

A20 野球用金属バットのスイートスポットに関する研究(野球1)

IWAHARA, Mitsuo / 渡邊, 敬人 / 藤原, 聖司 / 後藤, 裕太 / 岩原, 光男 / 長松, 昭男 / 新井, 和吉 / 寺西, 幸弘 / 長尾, 裕史 / WATANABE, Takahito / FUJIHARA, Seishi / GOTO, Yuta / NAGAMATSU, Akio / ARAI, Kazuyoshi / TERANISHI, Yukihiro / NAGAO, Hiroshi

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集

(巻 / Volume)

2006

(開始ページ / Start Page)

104

(終了ページ / End Page)

109

(発行年 / Year)

2006-11-08

A20 野球用金属バットのスイートスポットに関する研究

A research about a sweet spot of bat for baseball

○正 渡邊 敬人 (いすゞ自動車) 藤原 聖司 (法政大)
 学 後藤 裕太 (法政大) 正 岩原 光男 (法政大)
 正 長松 昭男 (法政大) 正 新井 和吉 (法政大)
 正 寺西 幸弘 (ミズノ) 正 長尾 裕史 (ミズノ)

Takahito Watanabe, ISUZU MOTORS limited, 8 Tsuchidana, Fujisawa-shi, Kanagawa

Seishi Fujihara, Hosei University, 3 Kajinotyou, Koganei-shi, Tokyo

Yuta Goto, Hosei University Mitsuo Iwahara, Hosei University

Akio Nagamatsu, Hosei University Kazuyoshi Arai, Hosei University

Yukihiro Teranishi, MIZUNO limited, 1-12-35, Minamikouhoku, Suminoe-ku, Osaka-shi, Osaka

Hiroshi Nagao, MIZUNO

Recently, baseball bats that have kinds of characters have been marketed due to advances in the materials and structure of modern baseball bats. One of remarkable point is a sweet spot in bats. But a sweet spot is sensuous and its point is laxness. So the reason why a sweet spot is approved is researched in this study. First of all, the first node, the second node and center of impact were measured. Next, the ball was made to collide with them and the repulsion coefficients were measured, and compared.

Keywords. Bat, Sweet spot, Center of impact, Modal analysis, Finite element method, Damping property

1. 概要

本研究は野球用金属バットに関する研究である。高校野球やアマチュア野球で用いられる金属バットはスポーツ用品としては主流製品といえる。野球用バットに関する研究は the American Society for Testing and Materials (ASTM) 等で進められ⁽¹⁾, 特に打撃性能に関する研究が盛んである。金属バットは打撃位置によって打撃性能が異なり, 最も反撥する部位がある。その部位はスイートスポットと呼ばれている。従来の打撃性能に関する研究の中でこのスイートスポットという言葉は度々用いられるが明確な位置と定義に関してはあまり研究されていない。本研究の目的は振動学の見地からこのスイートスポットの位置の特定と定義付けを行う事にある。

スイートスポットの同定には反撥係数を用いる。故に, 後述する衝突実験を行えば反撥係数の位置は判明する。しかし, それだけではスイートスポットの特性が不明確なままである。そのため, 金属バットにある各特異点, ここでは節, 打撃中心, 重心を特定し, それらをもとに特性を考察する。

研究の手順を以下に示す。第一に振動実験を行い, モード特性を把握する。打撃加振実験により固有振動数やモードを特定した。手や自由状態における支持条件の検討やヘッドキャップの影響に関しても打撃加振によって行っている。第二に打撃中心を特定する。特定に必要な慣性モーメントはバツ

トを実体振り子としてその周期を計測することにより得て, 打撃中心の位置を特定した。最後に特定した各特異点等に発射装置を用いて野球球をバットに衝突させその瞬間を高速ビデオカメラで撮影し反撥係数を計測する。

図1に反撥係数(COR)と衝突前後速度比の結果を示す。

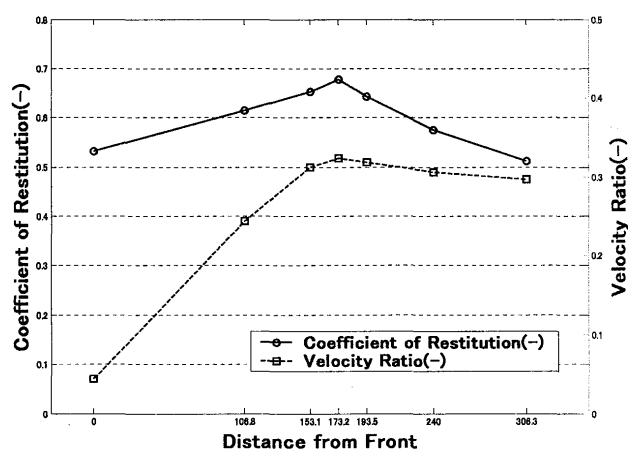


Fig. 1 COR & Velocity Ratio

2. 理論

2.1 モード解析

構造体を多自由度系で理論的に剛性と質量、減衰等で表現し、特性方程式を導出し、固有値解析を行ってモード特性を計算する手法を本論では理論モード解析とする。本研究においては各モード特性を導出する方法論に有限要素法を用いた。対して、線形構造体に振動加振を行い応答と入力との比、つまり周波数応答関数を観測し、モード特性を得る手法を実験モード解析とする⁽²⁾。振動実験はハンマによる打撃加振と加振器による加振を用いた。

2.2 打撃中心

スウィートスポットの定義は曖昧なので、本研究においては打撃時に最も反撥する部位とする。それと混同されがちだが、バットには別の意味を持つ打撃中心と呼ばれる部位がある。その定義は厳密に決まっている。この項で定義と算出式を示す。打撃時にバットは回転と並進の運動を行う。回転と並進が打ち消し合いグリップエンド端が動かない打撃部位が存在する。その打撃部位が打撃中心である。

以下に本研究で用いた算出式を示す。概要は図2を、変数は表1を参照とする。弾性体としての考察は振動現象として捕らえ、金属バットを剛体と仮定した時の運動は並進と回転の二つに分け、以下の式で表す。

並進系の運動

$$F = M_t \ddot{V}_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

回転系の運動

$$T = I_t \dot{\omega}_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の両辺を衝突部から重心間の距離 L_f で除し、(3)左辺を F とし(1)式に代入。

$$\frac{T}{L_f} = \frac{I_t}{L_f} \dot{\omega}_t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M_t \ddot{V}_t - \frac{I_t}{L_f} \dot{\omega}_t = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

打撃中心の定義から重心間の距離 L_f が重心から打撃中心の距離である時、回転運動によるグリップエンド端の速度と、重心の並進速度は正負を反転し同じ値となるため、以下の(5)式が成り立つ。

$$L_r \cdot \dot{\omega}_t - \dot{V}_t = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

そして、 $\dot{V}_t$ で(4)式をくくる。

$$\dot{V}_t \left(M_t + \frac{I_t}{L_f L_r} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式に(5)式を代入する。

$$L_f = - \frac{I_t}{M_t L_r} \quad \dots\dots\dots (7)$$

重心から打撃中心までの距離 L_f は以上の式を用いて求められる。

2.3 反撥係数

バットの弾性変形を無視し、反撥係数は以下のようにして求める。

$$e = - \frac{V_{lo} - (V_t + L_f \cdot \omega_t)}{V_{li}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

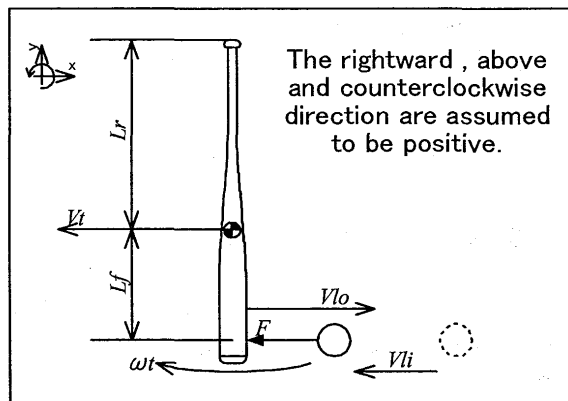


Fig. 2 Center of impact

Table. 1 Variables

F	Force by collision of ball	V_{li}	Velocity before ball collides
T	Torque around center of gravity axis of bat	V_{lo}	Velocity after ball collides
M_t	Mass of bat	ω_t	Velocity of rotation of bat
I_t	Moment of inertia of bat	L_f	Distance from center of gravity to collision part
V_t	Velocity after bat collides	L_r	Distance from center of gravity to axis edge

3. 構造解析

本研究において計算解析は実験の前段階から実験対象のモード特性等の傾向を知り、実験計画を立て易くするためと、実験結果の正当性を検討するための比較対象を作る目的のもとに行った。

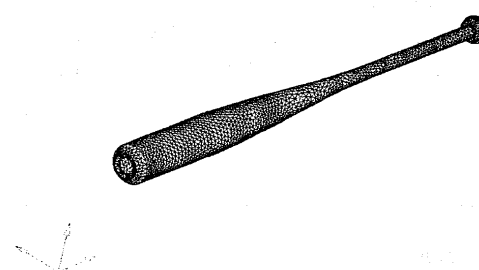
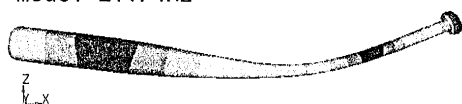


Fig. 3 Finite element model of bat

解析手法には有限要素法を用いた。バットの構造は円筒形状であるため厚みを超音波厚さ計で計測し、三次元要素を用いて図3のような有限要素モデルを作成した。

Model1 211.4Hz



Mode2 747.5Hz



Fig. 4 Mode of simulation

図 4 に計算結果の一、二次モードの形状を示す。軸対象構造であるため各モードも同一振動数付近に二つ発生する。梁の単純曲げモードと酷似している。最大振幅部はどちらも端にあり、バットの一般的な打撃部に節が集中している、等が見えた。

4. 実験

4.1 実験対象

実験対象とその他種の断面形状を図 5 に示す。

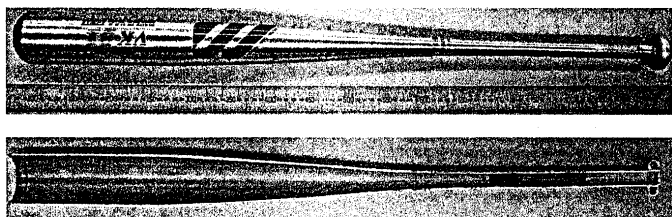


Fig. 5 A subject of experiment (mm)

金属バットは中距離打者用バットで、諸元は重量 903 g 全長 839 mm 最大径 66.6 mm 本体部の平均厚み 2.98 mm。長手方向において厚みは均一ではなく、さらに完全な円筒ではなく偏肉も見られる。部品構成は大きくヘッドキャップ、本体部、グリップエンドの 3 つであり、主な材質は本体部に用いられているアルミニウム合金 A7050 である。

図 5 下部に示す断面形状は同社製他種バットを切断したものである。この製品にはグリップ部に重量合わせを兼ねた制振材が詰められてあるが、本研究で用いられた図 5 上部のバットには制振材は含まれていない。続いて試験位置を図 6 に示す。

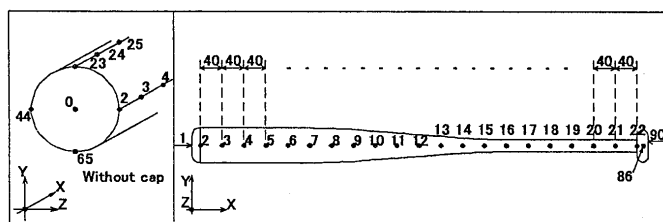


Fig. 6 Location of examination

長手方向を X、高さが Y、幅方向を Z 軸とし、原点 0 は本体先端と中心軸が交わる位置とする。ヘッドキャップ部に計測点 1、原点 0 から X 軸方向に 40 mm ずつ計測点を、グリップエンド部に計測点 90 を設定する。計測点は計 90 点となる。

4.2 振動実験

4.2.1 モード特性

計算結果より、計測点 90 (図 6) を応答点とし、計測点 2 から 89 を鉛直方向に打撃加振を行い、固有振動数を計測した。X 軸方向の応答は計測していない。なぜなら、鉛直方向に比べ応答が小さい事と、X 軸方向のモードは、打撃方向とは直交しているため影響が少ないと予測されたためである。

図 7 に 88 点の周波数応答関数の重ね合わせ線図を示す。

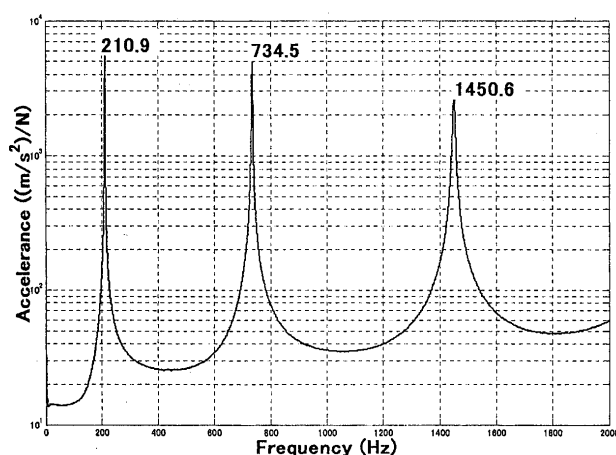


Fig. 7 Sum of FRF

一次固有振動数が 210.9 Hz、二次が 734.5 Hz である。

続いて、実験によって求められた一、二次のモード形状を図 8 に示す。

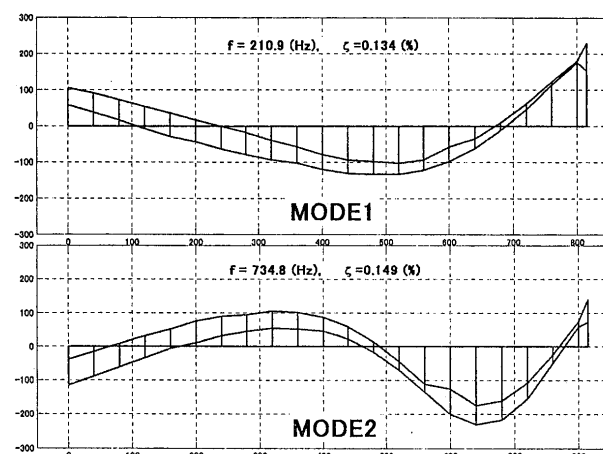


Fig. 8 First and Second mode

計算解析の結果と同様に、一次二次モード形状共に梁の曲げモードに似ている。実験対象は X 軸に対して対象構造であるため、モード形状も軸対象で存在する。

実験結果の一例として、図 9 に計測点 2, 5 の周波数応答関数 (モビリティ) による実験と計算結果の比較を示す。上図が先端部である計測点 2, 下図が先端から 120mm の位置である計測点 5 を示す。赤線が実験値, 青線が計算値である。

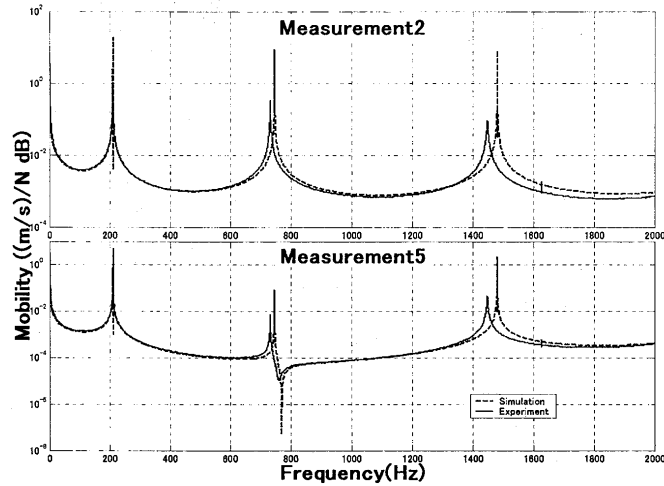


Fig. 9 FRF

表 2 には三次までの実験で求めた固有振動数と減衰比, 計算解析による固有振動数, そして実験値を基準とした計算値との偏差を示す。

Table. 2 Natural frequency

	Mode1	Mode2	Mode3
Experiment Natural frequency (Hz)	210.9	734.5	1450.6
Damping ratio (%)	0.14	0.15	0.27
Simulation Natural frequency (Hz)	211.4	747.5	1481.1
Deviation (%)	0.2	1.7	2.1

三次固有振動数までの偏差は 5% 以内であり, 実験値とかなり近似している。このことから実験値の正当性が高いことがわかる。

4.2.2 支持条件の検討

前項のモード特性の特定や以降の実験は自由支持状態において行っている。しかし, 実際は両手で支持し使用する。本項にて自由支持下における実験結果が実使用条件において有用であるか検討する。

図 10 に示すように手による支持と自由支持の二つの支持条件に対し, 2000Hz まで打撃加振を節点 2~22, 44~64, 86, 88 の計 44 点に行う。

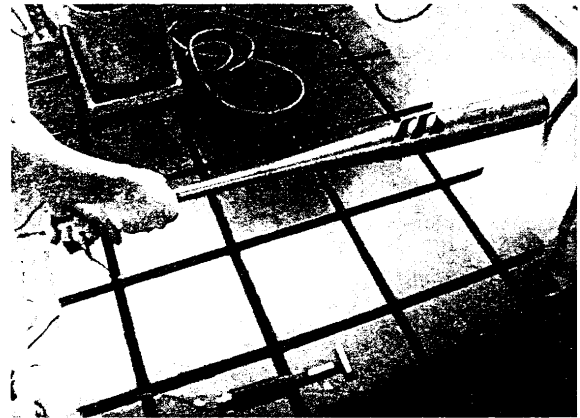


Fig. 10 Support of the hand

図 11 に周波数応答関数重ね合わせの比較線図を示す。赤線が手支持, 青線が自由支持である。

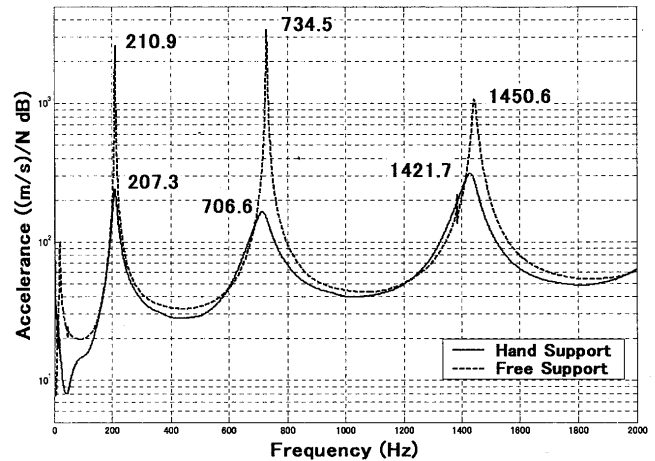


Fig. 11 Hand Support

一, 二次のアクセラランスの値は 10 倍以上自由支持の方が高いが, 2000Hz 以下の固有振動数の偏差は最大でも二次の約 3.8% である。固有振動数の値に大きな差が無いことはモード形状にも大きな差は無いことを示す。打撃中心に関してもアルミニウム合金と手の剛性には大きな差があるため, 手支持による影響は少ないとする。

4.2.3 ヘッドキャップの検討

金属バット先端部にはヘッドキャップが付いている。高校野球において, 高 Hz の打球音がキャッチャーの難聴の原因として挙げられ, その対策としてヘッドキャップは用いられるようになった。故に, ヘッドキャップは振動特性に影響を与える可能性があるため, 本項においてその影響に関する検討を行う。

ヘッドキャップの使用素材はウレタン樹脂で, 剛性値は約 3(GPa), 重量は約 32(g)。取り付け方法は接着剤等を用いず, はめ込んである。

前項 4.2.1 と同じ条件で、今度は 10kHz まで打撃試験を行った。図 12 に周波数応答関数重ね合わせの結果を示す。赤線がヘッドキャップ無し、青線がヘッドキャップ有りである。

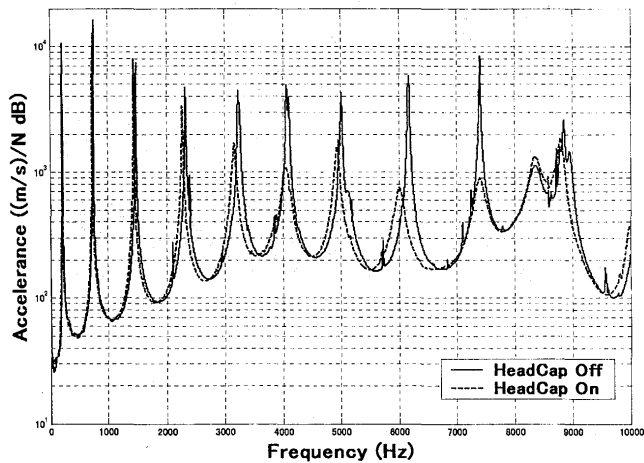


Fig. 12 HeadCap

図 12 に示されるように、固有振動数の偏差が小さい。キャップ有り基準偏差の最大値は 6kHz 付近の -2.86% であり、キャップの有無は固有振動数には、ほぼ影響を及ぼさないとと言える。対して 3k ~ 8k Hz の減衰比は明らかに違い、6k Hz 付近の減衰比はおおよそ 10 倍違う。以上のことから、ヘッドキャップは高 Hz 打球音を減音する効果はあるものの、固有振動数や、打撃性能に関して重要と思われる低次曲げモードの減衰比には影響しないことがわかる。故に、バットの打撃性能に関して、ヘッドキャップの有無は考慮しない。

4.2.4 節位置特定

一次と二次の固有振動数を特定した後に、金属バットの節の位置を特定するために加振器を用いて実験を行った。図 13 に示すようバットを水平に支持し、PC を用いて信号を作成した後、動電式加振器を用いて計測点 90 に各固有振動数で Y 方向にサイン加振をして故意に共振を起こす。

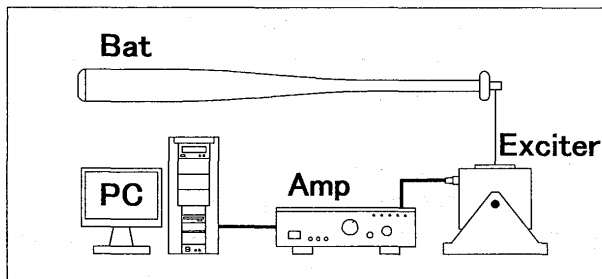


Fig. 13 Experiment of exciter

故意に起こした特定の固有振動数での共振状態では、その固有振動数のモード形状でバットは振動する。その状態で粉末を散布すると振幅部の粉末が流れ落ち、各モードの節部のみ粉末が残る。

粉末を散布し、節上に粉末が残った模様を図 14 に示す。以上のように一、二次モードの打撃部にある節の位置を特定した。原点から各節の X 方向の距離を表 4 に示す。



Fig. 14 Picture of node

4.3 振り子実験

打撃中心の位置を特定するために必要な物性値である重心軸周りの慣性モーメント(MOI)は本研究においては正確な体積データが得られないため、この振り子実験を行い、振り子振動数を計測した後に算出する。

まず、点でバットを支持し重心位置を特定する。後に図 15 のようにグリップ部でバットを吊り下げバットを実体振り子とし見立てる。その振り子運動の周期をレーザー変位計を用いて求め回転軸周りの慣性モーメントを計測し、平行軸の定理を用いて重心周りの慣性モーメントを求める。⁽³⁾

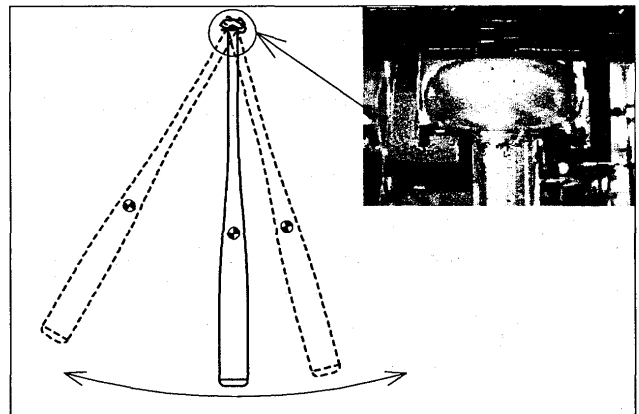


Fig. 15 Pendulum motion

以上、求めた振り子の周期と重心軸周りの慣性モーメントを表 3 に、重心及び打撃中心の先端からの位置を表 4 に示す。

Table. 3 Term and MOI

Term (sec)	Moment of inertia ($\times 10^{-6} \text{kgm}^2$)
1.576	53402.388

4.4 衝突実験

上記実験結果を基に特定した一次、二次モードの節、打撃中心、重心位置と、参考値のために計測点 8、先端部である計測点 2、そして一次節と打撃中心の間に時速 40km を目安に硬式野球用ボールを衝突させる。

バットはX軸を縦に取り自由支持し、野球球は蓄圧器を用いた発射装置を使用しバットに衝突させる。原理は二酸化炭素を蓄圧器に 1.4Mpa を目安に充填し、圧縮空気を発射管に流し込む。野球球を発射管内に装填し流れ込む圧縮空気によって射出しバットに衝突させる。高速度ビデオカメラで衝突の瞬間を 4500fps で撮影し、画像解析を行い、ボールの衝突前速度、衝突後速度、バットの重心の速度、バットの角速度を計測する。以上の概要図を図 16 に示す。

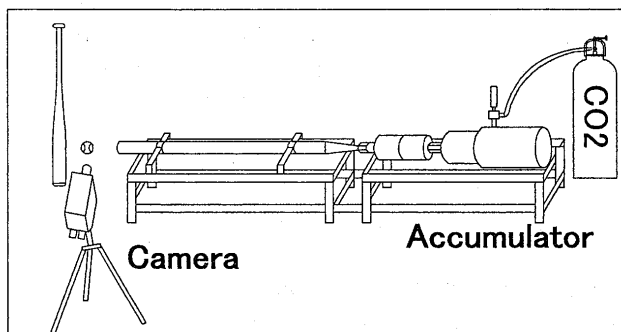


Fig. 16 Experiment of impact

図 17 に高速ビデオカメラを用いて撮影された衝突直後の写真を示す。

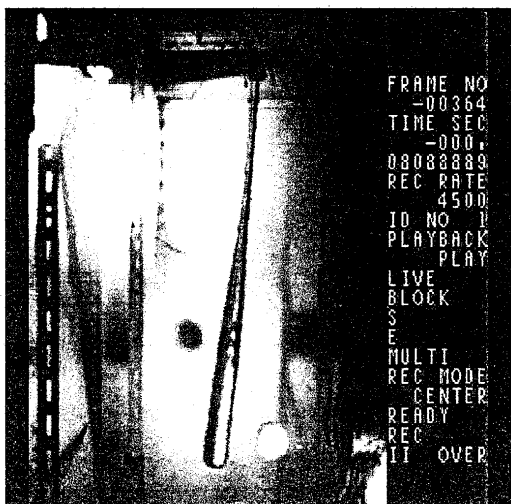


Fig. 17 Picture of impact

金属バットの先端部に野球球を衝突させた模様である。静止画では解かり難いが衝突直後のバットの振動の形状は一次の振動モード形状である事が確認できる。

表 4 に反撥係数、ボールの衝突前後の速度比を示す。

Table. 4 Position and Coefficients

	XaxDistance from origin(mm)	Coefficient of rebound(-)	Velocity ratio(Vlo/Vli)
Mesurment 2	0	0.533	0.044
Node of mode1	153.1	0.654	0.312
Node of mode2	106.8	0.616	0.244
Center of impact	193.5	0.644	0.318
Mesurment 8	240	0.576	0.306
Center of gravity	306.3	0.513	0.297
Between Node1 and COI	173.2	0.678	0.324

5. 結言

各振動実験によって、支持条件やヘッドキャップの影響を考慮した上で、各モード特性を特定することが出来た。

これらの値は、有限要素法を用いた計算結果と照らし合わせても正当性の高いものであり、これは同時に精度の高い有限要素モデルの作成に成功した事になる。以降に続く構造最適化の研究の足がかりとなった。一、二次のモードに関しては節の位置の特定にも成功している。

振り子実験によって重心まわりの慣性モーメントと打撃中心の位置を特定できた。

衝突実験によって各特異点等の反撥係数と衝突前後速度比を特定出来た。各特異点において反撥係数を比較すると一次モードの節と打撃中心での値が際立って高く、その上でその間の反撥係数を確認した。ただし、この結果は本研究に用いたバット特有の結果である事是否定しきれず、衝突前後の野球球とバットの運動が、両者の振動や速度のどのように割り振られたかを定量化し、比較検討する必要があるが、本研究においては断念している。

しかしながら、今回行った一連の実験により高反撥部位の位置と特異点との関係性の特定に成功した事で、本研究においては、スウィートスポットは一次の節と打撃中心の間であると結論付ける。

文 献

- (1) Lloyd V. Smith and John T. Axtell, : Journal of Testing and Evaluation, Vol. 3 1, No. 3, 2003.
- (2) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，1998
- (3) 青木弘，長松昭男：新編工業力学，養賢堂，1979.
- (4) Robert K. Adair, 中村和幸：ベースボールの物理学，紀伊国屋書店，1996