

実在する低強度コンクリート学校校舎における 床スラブ打ち継ぎ面のせん断強度に関する実験

貞末和史*・南 宏一**

(平成20年10月31日受理)

Experimental Study on Shear Strength for Joint of the Floor Slab in Existing RC School Buildings with Low-strength Concrete

Kazushi SADASUE and Koichi MINAMI

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

The investigation on seismic evaluation of existing reinforced concrete school building made it clear that the earthquake performance in this building is scarce. Therefore, A plan was made to construct the seismic retrofit for this building. In this research, we experimented with joint of the floor slab in an actual reinforced concrete school building to verify the validity of the seismic retrofit. From the test result, Shear strength for joint has been understood.

Key words: seismic retrofit, punching shear, connection

1. はじめに

平成18年に耐震診断が行われた広島県立宮島工業高校13号棟において、既存の鉄筋コンクリート(以下RC)校舎からコンクリートコアを抜き取って圧縮強度試験を行ったところ、日本建築防災協会の「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準¹⁾」において、コンクリート強度の下限値とされている 13.5N/mm^2 を下回る低強度のコンクリートが含まれることが判明した。その後、この学校校舎は、広島県より委託を受けた設計事務所によって耐震改修設計が行なわれ、低強度コンクリートを含む既存学校校舎の外側にRCのフレームを増設して、建物の保有耐力とじん性を増大させる改修案が挙げられた。

耐震改修設計は、広島県建築物耐震診断等評価委員会の「耐震診断・改修のためのガイドライン²⁾」に基づいて行

われた。しかしながら、コンクリート強度が上記したガイドラインの適用範囲外であることを踏まえた上で、改修設計の妥当性を実験によって検証することが必要となった。

耐震改修前および耐震改修後のRC学校校舎を図1に示す。耐震改修後の建物は、図1に示すように低強度コンクリートを含む既存建物と剛強に設計された増設RCフレームが一体となって地震力に抵抗することで、建物全体の耐震性能が確保される。ここで、地震時に既存建物に作用する力は、各階の床スラブを通じて増設RCフレームに伝達されるため、増設RCフレームによる耐震補強の効果が発揮されるか否かは、床スラブが十分な応力伝達能力を有しているか否かが要となる。しかしながら、この床スラブは、低強度コンクリートを含む既存の床スラブと、RCフレームの増設に伴う普通強度コンクリート新設床スラブの打ち継ぎ面を有するため、強度が大きく異なる2種類のコンク

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 福山大学工学部建築・建設学科

リートの接合面において、良好な応力伝達が行われるかどうか疑問が残る。

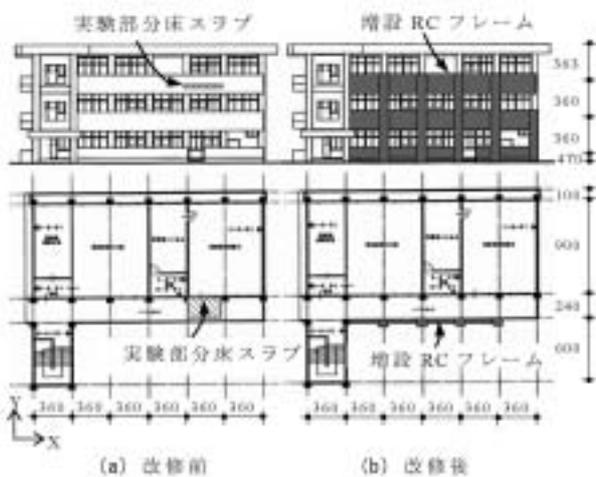


図1 耐震改修が行われた既存 RC 学校校舎 (単位: mm)

そこで、既存の低強度コンクリート床スラブと新設の普通強度コンクリート床スラブとの打ち継ぎ面のせん断破壊性状と耐力について検討するために、実際に耐震改修工事が予定された学校校舎の床スラブの一部分に油圧ジャッキ等を用いた加力装置を設置し、載荷実験を行った。本論では、まず初めに、耐震改修の対象となった建物の構造概要について述べ、次に、載荷実験の結果について報告する。

2. 既存建物および耐震改修設計の概要

耐震改修の対象となった建物は、広島県の西部に建つ地上3階建て、軒高11.3mの長方形平面を持つ高等学校の校舎棟であり、昭和46年(耐震診断時経過年数35年)の竣工となっている。

建物の構造形式はRC造であり、桁行(X)方向は6スパンのラーメン構造、梁間(Y)方向は耐震壁を有する1スパン(一部3スパン)のラーメン構造となっている。基礎構造は既製杭(RCパイル)で、支持深さはGL-5.0m〜-8.0m、支持層は風化花崗岩となっている。

耐震診断に先立ち現地調査が行われ、コンクリートコア圧縮強度試験を行ったところ、3個の圧縮強度の平均値から標準偏差/2を引き算した推定強度は、3階で14.4N/mm²、2階で13.2N/mm²、1階で15.7N/mm²であり、設計図書に記載されていた設計基準強度17.7N/mm²を下回っていることが確認された。なお、3階廊下床スラブにおける実験部分近傍では、圧縮強度が7.8N/mm²と極めて強度の小さいコンクリートが含まれることが明らかとなった。

改修前の耐震診断結果の概要を表1に示す。各階のIs

値は、X方向(3階:1.16, 2階:0.42, 1階:0.44), Y方向(3階:1.15, 2階:1.02, 1階:0.79)であった。耐震改修方法の項目を以下に挙げる。

- ・下階抜け壁の解消を目的として、上層階の一部の壁を撤去する。
- ・柱のじん性改善を目的として、1階の一部の柱側面に完全スリットを設ける・強度の増加を目的として、建物外側にRCフレームを増設する。

改修後の耐震診断結果の概要を表2に示す。各階のIs値は、改修後、X方向(3階:1.01, 2階:0.76, 1階:0.76), Y方向(3階:1.34, 2階:1.15, 1階:0.75)となった。

表1 耐震診断結果(改修前)

方向	階	E_o	S_D	T	I_s	q
X	3	1.16	0.97	0.93	1.16	2.07
	2	0.42	0.97	0.93	0.42	1.55
	1	0.44	0.97	0.93	0.44	1.59
Y	3	1.15	0.97	0.93	1.15	2.07
	2	1.02	0.97	0.93	1.02	1.81
	1	0.79	0.97	0.93	0.79	2.25

ここに、 E_o :保有性能基本指標、 S_D :形状指標、 T :経年指標、 I_s :構造耐震指標、 q :終局限界累積強度

表2 耐震診断結果(改修後)

方向	階	E_o	S_D	T	I_s	q
X	3	1.01	0.97	0.93	1.01	1.77
	2	0.76	0.97	0.93	0.76	2.74
	1	0.76	0.97	0.93	0.76	2.74
Y	3	1.34	0.97	0.93	1.34	2.40
	2	1.15	0.97	0.93	1.15	2.03
	1	0.75	0.97	0.93	0.75	2.14

3. 実験方法

改修後の建物の耐震性能を確保するには、既存建物と増設RCフレームの応力伝達部となる床スラブに十分な強度が求められ、本建物の耐震改修設計では、床スラブに $\tau=1.12\text{N/mm}^2$ のせん断強度が必要とされた。そこで、コンクリートコア抜き試験によって、最も低いコンクリート圧縮強度が確認された校舎3階の床スラブのせん断強度を検討することを目的として、載荷実験を計画した。

実験は実際に耐震改修工事が予定された学校校舎3階の床スラブの一部分のコンクリートを研り(写真1(a)参照)、実際の耐震改修工事で行う方法と同様な方法でスラブ筋の台直しを行い(写真1(b)参照)、新設する床スラブのコンクリートを打設した後、写真2に示されるように油圧ジャッキを設置し、既存床スラブと新設床スラブとの打ち継ぎ面に繰返しの直接せん断力を作用させた。なお、新設床スラブの回転を拘束するために、木材を介してPC

鋼棒で新設床スラブ端部と既存床スラブ端部の間を緊縮している。載荷方法の詳細を図2に示す。

床スラブ打ち継ぎ面の状況を写真1(c)に示す。打ち継ぎ面は実際の耐震改修工事と同様な状態であり、平滑にする等の特別な処理は行っていない。なお、既存校舎におけるコンクリートコア抜き試験によると、実験部分近傍のコンクリート圧縮強度は7.8N/mm²であり、早強コンクリートを用いた新設床スラブのコンクリート圧縮強度は、実験時に29N/mm²であった。

床スラブ部分の材料強度を表3、表4に示す。既存床スラブでは、上端筋に13φ、下端筋に8φの丸鋼が用いられていたが、新設床スラブにはD13の異形鋼を用いており、試験部分は、表4に示した鉄筋が混在した状態となっている。

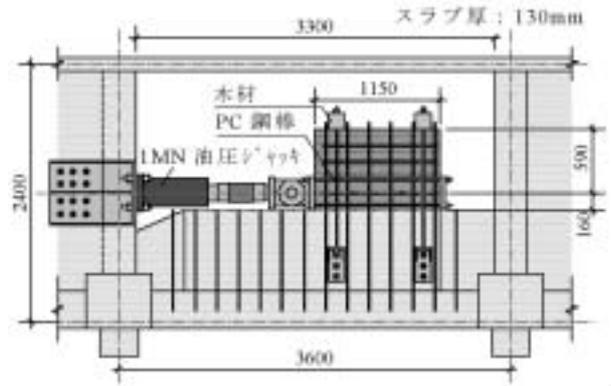


図2 載荷方法 (単位 mm)

表3 コンクリートの材料強度

使用箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	備考
既存床スラブ	7.8	コア抜き
新設床スラブ	29.0	新規打設

表4 鋼材の材料強度

使用箇所	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
13φ 既存床スラブ上端筋	278	434	23.1
8φ 既存床スラブ下端筋	307	459	22.2
D13 新設床スラブ	358	537	20.4



(a) 既存床スラブ切り後

(b) 新設床スラブ打設前



(c) 床スラブ打ち継ぎ面

写真1 配筋状況と床スラブの打ち継ぎ面



写真2 載荷状況

載荷は、既存床スラブと新設床スラブとの相対水平ずれ変位を変位制御し、正負繰り返しの漸増載荷を行った。

変位の計測状況を図3に示す。変位の計測は、変位計測用として新設床スラブに埋め込んだボルトを原点にとり、既存床スラブ部分に固定した変位計測用鋼製治具に取り付けた変位計の計測値 δ_1 、 δ_2 および δ_3 の計測値に基づき、図3に示す幾何学的な関係より(1.a,b,c)式によって、既存床スラブに対する新設床スラブの相対変位(水平ずれ変位 δ_U 、縦方向変位 δ_V 、回転角 θ)を算定した。また、ひずみゲージを用いて新設床スラブ筋のひずみ度を計測した。

$$\delta_U = \delta_1 + (Y_1 - \delta_{VB}) \cdot \theta \quad (1.a)$$

$$\delta_V = (\delta_3 - X_3) \cdot \theta + \delta_3 + Y_2 \cdot \theta^2 \quad (1.b)$$

$$\theta_B = (\delta_1 - \delta_2) / (Y_2 - Y_1) \quad (1.c)$$

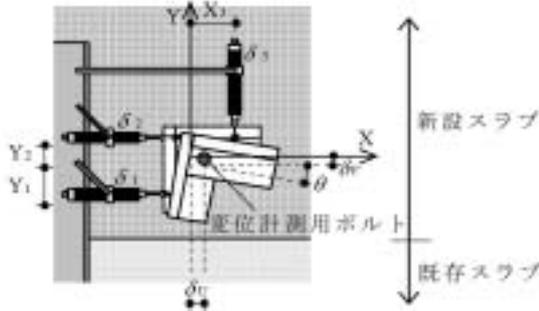
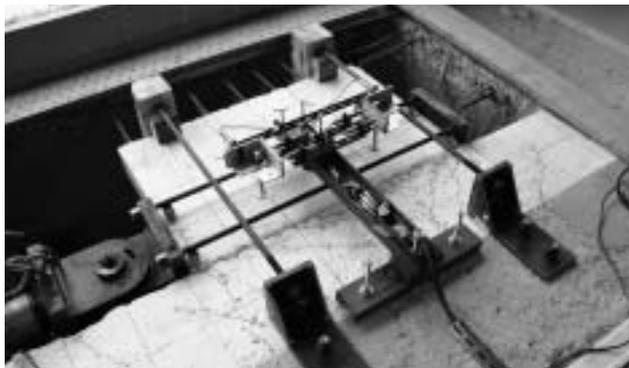


図3 変位計測

4. 実験結果および考察

4.1 破壊状況

破壊状況を写真3, 斜張力ひび割れ発生時および最大耐力時のせん断応力度と水平ずれ変位を表5に示す。せん断応力度 τ はせん断力 Q を新設床スラブ打ち継ぎ面の断面積(1150mm × 130mm)で除した値である。



(a) 水平ずれ変位 = ± 2mm 終了時



(b) 最終破壊状況

写真3 破壊状況

写真3 (a) に示されるように、载荷初期の小振幅時には、低強度コンクリートを有している既存床スラブに生じた斜めひび割れの発生が先行したが、最終的には、写真3 (b) に示されるように、床スラブ打ち継ぎ面近郊において、新設スラブ側の破壊が卓越した。

表5 斜張力ひび割れおよび最大せん断応力度

	τ_{cr} (N/mm ²)	δ_{cr} (mm)	τ_u (N/mm ²)	δ_u (mm)
正荷重	0.74	0.06	4.33	1.34
負荷重	-0.77	-0.02	-3.03	-1.99

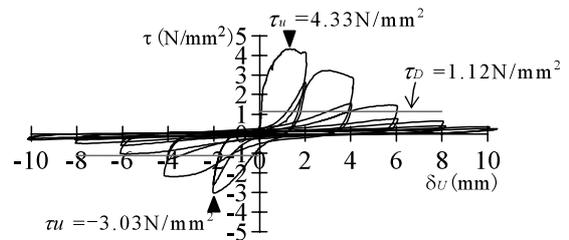
ここに、 τ_{cr} と δ_{cr} は斜張力ひび割れ発生時のせん断応力度と水平ずれ変位、 τ_u と δ_u は最大耐力時のせん断応力度と水平ずれ変位

4.2 履歴曲線

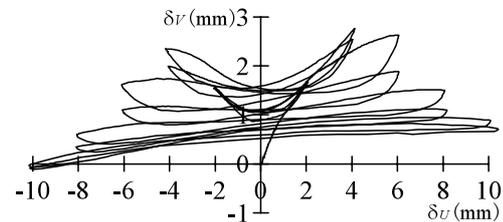
図4に $\tau - \delta_v$ 関係、 $\delta_v - \delta_u$ 関係を示す。図中の設計せん断応力度 τ_D (=1.12N/mm²)は、本建物の耐震改修設計において必要とされたせん断応力度である。

$\tau - \delta_v$ 関係を見てみると、既存床スラブと新設床スラブの水平ずれ変位が1~2mm程度で最大耐力に達した以降、急激な耐力低下を生じており、6mm以上の振幅の繰り返しでは、せん断力に対して、ほとんど抵抗できない状態となっていることがわかる。6mmの振幅を与えた時には写真3の最終破壊状態に近く、既存床スラブと新設床スラブの打ち継ぎ面に5mm程度の隙間が生じており、床スラブ筋が打ち継ぎ面の隙間の両端を固定端とした逆対象曲げモーメントを受けている状態であった。

斜張力ひび割れせん断応力度 τ_{cr} は τ_D を下回っているが、最大耐力時のせん断応力度 τ_u は τ_D を上回っていることが確認された。



(a) $\tau - \delta_v$ 関係



(b) $\delta_v - \delta_u$ 関係

図4 履歴曲線

4.3 ひずみ度推移

新設床スラブ内の床スラブ筋(縦筋)の両面にひずみゲージを貼り付けて、ひずみ度を計測している。図5にひずみゲージの貼り付け位置を示し、各位置におけるひずみ度の推移を図6に示す。なお、図6に示すひずみ度 ϵ は、縦

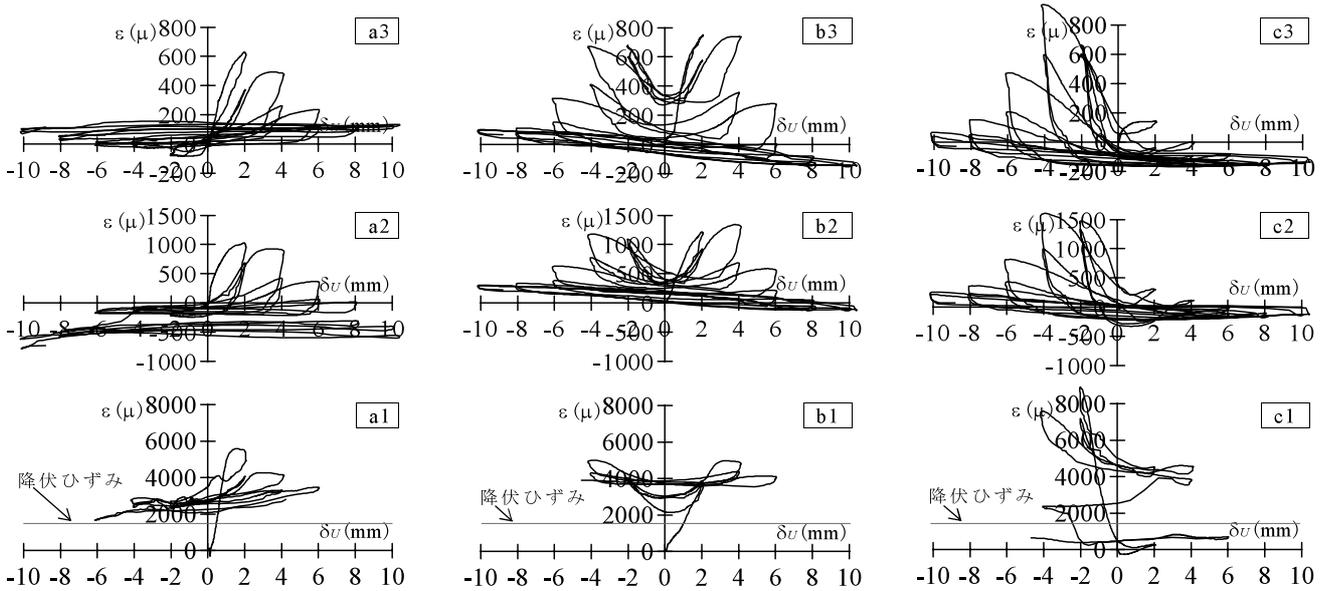


図6 ひずみ度推移

筋両面のひずみ度の平均値である。

打ち継ぎ面に近い位置のひずみ度が大きく、最大耐力に達する以前に降伏していることがわかる。また、b1～b3のひずみ度は、ほぼ正負対称の履歴を示しているのに対して、a1～a3およびc1～c3のひずみ度は非対称となっているため、新設床スラブが回転している影響も見られる。

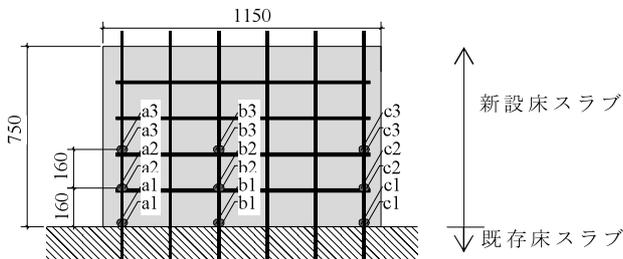


図5 ひずみ度測定位置 (単位: mm)

5. せん断強度の評価

床スラブの剛性や耐力は、通常、積載荷重等の鉛直荷重による面外方向の振動や変形に対する検討が必要であり、基・規準類においても、面外方向に対する設計式が示されている。そこで、床スラブの面内方向の耐力評価に関しては、RC壁や柱のひび割れ強度および終局強度の評価式を用いて検討を行った。

5.1 ひび割れ強度

RC壁のひび割れ強度に関して、無開口壁の初ひび割れせん断応力度 τ_{cr} とコンクリートの圧縮強度 σ_B の関係に対する既往の実験結果より、RC規準³⁾に下式が示されている。

$$Q_l = t \cdot l \cdot \tau_{cr} \quad (2.a)$$

$$\tau_{cr} = 0.05 \sigma_B \quad (\sigma_B < 21 \text{N/mm}^2) \quad (2.b)$$

ここに、 Q_l は許容水平せん断力、 t は壁板の厚さ、 l は柱中心間の距離である。

本論文では、 t を床スラブ厚さ、 l を新設スラブ打ち継ぎ面の長さとして、床スラブひび割れ発生時のせん断応力度 τ_{cr} の評価を行う。

5.2 終局強度

直接せん断を受けるRC柱の終局強度に関して、既存RC造耐震改修設計指針⁴⁾に下式が挙げられている。

$$pQ_c = k_{min} \cdot \tau_0 \cdot A \quad (3)$$

$$k_{min} = 0.34 / (0.52 + a/D) \quad (4)$$

$$\tau_0 = 0.98 + 0.1 \sigma_B + 0.85 \sigma \quad (0 \leq \sigma \leq 0.33 \sigma_B - 2.75) \quad (5.a)$$

$$\tau_0 = 0.22 \sigma_B + 0.49 \sigma \quad (0.33 \sigma_B - 2.75 \leq \sigma \leq 0.66 \sigma_B) \quad (5.b)$$

$$\tau_0 = 0.66 \sigma_B \quad (\sigma = 0.66 \sigma_B) \quad (5.c)$$

$$\sigma = a_g / A \cdot \sigma_y + \sigma_0 \quad (6)$$

ここに、 A は柱の断面積、 a はせん断力が集中的に作用すると仮定した時の作用点から梁フェイスまでの距離、 D は柱せい、 a_g は全主筋断面積、 σ_y は主筋降伏強度、 σ_0 は柱軸力である。

本論文では、上式における A を床スラブの断面積、 a_g および σ_y を床スラブ筋の断面積と降伏強度、 $a/D = 0$ 、 $\sigma_0 = 0$ として、下式で床スラブの終局せん断応力度 τ_u の評価を行う。

$$\tau_u = k_{min} \cdot \tau_0 \quad (7)$$

5.3 セン断応力度の実験値と計算値の比較

表6に実験値と計算値の比較を示す。実験値は正荷重時の値を用い、計算値のコンクリート強度 σ_B は、既存床スラブのコンクリート圧縮強度 7.8N/mm^2 を用いた。

いずれの計算値とも、実験値は計算値を上回ることが確認された。

表6 鋼材の材料強度

実験値(N/mm ²)		計算値(N/mm ²)		実験値/計算値	
τ_{cr}	τ_u	τ_{cr}	τ_u	ひび割れ強度	終局強度
0.74	4.33	0.39	3.60	1.90	1.20

6. まとめ

13.5N/mm^2 を下回る 7.8N/mm^2 の低強度コンクリートを有する学校校舎の耐震改修として、既存建物の外側にRCフレームを増設する案が挙げられた。増設RCフレームによる耐震補強の効果をj得るためには、既存建物と増設RCフレームの接合部分が十分な強度を有する必要がある。そこで、耐震改修設計の妥当性を検証するために、既存の低強度コンクリート床スラブと新設した普通強度床スラブにおける打ち継ぎ面が、耐震改修設計において必要とされたせん断強度を有しているか確認する実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 設計せん断応力度 τ_D は、斜張力ひび割れせん断応力度 τ_{cr} に対して、 $\tau_{cr}/\tau_D=0.67$ （正負の平均値）の安全率を有する。

- 2) 設計せん断応力度 τ_D は、終局せん断応力度 τ_u に対して、 $\tau_u/\tau_D=3.29$ （正負の平均値）の安全率を有する。
- 3) ひび割れせん断応力度の計算値は、実験値に対して、実験値/計算値=1.09の安全率を有する。
- 4) 終局せん断応力度の計算値は、実験値に対して、実験値/計算値=1.20の安全率を有する。

参 考 文 献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，2001.1
- 2) 広島県建築物耐震診断等評価委員会：耐震診断・改修のためのガイドライン「低強度コンクリート建築物の耐震診断および耐震改修について」，2007.10
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（第7版），2000.4
- 4) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説，2001.1

謝辞

本実験に際し、広島県総務部財務局営繕室、K構造研究所・藤田聖了氏および河政建設・坂川雄一氏より多大なるご支援とご協力を得ました。また、実験の実施に関しては、広島工業大学貞末研究室の学生の協力を得ました。ここに記し、感謝の意を表します。