

# ホプキンソン棒法を始めとする衝撃材料試験法 およびその研究動向

---

西田政弘 (名古屋工業大学)



# 研究室の装置と内容

---

1. 万能試験機(静的圧縮試験, 引張試験)

2. 衝撃実験装置

① 二段式軽ガスガン(横置き型)

(0.8 ~ 3.5 km/s)

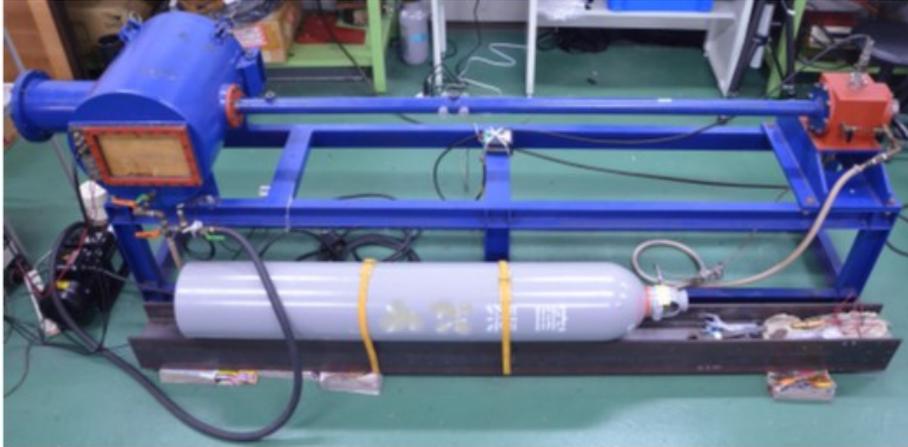
② 単段式ガスガン(窒素ガス)

(~ 150 m/s)

③ **ホプキンソン棒法**(圧縮型2本, 引張型1本)



## ② 単段式ガスガン → 液体容器の衝撃挙動



窒素ガス (～ 150 m/s)

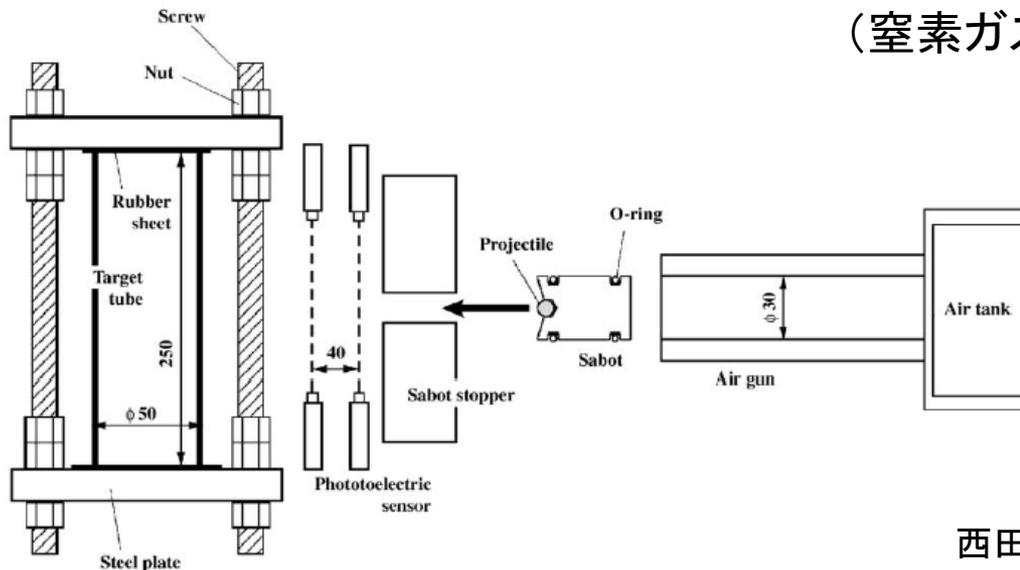


Fig. 1. Schematic of apparatus used for impact experiments.

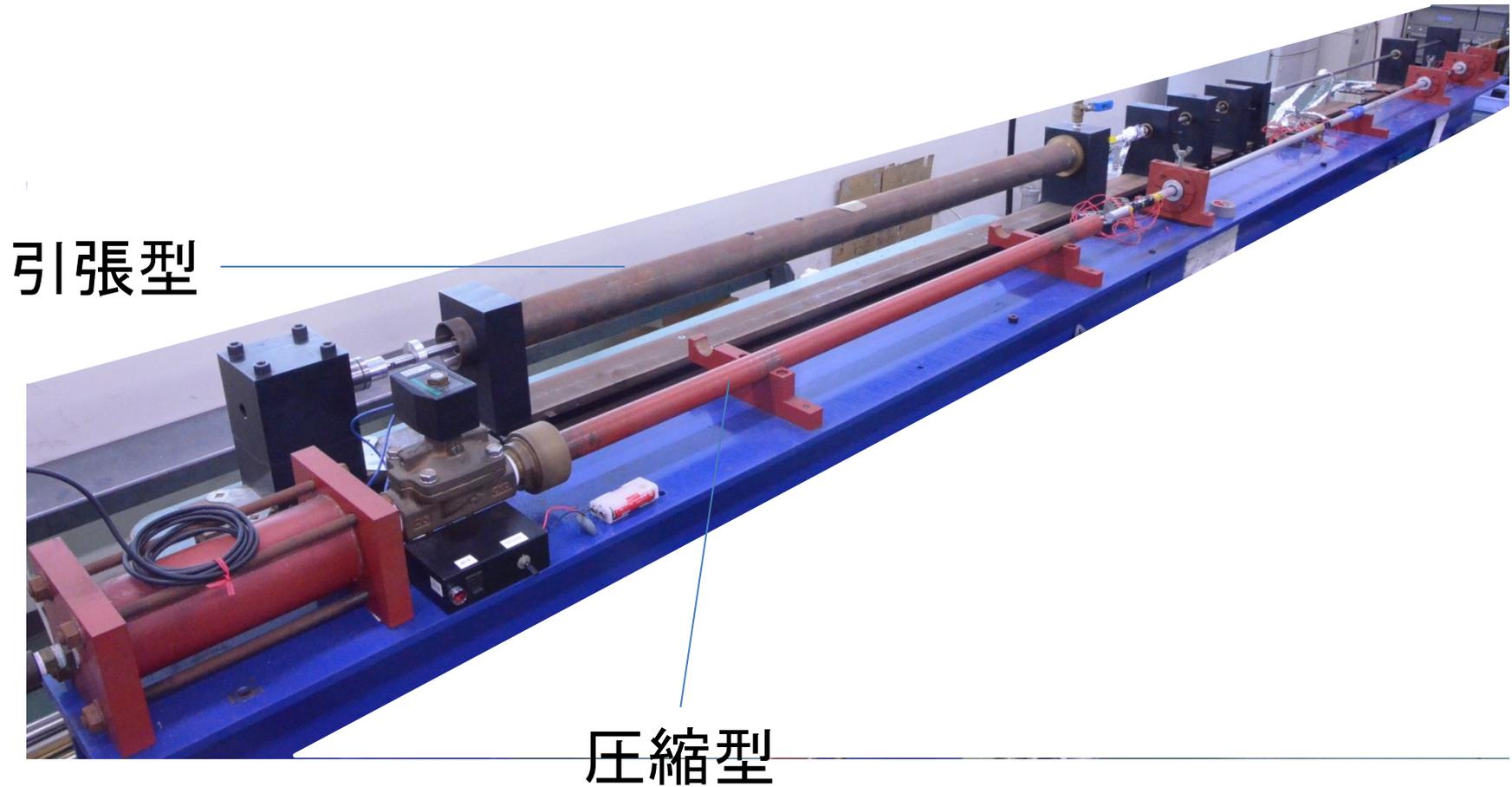
西田, 田中, 機械学会論文集, (2002)  
西田, 田中, 横山, 機械学会論文集, (2003)  
Nishida & Tanaka, Int J Impact Eng (2006)

### ③ ホプキンソン棒法

**SHPB: Split Hopkinson pressure bar**  
**(圧縮型2本, 引張型1本) @名工大**

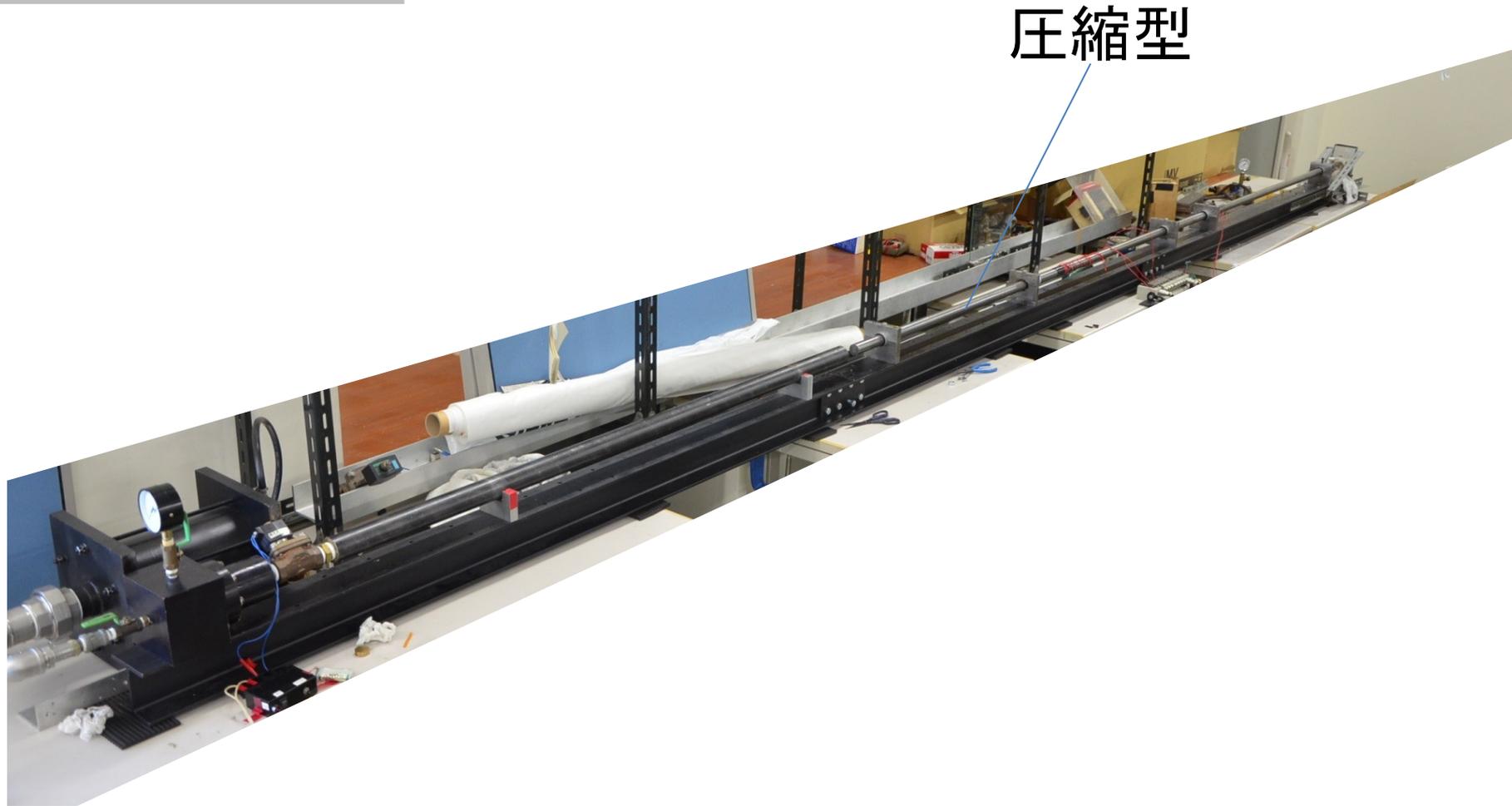
# 1階実験室

---



アルミ棒 → バイオマスプラスチックの特性評価

# 9階実験室



圧縮型

スチール棒 → 鉄粉圧密体（粉末冶金）

# 各種の衝撃試験法

Table 1 Experimental methods for high strain-rate testing

Loading mode	Applicable strain rate (1/s)	Test technique
Compression	$\dot{\epsilon} < 0.1$	Conventional load frames
	$0.1 < \dot{\epsilon} < 100$	Special servohydraulic frames
	$0.1 < \dot{\epsilon} < 500$	Cam plastometer and drop test
	$200 < \dot{\epsilon} < 10^4$	<u>Hopkinson bar in compression</u>
	$10^4 < \dot{\epsilon} < 10^5$	Taylor impact test
Tension	$\dot{\epsilon} < 0.1$	Conventional load frames
	$0.1 < \dot{\epsilon} < 100$	Special servohydraulic frames
	$100 < \dot{\epsilon} < 10^4$	<u>Hopkinson bar in tension</u>
	$\dot{\epsilon} < 10^4$	Expanding ring
	$\dot{\epsilon} > 10^5$	Flyer plate
Shear (Torsion)	$\dot{\gamma} < 0.1$	Conventional shear tests
	$0.1 < \dot{\gamma} < 100$	Special servohydraulic frames
	$10 < \dot{\gamma} < 10^3$	Torsional impact
	$100 < \dot{\gamma} < 10^4$	<u>Hopkinson bar in torsion</u>
	$10^3 < \dot{\gamma} < 10^4$	Double-notch shear and punch
	$10^4 < \dot{\gamma} < 10^7$	Pressure-shear plate impact

歪速度

試験機

0.001～0.1/s：静的引張り試験機

0.01～100/s：油圧サーボ試験機

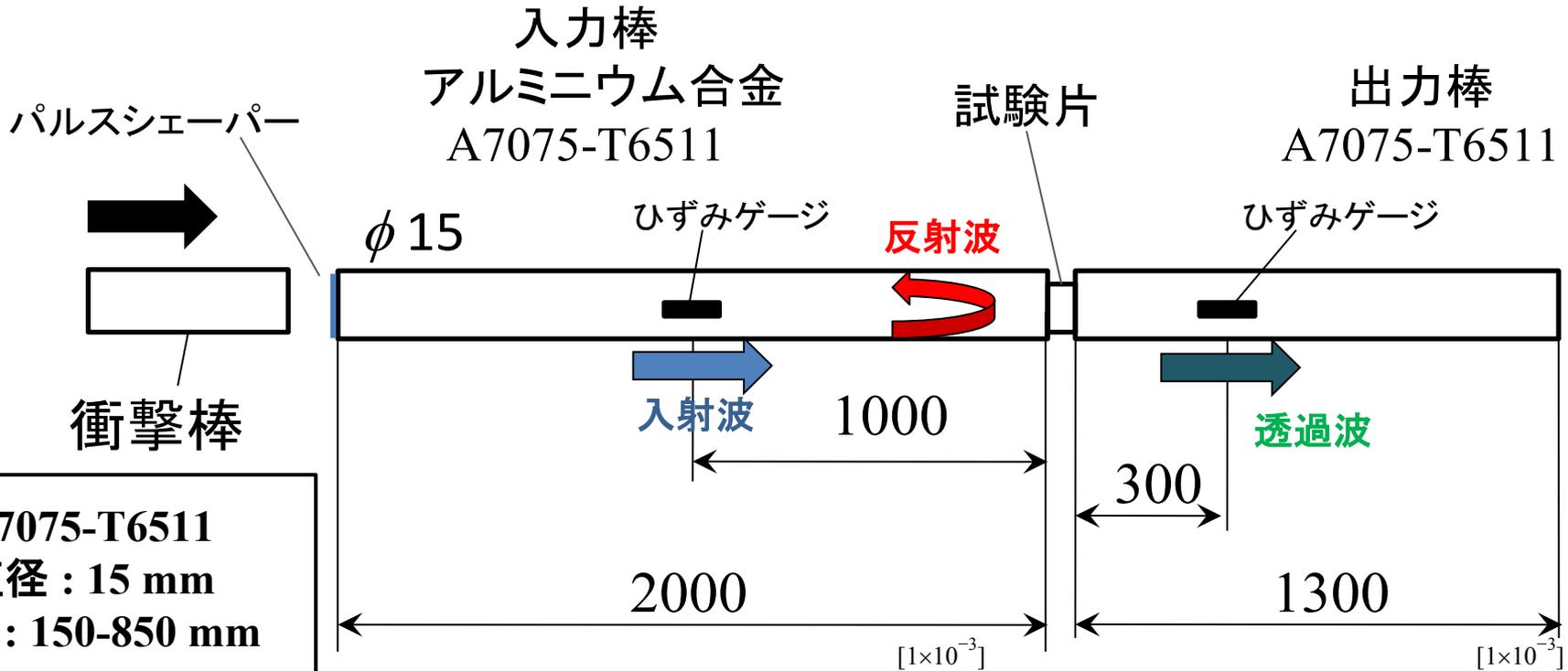
0.01～500/s：検力ブロック試験機

500～2000/s：ホプキンソン棒法



応力-ひずみ曲線

# スプリットホプキンソン棒法@名工大



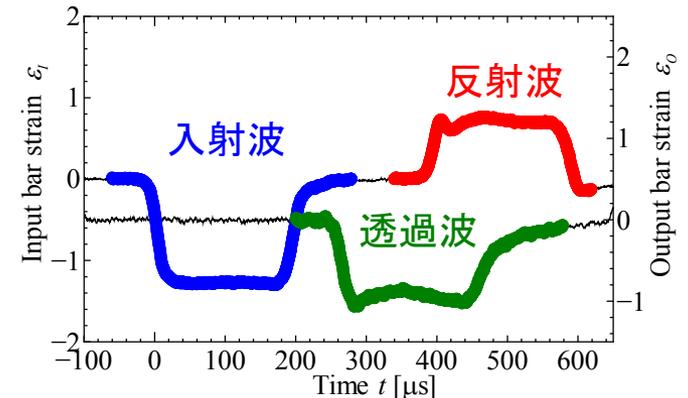
A7075-T6511  
直径 : 15 mm  
長さ : 150-850 mm

$$\textcircled{1} \quad \varepsilon(t) = \frac{2c_0}{L} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_o) dt$$

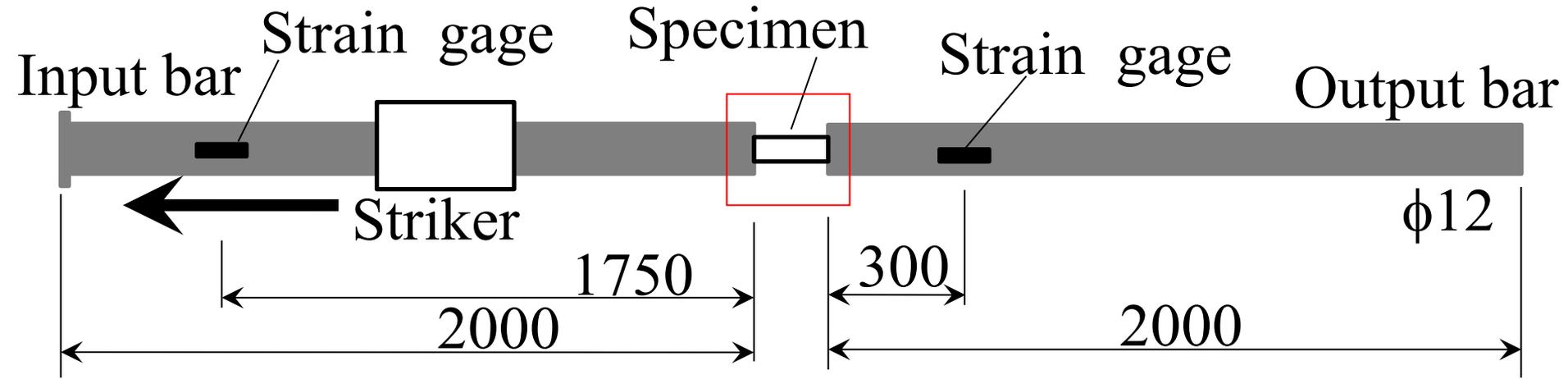
$c_0$  : 棒波速度  
 $L$  : 試験片の厚さ  
 $\varepsilon_I$  : 入射ひずみ  
 $\varepsilon_o$  : 透過ひずみ

$$\textcircled{2} \quad \sigma(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_o$$

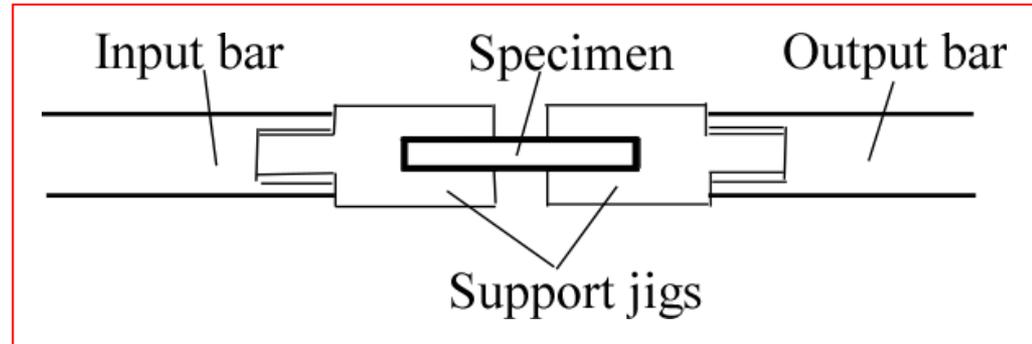
$E$  : 棒の縦弾性係数  
 $A$  : 棒の断面積  
 $A_s$  : 試験片の断面積



# 引張型 ホプキンソン棒法 (クロスキー法) @名工大



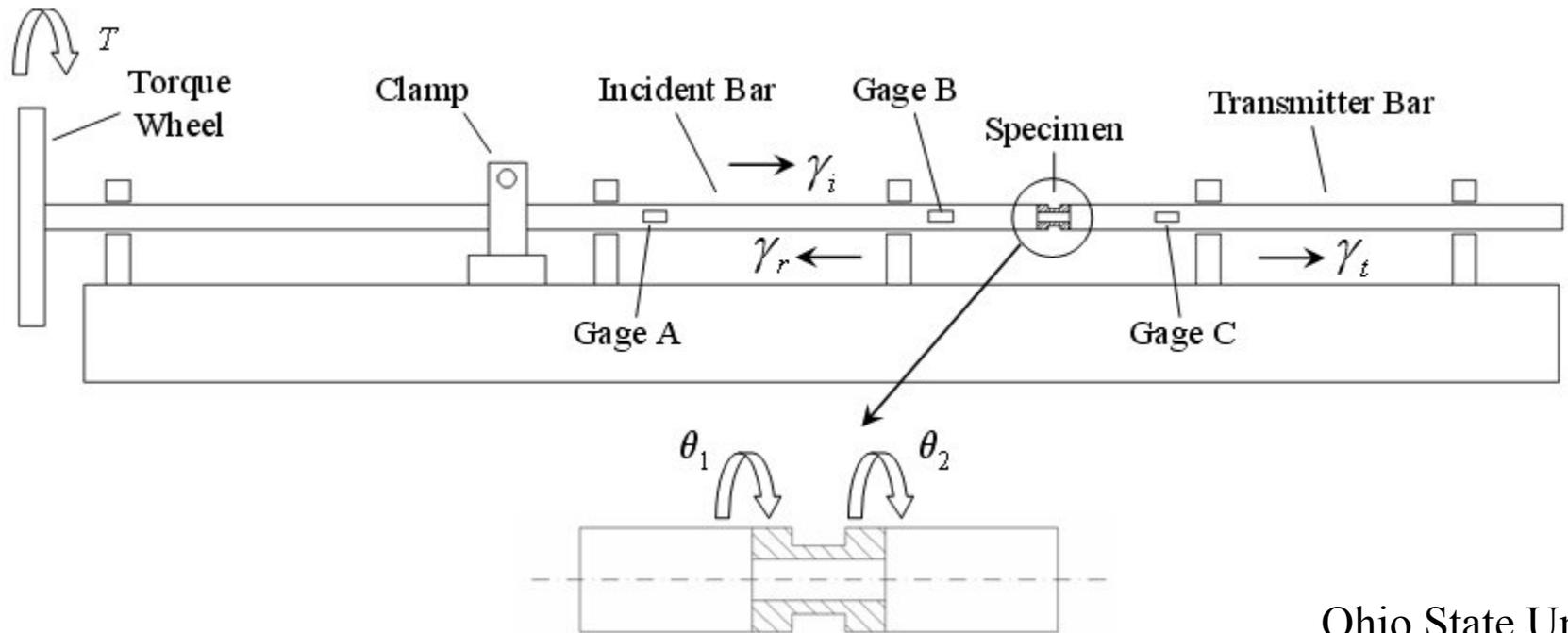
## 試験片の治具



## 入出力棒の材料定数

Stainless steel	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Velocity of bar wave $c_0$ [m/s]	Young's modulus $E$ [GPa]
SUS304	$8.0 \times 10^3$	4940	200

# ねじり型 ホプキンソン棒法 (コロスキー法)



# せん断型 ホプキンソン棒法 (クロスキー法)

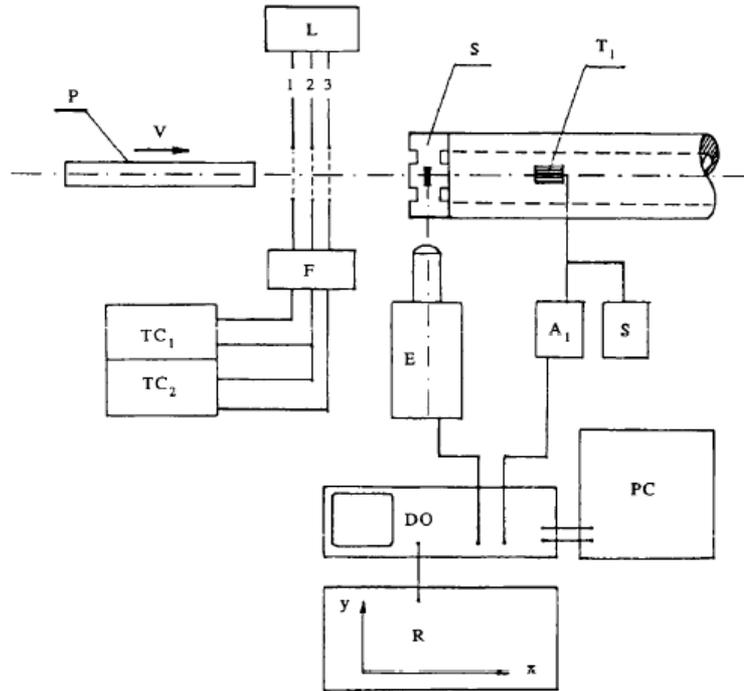
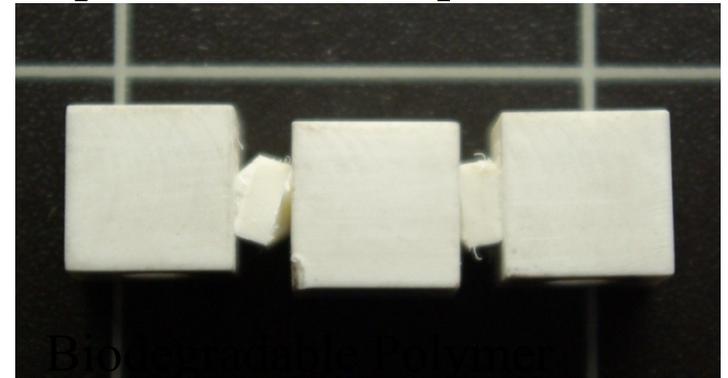


FIG. 1. New configuration of experimental setup developed in LPMM-Metz; P—projectile; S—double shear specimen; L—source of light; 1,2,3—fiber optics; F—photodiodes; TC<sub>1</sub>, TC<sub>2</sub>—time counters; E—optical extensometer; T<sub>1</sub>—strain resistance gage; S—DC supply unit; A<sub>1</sub>—amplifier; DO—digital oscilloscope; PC—microcomputer; R—XY recorder or graphic printer.

Specimen after impact



(DuPont Apexa WB100E)  
Aliphatic Aromatic Polyester

J. R. Klepaczko, AN experimental technique for shear testing at high and very high strain rates. the case of a mild steel, Irrr. J. Impucr Erlyny Vol. 15. No. I. PP. 25-39. 1994

# 衝撃三点曲げ試験法

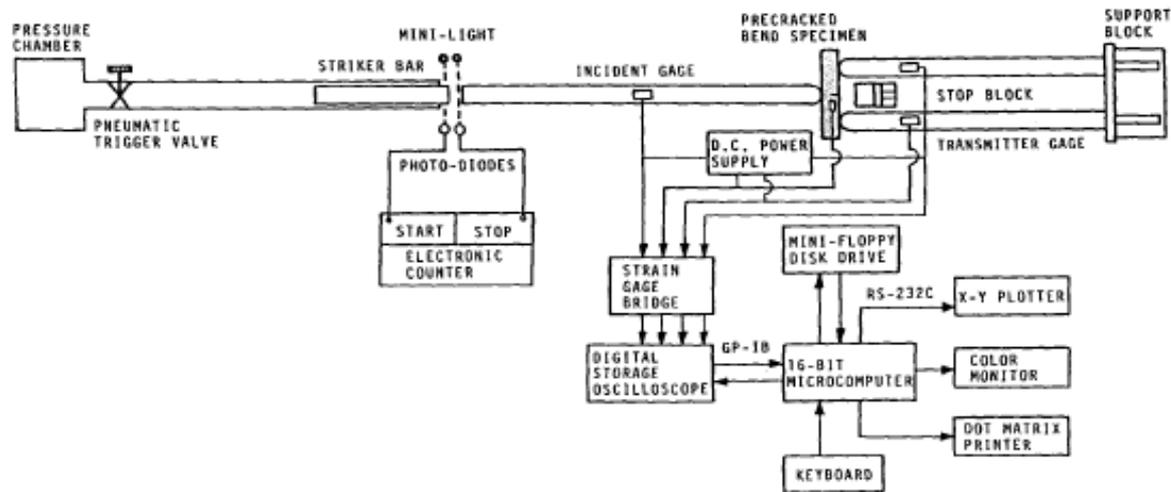


Fig. 1—Impact three-point bend test apparatus and block diagram of recording system

T. Yokoyama and K. Kishida: Experimental Mechanics, A novel impact three-point bend test method for determining dynamic fracture-initiation toughness, Vol.29, (1989), 188-194.

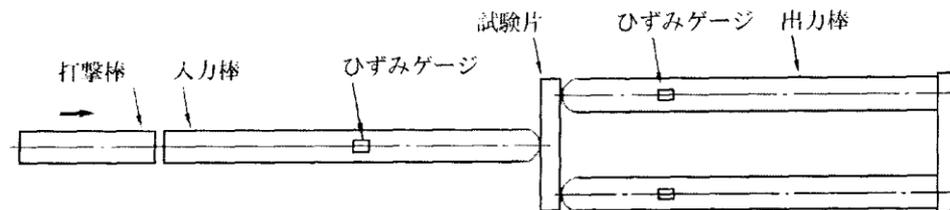


図7 SHPB型衝撃三点曲げ試験法

小川欽也, 東田文子, ランプ入射応力波を用いた衝撃三点曲げ試験, 強化プラスチック. 36-4 (1990) pp. 123-129

# スプリットホプキンソン棒法の歴史

---

ホプキンソン父:

John Hopkinson (1849 –1898)

Electrical engineer, Professor of electrical engineering at King's College London

ホプキンソン息子

Bertram Hopkinson (1874 –1918)

Professor of Mechanism and Applied Mechanics, Cambridge University



1913年11月に学会発表;

**B. Hopkinson**, “A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets,”

Philos. Trans. R. Soc. (London) A, 213, (1914) pp. 437-456.

弾性棒を測定に用いるアイデア

今のような二本の棒を使う形：

Herbert Kolsky, Professor, Brown University, USA



H. Kolsky, An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. Proc. Phys. Soc. London, B62, (1949) p.676.

1949年から50年後

Special Symposium

Kolsky Bar — Fifty years later

Organized by Prof. Klepazcko and Prof. Clifton

ASME M&M Conf. Virginia Tech. Blacksberg (VA) June 27 - June 30 (1999)

電気容量型の変位計

RM Davies, “A critical study of the Hopkinson Pressure Bar” Philos. Trans.

R. Soc. (London) A, 240, (1948)

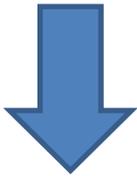
pp375-457.

## ひずみゲージを用いたホプキンソン棒法

Hauser, F. E., Simmon, J. A. and Dorn, J. E., Strain rate effects in Plastic Wave Propagation, pp.93-109; in Response of metals to high-velocity deformation, Wiley, Interscience Publishers, New York (1961)



1970年代に、ほぼ、現在の形になり、以後、精度向上のためのさまざまな工夫や応用研究



国際論文誌の発刊：

International Journal of Impact Engineering (Elsevier)

←1983 W. Johnson教授, ケンブリッジ

International Journal of Crashworthiness (Woodhead Publishing)

1996 (衝撃エネルギーの吸収性能とその関連研究)

日本でも、ほぼ同時期にホプキンソン棒法の研究がスタート

吉田進, 永田徳雄, 棒の衝突を利用した高速変形実験装置について, 金属材料研究所報告, 8-3 (1963) p. 223.

田中 吉之助, 安達 洋治, ホプキンソン棒法による動的強度, 日本航空宇宙学会誌, 21 230 (1973) pp. 126-133.

K. Tanaka, K. Ogawa, The static and dynamic compressive strength of Ti- and Ti-alloys, Conference on Mechanical behaviors of Materials, Boston (1976) pp. 1598-1602.

岸田敬三, 中川憲治, 石川勝彦, Thin wafer法の精度の検討, 材料, 28-304 (1979) p.74.

臺丸谷, 内藤, 浜田, 応力棒による動的弾塑性応力の測定, 非破壊検査, 32-12 (1986) p. 868

T.Yokoyama and K.Kishida, A Microcomputer-Based System for the High-Speed Compression Test by the Split Hopkinson Pressure Bar Technique, Journal of Testing and Evaluation, Vol.14, No.5, (1986), pp.236-242.

T. Yokoyama and K. Kishida: Journal of Testing and Evaluation, Vol.16, (1988), 198-204.

# 国内の研究会・分科会の活動状況(現在)

- (1) 日本材料学会「衝撃部門委員会」(1981年, S56年～) 会員 約90名
  - ① 委員会(研究会)を開催4回/年
  - ② S58年～ 3年に1回「衝撃問題シンポジウム」
  - ③ H14年～ 毎年東京で、「衝撃工学フォーラム(初心者のための衝撃工学入門)」
  - ④ 国際会議 International Symposium on Impact Engineeringを主催
- (2) 日本塑性加工学会「高エネルギー速度加工分科会」(昭和60年～)  
会員数約45名, 委員会開催1～2回/年  
爆発成形, 電磁成形, 液中放電成形などの衝撃的手法を用いた各種の材料加工, 創成技術の研究を対象
- (3) 日本機械学会機械材料・材料加工部門の分科会  
「材料・構造部材の動的挙動に関する研究分科会」(平成21年～24年)  
「衝撃負荷下における応力・ひずみ評価の精度向上に関する分科会」(平成25年～)  
会員数25名, 委員会開催数3回/年
- (4) 自動車技術会「構造強度部門委員会+2つの作業部会」会員数28名+作業部会31名, 委員会開催数6回/年  
自動車車体と部品の構造・衝突に関わる技術向上を目指す。  
(FRPのエネルギー吸収特性および実車への適用方法の検討など)
- (5) 日本実験力学会 「衝撃工学分科会」(主査 横山 隆 教授)  
2001年～ 会員 約 30名 年数回の分科会

# これまでの研究会

---

- (1) 日本鉄鋼協会「自動車用材料の高速変形に関する研究会」  
(平成9年～12年)会員数24名, 委員会開催数1～3回／年
- (2) 軽金属学会「アルミニウム合金の動的変形と強度研究部会」  
(平成8年～13年)会員数34名, 委員会開催数3回／年
- (3) 土木学会「構造工学委員会内: 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会」  
会員数50名(平成11年～14年), 委員会開催数2～3回／年
- (4) 土木学会「構造工学委員会内: 構造物の耐衝撃性能評価研究小委員会」  
会員数50名(平成20年～24年), 委員会開催数5～6回／年
- (5) 日本建築学会構造本委員会内・応用力学運営委員会内「地震による衝撃的破壊現象に関する小委員会」  
(平成12年～16年)会員数15名, 委員会開催数1～2回／年
- (6) 日本建築学会構造本委員会内・応用力学運営委員会内「耐衝撃性能評価小委員会」  
(平成18年～25年)会員数15名, 委員会開催数1～2回／年

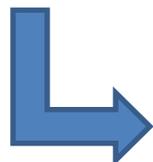
# NEDOの知的基盤創成・利用技術研究開発事業

---

NEDO

① 鉄鋼材料について

金属材料の高速変形特性評価方法の研究開発事業業務成果報告書  
(平成12年, 13年)



「高速引張試験方法ISO規格化専門委員会」

(委員長 木原諄二 日大教授) (平成17年)

日本鉄鋼連盟標準化センター



平成22年 衝撃引張り試験法の国際規格化: ISO26203-1, 26203-2  
金属材料薄板を対象とする,

弾性棒法(ワンバー法, ホプキンソン棒法)と油圧サーボ方式.

② アルミ合金について

非鉄金属の安全性確保に資するデータ整備 (平成12年)

# 国内の学術講演会

---

## 衝撃のセッションのある学術講演会

- (1) 日本材料学会
  - ① 年次大会
  - ② 材工連： 日本学術会議材料工学連合講演会
  
- (2) 日本実験力学学会
  - ① 年次大会
  - ② International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM) 毎年
  
- (3) 日本機械学会
  - ① 年次大会
  - ② 材料力学部門講演会： 材料力学カンファレンスM&M
  - ③ 機械材料・材料加工技術講演会M&P  
3年に一度 国際会議 ICM&Pを開催  
(アメリカ機械学会ASMEと共同で国際会議MSEC とジョイント国際会議)

# 海外の講演会 (1/2)

---

- (1) アメリカ実験力学会 (SEM: Society for Experimental Mechanics)  
2006年～ Technical Division on Dynamic Behavior of Materials  
部門会員 30名  
SEM Annual Meeting (毎年), 4年に一回 Internationalと名前を変え, 西海岸で
- (2) DYMAT : European association for the promotion of research into the dynamic behaviour of materials and its applications  
1985年～3年に一回国際会議  
Technical Meeting (それ以外の年)

2014年に, ホプキンソン100周年, ケンブリッジ大学 Cavendish Laboratory

Philos. Trans. に特集号

# 海外の講演会 (2/2)

---

- (3) European Society for Experimental Mechanics  
1959～ ICEM: International Conference on Experimental Mechanics  
2～3年おき
  - (4) BSSM : British Society for Strain Measurement  
International Conference on Advances in Experimental Mechanics  
2年に一回
  - (5) Asian Society of Experimental Mechanics  
Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM12)
  - (6) International Conference on Experimental Mechanics 2013 (ICEM 2013)  
東南アジアで行われている実験力学関係の学会
- 
- (7) アメリカ物理学会 (APS)  
Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter

# スプリットホプキンソン棒法についての 最近の動向

---

1. スプリットホプキンソン棒法  
(せん断試験, 曲げ試験, 円盤割裂試験)
2. スプリットホプキンソン棒法  
の応力-ひずみ線図  $+\alpha$  の情報
3. 測定対象

# ホプキンソン棒法 + $\alpha$

---

ホプキンソン棒法 (応力-ひずみ曲線) + 高速度撮影



1. ホプキンソン棒法 + 高速度撮影 + Digital image correlation (DIC)  
画像相関法



ひずみ分布

2. ホプキンソン棒法 + 温度上昇

熱電対 → 赤外線カメラ (FLIR社 5000コマ/s~)  
赤外線検知素子

InSb: インジウムアンチモン

MCT: 水銀カドミウムテルル

QWIP: 積層赤外線検知素子

3. ホプキンソン棒法 + 光センサー

フォトダイオード

# まとめ

---

1. ホプキンソンの原理, 種類, 歴史
2. 必ずしも考え方としては, 新しいが, せん断試験, 曲げ試験, 円盤割裂試験にホプキンソンを用いるに当たり, まだまだ改良点, 工夫点の余地はある.
3. 従来の圧縮試験, 引張試験においては, 特に,  
応力-ひずみ曲線+ $\alpha$  (ひずみ分布, 温度, 光)
4. 対象: 新素材, 構造(多孔質材料)  
← 高精度測定のために工夫の余地あり