

〈特別研究課題〉 長周期建物の地震対策に資する  
室内被害体験調査と減災行動誘発  
助成研究者 名古屋大学 長江 拓也



## 長周期建物の地震対策に資する 室内被害体験調査と減災行動誘発

長江 拓也  
(名古屋大学)

Seismic measures for long-period buildings developed by researches on humans  
in damaged buildings as well as promotions of disaster-mitigation actions

Takuya Nagae  
(Nagoya University)

### Abstract :

Nankai Trough earthquake is highly expected to occur in the first half of this century. High-rise buildings take an important role in Japanese society. Millions of people work inside of high-rise building offices. Currently such high-rise buildings are known to resonate with long-period ground motions, which are generated when Nankai Trough earthquake occurs. As well, hospitals having a special role in society may lose their functions during the intense long-duration oscillations. In order to enhance disaster-prevention abilities of those buildings, a series of large-scale shaking table tests were conducted while including humans and synchronizing with high-performance 3-D simulations.

### 1. はじめに

我が国には、高さ60 m以上の超高層建物2500棟以上が存在しており、その約80%が太平洋側に位置する複数の大都市に集中している(図1)。南海トラフ巨大地震による被害は広範に及ぶ。特に大都市の超高層建物群では、大振幅で長時間揺れ続ける共振現象が問題となる。超高層建物は、それぞれ数千人以上の人たちが働く場であり、超高層建物群の共振によって数百万にのぼる膨大な数の人々が危険に直面する。また地震後に超高層建物群の使用性、機能性を保持もしくは速やかに回復することは、日本社会の復旧、復興に極めて重要な意味を持つ。

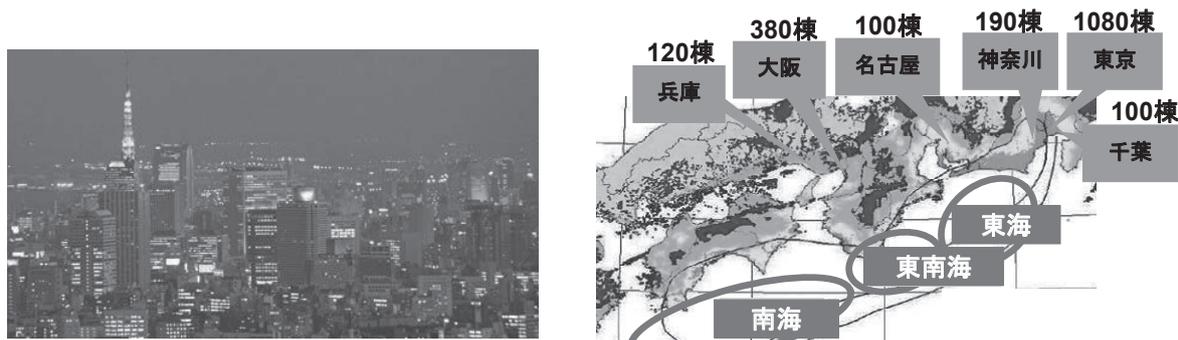


図1 南海トラフ巨大地震の影響を強く受ける超高層建物群

さて、地震時に居室が、超高層建物の周期でゆっくりと大きく長時間動き続ける、といわれても、実際に自分がその床の上で揺れを受けながら立っていられるのか、どのような危険をどのように回避すればよいのか等、具体的なイメージとともにその場の行動を準備することは容易でない。そもそもなぜ、超高層建物が長時間共振するのか、まずはじめに整理しておきたい。実は、1960年代の霞ヶ関ビルを皮切りに開始された超高層設計において、現在までほとんど考慮されてこなかった問題である。南海トラフ地震のような海溝型地震は、巨大な断層が10分間程度かけて破壊し続ける。このとき各破壊箇所の揺れが順次内陸に伝わり合成され、内陸地震とは比較にならない長時間継続の地震動となって現れる。都市が形成される平野は基本盆地のうえにあり、この盆地は、それぞれの深さに応じた卓越周期を持っている。名古屋だと3秒程度の周期、大阪だと5秒程度の周期が卓越しており、東京だともう少し長い周期が卓越する。各都市の地震動には、この盆地の振動特性が如実に現れる。この様に長時間継続する長周期地震動が生成されると、長周期地震動は超高層建物のもつ数秒以上の1次固有周期の揺れを育てて、大振幅の共振を生じさせる。観測記録等に基づき分かっていることとして、建物の1次固有周期(秒, s)は高さ(メートル, m)に比例し、具体的には高さに0.025を乗じることで評価できる。上記の盆地の卓越周期から、よく揺れるのは、名古屋だと120 m程度、大阪だと200m程度の高さの建物で、それぞれ階数にして30階建ておよび50階建て程度の超高層建物、ということになる。2011年の東北地方太平洋沖地震の際には、大阪府の咲洲庁舎が6秒強の周期で10分以上揺れ続け、最上階の床は片振幅で最大1.3 m移動した。そこにいた人はモノにつかまらなさと立っていられなかったという。震源から約700 kmの距離にあった大阪府の超高層建物において、このような共振が生じた事実は、以前より指摘のあった海溝型地震・長周期建物共振問題への対策をより強く促した。震源から距離に反比例して揺れが大きくなるという仮定が成り立ち、南海トラフ巨大地震の際には、この3倍を超える揺れが生じることを覚悟しなければならない。

東北地方太平洋沖地震の際に大阪府の震度は3であった。定義に従うと震度3は「屋内にいるほとんどの人が揺れに気づく」という程度の条件である。すなわち、通常の震度階級では、超高層建物の共振問題等、長周期の揺れによる危険性を適切に表現できないことになる。

気象庁<sup>1)</sup>では、2011年のうちに「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」を設置し、長周期地震動による危険性を表現する長周期地震動階級(表1)の定義に関する作業を開始している。名古屋大学からは、長年この問題に取り組んできた福和伸夫教授が副座長として参加し、議論をリードした。

表1 長周期地震動階級(気象庁ホームページより転載)

長周期地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	前者
長周期地震動階級1	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げものが大きく揺れる。	—
長周期地震動階級2	室内で大きな揺れを感じ、物に叩きまわりたいと感じる。物につかまらないうと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	キャスター付き什器がわずかに動く。棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。	—
長周期地震動階級3	立っていることが困難になる。	キャスター付き什器が大きく動く。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が入ることがある。
長周期地震動階級4	立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。	キャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が多くなる。

長周期地震動階級は、各地点の記録波を用いて建物の揺れを計算する手順をとる。周期が1.5秒から8秒の超高層建物を想定し、(1次モードの揺れを対象としているので)建物高さの約2/3の高さ位置における最大床速度を計算して、その地点の記録波を各階級に区分する。内部の人の体感・行動、さらに室内状況と対応のよい、床の最大速度に基づき各階級を規定しており、最大階級の階級4を最大床速度1.0 m/s以上としている。その様相を「人は立っていることができず、這わないと動くことができない。揺れに翻弄される。」さらに「室内ではキャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。」として、超高層共振の危険度を具体的に表現している。咲洲庁舎の最上階において、床速度は1.3 m/sに達していた。そこでの条件は、最大階級4だったといえる。このような情報が、緊急地震速報などと連動して事前に提供されれば、防災、減災効果を格段に高めることができる。

ところで現時点において、このような長周期地震動階級により超高層建物共振のリスクを評価し、速やかに公表している仕組みが稼働していることをどれだけの人に認知いただけているだろうか。今回の調査研究開発の中においては、こうした超高層共振問題とそれ取り巻く現状を課題とし、名古屋大学減災館の研究設備機能(次章で詳述)を拡充しつつ、実践的で社会の役に立つアウトカムの創出に取り組んだ。本稿では主としてこの内容についてご報告申し上げる。一方、超高層建物と同様に社会における重要な機能を担う、病院施設の地震被害軽減、機能維持に向けたシミュレーション技術の進展についても合わせて取り組んだので、後半ではその内容についてご報告申し上げる。

## 2. 減災館における屋上実験環境

防災教育・研究の拠点施設として、2014年3月に名古屋大学「減災館」が竣工した<sup>2)</sup>。この減災館の屋上に設置された振動実験室は、約100平米の面積を持ち、3D画像・音声環境の下で内部に人や家具を配置し、水平2方向の長周期大振幅床応答を再現することができる。本活動では、この研究環境を拡充しつつ、南海トラフ巨大地震時に事業継続が必要となる重要施設として、超高層ビルを主対象とし、施設の被害軽減や機能維持のための減災対策を推進する。図2において超高層建物の地震応答解析例を示す。入力した地動の揺れが建物内で数倍以上に増幅されることが確認できる。本実験では、この高層階の大振幅長時間床応答を減災館の屋上振動実験室に現出させる。

図3に加振状況を示す。振動実験室は、水平方向に力を持たず重量だけを支えるリニアスライダと復元力を与える水平バネ用ゴムにより、周期約5秒にチューニングされている。下部の水平

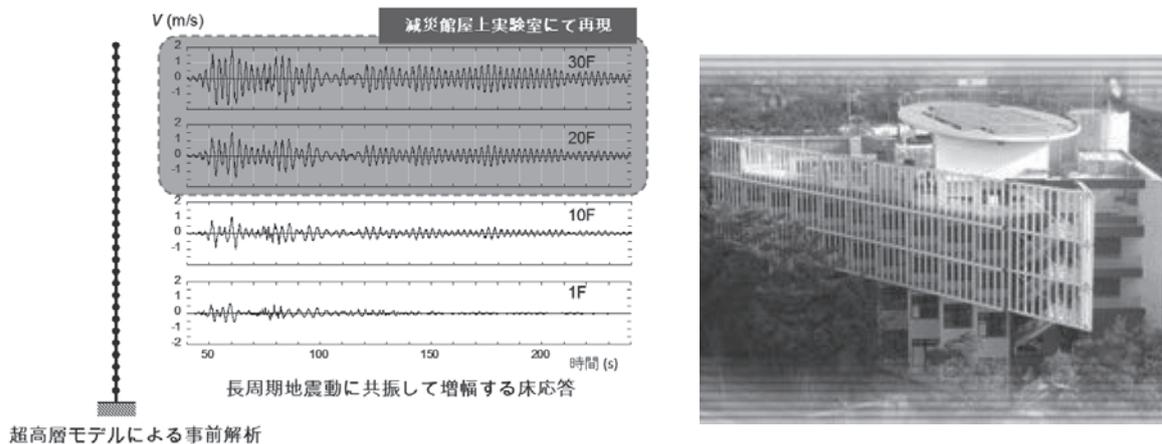
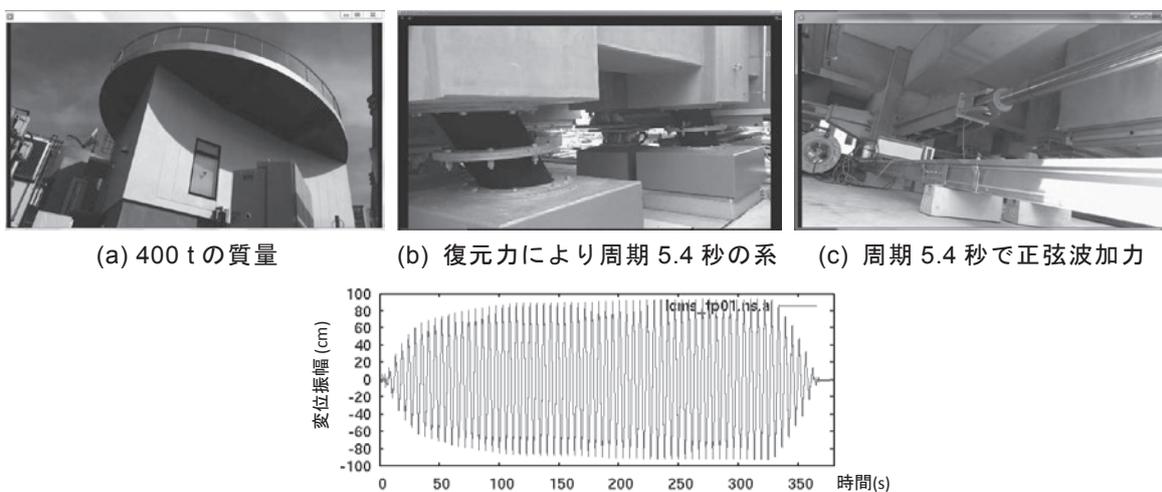


図2 超高層建物の共振の様子(左)と減災館屋上の振動実験室(右)



(d) 大振幅長時間加振の時刻歴波形(周期 5.4 秒で 7 分間の連続加振)

図3 屋上振動実験室の加振原理

アクチュエーターが同調的に周期約5秒の正弦波加力を与えることで、あたかも超高層建物が共振していく中での居室を再現する。本施設で特に特徴的な点は、家具什器、機器類を自然な形で配置するとともに、複数人の被験者を含む状態で、揺れを加える実験能力である。小学校の教室程度の広さを確保した居室において、資料収録のための監視ビデオ、速度分析のためのビデオモーションキャプチャ等を配備しつつ、このような大掛かりな実験を実施できる施設は現在のところ他に見当たらない。ここでは、表1に定義される長周期地震動階級について、床の揺れの強さ(最大床速度)に対応する、人間の体感・行動および室内状況を同時に総合調査することができる。

今回の実験に際して、この屋上振動実験室の内部状況を俯瞰できる全方位カメラを設置、活用した。図4に振動実験中に撮影した様子の一例を示す。ネットワーク接続により映像はリアルタイムでサーバに記録されるシステムを構築しており、映像の抽出および分析を容易に実施できる体制を整えることができた。加えて、常設型・振動実験計測装置として、4K解像度相当の360度全方位カメラを設置した。実験の全体像を高解像度で常時記録するとともに、ソフトウェアによる画像解析によって物体の移動を検出することができる環境を整備した。これにより、今後の実験検証に新たな側面を与えることが可能となった。

新たに導入した計測装置を活用しつつ実施された振動実験の課題は、気象庁との共同研究におけ

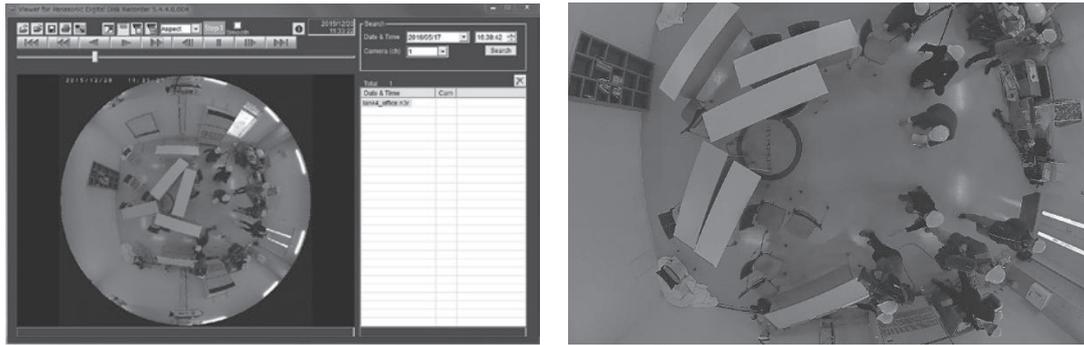


図4 今回の計測体制強化

る、長周期地震動階級についての実験検証、およびその啓発用技術資料の取得である。実験を通じて、360度全方位カメラによる映像が空間全体の被害様相、特に家具の転倒・滑動等の物理挙動のみでなく、人間の行動パターンの把握に極めて有効であることが分かった。映像の収録および編集においては、長周期地震動対策の必要性や具体的内容をさらに詳しく国民に伝えるための、分かり易いプレゼンテーションとして、図5に示すように、実写映像と3D数値シミュレーション映像を適



図5 防災・減災に資する新たな資料を作成



[http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/choshuki\\_eq5.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/choshuki_eq5.html)

図6 気象庁ホームページにおいて成果揭示(福和伸夫教授監修)

切に組み合わせた表現方法を採用した。なお、(減災館では施設設備等の一般公開を日々実施しており)来館者に対してモニター調査等も依頼し参考にしつつ、より最適な表現方法のあり方を関係者間で慎重に議論した。このような活動の成果は、既に気象庁のホームページにて一般公開されている。

### 3. 屋上振動実験の可能性を拓く病院シミュレーション開発

DMATとは、「災害急性期に活動できる機動性を持った トレーニングを受けた医療チーム」と定義される。2014年度には全国の病院から集結した数多くのチームが、屋上振動実験室を舞台に災害時医療の訓練を実施した。この時点で、実験室のシステムには、オフィス空間および居住空間の2種類についてのシミュレーション機能が導入されており、病院内を想定して、3D画像・音声環境の下で被害状況を再現するまでには至らなかった。一方で、約100平米の面積を持つ重厚な室内空間に多数の病院機器を持ち込んだ仮想病院の振動訓練は、各種の被害調査、減災行動誘発に対する研究調査の必要性を強く示唆するものであった。

こうした背景から、病院施設を対象とした研究設備の機能拡充を、本活動の柱のひとつにさせていただいた。病院施設の、ここでは端緒として手術室に関する室内安全化を課題とし、手術室を構成する機器類の導入に取り組んだ(図8)。並行して、実際の医療現場、特に多数の医療機器が密集するICUの現地視察(図9)を行うとともに、医療関係者へのヒアリングによって実際の医療現場と



図7 過去に実施されたDMAT訓練の様子(3Dシミュレーションは高層オフィス)

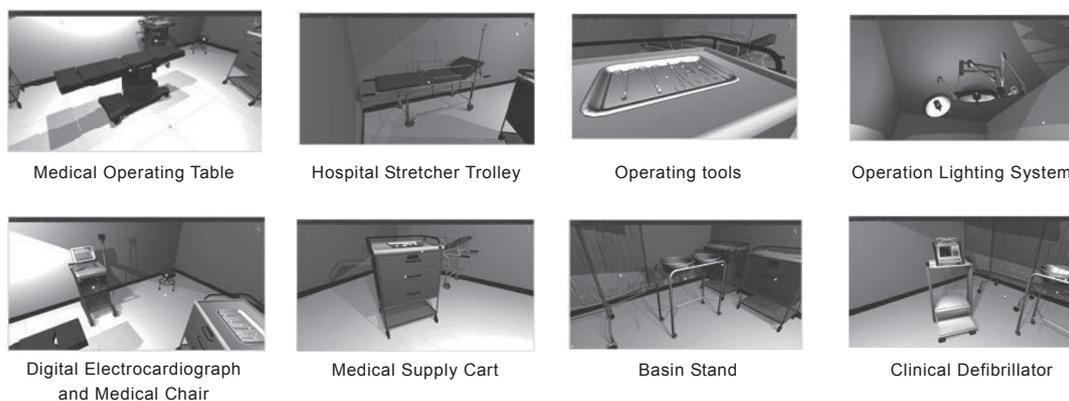


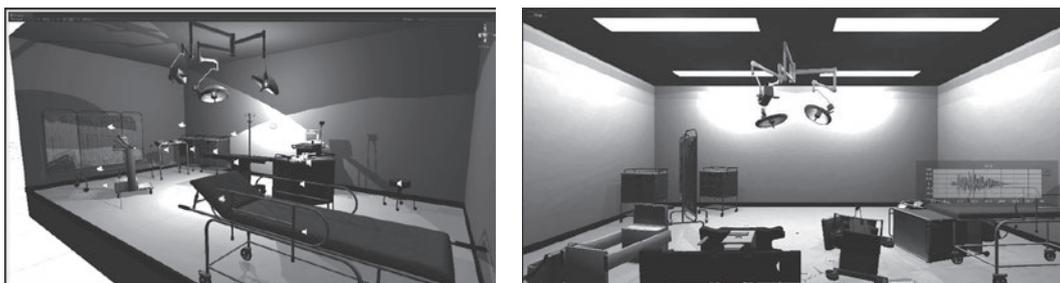
図8 今回導入の病院機器類



図9 現地調査において参考にした設備機器類

対比づけて説得力、納得感を増すための知見を収集した。合わせて、建物の構造特性(免震構造, 耐震構造, 高層建物等)と内部の被害予測に関するディスカッションを通じ、医療現場の総合的な安全化対策についての啓発に有用となる情報を収集した。

具体的には、長年取り組んできた3D振動モデルの開発資産を活用し、汎用の3Dソフトウェア開発環境を共通基盤としながら、新たにリアルな医療機器類をモデリングした。一旦完成した3D医療機器モデルに対して、様々な地震動入力に対する挙動を実際の実験映像等と対比することによって検証し、重心や摩擦係数等のパラメータをキャリブレーションしていった。こうして、特殊な対象物の条件を反映した手術室の3D振動シミュレーション環境を構築した。任意の入力地震動に対してリアルタイム演算による医療機器の挙動を確認することができ、各種地震を想定した場合の様々な建物条件に対する被害様相を検討することが可能である。都市レベルでの大局的な病院機能評価などに展開することも視野に入れることができる。再現性の向上、問題点の抽出など、今後も引き続き病院施設を対象とした防災、減災関連研究を実施していく予定である。本年度の手術室に関する成果については既に、医療関係者へのセミナー(図11)にて活用しており、現在は関係者か



空間の構築

被害状況

図10 病院施設を対象とした手術室被害シミュレーション



図11 医療関係者への説明用資料として研究成果を活用

らのヒアリングに基づくフィードバック情報を整理している段階に入っている。

#### 4. まとめ

超高層オフィス内部空間における安全性向上に関しては、家具固定等のハード対策の有効性が検証され、適用例も増えつつある。病院建物について免震構造であったとしても、キャスター付きの機器類が大きく移動・衝突を繰り返す危険性に対して対策が必要となる。内部空間の安全性向上や事業継続には、居住者の対策意識および行動規範の確立が重要となる。現状では、実際に当事者となる災害担当者が実物の揺れ・視覚・聴覚を経験する条件を前提として、地震時・地震直後にどのように行動すべきかを規定する指針類は無い。

本研究では、減災館の屋上実験室の振動実験能力を活用し、超高層オフィス特有のオフィス家具類・機器類を配置する、もしくは病院特有の家具類・医療機器類を再現する、等の準備により、災害対応の現場環境を実験用に構築し、被験者とともに、ここに長周期建物の床の揺れを現出させた。可能な限り実空間に近い総合環境をめざし、奥行きのある室内被害様相をリアルな映像と音声にて表現するシステムを用いており、具体的には、床との摩擦係数、家具重心位置を用いた剛体の運動をリアルタイム演算する数値解析技術、地震応答波形から自動生成した上で衝撃音を加える音声技術等を駆使した。

本活動で特に有意義だった点のひとつとして、名古屋大学減災連携研究センターと継続的に連携活動を実施している気象庁の公表技術資料に、成果を直接展開できたことが挙げられる。国が推進する防災施策に参画・貢献することは、数ある防災・減災活動の中でも、最も普及効率の高い形態・手法のひとつである。さらに、以前より連絡を密に取っている病院機関とともに、病院機能を対象として、今後必要となる関連防災資料についての調査を重ねるとともに、病院を対象とした新たな被害シミュレーション環境を構築した。早速その成果を持って、対策行動に関するセミナーを実施し、社会実装のための草の根活動にも取り組んだ。

#### 謝辞

本研究開発は、多くの関係各位のご協力のもとで執り行われました。特に、気象庁地震火山部管理課地震津波防災対策室の赤石一英調査官はじめ皆様に、多大なご教示をいただきました。本研究の基礎部分である名古屋大学減災館の屋上振動実験室は福和伸夫減災連携研究センター長、および飛田潤災害対策室長の監修のもとで稼動しています。実験の実施においては平墳義正技官にご協力いただいています。ここに記して感謝の意を表わします。なお、本稿の骨子については、協働した倉田和己助教(減災連携研究センター地域社会減災計画部門)とともに作成したものです。

#### 参考文献

- 1) 気象庁, [http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm\\_explain/about\\_level.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm_explain/about_level.html)
- 2) 名古屋大学減災連携研究センター, <http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>