

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007 ～ 2009
課題番号：19560482
研究課題名（和文） 繰返し荷重を受ける大型断面木部材の鋼ジョイント近傍の応力性状
研究課題名（英文） Mechanical properties of large-scale timber member adjacent steel joint under repeated load
研究代表者 今井 富士夫（IMAI FUJIO） 宮崎大学・工学部・教授 研究者番号：00038071

研究成果の概要（和文）：

本研究は大断面のボルト接合部の力学性状について検討したもので、実験では静的漸増ならびに繰返し引張荷重を受ける接合部の耐荷力にボルトとボルト孔の隙間に充填された樹脂が与える効果を検討した。また、解析では大断面の応力性状の解明を目的に、コンタクト要素を適用した有限要素解析を行った。その結果、充填樹脂は接合部のボルト本数を低減させることやコンタクト要素がボルト接合部の解析に適用できることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, the mechanical properties of bolted connections in the large section timber were investigated. The effects of resin filled up into bolt-hole clearances on the load-capacity of bolted connections under static cyclic tensile loading was investigated in the experiment and finite element analysis using “contact element” was performed to clarify the stress property of a large section. As a result of experimental investigation, it was cleared that filling up resin into bolt-hole clearances leads to a decrease in the number of bolts under the same design condition. It was also indicated from the results of finite element analysis that “contact element” is able to be applied to the analysis of bolted connection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：木橋、ボルト接合、鋼ジョイント、樹脂充填、引張耐荷力、応力性状

1. 研究開始当初の背景

近年、集成材を利用した木道路橋が多く建設されており、これらの断面は建築分野で使

用される部材に比べて大断面となる。また、木部材同士の接合は鋼ジョイントにボルト接合されており、一般にはボルト孔はボルト

よりも大きくして、隙間によるガタを防ぐため、その隙間には樹脂が充填される。

また、木部材のボルト接合は鋼橋のような摩擦接合ではなく支圧接合となるため、ボルト変形の影響を受けて、木部材と鋼板との接触面には過大な応力が発生する。

木橋の設計では主として建築部材を対象とした木質構造設計基準を参考にしており、断面の大型化やボルトによる木部材側面の大きな応力の発生、加えてガタ防止のために充填される樹脂の効果などについては十分に検討されているとは言いがたい。

本研究はこのような背景のもと、大型化する木部材の設計基準を確立することを目的としたものである。

2. 研究の目的

本研究は前述した課題を検討するもので、ここでの目的は、以下のような3つの項目に大別できる。

(1) 充填樹脂の効果に関する検討

ボルトとボルト孔の隙間に充填される樹脂はボルト接合部の耐荷力向上に寄与することは以前から建築学会で明らかとなっていたが、その効果はいまだ設計規準などには反映されていない。そこで、充填樹脂の効果を明確にして設計規準に反映できるような具体的なデータを収集するための実験を実施する。

(2) ボルトに近接する木部材の応力性状とその改善策

鋼ジョイントすなわち結合ボルト近傍の木部材には図-1に示すように、ボルトの変形に伴って、応力の分布は変化し、部材の両側面には理論値に比べて過大な応力が発生する。本研究では、応力集中の状況を確認するとともに、当初は図-2に示すような応力

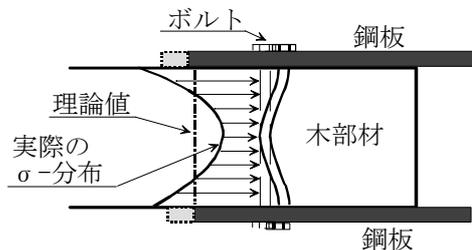


図-1 ボルトの変形と木部材の応力分布

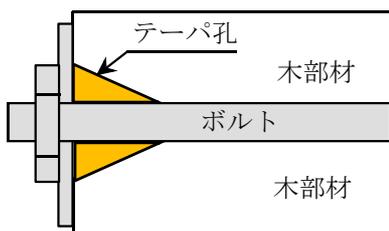


図-2 応力緩和策 (テーパ孔)



写真-1 ボルト破壊

緩和策 (テーパ孔) の効果についても検討する予定であった。

(3) 解析モデルの開発

大型化断面を有する木部材の設計基準を確立するためには、部材の各部位の応力性状やボルト接合部の挙動を正確に把握する必要がある。しかしながら、木部材には節や木目があり、実験で得られた結果は必ずしも一般性のあるものとは言いがたい面もある。

そこで精度の高い解析法の開発が必要となるが、写真-1に示すように、ボルト接合では変形の進行に伴って、ボルトの木部材へのめり込みや肌離れが生じる。よって、このような現象を捉えることのできる解析モデルを開発する必要がある。ここでは、接触要素による解析モデルを検討する。

3. 研究の方法

(1) 樹脂の充填効果と木部材の応力性状 (研究目的(1)と(2))

2つの課題については静的引張荷重を受ける供試体による実験を行った。実験で使用したモデルは図-3に示すように、木部材の両端に鋼ジョイントを模した鋼板を配置してボ

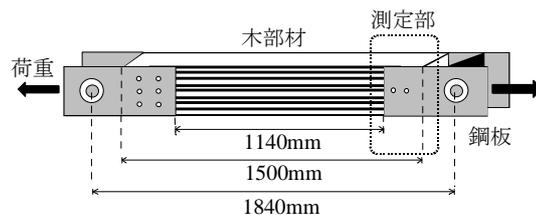
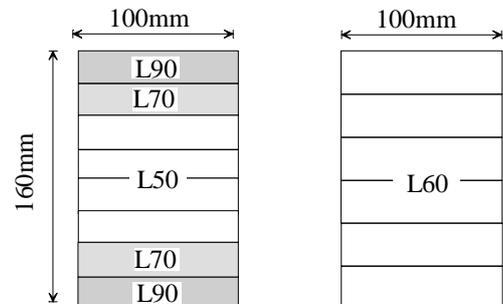


図-3 供試体



(a) 異等級モデル

(b) 等級モデル

図-4 供試体に使用した集成材

ルト接合されており、測定部は片側（図では右側）のみとした。木部材には集成材を使用しており、実験当初は対称異等級構成集成材（強度等級 E75-F240 に相当）を使用した。ボルト接合の特性を精度よく把握するためには、他の要因はできるだけ排除することが望ましいと考えて、後半の実験では一様な材質のラミナで構成された同一等級構成集成材（ラミナ等級：L60）を使用した。実験で使用した2つのモデルを図-4に示す。

供試体のボルト配置は1列2本と3列2本の2種類とした。

荷重は静的引張荷重とし、単調な漸増载荷と繰返し载荷の2つの载荷を行っている。

ボルトとボルト孔については図-5に示すように、ボルト径 d とボルト孔 D を等しくした「打込み型」とボルト孔をボルトよりも大きくして、隙間に樹脂を充填した「樹脂型」の2種類の供試体を準備した。

d =ボルト径、 D =ボルト孔径

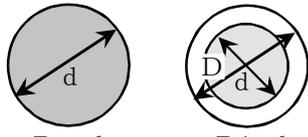


図-5 供試体のモデル

(2) 解析モデルの開発 (研究目的(2)と(3))

解析には有限要素法 (FEM) を適用するものとし、解析ソフト DIANA を使用した。

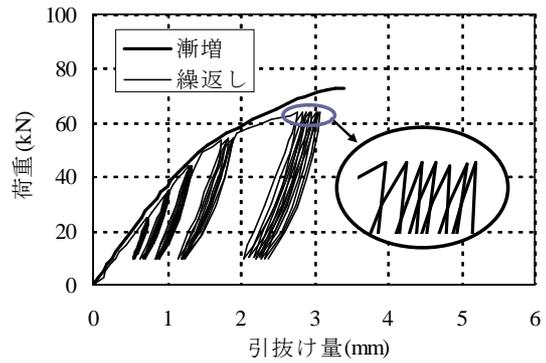
通常の FEM 解析では要素間が接する辺の節点は共有している。しかしながら、写真-1 に示すように、ボルト接合部でのボルトはその変形に伴って木部材から離れる現象が生じる。このような挙動を表現するには通常の要素設定では解析できない。そこで、本研究ではボルトとボルト孔の肌離れを表現できるとされる接触要素 (コンタクト要素) を導入することにした。接触要素では要素の接する面の節点は互いに独立であり、2つの物体が接触するまでは互いに干渉をせず、「接触した」と判定された場合にのみ、力を伝達するものである。

4. 研究成果

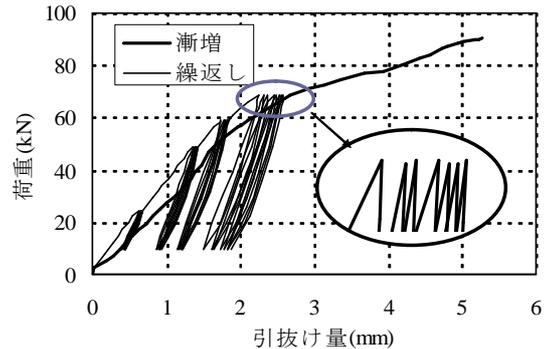
(1) 樹脂の効果と木部材の応力性状

樹脂の効果を確認するために、まず樹脂型ではボルト $d16$ に対して、ボルト孔 $D20$ とする供試体を用いて実験を行った。図-6 は荷重と木部材の鋼板からの引抜け量の関係を示したもので、図中の楕円で囲った部分は繰返し载荷における最終ステップでの荷重の繰返しに対する引抜け量の変化である。

荷重の繰返しの影響についてみると、荷重の繰返しによって徐々に引抜け量は増大し



(a) 打込み型



(b) 樹脂型

図-6 荷重-引抜け量の関係 (1列2本, $d16$)

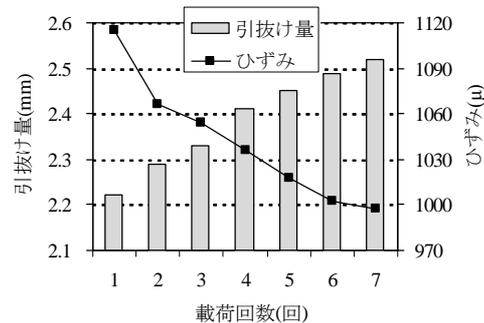


図-7 最終荷重ステップでの引抜け量とひずみの変化

ていく傾向にある。ただし、低荷重での繰返しに対しては引抜け量は収束していくが、高い荷重に対しての変位はわずかではあるが漸増している。このような現象は漸増崩壊と言われるものである。

打込み型と樹脂型の耐荷力を比較すると、漸増および繰返し载荷のいずれについても樹脂型の耐荷力は打込み型に比べて大幅な耐荷力の増加となっていることが判る。

図-7 は打込み型の繰返し载荷の最終ステップの荷重の繰返しに対する引抜け量とひずみの変化を示したものである。図から明らかなように、荷重の繰返しによって、引抜け量は増大する傾向にあるのに対して、ひずみは減少していることが判る。

図-8 は1列2本のボルト近傍のひずみ分

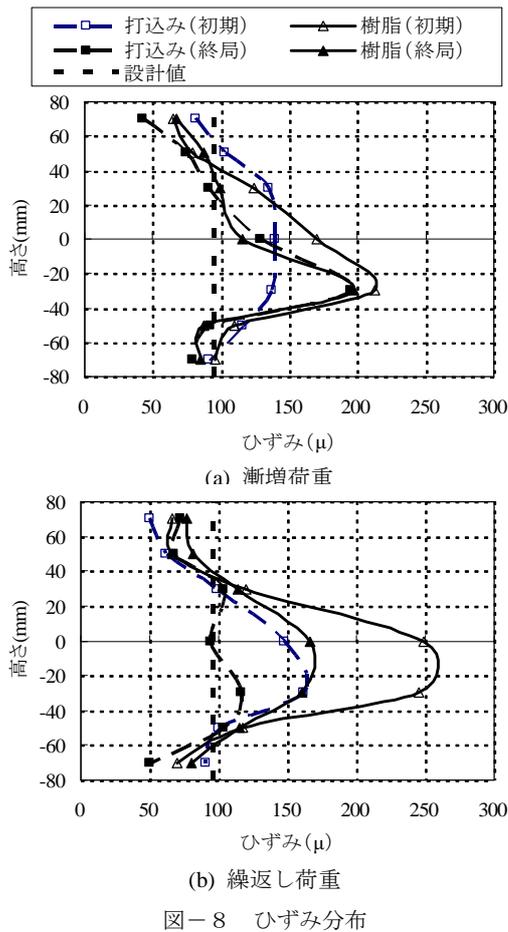


図-8 ひずみ分布

布を示したもので、本図は初期(0kN~10kN)から終局時(終局荷重近傍の10kN)について示している。また、図中の設計値は引張荷重10kNに対する木部材に発生する理論ひずみである。

初期および終局のいずれも、実験で得られたひずみは中央部(ボルト配置位置)では設計値よりも大きく、縁端では小さくなるような分布をしており、ひずみが一樣でないことを示している。また、ボルト位置(高さ0mm)とは完全に一致してはいないが、ボルト近傍には応力集中が発生していることは明らかである。

漸増荷重の樹脂型を除くと、いずれも初期での顕著な応力集中が終局時になると大幅に低減している。これは終局時では7回の荷重繰返しを行っているためで、図-7で示したように、荷重の繰返しとともに、ひずみは低減しながら収束する傾向があることから生じたものと思われる。

本研究では当初テーパ孔による応力緩和についても検討する予定であった。しかしながら、前述したように樹脂の効果は著しく高いことが明らかとなったため、充填樹脂のボルト接合部の耐荷力への効果の度合いを具体化できれば、ボルト接合部の設計を合理化できるものと考えた。

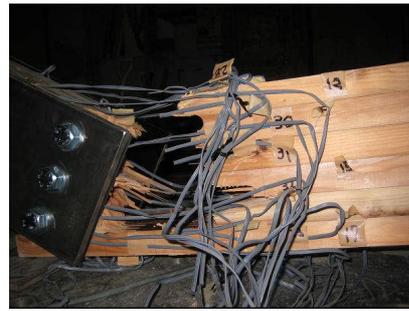
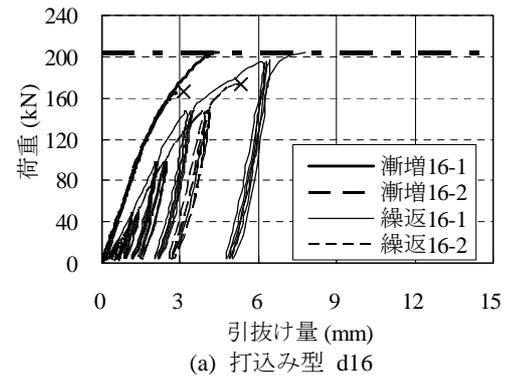
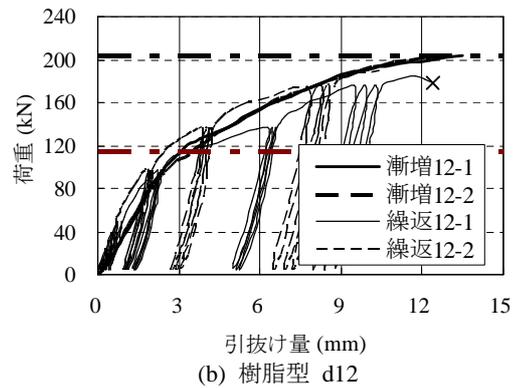


写真-2 集合型破壊



(a) 打込み型 d16



(b) 樹脂型 d12

図-9 荷重-引抜け量の関係

そこで、次にボルト d12 に対して、ボルト孔を D=16mm とした樹脂型とボルト d16 でボルト孔をボルトと同径の D=16mm とした打込み型の引張試験を実施した。実験では参考のために、ボルト d12 の打込み型についてもやっている。

ここでの実験では、写真-1 に示すようなボルト破壊に加えて、写真-2 に示す木部材の集合型破壊が生じた。ボルトによる接合部の耐荷力を検討するとき、集合型破壊は避けるようにしなければならない。実験で集合型破壊が生じた原因は、供試体の設計が不十分であったことになる。

図-9 は実験から得られた荷重-引抜け関係を示したもので、図中の×は集合型破壊で終局に至ったことを意味する。また、太い一点鎖線はボルト破壊するときの設計耐荷力で、202kN はボルト d16、114kN は d12 に関するものである。

先ほど同様に、繰返し荷重を受けた場合に

表-1 実験で得られた終局荷重と破壊形式

形式	ボルト径	載荷法	終局荷重 (kN)	破壊形式	設計値との比
打込み	d12	漸増	146	ボルト破壊	0.72
			140	ボルト破壊	0.69
		繰返し	127	ボルト破壊	0.62
			147	ボルト破壊	0.73
	d16	漸増	205	ボルト破壊	1.01
			165	集合型破壊	—
繰返し		204	ボルト破壊	1.01	
樹脂	d12	漸増	203	ボルト破壊	1.01
			204	ボルト破壊	1.01
		繰返し	185	集合型破壊	—
	d16	漸増	190	ボルト破壊	0.94
			190	ボルト破壊	0.94

は漸増荷重に比べて引抜け量は増加するが、耐荷力を左右するものではないと考えられる。また、ボルト d12 でもボルト孔を 16mm とした樹脂型は、ボルト d16 の打込み型と同等な耐荷力を示している。樹脂型は使用ボルトの径が小さいために、引抜け量は大きくなっているが、換言すれば、靱性が大きいとも言える。

表-1 は終局荷重を整理したものである。表から明らかなように、ボルト破壊を呈した終局荷重をみると、樹脂型 d12 でも打込み型 d16 と同等な耐荷力を有していることが判る。

このことは、樹脂を注入する施工法を採用した場合には、接合部のボルト設計では使用ボルトの径ではなく、樹脂が充填される木部材のボルト孔をボルト径と等値であるとして設計できることを示唆するもので、設計において、大幅なボルト本数の低減となるものである。

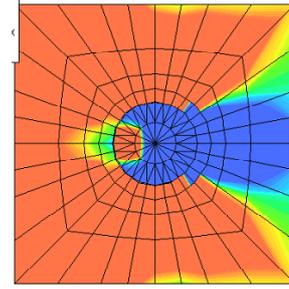
(2) 解析モデルの開発

本研究では、大断面の鋼ジョイント近傍の木部材の応力性状の解明も 1 つの課題であった。この課題を明らかにするためには、実験では詳細な検討は困難であり、解析的なアプローチが必要で、このような解析手法としては、FEM 解析が一般的である。ボルト接合部の解析では、前述したようにボルトの変形によって生じるボルト孔の変形すなわちボルトの木部材へのめり込みや肌離れを忠実に表現できる解析モデルの開発が必要となってくる。

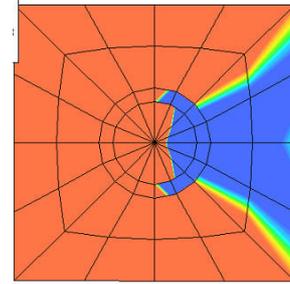
本研究ではボルトとボルト孔の境界に接触要素の 1 つであるコンタクト要素を挿入した解析モデルについて検討した。ここでの解析は 2 次元解析である。

比較のために、ボルトとボルト孔の境界の節点を共有する通常モデルについても解析を行った。

図-10 は両者の解析で得られたボルトとボルト周辺の木部材の応力分布を示したものである。図中の青色系は圧縮を、赤色系は引張を意味する。荷重はボルト中心点に右側



(a) コンタクト要素



(b) 通常要素

図-10 応力コンター

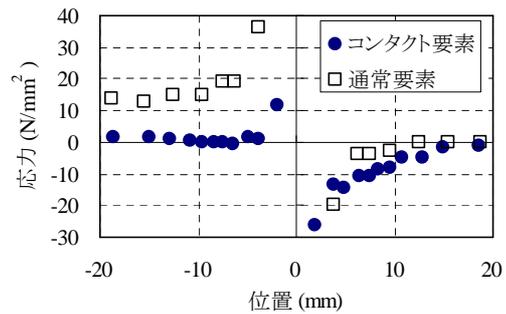


図-11 中央線の応力分布

に水平荷重をさせている。

両者を比較すると、通常モデルではボルト左端は木部材から離れ、応力伝達は実際には生じないはずであるが、節点を共有しているために、木部材にも引張応力が発生している。

一方、コンタクト要素を使用した場合には、ボルトの変形によって、ボルト孔も変形するために、ボルト左端の中央部にも圧縮応力が発生している。また、コンタクト要素で解析すると、ボルト右側の木部材には通常要素以上の応力集中が発生していることが判る。

これらを数値化したものが図-11 で、図-10 の高さ中央の応力を示している。解析モデルで使用したボルトは d12 で、図中の ±6mm はボルト内部の応力となる。

コンタクト要素の場合、ボルト左側の応力はほぼ 0 となっており、肌離れによる応力伝達はされていないが、通常要素では節点を共有するために高い応力が発生している。また、右側では逆に、通常要素では木部材の圧縮応力は低くなっており、コンタクト要素では圧

縮部に応力集中が発生している。

以上のことから、コンタクト要素は現実的なモデルであると考えられ、3次元解析に拡張すれば、大断面の応力性状を把握できるものと考えられる。

(3) 本研究で得られた結果の要約

本研究では、実験的にはボルトとボルトの隙間に充填された樹脂の効果について静的引張試験を実施してきた。載荷は漸増載荷と繰返し載荷について行っている。その結果、充填樹脂の効果は非常に高く、ボルト接合部の耐荷力は樹脂を充填した場合には、ボルト孔と同径のボルトと同等の耐荷力を有することが明らかとなった。

今後、ボルト径、ボルト径(d)と木部材の厚さ(L)の比(L/d)、樹脂厚などをパラメータとする実験を重ねていく必要がある。これらの結果が今回得られたものと同様となれば、ボルト接合部でのボルト本数は大幅に低減でき、合理的な設計が可能となるものと考えている。

また、繰返し載荷は漸増載荷に比べて、木部材の鋼板からの引抜け量は荷重の繰返しによって大きくなるが、1つの荷重ステップでの荷重の繰返しでのひずみは繰返しのよって、低減することが明らかにされた。ただし、繰返し載荷による耐荷力は漸増載荷とほぼ同等となることも確認された。

解析的にはボルトの変形に伴うボルトの木部材からの肌離れを表現できると思われるコンタクト要素を適用した解析モデルについて検討した。2次元解析ではあるが、肌離れをよく表現できることを確認した。この要素を3次元解析に拡張すれば、大断面の応力性状を精度よく把握できるものとする。

本研究での実験で得られた成果を最終的にまとめ、投稿した論文が[雑誌論文①構造工学論文集]で、この論文は木橋の設計基準を整備する上で有効なデータを提供しているとして、3名の査読者の評価は6段階の5が2名、4が1名と高い評点と得ている。

なお、疲労試験なども実施したが、載荷装置の不具合などから十分なデータを得ることはできなかった。今後は疲労試験についても検討していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 今井富士夫、中澤隆雄、飯村豊、ボルト孔に充填された樹脂が接合の引抜け性状に与える効果、構造工学論文集、査読有、Vol.56A、2010、pp.850-857
- ② 上田亜矢子、今井富士夫、中澤隆雄、尾

上幸造、飯村豊、ボルト孔に充填された樹脂がボルト接合の耐荷力に与える影響、第8回木橋技術に関するシンポジウム、査読無、2009、pp.21-28

- ③ Fuio Imai、Takao Nakazawa、Yutaka Iimura、Influence of Resin injected into Bolt Hole on Mechanical Properties of Timber-Steel Connection, 10th World Conference on Timber Engineering, 査読無、2008, CD (頁無し)

- ④ 上田亜矢子、今井富士夫、中澤隆雄、飯村豊、ボルト孔に充填された樹脂の木部材のボルト接合への補強効果、第7回木橋技術に関するシンポジウム、査読無、2008、pp.63-70

[学会発表] (計2件)

- ① 村上弥生、今井富士夫、中澤隆雄、繰返し引張荷重を受ける木部材のボルト接合部の挙動、平成19年度土木学会西武支部研究発表会、査読無、2008、pp.5-6
- ② 上田亜矢子、今井富士夫、木部材接合部のボルト孔への樹脂充填効果、平成20年度土木学会西武支部研究発表会、査読無、2009、pp.169-170

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 富士夫 (IMAI FUJIO)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：00038077

(2) 研究分担者

中澤 隆雄 (NAKAZAWA TAKAO)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：700041027