平均化半径を 150 mm とした⁶⁾。繰り返し載荷に伴い、床版中央の対称面ではせん断変形が徐々に卓越し、たわみが大きくなってくるとともに、床版の内部で非曲げ型のひずみ（ひび割れ）損傷が蓄積していく様子が確認でき、実験挙動の傾向を捉えているものと考えられる。示方書⁷⁾およびそのもと

となった研究⁸⁾では、平均化半径 150 mm に対して 1000~1500 μ の限界値が例示されているが、この例では 1000 μ 到達時の載荷繰り返し回数は 4.64×10^5 回、同 1500 μ 到達時は載荷繰り返し回数 4.80×10^5 回であった。

その他の解析ケースについても、同じように重み付け平均化処理を行った偏差ひずみの第二不変量 $\sqrt{J_2}$ によって、損傷と破壊の判定を行えばよい。RC47-2 床版では、1000 μ 到達時の載荷繰り返し回数は 2.89×10^5 回、同 1500 μ 到達時は載荷繰り返し回数 3.20×10^5 回であった。ただし、RC39-3~RC39-9 床版のように、部材厚が 190 mm と薄い場合には、相対的に平均化半径が大きくなり過ぎることのないように留意する必要がある。もともと、平均化半径に物理的根拠はないとされており⁸⁾、標準となっている 150 mm に必ずしも拘る必要はない。一例として、RC39-8 床版について、平均化半径を変化させた場合のコンター図を比較すると、相対的に平均化半径が大きい場合には、内部に蓄積されている損傷が断面全体に広がってしまう（図-6）。

以上を踏まえ、あくまで現時点での一案として、部材厚が薄く鉄筋量も少ない RC39-3~RC39-9 床版に対して、平均化半径を有効高さの半分として整理してみる。平均化半径の大きさと対応する限界値について今後も詳細な検討を必要とするが、今回得られた解析結果について暫定的に $\sqrt{J_2}$ の=1000 μ 到達時を解析上の破壊と判定すると、図-7 のようになる。これについては、応答値算定の見直しを含め、検討を継続する所存である。

5. まとめ

形状・配筋・載荷方法の異なる RC 床版の輪荷重走行試験の再現解析を実施し、損傷評価に関する考察を行った。完全には実験と一致していない点もあるものの、高サイクル繰り返し載荷であることを踏まえれば、概ね妥当な精度で再現できていると思われる。また、損傷評価に関する考察を行い、床版のたわみの進展は、コンクリートのひび割れ損傷と強い相関があることを示した。今後は、損傷と破壊判定の高精度化とともに、他種類の床版（軽量床版や繊維シート補強床版など）へも解析範囲を拡充できるよう、引き続き検討を進めたい。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007。
- 2) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- 3) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X.: Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 4) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, T.: Direct path-integral scheme for fatigue simulation of reinforced concrete in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(1), pp.159-177, 2006.
- 5) 津野和宏，磯部龍太郎，井上治郎，土屋智史：膨張材併用軽量コンクリートを用いた床版の疲労耐久性予測解析，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，V-298，pp.595-596，土木学会，2012.9
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料第 28 号，2002 年 3 月
- 7) 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2013
- 8) 斉藤成彦，牧剛史，土屋智史，渡邊忠朋：非線形有限要素解析による RC はり部材の損傷評価，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.67, No.2, pp.166-180, 2011.

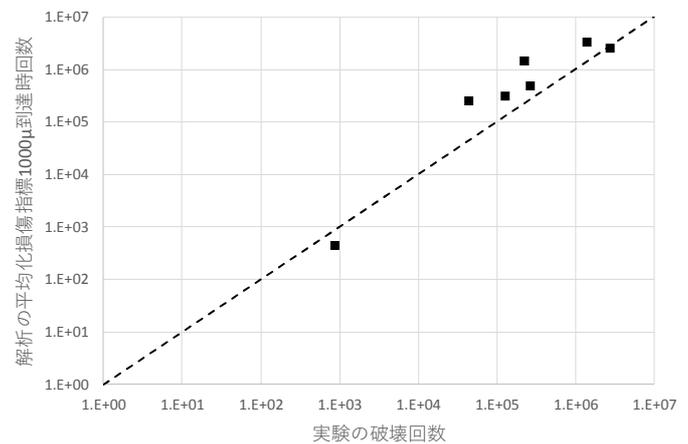


図-7 破壊判定時走行回数の比較