

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03341

研究課題名（和文）縦開口を有する鉄筋コンクリート連層壁の耐震性能

研究課題名（英文）Seismic performance of multi-story reinforced concrete walls with vertical openings

研究代表者

市之瀬 敏勝 (ichinose, toshikatsu)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10151474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリート建物の耐震壁の設計にあたっては、窓やドアなど開口の影響を適切に評価する必要がある。これまで、中高層建物では開口の上下で地震被害がよく見られた。本研究では、規則的な開口配置はもちろん、不規則な配置の場合も含めて鉄筋コンクリート連層耐震壁の実験を行った。また、基礎梁や中間階の梁を抜き出した要素実験も行った。そして、損傷限界、終局強度、変形性能に関するデータを得た。実験結果に基づき、損傷限界、終局強度を簡単に表現できるような開口低減率の計算式を導いた。さらに、有限要素法解析により、開口低減率の妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請者が調べた限り、今回のような実験は、国の内外を問わず行われていない。開口の上下で地震被害は、世界中でよく発生しており、学術的インパクトは大きいものと考えられる。また、提案した開口低減率の計算式は十分に簡単であるため、実際の構造設計で使用可能と考えられる。

研究成果の概要（英文）：In designing structural walls of reinforced concrete buildings, it is necessary to properly evaluate the effects of openings such as windows and doors. Seismic damages have often been observed above and below vertical openings in middle- and high-rise buildings. In this study, we conducted experiments on multi-story reinforced concrete structural walls with regularly located openings and those with irregularly located openings. In addition, experiments were also conducted on the foundation beams and beams in the upper stories. As a result, data on damage limit, ultimate strength, and deformation capacity were obtained. Based on the experimental results, we derived a formula for the reduction rate that can be easily used to evaluate the effect of the opening on the damage limit and ultimate strength. Furthermore, the validity of the reduction rate was verified by the finite element method analysis.

研究分野：工学，建築学

キーワード：鉄筋コンクリート 中高層建物 連層耐震壁 開口 地震被害 開口低減率

1. 研究開始当初の背景

開口を持つ壁の剛性と強度は、開口がない壁の剛性と強度に「開口低減率」を乗じて評価することになっている。縦長開口の問題は、2005年の耐震偽装事件で社会的に注目され、2007年版以降の基準解説書¹⁾で、開口低減率を h_0/h すなわち開口高さと同層高の比をとるものと定められた。しかし、図2,3の破壊モードは図1と全く異なると予想されるので、これは明らかな矛盾である。耐震壁の強度・剛性は建物全体の耐震性に大きな影響を与える。低減率の過小評価が危険側の判断、つまり耐震性能を過大評価する場合もあり得る。

2010年版のRC規準²⁾では、塑性理論に基づいた縦開口を有する耐震壁の許容せん断力の低減率が示された。しかし、この理論は実験の根拠が薄弱であり、不明瞭な記述も多いとして、日本建築行政会議で承認されず、実務設計では使えない状況にある。

米国のACI 318 codeでも、図1のような規則的な開口に対する規定は示されている。しかし、図2~4のような不規則な開口については、strut-and-tieモデルのような高度なモデルを使わざるを得ず、実用的ではない。

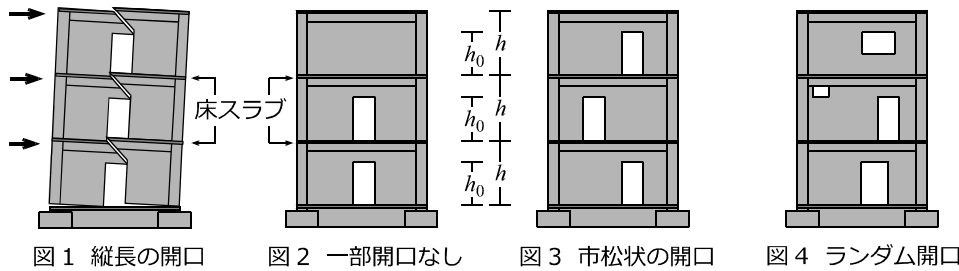


図1 縦長の開口

図2 一部開口なし

図3 市松状の開口

図4 ランダム開口

2. 研究の目的

図1~4に示すような任意配置の縦開口を有する耐震壁の実験を行い、剛性や強度に関するデータを得る。さらに、残留ひび割れ幅を測定することにより、損傷限界に関するデータも蓄積する。ただし、実験だけではあらゆるケースを網羅することは不可能である。そこで、有限要素法解析も援用する。そして、剛性や損傷限界、終局強度を簡単に表現できるような開口低減率の計算式を導く。この計算式は、2010年版のRC規準²⁾で示された計算式を基本にしつつ、より単純でかつ実験結果と整合性の高いものとした。海外の構造設計者にも利用しやすい形式を心掛けた。

3. 研究の方法

(1) 袖壁付き柱 - 基礎梁部分架構の非線形 FEM 解析概要

試験体は実大の40%スケールとし、側柱の頂部および脚部にピン支承を設置する計画である。側柱断面は320mm角とし、基礎梁断面は240×600mmとした。壁厚さは80mmとし、壁板の中央に幅360mm(実大で900mm)の縦開口の配置を想定した。図5に試験体の要素分割および境界条件を示す。解析は二次元解析とし、平面応力場を仮定した。コンクリートおよび柱上下のピン支承は四辺形要素で定義し、壁筋、柱帯筋および基礎梁あばら筋は埋め込み鉄筋で表現した。

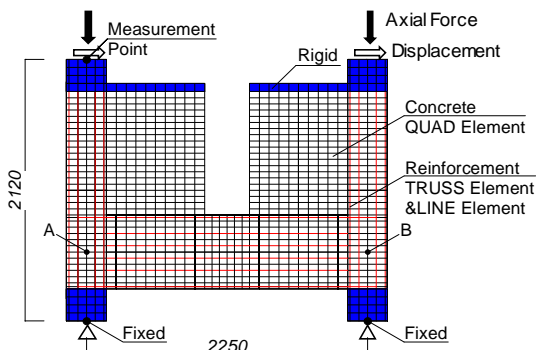


図5 試験体の要素分割

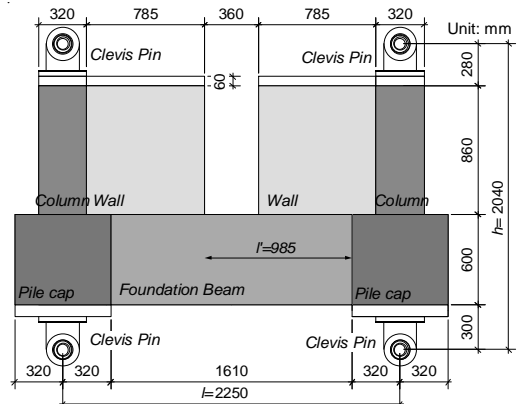


図6 試験体形状

(2) 縦開口を有する鉄筋コンクリート造連層耐震壁における基礎梁実験概要

図 6 に試験体形状を示す。試験体は、文献 2) に示される連層耐震壁を対象に基礎梁に作用する応力の把握のために基礎梁下端から開口上端付近までをモデル化した 40% スケールの部分架構である。側柱頂部およびパイルキャップの脚部には、載荷装置と接続するためのピン支承が設置されている。試験体形状は前述の有限要素法解析と同じ形状を想定し、壁厚は 160mm とやや厚めに設定した。これは、上部構造のコンクリート強度が基礎構造のものよりも高く設定される場合を想定し、両者のコンクリート強度の差を同一のコンクリート強度で模擬するためである。壁板の中央には縦開口を想定した幅 360mm のクリアランスが設置されている。

試験体上部および下部ピン支承の両側水平距離が固定される本試験体では、基礎梁に圧縮軸力が作用する。そのため、本試験体は(1)に示した事前 FEM 解析の結果を参考に最大耐力時の梁軸力比を 0.13 に仮定して設計した。実験変数にはあばら筋比を選択した。梁のせん断破壊型を想定してあばら筋比を 0.22% とした試験体 FBS および、梁の曲げ降伏型を想定してあばら筋比を 0.66% とした試験体 FBF を作成した。

(3) RC 耐震壁の開口高さによる耐力低減率に関する構造実験の概要

図 7 に試験体形状を示す。本研究では、同図(a)に示す先行研究の試験体 WV1³⁾を基準とし、中層の RC 建物における連層耐震壁を想定した 1/4 スケールの試験体 2 体を新たに作成した。試験体の高さは 3,000mm、全長は 1,900mm である。既往の試験体 WV1 を含めて、実験変数は開口配置と開口高さである。試験体 WV1 は各層の壁板に縦長開口を有する試験体であり、試験体 WV4 は WV1 の 3 層開口をなくした試験体である。試験体 WV5 は r_3 の値が試験体 WV4 と等価で各層の壁板に縦長開口を有する試験体である。なお、試験体 WV1 および WV4 の開口形状は 700×200mm であり、試験体 WV5 は 467×200mm である。梁幅は壁厚と同一の寸法 60mm とした。

既往の実験を含めて本実験では柱に軸力を加えない載荷計画としたため、側柱の主筋量を割り増すことにより終局時に圧縮域に作用する軸力が現実的な数値となるように設計した。水平力の載荷は載荷フレームおよび上スタブに取り付けた左右 2 台の水平オイルジャッキの荷重の絶対値が等しくなるように制御した。

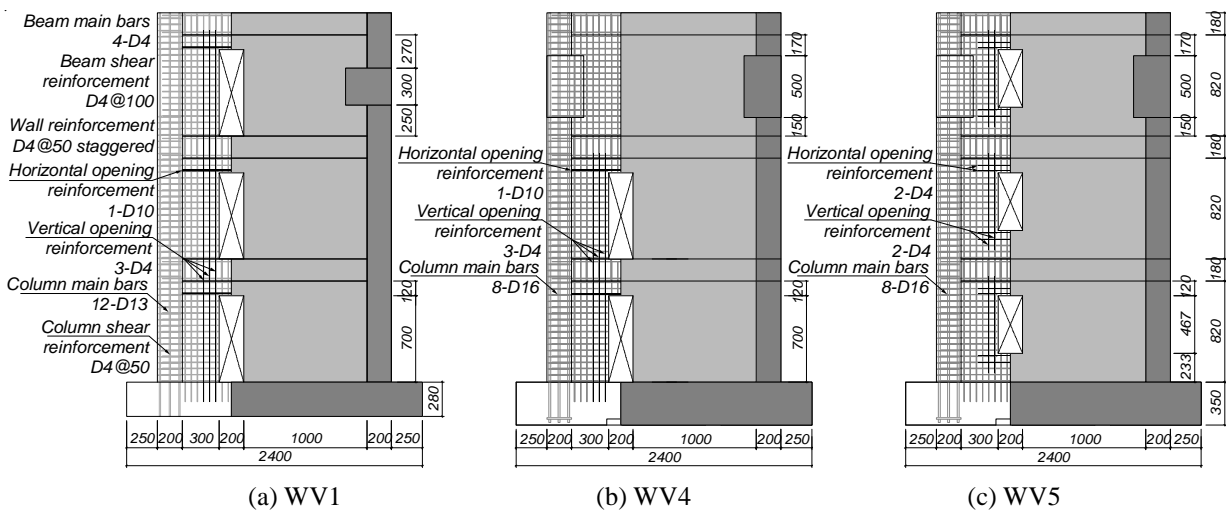


図 7 試験体形状

4. 研究成果

(1) 袖壁付き柱 - 基礎梁部分架構の非線形 FEM 解析の結果

図 8 に $R=1/200\text{rad}$ におけるコンクリートの最小主応力分布を示す。同図では、変形倍率を 20 倍に拡大して示している。左側壁頂部と左側壁脚部および右側柱脚部付近に高い圧縮応力が生じており、その 3 者を結ぶ圧縮ストラットの形成が認められた。図 9 に $R=1/200\text{rad}$ における袖壁付き柱および基礎梁の曲げモーメント分

布，柱頭および柱脚に作用する軸力と水平力，および開口直下の基礎梁の負担する軸力とせん断力を示す。ここで，基礎梁の負担する軸力とせん断力は開口直下の基礎梁を鉛直に切断したときにできる自由体の水平方向と鉛直方向の力の釣り合いにより算出した。開口左側における基礎梁では，開口端から僅かに内側で曲げモーメントの最大値が確認された。これは図 8 の最小主応力分布に示すように左側の袖壁脚部の圧縮側端部において高い圧縮応力が生じたためである。一方の開口右側における基礎梁では，開口端部から柱にかけて曲げモーメント分布の傾きが緩やかになる傾向が認められ，袖壁縦筋に生じる引張力の影響が確認された。また，基礎梁の曲げモーメント分布の形状から基礎梁の危険断面間距離は左側開口端部から右側の内側柱までとして評価する方が解析結果と整合するものと推察された。

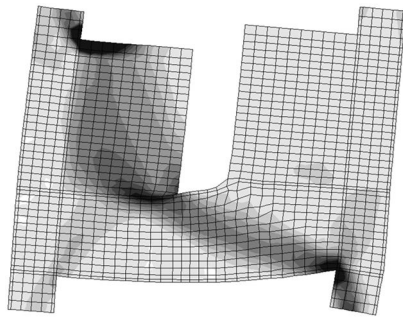


図 8 最小主応力分布 (1/200rad)

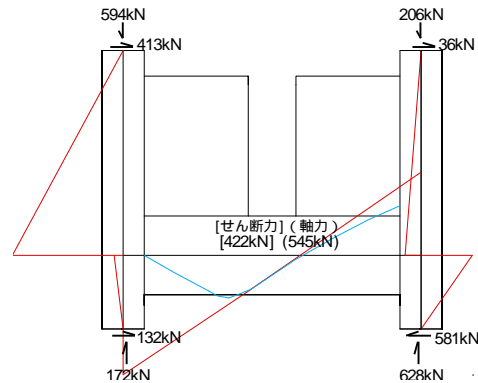


図 9 曲げモーメント分布 (1/200rad)

(2) 縦開口を有する鉄筋コンクリート造連層耐震壁における基礎梁実験結果

図 10 に基礎梁の終局曲げモーメント時の応力状態を示す。梁の終局曲げモーメントは，図 9 に示した最大耐力時の圧縮軸力を考慮して，ACI のストレスブロック法に従い算定した。終局曲げモーメントの発現位置は図 11 中の右側パイルキャップ端および左側開口端の内側に仮定した。基礎梁のせん断耐力はトラス・アーチ理論式に従い算定した。内法長さは曲げ耐力計算法と同様に右側のパイルキャップ端から左側の開口端の内側までと仮定して求めた。

試験体 FBS では $R=1/400 \sim 1/250$ rad における軸力の範囲において梁せん断耐力が梁曲げ耐力と比べて低く，破壊モードの判定結果は梁せん断破壊型と判断された。この傾向は， $1/250$ rad の载荷サイクルまでに梁上端筋および下端筋の降伏が認められたものの，その直後にせん断破壊が生じた実験結果と対応した。

試験体 FBF では，梁曲げ耐力の計算結果が他の計算結果と比べて低い。当該試験体の実験では圧縮柱側のコンクリートの圧壊および柱主筋の引張降伏は認められていないことから，耐力計算の破壊モードは実験結果と同様に引張柱側壁脚部の圧壊および壁縦筋の引張降伏を伴う梁曲げ降伏型と判断された。実験値および梁曲げ耐力計算値の比率は 1.02 となり，本論に示した梁試験体の最大耐力は ACI のストレスブロック法を基に壁脚部の圧縮力および壁縦筋の引張力を考慮することで精度良く評価可能である。

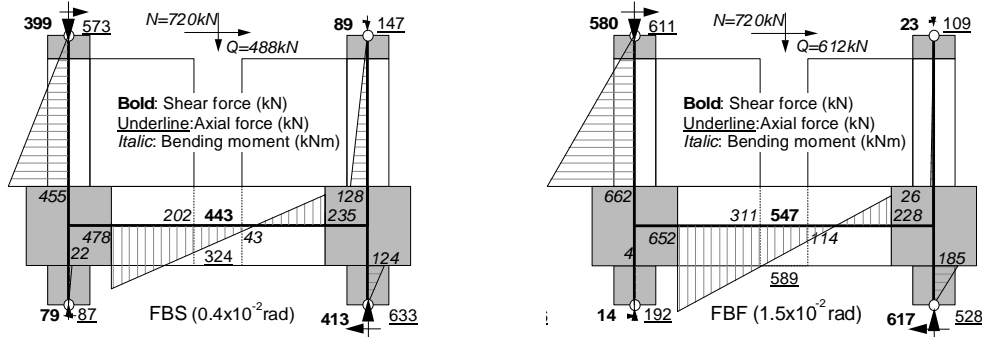


図 10 応力分布

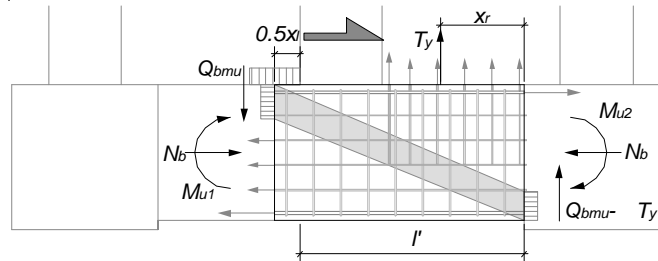


図 11 基礎梁の終局曲げモーメント時の応力状態

(3) RC 耐震壁の開口高さによる耐力低減率に関する構造実験の結果

各試験体における $R=1/133\text{rad}$ の荷重サイクルピーク時の変形概略図を図 12 に示す。同図の変形は変位計により計測された水平、鉛直変位計の実測値を 10 倍して表現した。同図の試験体内部の変形状況は実験で観測された主要なひび割れをもとに作成した。試験体 WV4 は負荷荷 $R=-1/133\text{rad}$ では試験体 WV1 と同様に開口上部の 3 層梁と上部壁板がせん断破壊したため、右の壁板が一層壁脚で塑性ヒンジを形成し全体として回転挙動が卓越している。一方、正荷重 $R=1/133\text{rad}$ では、試験体 WV4 の三層梁のせん断ひび割れが上部壁板を貫通することなく局所的な損傷を生じており、三層が下層の変形をやや曲げ戻す様相を呈した。

文献 2) に示される開口低減率および本研究グループより提案した新たな開口低減率 $newr_3^{(4)}$ を用いて実験の最大耐力を評価した。 $newr_3$ では、RC 規準に示された崩壊機構を踏襲しつつ、とくに壁脚部のモーメント抵抗を修正して評価したものである。 $newr_3$ の計算結果は試験体 WV1 の正荷重において実験結果を 1.26 倍上回ったが、その他において $newr_3$ の計算結果は実験結果と概ね一致した。

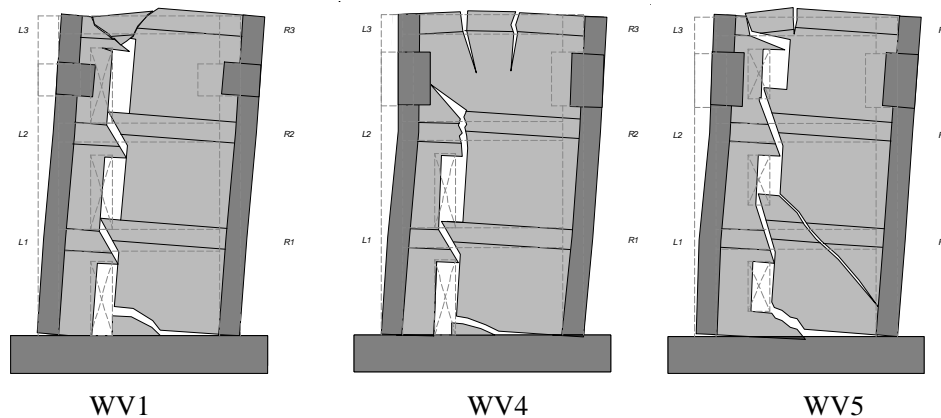


図 12 各試験体の $1/133\text{rad}$ における変形性状

< 引用文献 >

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究法人建築研究所：2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2015.6
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018.12
- 3) 廣澤光法，他 6 名：複数の縦長開口を有する RC 連層耐震壁の構造性能：縦開口が 1 列に偏在配置される場合と斜めに配置される場合の実験，日本建築学会構造系論文集，Vol.82，pp.579-588，No.734，2017.4
- 4) 鈴木卓，真田靖士，劉虹：RC 耐震壁の開口高さによる耐力低減率の高精度化，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.723，pp，883-891，2016.5

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 宮本大輔, 鈴木 卓, 真田靖士, 市之瀬敏勝	4. 巻 40
2. 論文標題 袖壁付き柱 基礎梁部分架構の非線形FEM解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 175-180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木卓, 真田靖士, 市之瀬敏勝, 楠原文雄, 高橋之	4. 巻 84
2. 論文標題 縦開口を有する鉄筋コンクリート造連層耐震壁における基礎梁の構造性能の実験的評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1567-1575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 広人, 劉 虹, 鈴木 卓, 楠原 文雄, 市之瀬 敏勝, 真田 靖士, 高橋 之
2. 発表標題 一階の縦長開口をずらして配置した RC 連層耐震壁の静的載荷実験
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会（東北）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本 大輔, 鈴木 卓, 真田 靖士, 市之瀬 敏勝
2. 発表標題 袖壁付き柱 - 基礎梁部分架構の事前 FEM 解析
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会（東北）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rado RAMAROZATOV0, Hong LIU, Suguru SUZUKI, Susumu TAKAHASHI, Yasushi SANADA, Toshikatsu ICHINOSE
2. 発表標題 Experimentation on three-story RC shear walls with different dispositions of door openings Part 1: Outline of Experiment
3. 学会等名 日本建築学会2017年度大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hong LIU, Rado RAMAROZATOV0, Suguru SUZUKI, Susumu TAKAHASHI, Yasushi SANADA, Toshikatsu ICHINOSE
2. 発表標題 Experimentation on three-story RC shear walls with different dispositions of door openings Part 2: Experimental results
3. 学会等名 日本建築学会2017年度大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井崎周, 宮本大輔, 鈴木卓, 真田靖士, 市之瀬敏勝, 楠原文雄, 高橋之
2. 発表標題 縦長開口を有する連層耐震壁に付帯する基礎梁に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井崎周, 鈴木卓, 真田靖士, 市之瀬敏勝, 楠原文雄, 高橋之
2. 発表標題 縦長開口を有するRC造連層耐震壁脚部の基礎梁の構造実験
3. 学会等名 日本建築学会2019年度大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	眞田 靖士 (Sanada Yasushi) (80334358)	大阪大学・工学研究科 ・教授 (14401)	
研究分担者	高橋 之 (Takahashi Susumu) (20620842)	大同大学・工学部・講師 (33907)	
研究分担者	鈴木 卓 (Suzuki Suguru) (20738710)	高知工科大学・システム工学群・講師 (26402)	