

海外調査報告：

第10回日中建築構造技術交流会に参加して



EHS&S 研究センター上級研究員 兼 構造コンサルティング部長 中野時衛

Keyword：中国の超々高層建物の構造計画，中国の超高層建物の風荷重と地震荷重，中国の免震・制震構造，上海センタービル

1. はじめに

日本と中国の建築構造技術者の交流会である「第10回日中建築構造技術交流会」は、中国南京市にある東南大学で2013年11月30日と12月1日の2日間、開催された。

この交流会は、1993年より日本と中国の技術者が2年に1回、一堂に会してさまざまな主題について発表と討論を行う、建築技術全般に関する横断的な交流会として定着・発展してきた。

第10回交流会は、1993年の第1回交流会が開催されてから20年目の節目の開催であり、10回と20周年という2つの意味合いで記念すべき交流会となった。

著者はすでに2004年杭州市で開催された第6回交流会、2006年重慶市で開催された第7回交流会にも参加しているが、今回もNTTファシリティーズの発表論文共著者として本交流会に参加し、中国の設計・建設業界の最新情報の収集を図った。

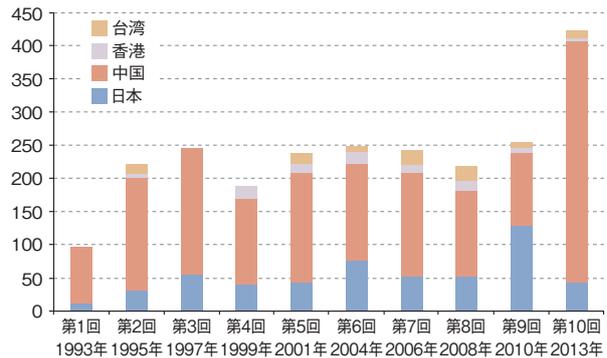
2. 会議の参加者、発表論文数および会議プログラム¹⁾

第10回交流会の参加者は日本側46名、中国側は香港5名、台湾11名を合わせた362名、全体で408名である。図1に今回を含むこれまでの交流会の日中両国を合わせた参加人数を示す。今回の参加者数は過去最多であり、前回よりも100名以上増えて400名を超過した。中国側の参加者

の急増の理由は、中国国内の好景気に伴う建設需要の増大、とりわけ超高層建物や免制震建物など、高度で新しい構造技術に対する関心の高さを反映していると言えよう。

交流会当日に配布された論文集に掲載された論文総数は125編、うち日本側は37編である。このうち口頭発表は日本側38編、中国側43編であった。

第10回交流会のプログラムを表1に示す。また、恒例の全体記念撮影を写真1に示す。



	開催年	開催地	開催大学
第1回	1993年	北京	精華大学
第2回	1995年	上海	同济大学
第3回	1997年	深圳	深圳大学
第4回	1999年	大連	大連理工大学
第5回	2001年	西安	西安建築科技大学
第6回	2004年	杭州	浙江大学
第7回	2006年	重慶	重慶大学
第8回	2008年	北京	北京工業大学
第9回	2010年	東京	日本大学
第10回	2013年	南京	東南大学

図1 交流会の参加人数



写真1 恒例の全体記念撮影

表1 第10回日中建築構造技術交流会のプログラム

2013年11月30日(土)	12月1日(日)
<p>◆開会式</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 組織委員会報告：崔鴻超常務副会長 2. 開会の辞：江歆成第十回交流会会長 3. 贈呈式：崔鴻超常務副会長、金箱温春会長(JSCA) 4. 中国側代表挨拶：王亞勇名誉会長 5. 日本側代表挨拶：鈴木計夫名誉会長 <p>◆基調講演</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中国における建築免震技術の発展、応用および地震経験：周福霖(広州大学) 2. A Practical Approach using Large-Scale Testing Facilities for Research on Urgent Issues Disclosed in 2011 Tohoku Earthquake：中島正愛(京都大学) 3. 超高層耐震設計における層せん断力係数について：魏瑾(深圳市力鵬工程結構技術有限公司) 4. 種々の形状を持つ超々高層建築物の風荷重特性：田村幸雄(東京工芸大学) <p>◆学術報告および討論会</p> <ol style="list-style-type: none"> 第1分会場：建築構造設計理論 第2分会場：構造設計と設計技術 第3分会場：制震構造・免震構造・耐震補強 第4分会場：各種構造・共同試設計 <p>◆日中共催宴会 ◆日中合同役員会</p>	<p>◆学術報告および討論会</p> <ol style="list-style-type: none"> 第1分会場：建築構造設計理論 第2分会場：構造設計と設計技術 第3分会場：制震構造・免震構造・耐震補強 第4分会場：各種構造・日中共同試設計 <p>◆全体委員会(覚書の調印)</p> <p>中国側調印者：崔鴻超常務副会長、任慶英副会長 日本側調印者：金箱温春会長(JSCA)、北村春幸副会長</p> <p>◆閉会式</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 中国側代表挨拶：柯長華名誉会長 2. 日本側代表挨拶：南宏一名誉会長 3. 台湾代表挨拶：藍朝卿台湾省結構工程師公會理事長 4. 香港代表挨拶：鄭君尚香港科技大学土木及環境工程學教授 5. 閉会の辞：江歆成第十回交流会会長 <p>◆冷餐会</p>

3. 基調講演

会議に先立ち、日本と中国の大学教授、構造技術者各2名が基調講演を行った。ここでは日本側の中島正愛京都大学教授と、田村幸雄東京工芸大学教授の基調講演の内容を紹介する。

3.1 中島教授の講演²⁾

(講演当時は振動崩壊実験は未実施であったが、その後まもなく実験が実施されたため、実験結果も含んだ形の内容に修正)

中島教授からは、「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト～都市機能の維持回復に関する調査研究」において、E-ディフェンスにより実施された縮小18層鉄骨造建物模型の完全崩壊実験についての以下の講演があった。

この研究の目的は、①建築基準法で想定される以上の想定外地震動に対し、都市の基盤をなす高層ビルが崩壊するまでの余裕度を定量化する、②被災建物が健全か否かを速やかに判断する方策として、被災後の建物の健全度を即時モニタリングし、損傷の位置・程度を把握する仕組みを構築することの2つである。

試験体は、初期の超高層ビルの鉄骨造18層建物、1/3縮小モデル(1×3スパン、平面5×6m、高さ25.3m、重量約420ton)で、振動台実験の試験体としては世界最大規模である(写真2)。この試験体をE-ディフェンス(図2)で「南海トラフ三連動地震動」として作成した波により加振した。この波は三連動平均レベル、擬似速度応答スペクトル(減衰定数5%) $pSv=110cm/s$ 、継

続時間約8分、 $M=8.7$ 相当の大地震動波形である。加振のスケジュールは、建築基準法で要求される地震動相当の波(告示極稀地震動レベル $pSv=81cm/s$)を入力し、基本的な性状を確認、その後三連動平均レベル($pSv=110cm/s$)を基準に、1.64倍、2倍、2.3倍……と徐々に加振のレベルを大きくし、最終的には試験体を崩壊させて、どの程度余裕があるかを検証した。同時にモニタリングシステムで建物全体系一層レベルの損傷推定と部材レベルの損傷推定を行った。

加振は余裕度の明確な把握のため、一方向とし、安全性の保護のため防護フレームを設けている(図2)。三連動最大級を超えるレベル、三連動平均レベルの3.1倍の入力時には、2～5階以上の梁端部が破断し、1階の柱脚が局部座屈を起こし、かろうじて自立している状況となった。最大層間変形も1/19となり、特に下5層に大きな変形が集中している。結局、写真3に示すように、三連動平均レベルの3.8倍の入力で崩壊した。崩壊原因は、1階柱の座屈と2～5階までの大梁端部破断による。最大層間変形は1/6であった。

1980～90年頃に設計された初期の超高層ビルは、三連動平均レベルの南海トラフ地震に対して、構造の損傷がほぼ継続使用可能、三連動平均レベルの2倍で2～3階の梁端部に破断は生じるものの、まだ倒壊には十分な余裕がある。平均レベルの3.8倍で完全に崩壊し、余裕度は3.8であることがわかった。



写真2 試験体概要

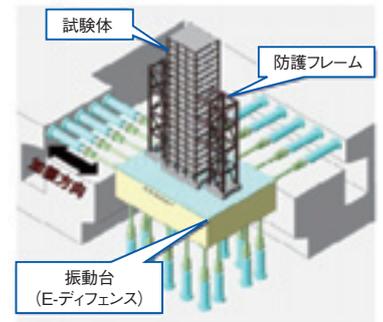


図2 振動台実験の概要



最終崩壊形(試験体は倒壊して防護フレームに寄りかかっている)



梁端フランジの破断



1階柱脚の局部座屈(四角い柱がへこんでいる)

写真3 実験結果(三連動最大級を超えるレベル、三連動平均レベルの3.8倍、 $pSv=420cm/s$ 入力時)

3.2 田村教授の講演³⁾

田村教授からは、過去10回の交流会ではじめて風工学についての基調講演であり、さまざまな平面形状および立体形状（振れ）を有する超高層建物に作用する風荷重のスペクトル特性に関する以下の報告があった。

図3は正方形平面、コーナー隅切平面形、コーナーが丸く面取りされた平面形、立面4面がテーパ付き、立面がセットバック、立面が90度振られた形状、立面が180度振られた形状、立面の4面に開口があるものの8

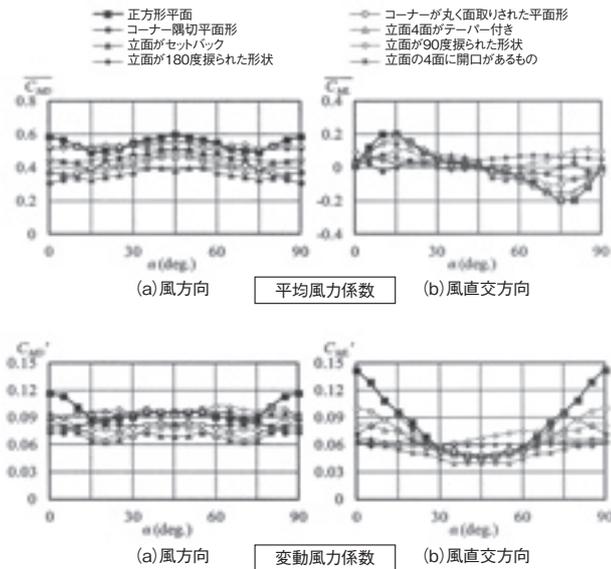


図3 種々な形状を持つ超高層建物に作用する平均風力係数と変動風力係数

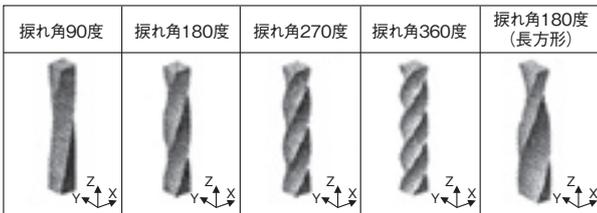


図4 正方形平面での立面振れモデル

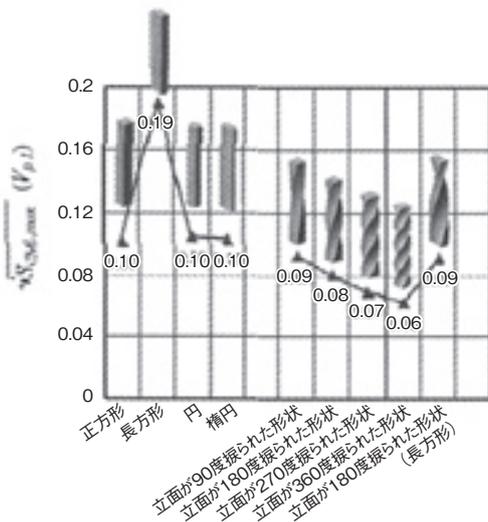


図5 種々な形状を持つ超高層建物の風直交方向のスペクトル値

つのモデルについて、風洞実験による建物の風方向と風直交方向の平均と変動分の風力係数を示している。

図3より風方向と風直交方向の平均風力係数、変動風力係数は、正方形平面モデルより、4面テーパ付き、セットバックなどのモデルの方が小さくなる。また、振れモデルの変動風力係数は、風方向では風向にかかわらず一定であり、正方形平面モデルよりも小さい。

図4に立面振れモデルを示す。このモデルに対する風直交方向の500年再現期間風速に対するスペクトル値を図5に示す。これより正方形平面の場合は、振れ角度が大きいモデルがスペクトル値が小さいことがわかる。

4. 学術発表および討論会¹⁾

今回の交流会で取り上げた論文および討論のテーマは、下記の7項目である。

- ①構造技術者の役割と責任,
- ②巨大地震動と建築物の終局耐震性,
- ③日中両国における設計・改修の新基準と性能設計,
- ④免震・制震構造および既存建物に対する耐震改修・補強技術の設計・研究,
- ⑤鋼・コンクリート他各種の構造および非構造部材に関する研究および応用,
- ⑥超高層建築, 大空間建築および基礎構造の開発・設計・施工,
- ⑦実例解析……日中両国による試設計をもとにした設計法や基準, 解析方法等の研究である。

交流会ではこれらのテーマを4つの大括りのテーマに分類して4つの会場に振り分け、会場ごとに学術発表とテーマごとの討論会が行われた。

4.1 第1分会場の学術発表および討論会内容

第1分会場のテーマは建築構造設計理論であり、討論会では、「中国では汶川・四川大地震で長周期成分を含む大きな地震記録が得られており、設計に反映する貴重な機会があるのになぜ新たな独自の基準が策定されないのか?」「構造設計に際して精度の高い応答解析をより積極的に用いるべきではないか?」など、日本側から率直な質問や意見が数多く寄せられた。

4.2 第2分会場の学術発表および討論会内容

第2分会場のテーマは構造設計と設計技術であり、学術発表では日中双方から上海センターをはじめとする塔状構造物や超々高層建物、免震建物、競技場施設や空港施設などの大空間構造物についての具体的な設計事例の紹介があった。

討論会では日本側から下記の①～③についての話題が用意され、それに対する日中双方の取り組みの特徴や設計法の違いについて熱心な情報共有と意見交換がなされた。

- ①中国で高さ500mを超える超高層建物の構造形式については、センターRC造コア+外周SRC造巨大柱構造が多いが、これが構造的に最も合理的か?

中国側から、「柱の引抜きについて一番心配している。外周巨大柱構造とし外周部に軸力を集める構造形式で引抜き防止を図っている。また、鉄骨はまだ高いので、巨大なSRC造柱とせざるを得ない。コアRC造+外周鉄骨ラーメンの構造形式は変形能力が違いすぎて設計が難しい。制震デバイスは中国にはない」などの意見があった。

②高さが500mを超える上空の風の特徴はどのように考えているのか？ 日本東京スカイツリーでは設計時に長期間観測している。

中国側から、「高さが200mを超える建物では、風洞実験が必要。耐風設計の方法は2つある。1つは荷重指針によって設計すること、もう1つは数値シミュレーション(CFD: Computational Fluid Dynamics)を行うこと。居住性確保については、事務室と居室に対して、建物の最上階で加速度の制限値を設けている。風速の高さ方向プロファイルは、設計の再現期間に応じて、低い高さの値から外挿して求めている」などの意見があった。

田村東京工芸大学教授からは「風のプロファイルについては、観測結果から、高さ700mくらいまでは風速が増加すると考えて設計する方がよい。気候変動と設計風速の関係については、まだはっきりとはわからない。近年、海水温の上昇や豪雨の増加はあるが、台風に関しては、特性が変化しているというデータは現状まだない。なお、台風シミュレーション上では、海水温を上げると強い台風が発生する(回数は減る)。CFDによる数値シミュレーションは、日本では、まだ適用の限界があるという判断から、風荷重評価には用いていない」などの意見があった。

③大地震時の部材の塑性化をどの程度に抑えているのか？ また、どのような崩壊形を目指して設計しているのか？

中国側から、「部材の許容塑性率は規定していない。倒壊を防ぐため、梁を塑性化させて、柱は弾性に留める設計を行っている。重要建物については、弾塑性の時刻歴応答解析を行って、塑性化の順序を確認するようにしている」などの意見があった。

4.3 第3分会場の学術発表および討論会内容

第3分会場のテーマは制震構造・免震構造・耐震補強であり、学術発表では強震観測記録の分析に基づく免震建物の性能評価、既存建物の免震改修・液状化対策、耐震・制震補強の実例や耐震診断評価法、回転慣性ダンパーなどの新たな制震補強工法など日中双方の最先端の制震・免震関連技術が紹介された。この会場は発表22編のうち日本側が16編を占め、日本の先端技術に関する質疑が相次いだ。中国の設計はかなり基準に制約されている印象である。

共著者であるNTTファシリティーズの後藤和弘氏の学術発表は、この第3分会場で行われた。テーマは「RC

造と鋼板パネルを併用したハイブリッド型耐震壁を用いた登録有形文化財の歴史的建造物の補強と施工」であり、「煉瓦に鋼板パネルを貼り付けることにより、剛性が高くなり周期が短くなって地震時の挙動が変わってしまうことはないか？」という質問に対して、「常時微動計測も行ったが、煉瓦はもともと剛性が高く、建物の固有周期は短い。鋼板パネルを貼り付けた補強による影響はほとんどない」との回答を行い、了解された。

4.4 第4分会場の学術発表および討論会内容

第4分会場のテーマは各種構造・共同設計であり、学術発表では芳村学首都大学東京教授他から鉄筋コンクリート構造や鋼板コンクリート構造についての最新の知見が、南宏一福山大学名誉教授からは日本のSRC構造の発展や震害の特徴について詳しく報告された。また、空調機器の落下再現実験(NTTファシリティーズの西井氏の発表論文)についても報告された。第9回交流会から取り上げられた日中共同設計は、設計結果が日中双方から紹介された。

討論会ではまず日中双方の設計事例を比較した結果、日本側の地震荷重が大きく、使用材料の数量が増えることが明らかとなったので、日中双方の設計用せん断力係数の違いや中国の構造設計基準の現状に焦点を当てた討論が行われた。中国では日本以上にオーナーからの建設コスト低減の要求が強いという意見も多数寄せられた。

中国では時刻歴解析が少なく、モーダル解析が多い。制震デバイスを使っている例は少ない。

5. 上海センタービルについて (見学施設の紹介)^{4,5)}

会議に先立ち、10月28日に上海にて、施工途上の竣工時高さ632m(予定)の上海センタービル(上海浦東地区)を見学する機会があったので、概要を述べる。

5.1 建物概要

地上高: 632m(中国第1位, 世界第2位の高さ), 構造高さ: 580m
敷地面積: 30,370㎡, 延床面積: 576,000㎡, 階数: 121階
工期: 2008年11月28日~2015年(約7年間, 施工中), 地下階: 25m
地盤: 粘土混じり砂質土, エレベータ: 143台
用途: 商業, 事務室, ホテル, 展望台など
建築主: 上海タワー開発・建設株式会社, 施工会社: 上海建工

Zone1~Zone9の鉛直方向に機能分離, Zoneの区切りがMEP(2層の機械室階: Mechanical Equipment)である。コアを内蔵する, 直径65mの高さ方向に低減する円筒形の内側タワー+外周の角部が丸まった3角形平面のガラスカーテンウォール構造のダブル・スキン構造である。外周カーテンウォールは立面的には120度振られてテーパー付きのため, 取り付けに工夫がされている。120度立面的に振れているのは, 3.2節からわかるように風荷重が一番小さくなるためである。

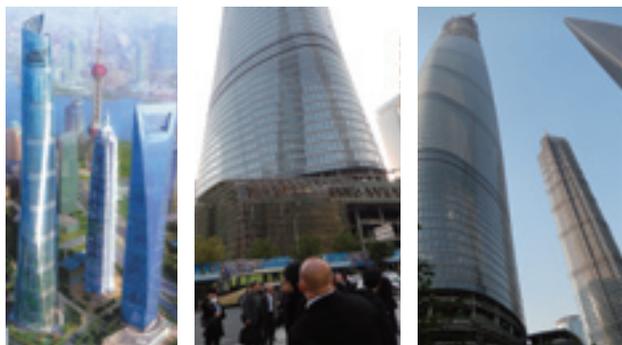


写真4 左は上海センター、金茂タワー、世界金融中心のパス、中央は上海センター、右は3つのタワーの写真

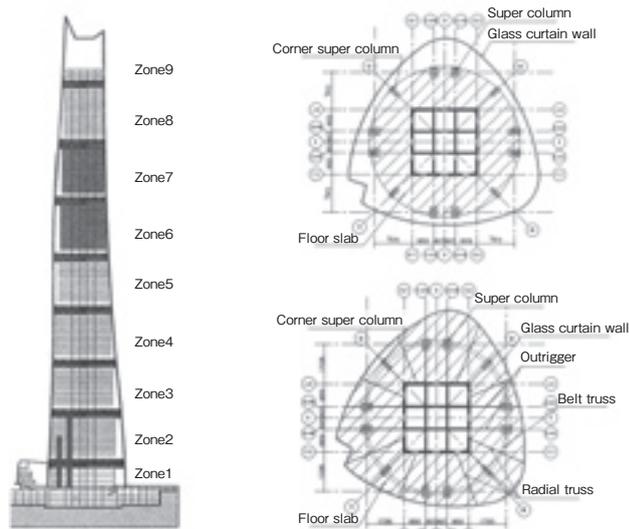


図6 上海センターの立面図と基準階伏図・最下階伏図

5.2 水平荷重に対する構造計画

構造計画を図7に示すが、高層建築に適したコア+アウトリガー+外周メガフレームで計画している。

1) コンクリートコア壁

厚さ1.2~0.5m, コア形状も30m角から上部では角部が取れて八角形に変化する。

2) スーパー柱 (巨大メガ柱)

8本のスーパー柱 (巨大メガ柱) は、大きさ5.3×3.7m~1.9×2.4mの長方形で、内部に4~6%の断面比率でS造ボックスコラムが充填されている。斜め柱も4本配置されている。

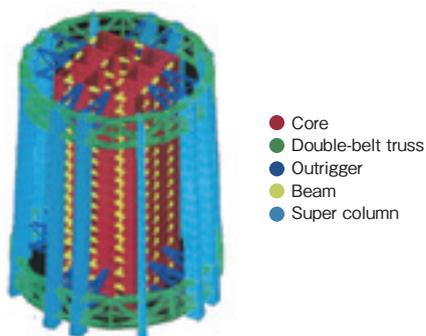


図7 水平荷重に対する構造計画

3) 2層のアウトリガートラス

8つある MEP (2層の機械室階) で、コアと外周架構を連結している。

4) 2層のベルトトラス付き外周メガフレーム

2層のベルトトラスはアウトリガーが取り付く層に設けられ、これにより外周メガフレームは20%の横力を負担する。

5.3 基礎構造

マットスラブの厚さは6m, $\phi 1.0\text{m}$ の場所打ちコンクリート杭, $L=86\text{m}$, 2,836本を打設。地中連続壁厚さ1.2mを設けて掘削時の安全性確保を行っている。

6. おわりに

日中共同試設計に関する討論で、耐震構造では、中国基準の地震荷重は日本の地震荷重の1/4程度であり、単位面積当たりの鋼材量は1/2弱程度になっていることが判明した。

この原因は、地震用せん断力係数は日本では一般に0.2、中国では0.08を用いていることによることが大きい。

免震構造に関しても同様ことが言える。中国では免震構造の採用により、地震力を仕様書的に低減することが可能になるため、雲南省などの地震多発エリア (烈度8以上) での構造コストは10%以上の低減が可能となる。免震構造を普及するための、中国の実用主義政策の表れかもしれない。台湾では免震構造を採用しても、地震力の低減は認められない。日本も免震構造の仕様書的な低減は認められていない。

この議論に対して、閉会式挨拶で黎明期から日中交流会に参加してこられた南宏一福山大学名誉教授が、「日本からの一方的な技術紹介ではなく、両国の技術者が自分の経験に基づき議論を行える時代になった」と紹介されていたことが印象深い。

〔参考文献〕

- 1) 柴慶治, 小川一郎, 國津博昭:「第十回日中建築構造技術交流会」の概要報告, structure, No.130, pp.64~69, 2014.4
- 2) 鉄骨造高層建物のE-ディフェンス振動台実験結果, www.bosai.go.jp/press/2013/pdf/20140225_01.pdf
- 3) 田村幸雄ほか: Aerodynamic characteristics of tall buildings with unconventional configurations, 第10回日中建築構造技術交流会論文集, pp.13~24, 2013.12
- 4) Jiemin DING ほか: Introduction to Shanghai Tower Structural Design and Construction, 第10回日中建築構造技術交流会論文集, pp.287~301, 2013.12
- 5) Shanghai Tower パンフレット, 2012