

# 起電力による鉄鋼の衝撃変形評価とその応用

研究代表者 秋田県立大学システム科学技術学部 助手 中山 昇  
共同研究者 秋田県立大学システム科学技術学部 教授 熊沢鉄雄

## 1. はじめに

鉄鋼構造物の強度信頼性設計では外部から負荷を受けた時の応力やひずみ情報が必要である．特にひずみが集中して破壊発生に繋がる箇所の変形データの取得，評価が重要となっている．しかし，微細な箇所の変形やひずみを測定する技術は未だ確立されていない．そこで，構造体の変形をゼーベック効果によって生じる電圧変化（起電力）として測定することが出来るのではないかとこの観点から，起電力を用いた変形測定法を考案した<sup>(1)</sup>．

本研究では，起電力を用いた変形測定法を一般性のある衝撃測定法として確立することを目的とした．スプリットホプキンソンバー試験装置<sup>(2)-(8)</sup>を用いてひずみ波の伝ばに伴う起電力変化の測定およびひずみゲージ出力との対比によりその特徴を調べる．また測定における感度評価と向上，ノイズの評価と低減対策の基礎検討を行う．これらの研究の結果に基づいてヘルスマonitoringとしての利用方法の検討を行った．

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

本実験では鉄系材料の変形と起電力発生との基礎的知見を求めるために，試験片材料に純鉄を用いた．試験片形状は円柱状であり，直径  $d=5\text{mm}$ ，長さ  $l=3\text{mm}$  である．また試験片は実験ごとに交換した．

### 2.2 スプリットホプキンソンバー試験装置

応力やひずみと起電力の関係を定量的に求めるためには，正確な応力 - ひずみ線図を求める必要がある．その方法として，スプリットホプキンソンバー法<sup>(2)-(8)</sup>がある．

スプリットホプキンソンバー試験装置の概略図を図 1 に示す．主に，ホプキンソンバーと呼ばれる同材質，同径の 2 本の細長い弾性棒（入力棒と出力棒），ストライカ（材質：S45C），バレル，コンプレッサー，バルブから構成されている．入力棒の左端面に同径のストライカをコンプレッサーで圧縮した空気により高速で同軸衝突させる．入力棒内に発生した入射（圧縮）応力波は，左から右へ伝ばし出力棒側に伝ばする．その応力波を入出力棒上のひずみゲージによって測定する．また，入射する応力波の大きさは，ストライカのバレルへの押込み量，打ち出す空気圧およびソレノイドバルブの開放時間で制御することができる．

ひずみゲージは入力・出力棒の中心部にそれぞれ半径方向対面に二枚ずつ取り付けられた．ストライカの衝突により試験片に入射する応力波をひずみゲージで検出し，アンプを通してオシロスコープで表示，記録した．

入力・出力棒のひずみゲージで測定した応力波（入射  $\varepsilon_i$ ，反射  $\varepsilon_r$ ，透過  $\varepsilon_t$  の三つの応力波）から，一次元波動理論に基づいて圧縮試験片の公称ひずみ  $\varepsilon$ ，公称ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$ ，公称応力  $\sigma$  は，それぞれ式(1)，式(2)，式(3)から求めることができる．

$$\varepsilon(t) = \frac{2c_0}{l} \int_0^t [\varepsilon_i(t') - \varepsilon_r(t')] dt' \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2c_0}{l} [\dot{\varepsilon}_i(t) - \dot{\varepsilon}_r(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_i(t) \quad (3)$$

ここで  $A$ ， $E$ ， $c_0 (= \sqrt{E/\rho})$  はそれぞれ入力棒の断面積，ヤング率，縦ひずみパルス（縦弾性波）の伝ば速度である． $l$ ， $A_s$  は，純鉄円柱試験片の変形前の長さ（ $= \pi d^2/4$ ）である．式(1)～(3)から時間  $t$  を消去すれば，圧縮試験片の公称応力  $\sigma$ ，公称ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$ ，公称ひ

ずみの関係が求められる．この解析では，純鉄円柱試験片の両端での動的圧縮力の釣り合いが成立することを仮定している．

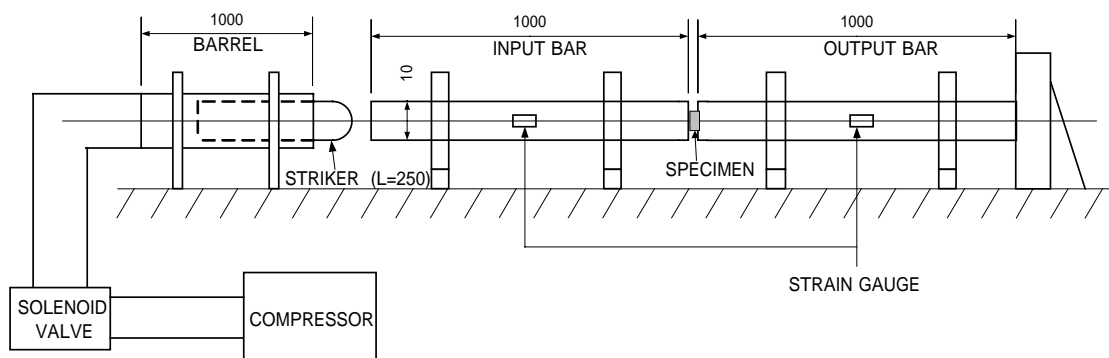


図 1 ホプキンソンバー試験装置の概略図

### 2.3 起電力測定装置

スプリットホプキンソンバー試験装置の入力・出力棒の間の試験片固定位置からひずみゲージ取り付け位置までの拡大図及び各種測定機器との配置図を図 2 に示す．起電力を測定するため，スポット溶接機を用いて試験片円筒表面の長手方向に Cu 線と Con.線（コンスタンタン線）を 2mm 離して直接電着した．この熱電対は室温との差分をとるために，試験片と同じく Cu 線と Con.線が電着された純鉄円柱試験片を配置したダミー回路を持つ温度 273K の基準接点温度に保持した氷点容器を通しアンプに接続した．起電力はアンプを通し増幅してオシロスコープで表示，記録した．

また，試験中，入力・出力棒と試験片を絶縁するために，入力・出力棒と試験片との接触面は絶縁テープを介して絶縁し，その間に試験片を固定した．さらに圧縮負荷により試験片の変形が起こる際に試験片両端面と入力・出力棒の接触面の間に摩擦が発生すると，試験片が樽型変形を起こすため，接触面には二硫化モリブデンを塗布してある．

また，同軸ケーブルやひずみゲージまたは導線部がアンテナの役割をして電磁波の影響を受けることで，オシロスコープに表示される波形にノイズが生じる．このノイズ除去のため，試験装置を構成するオシロスコープとアンプを繋ぐ同軸ケーブルには全てにアルミ箔を巻いた．また，ひずみゲージとブリッジ回路ボックスを結ぶ導線部にもノイズ除去のための金属が巻いてある 3 線式導線を用いた．

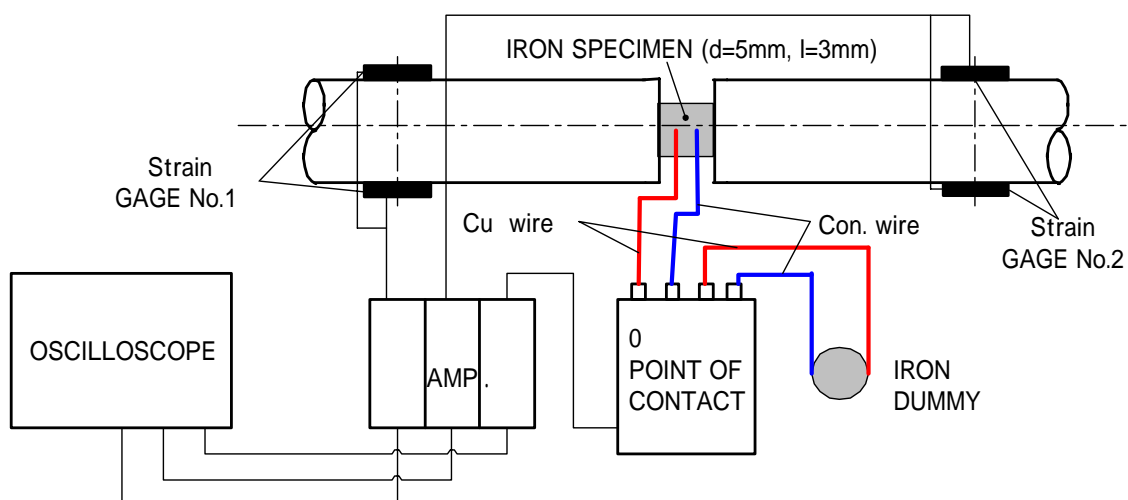


図 2 起電力測定装置と配線図

### 3. 実験結果

#### 3.1 応力 - ひずみ - 起電力の関係

純鉄円柱試験片中に持続時間  $110\ \mu\text{s}$ 、入射ひずみ  $500\ \mu$  の応力波を入射したときの代表的な応力波形（入射波  $i$ 、反射波  $r$ 、透過波  $t$ ）と起電力波形を図 3 に示す。図 3 では、起電力は入力棒のひずみゲージで圧縮応力波を検出した後、約  $100\ \mu\text{s}$  後に急激に立ち上がりピークを迎えている。これは、ひずみゲージと熱電対には  $0.5\text{m}$  の間隔があるので応力波が伝ばするために発生するタイムラグ（応力波の伝ば速度：約  $5100\text{m/s}$ ）である。起電力はピーク値までほぼ直線形で上昇し、その後緩やかに減少する。

図 3 の入射波  $i$ 、透過波  $t$  から求めた応力 - ひずみ、ひずみ速度 - ひずみ - 起電力の関係を図 4 に示す。図 4 より、応力 - ひずみ曲線の応力が増加する範囲において起電力と応力 - ひずみ曲線は同じ傾きで増加していることがわかる。また応力がピークに達し一定の値になると起電力は増加せず、減少する。

応力 - ひずみ曲線において応力が増加する範囲内での応力と起電力の関係を図 5 に示す。同図から、応力 - ひずみ曲線において応力が増加する範囲内での応力と起電力は比例関係にあることが確認できる。従って、応力が弾性域内（応力 - ひずみ曲線の応力が増加する範囲）にある場合は、起電力法を用いることで試験片内の応力（荷重）の挙動をモニタリングできる可能性があると考えられる。

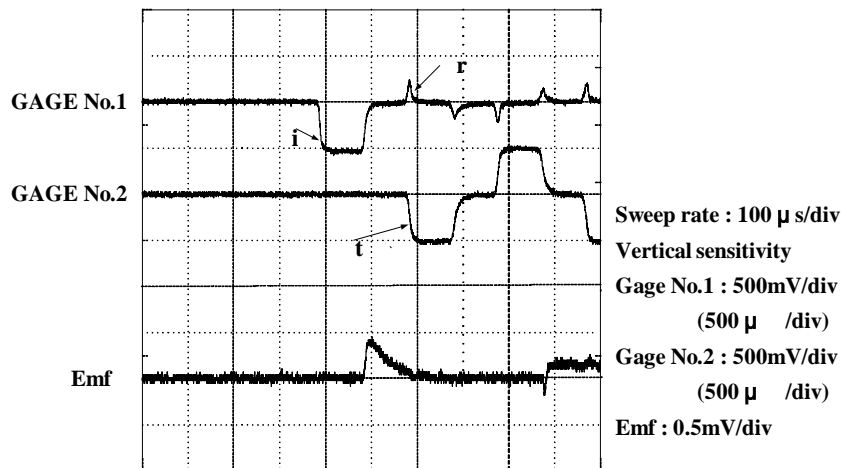


図 3 オシロスコープ波形（入射ひずみ  $500\ \mu$ ）

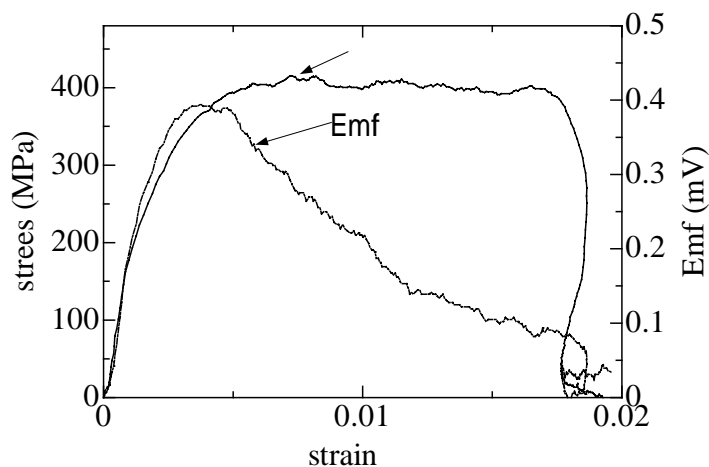


図 4 応力 - ひずみ - 起電力の関係（入射ひずみ  $500\ \mu$ ）

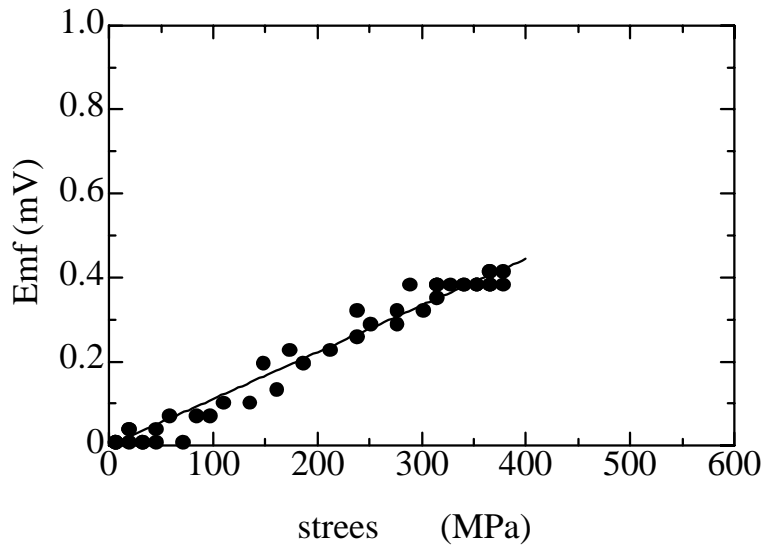


図5 応力 - 起電力の関係  
(入射ひずみ  $500 \mu$  )

### 3.2 入射ひずみ波のピーク値と起電力の関係

起電力には速度依存性があるのか確認するために、入射ひずみ波のピーク値を  $250, 500, 750 \mu$  と変化させ、起電力を測定した。図6に入射ひずみ波のピーク値を変化させたときの応力 - ひずみ - 起電力の関係を示す。同図において、応力が弾性域内（応力 - ひずみ曲線の応力が増加する範囲）にある場合は、応力 - ひずみ曲線と起電力は非常に一致していることがわかる。

図6から得られた弾性域内における応力と起電力の関係を図7に示す。図7からひずみ速度（入射ひずみ波のピーク値）が変化しても、応力と起電力には比例関係があることがわかる。

従って、弾性域内（応力が増加する範囲内）では、ひずみ速度が変化する動的もしくは衝撃的な荷重下における応力（荷重）を起電力法によって定量的に測定することができると思われる。

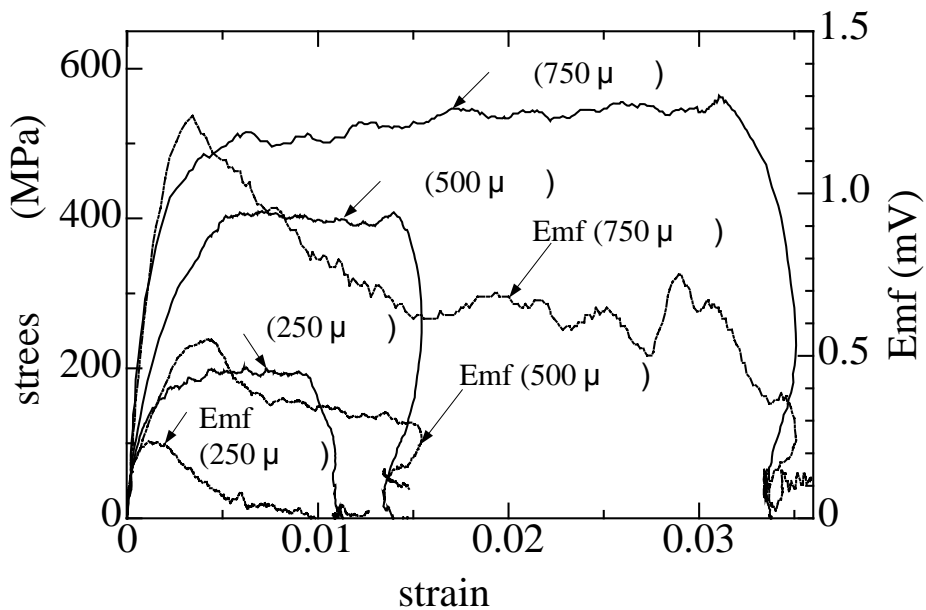


図6 入射ひずみピーク別の応力 - ひずみ - 起電力の関係

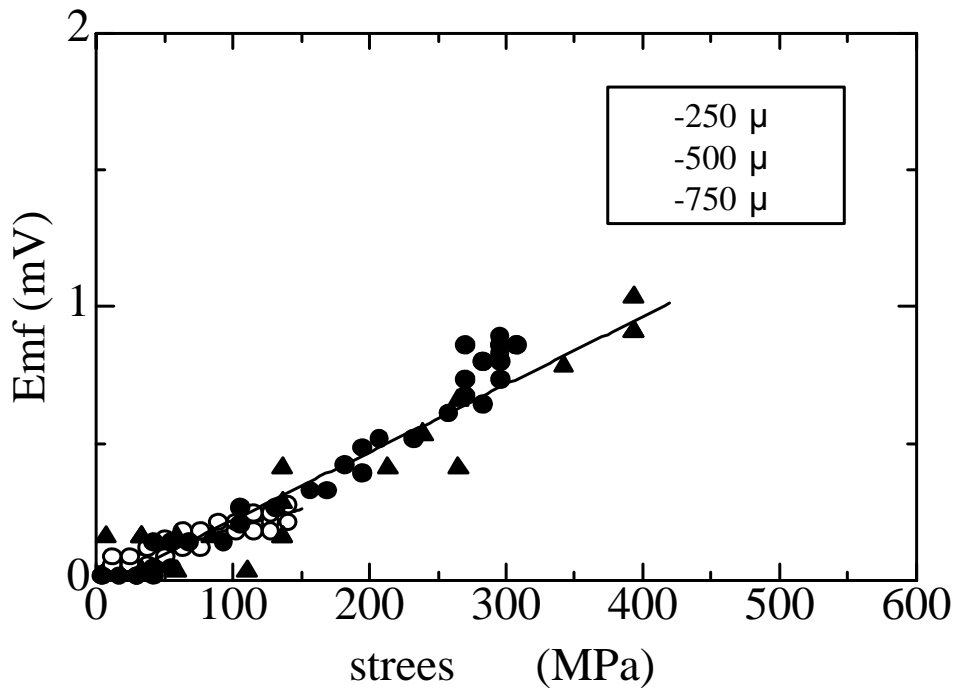


図7 応力 起電力の関係

### 3.3 起電力の感度向上に関する検討(熱電対の取り付け位置の変化)

起電力法を用いて、構造体の応力(荷重・ひずみ)変化を感度良く測定するために純鉄円柱試験片への熱電対の取り付け位置を変化して起電力の大きさを検討した。

図8(a)-(c)に、それぞれ(a)長手方向(間隔:2mm)、(b)半径方向対面、(c)一点結線の模式図を示す。図8(a)の長手方向(間隔:2mm)は「3.2」までの実験で用いた取り付け位置である。

試験片に入射したひずみ波は、持続時間110 $\mu$ s、ピーク値500 $\mu$ である。

図9(a)-(c)に各熱電対の取り付け位置変化による応力-ひずみ-起電力の関係を示す。(c)一点結線では起電力を測定することができなかった。図9から感度が一番良い取り付け位置は(b)半径方向対面であることがわかる。(a)長手方向(間隔:2mm)の取り付け位置と比較して(b)半径方向対面は約15倍の感度があることがわかる。

これらの結果から、起電力法によって応力(荷重・ひずみ)を測定する場合、半径方向対面に熱電対を取り付けることが望ましいことがわかった。

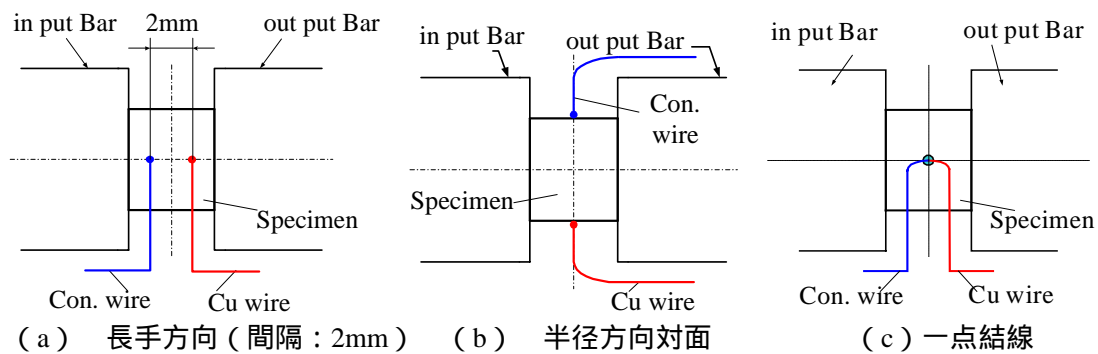
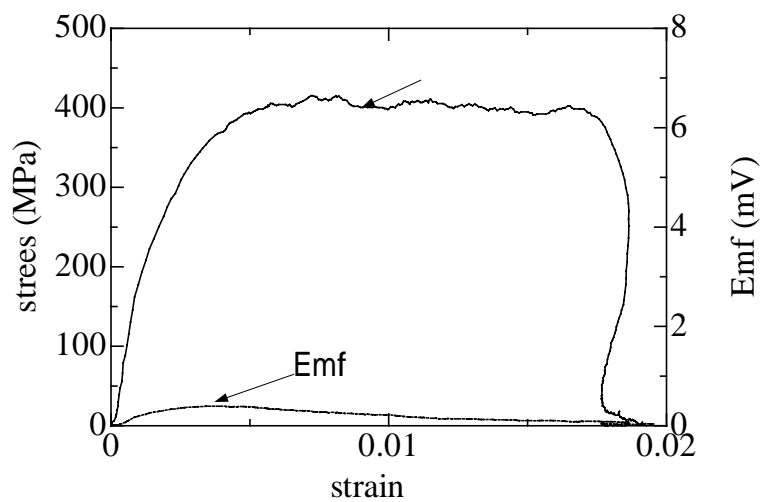
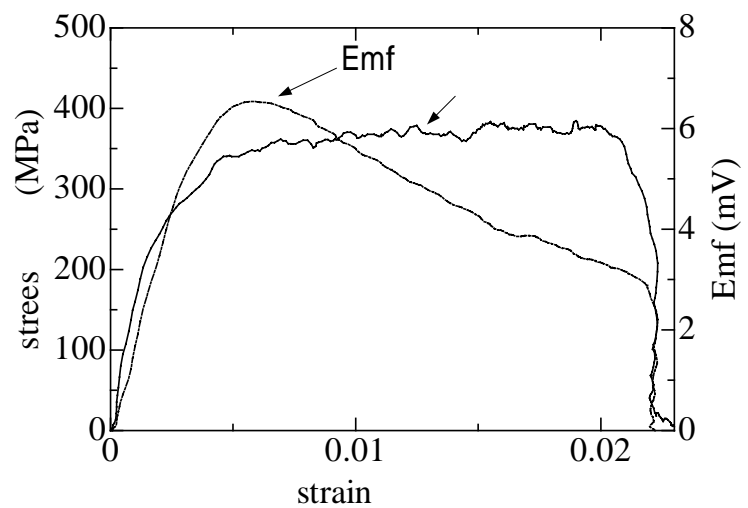


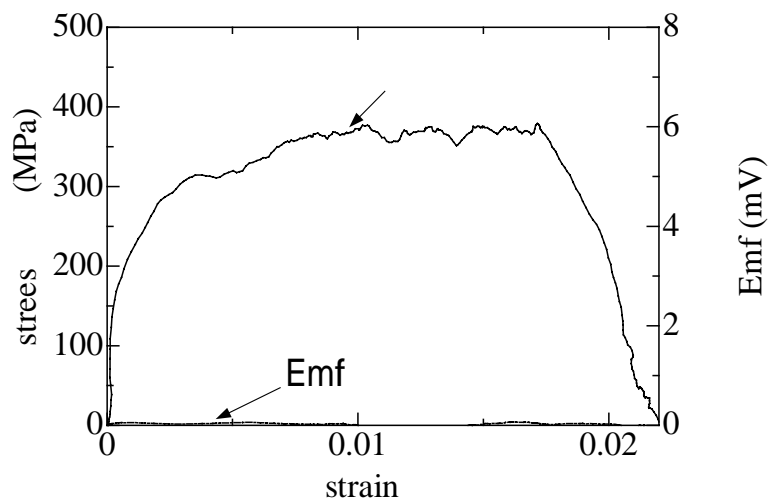
図8 熱電対の取り付け位置の模式図



(a) 長手方向 (間隔: 2mm)



(b) 半径方向対面



(c) 一点結線

図9 応力 - ひずみ - 起電力の関係 (熱電対の取り付け位置変化)

### 3.4 構造ヘルスマニタリングに関する検討

これまでの実験は応力・ひずみ・起電力を定量的に求めるために短い円筒形状の純鉄を用いてきた。実際に使用される構造物の形状に近づけ、構造ヘルスマニタリングの可能性があるので検討した。図10に構造ヘルスマニタリング用の衝撃試験装置を示す。試験片は、直径  $d=10\text{mm}$ 、長さ  $l=500\text{mm}$  の純鉄棒状試験片を用いた。熱電対の取り付け位置の模式図を図11に示す。ここでの熱電対の取り付け位置は、感度が高い半径方向対面を採用した。純鉄棒状試験片の破損を防ぐためにストライカの材質を S45C から A2014P に変更した。

図12に実験で測定した代表的なひずみ・熱起電力波形を示す。同図からひずみゲージと同様に感度良く起電力を測定していることがわかる。

従って、起電力法を用いて起電力を測定することで構造体のヘルスマニタリングの可能性がわかった。

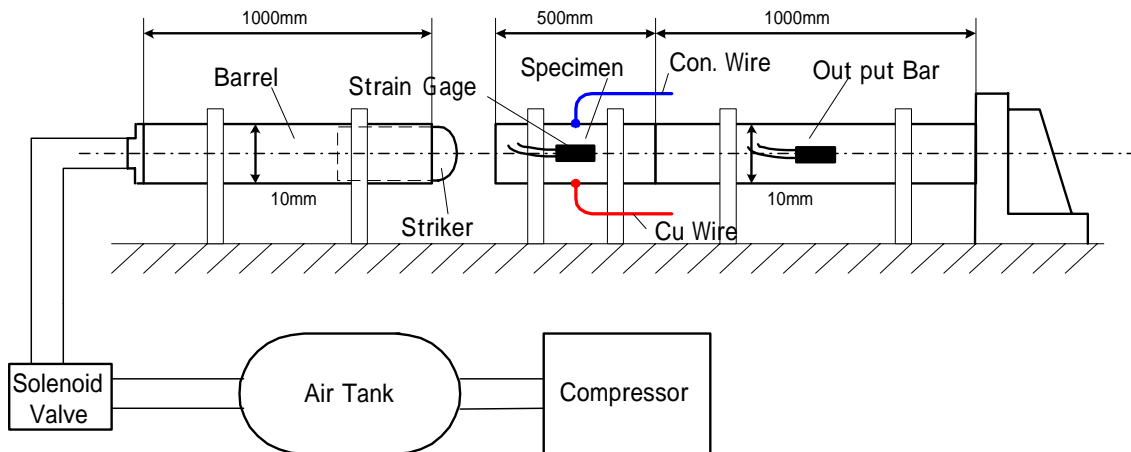


図10 構造ヘルスマニタリング用衝撃試験装置の概略図

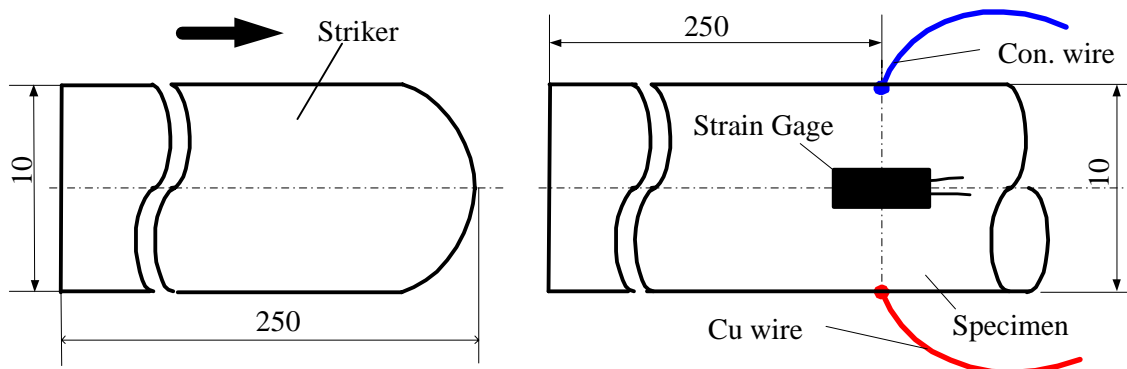


図11 熱電対の取り付け位置の概略図（半径方向対面）



図 12 ひずみ・熱起電力波形（ヘルスモニタリング）

#### 4. おわりに

本研究では，起電力を用いた変形測定法を定量的に測定することができる衝撃測定法として確立することを目的とした．

その結果，以下のことがわかった．

1. 弾性域内（応力が増加する範囲内）では，ひずみ速度が変化する動的もしくは衝撃的な荷重下における応力（荷重）を起電力法によって定量的に測定できると思われる．
2. 起電力法によって応力（荷重・ひずみ）を測定する場合，半径方向対面に熱電対を取り付けることが望ましいことがわかった．
3. 起電力法を用いて起電力を測定することで構造体のヘルスモニタリングの可能性があることがわかった．

以上の結果から，起電力法を用いることで構造体に負荷された衝撃応力（荷重・ひずみ）を定量的に測定でき，ヘルスモニタリングを行うことができると考える．

#### 参考文献

- (1) 熊澤鉄雄，駒崎慎一；“起電力による微細はんだボールの変形評価”，日本機械学会（A編），68（669），pp.148-153（2002）
- (2) 横山隆；“ホプキンソン棒法による材料の衝撃変形強度の評価”非破壊検査 A&T，pp.388-395（1999）
- (3) 岸田敬三，中川憲治；“スプリットホプキンソン棒法による動的破壊じん性の測定”，材料，32（361），pp.1096-1101（1983）
- (4) 横山隆；“ホプキンソン棒法による材料の衝撃変形強度・動的破壊開始じん性の測定”材料試験技術，43（4），pp.3-12（1998）
- (5) 佐藤千明，岩田英生，池上皓三；“クランプ式ホプキンソン棒を用いた複合衝撃負荷での接着強度の測定”，日本機械学会（A編），63（606），pp.129-134（1997）
- (6) 横山隆，岸田敬三，長岡英一；“ホプキンソン棒法による高速圧縮試験のためのマイクロコンピュータ援用データ処理システムの開発”，塑性と加工（日本塑性加工学会誌），26（288），pp.59-65（1985）
- (7) 望月知弘，早坂康男，梅田章；“スプリットホプキンソン棒法による力センサの動特性評価”，自動車技術，55（2），pp.57-61（2001）
- (8) 谷村眞治，梅津浩一，木村則秀，五十鈴川浩児；“ホプキンソン棒法による低温用特殊試験法”，日本機械学会（A編），56（529），pp.126-130（1990）